

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΩΝ
ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ
ΒΑΡΕΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ
NA49/SPS ΚΑΙ ALICE/LHC.

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Η. ΧΡΙΣΤΑΚΟΓΛΟΥ

2 Μαρτίου 2007

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για τη διατριβή αυτή έγινε μια προσπάθεια να καλυφθούν και να συγκεραστούν δυο διαφορετικά αλλά συσχετισμένα θέματα: η ανάλυση πειραματικών δεδομένων που καταγράφησαν από το πείραμα *NA49*, μέλος της παλιάς γενιάς πειραμάτων του *SPS* και προσομοιώσεων που παράχθηκαν στο πείραμα *ALICE*, της καινούριας γενιάς πειραμάτων του *LHC*, αλλά και η ανάπτυξη λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί από τα μέλη του πειράματος *ALICE*.

Τα δυο πρώτα κεφάλαια αυτού του βιβλίου αφιερώθηκαν στη θεωρητική θεμελίωση των αλληλεπιδράσεων βαρέων ιόντων σε υψηλές ενέργειες. Ο στόχος αυτών των μελετών είναι η ανακάλυψη και διερεύνηση της νέας φάσης της ύλης που αποτελείται από ελεύθερα quarks και gluons. Επίσης, στα κεφάλαια αυτά παρουσιάστηκαν εν συντομία τα κύρια πειραματικά αποτελέσματα τόσο από το *SPS*, όσο και από το *RHIC*. Πιο ειδικά, το κεφάλαιο 2 ήταν αφιερωμένο στην παρουσίαση των κυριότερων και πιο σημαντικών πειραματικών συμπερασμάτων στο ενδιαφέρον και απαιτητικό πεδίο της φυσικής *Event by Event*. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού γίνεται η πρώτη προσπάθεια εισαγωγής του κύριου κομματιού αυτής της διατριβής, που είναι η μελέτη της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου *Balance Function*.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται η προσπάθεια να θεμελιωθεί θεωρητικά η μέθοδος αυτή και να παρουσιαστούν οι κύριες ιδιότητές της. Το κίνητρο για τη μελέτη της *Balance Function* προέρχεται από την πρόβλεψη ότι το εύρος της κατανομής της σχετίζεται με το χρόνο αδρονοποίησης του συστήματος που προκύπτει μετά από μια αλληλεπίδραση. Η μέθοδος είναι βασισμένη στο γεγονός ότι σωματίδια δημιουργούνται στο ίδιο σημείο του χώρου και του χρόνου σε ζεύγη με αντίθετο φορτίο. Η αρχική συσχέτιση που έχουν αποκτήσει τα σωματίδια αυτά μπορεί να διαταραχτεί από τις αλληλεπιδράσεις τους με το υπόλοιπο σύστημα.

Στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται μια λεπτομερής περιγραφή της πειραματικής διάταξης του *NA49*. Οι κύριοι ανιχνευτές του πειράματος, που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των δεδομένων που αναλύθηκαν, είναι 4 ανιχνευτές προβολής χρόνου *Time Projection Chambers - TPC*, ικανοί να καταγράφουν περίπου το 80% των παραγόμενων σωματιδίων σε μια κεντρική αλληλεπίδραση *Pb + Pb*. Στο κεφάλαιο αυτό δε, πειγράφονται οι αποδόσεις και οι διακριτικές ικανότητες των ανιχνευτών του πειράματος.

Στο κεφάλαιο 5 εξετάζονται για πρώτη φορά τα πειραματικά δεδομένα, με το να οριστούν τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούν τόσο τα γεγονότα, όσο

και οι τροχιές, ώστε να γίνουν αποδεκτές στην ανάλυση. Τα κριτήρια αυτά εφαρμόζονται ώστε να απομονωθούν εκείνα τα στοιχεία που δημιουργούν το υπόβαθρο στη μέτρησή μας με τελικό σκοπό την ανάδειξη του σήματος. Επίσης, ορίζεται τόσο ο φασικός χώρος, όσο και το φίλτρο αποδοχής του πειράματος NA49. Τέλος, σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχουν πίνακες που περιγράφουν την στατιστική και τα χαρακτηριστικά των γεγονότων που αναλύθηκαν.

Στο επόμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 6) παρουσιάζονται τα κύρια πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης συσχετισμών φορτίου για μη ταυτοποιημένα σωματίδια. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αποτελέσματα από ανάλυση δεδομένων $A + A$ συγκρούσεων σε ενέργειες 40A και 158A GeV σε δυο διαφορετικά διαστήματα της ψευδοωκύτητας: την κεντρική περιοχή όπου παρατηρείται μια μείωση του εύρους των κατανομών της **Balance Function** καθώς η κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων αυξάνεται και την εμπρόσθια περιοχή, όπου το φαινόμενο αυτό απουσιάζει. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να είναι μια ένδειξη της ύπαρξης καθυστερημένης φάσης αδρονοποίησης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται επίσης αποτελέσματα από τη μελέτη της **Balance Function** σε όλο το διαθέσιμο ενεργειακό φάσμα του *SPS*. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης δίνει μια πρώτη ένδειξη εξάρτησης της κανονικοποιημένης παραμέτρου W που χρησιμοποιήθηκε από την ενέργεια. Τα πειραματικά δεδομένα δεν μπορούν να περιγραφούν από τα αδρονικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ως σύγκριση.

Το κεφάλαιο 7 είναι αφιερωμένο στην περιγραφή των αποτελεσμάτων των συσχετισμών ταυτοποιημένων φορτίων. Ειδικά, μελετήθηκαν οι συσχετισμοί στην ωκύτητα και στην αναλλοίωτη ορμή ζευγών πιονίων και καονίων σε αλληλεπιδράσεις $A + A$ σε ενέργεια 158A GeV. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι υπάρχει μια εξάρτηση από την κεντρικότητα του εύρους της **Balance Function** για τα ζεύγη πιονίων αλλά όχι για αυτά των καονίων. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, της μελέτης των μη ταυτοποιημένων σωματιδίων, έτσι και εδώ η εξάρτηση αυτή παρατηρείται μόνο στην κεντρική περιοχή της ωκύτητας και όχι στην εμπρόσθια.

Σε μια προσπάθεια ερμηνείας των πειραματικών μας αποτελεσμάτων, μελετήθηκαν τόσο αδρονικά όσο και θερμικά μοντέλα. Στο κεφάλαιο 8, περιγράφεται η φυσική βάση κάθε μοντέλου και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυσή του. Το κεντρικό συμπέρασμα είναι ότι μοντέλα όπως το **AMPT** που περιγράφουν την εξέλιξη των παρτονίων πριν την αδρονοποίησή τους, μπορούν να περιγράψουν τα πειραματικά δεδομένα, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί ως απόδειξη της συσχέτισης του εύρους της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου με το χρόνο αδρονοποίησης. Στη βάση της ερμηνείας των πειραματικών δεδομένων, εξετάστηκε επίσης η συνεισφορά των προϊόντων συν-

τονισμών στη μείωση του εύρους της **Balance Function** : η μελέτη ανέδειξε ότι η συνεισφορά είναι της τάξης του 4%.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής επικεντρωνόμαστε στο (κοντινό) μέλλον της φυσικής βαρέων ιόντων με την περιγραφή του πειράματος **ALICE**. Λόγω του ότι το βιβλίο αυτό γραφόταν λίγο πριν την έναρξη λειτουργίας του νέου επιταχυντικού συστήματος **LHC**, οι ανιχνευτές που απαρτίζουν το πείραμα **ALICE** περιγράφονται με λεπτομέρεια στη βάση της απόδοσής τους ως προς την ανίχνευση τροχιών και την ταυτοποίηση σωματιδίων (μεταξύ πολλών άλλων) χρησιμοποιώντας **Monte Carlo** προσομοιώσεις. Το κεφάλαιο 9 περιγράφει τα πιο πάνω.

Τα κεφάλαια 10 και 11, καλύπτουν την πλευρά του λογισμικού του πειράματος **ALICE**. Στο πρώτο από αυτά περιγράφεται η πολυπλοκότητα αλλά και η χρησιμότητα του **GRID** μαζί με το πολύ σημαντικό του ρόλο στην ανακατασκευή δεδομένων αλλά ακόμα και στην ανάλυσή τους. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 11 περιγράφεται με λεπτομέρεια η κύρια συνεισφορά στο λογισμικό και στο πακέτο ανάλυσης του πειράματος: η ανάπτυξη του πακέτου **Event Tag System**. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε σε πολλές **Physics Data Challenges** αποδεικνύοντας τόσο τη χρησιμότητά του, όσο και την αξιοπιστία και αποδοτικότητά του. Θα χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα δε και κατά την ανάλυση πειραματικών δεδομένων μειώνοντας αισθητά το χρόνο ανάλυσής τους. Το λογισμικό αυτό έχει αξιολογηθεί και εξεταστεί σε όλες τις δυνατές συνθήκες ανάλυσης: τοπική ανάλυση, ανάλυση με τη βοήθεια του συστήματος **PROOF** αλλά και ανάλυση στο **GRID**.

Τέλος, στο κεφάλαιο 12 περιγράφονται οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν ώστε να επεκταθεί η μέθοδος της **Balance Function** στις πολύ υψηλές ενέργειες του **LHC**. Για το σκοπό αυτό ο κώδικας έπρεπε να βελτιστοποιηθεί για να ανταπεξέλθει στις πολύ μεγάλες πολλαπλότητες παραγόμενων σωματιδίων που αναμένονται σε αυτές τις ενέργειες. Στις μελέτες που παρουσιάζονται και αφορούν προσομοιώσεις του πειράματος, έχουν χρησιμοποιηθεί όλα τα συστατικά που περιγράφονται στα κεφάλαια 9, 10 και 11.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πολλοί είναι αυτοί που βοήθησαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας. Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επίκ. Καθηγήτρια κ. Μαρία Βασιλείου και τον Αν. Καθηγητή κ. Άγγελο Πετρίδη για την συμπαράσταση και την καθοδήγησή τους. Υπήρξαν από τα πιο σημαντικά στηρίγματα σε όλη τη διάρκεια της μέχρι τώρα πορείας μου, βοηθώντας, εκτός όλων των άλλων επιστημονικών λόγων, στο να μένω συγκεντρωμένος στον στόχο παρά τους όποιους εξωτερικούς παράγοντες. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αν. Καθηγήτρια Μ. Στασσινάκη για τη στήριξη και τις συμβουλές της.

Πολύτιμη υπήρξε η βοήθεια των Καθηγητών κυρίων P. Seyboth και R. Stock οι οποίοι έδωσαν μεγάλη ώθηση σε όλα τα στάδια της ερευνητικής μου δραστηριότητας. Μεγάλη υπήρξε και η συμβολή των M. Gaździcki και C. Blume των οποίων οι ιδέες υπήρξαν πηγή έμπνευσης.

Η παρουσία μου σε ένα περιβάλλον όπως το *CERN* για πάνω από 3.5 χρόνια, μου έδωσε τη δυνατότητα να συναναστραφώ, να γνωρίσω και να συνεργαστώ με πολλούς αξιόλογους επιστήμονες. Μεγάλη η συνεισφορά τόσο του Peter Hristov όσο και του Federico Carminati, εκ των πρωτεργατών της offline ομάδας του *ALICE*, που μου εμπιστεύτηκαν τόσο σημαντικές αρμοδιότητες. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους Yves Schutz και Karel Safarik που πίστεψαν στο πρόσωπό μου δίνοντάς μου τη δυνατότητα να αναπτύξω και να αναδείξω την εργασία μου. Ένα ακόμα πρόσωπο που έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην παραμονή μου στο *CERN*, είναι ο Tapan Nayak, υπεύθυνος του προγράμματος *Event by Event* του πειράματος. Οι συμβουλές του, η καθοδήγησή του αλλά και η μεταξύ μας συνεργασία (όπως επίσης και ο καθημερινός μας καφές) υπήρξαν καθοριστικές. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω του υπεύθυνους του physics working group Christian Kuhn και Luciano Ramello για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν.

Ευχαριστώ από την καρδιά μου τους γονείς μου και την αδερφή μου για όλα. Ευχαριστώ τη Δήμητρα τόσο για αυτό που έκανε όσο και για το ότι με ανέχτηκε στις δύσκολες περιόδους τόσο κατά την ανάλυση όσο και κατά τη συγγραφή.

Στη Δήμητρα

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΓΕΝΙΚΑ	1
1.1.1	Περιγραφή πειραματικών εξελίξεων	2
1.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ	4
1.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	7
1.3.1	Θερμοδυναμικές παράμετροι	8
1.3.2	Μελέτη συσχετισμών Bose-Einstein	11
1.3.3	Συλλογική συμπεριφορά - Ροή	13
1.3.4	Περιοχή υψηλού P_T	14
1.4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ QUARK GLUON PLASMA	15
2	ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΚΤΜΑΝΣΕΩΝ ΣΕ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΙΟΝΤΩΝ	21
2.1	ΔΙΑΚΤΜΑΝΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΟΡΜΗΣ P_T	23
2.2	ΔΙΑΚΤΜΑΝΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΟΤΗΤΑΣ	25
2.3	ΔΙΑΚΤΜΑΝΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ K/π	26
2.4	ΔΙΑΚΤΜΑΝΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	30
3	ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ - BALANCE FUNCTION	37
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	37
3.1.1	Ορισμοί	38
3.2	ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	44
3.2.1	Εξάρτηση από τη σωματιδιακή πολυπλοκότητα	45
3.2.2	Εξάρτηση από το καθαρό φορτίο	46
3.2.3	Εξάρτηση από το εύρος της κατανομής των σωματιδίων	47
3.2.4	Εξάρτηση από το ποσοστό απώλειας τροχιών	48

3.2.5	Εξάρτηση από το αναλυόμενο διάστημα	48
3.2.6	Εξάρτηση από τον αριθμό των συσχετισμένων σωματιδίων	49
3.3	ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΜΕΣΩ ΕΝΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ . .	50
4	ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ <i>N</i> A49	56
4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ <i>SPS</i>	57
4.2	ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΟΥ <i>N</i> A49	59
4.3	ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ <i>N</i> A49	61
4.3.1	Οι ανιχνευτές TPC	63
4.3.2	Οι ανιχνευτές TIME OF FLIGHT	64
4.4	ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ Pb + Pb . .	64
4.4.1	Καθορισμός της παραμέτρου χρούσης b	67
4.4.2	Καθορισμός της παραμέτρου N_{spec}	69
4.5	ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	70
4.6	ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΕΣ	74
4.6.1	Διακριτική ικανότητα στην ορμή	74
4.6.2	Διακριτική ικανότητα στη μέτρηση του σημείου πρω- τεύουσας αλληλεπίδρασης	74
4.6.3	Διακριτική ικανότητα διαχωρισμού δυο τροχιών	76
4.6.4	Απόδοση ανακατασκευής τροχιών	76
5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	79
5.1	ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ	79
5.2	ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΡΟΧΙΩΝ	84
5.2.1	Ταυτοποίηση σωματιδίων	87
5.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ ΑΠΟΔΟΧΗΣ	89
5.4	ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΑΣΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ	91
6	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΓΙΑ ΜΗ ΤΑΥΤΟ- ΠΟΙΗΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	97
6.1	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ $A+A$ ΣΕ ΕΝΕΡΓΕΙΑ $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	97
6.1.1	Εξάρτηση από το αλληλεπιδρόν σύστημα και την κεντρι- κότητα	98
6.1.2	Μελέτη συστηματικών σφαλμάτων	101
6.1.3	Αποτελέσματα	104
6.1.4	Εξάρτηση από την περιοχή της ψευδοωκύτητας	107
6.2	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ $A+A$ ΣΕ ΕΝΕΡΓΕΙΑ $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$	109

6.2.1	Εξάρτηση από το αλληλεπιδρόν σύστημα και την κεντρικότητα	110
6.2.2	Εξάρτηση από την περιοχή της ψευδοωκύτητας	112
6.3	ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	114
6.3.1	Εξάρτηση από την περιοχή της ψευδοωκύτητας	116
7	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΓΙΑ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	125
7.1	ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΩΚΥΤΗΤΑ	128
7.1.1	Εξάρτηση από την περιοχή της ωκύτητας	134
7.2	ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΛΟΙΩΤΗ ΟΡΜΗ	138
8	ΜΕΛΕΤΗ ΑΔΡΟΝΙΚΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ	147
8.1	Heavy Ion Jet Interaction Generator - HIJING	148
8.1.1	Μελέτη της συνεισφοράς των συντονισμών στην Balance Function	150
8.2	Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics - UrQMD	153
8.3	A Multi-Phase Transport model - AMPT	154
8.3.1	ΜΕΛΕΤΗ ΜΗ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	158
8.3.2	ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	160
8.4	THERMal heavy-IoN generATOR - THERMINATOR	162
8.4.1	Συνεισφορά της εγκάρσιας ροής στην Balance Function	164
8.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	166
9	ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ <i>ALICE</i>	169
9.1	ΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΡΟΧΙΩΝ - <i>ITS</i>	171
9.2	Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΠΡΟΒΟΛΗΣ ΧΡΟΝΟΥ - <i>TPC</i>	173
9.3	Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ - <i>TRD</i>	177
9.4	Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΠΤΗΣΗΣ - <i>TOF</i>	179
9.5	ΟΙ ΥΠΟΛΟΙΠΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΤΟΥ <i>ALICE</i>	180
9.5.1	Ο ανιχνευτής <i>HMPID</i>	181
9.5.2	Ο ανιχνευτής <i>PHOS</i>	181
9.5.3	Ο ανιχνευτής <i>EMCAL</i>	182
9.5.4	Ο ανιχνευτής <i>PMD</i>	183
9.5.5	Ο ανιχνευτής <i>FMD</i>	183
9.5.6	Ο ανιχνευτής <i>ZDC</i>	183

9.5.7	Ο ανιχνευτής <i>MUON</i>	184
9.5.8	Ο ανιχνευτής <i>V0</i>	186
9.5.9	Ο ανιχνευτής <i>T0</i>	186
9.6	ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ <i>ALICE</i>	187
9.6.1	Ταυτοποίηση σωματιδίων με τον <i>TPC</i>	187
9.6.2	Ταυτοποίηση σωματιδίων με τον <i>TOF</i>	188
9.6.3	Συνδιασμένη ταυτοποίηση σωματιδίων	189
10	ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ <i>ALICE</i> ΚΑΙ ΤΟ <i>GRID</i>	192
10.1	ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ	193
10.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΤΟΥ <i>ALICE</i>	197
11	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΕΠΙΛΟΓΗΣ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ Event Tag System ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ <i>ALICE</i>	201
11.1	ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΟΓΟΥ ΑΡΧΕΙΩΝ (FILE CATALOG)	202
11.1.1	Metadata σε επίπεδο αρχείων (file metadata)	204
11.2	ΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΟ <i>ALICE</i>	205
11.2.1	Δομή του Event Tag System	207
11.2.2	Δημιουργία των αρχείων	209
11.2.3	Ανάλυση με τη βοήθεια του Event Tag System	211
12	Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ <i>ALICE</i>	214
12.1	ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ $p + p$	214
12.1.1	ΜΗ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΡΟΧΙΕΣ	218
12.1.2	ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΡΟΧΙΕΣ	223
12.2	ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ $Pb + Pb$	226
13	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	230
A'	ΔΟΜΗ ΤΟΥ Event Tag System	234
B	Curriculum Vitae	241
B.1	Personal Details	241
B.2	Education	241
B.3	Research Experience	242
B.4	Publications and Preprints	244
B.5	Conferences	248

B.6	Internal Notes	249
B.7	Teaching Experience	250
B.8	Language Knowledge - Computer Skills	250

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Πριν περίπου τρεις δεκαετίες η μελέτη των βαθιών ανελαστικών σχεδιάσεων λεπτονίου - νουκλεονίου ανέδειξαν την εσωτερική δομή του νουκλεονίου. Κάθε νουκλεόνιο βρέθηκε ότι απαρτίζεται από τρία σημειακά σωματίδια, τα ονομαζόμενα παρτόνια (πρότυπο παρτονίων - parton model).

Η θεωρία βαθμίδος των ισχυρών αλληλεπιδράσεων, που είναι η Κβαντική Χρωμοδυναμική (QCD), ταυτοποίησε τα παρτόνια με τα quarks και anti - quarks, τα οποία είχαν προταθεί από τους Gell Mann - Zweig στο στατικό πρότυπο των quarks .

Σύμφωνα με την Κβαντική Χρωμοδυναμική, πηγή της αλληλεπίδρασης είναι το φορτίο χρώματος και φορέας της τα gluons . Η αλληλεπίδραση μεταξύ quarks και gluons παρουσιάζουν δυο χαρακτηριστικά:

- Την ασυμπτωτική ελευθερία (asymptotic freedom), όπου σε καταστάσεις υψηλής ενεργειακής πυκνότητας ή ισοδύναμα σε αποστάσεις μικρής κλίμακας ($\ll 1 fm$), η ισχύς της αλληλεπίδρασης είναι μικρή.
- Τη δέσμευση χρώματος (color confinement), όπου σε καταστάσεις χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας ή ισοδύναμα σε αποστάσεις της τάξης του $1 fm$, η ισχύς της αλληλεπίδρασης είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα τα quarks και τα gluons να σχηματίζουν δέσμιες καταστάσεις χωρίς χρώμα (αδρόνια).

Η μελέτη της QCD σε μη μηδενική θερμοκρασία ή πυκνότητα, υποδεικνύει ότι σε συνθήκες υψηλής ενεργειακής πυκνότητας η αδρονική ύλη μεταβαίνει σε

μια νέα φάση όπου τα **quarks** και **gluons** δεν αποτελούν πλέον διακριτές δέσμιες καταστάσεις αλλά είναι αποδεσμευμένα και συμπεριφέρονται ως ελεύθερα σωματίδια [1, 2, 3, 4, 5]. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από φαινομενολογικές περιγραφές της συμπεριφοράς της αδρονικής ύλης σε υψηλές θερμοκρασίες ή πυκνότητες [6, 7, 8, 9]. Αυτή η νέα κατάσταση της ύλης ονομάζεται **Quark Gluon Plasma - QGP**.

Η μελέτη των εξισώσεων της QCD σε διακριτοποιημένο χώρο και χρόνο (lattice QCD), δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των κρίσιμων συνθηκών για τη μετάβαση [10, 11, 12]. Εκτιμάται ότι η τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας είναι της τάξης των $150 - 200 \text{ MeV}$, για περιβάλλον χαμηλής βαρυονικής πυκνότητας, τιμή η οποία συνεπάγεται συνθήκες ενεργειακής πυκνότητας περίπου $1 - 3 \text{ GeV}/\text{fm}^3$. Τέτοια κρίσιμη τιμή ενεργειακής πυκνότητας μπορεί να επιτευχθεί αντίστοιχα σε περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας αλλά με υψηλή πυκνότητα σωματιδίων της τάξης των $10\rho_0$, όπου $\rho_0 \approx 0.14 \text{ νουκλεόνια}/\text{fm}^3 \approx 0.13 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ η πυκνότητα της πυρηνικής ύλης.

Έλλη σε φάση πλάσματος **quark - gluon** εικάζεται ότι υπήρξε κατά τα πρώτα στάδια της εξέλιξης του σύμπαντος και μέχρι ένα χρόνο της τάξης των $10 \mu\text{sec}$ μετά τη Μεγάλη Έκρηξη, όταν η θερμοκρασία που επικρατούσε ήταν ανώτερη της κρίσιμης τιμής των 200 MeV που αντιστοιχεί σε $2.3 \cdot 10^{12} \text{ K}$ (η σημερινή θερμοκρασία του σύμπαντος είναι 2.7 K). Αντίθετα, πλάσμα **quark-gluon** το οποίο παράγεται όχι λόγω των συνθηκών υψηλής θερμοκρασίας αλλά λόγω υψηλής τιμής της πυκνότητας ($\gg \rho_0$) θεωρείται ότι πιθανόν να δημιουργείται στον πυρήνα των αστέρων νετρονίων.

1.1.1 Περιγραφή πειραματικών εξελίξεων

Στην προσπάθεια για την επιβεβαίωση της ύπαρξης αυτής της νέας κατάστασης της ύλης, αναπτύχθηκαν εξελιγμένα επιταχυντικά συστήματα που μπορούν να παρέχουν τις αρχικές εκείνες συνθήκες που απαιτούνται. Οι επιταχυντές αυτοί, χρησιμοποιήθηκαν για να προσδώσουν σε ιόντα μεγάλες ενέργειες και στη συνέχεια να οδηγήσουν στη σύγκρουσή τους. Αυτό που επιδιώκεται με τις συγκρούσεις βαρέων ιόντων σε υψηλές ενέργειες [13, 14, 15] είναι η συγκέντρωση και απελευθέρωση μεγάλου ποσού ενέργειας σε μικρό όγκο και ελάχιστο χρόνο. Οι συγκρούσεις αυτές αποτελούν το μόνο τρόπο επίτευξης συνθηκών υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πυκνότητας, ικανών για την παραγωγή ύλης σε φάση πλάσματος **quark - gluon**.

Επιταχυντικό σύστημα	$A + A$	$\sqrt{s_{NN}}[GeV]$	$E_{lab.} [AGeV]$
<i>SPS</i>	$Pb + Pb$	6.3	20
<i>SPS</i>	$Pb + Pb$	7.6	30
<i>SPS</i>	$Pb + Pb$	8.8	40
<i>SPS</i>	$Si + Si$	8.8	40
<i>SPS</i>	$C + C$	8.8	40
<i>SPS</i>	$Pb + Pb$	12.3	80
<i>SPS</i>	$Pb + Pb$	17.3	158
<i>SPS</i>	$Si + Si$	17.3	158
<i>SPS</i>	$C + C$	17.3	158
<i>SPS</i>	$p + p$	17.3	158
<i>RHIC</i>	$Au + Au$	62.4	-
<i>RHIC</i>	$Cu + Cu$	62.4	-
<i>RHIC</i>	$Au + Au$	130	-
<i>RHIC</i>	$Au + Au$	200	-
<i>RHIC</i>	$Cu + Cu$	200	-
<i>LHC</i>	$p + p$	900	-
<i>LHC</i>	$p + p$	2200	-
<i>LHC</i>	$p + p$	14000	-
<i>LHC</i>	$Pb + Pb$	5500	-

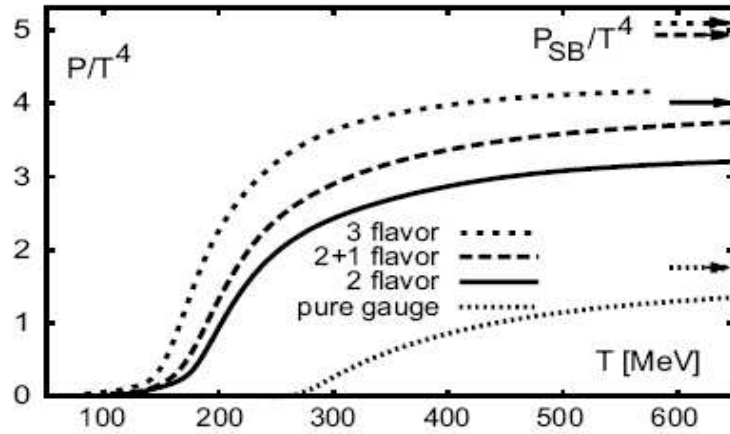
Πίνακας 1.1: Στον πίνακα φαίνονται τα διάφορα επιταχυντικά συστήματα, τα ιόντα που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι ενέργειες στο κέντρο μάζας αλλά και στο εργαστήριο (στην περίπτωση των πειραμάτων σταθερού στόχου του *SPS*).

Η πρώτη γενιά πειραμάτων σταθερού στόχου σε αυτό το πεδίο έρευνας ξεκίνησε το 1986 με τη λειτουργία των επιταχυντών **BNL-AGS** και **CERN-SPS** με δέσμες ιόντων σε ενέργειες $29AGeV$ και $400AGeV$ αντίστοιχα. Σκοπός των πειραμάτων αυτών ήταν η διερεύνηση των συνθηκών που επιτρέπουν τη δημιουργία της κατάστασης **QGP** και η πιθανή ανίχνευση αυτής. Εξάλλου τα πειράματα αυτά βοήθησαν και στη μελέτη και καταγραφή των χαρακτηριστικών της αλληλεπίδρασης [16, 17, 18]. Η επόμενη γενιά πειραμάτων (δεκαετία 90), συγκροτεί το πρόγραμμα βαρέων ιόντων στο **CERN-SPS** με ενέργεια δέσμης ιόντων μολύβδου στα $158AGeV$. Το σύνολο των αποτελεσμάτων του προγράμματος αυτού οδήγησε στην ανακοίνωση [19] πως υπάρχει πειστική ένδειξη ότι στις συγκρού-

σεις $Pb + Pb$ επετεύχθη η δημιουργία της ύλης σε κατάσταση QGP (αύξηση παραδοξότητας, μείωση παραγωγής J/Ψ). Τα συμμετέχοντα πειράματα είναι: NA45/CERES, NA49, NA50/60 και WA97/NA57 ($\sqrt{s_{Pb+Pb}} \approx 4TeV$) όπου το καθένα ξεχωριστά, με ειδικά βελτιωμένη ανιχνευτική διάταξη, μελετά συγκεκριμένη ένδειξη για την ανίχνευση της δημιουργίας QGP. Επίσης τα τελευταία χρόνια, τα πειράματα συγκρουόμενων δεσμών του επιταχυντή RHIC στο BNL μελετούν τα αλληλεπιδρόντα συστήματα με συνολική ενέργεια κέντρου μάζας ($\sqrt{s_{NN}} \approx 200GeV$), ενώ το μελλοντικό πείραμα ALICE στον επιταχυντή LHC θα διεξαχθεί μετά το 2007 με ενέργεια ($\sqrt{s_{NN}} \approx 5.5GeV$).

Ο πίνακας 1.1 δείχνει τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν ή θα χρησιμοποιηθούν στα αντίστοιχα επιταχυντικά συστήματα, καθώς και τις ενέργειες που επετεύχθησαν.

1.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ



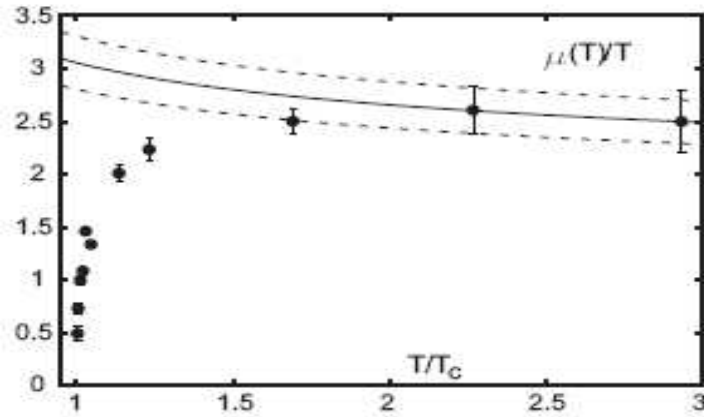
Σχήμα 1.1: LQCD υπολογισμοί για το λόγο P/T^4 της ισχυρά αλληλεπιδρώσας ύλης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για διαφορετικές επιλογές του αριθμού και του είδους των γεύσεων των quarks .

Το διάγραμμα φάσης της ισχυρά αλληλεπιδρώσας ύλης που βρίσκεται σε θερμική ισορροπία περιγράφεται από την κβαντική χρωμοδυναμική. Σε αρκετά υψηλές τιμές της θερμοκρασίας, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, τα αδρό-

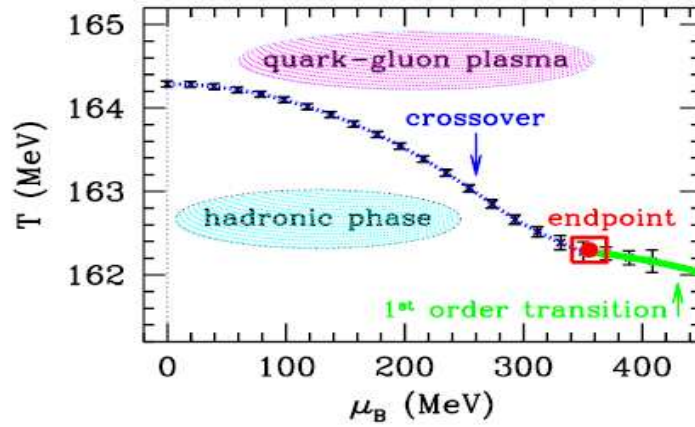
για αναμένονται να απελευθερώσουν τα συστατικά τους (quarks και gluons). Η εμφάνιση αυτών των νέων βαθμών ελευθερίας θα μπορούσε να εκδηλωθεί με μια ξαφνική αύξηση στην πίεση αυξανόμενης της θερμοκρασίας, που με τη σειρά της θα είχε ως συνέπεια την αλλαγή της καταστατικής εξίσωσης του συστήματος. Στο όριο που τα ελεύθερα quarks και gluons δεν αλληλεπιδρούν και παράλληλα τα πρώτα θεωρούνται χωρίς μάζα, η πίεση της παρτονικής αυτής κατάστασης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας σε σχεδόν μηδενικό χημικό δυναμικό, καθορίζεται από τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας [20]:

$$\frac{P_{SB}}{T^4} = [2(N_c^2 - 1) + \frac{7}{2}N_c N_f] \frac{\pi^2}{90}, \quad (1.1)$$

όπου N_c είναι ο αριθμός των χρωμάτων και N_f ο αριθμός των γεύσεων των quarks. Για να ληφθούν υπόψη όλες οι παράμετροι, όπως αλληλεπιδράσεις χρώματος μεταξύ των συστατικών κ.α., η μελέτη πρέπει να γίνει σε χωρο-χρονικό πλέγμα (LQCD) [20]. Παρά τις υπολογιστικές δυσκολίες τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη της LQCD είναι τα εξής:



Σχήμα 1.2: Η εξάρτηση του λόγου $\mu(T)/T$ από την τιμή της θερμοκρασίας του συστήματος εκφρασμένης από το λόγο T/T_c . Οι καμπύλες δείχνουν τις αναμενόμενες συμπεριφορές του λόγου από τη μελέτη της pQCD.



Σχήμα 1.3: LQCD αποτελέσματα για μη μηδενικό χημικό δυναμικό. Η συνεχής γραμμή δείχνει την περιοχή της μετάβασης φάσης πρώτης τάξης ενώ η διακεκομμένη καμπύλη υποδηλώνει την περιοχή της μετάβασης crossover.

- Υπάρχει πραγματικά μια προβλεπόμενη μετάβαση κάποιου είδους από την αδρονική φάση στη QGP. Η μετάβαση αυτή πραγματοποιείται σε μια περιοχή θερμοκρασίας γύρω από τους $T_c \approx 160 \text{ MeV}$ για μηδενικό χημικό δυναμικό. Η ακριβής τιμή της κρίσιμης αυτής θερμοκρασίας εξαρτάται από τις μάζες των quarks που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό.
- Ο λόγος της πίεσης προς την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας (P/T^4) αυξάνεται απότομα πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία και στη συνέχεια αρχίζει να αποκτά μια σχετικά σταθερή τιμή πάνω από $2T_c$ (σχήμα 1.1) [21].
- Πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία, το ενεργό δυναμικό των ζευγών βαρέων $q - \bar{q}$ παίρνει τη μορφή ενός δυναμικού Coulomb, με μάζα που αυξάνεται απότομα αυξανόμενης της θερμοκρασίας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2, η μάζα διαφέρει κατά πολύ από τους υπολογισμούς της pQCD (διακεκομμένες καμπύλες) [22]. Η αυξημένη αυτή μάζα οδηγεί σε μείωση της απόστασης των αλληλεπιδράσεων $q - \bar{q}$, που με τη σειρά της οδηγεί στην αναμενόμενη μείωση της παραγωγής $c - \bar{c}$ μεσονίων ($J/\Psi - \psi'$) σε σχέση με τα αντίστοιχα $D^+(c\bar{d}) - D^0(c\bar{u})$ μεσόνια [23, 24].

- Το είδος της μετάβασης εξαρτάται πολύ από τον αριθμό των γεύσεων των quarks καθώς και από τις αντίστοιχες μάζες τους [25]. Για τους πιο ρεαλιστικούς υπολογισμούς που περιλαμβάνουν δυο ελαφριά quarks ($u - d$) και ένα πιο βαρύ (s), η μετάβαση θεωρείται ότι είναι τύπου crossover (υποδηλώνοντας τη μη ύπαρξη ασυνεχειών σε θερμοδυναμικές παραμέτρους) σε σχεδόν μηδενικό χημικό δυναμικό.
- Υπολογισμοί σε χημικό δυναμικό διάφορο του 0, υποδηλώνουν την ύπαρξη ενός κρίσιμου σημείου όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 1.3 [26]. Η αδυναμία που υπάρχει στον υπολογισμό των παραμέτρων σε μοντέλα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, αδυναμία που κυρίως πηγάζει από τις υπολογιστικές απαιτήσεις, οδηγεί στη μη εξαγωγή συγκεκριμένης περιοχής του χημικού δυναμικού (οι τελευταίες εργασίες εκτείνουν την περιοχή από την τιμή $\mu_b \approx 700\text{MeV}$ έως $\mu_b \approx 350\text{MeV}$ [26, 27]).

1.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

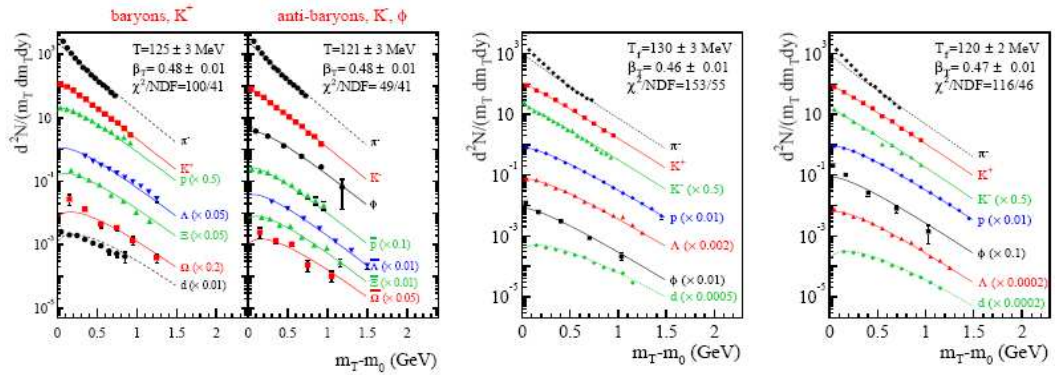
Στην προσπάθεια να ελεγχθούν πειραματικά οι θεωρητικές προβλέψεις, μελετήθηκαν πολλές παράμετροι που θεωρούνται ότι μπορούν να δώσουν σημαντικές ενδείξεις τόσο για την αρχική φάση του συστήματος που δημιουργείται μετά από μια αλληλεπίδραση βαρέων ιόντων σε υψηλές ενέργειες όσο και για την εξέλιξή του. Ενδεικτικά, κάποια από τα στοιχεία που μελετήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

- Τα φάσματα της εγκάρσιας μάζας (m_T) και οι κατανομές της ωκύτητας διαφόρων ειδών σωματιδίων με σκοπό τον υπολογισμό διαφόρων θερμοδυναμικών μεταβλητών. Με την προσαρμογή κάποιων θεωρητικών μοντέλων στις κατανομές αυτές είναι δυνατόν να εξαχθούν οι τιμές της θερμοκρασίας της χημικής και θερμικής αδρονοποίησης (chemical - kinetic freeze-out), της εγκάρσιας ταχύτητας επέκτασης του συστήματος αλλά και του χημικού δυναμικού.
- Οι συσχετισμοί όμοιων φορτίων (Bose - Einstein). Με τη βοήθεια αυτών των μελετών μπορεί να εξαχθεί η πληροφορία τόσο για το μέγεθος της πηγής εκπομπής των αδρονίων (πυρόσφαιρα) όσο και για το χρόνο ζωής της.

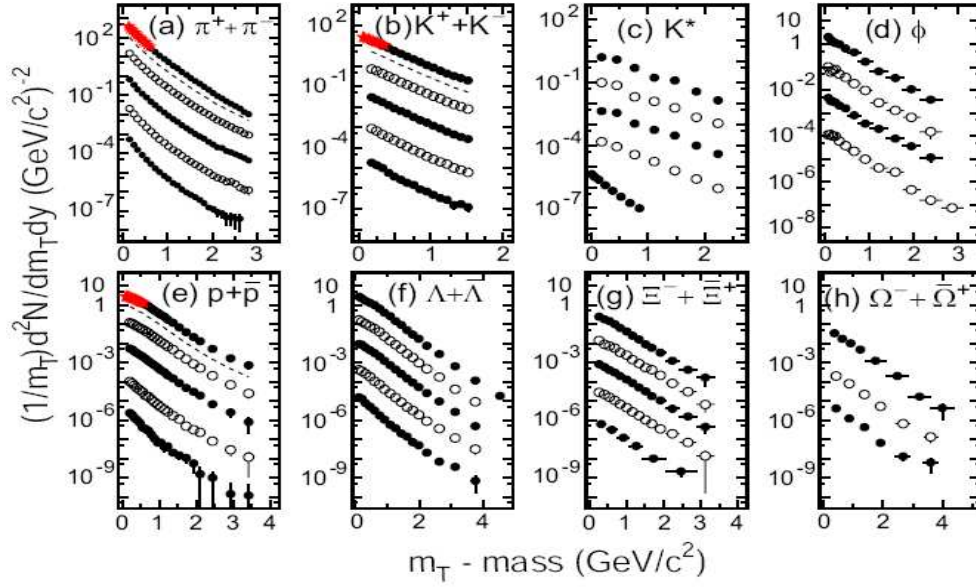
- Η συλλογική ροή του συστήματος που δημιουργείται κατά την αλληλεπίδραση βαρέων ιόντων. Η συμπεριφορά αυτή του συστήματος εξαρτάται από το αν η αλληλεπίδραση είναι συμμετρική ή όχι και δίνει πληροφορία για την εγκάρσια ταχύτητα επέκτασής του.
- Τα σωματίδια με υψηλή τιμή της εγκάρσιας ορμής. Η περιοχή αυτή μελετάται ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του μέσου σε πίδακες αδρονίων, αφού έχει προταθεί ότι αυτοί δεν καταφέρνουν να διαπεράσουν ένα μέσο με τις ιδιότητες που αναμένεται να έχει η ύλη που αποτελείται από ελεύθερα quarks και gluons .
- Η ενεργειακή εξάρτηση παραμέτρων, όπως παραγόμενα σωματίδια ή λόγοι παραγωγής σωματιδίων, με σκοπό την εύρεση κάποιας ασυνέχειας. Οποιαδήποτε τέτοιου είδους συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στην επίτευξη των κρίσιμων εκείνων συνθηκών για την απελευθέρωση των quarks και των gluons .

Στις επόμενες παραγράφους παραθέτουμε τα κυριότερα πειραματικά αποτελέσματα τόσο από πειράματα του *SPS* όσο και του *RHIC*.

1.3.1 Θερμοδυναμικές παράμετροι



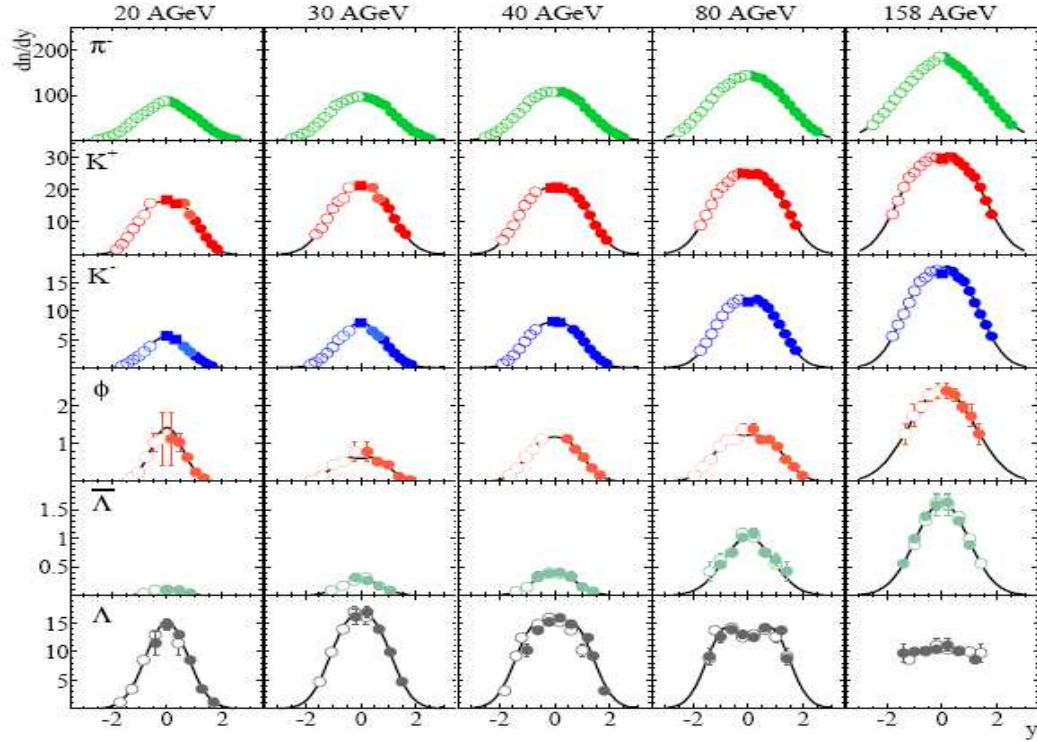
Σχήμα 1.4: m_T φάσματα όπως υπολογίστηκαν από αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ του *SPS* σε ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ (για τα δυο αριστερά γραφήματα), $\sqrt{s_{NN}} = 6.3\text{GeV}$ και $\sqrt{s_{NN}} = 7.6\text{GeV}$ (για τα δυο δεξιά γραφήματα).



Σχήμα 1.5: m_T φάσματα για την κεντρική περιοχή της ωκύτητας όπως υπολογίστηκαν από αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ του $RHIC$ σε ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 200 GeV$.

Οι αναλλοίωτες κατανομές των εγκάρσιων μαζών m_T φαίνονται στο σχήμα 1.4 για τις ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$, $\sqrt{s_{NN}} = 7.6 GeV$ και $\sqrt{s_{NN}} = 6.3 GeV$ και για ένα μεγάλο αριθμό ειδών σωματιδίων που ανιχνεύτηκαν από το πείραμα $NA49$ [28]. Τα φάσματα γίνονται σταδιακά πιο επίπεδα όσο αυξάνεται η μάζα των σωματιδίων, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο συνδυασμό της θερμικής κατανομής των ορμών αλλά και της ισχυρής ακτινικής ροής της παραγόμενης ύλης. Μια παραμετροποίηση με *blast wave model* [29] παρέχει μια ικανοποιητική περιγραφή των φασμάτων με τη βοήθεια δυο παραμέτρων: της θερμοκρασίας $T \approx 120 - 140 MeV$ και της ακτινικής ταχύτητας της ροής $\beta_T \approx 0.43 - 0.48c$. Αυτές οι παράμετροι χαρακτηρίζουν το θερμικό και κινητικό *freeze-out* της σφαίρας που δημιουργείται μετά από μια τέτοια σύγκρουση.

Το σχήμα 1.5, δείχνει τα αντίστοιχα φάσματα που προέκυψαν από την ανάλυση συγκρούσεων $Au + Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 200 GeV$ για το πείραμα $STAR$. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι καθώς η αλληλεπίδραση γίνεται όλο και πιο κεντρική, το σύστημα γίνεται όλο και πιο ψυχρό, ενώ παράλληλα επι-

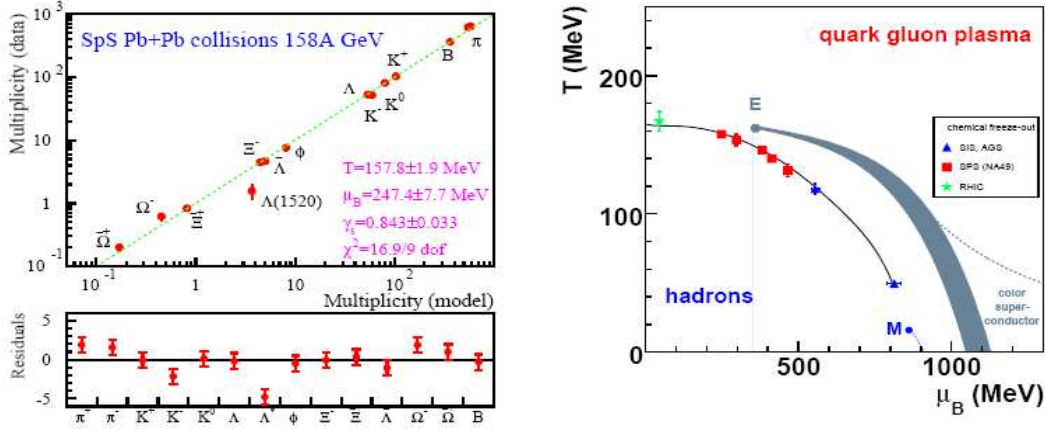


Σχήμα 1.6: Οι κατανομές της ωχύτητας των παραγομένων σωματιδίων σε κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε όλο το ενεργειακό φάσμα του SPS. Τα κλειστά σύμβολα δείχνουν τις πραγματικές μετρήσεις ενώ τα ανοιχτά είναι τα αντικατοπτρισμένα, λόγω συμμετρίας, σημεία.

δεικνύει ισχυρότερη συλλογική συμπεριφορά καθώς η ακτινική ροή αυξάνεται [30, 31, 32, 33].

Το σχήμα 1.6 δείχνει τις κατανομές της ωχύτητας πολλών ειδών σωματιδίων για διάφορες ενέργειες. Οι κατανομές αυτές για την πλειονότητα των περιπτώσεων έχουν μέγιστη τιμή στη μεσαία περιοχή της y . Μπορούμε ακόμα να εκμεταλλευτούμε τη συμμετρία των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ώστε να εξάγουμε τον αριθμό των παραγομένων σωματιδίων σε όλο το φασικό χώρο (4π). Οι λόγοι των αριθμών των παραγόμενων σωματιδίων αλλά και οι ίδιοι οι αριθμοί αυτοί είναι συνεπείς με στατιστικά μοντέλα που περιγράφουν τις αλληλεπιδράσεις με τρεις παραμέτρους: τη θερμοκρασία T , το βαρυο-χημικό δυναμικό μ_b

αλλά και τον παράγοντα μείωσης της παραδοξότητας γ_s . Οι γραφικές παραστάσεις του σχήματος 1.7 δείχνουν ένα παράδειγμα προσαρμογής των πειραματικών δεδομένων του NA49 στη μέγιστη ενέργεια του SPS με ένα τέτοιο στατιστικό μοντέλο. Από την προσαρμογή αυτή προκύπτουν τα αντίστοιχα σημεία του διαγράμματος φάσης στο επίπεδο $T - \mu_b$ [34].

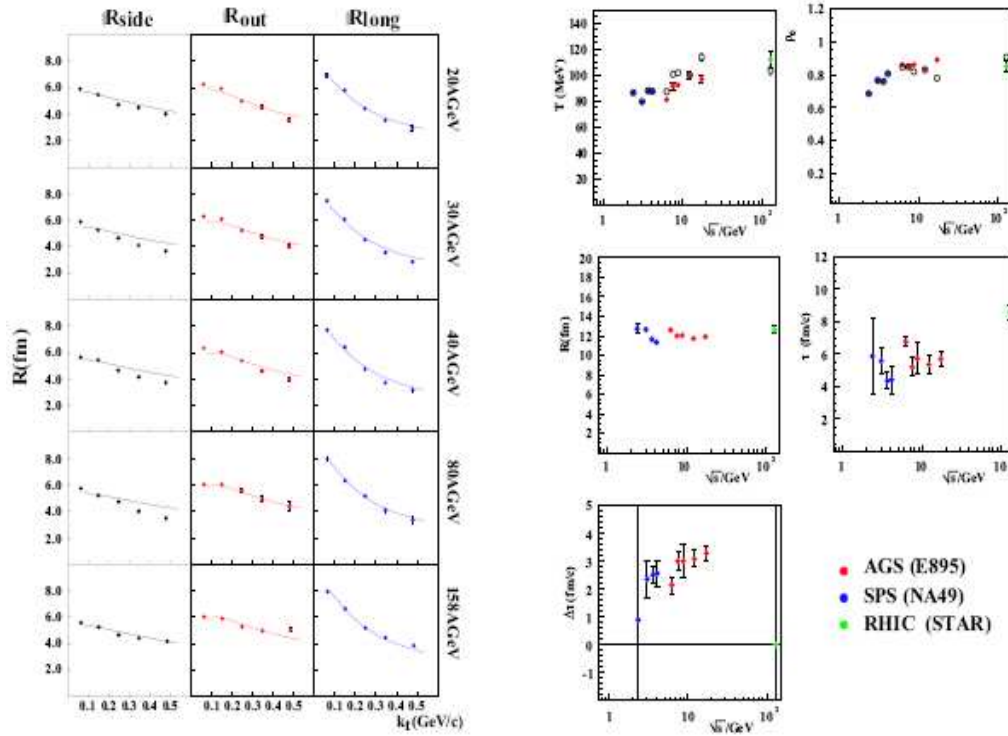


Σχήμα 1.7: Τα αποτελέσματα μιας προσαρμογής ενός στατιστικού μοντέλου στα πειραματικά αποτελέσματα του NA49 (αριστερό γράφημα). Το διάγραμμα φάσης της αδρονικής ύλης που δείχνει τα πειραματικά σημεία όπως αυτά προέκυψαν από τη μελέτη στατιστικών μοντέλων (δεξί γράφημα).

1.3.2 Μελέτη συσχετισμών **Bose-Einstein**

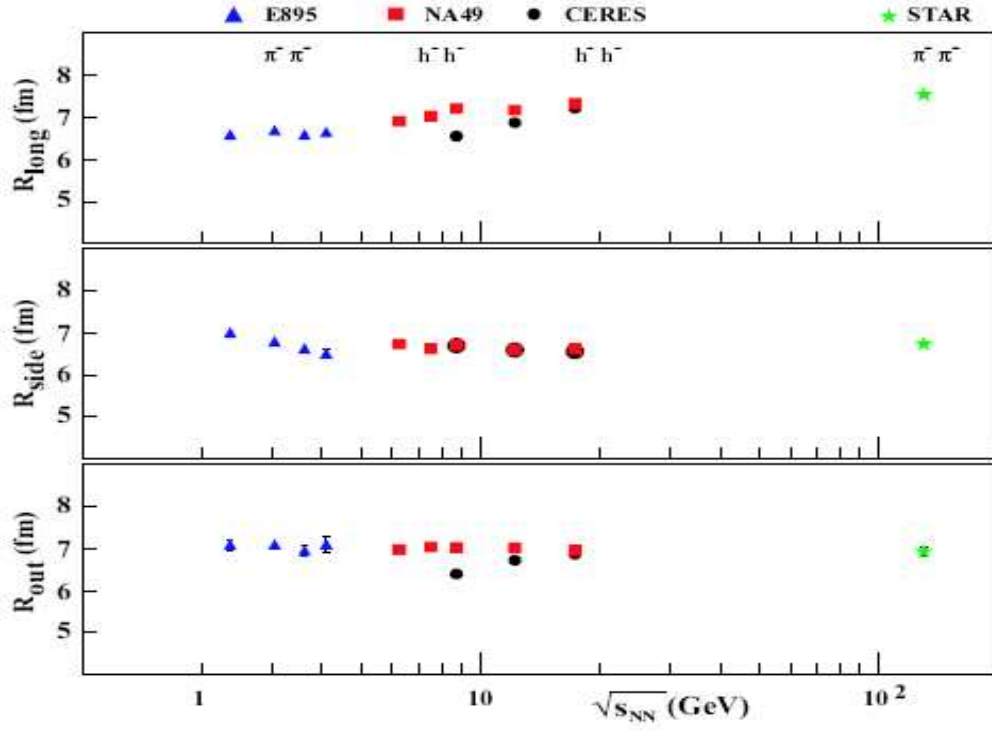
Η συλλογική ροή επηρεάζει επίσης τους συσχετισμούς όμοιων σωματιδίων. Για αρνητικά φορτισμένα πιόνια η ακτίνα των συσχετισμών Bose-Einstein στις διαφορές της ορμής (η ακτίνα αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους της πηγής παραγωγής των πιονίων), μειώνεται με την αύξηση της ροής. Αυτή η μείωση γίνεται ακόμα πιο αισθητή καθώς η εγκάρσια ορμή αυξάνεται. Το σχήμα 1.8 δείχνει τις παραμέτρους που καθορίζουν το μέγεθος της πηγής ως συνάρτηση της μέσης τιμής της εγκάρσιας ορμής των ζευγών π^- (k_T). Η χρησιμοποίηση μιας blast wave παραμετροποίησης που υποθέτει μια ομοιόμορφη εκπομπή πιονίων από ένα κύλινδρο ακτίνας R και μια εγκάρσια ροή που αυξάνεται γραμμικά με την ακτίνα παίρνοντας μια μέγιστη τιμή ρ_0 στην επιφάνεια του κυλίνδρου

[35], μας δίνει πληροφορίες επίσης για τη θερμοκρασία του κινητικού freeze-out (T), το χρόνο ζωής της σφαίρας (προκύπτει κυρίως από το R_{long}) καθώς και τη χρονική διάρκεια της εκπομπής των πιονίων $\Delta\tau$ (προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ των R_{out} και R_{side}). Τα κύρια αποτελέσματα που φαίνονται στις αριστερές γραφικές παραστάσεις του σχήματος 1.8 δείχνουν ότι δεν υπάρχει κάποια ισχυρή εξάρτηση από την ενέργεια των παραμέτρων αυτών.



Σχήμα 1.8: Οι χωρικές παράμετροι της πηγής των πιονίων ως συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής των ζευγών πιονίων (αριστερό γράφημα). Παράμετροι που προκύπτουν από τη μελέτη blast wave παραμετροποιήσεων σε μελέτες HBT και φάσματα εγκάρσιων μαζών (δεξί γράφημα).

Οι ακτινικές παράμετροι της πηγής για $k_T = 0.15 \text{ GeV}/c$ φαίνονται στο σχήμα 1.9. Επιβεβαιώνεται για μια ακόμη φορά ότι τόσο το R_{long} όσο και τα R_{side} και R_{out} δεν δείχνουν κάποια εξάρτηση καθώς πηγαίνουμε από τις ενέργειες του AGS σε αυτές του SPS και από εκεί σε ενέργειες του RHIC.



Σχήμα 1.9: Η ενεργειακή εξάρτηση των ακτινικών παραμέτρων που υπολογίζονται από τη μελέτη συσχετισμών $\pi\pi$ σε κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ (SPS) και $Au + Au$ (AGS – RHIC) για μια τιμή της εγκάρσιας ορμής των ζευγών $k_T \approx 0.15 \text{ GeV}/c$.

1.3.3 Συλλογική συμπεριφορά - Ροή

Η μη ισοτροπική ροή είναι ακόμα μια παράμετρος που είναι ευαίσθητη στις αρχικές συνθήκες μιας αλληλεπίδρασης. Οι μη κεντρικές αλληλεπιδράσεις οδηγούν σε μη συμμετρικές κατανομές της ορμής ως προς την αζιμουθιακή γωνιά ϕ . Το πείραμα NA49 μέτρησε την ανισοτροπική ροή πιονίων και πρωτονίων σε αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 \text{ GeV}$ και $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$ [36]. Τα αποτελέσματα της παραμέτρου v_2 δίνονται στο σχήμα 1.10 για ενέργειες του AGS μέχρι του RHIC. Η αύξηση της τιμής του v_2 με την ενέργεια μειώνεται στην περιοχή του SPS. Μια ακόμη ενδιαφέρουσα συμπεριφορά είναι

η γραμμική εξάρτηση από την πυκνότητα των παραγόμενων σωματιδίων του λόγου v_2/ϵ όπου ϵ η εκκεντρότητα της αλληλεπίδρασης.

Πρόσφατα το *NA49* επέκτεινε την ανάλυση της ανισοτροπικής ροής στα Λ σωματίδια. Το κάτω αριστερά γράφημα του σχήματος 1.10 δείχνει την αζιμουθιακή κατανομή των σωματιδίων αυτών, ενώ το μεσαίο γράφημα δείχνει την παράμετρο v_2 στην κεντρική περιοχή της ωκύτητας, ως συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής για τα πειράματα *NA49* και *STAR*. Παρατηρείται μια ισχυρή αύξηση με το P_T και στις δυο ενέργειες, ενώ παράλληλα οι τιμές του v_2 για το *NA49* είναι κατά 30% μικρότερες από αυτές του *STAR*. Η αντίστοιχη εξάρτηση της v_2 από την εγκάρσια ορμή για διάφορα είδη σωματιδίων (*NA49*) φαίνονται στο κάτω δεξί γράφημα του σχήματος 1.10. Όπως και στα αποτελέσματα του *RHIC* έτσι και εδώ, γίνεται εμφανής μια ιεραρχική κατάταξη ως προς τη μάζα, κάτι που μπορεί να περιγραφεί από παραμετροποιήσεις *blast wave* (συνεχείς γραμμές του σχήματος) [35].

1.3.4 Περιοχή υψηλού P_T

Η μελέτη των παραγόμενων σωματιδίων σε ενέργειες του *SPS* αρχικά επικεντρώθηκε σε χαμηλές περιοχές της εγκάρσιας ορμής, αφού η παραγωγή τους σε $P_T > 1.5 \text{ GeV}/c$ είναι αισθητά μειωμένη. Πρόσφατα ξεκίνησε μια καινούρια προσπάθεια μελέτης αυτής της περιοχής ώστε να ακολουθηθούν οι μελέτες που γίνονται σε πειράματα του *RHIC* [37]. Τα δυο πάνω γραφήματα του σχήματος 1.11, δείχνουν την εξάρτηση από την εγκάρσια ορμή των λόγων p/π^+ και Λ/K_s^0 για τις κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb+Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$ (αριστερό γράφημα) και την αντίστοιχη του λόγου $\bar{p}/\pi^-$ για διάφορες ενέργειες (δεξί γράφημα).

Επιπροσθέτως, η απώλεια ενέργειας των παρτονίων μέσα στο πυκνό μέσο, κάτι που αποτυπωνόταν από την παράμετρο R_{CP} των πιονίων που περιγράφει την παραγωγή τους σε κεντρικές και περιφερειακές συγκρούσεις, ήταν μια ισχυρή ένδειξη στα πειράματα του *RHIC* της ύπαρξης της μετάβασης φάσης. Τα αποτελέσματα του λόγου R_{CP} για το πείραμα *NA49* αλλά και για κάποια πειράματα του *RHIC* φαίνονται στα δυο κάτω γραφήματα του σχήματος 1.11.

1.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ QUARK GLUON PLASMA

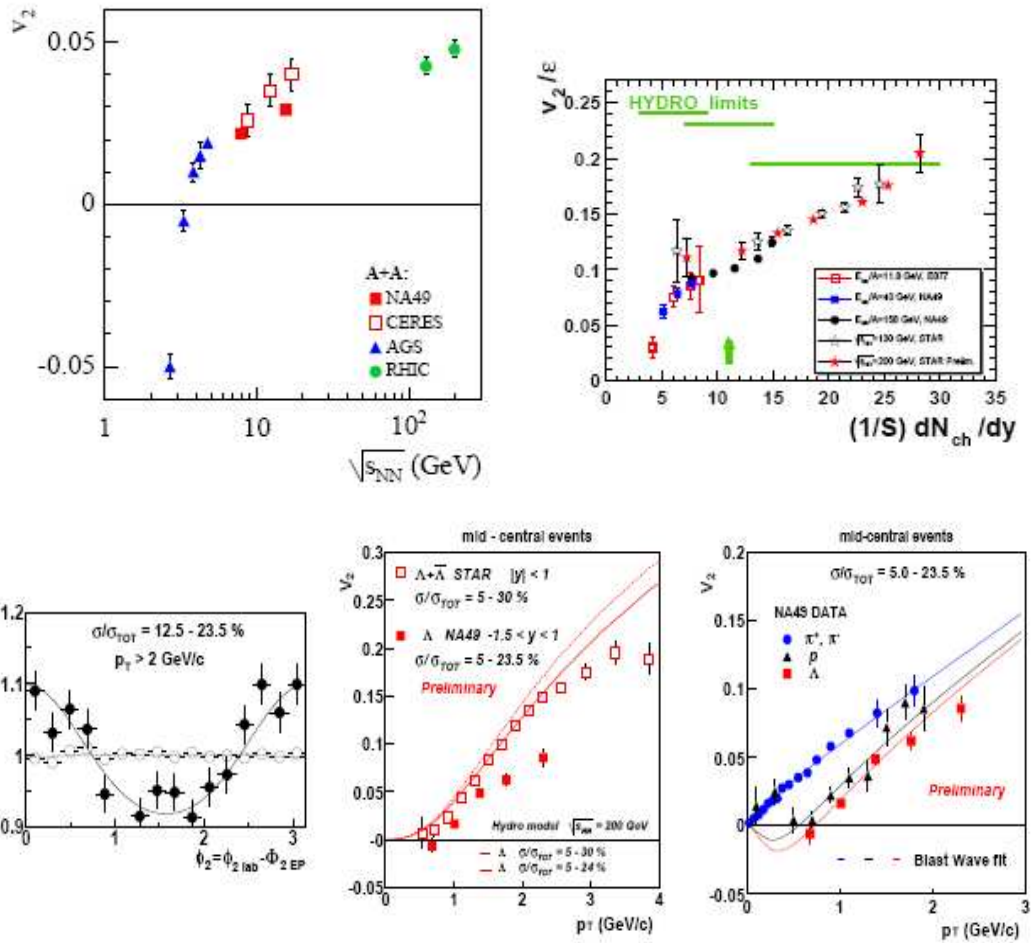
Παράλληλα με τα προηγούμενα πολύ σημαντικά αποτελέσματα, εμφανίστηκαν και κάποια πειραματικά δεδομένα των οποίων η εξήγηση οδηγούσε στην παραδοχή της εμφάνισης της ύλης των ελεύθερων quarks και gluons. Αυτά σχετίζονταν κυρίως (όπως θα δούμε και πιο κάτω) σε ασυνέχειες που εμφανίζονταν σε πειραματικά μετρούμενες παραμέτρους σε όλο το διαθέσιμο ενεργειακό φάσμα.

Τα κύρια αποτελέσματα μιας διεξοδικής ανάλυσης της ενεργειακής εξάρτησης της παραγωγής παραδοξότητας παρουσιάζονται στο σχήμα 1.12. Ο λόγος $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$ παρουσιάζει μια μεγάλη αύξηση ξεκινώντας από τις χαμηλές ενέργειες του AGS, ένα μέγιστο στις χαμηλές ενέργειες του SPS (γύρω από $\sqrt{s_{NN}} = 7.6\text{GeV}$) που ακολουθείται από μια αρχική πτώση της τιμής που επιδεικνύει όμως μια σταθερή συμπεριφορά από την πιο μεγάλη ενέργεια του SPS σε αυτές του RHIC. Η προσπάθεια που έγινε να αναπαραχθεί αυτή η συμπεριφορά με τη βοήθεια κάποιων μικροσκοπικών μοντέλων (RQMD, UrQMD, Hadron Gas Model - HGM) δεν οδήγησε σε επιτυχία. Λόγω του ότι στις ενέργειες του SPS η παραγωγή αντι-βαρυονίων είναι αισθητά χαμηλή, ο αριθμός των K^+ μας δίνει μια ένδειξη για το μισό σχεδόν αριθμό των $\bar{s}$ quarks στην τελική κατάσταση. Αντίθετα, τα s quarks μοιράζονται ανάμεσα στα K^- και κυρίως τα Λ . Έτσι το μέγιστο του λόγου $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$ οδηγεί σε μια ενεργειακή μεταβολή του αντίστοιχου λόγου $\langle K^- \rangle / \langle \pi^- \rangle$ αλλά και ένα ακόμα μέγιστο στην ενεργειακή εξάρτηση του λόγου $\langle \Lambda \rangle / \langle \pi^\pm \rangle$ (σχήμα 1.12).

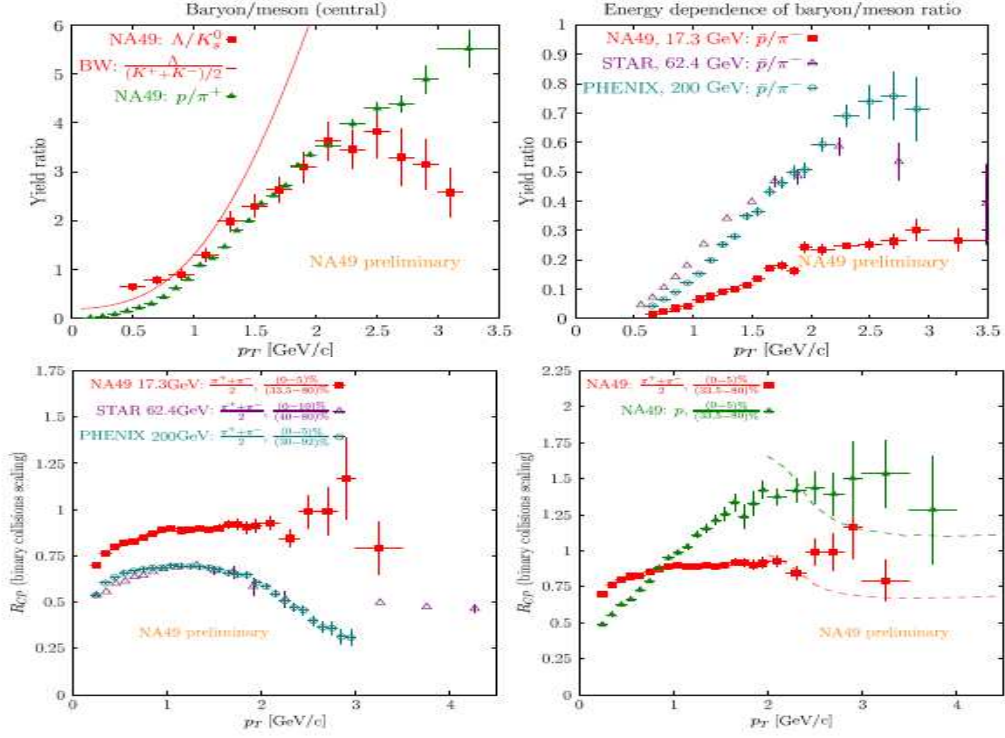
Μια προσέγγιση της ολικής παραδοξότητας που παράγεται νορμαλισμένη στον αριθμό των πιονίων, δίνεται από την παράμετρο $E_S = (\langle K + \bar{K} \rangle + \langle \Lambda \rangle) / \langle \pi \rangle$. Η ενεργειακή εξάρτηση της παραμέτρου αυτής δίνεται στο αριστερό γράφημα του σχήματος 1.13. Γίνεται φανερό ότι το μέγιστο που παρατηρήθηκε στο λόγο $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$ αποτυπώνεται και εδώ. Αντίθετα, παρατηρείται μια σταθερή συμπεριφορά της παραμέτρου αυτής σε αλληλεπιδράσεις $p + p$. Το μοντέλο που μπορεί να περιγράψει με επιτυχία τα πειραματικά σημεία είναι αυτό που υποθέτει ότι η μετάβαση φάσης πραγματοποιήθηκε στην περιοχή των $\sqrt{s_{NN}} = 7.6\text{GeV}$. Στην ίδια περίπου ενέργεια, ο ρυθμός αύξησης των παραγόμενων πιονίων ανά συμμετέχον νουκλεόνιο (ένδειξη της εντροπίας ανά βαρυόνιο) αυξάνεται για αλληλεπιδράσεις βαρέων ιόντων αλλά όχι για αλληλεπιδράσεις νουκλεονίων (μεσαίο γράφημα του σχήματος 1.13). Η συμ-

περιφορά αυτή προβλέφθηκε επίσης από το ίδιο μοντέλο (Statistical Model of the Early Stage - SMES) [38]. Επίσης, η θερμοκρασία που υπολογίζεται από την προσαρμογή μιας εκθετικής συνάρτησης στα φάσματα των εγκάρσιων μαζών των K^+ , ως συνάρτηση της ενέργειας (αριστερό γράφημα του σχήματος 1.13), δείχνει μια αρχική γρήγορη άνοδο για τις χαμηλές ενέργειες του AGS, παραμένει σχεδόν σταθερή σε όλο το ενεργειακό φάσμα του SPS και συνεχίζει να αυξάνεται στις μεγαλύτερες ενέργειες του RHIC. Η συμπεριφορά αυτή δεν αναπαράχθηκε από τα τυπικά μοντέλα που δεν περιλαμβάνουν τη μετάβαση φάσης, σε αντίθεση με κάποιους υδροδυναμικούς υπολογισμούς που υποθέτουν την ύπαρξη αυτής της μετάβασης και οι οποίοι περιγράφουν τα πειραματικά σημεία.

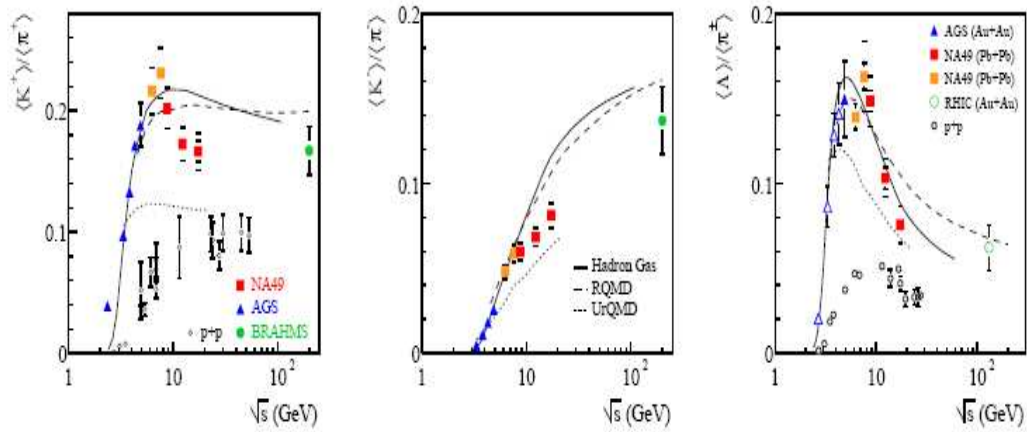
Τέλος, μια ακόμη ένδειξη της ύπαρξης της μετάβασης φάσης, προήλθε αποκλειστικά από τα πειραματικά δεδομένα του RHIC. Αναφερόμαστε στην απώλεια ενέργειας των παρτονίων στο πυκνό μέσο που δημιουργείται μετά από μια αλληλεπίδραση βαρέων ιόντων σε υψηλές ενέργειες. Το σχήμα 1.14 δείχνει την παράμετρο $R_{AB}(P_T)$, που περιγράφει το λόγο της παραγωγής σωματιδίων σε αλληλεπιδράσεις $A + B$ ($Au + Au$ ή ακόμα και $d + Au$) προς την παραγωγή των ίδιων σωματιδίων σε αλληλεπιδράσεις νουκλεονίων. Ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο παρατηρείται: η παραγωγή αδρονίων με μεγάλη τιμή εγκάρσιας ορμής σε κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ μειώνεται περίπου πέντε φορές σε σχέση με την αντίστοιχη παραγωγή σε αλληλεπιδράσεις $d + Au$. Λόγω του ότι δεν παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο στις αλληλεπιδράσεις $d + Au$, εξάγεται το συμπέρασμα ότι αυτή η συμπεριφορά οφείλεται αποκλειστικά σε αλληλεπιδράσεις των παρτονίων με συστατικά της τελικής κατάστασης (πυρόσφαιρας). Αυτό οδηγεί με τη σειρά του στο συμπέρασμα ότι η ύλη που δημιουργείται μετά από μια κεντρική αλληλεπίδραση $Au + Au$ έχει τέτοιες ιδιότητες ώστε να προκαλέσει την απώλεια ενέργειας των αρχικών παρτονίων.



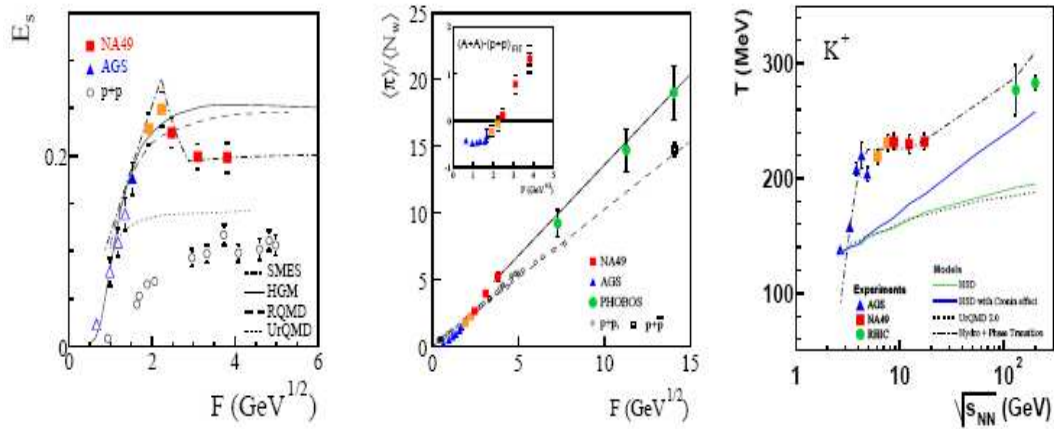
Σχήμα 1.10: Πάνω αριστερά: Η ενεργειακή εξάρτηση της παραμέτρου v_2 για πιόνια. Πάνω δεξιά: Ο λόγος της παραμέτρου v_2 ως προς την εκκεντρότητα της αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση της παραγόμενης σωματιδιακής πυκνότητας. Κάτω αριστερά: Η αζιμουθιακή κατανομή των Λ υπερονίων. Κάτω μέση: Η παράμετρος v_2 των Λ υπερονίων για τα πειράματα NA49 και STAR ως συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής. Κάτω δεξιά: Η παράμετρος v_2 των $\pi^\pm$, p και Λ για το πείραμα NA49 ως συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής



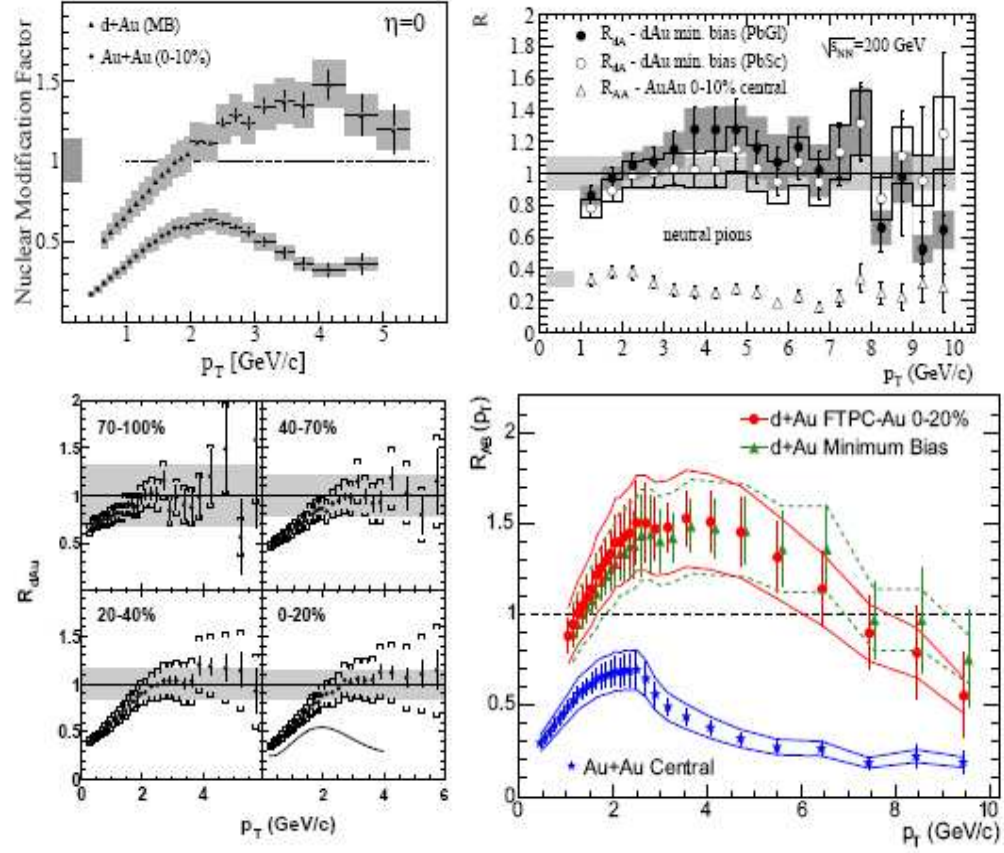
Σχήμα 1.11: Πάνω αριστερά: Η εξάρτηση από την εγκάρσια ορμή των λόγων p/π^+ και Λ/K_s^0 για την κεντρική περιοχή της ωκύτητας και για τις κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ στη μέγιστη ενέργεια του SPS. Πάνω δεξιά: Η εξάρτηση από την εγκάρσια ορμή του λόγου $\bar{p}/\pi^-$ για τα διάφορες ενέργειες. Κάτω αριστερά: Η εξάρτηση από την εγκάρσια ορμή της παραμέτρου R_{CP} για πιόνια και για διάφορες ενέργειες. Κάτω δεξιά: Η παράμετρος R_{CP} για πιόνια και πρωτόνια στο SPS συγκρινόμενη με υπολογισμούς $pQCD$.



Σχήμα 1.12: Αριστερά: Η ενεργειακή εξάρτηση του λόγου $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$. Μέση: Η ενεργειακή εξάρτηση του λόγου $\langle K^- \rangle / \langle \pi^- \rangle$. Δεξιά: Η ενεργειακή εξάρτηση του λόγου $\langle \Lambda \rangle / \langle \pi^\pm \rangle$.



Σχήμα 1.13: Αριστερά: Η ενεργειακή εξάρτηση της παραμέτρου E_S . Μέση: Η ενεργειακή εξάρτηση του λόγου $\langle \pi \rangle / \langle N_W \rangle$. Δεξιά: Η ενεργειακή εξάρτηση της θερμοκρασίας που προκύπτει από την προσαρμογή μιας εκθετικής συνάρτησης στα m_T φάσματα των K^+ .



Σχήμα 1.14: Οι λόγοι $R_{AB}(P_T)$ για φορτισμένα αδρόνια και π^0 για αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ και $d + Au$ σε σχέση με αλληλεπιδράσεις νουκλεονίων για τα πειράματα BRAHMS [39] (πάνω αριστερά), PHENIX [40] (πάνω δεξιά), PHOBOS [41] (κάτω αριστερά) και STAR [42] (κάτω δεξιά).

Κεφάλαιο 2

ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΩΝ ΣΕ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΙΟΝΤΩΝ

Μετά από μια αλληλεπίδραση βαρέων ιόντων σε υψηλές ενέργειες αναμένουμε το σχηματισμό ενός ζεστού και πυκνού συστήματος, του οποίου η χρονική εξέλιξη θα αναδείξει τα χαρακτηριστικά της μετάβασης φάσης από την αδρονική ύλη σε αυτή του *QGP*. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι πιθανό να μεταβάλλονται από γεγονός σε γεγονός. Τέτοιες ενδιαφέρουσες συμπεριφορές μπορούν να μελετηθούν με τη βοήθεια παραμέτρων και αναλύσεων σε επίπεδο *Event by Event*. Η μελέτη λοιπόν κάθε γεγονότος ξεχωριστά προσφέρει τη δυνατότητα της διερεύνησης της πιθανής μετάβασης φάσης, καθώς και το είδος αυτής της μετάβασης και της ύλης που δημιουργείται. Εξαιτίας της μεγάλης παραγωγής σωματιδίων τόσο στο *SPS*, όσο και στο *RHIC* αλλά και της αναμενόμενης ακόμα μεγαλύτερης παραγωγής στις ενέργειες του *LHC*, έχει γίνει δυνατό να πραγματοποιηθούν ακριβείς *Event by Event* μετρήσεις και μελέτες διακυμάνσεων πολλών παραμέτρων.

Οι διακυμάνσεις θερμοδυναμικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία του συστήματος και η εντροπία του, έχουν προταθεί σαν ενδείξεις της ύπαρξης της μετάβασης φάσης σε μια ύλη με αποδεδειγμένα *quarks* και *gluons* αλλά και ως απευθείας χαρακτηριστικά των ιδιοτήτων του συστήματος που δημιουργείται μετά από μια σύγκρουση πυρήνων [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Μεγάλες διακυμάνσεις της ενεργειακής πυκνότητας λόγω σχηματισμού *droplets* αναμένονται αν η μετάβαση φάσης είναι πρώτης τάξης (*first order transition*). Μετάβαση δεύτερης τάξης αναμένεται να οδηγήσει σε ασυνέχεια στην ειδική θερμότητα, καθώς και

αύξηση των διακυμάνσεων της ενεργειακής πυκνότητας, εξαιτίας της ύπαρξης συσχετισμών ευρείας κλίμακας μέσα στο σύστημα. Έχει προβλεφθεί ότι οι διακυμάνσεις κοντά στο κρίσιμο σημείο στο οποίο θα επέλθει μια μετάβαση φάσης δεύτερης τάξης θα αυξηθούν [3]. Σύγχρονες προβλέψεις της lattice QCD προβλέπουν ότι το κρίσιμο αυτό σημείο που οριοθετεί τη μετάβαση φάσης βρίσκεται σε σχετικά μικρή τιμή του βαρυονημικού δυναμικού, στην περιοχή που καλύπτουν οι *SPS* και *RHIC* [8], σχετικά μακριά από την περιοχή κάλυψης του *LHC*.

Η γρήγορη ανάπτυξη του πεδίου της φυσικής Event by Event τα τελευταία χρόνια σχετίζεται άμεσα με την πρόοδο που έχει συντελεστεί στην τεχνολογία, με τη βοήθεια της οποίας αναπτύσσονται οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται από τα πειράματα. Η ανάπτυξη λοιπόν ικανών ανιχνευτών να καλύψουν μεγάλη περιοχή του φασικού χώρου αλλά και η δυνατότητα σύγκρουσης δεσμών σε διαφορετικές ενέργειες, επιτρέπουν την ανίχνευση ενός μεγάλου μέρους των παραγόμενων σωματιδίων τόσο στο *SPS* όσο και στο *RHIC* αλλά και στο άμεσο μέλλον στο *LHC*. Οι πρώτες μελέτες σε επίπεδο Event by Event ξεκίνησαν από τα πειράματα του *SPS*. Οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν τις διακυμάνσεις στη σωματιδιακή πολλαπλότητα των φορτισμένων σωματιδίων αλλά και των φωτονίων, στο λόγο του αριθμού των παραγόμενων καονίων και πιονίων, στο καθαρό φορτίο κ.α. Οι αναλύσεις αυτές επεκτάθηκαν σε μεγαλύτερες ενέργειες από τα αντίστοιχα πειράματα του *RHIC*.

Οι μελέτες σε επίπεδο Event by Event χρειάζεται να ανταποκριθούν στην ακόλουθη πρόκληση: πρέπει να διαχωριστούν οι διακυμάνσεις που οφείλονται ενδεχομένως αποκλειστικά στην αλλαγή φάσης από αυτές που προκαλούνται από στατιστικούς λόγους. Ως προς την πρώτη κατηγορία, η συνεισφορά από δυναμικές παραμέτρους χωρίζεται με τη σειρά της σε δυο κατηγορίες: διακυμάνσεις που δεν μεταβάλλονται από γεγονός σε γεγονός και άλλες που αντανακλούν κάποια καινούρια φυσική και μπορούν να μεταβάλλονται σε κάθε γεγονός. Οι διακυμάνσεις αυτές ενεργούν κατά διαφορετικό τρόπο σε κάθε παράμετρο που μελετάται σε επίπεδο Event by Event.

Έχει προταθεί, ότι διαδικασίες που ακολουθούν το σχηματισμό του *QGP*, όπως η σκέδαση αδρονίων ή ακόμα η διάσπαση συντονισμών, μπορούν να αποκρύψουν τις διακυμάνσεις που πηγάζουν από την αλλαγή στη φάση της ύλης. Έτσι η εξέλιξη των διακυμάνσεων από τις αρχικές στιγμές της αλληλεπίδρασης μέχρι το freeze-out πρέπει να ληφθεί υπόψη προτού εξαχθούν τα οριστικά συμπεράσματα γύρω από τους μηχανισμούς που τις προκαλούν (διακυμάνσεις που αποδίδονται στην αδρονική φάση ή σε αυτή των αποδεσμευμένων quarks και gluons). Υπάρχουν πολλές παράμετροι που μελετούνται σε επίπεδο Event by

Event . Μερικές από τις κυριότερες θα περιγραφούν εν συντομεία στις επόμενες παραγράφους.

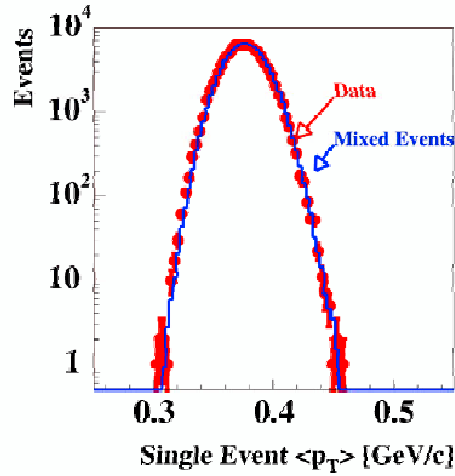
2.1 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΟΡΜΗΣ

$$P_T$$

Η μέση εγκάρσια ορμή των εκπεμπόμενων σωματιδίων σε ένα γεγονός σχετίζεται με τη θερμοκρασία του συστήματος μετά τη σύγκρουση. Έτσι οι διακυμάνσεις της μέσης τιμής του P_T σε επίπεδο **Event by Event** θα είναι ευαίσθητες στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που έχουν προβλεφθεί για τις μεταβολές φάσεις στην *QCD*. Η εξάρτηση της $\langle P_T \rangle$ και οι αντίστοιχες διακυμάνσεις έχει προβλεφθεί ότι παρέχουν ενδείξεις για τη θερμική ισορροπία του συστήματος [9].

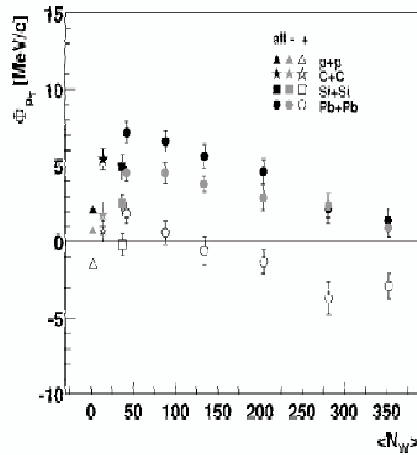
Οι διακυμάνσεις της μέσης τιμής της εγκάρσιας ορμής έχουν μελετηθεί από τα πειράματα *NA49*, *CERES*, *STAR* και *PHENIX*. Το πείραμα *NA49* ήταν το πρώτο που ανέφερε *Gaussian* συμπεριφορά της τιμής της $\langle P_T \rangle$ σε επίπεδο **Event by Event** για τις πλέον κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ στη μέγιστη ενέργεια του *SPS* ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 [10, 11]. Η μελέτη του μέσου αλλά και της διασποράς της κατανομής υποδείκνυε ότι οι μετρούμενες διακυμάνσεις είναι συνεπείς με τις αναμενόμενες διακυμάνσεις, όπως αυτές υπολογίζονται σε στατιστικά μοντέλα παραγωγής σωματιδίων, όταν φαινόμενα βασισμένα στην κβαντική στατιστική, όπως αλληλεπιδράσεις *Coulomb* αλλά και διασπάσεις συντονισμών, ληφθούν υπόψη [12, 13].

Συστηματικές μελέτες των **Event by Event** διακυμάνσεων έχουν γίνει με τη βοήθεια της παραμέτρου Φ [14] αλλά και άλλες σχετικές παραμέτρους [15]. Η παράμετρος Φ επιτρέπει την απομάκρυνση της επίδρασης των ανεπιθύμητων διακυμάνσεων του όγκου του συστήματος που είναι φυσιολογικό να υπάρχουν εξαιτίας των διακυμάνσεων της παραμέτρου κρούσης κάθε αλληλεπίδρασης (διακυμάνσεις στην κεντρικότητα) οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν σε μεταβολές του αριθμού των νουκλεονίων που συμμετέχουν στις συγκρούσεις. Πρέπει να τονιστεί ότι η αναμενόμενη τιμή της παραμέτρου Φ_{P_T} στην περίπτωση της παραγωγής μη συσχετισμένων σωματιδίων είναι κοντά στο 0. Οι τιμές της παραμέτρου αυτής που προκύπτουν για αλληλεπιδράσεις $p+p$ αλλά και πυρήνα-πυρήνα ($C+C$, $Si+Si$ και $Pb+Pb$) σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ φαίνονται στο σχήμα 2.2 ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που συμμε-



Σχήμα 2.1: Οι διακυμάνσεις της μέσης τιμής της εγκάρσιας ορμής για κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ όπως μετρήθηκαν από το πείραμα $NA49$.

τέχουν στις αλληλεπιδράσεις [10]. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της ωκύτητας που ορίζεται από το διάστημα: $4.0 < y < 5.5$. Τα αποτελέσματα φανερώνουν μια σημαντική συνεισφορά μη στατιστικών διακυμάνσεων για τα ελαφριά συστήματα ($C + C$ και $Si + Si$) αλλά και τις περιφερειακές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν παρουσιαστεί από το πείραμα $PHENIX$ του $RHIC$ [16, 17]. Τέλος, σημαντικές διακυμάνσεις σε κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ και $Au + Au$ στις κεντρικές περιοχές της ωκύτητας έχουν αναφερθεί από τα πειράματα $CERES$ του SPS [18] και $STAR$ του $RHIC$ [19, 20] αντίστοιχα.



Σχήμα 2.2: Η εξάρτηση της παραμέτρου Φ_{PT} από τον αριθμό των νουκλεονίων που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση για την ενεργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

2.2 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΟΤΗΤΑΣ

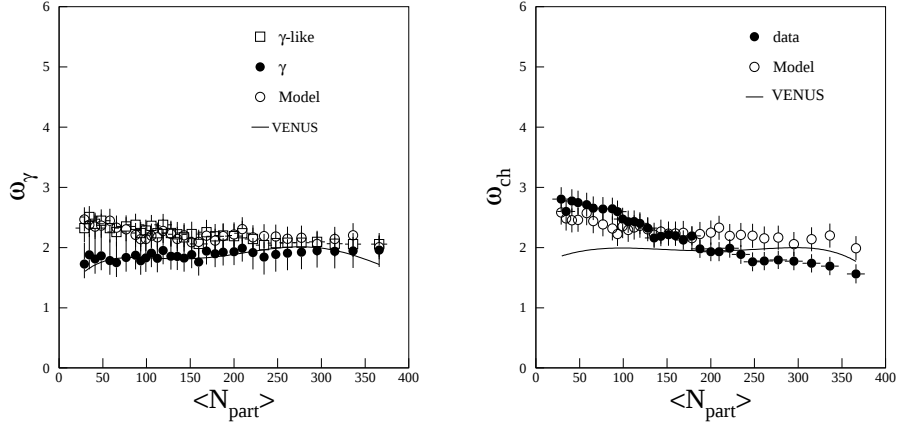
Η πολλαπλότητα των παραγόμενων σωματιδίων είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει το σύστημα που δημιουργείται μετά από μια σύγκρουση βαρέων ιόντων. Οι διακυμάνσεις δε της σωματιδιακής πολλαπλότητας σε επίπεδο *Event by Event* μπορούν να αποτελέσουν ένα άμεσο χαρακτηριστικό της ύπαρξης της φάσης των ελεύθερων *quarks* και *gluons*. Πολλές μέθοδοι προτάθηκαν για τη μελέτη αυτού του είδους των διακυμάνσεων.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι η σωματιδιακή πολλαπλότητα μπορεί να περιγραφεί από *Gaussian* κατανομές, τα πειράματα *NA49* [21] και *WA98* [22] του *SPS* χρησιμοποίησαν τη νορμαλισμένη διασπορά για να χαρακτηρίσουν ποσοτικά τις διακυμάνσεις του αριθμού των παραγόμενων σωματιδίων. Στη βάση ενός απλού μοντέλου που περιγράφει τα συμμετέχοντα σε μια αλληλεπίδραση νουκλεόνια, η πολλαπλότητα των παραγόμενων σωματιδίων μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση 2.1. Έτσι οι διακυμάνσεις μπορούν να μελετηθούν με βάση μια απλή έκφραση όπως αυτή της σχέσης 2.2. Οι διακυμάνσεις της σωματιδιακής πολλαπλότητας για φορτισμένα σωματίδια και φωτόνια σε διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας φαίνονται στο σχήμα 2.3. Τα πειραματικά αποτελέσματα [22] συγκρίνονται με διάφορα μοντέλα όπως το *VENUS*. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται να έρχονται σε συμφωνία με αυτά που προκύπτουν από ένα μοντέλο που περιγράφει τα συμμετέχοντα στην αλληλεπίδραση νουκλεόνια και λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις της παραμέτρου κρούσης.

$$N = \sum_{i=1}^{N_{part}} n_i \quad (2.1)$$

$$\omega_x = \frac{\sigma_x^2}{\langle X \rangle} \quad (2.2)$$

Οι διακυμάνσεις της σωματιδιακής πολλαπλότητας μελετήθηκαν και από το πείραμα *NA49* και τα αντίστοιχα αποτελέσματα δημοσιεύτηκαν πρόσφατα [21]. Στο σχήμα 2.4 φαίνεται η νορμαλισμένη διασπορά ως συνάρτηση της κεντρικότητας της αλληλεπίδρασης για αρνητικά, θετικά αλλά και όλα τα σωματίδια. Στα ίδια σχήματα φαίνονται και οι αντίστοιχες τιμές διαφόρων αδρονικών μοντέλων που μελετήθηκαν. Η παράμετρος αυτή, για τα πειραματικά δεδομένα,

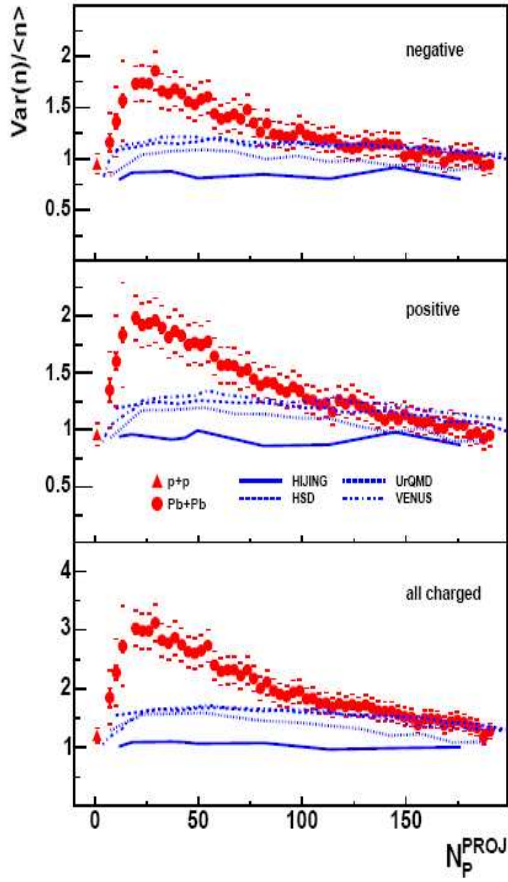


Σχήμα 2.3: Οι διακυμάνσεις της σωματιδιακής πολλαπλότητας για φωτόνια και φορτισμένα σωματίδια ως συνάρτηση του αριθμού των συμμετεχόντων νουκλεονίων όπως μετρήθηκαν από το πείραμα *WA98* σε αλληλεπιδράσεις *Pb + Pb* σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα από ένα μοντέλο που αναπαριστά τη συμπεριφορά των συμμετεχόντων νουκλεονίων αλλά και από το *Venus*.

εμφανίζει μια μη μονοτονική εξάρτηση από την κεντρικότητα, λαμβάνοντας μια μέγιστη τιμή στις πιο περιφερειακές αλληλεπιδράσεις *Pb + Pb*. Αντίθετα, τα μοντέλα που εξετάστηκαν παράγουν σχεδόν *Poissonian* κατανομές πολλαπλότητας με συνέπεια η νορμαλισμένη διασπορά τους να μην εμφανίζει κάποια ιδιαίτερη εξάρτηση από την κεντρικότητα.

2.3 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ K/π

Αρχικές θεωρητικές μελέτες [23, 24] πρότειναν στην περίπτωση της ύπαρξης μεγάλων διαφορών στην ενθαλπεία της αδρονικής ύλης και του *QGP*, την προοπτική της ύπαρξης διακυμάνσεων που θα γίνονταν αντιληπτές κοντά στη θερμοκρασία που θα γινόταν αυτή η μεταβολή στη φάση, δηλαδή κοντά στην κρίσιμη θερμοκρασία T_c . Το γεγονός αυτό επιδέχεται να έχει επίπτωση στο μετρούμενο σε επίπεδο *Event by Event* λόγο του αριθμού των παραγόμενων

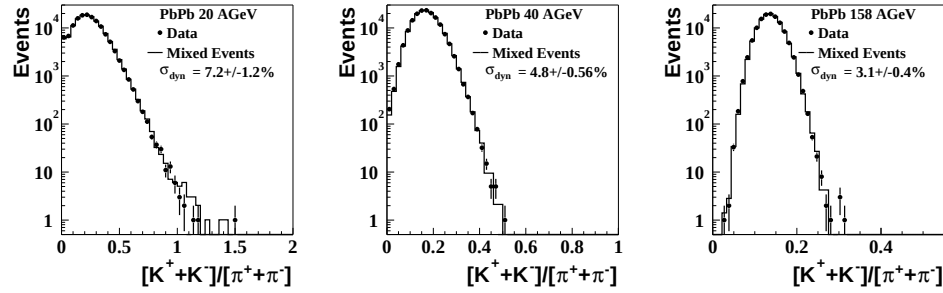


Σχήμα 2.4: Η νορμαλισμένη διασπορά της κατανομής του αριθμού των παραγόμενων σωματιδίων για αρνητικά φορτισμένα (πάνω γράφημα), για θετικά φορτισμένα (μεσαίο γράφημα) και για όλα τα σωματίδια (κάτω γράφημα) σε αλληλεπιδράσεις διαφόρων συστημάτων σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ στο πείραμα *NA49*. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διάφορα αδρονικά μοντέλα.

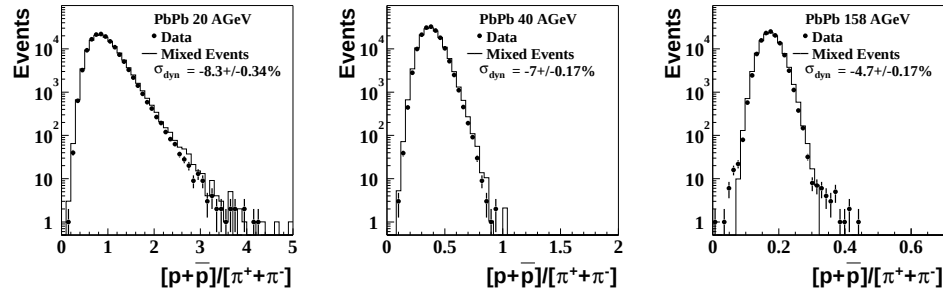
καονίων και πιονίων. Σύγχρονοι υπολογισμοί κάνουν λόγο για διαφορετική συμπεριφορά των διακυμάνσεων που υπολογίζονται σε επίπεδο *Event by Event* κοντά στη συνοριακή γραμμή που διαχωρίζει τις δυο φάσεις αλλά και πιο συγκεκριμένα κοντά στο λεγόμενο *tricritical point*. Έχει προταθεί ότι η παράμετρος εκείνη που είναι πιο ευαίσθητη στη μετάβαση φάσης της *QCD* είναι ο λόγος K/π .

Τόσο το πείραμα *NA49* του *SPS*, όσο και το πείραμα *STAR* του *RHIC* μελέτησαν και δημοσίευσαν τα αποτελέσματά τους γύρω από το μετρούμενο *Event by Event* λόγο αυτό. Πρόσφατες αναλύσεις του λόγου $[K^+ + K^-]/[\pi^+ + \pi^-]$ αλλά και του $[p + \bar{p}]/[\pi^+ + \pi^-]$ πραγματοποιήθηκαν σε κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε ενέργειες σταθερού στόχου 20, 30, 40, 80 και 158 *AGeV* από το πείραμα *NA49* [25, 26, 27, 28]. Σε όλες τις ενέργειες το 3.5% των πιο κεντρικών αλληλεπιδράσεων έχει επιλεγεί. Οι κατανομές των λόγων καονίων

προς πιονίων και πρωτονίων προς πιονίων για ενέργειες 20, 40 και 158 $AGeV$ φαίνονται αντίστοιχα στα σχήματα 2.5 και 2.6. Η συνεισφορά στις κατανομές από διακυμάνσεις στην πολλαπλότητα αλλά και από φαινόμενα που αποδίδονται στον ανιχνευτή απαλείφονται με τη βοήθεια της μεθόδου ανάμιξης γεγονότων (event mixing methods). Τα αναμεμιγμένα γεγονότα χρησιμοποιούν τις ίδιες μεθόδους προσαρμογής όπως και τα πραγματικά γεγονότα.



Σχήμα 2.5: Οι κατανομές του λόγου $[K^+ + K^-]/[\pi^+ + \pi^-]$ για τα πειραματικά δεδομένα και για τα γεγονότα ανάμιξης για τρεις ενέργειες του SPS .

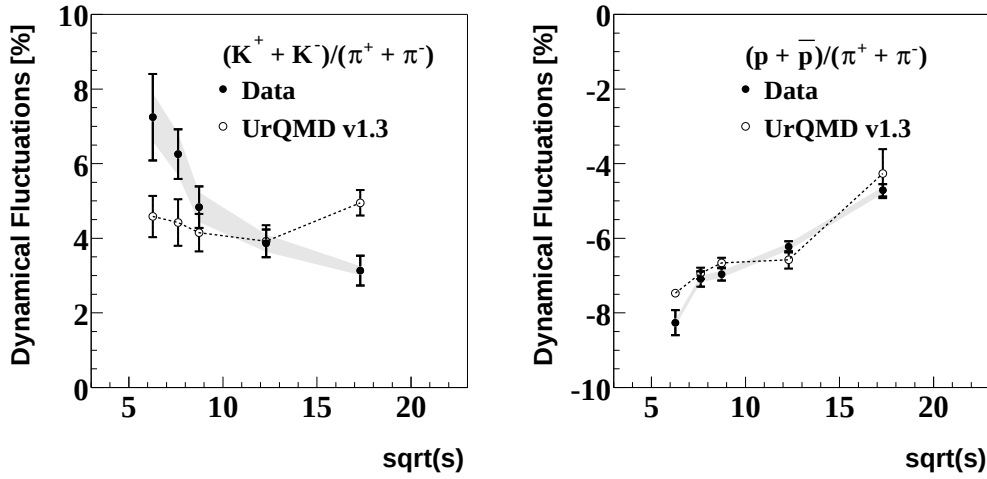


Σχήμα 2.6: Οι κατανομές του λόγου $[p + \bar{p}]/[\pi^+ + \pi^-]$ για τα πειραματικά δεδομένα και για τα γεγονότα ανάμιξης για τρεις ενέργειες του SPS .

Για κάθε δείγμα, η εκτίμηση των δυναμικών διακυμάνσεων δίνεται μέσω της σύγκρισης των ευρών των κατανομών των πραγματικών και των αναμεμιγμένων γεγονότων. Η παράμετρος που προκύπτει καλείται σ_{dyn} και δίνεται από τη σχέση 2.3.

$$\sigma_{dyn.} = \text{sign}(\sigma_{data}^2 - \sigma_{mixed}^2) \sqrt{|\sigma_{data}^2 - \sigma_{mixed}^2|}. \quad (2.3)$$

Το σχήμα 2.7 δείχνει τη συμπεριφορά της παραμέτρου αυτής σε συνάρτηση με την ενέργεια για τους λόγους $[K^+ + K^-]/[\pi^+ + \pi^-]$ (αριστερό γράφημα) και $[p + \bar{p}]/[\pi^+ + \pi^-]$ (δεξί γράφημα). Οι διακυμάνσεις του λόγου K/π είναι θετικές και μειώνονται με την ενέργεια. Αντίθετα, οι διακυμάνσεις του λόγου p/π είναι αρνητικές αφού οι κατανομές των πραγματικών δεδομένων είναι πιο στενές από τις αντίστοιχες των αναμειγμένων. Οι αρνητικές αυτές διακυμάνσεις μπορούν να γίνουν κατανοητές αν ληφθούν υπόψη οι συντονισμοί εκείνοι που διασπώνται σε πρωτόνια και πιόνια. Το επίπεδο των αρνητικών αυτών διακυμάνσεων μπορεί να σχετίζεται με τη σχετική συνεισφορά των προϊόντων των συντονισμών στην τελική κατάσταση μιας αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 2.7: Η ενεργειακή εξάρτηση του σήματος των Event by Event διακυμάνσεων των λόγων $[K^+ + K^-]/[\pi^+ + \pi^-]$ (αριστερό γράφημα) και $[p + \bar{p}]/[\pi^+ + \pi^-]$ (δεξί γράφημα) για τα πειραματικά δεδομένα και για το μοντέλο *UrQMD*. Τα συστηματικά σφάλματα φαίνονται στα σχήματα ως γκρι ζώνες.

Τα δεδομένα συγκρίθηκαν με το string-hadronic model *UrQMD* [29]. Στο μοντέλο αυτό δεν υπεισέρχονται διακυμάνσεις που προέρχονται από μετάβαση φάσης, ενώ οι συντονισμοί καθώς και οι συσχετισμοί σωματιδίων λόγω νόμων

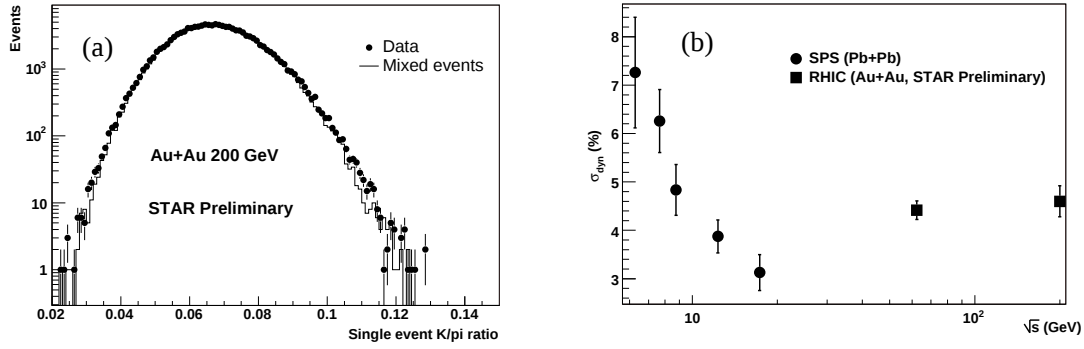
διατήρησης συμπεριλαμβάνονται. Η εξάρτηση από την ενέργεια του λόγου p/π στο *UrQMD* συμπίπτει με την αντίστοιχη συμπεριφορά των πειραματικών δεδομένων όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7. Αυτό αποτελεί ακόμα μια ένδειξη της συσχέτισης των αρνητικών διακυμάνσεων με τη διάσπαση των συντονισμών. Από την άλλη μεριά όμως το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να περιγράψει την συμπεριφορά του λόγου K/π των πειραματικών δεδομένων. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η συνεισφορά των συντονισμών αλλάζει δραματικά με την ενέργεια, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι στο λόγο αυτό οι συντονισμοί δεν συνεισφέρουν σημαντικά στο σήμα.

Το πείραμα *STAR* στο *RHIC* πραγματοποίησε επίσης μια αντίστοιχη μελέτη γύρω από το Event by Event λόγο K/π σε αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 62.4 \text{ GeV}$ και $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ [30]. Το σχήμα 2.8 δείχνει την κατανομή του λόγου K/π για το 5% των πιο κεντρικών αλληλεπιδράσεων $Au + Au$ στη μέγιστη ενέργεια του *RHIC*. Οι κατανομές τόσο των πειραματικών δεδομένων, όσο και των αναμεμιγμένων γεγονότων παρουσιάζονται για καλύτερη σύγκριση. Το πείραμα *STAR* μέτρησε επίσης τους λόγους K^+/π^+ και K^-/π^- και κατέληξε στις τιμές: $\sigma_{dyn.} = 3.06 \pm 0.88\%$ και $\sigma_{dyn.} = 3.61 \pm 0.67\%$ αντίστοιχα. Στο σχήμα 2.8 φαίνεται η εξάρτηση της παραμέτρου $\sigma_{dyn.}$ από την ενέργεια. Παρατηρείται μια μέγιστη τιμή της παραμέτρου για τη μικρότερη ενέργεια του *SPS* ενώ, όπως είδαμε και πιο πριν, ακολουθεί μια πτώση [28, 31] μέχρι τη μέγιστη ενέργεια του *SPS*. Για τις μεγαλύτερες ενέργειες του *RHIC* παρατηρείται μια επιπλέον αύξηση.

2.4 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μελέτης διακυμάνσεων ποσοτήτων που διατηρούνται είναι ότι ο χρόνος εφησυχασμού σε ένα θερμικό σύστημα είναι πιο μεγάλος από τον αντίστοιχο χρόνο ποσοτήτων που δεν διατηρούνται. Ως συνέπεια, οι διακυμάνσεις των διατηρούμενων παραμέτρων, όπως το ηλεκτρικό φορτίο ή και ο βαρυονικός αριθμός, μπορούν ενδεχομένως να παρέχουν πληροφορία που προέρχεται απευθείας από τις αρχικές στιγμές του συστήματος που δημιουργείται μετά από μια σύγκρουση πυρήνων σε υψηλές ενέργειες, στιγμές κατά τις οποίες κυριαρχούν διαφορετικοί βαθμοί ελευθερίας.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα των μελετών των διακυμάνσεων του ηλεκτρικού φορτίου αλλά και του βαρυονικού αριθμού είναι η ευαισθησία αυτών των μεγεθών στο κλασματικό φορτίο που έχουν τα *quarks*, με συνέπεια να προσφέρουν μια ακόμα ένδειξη της ύπαρξης της φάσης των ελεύθερων *quarks* και *gluons*.



Σχήμα 2.8: (a) Η κατανομή του λόγου K/π για τα πειραματικά δεδομένα και τα γεγονότα ανάμιξης σε αλληλεπιδράσεις $Au+Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$. (b) Η ενεργειακή εξάρτηση του σήματος των Event by Event διακυμάνσεων των λόγων K/π για ενέργειες που ξεκινούν από το SPS και καταλήγουν στο RHIC.

Η διατήρηση του συνολικού φορτίου φυσικά οδηγεί στην εξαφάνιση των όποιων διακυμάνσεων φορτίου υπάρχουν αν όλο το σύστημα ληφθεί υπόψη.

Οι διακυμάνσεις του ηλεκτρικού φορτίου μπορούν να εκφραστούν από τη σχέση 2.4:

$$\langle (\delta Q)^2 \rangle = \langle Q^2 \rangle - \langle Q \rangle^2, \quad (2.4)$$

όπου Q είναι το καθαρό φορτίο που μετρείται στην περιοχή που καλύπτει ο ανιχνευτής. Στην περίπτωση ύπαρξης QGP οι διακυμάνσεις του καθαρού ηλεκτρικού φορτίου εξαρτώνται από το τετράγωνο των κλασματικών φορτίων των quarks. Για να αναδείξουμε αυτή την εξάρτηση, πρέπει να διαιρέσουμε την παράμετρο $\langle (\delta Q)^2 \rangle$ με τον αριθμό των σωματιδίων ή ακόμα με την εντροπία του συστήματος. Μια καλή προσέγγιση της εντροπίας δίνεται από τον αριθμό των φορτισμένων σωματιδίων της τελικής κατάστασης, οπότε η παράμετρος 2.5 πρέπει να είναι ευαίσθητη στην ύπαρξη κλασματικών φορτίων και κατά συνέπεια στην ύπαρξη της φάσης QGP .

$$\frac{\langle (\delta Q)^2 \rangle}{\langle N_{ch.} \rangle} \quad (2.5)$$

Πραγματικά, αν κάποιος αντικαταστήσει $N_{ch.} \approx N_q + N_g$, όπου N_g ο αριθμός των **gluons** τότε για την περίπτωση του QGP και του αερίου πιονίων έχουμε αντίστοιχα:

$$\frac{\langle (\delta Q)^2 \rangle}{\langle N_{ch.} \rangle_{QGP}} \approx 0.2 \quad (2.6)$$

$$\frac{\langle (\delta Q)^2 \rangle}{\langle N_{ch.} \rangle_{\pi-gas}} = 1 \quad (2.7)$$

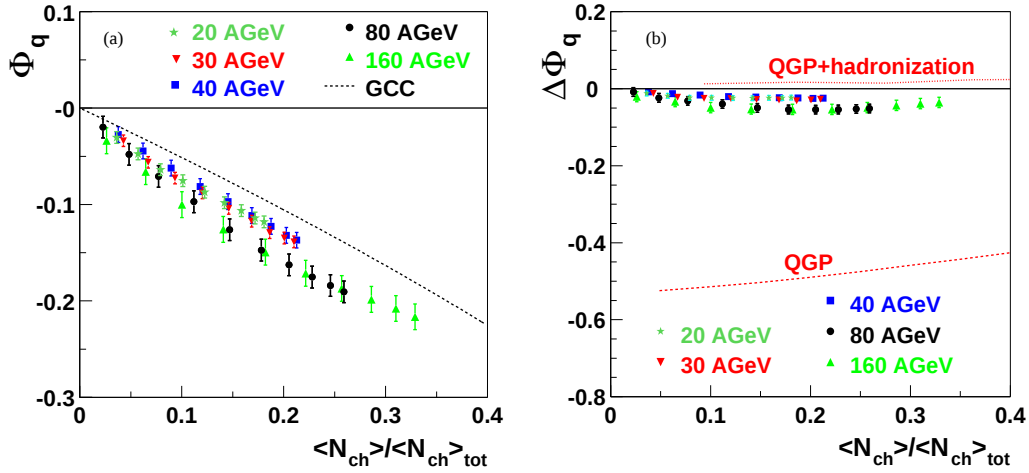
Αν κάποιος επιβάλλει και τις κατάλληλες διορθώσεις λόγω κβαντικής στατιστικής αλλά και αν ληφθούν υπόψη οι διασπάσεις των συντονισμών, τότε για αέριο αδρονίων αλλά και για την περίπτωση του QGP [32] έχουμε:

$$\frac{\langle (\delta Q)^2 \rangle}{\langle N_{ch.} \rangle_{hadrongas}} \approx 0.75 \quad (2.8)$$

$$\frac{\langle (\delta Q)^2 \rangle}{\langle N_{ch.} \rangle_{QGP}} \approx 0.25 - 0.4 \quad (2.9)$$

Για να μελετήσει κανείς πειραματικά την πιο πάνω παράμετρο δεν είναι επαρκές να μετρήσει απλά τις διακυμάνσεις του καθαρού φορτίου και τον αριθμό των παραγόμενων φορτισμένων σωματιδίων ξεχωριστά. Οι διακυμάνσεις του καθαρού φορτίου εξαρτώνται άμεσα από το μέγεθος του συστήματος και κατά συνέπεια από τις αντίστοιχες διακυμάνσεις της τιμής της παραμέτρου κρούσης μιας αλληλεπίδρασης. Έτσι το φαινόμενο των διακυμάνσεων του όγκου πρέπει με κάποιο τρόπο να απαληφθεί.

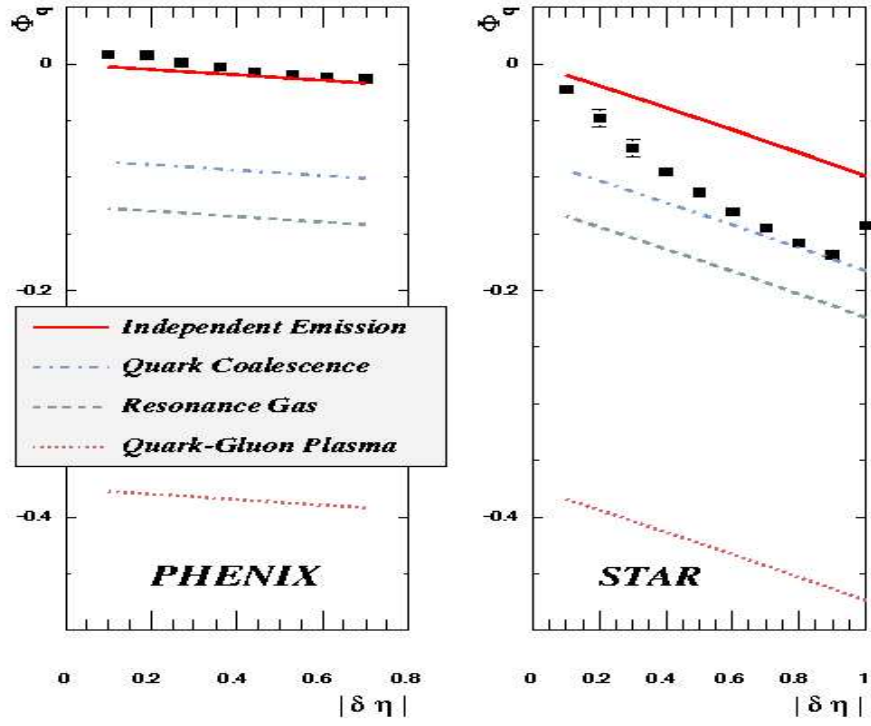
Με βάση όλο τον πιο πάνω φορμαλισμό αλλά και τις παρατηρούμενες δυσκολίες, οι διακυμάνσεις του καθαρού ηλεκτρικού φορτίου μελετήθηκαν και τα αρχικά αποτελέσματα [33, 34, 35, 36] έδειξαν ότι στις διακυμάνσεις αυτές κυριαρχεί το φαινόμενο της διατήρησης του ολικού φορτίου [37, 38, 39] και ότι άλλες συνεισφορές, αν υπάρχουν, είναι μικρές. Οι Event by Event διακυμάνσεις του καθαρού φορτίου αναμένονται να έχουν μικρή τιμή στην περίπτωση αλλαγής φάσης [40, 32].



Σχήμα 2.9: Η εξάρτηση των Φ_q και $\Delta\Phi_q$ από το λόγο των σωματιδίων που αναλύονται για κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ στις ενέργειες του *SPS*.

Διαφορετικές παράμετροι για τη μελέτη των διακυμάνσεων αυτών έχουν προταθεί από τα πειράματα *NA49*, *PHENIX* και *STAR*. Μια από αυτές είναι η παράμετρος $\Delta\Phi_q$, που χρησιμοποιείται από το πείραμα *NA49* και ορίζεται ως: $\Delta\Phi_q = \Phi_q - \Phi_{q,GCC}$. Η παράμετρος Φ_q βασίζεται στο γνωστό μέγεθος Φ των διακυμάνσεων *Event by Event* [41, 37] ενώ η $\Phi_{q,GCC}$ είναι η τιμή της Φ_q στην περίπτωση που τα σωματίδια είναι συσχετισμένα μόνο από την ύπαρξη της διατήρησης του ολικού φορτίου [37].

Το σχήμα 2.9 δείχνει την εξάρτηση της Φ_q και $\Delta\Phi_q$ από το λόγο $\langle N_{ch} \rangle / \langle N_{ch} \rangle_{total}$ για τις κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ όλων των ενεργειών του *SPS* [42]. Παρατηρείται μια συνεχής μείωση της Φ_q καθώς ο λόγος του αριθμού των σωματιδίων που αναλύονται μεγαλώνει. Αυτό μπορεί να αποδοθεί εισάγωντας τη διατήρηση του ολικού φορτίου σαν τη μόνη πηγή συσχετισμών. Από την άλλη μεριά, οι τιμές της $\Delta\Phi_q$ είναι κοντά στο 0 όπως αναμενόταν για αέριο πιονίων που σχετίζονται μόνο από τη διατήρηση του ολικού φορτίου [38]. Τα αποτελέσματα από ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τη διάσπαση συντονισμών [42, 37] δείχνουν ότι η διάσπαση του ρ μεσονίου οδηγεί στην αύξηση των αρχικών (στη φάση *QGP*) διακυμάνσεων στην τιμή $\Delta\Phi_q \approx 0$ και κατά συνέπεια να σκεπάσει την ανάδειξη της ύπαρξης της φάσης αυτής στο *SPS*.



Σχήμα 2.10: Αποτελέσματα των διακυμάνσεων του καθαρού φορτίου από το πείραμα *PHENIX* [34] και *STAR* [35] για αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 130 GeV$.

Στο *RHIC*, τόσο το πείραμα *PHENIX* όσο και το *STAR* μελέτησαν τις διακυμάνσεις του καθαρού φορτίου σε αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 130 GeV$. Στο πείραμα *PHENIX* οι διακυμάνσεις μελετήθηκαν μέσω της παραμέτρου [34]:

$$V(Q) = \langle Q^2 \rangle - \langle Q \rangle^2 = n_{ch} \quad (2.10)$$

Τα πειραματικά δεδομένα δεν δείχνουν κάποια εξάρτηση από την κεντρικότητα, ενώ παράλληλα συμφωνούν με τους υπολογισμούς με βάση το μοντέλο *RQMD*.

Το πείραμα *STAR* μελέτησε τις διακυμάνσεις με τη βοήθεια της παραμέτρου [15]:

$$\nu_{+-} = \langle \left(\frac{N_+}{\langle N_+ \rangle} - \frac{N_-}{\langle N_- \rangle} \right)^2 \rangle. \quad (2.11)$$

Οι δυναμικές διακυμάνσεις ορίζονται ως: $\nu_{+-,dyn.} = \nu_{+-} - \nu_{+-,stat.}$, όπου:

$$\nu_{+-,stat.} = \frac{1}{\langle N_+ \rangle} + \frac{1}{\langle N_- \rangle}. \quad (2.12)$$

Οι δυναμικές διακυμάνσεις στο 5% των πιο κεντρικών αλληλεπιδράσεων είναι [35]:

$$\nu_{+-,dyn.} = -0.00236 \pm 0.00006(stat.) \pm 0.00012(syst.). \quad (2.13)$$

Το αποτέλεσμα αυτό συγκρίθηκε με το αντίστοιχο του πειράματος *PHENIX* [34] αλλάζοντας την έκφραση του $v(Q)$ ώστε να ληφθούν υπόψη φαινόμενα αποδοχής [15]:

$$\nu_{+-,stat.} = \frac{4}{N_+ + N_-} (v(Q) - 1), \quad (2.14)$$

που δίνει:

$$\nu_{+-,dyn.} = -0.0018 \pm 0.0004(stat.) \pm 0.0009(syst.). \quad (2.15)$$

τιμή που έρχεται σε συμφωνία με την τιμή που παρουσίασε το *STAR* για το 11% των πιο κεντρικών αλληλεπιδράσεων. Το σχήμα 2.10 δίνει τα αποτελέσματα των πειραμάτων *PHENIX* και *STAR* [43] εκφρασμένα με την παράμετρο Φ_q .

Σε αυτό το κεφάλαιο προσπαθήσαμε να καλύψουμε και να περιγράψουμε την υπάρχουσα κατάσταση από πλευράς πειραματικών αποτελεσμάτων στο μεγάλο αυτό πεδίο των Event by Event μελετών. Οι κύριες παράμετροι και τα κύρια μεγέθη με τα οποία τα πειράματα προσπαθούν να αναδείξουν τις όποιες διακυμάνσεις, δεν είχαν καταστήσει, τουλάχιστον μέχρι τη στιγμή που γραφόταν αυτό το κείμενο, δυνατή την εξαγωγή κάποιων ασφαλών συμπερασμάτων. Αυτό είναι λογικό αν αναλογιστεί κανείς την πολυπλοκότητα των συστημάτων αλλά και την πληθώρα των μηχανισμών που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο των Event by Event μελετών, αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια μια καινούρια μέθοδος που καλείται Συνάρτηση Ισοζυγίου Φορτίου (Balance Function) και που είναι το κύριο θέμα της διατριβής αυτής. Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι η ανάδειξη συσχετισμών μεταξύ των εξεταζόμενων σωματιδίων σε επίπεδο Event by Event . Στο επόμενο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη θεμελίωση, τον ορισμό και τις ιδιότητες της Balance Function .

Κεφάλαιο 3

ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ - **BALANCE FUNCTION**

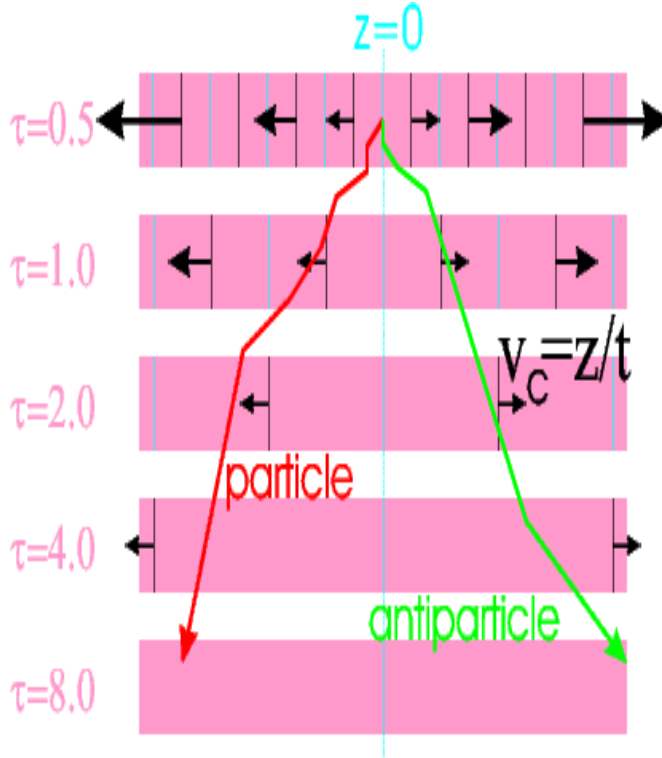
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια νέα μέθοδος, η συνάρτηση ισοζυγίου (Balance Function - BF), έχει εισαχθεί από τους Bass, Danielewicz και Pratt [1], με τη βοήθεια της οποίας κάποιος μπορεί να εξάγει συγκριτικά πληροφορία για το χρόνο της αδρονοποίησης των σωματιδίων μετά από μια σύγκρουση ιόντων. Η Balance Function είχε χρησιμοποιηθεί για πρώτη φορά στη μελέτη συσχετισμών φορτίου σε αλληλεπιδράσεις $p + p$ στο ISR [2] και $e^- + e^+$ στο PETRA [3]. Πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του πειράματος STAR στο RHIC-Brookhaven, ώστε να μελετηθούν οι συσχετίσεις φορτίου που προέρχονται από αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 130 GeV$ [4]. Παράλληλα, το πείραμα NA49 στο SPS-CERN χρησιμοποίησε τη συνάρτηση ισοζυγίου για να μελετήσει τις συσχετίσεις φορτίου σε αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$, $Si + Si$, $C + C$ αλλά και $p + p$ σε διάφορες ενέργειες από $\sqrt{s_{NN}} = 6.3 GeV$ μέχρι $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ [5].

Η συσχέτιση μεταξύ της φυσικής διαδικασίας αδρονοποίησης και του χρόνου αδρονοποίησης των σωματιδίων μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά στο σχήμα 3.1:

Κατά την αλληλεπίδραση, ζεύγη αντιθέτων φορτισμένων σωματιδίων σχηματίζονται στο ίδιο σημείο του χωρόχρονου και συσχετίζονται ως προς την ορμή τους. Τα ζεύγη που έχουν δημιουργηθεί 'νωρίς', διαχωρίζονται αρκετά

στο φασικό χώρο κυρίως λόγω του ότι η φάση κατά την οποία τα σωματρία αυτά αλληλεπιδρούν με τα υπόλοιπα του συστήματος (σκεδάσεις, δευτερεύουσες αλληλεπιδράσεις κ.α.) διαρκεί πολύ. Αντίθετα, ζεύγη που δημιουργούνται πιο ‘αργά’ διαχωρίζονται λιγότερο ως προς την ορμή τους. Έτσι η συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου μπορεί να δώσει ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα για το εύρος του διαχωρισμού.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα που αναπαριστά τη εξέλιξη στο χώρο και στο χρόνο του διαχωρισμού των παραγομένων σωματιδίων μετά από μια σύγκρουση ιόντων.

3.1.1 Ορισμοί

Η συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου BF, ορίζεται ως η διαφορά των συναρτήσεων συσχετισμού (correlation functions) αντίθετα και όμοια φορτισμένων σωματιδίων, κανονικοποιημένη στον ολικό αριθμό των φορτισμένων σωματιδίων. Στην πιο γενική της μορφή δίνεται από τη σχέση 3.1 ([1]):

$$B(P_2|P_1) = \frac{1}{2} \left[\rho(b, P_2|a, P_1) - \rho(b, P_2|b, P_1) + \right.$$

$$\rho(a, P_2|b, P_1) - \rho(a, P_2|a, P_1) \Big] \quad (3.1)$$

$$\rho(b, P_2|a, P_1) = \frac{N(b, P_2|a, P_1)}{N(a, P_1)} \quad (3.2)$$

Ο όρος $\rho(b, P_2|a, P_1)$ (Σχέση 3.2) εκφράζει τη συνάρτηση πιθανότητας ώστε να παρατηρήσουμε ένα σωματίο τύπου b σε μια διαμέριση P_2 ενώ ήδη υπάρχει ένα σωματίο τύπου a σε μια διαμέριση P_1 . Οι P_1 και P_2 μπορούν να είναι διαμερίσεις της ορμής των σωματιδίων (για παράδειγμα ψευδο-ωκύτητα ή ωκύτητα). Έτσι, αν αναφερόμαστε σε συσχετισμούς φορτισμένων μη ταυτοποιημένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα, τότε η σχέση 3.1 παίρνει τη μορφή:

$$B(\Delta\eta) = \frac{1}{2} \left[\frac{N_{+-}(\Delta\eta) - N_{--}(\Delta\eta)}{N_-} + \frac{N_{-+}(\Delta\eta) - N_{++}(\Delta\eta)}{N_+} \right]. \quad (3.3)$$

Κατά εντελώς αντίστοιχο τρόπο, στην περίπτωση ταυτοποιημένων σωματιδίων, η σχέση 3.1 παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$B(\Delta y) = \frac{1}{2} \left[\frac{N_{+-}(\Delta y) - N_{--}(\Delta y)}{N_-} + \frac{N_{-+}(\Delta y) - N_{++}(\Delta y)}{N_+} \right]. \quad (3.4)$$

Στις πιο πάνω σχέσεις, η διαμέριση P_2 αναφέρεται στη σχετική (ψευδο)ωκύτητα των αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων ($\Delta\eta = |\eta_b - \eta_a|$ ή $\Delta y = |y_b - y_a|$), ενώ η P_1 μπορεί να αναφέρεται σε όλο το εύρος της κατανομής της (ψευδο)ωκύτητας. Αν εφαρμοστεί αυτός ο φορμαλισμός, τότε η συνάρτηση ισοζυγίου εκφράζει την πιθανότητα να διαχωρίζονται τα ζεύγη στον αντίστοιχο φασικό χώρο κατά $\Delta\eta$ ή Δy .

Όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια, η **Balance Function** παρέχει τη δυνατότητα να μελετηθεί ως συνάρτηση και άλλων παραμέτρων. Έτσι, έχει προταθεί η μελέτη της **Balance Function** ως συνάρτηση της σχετικής αναλλοίωτης ορμής και των αντίστοιχων συνιστωσών της [6]. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα να απομονωθούν μηχανισμοί στους οποίους, όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια, έχει αποδωθεί μέρος της εξάρτησης από την κεντρικότητα της **Balance Function**. Ένας από αυτούς τους μηχανισμούς είναι η εγκάρσια ροή του συστήματος. Η σχετική ορμή δυο σωματιδίων δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}
q_\alpha &= (p_{a,\alpha} - p_{b,\alpha}) - P_\alpha \frac{P \cdot (p_a - p_b)}{P^2} \\
&= (p_{a,\alpha} - p_{b,\alpha}) - P_\alpha \frac{(m_a^2 - m_b^2)}{s}
\end{aligned}$$

όπου P είναι η ολική ορμή του ζεύγους των σωματιδίων και $\sqrt{s} = \sqrt{(p_a + p_b)^2}$ η ενέργεια στο κέντρο μάζας τους. Έτσι η αναλλοίωτη ορμή δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{inv.}^2 = -q^2 = -(p_a - p_b)^2 + \frac{(m_a^2 - m_b^2)^2}{P^2}. \quad (3.5)$$

Στην περίπτωση βέβαια που μιλάμε για σωματίδια με ίδια μάζα ο δεύτερος όρος της 3.5 παύει να υφίσταται. Ακολουθώντας το παράδειγμα των μελετών γύρω από συσχετισμούς πιονίων (HBT) [7], μπορούμε να ορίσουμε τις αντίστοιχες συνιστώσες της αναλλοίωτης ορμής στον άξονα της δέσμης $Q_{long.}$, στην κατεύθυνση της εγκάρσιας ορμής του ζεύγους Q_{out} , καθώς και στην κάθετη διεύθυνση προς το επίπεδο που ορίζουν τόσο ο άξονας της δέσμης, όσο και η εγκάρσια ορμή του ζεύγους, Q_{side} . Για τις ορμές στο σύστημα του εργαστηρίου P και q , οι τρεις αυτές συνιστώσες παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$Q_{long.} = \frac{1}{\sqrt{s + P_t^2}} (P_0 q_z - P_z q_0). \quad (3.6)$$

$$Q_{out} = \frac{(P_x q_y - P_y q_x)}{P_t}. \quad (3.7)$$

$$Q_{side} = \sqrt{\frac{s}{s + P_t^2}} \frac{(P_x q_x + P_y q_y)}{P_t}. \quad (3.8)$$

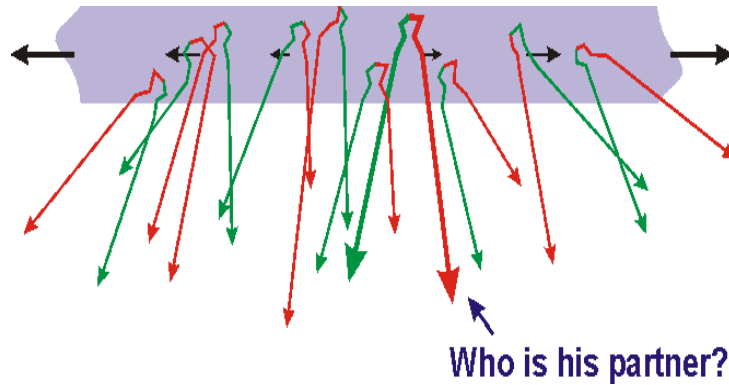
Αν υιοθετηθεί αυτός ο φορμαλισμός, τότε η συνάρτηση ισοζυγίου παίρνει τη μορφή:

$$B(Q_{inv.}) = \frac{1}{2} \left[\frac{N_{+-}(Q_{inv.}) - N_{--}(Q_{inv.})}{N_-} + \frac{N_{-+}(Q_{inv.}) - N_{++}(Q_{inv.})}{N_+} \right]. \quad (3.9)$$

Κατά εντελώς αντίστοιχο τρόπο, ορίζεται η **Balance Function** ως συνάρτηση των υπολοίπων συνιστωσών της αναλλοίωτης ορμής $Q_{long.}$, Q_{out} και Q_{side} .

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα να μελετηθεί η **Balance Function** για διάφορους τύπους σωματιδίων: μπορεί να διαχωρίζονται ως προς το φορτίο, ως προς το αν περιέχουν ένα παράδοξο (s) quark ή ένα $\bar{s}$ quark ή ακόμα αν πρόκειται για $ze'ugh$ baruon'iou - antibaruon'iou [1, 4, 8].

Η συνάρτηση πιθανότητας $\rho(b, P_2|a, P_1)$ υπολογίζεται αν πρώτα καταμετρήσουμε τα ζεύγη των σωματιδίων a και b , τα οποία πληρούν και τα δυο κριτήρια $N(b, P_2|a, P_1)$ και διαιρέσουμε με τον αριθμό των σωματιδίων που πληρεί το κριτήριο $N(a, P_1)$: Πρέπει να τονιστεί ότι τόσο ο αριθμητής, όσο και ο παρονομαστής της συνάρτησης πιθανότητας, αθροίζονται σε όλα τα γεγονότα της ανάλυσης, ενώ ο αριθμητής συνδέει ζεύγη μόνο του ίδιου γεγονότος. Το τελευταίο σημαίνει ότι οι συνδυασμοί των σωματιδίων που μας δίνουν τον αριθμητή περιορίζονται μόνο στο ίδιο το γεγονός, παρά το ότι στο τέλος αθροίζουμε όλους τους αριθμητές πριν διαιρέσουμε για να υπολογίσουμε τη συνάρτηση ισοζυγίου.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα που αναδεικνύει το κίνητρο για την εφαρμογή της **Balance Function**.

Η συνάρτηση ισοζυγίου είναι κανονικοποιημένη στη μονάδα αν τα σωματίδια a και b αναφέρονται σε όλα τα σωματίδια που διατηρούν το συνολικό αρχικό φορτίο:

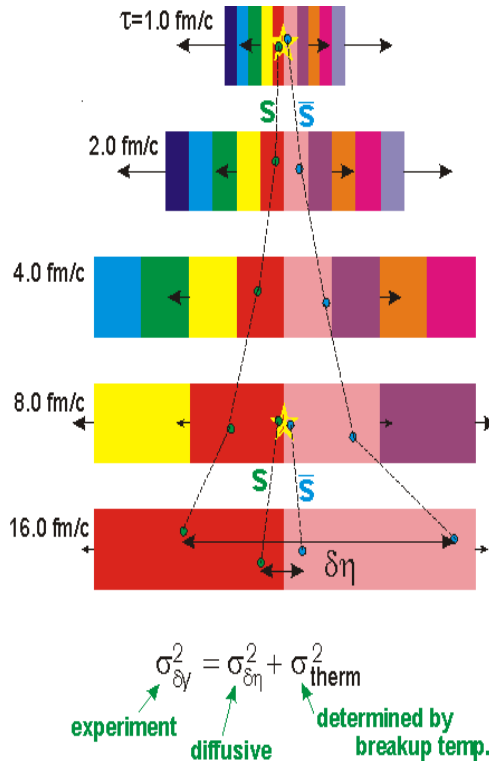
$$\sum_{P_2} B(P_2|P_1) = \frac{1}{2} [M_b - (M_b - 1) + M_a - (M_a - 1)] = 1 \quad (3.10)$$

όπου M_a και M_b είναι οι μέσες τιμές των πολλαπλοτήτων των σωματιδίων τύπου a και b .

Η κανονικοποίηση αυτή επηρεάζεται και από την επίδραση της ικανότητας που έχει ο εκάστοτε ανιχνευτής στο να καταγράφει σωματίδια στις διάφορες περιοχές του φασικού χώρου (acceptance). Αυτό φαίνεται ακόμα και από τον ορισμό της συνάρτησης ισοζυγίου $B(P_2|P_1)$. Έτσι αν η διαμέριση είναι αυτή του πιο πάνω παραδείγματος (η P_2 αναφέρεται στη σχετική ωχύτητα ενώ η P_1 σε όλο το εύρος της κατανομής της που μετρά ο ανιχνευτής μας), τότε η συνάρτηση ισοζυγίου παίρνει τη μορφή $B(\Delta y|Y)$ όπου $Y = y_{max} - y_{min}$ το εύρος της κατανομής που μετρά ο ανιχνευτής. Σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση ισοζυγίου τείνει στο μηδέν όταν το Δy τείνει στο Y . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σωματίδιο που πληρεί τη συνθήκη P_1 βρίσκεται στο άκρο της κατανομής της ωχύτητας, ενώ το δεύτερο σωματίδιο βρίσκεται στο ακριβώς αντίθετο άκρο ώστε η σχετική τους ωχύτητα να είναι $\Delta y \approx Y$, ενώ και τα δύο βρίσκονται μέσα στην περιοχή που μετρά ο ανιχνευτής.

Η πιο σημαντική παράμετρος της συνάρτησης ισοζυγίου είναι το εύρος της αντίστοιχης κατανομής. Το εύρος αυτό σχετίζεται με το χρόνο κατά τον οποίο πραγματοποιήθηκε η αδρονοποίηση (Σχήμα 3.3). Έτσι, αν έχουμε μια κατανομή με μεγάλο εύρος, αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαδικασία της παραγωγής των αδρονίων πραγματοποιήθηκε στα αρχικά στάδια μετά την αλληλεπίδραση. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου θα έχουμε μια σχετικά στενή κατανομή, θα οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι η αδρονοποίηση πραγματοποιήθηκε αρκετά πιο αργά από τη χρονική στιγμή $t_0 = 0$ κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η αλληλεπίδραση. Αυτό ίσως αποτελέσει μια ένδειξη ότι στον ενδιάμεσο χρόνο που μεσολάβησε από την πραγματοποίηση της αλληλεπίδρασης μέχρι την παραγωγή των αδρονίων (formation time), υπήρξε μια αλλαγή φάσης από την ύλη που περιέχει ελεύθερα quarks και gluons (QGP) και έπειτα πάλι σε αδρονική ύλη.

Το εύρος της κατανομής της συνάρτησης ισοζυγίου μπορεί να επηρεαστεί από δυο κύριους παράγοντες [1]:



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα που αναδεικνύει τις συνιστώσες που επηρεάζουν το εύρος της κατανομής της Balance Function .

- Το διαχωρισμό των παραγόμενων αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων ως προς την ωκύτητά τους λόγω της μεγάλης τιμής της αρχικής θερμοκρασίας (θερμοκρασία μετά την αλληλεπίδραση).
- Τις δευτερεύουσες αλληλεπιδράσεις των παραγόμενων σωματιδίων (σκεδάσεις κ.ο.κ) που οδηγούν στον επιπλέον διαχωρισμό τους ως προς την ωκύτητά τους.

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι το συνολικό θεωρητικό εύρος θα πρέπει να έχει τουλάχιστον δυο συνιστώσες και κατά συνέπεια θα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\delta n}^2 = \sigma_T^2 + \sigma_{diff}^2. \quad (3.11)$$

Κάθε όρος της 3.11 περιγράφει τους δυο διαφορετικούς μηχανισμούς. Ο όρος σ_T^2 αναφέρεται στη συνιστώσα του εύρους λόγω της θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιήθηκε η αδρονοποίηση. Η σχέση που συνδέει τα δυο μεγέθη είναι η ακόλουθη [1]:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{2T}{m}} \quad (3.12)$$

όπου T η θερμοκρασία και m η μάζα του παραγόμενου σωματιδίου. Αν λοιπόν η θερμοκρασία είναι μεγάλη το εύρος θα είναι επίσης μεγάλο και η αδρονοποίηση θα πραγματοποιείται αμέσως μετά την αλληλεπίδραση. Στην αντίθετη περίπτωση της μικρής θερμοκρασίας, το εύρος θα είναι πιο μικρό με συνέπεια να μιλάμε για μια επιπλέον φάση που δημιουργήθηκε στο μεσοδιάστημα. Από την άλλη μεριά, ο ρόλος του δεύτερου όρου (σ_{diff}^2) είναι να οδηγεί σε κάθε περίπτωση σε αύξηση του εύρους της κατανομής. Στην πραγματικότητα το εύρος της συνάρτησης ισοζυγίου εξαρτάται και από άλλους παράγοντες στους οποίους θα αναφερθούμε παρακάτω.

Σε αυτή τη διατριβή το εύρος υπολογίζεται από την ίδια την κατανομή της Balance Function εκτός και αν τονίζεται κάποιος άλλος τρόπος (fitting procedure). Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που μελετάμε συσχετισμούς στην (ψευδο)ωκύτητα, το εύρος θα υπολογίζεται από τις σχέσεις αντίστοιχα:

$$\langle \Delta\eta \rangle = \sum_{i=0} B_i \Delta\eta_i / \sum_{i=0} B_i \quad (3.13)$$

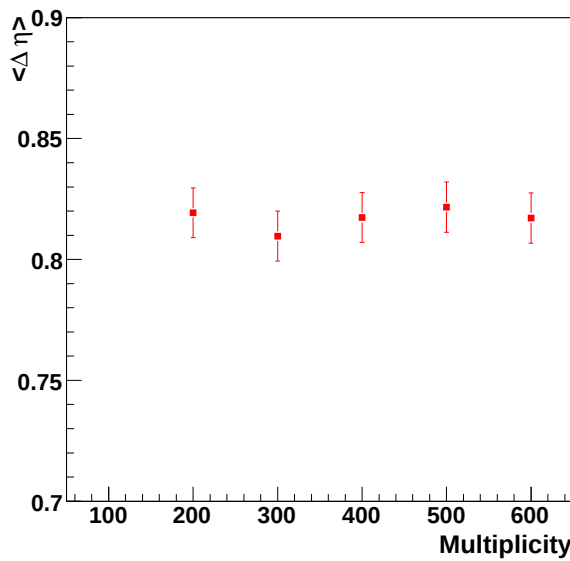
$$\langle \Delta y \rangle = \sum_{i=0} B_i \Delta y_i / \sum_{i=0} B_i \quad (3.14)$$

3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

Το πρώτο στάδιο της παρούσας εργασίας αφορά τη μελέτη των ιδιοτήτων της συνάρτησης ισοζυγίου με ένα απλό πρότυπο μοντέλο (toy model) που αναπτύξαμε. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργούμε αντίθετα φορτισμένα σωματίδια, η πολλαπλότητα των οποίων ήταν η πρώτη ελεύθερη παράμετρος. Τα σωματίδια αυτά, που αποτελούσαν το μη συσχετισμένο υπόβαθρο μας, κατανέμονταν στο φασικό χώρο (η, P_T) τυχαία. Η κατανομή της ψευδοωκύτητας είχε παραμετροποιηθεί και ακολουθούσε μια Gaussian κατανομή, της οποίας το εύρος ήταν μια ακόμη ελεύθερη παράμετρος. Τέλος, υπήρχε η δυνατότητα να προσθέσουμε

σε επίπεδο γεγονός ανά γεγονός, ‘συσχετισμένα σωματίδια’ αντίθετου φορτίου. Αυτά ακολουθούσαν μια αρκετά πιο στενή κατανομή από ότι το υπόβαθρο, ενώ για κάθε θετικό (αρνητικό) σωματίο που αποκτούσε την τιμή ψευδοωκύτητας $\langle \eta \rangle + \epsilon$, το αρνητικό (θετικό) αποκτούσε την τιμή $\langle \eta \rangle - \epsilon$: τοποθετούνται δηλαδή συμμετρικά ως προς το κέντρο της κατανομής της ψευδοωκύτητας του υποβάθρου. Σε αυτή τη βάση, έγινε μια εκτενής μελέτη γύρω από την απόκριση της μεθόδου στη μεταβολή διαφόρων παραμέτρων.

3.2.1 Εξάρτηση από τη σωματιδιακή πολλαπλότητα

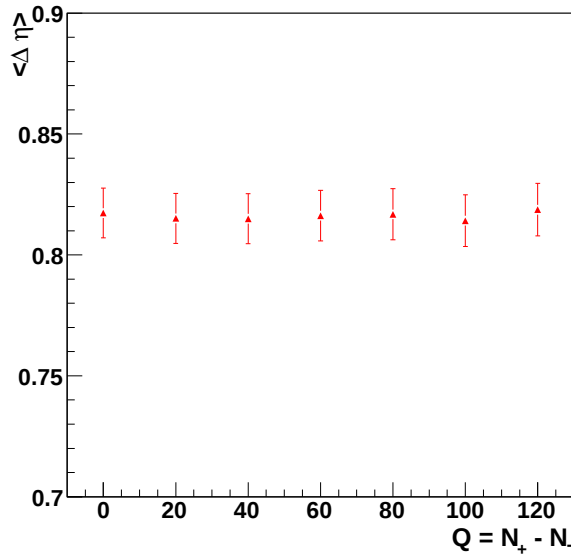


Σχήμα 3.4: Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από την πολλαπλότητα των γεγονότων.

Στο πρώτο στάδιο της μελέτης των ιδιοτήτων της συνάρτησης ισοζυγίου, προσπαθήσαμε να δούμε αν τόσο η κατανομή, όσο και το εύρος εξαρτώνται από την πολλαπλότητα των παραγόμενων σωματιδίων που απαρτίζουν το υπόβαθρο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί αν υπάρχει η όποια εξάρτηση, θα πρέπει αυτή να παραμετροποιηθεί, ώστε να υπολογίζεται στην περίπτωση της μελέτης πραγματικών δεδομένων που προέρχονται από συγκρούσεις βαρέων ιόντων, μιας και σε αυτές τις περιπτώσεις η πολλαπλότητα δεν παραμένει σταθερή. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 3.4 όπου το εύρος στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) σχεδιάζεται ως συνάρτηση της πολλαπλότητας των γεγονότων που απαρτίζονται από τα σωματίδια του υποβάθρου. Όπως προκύπτει δεν υπάρχει

κάποια εξάρτηση από αυτή την παράμετρο. Έτσι στην περίπτωση των αλληλεπιδράσεων, $Pb - Pb$ η όποια μεταβολή στο εύρος δε θα αποδίδεται στη διαφορετική πολλαπλότητα των γεγονότων που ουσιαστικά αποτυπώνει και το είδος τους (κεντρικές - περιφερειακές).

3.2.2 Εξάρτηση από το καθαρό φορτίο

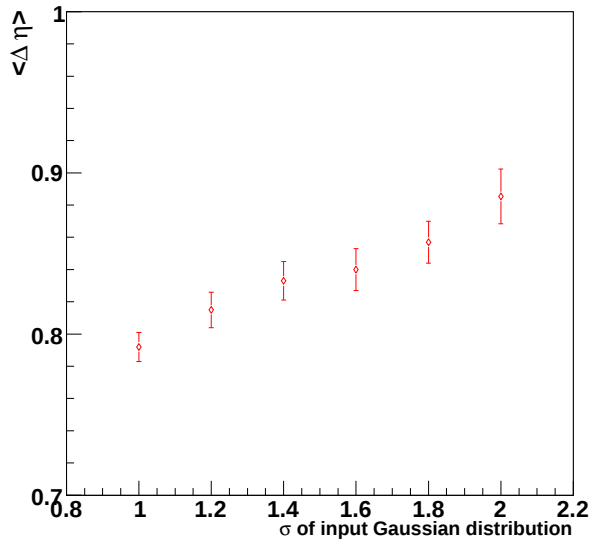


Σχήμα 3.5: Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από τη μέση τιμή του καθαρού φορτίου των γεγονότων.

Το επόμενο βήμα ήταν η μελέτη της πιθανής εξάρτησης της συνάρτησης ισοζυγίου από το καθαρό φορτίο. Το καθαρό φορτίο είναι η διαφορά της πολλαπλότητας των θετικών και των αρνητικών σωματιδίων μέσα σε ένα γεγονός $Q = |N_+ - N_-|$. Σ' αυτό το βήμα ελπίζουμε να αφαιρέσουμε την επίδραση από το καθαρό φορτίο, το οποίο δεν μηδενίζεται σε συγκρούσεις βαρέων ιόντων (πρέπει να διατηρείται το ολικό φορτίο κατά την αλληλεπίδραση). Επίσης, όπως θα γίνει φανερό και στα επόμενα βήματα, η ανάλυση δεν έχει γίνει σε ολόκληρη την περιοχή του φασικού χώρου αλλά σε ένα μέρος του. Αυτό έχει ως συνέπεια να αναλύουμε κάθε φορά και διαφορετικό αριθμό σωματιδίων οπότε και διαφορετικό καθαρό φορτίο. Στο συγκεκριμένο μέρος λοιπόν γίνεται φανερό ότι το καθαρό φορτίο θα μεταβάλεται σε επίπεδο γεγονός ανά γεγονός. Το αποτέλεσμα συνοψίζεται στο σχήμα 3.5, όπου αναδεικνύεται η μη εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta\eta \rangle$ από το καθαρό φορτίο. Έτσι στην περίπτωση της ανάλυσης

πραγματικών δεδομένων, η οποία μεταβολή στο εύρος δε θα αποδίδεται στο διαφορετικό καθαρό φορτίο.

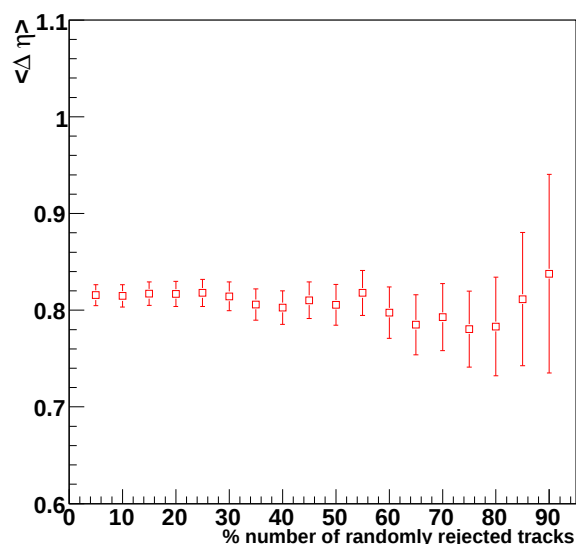
3.2.3 Εξάρτηση από το εύρος της κατανομής των σωματιδίων



Σχήμα 3.6: Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από το εύρος της κατανομής της ψευδοωκύτητας των σωματιδίων του υποβάθρου.

Στη συνέχεια, έγινε μια μελέτη γύρω από την πιθανή εξάρτηση του εύρους των κατανομών της **Balance Function** από το εύρος των κατανομών στην ψευδοωκύτητα των σωματιδίων του υποβάθρου. Το κίνητρο για να γίνει αυτή η μελέτη είναι η διαφορά στα εύρη των κατανομών της ψευδοωκύτητας όλων των φορτισμένων σωματιδίων που προέρχονται από αλληλεπιδράσεις $Pb+Pb$ σε όλο το ενεργειακό φάσμα του *SPS*. Το σχήμα 3.6 στο οποίο το εύρος της **Balance Function** σχεδιάζεται ως συνάρτηση του εύρους των κατανομών της ψευδοωκύτητας των σωματιδίων υποβάθρου, συνοψίζει τα αποτελέσματα. Από το σχήμα προκύπτει ότι υπάρχει κάποια σχεδόν γραμμική συνάρτηση από αυτή την παράμετρο. Αυτό μας δείχνει ότι αν χρειαστεί να αναλύσουμε τους συσχετισμούς φορτίου σε διαφορετικές ενέργειες, θα πρέπει να βρούμε ένα επίπεδο κανονικοποίησης του εύρους των πραγματικών δεδομένων ώστε η άμεση σύγκριση να είναι δυνατή.

3.2.4 Εξάρτηση από το ποσοστό απώλειας τροχιών

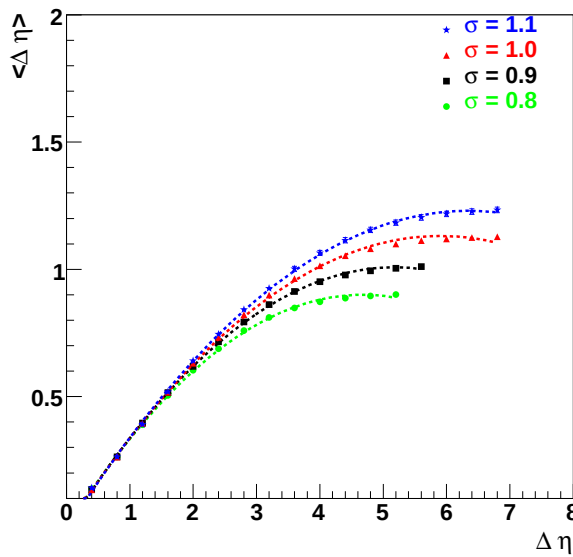


Σχήμα 3.7: Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από το ποσοστό των σωματιδίων που απορρίπτονται. Τα σωματίδια αποτελούν το υπόβαθρο.

Η επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε, είναι το ποσοστό των τροχιών που χάνονται ή απορρίπτονται λόγω γεωμετρικής αποδοχής, κακής ανακατασκευής της τροχιάς κ.α.. Το σχήμα 3.7 δείχνει το εύρος της συνάρτησης ισοζυγίου ως συνάρτηση του ποσοστού των σωματιδίων υποβάθρου που απορρίπτονται τυχαία. Αυτό που βλέπουμε είναι ότι αν έχουμε ένα εντελώς μη συσχετισμένο δείγμα, το εύρος δεν εξαρτάται από τον αριθμό των τροχιών που απορρίπτονται. Η εικόνα αυτή αλλάζει βέβαια αν προσθέσουμε στο αρχικό μας δείγμα κάποιο αριθμό συσχετισμένων τροχιών (ο ορισμός των συσχετισμένων τροχιών έχει δοθεί πιο πάνω).

3.2.5 Εξάρτηση από το αναλυόμενο διάστημα

Ένας ακόμη έλεγχος που έγινε, ήταν αυτός κατά τον οποίο για διάφορες τιμές του εύρους των κατανομών της ψευδοωκύτητας των σωματιδίων που απαρτίζουν το υπόβαθρο, υπολογίσαμε την συνάρτηση ισοζυγίου για διαφορετικές κάθε φορά διαμερίσεις του φασικού χώρου. Για το σκοπό αυτό, μελετούμε το φασικό χώρο, ο οποίος ορίζεται να είναι πάντα συμμετρικά ως προς το μέσο της κατανομής της ψευδοωκύτητας και επεκτείναμε κάθε φορά το αναλυόμενο διάστημα. Το σχήμα 3.8 δείχνει το εύρος της συνάρτησης ισοζυγίου ως

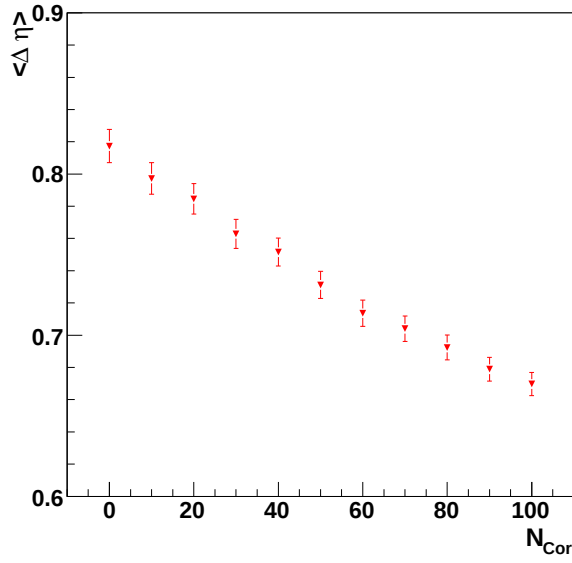


Σχήμα 3.8: Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από το εύρος του φασικού χώρου που αναλύουμε κάθε φορά. Οι διαφορετικές καμπύλες αφορούν τα διαφορετικά εύρη των κατανομών της ψευδοωκύτητας των σωματιδίων του υποβάθρου.

συνάρτηση του αναλυόμενου διαστήματος στην ψευδοωκύτητα. Βλέπουμε ότι έχουμε μια σημαντική εξάρτηση από το αναλυόμενο διάστημα, η οποία τείνει να μην υπάρχει καθώς αυτό μεγαλώνει και τείνει να καλύψει όλο το φασικό χώρο. Αυτό είναι ένα ακόμη πειραματικό πρόβλημα, καθώς όλοι σχεδόν οι ανιχνευτές δεν καλύπτουν όλο το φασικό χώρο.

3.2.6 Εξάρτηση από τον αριθμό των συσχετισμένων σωματιδίων

Τέλος, τοποθετήσαμε στο αρχικό μας υπόβαθρο έναν μεταβαλλόμενο αριθμό συσχετισμένων τροχιών, ο καθορισμός των οποίων έγινε στην αρχή της ενότητας αυτής. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 3.9, όπου το εύρος της **Balance Function** αποδίδεται ως συνάρτηση του αριθμού των συσχετισμένων σωματιδίων που έχουν προστεθεί στο υπόβαθρο. Γίνεται φανερό ότι το εύρος και κατ'επέκταση η μέθοδος είναι ευαίσθητη στην αύξηση αυτού του αριθμού. Αυτό το τελευταίο μας δίνει τη δυνατότητα να πούμε ότι το εύρος είναι ένα μέγεθος που μπορεί να μας δώσει πληροφορία για τον αριθμό των συσχετίσεων που υπάρχουν στο αναλυόμενο δείγμα.



Σχήμα 3.9: Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωχύτητα (Σχέση 3.13) από τον αριθμό των συσχετισμένων σωματιδίων που προσθέτονται στο αρχικό υπόβαθρο.

3.3 ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΜΕΣΩ ΕΝΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην παράγραφο αυτή, θα αναφερθούμε στις προβλέψεις που μπορούν να γίνουν για τη συμπεριφορά της συνάρτησης ισοζυγίου, χρησιμοποιώντας ένα απλό θερμικό μοντέλο [1]. Στα πλαίσια του μοντέλου αυτού, μπορούμε να επιλέξουμε την τιμή διαφόρων μεγεθών που παίζουν το ρόλο των ελεύθερων παραμέτρων.

- T_{chemical} : Είναι η θερμοκρασία του **chemical freeze out**, που καθορίζει τις πολλαπλότητες των παραγόμενων αδρονίων. Η τιμή δίνεται σε MeV .
- V_{chemical} : Είναι ο όγκος του συστήματος όπως αυτός καθορίζεται πριν το **chemical freeze out**.
- T_{kinetic} : Είναι η θερμοκρασία του **kinetic freeze out**, που καθορίζει τις κατανομές της ορμής των παραγόμενων αδρονίων. Η τιμή δίνεται σε MeV .
- u_t : Είναι η ταχύτητα εξάπλωσης στην εγκάρσια διεύθυνση του συστήματος. Χρησιμοποιείται για το λεγόμενο **blast wave boosting**.
- u_l : Είναι η ταχύτητα εξάπλωσης στη διαμήκη διεύθυνση του συστήματος. Χρησιμοποιείται για το λεγόμενο **blast wave boosting**.

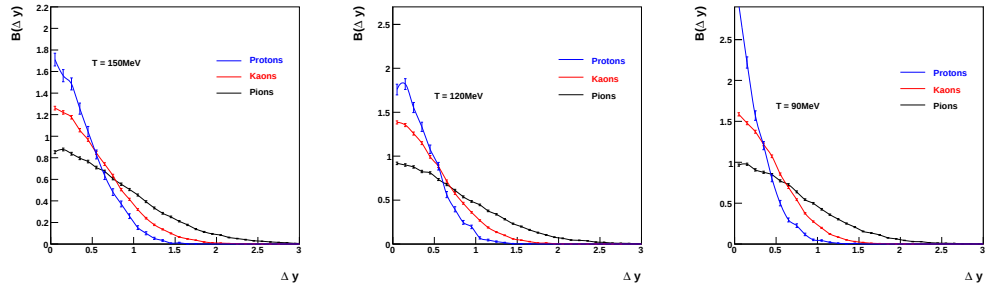
Οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται στα πλαίσια αυτού του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

- Ορίζονται *partition functions* με βάση τις τιμές των $T_{chemical}$ και $V_{chemical}$.
- Στη συνέχεια δημιουργείται ο φασικός χώρος που είναι συνεπής με τις παραγόμενες *partition functions*.
- Καθορίζεται η ορμή των παραγόμενων σωματιδίων με βάση την τιμή της παραμέτρου $T_{kinetic}$.
- Έπειτα πραγματοποιείται η διάσπαση των σωματιδίων που έχουν αυτή τη δυνατότητα.
- Τέλος κάθε σύνολο σωματιδίων υπόκειται σε μια προώθηση σύμφωνα με τις τιμές των u_t και u_l .

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε μια σταθερή θερμοκρασία του *chemical freeze out* με τιμή $T_{chemical} = 175 MeV$, ενώ η τιμή της εγκάρσιας ταχύτητας εξάπλωσης του συστήματος είχε και αυτή σταθερή τιμή $u_t = 0.9c$. Αντίθετα, μεταβάλλαμε την τιμή της θερμοκρασίας του *kinetic freeze out*, δημιουργώντας 100K γεγονότα με τιμές $T_{kinetic} = 150 MeV$, $T_{kinetic} = 120 MeV$ και $T_{kinetic} = 90 MeV$. Έτσι μελετήσαμε τη συμπεριφορά της κατανομής της συνάρτησης ισοζυγίου για διαφορετικά ζεύγη ταυτοποιημένων σωματιδίων (πιόνια, καόνια και προτόνια) τόσο στην ωχύτητα όσο και στην αναλλοίωτη ορμή. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε σαν ένα εργαλείο ώστε να επαληθεύσουμε τη σχέση 3.11 αφού η διαδικασία των δευτερευουσών αλληλεπιδράσεων ($\sigma_{diff.}$) δεν έχει ληφθεί υπόψη. Ακόμα με τη βοήθεια του, θέλουμε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση για τη συμπεριφορά της συνάρτησης ισοζυγίου όταν αυτή μελετάται ως προς τη σχετική αναλλοίωτη ορμή Q_{inv} , καθώς και στις αντίστοιχες συνιστώσες S_{side} , Q_{out} και Q_{long} .

Το σχήμα 3.10 δείχνει τη συνάρτηση ισοζυγίου ως συνάρτηση της σχετικής ωχύτητας των αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων για τα τρία διαφορετικά είδη ζευγών (ζεύγη πιονίων, καονίων και προτονίων), ομαδοποιημένα ως προς τις διαφορετικές θερμοκρασίες του *kinetic freeze out*. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι όσο μεγαλώνει η μάζα του σωματιδίου που μελετάμε, τόσο στενεύει η κατανομή στην οποία καταλήγουμε. Αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει τη σχέση 3.12.

Το σχήμα 3.10 δείχνει για μια ακόμη φορά τη συνάρτηση ισοζυγίου ως συνάρτηση της σχετικής ωχύτητας των αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων για τις



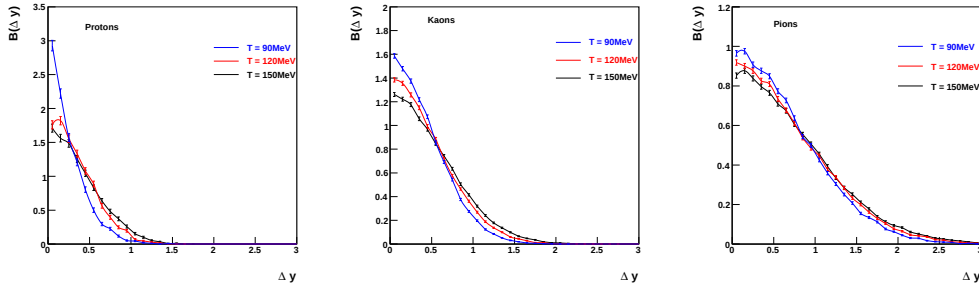
Σχήμα 3.10: Η Balance Function ως συνάρτηση της διαφοράς στην ωκύτητα για διάφορα ζεύγη σωματιδίων για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, ξεκινώντας από την υψηλότερη (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στη χαμηλότερη (δεξί γράφημα) .

τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν, ομαδοποιημένα όμως ως προς τα διαφορετικά ήδη των σωματιδίων. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι όσο μειώνεται η θερμοκρασία του kinetic freeze out, τόσο πιο στενή είναι η κατανομή στην οποία καταλήγουμε, κάτι που επιβεβαιώνει τη σχέση 3.12 αν διατηρηθεί η μάζα σταθερή.

Το επόμενο βήμα είναι η μελέτη της Balance Function στη σχετική αναλλοίωτη ορμή $Q_{inv.}$ καθώς και στις αντίστοιχες συνιστώσες της (Q_{side} , $Q_{out.}$ και $Q_{long.}$). Το σχήμα 3.12 δίνει τη συνάρτηση ισοζυγίου ως συνάρτηση της $Q_{inv.}$ για τα 3 διαφορετικά είδη σωματιδίων, ομαδοποιημένα ως προς τις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Μελετώντας τα συγκεκριμένα γραφήματα, βγάζουμε το συμπέρασμα ότι αν διατηρήσουμε τη θερμοκρασία σταθερή, η πρόβλεψη είναι ότι καταλήγουμε σε πιο στενές κατανομές καθώς η μάζα του σωματιδίου μειώνεται.

Αν τώρα ομαδοποιήσουμε τις ίδιες κατανομές ως προς τα τρία διαφορετικά είδη σωματιδίων, τότε παίρνουμε την εικόνα του σχήματος 3.13. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι αν διατηρήσουμε τη μάζα σταθερή και μεταβάλλουμε τη θερμοκρασία, το μοντέλο μας δίνει πιο στενές κατανομές καθώς η θερμοκρασία μειώνεται.

Τέλος, το σχήμα 3.14 δείχνει τη συνάρτηση ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων ως συνάρτηση των διαφόρων συνιστωσών της αναλλοίωτης ορμής Q_{side} (αριστερό σχήμα), Q_{out} (μεσαίο σχήμα) και $Q_{long.}$ (σχήμα δεξιά), για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες. Η πρόβλεψη με τη βοήθεια του μοντέλου μας οδηγεί σε πιο

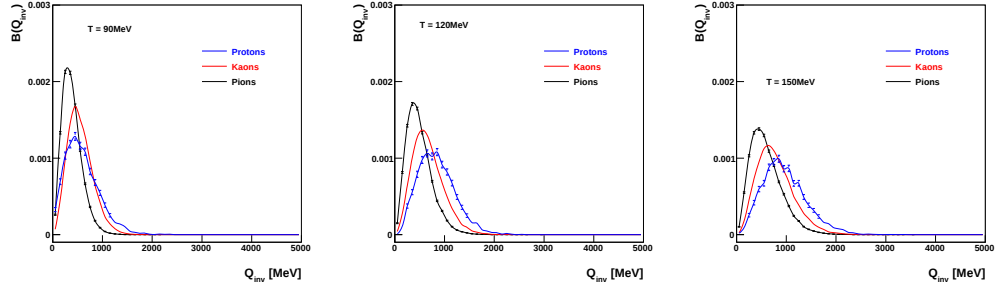


Σχήμα 3.11: Η Balance Function ως συνάρτηση της διαφοράς στην ωκύτητα για τις 3 διαφορετικές θερμοκρασίες και για τα τρία διαφορετικά είδη σωματιδίων, ξεκινώντας από τα πρωτόνια (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στα πιόνια (δεξί γράφημα).

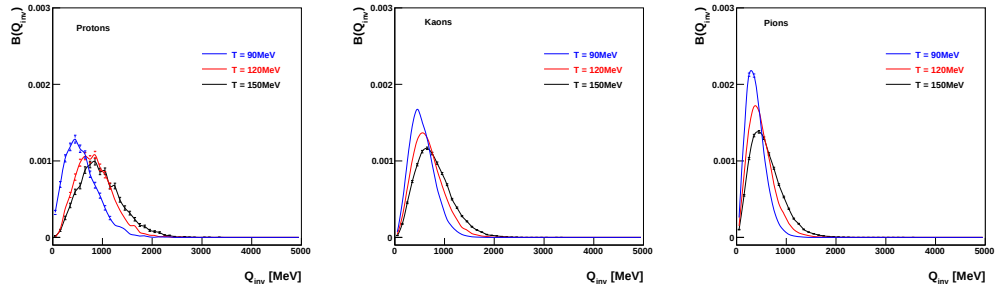
στενές κατανομές καθώς η θερμοκρασία μειώνεται.

Ως ένα γενικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι με βάση το πρότυπο που μελετήθηκε και χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψη οι δευτερεύουσες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόμενων σωματιδίων:

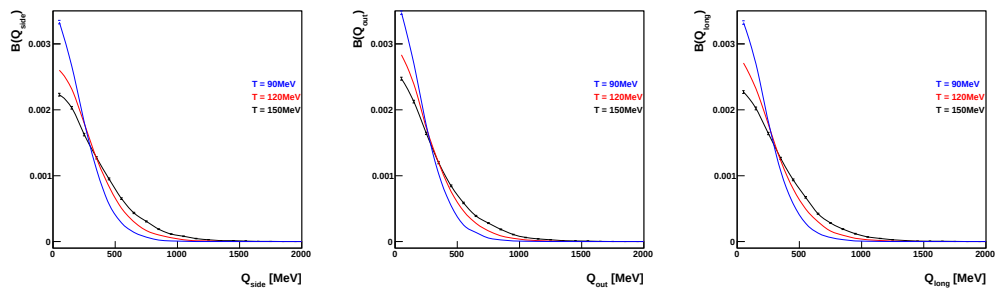
- Το εύρος της συνάρτησης ισοζυγίου, όταν αυτή μελετάται ως συνάρτηση της (ψευδο)ωκύτητας, μειώνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία του kinetic freeze out. Επίσης τα ελαφρότερα σωματίδια (πιόνια) αναμένεται να έχουν πιο ευρείς κατανομές από τα πιο βαριά (καόνια και πρωτόνια).
- Το εύρος της συνάρτησης ισοζυγίου όταν αυτή μελετάται στην αναλλοίωτη ορμή Q_{inv} , μειώνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία του kinetic freeze out. Επίσης τα πιο ελαφριά σωματίδια (πιόνια) αναμένεται να έχουν πιο στενές κατανομές από τα βαρύτερα (αντίθετη συμπεριφορά από την προηγούμενη περίπτωση).
- Το εύρος της συνάρτησης ισοζυγίου όταν αυτή μελετάται στις συνιστώσες της αναλλοίωτης ορμής Q_{side} , Q_{out} και Q_{long} , μειώνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία του kinetic freeze out.



Σχήμα 3.12: Η Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής αναλλοίωτης ορμής Q_{inv} . για διάφορα ζεύγη σωματιδίων για τις 3 διαφορετικές θερμοκρασίες, ξεκινώντας από την υψηλότερη (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στη χαμηλότερη (δεξί γράφημα).



Σχήμα 3.13: Η Balance Function σαν συνάρτηση της σχετικής αναλλοίωτης ορμής Q_{inv} . για τις 3 διαφορετικές θερμοκρασίες και για τα τρία διαφορετικά είδη σωματιδίων, ξεκινώντας από τα πρωτόνια (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στα πιόνια (δεξί γράφημα) .



Σχήμα 3.14: Η Balance Function ως συνάρτηση των διαφορετικών συνιστωσών της σχετικής αναλλοίωτης ορμής Q_{inv} για ζεύγη πιονίων και για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, ξεκινώντας από την Q_{side} (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στην Q_{long} (δεξί γράφημα) .

Κεφάλαιο 4

ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ NA49

Το NA49 θεωρείται το πείραμα το οποίο βοήθησε στην περαιτέρω μελέτη των σωματιδίων που παράγονται από συγκρούσεις βαρέων ιόντων. Τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκρούσεις μεταξύ $Pb - Pb$ δημιουργούν τις προϋποθέσεις για τη δημιουργία πλάσματος που αποτελείται από quarks και gluons [1]. Το πείραμα NA49 ανταποκρίθηκε στις αρχές σχεδίασής του [1].

Σε μία τυπική κεντρική σκέδαση $^{208}Pb + ^{208}Pb$ με ενέργεια δέσμης ίση με 158 AGeV, παράγονται περισσότερα από 2000 αδρόνια, από τα οποία πάνω από 1200 είναι φορτισμένα και εισέρχονται στον ανιχνευτή όπου και καταμετρούνται. Η μεγάλη αυτή πολλαπλότητα των τροχιών, θέτει υψηλές απαιτήσεις τόσο στο ίδιο το ανιχνευτικό σύστημα όσο και στο ηλεκτρονικό σύστημα ανάγνωσης των δεδομένων.

Ο σχεδιασμός του πειράματος NA49 καθιστά δυνατή τη μελέτη:

- Της κατανομής της ωχύτητας και της εγκάρσιας συνιστώσας της ορμής των αδρονίων [3].
- Της παραγωγής των παράξενων σωματιδίων ($\Lambda, \bar{\Lambda}, K_S^0, \Omega^-, \bar{\Omega}^+$), καθώς επίσης και των ($\Xi^-, \bar{\Xi}^+$) από την τοπολογία της διάσπασης [4, 5, 6, 7, 8]. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα μελέτης της παραγωγή των σωματιδίων Φ μέσω της ταυτοποίησης των προϊόντων της διάσπασής τους από την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους (dE/dx) [9].
- Των διακυμάνσεων του λόγου K/π από γεγονός σε γεγονός [10, 11].
- Της χωροχρονικής εξέλιξης των αλληλεπιδράσεων Pb+Pb από την εξέταση των συσχετίσεων των αδρονίων με ίσο ή αντίθετο φορτίο [12, 13].

Το πείραμα *NA49* είναι διεθνής συνεργασία που χρονολογείται από το 1994 με περίπου 100 επιστήμονες από 10 διαφορετικές χώρες:

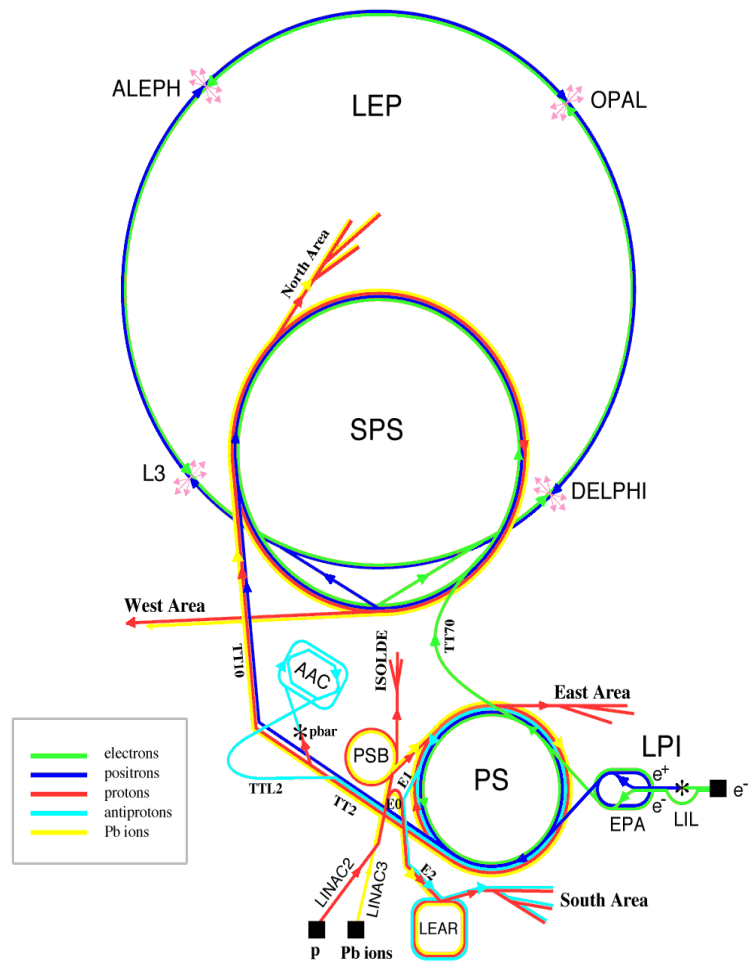
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ *SPS*

Το *NA49* βρίσκεται βόρεια της *H2* γραμμής εξόδου δέσμης του CERN-SPS, που είναι ικανή να παράγει πρωτόνια και ιόντα σε πληθώρα ενεργειών. Η μέγιστη δυνατή ενέργεια που μπορεί να επιτευχθεί είναι περίπου 158 AGeV για ιόντα *Pb* και 450 GeV για πρωτόνια.

Η σχηματική αναπαράσταση της επιταχυντικής διάταξης που παράγει τις δέσμες *Pb* φαίνεται στο σχήμα 4.1. Παρότι χρησιμοποιήθηκε η υπάρχουσα υποδομή του CERN, ορισμένες αναβαθμίσεις ήταν απαραίτητες έτσι ώστε το σύστημα να ανταποκριθεί στις ιδιότητες των ιόντων του μολύβδου.

Το συγκεκριμένο σύστημα είχε χρησιμοποιηθεί για επιτάχυνση δεσμών ιόντων ^{16}O και ^{32}S σε ενέργειες 200 GeV . Για να παραχθεί δέσμη ιόντων μολύβδου συγκρίσιμης ενέργειας με το υπάρχον επιταχυντικό σύστημα ήταν αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί ο καλύτερος λόγος φορτίου προς μάζα κάτι που υποδεικνύει τη χρησιμοποίηση ιόντων Pb^{82+} . Τέτοια ιόντα απαιτούν συγκεκριμένες προδιαγραφές στο σύστημα που παράγει το κενό στον επιταχυντή καθώς οι αντιδράσεις ανταλλαγής φορτίου με τα υπολοιπόμενα μόρια του αερίου θεωρείται ο μεγαλύτερος κίνδυνος για τη δέσμη. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό σε επιταχύνσεις με χαμηλό ρυθμό ενώ οι απώλειες αυτές ελαχιστοποιούνται όταν έχουμε γρήγορη επιτάχυνση.

Αν και μπορούμε να παράγουμε $^{208}\text{Pb}^{82+}$ με μία μόνο διαδικασία, κρίθηκε απαραίτητη η χρησιμοποίηση κατάλληλου ρεύματος. Τέθηκε ο σχεδιαστικός στόχος των 108 ιόντων ανά κύκλο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη διεξαγωγή 6–8 πειραμάτων βαρέων ιόντων. Για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε μία πηγή Electron Cyclotron Resonance (ESR - Κύκλοτρο Συντονισμού Ηλεκτρονίων). Αν και μπορούσε να δώσει τα απαραίτητα υψηλά ρεύματα ($\approx 2 - 3\text{ mA}$), η πλέον πιθανή φορτισμένη κατάσταση που παρήγαγε ήταν $^{208}\text{Pb}^{27+}$, το οποίο σήμαινε ότι ήταν απαραίτητη περαιτέρω απογύμνωση. Αυτή η φορτισμένη κατάσταση επιλέχθηκε με την βοήθεια ενός μαγνητικού φασματομέτρου στο πρώτο στάδιο της επιτάχυνσης. Ο νέος γραμμικός επιταχυντής LINAC, και ο Παροχέας Ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Power Supply- RFQ), επιτρέπουν επιτάχυνση των $^{208}\text{Pb}^{27+}$ μέχρι την ενέργεια των $4,2\text{ MeV}$, όπου τα ιόντα



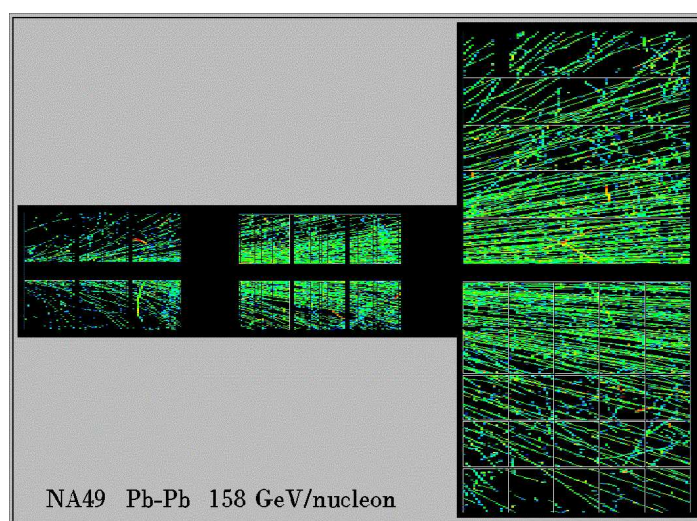
Σχήμα 4.1: Το επιταχυντικό σύστημα του CERN.

διαπερνούν ένα λεπτό φύλλο Al για περαιτέρω απογύμνωση. Η πιο πιθανή φορτισμένη κατάσταση που προκύπτει είναι η $^{208}Pb^{53+}$. Στην συνέχεια τα ιόντα εισάγονται στον Σύγχροτρον Προωθητή Πρωτονίων (Proton Synchrotron Booster-PSB), από όπου εξέρχονται με ενέργεια $94MeV$ και μετά στον Σύγχροτρον Πρωτονίων (Proton Synchrotron-PS) που φτάνουν σε ενέργεια $4,25GeV$. Σε αυτό το σημείο τα ιόντα διαπερνούν ένα ακόμη φύλλο Al και προκύπτουν

εντελώς απογυμνωμένα πριν εισαχθούν στον Super Proton Synchrotron (SPS). Αφού επιταχυνθούν σε ενέργεια $158A\text{GeV}$, τα ιόντα οδηγούνται στο σημείο εξόδου της βόρειας περιοχής.

4.2 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΟΥ NA49

Υπολογισμοί που έγιναν δείχνουν ότι συγκρούσεις μεταξύ $Pb-Pb$ μπορούν να δημιουργήσουν τις κατάλληλες προϋποθέσεις ώστε να παρατηρηθεί η αλλαγή φάσης από πυρηνική ύλη σε πλάσμα που αποτελείται από quarks και gluons. Με βάση λοιπόν αυτό το σκεπτικό έγινε η σχεδίαση του πειράματος NA49.



Σχήμα 4.2: Αποτύπωση οριζόντιας τομής πάχους ($7\mu\text{m}$) στο επίπεδο της δέσμης, για μία κεντρική σκέδαση ($Pb + Pb$) των (158GeV)νουκλεόνιο.

Λόγω του ότι το NA49 ασχολείται κυρίως με συγκρούσεις βαρέων ιόντων και με τα παραγόμενα από αυτές αδρόνια, ο ανιχνευτής που θα χρησιμοποιούταν θα έπρεπε να είχε υψηλή απόδοση και πιο συγκεκριμένα θα έπρεπε να μπορεί να καλύπτει ένα μεγάλο μέρος του φασικού χώρου και να έχει πολύ καλή διακριτική ικανότητα. Από στοιχεία που είχαν εξαχθεί από το πείραμα NA35 (πείραμα προηγούμενης γενιάς), είχε βγει το συμπέρασμα ότι για να υπάρξουν

αξιόπιστα αποτελέσματα έπρεπε να μελετηθεί τουλάχιστον το 50% του φασικού χώρου.

Για να εξαχθούν πληροφορίες για το είδος των παραγόμενων σωματιδίων ήταν αναγκαίο να υπάρχει δυνατότητα αναγνώρισης και ταυτοποίησης τους (Particle Identification). Αυτό είναι δυνατόν να γίνει με τον καθορισμό των στοιχείων που αποτελούν την τετραορμή των σωματιδίων. Οι χωρικές συνιστώσες της τετραορμής καθορίζονται από την καμπυλότητα της τροχιάς ενός σωματιδίου που περνά από μαγνητικό πεδίο. Αυτή η μέθοδος με τη σειρά της προϋποθέτει ένα ανιχνευτή τροχιάς. Για να ολοκληρωθεί η ταυτοποίηση, απαιτείται επιπλέον μετρήσεις για τον καθορισμό του είδους (οικογένεια) του σωματιδίου. Αυτό είναι δυνατόν να γίνει μέσω του ειδικού ιονισμού που προκαλείται μέσα στον θάλαμο που ανιχνεύει τις τροχιές και πιο συγκεκριμένα από τη μέτρηση της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους (dE/dx).

Τα περισσότερα παραγόμενα σωματίδια σε αυτές τις συγκρούσεις θεωρούνται ρελατιβιστικά. Σε τέτοιες περιπτώσεις η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους εξαρτάται από την ταχύτητα. Επιπλέον αφού ο ιονισμός παρουσιάζει στατιστικές διακυμάνσεις, πρέπει να γίνουν πολλές μετρήσεις ώστε να μειωθεί το σχετικό σφάλμα. Διάφορες προσομοιώσεις έδειξαν ότι για να διαχωριστούν πιόνια από καόνια στην περιοχή των $5 - 10 \text{ GeV}$ πρέπει να έχουμε μια διακριτική ικανότητα της τάξεως του 4%. Αυτό υποδήλωνε ένα μήκος τροχιάς της τάξεως των 3, 5m. Ένα ακόμα στοιχείο που έπρεπε να ληφθεί υπόψη είναι το γεγονός της μεγάλης πυκνότητας των τροχιών σαν συνέπεια των συγκρούσεων $Pb-Pb$. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την ύπαρξη πολλών ηλεκτρονικών καναλιών.

Η επιλογή του ανιχνευτή έγινε με βάση τις πιο κάτω προδιαγραφές του πειράματος:

- Το πείραμα πραγματοποιείται μέσα σε πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από δυο μαγνήτες [14], με αποτέλεσμα ο φασικός χώρος που θα πρέπει να ελέγχουμε να είναι εκτενής.
- Η μεγάλη πολλαπλότητα καθώς και η μεγάλη πυκνότητα των παραγόμενων σωματιδίων σε αλληλεπιδράσεις βαρέων ιόντων επιβάλλει ανιχνευτή με μεγάλη ικανότητα αναγνώρισης και διαχωρισμού των τροχιών. Επίσης χρειαζόμαστε χωριστούς και με μεγάλο όγκο ανιχνευτές.
- Για να ταυτοποιήσουμε σωματίδια σε μεγάλες στερεές γωνίες απαιτείται ο ανιχνευτής να έχει την ικανότητα τόσο να ανιχνεύει τις τροχιές, όσο και να ταυτοποιεί τα σωματίδια.

- Το σύστημα καταγραφής δεδομένων πρέπει να έχει την ικανότητα να καταγράφει περίπου 20 γεγονότα σε κάθε σύγκρουση για τα γεγονότα που περιλαμβάνουν υψηλή πολλαπλότητα, έτσι ώστε να φτάσουμε στον τελικό αριθμό των 106 γεγονότων για κάθε περίοδο κατά την οποία περνάει η δέσμη.

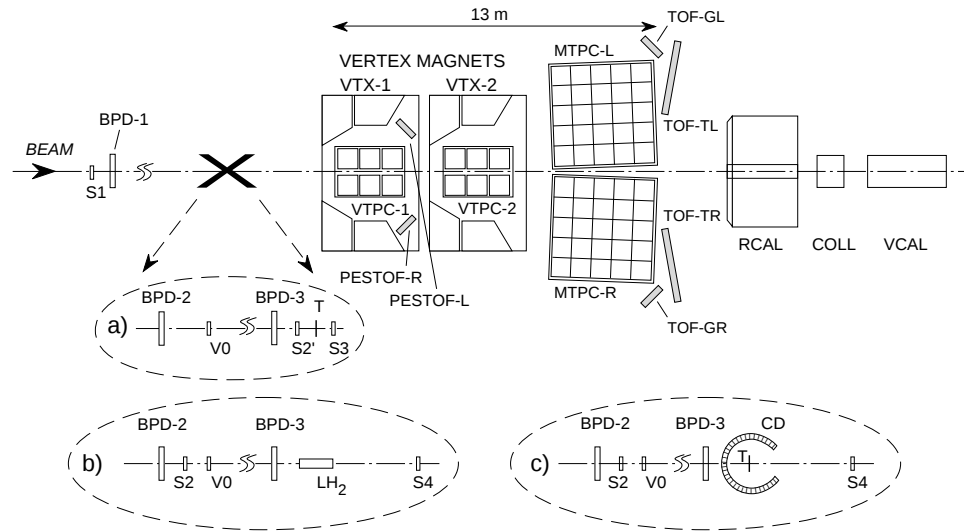
Όλες οι πιο πάνω προϋποθέσεις ικανοποιούνται από τους ανιχνευτές προβολής χρόνου (TPC - Time Projection Chamber) [15, 16]. Οι ανιχνευτές TPC χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε πειράματα φυσικής υψηλών ενεργειών. Επιτρέπουν σε συνδυασμό με μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο την ανακατασκευή των τροχιών καθώς και την ταυτοποίηση των φορτισμένων σωματιδίων.

4.3 ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ N49

Τα κυριότερα συστατικά του πειράματος είναι οι 4 μεγάλοι θάλαμοι *Time Projection Chambers*. Οι δυο από αυτούς (*VTPC - Vertex TPC*) είναι τοποθετημένοι ο ένας μετά τον άλλο σε περιοχή με μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι *CERN Vertex Magnets* εντάσεως 1.5 και 1.1 *Tesla* αντίστοιχα. Οι άλλοι δυο (*MTPC - Main TPC*), που είναι οι κύριοι και έχουν μεγαλύτερο όγκο, είναι τοποθετημένοι παράλληλα και ακριβώς πίσω από τους πρώτους σε περιοχή όπου δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο.

Η αναγνώριση των σωματιδίων επιτυγχάνεται καλύτερα με τη βοήθεια συσκευών *Time - Of - Flight* που είναι τοποθετημένοι αμέσως μετά τους κύριους TPC (MTPC) που μετρούν το χρόνο πτήσης των σωματιδίων.

Τέλος, κινούμενοι πάντα κατά μήκος της διεύθυνσης της εισερχόμενης δέσμης, το ανιχνευτικό σύστημα του πειράματος συμπληρώνεται από τα δύο θερμιδόμετρα που ακολουθούν. Το πρώτο, *Ring-Calorimeter* (σε σχήμα δακτυλίου), μετρά την εγκάρσια κατανομή της ενέργειας (E_T), ενώ το δεύτερο δίνει την ενέργεια των ουδετέρων σωματιδίων της αλληλεπίδρασης (E_{veto}). Το E_{veto} χρησιμοποιείται ως κριτήριο της κεντρικότητας μίας σκέδασης: όσο πιο μικρή η τιμή του E_{veto} τόσο πιο κεντρική θεωρείται η σκέδαση. Η συνολική διάταξη του πειράματος καθώς και οι τροποποιήσεις για τους διαφορετικούς στόχους - δέσμες φαίνονται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Η πειραματική διάταξη του πειράματος NA49 με διαφορετικές διευθετήσεις στόχων για σχεδάσεις a) Pb+Pb, b) p+p και c) p+A. Η θέση του στόχου είναι στο μπροστινό μέρος του μαγνήτη VTX-1.

Διαστάσεις [mm]	VTPC-1	VTPC-2	MTPC-L/R
Πλάτος	2000	2000	3900
Μήκος	2500	2500	3900
Υψος	980	980	1800
Μήκος Ολίσθησης	666	666	1117
Μήκος Πλακιδίων	16.28	28	40
Πλάτος Πλακιδίων	3.5	3.5	3.6, 5.5
Γωνία Πλακιδίων [°]	12 – 55°	2 – 20°	0°, 15°

Πίνακας 4.1: Διαστάσεις των ανιχνευτών προβολής χρόνου (*TPCs*) του πειράματος NA49.

4.3.1 Οι ανιχνευτές **TPC**

Τα κυριότερα συστατικά του πειράματος είναι οι 4 μεγάλοι θάλαμοι *Time Projection Chambers*. Αυτοί οι θάλαμοι, όπως έχει ήδη τονιστεί, χρησιμεύουν στην αναγνώριση των παραγόμενων σωματιδίων και στην εξαγωγή πληροφοριών γύρω από τις ορμές τους μέσω της μέτρησης της απώλειας της ενέργειας ανά μονάδα μήκους. Οι διαστάσεις των δυο αυτών ειδών θαλάμων (VTPC και MTPC) δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4.1).

Η αναγνώριση και ταυτοποίηση των παραγομένων σωματιδίων γίνεται μέσω της απώλειας ενέργειας λόγω ιονισμού κάποιου μέσου (συνήθως αέριο). Τα κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη για την επιλογή του αερίου είναι τα ακόλουθα:

- Η ταχύτητα ολίσθησης των ηλεκτρονίων πρέπει να είναι κατάλληλη ώστε να μην δημιουργείται πρόβλημα στους *TPC*.
- Πρέπει να έχουμε μικρή διαμήκη και εγκάρσια διάχυση ηλεκτρονίων η οποία όμως δεν πρέπει να είναι τόσο μικρή ώστε να καταστήσει τον διαχωρισμό γειτονικών τροχιών δύσκολο.
- Πρέπει να έχουμε μεγάλο αριθμό πρωτογενώς ιονισμένων σωματιδίων ανά μονάδα μήκους διαδρομής των ηλεκτρονίων.
- Πρέπει να έχουμε σχετικά μικρό ατομικό αριθμό ώστε να περιορίζεται το φαινόμενο της αλλοίωσης του πεδίου ολίσθησης από τα ιόντα.

Μελετήθηκαν διάφορα μίγματα αερίων, κυρίως ως προς τους παράγοντες διάχυσης, τις ταχύτητες ολίσθησης καθώς και την ικανότητα προσκόλλησης ηλεκτρονίων. Αυτό που επιλέχθηκε τελικά, ήταν ένα μίγμα $NeCO_2$ με αναλογία 90 : 10 για τους *VTPC* οι οποίοι ως συνέπεια της θέσης τους, θα υπόκεινται σε μεγαλύτερη πυκνότητα τροχιών. Από την άλλη μεριά, για τους *MTPC* επιλέχθηκε ένα μίγμα $ArCO_2CH_4$ με αναλογία 90 : 5 : 5 μιας και η πυκνότητα τροχιών στην περιοχή αυτών των θαλάμων μειώνεται (τα μίγματα που περιέχουν αργό και μεθάνιο δεν είναι κατάλληλα σε περιβάλλον μεγάλης σωματιδιακής πυκνότητας).

4.3.2 Οι ανιχνευτές **TIME OF FLIGHT**

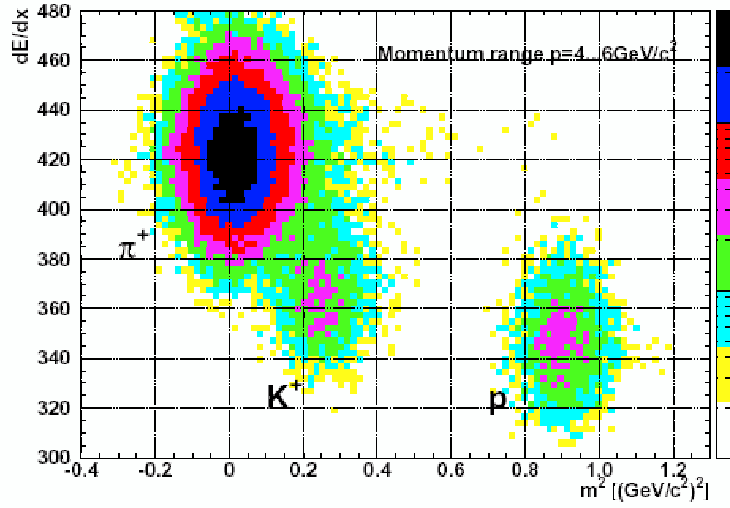
Για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα στην ταυτοποίηση των σωματιδίων, τοποθετήθηκαν μετά τους δυο κύριους ανιχνευτές *TPC*, δυο ανιχνευτές χρόνου πτήσης (*Time Of Flight - TOF*) οι οποίοι χρησιμοποιούνται με καλή απόδοση για την αναγνώριση σωματιδίων.

Το όλο σύστημα των *TOF* σχηματίζεται από 4 ξεχωριστά υποσυστήματα τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από 2000 κανάλια. Τα μεγαλύτερα από τα δυο υποσυστήματα καλύπτουν μια περιοχή της τάξης των $2.2\ m^2$.

Η χρονική απόσταση που μετράνε οι ανιχνευτές χρόνου πτήσης ξεκινά όταν πραγματοποιηθεί μια αλληλεπίδραση μεταξύ δέσμης και στόχου και τελειώνει όταν δώσει σήμα ένας από τους σπινθηριστές που είναι τοποθετημένοι κοντά στους *TOF*. Λόγω του ότι οι *TPC* δίνουν με μεγάλη ακρίβεια τη θέση μιας τροχιάς, συνδιασμός αυτής της πληροφορίας και της αντίστοιχης που λαμβάνουμε από τους *TOF* δίνει την ακριβή θέση της αλληλεπίδρασης. Συνδιάζοντας έτσι τα αποτελέσματα των δυο αυτών διαφορετικών ανιχνευτών έχουμε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα στο διαχωρισμό των σωματιδίων (Σχήματα 4.4 και 4.5). Από αυτά τα σχήματα γίνεται φανερό ότι η ταυτόχρονη χρησιμοποίηση της μέτρησης του dE/dx και της αντίστοιχης από τους *TOF* ανιχνευτές, οδηγούν στον καλύτερο διαχωρισμό των φορτισμένων σωματιδίων.

4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ **Pb + Pb**

Για την επιλογή των κεντρικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ ιόντων μολύβδου, χρειάζεται επιπλέον η μέτρηση της ενέργειας που έχει απομείνει στον άξονα της δέσμης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του *Veto* θερμομέτρου που



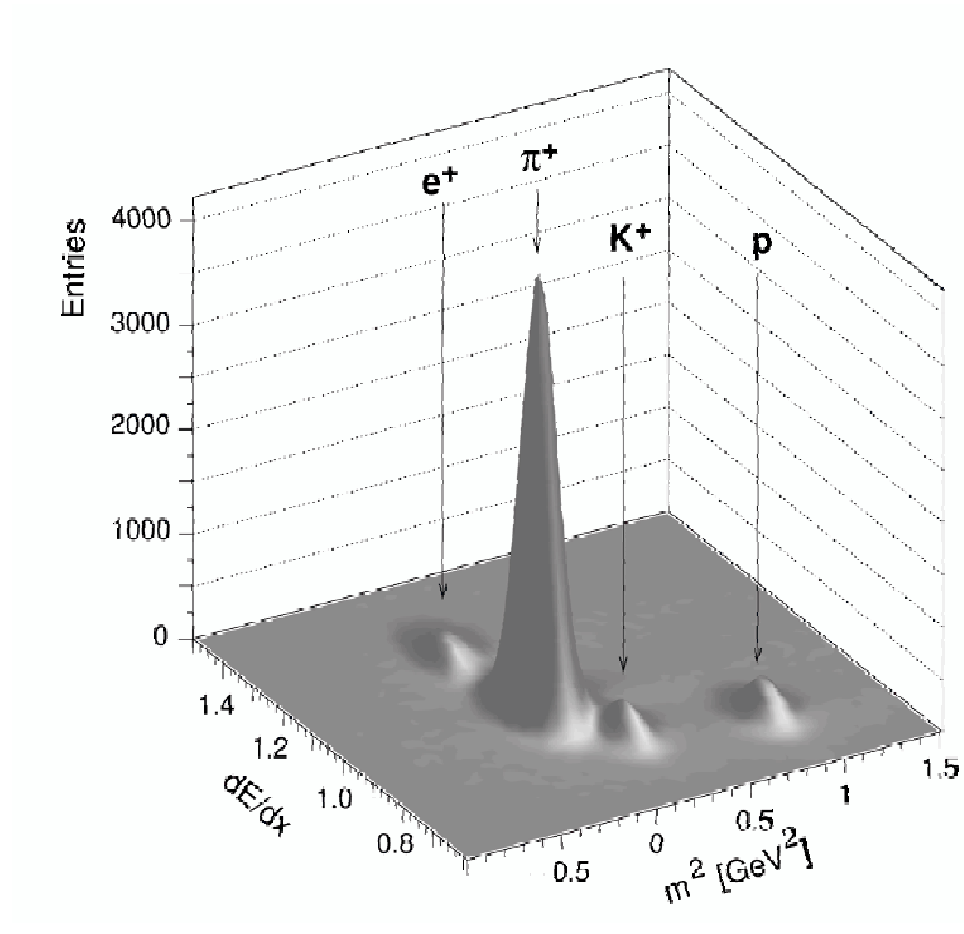
Σχήμα 4.4: Ταυτοποίηση σωματιδίων από ταυτόχρονη μέτρηση dE/dx και TOF.

είναι τοποθετημένο 20 m πίσω από το σημείο της αλληλεπίδρασης (VCAL στο σχήμα 4.3).

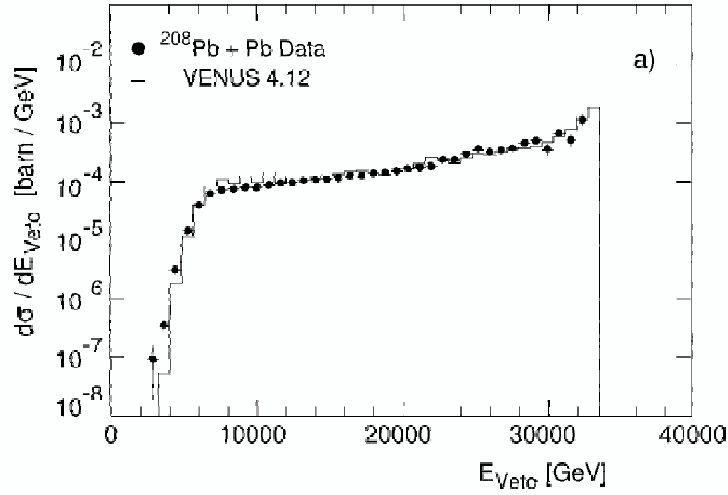
Το Veto καλορίμετρο αποτελείται από σπινθηριστές μολύβδου με 16 μήκη ακτινοβολίας, που συμπληρώνονται από σπινθηριστές σιδήρου με 7.5 μήκη ακτινοβολίας. Η διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της ενέργειας είναι:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{1.0}{\sqrt{E}} \quad (4.1)$$

Το σχήμα 4.6 εμφανίζει την κατανομή της ενέργειας που εναποτίθεται στο Veto καλορίμετρο σε αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$. Οι κεντρικές αλληλεπιδράσεις αντιστοιχούν σε ενέργειες $E_{veto} \leq 9TeV$. Συμπερασματικά οι κεντρικές αλληλεπιδράσεις αντιστοιχούν στο περίπου 5% της ενεργού διατομής των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ και σε παραμέτρους χρούσεις $b \leq 3.5fm$ (σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.5: Ταυτοποίηση σωματιδίων από ταυτόχρονη μέτρηση dE/dx και TOF.



Σχήμα 4.6: Η κατανομή της ενέργειας που εναποτίθεται στο Veto καλορίμετρο σε αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$.

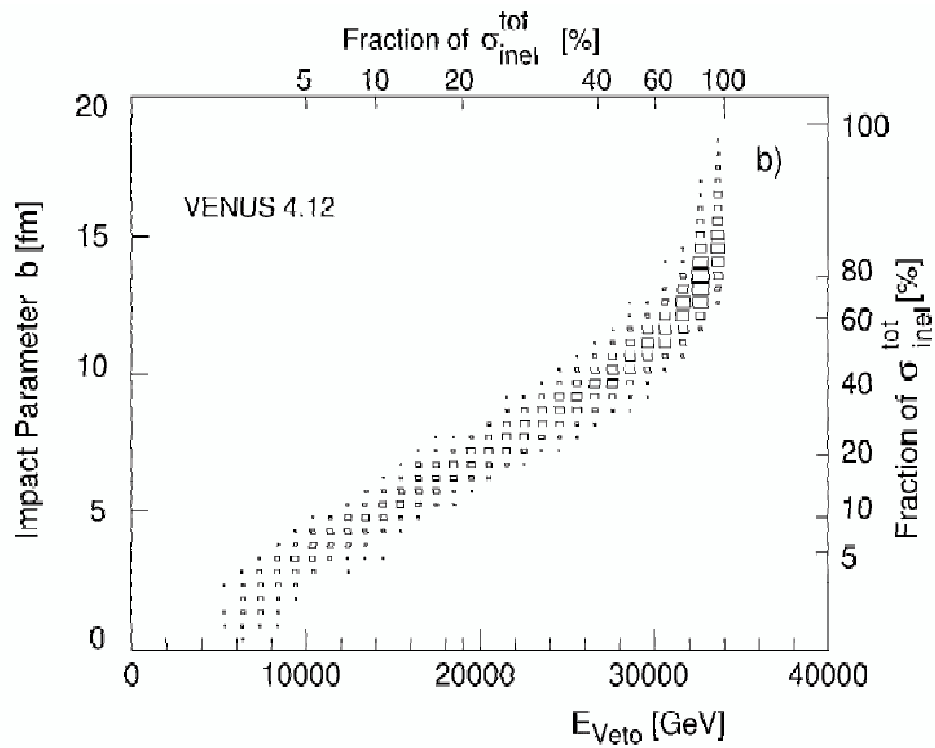
4.4.1 Καθορισμός της παραμέτρου κρούσης $\mathbf{b}$

Ένας απλός τρόπος υπολογισμού της παραμέτρου κρούσης για κάθε διαφορετική κλάση κεντρικότητας, πραγματοποιείται αν θεωρήσουμε ότι η ενέργεια $\langle E_0 \rangle$ του Veto καλορίμετρου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η παράμετρος κρούσης ($\mathbf{b}$) έτσι ώστε να ισχύει:

$$\int_0^{E_0} \frac{d\sigma}{dE'_0} dE'_0 = \int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db' \quad (4.2)$$

όπου $d\sigma/dE_0$ είναι το φάσμα της κατανομής της E_0 και $d\sigma/db$ δίνεται κατά προσέγγιση από τη γεωμετρική ενεργό διατομή $2\pi b$. Η πιο πάνω σχέση λύνεται κατά προσέγγιση ως προς $\mathbf{b}$ δίνοντας:

$$\langle b(E_0) \rangle = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{E_0} \frac{d\sigma}{dE'_0} dE'_0 \right]^{1/2} \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.7: Η παράμετρος χρούσης και ο λόγος της ενεργού διατομής ως συνάρτηση της ενέργειας που εναποτίθεται στο Veto καλορίμετρο σε αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$

4.4.2 Καθορισμός της παραμέτρου N_{spec}

Η μέση ενέργεια που αναλογεί σε κάθε νουκλεόνιο που δεν αλληλεπιδρά με τον στόχο, είναι η κινητική ενέργεια της δέσμης ανά νουκλεόνιο T_{beam}/A . Μια εκτίμηση του αριθμού $N_{spec.}$ προέρχεται από τη μέτρηση της ενέργειας E_0 και της αντίστοιχης μέτρησης που προέρχεται από προσομοίωση της πρόσμιξης της E_0 από παραγόμενα σωματίδια ($E_{0,cont.}$):

$$N_{spec.} = \left(1 - \epsilon(E_0)\right) \frac{E_0 - E_{0,cont.}}{T_{beam}/a} \quad (4.4)$$

όπου $\epsilon(E_0)$ είναι ένας παράγοντας διόρθωσης της μετρούμενης ενέργειας E_0 .

Μέσα σε κάθε κλάση κεντρικότητας, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της τιμής της παραμέτρου $N_{part.}$ από τις κατανομές των $p - \bar{p}$ και $K^+ - K^-$ μαζί με εκτιμήσεις από μοντέλα προσομοίωσης για τις κατανομές του καθαρού αριθμού των νετρονίων $n - \bar{n}$ και του αντίστοιχου αριθμού των υπερονίων $Y - \bar{Y}$. Τα μοντέλα αυτά δείχνουν ένα μικρό πλεόνασμα της τάξης του $a \approx 2 - 9\%$ της κατανομής των $n - \bar{n}$ σε σχέση με την αντίστοιχη κατανομή των $p - \bar{p}$.

Η κατανομή $K^+ - K^-$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παραδοξότητας που περιέχουν τα μεσόνια. Από τη διατήρηση της παραδοξότητας το πιο πάνω πλεόνασμα καλύπτεται από τον καθαρό αριθμό των παράδοξων υπερονίων $Y - \bar{Y}$. Υποθέτοντας ότι οι κατανομές $K^+ - K^-$ και $K^0 - \bar{K}^0$ είναι παρόμοιες, βγάζουμε το συμπέρασμα ότι ο καθαρός αριθμός των παράδοξων σωματιδίων ισούται με δυο φορές την κατανομή των $K^+ - K^-$. Τέλος, αφού τα σωματίδια Ξ και Ω^- αποτελούνται από περισσότερα των 1 παράδοξα quarks, ο καθαρός αριθμός των παράδοξων σωματιδίων που οφείλεται στα υπερόνια είναι:

$$(Y - \bar{Y}) \left[1 + \frac{Xi - \bar{X}i}{Y - \bar{Y}} + 2 \frac{\Omega^- - \bar{\Omega}^+}{Y - \bar{Y}} \right] = (Y - \bar{Y})(1 + \beta)$$

Από μετρήσεις της παραγωγής των υπερονίων σε αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ στο CERN - SPS προκύπτει ότι $\beta = 0.1 \pm 0.02$. Έτσι η παράμετρος $N_{part.}$ δίνεται από τη σχέση:

$$N_{part.} \approx (2 + a)(p - \bar{p}) + 2(1 - \beta)(K^+ - K^-) \quad (4.5)$$

4.5 ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια του πειράματος NA49 είναι η αναγνώριση και ταυτοποίηση των παραγομένων σωματιδίων. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να ελεγχθεί σχεδόν όλος ο φασικός χώρος και μάλιστα κάθε τροχιά ξεχωριστά. Αυτό είναι εξαιρετικά δύσκολο αν αναλογιστούμε ότι το συγκεκριμένο πείραμα είναι πείραμα σταθερού στόχου, με πολύ μεγάλη πολλαπλότητα παραγομένων σωματιδίων. Αφού στο πείραμα αυτό η κατανομή της ορμής των ανακατασκευασμένων τροχιών κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες MeV/c μέχρι $100GeV/c$, η τιμή της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής βρίσκεται σε όλο το φάσμα, από το υπο-ρελατιβιστικό όριο για καόνια και πρωτόνια μέχρι τη ρελατιβιστική αύξηση για πιόνια και ηλεκτρόνια.

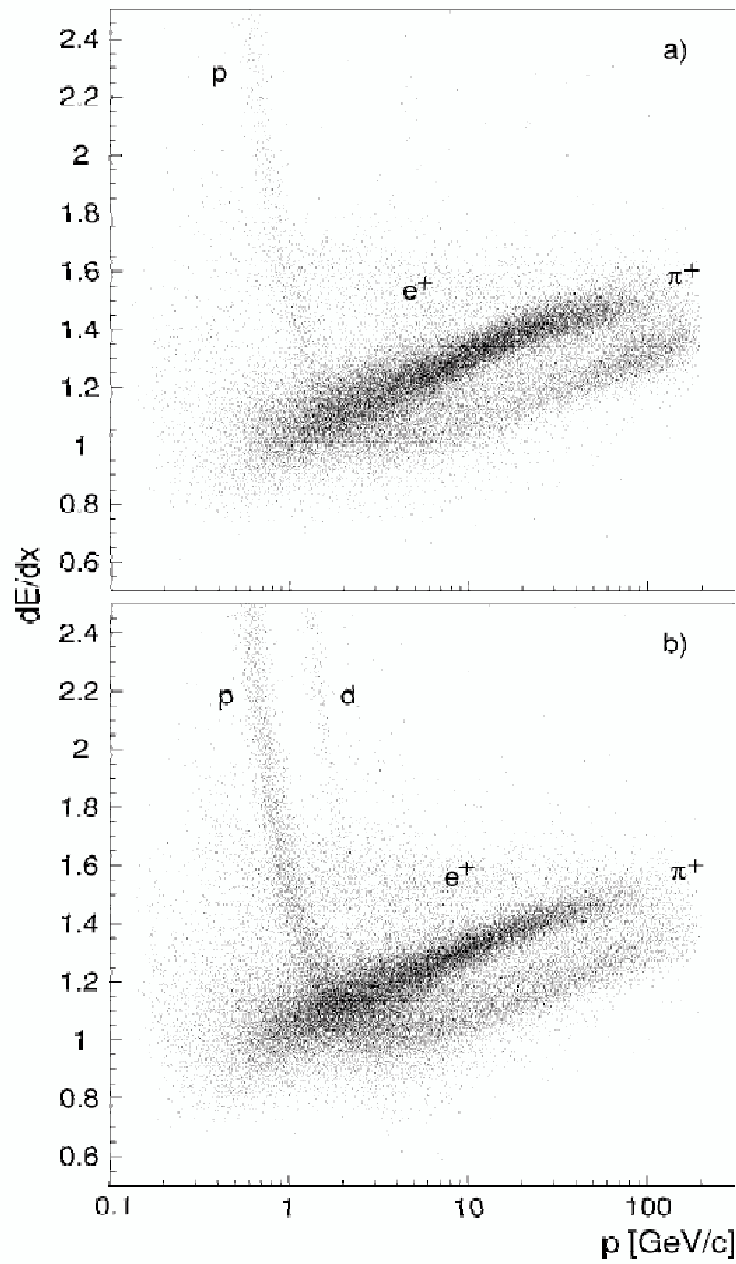
Η ταυτοποίηση των παραγομένων σωματιδίων γίνεται, όπως έχουμε πει και πιο πριν, με τη βοήθεια των TPC και κυρίως μέσω της μέτρησης της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους των φορτισμένων σωματιδίων (ιονισμός του αερίου των ανιχνευτών). Στο σχήμα 4.8 φαίνεται η παράμετρος dE/dx γις θετικά φορτισμένα σωματάρια σαν συνάρτηση της ορμής τους σε διαφορετικές αλληλεπιδράσεις. Η προβολή του γραφήματος αυτού στην περιοχή των $10GeV/c$ (σχήμα 4.9) δείχνει τον καλό διαχωρισμό των ηλεκτρονίων από τα πιόνια και τα πρωτόνια. Επίσης γίνεται φανερή η κορυφή των καονίων, πράγμα πολύ σημαντικό στις αναλύσεις που μελετούν παραδοξότητα (*strangeness*).

Η ικανότητα ταυτοποίησης σωματιδίων αν χρησιμοποιούσαμε μόνο ένα TPC θα αναγόταν σε καθορισμό πιθανοτήτων ταυτοποίησης (σχήμα 4.10). Για να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιούμε όλους τους TPC ταυτόχρονα γιατί έτσι τα κριτήρια επιλογής καθορίζονται από όλο το χώρο.

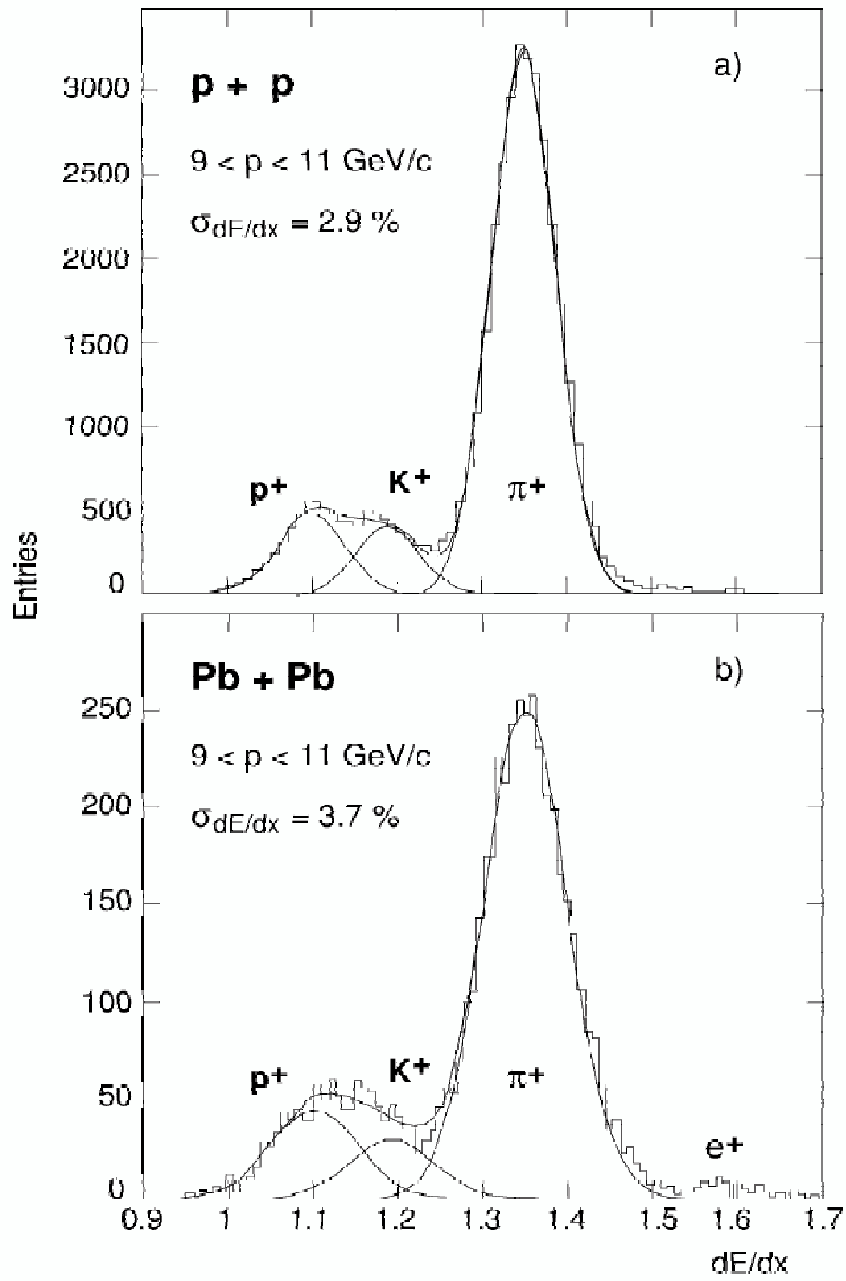
Η διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής, υπολογίζεται και βελτιώνεται μέσω μιας μεθόδου βάση της οποίας περιπκόπτουμε συσσωματώματα (*clusters*). Η καλύτερη μέθοδος επιλέχθηκε ύστερα από ανάλυση δεδομένων που προήλθαν από προσομοιώσεις (*Monte Carlo*). Έτσι η διακριτική ικανότητα στη μέτρηση του dE/dx υπολογίζεται ότι είναι:

$$\sigma \approx \frac{38\%}{N_{clusters}} \quad (4.6)$$

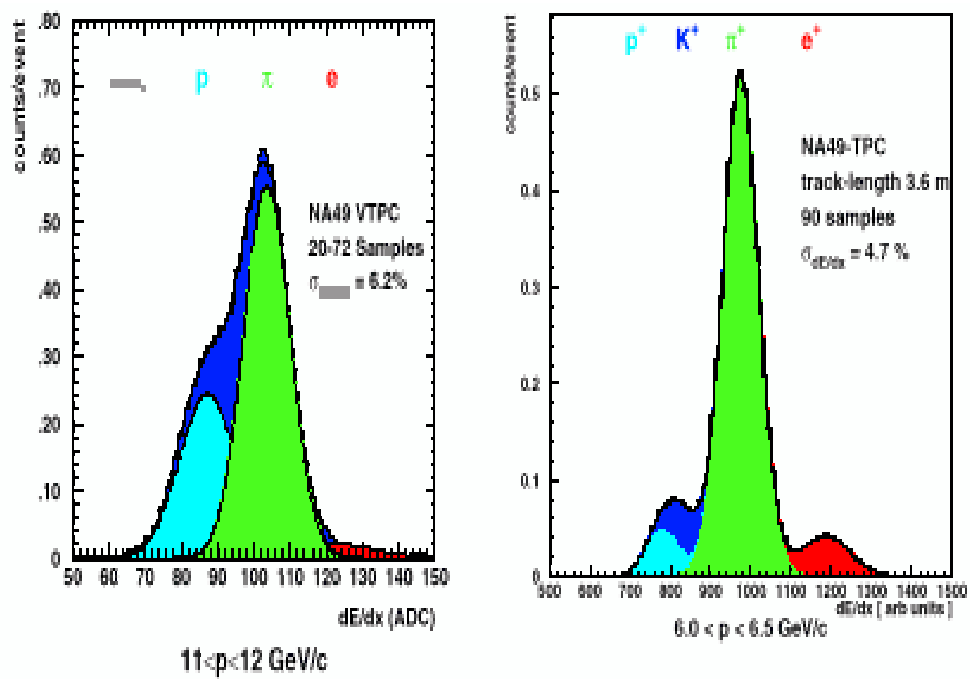
όπου $N_{clusters}$ ο αριθμός των *clusters* κάθε τροχιάς.



Σχήμα 4.8: Η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής ως συνάρτηση της ορμής των θετικά φορτισμένων σωματιδίων που παράγονται σε συγκρούσεις $p + p$ και $Pb + Pb$



Σχήμα 4.9: Η τιμή της dE/dx για συγκεκριμένο εύρος ορμής σε συγκρούσεις $p + p$ και $Pb + Pb$.



Σχήμα 4.10: Η τιμή της dE/dx για συγκεκριμένο εύρος ορμής σε συγκρούσεις $p + p$ και $Pb + Pb$.

4.6 ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΕΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΕΣ

4.6.1 Διακριτική ικανότητα στην ορμή

Η μέτρηση της ορμής των παραγομένων σωματιδίων, γίνεται με τη βοήθεια του μαγνητικού πεδίου, η τιμή του οποίου είναι $1.5T$ για την περιοχή του πρώτου *VTPC* και $1.1T$ για τον δεύτερο, που υπάρχει στο χώρο που καλύπτουν οι δυο *VTPC*. Η διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της ορμής εξαρτάται από την αντίστοιχη διακριτική ικανότητα στις μετρήσεις των τριών χωρικών συντεταγμένων. Επίσης εξαρτάται από το ολικό μήκος της τροχιάς καθώς και από τον αριθμό των σημείων που έχουν καταγραφεί σε κάθε *TPC*.

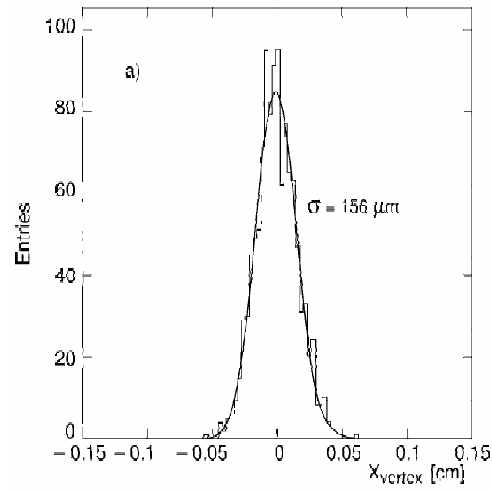
Τυπικές τιμές αυτής της διακριτικής ικανότητας για τροχιές που περάσαν μόνο από τον *VTPC-1* και για αυτές που περάσαν από τον *VTPC-2* και έναν από τους *MTPC* είναι αντίστοιχα:

$$dP/P^2 = 7.0 \cdot 10^{-4} (GeV/c)^{-1} \quad (4.7)$$

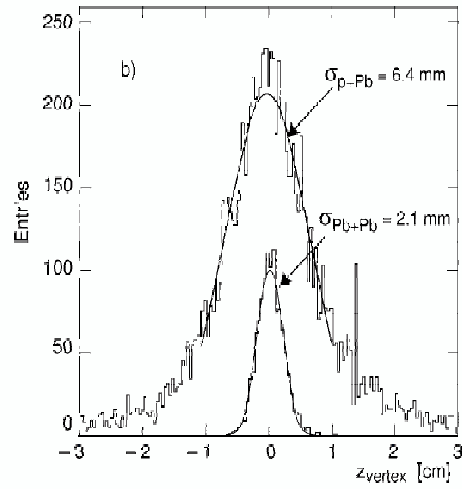
$$dP/P^2 = 0.3 \cdot 10^{-4} (GeV/c)^{-1} \quad (4.8)$$

4.6.2 Διακριτική ικανότητα στη μέτρηση του σημείου πρωτεύουσας αλληλεπίδρασης

Ο καθορισμός του σημείου της πρωτεύουσας αλληλεπίδρασης (*primary vertex*), περιορίζεται στο κάθετο επίπεδο ως προς τη δέσμη από τον προσδιορισμό της θέσης της δέσμης. Ο καθορισμός λοιπόν του πρωτεύοντος *vertex* έχει μεγάλη φυσική σημασία αφού μέσω αυτής της διαδικασίας μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός των δευτερευουσών αλληλεπιδράσεων από τις αρχικές. Για γεγονός με μεγάλη πολλαπλότητα παραγομένων σωματιδίων, η διακριτική ικανότητα στην εύρεση του *vertex* στον άξονα x είναι της τάξης του $150 \mu m$ για κεντρικές συγκρούσεις μεταξύ ιόντων μολύβδου 4.11. Από την άλλη μεριά για τη διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της θέσης του πρωτεύοντος *vertex* στον άξονα της δέσμης είναι της τάξης του $2.1 mm$ 4.12.



Σχήμα 4.11: Η κατανομή του vertex στον άξονα x για κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$.



Σχήμα 4.12: Η κατανομή του vertex στον άξονα z για κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ και αλληλεπιδράσεις $p + Pb$.

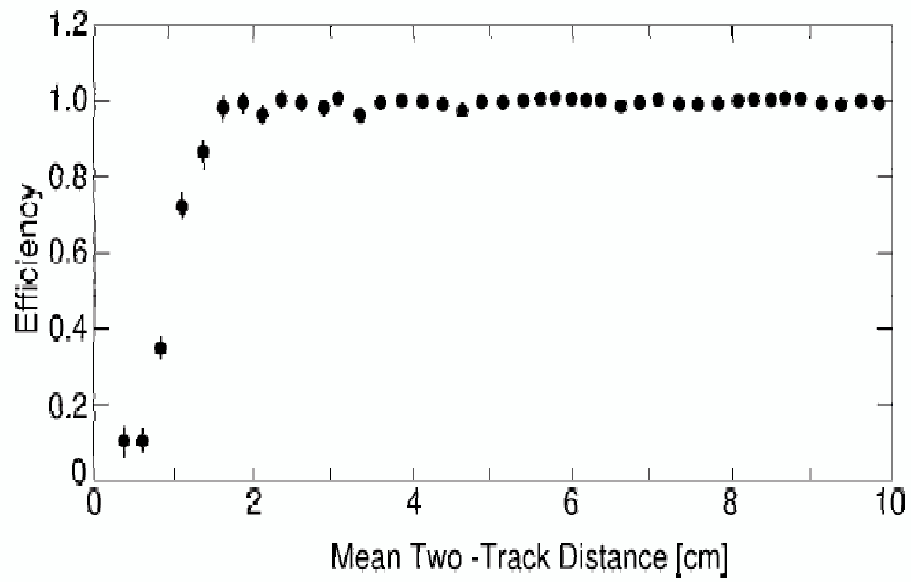
4.6.3 Διακριτική ικανότητα διαχωρισμού δυο τροχιών

Ο διαχωρισμός των τροχιών που βρίσκονται πολύ κοντά στο φασικό χώρο, είναι πρωτίστης σημασίας σε γεγονότα με μεγάλη πολλαπλότητα παραγομένων σωματιδίων. Το πρόβλημα είναι πολύ μεγαλύτερο σε πειράματα σταθερού στόχου αφού η πλειονότητα των σωματιδίων ταξιδεύει παράλληλα στον άξονα της δέσμης ενώ παρατηρούνται λίγα σωματίδια των οποίων οι τροχιές τέμνονται υπό μεγάλες γωνίες.

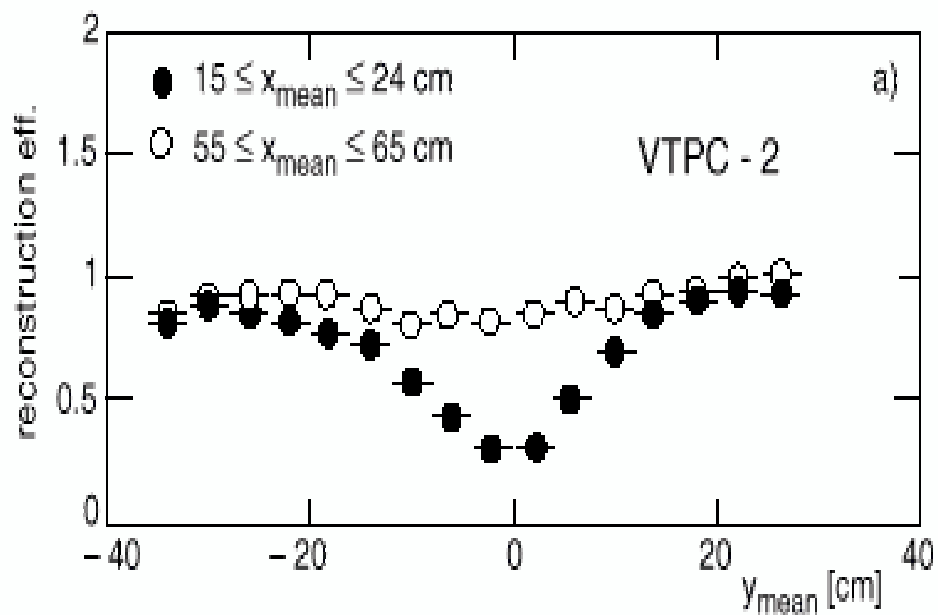
Ο διαχωρισμός των γειτονικών τροχιών μπορεί να γίνει με μεγάλη απόδοση, μέχρι και για αποστάσεις 1cm . Η διακριτική ικανότητα στο διαχωρισμό των τροχιών επιτυγχάνεται πειραματικά αν συγκρίνουμε τις αποστάσεις των τροχιών του ίδιου γεγονότος με τις αντίστοιχες αποστάσεις ζευγών που προκύπτουν από αναμεμιγμένα γεγονότα (*mixed events*). Το σχήμα 4.13 δείχνει την υπολογισμένη διακριτική ικανότητα. Ο διαχωρισμός των τροχιών, επιτυγχάνεται και κάτω από αυτό το επίπεδο με διάφορες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια των διαφόρων αναλύσεων. Έτσι μπορούμε να φτάσουμε σε μια μέση απόσταση μέχρι και $3-5\text{mm}$ αν ληφθεί υπόψη η πληροφορία του dE/dx των *TPC*.

4.6.4 Απόδοση ανακατασκευής τροχιών

Σε περιβάλλον με χαμηλή πολλαπλότητα τροχιών η ικανότητα ακόμα και του ματιού να τις αναγνωρίζει είναι αρκετά μεγάλη. Σε συνθήκες όμως με μεγάλη πυκνότητα τροχιών η ικανότητα αναγνώρισής τους καθορίζεται από την προσπάθεια ανακατασκευής τροχιών που παράγονται μέσα από *Monte Carlo*. Αυτή η ικανότητα είναι συνήθως πάνω από 95% σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα, ενώ μειώνεται στις αντίστοιχες περιοχές με υψηλή πυκνότητα τροχιών (σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.13: Η διακριτική ικανότητα στο διαχωρισμό δυο τροχιών όπως προκύπτει από ανάμιξη γεγονότων (event mixing) στον VTPC-2.



Σχήμα 4.14: Η ικανότητα ανακατασκευής των τροχιών σε δυο περιοχές, μακριά και κοντά στον άξονα της δέσμης σαν συνάρτηση του μήκους ολίσθησης.

Κεφάλαιο 5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το πρώτο βήμα που πραγματοποιήθηκε πριν αναλυθούν τα πειραματικά δεδομένα με τη βοήθεια της συνάρτησης ισοζυγίου, ήταν να μελετηθεί η ποιότητά τους τόσο σε επίπεδο γεγονότων, όσο και σε επίπεδο τροχιών. Οι επόμενες παράγραφοι ασχολούνται ακριβώς με αυτό το θέμα.

5.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ

Τα γεγονότα που αναλύθηκαν, προέρχονται από διάφορα αλληλεπιδρώντα συστήματα όπως $p + p$, $C + C$, $Si + Si$ καθώς και $Pb + Pb$. Για την περίπτωση των πρωτονίων, έχουν επιλεγεί όλες οι ανελαστικές τους αλληλεπιδράσεις. Για τις περιπτώσεις του άνθρακα αλλά και του πυριτίου, τα πειραματικά δεδομένα που αναλύθηκαν αντιστοιχούν στο 15% και 12% αντίστοιχα των πιο κεντρικών συγκρούσεων. Τέλος, οι αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ έχουν χωριστεί σε 6 κατηγορίες κεντρικότητας, με βάση την ενέργεια που αποτίθεται από τα νουκλεόνια που δεν λαμβάνουν μέρος στις αλληλεπιδράσεις στο αντίστοιχο θερμιδόμετρο (veto calorimeter) [1] (λεπτομέρειες για τον τρόπο καθορισμού τις κεντρικότητας δίνονται στο κεφάλαιο 4). Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τις διάφορες κλάσεις κεντρικότητας για τις δυο ενέργειες του SPS που αναλύθηκαν, παρουσιάζονται στους πίνακες 5.1 για την περίπτωση της $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ και 5.2 για την $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$ αντίστοιχα [2, 3].

Το γράφημα 5.1 δείχνει την ενέργεια E_{VETO} που αποτίθεται από τα νουκλεόνια που δεν λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση στο αντίστοιχο καλορί-

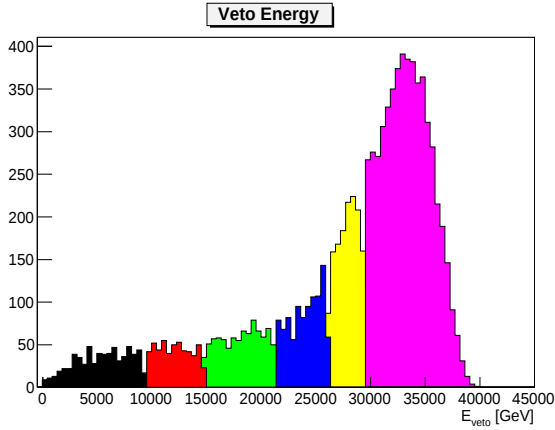
Αλληλεπίδραση	Εύρος $E_0(GeV)$	$\langle N_W \rangle$	$\langle b \rangle [fm]$
$p + p$		2	
$C + C$		14	1.9
$Si + Si$		37	2.0
$Pb + Pb(6)$	29340 - 40000	42 ± 10	11.5
$Pb + Pb(5)$	26080 - 29340	88 ± 10	9.6
$Pb + Pb(4)$	21190 - 26080	134 ± 10	8.3
$Pb + Pb(3)$	14670 - 21190	204 ± 10	6.5
$Pb + Pb(2)$	9250 - 14670	281 ± 10	4.6
$Pb + Pb(1)$	0 - 9250	362 ± 8	2.4

Πίνακας 5.1: Τα διαφορετικά συστήματα αλλά και οι κατηγορίες κεντρικότητας για τα πειραματικά δεδομένα που αναλύθηκαν στην ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$. Στον πίνακα φαίνονται τα συστήματα και οι 6 κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$, καθώς και το εύρος της ενέργειας στο καλορίμετρο που καθορίζει την κεντρικότητα μαζί με τον αριθμό των νουκλεονίων που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση. Τέλος, παρατίθεται και το αντίστοιχο εύρος της παραμέτρου κρούσης.

μετρο για τη μέγιστη ενέργεια του SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$). Τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν στα εύρη των ενεργειών που καθορίζουν την κάθε κατηγορία κεντρικότητας όπως αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Τέλος, για την ενεργειακή μελέτη που πραγματοποιήθηκε, αναλύθηκαν οι πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε όλο το ενεργειακό φάσμα του SPS . Ο αριθμός των γεγονότων που αναλύθηκε σε κάθε ενέργεια, καθώς και κάποιες επιπλέον πληροφορίες (όπως το ποσοστό της ενεργού διατομής που αντιστοιχεί στις κεντρικές συγκρούσεις κάθε ενέργειας), παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

Μέσα σε κάθε κατηγορία κεντρικότητας, ελέγχουμε αν τα αντίστοιχα γεγονότα προέρχονται από την πρωτεύουσα αλληλεπίδραση ή αν αντιστοιχούν σε κάποιο μηχανισμό που αποτελεί το υπόβαθρο, όπως αλληλεπίδραση της δέσμης με το αέριο του σωλήνα που μεταφέρεται η δέσμη (**beam gas**) ή ακόμα και μη εστιασμένη δέσμη που αλληλεπιδρά με τα τοιχώματα του σωλήνα. Για το σκοπό αυτό, ελέγχουμε το σημείο της πρωτεύουσας αλληλεπίδρασης (**primary vertex**) και στις τρεις συνιστώσες. Το σχήμα 5.2, δείχνει κάποιες ενδεικτικές κατανομές των V_x (αριστερό γράφημα), V_y (μεσαίο γράφημα) και V_z (δεξί γράφημα) που αντιστοιχούν στα **minimum bias** $Pb + Pb$ γεγονότα. Με κόκκινο



Σχήμα 5.1: Η κατανομή της ενέργειας που αποτίθεται στο καλορίμετρο της διάταξης του NA49 από τα νουκλεόνια που δεν λαμβάνουν μέρος στις αλληλεπιδράσεις των πλέον βαρέων ιόντων ($Pb+Pb$) για τη μέγιστη ενέργεια του SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$).

Αλληλεπίδραση	Εύρος $E_0(GeV)$	$\langle N_W \rangle$	$\langle b \rangle [fm]$
$C + C$		14	1.9
$Si + Si$		37	2.0
$Pb + Pb(6)$	6406 - 20000	42 ± 10	11.5(;)
$Pb + Pb(5)$	5436 - 6406	88 ± 10	9.6(;)
$Pb + Pb(4)$	4191 - 5436	134 ± 10	8.3(;)
$Pb + Pb(3)$	2586 - 4191	204 ± 10	6.5(;)
$Pb + Pb(2)$	1398 - 2586	281 ± 10	4.6(;)
$Pb + Pb(1)$	0 - 1398	362 ± 8	2.4(;)

Πίνακας 5.2: Οι αντίστοιχες πληροφορίες που υπάρχουν στον πίνακα 5.1 αυτή τη φορά για την περίπτωση της ενέργειας $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$.

περιγράφεται η περιοχή που επιλέγεται να αναλυθεί, ενώ με μαύρο αυτή που απορρίπτεται. Αυτό που δείχνουν τα σχήματα, είναι ότι δεχόμαστε τα γεγονότα των οποίων οι συνιστώσες της θέσης της πρωτεύουσας αλληλεπίδρασης πληρούν τις σχέσεις:

$$|V_i - V_{i0}| \leq \Delta V_i$$

όπου $i : x, y, z$ για τις τρεις διαφορετικές συνιστώσες. Οι τιμές για τα V_{i0} και ΔV_i εξαρτώνται από το εκάστοτε δείγμα των γεγονότων [2, 3].

$\sqrt{s_{NN}}[GeV]$	Αριθμός γεγονότων	$\sigma_{cent.}/\sigma_{inel.}[\%]$	$\langle N_W \rangle$
6.3	100K	7.2	$349 \pm 1 \pm 5$
7.6	100K	7.2	$349 \pm 1 \pm 5$
8.8	100K	7.2	$349 \pm 1 \pm 5$
12.3	100K	7.2	$349 \pm 1 \pm 5$
17.3	100K	5.0	362 ± 8

Πίνακας 5.3: Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται η ενέργεια της αλληλεπίδρασης, ο αριθμός των γεγονότων που αναλύθηκαν, η ενεργός διατομή που αντιστοιχεί στις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ ως ποσοστό της ολικής ανελαστικής ενεργού διατομής, καθώς και ο αριθμός των νουκλεονίων που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση. Στην τελευταία στήλη το πρώτο σφάλμα αντιστοιχεί στο στατιστικό σφάλμα, ενώ ο δεύτερος όρος (όπου υπάρχει) στο συστηματικό.

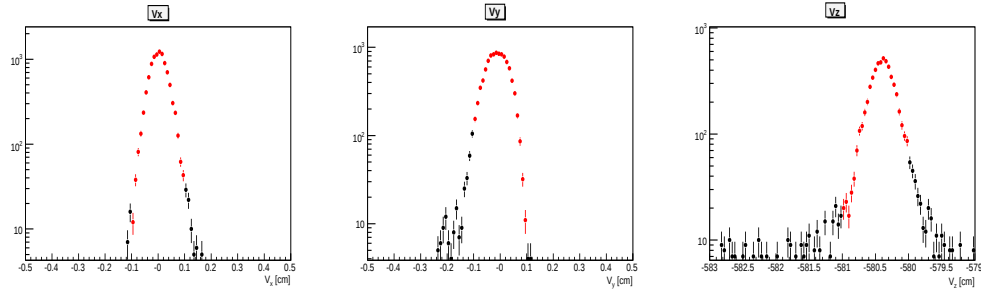
Άλλη μια ποσότητα που ελέγχουμε και αφορά το σημείο της πρωτεύουσας αλληλεπίδρασης, είναι ο λόγος του αριθμού των τροχιών που σχετίζονται με το σημείο αυτό ως προς τον ολικό αριθμό των τροχιών που καταγράφησαν από τους ανιχνευτές. Στο σχήμα 5.3 βλέπουμε την κατανομή αυτού του λόγου, από την οποία δεχόμαστε όλη την περιοχή πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή ($ratio > 0.25$). Με τη μελέτη αυτή, εξασφαλίζουμε ότι οι τροχιές του γεγονότος που αναλύουμε προέρχονται κυρίως από την κύρια αλληλεπίδραση [2, 3].

Η συσχέτιση του αριθμού των τροχιών που καταγράφονται από τους ανιχνευτές με την ενέργεια που αποτίθεται στο θερμιδόμετρο (E_{VETO}), μας δίνει ένα ακόμα κριτήριο επιλογής γεγονότων. Το σχήμα 5.4 δείχνει το συσχετισμό των δυο αυτών μεγεθών για τις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$. Όλα τα γεγονότα που βρίσκονται μέσα στη ζώνη που φαίνεται στο σχήμα γίνονται αποδεκτά στην ανάλυση.

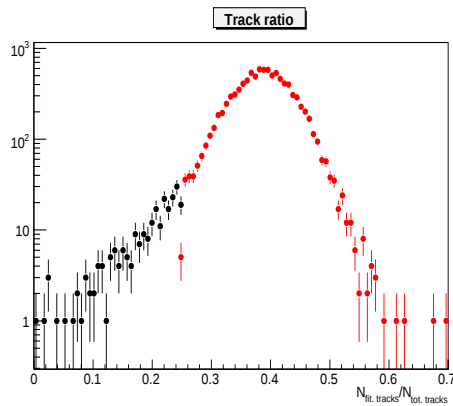
Τέλος, σε επίπεδο γεγονότος, εξετάζουμε και τον ολικό αριθμό των τροχιών, θέτοντας τουλάχιστων στην περίπτωση των ιόντων ($C + C$, $Si + Si$, $Pb + Pb$) ένα κατώτατο όριο (10 τροχιές ανά γεγονός). Το σχήμα 5.5 εμφανίζει την κατανομή του αριθμού των τροχιών, όπου στο αριστερό μέρος βλέπουμε τη μικρή περιοχή που απορρίπτεται λόγω αυτού του κριτηρίου.

Συνοπτικά, σε επίπεδο γεγονότων, επιβλήθηκαν τα ακόλουθα κριτήρια:

- Οι τιμές της θέσης του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης.

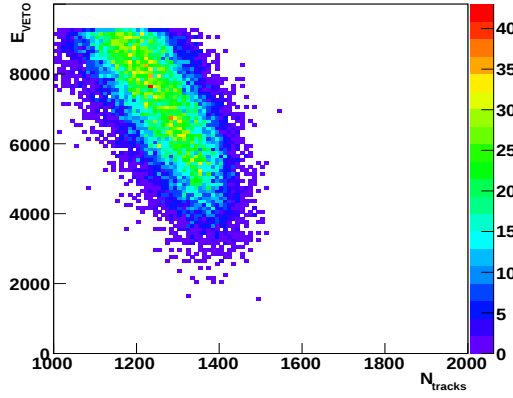


Σχήμα 5.2: Οι κατανομές των V_x (αριστερό γράφημα), V_y (μεσαίο γράφημα) και V_z (δεξί γράφημα) που αντιστοιχούν στα **minimum bias** γεγονότα αλληλεπίδρασεων $Pb + Pb$. Με κόκκινο περιγράφεται η περιοχή που επιλέγεται να αναλυθεί, ενώ με μαύρο αυτή που απορρίπτεται.

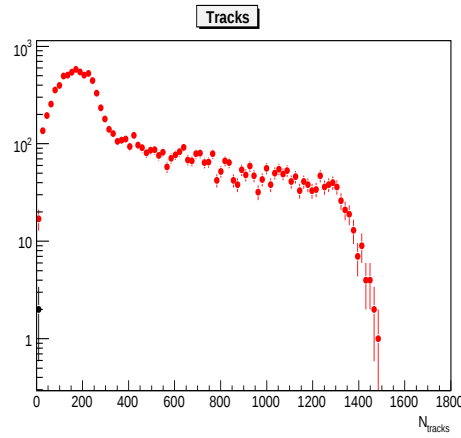


Σχήμα 5.3: Η κατανομή του λόγου του αριθμού των τροχιών που σχετίζονται με το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης ως προς τον ολικό αριθμό των τροχιών.

- Οι τιμές του λόγου των τροχιών που αποδίδονται στο σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης προς τον ολικό αριθμό των τροχιών.
- Ελάχιστη πολλαπλότητα τροχιών ανά γεγονός.



Σχήμα 5.4: Η συσχέτιση του αριθμού των τροχιών που καταγράφονται από τους ανιχνευτές με την ενέργεια που αποτίθεται από τα νουκλεόνια που δεν λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση (E_{VETO}). Τα σημεία προέρχονται από τις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$.



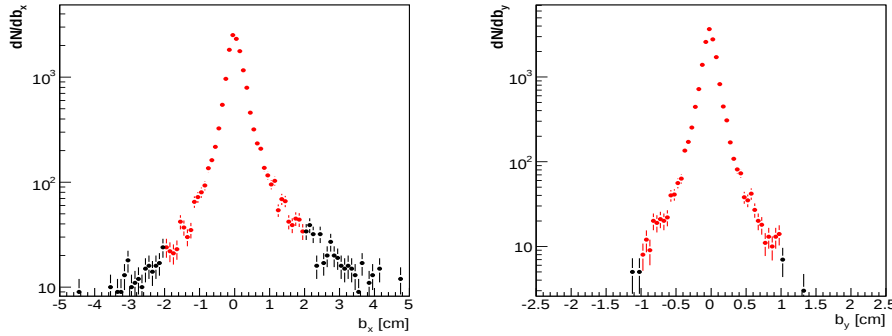
Σχήμα 5.5: Η κατανομή του αριθμού των τροχιών. Τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν στην περιοχή που απορρίπτεται στην περίπτωση συγκρούσεων $C + C$, $Si + Si$ ή $Pb + Pb$.

5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΡΟΧΙΩΝ

Αφού ελέγξουμε όλες τις παραμέτρους σε επίπεδο γεγονότος, το επόμενο βήμα είναι να ελέγξουμε την ποιότητα των τροχιών που αντιστοιχούν στο γεγονός, ώστε να εξασφαλίσουμε την ποιότητα της ανάλυσης. Τα ποιοτικά κριτήρια θα αναφερθούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Στην ανάλυση αυτή, ενδιαφερόμαστε για τροχιές που προέρχονται από την κύρια αλληλεπίδραση. Μια παράμετρος που μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη συνεισφορά τροχιών που προέρχονται από δευτερεύουσες αλληλεπιδράσεις, είναι η απόσταση της προέκτασης της τροχιάς στο υπολογισμένο σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης. Το σχήμα 5.6, δείχνει την κατανομή των δυο συνιστωσών της παραμέτρου αυτής στο x (b_x - αριστερό γράφημα) και y άξονα (b_y - δεξί γράφημα) αντίστοιχα. Έτσι, επιλέγοντας τις τροχιές που έχουν τιμές γύρω από

την κεντρική τιμή της κατανομής, εξασφαλίζουμε κατά ένα μεγάλο ποσοστό ότι αυτές προέρχονται από την κύρια αλληλεπίδραση [2, 3].

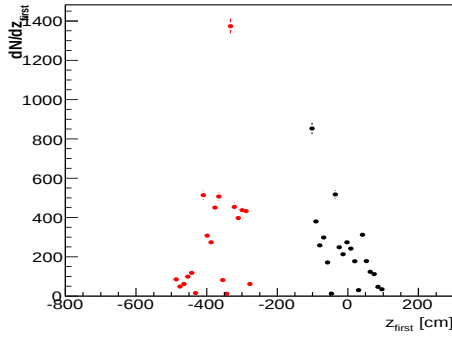


Σχήμα 5.6: Οι κατανομές των b_x (αριστερό γράφημα) και b_y (δεξί γράφημα) που δίνουν την απόσταση των τροχιών από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης. Με κόκκινο περιγράφεται η περιοχή που επιλέγεται να αναλυθεί, ενώ με μαύρο αυτή που απορρίπτεται.

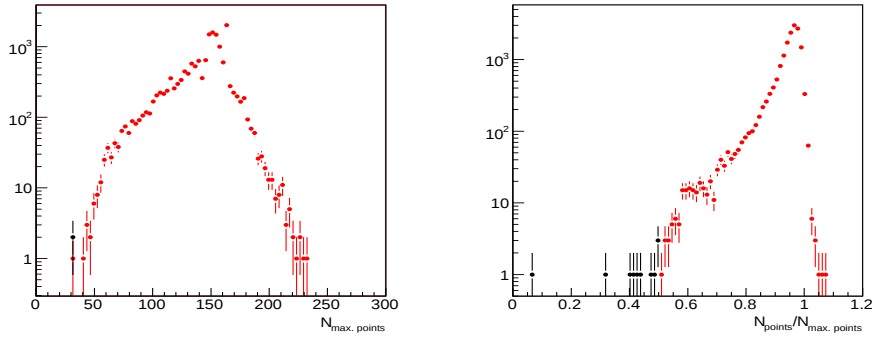
Μια ακόμη παράμετρος που κινείται στην ίδια κατεύθυνση της απόρριψης τροχιών που δεν προέρχονται από την κύρια αλληλεπίδραση, είναι η θέση του πρώτου σημείου της τροχιάς στον άξονα της δέσμης. Επιλέγεται αυτή η περιοχή που μας εξασφαλίζει ότι το πρώτο σημείο της τροχιάς βρίσκεται σε κάποιον από τους δυο πρώτους ανιχνευτές προβολής χρόνου (VTPC-1, VTPC-2) και όχι στους αμέσως επόμενους (MTPC). Το γράφημα 5.7 δείχνει την κατανομή της θέσεως του πρώτου σημείου κάθε τροχιάς. Γίνεται φανερό, ότι οι τροχιές που απαρτίζουν τα μαύρα σημεία του γραφήματος έχουν μεγάλη πιθανότητα να προέρχονται από δευτερεύουσες αλληλεπιδράσεις, αφού δεν έχουν αφήσει κάποιο ίχνος στους δυο πρώτους ανιχνευτές του πειράματος [2, 3].

Επίσης απαιτούμε οι τροχιές οι οποίες θα αναλυθούν να έχουν έναν κατώτερο αριθμό σημείων που καταγράφονται στους κύριους θαλάμους TPC. Ακόμα, ο λόγος του αριθμού αυτού προς τον ολικό αριθμό των σημείων μας δίνει ένα ακόμα κριτήριο ποιότητας της τροχιάς. Οι δυο αυτές κατανομές φαίνονται στο γράφημα 5.8.

Λόγω της όχι τόσο καλής κάλυψης στην εγκάρσια ορμή που παρέχεται από τους ανιχνευτές του πειράματος, επιλέγουμε τροχιές των οποίων η P_T έχει τιμές $0.005 \text{ GeV}/c < P_T < 1.5 \text{ GeV}/c$. Το σχήμα 5.9 εμφανίζει την κατανομή



Σχήμα 5.7: Η κατανομή της θέσης του πρώτου σημείου αλληλεπίδρασης της τροχιάς με το υλικό του ανιχνευτή. Τα μαύρα σημεία που αντιστοιχούν σε περιοχές μακριά από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης απορρίπτονται.



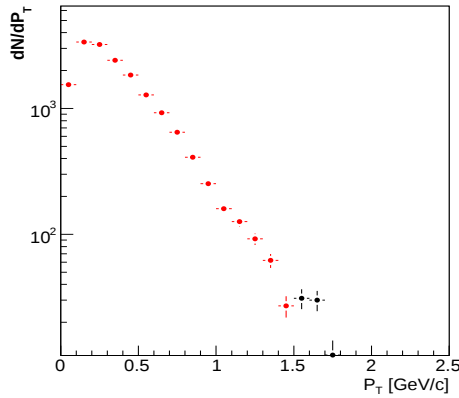
Σχήμα 5.8: Οι κατανομές του αριθμού των σημείων των τροχιών που καταγράφονται από τους κύριους TPC (αριστερό γράφημα) καθώς και ο λόγος του αριθμού αυτού ως προς το συνολικό αριθμό των σημείων μιας τροχιάς.

της εγκάρσιας ορμής όλων των φορτισμένων σωματιδίων. Τα κόκκινα σημεία αντιπροσωπεύουν την περιοχή που επιλέγεται.

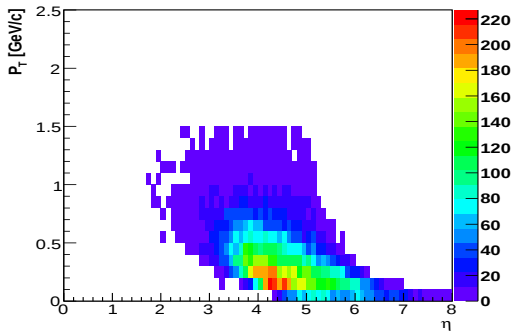
Τέλος, το σχήμα 5.10 δείχνει τον τελικό φασικό χώρο στη ψευδοωκύτητα και στην εγκάρσια ορμή για την περίπτωση των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ που είναι διαθέσιμος ύστερα από όλους τους ελέγχους.

Συνοπτικά, τα κριτήρια που επιβλήθηκαν σε επίπεδο τροχιών είναι τα ακόλουθα:

- Επιβολή μέγιστης τιμής της απόστασης της προέκτασης της τροχιάς από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 5.9: Η κατανομή της εγκάρσιας ορμής όλων των φορτισμένων σωματιδίων.



Σχήμα 5.10: Ο φασικός χώρος που είναι διαθέσιμος για την περίπτωση των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ ύστερα από όλους τους ελέγχους.

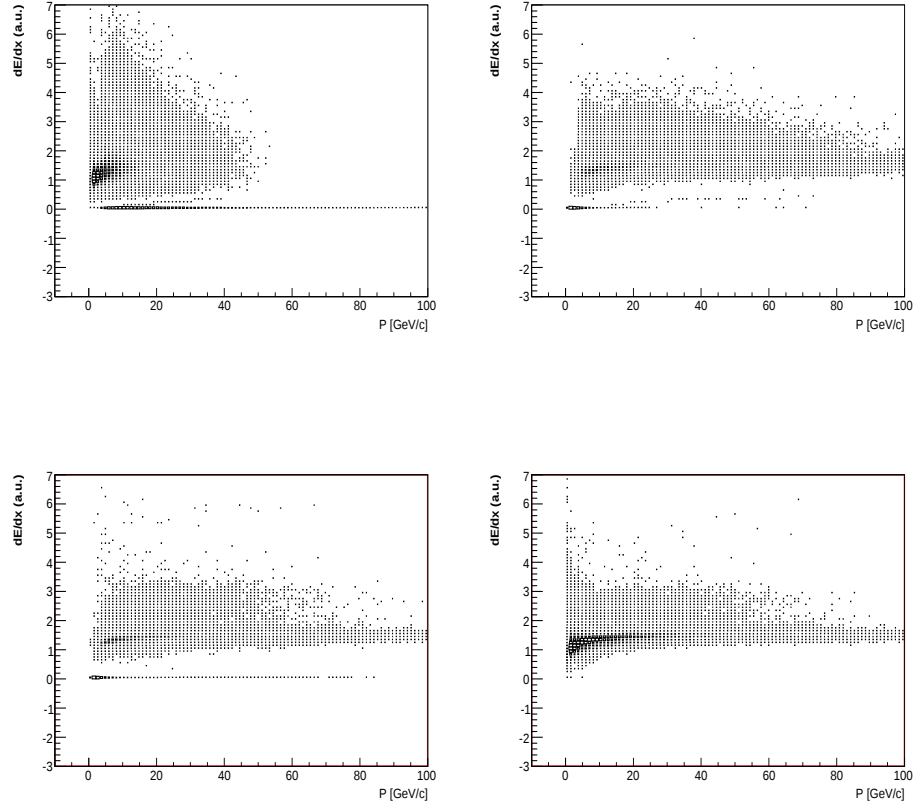
- Η θέση του πρώτου σημείου της τροχιάς στον άξονα της δέσμης.
- Κατώτερος αριθμός σημείων στους κύριους ανιχνευτές του πειράματος.
- Κατώτερη τιμή στην εγκάρσια ορμή των τροχιών.

5.2.1 Ταυτοποίηση σωματιδίων

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4, η ταυτοποίηση των σωματιδίων γίνεται με τη βοήθεια όλων των Ανιχνευτών Προβολής Χρόνου (*TPC*) του πειράματος. Για καλύτερα αποτελέσματα, χρησιμοποιείται και ο ανιχνευτής μέτρησης χρόνου πτήσης (*TOF*) που έχει τοποθετηθεί ακριβώς πίσω από τους δυο **MTPC**.

Στην ανάλυση που παρουσιάζεται σε αυτήν τη διατριβή, για την ταυτοποίηση των σωματιδίων χρησιμοποιήθηκε μόνο η πληροφορία από τους **TPC**. Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η απώλεια ενέργειας που καταγράφεται από τους

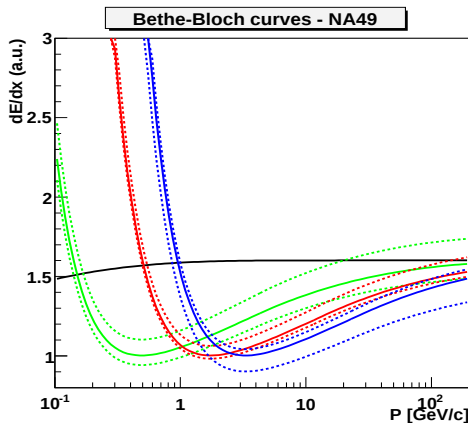
διαφορετικούς ανιχνευτές TPC ξεκινώντας από τους δυο *VTPC* (πάνω γραφήματα) και καταλήγωντας στην πληροφορία από τους *MTPC* αλλά και το συνδυασμό από όλους τους ανιχνευτές, ως συνάρτηση της ορμής του σωματιδίου [2, 3].



Σχήμα 5.11: Η απώλεια ενέργειας του σωματιδίου ως συνάρτηση του μέτρου της ορμής του, όπως αυτή καταγράφεται από τους *VTPC* – 1 (πάνω αριστερά), *VTPC* – 2 (πάνω δεξιά), *MTPC* (κάτω αριστερά) αλλά και η συνδυασμένη πληροφορία από όλους τους *TPC* (κάτω δεξιά).

Για την επιλογή λοιπόν των πιονίων και των καονίων από το δείγμα των σωματιδίων κάθε γεγονότος, λάβαμε υπόψη τη συνολική πληροφορία που καταγράφηκε στους ανιχνευτές. Στη συνέχεια, με βάση τις **Bethe-Bloch** καμπύλες που δίνουν την εξάρτηση της απώλειας ενέργειας από την ορμή, όπως αυτές

έχουν τροποποιηθεί για τις παραμέτρους του πειράματος, επιλέγουμε μια καλύτερη και ανώτερη ζώνη γύρω από την εκάστοτε κεντρική τιμή της καμπύλης αυτής για τα δυο διαφορετικά είδη σωματιδίων. Το σχήμα 5.12 δείχνει με τις διακεκομμένες γραμμές τις περιοχές αυτές για τα διάφορα είδη των σωματιδίων. Έτσι ανάλογα με τη θέση του ίχνους στο επίπεδο $dE/dx - P$ κάθε σωματιδίου καθορίζεται και η ταυτότητά του. Από τη μελέτη του σχήματος αυτού, γίνεται φανερό ότι για μικρές τιμές της ορμής των σωματιδίων, ο διαχωρισμός μεταξύ πιονίων και καονίων είναι ικανοποιητικός. Καθώς όμως η ορμή μεγαλώνει και για μια τιμή της $P > 20 \text{ GeV}/c$, υπάρχει μια επικάλυψη, με αποτέλεσμα ο βαθμός πρόσμιξης του ενός είδους σωματιδίων στο άλλο να αυξάνεται. Όπως θα δούμε όμως και στα επόμενα κεφάλαια, το σε πόσο βαθμό η αυξανόμενη πρόσμιξη αυτή επηρεάζει τα αποτελέσματά μας, μελετήθηκε λεπτομερώς μεταβάλλοντας τις θέσεις των διακεκομμένων γραμμών για την περίπτωση των καονίων [2, 3].



Σχήμα 5.12: Οι έντονες γραμμές δείχνουν τις Bethe-Bloch καμπύλες που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ απώλειας ενέργειας και ορμής του σωματιδίου για τα διάφορα είδη των σωματιδίων (πράσινο - πόνια, κόκκινο - καόνια, μπλε - πρωτόνια, μαύρο - ηλεκτρόνια). Οι διακεκομμένες γραμμές περιγράφουν τις ζώνες στο επίπεδο $dE/dx - P$ που καθορίζουν την επιλογή της ταυτοποίησης των σωματιδίων.

5.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ ΑΠΟΔΟΧΗΣ

Οι ανιχνευτές του πειράματος, παρέχουν μεγάλη κάλυψη στην ορμή αλλά δεν παρέχουν ολοκληρωτική κάλυψη στην αζιμουθιακή γωνία ϕ . Έτσι για λόγους πληρότητας αλλά και για να επιτραπεί η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων όλων των μελετών σε επίπεδο γεγονόσ ανά γεγονός, μελετήθηκε και ορίστηκε ένα φίλτρο αποδοχής τροχιών (NA49 acceptance filter) [2, 3].

Το φίλτρο αυτό ορίζει κάποιες καμπύλες στο επίπεδο $P_T - \phi$ για κάθε διάστημα της ωκύτητας η οποία υπολογίζεται αν υποτεθεί ότι το σωματίο είναι

πιόνιο. Η παραμετροποίηση των καμπυλών αυτών δίνεται από τη σχέση 5.1:

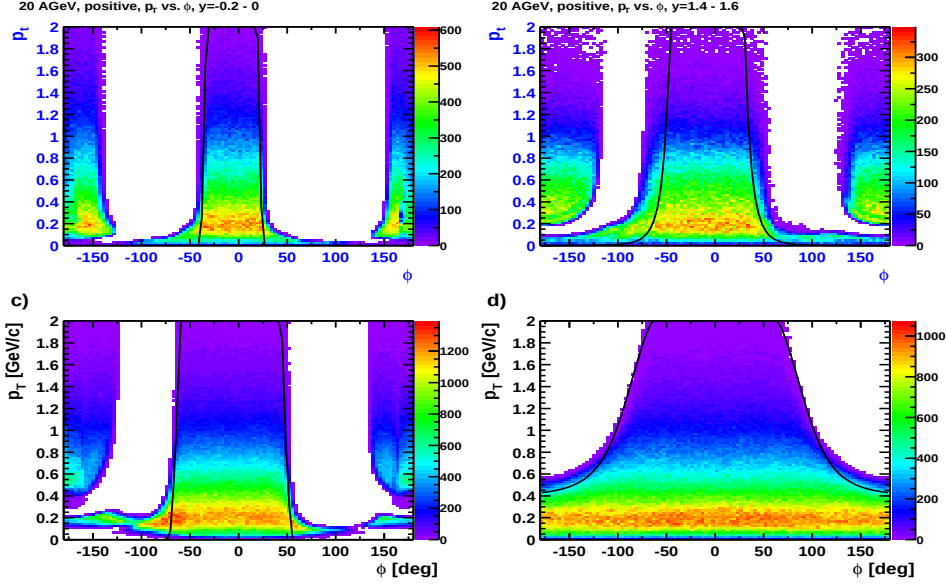
$$p_T(\phi) = \frac{1}{A + (\frac{D+\phi}{C})^6} + B, \quad (5.1)$$

όπου A , B , C και D είναι παράμετροι που εξαρτώνται από την ωκύτητα αλλά και την ενέργεια. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών για όλες τις ενέργειες αλλά και τις περιοχές της ωκύτητας κέντρου μάζας, φαίνονται στους πίνακες 5.4 και 5.5.

	6.3GeV				7.6GeV				8.8GeV			
y	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
-0.5									0	0	23	4
-0.3					0	0	25	-7	0	0	30	7
-0.1	0	-1	32	-7	0	0	31	-8	0	0	38	10
0.1	0	0	34	-8	0	0	40	-8	0	0	43	8
0.3	0	0	41	-8	0	0	44	-8	0	0	46	7
0.5	0	-0.05	47	-8	0	0	46	-7	0	0	40	0
0.7	0	-0.1	50	-7	0	0	42	0	0	0	22	0
0.9	0	-0.3	53	-3	0	0	35	-10	0	0	34	6
1.1	0	-0.2	38	-10	0	0	39	-13	0	0	46	15
1.3	0	-0.1	42	-12	0	0	44	-14	0	0	52	15
1.5	0	0	43	-8	0	0	55	-21	0	0.1	58	20
1.7	0	0	51	-18	0	0.08	62	-2	0	0.08	72	0
1.9	0	0	63	-4	0	0.08	67	0	0	0.08	68	0
2.1	0	0	62	0	0	0.05	61	0	0	0.09	60	0
2.3	0	0	57	0	0.6	0.05	57	0	0.5	0.08	50	0
2.5	0.7	0	54	0	0.6	0	46	0	0.6	0.05	40	0
2.7	0.7	0	41	0	1	0	33	0	1.5	0.05	35	0
2.9	1.5	0	30	0	2.7	0	32	0				
3.1												

Πίνακας 5.4: Οι τιμές των παραμέτρων A , B , C και D των καμπυλών του φίλτρου αποδοχής για τις χαμηλές ενέργειες του SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 6.3 - 7.6 - 8.8 GeV$) αλλά και για τα διαφορετικά διαστήματα της ωκύτητας υπολογισμένης στο κέντρο μάζας.

Ενδεικτικά, τα σχήματα 5.13 δίνουν τις καμπύλες του φίλτρου αποδοχής για δυο ενέργειες του *SPS* ($\sqrt{s_{NN}} = 6.3\text{GeV}$ - δυο πάνω γραφήματα, $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ - δυο κάτω γραφήματα) και για δυο διαφορετικές περιοχές της ωκύτητας.

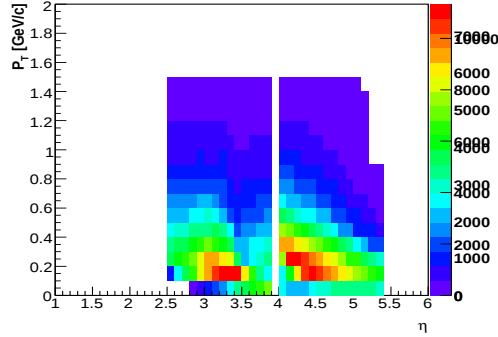


Σχήμα 5.13: Οι καμπύλες του φίλτρου αποδοχής στο επίπεδο $P_T - \phi$. Τα δυο πρώτα γραφήματα αφορούν την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 6.3\text{GeV}$ για δυο περιοχές της ωκύτητας: $1.7 < y < 1.9$ (αριστερό γράφημα) και $3.3 < y < 3.5$ (δεξί γράφημα). Τα δυο γραφήματα της κάτω περιοχής αφορούν την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ για δυο διαστήματα της ωκύτητας: $2.5 < y < 2.7$ (αριστερό γράφημα) και $4.1 < y < 4.3$ (δεξί γράφημα).

5.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΑΣΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Τέλος, με βάση τα παραπάνω, έγινε και η αντίστοιχη επιλογή του φασικού χώρου που αναλύθηκε. Ο χώρος αυτός παρέμενε αναλλοίωτος για μια ενέργεια και συγκεκριμένα στη μελέτη της εξάρτησης από τα αλληλεπιδρώντα συστήματα και από την κεντρικότητα των συγκρούσεων $Pb + Pb$. Όπως γίνεται φανερό όμως, άλλαζε με την ενέργεια. Επίσης πρέπει να τονισθεί ότι, όπως θα δούμε

και στα επόμενα κεφάλαια, ο ευρύτερος φασικός χώρος χωρίστηκε σε δυο μέρη έτσι ώστε να μας δωθεί η δυνατότητα να μελετήσουμε τη Balance Function σε διαφορετικές περιοχές της (ψευδο)ωκύτητας [2, 3].

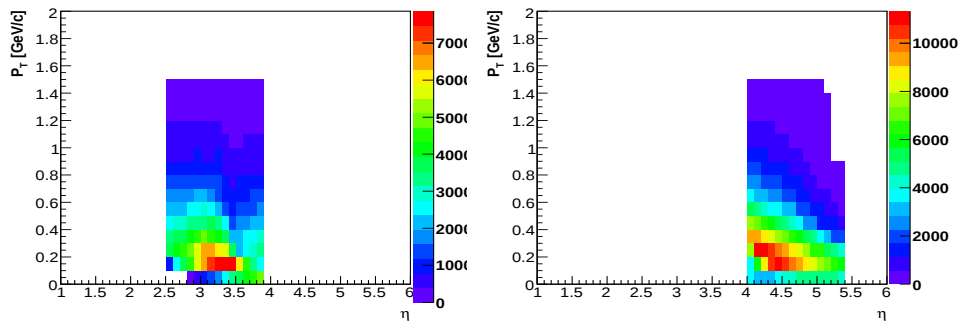


Σχήμα 5.14: Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ κατά την αρχική φάση της μελέτης.

Έτσι, στην περίπτωση της μεγαλύτερης ενέργειας του *SPS* ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$), οι περιοχές που αναλύθηκαν είναι:

- Στα αρχικά στάδια της ανάλυσης επιλέχθηκε η περιοχή $0.005\text{GeV}/c < P_T < 1.5\text{GeV}/c$ και $2.6 \leq \eta \leq 5.0$ όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.14.
- Στη συνέχεια για να μας δωθεί η δυνατότητα να αναλύσουμε δυο περιοχές, ορίστηκε ως **mid-rapidity** περιοχή αυτή που αφορούσε το επίπεδο που καθοριζόταν από $0.005\text{GeV}/c < P_T < 1.5\text{GeV}/c$ και $2.5 \leq \eta \leq 3.9$ (στην περίπτωση μη ταυτοποιημένων σωματιδίων) ή $2.5 \leq y \leq 3.9$ (στην περίπτωση ταυτοποιημένων) (Σχήμα 5.15).
- Ορίστηκε ως **forward rapidity** περιοχή αυτή που αφορούσε το επίπεδο που καθοριζόταν από $0.005\text{GeV}/c < P_T < 1.5\text{GeV}/c$ και $4.0 \leq \eta \leq 5.4$ (στην περίπτωση μη ταυτοποιημένων σωματιδίων) ή $4.0 \leq y \leq 5.4$ (στην περίπτωση ταυτοποιημένων).

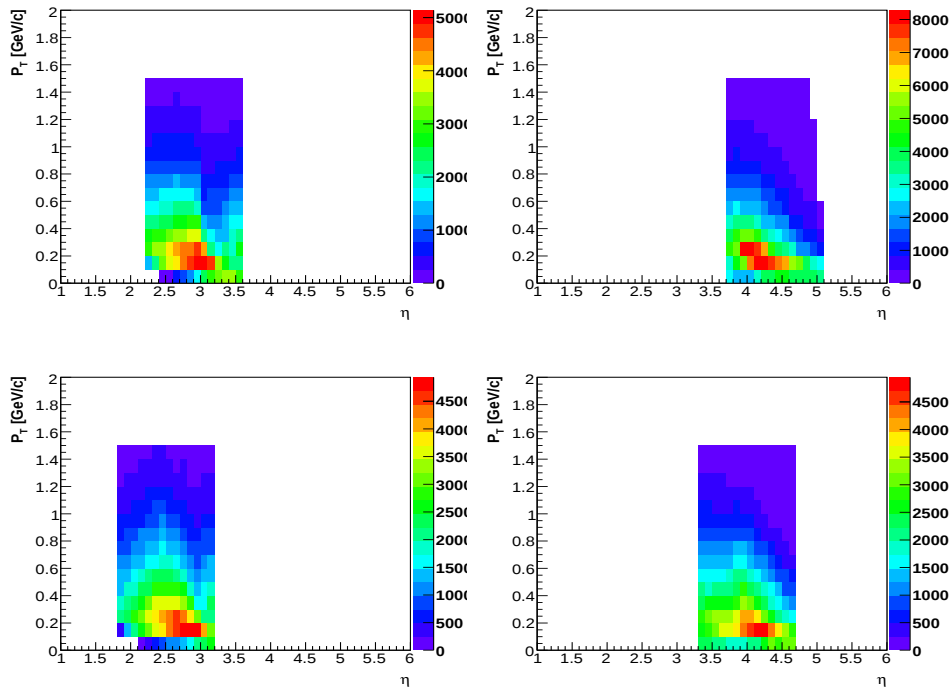
Τέλος, για τις υπόλοιπες ενέργειες του *SPS* οι περιοχές της (ψευδο)ωκύτητας που καθορίζουν τη μεσαία και εμπρόσθια αντίστοιχα περιοχή, δίνονται στον πίνακα 5.6 και σχηματικά στα γραφήματα 5.16-5.17.



Σχήμα 5.15: Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$. Το αριστερό γράφημα δείχνει την περιοχή της **mid-rapidity** ενώ το δεξί την περιοχή της **forward rapidity**.

	12.3GeV				17.3GeV			
y	A	B	C	D	A	B	C	D
-0.5	0	0	35	-10	0	-1	63	-8
-0.3	0	0.07	40	-10	0	0	57	-10
-0.1	0	0.07	46	-10	0	0.09	63	-13
0.1	0	0.05	52	-12	0	0.08	67	-4
0.3	0	0	58	-7	0	0.08	65	-3
0.5	0	-1	29	-2	0	0.05	27	0
0.7	0	0.05	26	0	0	0	35	0
0.9	0	0.08	35	0	0	0.1	41	0
1.1	0.3	0.1	67	-27	0.34	0.43	109	0
1.3	0.3	0.3	75	-15	0.36	0.43	100	0
1.5	0.3	0.27	85	0	0.55	0.4	100	0
1.7	0.3	0.18	75	0	0.6	0.4	88	0
1.9	0.45	0.15	70	0	0.61	0.35	73	0
2.1	0.5	0.12	50	0	0.73	0.34	55	0
2.3	0.75	0.08	50	0	1.7	0.28	60	0
2.5	2.2	0.08	50	0	2.8	0.25	60	0
2.7	3.2	0.08	45	0	5	0.2	57	0
2.9	4.5	0.08	45	0	7	0.15	60	0
3.1	5.5	0	45	0	7	0.1	70	0

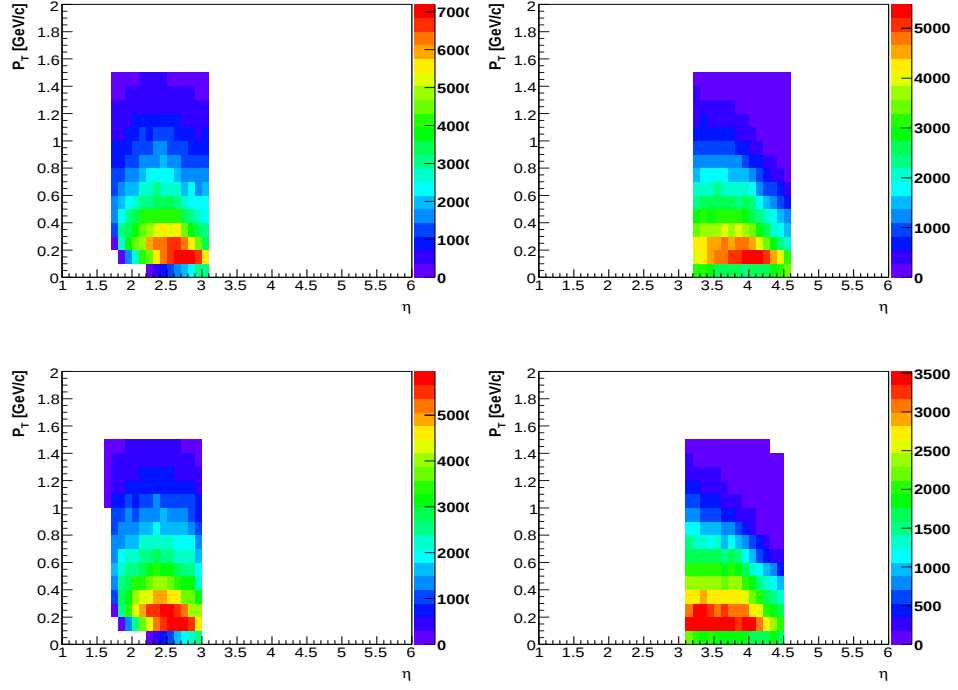
Πίνακας 5.5: Οι τιμές των παραμέτρων A , B , C και D των καμπυλών του φίλτρου αποδοχής για τις δυο μεγαλύτερες ενέργειες του SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 12.3-17.3GeV$ αλλά και για τα διαφορετικά διαστήματα της ωκύτητας υπολογισμένης στο κέντρο μάζας.



Σχήμα 5.16: Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 12.3\text{GeV}$ (πάνω γραφήματα) και για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8\text{GeV}$ (κάτω γραφήματα). Τα αριστερά γραφήματα δείχνουν την περιοχή της **mid-rapidity** ενώ τα δεξιά την περιοχή της **forward rapidity**.

Ενέργεια	Περιοχή μέσης ωκύτητας	Περιοχή εμπρόσθιας ωκύτητας
$\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$	$2.6 \leq \eta \leq 5.0$	
$\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$	$2.5 \leq \eta \leq 3.9$	$4.0 \leq \eta \leq 5.4$
$\sqrt{s_{NN}} = 12.3\text{GeV}$	$2.2 \leq \eta \leq 3.6$	$3.7 \leq \eta \leq 5.1$
$\sqrt{s_{NN}} = 8.8\text{GeV}$	$1.8 \leq \eta \leq 3.2$	$3.3 \leq \eta \leq 4.7$
$\sqrt{s_{NN}} = 7.6\text{GeV}$	$1.7 \leq \eta \leq 3.1$	$3.2 \leq \eta \leq 4.6$
$\sqrt{s_{NN}} = 6.3\text{GeV}$	$1.6 \leq \eta \leq 3.0$	$3.1 \leq \eta \leq 4.5$

Πίνακας 5.6: Οι περιοχές της μέσης ωκύτητας και αυτές της εμπρόσθιας ωκύτητας για τις ενέργειες του *SPS* που αναλύθηκαν.



Σχήμα 5.17: Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 7.6\text{GeV}$ (πάνω γραφήματα) και για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 6.3\text{GeV}$ (κάτω γραφήματα). Τα αριστερά γραφήματα δείχνουν την περιοχή της **mid-rapidity** ενώ τα δεξιά την περιοχή της **forward rapidity**.

Κεφάλαιο 6

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΓΙΑ ΜΗ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των συσχετίσεων φορτίου για μη ταυτοποιημένα σωματίδια. Στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας έγινε εκτενής μελέτη της εξάρτησης της συνάρτησης ισοζυγίου από το αλληλεπιδρόν σύστημα, την κεντρικότητα των συγκρούσεων αλλά και την περιοχή της ψευδοωκότητας για δυο ενέργειες του *SPS* ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ και $\sqrt{s_{NN}} = 8.8\text{GeV}$) για τις οποίες το πείραμα *NA49* κατέγραψε *minimum-bias* δεδομένα. Επίσης, μελετήθηκε η ενεργειακή εξάρτηση της συνάρτησης ισοζυγίου σε όλο το ενεργειακό φάσμα του *SPS* ($\sqrt{s_{NN}} = 6.3\text{GeV} - \sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$).

6.1 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ $A+A$ ΣΕ ΕΝΕΡΓΕΙΑ $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$

Για την ενέργεια αυτή αναλύθηκαν πειραματικά δεδομένα από αλληλεπιδράσεις $p + p$, $C + C$, $Si + Si$ και $Pb + Pb$ [1]. Κάποια στοιχεία και λεπτομέρειες για τις αλληλεπιδράσεις αυτές παραθέτονται στο Κεφάλαιο 5 και πιο συγκεκριμένα στον πίνακα 5.1. Η επιλογή των γεγονότων και των τροχιών περιγράφηκαν επίσης στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5).

6.1.1 Εξάρτηση από το αλληλεπιδρόν σύστημα και την κεντρικότητα

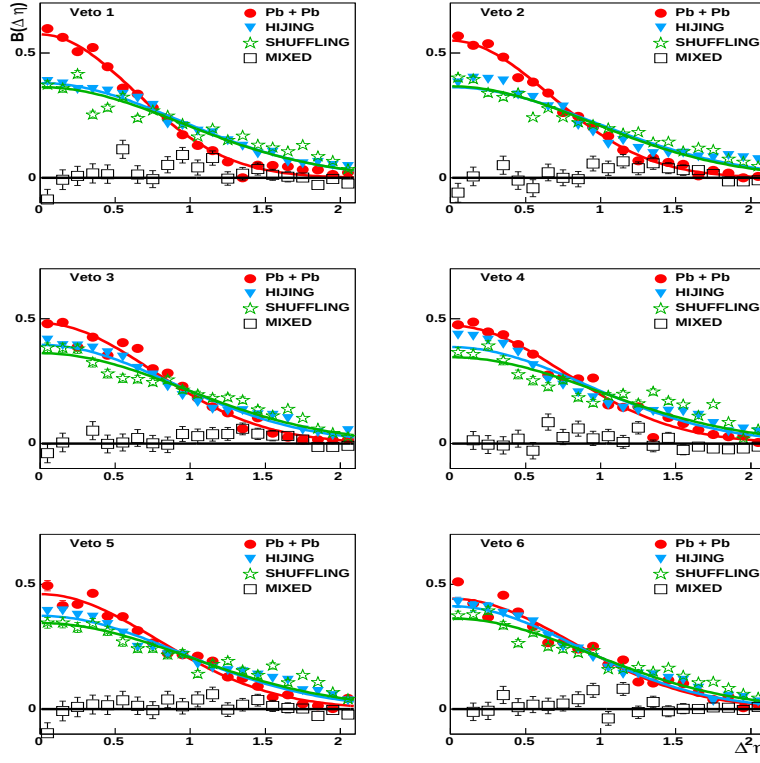
Το πρώτο βήμα της μελέτης της συνάρτησης ισοζυγίου έγινε με την ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από διάφορα συστήματα στη μέγιστη ενέργεια του *SPS*. Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε αρχικά, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, ήταν ο διευρυμένος ($2.6 < \eta < 5.0$) και φαίνεται στο σχήμα 5.14.

Οι κατανομές της **Balance Function** που προέκυψαν για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ φαίνονται στο σχήμα 6.1 με κόκκινους κύκλους. Στα γραφήματα αυτά αναπαριστάται η **Balance Function** ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκότητα. Οι αντίστοιχες κατανομές των πειραματικών δεδομένων για τα μικρότερα αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si+Si$, $C+C$ και $p+p$) φαίνονται στο σχήμα 6.2.

Από μια μελέτη των γραφημάτων ακόμα και σε αυτό το επίπεδο του διευρυμένου φασικού χώρου, ίσως γίνει φανερό ότι υπάρχει κάποια σχετική εξάρτηση του εύρους της **Balance Function** από το σύστημα και την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων, αφού οι κατανομές γίνονται όλο και πιο στενές όσο το αλληλεπιδρόν σύστημα αλλά και η κεντρικότητα μεγαλώνουν [1].

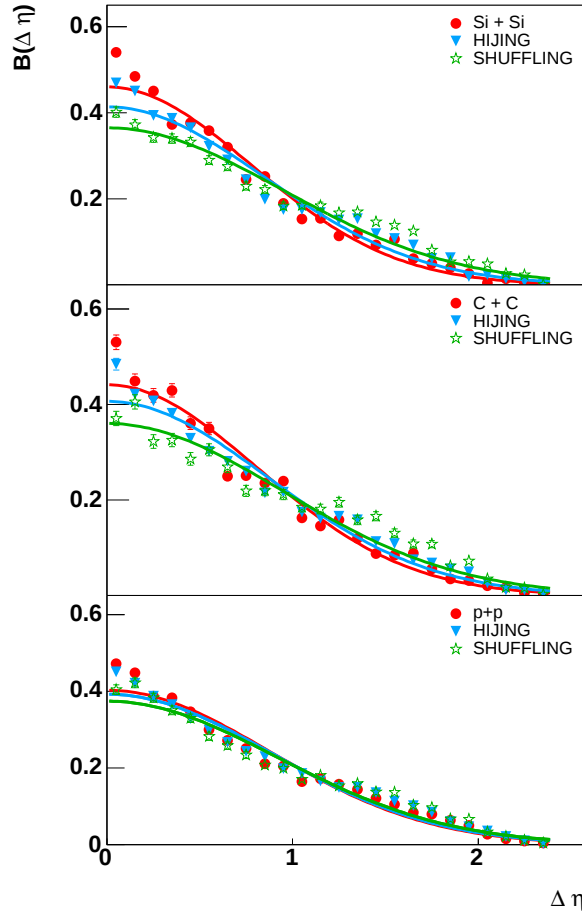
Στη συνέχεια, βασισμένοι και στις υπόλοιπες μελέτες **event by event** στις οποίες το υπόβαθρο αναπαράγεται με τη βοήθεια της μεθόδου της ανάμιξης γεγονότων (**event mixing**), εφαρμόσαμε τη μέθοδο αυτή και στα προαναφερθέντα πειραματικά δεδομένα. Με βάση λοιπόν τη μέθοδο αυτή, κάθε καινούριο γεγονός προκύπτει από τα αρχικά γεγονότα που έχουν παρόμοια πολλαπλότητα αλλά και τιμή της θέσης της κύριας αλληλεπίδρασης στον z άξονα, επιλέγοντας τυχαία μια τροχιά από κάθε γεγονός. Το κάθε γεγονός δε που δημιουργείται, προκύπτει παίρνοντας από κάθε καινούριο γεγονός μια τυχαία τροχιά, η οποία στη συνέχεια δεν χρησιμοποιείται πάλι στη δημιουργία άλλου γεγονότος. Η επιλογή αυτή των τροχιών συνεχίζεται μέχρι να συμπληρωθεί η πολλαπλότητα του αρχικού γεγονότος. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι κατά τη μέθοδο αυτή δεν γίνεται σεβαστή η διατήρηση του φορτίου. Οι κατανομές της **Balance Function** ως συνάρτηση της $\Delta\eta$ για τις διαφορετικές κατηγορίες κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ φαίνονται στο σχήμα 6.1 με μαύρα τετράγωνα. Τα σημεία βρίσκονται γύρω από το μηδέν, γεγονός που αποδίδεται στη μη ύπαρξη των συσχετισμών που οφείλονται στη διατήρηση του ολικού φορτίου [1].

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι η μέθοδος αυτή αφαιρεί κάθε είδους συσχετισμών και δεν μπορεί να τροφοδοτήσει την ανάλυση με ένα επίπεδο αναφοράς. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε μια άλλη μέθοδο ανάμιξης που ονομάζεται



Σχήμα 6.1: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα αλλά και για το μοντέλο HIJING [3] για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα.

shuffling [1]. Κατά την εφαρμογή του shuffling ουσιαστικά αναμιγνύονται οι τροχιές του ίδιου του γεγονότος ως εξής: κάθε τροχιά παίρνει την τιμή της (ψευδο)ωκύτητας μιας άλλης τυχαίας τροχιάς του ίδιου γεγονότος διατηρώντας όμως το φορτίο σταθερό. Με το μηχανισμό αυτό μπορούμε να αφαιρέσουμε κάθε είδος συσχετισμών μεταξύ των φορτισμένων σωματιδίων εκτός από τους συσχετισμούς που προέρχονται από τη διατήρηση του ολικού φορτίου. Έτσι, καταγράφουμε τις κατανομές της Balance Function αν δεν υπήρχαν επιπλέον μηχανισμοί συσχέτισης των παραγόμενων σωματιδίων. Η μέθοδος αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να αποκτήσουμε ένα σύστημα - επίπεδο αναφοράς που θα περιγράφει το μη συσχετισμένο υπόβαθρό μας. Στα γραφήματα 6.1 και 6.2



Σχήμα 6.2: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα αλλά και για το μοντέλο HIJING [3] για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si + Si$, $C + C$ και $p + p$) ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκότητα.

αναπαριστούνται, με πράσινα αστέρια, οι κατανομές της Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς στην ψευδοωκότητα όπως προκύπτουν από τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο suffling γεγονότα, για αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ αλλά και για τα πιο ελαφριά συστήματα αντίστοιχα. Στα ίδια γραφήματα βλέπουμε και τις αντίστοιχες κατανομές των πειραματικών δεδομένων (κόκκινοι κύκλοι). Το συμπέρασμα το οποίο μπορεί να εξαχθεί είναι ότι για όλα τα συστήματα και τις κεντρικότητες οι κατανομές των πειραματικών δεδομένων είναι πιο στενές από αυτές των αναμεμιγμένων γεγονότων. Η διαφορά τους γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνουμε το μέγεθος του συστήματος αλλά και την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης [1].

Τέλος για την περαιτέρω μελέτη της εξάρτησης τόσο από το σύστημα όσο και από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης, χρησιμοποιήσαμε το μικροσκοπικό μοντέλο HIJING [3] ώστε να παράγουμε ικανή στατιστική για όλα τα

συστήματα και τις κεντρικότητες που αναλύσαμε στα πειραματικά δεδομένα. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι η ανάγκη να περιοριστούν τα στατιστικά σφάλματα των σημείων που προκύπτουν από την ανάλυση του όποιου μοντέλου σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο από τα αντίστοιχα σφάλματα των πειραματικών δεδομένων. Στα σχήματα 6.1 και 6.2 αναπαριστώνται οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου όπως προέκυψαν από τη μελέτη του μοντέλου αυτού με μπλε τρίγωνα για όλες τις κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ αλλά και για τα μικρότερα συστήματα αντίστοιχα. Στα ίδια σχήματα παρατίθενται και οι κατανομές της **Balance Function** των πειραματικών δεδομένων αλλά και των δυο μεθόδων **mixing (event-mixing, shuffling)** για σύγκριση. Γίνεται φανερό από μια απλή παρατήρηση των γραφικών αυτών παραστάσεων ότι οι κατανομές που προκύπτουν από την ανάλυση του μοντέλου έχουν πιο μεγάλο εύρος από τις αντίστοιχες των πειραματικών δεδομένων, ενώ είναι πιο στενές από τις κατανομές των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο **shuffling** δεδομένων. Ένα επιπλέον στοιχείο που μπορεί να προκύψει ακόμα και από αυτές τις γραφικές παραστάσεις είναι ότι δεν διακρίνεται στο πρότυπο αυτό κάποια εξάρτηση από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης αλλά και από το μέγεθος του συστήματος [1].

Όπως είπαμε στο κεφάλαιο 3, στην περίπτωση της μελέτης των συσχετισμών μη ταυτοποιημένων σωματιδίων, το εύρος υπολογίζεται από τις ίδιες τις κατανομές της **Balance Function** χρησιμοποιώντας τη σχέση 3.13. Από τον υπολογισμό εξαιρούνται τα πρώτα σημεία ώστε να εξαλείψουμε τυχόν επίδραση από φαινόμενα συσχετισμών φορτίων μικρής κλίμακας (**short range correlation effects**), όπως φαινόμενα **Coulomb** αλλά και **HBT** [1].

6.1.2 Μελέτη συστηματικών σφαλμάτων

Πριν την παράθεση των τελικών αποτελεσμάτων της μελέτης που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, θα ήταν καλό να αναφερθούμε και στην αναλυτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε για να υπολογιστούν τα τυχόν συστηματικά σφάλματα. Για το σκοπό αυτό αναλύθηκαν δεδομένα αλληλεπιδράσεων $Pb+Pb$ και $p + p$ που είχαν καταγραφεί σε άλλες χρονικές περιόδους του πειράματος **NA49** με διαφορετικές συνθήκες (τόσο ως προς το πρόγραμμα ανακατασκευής αλλά κυρίως ως προς την πολικότητα του μαγνητικού πεδίου). Έτσι χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν τα δεδομένα που φαίνονται στον πίνακα 6.1.

Τα αποτελέσματα για τα διαφορετικά αυτά είδη δεδομένων παραθέτονται στον πίνακα 6.2.

Γίνεται φανερό από τη μελέτη των τιμών του εύρους των κατανομών στον πίνακα 6.2 ότι τα συστηματικά σφάλματα, που ορίζονται ως το μισό της δια-

Αλληλεπίδραση / (Είδος δεδομένων)	Χρόνος	Πολικότητα
p+p / (3)	2000	+
C+C / (3)	1998	+
Si+Si / (3)	1998	+
Pb+Pb (m.b.) / (1)	1996	-
Pb+Pb (m.b.) / (2)	1996	+
Pb+Pb (m.b.) / (3)	2000	+
Pb+Pb (cen.) / (1)	1996	-

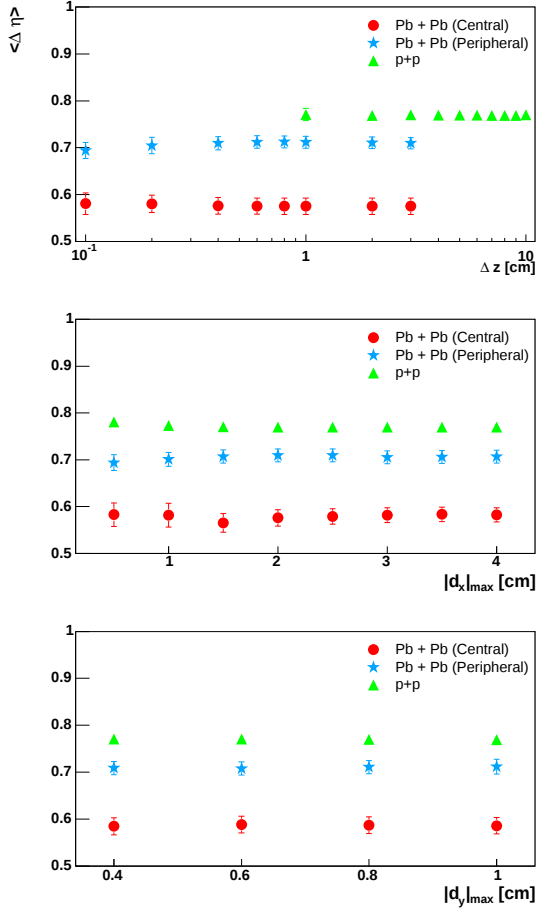
Πίνακας 6.1: Τα διαφορετικά είδη δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν για τον υπολογισμό των συστηματικών σφαλμάτων. Παραθέτονται το είδος της αλληλεπίδρασης, με τον αριθμό στην παρένθεση να ορίζει την αντίστοιχη κατηγορία δεδομένων, η περίοδος κατά την οποία καταγράφηκαν τα δεδομένα αλλά και η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου.

Αλληλεπίδραση	$\langle \Delta\eta \rangle$ (Σετ 1)	$\langle \Delta\eta \rangle$ (Σετ 2)	$\langle \Delta\eta \rangle$ (Σετ 3)
p+p	-	-	0.767 ± 0.007
C+C	-	-	0.721 ± 0.015
Si+Si	-	-	0.698 ± 0.011
Pb+Pb(Veto 6)	0.698 ± 0.022	0.695 ± 0.019	0.704 ± 0.016
Pb+Pb(Veto 5)	0.695 ± 0.022	0.700 ± 0.021	0.689 ± 0.021
Pb+Pb(Veto 4)	0.653 ± 0.021	0.672 ± 0.019	0.663 ± 0.019
Pb+Pb(Veto 3)	0.642 ± 0.021	0.661 ± 0.018	0.645 ± 0.019
Pb+Pb(Veto 2)	0.594 ± 0.012	-	-
Pb+Pb(Veto 1)	0.582 ± 0.011	-	-

Πίνακας 6.2: Το εύρος των κατανομών της Balance Function για τις διαφορετικές κατηγορίες πειραματικών δεδομένων που αναλύθηκαν.

φοράς της μεγαλύτερης και μικρότερης τιμής του $\langle \Delta\eta \rangle$, είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα στατιστικά [1].

Το επόμενο βήμα στη μελέτη των συστηματικών σφαλμάτων, ήταν η επίδραση των τιμών των κριτηρίων επιλογής σε επίπεδο γεγονότος και τροχιών στο εύρος των κατανομών της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου. Για το σκο-



Σχήμα 6.3: Το εύρος των κατανομών της Balance Function ως συνάρτηση του εύρους της κατανομής του V_z (πρώτο γράφημα) και του εύρους της κατανομής της $|d_x|_{max}$ και $|d_y|_{max}$ (μεσαίο και κάτω σχήμα αντίστοιχα).

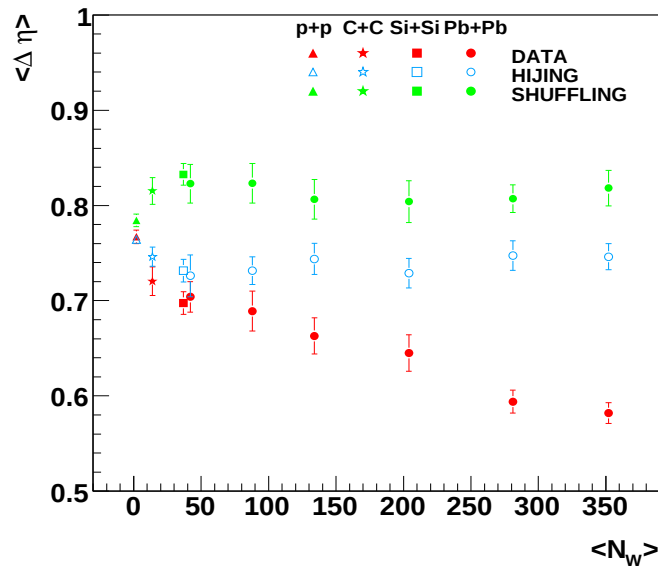
πό αυτό μεταβάλλαμε το εύρος της αποδεχόμενης κατανομής του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης στο z άξονα (επίπεδο γεγονότος), αλλά και τα αντίστοιχα εύρη των κατανομών των κοντινότερων αποστάσεων των τροχιών από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης στον x και y άξονα. Μετά τη μελέτη των κατανομών της Balance Function και με τον αντίστοιχο υπολογισμό των ευρών παίρνουμε τις γραφικές παραστάσεις 6.3. Στα σχήματα αυτά φαίνεται το $\langle \Delta \eta \rangle$ ως συνάρτηση των ευρών των κατανομών των τριών παραμέτρων που αναφέρθηκαν πιο πάνω για τις πιο περιφερειακές και πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ αλλά και για συγκρούσεις $p + p$. Από τη μελέτη γίνεται φανερό ότι το εύρος της Balance Function δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα (η μεταβολή υπολογίστηκε ότι είναι της τάξης του 2%) όταν μεταβάλλουμε τα διάφορα κριτήρια αποδοχής γεγονότων και τροχιών [1].

Ως συμπέρασμα προκύπτει ότι τα υπολογισμένα συστηματικά σφάλματα για

αλληλεπιδράσεις $p+p$, $C+C$, $Si+Si$, $Pb+Pb(peripheral)$ και $Pb+Pb(central)$ είναι αντίστοιχα: ± 0.006 , ± 0.010 , ± 0.012 , ± 0.009 και ± 0.003 [1].

6.1.3 Αποτελέσματα

Αφού λοιπόν παραθέσαμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των συστηματικών σφαλμάτων, είναι καιρός να επικεντρωθούμε στα κύρια αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των συσχετισμών μη ταυτοποιημένων φορτισμένων σωματιδίων στη μέγιστη ενέργειά του *SPS*. Το σχήμα 6.4 δείχνει το εύρος όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές της **Balance Function** με τη βοήθεια της σχέσης 3.13 του Κεφαλαίου 3 για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότα αλλά και γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο *HIJING* [3] ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση [1].

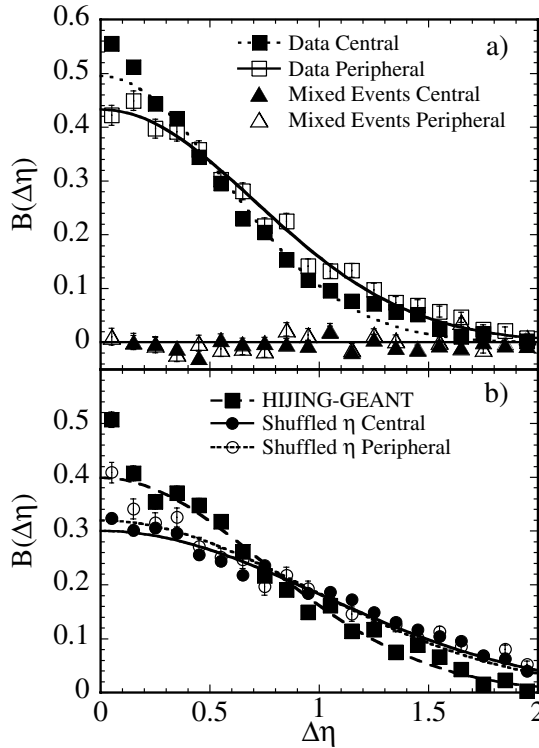


Σχήμα 6.4: Η εξάρτηση του εύρους όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές της **Balance Function** με τη βοήθεια της σχέσης 3.13 για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότα αλλά και γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο *HIJING* [3] από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση.

Από τη μελέτη του σχήματος γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια έντονη εξάρτηση του εύρους της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά δεδομένα από το σύστημα και την κεντρικότητα [1]. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του $\langle \Delta \eta \rangle$ παίρνει τη μέγιστή του τιμή για τις αλληλεπιδράσεις $p + p$, ενώ στη συνέ-

χεια μειώνεται όσο μεγαλύτερο γίνεται το αλληλεπιδρόν σύστημα ($C + C$, $Si + Si$ και $Pb + Pb$). Η πτώση δε της τιμής του εύρους συνεχίζεται με συνέπεια να παίρνουμε την ελάχιστη τιμή για τις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$. Η σχετική αυτή πτώση, όπως αυτή υπολογίζεται από τη σχέση $100(\langle\Delta\eta\rangle_{Peripheral} - \langle\Delta\eta\rangle_{Central})/\langle\Delta\eta\rangle_{Peripheral}$, είναι $17 \pm 3\%$. Από την άλλη μεριά, τόσο το μοντέλο HIJING [3] αλλά πολύ περισσότερο τα αναμειγμένα με τη μέθοδο shuffling δεν παρέχουν ένδειξη για οποιαδήποτε εξάρτηση [1].

Παράλληλα, το πείραμα *STAR*, πραγματοποίησε αντίστοιχη μελέτη γύρω από τους συσχετισμούς μη ταυτοποιημένων φορτίων σε αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 130\text{GeV}$ [2]. Στο γράφημα 6.5 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής ψευδοωκότητας των αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων, για τα πειραματικά δεδομένα αλλά και για τα αναμειγμένα με τις μεθόδους shuffling και event mixing γεγονότα για τις δυο ακραίες κεντρικότητες [2]. Στα ίδια σχήματα φαίνονται και οι αντίστοιχες κατανομές των γεγονότων που προήλθαν από τη χρήση του μοντέλου HIJING.

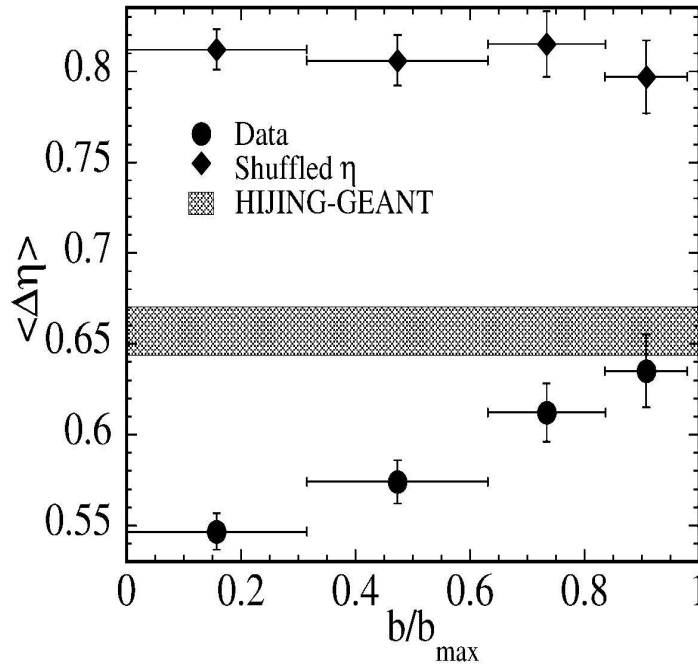


Σχήμα 6.5: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις πιο πειφερειακές αλλά και τις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 130\text{GeV}$ του πειράματος *STAR*. Στις γραφικές παραστάσεις φαίνονται οι κατανομές των πειραματικών δεδομένων, των αναμειγμένων με τις μεθόδους shuffling και event mixing γεγονότων αλλά και οι αντίστοιχες κατανομές που προκύπτουν από τη μελέτη του μοντέλου HIJING.

Στο σημείο αυτό, είναι καλό να αναφερθεί ότι το πείραμα *STAR* εξετάζει

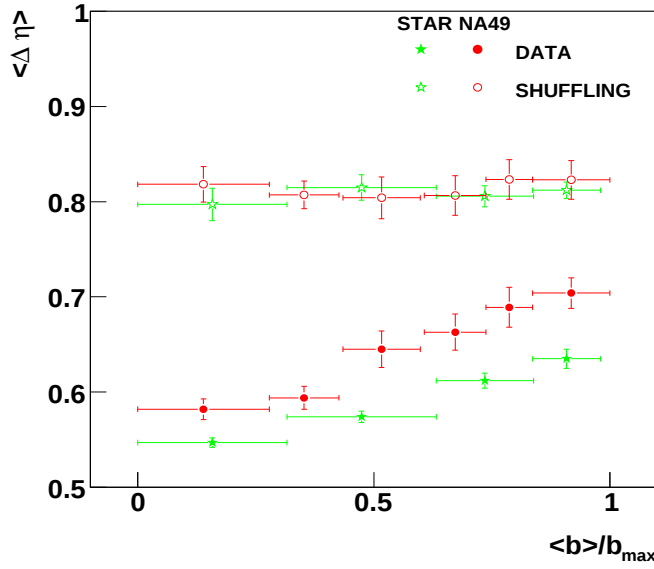
τη Balance Function σε διαφορετική περιοχή του φασικού χώρου από ότι το πείραμα *NA49*. Έτσι, ενώ το πείραμα *NA49* μελετά το φασικό χώρο που ορίζεται από το σχήμα 5.14, το *STAR* μελετά μια πιο κεντρική περιοχή που ορίζεται από το διάστημα $|\eta| \leq 1.3$ [2].

Το σχήμα 6.6 δείχνει την εξάρτηση του εύρους για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότα του *STAR* από την κανονικοποιημένη παράμετρο κρούσης b/b_{max} . Επίσης, φαίνεται και το επίπεδο στο οποίο κινούνται τα αντίστοιχα εύρη των κατανομών των *HIJING* [3] γεγονότων. Γίνεται φανερό ότι υπάρχει και σε αυτή την περίπτωση έντονη εξάρτηση από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης για τα πειραματικά δεδομένα. Αντίθετα, τόσο το *HIJING* [3] όσο και τα αναμεμιγμένα γεγονότα δεν μπορούν να περιγράψουν το φαινόμενο αυτό [1].



Σχήμα 6.6: Η εξάρτηση του εύρους για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* και τα *HIJING* [3] γεγονότα για τις αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 130 GeV$ του πειράματος *STAR* από το νορμαλισμένο λόγο b/b_{max} .

Το σχήμα 6.7 δείχνει την εξάρτηση του εύρους για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότα για τα δυο πειράματα από την κανονικοποιημένη παράμετρο κρούσης b/b_{max} . Συγκρίνοντας, παρατηρούμε ότι τόσο το *NA49*, όσο και το *STAR* δείχνει μια έντονη εξάρτηση του εύρους της Balance Function από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων για τα πειραματικά δεδομένα. Το *NA49* δείχνει μια σχετική πτώση της τάξης του $17 \pm 3\%$, ενώ



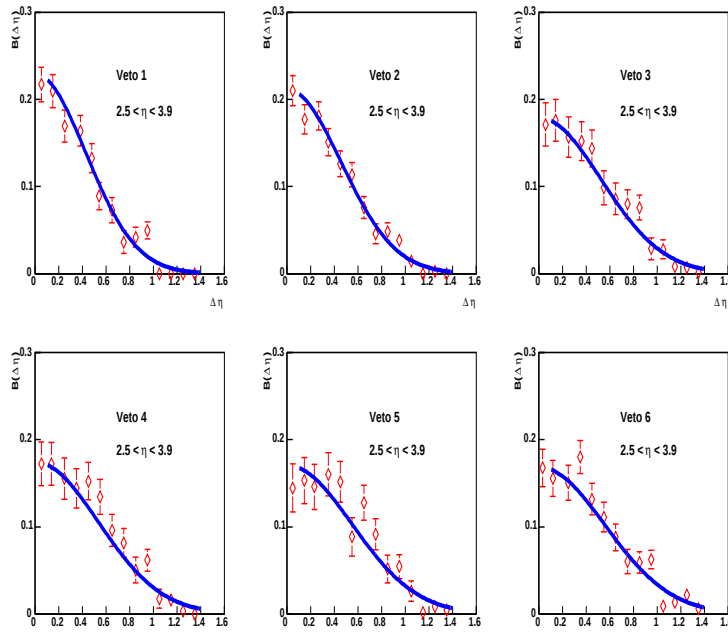
Σχήμα 6.7: Η εξάρτηση του εύρους για τα πειραματικά και τα αναμειγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα για τα δυο πειράματα από το νορμαλισμένο λόγο $b/b_{\max}$.

το *STAR* παρουσιάζει μια πτώση της τάξης του $14 \pm 2\%$. Πρέπει σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι στο σχήμα 6.7 δεν προσπαθούμε να συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα του *NA49* και του *STAR* σημείο προς σημείο και αυτό γιατί ο φασικός χώρος που αναλύεται είναι διαφορετικός για τα δυο πειράματα. Αντίθετα, η σύγκριση έγκειται στο φαινόμενο που είναι η σχετική ελλάτωση του εύρους από τις πιο περιφερειακές στις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις [1].

6.1.4 Εξάρτηση από την περιοχή της ψευδοωκύτητας

Λαμβάνοντας υπόψη το πρότυπο του Pratt που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 σύμφωνα με το οποίο τα ζεύγη αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων δημιουργούνται συμμετρικά ως προς την κεντρική περιοχή της (ψευδο)ωκύτητας, η επόμενη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην ίδια ενέργεια, ήταν αυτή της εξάρτησης από την περιοχή της ψευδοωκύτητας. Για το σκοπό αυτό ο φασικός χώρος που περιγράφεται από το σχήμα 5.14 και χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, χωρίστηκε ουσιαστικά σε δυο τμήματα. Έτσι, ορίστηκε η περιοχή της κεντρικής ωκύτητας (mid-rapidity) και της εμπρόσθιας (forward rapidity) που περιγράφονται στο σχήμα 5.15.

Το σχήμα 6.8, δείχνει τις κατανομές της Balance Function ως συνάρτηση της

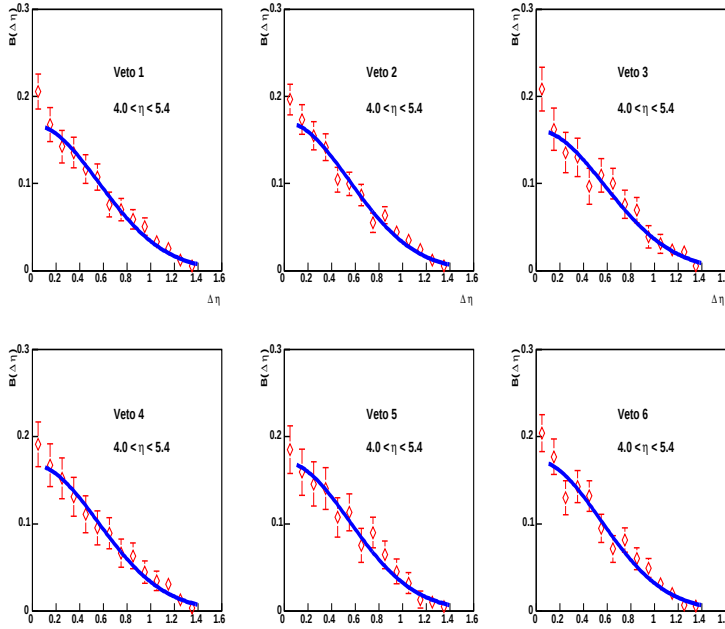


Σχήμα 6.8: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκότητα. Η περιοχή της ψευδοωκότητας που αναπαριστάται είναι η κεντρική.

σχετική διαφοράς στη ψευδοωκότητα των αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων, για τις διαφορετικές κατηγορίες κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ στην κεντρική περιοχή (mid-rapidity). Στο σχήμα 6.9 φαίνονται οι αντίστοιχες κατανομές για την εμπρόσθια περιοχή του φασιικού χώρου [1].

Για την περιγραφή του μη συσχετισμένου υποβάθρου και στις δυο περιοχές του φασιικού χώρου, εφαρμόσαμε τη μέθοδο ανάμιξης γεγονότων *shuffling*. Οι αντίστοιχες κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου φαίνονται στα σχήματα 6.10 και 6.11 για την κεντρική και εμπρόσθια περιοχή.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης παραθέτονται συνοπτικά στις γραφικές παραστάσεις 6.12, όπου αναπαριστάται το εύρος των κατανομών της **Balance Function**, όπως αυτό υπολογίζεται από τη σχέση 3.13 ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότα και αυτά που έχουν παραχθεί με το μοντέλο **HIJING**. Το αριστερό γράφημα αφορά την κεντρική περιοχή του φασιικού χώρου, ενώ το δεξί την εμπρόσθια περιοχή. Από τα γραφήματα αυτά γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια έντονη εξάρτηση του εύρους από το αλληλεπιδρόν σύστημα αλλά και από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης για τα πειραματικά δεδομένα. Η εξάρτηση δε αυτή, περιορίζεται μόνο στην

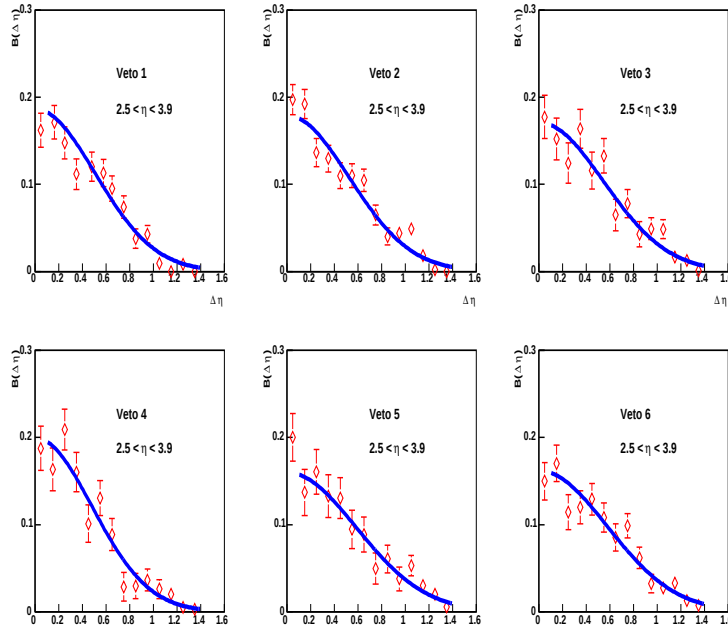


Σχήμα 6.9: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωχύτητα. Η περιοχή της ψευδοωχύτητας που αναπαριστάται είναι η εμπρόσθια.

κεντρική περιοχή της ψευδοωχύτητας. Από την άλλη μεριά, τόσο τα γεγονότα προσομοίωσης (HIJING) [3], όσο και τα αυτά της ανάμιξης (shuffling) δεν δείχνουν κάποια εξάρτηση από το μέσο αριθμό συμμετεχόντων νουκλεονίων στην αλληλεπίδραση $\langle N_{wounded} \rangle$ [1].

6.2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ $A+A$ ΣΕ ΕΝΕΡΓΕΙΑ $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει η περιγραφή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την αντίστοιχη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη δεύτερη ενέργεια του SPS για την οποία το $NA49$ κατέγραψε **minimum bias** δεδομένα. Στην ενέργεια αυτή αναλύθηκαν αλληλεπιδράσεις $C+C$, $Si+Si$ και $Pb+Pb$. Κάποια στοιχεία και λεπτομέρειες για τις αλληλεπιδράσεις αυτές φαίνονται στο κεφάλαιο 5 και πιο συγκεκριμένα στον πίνακα 5.2. Η επιλογή των γεγονότων και των τροχιών έχουν περιγραφεί επίσης στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5). Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε φαίνεται στο σχήμα 5.16.



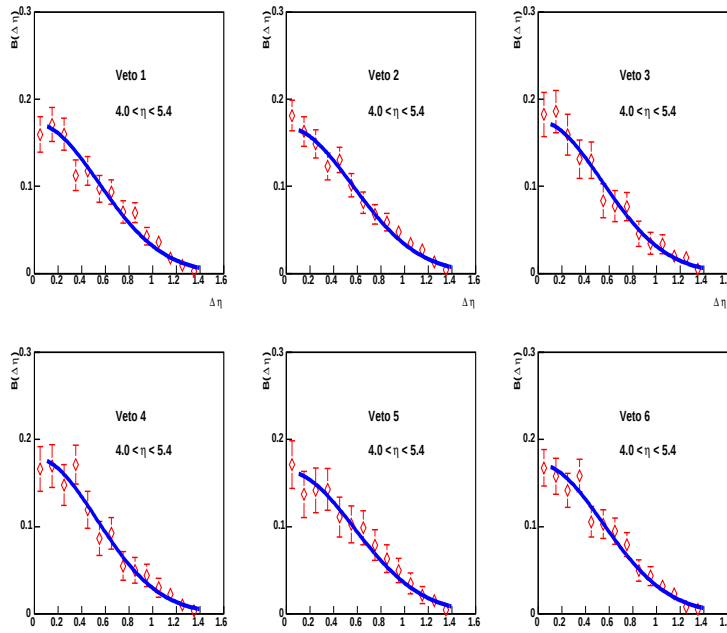
Σχήμα 6.10: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. Οι κατανομές προέρχονται από τα αναμειγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα, ενώ η περιοχή της ψευδοωκύτητας που αναπαριστάται είναι η κεντρική.

6.2.1 Εξάρτηση από το αλληλεπιδρόν σύστημα και την κεντρικότητα

Οι κατανομές της Balance Function που προέκυψαν για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε αυτή την ενέργεια φαίνονται στο σχήμα 6.13. Στα γραφήματα αυτά αναπαριστάται η Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. Οι αντίστοιχες κατανομές των πειραματικών δεδομένων για τα μικρότερα αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si + Si$ και $C + C$) φαίνονται στο σχήμα 6.14.

Από μια μελέτη των γραφημάτων ακόμα και σε αυτό το επίπεδο, ίσως γίνει φανερό ότι υπάρχει μια εξάρτηση του εύρους της Balance Function από το σύστημα και την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων, αφού οι κατανομές γίνονται όλο και πιο στενές όσο το αλληλεπιδρόν σύστημα αλλά και η κεντρικότητα αυξάνονται [1].

Στη συνέχεια, εφαρμόσαμε τη μέθοδο shuffling για να περιγράψουμε το

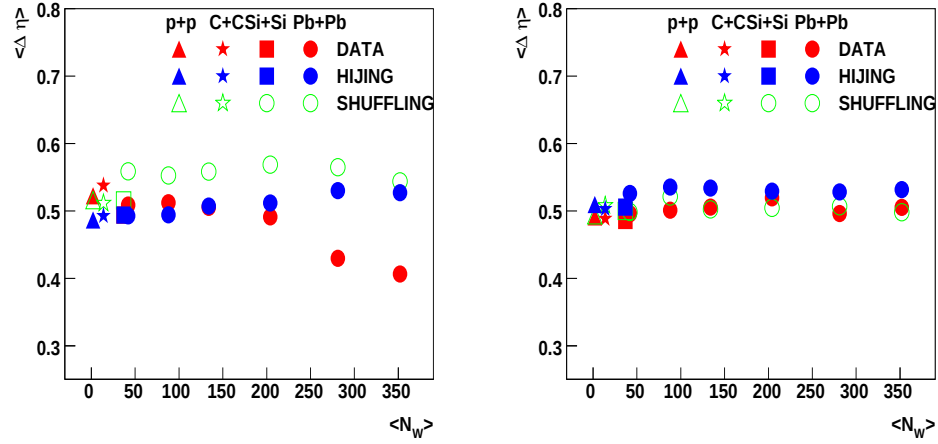


Σχήμα 6.11: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. Οι κατανομές προέρχονται από τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα, ενώ η περιοχή της ψευδοωκύτητας που αναπαριστάται είναι η εμπρόσθια.

υπόβαθρο των μη συσχετισμένων σωματιδίων. Τα σχήματα 6.15 και 6.16 αναπαριστούν τις κατανομές της Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς στην ψευδοωκύτητα, για αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ αλλά και για τα πιο ελαφριά συστήματα αντίστοιχα.

Έχοντας ως βάση τις πιο πάνω κατανομές, υπολογίσαμε τα αντίστοιχα εύρη χρησιμοποιώντας τη σχέση 3.13. Το σχήμα 6.22 δείχνει το $\langle \Delta\eta \rangle$ για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα αλλά και γεγονότα προσομοίωσης που έχουν παραχθεί με το μοντέλο UrQMD [4] ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση.

Από τη μελέτη του σχήματος γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια έντονη εξάρτηση του εύρους της συνάρτησης ισοζυγίου από το σύστημα και την κεντρικότητα για τα πειραματικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του $\langle \Delta\eta \rangle$ γίνεται μέγιστη για τις αλληλεπιδράσεις $C + C$, ενώ στη συνέχεια μειώνεται, όσο αυξάνεται το σύστημα ($Si + Si$ και $Pb + Pb$). Η πτώση δε της τιμής του εύρους συνεχίζεται με συνέπεια να παίρνουμε την ελάχιστη τιμή για τις πιο κεντρικές αλληλεπιδρά-

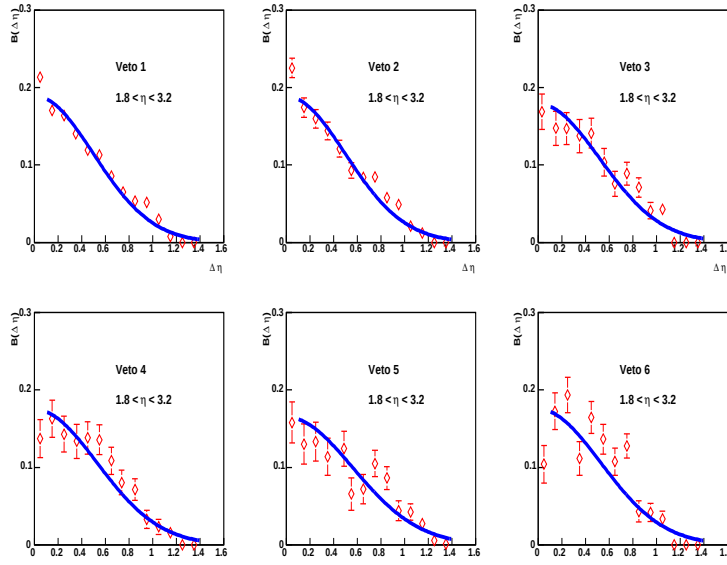


Σχήμα 6.12: Η εξάρτηση του εύρους όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές της **Balance Function** με τη βοήθεια της σχέσης 3.13 για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο **shuffling** γεγονότα αλλά και γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο **HIJING** [3] από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση. Το αριστερό γράφημα αφορά την κεντρική περιοχή του φασικού χώρου, ενώ το δεξί την εμπρόσθια περιοχή.

σεις $Pb + Pb$. Η σχετική αυτή πτώση, όπως αυτή υπολογίζεται από τη σχέση $100(\langle \Delta \eta \rangle_{Peripheral} - \langle \Delta \eta \rangle_{Central}) / \langle \Delta \eta \rangle_{Peripheral}$, είναι $14 \pm 4\%$. Από την άλλη μεριά, τόσο το μοντέλο **UrQMD** [4] αλλά πολύ περισσότερο τα αναμεμιγμένα γεγονότα με τη μέθοδο **shuffling** δε δείχνουν κάποια ένδειξη τέτοιας εξάρτησης [1].

6.2.2 Εξάρτηση από την περιοχή της ψευδοωκύτητας

Ακολουθώντας τα βήματα της μελέτης στην ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$, τα αποτελέσματα της οποίας περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, εξετάστηκε η συνάρτηση ισοζυγίου και στην εμπρόσθια περιοχή του φασικού χώρου. Η περιοχή αυτή περιγράφεται από το σχήμα 5.16. Στα σχήματα 6.18 και 6.19 φαίνονται οι κατανομές της **Balance Function** ως συνάρτηση της διαφοράς στην ψευδοωκύτητα για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$

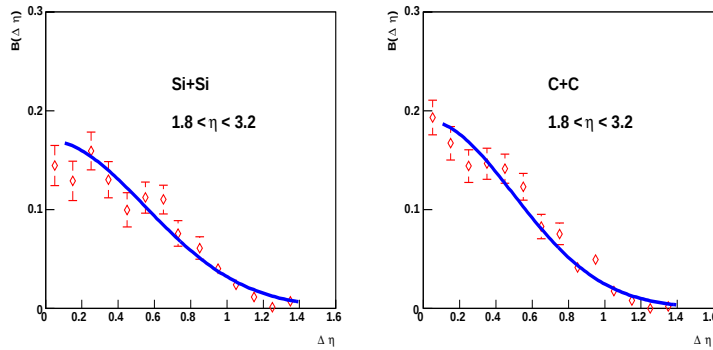


Σχήμα 6.13: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 \text{ GeV}$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα.

αλλά και για τα μικρότερα συστήματα αντίστοιχα. Έγινε προσπάθεια για μια ακόμη φορά να περιγραφεί το μη συσχετισμένο υπόβαθρο με τη βοήθεια της μεθόδου *shuffling*. Οι κατανομές που προκύπτουν για τις διάφορες κεντρικότητες και τα αλληλεπιδρόντα συστήματα, φαίνονται στα σχήματα 6.20 και 6.21.

Το σχήμα 6.22 δείχνει το $\langle \Delta\eta \rangle$ όπως αυτό υπολογίστηκε από τη σχέση 3.13 για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότα αλλά και γεγονότα προσομοίωσης που έχουν παραχθεί με το μοντέλο UrQMD [4] ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση [1].

Από τη μελέτη του σχήματος γίνεται φανερό ότι η όποια εξάρτηση υπάρχει από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων περιορίζεται μόνο στην κεντρική περιοχή της ψευδοωκύτητας. Τόσο τα πειραματικά όσο και τα αναμεμιγμένα και τα UrQMD [4] σημεία δεν δείχνουν κάποια μεταβολή καθώς ο αριθμός των συμμετεχόντων νουκλεονίων μεταβάλλεται. Η εικόνα για αυτή την ενέργεια είναι συνεπής με αυτή που παρατηρήθηκε στη μεγαλύτερη ενέργεια που αναλύθηκε [1].

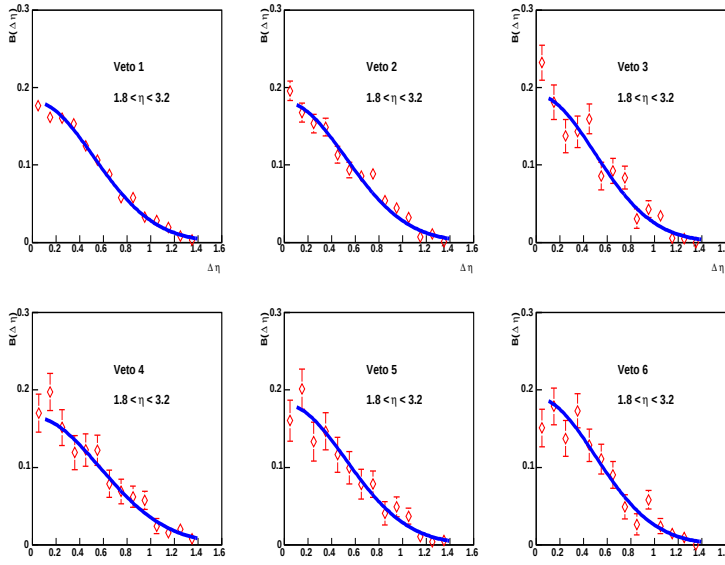


Σχήμα 6.14: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si+Si$ και $C+C$) σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκότητα.

6.3 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Το τελευταίο στάδιο της μελέτης των συσχετισμών μη ταυτοποιημένων σωματιδίων, απαιτούσε τη μελέτη της εξάρτησης της συνάρτησης ισοζυγίου από την ενέργεια. Για το σκοπό αυτό αναλύθηκαν οι πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε όλο το ενεργειακό φάσμα του *SPS*. Λεπτομέρειες για τα δείγματα που αναλύθηκαν δίνονται στον πίνακα 5.3. Τα κριτήρια επιλογής των γεγονότων και των τροχιών περιγράφονται στο κεφάλαιο 5, ενώ οι αντίστοιχες περιοχές του φασικού χώρου για κάθε ενέργεια φαίνονται στα σχήματα 5.15 - 5.17.

Όπως δείξαμε και στο κεφάλαιο 3, το εύρος μιας κατανομής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το εύρος της αρχικής κατανομής (σχήμα 3.6) αλλά και το εύρος του φασικού χώρου που αναλύεται (σχήμα 3.8). Γίνεται λοιπόν φανερό ότι αφού το εύρος της κατανομής της ψευδοωκότητας μεταβάλλεται με την ενέργεια, το εύρος που δίνεται από τη σχέση 3.13 του κεφαλαίου 3 δεν είναι η κατάλληλη παράμετρος ώστε να μελετηθεί η ενεργειακή εξάρτηση της **Balance Function**. Ήταν αναγκαίο να βρεθεί ένα επίπεδο αναφοράς με βάση το οποίο θα κανονικοποιηθούν τα υπολογισμένα από τις κατανομές εύρη. Βασισμένοι στις προηγούμενες μελέτες, επιλέχθηκε η μέθοδος **shuffling** και οι αντίστοιχες κατανομές που προκύπτουν ώστε να παρέχουν αυτό το επίπεδο αναφοράς. Έτσι ορίσαμε την κανονικοποιημένη παράμετρο W που δίνεται από τη σχέση 6.1.

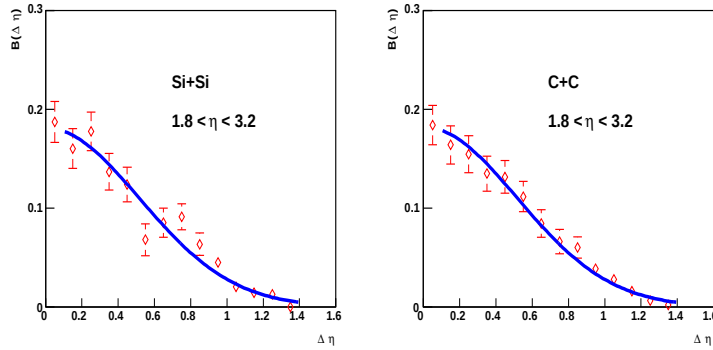


Σχήμα 6.15: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκότητα.

$$W = \frac{100 \cdot (\langle \Delta\eta \rangle_{shuffled} - \langle \Delta\eta \rangle_{data})}{\langle \Delta\eta \rangle_{shuffled}}. \quad (6.1)$$

Οι γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 6.23 και 6.24, δείχνουν τις κατανομές της **Balance Function** για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο **shuffling** δεδομένα για όλες τις ενέργειες του *SPS* [1].

Με βάση τις κατανομές αυτές λοιπόν υπολογίζουμε την παράμετρο W και την εξετάζουμε ως συνάρτηση της ενέργειας. Το σχήμα 6.25 δείχνει ακριβώς αυτή την εξάρτηση από την ενέργεια. Τα πειραματικά σημεία (κόκκινα τετράγωνα), δίνουν μια πρώτη ένδειξη ύπαρξης τέτοιας εξάρτησης. Φαίνεται ότι η παράμετρος W παίρνει την ελάχιστη τιμή της για τη μικρότερη ενέργεια του *SPS* ($\sqrt{s_{NN}} = 6.3\text{GeV}$), ενώ για τις ενδιάμεσες ενέργειες (από $\sqrt{s_{NN}} = 7.3\text{GeV}$ μέχρι $\sqrt{s_{NN}} = 12.3\text{GeV}$) παραμένει στο ίδιο επίπεδο. Στη συνέχεια και καθώς φτάνουμε στη μέγιστη ενέργεια του *SPS* ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$) παρατηρείται μια επιπλέον αύξηση της τιμής του W . Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν δυο μοντέλα για τον έλεγχο και τη σύγκριση των πειραματικών μας δεδομένων: το **UrQMD** [4] και το **HSD** [5]. Τα γεγονότα που παρήχθησαν, αναλύθηκαν με τη **Balance Function** και στη συνέχεια πέρασαν μέσα από τη διαδικασία της ανάμιξης των γεγονότων (**shuffling**) ώστε να υπολογιστεί η παράμετρος W . Στο σχήμα 6.25 φαίνονται και οι τιμές της παραμέτρου αυτής για τα δυο μοντέλα



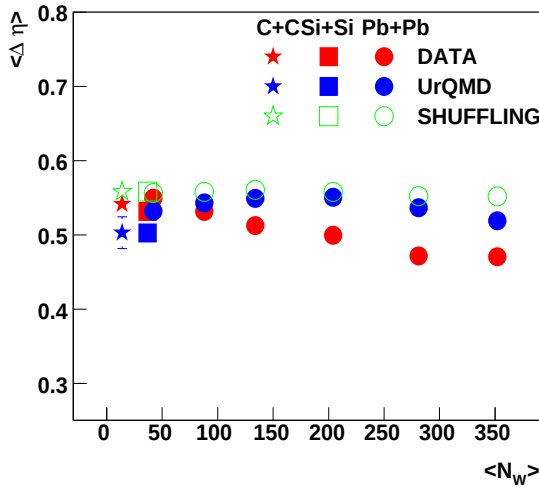
Σχήμα 6.16: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si + Si$ και $C + C$) ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκότητα.

που χρησιμοποιήθηκαν. Γίνεται φανερό ότι κανένα από αυτά δεν μπορεί να περιγράψει τα πειραματικά σημεία [1].

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη και τα αντίστοιχα αποτελέσματα του *STAR* σε αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε μεγαλύτερη ενέργεια ($\sqrt{s_{NN}} = 130\text{GeV}$), υπολογίσαμε την τιμή της παραμέτρου W και για αυτή την περίπτωση. Η εξέλιξη της τιμής της ξεκινώντας από τις χαμηλές ενέργειες του *SPS* στις μεγαλύτερες του *RHIC* φαίνεται στο σχήμα 6.26. Παρατηρούμε μια επιπλέον αύξηση της τιμής της παραμέτρου W καθώς η ενέργεια αυξάνεται από το *SPS* στο *RHIC* [1].

6.3.1 Εξάρτηση από την περιοχή της ψευδοωκότητας

Το τελευταίο βήμα σε αυτή την εκτενή μελέτη τον συσχετισμών μη ταυτοποιημένων σωματιδίων, ήταν η διερεύνηση της εξάρτησης των προηγούμενων αποτελεσμάτων από την περιοχή της ωκότητας. Στην προηγούμενη παράγραφο, είδαμε ότι η ενεργειακή μελέτη της Balance Function στην κεντρική περιοχή της ψευδοωκότητας έδειξε μια πρώτη εξάρτηση από το $\sqrt{s_{NN}}$ για τα πειραματικά δεδομένα. Επεκτείναμε λοιπόν αυτή τη μελέτη στην εμπρόσθια περιοχή της ωκότητας. Ο φασικός χώρος που αντιστοιχεί σε κάθε ενέργεια του *SPS* φαίνεται στα σχήματα 5.15-5.17. Τα πειραματικά μας δεδομένα αναλύθηκαν επευθείας με τη Balance Function αλλά και αφού πέρασαν από τη διαδικασία της ανάμιξης. Από τις γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν, υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα εύρη και έχοντας αυτά ως βάση χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.1

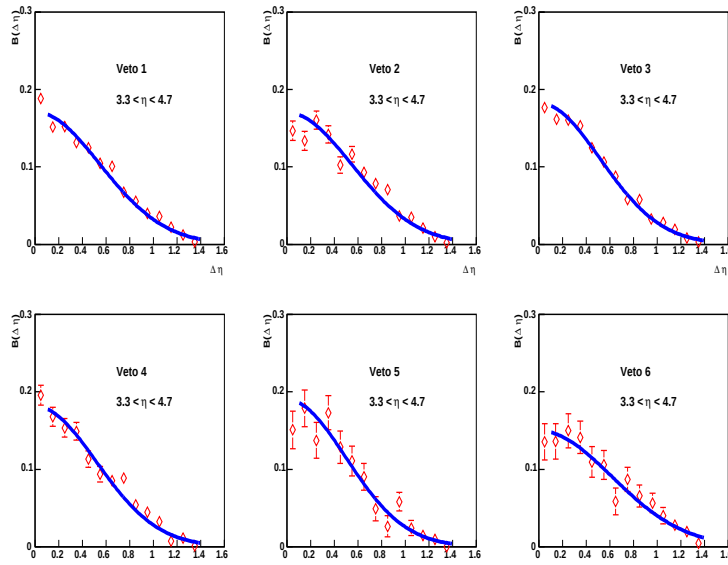


Σχήμα 6.17: Η εξάρτηση του εύρους όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές της Balance Function με τη βοήθεια της σχέσης 3.13 για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα αλλά και γεγονότα προσομοίωσης που έχουν παραχθεί με το μοντέλο UrQMD [4] από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση.

εξάγαμε την τιμή του W . Το σχήμα 6.27 δείχνει την εξάρτηση της παραμέτρου W από την ενέργεια για τα πειραματικά δεδομένα του NA49 για τις δυο περιοχές της ωκότητας. Το συμπέρασμα είναι ότι η ενεργειακή εξάρτηση που εμφανίστηκε στην mid-rapidity δεν υπάρχει στην εμπρόσθια περιοχή [1].

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου για μη ταυτοποιημένα σωματίδια στην ψευδοωκότητα. Εξετάστηκε η εξάρτηση του εύρους της Balance Function από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης αλλά και από το αλληλεπιδρόν σύστημα σε δυο ενέργειες του SPS, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε η πρώτη προσπάθεια ελέγχου της ενεργειακής εξάρτησης της μεθόδου σε όλο το φάσμα του επιταχυντή. Από τη μελέτη αυτή εξήχθησαν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Το εύρος της συνάρτησης ισοζυγίου μειώνεται καθώς αυξάνεται τόσο το σύστημα που αλληλεπιδρά, όσο και η κεντρικότητα των συγκρούσεων. Στη μέγιστη δε ενέργεια του SP ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$) η σχετική μείωση του εύρους στις κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ υπολογισμένη συγκριτικά με τις πιο περιφερειακές, υπολογίστηκε ότι είναι της τάξης του $17 \pm 3\%$. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται τόσο σε χαμηλότερες ενέργειες ($\sqrt{s_{NN}} = 8.8\text{GeV}$), όσο και σε υψηλότερες ($\sqrt{s_{NN}} = 130\text{GeV}$). Η μείωση του εύρους για τα πειραματικά δεδομένα, δεν μπορεί να περιγραφεί

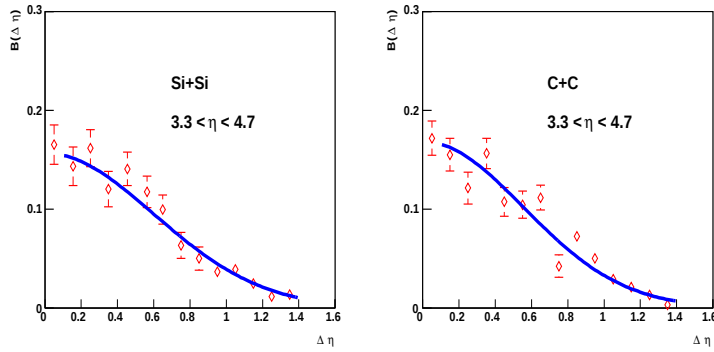


Σχήμα 6.18: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκότητα για την εμπρόσθια περιοχή.

ούτε από τα μικροσκοπικά αδρονικά μοντέλα που μελετήθηκαν (HIJING - UrQMD) ούτε όμως και από τα γεγονότα ανάμιξης (shuffling).

- Η μείωση αυτή του εύρους με την κεντρικότητα αποτυπώνεται μόνο στη μεσαία περιοχή της ψευδοωκότητας. Η μελέτη της εμπρόσθιας περιοχής σε δυο ενέργειες, αποκάλυψε ότι αυτό το φαινόμενο εξαφανίζεται.
- Η ενεργειακή μελέτη της **Balance Function**, υπολογισμένη με βάση την κανονικοποιημένη παράμετρο W , έδωσε μια πρώτη ένδειξη εξάρτησης από την παράμετρο $\sqrt{s_{NN}}$ της αλληλεπίδρασης. Η εξάρτηση αυτή, δεν μπορεί να αποδοθεί για μια ακόμη φορά από τα εξεταζόμενα πρότυπα (HSD - UrQMD).
- Η επέκταση της μελέτης και στην εμπρόσθια περιοχή για όλες τις ενέργειες, ανέδειξε και σε αυτή την περίπτωση ότι η όποια εξάρτηση αποτυπώνεται μόνο στη μεσαία περιοχή της ψευδοωκότητας.

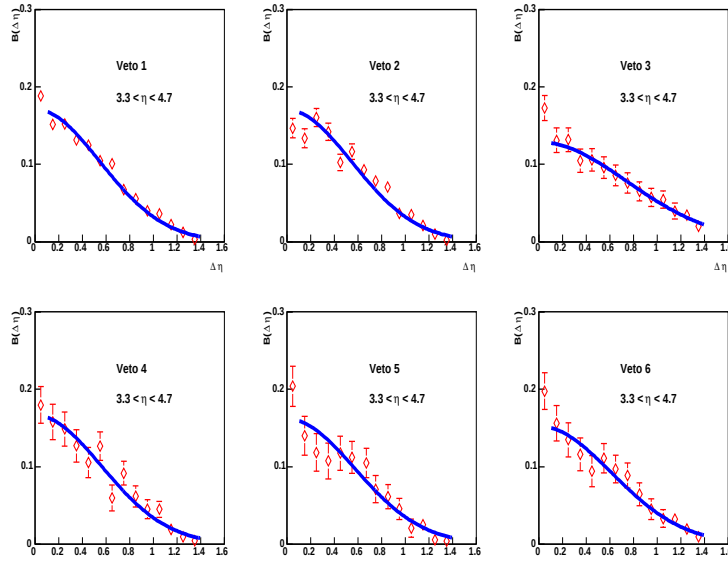
Τα αποτελέσματα αυτά έδωσαν το έναυσμα σε αρκετές προσπάθειες ώστε να ερμηνευτούν τα πειραματικά δεδομένα. Οι κυρίαρχες θεωρείες είναι οι ακόλουθες:



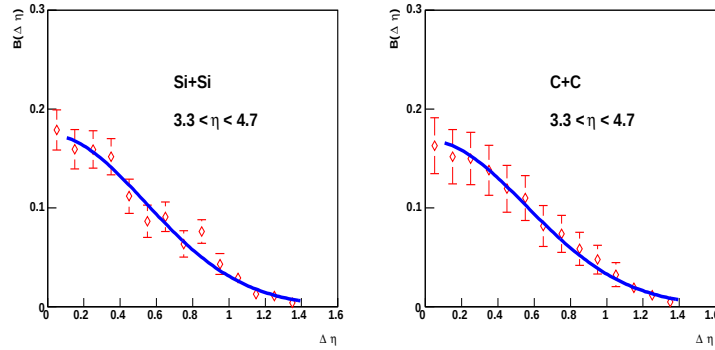
Σχήμα 6.19: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si+Si$ και $C+C$) σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωχύτητα για τη forward rapidity.

- Η ύπαρξη καθυστερημένου χρόνου αδρονποίησης του συστήματος, κάτι που μπορεί να αποδωθεί στην εμφάνιση μιας ενδιάμεσης κατάστασης της ύλης αμέσως μετά την αλληλεπίδραση των ιόντων [; , ;].
- Μέρος της πτώσης της τιμής του εύρους με την κεντρικότητα αποδόθηκε στην επίδραση των προϊόντων των διασπάσεων των συντονισμών [7].
- Τέλος, ένας ακόμα μηχανισμός που θεωρήθηκε υπαίτιος για το φαινόμενο αυτό, είναι η αυξανόμενη με την κεντρικότητα εγκάρσια τομή του συστήματος [8].

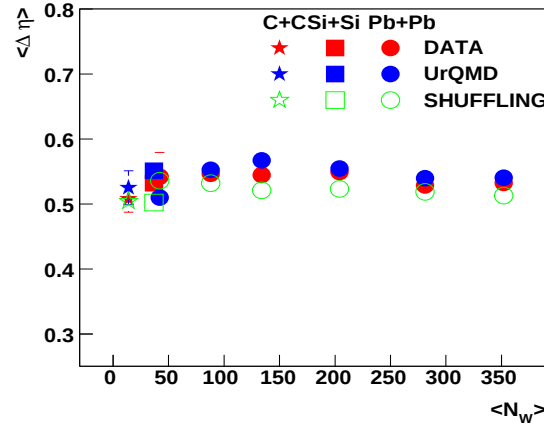
Στα επόμενα κεφάλαια, θα προσπαθήσουμε είτε με πειραματικές διαδικασίες ή με τη μελέτη μοντέλων να αποκλείσουμε ή να ποσοτικοποιήσουμε την επίδραση κάποιων από τους μηχανισμούς αυτούς.



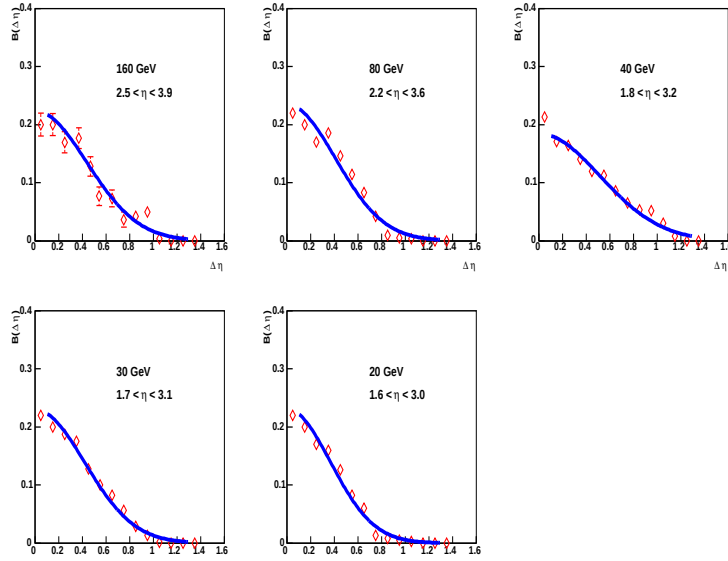
Σχήμα 6.20: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωχύτητα για τη forward rapidity.



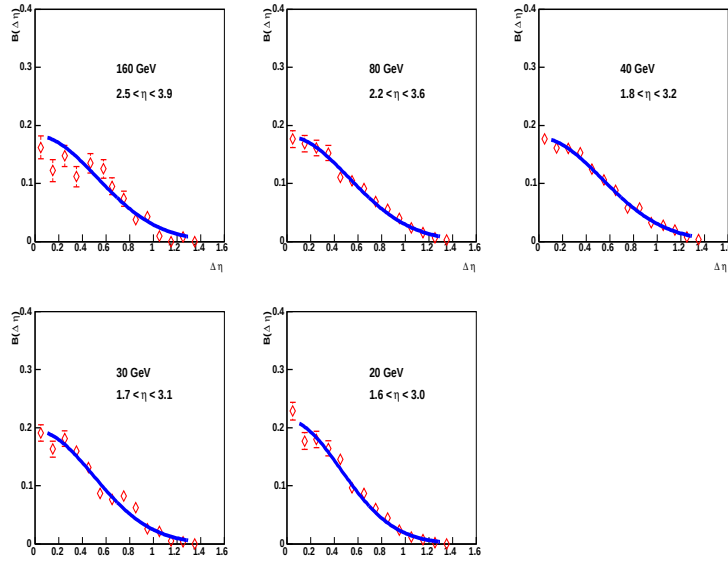
Σχήμα 6.21: Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρόντα συστήματα ($Si + Si$ και $C + C$) ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωχύτητα για τη forward rapidity.



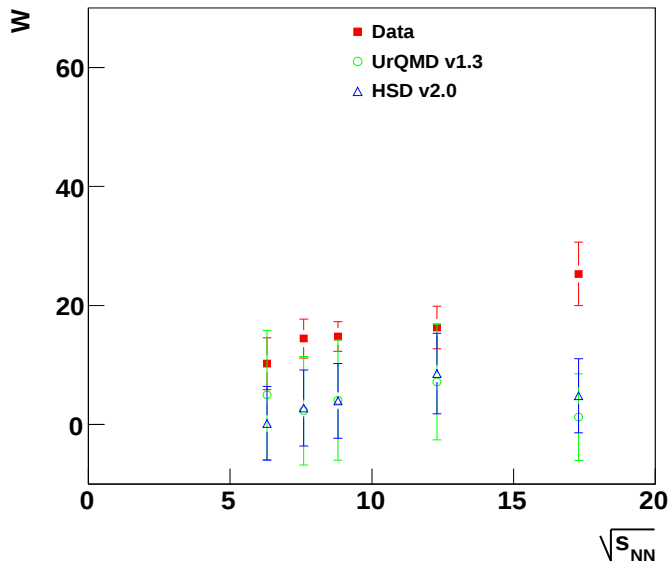
Σχήμα 6.22: Η εξάρτηση του εύρους, όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές της Balance Function με τη βοήθεια της σχέσης 3.13 για την εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας, από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση. Στο σχήμα φαίνονται τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα αλλά και γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο UrQMD.



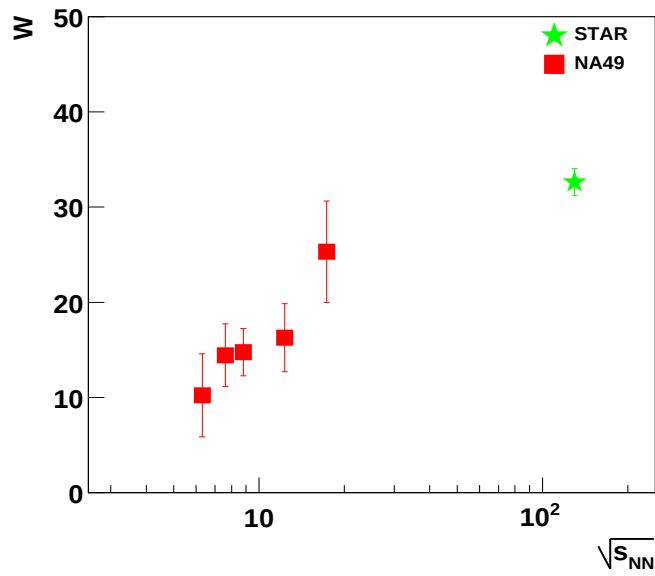
Σχήμα 6.23: Οι κατανομές της Balance Function για τα πειραματικά δεδομένα και για όλες τις ενέργειες του *SPS*.



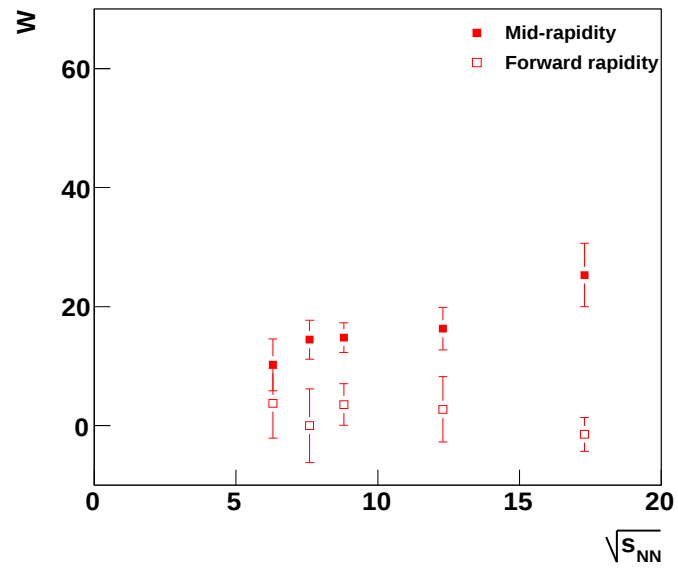
Σχήμα 6.24: Οι κατανομές της Balance Function για τα αναμειγμένα με τη μέθοδο *shuffling* δεδομένα και για όλες τις ενέργειες του *SPS*.



Σχήμα 6.25: Η εξάρτηση της νορμαλισμένης παραμέτρου W από την ενέργεια, για τα πειραματικά δεδομένα αλλά και για τα δυο μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν (UrQMD [4] και HSD [5]).



Σχήμα 6.26: Η εξέλιξη της τιμής της νορμαλισμένης παραμέτρου W από το ενεργειακό φάσμα του *SPS* σε ανώτερες ενέργειες του *RHIC*.



Σχήμα 6.27: Η εξάρτηση της νορμαλισμένης παραμέτρου W από την ενέργεια, για τα πειραματικά δεδομένα στις δυο περιοχές του φασικού χώρου.

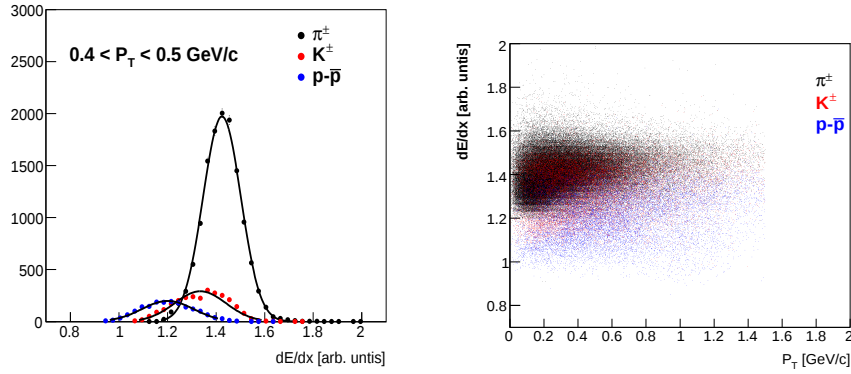
Κεφάλαιο 7

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΓΙΑ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρατεθούν όλα τα στοιχεία που προέκυψαν από τη μελέτη των συσχετισμών φορτίου ταυτοποιημένων σωματιδίων. Αυτό ήταν το επόμενο βήμα μιας ανάλυσης που ξεκίνησε από τη διερεύνηση της **Balance Function** για όλα τα φορτισμένα σωματίδια, αποτελέσματα της οποίας παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν με λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 6.

Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα, είναι καλό να αναφερθούμε σε μερικές βασικές παραμέτρους που ελέγχθηκαν πριν την ανάλυση. Τα κριτήρια σε επίπεδο γεγονότων και τροχιών παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 5. Για την ταυτοποίηση δε των σωματιδίων και την αναγνώριση πιονίων και καονίων, που θα μας απασχολήσουν κυρίως εδώ, χρησιμοποιήθηκε η πληροφορία που εξάχθηκε από του θαλάμους προβολής χρόνου (*TPC*) του πειράματος. Η κατανομή της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής στους *TPC*, για πιόνια, καόνια και πρωτόνια με εγκάρσιες ορμές $0.4 < P_T < 0.5 \text{ GeV}/c$ φαίνεται στο αριστερό γράφημα του σχήματος 7.1. Το δεξί γράφημα του σχήματος 7.1 δίνει τη συσχέτιση της τιμής της dE/dx με την ορμή των σωματιδίων για τα προηγούμενα είδη. Με τη βοήθεια επιπλέον διαμερίσεων του φασικού χώρου, αλλά και επέκταση της μελέτης της ταυτοποίησης σε επιπλέον παραμέτρους (φορτίο, ορμή, εγκάρσια ορμή, ψευδοωκύτητα), η ταυτοποίηση γίνεται με μεγαλύτερη επιτυχία.

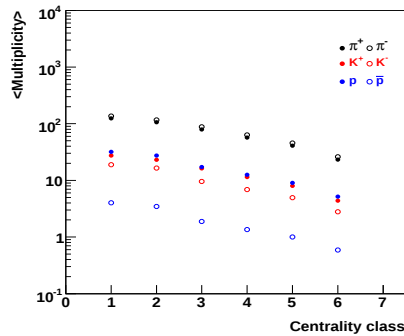
Με βάση την πιο πάνω διαδικασία, επιλέγονται για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$, τα διαφορετικά



Σχήμα 7.1: Αριστερό γράφημα: Οι κατανομές της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής για διαφορετικά είδη σωματιδίων. Δεξί γράφημα: Η εξάρτηση της dE/dx από την εγκάρσια ορμή.

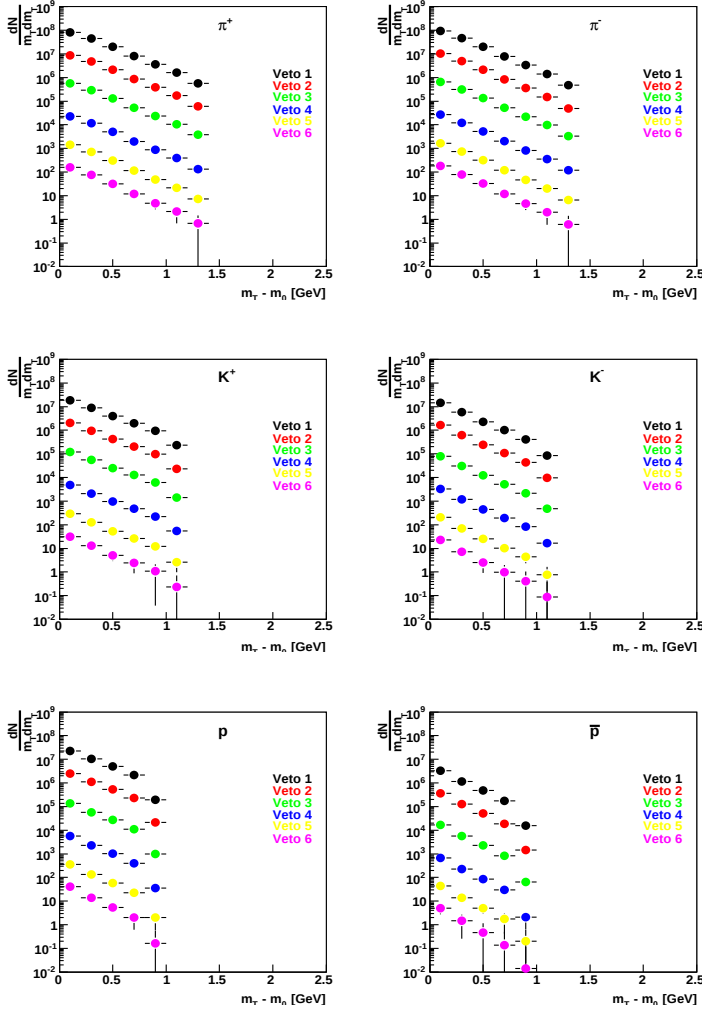
είδη σωματιδίων (πιόνια, καόνια και πρωτόνια). Το σχήμα 7.2, δίνει τον αριθμό των αναγνωρισμένων τροχιών για κάθε είδος κεντρικότητας. Στους αριθμούς αυτούς δεν έχει γίνει κάποια διόρθωση για αυτό και απέχουν από τις δημοσιευμένες τιμές του πειράματος. Παρατηρείται, όπως είναι άλλωστε φυσικό, μια πτώση του αριθμού (ανεξάρτητα από το είδος της τροχιάς) με τη μείωση της κεντρικότητας.

Το σχήμα 7.3, δίνει τις κατανομές της εγκάρσιας μάζας (m_T) ως συνάρτηση της διαφοράς $m_T - m_0$ για πιόνια, καόνια και πρωτόνια. Οι κατανομές δίνονται



Σχήμα 7.2: Διάγραμμα που δείχνει την ολική καταγεγραμμένη πολλαπλότητα των διαφορετικών ειδών σωματιδίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$.

για όλες τις κατηγορίες κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων. Εφαρμόζοντας μια προσαρμογή εκθετικής συνάρτησης στις κατανομές αυτές, μπορεί να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες για τη δυναμική του συστήματος και των τροχιών.



Σχήμα 7.3: Διάγραμμα που δείχνει τις κατανομές της εγκάρσιας μάζας (m_T) των διαφορετικών ειδών σωματιδίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$.

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των συσχετισμών φορτίων ζευγών πιονίων και καονίων τόσο στην ωχύτητα, όσο και στην αναλλοίωτη ορμή.

7.1 ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΩΚΥΤΗΤΑ

Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 3, η συνάρτηση ισοζυγίου μπορεί να αναλυθεί και σε άλλες παραμέτρους, μια εκ των οποίων μπορεί να είναι η ωκύτητα των ταυτοποιημένων σωματιδίων [1]. Για το σκοπό αυτό ο ορισμός της Balance Function παίρνει τη μορφή:

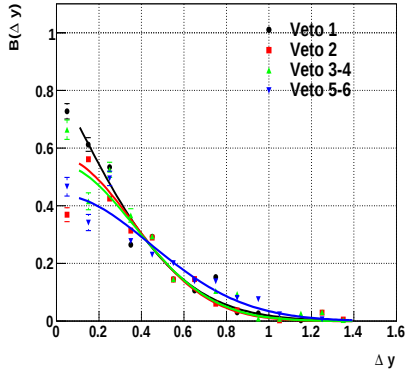
$$B(\Delta y) = \frac{1}{2} \left[\frac{N_{+-}(\Delta y) - N_{--}(\Delta y)}{N_-} + \frac{N_{-+}(\Delta y) - N_{++}(\Delta y)}{N_+} \right]. \quad (7.1)$$

Η μελέτη των συσχετισμών σε αυτή την παράμετρο, δίνει τη δυνατότητα να διερευνήσει κανείς την ύπαρξη διαφορετικού είδους μηχανισμού συσχετισμών για τα διάφορα είδη σωματιδίων [1] ή ακόμα και ο έλεγχος του πιθανού χρόνου αδρονοποίησης πιονίων και καονίων.

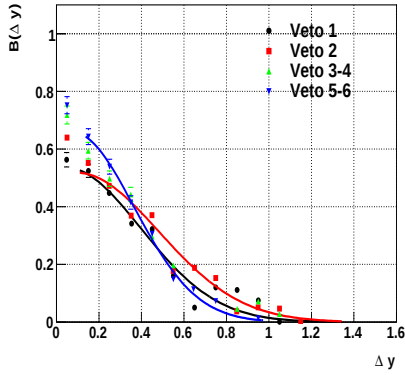
Μελετήθηκαν λοιπόν όλες οι κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ στη μέγιστη ενέργεια του SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$) και ειδικότερα υπολογίστηκαν οι κατανομές της Balance Function για ζεύγη πιονίων και καονίων [2]. Πριν την εξαγωγή παραμέτρων (τιμή ευρών), στα αρχικά αυτά στάδια της μελέτης, επιλέχθηκε να συμπετηχθούν για λόγους στατιστικής οι τέσσερις περιφερειακές αλληλεπιδράσεις (Veto3 - Veto6) σε δυο ενώνοντάς τις ανά δυο (Veto3-Veto4 και Veto5-Veto6). Το σχήμα 7.4 δίνει τις κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου σε σχέση με τη διαφορά στην ωκύτητα των αντίθετα φορτισμένων πιονίων, για τις τέσσερις νέες κλάσεις κεντρικότητας [2]. Οι καμπύλες που έχουν σχεδιαστεί στα σχήματα, είναι γκαουσιανές κατανομές που χρησιμοποιούνται απλά για να καθοδηγήσουν το μάτι. Με μια γρήγορη επεξεργασία των γραφημάτων αυτών, ίσως αναδεικνύεται ακόμα και από αυτό το στάδιο η μείωση του εύρους της Balance Function καθώς πηγαίνουμε από πιο περιφερειακές σε πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις.

Το σχήμα 7.5 δίνει τις κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου σε σχέση με τη διαφορά στην ωκύτητα των αντίθετα φορτισμένων καονίων, για τις τέσσερις νέες κλάσεις κεντρικότητας. Η μελέτη απλά των σχημάτων σε αυτή την περίπτωση δεν μπορεί να βοηθήσει στην εξαγωγή κάποιων αρχικών ενδείξεων ως προς τις τιμές των ευρών.

Ακολουθώντας τα βήματα της ανάλυσης στην περίπτωση μη ταυτοποιημένων σωματιδίων, εφαρμόσαμε τη μέθοδο *shuffling* στα πειραματικά μας δεδομένα ώστε να πάρουμε μια ένδειξη για τη μέγιστη τιμή του εύρους της συνάρτησης



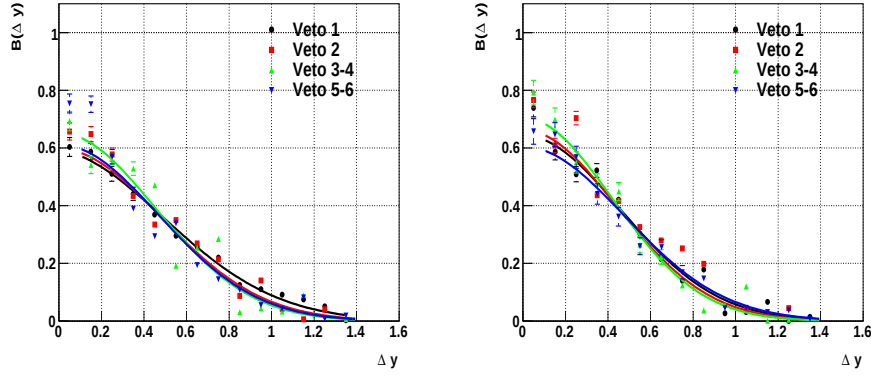
Σχήμα 7.4: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.



Σχήμα 7.5: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη καονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

ισοζυγίου σε κάθε περίπτωση. Για το σκοπό αυτό, αναμείξαμε τις τιμές των ορμών των πιονίων και των καονίων ξεχωριστά, αφού αυτά περάσαν από τα ίδια κριτήρια επιλογής που περνούν κατά την ανάλυση. Δημιουργήθηκαν λοιπόν καινούρια, αναμεμιγμένα γεγονότα, τα οποία αναλύθηκαν πάλι με τη συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου. Τα γραφήματα του σχήματος 7.6 δίνουν τις κατανομές ως συνάρτηση της Δy για πιόνια και καόνια (αριστερό και δεξί γράφημα αντίστοιχα). Και στις δυο περιπτώσεις δεν παρατηρούνται αισθητές διαφορές των κατανομών για διαφορετικές κεντρικότητες, κάτι που ήταν άλλωστε αναμενόμενο με βάση την προηγούμενή μας εμπειρία (κεφάλαιο 6).

Τέλος, στην προσπάθειά μας να συγκρίνουμε τα πειραματικά μας αποτελέσματα με κάποιο πρότυπο, χρησιμοποιήθηκε το UrQMD [3] για να παραχθεί ικανή στατιστική γεγονότων σε όλες τις κεντρικότητες. Με τη βοήθεια του



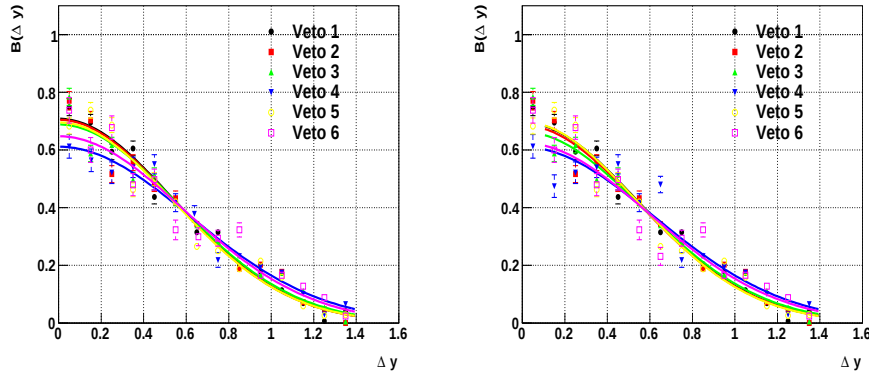
Σχήμα 7.6: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* ζεύγη πιονίων (δεξί γράφημα) και καονίων (αριστερό γράφημα) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb+Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

μοντέλου αυτού, υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων και καονίων, οι κατανομές των οποίων φαίνονται στα γραφήματα του σχήματος 7.7.

Έχοντας όλες τις κατανομές στη διάθεσή μας, υπολογίσαμε τα αντίστοιχα εύρη με τη βοήθεια της σχέσης 7.1. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι από τον υπολογισμό έχουν αποκλειστεί τα πρώτα σημεία των γραφικών παραστάσεων. Αυτό γίνεται λόγω του ότι η διαμέριση αυτή δέχεται επιδράσεις από όλα εκείνα τα φαινόμενα που συγκαταλέγονται στην κατηγορία των συσχετισμών μικρής εμβέλειας, όπως HBT και αλληλεπιδράσεις *Coulomb* μεταξύ των φορτισμένων σωματιδίων [1].

$$\langle \Delta y \rangle = \sum_{i=0} B_i \Delta y_i / \sum_{i=0} B_i \quad (7.2)$$

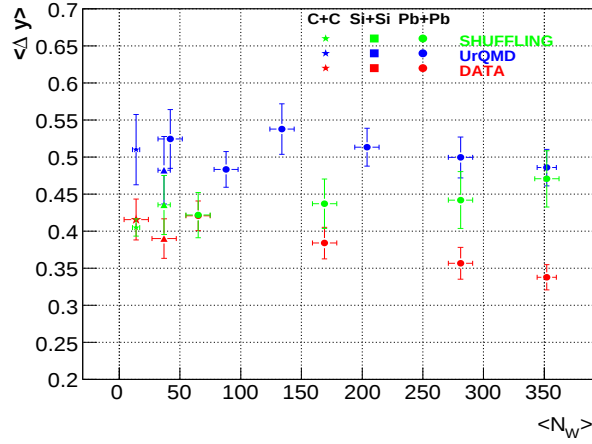
Το σχήμα 7.8 δίνει την εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ (όπως αυτό υπολογίζεται από τη σχέση 7.1), από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος



Σχήμα 7.7: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο UrQMD [3] για ζεύγη πιονίων (δεξί γράφημα) και καονίων (αριστερό γράφημα) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

στην αλληλεπίδραση [2]. Τα σημεία αφορούν την ανάλυση ζευγών πιονίων. Από τη μελέτη του σχήματος γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια έντονη εξάρτηση του εύρους από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ για τα πειραματικά δεδομένα. Αντίθετα, τόσο τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD δεν μπορούν να περιγράψουν το φαινόμενο αυτό. Η εικόνα που παίρνουμε είναι παρόμοια με αυτή της μελέτης των συσχετιμών φορτίου μη ταυτοποιημένων σωματιδίων, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6.

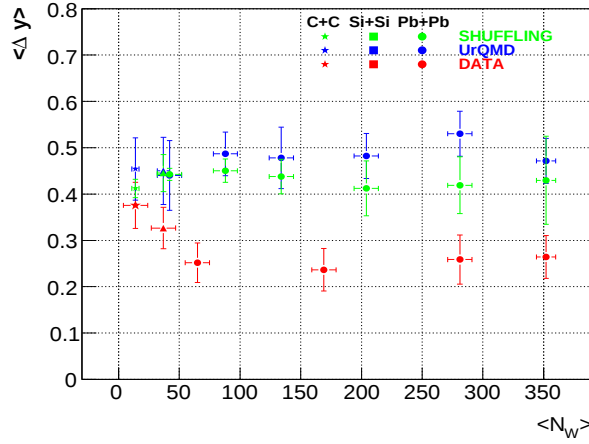
Αντίστοιχα, το σχήμα 7.9 δίνει την εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση, για ζεύγη καονίων [2]. Σε αυτή την περίπτωση, αν και υπάρχει μια αρχική ένδειξη μείωσης του εύρους ξεκινώντας από τα πιο μικρά συστήματα ($C + C$ και $Si + Si$) σε σχέση με τις αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$, στη συνέχεια δεν υπάρχει κάποια ένδειξη εξάρτησης του εύρους από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων των τελευταίων. Τόσο η μέθοδος *shuffling* όσο και το πρότυπο UrQMD δείχνουν μηδενική εξάρτηση, ενώ παράλληλα οι απόλυτες τιμές των ευρών τους είναι αρκετά πιο μεγάλες από αυτές των πειραματικών δεδομένων.



Σχήμα 7.8: Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη πιονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμειγμένων με τη μέθοδο shuffling γεγονότων (πράσινα σημεία) καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD.

Η συμπεριφορά αυτή του εύρους τόσο για τα ζεύγη πιονίων, όσο και για αυτά των καονίων θα μελετηθεί με τη βοήθεια διαφόρων προτύπων στο κεφάλαιο 8. Ως μια πρώτη προσπάθεια εξήγησης των αποτελεσμάτων, θα μπορούσε κανείς να επικαλεστεί τα εξής:

- Τα ζεύγη πιονίων δείχνουν μια ευαισθησία στην κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης για τα πειραματικά δεδομένα, κάτι που μπορεί να αποδωθεί στην ύπαρξη της καθυστερημένης αδρονοποίησης του συστήματος. Πρέπει σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι η μελέτη αυτή σε αυτή την παράμετρο (ωκύτητα) εξακολουθεί να μην αποκλείει την απόδοση του φαινομένου στην αύξηση της εγκάρσιας ροής του συστήματος με την κεντρικότητα [4]. Στην επόμενη παράγραφο θα αναφερθούμε σε αυτόν το μηχανισμό.
- Τα ζεύγη καονίων δεν παρουσιάζουν κάποια εξάρτηση από την κεντρικότητα, κάτι που θα μπορούσε να αποδωθεί στο χρόνο δημιουργίας των



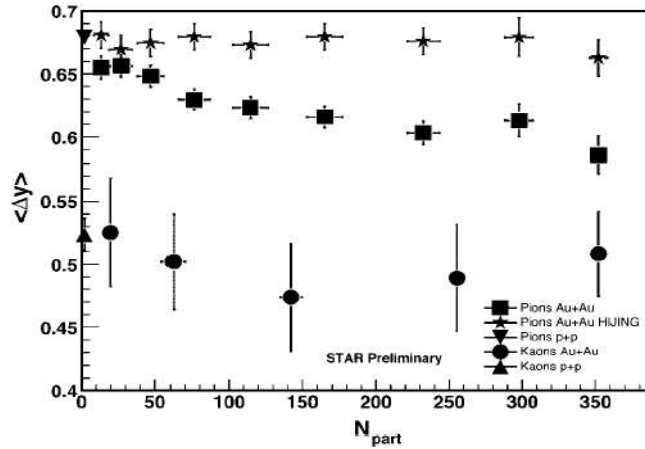
Σχήμα 7.9: Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη καονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότων (πράσινα σημεία) καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD.

καονίων και γενικότερα των σωματιδίων με παράδοξα *quarks*. Θεωρείται ότι τα σωματίδια αυτά δημιουργούνται στο αρχικό στάδιο της αλληλεπίδρασης.

- Οι απόλυτες τιμές των ευρών (πειραματικών σημείων) πιονίων και καονίων ($\langle \Delta y \rangle_{\pi^\pm} > \langle \Delta y \rangle_{K^\pm}$) ακολουθούν την εξάρτηση από τη μάζα που είχε συζητηθεί και εξεταστεί με τη βοήθεια ενός θερμικού μοντέλου αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Παράλληλα, το πείραμα *STAR* πραγματοποίησε μια αντίστοιχη μελέτη [5]. Στη μελέτη αυτή εξέτασαν τη συνάρτηση ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων και καονίων που προέρχονται από αλληλεπιδράσεις $p + p$ και $Au + Au$ σε ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ [5]. Τα κύρια αποτελέσματά τους συνοψίζονται στο σχήμα 7.10. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης

ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη πιονίων και καονίων από το αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Αυτό που παρατηρείται είναι μια συνεπής εικόνα με αυτή που παρουσιάστηκε πιο πάνω για το πείραμα *NA49*: υπάρχει μια μείωση του εύρους για ζεύγη πιονίων καθώς η αλληλεπίδραση γίνεται πιο κεντρική, ενώ δεν μπορεί να ειπωθεί κάτι ανάλογο για την περίπτωση των ζευγών καονίων. Αν δε, συγκρίνουμε τις απόλυτες τιμές των ευρών μεταξύ των δυο αυτών ειδών σωματιδίων, βλέπουμε ότι ακολουθείται η ίδια πορεία: τα βαρύτερα σωματίδια έχουν πιο στενές κατανομές [1].

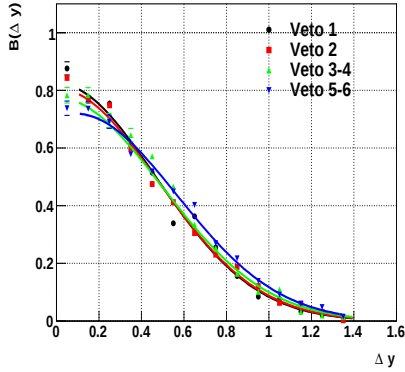


Σχήμα 7.10: Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη πιονίων και καονίων από το αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου HIJING.

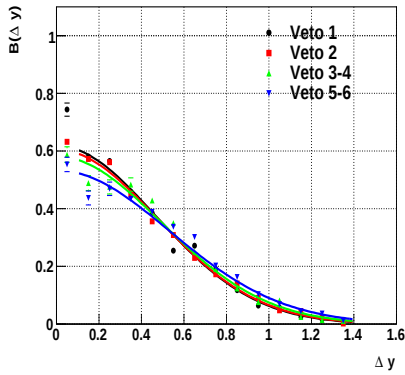
7.1.1 Εξάρτηση από την περιοχή της ωκύτητας

Το επόμενο βήμα της μελέτης των συσχετισμών φορτίου ταυτοποιημένων σωματιδίων, ήταν η εξάρτηση των αποτελεσμάτων μας από την περιοχή της ωκύτητας. Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο, ότι η αντίστοιχη μελέτη μη ταυτοποιημένων σωματιδίων που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 6 ανέδειξε ότι το φαινόμενο της μείωσης του εύρους της *Balance Function* με την κεντρικότητα εντοπίζεται μόνο στην μεσαία περιοχή της ψευδοωκύτητας και όχι στην εμπρόσθια. Έτσι, εξετάστηκαν και σε αυτή την περίπτωση η περιοχή της *mid-rapidity*

και της forward rapidity που περιγράφονται στο σχήμα 5.15.



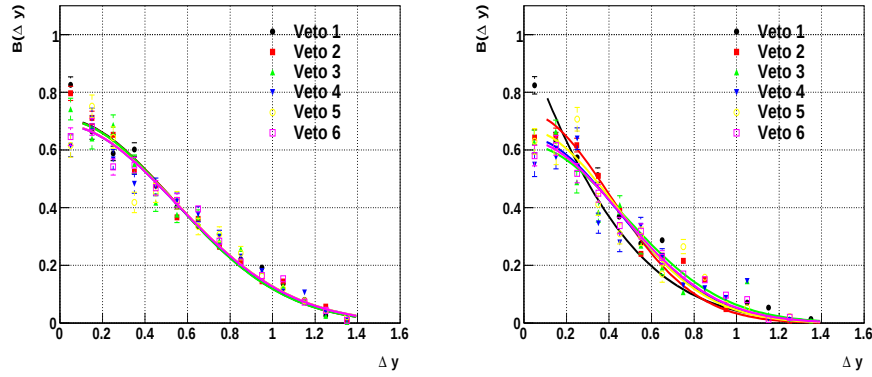
Σχήμα 7.11: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων για την εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας και για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.



Σχήμα 7.12: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη καονίων για την εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας και για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

Το σχήμα 7.11 δίνει τις κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου σε σχέση με τη διαφορά στην ωκύτητα των αντίθετα φορτισμένων πιονίων, για τις τέσσερις κλάσεις κεντρικότητας στην εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας. Οι καμπύλες που έχουν σχεδιαστεί στα σχήματα, είναι γκαουσιανές κατανομές που χρησιμοποιούνται απλά για να καθοδηγήσουν το μάτι. Με μια γρήγορη επεξεργασία των γραφημάτων αυτών, ίσως αναδεικνύεται ακόμα και από αυτό το στάδιο ότι δεν υπάρχει κάποια αισθητή μείωση του εύρους της **Balance Function** καθώς πηγαίνουμε από πιο περιφερειακές σε πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις.

Το σχήμα 7.12 δίνει τις αντίστοιχες κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη καονίων στην εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας. Και



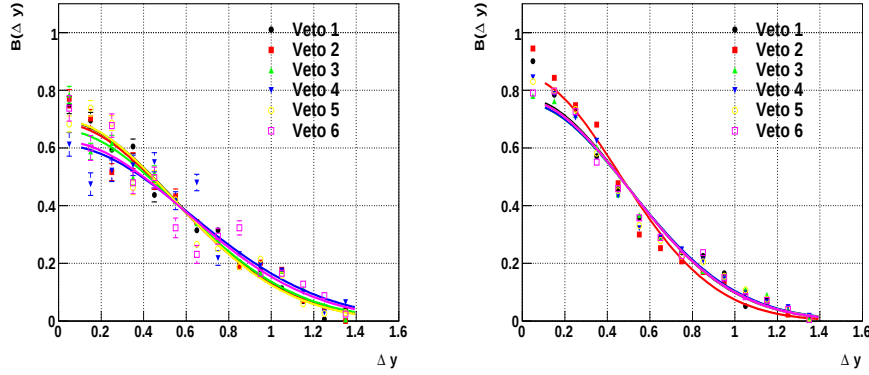
Σχήμα 7.13: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου (εμπρόσθια περιοχή) για αναμειγμένα με τη μέθοδο *shuffling* ζεύγη πιονίων (αριστερό γράφημα) και καονίων (δεξί γράφημα) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

σε αυτή την περίπτωση δεν διακρίνεται κάποια εξάρτηση του εύρους από την κεντρικότητα.

Στη συνέχεια, τα πειραματικά μας δεδομένα σε αυτή την εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας, πέρασαν μέσα από τη διαδικασία της ανάμειξης με τη βοήθεια της μεθόδου *shuffling*. Τα γραφήματα του σχήματος 7.13 δίνουν τις κατανομές ως συνάρτηση της Δy για πιόνια και καόνια (αριστερό και δεξί γράφημα αντίστοιχα). Και στις δυο περιπτώσεις δεν παρατηρούνται αισθητές διαφορές των κατανομών για διαφορετικές κεντρικότητες.

Τέλος, όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, μελετήθηκαν γεγονότα που έχουν παραχθεί με τη βοήθεια του μοντέλου *UrQMD* και υπολογίστηκαν οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για τα ζεύγη των διαφορετικών ειδών σωματιδίων στην εμπρόσθια αυτή περιοχή. Οι κατανομές αυτές δίνονται στα γραφήματα του σχήματος 7.14 (αριστερό σχήμα πιόνια - δεξί καόνια).

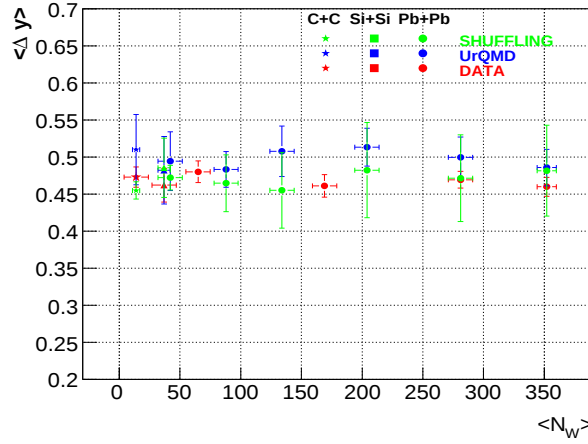
Από τις γραφικές αυτές παραστάσεις μπορεί κανείς πάλι να υπολογίσει τα αντίστοιχα εύρη (όπως αυτά υπολογίζονται από τη σχέση 7.1). Το σχήμα 7.15 δίνει την εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$, από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Τα σημεία αφορούν την ανάλυση ζευγών πιονίων. Από τη μελέτη του σχήματος γίνεται φανερό ότι στην εμπρό-



Σχήμα 7.14: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου (εμπρόσθια περιοχή) για γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο UrQMD για ζεύγη πιονίων (αριστερό γράφημα) και καονίων (δεξί γράφημα) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

σθια αυτή πειορχή της ωκύτητας δεν υπάρχει κάποια εξάρτηση του εύρους από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ για τα πειραματικά δεδομένα. Τόσο τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμειγμένων με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD συμφωνούν με το συμπέρασμα αυτό αν και οι απόλυτες τιμές των σημείων αυτών είναι μεγαλύτερες από αυτές των πειραματικών δεδομένων.

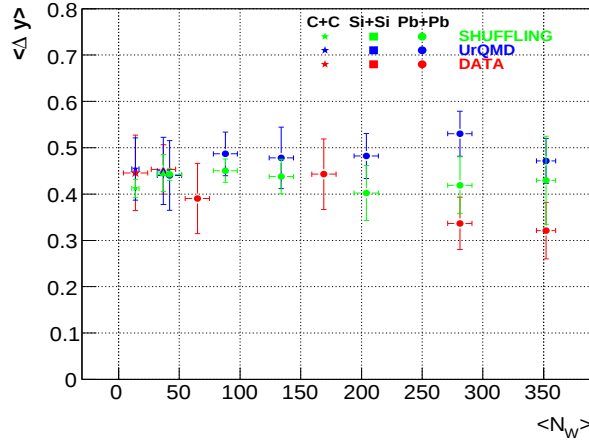
Το σχήμα 7.16 δίνει την εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση, για ζεύγη καονίων στην εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας. Και σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει κάποια ένδειξη εξάρτησης του εύρους από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων των τελευταίων. Τόσο η μέθοδος *shuffling*, όσο και το πρότυπο UrQMD δείχνουν μηδενική εξάρτηση, ενώ παράλληλα οι απόλυτες τιμές των ευρών τους είναι αρκετά πιο μεγάλες από αυτές των πειραματικών δεδομένων.



Σχήμα 7.15: Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη πιονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση για την εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμειγμένων με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD.

7.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΛΟΙΩΤΗ ΟΡΜΗ

Αναφέρθηκε ήδη στο κεφάλαιο ;;, ότι η συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου μπορεί να αναλυθεί και σε άλλες παραμέτρους όπως η αναλλοίωτη ορμή ζευγών σωματιδίων [4]. Ειδικά αυτή η παράμετρος θεωρήθηκε σε δημοσιεύσεις [4] η κατάλληλη ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για το αν η μείωση του εύρους με την αύξηση της κεντρικότητας μπορεί να αποδωθεί στην αυξανόμενη με την κεντρικότητα εγκάρσια ροή του συστήματος. Αυτός ο μηχανισμός είχε προταθεί αρχικά ως ένας από τους επικρατέστερους για την επεξήγηση των αποτελεσμάτων τόσο του πειράματος *STAR*, όσο και του *NA49* [6]. Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο ότι η αναλλοίωτη ορμή ζεύγους σωματιδίων δίνεται από τη σχέση 7.3. Αν υιοθετηθεί αυτός ο φορμαλισμός, τότε η συνάρτηση ισοζυγίου παίρνει τη μορφή της σχέσης 7.4



Σχήμα 7.16: Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη καονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση για την εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD.

$$Q_{inv.}^2 = -q^2 = -(p_a - p_b)^2 + \frac{(m_a^2 - m_b^2)^2}{P^2}. \quad (7.3)$$

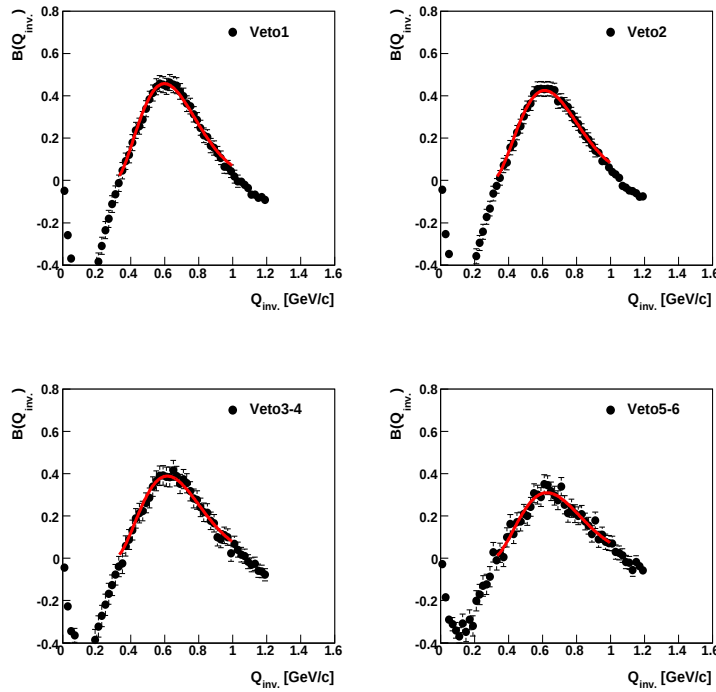
$$B(Q_{inv.}) = \frac{1}{2} \left[\frac{N_{+-}(Q_{inv.}) - N_{--}(Q_{inv.})}{N_-} + \frac{N_{-+}(Q_{inv.}) - N_{++}(Q_{inv.})}{N_+} \right]. \quad (7.4)$$

Με βάση τα πιο πάνω, στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν κάποια αρχικά αποτελέσματα της εξάρτησης από την κεντρικότητα του εύρους της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου που μελετάται στην αναλλοίωτη ορμή για ζεύγη πιονίων και καονίων. Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι προφανής: στην περίπτωση που συνεχιστεί να παρατηρείται το φαινόμενο της μείωσης του εύρους με την αύξηση της κεντρικότητας, τότε αυτό δεν θα μπορεί να αποδοθεί στην

αύξηση της εγκάρσιας ροής - αντίθετα αν το φαινόμενο δεν αναδειχτεί, τότε η εγκάρσια ροή μπορεί να θεωρηθεί ως ο κύριος μηχανισμός.

Ένα ακόμα στοιχείο που πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο είναι ο υπολογισμός του εύρους: σε αυτή την περίπτωση το εύρος δεν θα ήταν σωστό να υπολογιστεί με βάση μια αντίστοιχης μορφής σχέση με αυτή της 7.1 μιας και η τυπική κατανομή της **Balance Function** σε αυτήν την παράμετρο δείχνει σαν αυτή του σχήματος 3.13. Για τη μελέτη λοιπόν σε αυτή την παράμετρο, το εύρος υπολογίζεται από την προσαρμογή στις κατανομές μιας συνάρτησης της μορφής 7.5. Από το αποτέλεσμα της προσαρμογής αυτής εξάγουμε και το αντίστοιχο εύρος (σ στη σχέση) [2].

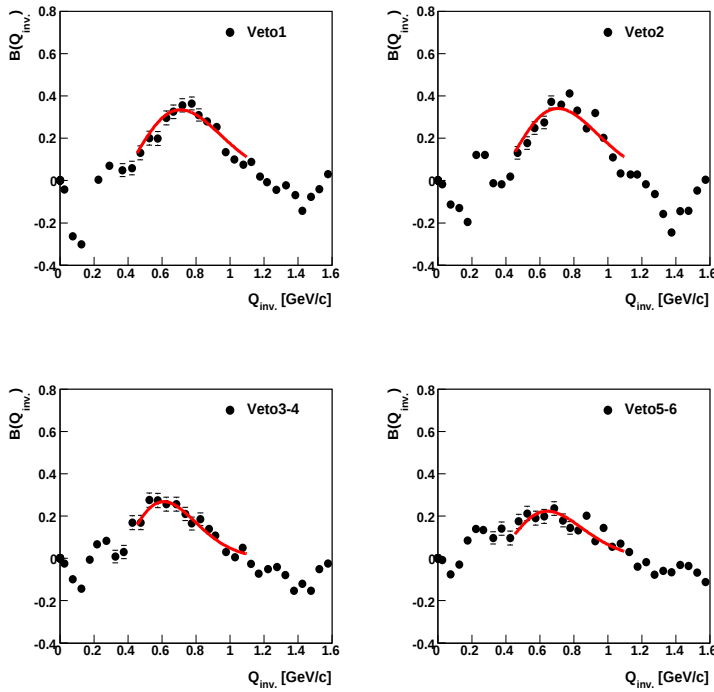
$$f(Q_{inv.}) = Ae^{-Q_{inv.}^2/\sigma^2} \quad (7.5)$$



Σχήμα 7.17: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων στην αναλλοίωτη ορμή για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

Το σχήμα 7.17 δίνει τις κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου σε σχέση με την αναλλοίωτη ορμή των σωματιδίων για αντίθετα φορτισμένων πιο-

νίων, για τις τέσσερις νέες κλάσεις κεντρικότητας. Οι καμπύλες που έχουν σχεδιαστεί στα σχήματα αντιστοιχούν στις προσαρμογές στα πειραματικά σημεία των συναρτήσεων της μορφής της σχέσης 7.5. Με μια γρήγορη επεξεργασία των γραφημάτων αυτών, ίσως αναδεικνύεται ακόμα και από αυτό το στάδιο η μείωση του εύρους της Balance Function καθώς πηγαίνουμε από πιο περιφερειακές σε πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις. Μια ακόμα παρατήρηση που μπορεί να γίνει σε αυτό το σημείο είναι η πτώση των κατανομών κάτω από το μηδέν για τιμές ορμών μικρότερες του $0.3\text{GeV}/c$. Η πτώση αυτή αποδίδεται στην ύπαρξη φαινομένων συσχετισμών μικρής εμβέλειας (HBT, Coulomb) μεταξύ των φορτισμένων σωματιδίων.

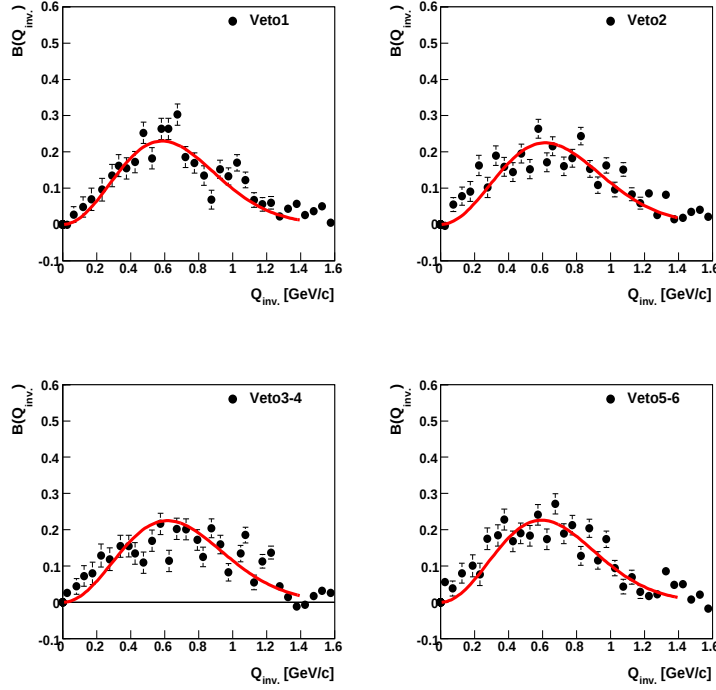


Σχήμα 7.18: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη καονίων στην αναλλοίωτη ορμή για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$.

Το σχήμα 7.18 δίνει τις αντίστοιχες κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου των αντίθετα φορτισμένων καονίων, για τις τέσσερις νέες κλάσεις κεντρικότητας. Η μελέτη απλά των σχημάτων σε αυτή την περίπτωση δεν μπορεί να βοηθήσει στην εξαγωγή κάποιων αρχικών ενδείξεων ως προς τις τιμές των ευρών. Οι κατανομές δεν δείχνουν να είναι κατάλληλες για προσαρμογή με κάποια συνάρτηση αφού τα σημεία επιδεικνύουν μια συνεχή διακύμανση. Ειδικά

για την περίπτωση των καονίων, υπάρχει η ανάγκη βελτίωσης της στατιστικής με επιβολή διαφορετικών κριτηρίων επιλογής των ταυτοποιημένων σωματιδίων.

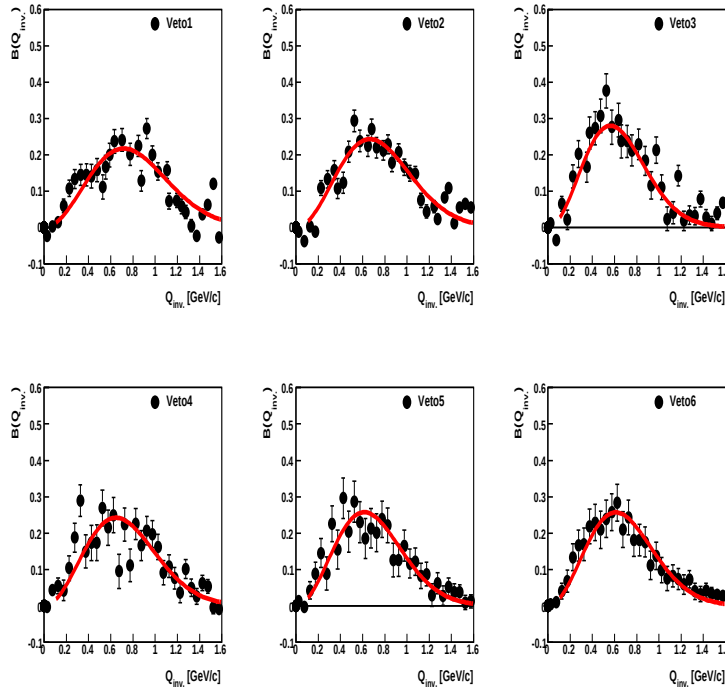
Τα πειραματικά δεδομένα πέρασαν για ακόμα μια φορά από το φίλτρο του μηχανισμού ανάμιξης *shuffling*. Τα γραφήματα των σχημάτων 7.19 και 7.20 δίνουν τις κατανομές που προέκυψαν ως συνάρτηση της $Q_{inv.}$ για πιόνια και καόνια αντίστοιχα. Και στις δυο περιπτώσεις δεν παρατηρούνται αισθητές διαφορές των κατανομών για διαφορετικές κεντρικότητες.



Σχήμα 7.19: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* ζεύγη πιονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$.

Τέλος, στην προσπάθειά μας να συγκρίνουμε τα πειραματικά μας αποτελέσματα με κάποιο πρότυπο, χρησιμοποιήθηκε το AMPT [7] για να παραχθεί ικανή στατιστική γεγονότων σε όλες τις κεντρικότητες. Με τη βοήθεια του μοντέλου αυτού, υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων και καονίων. Οι κατανομές των πρώτων φαίνονται ενδεικτικά στο σχήμα 7.21.

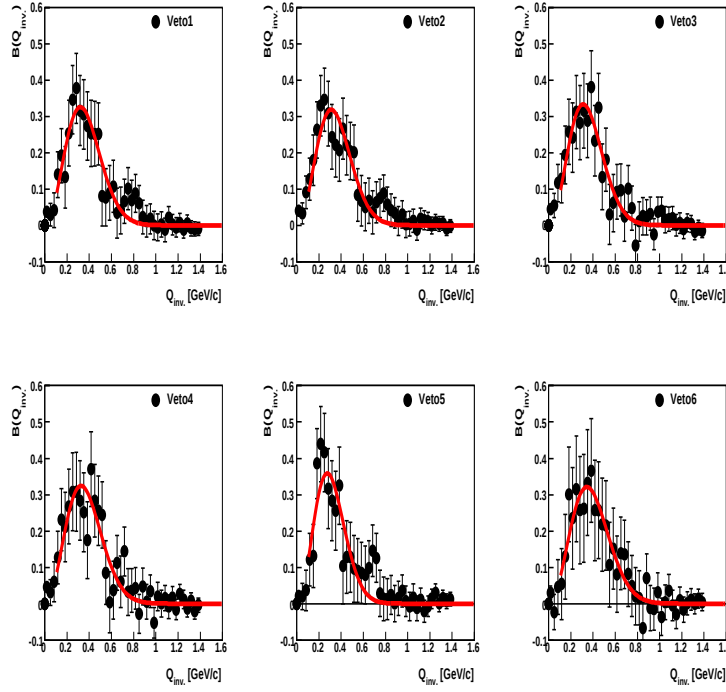
Το σχήμα 7.22 δίνει την εξάρτηση του εύρους ($Q_{inv.}$), όπως αυτό υπολογίζεται από την προσαρμογή συναρτήσεων της μορφής της σχέσης 7.5) στα πειραματικά δεδομένα, από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση [2]. Τα σημεία αφορούν την ανάλυση ζευγών πιο-



Σχήμα 7.20: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για αναμεμιγμένα με τη μέθοδο *shuffling* ζεύγη καονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$.

νίων. Από τη μελέτη του σχήματος γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια έντονη εξάρτηση του εύρους από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ για τα πειραματικά δεδομένα. Αντίθετα, τόσο τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου **AMPT** δεν μπορούν να περιγράψουν το φαινόμενο αυτό. Το γεγονός ότι εξακολουθεί να υπάρχει η εξάρτηση από την κεντρικότητα του εύρους της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου, ακόμα και κατά την ανάλυση σε αυτήν την παράμετρο, μας δίνει τη δυνατότητα να ισχυριστούμε (όπως εξηγήσαμε και στην εισαγωγή αυτής της παραγράφου) ότι υπάρχει μια πρώτη ένδειξη ότι το φαινόμενο της αύξησης της εγκάρσιας ροής με την κεντρικότητα δεν επιδρά στη μείωση του εύρους. Στο κεφάλαιο ;, θα αναδειχτεί και η συνεισφορά ενός ακόμα μηχανισμού, που είναι η διάσπαση συντονισμών.

Αντίστοιχα, το σχήμα 7.23 δίνει την εξάρτηση του εύρους $\langle Q_{inv} \rangle$ από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση, για ζεύγη καονίων. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει κάποια ένδειξη εξάρτη-

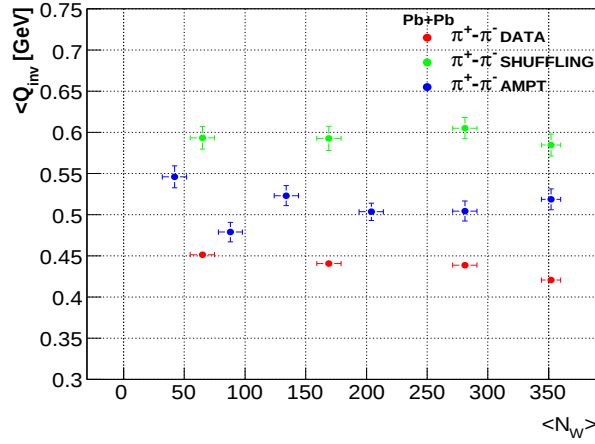


Σχήμα 7.21: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για γεγονότα που έχουν παραχθεί με τη βοήθεια του μοντέλου AMPT. Τα σχήματα αφορούν την ανάλυση ζευγών πιονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

σης του εύρους από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων των τελευταίων. Τόσο η μέθοδος *shuffling*, όσο και το πρότυπο AMPT δείχνουν μηδενική εξάρτηση, ενώ παράλληλα οι απόλυτες τιμές των ευρών του μοντέλου πλησιάζουν τα πειραματικά μας αποτελέσματα για τις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις.

Σε αυτό το κεφάλαιο είδαμε τα κύρια αποτελέσματα της μελέτης συσχετισμών ταυτοποιημένων σωματιδίων σε δυο παραμέτρους: στην ωκύτητα και στην αναλλοίωτη ορμή. Τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι τα ακόλουθα:

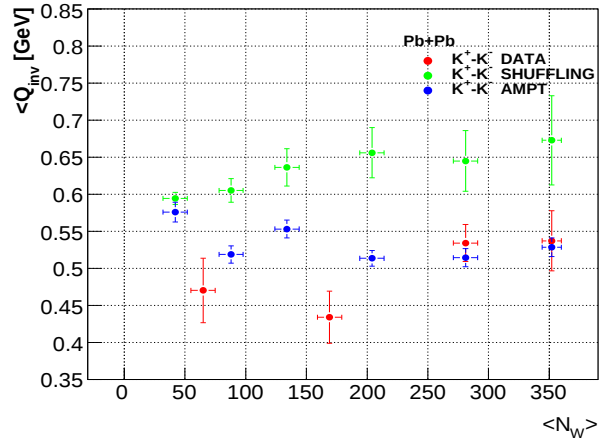
- Τα ζεύγη πιονίων, όταν μελετηθούν στη ωκύτητα, δείχνουν μια ευαισθησία στην κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης για τα πειραματικά δεδομένα, κάτι που μπορεί να αποδωθεί στην ύπαρξη της καθυστερημένης αδρονοποίησης του συστήματος [1], στην επίδραση των προϊόντων διασπάσεων συντονισμών [6] καθώς και στην αυξανόμενη με την κεντρικότητα εγκάρσια ροή. Κατά τη μελέτη των ζευγών αυτών στην αναλλοίωτη ορμή, παράμετρος που θεωρείται απαλλαγμένη από το μηχανισμό αυτό, ανα-



Σχήμα 7.22: Η εξάρτηση του εύρους $\langle Q_{inv} \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη πιονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου **AMPT**.

δεικνύεται για μια ακόμη φορά η μείωση του εύρους με την αύξηση της κεντρικότητας της αλληλεπίδρασης. Αυτό το φαινόμενο μας δίνει τη δυνατότητα να ισχυριστούμε ότι υπάρχει μια πρώτη ένδειξη ότι το φαινόμενο της αύξησης της εγκάρσιας ροής με την κεντρικότητα δεν επιδρά στη μείωση του εύρους.

- Τα ζεύγη καονίων δεν παρουσιάζουν κάποια εξάρτηση από την κεντρικότητα, τόσο κατά τη μελέτη τους στην ωκύτητα, όσο και στην αναλλοίωτη ορμή. Ειδικά για τη δεύτερη παράμετρο, επιπλέον μελέτη της επιλογής των ταυτοποιημένων σωματιδίων πρέπει να γίνει ώστε να εξαχθούν πιο χρήσιμα και ασφαλή συμπεράσματα από τις κατανομές της **Balance Function**.



Σχήμα 7.23: Η εξάρτηση του εύρους $\langle Q_{inv.} \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη καονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμειγμένων με τη μέθοδο *shuffling* γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου AMPT.

Κεφάλαιο 8

ΜΕΛΕΤΗ ΑΔΡΟΝΙΚΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναφερθήκαμε στην ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που καταγράφησαν από τους ανιχνευτές του πειράματος *NA49* σε όλες τις διαθέσιμες ενέργειες του επιταχυντικού συστήματος *SPS*. Συμπερασματικά, τα κύρια αποτελέσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:

- Παρατηρήθηκε μια έντονη εξάρτηση του εύρους της **Balance Function** από το αλληλεπιδρόν σύστημα και την κεντρικότητα των συγκρούσεων κατά τη μελέτη των συσχετισμών φορτίου μη ταυτοποιημένων σωματιδίων [1]. Η σχετική αυτή μείωση του εύρους (σύγκριση κεντρικών και περιφερειακών αλληλεπιδράσεων) είναι της τάξης του $17 \pm 3\%$ [1]. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε επίσης και στο πείραμα *STAR* του *RHIC* όπου σε αλληλεπιδράσεις *Au + Au* σε ενέργειες μεγαλύτερες του *SPS* αναφέρθηκε μια σχετική πτώση της τάξης του $14 \pm 2\%$ [2].
- Η μείωση του εύρους της **Balance Function** με την αύξηση της κεντρικότητας, εντοπίζεται στη μεσαία περιοχή της ψευδοωκύτητας. Η μελέτη της εμπρόσθιας περιοχής έδειξε ότι αυτό το φαινόμενο απουσιάζει [3].
- Η ανάλυση πειραματικών δεδομένων συγκρούσεων *Pb + Pb* σε όλο το ενεργειακό φάσμα του *SPS*, φανέρωσε μια πρώτη ένδειξη εξάρτησης της παραμέτρου *W* από την ενέργεια της αλληλεπίδρασης [3].
- Η μελέτη των συσχετισμών φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια στην ωκύτητα έδειξε ότι υπάρχει μια εξάρτηση του εύρους από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης (μείωση του $\langle \Delta y \rangle$) για ζεύγη πιονίων αλλά όχι

για ζεύγη καονίων [4]. Το ίδιο συμπέρασμα έχει δημοσιευθεί και από το πείραμα *STAR* [5].

- Η μελέτη των συσχετισμών φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια στην αναλλοίωτη ορμή έδειξε, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ότι υπάρχει μια εξάρτηση του εύρους από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης (μείωση του $\langle Q_{inv} \rangle$) για ζεύγη πιονίων αλλά όχι για ζεύγη καονίων [4].

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε διάφορα πρότυπα που μελετήθηκαν με σκοπό να συγκρίνουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν από τα πειραματικά μας δεδομένα. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας, χρησιμοποιήσαμε διάφορα μικροσκοπικά πρότυπα, τα αποτελέσματα μερικών εκ των οποίων έχουν παρατεθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Οι γεννήτορες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθοι:

- Heavy Ion Jet Interaction Generator - HIJING [6]
- Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics - UrQMD [7]
- A Multi-Phase Transport model - AMPT [8]
- THERMal heavy-IoN generATOR - THERMINATOR [9]

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα περιγράψουμε εν συντομία τις βασικές αρχές κάθε μοντέλου, καθώς και το ποια είναι τα κύρια αποτελέσματα που εξήχθησαν από κάθε ένα ξεχωριστά.

8.1 Heavy Ion Jet Interaction Generator - HIJING

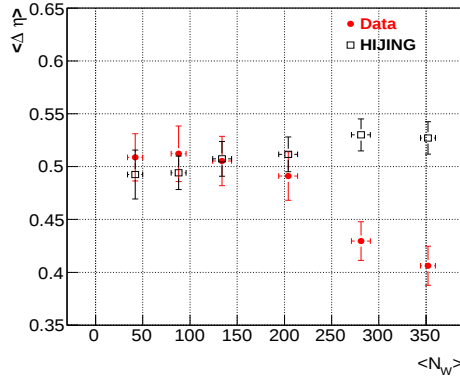
Το HIJING (Heavy Ion Jet Interaction Generator) [6] βασίζεται στη φαινομενολογία των αδρονικών αλληλεπιδράσεων σε ενδιάμεσες ενέργειες ($\sqrt{s} \leq 20 \text{ GeV/nucleon}$) όπως αυτή περιγράφεται στο μοντέλο FRITIOF αλλά και από το μοντέλο των δυαδικών παρτονίων (dual parton model). Στηρίζεται ακόμα στην επιτυχή εφαρμογή της perturbative-QCD όπως αυτή περιγράφεται στο μοντέλο PYTHIA για τις αδρονικές αλληλεπιδράσεις. Αυτή τη στιγμή το πρότυπο αυτό είναι από τα λίγα που ασχολούνται και περιγράφουν με επιτυχία διαδικασίες που σχετίζονται με πίδακες αδρονίων αλλά και ιδιότητες που αφορούν

το μέσο που δημιουργείται μετά από μια αλληλεπίδραση ιόντων, όπως “parton shadowing” και “jet quenching”. Επίσης, με το να περιγράφει με επιτυχία τη φαινομενολογία των χορδών σε αλληλεπιδράσεις που χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές της εγκάρσιας ορμής, παρέχει μια λογική σύνδεση μεταξύ της κυρίαρχης non-perturbative fragmentation physics σε ενέργειες του *SPS* και τη φυσική της perturbative QCD που εμφανίζεται κυρίως σε ενέργειες του *RHIC* αλλά και μελλοντικά του *LHC* [6].

Τα κύρια χαρακτηριστικά του HIJING είναι τα ακόλουθα:

- Περιγράφει τις αρχικές αλληλεπιδράσεις των παρτονίων μέσω της ανταλλαγής μικρών τιμών P_T . Οι χαμηλής ενέργειας πίδακες περιγράφονται με τη βοήθεια χορδών μεταξύ quarks και diquarks .
- Περιγράφει την παραγωγή πολλαπλών mini-jets αλλά και την εκπομπή ακτινοβολίας τους στα πλαίσια του μοντέλου PYTHIA.
- Η εξάρτηση της παραμέτρου κρούσης μιας αλληλεπίδρασης από τον αριθμό των ανελαστικών αλληλεπιδράσεων περιγράφεται από τη γεωμετρία του πυρήνα που αλληλεπιδρά.
- Περιγράφει το φαινόμενο του jet quenching ώστε να επιτραπεί η μελέτη φυσικών παραμέτρων σε ενδιάμεσες και υψηλές τιμές της εγκάρσιας ορμής με το να αποδίδει απώλεια ενέργειας στα παρτόνια που διαπερνούν το μέσο που δημιουργείται.
- Δεν περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόμενων σωματιδίων που χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές της εγκάρσιας ορμής.

Με βάση τα προηγούμενα, γίνεται φανερό ότι το πρότυπο αυτό προσπαθεί να περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις των αδρονίων χωρίς να λαμβάνει υπόψη του κάποια αλλαγή φάσης από την πυρηνική/αδρονική ύλη σε αυτή των ελεύθερων quarks και gluons . Έτσι, η εμφάνιση των παραγόμενων, μετά την αλληλεπίδραση των συστημάτων, σωματιδίων γίνεται στιγμιαία χωρίς να περάσει κάποιος χρόνος κατά τη διάρκεια του οποίου θα περιγράφονται οι διαδικασίες αλληλεπίδρασης σε επίπεδο παρτονίων. Από τη στιγμή δε που το πρότυπο δεν λαμβάνει υπόψη έναν ακόμα παράγοντα που επηρεάζει το εύρος της Balance Function και που είναι η αύξηση της εγκάρσιας ταχύτητας του συστήματος με την κεντρικότητα [10], τότε η μοναδική συνιστώσα παραγωγής συσχετισμένων τροχιών που απομένει είναι αυτή της διάσπασης συντονισμών. Η μελέτη του μηχανισμού αυτού θα περιγραφεί στην παράγραφο που ακολουθεί.



Σχήμα 8.1: Η εξάρτηση των ευρών των κατανομών της Balance Function από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων για τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινα σημεία) και το πρότυπο HIJING, για αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

Με τη βοήθεια του προτύπου αυτού παράχθηκε ικανή στατιστική γεγονότων (τουλάχιστον 50K γεγονότα $Pb + Pb$ για κάθε κατηγορία κεντρικότητας) τα οποία, αφού πέρασαν από το φίλτρο αποδοχής του πειράματος NA49 [1] αλλά και τα κριτήρια επιλογής (τόσο σε επίπεδο γεγονότων όσο και τροχιών) που εφαρμόστηκαν και στα πειραματικά δεδομένα, αναλύθηκαν με τη συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου. Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε είναι ίδιος με αυτόν που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6.

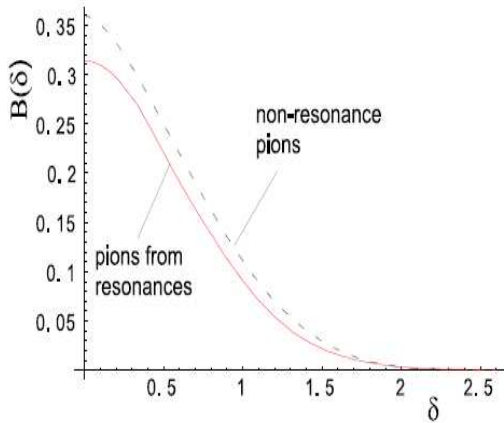
Το σχήμα 8.1, δίνει την εξάρτηση των ευρών της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης, όπως αυτή αναπαριστάται από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος σε μια σύγκρουση. Η μείωση του εύρους με την αύξηση του αριθμού $\langle N_W \rangle$ που παρατηρείται στα πειραματικά δεδομένα δεν μπορεί να περιγραφεί από το πρότυπο HIJING.

8.1.1 Μελέτη της συνεισφοράς των συντονισμών στην **Balance Function**

Έχει προταθεί [11] ότι η συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου είναι ευαίσθητη στην ύπαρξη των σωματιδίων που προέρχονται από διάσπαση συντονισμών. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με έναν σχετικά απλοϊκό τρόπο: ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σωματίδιο που δεν είναι σταθερό και διασπάται σε δυο προϊόντα (για παράδειγμα $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$). Τα προϊόντα αυτά θα δημιουργηθούν στο ίδιο σημείο του χώρου κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται η ενέργεια καθώς και οι αντίστοιχοι κβαντικοί αριθμοί. Τα σωματρία αυτά που προκύπτουν θεωρούνται

αλλά και είναι αρχικά πλήρως συσχετισμένα. Στη συνέχεια βέβαια, και ανάλογα με τη μέση τιμή της ελεύθερης διαδρομής εξαιτίας της πυκνότητας του παραγόμενου συστήματος, θα σχεδαστούν από άλλα παράπλευρα σωματίδια με αποτέλεσμα να χάσουν μέρος της αρχικής αυτής συσχέτισης.

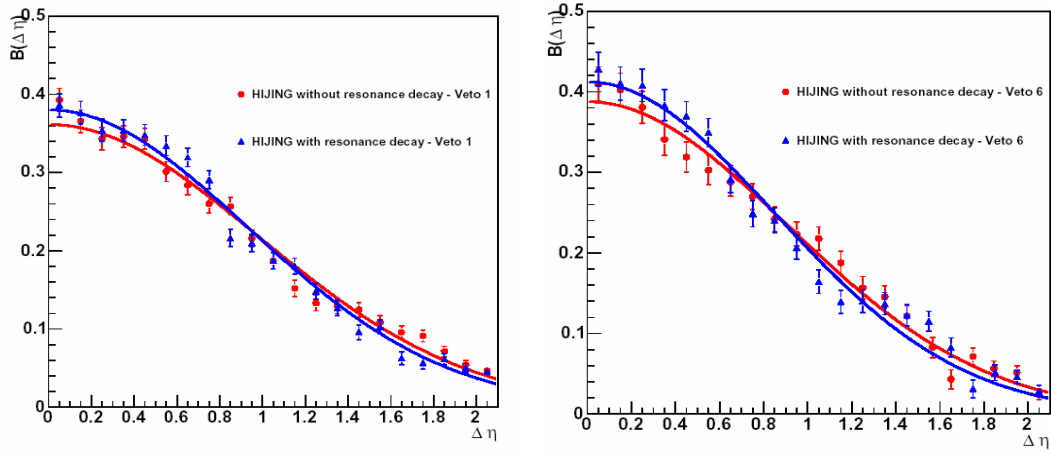
Στις δημοσιεύσεις [11] έγινε η προσπάθεια να διαχωριστούν οι δυο αυτοί μηχανισμοί παραγωγής αδρονίων. Η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώθηκε σε πιόνια που προέρχονται από συντονισμούς όπως: $K_s^0, \eta, \rho^0, \omega$. Οι συντονισμοί αυτοί διασπώνται σε ζεύγη πιονίων τα οποία συνεισφέρουν στον αριθμό των συσχετισμένων τροχιών που υπάρχουν στο δείγμα που αναλύεται. Έτσι έγινε μια πρώτη προσπάθεια να διαχωριστούν τα πιόνια που προέρχονται από τέτοιες διαδικασίες από αυτά που δημιουργούνται κατά την αδρονοποίηση του συστήματος. Το σχήμα 8.2 δείχνει τις κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις δυο διαφορετικές κατηγορίες πιονίων. Οι κατανομές αν και δεν είναι κανονικοποιημένες και κατά συνέπεια άμεσα συγκρίσιμες οπτικά, δίνουν δυο εύρη τα οποία είναι πολύ συγκρίσιμα σε τιμή [11]. Μια πρώτη ένδειξη λοιπόν που παίρνουμε από τη μελέτη αυτή είναι ότι η συνεισφορά των συντονισμών δεν θα πρέπει να θεωρείται πολύ μεγάλη.



Σχήμα 8.2: Οι κατανομές της Balance Function για πιόνια που προέρχονται από συντονισμούς και για πιόνια που δημιουργούνται στο στάδιο της αδρονοποίησης.

Για να επαληθευτεί αυτός ο ισχυρισμός, πραγματοποιήθηκε μια εκτενής μελέτη με τη βοήθεια του προτύπου HIJING. Έγινε παραγωγή ικανής στατιστικής ($N_{events} \approx 50K$) για τις δυο ακραίες κατηγορίες κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ [;]. Δόθηκε δε ιδιαίτερη βαρύτητα στην περίπτωση των πιονίων που προέρχονται από τη διάσπαση του ρ^0 μεσονίου και για αυτό το λόγο τα γεγονότα χωρίστηκαν σε αυτά που το μεσόνιο διασπάστηκε και σε αυτά όπου η διάσπασή του είχε απαγορευτεί μέσα

από τον κώδικα του προτύπου. Τα γραφήματα του σχήματος 8.3 δίνουν τις κατανομές των **Balance Function** ως συνάρτηση της διαφοράς στην ψευδοωκότητα για όλα τα φορτισμένα σωματίδια και για τις πιο κεντρικές (αριστερό γράφημα) και τις πιο περιφερειακές (δεξί γράφημα) αλληλεπιδράσεις $Pb+Pb$. Οι δυο διαφορετικές κατανομές κάθε γραφήματος αντιστοιχούν στις δυο διαφορετικές, ως προς τη διάσπαση του ρ^0 μεσονίου, περιπτώσεις. Το αρχικό συμπέρασμα από τη μελέτη του σχήματος, είναι ότι οι κατανομές δεν διαφέρουν αισθητά. Αυτό επιβεβαιώνεται από τον υπολογισμό του εύρους των κατανομών με τη βοήθεια τη σχέσης 3.13 του κεφαλαίου 3. Οι τιμές που παίρνουμε είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 8.3: Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου που προκύπτουν από ανάλυση γεγονότων του προτύπου **HIJING** για δυο ακραίες κλάσεις κεντρικότητας αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$: για τις πιο κεντρικές συγκρούσεις (αριστερό γράφημα) και τις πιο περιφερειακές (δεξί γράφημα). Οι δυο διαφορετικές κατανομές αντιστοιχούν στις δυο διαφορετικές, ως προς τη διάσπαση του ρ^0 μεσονίου, περιπτώσεις.

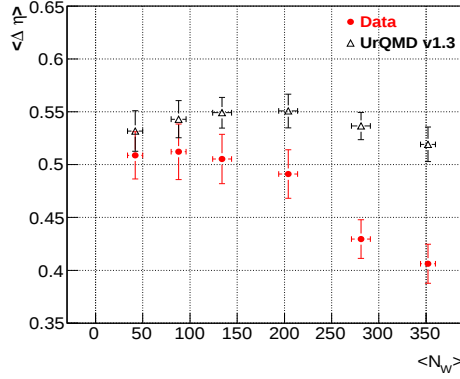
- Κεντρικές αλληλεπιδράσεις - Επιτρεπτή διάσπαση του ρ^0 :
 $\langle \Delta\eta \rangle = 0.746 \pm 0.014$.
- Κεντρικές αλληλεπιδράσεις - Μη επιτρεπτή διάσπαση του ρ^0 :
 $\langle \Delta\eta \rangle = 0.777 \pm 0.015$.

- Περιφερειακές αλληλεπιδράσεις - Επιτρεπτή διάσπαση του ρ^0 :
 $\langle \Delta\eta \rangle = 0.726 \pm 0.022$.
- Περιφερειακές αλληλεπιδράσεις - Μη επιτρεπτή διάσπαση του ρ^0 :
 $\langle \Delta\eta \rangle = 0.757 \pm 0.023$.

Το αποτέλεσμα είναι ότι η επίδραση των προϊόντων της διάσπασης του ρ^0 μεσονίου είναι της τάξης του 4% και μάλιστα δεν εξαρτάται από την κεντρικότητα. Έτσι η αισθητή πτώση του εύρους σε σχέση με την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης που παρατηρείται στα πειραματικά δεδομένα, δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στη διάσπαση των συντονισμών [;].

8.2 Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics - UrQMD

Το UrQMD (Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics)[7] είναι ένα μικροσκοπικό μοντέλο βασισμένο σε μια περιγραφή του φασικού χώρου της αλληλεπίδρασης με την προσθήκη της θεωρίας μεταφοράς. Στα πλαίσια αυτού του μοντέλου, γίνεται μια σχετικιστική περιγραφή της αλληλεπίδρασης σε 4 διαστάσεις, ενώ ακολουθείται ένας συνεπής φορμαλισμός της δυναμικής των συγκρούσεων βαρέων ιόντων τόσο σε χαμηλές, όσο και σε υψηλές ενέργειες. Έτσι, διαφορετικοί μηχανισμοί που έχουν εξάρτηση από την ενέργεια έχουν υιοθετηθεί, ξεκινώντας από το σχηματισμό πυρήνων και τη βαθιά ανελαστική σκέδαση, μέχρι την παραγωγή σωματιδίων και συντονισμών σε ενδιαμέσες ενέργειες, φτάνοντας σε σχετικιστικές ενέργειες όπου τόσο η διέγερση χορδών, όσο και η διάσπαση και σκέδαση παρτονίων παίζουν σημαντικό ρόλο. Η παραγωγή δε των σωματιδίων μπορεί να γίνει μέσω διέγερσης, συνδυασμού παρτονίων, διάσπαση συντονισμών ή διάσπαση χορδών. Πιο συγκεκριμένα, για ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} < 6\text{GeV}$, η παραγωγή σωματιδίων πραγματοποιείται κυρίως μέσω αλληλεπιδράσεων μεσονίων-βαρυονίων και μεσονίων-μεσονίων, ενώ για μεγαλύτερες ενέργειες η διέγερση και διάσπαση χορδών είναι ο επικρατέστερος μηχανισμός. Η μεταφορά των σωματιδίων πραγματοποιείται με βάση εξισώσεις κίνησης. Η ενεργός διατομή μεταφράζεται γεωμετρικά, δίνοντας μια αλληλεπίδραση μεταξύ σωματιδίων που πλησιάζουν αρκετά μεταξύ τους. Τέλος, στα πλαίσια του μοντέλου αυτού, επιτρέπεται η περαιτέρω αλληλεπίδραση (σχεδάσεις) των σωματιδίων που παράγονται από τα υπόλοιπα σωματίδια του δείγματος. Αυτή είναι μια από τις μεγάλες διαφορές με το πρότυπο HIJING [6, 7].



Σχήμα 8.4: Η εξάρτηση των ευρών των κατανομών της Balance Function από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων για τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινα σημεία) και το πρότυπο UrQMD, για αλληλεπιδράσεις $Pb+Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

Με τη βοήθεια του προτύπου αυτού παράχθηκε ικανή στατιστική γεγονότων (τουλάχιστον 50K γεγονότα $Pb+Pb$ για κάθε κατηγορία κεντρικότητας) τα οποία, αφού πέρασαν από το φίλτρο αποδοχής του πειράματος NA49 [1] αλλά και τα κριτήρια επιλογής (τόσο σε επίπεδο γεγονότων όσο και τροχιών) που εφαρμόστηκαν και στα πειραματικά δεδομένα, αναλύθηκαν με τη συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου. Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε είναι ίδιος με αυτόν που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6.

Το σχήμα 8.4 δίνει την εξάρτηση των ευρών της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για αλληλεπιδράσεις $Pb+Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης, όπως αυτή αναπαριστάται από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος σε μια σύγκρουση. Η μείωση του εύρους με την αύξηση του αριθμού $\langle N_W \rangle$ που παρατηρείται στα πειραματικά δεδομένα δεν μπορεί να περιγραφεί από το πρότυπο UrQMD.

8.3 A Multi-Phase Transport model - AMPT

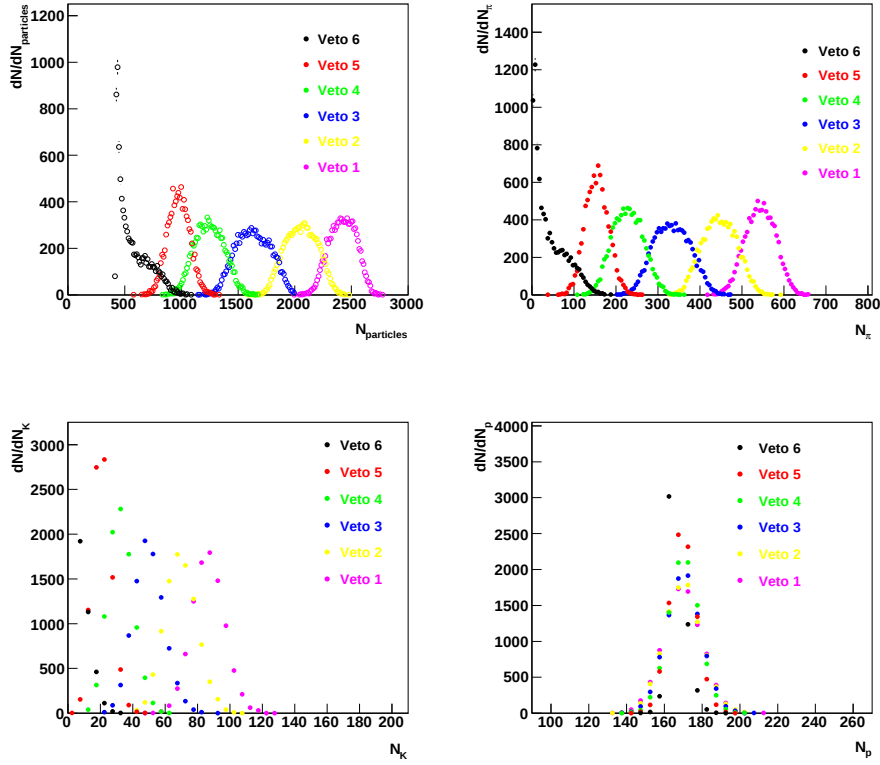
Το AMPT (A Multi-Phase Transport model) [8], είναι ένα μοντέλο που πραγματεύεται διαφορετικές μορφές-φάσεις του συστήματος που δημιουργείται μετά από μια αλληλεπίδραση σε μεγάλες ενέργειες. Περιέχει δε μεταξύ άλλων, μια φάση που περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις των quarks και των παρτονίων πριν την αδρονοποίηση. Αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη:

- Οι χωρικές κατανομές αλλά και οι αντίστοιχες κατανομές της ορμής των παρτονίων αλλά και των χορδών περιγράφονται από το μοντέλο HIJING.

- Ο καταγισμός των παρτονίων περιγράφεται από το μοντέλο του Zhang - ZPC [12].
- Όταν οι αλληλεπιδράσεις των παρτονίων σταματήσουν, τότε αυτά επανενώνονται με τις χορδές από τις οποίες προήλθαν και δημιουργούν αδρόνια σύμφωνα με το μοντέλο διάσπασης χορδών που περιγράφεται από το LUND [13].
- Η σκέδαση μεταξύ των τελικών αδρονίων περιγράφεται από το μοντέλο μεταφοράς ART [14].

Αριθμός γεγονότων	Κεντρικότητα	Εύρος $b[fm]$	$\langle t_{freeze-out} \rangle$
100K	<i>Veto1</i>	$0 \leq b \leq 3.4$	5.0 ± 3.5
100K	<i>Veto2</i>	$3.4 \leq b \leq 5.4$	12.7 ± 1.2
300K	<i>Veto3</i>	$5.4 \leq b \leq 7.4$	15.0 ± 1.1
300K	<i>Veto4</i>	$7.4 \leq b \leq 9.1$	17.1 ± 0.8
300K	<i>Veto5</i>	$9.1 \leq b \leq 10.2$	18.4 ± 0.6
300K	<i>Veto6</i>	$10.2 \leq b$	19.1 ± 0.4

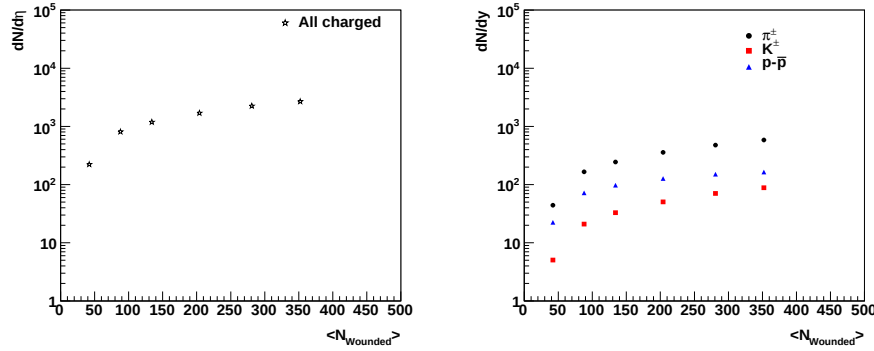
Πίνακας 8.1: Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται ο αριθμός των γεγονότων $Pb+Pb$ που έχουν παραχθεί με τη βοήθεια του μοντέλου AMPT, η κεντρικότητα αλλά και το εύρος της παραμέτρου χρούσης. Η τελευταία στήλη δίνει το μέσο χρόνο αδρονοποίησης των γεγονότων για κάθε κλάση κεντρικότητας.



Σχήμα 8.5: Οι κατανομές των πολλαπλοτήτων όλων των παραγόμενων σωματιδίων (πάνω αριστερά), των πιονίων (πάνω δεξιά), των καονίων (κάτω αριστερά) αλλά και των πρωτονίων (κάτω δεξιά) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$, όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο AMPT.

Όπως γίνεται φανερό, το μοντέλο αυτό παρέχει τη δυνατότητα να μελετηθεί και η χρονική στιγμή δημιουργίας των αδρονίων. Έτσι, παράχθηκε ικανή στατιστική γεγονότων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ ώστε να γίνει εκτεταμένη μελέτη του μοντέλου αυτού. Στοιχεία για τα γεγονότα που παράχθηκαν φαίνονται στον πίνακα 8.1.

Το σχήμα 8.5 δείχνει τις πολλαπλότητες των παραγόμενων σωματιδίων, αλλά και τις αντίστοιχες πολλαπλότητες ομαδοποιημένες ως προς την οικογένεια των σωματιδίων (πιόνια, καόνια και πρωτόνια). Σε κάθε γράφημα εμφανίζον-



Σχήμα 8.6: Ο μέσος αριθμός των παραγόμενων σωματιδίων (αριστερά), πιονίων, καονίων και πρωτονίων (δεξιά) ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση.

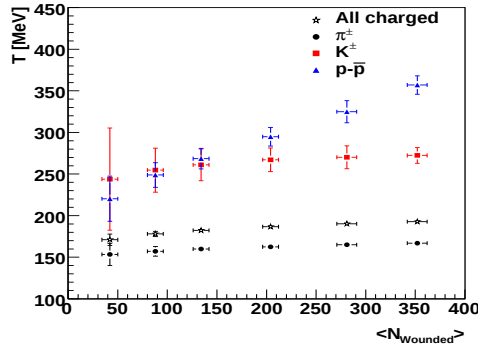
ται οι κατανομές για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$.

Το σχήμα 8.6 δείχνει την εξάρτηση από τη κεντρικότητα του μέσου αριθμού των παραγόμενων σωματιδίων (αριστερό γράφημα) και των αντίστοιχων μέσων αριθμών των παραγόμενων πιονίων, καονίων και πρωτονίων (δεξί γράφημα) όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο AMPT.

Το σχήμα 8.7 δείχνει την εξάρτηση της θερμοκρασίας όλων των φορτισμένων σωματιδίων, των πιονίων, των καονίων αλλά και των πρωτονίων, ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση. Η θερμοκρασία αυτή προέκυψε από την προσαρμογή μιας εκθετικής συνάρτησης της μορφής $dN/(N_{events} P_T dP_T) = A \exp(-P_T/T)$ στα αντίστοιχα φάσματα των εγκάρσιων ορμών.

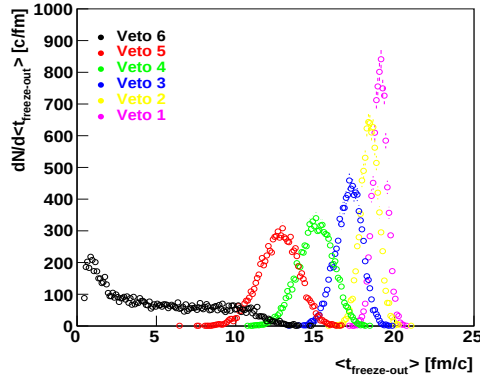
Τέλος, όπως αναφέρθηκε και πιο πριν, το μοντέλο αυτό δίνει τη δυνατότητα της μελέτης της συσχέτισης του εύρους της Balance Function με το χρόνο της αδρονοποίησης των σωματιδίων. Στα πλαίσια λοιπόν του μοντέλου αυτού, μελετήσαμε το μέσο χρόνο αδρονοποίησης που χαρακτηρίζει κάθε γεγονός και δίνεται από τη σχέση:

$$\langle t_{freeze-out} \rangle = \sum_{i=0}^N t_i / N \quad (8.1)$$



Σχήμα 8.7: Η εξάρτηση της θερμοκρασίας όπως αυτή προκύπτει από την προσαρμογή μιας εκθετικής συνάρτησης στα φάσματα των εγκάρσιων ορμών, όλων των φορτισμένων σωματιδίων, των πιονίων, των καονίων αλλά και των πρωτονίων, ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση.

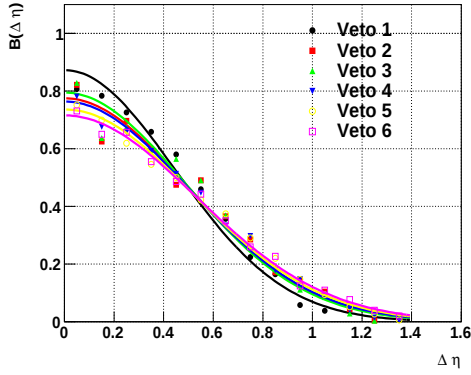
8.3.1 ΜΕΛΕΤΗ ΜΗ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ



Σχήμα 8.8: Οι κατανομές του μέσου χρόνου αδρονοποίησης όλων των παραγόμενων σωματιδίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$, όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο AMPT.

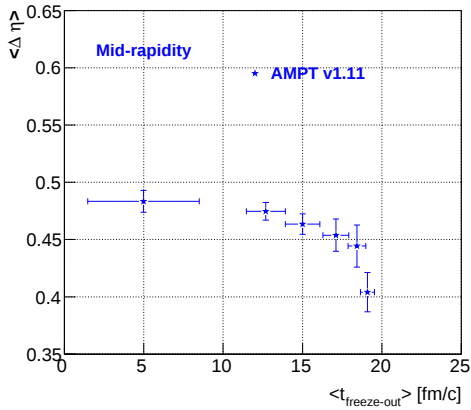
Με τη βοήθεια των γεγονότων που παράχθηκαν, μας δόθηκε η δυνατότητα να μελετήσουμε την πιθανή συσχέτιση του εύρους της **Balance Function** με το χρόνο αδρονοποίησης των γεγονότων, όπως αυτός υπολογίζεται από τη σχέση 8.1. Οι κατανομές της παραμέτρου 8.1 για όλα τα φορτισμένα σωματάρια φαίνονται στο σχήμα 8.8. Το σχήμα 8.9 δείχνει τις κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για μη ταυτοποιημένα σωματάρια για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ στη μέγιστη ενέργεια του SPS ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς $\Delta\eta$. Οι κατανομές αυτές είναι νορμαλισμένες στο ολοκλήρωμα της κατανομής των πιο κεντρικών αλληλεπιδράσεων για αυτό και είναι άμεσα συγκρίσιμες. Από τη μελέτη του σχήματος, γίνεται φανερό ότι υπάρ-

χει μια εξάρτηση από την κεντρικότητα, αφού οι κατανομές των πιο κεντρικών συγκρούσεων $Pb + Pb$ είναι πιο στενές από αυτές των πιο περιφερειακών.



Σχήμα 8.9: Οι κατανομές της Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς $\Delta\eta$ των μη ταυτοποιημένων σωματιδίων για όλες τις κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ όπως προκύπτουν από την ανάλυση γεγονότων που παράχθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου AMPT.

Με τη βοήθεια της σχέσης 3.13, υπολογίζουμε τα αντίστοιχα εύρη, οι τιμές των οποίων φαίνονται στο σχήμα 8.10 ως συνάρτηση του μέσου χρόνου αδρονοποίησης των γεγονότων, όπως αυτός υπολογίζεται από τη σχέση 8.1. Με τη βοήθεια του σχήματος αυτού, έχουμε μια πιο άμεση απόδειξη της εξάρτησης που είχε ήδη παρατηρηθεί από τη μελέτη των ίδιων των κατανομών (σχήμα 8.9) αλλά και μια επιβεβαίωση της θεωρίας της συνάρτησης ισοζυγίου: το εύρος σχετίζεται άμεσα με το χρόνο της αδρονοποίησης.

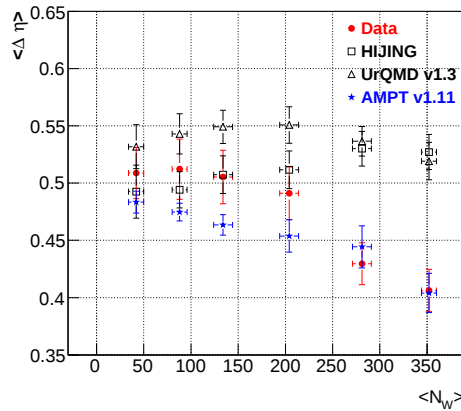


Σχήμα 8.10: Τα εύρη των κατανομών της συνάρτησης ισοζυγίου ως συνάρτηση του μέσου χρόνου αδρονοποίησης των γεγονότων, όπως αυτός υπολογίζεται από τη σχέση 8.1.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι υπάρχει μια έντονη εξάρτηση από το χρόνο αδρο-

νοποίησης αλλά και από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης, εξάρτηση που είχε ήδη παρατηρηθεί και από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων. Η σχετική δε πτώση, που ορίζεται από την πτώση του εύρους μεταξύ των πιο περιφερειακών και των πιο κεντρικών αλληλεπιδράσεων, νορμαλισμένη στην τιμή του εύρους των πιο περιφερειακών, είναι της τάξης του $(16.4 \pm 3)\%$. Θυμίζουμε σε αυτό το σημείο ότι η αντίστοιχη τιμή της σχετικής πτώσης για τα πειραματικά δεδομένα είναι $(17 \pm 3)\%$.

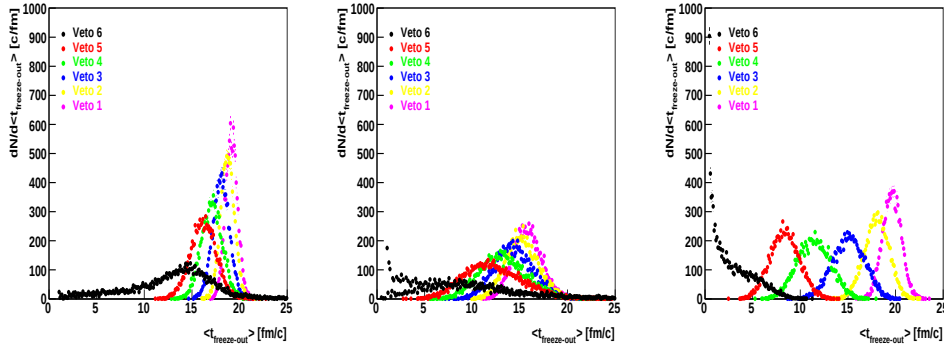
Αν τώρα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραματικών δεδομένων, καθώς και των υπολοίπων μοντέλων που μελετήθηκαν, παίρνουμε το γράφημα 8.11, στο οποίο το εύρος των κατανομών της **Balance Function** παρίσταται ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση. Τα σημεία που φαίνονται αφορούν τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινοι σημεία), το μοντέλο AMPT (μπλε σημεία) καθώς και τα άλλα δυο μικροσκοπικά μοντέλα που μελετήθηκαν (HIJING - UrQMD).



Σχήμα 8.11: Τα εύρη των κατανομών της συνάρτησης ισοζυγίου ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση για τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινα σημεία), το μοντέλο AMPT (μπλε σημεία) καθώς και τα άλλα δυο μικροσκοπικά μοντέλα που μελετήθηκαν (HIJING - UrQMD).

8.3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Ως επόμενο βήμα, μελετήθηκε η **Balance Function** για ταυτοποιημένα ζεύγη πιονίων και καονίων χρησιμοποιώντας τα γεγονότα του πίνακα 8.1. Οι κατανομές της παραμέτρου 8.1 για πιόνια, καόνια και πρωτόνια, φαίνονται στο σχήμα 8.12. Το σχήμα 8.13, δείνει τις κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου ως προς τη σχετική διαφορά στην ωχύτητα για ζεύγη πιονίων. Στο γράφημα αυτό φαίνονται οι κατανομές για όλες τις κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων

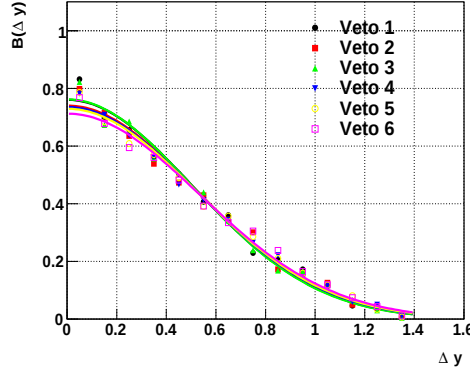


Σχήμα 8.12: Οι κατανομές του μέσου χρόνου αδρονοποίησης των πιονίων (αριστερά), των καονίων (μέση) αλλά και των πρωτονίων (δεξιά) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb+Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο AMPT.

$Pb+Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$. Γίνεται φανερό, ότι δεν παρατηρείται κάποια εξάρτηση από την κεντρικότητα μιας και οι νορμαλισμένες (στο εμβαδό της κατανομής των πιο κεντρικών αλληλεπιδράσεων) γραφικές παραστάσεις δείχνουν να έχουν το ίδιο εύρος.

Το πιο πάνω συμπέρασμα πιστοποιείται και από το αριστερό γράφημα του σχήματος 8.14, στο οποίο φαίνονται τα εύρη των κατανομών όπως αυτά υπολογίστηκαν από τη σχέση 3.13, ως συνάρτηση του μέσου χρόνου αδρονοποίησης των γεγονότων. Μια απλή σύγκριση δε μεταξύ των τιμών αυτών με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν τόσο από τα πειραματικά μας δεδομένα, όσο και από το μοντέλο UrQMD (δεξί γράφημα του σχήματος 8.14), μας δείχνει ότι το μοντέλο AMPT ακολουθεί σε συμπεριφορά το UrQMD στην περίπτωση των ζευγών πιονίων. Και τα δυο μοντέλα δε, δεν μπορούν να περιγράψουν την έντονη εξάρτηση από την κεντρικότητα που παρατηρήθηκε από την ανάλυση των συσχετισμών ζευγών πιονίων από τα πειραματικά δεδομένα.

Τέλος, στα πλαίσια της μελέτης ταυτοποιημένων σωματιδίων, εξετάστηκαν και οι συσχετισμοί ζευγών καονίων, των οποίων οι κατανομές της Balance Function φαίνονται στο σχήμα 8.15. Για μια ακόμη φορά φαίνεται ότι δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη εξάρτηση από την κεντρικότητα, κάτι που επιβεβαιώνεται από το αριστερό γράφημα του σχήματος 8.16. Στο γράφημα αυτό, παρατηρού-



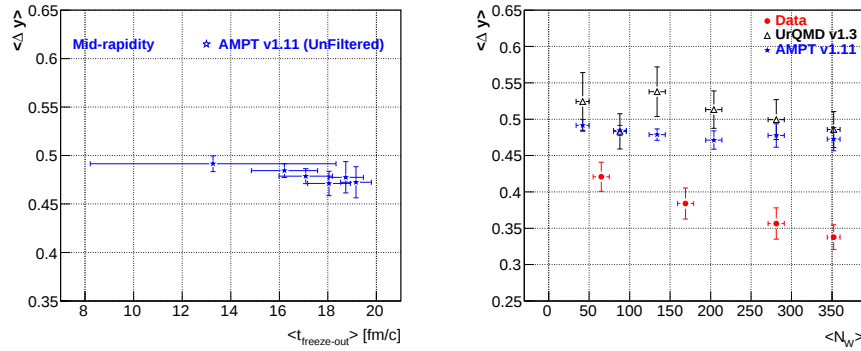
Σχήμα 8.13: Οι κατανομές της Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς Δy των ταυτοποιημένων πιονίων για όλες τις κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$, όπως προκύπτουν από την ανάλυση γεγονότων που παράχθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου AMPT.

με την εξάρτηση του εύρους της κατανομής της συνάρτησης ισοζυγίου από το μέσο χρόνο αδρονοποίησης των καονίων σε κάθε γεγονός. Στα πλαίσια των στατιστικών σφαλμάτων δεν παρατηρείται πτώση του εύρους.

Το δεξί γράφημα του σχήματος 8.16 δίνει τη σύγκριση μεταξύ των μοντέλων AMPT και UrQMD με τα αποτελέσματα των πειραματικών δεδομένων για ζεύγη καονίων. Τα εύρη για τα δυο μοντέλα δεν παρουσιάζουν κάποια εξάρτηση από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση, κάτι μάλιστα που είχε φανεί και για τα πραγματικά γεγονότα. Από την άλλη μεριά όμως, πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές του εύρους που παίρνουμε από τα μοντέλα αυτά είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν για τα πειραματικά δεδομένα.

8.4 THERMal heavy-IoN generATOR - THERMINATOR

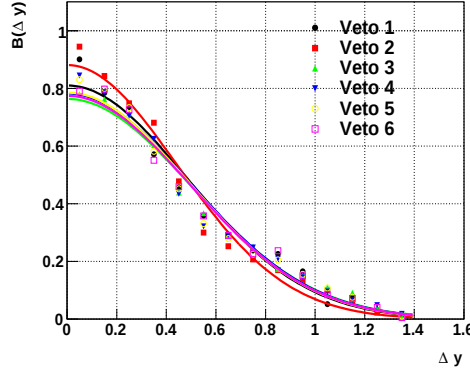
Για την περιγραφή των φαινομένων που παρατηρούνται σε χαμηλές τιμές της εγκάρσιας ορμής (soft physics), έχουν αναπτυχθεί όχι μόνο στατιστικά μοντέλα τα οποία περιγράφουν με αρκετή επιτυχία τους λόγους των παραγομένων σωματιδίων αλλά και θερμικά μοντέλα που προσπαθούν να περιγράψουν τα φάσματα (κυρίως P_T spectra). Οι ενέργειες στις οποίες η εφαρμογή των πιο πάνω έχει ελεγχθεί καλύπτει το ενεργειακό φάσμα του SPS αλλά και αυτό του RHIC. Στη δεύτερη κατηγορία, αυτή των θερμικών μοντέλων, ανήκει και το THERMINATOR (THERMal heavy-IoN generATOR) [9]. Το μοντέλο αυτό βασίζεται



Σχήμα 8.14: Η εξάρτηση του εύρους των κατανομών της Balance Function για ζεύγη πιονίων από το μέσο χρόνο αδρονοποίησης των γεγονότων (αριστερό γράφημα). Η σύγκριση των τιμών των ευρών μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των μοντέλων AMPT και UrQMD ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση (δεξί γράφημα).

στην ιδέα ότι τόσο το θερμικό, όσο και το χημικό freeze-out πραγματοποιείται την ίδια χρονική στιγμή. Πιο συγκεκριμένα το THERMINATOR βασίζεται στις πιο κάτω υποθέσεις:

- Στο ίδιο σημείο του χώρου και του χρόνου κατά την εξέλιξη του μέσου που δημιουργείται μετά από μια αλληλεπίδραση πυρήνων, πραγματοποιείται η θερμική και χημική ισορροπία. Οι σωματιδιακές πυκνότητες ακολουθούν τις κατανομές Fermi-Dirac ή Bose-Einstein.
- Το freeze-out πραγματοποιείται σε συγκεκριμένες τιμές των θερμοδυναμικών παραμέτρων. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι η θερμοκρασία αλλά και τα τρία χημικά δυναμικά: των βαρυονίων, των παράδοξων σωματιδίων αλλά και του ισοσπίν.
- Το freeze-out πραγματοποιείται σε μια αναλλοίωτη σε μετασχηματισμούς κυλινδρική επιφάνεια. Το πεδίο ταχυτήτων είναι τέτοιο ώστε να παρέχει και να περιγράφει τόσο τη διαμήκη όσο και την εγκάρσια εξάπλωση του συστήματος.



Σχήμα 8.15: Οι κατανομές της Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς Δy των ταυτοποιημένων καονίων για όλες τις κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$, όπως προκύπτουν από την ανάλυση γεγονότων που παράχθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου AMPT.

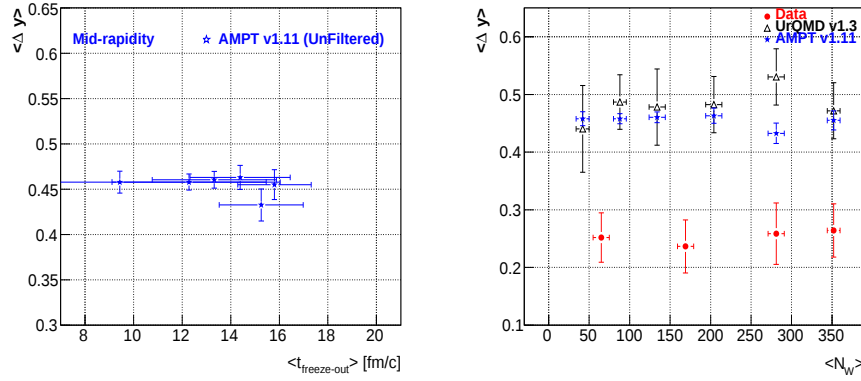
- Ως τελευταίο στάδιο, έχουμε τη διάσπαση των συντονισμών, τα προϊόντα των οποίων μπορούν να δημιουργήσουν καταιγισμούς σωματιδίων.

8.4.1 Συνεισφορά της εγκάρσιας ροής στην **Balance Function**

Το πρότυπο αυτό χρησιμοποιήθηκε για να αποκτήσουμε μια πρώτη ένδειξη για το ποσοστό της επίδρασης του παράγοντα της συλλογικής εγκάρσιας συμπεριφοράς του δημιουργούμενου συστήματος. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε ενέργειες του *RHIC* μιας και οι παράμετροι του προτύπου αυτού είναι συντονισμένες για αυτό το ενεργειακό φάσμα. Σε πρόσφατες δημοσιεύσεις [11] προτάθηκε ότι η αύξηση της εγκάρσιας ταχύτητας της επέκτασης του συστήματος με την κεντρικότητα, κάτι που αποδεικνύεται από την αύξηση της μέσης τιμής της εγκάρσιας ορμής των παραγόμενων σωματιδίων με την κεντρικότητα, οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση του αριθμού των συσχετισμένων φορτίων. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση του εύρους των κατανομών της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου με την κεντρικότητα.

Με τη βοήθεια του μοντέλου αυτού, πραγματοποιήθηκε η παραγωγή ικανής στατιστικής (τουλάχιστον 50K γεγονότα) για διαφορετικές τιμές της εγκάρσιας ταχύτητας επέκτασης του συστήματος, ξεκινώντας από μηδενική τιμή και καταλήγοντας με σταθερό βήμα σε μια τιμή $\beta_T = 0.7c$. Οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου παρέμειναν στεθερές έχοντας τις ακόλουθες τιμές:

- $T_{freeze-out} = 165 MeV$
- $\mu_I = -0.9 MeV$



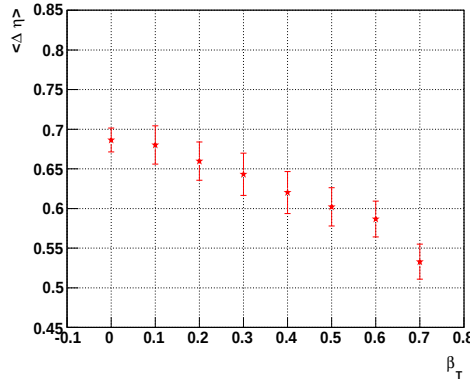
Σχήμα 8.16: Η εξάρτηση του εύρους των κατανομών της Balance Function για ζεύγη καονίων από το μέσο χρόνο αδρονοποίησης των γεγονότων (αριστερό γράφημα).

Η σύγκριση των τιμών των ευρών μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των μοντέλων AMPT και UrQMD ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση (δεξί γράφημα).

- $\mu_s = 6.9 \text{ MeV}$
- $\mu_b = 28.5 \text{ MeV}$

Γίνεται φανερό ότι οι τιμές των παραμέτρων, ειδικά η τιμή του βαρυοχημικού δυναμικού, πλησιάζει τις τιμές των αντίστοιχων μεγεθών που έχουν υπολογιστεί για τις ενέργειες του RHIC [15]. Δεν έγινε κάποια αλλαγή σε αυτές τις παραμέτρους, ούτε κάποια δοκιμή με αντίστοιχες τιμές του SPS αφού το μοντέλο είναι ρυθμισμένο (τουλάχιστον όσο γραφόταν αυτή η διατριβή) για ενέργειες μεγαλύτερες του SPS. Υπολογίστηκε έτσι η συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου για μη ταυτοποιημένα σώματα για όλα τα δείγματα και από εκεί υπολογίστηκαν και τα αντίστοιχα εύρη των κατανομών. Το σχήμα 8.17 δείχνει το τελικό αποτέλεσμα αυτής της μελέτης: η εξάρτηση του εύρους της κατανομής της Balance Function από την τιμή της εγχάρσιας ταχύτητας επέκτασης του συστήματος. Βλέπουμε ότι υπάρχει μια έντονη εξάρτηση του $\langle \Delta\eta \rangle$ από την τιμή της β_T . Ειδικά στην περίπτωση που φτάνουμε σε πολύ υψηλές τιμές, ακόμα και για ενέργειες του RHIC, το εύρος μειώνεται αισθητά, ξεκινώντας

από μια τιμή $\langle \Delta\eta \rangle \approx 0.69$ και καταλήγοντας σε $\langle \Delta\eta \rangle \approx 0.54$ (για σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές του *STAR* παραπέμπουμε στο σχήμα 6.6 του κεφαλαίου 6).



Σχήμα 8.17: Η εξάρτηση του εύρους της Balance Function ως συνάρτηση της εγκάρσιας ταχύτητας της ροής του συστήματος όπως προκύπτει από τη μελέτη του προτύπου THERMINATOR.

Τα αποτελέσματα αυτά, αν και μπορούν να θεωρηθούν σημαντικά, είναι απλά ενδεικτικά για το ποια μπορεί να είναι η επίδραση της συλλογικής συμπεριφοράς του συστήματος στην Balance Function. Δεν αποτελούν όμως τίποτε άλλο παρά μια πρώτη προσπάθεια υπολογισμού της τάξης μεγέθους της επίδρασης. Είναι φανερό ότι για να εξαχθούν τελικά συμπεράσματα, πρέπει να αναπτυχθεί περισσότερο ο κώδικας από τους συγγραφείς του και να επεκταθεί τόσο σε μεγαλύτερες ενέργειες υπό το πρίσμα της αναμενόμενης λειτουργίας του *LHC*, όσο (κυρίως) σε μικρότερες ενέργειες του *SPS*.

8.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο αυτό, μελετήθηκαν αρκετά πρότυπα που περιγράφουν τις αλληλεπιδράσεις βαρέων ιόντων και καλύπτουν διάφορους μηχανισμούς παραγωγής σωματιδίων. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης και στην προσπάθεια να ελεγχθούν τα πειραματικά ευρήματα εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το εύρος της συνάρτησης ισοζυγίου μειώνεται καθώς αυξάνεται τόσο το σύστημα που αλληλεπιδρά όσο και η κεντρικότητα των συγκρούσεων. Στη μέγιστη δε ενέργεια του *SP* ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$) η σχετική μείωση

του εύρους στις κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ υπολογισμένη συγκριτικά με τις πιο περιφερειακές, υπολογίστηκε ότι είναι της τάξης του $17 \pm 3\%$. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται τόσο σε χαμηλότερες ενέργειες ($\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$), όσο και σε υψηλότερες ($\sqrt{s_{NN}} = 130 GeV$). Η μείωση του εύρους για τα πειραματικά δεδομένα, δεν μπορεί να περιγραφεί ούτε από τα μικροσκοπικά αδρονικά μοντέλα που μελετήθηκαν (HIJING - UrQMD) ούτε όμως και από τα γεγονότα ανάμιξης (shuffling). Η μελέτη όμως του μοντέλου AMPT το οποίο περιγράφει το στάδιο των αλληλεπιδράσεων των παρτονίων πριν την αδρονοποίησή τους, αποδίδει πολύ καλά τα πειραματικά αποτελέσματα. Με τη βοήθεια του μοντέλου αυτού, επιτεύχθηκε μια αρχική συσχέτιση του εύρους της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου με το χρόνο αδρονοποίησης του συστήματος.

- Η μείωση αυτή του εύρους με την κεντρικότητα αποτυπώνεται μόνο στη μεσαία περιοχή της ψευδοωκύτητας. Η μελέτη της εμπρόσθιας περιοχής σε δυο ενέργειες, αποκάλυψε ότι αυτό το φαινόμενο εξαφανίζεται. Τα μικροσκοπικά μοντέλα HIJING - UrQMD που μελετήθηκαν επιβεβαιώνουν το γεγονός αυτό.
- Η ενεργειακή μελέτη της **Balance Function**, υπολογισμένη με βάση την κανονικοποιημένη παράμετρο W , έδωσε μια πρώτη ένδειξη εξάρτησης από την παράμετρο $\sqrt{s_{NN}}$ της αλληλεπίδρασης. Η εξάρτηση αυτή, δεν μπορεί να αποδοθεί για μια ακόμη φορά από τα εξεταζόμενα πρότυπα (HSD - UrQMD).
- Τα διάφορα μοντέλα που μελετήθηκαν δεν μπορούν να αποδώσουν την εξάρτηση του εύρους από την κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης για ζεύγη πιονίων.
- Οι συσχετισμοί φορτίου των ζευγών καονίων δεν παρουσιάζουν κάποια εξάρτηση από την κεντρικότητα, τόσο στα πειραματικά δεδομένα όσο και στα πρότυπα.

Γίνεται λοιπόν φανερό, ότι ενώ υπάρχει μια αρχική ένδειξη λειτουργίας της μεθόδου (συσχέτιση εύρους με χρόνο αδρονοποίησης - εξάρτηση από την κεντρικότητα και την ενέργεια της αλληλεπίδρασης), η μη ύπαρξη προτύπων που να περιγράφουν με επιτυχία τα πειραματικά δεδομένα καθιστά την εξαγωγή οριστικών συμπερασμάτων μη ασφαλή. Θεωρούμε δε ότι, ειδικά στο επίπεδο των μελετών **Event by Event**, η θεωρία πρέπει να αναπτυχθεί περισσότερο.

Είναι γενικά αποδεκτό, ότι υπάρχει ένδοια μοντέλων που θα μπορούσαν να περιγράψουν όχι μόνο τα πειραματικά αποτελέσματα που περιγράφησαν σε αυτή τη διατριβή αλλά και άλλα αποτελέσματα τουλάχιστον αυτού του απαιτητικού κλάδου.

Κεφάλαιο 9

ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ *ALICE*

Το πρόγραμμα του *LHC* έχει σχεδιαστεί κατά αντίστοιχο τρόπο σε σχέση με τα προηγούμενα προγράμματα των επιταχυντών *SPS* και *RHIC*. Θα βασίζεται σε δυο κομμάτια: συγκρούσεις μεταξύ των μεγαλύτερων δυνατών πυρήνων στη μεγαλύτερη δυνατή ενέργεια, καθώς και συστηματική μελέτη διαφορετικών συστημάτων (*pp*, *pA*, *AA*) σε διάφορες ενέργειες.

Τα πρώτα δεδομένα που θα καταγραφούν από τους ανιχνευτές του *ALICE* θα προέρχονται από αλληλεπιδράσεις *pp* μιας και το *LHC* θα ξεκινήσει τη λειτουργία του παρέχοντας συγκρουόμενες δέσμες πρωτονίων. Οι αλληλεπιδράσεις *Pb + Pb* που θα παράγουν και τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα προβλέπονται αμέσως μετά τη λήξη της 'πιλοτικήσ' αυτής αρχικής περιόδου. Το αρχικό πρόγραμμα του *ALICE* δίδεται στις πιο κάτω γραμμές:

- Αλληλεπιδράσεις $p + p$ σε $\sqrt{s} = 14TeV$.
- Αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε $\sqrt{s_{NN}} = 5.5TeV$.
- Αλληλεπιδράσεις $p + Pb$ σε $\sqrt{s_{NN}} = 5.5TeV$.
- Αλληλεπιδράσεις $p + p$ σε $\sqrt{s} = 5.5TeV$.
- Αλληλεπιδράσεις $Ar + Ar$ σε $\sqrt{s_{NN}} = 5.5TeV$.

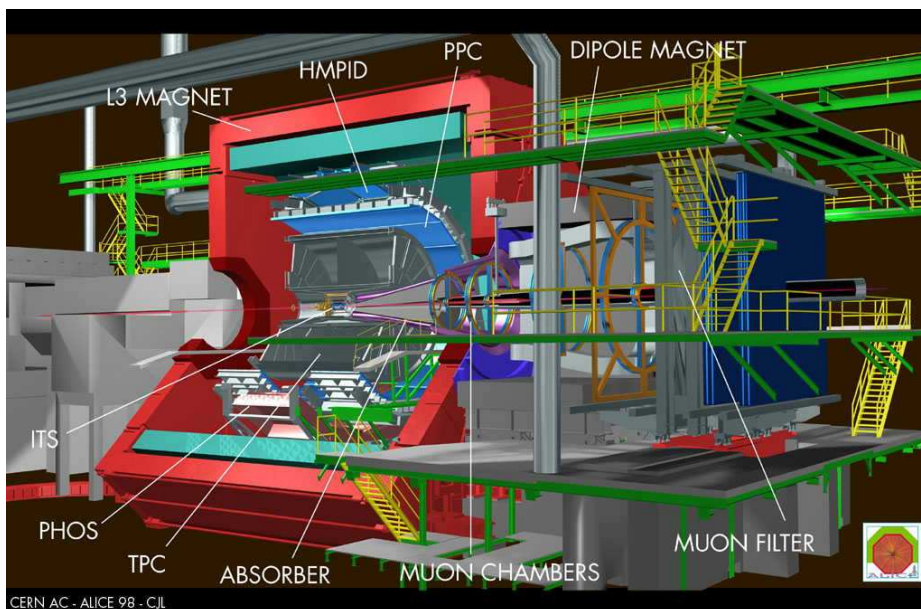
Η ανώτατη επιτρεπόμενη από τους ανιχνευτές τιμή της *luminosity* είναι $\approx 5 \times 10^{30} cm^{-2} s^{-1}$ για την περίπτωση των αλληλεπιδράσεων $p+p$ και $\approx 10^{27} cm^{-2} s^{-1}$ για την περίπτωση των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ [1].

Το πείραμα *ALICE* έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανιχνεύει και να αναγνωρίζει αδρόνια, λεπτόνια και φωτόνια γύρω από την κεντρική

περιοχή της ωκύτητας. Η σχεδιάσή του είναι διαφορετική αν συγκριθεί με τα υπόλοιπα πειράματα του *LHC*. Αυτή η διαφορετικότητα προκύπτει από την απαίτηση να μπορούν να ανιχνεύονται και να αναγνωρίζονται σωματίδια από σχετικά μικρή ($\approx 100\text{MeV}/c$) μέχρι αρκετά μεγάλη ($\approx 100\text{GeV}/c$) τιμή της εγκάρσιας ορμής, να μπορούν να ανακατασκευάζονται συντονισμοί που ζουν λίγο όπως τα υπερόνια, τα *D* και *B* μεσόνια αλλά και να μπορούν οι ανιχνευτές του να ανταπεξέρχονται σε ένα περιβάλλον με μεγάλη πολλαπλότητα φορτισμένων σωματιδίων αφού αναμένεται η παραγωγή 2000-8000 τέτοιων σωματιδίων ανά μονάδα ωκύτητας στην κεντρική της περιοχή. Η ανίχνευση και ταυτοποίηση των μιονίων πραγματοποιείται με ένα ειδικό σπεκτρόμετρο που καλύπτει τις μεγάλες περιοχές της ωκύτητας ($-4.0 < \eta < -2.4$). Αδρόνια, ηλεκτρόνια και φωτόνια ανιχνεύονται στην κεντρική περιοχή της ωκύτητας ($-0.9 < \eta < 0.9$) από ένα σύνολο ανιχνευτών για τους οποίους θα μιλήσουμε στις επόμενες ενότητες, μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο της τάξης των $B = 0.5T$. Η ανίχνευση βασίζεται κυρίως: στο εσωτερικό ανιχνευτικό σύστημα (Inner Tracking System - ITS) που αποτελείται από έξι επίπεδα ανιχνευτών πυριτίου, έναν ανιχνευτή προβολής χρόνου (Time Projection Chamber - TPC) και έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας μετάβασης (Transition Radiation Detector - TRD).

Η ταυτοποίηση των σωματιδίων στην κεντρική περιοχή πραγματοποιείται με τη βοήθεια των ITS και TPC με την μέτρηση της απώλειας ενέργειας, του TRD με τη μέτρηση ακτινοβολίας μετάβασης, με τον Time Of Flight - TOF ανιχνευτή καθώς και με τον High-Momentum Particle Identification Detector (HMPID) μετρώντας ακτινοβολία Cerenkov. Τα φωτόνια δε ανιχνεύονται με τη βοήθεια των ανιχνευτών PHOton Spectrometer (PHOS). Επιπλέον ανιχνευτές που είναι τοποθετημένοι σε μεγάλες τιμές της ωκύτητας, χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό των γεγονότων αλλά και για σκανδαλισμό. Οι ανιχνευτές αυτοί, καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή της ωκύτητας ($-3.4 < \eta < 5.1$) για την ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων (Forward Multiplicity Detector - FMD) αλλά και για το σκανδαλισμό (V0 - T0). Επίσης υπάρχει ο ανιχνευτής Photon Multiplicity Detector (PMD), που καλύπτει μια στενή περιοχή της ωκύτητας ($2.3 < \eta < 3.5$) για την μελέτη της πολλαπλότητας των φωτονίων αλλά και ο Zero Degree Calorimeter (ZDC) που καλύπτει την περιοχή της ωκύτητας της δέσμης για τη μέτρηση των νουκλεονίων που δεν μετέχουν στις αλληλεπιδράσεις και κατ' επέκταση τον καθορισμό της κεντρικότητάς τους. Μια εικόνα όλων των ανιχνευτικών διατάξεων του πειράματος δίδεται στο γράφημα 9.1.

Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε αναλυτικά στους κύριους ανιχνευτές του πειράματος αλλά και στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η ταυτοποίηση των σωματιδίων.



Σχήμα 9.1: Στο σχήμα φαίνονται όλοι οι ανιχνευτές που απαρτίζουν την πειραματική διάταξη του *ALICE*.

9.1 ΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΡΟΧΙΩΝ - *ITS*

Ο ανιχνευτής *ITS* αποτελείται από έξι κυλινδρικά επίπεδα ανιχνευτών πυριτίου, που είναι τοποθετημένα σε αποστάσεις $r = 4, 7, 15, 24, 39$ και 44cm από το κέντρο του σωλήνα της δέσμης (beam pipe). Καλύπτει την κεντρική περιοχή της ωκύτητας $|\eta| < 0.9$ για όλα τα σημεία της κύριας αλληλεπίδρασης που βρίσκονται σε ικανή απόσταση από την περιοχή της αλληλεπίδρασης ($\pm 1\sigma$). Ο ανιχνευτής έχει σχεδιαστεί για καλή ανίχνευση τροχιών. Η εξωτερική του ακτίνα έχει καθοριστεί με το σκοπευτικό να καλύπτει τις τροχιές που ανιχνεύονται από τον *TPC*, ενώ η εσωτερική ακτίνα είναι η μικρότερη δυνατή επιτρεπόμενη με βάση τις διαστάσεις του σωλήνα της δέσμης (3cm). Το πρώτο επίπεδο έχει μια πιο μεγάλη κάλυψη $|\eta| < 1.98$ ώστε να παρέχει μαζί με τον *FMD* μια συνεχή κάλυψη σε ένα μεγάλο φάσμα της ωκύτητας της πολλαπλότητας των φορτισμένων σωματιδίων. Λόγω της μεγάλης σωματιδιακής πυκνότητας (≈ 80

σωμάτια ανά cm^2), ανιχνευτές *pixel* έχουν επιλεγεί για τα δυο πιο εσωτερικά στρώματα (*SPD*) και ανιχνευτές ολίσθησης πυριτίου (*silicon drift*) για τα δυο αμέσως επόμενα (*SDD*). Για τα δυο εξωτερικά επίπεδα, όπου η πυκνότητα των σωματιδίων είναι κάτω από 1 σωματίο ανά cm^2 έχουν επιλεγεί *silicon strip* ανιχνευτές. Με την εξαίρεση των δυο εσωτερικών στρωμάτων, τα υπόλοιπα θα έχουν αναλογικές εξόδους ώστε να παρέχουν την πληροφορία της απώλειας ενέργειας (dE/dx) στη μη σχετικιστική περιοχή ($1/\beta^2$) [2].

Ο ανιχνευτής αυτός έχει σχεδιαστεί ώστε να φέρει σε πέρας τις ακόλουθες διαδικασίες:

- Εύρεση του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης (*primary vertex*) με μια διακριτική ικανότητα καλύτερη από $100\mu m$.
- Ανακατασκευή των σημείων των δευτερευόντων αλληλεπιδράσεων (*secondary vertex*) από διασπάσης D και B μεσονίων.
- Ανίχνευση και ταυτοποίηση σωματιδίων με ορμή πάνω από $100 MeV/c$.
- Βελτίωση της διακριτικής ικανότητας στη μέτρηση της ορμής και της γωνίας για σωματίδια με μεγάλη τιμή εγκάρσιας ορμής που περνούν από το *TPC*.
- Ανακατασκευή, με περιορισμένη ασφαλώς διακριτική ικανότητα στην ορμή, σωματιδίων που περνούν από νεκρές ζώνες του *TPC*.

Επίπεδο	Είδος	r [cm]	$\pm z$ [cm]	Κανάλια
1	<i>pixel</i>	4.0	14.1	3278400
2	<i>pixel</i>	7.2	14.1	6556800
3	<i>drift</i>	15.0	22.2	43008
4	<i>drift</i>	23.9	29.7	90112
5	<i>strip</i>	38.5	43.2	1148928
6	<i>strip</i>	43.6	48.9	1459200

Πίνακας 9.1: Οι διαστάσεις των διαφόρων επιπέδων του *ITS*.

Ο ανιχνευτής αυτός συνεισφέρει στη βελτίωση της διακριτικής ικανότητας στην ορμή και τη γωνία των σωματιδίων που υπολογίζεται από τον *TPC*. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει επίπτωση σε πολλές αναλύσεις όπως: στη μελέτη

Παράμετρος	<i>SiliconPixel</i>	<i>SiliconDrift</i>	<i>SiliconStrip</i>
Χωρική ακρίβεια ($r\phi$) [μm]	12	38	20
Χωρική ακρίβεια z [μm]	100	28	830
Two track resolution($r\phi$) [μm]	100	200	300
Two track resolution z [μm]	850	600	2400

Πίνακας 9.2: Παράμετροι των διαφόρων επιπέδων του *ITS*.

γενικών χαρακτηριστικών των γεγονότων όπως αυτά προκύπτουν από μελέτη φασμάτων, στη μελέτη παραγωγής συντονισμών (ρ , ω και φ) όπου η τιμή της μάζας και του εύρους εξαρτώνται από τη διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της ορμής, στη μελέτη της μείωσης της παραγωγής βαρέων συντονισμών (heavy quarkonia) όπως J/Ψ και Y αλλά και στη μελέτη παραγωγής πιδάκων και των αλληλεπιδράσεων αυτών με το μέσο.

Για τις μελέτες αυτές, οι δυνατότητες ταυτοποίησης σωματιδίων του *ITS* είναι εξίσου σημαντικές, καθώς σωματία με μικρή τιμή ορμής ($\approx 100 MeV/c$) αναγνωρίζονται μόνο από αυτόν. Επίσης, η απαίτηση για καλή διακριτική ικανότητα μέτρησης της γωνίας των σωματιδίων καθορίζεται από την ανάγκη να μετρηθεί με ακρίβεια το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης καθώς και το πρώτο σημείο αλληλεπίδρασης κάθε τροχιάς με το υλικό. Η ακρίβεια αυτή εξαρτάται από το πάχος και τη θέση του πρώτου επιπέδου των ανιχνευτών, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί ώστε να δίνουν ακριβείς μετρήσεις της παραμέτρου κρούσης των τροχιών επιτρέποντας έτσι την ταυτοποίηση σημείων διάσπασης charm και beauty μεσονίων αλλά και υπερονίων. Ορισμένες από τις πιο σημαντικές παραμέτρους των κάθε επιπέδων δίνονται στους πίνακες 9.1 και 9.2.

9.2 Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΠΡΟΒΟΛΗΣ ΧΡΟΝΟΥ - *TPC*

Ο ανιχνευτής προβολής χρόνου είναι ο κύριος ανιχνευτής τροχιών του πειράματος και μαζί με τους υπόλοιπους ανιχνευτές της κεντρικής περιοχής (*ITS*, *TRD*, *TOF*, *HMPID*), παρέχει ακριβείς μετρήσεις της ορμής των φορτισμένων σωματιδίων, ικαονποιητικό διαχωρισμό δυο τροχιών, ταυτοποίηση σωματιδίων και καθορισμό του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης. Ο φασικός χώρος που καλύπτει στην ψευδοωκύτητα περιορίζεται στο $|\eta| < 0.9$ ενώ αυξάνεται στο $|\eta| < 1.5$ για τροχιές που έχουν περιορισμένο μήκος και διακριτική ικανότητα

στην ορμή. Ως προς την εγκάρσια ορμή, η κάλυψη φτάνει μέχρι τα $100\text{GeV}/c$ με ικανοποιητική διακριτική ικανότητα. Επίσης, δεδομένα που προέρχονται από τους κεντρικούς αυτούς ανιχνευτές, θα χρησιμοποιηθούν για το γρήγορο σκανδαλισμό υψηλού επιπέδου (online High-Level Trigger - HLT) για την επιλογή σημάτων με χαμηλή ενεργό διατομή [3].

Ο ανιχνευτής έχει σχεδιαστεί ώστε να ανταπεξέλθει στη μεγάλη πυκνότητα τροχιών που αναμένεται στις πλέον κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ στις ενέργειες του LHC (μέχρι $dN_{ch.}/d\eta = 8000$). Αυτός ο μεγάλος αριθμός παραγόμενων σωματιδίων οδήγησε σε αναγκαστικές τροποποιήσεις στο σχεδιασμό και στα ηλεκτρονικά του TPC , οι οποίες οδήγησαν σε μέγιστες τιμές της κατάληψης, που ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των pad rows και των διαμερίσεων του χρόνου (time bins) πάνω από το κατώφλι προς τον ολικό τους αριθμό, της τάξης του 40% κοντά στην εσωτερική επιφάνεια του TPC και κοντά στο 15% στην αντίστοιχη εξωτερική [3].

Ο ανιχνευτής αυτός, όπως είπαμε και πιο πάνω, είναι ο κύριος ανιχνευτής για τη μελέτη αδρονίων τόσο στις αλληλεπιδράσεις βαρέων ιόντων, όσο και σε αυτές μεταξύ πρωτονίων. Οι αδρονικές μετρήσεις δίνουν πληροφορία για το είδος των σωματιδίων που εκπέμπονται από την ‘πηγή’ μέσω της μελέτης φασμάτων σωματιδίων με ένα ή και περισσότερα παράξενα κουάρκ, για την εξέλιξη στο χώρο και στο χρόνο της ‘πηγής’ κατά την αδρονοποίηση μέσω των μελετών γύρω από συσχετισμένα σωματίδια, καθώς και για τις διακυμάνσεις σε επίπεδο γεγονότος. Οι μελέτες συσχετισμών επιβάλλουν δε τη μεγαλύτερη απαίτηση στην ακρίβεια των μετρήσεων τόσο της ορμής, όσο και στη διακριτική ικανότητα διαχωρισμού δυο τροχιών. Από την άλλη μεριά, η μελέτη των διακυμάνσεων ανά γεγονός, απαιτεί την κάλυψη ικανού φασικού χώρου ($\eta - P_T$) ώστε να καταγραφούν και να διαχωριστούν οι διακυμάνσεις αυτές που σχετίζονται άμεσα με την ‘πηγή’. Γίνεται δε κατανοητό, ότι για μελέτες φασμάτων η ύπαρξη ικανοποιητικής ταυτοποίησης σωματιδίων είναι εξίσου αναγκαία. Ακόμα, για τη μελέτη της ροής και την ανακατασκευή και εύρεση του επιπέδου του γεγονότος χρειάζεται καλή και πλήρης αξιμουθιακή κάλυψη. Τέλος, για τη μελέτη σωματιδίων που έχουν charm και beauty κουάρκ αλλά και της οικογένειας των quarkonia, όπου η ενεργός διατομή δεν είναι τόσο μεγάλη, χρειάζεται κάλυψη μεγάλης περιοχής του φασικού χώρου αλλά και καλή διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της ορμής σε μεγάλες τιμές της (κάτι που επιτυγχάνεται με τη βοήθεια και των υπόλοιπων ανιχνευτών).

Έτσι πιο συγκεκριμένα:

- Για τη μελέτη αδρονίων με χαμηλή τιμή ορμής, απαιτείται διακριτική ικα-

νότητα στη μέτρηση της ορμής που αγγίζει το 1% για σωματίδια με ορμή $\approx 100\text{MeV}/c$ μέχρι $\approx 1\text{GeV}/c$. Από την άλλη μεριά, για εύρεση πιδάκων αλλά και γενικότερα για μελέτη των ανελαστικών σχεδιάσεων η πληροφορία από τον *TPC* θα συνδυαστεί με αυτή τόσο από το *ITS*, όσο και από το *TRD*, ώστε να φτάσουμε σε μια διακριτική ικανότητα της τάξης του 10% για τροχιές με τιμές της εγκάρσιας ορμής $P_T \approx 100\text{GeV}/c$.

- Για τη μελέτη των συσχετισμών σωματιδίων (**HBT**), απαιτείται η πολύ καλή ανίχνευση τροχιών με μικρές διαφορές στις τιμές των ορμών τους. Η απαιτούμενη λοιπόν διακριτική ικανότητα στη μέτρηση διαφορών στην ορμή εξαρτάται από το μέγεθος της πηγής και πρέπει να είναι $5\text{MeV}/c$ ή και καλύτερη για μια πηγή με μέγεθος 20fm .
- Η ταυτοποίηση των σωματιδίων μέσω της μέτρησης της απώλειας ενέργειας στην περιοχή των χαμηλών τιμών της ορμής ($1/\beta^2$) επιτυγχάνεται σε ορισμένες περιοχές της ορμής όπου η διαφορά στον ιονισμό είναι αισθητή μεταξύ των διαφορετικών σωματιδίων. Για να καλυφθεί όμως μεγάλο μέρος του φάσματος της ορμής, χρησιμοποιούμε την πληροφορία από άλλους ανιχνευτές (**TOF**, **HMPID**).
- Για τον υπολογισμό της παραμέτρου κρούσης στο σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης αλλά και την ανακατασκευή των σημείων δευτερευόντων αλληλεπιδράσεων, χρειάζεται να συνδυάζονται οι πληροφορίες για τις θέσεις των τροχιών από τον *TPC* με αυτές από τον *ITS*. Ο συνδυασμός δε της πληροφορίας αυτής με τους υπόλοιπους ανιχνευτές, θα βελτιώσει σημαντικά τη διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της ορμής σε σχέση με την ανακατασκευή τροχιών αν χρησιμοποιούσαμε μόνο τον *TPC*.
- Για τον χαρακτηρισμό και τη μελέτη των ιδιοτήτων κάθε γεγονότος (μέτρηση ροής και επιπέδου του γεγονότος), είναι αναγκαία η ύπαρξη πλήρους κάλυψης στην αζιμουθιακή γωνία ϕ .

Με την προσθήκη του ανιχνευτή *TRD* [4] στην ομάδα των ανιχνευτών της κεντρικής περιοχής, οι προοπτικές μελέτης και άλλων παραμέτρων πέρα από τις αδρονικές επεκτάθηκε, με συνέπεια να τροποποιηθούν αντίστοιχα και οι αποδόσεις αλλά και η σχεδίαση του *TPC* ώστε να ανταπεξέλθει επίσης και σε μελέτες που σχετίζονται με ηλεκτρόνια. Πιο συγκεκριμένα, ο *TPC* σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει τη μεγαλύτερη δυνατή κάλυψη για τροχιές με μεγάλη τιμή της εγκάρσιας ορμής για να εξασφαλίσουμε στατιστική αλλά και καλή διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της ορμής για ζεύγη ηλεκτρονίων με μεγάλα P_T . Τα

ηλεκτρόνια αυτά που ανιχνεύονται στην κεντρική περιοχή και των οποίων η παράμετρος χρούσης καθορίζεται από τον *ITS* θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της παραγωγής σωματιδίων που περιέχουν *charm* ή *beauty* κουarks. Επίσης, η ακριβής μέτρηση της παραμέτρου χρούσης θα βοηθήσει στο διαχωρισμό μεταξύ απευθείας παραγομένων J/Ψ σωματιδίων και αυτών που προέρχονται από διασπάσεις σωματιδίων *B*.

Έτσι πιο συγκεκριμένα:

- Η απόδοση στην εύρεση των τροχιών με $P_T > 1\text{GeV}/c$ που εισέρχονται στον *TRD* πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη.
- Η διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της ορμής για ηλεκτρόνια με $P_T \approx 1\text{GeV}/c$ πρέπει να είναι καλύτερη από 1.5%, ώστε η διακριτική ικανότητα στη μάζα του ζεύγους των ηλεκτρονίων να είναι κάτω από 1% για να υπάρχει η δυνατότητα διαχωρισμού μεταξύ των διαφόρων σωματιδίων της οικογένειας Υ .
- Για την επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού απόρριψης πιονίων για ορμές μεγαλύτερες του $1\text{GeV}/c$, η ταυτοποίηση των ηλεκτρονίων από τον *TRD* πρέπει να συνδυαστεί από τη μέτρηση του dE/dx από τον *TPC* ειδικά στην περιοχή των χαμηλών τιμών της ορμής ($< 3\text{GeV}/c$). Για να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση, ο *TPC* πρέπει να παρέχει μια διακριτική ικανότητα στη μέτρηση του dE/dx καλύτερη από 10% στο υψηλής σωματιδιακής πυκνότητας περιβάλλον που αναμένεται στις κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$.
- Για την ανίχνευση υποψηφίων ηλεκτρονίων που αναγνωρίζονται από τον *TRD*, ο *TPC* πρέπει να ανταπεξέρχεται σε ένα ρυθμό συγκρούσεων που αγγίζει τα 200Hz .
- Για τη μελέτη συντονισμών με χαμηλή ενεργό διατομή, όπως J/Ψ και Υ , χρειαζόμαστε ένα σύστημα σκανδαλισμού που θα βοηθήσει στο να έχουμε ικανοποιητική στατιστική. Αυτό επιτυγχάνεται από το σύστημα σκανδαλισμού υψηλού επιπέδου (*HLT - High Level Trigger*) που έχει σχεδιαστεί ώστε να βρίσκει ηλεκτρόνια με μεγάλη τιμή της εγκάρσιας ορμής στον *TRD* και να τα ταιριάζει με τον *TPC*.

Ως προς τη διάταξη τώρα του ανιχνευτή έχουμε να κάνουμε με ένα κυλινδρικό σχήμα με εσωτερική ακτίνα 85cm και εξωτερική 250cm και ένα συνολικό

μήκος της τάξης των 500cm . Ο ανιχνευτής αποτελείται από ένα μεγάλο κυλινδρικό χώρο, που είναι γεμάτος από 88m^3 μίγματος Ne/CO_2 με αναλογία $90\% : 10\%$ που χρειάζεται για να μεταφέρει τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται σε μια απόσταση μέχρι και 2.5m . Ο φασικός χώρος που καλύπτεται στην ψευδοσκυτήτητα είναι $|\eta| < 0.9$ για τροχιές που καλύπτουν όλη την ακτίνα του TPC και $|\eta| < 1.5$ για τροχιές που δεν φτάνουν στο TRD . Μερικές λεπτομέρειες ως προς τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του ανιχνευτή παρατίθενται στον πίνακα 9.3.

Κάλυψη $ \eta $	0.9 - 1.5(full - partial radial track length)
Κάλυψη ϕ	2π
Ακτίνα	$845 < r < 2466\text{mm}$
Μήκος	5000mm
Ολικός αριθμός readout chambers	$2 \times 2 \times 18 = 72$
Εσωτερικός κύλινδρος	(ενεργός περιοχή) $847 < r < 1320\text{mm}$
Μέγεθος πλακιδίων (mm)	$4 \times 7.5 \phi \times r$
pad rows	63
N_{padrows}	5504
Εξωτερικός κύλινδρος	(ενεργός περιοχή) $1346 < r < 2466\text{mm}$
Μέγεθος πλακιδίων (mm)	6×10 και $6 \times 15 \phi \times r$
pad rows	96
N_{padrows}	9984

Πίνακας 9.3: Παράμετροι του ανιχνευτή TPC .

9.3 Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ - TRD

Ο κύριος στόχος του ανιχνευτή ακτινοβολίας μετάβασης (TRD) [4] είναι να παρέχει ταυτοποίηση ηλεκτρονίων με ορμή μεγαλύτερη του $1\text{GeV}/c$ στην κεντρική περιοχή. Στην περιοχή αυτή των ορμών, η απόρριψη πιονίων μέσω της μέτρησης της απώλειας ενέργειας με τη βοήθεια του TPC δεν είναι επαρκής. Ως συνέπεια, η προσθήκη του TRD αυξάνει σημαντικά τις δυνατότητες του πειράματος. Έτσι ο ανιχνευτής αυτός μαζί με τη βοήθεια των ITS και TPC

θα παρέχει ικανοποιητική ταυτοποίηση ηλεκτρονίων για τη μελέτη συντονισμών ελαφριών αλλά και βαρέων ανυσματικών μεσονίων σε αλληλεπιδράσεις $Pb+Pb$ αλλά και $p+p$. Επίσης, η ταυτοποίηση των ηλεκτρονίων που προέρχεται από τους TPC και TRD για τιμές της εγκάρσιας ορμής $P_T > 1\text{GeV}/c$, θα χρησιμοποιηθεί μαζί με την πληροφορία για την παράμετρο κρούσης (πληροφορία από το ITS) στη μελέτη της παραγωγής *charm* και *beauty* μεσονίων από τις αλληλεπιδράσεις. Μια αντίστοιχη τεχνική χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό απευθείας παραγόμενων J/Ψ μεσονίων από αυτά που προέρχονται από διασπάσεις B . Τα τελευταία μπορούν να αποτελέσουν το υπόβαθρο στη μέτρηση των παραγομένων J/Ψ και την πιθανή επίδραση που έχει πάνω σε αυτή τη διαδικασία παραγωγής η ύπαρξη ενός μέσου που αποτελείται από κουarks και γκλουόνια. Επίσης, ο ανιχνευτής TRD , λόγω του ότι έχει πολύ γρήγορη απόκριση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέρος ενός συστήματος σκανδαλισμού για την επιλογή ηλεκτρονίων με πολύ υψηλή τιμή της εγκάρσιας ορμής. Τέτοιο σύστημα θα προσδώσει επιπλέον δυνατότητες στη μέτρηση των παραγομένων σωματιδίων της οικογένειας Y .

Έχοντας λοιπόν ως βάση όλα τα παραπάνω, ο TRD σχεδιάστηκε με τις ακόλουθες προδιαγραφές [4]:

- Η απαιτούμενη ικανότητα στην απόρριψη των πιονίων προέρχεται κυρίως από τις μετρήσεις των J/Ψ και την αντίστοιχη εξάρτησή της από την εγκάρσια ορμή. Ο στόχος δε είναι να αυξηθεί η απόρριψη αυτή κατά 100 για ηλεκτρόνια με ορμή $P_T > 3\text{GeV}/c$.
- Η απαιτούμενη διακριτική ικανότητα στη μέτρηση της ορμής προκύπτει από την ανάγκη να συνδυαστεί η πληροφορία με αυτή του TPC . Ο TRD θα παρέχει διακριτική ικανότητα που θα κυμαίνεται στα επίπεδα του 5% για τροχιές με ορμή $P_T \approx 5\text{GeV}/c$.
- Το πάχος του ανιχνευτή πρέπει να είναι τέτοιο ώστε το υλικό του να μη δημιουργεί επιπλέον υπόβαθρο, κυρίως από τη εκπομπή φωτονίων, με αποτέλεσμα να αυξάνει την κατάληψη των pixels.

Οι απαιτήσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω, οδήγησαν και στη παρούσα σχεδίαση του ανιχνευτή. Χρησιμοποιούνται κυλινδρικές συντεταγμένες με αρχή στο κέντρο του σωλήνα της δέσμης και θετικό άξονα z που δείχνει προς την κατεύθυνση του ανιχνευτή μιονίων. Η κάλυψη στην ψευδοωκότητα είναι στο $|\eta| \leq 0.9$ για να ταιριάζει με την αντίστοιχη κάλυψη του TPC . Οι θάλαμοι του TRD γεμίζουν το χώρο που υπάρχει μεταξύ του TPC και των θαλάμου

του ανιχνευτή μέτρησης χρόνου πτήσης *TOF* για το οποίο θα μιλήσουμε στη συνέχεια. Για να καλύψει το διαχωρισμό που προσφέρει το *space frame*[1] στην αζιμουθιακή γωνία φ , ο ανιχνευτής αποτελείται από 18 κομμάτια που καλούνται *super modules*. Κάθε τέτοιο δε αποτελείται από 6 επιμέρους επίπεδα ως προς την r συντεταγμένη και από 5 ζώνες ως προς τη z (κατά μήκος του άξονα της δέσμης). Σαν σύνολο λοιπόν έχουμε: $18 \times 5 \times 6 = 540$ **TRD modules**. Μερικές λεπτομέρειες γύρω από τις τεχνικές προδιαγραφές του ανιχνευτή φαίνονται στον πίνακα 9.4.

Κάλυψη $ \eta $	0.9
Κάλυψη ϕ	2π
Ακτίνα	$2.9 < r < 3.7m$
Μήκος	$\approx 7000mm$
Διαχωρισμός στη φ	18 μέρη
Ακτινικός διαχωρισμός	6 επίπεδα
Διαχωρισμός στο z	5 μέρη
Ολικός αριθμός θαλάμων	540

Πίνακας 9.4: Παράμετροι του ανιχνευτή *TRD*.

9.4 Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΠΤΗΣΗΣ - *TOF*

Ο ανιχνευτής χρόνου πτήσης τους πειράματος *ALICE* [5], καλύπτει την κεντρική περιοχή της ψευδοωκότητας ($|\eta| \leq 0.9$) και παρέχει ταυτοποίηση σωματιδίων στην μεσαία περιοχή των ορμών ($0.2 - 3.1 GeV/c$). Από τη στιγμή που η πλειονότητα των σωματιδίων εκπέμπονται σε αυτή την περιοχή, η απόδοση ενός τέτοιου ανιχνευτή είναι πολύ σημαντική για το πείραμα. Η ανίχνευση αλλά και ταυτοποίηση σωματιδίων σε αυτήν την περιοχή των ορμών, θα βοηθήσει στη μελέτη τόσο της φύσης, όσο και της εξέλιξης του συστήματος που δημιουργείται μετά από μια αλληλεπίδραση βαρέων ιόντων σε ενέργειες όπως αυτές του *LHC*.

Ο ανιχνευτής αυτός, με τη βοήθεια των *ITS* και *TPC* που αναλαμβάνουν κυρίως την ανακατασκευή του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης καθώς και την ταυτοποίηση σωματιδίων στο χαμηλό φάσμα των ορμών ($P_T \leq 0.6 GeV/c$, θα παρέχει αναγνώριση πιονίων, καονίων αλλά και πρωτονίων σε επίπεδο **event**

by event (E-by-E). Τα αναγνωρισμένα από τον *TOF* σωματίδια θα χρησιμοποιούνται για τη μελέτη αδρονικών παραμέτρων σε κάθε γεγονός. Στο επίπεδο δε της συνολικής ανάλυσης, καόνια θα χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της αναλλοίωτης μάζας και πιο συγκεκριμένα για τη μελέτη των καταστάσεων *open charm* , καθώς και για την παραγωγή ϕ μεσονίων. Ένας τέτοιος λοιπόν ανιχνευτής, με μεγάλη κάλυψη φασικού χώρου, πρέπει να λειτουργεί αποδοτικά σε ένα περιβάλλον που όπως είπαμε αναμένεται να χαρακτηρίζεται από μεγάλη πυκνότητα τροχιών. Έτσι, με βάση αυτό, θα πρέπει η απόκρισή του να είναι τέτοια ώστε να ανταπεξέρχεται σε πολλαπλότητες που αγγίζουν το $dN_{charg.}/d\eta \approx 8000$.

Ο *TOF* καλύπτει μια κυλινδρική περιοχή με πολική αποδοχή $|\theta - 90^\circ| < 45^\circ$. Έχει τμηματική δομή που αντανακλάται σε 18 τμήματα στην αξιμουθιακή γωνία ϕ και 5 τμήματα κατά μήκος του άξονα της δέσμης. Ο τελευταίος διαχωρισμός επιλέχθηκε για να ταιριάζει με τον αντίστοιχο διαχωρισμό του προηγούμενου ανιχνευτή (*TRD*) του οποίου οι θάλαμοι μπαίνουν στον ενδιάμεσο από το *TPC* και *TOF* χώρο. Η όλη δομή σχηματίζει έναν κυλινδρικό φλοιό με εσωτερική και εξωτερική ακτίνα 370cm και 399cm αντίστοιχα. Μερικές λεπτομέρειες της σχεδιάσής του αναφέρονται στον πίνακα 9.5.

Κάλυψη $ \eta $	0.9
Κάλυψη ϕ	2π
Ακτίνα	$3.7 < r < 3.99\text{m}$
Μήκος	$\approx 7450\text{mm}$
Διαχωρισμός στη ϕ	18 μέρη
Διαχωρισμός στο z	5 μέρη
Ολικός αριθμός θαλάμων	90

Πίνακας 9.5: Παράμετροι του ανιχνευτή *TOF*.

9.5 ΟΙ ΥΠΟΛΟΙΠΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΤΟΥ *ALICE*

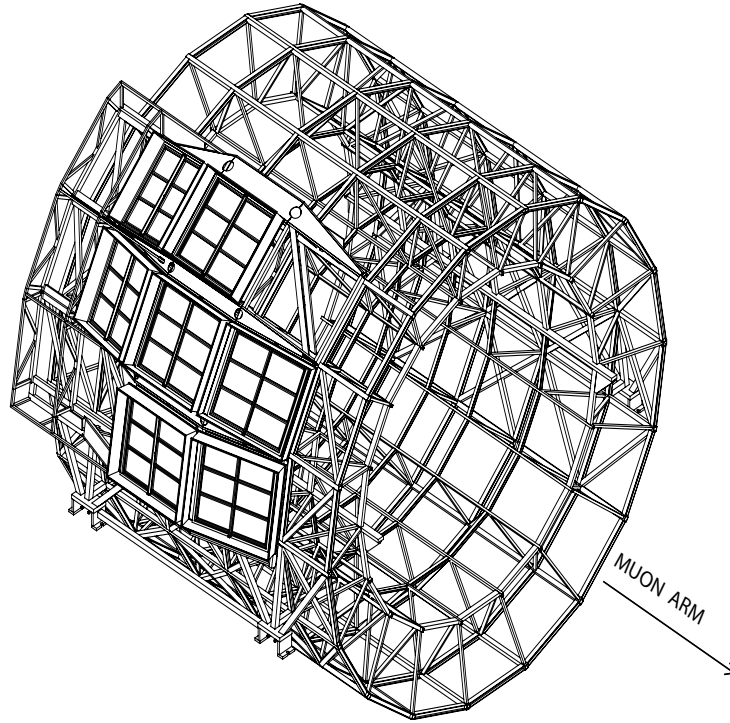
Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε εν συντομεία στους υπόλοιπους ανιχνευτές του πειράματος.

9.5.1 Ο ανιχνευτής *HMPID*

Ο ανιχνευτής ταυτοποίησης σωματιδίων υψηλής ορμής - **High-Momentum Particle Identification Detector (HMPID)** [6], είναι αφοσιωμένος στην αναγνώριση αδρονίων με τιμή εγκάρσιας ορμής $P_T > 1\text{GeV}/c$. Ο ανιχνευτής αυτός καλύπτει ένα σχετικά πολύ μικρό μέρος του φασικού χώρου (5%) που καλύπτεται από τους υπόλοιπους ανιχνευτές της κεντρικής περιοχής. Η γεωμετρία δε του ανιχνευτή σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή σωματιδίων με μεγάλο P_T τόσο σε αλληλεπιδράσεις pp , όσο και βαρέων ιόντων. Ο *HMPID* θα ενισχύσει τις δυνατότητες ταυτοποίησης του πειράματος με το να παρέχει πληροφορία για σωματίδια με ορμή κυρίως πάνω από το διάστημα στο οποίο οι υπόλοιποι ανιχνευτές (και κυρίως ο *TOF*) είναι λειτουργικοί. Ο ανιχνευτής αυτός θα βοηθήσει στο διαχωρισμό των π/K και K/p σε επίπεδο τροχιάς μέχρι τα $3\text{GeV}/c$ και $5\text{GeV}/c$ αντίστοιχα. Η κάλυψη που θα παρέχει στην ψευδοωκύτητα περιορίζεται στο διάστημα $|\eta| < 0.6$ ενώ το αντίστοιχο διάστημα στην αζιμουθιακή γωνία είναι της τάξης των 57.61° . Θα τοποθετηθεί σε απόσταση $5m$ από το κέντρο του σωλήνα της δέσμης ενώ θα χωρίζεται σε 3 κομμάτια στο ϕ και z , έχοντας ένα συνολικό αριθμό θαλάμων που φτάνει τους 7 όπως φαίνεται στο σχήμα 9.2.

9.5.2 Ο ανιχνευτής *PHOS*

Ο ανιχνευτής **PHOton Spectrometer - PHOS** [7], είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό φασματομέτρο με πολύ καλή διακριτική ικανότητα που θα είναι τοποθετημένο σε μια περιορισμένη περιοχή του φασικού χώρου και θα παρέχει αναγνώριση φωτονίων καθώς και ουδέτερων μεσονίων μέσω του καναλιού διάσπασης σε δυο φωτόνια. Οι κύριοι στόχοι του ανιχνευτή αυτού είναι να συμβάλλει στη μελέτη των θερμικών και δυναμικών ιδιοτήτων του συστήματος που δημιουργείται στην αρχική φάση μετά τη σύγκρουση μέσω της μέτρησης φασμάτων απευθείας **single photon** αλλά και **diphoton**. Ένα ακόμα σημείο στο οποίο θα συμβάλλει ο ανιχνευτής αυτός θα είναι και η διερεύνηση του **jet quenching** σαν άμεσο χαρακτηριστικό της ύπαρξης *QGP* μέσω της μελέτης φασμάτων ουδέτερων πιονίων (π^0) και αναγνώρισης πιδάκων μέσω της μελέτης των συσχετισμών $\gamma - jet$ και $jet - jet$. Η κάλυψη στην ψευδοωκύτητα όπως είπαμε θα είναι περιορισμένη στο $|\eta| < 0.12$, $\Delta\phi = 100^\circ$ στην αζιμουθιακή γωνία, η απόσταση από το σημείο της αλληλεπίδρασης θα είναι $\approx 4600mm$ και ο ανιχνευτής θα αποτελείται από 5 θαλάμους με ένα συνολικό αριθμό κρυστάλλων που θα αγγίζει το 3584 καλύπτοντας μια περιοχή $8m^2$.



Σχήμα 9.2: Τα 7 module του ανιχνευτή *HMPID* καθώς είναι τοποθετημένο στο πλαίσιο στήριξης (space frame), όπως αναπαριστάται μέσα στο πακέτο *AliRoot*.

9.5.3 Ο ανιχνευτής *EMCAL*

Ο σχεδιασμός του Electromagnetic Calorimeter - *EMCAL* είναι επηρεασμένος από την τοποθέτησή του σε σχέση με το μαγνήτη του πειράματος [1]. Ο *EMCAL* [8] θα είναι τοποθετημένος μέσα στην περιοχή που ορίζει ο μαγνήτης, καλύπτοντας έναν κυλινδρικό χώρο περίπου 112cm στην ακτινική συνιστώσα ανάμεσα από το πλαίσιο στήριξης (space frame) [1] και τον μαγνήτη. Λόγω της γεωμετρίας τόσο του *PHOS*, όσο και του *HMPID* το καλορίμετρο καλύπτει μια περιοχή που εκτείνεται σε 110 μοίρες στην αζιμουθιακή γωνία φ , δίπλα από τους θαλάμους του τελευταίου.

9.5.4 Ο ανιχνευτής *PMD*

Ο ανιχνευτής **Photon Multiplicity Detector - PMD** έχει ως αρμοδιότητα τη μέτρηση της πολλαπλότητας και τη χωρική κατανομή στο φασικό χώρο $\eta - \phi$ των φωτονίων σε επίπεδο γεγονόσ ανά γεγονός στην περιοχή των μεγάλων τιμών της ψευδοωκότητας [9]. Ο *PMD* θα χρησιμοποιηθεί σε μελέτες διακυμάνσεων σε επίπεδο γεγονόσ ανά γεγονός, στη μελέτη της ροής αλλά και στο σχηματισμό αποπροσανατολισμένου χειραλικού συμπυκνώματος (**Disoriented Chiral Condensate - DCC**). Θα παρέχει δε εκτιμήσεις για την εγκάρσια τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας καθώς και το επίπεδο της αλληλεπίδρασης πάλι σε κάθε γεγονός.

Ο ανιχνευτής αυτός θα τοποθετηθεί σε απόσταση 360cm από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης, στην αντίθετη από τον ανιχνευτή μιονίων κατεύθυνση και θα καλύπτει το διάστημα $2.3 \leq \eta \leq 3.5$. Ο *PMD* παρέχει πλήρη κάλυψη στην αζιμουθιακή γωνία ϕ και θα αποτελείται συνολικά από 4 κύριους θαλάμους.

9.5.5 Ο ανιχνευτής *FMD*

Η κύρια αρμοδιότητα του **Forward Multiplicity Detector - FMD** είναι να παρέχει μέτρηση της πολλαπλότητας των φορτισμένων σωματιδίων σε περιοχές της ψευδοωκότητας που δεν καλύπτονται από τους ανιχνευτές της κεντρικής περιοχής: $-3.4 < \eta < -1.7$ και $1.7 < \eta < 5.1$ [10]. Ο *FMD* θα επιτρέψει τη μελέτη των διακυμάνσεων της πολλαπλότητας σε επίπεδο γεγονόσ ανά γεγονός καθώς και την ανάλυση της ροής στο φασικό χώρο που καλύπτει. Μαζί δε με το σύστημα των *pixels* του *ITS* θα παρέχει πληροφορία για την πολλαπλότητα των φορτισμένων σωματιδίων σε έναν εκτενή φασικό χώρο $-3.4 < \eta < 5.1$. Ο ανιχνευτής αυτός αποτελείται από 51200 κανάλια που κατανέμονται σε πέντε δακτυλίους.

9.5.6 Ο ανιχνευτής *ZDC*

Η παράμετρος εκείνη που σχετίζεται περισσότερο από κάθε άλλη με τη γεωμετρία μιας αλληλεπίδρασης είναι ο αριθμός των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος σε αυτή. Ο αριθμός αυτός μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της μέτρησης της ενέργειας που μεταφέρουν τα μη αλληλεπιδρώντα νουκλεόνια των δεσμών στην εμπρόσθια κατεύθυνση (σε μηδέν μοίρες σε σχέση με τον άξονα της δέσμης). Η ενέργεια που αντιστοιχεί σε αυτή την περιοχή ελλατώνεται με την αύξηση της

κεντρικότητας μιας αλληλεπίδρασης. Τα μη αλληλεπιδρώντα νουκλεόνια, θα ανιχνεύονται στο πείραμα *ALICE* από τα *Zero Degree Calorimeters - ZDC*[11]. Στην ιδεατή περίπτωση κατά την οποία όλα τα μη αλληλεπιδρώντα νουκλεόνια ανιχνεύονται, τότε ο υπολογισμός του αριθμού των νουκλεονίων που παίρνουν μέρος στην αλληλεπίδραση θα δίνεται από την πιο κάτω σχέση:

$$E_{ZDC}(TeV) = 2.76N_{spectators}$$

$$N_{participants} = A - N_{spectators} \quad (9.1)$$

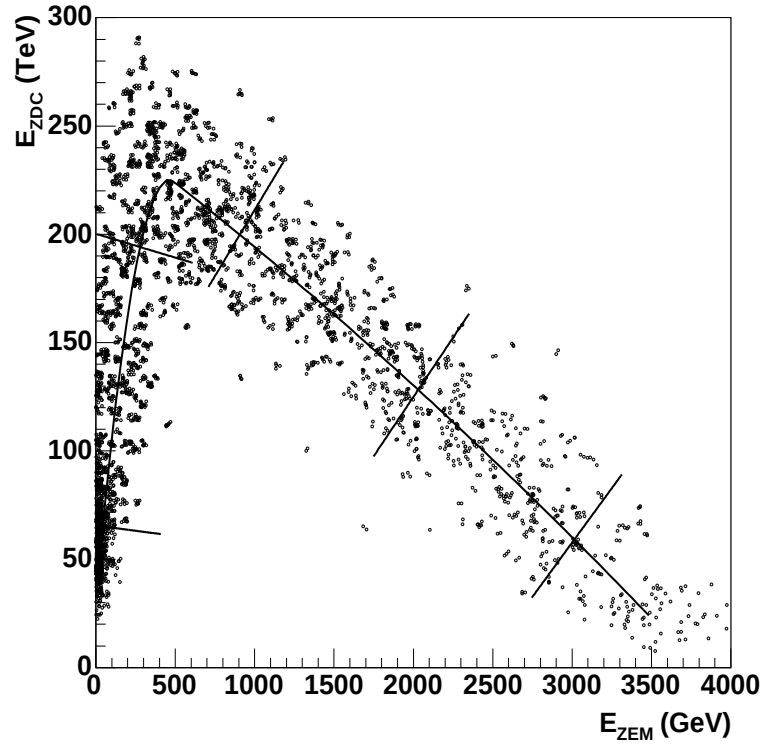
όπου 2.76 είναι η ενέργεια του νουκλεονίου σε δέσμη *Pb* στις ενέργειες του *LHC*.

Ο *ZDC* θα τοποθετηθεί 116m από το σημείο της αλληλεπίδρασης. Υπάρχουν δυο διαφορετικοί ανιχνευτές που θα χρησιμοποιηθούν: ένας για νετρόνια τοποθετημένος στο κέντρο του άξονα της δέσμης και ένας άλλος για πρωτόνια που δεν μετέχουν στην αλληλεπίδραση, τοποθετημένος σε τέτοια θέση ώστε να τα ανιχνεύει λαμβάνοντας υπόψη την τροχιά τους λόγω του μαγνητικού πεδίου. Το όλο ανιχνευτικό σύστημα ολοκληρώνεται και από ένα ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο που είναι επιφορτισμένο να αναγνωρίζει σε κάθε γεγονός σώματα που εκπέμπονται σε μεγάλες τιμές της ψευδοωκύτητας (κυρίως π^0 που διασπώνται σε δυο φωτόνια). Ο συνδυασμός της πληροφορίας από τα αδρονικά και το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο κάνει δυνατό το χαρακτηρισμό της κάθε αλληλεπίδρασης ως προς την κεντρικότητά της όπως φαίνεται και στο γράφημα 9.3

9.5.7 Ο ανιχνευτής *MUON*

Ο ανιχνευτής των μιονίων σχεδιάστηκε για να αναγνωρίζει μίονια σε ένα εύρος πολικών γωνιών μεταξύ $2^0 - 9^0$. Το συγκεκριμένο διάστημα που είναι μια σύνθεση και ένας συμβιβασμός μεταξύ κάλυψης του φασιικού χώρου και κόστους κατασκευής αντιστοιχεί σε ένα εύρος της ψευδοωκύτητας $-4.0 < \eta < -2.4$ [12]. Ο ανιχνευτής αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Έναν απορροφητή για την απορρόφηση των αδρονίων και των φωτονίων από το σημείο της αλληλεπίδρασης.
- Ένα σύστημα ανίχνευσης που περιλαμβάνει 10 επίπεδα.
- Έναν μεγάλο διπολικό μαγνήτη.



Σχήμα 9.3: Ο συνδυασμός της πληροφορίας των αδρονικών καλοριμέτρων και του ηλεκτρομαγνητικού για τον καθορισμό της κεντρικότητας μιας αλληλεπίδραξης.

- Ένα φίλτρο μιονίων που ακολουθείται από ένα σύστημα τεσσάρων θαλάμων σκανδαλισμού.
- Μια εσωτερική ασπίδα δέσμης για την προστασία των θαλάμων από πρωτογενή και δευτερογενή σωματίδια που παράγονται σε μεγάλες τιμές τις ψευδοωκύτητας.

Η προσθήκη αυτού του ανιχνευτή στο σύνολο των ανιχνευτών του *ALICE*, δίνει τη δυνατότητα της μελέτης της παραγωγής ανυσματικών μεσονίων με βαρέα κουάρκ, όπως J/Ψ , Ψ' , Υ , Υ' , Υ'' καθώς και ϕ μεσόνια στο κανάλι διάσπασης σε ζεύγη μιονίων ($\mu^\pm$). Η ταυτόχρονη μέτρηση όλων των μελών της οικογένειας με τον ίδιο ανιχνευτή θα επιτρέψει την άμεση σύγκριση του

ρυθμού παραγωγής τους ως συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων όπως η τιμή της εγκάρσιας ορμής καθώς και η κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων.

9.5.8 Ο ανιχνευτής $V0$

Ο ανιχνευτής $V0$ [13] αποτελείται από δυο επιμέρους συστήματα ($V0L$ και $V0R$) τοποθετημένα ασύμμετρα ως προς το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης. Ο $V0L$ είναι τοποθετημένος $335cm$ από το σημείο αυτό στην αντίθετη από τον ανιχνευτή μιονίων κατεύθυνση, ενώ ο $V0R$ βρίσκεται σε καθορισμένη θέση μπροστά από τον απορροφητή $90cm$ από το *vertex*. Οι ανιχνευτές $V0$ χωρίζονται σε 72 μετρητές οι οποίοι είναι κατανεμημένοι σε πέντε δακτυλίους. Θεωρούνται αλλά και είναι σημαντικά στοιχεία της πειραματικής διάταξης γιατί παρέχουν:

- Σκανδαλισμό ελάχιστης επιροής (Minimum bias trigger) στους ανιχνευτές της κεντρικής περιοχής.
- Ένδειξη της κεντρικότητας της αλληλεπίδρασης.
- Έλεγχο της φωτεινότητας (luminosity).

9.5.9 Ο ανιχνευτής $T0$

Ο ανιχνευτής $T0$ [14] είναι επιφορτισμένος με το να παρέχει το αρχικό σήμα για τον ανιχνευτή TOF . Επίσης δίνει εκτίμηση για τη θέση του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης με ακρίβεια $\pm 1.5cm$ παρέχοντας παράλληλα το σκανδαλισμό πρώτου επιπέδου ($L0$ trigger) όταν η θέση του είναι ανάμεσα στις επιτρεπτές τιμές. Μια ακόμη αρμοδιότητα είναι η προετοιμασία του ανιχνευτή TRD (pretrigger). Τέλος, παρέχει και το σκανδαλισμό $T0_{min-bias}$, $T0_{semi-central}$ ή $T0_{central}$ μετρώντας την πολλαπλότητα των παραγομένων σωματιδίων. Ο ανιχνευτής αποτελείται από δυο συστήματα μετρητών *Cerenkov*, το ένα εκ των οποίων ($T0_R$) είναι τοποθετημένο σε απόσταση $70cm$ από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης και καλύπτει την περιοχή της ψευδοωκότητας $2.9 \leq \eta \leq 3.3$, ενώ το άλλο ($T0_L$) είναι τοποθετημένο στην αντίθετη κατεύθυνση σε απόσταση $350cm$ κοντά στους υπόλοιπους ανιχνευτές αυτής της περιοχής (FMD , $V0$ και PMD) και καλύπτει το χώρο $-5 \leq \eta \leq -4.5$.

9.6 ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ *ALICE*

Η ταυτοποίηση των σωματιδίων στο πείραμα πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη λήψη πληροφοριών από πολλούς ανιχνευτές, κάθε ένας από τους οποίους καλύπτει συγκεκριμένη περιοχή του φασικού χώρου. Κατά τη διαδικασία αυτή λαμβάνουμε υπόψη την Bayesian μέθοδο ξεκινώντας από μια προκαθορισμένη συγκέντρωση σωματιδίων (διαφορετικών τύπων). Έχοντας σαν στοιχείο την απόκριση κάθε ανιχνευτή, ορίζουμε ως πιθανότητα ένα σωματίο να είναι τύπου i το λόγο:

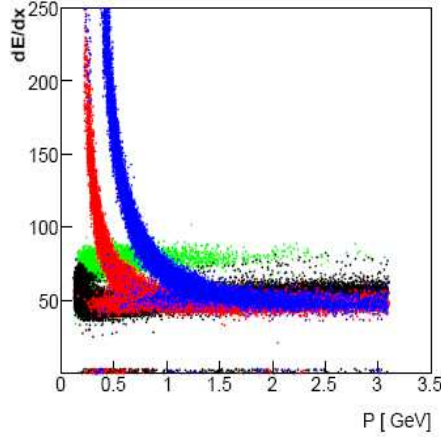
$$W_i = C_i \Pi_i / \sum_{i=0}^{i=N} C_i \Pi_i, \quad (9.2)$$

όπου C_i είναι το ποσοστό που δίνει την αρχική συγκέντρωση των σωματιδίων τύπου i και Π_i είναι η αντίστοιχη απόκριση του ανιχνευτή.

9.6.1 Ταυτοποίηση σωματιδίων με τον *TPC*

Το σχήμα 9.4, δείχνει την εξάρτηση της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής, όπως αυτή μετριέται από τον ανιχνευτή *TPC*, ως συνάρτηση της ορμής των σωματιδίων. Στο σχήμα φαίνονται καθαρά οι διάφορες ζώνες για κάθε είδος σωματιδίου: λεπτόνια (πράσινο), πιόνια (μαύρο), καόνια (κόκκινο) και πρωτόνια (μπλε). Ο διαχωρισμός των πρωτονίων δείχνει να είναι εφικτός μέχρι την τιμή $P \approx 1\text{GeV}/c$ ενώ των καονίων μέχρι την τιμή $P \approx 0.7\text{GeV}/c$.

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα του σχήματος 9.5, στο οποίο η απόδοση της διαδικασίας ταυτοποίησης αλλά και το ποσοστό των προσμίξεων δίνονται ως συνάρτηση της ορμής των σωματιδίων. Έτσι για τα πιόνια (αριστερό γράφημα) έχουμε άριστη ταυτοποίηση σε όλη την περιοχή (μέχρι $P = 1.1\text{GeV}/c$), ενώ παράλληλα οι αντίστοιχες προσμίξεις είναι μικρές για όλα τα είδη σωματιδίων εκτός από τα καόνια όπου το αντίστοιχο ποσοστό πρόσμιξης αυξάνεται μετά τα $0.6\text{GeV}/c$. Η ταυτοποίηση των καονίων (μεσαίο γράφημα) είναι καλή μέχρι την τιμή $P \approx 0.7\text{GeV}/c$ μετά από την οποία τα καόνια ταυτοποιούνται λανθασμένα ως πιόνια. Τέλος, για τα πρωτόνια έχουμε αρκετά καλή ταυτοποίηση που περιορίζεται στην περιοχή $0.4 < P < 1.1\text{GeV}/c$.

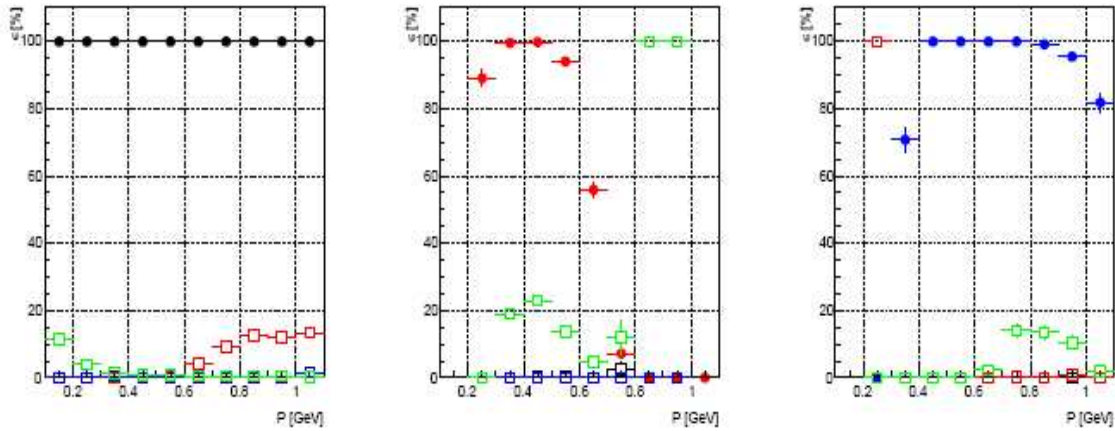


Σχήμα 9.4: Η εξάρτηση από την ορμή της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους (πληροφορία από τον *TPC*) για διάφορα είδη σωματιδίων.

9.6.2 Ταυτοποίηση σωματιδίων με τον *TOF*

Το σχήμα 9.6, δείχνει της ταχύτητας πτήσης των σωματιδίων, όπως αυτή μετρείται από τον ανιχνευτή *TOF*, από την ορμή. Στο σχήμα φαίνονται καθαρά οι διάφορες ζώνες για κάθε είδος σωματιδίου: λεπτόνια (πράσινο), πιόνια (μαύρο), καόνια (κόκκινο) και πρωτόνια (μπλε). Ο διαχωρισμός των πρωτονίων δείχνει να είναι εφικτός μέχρι την τιμή $P \approx 3.1 \text{ GeV}/c$ ενώ των καονίων μέχρι την τιμή $P \approx 2.5 \text{ GeV}/c$.

Το σχήμα 9.5, στο οποίο η απόδοση της διαδικασίας ταυτοποίησης αλλά και το ποσοστό των προσμίξεων δίνονται ως συνάρτηση της ορμής των σωματιδίων, επιβεβαιώνει τις αρχικές παρατηρήσεις. Έτσι για τα πιόνια (αριστερό γράφημα) έχουμε άριστη ταυτοποίηση σε όλη την περιοχή (μέχρι $P = 3.1 \text{ GeV}/c$) ενώ παράλληλα οι αντίστοιχες προσμίξεις είναι μικρές για όλα τα είδη σωματιδίων. Η ταυτοποίηση των καονίων (μεσαίο γράφημα) είναι εξαιρετική μέχρι την τιμή $P \approx 2.5 \text{ GeV}/c$ μετά από την οποία τα καόνια ταυτοποιούνται λανθασμένα ως πιόνια. Τέλος, για τα πρωτόνια έχουμε αρκετά καλή ταυτοποίηση που περιορίζεται στην περιοχή $0.4 < P < 3.1 \text{ GeV}/c$.

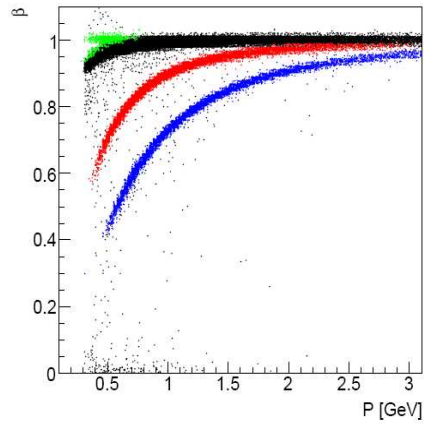


Σχήμα 9.5: Η απόδοση της ταυτοποίησης σωματιδίων αλλά και τα διάφορα ποσοστά πρόσμιξης ως συνάρτηση της ορμής (πληροφορία μόνο από τον *TPC*) για τρία είδη: πιόνια (αριστερό γράφημα), καόνια (μεσαίο γράφημα) και πρωτόνια (αριστερό γράφημα).

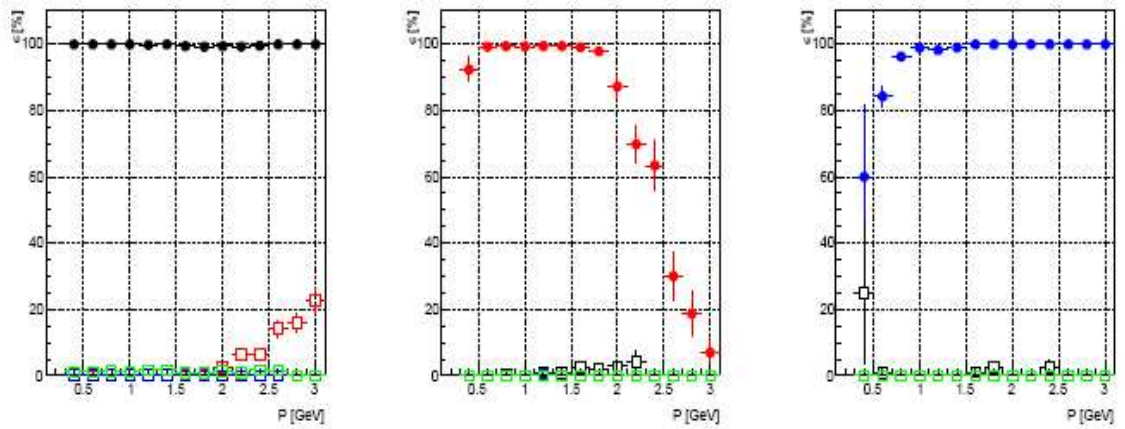
9.6.3 Συνδυασμένη ταυτοποίηση σωματιδίων

Αν χρησιμοποιήσουμε την πληροφορία από όλους τους ανιχνευτές για τροχιές που διαπερνούν το κύριο ανιχνευτικό σύστημα (*TPC*), τότε παίρνουμε την εικόνα του σχήματος 9.8 για την απόδοση αλλά και τα ποσοστά προσμίξεων. Ο χώρος πλέον εκτείνεται στα $P \approx 3.1 \text{ GeV}/c$ αφού ο ανιχνευτής χρόνου πτήσης κυριαρχεί σε μεσαίες περιοχές της ορμής. Η συμπεριφορά της απόδοσης για την ταυτοποίηση καονίων και πρωτονίων είναι συνδυασμός της ικανότητας του *TPC* και του *TOF* για αυτό και παρατηρείται αυτή η πτώση στην περιοχή $P > 1 \text{ GeV}/c$ (περιοχή όπου ο *TPC* δεν βοηθά στην ταυτοποίηση).

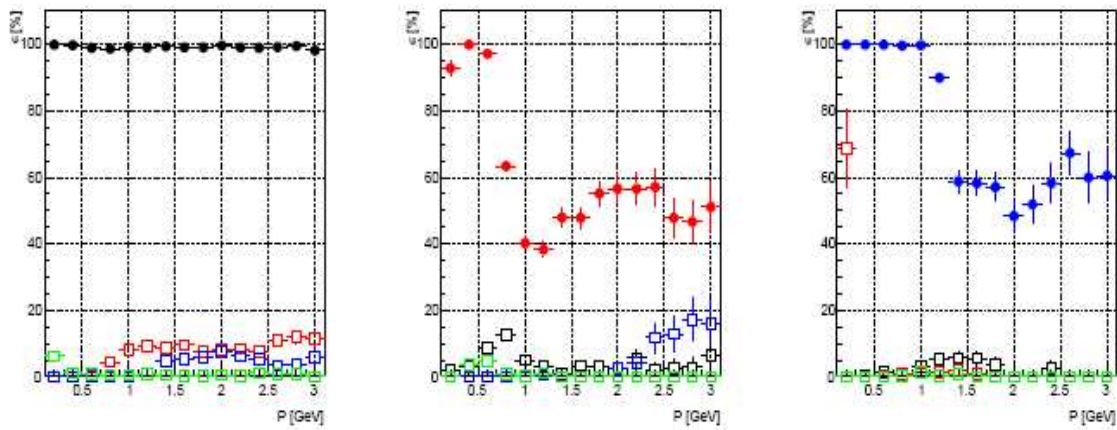
Αντίθετα, αν μελετηθούν οι τροχιές που περνούν από τον ανιχνευτή θαλάμου πτήσης (απαίτηση που μας εξασφαλίζει καλύτερη ταυτοποίηση), τότε η εικόνα βελτιώνεται αισθητά (σχήμα 9.9). Πρέπει όμως να τονισθεί ότι ένα μεγάλο μέρος των τροχιών δεν φτάνει τα όρια του *TOF* κάτι που έχει ως συνέπεια την ελάττωση του αριθμού των τροχιών που αναλύονται.



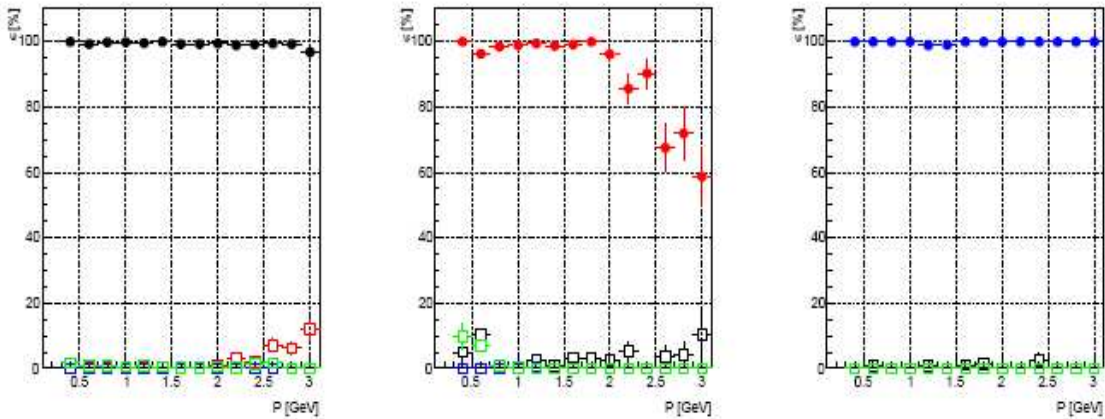
Σχήμα 9.6: Η εξάρτηση από την ορμή της ταχύτητας πτήσης (πληροφορία από τον *TOF*) για διάφορα είδη σωματιδίων.



Σχήμα 9.7: Η απόδοση της ταυτοποίησης σωματιδίων αλλά και τα διάφορα ποσοστά πρόσμιξης ως συνάρτηση της ορμής (πληροφορία μόνο από τον *TOF*) για τρία είδη: πιόνια (αριστερό γράφημα), καόνια (μεσαίο γράφημα) και πρωτόνια (δεξί γράφημα).



Σχήμα 9.8: Η απόδοση της ταυτοποίησης σωματιδίων αλλά και τα διάφορα ποσοστά πρόσμιξης ως συνάρτηση της ορμής για τρία είδη: πιόνια (αριστερό γράφημα), καόνια (μεσαίο γράφημα) και πρωτόνια (δεξί γράφημα).



Σχήμα 9.9: Η απόδοση της ταυτοποίησης σωματιδίων αλλά και τα διάφορα ποσοστά πρόσμιξης ως συνάρτηση της ορμής (τροχιές που περνούν από τον *TOF*) για τρία είδη: πιόνια (αριστερό γράφημα), καόνια (μεσαίο γράφημα) και πρωτόνια (δεξί γράφημα).

Κεφάλαιο 10

ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ *ALICE* ΚΑΙ ΤΟ *GRID*

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με το υπολογιστικό μοντέλο του πειράματος *ALICE* ως μια εισαγωγή που θα καταστήσει σαφές το πλαίσιο μέσα στο οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη λογισμικού. Η παρουσίαση του λογισμικού αυτού θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

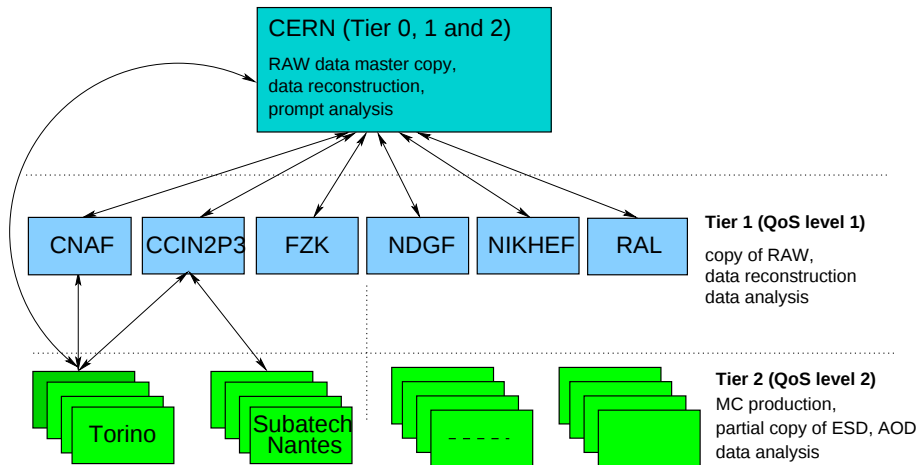
Το υπολογιστικό μοντέλο του πειράματος *ALICE* προϋποθέτει την ύπαρξη ενός λειτουργικού πλέγματος (*GRID*) που θα επιτρέπει την αποδοτική αλλά και ‘δημοκρατική’ πρόσβαση σε παγκοσμίως κατανεμημένες υπολογιστικές αλλά και αποθηκευτικές πηγές. Η εφαρμογή της προηγούμενης υπόθεσης έχει παρουσιαστεί σε μια σειρά δοκιμών (*PhysicsDataChallenges – PDCs*) που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ του 2003 και του 2006 με το σύστημα που αναπτύχθηκε στο *ALICE* και ονομάζεται *AliEn* [1]. Από το 2005 και μετά έγινε προσπάθεια να χτιστεί και να αναπτυχθεί ένα παρόμοιο σύστημα που θα χρησιμοποιεί στο μέγιστο βαθμό τις κοινές υπηρεσίες του *GRID* που παρέχονται από το *LCG* [2], προσθέτοντας τον αναγκαίο αριθμό υπηρεσιών που απαιτούνται από το *ALICE* και προέρχονται από το σύστημα *AliEn*.

Η εμπειρία που αποκτήθηκε από τις *PDCs* αποδεικνύει την αναγκαιότητα ύπαρξης ενός τέτοιου μοντέλου που θα χαρακτηρίζεται από μια βασική ιεραρχία και συγκεκριμένες κατηγορίες υπολογιστικών πόρων. Έτσι έξυπνη και λειτουργική διαχείριση, κατανομή και οργάνωση των εργασιών που θα βασίζεται στα στοιχεία των υπολογιστικών πόρων αλλά και στις ανάγκες κάθε εργασίας, επιτρέπει την καλύτερη χρησιμοποίηση και εκμετάλλευση των υπολο-

γιστικών κέντρων σε σχέση με την επιλεγμένη ιεραρχία. Παρ'όλα αυτά, για να ληφθεί υπόψη η πιθανότητα ενσωμάτωσης λιγότερο εξελιγμένων υπηρεσιών του *GRID*, οι προβλεπόμενες υπολογιστικές εργασίες έχουν κατηγοριοποιηθεί με έναν τρόπο ώστε να υπάρχουν υπολογιστικά κέντρα που ονομάζονται *TIER*. Η κατηγοριοποίηση των κέντρων σε *TIER*, σε σχέση με το είδος των υπολογιστικών εργασιών, επιτρέπει την απόδοση μιας εργασίας στο κέντρο εκείνο που επιτρέπει αλλά και παρέχει τις πηγές και τις δυνατότητες που απαιτεί η εργασία.

10.1 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Το υπολογιστικό μοντέλο του πειράματος *ALICE* έχει ως βάση την ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού υπολογιστικών πόρων που είναι απαραίτητοι ώστε να αποθηκευτούν αλλά και να αναλυθούν τα δεδομένα που θα παραχθούν από το πείραμα κατά τη λειτουργία του [3].



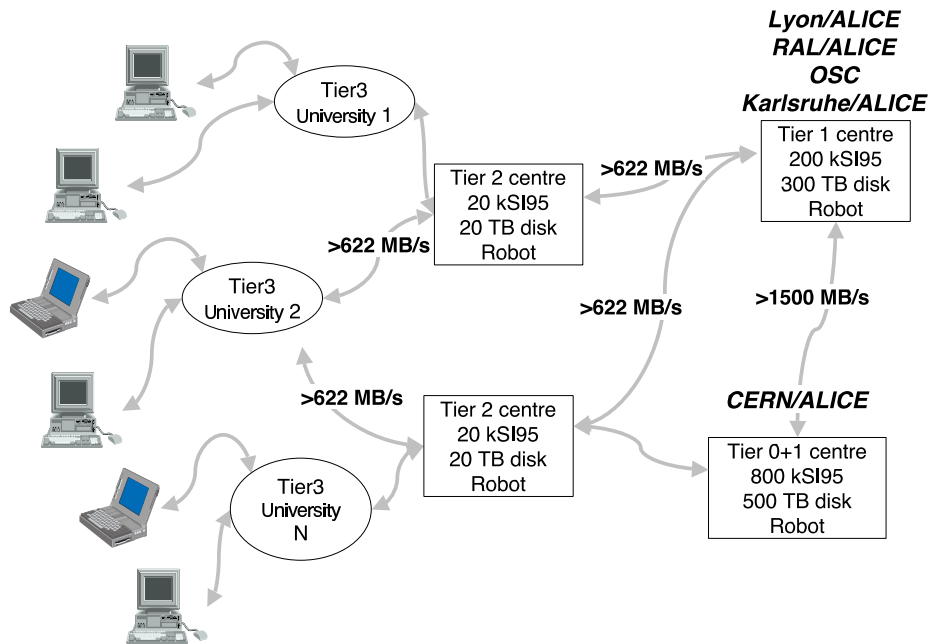
Σχήμα 10.1: Σχηματική αναπαράσταση των υπολογιστικών εργασιών του *ALICE* στο πλαίσιο του μοντέλου *MONARC*.

Από την αρχή του σχεδιασμού των πειραμάτων του *LHC* [4], αναγνωρίστηκε η αναγκαιότητα της ύπαρξης τόσο υπολογιστικών πόρων για ανάλυση

και επεξεργασία, όσο και για αποθήκευση των δεδομένων πέρα από ένα υπολογιστικό κέντρο. Τα υπολογιστικά εκείνα κέντρα που παρέχουν αυτούς τους πόρους, είναι φυσικό να βρίσκονται στις εγκαταστάσεις των ινστιτούτων και των πανεπιστημίων που συμμετέχουν στα αντίστοιχα πειράματα. Το τεχνικό αυτό μέρος της αποκέντρωσης των πόρων έχει αποδοθεί στο λεγόμενο μοντέλο *MONARC* [5] η δομή του οποίου παρουσιάζεται σχηματικά στο γράφημα 10.1. Το μοντέλο αυτό περιγράφει ένα σύνολο κατανεμημένων υπολογιστικών πόρων, που έχουν κατηγοριοποιηθεί σε κέντρα που ονομάζονται *TIER*, με το *TIER* – 0 να βρίσκεται στο *CERN*, τα *TIER* – 1 να απαρτίζονται από τα μεγάλα υπολογιστικά κέντρα που παρέχουν ασφαλή αποθηκευτικά μέσα στη μορφή μαζικών συστημάτων αποθήκευσης (*Mass Storage System* - *MSS*) και τα *TIER* – 2 να αποτελούνται από τα μικρότερα περιφερειακά υπολογιστικά κέντρα, όπως φαίνεται σχηματικά στο γράφημα 10.2. Το μοντέλο προβλέπει επίσης την ύπαρξη κέντρων *TIER* – 3 που αποτελούνται από τα πανεπιστημιακά υπολογιστικά κέντρα, καθώς και *TIER* – 4 που χαρακτηρίζονται οι υπολογιστές των χρηστών (γράφημα 10.2). Η διαφορά μεταξύ των τριών κύριων κατηγοριών *TIER* είναι η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (*Quality of Service* - *QoS*) καθώς και η αξιοπιστία τους σε πολλαπλά επίπεδα. Είναι αυτονόητο ότι η μέγιστη ποιότητα των υπηρεσιών αλλά και η μέγιστη αξιοπιστία παρέχεται κατά σειρά από τα *TIER* – 0, τα *TIER* – 1 και τέλος τα *TIER* – 2.

Η βασική αρχή που κρύβεται πίσω από το μοντέλου του *ALICE* είναι ότι κάθε χρήστης έχει ίδια και ίση πρόσβαση στους υπολογιστικούς πόρους για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων. Έτσι, το σύστημα που προκύπτει είναι πολύπλοκο και αποτελείται από εκατοντάδες στοιχεία σε κάθε κέντρο με τον αριθμό των κέντρων να είναι αρκετες δεκάδες. Μεγάλος αριθμός εργασιών προβλέπεται να εκτελούνται παράλληλα, μερικές από τις οποίες έχουν κάποιες επιμέρους διαδικασίες που ακολουθούν μια συγκεκριμένη λογική σειρά, όπως για παράδειγμα η ανακατασκευή των *rawdata*, παραγωγή μεγάλου αριθμού *MonteCarlo* δεδομένων, αλλά και μερικών που δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη σειρά, όπως η ανάλυση δεδομένων από κάθε χρήστη. Για να χρησιμοποιηθεί το σύστημα αποδοτικά, θα πρέπει οι κατανεμημένοι υπολογιστικοί και αποθηκευτικοί πόροι να είναι εντελώς διάφανοι σε κάθε χρήστη ο οποίος θα τα βλέπει σαν μια εννιαία οντότητα.

Σε ένα λειτουργικό *GRID*, η κατανομή των εργασιών στα αντίστοιχα υπολογιστικά κέντρα θα πρέπει να γίνεται δυναμικά, δηλαδή οι εργασίες να αναθέτονται σε εκείνα τα κέντρα που θα πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές ανεξάρτητα από την κατηγορία *TIER* στην οποία μπορεί να ανήκουν. Αυτή η εικόνα είναι μια εξέλιξη του συστήματος *MONARC* μιας και κάνει το μοντέλο



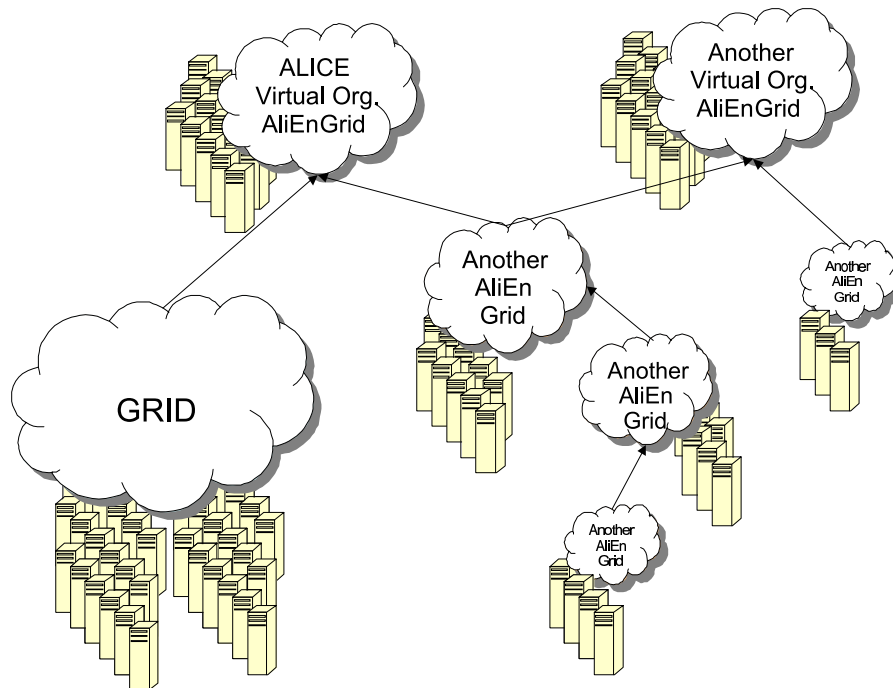
Σχήμα 10.2: Σχηματική αναπαράσταση της ιεραρχικής δομής που ακολουθείται στο μοντέλο που έχει υιοθετηθεί από το *ALICE*.

πιο ευπροσάρμοστο και επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των χρήσεων των πόρων. Το ελεύθερο, από την πλευρά της ανάθεσης εργασιών σε κάθε κέντρο με βάση το είδος του, αυτό μοντέλο έχει υιοθετηθεί από το *AliEn* και χρησιμοποιείται για να εξερευνήσει τις υπολογιστικές δυνατότητες που προσφέρονται από τα κέντρα που συμμετέχουν στο πείραμα *ALICE* κατά τη διάρκεια των *Physics Data Challenges*.

Το υπολογιστικό μοντέλο του *ALICE* προβλέπει ότι ένα αντίγραφο των πρωτογενών δεδομένων (*rawdata*) που παράγονται από το πείραμα θα αποθηκεύεται στο *TIER-0* που είναι στο *CERN*, ενώ ένα δεύτερο αντίγραφο αυτών θα διανεμηθεί στα εξωτερικά *TIER-1* κέντρα παρέχοντας έτσι έναν ασφαλή μηχανισμό αντιγραφής και αποθήκευσης. Η ανακατασκευή στο επίπεδο των *Event Summary Data (ESD)* θα μοιράζεται μεταξύ των *TIER-0* και *TIER-1* με το πρώτο να αναλαμβάνει την αρχική προσπάθεια ανακατασκευής και τα δεύ-

τερα να ακολουθούν. Η παραγωγή των Analysis Object Data (AOD) καθώς και η ανάλυση αλλά και η παραγωγή *MonteCarlo* δεδομένων θα πραγματοποιείται μεταξύ *TIER - 1* και *TIER - 2*.

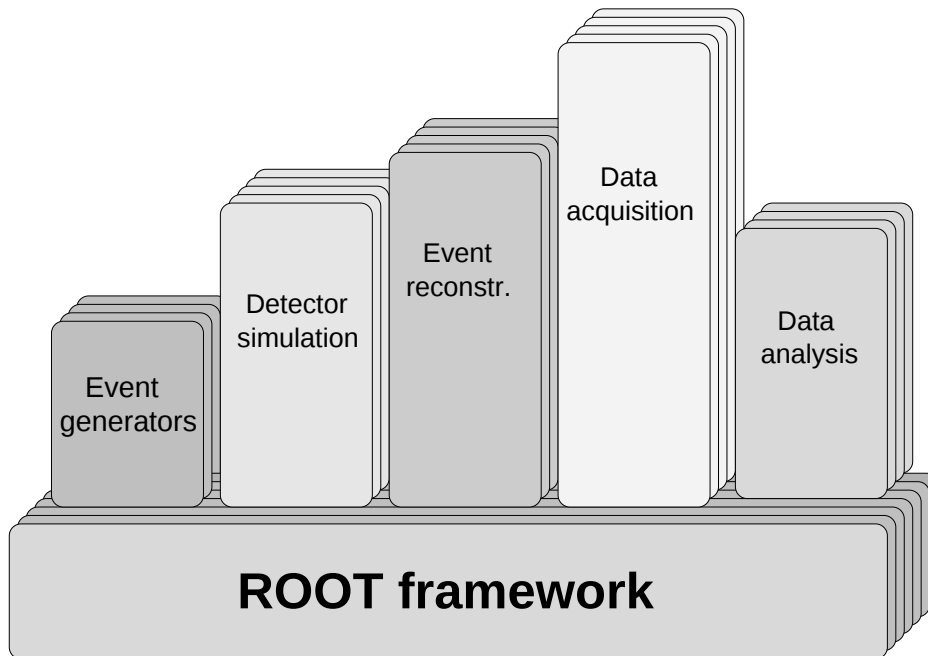
Στα πλαίσια λοιπόν αυτού του πολύπλοκου συστήματος που καλείται να ενώσει ανομοιογενή υποσυστήματα που θα παρέχονται από τα εκάστοτε υπολογιστικά κέντρα, τα πειράματα του *LHC* σχεδίασαν ένα μοντέλο και παρουσίασαν κάποιες υπηρεσίες που θα δίνουν τη δυνατότητα ύπαρξης μιας ομοιογενούς βάσης που καλείται **Virtual Organisation (VO)** και αντιπροσωπεύει κάθε πείραμα. Οι υπηρεσίες αυτές αναλαμβάνουν να επικοινωνούν με τα εξωτερικά και κατά βάση ανομοιογενή συστήματα, όπως δίνεται σχηματικά στο γράφημα 10.3, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στον κοινό χρήστη να εκμεταλεύεται στο έπακρο τους πόρους που του παρέχουν τα διάφορα υπολογιστικά κέντρα χωρίς να ενδιαφέρεται για το είδος των υπηρεσιών που παρέχουν: η όλη διαδικασία, όπως γίνεται κατανοητό, είναι τελείως διάφανη στα μάτια του χρήστη.



Σχήμα 10.3: Σχηματική αναπαράσταση της σύνδεσης του Virtual Organisation (VO) του *ALICE* με τα εξωτερικά συστήματα.

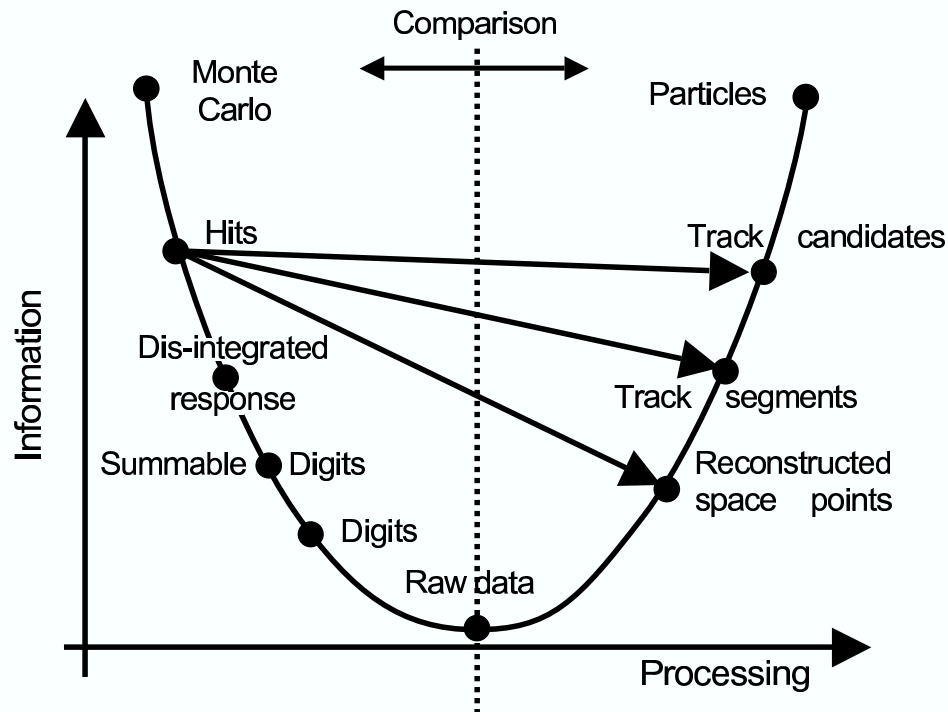
10.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΤΟΥ *ALICE*

Εδώ και αρκετά χρόνια, το πείραμα *ALICE* ξεκίνησε να αναπτύσσει το δικό του υλικό (*software*) που ονομάζεται *AliRoot* [6]. Από την αρχή μάλιστα του σχεδιασμού του πειράματος είχε γίνει φανερό ότι θα έπρεπε να γίνει μια μετάβαση από τεχνικές και γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον στα πειράματα προηγούμενης γενιάς, σε αντικειμενοστρεφείς γλώσσες προγραμματισμού (**Object Oriented - OO**). Η επιλογή λοιπόν ήταν να χρησιμοποιηθεί ως βάση του πακέτου *AliRoot* το πακέτο ανάλυσης *ROOT* [7], το οποίο χρησιμοποιεί ως κύρια γλώσσα τη *C++* που είναι μια καθαρά **object oriented** γλώσσα.



Σχήμα 10.4: Τα διάφορα στοιχεία που αποτελούν το πακέτο ανάλυσης *ROOT*.

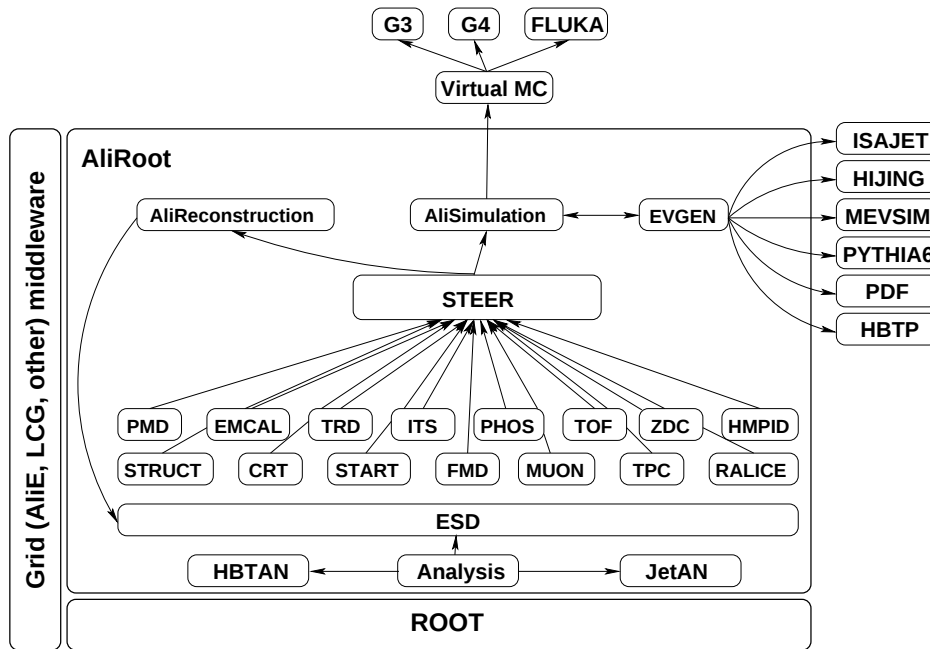
Το πακέτο *ROOT* που σχηματικά δίνεται στο γράφημα 10.4, παρέχει ένα σύνολο από τάξεις (**classes**) καθώς και ένα πλήρες περιβάλλον από προγραμματιστικά πακέτα ξεκινώντας από μοντέλα παραγωγής δεδομένων, προσομοιώσεις ανιχνευτών, ανακατασκευή γεγονότων καθώς και μια πλήρη πλατφόρμα ανάλυσης δεδομένων. Ένα από τα πλέον σημαντικά κομμάτια του *ROOT* είναι



Σχήμα 10.5: Η αλυσίδα που ακολουθείται για την επεξεργασία των δεδομένων στα πλαίσια του *AliRoot*.

Βασισμένο λοιπόν στο *ROOT*, το *AliRoot* η ροή των διαδικασιών του οποίου σχηματικά δίνονται στο γράφημα 10.5 παρέχει τις κληρονομημένες από αυτό το σύστημα ιδιότητες στο χρήστη. Προσομοιωμένα γεγονότα παράγονται από *Monte Carlo* μοντέλα. Οι παραγόμενες τροχιές αλληλεπιδρούν με τους ανιχνευτές μέσω των διαφόρων πακέτων προσομοίωσης όπως τα *GEANT3* [8], *FLUKA* [9], *GEANT4* [10]. Τα πακέτα αυτά παράγουν λεπτομερή πληροφορία γύρω από την απόθεση ενέργειας στους ανιχνευτές που συνήθως ονομάζεται *hit*. Τα *hits* στη συνέχεια μετατρέπονται σε μια ιδεατή ανιχνευτική απόκριση λαμβάνοντας υπόψη την επεξεργασία των ηλεκτρονικών σημάτων καθώς και το εν διγίτιζατιον. Η ανάγκη για πρόσμιξη διαφορετικών προσομοιωμένων γεγονότων οδήγησε στη δημιουργία ενός επιπλέον βήματος που είναι τα *summable*

digits. Τα ψηφία στη συνέχεια μετετρέπονται στη μορφή που θα δίνουν οι έξοδοι των ηλεκτρονικών που ονομάζονται πρωτογενή δεδομένα (raw data). Τα δεδομένα που παράγονται από *Monte Carlo* μοντέλα περιέχουν όλη την πληροφορία για τα παραγόμενα σωματίδια: την ταυτοποίηση τους αλλά και την ορμή τους. Καθώς τα γεγονότα ακολουθούν την προηγούμενη αλυσίδα προσομοίωσης, η πληροφορία αυτή μεταβάλλεται σε αυτήν που προκύπτει όταν σωματίδια διασχίζουν έναν ανιχνευτή. Οι αλγόριθμοι ανακατασκευής προσπαθούν να ανακατασκευάσουν την πληροφορία για την τροχιά και την ταυτότητα του σωματιδίου από την αντίστοιχη πληροφορία που περιέχεται στα raw data. Για να εκτιμηθεί και να αξιολογηθεί το software καθώς και η απόδοση του ανιχνευτή, προσομοιωμένα γεγονότα περνούν από όλο τον κύκλο και στο τέλος η ανακατασκευασμένη πληροφορία που αντιστοιχεί στα σωματίδια συγκρίνεται με αυτή από το *Monte Carlo*.



Σχήμα 10.6: Η δομή του πακέτου *AliRoot*.

Η δομή του πακέτου *AliRoot* δίνεται σχηματικά στο γράφημα 10.6. Το κεντρικό σύστημα είναι το *STEER* με το οποίο αλληλεπιδρούν όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα. Οι ανιχνευτές αποτελούν ξεχωριστά συστήματα και περιέχουν

τους αντίστοιχους κώδικες για προσομοίωση και ανακατασκευή. Οι αλληλεπιδράσεις με τους ανιχνευτές επιτυγχάνονται με τη βοήθεια του μηχανισμού **Virtual Monte Carlo (Virtual MC)** [11]. Ο αντίστοιχος μηχανισμός χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση διαφορετικών κάθε φορά πακέτων **event generators**.

Στα πλαίσια του πακέτου αυτού σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε μεταξύ άλλων και το λεγόμενο **Event Tag System** που αποτελεί κομμάτι του κεντρικού συστήματος του *AliRoot* η δομή καθώς και η χρησιμότητα του οποίου θα περιγραφεί λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 11

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΕΠΙΛΟΓΗΣ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ **Event Tag System** ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ *ALICE*

Τα πειράματα υψηλών ενεργειών παράγουν πολλά TeraBytes από δεδομένα ενώ τα μελλοντικά, όπως το *ALICE*, αναμένεται να παράγουν ακόμα περισσότερα. Η πλειονότητα των αναλύσεων πραγματοποιείται σε ένα κομμάτι των παραγόμενων αυτών δεδομένων. Τυπικά, τα γεγονότα είναι οργανωμένα σε αρχεία, τα οποία με τη σειρά τους είναι αποθηκευμένα σε μεγάλα συστήματα μαζικής αποθήκευσης. Για να πραγματοποιήσει κάποιος μια ανάλυση, διαδικασίες διαχείρισης αρχείων, όπως εύρεση των αρχείων που περιέχουν συγκεκριμένα γεγονότα, μεταφορά αυτών σε συγκεκριμένες προεπιλεγμένες τοποθεσίες - υπολογιστικά κέντρα που έχουν ανατεθεί για την ανάλυση, καθώς και αφαίρεση των αρχείων αυτών μετά το τέλος της διαδικασίας, είναι μερικές από τις ενέργειες στις οποίες καταναλώνεται το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου. Υπάρχουν τρεις γενικές στρατηγικές που αντιμετωπίζουν τα πιο πάνω προβλήματα: αυτόματη μεταφορά των αναγκαίων αρχείων κάθε φορά, αποθήκευση όλων των αρχείων σε μεγάλα συστήματα μαζικής αποθήκευσης [1] και αποστολή των εργασιών ανάλυσης στο υπολογιστικό εκείνο κέντρο του οποίου το σύστημα αποθήκευσης έχει τα αντίστοιχα δεδομένα που θα αναλυθούν [2, 3].

Όπως τονίστηκε και στο κεφάλαιο 10, το πείραμα *ALICE* έχει επιλέξει την τρίτη διαδρομή. Η όλη διαδικασία ξεκινάει από την ύπαρξη μιας πολύ γρήγορης και αξιόπιστης βάσης δεδομένων που περιγράφει τις οντότητες που υπάρχουν

στον κατάλογο αρχείων [4]. Στη βάση δεδομένων αυτή περιγράφεται η σχέση μεταξύ των αρχείων και των αντίστοιχων τοποθεσιών μέσα στον κατάλογο όπου τα αρχεία αποθηκεύονται. Κάθε αρχείο μέσα στον κατάλογο περιγράφεται, εκτός από την πραγματική του θέση μέσα σε αυτόν και από ένα σύνολο παραμέτρων που το χαρακτηρίζουν. Οι παράμετροι αυτές ονομάζονται **meta-data** πεδία, υπάρχουν μέσα στη βάση δεδομένων και θα μιλήσουμε αναλυτικά για αυτές στις επόμενες παραγράφους.

Σε επίπεδο γεγονότων δε, το *ALICE* αποφάσισε να επενδύσει κάποιο χρόνο και προσπάθεια στη δημιουργία ενός συστήματος, που καλείται **Event Tag System**, το οποίο θα μειώσει αισθητά το χρόνο που χρειάζεται για να αναλυθούν τα δεδομένα με το να παρέχει στον κώδικα κάθε χρήστη-φυσικού τα γεγονότα εκείνα που έχουν άμεσο ενδιαφέρον στην εκάστοτε μελέτη. Το **Event Tag System** είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει γρήγορη και αξιόπιστη προεπιλογή των γεγονότων που σχετίζονται με την κάθε ανάλυση. Η διαδικασία αυτή είναι απόλυτα ελεγχόμενη από το χρήστη ο οποίος είναι υπεύθυνος να ορίσει τα κριτήρια εκείνα, μέσα στον κώδικά του, που θα του επιτρέψουν ύστερα με την αλληλεπίδραση με τον αντίστοιχο μηχανισμό να αναλύσει μόνο εκείνα τα δεδομένα που τον ενδιαφέρουν. Το σύστημα αυτό είναι μια εξέλιξη του ήδη υπάρχοντος συστήματος που αναπτύχθηκε αρχικά στα πλαίσια του πειράματος *STAR* [5].

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα περιγράψουμε αρχικά τη δομή του καταλόγου αρχείων του πειράματος καθώς και τα **metadata** πεδία σε επίπεδο αρχείων. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε με λεπτομέρεια τη δομή του **Event Tag System**, τη θέση που έχει αυτό στο συνολικό πλαίσιο της ανάλυσης καθώς και το πώς δημιουργούνται τα αντίστοιχα αρχεία και πώς αυτά χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της ανάλυσης.

11.1 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΟΓΟΥ ΑΡΧΕΙΩΝ (**FILE CATALOG**)

Τα **metadata** πεδία σε επίπεδο **run** αλλά και αρχείου θα αποθηκευτούν στη βάση δεδομένων που περιγράφει τον κατάλογο αρχείων [6]. Μια δομή από διάφορα επίπεδα θα περιγραφεί μέσα στη βάση δεδομένων, ώστε να εξασφαλιστεί η μη επανάληψη της πληροφορίας. Για παράδειγμα, αρχεία που προέρχονται από ένα συγκεκριμένο **run** δεν χρειάζονται να περιγραφούν από μια συνθήκη που αφορά το **run** ένα προς ένα αφού αυτή η πληροφορία θα υπάρχει σε ένα ανώ-

τερο επίπεδο (αυτό του *run*). Ο κατάλογος των αρχείων έχει μια δενδροειδή μορφή, που εξασφαλίζει καλύτερη οργάνωση αλλά και τη δυνατότητα να μην επαναλαμβάνεται η πληροφορία σε επίπεδο αρχείου. Έτσι η προτεινόμενη δομή ξεκινά από το διαχωρισμό των αρχείων σε αυτά που προέρχονται από πραγματικά δεδομένα και σε αυτά που προέρχονται από προσομοιώσεις. Για την κάθε περίπτωση η διαδρομή θα είναι:

- /data/<Year>/<AcceleratorPeriod>/<RunNumber>/ (real data),
- /sim/<Year>/<ProductionType>/<RunNumber>/ (simulated data),

όπου < Year >, < AcceleratorPeriod > και < RunNumber > παίρνουν τιμές όπως 2007, LHC07a, 0001 αντίστοιχα και περιγράφουν τη χρονιά παραγωγής των δεδομένων, την περίοδο του επιταχυντή και την αριθμητική ταυτότητα του *run*. Από την άλλη μεριά, η παράμετρος < ProductionType > περιγράφει τις πληροφορίες για το συγκεκριμένο *run* της προσομοίωσης και μπορεί να πάρει τιμές όπως PDC06, PDC06_Residual κ.α. Η δομή αυτή των υποκαταλόγων παρέχει τη δυνατότητα να αποθηκευτούν διαφορετικά είδη αρχείων σε συγκεκριμένη τοποθεσία. Έτσι μπορούμε να χωρίσουμε τα αρχεία στις ακόλουθες κατηγορίες:

- raw/:Για αρχεία που περιέχουν raw data.
- reco/<PASSX>/cond/:Για αρχεία που περιέχουν πληροφορία για το calibration. Τα αρχεία αυτά αντιστοιχούν στο X πέρασμα του προγράμματος ανακατασκευής.
- reco/<PASSX>/ESD/:Για τα κύρια αρχεία που είναι προϊόντα του προγράμματος ανακατασκευής, όπως το AliESDs.root(Event Summary Data - ESD) και τα tag αρχεία. Τα αρχεία αυτά αντιστοιχούν στο X πέρασμα του προγράμματος ανακατασκευής.

Τα αρχεία τώρα που θα αποθηκευτούν στον κάθε κατάλογο, θα έχουν ένα πρόσθετο αριθμητικό στοιχείο μπροστά από το πραγματικό τους όνομα, που θα τα διαχωρίζει από τα συγγενή αρχεία του ίδιου *run*. Έτσι για παράδειγμα στην περίπτωση των ESD η ονομασία του αρχείου θα είναι:

< S >.AliESDs.root

όπου το $\langle S \rangle$ είναι το αριθμητικό πρόθεμα του αντίστοιχου αρχείου των raw data. Έτσι διαφορετικοί υποκατάλογοι που αντιστοιχούν σε διαφορετικό *run* μπορεί να έχουν το ίδιο όνομα αρχείων αλλά με διαφορετικό περιεχόμενο. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση όμως, τόσο η δενδοειδής αυτή δομή, όσο και το GUID που είναι το κύριο και μοναδικό κλειδί του κάθε αρχείου μέσα στον κατάλογο, μας εγγυώνται ότι τα αρχεία αυτά θα είναι διαχωρίσιμα.

11.1.1 Metadata σε επίπεδο αρχείων (file metadata)

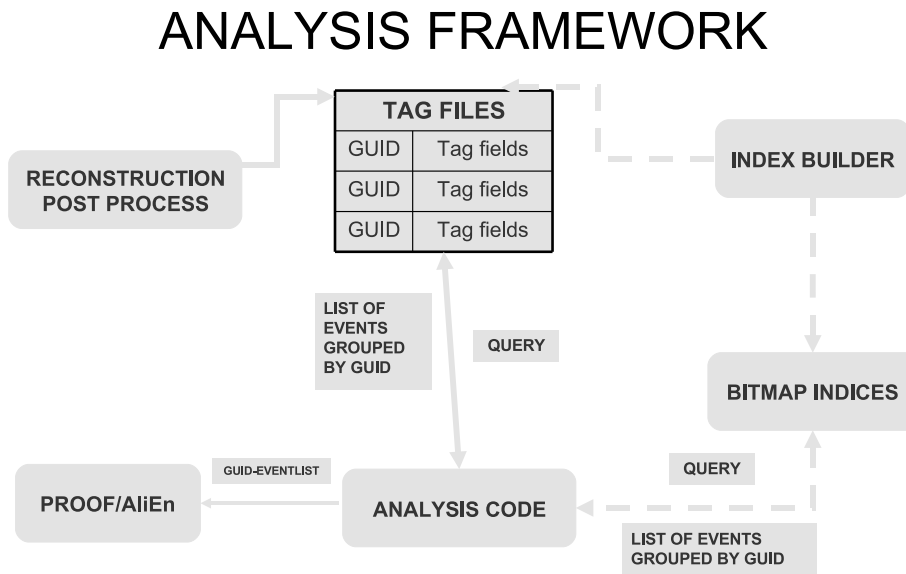
Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, απόδοση κάποιων πεδίων σε δεδομένα που τα χαρακτηρίζουν και τα περιγράφουν οδηγεί σε πιο εύκολη οργάνωσή τους και πιο εύκολη και αξιόπιστη ανάκλησή τους κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Σε επίπεδο *run* αλλά και αρχείων το πείραμα αποφάσισε να υιοθετήσει τα πεδία που περιγράφονται στον πίνακα 11.1.

Όνομα	Τύπος παραμέτρου	Πηγή
run comment	text	DAQ logbook
run type	text	DAQ logbook
run start time	date (yyyymmddhhmmss)	DAQ logbook
run stop time	date (yyyymmddhhmmss)	DAQ logbook
run stop reason	text	DAQ logbook
magnetic field setting	text	DCS
collision system	text	DCS
collision energy	text	DCS
trigger class	text	DAQ logbook
detectors present in run	bitmap 0=not included, 1=included	DAQ logbook
number of events in this run	integer	DAQ logbook
run sanity	flag bit or bit mask	manually

Πίνακας 11.1: Τα πεδία metadata που χαρακτηρίζουν κάθε *run*.

11.2 ΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΟ *ALICE*

Αφού είδαμε πώς μπορεί κάποιος να ζητήσει και να εξάγει τα αρχεία που τον ενδιαφέρουν από τον κατάλογο, ας προχωρήσουμε ένα βήμα πιο πέρα: στην επιλογή των γεγονότων από τα επιλεγμένα αρχεία που θα περάσουν από τον κώδικα της ανάλυσης. Η διαδικασία αυτή αντιμετωπίζεται από το λεγόμενο Event Tag System[9] το οποίο θα παρέχει στον κώδικα κάθε χρήστη μόνο τα γεγονότα εκείνα που ικανοποιούν τις συνθήκες που ο ίδιος έχει επιβάλλει. Βάση του συστήματος αυτού είναι τα *tag* αρχεία που είναι κατά βάση *root* αρχεία με δένδροειδή δομή και τα οποία περιέχουν την πληροφορία σχετικά με το εκάστοτε *ESD* αρχείο με το οποίο σχετίζονται. Το πλαίσιο ανάλυσης, το οποίο δίνεται σχηματικά στο γράφημα 11.1 περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:



Σχήμα 11.1: Το πλαίσιο ανάλυσης του πειράματος *ALICE* και η θέση του Event Tag Systemμέσα σε αυτό.

- Το **offline** πλαίσιο με το αντίστοιχο πρόγραμμα ανακατασκευής, δημιουργεί τα *tag* αρχεία ως το τελευταίο βήμα της όλης διαδικασίας ανακατασκευής. Η δημιουργία αυτών των αρχείων έχει προβλεφθεί να γίνεται και από τους χρήστες σε κάθε χρονική στιγμή (λεπτομέρειες για τον τρόπο που γίνεται αυτό θα δωθούν πιο κάτω). Τα αρχεία αυτά έχουν δενδροειδή δομή και ουσιαστικά περιέχουν πληροφορίες για κάθε αρχείο ομαδοποιημένες με βάση το πρωτεύον κλειδί κάθε *ESD* που όπως είπαμε είναι το *GUID*.
- Ακολουθώντας τη ροή του διαγράμματος, ο αλγόριθμος του **Index Builder** του **Grid Collector**[10, 11] (το πακέτο έχει αναπτυχθεί για το πείραμα *STAR*) θα λαμβάνει τα αρχεία αυτά και θα παράγει τους αντίστοιχους **bitmap** δείκτες.
- Παράλληλα ο χρήστης θα γράφει τον κώδικα που θα χρησιμοποιήσει στην ανάλυσή του, μέσα στον οποίο θα επιβάλλει τα κριτήρια εκείνα που επιθυμεί ανάλογα με το είδος της ανάλυσης.
- Τα κριτήρια αυτά θα χρησιμοποιηθούν για να εξαχθεί μια λίστα από γεγονότα που τα ικανοποιούν ομαδοποιημένα ως προς *GUID*. Η λίστα αυτή προέρχεται από απευθείας αλληλεπίδραση με τα *tag* αρχεία αυτή τη στιγμή, ενώ στο μέλλον προβλέπεται να δημιουργείται μέσω της αλληλεπίδρασης με τους **bitmap** δείκτες (για αυτό το λόγο στο σχήμα 11.1 το κομμάτι που αφορά τον αλγόριθμο του **Index Builder** ενώνεται με διακεκομμένες γραμμές αφού είναι προς το παρόν ανενεργό).
- Το αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας θα τροφοδοτείται είτε στο *AliEn* [4], είτε στα **PROOF clusters** [12] έτσι ώστε να ανλυθούν μόνο εκείνα τα γεγονότα που ικανοποιούν τα κριτήρια που έχουν επιβληθεί από το χρήστη.

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι το όλο πλαίσιο της ανάλυσης βασίζεται στην ύπαρξη ενός **Event Tag System** το οποίο θα παρέχει γρήγορη και αξιόπιστη πρόσβαση στα γεγονότα που ενδιαφέρουν την εκάστοτε ανάλυση. Το σύστημα αυτό, του οποίου η δομή θα περιγραφεί στην επόμενη παράγραφο, υπάρχει μέσα στο πακέτο *AliRoot* από τον Ιούνιο του 2005.

11.2.1 Δομή του **Event Tag System**

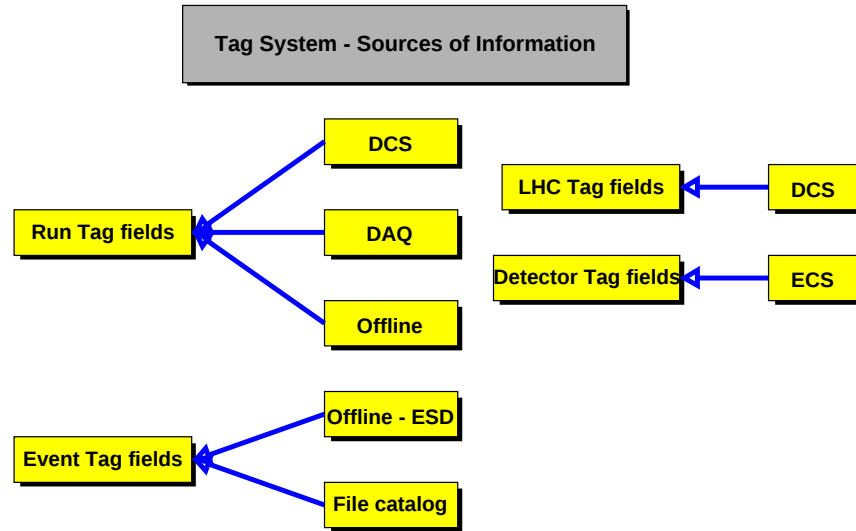
Το Event Tag System σύστημα που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στα πλαίσια του πειράματος *ALICE*, έχει ως σκοπό να προσφέρει μια περίληψη των πιο χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με το κάθε είδος ανάλυσης που περιέχεται σε κάθε αρχείο *AliESDs.root* [9]. Περιλαμβάνει τέσσερα επίπεδα πληροφορίας:

- Επίπεδο *RUN*: Αποτελείται από τα πεδία που περιγράφουν τις συνθήκες κάθε *RUN*. Οι τιμές των πεδίων αυτών θα προέρχονται κυρίως από το Detector Control System (DCS) [13], το Data Acquisition System (DAQ) [14] καθώς και από το λογισμικό που έχει επιφορτιστεί με την ανακατασκευή των γεγονότων [4, 15].
- Επίπεδο *LHC*: Αποτελείται από πεδία που περιγράφουν την κατάσταση και τις συνθήκες του επιταχυντή [16] για κάθε *run* του *ALICE* και θα προέρχονται από το *DCS* [13] που έχει άμεση επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου της μηχανής.
- Επίπεδο ανιχνευτών: Αποτελείται από πεδία που περιγράφουν τους ανιχνευτές που ήταν ενεργοί κατά τη διάρκεια αυτού του *run*. Η πληροφορία προέρχεται από το Experimental Control system (ECS) [17] καθώς και από το *AliRoot* [15].
- Επίπεδο γεγονότος: Αποτελείται από πεδία που περιγράφουν κάθε γεγονός. Τα πεδία αυτά σχετίζονται κυρίως με φυσικές παραμέτρους αν και υπάρχουν πληροφορίες και για τη θέση των αρχείων μέσα στον κατάλογο. Κατά συνέπεια οι τιμές των πεδίων αυτών προέρχονται τόσο από το *AliRoot* [15], όσο και από το *AliEn* [4].

Οι διάφορες πηγές των πεδίων των τεσσάρων αυτών επιπέδων φαίνονται στο σχήμα 11.2.

Ο κώδικας που ελέγχει όλα τα επίπεδα πληροφοριών του Event Tag System έχει ενταχθεί από τον Ιούνιο του 2005 στο πακέτο *AliRoot* και πιο συγκεκριμένα στο κεντρικό μέρος του που είναι το *STEER module*. Έτσι αντίστοιχα έχουμε τις ακόλουθες τάξεις:

- **Run Tags**: Η τάξη που ελέγχει αυτό το επίπεδο καλείται *AliRunTag*. Τα πεδία της περιγράφονται στον πίνακα A.1 ενώ οι μέθοδοι που τα ελέγχουν αναγράφονται στον πίνακα A.2.



Σχήμα 11.2: Οι πηγές των διαφορετικών επιπέδων του συστήματος.

- **LHC Tags:** Η τάξη που ελέγχει αυτό το επίπεδο καλείται *AliLHCTag*. Τα πεδία της περιγράφονται στον πίνακα ;; ενώ οι μέθοδοι που τα ελέγχουν αναγράφονται στον πίνακα A.4.
- **Detector Tags:** Η τάξη που ελέγχει αυτό το επίπεδο καλείται *AliDetectorTag*. Τα πεδία της περιγράφονται στον πίνακα A.5 ενώ οι μέθοδοι που τα ελέγχουν αναγράφονται στον πίνακα A.6.
- **Event Tags:** Η τάξη που ελέγχει αυτό το επίπεδο καλείται *AliEventTag*. Τα πεδία της περιγράφονται στον πίνακα A.8 ενώ οι μέθοδοι που τα ελέγχουν αναγράφονται στον πίνακα A.10.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τα πεδία του συστήματος καθώς και για τις μεθόδους που τα ελέγχουν δίνονται στο παράρτημα Α'. Όπως είπαμε τα τελικά *tag* αρχεία που προκύπτουν θα είναι αρχεία *root* που θα έχουν δενδροειδή μορφή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 11.3.



Σχήμα 11.3: Η δενδροειδής μορφή ενός αρχείου *tag* όπως αυτό προκύπτει από το πρόγραμμα ανακατασκευής του *AliRoot*.

11.2.2 Δημιουργία των αρχείων

Όπως είπαμε και στην προηγούμενη παράγραφο τα *tag* αρχεία είναι αρχεία *root* που έχουν δενδροειδή μορφή. Η δημιουργία τους μπορεί να γίνει με δυο διαφορετικούς τρόπους:

- **On the fly:** Σε αυτή την περίπτωση τα αρχεία δημιουργούνται στο τελευταίο βήμα του προγράμματος ανακατασκευής όπως φαίνεται και στο σχήμα 11.4. Η διαδικασία αυτή ενεργοποιείται ακριβώς μετά το γέμισμα κάθε *ESD* αρχείου από την τάξη *AliReconstruction* που ευθύνεται για την οργάνωση του όλου πακέτου της ανακατασκευής των γεγονότων. Στη συνέχεια καλείται η μέθοδος *AliReconstruction::CreateTags(TFile *file)* που έχοντας ως βάση το *ESD* που έχει ήδη δημιουργηθεί αναλαμβάνει τη δημιουργία του *tag* αρχείου που έχει την ακόλουθη ονομασία: *RunRunId.EventFirstEventId_LastEventId.ESD.tag.root* [9]. Κατά

αυτό ακριβώς τον τρόπο πραγματοποιείται και η δημιουργία των επίσημων *tag* αρχείων του πειράματος.

- **Post process:** Μετά τη δημιουργία και την καταχώριση των *AliESDs.root* αρχείων στον κατάλογο, κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει τα δικά του *tag* αρχεία για τους σκοπούς της ανάλυσής του με μια διαδικασία έξω από το πρόγραμμα ανακατασκευής.

```
pchrist@dimitra:~/ALICE/Simulation
```

```
File Edit View Terminal Tabs Help
```

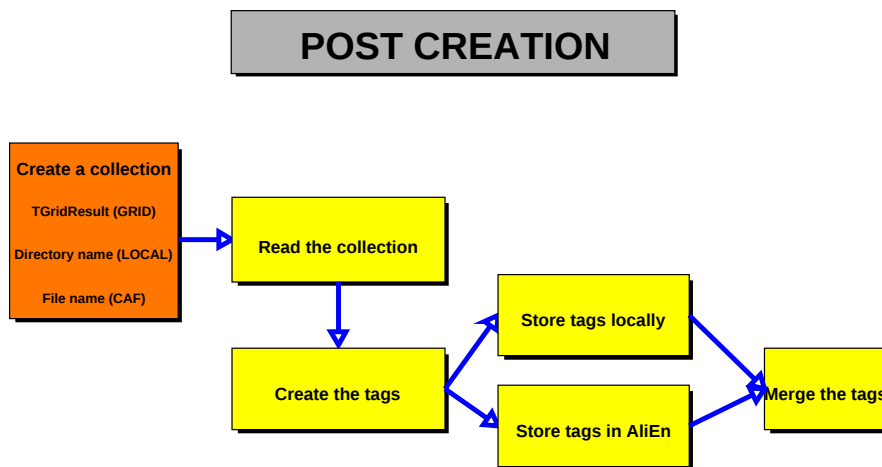
```
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3MenHandler::Binary2Memory: File] File Size == 0  
[Alil3Evaluate::AssignIDs() : You need to compile with the do_mc flag!  
I-AlReconstruction::FillESD: Execution time: R:0.27s C:0.02s  
I-AlReconstruction::FillTriggerESD: Filling trigger information into the ESD  
E-AlRunLoader::LoadTriggers: Can not find trigger tree named TreeCT in file ./Trigger.root  
W-AlReconstruction::FillTriggerESD: No trigger can be loaded! The trigger information is not stored in the ESD !  
TooFewTracks  
I-AlReconstruction::Run: Execution time for filling ESD : R:8.64s C:1.98s  
I-AlReconstruction::CreateTag: Creating the tags.....  
I-AlReconstruction::CreateTag: writing tags to file Run0_1_ESD.tag.root  
pcrist@dimitra Simulation]$
```

MUON FILTER

Σχήμα 11.4: Εικόνα που δείχνει τη δημιουργία των *tag* αρχείων ως το τελευταίο βήμα του προγράμματος ανακατασκευής των γεγονότων. Κατά αυτό ακριβώς τον τρόπο πραγματοποιείται και η δημιουργία των επίσημων *tag* αρχείων του πειράματος.

Ειδικά για τη δεύτερη αυτή περίπτωση, υπάρχει πρόβλεψη για κάθε πιθανή τοποθεσία αποθήκευσης του *ESD* αρχείου. Τα βήματα που ακολουθούνται περιγράφονται πιο κάτω:

Θεωρούμε ότι το πρόγραμμα ανακατασκευής γεγονότων έχει ολοκληρώσει τη δημιουργία όλων των αρχείων και ειδικότερα των *AliESDs.root* τα οποία έχουν καταχωρηθεί με επιτυχία στον κατάλογο. Στη συνέχεια ο οποιοσδήποτε χρήστης μπορεί να διαβάσει τη λίστα από τα αρχεία αυτά και να δημιουργήσει τα *tag* αρχεία τα οποία έχει τη δυνατότητα να τα αποθηκεύσει είτε στο τοπικό του σύστημα ή ακόμα και στον κατάλογο των αρχείων. Ως ένα τελευταίο βήμα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μόνο ένα *tag* αρχείο που θα προκύψει από τη σύνθεση των επιμέρους που έχει μόλις δημιουργήσει. Η όλη διαδικασία αναπαριστάται γραφικά στο σχήμα 11.5. Λεπτομέρειες γύρω από τον τρόπο δημιουργίας των αρχείων *tag* ακολουθώντας τη δεύτερη διαδικασία δίνονται στο [9].

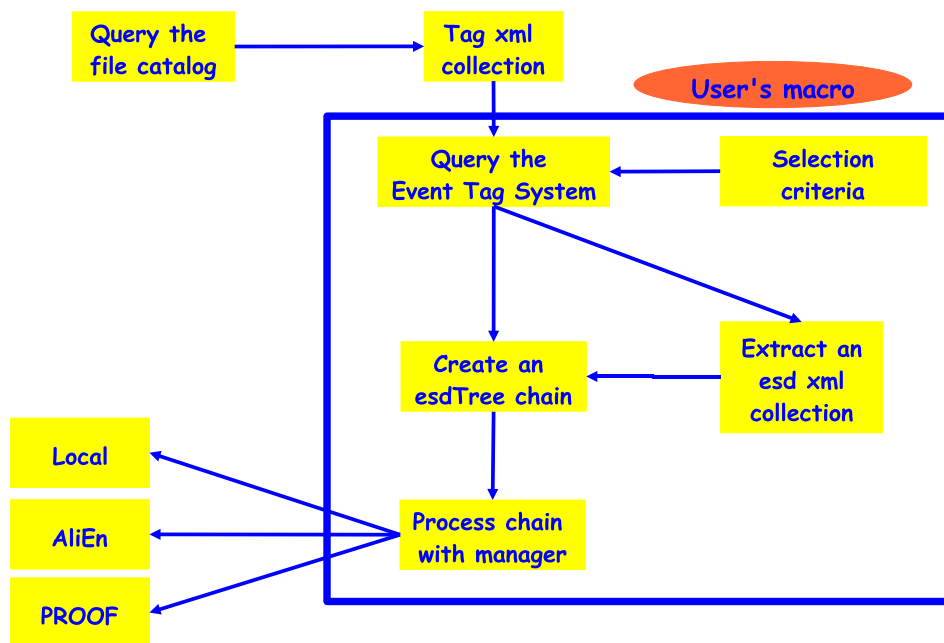


Σχήμα 11.5: Η διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία των αρχείων *tag*.

11.2.3 Ανάλυση με τη βοήθεια του **Event Tag System**

Στην παράγραφο αυτή θα δούμε συνοπτικά πώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το Event Tag System για να αναλύσουμε δεδομένα. Αναλυτική περιγραφή αλλά και λεπτομερείς οδηγίες δίνονται στο παράρτημα ;;

Το σχήμα 11.6, δείχνει τη ροή της διαδικασίας ανάλυσης. Το πρώτο βήμα γίνεται με την αλληλεπίδραση με τον κατάλογο αρχείων του *GRID* από την οποία δημιουργούμε μια λίστα αρχείων *tag* που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Στη συνέχεια ορίζουμε τα κριτήρια που πρέπει τα γεγονότα να ικανοποιούν: τα κριτήρια αυτά καθορίζονται ανάλογα με την αντίστοιχη ανάλυση. Έχοντας αυτά τα δυο στοιχεία, ζητούμε από το *Event Tag System* να δημιουργήσει είτε μια αλυσίδα αρχείων και γεγονότων (γεγονότα που πληρούν τα επιβληθέντα κριτήρια) ή μια άλλη συλλογή *ESD* αρχείων από τα οποία πάλι εξάγουμε τα γεγονότα που ικανοποιούν τα κριτήρια μας. Στο τέλος, η λίστα αυτή των γεγονότων αναλύεται είτε τοπικά, είτε στο *GRID* ή ακόμα και στο *PROOF*.



Σχήμα 11.6: Η ροή της διαδικασίας ανάλυσης: Έχοντας ως παραμέτρους μια συλλογή αρχείων tag (tag xml collection) την οποία δημιουργούμε με την αλληλεπίδραση με τον κατάλογο αρχείων του *GRID* καθώς και τα κριτήρια επιλογής, ζητούμε από το Event Tag System και είτε παίρνουμε την αλυσίδα των αρχείων μαζί με τη λίστα των γεγονότων που πληρούν τα κριτήρια που επιβλήθηκαν ή δημιουργούμε μια καινούρια συλλογή αρχείων *ESD* από την οποία πάλι δημιουργούμε την αλυσίδα των γεγονότων που πληρούν τα κριτήρια. Τα γεγονότα αυτά μπορούν να αναλυθούν είτε τοπικά, είτε στο *GRID* ή ακόμα και στο *PROOF*.

Κεφάλαιο 12

Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ *ALICE*

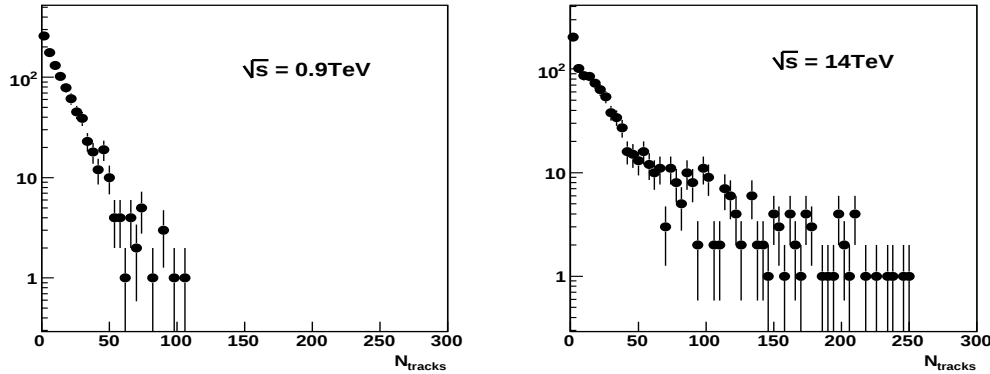
Η μέθοδος της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου, προτάθηκε και υιοθετήθηκε και από το πείραμα *ALICE* [1]. Έτσι επεκτάθηκε η μέθοδος και στις υψηλές ενέργειες του *LHC* με τη μελέτη προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας όλα τα στοιχεία που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Μελετήθηκαν αλληλεπιδράσεις $p + p$ σε ενέργειες $\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ αλλά και $Pb + Pb$ με διάφορες κεντρικότητες σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 5.5\text{TeV}$. Τα γεγονότα αυτά έχουν παραχθεί με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης του πειράματος που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 10 στα πλαίσια των δοκιμών του συστήματος *GRID*, πιο γνωστών ως **Physics Data Challenged - PDCs**. Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε όλος ο μηχανισμός του *GRID*: τα δεδομένα είχαν διανεμηθεί στα διάφορα υπολογιστικά κέντρα και η ανάλυσή τους έγινε με βάση τη ροή που περιγράφηκε με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 11.

12.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ $p + p$

Στα πλαίσια της προετοιμασίας και μελέτης της απόδοσης των ανιχνευτών του πειράματος *ALICE*, παράχθηκε μεγάλος αριθμός δεδομένων **minimum bias** $p + p$ σε δυο ενέργειες του *LHC*: $\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$. Λεπτομέρειες για τη στατιστική των δειγμάτων που αναλύθηκαν φαίνονται στον πίνακα 12.1. Προκειμένου δε να ελεγχθεί η σταθερότητα των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν γεγονότα από δυο περιόδους παραγωγής (*PDC05* και *PDC06*) όπως φαίνεται και στον πίνακα 12.1 [1].

Αλληλεπίδραση	$\sqrt{s}[\text{TeV}]$	Στατιστική	Περίοδος παραγωγής
$p + p$	0.9	200K	PDC06
$p + p$	14	1M	PDC05
$p + p$	14	1M	PDC06

Πίνακας 12.1: Η ενέργεια και ο αντίστοιχος αριθμός των γεγονότων που αναλύθηκε για τις αλληλεπιδράσεις $p + p$ καθώς και η περίοδος παραγωγής τους.

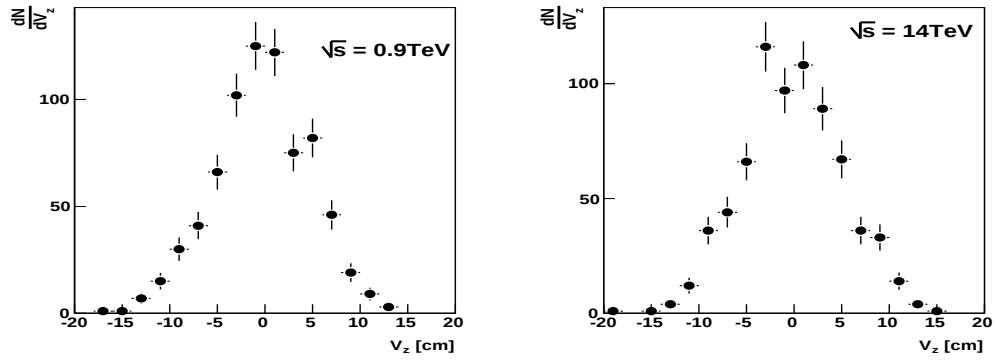


Σχήμα 12.1: Η κατανομή των τροχιών όπως προκύπτει από την ανακατασκευή γεγονότων $p + p$ σε ενέργειες $\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ (αριστερό γράφημα) και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ (δεξί γράφημα).

Πριν παραθέσουμε τα κύρια αποτελέσματα αυτής της μελέτης, καλό θα ήταν να περιγράψουμε μερικές βασικές κατανομές των δεδομένων, τόσο σε επίπεδο γεγονότος όσο και σε επίπεδο τροχιών. Το σχήμα 12.1 δείχνει την κατανομή των τροχιών όπως αυτές προκύπτουν από το πρόγραμμα ανακατασκευής του πειράματος, χωρίς την επιβολή κάποιας διόρθωσης για τις ενέργειες $\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ (αριστερό γράφημα) και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ (δεξί γράφημα).

Το σχήμα 12.2 δείχνει την κατανομή του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης στον άξονα των δεσμών για τις δυο διαφορετικές ενέργειες.

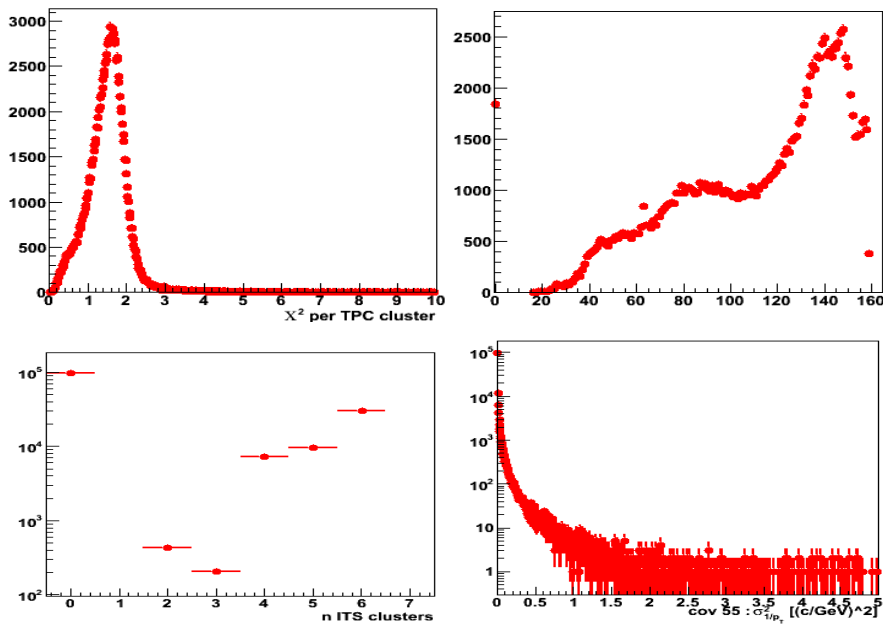
Σε αυτό το σημείο, θα ήταν καλό να παραθέσουμε τα γραφήματα εκείνα που δίνουν τον ορισμό της τροχιάς που επιλέγεται για την ανάλυση. Ο καθο-



Σχήμα 12.2: Η κατανομή της τιμής του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης στον άξονα της δέσμης όπως προκύπτει από την ανακατασκευή γεγονότων $p + p$ σε ενέργειες $\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ (αριστερό γράφημα) και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ (δεξί γράφημα).

ρισμός της τροχιάς γίνεται με τη μελέτη συγκεκριμένων παραμέτρων και την επιβολή περιορισμών στις κατανομές τους. Τα κριτήρια που επιβλήθηκαν είχαν ως στόχο να απομακρύνουν τροχιές που προέρχονται από δευτερεύουσες αλληλεπιδράσεις και όχι από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης. Μερικά από τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούν οι τροχιές είναι:

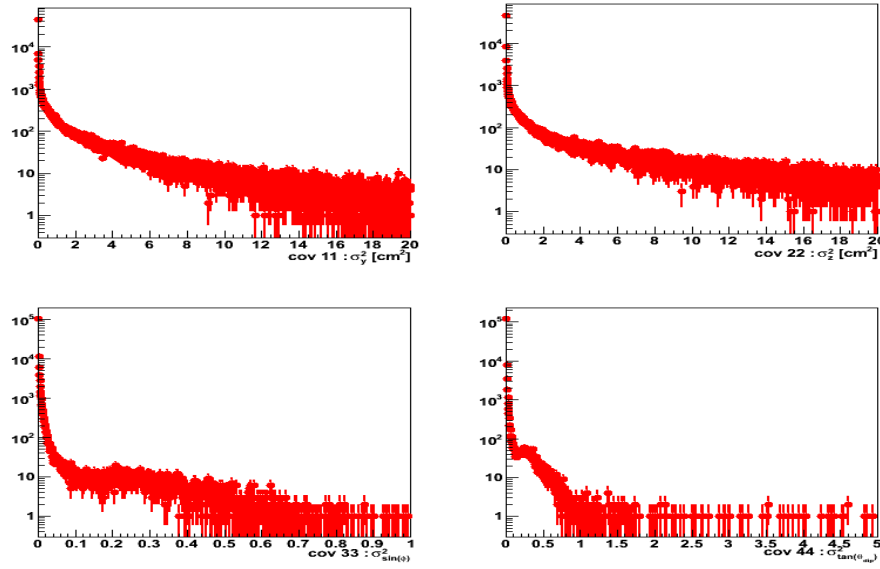
- Να υπάρχει τουλάχιστον ένα συσσωμάτωμα (cluster) στον *ITS* (κάτω αριστερά γράφημα του σχήματος 12.3).
- Ο ελάχιστος αριθμός clusters στον *TPC* να είναι 50 (πάνω δεξιά γράφημα του σχήματος 12.3).
- Η μέγιστη τιμή της παραμέτρου χ^2 για κάθε cluster του *TPC* να είναι 3.5 (πάτω αριστερά γράφημα του σχήματος 12.3).
- Η μέγιστη τιμή της διακριτικής ικανότητας στη μέτρηση της θέσης της τροχιάς στον κάθετο άξονα ως προς τη δέσμη να είναι 2 (πάνω αριστερά γράφημα του σχήματος 12.4).
- Η μέγιστη τιμή της διακριτικής ικανότητας στη μέτρηση της θέσης της



Σχήμα 12.3: Ο αριθμός των clusters που έχουν οι τροχιές σε *ITS* και *TPC* (κάτω αριστερά και πάνω δεξιά γραφήματα αντίστοιχα) καθώς και η κατανομή της χ^2 ανά TPC cluster (πάνω αριστερά) όσο και η κατανομή της διακριτικής ικανότητας στη μέτρηση της καμπυλότητας της τροχιάς (κάτω δεξιά γράφημα).

τροχιάς στον άξονα της δέσμης να είναι 2 (πάνω δεξιά γράφημα του σχήματος 12.4).

- Η μέγιστη τιμή της διακριτικής ικανότητας στη μέτρηση του ημιτόνου της αξιμουθιακής γωνίας της τροχιάς να είναι 0.5 (κάτω αριστερά γράφημα του σχήματος 12.4).
- Η μέγιστη τιμή της διακριτικής ικανότητας στη μέτρηση της εφαπτομένης της πολικής γωνίας της τροχιάς να είναι 0.5 (κάτω δεξιά γράφημα του σχήματος 12.4).
- Η μέγιστη τιμή της διακριτικής ικανότητας στη μέτρηση της καμπυλότητας της τροχιάς να είναι 2 (κάτω δεξιά γράφημα του σχήματος 12.3).



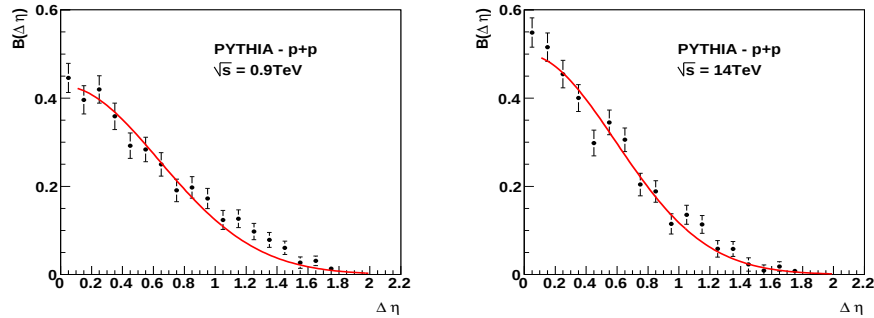
Σχήμα 12.4: Οι κατανομές των διακριτικών ικανοτήτων στη μέτρηση της y και z θέσης της τροχιάς (δυσό πάνω γραφήματα) αλλά και στη μέτρηση του ημιτόνου της αζιμουθιακής γωνίας (κάτω αριστερά) και της εφαπτομένης της πολικής γωνίας της τροχιάς (κάτω δεξιά).

- Η τροχιά θα έπρεπε, κατά την προσπάθεια συσχέτισής της από το πρόγραμμα ανακατασκευής με το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης, να έχει περάσει τόσο από τον *TPC* όσο και από τον *ITS*.

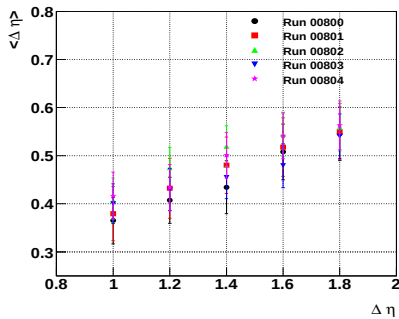
12.1.1 ΜΗ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΡΟΧΙΕΣ

Ως πρώτο βήμα, ακολουθώντας την πορεία της έρευνας των πειραματικών δεδομένων, επιλέχθηκε η μελέτη των συσχετισμών φορτίου για μη ταυτοποιημένα σωματίδια. Για όλα τα στάδια της ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι κεντρικοί ανιχνευτές του πειράματος *ALICE* (κυρίως οι *ITS* - *TPC* - *TOF*) ενώ αν δεν αναφερθεί διαφορετικά, ο φασικός χώρος που αναλύθηκε αποτελείται από αυτόν που καθορίζεται από τους ανιχνευτές αυτούς στην κεντρική περιοχή: $|\eta| < 1.0$ και $P_T > 0.1 \text{ GeV}$ [2].

Το σχήμα 12.5 δείχνει ενδεικτικά τις κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου φορτίου ως προς τις διαφορές στην ψευδοωκότητα των μη ταυτοποιημένων σωματιδίων για τις δυο ενέργειες ($\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$) [1]. Στις κατανομές έχει γίνει μια προσαρμογή με Gaussian συνάρτηση. Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε και στις δυο περιπτώσεις είναι αυτός που παρέχουν οι ανιχνευτές της κεντρικής περιοχής.



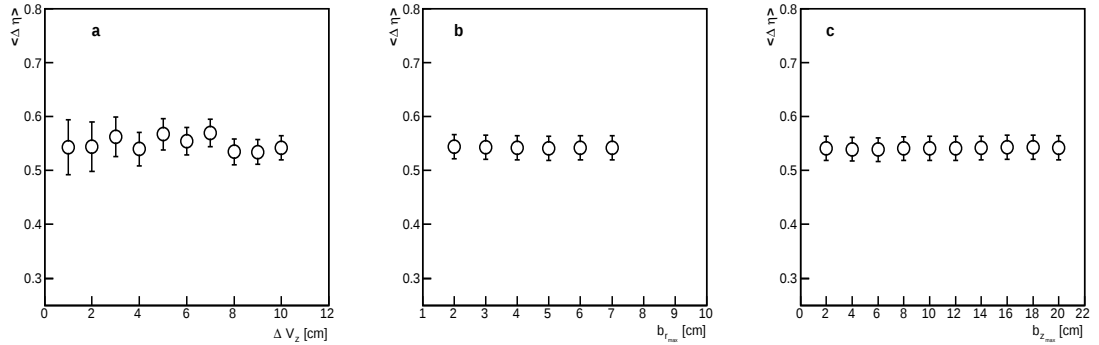
Σχήμα 12.5: Η κατανομή της Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς στην ψευδοωκότητα για μη ταυτοποιημένα σωματίδια. Η ανάλυση έγινε σε γεγονότα $p + p$ σε ενέργειες $\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ (αριστερό γράφημα) και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ (δεξί γράφημα).



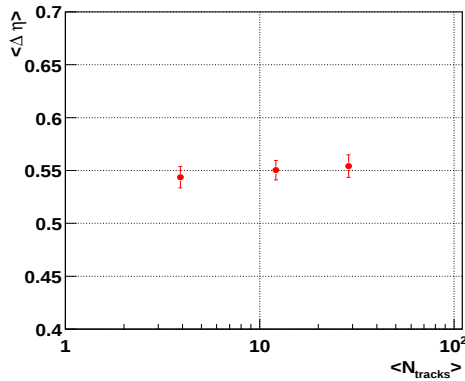
Σχήμα 12.6: Η εξάρτηση του εύρους της Balance Function από το διάστημα της ψευδοωκότητας που μελετάται. Τα γεγονότα που αναλύθηκαν προέρχονται από προσομοιώσεις $p + p$ αλληλεπιδράσεων σε ενέργεια $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$.

Εξάρτηση από τον αναλυόμενο φασικό χώρο

Μια από τις πρώτες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της προετοιμασίας του πειράματος *ALICE* και της εφαρμογής της συνάρτησης ισοζυγίου στις αντίστοιχες ενέργειες του *LHC* ήταν η εξάρτηση του εύρους της **Balance Function** από το εύρος του φασικού χώρου $\Delta\eta$ που αναλύεται [1]. Έτσι μελετήθηκαν οι συσχετισμοί μη ταυτοποιημένων σωματιδίων χρησιμοποιώντας τους ανιχνευτές της κεντρικής περιοχής. Το διάστημα της ψευδοωκότητας μειώθηκε σταδιακά με βήμα 0.1 ξεκινώντας από $|\Delta\eta| = 1.0$, πάντα όμως γύρω από την περιοχή της κεντρικής ωκότητας. Το σχήμα 12.6 δείχνει την εξάρτηση του εύρους της **Balance Function** από το διάστημα της ψευδοωκότητας που αναλύθηκε. Η εξάρτηση αυτή παρουσιάζεται για διάφορες περιόδους παραγωγής δεδομένων αλλά και για όλο το δείγμα, ενώ τα σφάλματα που φαίνονται στο σχήμα αντιστοιχούν στα στατιστικά. Παρατηρούμε μια γραμμική συμπεριφορά του εύρους, κάτι που έχει ήδη εμφανιστεί σε χαμηλότερες ενέργειες του *SPS* και *RHIC*. Έτσι για να συγκριθούν άμεσα τα αποτελέσματα των πειραμάτων των δυο επιταχυντικών συστημάτων (*LHC* και *RHIC*), η **Balance Function** πρέπει να αναλυθεί σε όλο τον διαθέσιμο από τους ανιχνευτές φασικό χώρο.



Σχήμα 12.7: Η εξάρτηση του εύρους της **Balance Function** από τα διάφορα κριτήρια επιλογής τόσο σε επίπεδο γεγονότων, όσο και σε επίπεδο τροχιών: ως προς το εύρος της κατανομής του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης στο z άξονα (a) και ως προς το εύρος των κατανομών των αποστάσεων των τροχιών από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης στην ακτινική συνιστώσα (b) καθώς και στον άξονα της δέσμης (c).



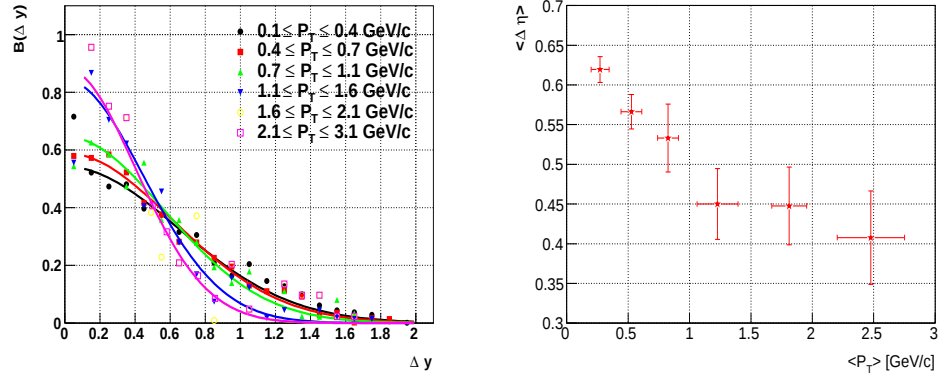
Σχήμα 12.8: Η εξάρτηση του εύρους της Balance Function για όλα τα φορτισμένα σωματίδια από την μέση πολλαπλότητα των γεγονότων.

Μελέτη συστηματικών σφαλμάτων

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια εκτεταμένη και λεπτομερής μελέτη για τον υπολογισμό των συστηματικών σφαλμάτων [1]. Για να γίνει αυτό, τα κριτήρια ποιότητας τόσο σε επίπεδο γεγονότος, όσο και σε επίπεδο τροχιάς μεταβλήθηκαν και το αντίστοιχο εύρος των κατανομών Balance Function υπολογίστηκε. Στο σχήμα 12.7a φαίνεται η εξάρτηση της $\langle \Delta\eta \rangle$ της Balance Function από το εύρος της κατανομής της z συνιστώσας του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης που εισέρχεται στην ανάλυση. Όπως και στην περίπτωση των πειραματικών δεδομένων (Κεφάλαιο 6), το συστηματικό σφάλμα ορίζεται ως η μέση τιμή της μικρότερης και μεγαλύτερης τιμής του εύρους και βρέθηκε ότι είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στατιστικό. Τα άλλα δυο γραφήματα δείχνουν την εξάρτηση του εύρους από την απόσταση της τροχιάς από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης στην ακτινική συνιστώσα (σχήμα 12.7b) καθώς και στον άξονα της δέσμης (σχήμα 12.7c). Η σταθερότητα των αποτελεσμάτων είναι σε αυτό το επίπεδο ακόμα πιο εμφανής.

Εξάρτηση από την σωματιδιακή πολλαπλότητα

Στη συνέχεια, αναλύθηκε όλο το δείγμα σε όλο το φασικό χώρο που παρέχουν οι κεντρικοί ανιχνευτές ($|\eta| < 1.0$ και $P_T > 0.1 \text{ GeV}$) στην προσπάθεια να διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποιο ίχνος εξάρτησης από την πολλαπλότητα των γεγονότων. Για το σκοπό αυτό, χωρίστηκαν τα γεγονότα σε τρεις κατηγορίες πολλαπλότητας κάθε μια από τις οποίες αναλύθηκε ξεχωριστά. Το σχήμα 12.8 δείχνει την εξάρτηση του εύρους της Balance Function για όλα τα φορτισμένα



Σχήμα 12.9: Δεξί γράφημα: Οι κατανομές της Balance Function για τις αντίστοιχες διαμερίσεις στο χώρο της εγκάρσιας ορμής ως συνάρτηση της διαφοράς στην ψευδοωκύτητα. Αριστερό γράφημα: Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta \eta \rangle$ των κατανομών της Balance Function από τη μέση τιμή της εγκάρσιας ορμής των προς ανάλυση τροχιών.

σωμάτια από την μέση πολλαπλότητα των γεγονότων. Από τη μελέτη του σχήματος αυτού δεν προκύπτει κάποια εξάρτηση από τον αριθμό των τροχιών [1].

Εξάρτηση από την μέση τιμής της εγκάρσιας ορμής

Μια ακόμη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, είναι η εξάρτηση του εύρους από τη μέση τιμή της εγκάρσιας ορμής των σωματιδίων. Με το βήμα αυτό, επιτυγχάνουμε την επέκταση της μεθόδου σε δυο διαστάσεις: μελετάμε τους συσχετισμούς φορτίων στην ψευδοωκύτητα και στην εγκάρσια ορμή ταυτόχρονα. Το βήμα αυτό είναι εφικτό λόγω του μεγάλου αριθμού γεγονότων που κατά καιρούς έχουν παραχθεί στα πλαίσια των διαφόρων **Physics Data Challenges - PDCs** αλλά και της αντίστοιχης μεγάλης (συγκριτικά με τις χαμηλότερες ενέργειες του *SPS*) πολλαπλότητας των σωματιδίων που παρατηρείται σε τιμές της εγκάρσιας ορμής μεγαλύτερες του $1.5 \text{ GeV}/c$. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκε η περιοχή της εγκάρσιας ορμής που καθορίζεται από το διάστημα: $0.1 < P_T < 3.1 \text{ GeV}/c$. Το διάστημα αυτό χωρίστηκε κατάλληλα σε διαμερίσεις ώστε η στατιστική των

τροχιών να είναι ικανή να μας δώσει κατανομές με μικρά σχετικά στατιστικά σφάλματα. Οι κατανομές της **Balance Function** που πήραμε για τις αντίστοιχες διαμερίσεις στο χώρο της εγκάρσιας ορμής, φαίνονται στο σχήμα 12.9 ως συνάρτηση της διαφοράς στην ψευδοωκότητα. Το σχήμα 12.9 δίνει επίσης την εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta\eta \rangle$ των κατανομών της **Balance Function** από τη μέση τιμή της εγκάρσιας ορμής των προς ανάλυση τροχιών. Το κεντρικό συμπέρασμα είναι ότι οι κατανομές γίνονται όλο και πιο στενές όσο το σύστημα που αναλύεται έχει μεγαλύτερη εγκάρσια διεύθυνση.

12.1.2 ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΡΟΧΙΕΣ

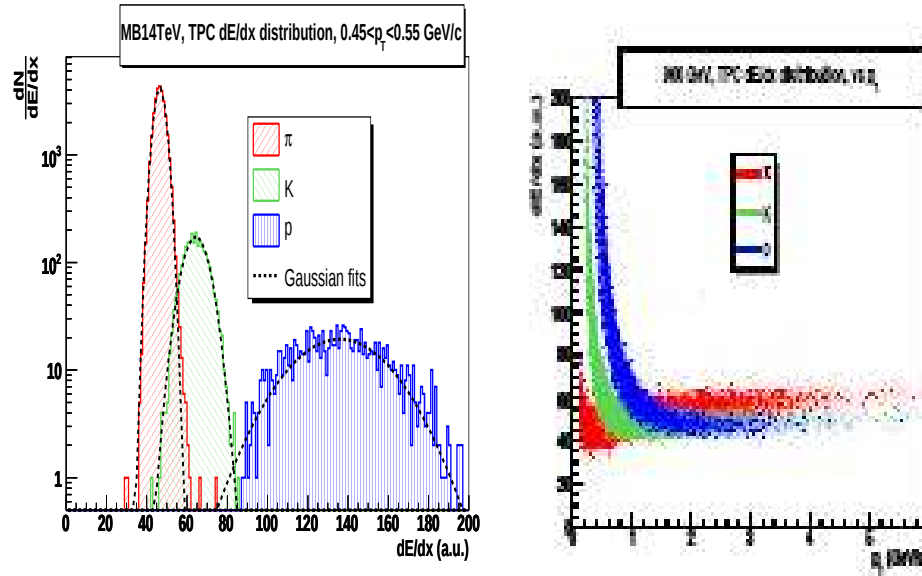
Το επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκε με τη μελέτη ταυτοποιημένων σωματιδίων στην κεντρική περιοχή του φασιικού χώρου. Τα ζεύγη που μελετήθηκαν ήταν τα ακόλουθα:

- $\pi^\pm$,
- $K^\pm$,
- $p-\bar{p}$.

Το σχήμα 12.10 δείχνει την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής για τα διαφορετικά είδη αδρονίων (πιόνια, καόνια και πρωτόνια με διαφορετικά χρώματα), για αλληλεπιδράσεις $p + p$ σε ενέργεια $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$. Οι τιμές της παραμέτρου dE/dx προέρχονται από τον ανιχνευτή *TPC*, ενώ ενδεικτικά δίνονται οι κατανομές των σωματιδίων με εγκάρσια ορμή $0.45 < P_T < 0.55$ [2].

Στο σχήμα 12.10 φαίνεται ακόμα η εξάρτηση της παραμέτρου dE/dx (πληροφορία από τον *TPC*) από την τιμή της εγκάρσιας ορμής των σωματιδίων. Φαίνεται καθαρά από τη μελέτη του σχήματος αυτού ότι έχουμε ένα πολύ καλό διαχωρισμό πρωτονίων από καόνια και πιόνια μέχρι την τιμή $P_T \approx 1.1\text{GeV}/c$ πέρα από την οποία απαιτείται η χρησιμοποίηση του ανιχνευτή *TOF*. Ο διαχωρισμός δε πιονίων και καονίων, πραγματοποιείται κυρίως με τη βοήθεια του ανιχνευτή μέτρησης χρόνου πτήσης, μιας και ο *TPC*, όπως φαίνεται και από το σχήμα, βοηθά μόνο σε μια στενή περιοχή ($0.2 < P_T < 0.7\text{GeV}/c$) [2].

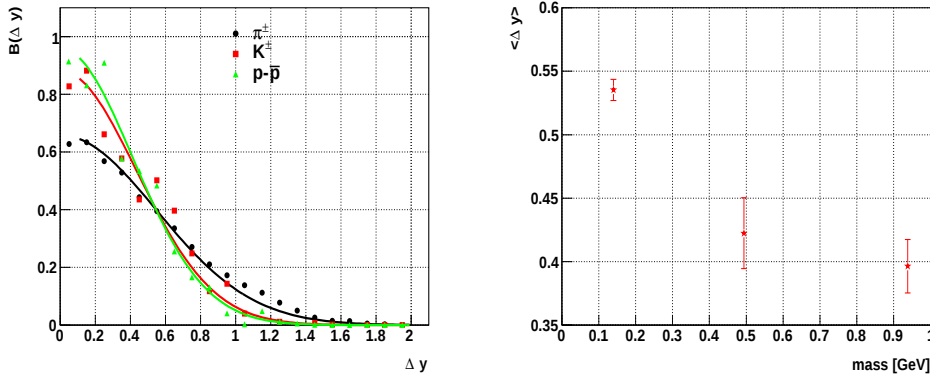
Το σχήμα 12.11 δίνει τις αντίστοιχες κατανομές της **Balance Function** για ζεύγη πιονίων (μαύροι κύκλοι), καονίων (κόκκινα τετράγωνα) και (αντι)πρωτονίων (πράσινα τρίγωνα) ως συνάρτηση της διαφοράς στην ωκότητα των αντίθετα φορτισμένων σωματιδίων [1]. Ο φασιικός χώρος που χρησιμοποιήθηκε είναι



Σχήμα 12.10: Δεξί γράφημα: Η κατανομή της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής για διαφορετικά είδη σωματιδίων όπως καταγράφεται από τον *TPC* για συγκεκριμένη περιοχή τιμών της εγκάρσιας ορμής. Αριστερό γράφημα: Η κατανομή της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής για διαφορετικά είδη σωματιδίων όπως καταγράφεται από τον *TPC* ως συνάρτηση της ορμής των σωματιδίων.

αυτός που παρέχεται από τους ανιχνευτές της κεντρικής περιοχής. Η ταυτοποίηση έγινε, όπως είπαμε και πιο πάνω, με τη βοήθεια της πληροφορίας από τον *TPC* για τη χαμηλή περιοχή τιμών του P_T και από τον *TOF* για τιμές ορμών μεγαλύτερες από $1.1 \text{ GeV}/c$. Το σχήμα 12.11 εμφανίζει επίσης τα κύρια αποτελέσματα: το εύρος $\langle \Delta y \rangle$ μειώνεται καθώς η μάζα του εξεταζομένου σωματιδίου μεγαλώνει. Η συμπεριφορά αυτή έχει ήδη αναδειχτεί τόσο από το πείραμα *STAR* όσο και από το *NA49* ως προς τα πειραματικά δεδομένα. Από τη μεριά της θεωρίας, τα υπάρχοντα πρότυπα, αναμένουν αυτή τη μείωση και μάλιστα, όπως προτάθηκε και στο [3], η μελέτη των συσχετισμών φορτίου ταυτοποιημένων σωματιδίων μπορεί να αναδείξει τους διαφορετικούς μηχανισμούς παραγωγής τους.

Οι λόγοι των υπολογισμένων ευρών είναι:



Σχήμα 12.11: Δεξί γράφημα: Η κατανομή της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια ως συνάρτηση της διαφοράς στην ωκύτητα - Τα διαφορετικά χρώματα και σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικά είδη σωματιδίων. Αριστερό γράφημα: Το εύρος των κατανομών του προηγούμενου σχήματος ως συνάρτηση της μάζας των σωματιδίων.

$$\frac{\langle \Delta y \rangle_\pi}{\langle \Delta y \rangle_K} = 1.27 \pm 0.09$$

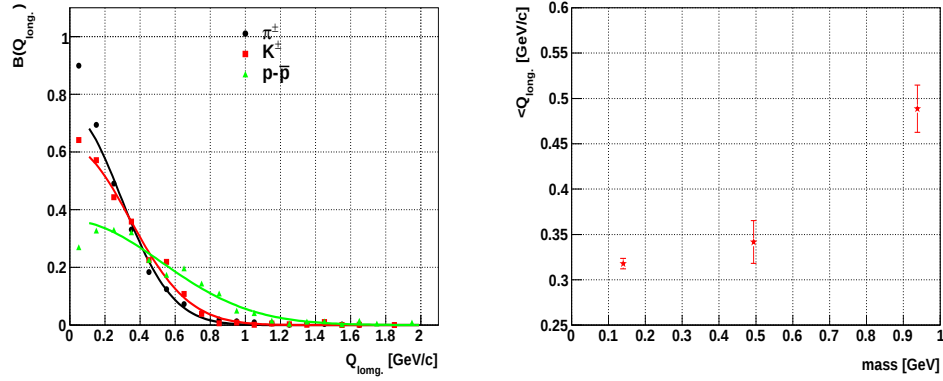
$$\frac{\langle \Delta y \rangle_\pi}{\langle \Delta y \rangle_p} = 1.35 \pm 0.07$$

$$\frac{\langle \Delta y \rangle_K}{\langle \Delta y \rangle_p} = 1.07 \pm 0.09$$

Αντίστοιχα, η τιμή που παίρνει κάποιος από το [3] για αλληλεπιδράσεις $p+p$ σε ενέργεια $\sqrt{s} = 200\text{GeV}$ είναι:

$$\frac{\langle \Delta y \rangle_\pi}{\langle \Delta y \rangle_K} \approx 1.31$$

Τέλος, η Balance Function μελετήθηκε και στις συνιστώσες της αναλλοίωτης ορμής Q_i που ορίστηκαν στο κεφάλαιο 3. Τα σχήματα 12.12, 12.13 και 12.14 δείχνουν τις κατανομές ως συνάρτηση των $Q_{long.}$, $Q_{out.}$ και $Q_{side.}$ αντίστοιχα για τα τρία είδη αδρονίων (ζεύγη πιονίων, καονίων και πρωτονίων).



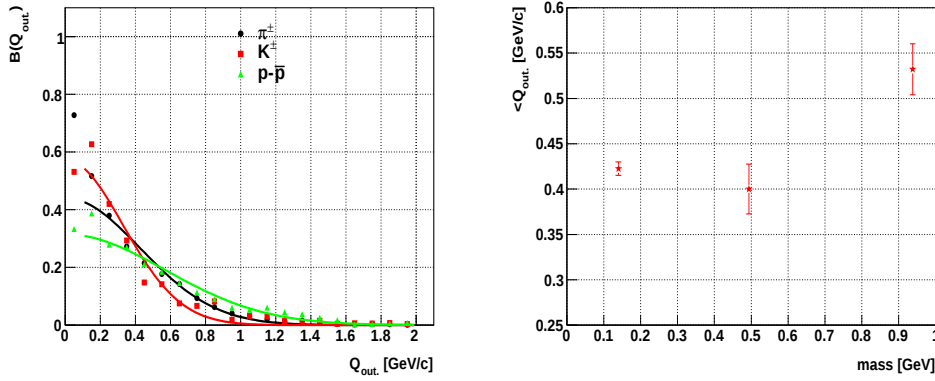
Σχήμα 12.12: Δεξί γράφημα: Η κατανομή της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια ως συνάρτηση της παραμέτρου Q_{long} . - Τα διαφορετικά χρώματα και σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικά είδη σωματιδίων. Αριστερό γράφημα: Το εύρος των κατανομών του προηγούμενου σχήματος ως συνάρτηση της μάζας των σωματιδίων.

Υπολογίστηκαν δε και τα ανάλογα εύρη των κατανομών που εμφανίζονται ως συνάρτηση της μάζας των σωματιδίων στα προαναφερθέντα σχήματα. Το κοινό συμπέρασμα είναι ότι τα εύρη μεγαλώνουν καθώς η μάζα του αναλυόμενου συστήματος αυξάνεται.

12.2 ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ $Pb + Pb$

Η συνάρτηση ισοζυγίου φορτίου μελετήθηκε επίσης σε προσομοιώσεις αλληλεπιδράσεων βαρέων ιόντων και πιο συγκεκριμένα σε γεγονότα $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 5.5 TeV$ [1]. Σκοπός της μελέτης αυτής ήταν η διερεύνηση της εξάρτησης του εύρους από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων. Έτσι αναλύθηκαν οι δυο ακραίες κατηγορίες κεντρικότητας του πειράματος ALICE:

- Οι πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ που αντιστοιχούν σε μια περιοχή παραμέτρων κρούσεων $0 < b < 5 fm$.
- Οι πιο περιφερειακές αλληλεπιδράσεις με παράμετρο κρούσης $15 < b <$



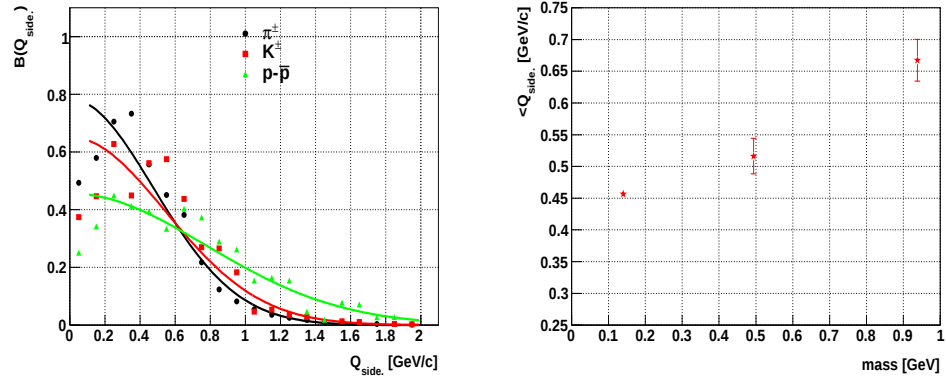
Σχήμα 12.13: Δεξί γράφημα: Η κατανομή της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια ως συνάρτηση της παραμέτρου Q_{out} . - Τα διαφορετικά χρώματα και σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικά είδη σωματιδίων. Αριστερό γράφημα: Το εύρος των κατανομών του προηγούμενου σχήματος ως συνάρτηση της μάζας των σωματιδίων.

100 fm.

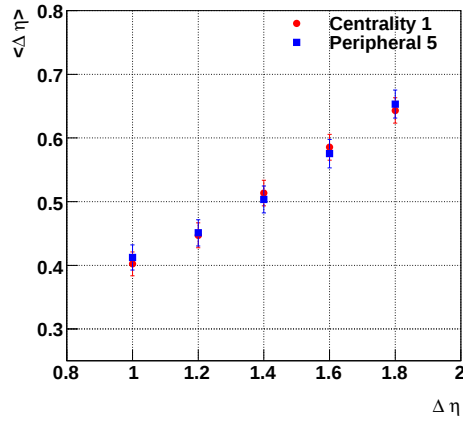
Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής από το διάστημα της ψευδοωκότητας που αναλύθηκε φαίνεται στο σχήμα 12.15. Όπως και στην περίπτωση των προσομοιώσεων $p+p$ έτσι και εδώ αναλύθηκε όλη η περιοχή της ψευδοωκότητας που παρέχεται από τους ανιχνευτές της κεντρικής περιοχής. Το διάστημα αυτό μειωνόταν σταδιακά κάθε φορά με σταθερό βήμα. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση η γραμμική εξάρτηση του εύρους από το αναλυόμενο διάστημα.

Τέλος, το σχήμα 12.16 δείχνει την εξάρτηση του εύρους από την κανονικοποιημένη παράμετρο χρούσης b/b_{max} για τις πιο κεντρικές και τις πιο περιφερειακές συγκρούσεις $Pb + Pb$. Η εικόνα αυτή είναι συμβατή με τη φάση αδρονοποίησης της ύλης χωρίς την ύπαρξη της μετάβασης σε φάση QGP.

Η ανάλυση για προσομοιώσεις αλληλεπιδράσεων βαρέων ιόντων δεν κατέσται δυνατό να επεκταθεί περαιτέρω, μιας και η στατιστική των δεδομένων που είχε παραχθεί ήταν περιορισμένη (κυρίως για τεχνικούς λόγους του πειράματος).

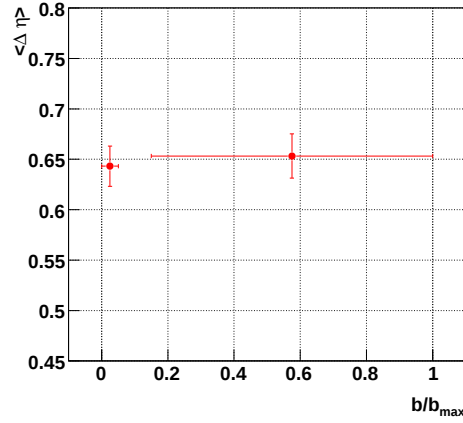


Σχήμα 12.14: Δεξί γράφημα: Η κατανομή της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια ως συνάρτηση της παραμέτρου Q_{side} . - Τα διαφορετικά χρώματα και σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικά είδη σωματιδίων. Αριστερό γράφημα: Το εύρος των κατανομών του προηγούμενου σχήματος ως συνάρτηση της μάζας των σωματιδίων.



Σχήμα 12.15: Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής από το διάστημα της ψευδοωκότητας που αναλύθηκε για αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$.

Με την έναρξη της λειτουργίας του νέου επιταχυντικού συστήματος, θα δοθεί η δυνατότητα να μελετηθούν συγκρούσεις τόσο πρωτονίων όσο και βαρέων



Σχήμα 12.16: Η εξάρτηση του εύρους από την κανονικοποιημένη παράμετρο χρούσης b/b_{max} για τις πιο κεντρικές και τις πιο περιφερειακές συγκρούσεις $Pb + Pb$.

ιόντων σε ενέργειες που είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που παρείχαν οι μέχρι τώρα επιταχυντές. Εκτός του νέου ενεργειακού φάσματος, οι πολλαπλότητες που αναμένονται ($dN/d\eta \approx 7$ για $p + p$ και $dN/d\eta \approx 1200$ για $Pb + Pb$), θα επιτρέψουν την επέκταση των διαφόρων αναλύσεων σε διαφορετικά επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα για την **Balance Function**, όπως δείξαμε και στη μελέτη προσομοιώσεων, ανοίγεται το πεδίο για την επέκταση της μεθόδου σε άλλη μια διάσταση εκτός από αυτή της (ψευδο)ωκότητας. Αυτό μπορεί πλέον να γίνει αφού η στατιστική των τροχιών στις υψηλές αυτές ενέργειες θα είναι ικανή ώστε να μας δώσει κατανομές με μικρά στατιστικά σφάλματα. Τέλος, η μεγαλύτερη παραγωγή, σε σχέση με τις χαμηλότερες ενέργειες, πιδάκων αδρονίων, θα καταστήσει δυνατή τη μελέτη της επίδρασης τέτοιων φαινομένων σε μεθόδους **Event by Event** και πιο συγκεκριμένα στην **Balance Function**.

Κεφάλαιο 13

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη διατριβή αυτή έγινε μια προσπάθεια να αναλυθούν και να παρουσιαστούν τα δυο κύρια θέματα τα οποία αναπτύχθηκαν. Το πρώτο κομμάτι, πιο άμεσα συσχετισμένο με τη φυσική, αφορά την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων αλληλεπιδράσεων $A + A$ σε όλες τις ενέργειες του SPS με σκοπό την μελέτη των συσχετισμών φορτίου με τη βοήθεια της συνάρτησης ισοζυγίου **Balance Function**. Η μέθοδος αυτή έχει προταθεί ότι σχετίζεται άμεσα (και πιο συγκεκριμένα το εύρος της) με το χρόνο αδρονοποίησης του συστήματος. Στο πρώτο επίπεδο της μελέτης, εξετάστηκε η εξάρτηση από το αλληλεπιδρόν σύστημα αλλά και από την κεντρικότητα του εύρους της **Balance Function** σε δυο ενέργειες: $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ και $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε σε όλα τα φορτισμένα σωμάτια (δεν χρησιμοποιήθηκε η ταυτοποίησή τους). Τα πειραματικά ευρήματα που εξήχθησαν ήταν τα ακόλουθα:

- Το εύρος της συνάρτησης ισοζυγίου μειώνεται καθώς αυξάνεται τόσο το σύστημα που αλληλεπιδρά όσο και η κεντρικότητα των συγκρούσεων. Στη μέγιστη δε ενέργεια του SP ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$) η σχετική μείωση του εύρους στις κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ υπολογισμένη συγκριτικά με τις πιο περιφερειακές, υπολογίστηκε ότι είναι της τάξης του $17 \pm 3\%$. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται τόσο σε χαμηλότερες ενέργειες ($\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$), όσο και σε υψηλότερες ($\sqrt{s_{NN}} = 130 GeV$). Η μείωση του εύρους για τα πειραματικά δεδομένα, δεν μπορεί να περιγραφεί ούτε από τα μικροσκοπικά αδρονικά μοντέλα που μελετήθηκαν (**HIJING** - **UrQMD**) ούτε όμως και από τα γεγονότα ανάμιξης (**shuffling**). Η μελέτη όμως του μοντέλου **AMPT** το οποίο περιγράφει το στάδιο των αλληλεπιδράσεων των παρτονίων πριν την αδρονοποίησή τους, αποδίδει πολύ καλά

τα πειραματικά αποτελέσματα. Με τη βοήθεια του μοντέλου αυτού, επιτεύχθηκε μια αρχική συσχέτιση του εύρους της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου με το χρόνο αδρονοποίησης του συστήματος.

- Η μείωση αυτή του εύρους με την κεντρικότητα αποτυπώνεται μόνο στη μεσαία περιοχή της ψευδοωκύτητας. Η μελέτη της εμπρόσθιας περιοχής σε δυο ενέργειες, αποκάλυψε ότι αυτό το φαινόμενο εξαφανίζεται. Τα μικροσκοπικά μοντέλα **HIJING - UrQMD**) που μελετήθηκαν επιβεβαιώνουν το γεγονός αυτό.
- Η ενεργειακή μελέτη της **Balance Function** , υπολογισμένη με βάση την κανονικοποιημένη παράμετρο W , έδωσε μια πρώτη ένδειξη εξάρτησης από την παράμετρο $\sqrt{s_{NN}}$ της αλληλεπίδρασης. Η εξάρτηση αυτή, δεν μπορεί να αποδοθεί για μια ακόμη φορά από τα εξεταζόμενα πρότυπα (**HSD - UrQMD**).
- Η επέκταση της μελέτης και στην εμπρόσθια περιοχή για όλες τις ενέργειες, ανέδειξε και σε αυτή την περίπτωση ότι η όποια εξάρτηση αποτυπώνεται μόνο στη μεσαία περιοχή της ψευδοωκύτητας.

Στη συνέχεια, η μελέτη επεκτάθηκε σε ταυτοποιημένες τροχιές. Η ταυτοποίηση έγινε με τη βοήθεια των ανιχνευτών προβολής χρόνου του πειράματος **NA49**. Έτσι αναγνωρίστηκαν τόσο πόνια, όσο και καόνια και μελετήθηκαν οι συσχετισμοί τους στην ωκύτητα αλλά και στην αναλλοίωτη ορμή. Η δεύτερη παράμετρος θεωρείται η πιο κατάλληλη ώστε να απομονώσει μηχανισμούς που θεωρούνται υπαίτιοι για τη μείωση του εύρος με την κεντρικότητα: η αυξανόμενη εγκάρσια ροή του συστήματος με την αύξηση της κεντρικότητας της αλληλεπίδρασης δεν αποτυπώνεται στην παράμετρο Q_{inv} που είναι ανεξάρτητη από αυτή. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε στη μέγιστη ενέργεια του **SPS** και ανέδειξε τα εξής:

- Τα ζεύγη πιονίων, όταν μελετηθούν στην ωκύτητα, δείχνουν μια ευαισθησία στην κεντρικότητα της αλληλεπίδρασης για τα πειραματικά δεδομένα, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη της καθυστερημένης αδρονοποίησης του συστήματος, στην επίδραση των προϊόντων διασπάσεων συντονισμών, καθώς και στην αυξανόμενη με την κεντρικότητα εγκάρσια ροή. Κατά τη μελέτη των ζευγών αυτών στην αναλλοίωτη ορμή, παράμετρος που θεωρείται απαλλαγμένη από το μηχανισμό αυτό, αναδεικνύεται για μια ακόμη φορά η μείωση του εύρους με την αύξηση της κεντρικότητας της αλληλεπίδρασης. Αυτό το φαινόμενο μας δίνει τη δυνατότητα να

ισχυριστούμε ότι υπάρχει μια πρώτη ένδειξη ότι το φαινόμενο της αύξησης της εγκάρσιας ροής με την κεντρικότητα δεν επιδρά στη μείωση του εύρους.

- Τα ζεύγη καονίων δεν παρουσιάζουν κάποια εξάρτηση από την κεντρικότητα, τόσο κατά τη μελέτη τους στην ωχύτητα, όσο και στην αναλλοίωτη ορμή. Ειδικά για τη δεύτερη παράμετρο, επιπλέον μελέτη της επιλογής των ταυτοποιημένων σωματιδίων πρέπει να γίνει ώστε να εξαχθούν πιο χρήσιμα και ασφαλή συμπεράσματα από τις κατανομές της *Balance Function*.
- Όλα τα μοντέλα που μελετήθηκαν, δεν μπόρεσαν να περιγράψουν τις συμπεριφορές που αποτυπώνονται στα πειραματικά δεδομένα.

Γίνεται λοιπόν φανερό, ότι ενώ υπάρχει μια αρχική ένδειξη λειτουργίας της μεθόδου (συσχέτιση εύρους με χρόνο αδρονοποίησης - εξάρτηση από την κεντρικότητα και την ενέργεια της αλληλεπίδρασης), η μη ύπαρξη μοντέλων που να περιγράφουν με επιτυχία τα πειραματικά δεδομένα καθιστά την εξαγωγή οριστικών συμπερασμάτων μη ασφαλή. Θεωρούμε δε ότι, ειδικά στο επίπεδο των μελετών *Event by Event*, η θεωρία πρέπει να αναπτυχθεί περισσότερο. Είναι γενικά αποδεκτό, ότι υπάρχει ένδοια μοντέλων που θα μπορούσαν να περιγράψουν όχι μόνο τα πειραματικά αποτελέσματα που περιγράφησαν σε αυτή τη διατριβή αλλά και άλλα αποτελέσματα τουλάχιστον αυτού του απαιτητικού κλάδου.

Στο δεύτερο κομμάτι αυτής της διατριβής, έγινε αναφορά στο μέλλον της φυσικής βαρέων ιόντων. Αυτό έρχεται (οι γραμμές αυτές γράφτηκαν λίγο πριν την έναρξη του προγράμματος του επιταχυντή *LHC*) με το πείραμα *ALICE*. Το πείραμα αυτό, με τον πλούσιο ανιχνευτικό του εξοπλισμό, παρέχει πολύ καλή ανακατασκευή τροχιών με πολύ χαμηλό κατώφλι της τιμής της εγκάρσιας ροής ($P_T > 0.1 \text{ GeV}/c$ αλλά και πολύ καλή ταυτοποίηση σωματιδίων σε μεγάλο εύρος της ορμής των τροχιών. Το όλο πρόγραμμα, συνδυάζεται από ένα πολύπλοκο αλλά συνάμα χρήσιμο σύστημα: το *GRID*. Στα πλαίσια της περιγραφής του λογισμικού του πειράματος, έγινε μια λεπτομερής παρουσίαση της συνεισφοράς σε αυτόν τον τομέα: η ανάπτυξη του πακέτου *Event Tag System*. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε σε πολλές *Physics Data Challenges* αποδεικνύοντας τόσο τη χρησιμότητά του, όσο και την αξιοπιστία και αποδοτικότητά του. Θα χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα δε και κατά την ανάλυση πειραματικών δεδομένων μειώνοντας αισθητά το χρόνο ανάλυσής τους. Το λογισμικό αυτό έχει αξιολο-

γηθεί και εξεταστεί σε όλες τις δυνατές συνθήκες ανάλυσης: τοπική ανάλυση, ανάλυση με τη βοήθεια του συστήματος **PROOF** αλλά και ανάλυση στο **GRID**.

Τέλος, στα πλαίσια της προσπάθειας ανάπτυξης του προγράμματος φυσικής του πειράματος, παρουσιάστηκαν οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν ώστε να επεκταθεί η μέθοδος της **Balance Function** στις πολύ υψηλές ενέργειες του **LHC**. Για το σκοπό αυτό ο κώδικας έπρεπε να βελτιστοποιηθεί για να ανταπεξέλθει στις πολύ μεγάλες πολλαπλότητες παραγόμενων σωματιδίων που αναμένονται σε αυτές τις ενέργειες.

Η καινούρια αυτή εποχή που ανοίγεται για τη φυσική υψηλών ενεργειών, με την έναρξη του προγράμματος του επιταχυντικού συστήματος **LHC**, θα δώσει το έναυσμα για επέκταση των μέχρι τώρα γνώσεών μας πάνω σε διάφορα θέματα: θα επιβεβαιωθούν ήδη καθιερωμένα πρότυπα, θα τροποποιηθούν θεωρητικοί μηχανισμοί και θα ανακαλυφθούν καινούρια στοιχεία. Με αυτό το σκεπτικό και προς αυτήν την κατεύθυνση, η συνάρτηση ισοζυγίου ίσως μπορέσει να δώσει κάποιες απαντήσεις σε ερωτήματα που μέχρι τώρα, λόγω τεχνικών (πειραματικών) ή/και δυσκολιών στη θεωρία δεν είχαν βρει την απάντησή τους.

Παράρτημα Α΄

ΔΟΜΗ ΤΟΥ **Event Tag System**

Table A.1: Run tag fields.

Field name	Field type	Description	Source
fAliceRunId	Int_t	The run's unique identifier.	DAQ
fAliceMagneticField	Float_t	The value of the magnetic field.	DCS
fAliceRunStartTime	Int_t	The start time for each ALICE run.	DAQ
fAliceRunStopTime	Int_t	The stop time for each ALICE run.	DAQ
fAlirootVersion	TString (10)	The version of AliRoot.	Offline
fRootVersion	TString (10)	The version of ROOT.	Offline
fGeant3Version	TString (10)	The version of Geant3.	Offline
fAliceRunQuality	Bool_t	Validation of the reconstruction.	Offline
fAliceBeamEnergy	Float_t	Center of mass beam energy.	DCS
fAliceBeamType	TString (5)	Colliding systems type.	DCS
fAliceCalibrationVersion	Int_t	Calibration version.	Offline
fAliceAlignmentVersion	Int_t	Alignment version.	Offline
fAliceDataType	Int_t	Simulation (0) or data (1).	Offline
fNumEvents	Int_t	Number of events per file.	Offline
fEventTag	TClonesArray	An array of event tag objects.	
fDetectorTag	TClonesArray	An array of detector tag objects.	
fLHCTag	AliLHCTag	An AliLHCTag object.	

Table A.2: Run tag methods.

Setter	Getter	Description
SetRunId(Int_t n)	Int_t GetRunId()	Run number.
SetMagneticField(Float_t n)	Float_t GetMagneticField()	Magnetic field.
SetRunStartTime(Int_t n)	Int_t GetRunStartTime()	Run start time.
SetRunStopTime(Int_t n)	Int_t GetRunStopTime()	Run stop time.
SetAlirootVersion(TString n)	const char* GetAlirootVersion()	AliRoot's version.
SetRootVersion(TString n)	const char* GetRootVersion()	ROOT's version.
SetGeant3Version(TString n)	const char* GetGeant3Version()	Geant3 version.
SetRunQuality(Int_t n)	Int_t GetRunQuality()	Reconstruction sanity.
SetBeamEnergy(Float_t n)	Float_t GetBeamEnergy()	Beam energy.
SetBeamType(TString n)	const char *GetBeamType()	Colliding systems.
SetCalibVersion(Int_t n)	Int_t GetCalibVersion()	Calibration version.
SetAlignVersion(Int_t n)	Int_t GetAlignVersion()	Alignment version.
SetDataType(Int_t n)	Int_t GetDataType()	Real data/MC.
AddEventTag(AliEventTag *t)	TClonesArray *GetEventTags()	Event tag objects.
AddLHCTag(AliLHCTag *t)	AliLHCTag *GetLHCTag()	LHC tag objects.

Table A.3: LHC tag fields.

Field name	Field type	Description	Source
fLHCState	TString	LHC run conditions.	DCS
fLHCLuminosity	Float_t	The value of the LHC luminosity.	DCS

Table A.4: LHC tag methods.

Setter	Getter	Description
SetLHCState(TString t)	const char *GetLHCState()	LHC state.
SetLuminosity(Float_t l)	Float_t GetLuminosity()	LHC luminosity.

Table A.5: Detector tag fields - the configuration will be retrieved from ECS.

Field name	Field type	Description
fITS	Bool_t	Takes 0 if the ITS is used otherwise 1.
fTPC	Bool_t	Takes 0 if the TPC is used otherwise 1.
fTRD	Bool_t	Takes 0 if the TRD is used otherwise 1.
fTOF	Bool_t	Takes 0 if the TOF is used otherwise 1.
fHMPID	Bool_t	Takes 0 if the HMPID is used otherwise 1.
fPHOS	Bool_t	Takes 0 if the PHOS is used otherwise 1.
fZDC	Bool_t	Takes 0 if the ZDC is used otherwise 1.
fMUON	Bool_t	Takes 0 if the MUON arm is used otherwise 1.
fPMD	Bool_t	Takes 0 if the PMD is used otherwise 1.
fEMCAL	Bool_t	Takes 0 if the EMCAL is used otherwise 1.
fVZERO	Bool_t	Takes 0 if the VZERO is used otherwise 1.
fTZERO	Bool_t	Takes 0 if the TZERO is used otherwise 1.

Table A.6: Detector tag methods.

Setter	Getter	Description
SetITS()	Bool_t GetITS()	State of the ITS.
SetTPC()	Bool_t GetTPC()	State of the TPC.
SetTRD()	Bool_t GetTRD()	State of the TRD.
SetTOF()	Bool_t GetTOF()	State of the TOF.
SetHMPID()	Bool_t GetHMPID()	State of the HMPID.
SetPHOS()	Bool_t GetPHOS()	State of the PHOS.
SetZDC()	Bool_t GetZDC()	State of the ZDC.
SetMUON()	Bool_t GetMUON()	State of the MUON.
SetPMD()	Bool_t GetPMD()	State of the PMD.
SetEMCAL()	Bool_t GetEMCAL()	State of the EMCAL.
SetVZERO()	Bool_t GetVZERO()	State of the VZERO.
SetTZERO()	Bool_t GetTZERO()	State of the TZERO.

Table A.7: Event tag fields.

Field name	Field type	Description
fAliceEventId	Int_t	The event's unique identifier.
fGUID	TString	The file's unique identifier.
fturl	TString	The logical filename (file catalog).
fPath	TString	The file's path in the local file system.
fNumberOfParticipants	Int_t	The number of participants (ZDC).
fImpactParameter	Float_t	The impact parameter (Glauber).
fPrimaryVertexFlag	Bool_t	Primary vertex found (1) or not (0).
fPrimaryVertexX	Float_t	Primary vertex x coordinate.
fPrimaryVertexY	Float_t	Primary vertex y coordinate.
fPrimaryVertexZ	Float_t	Primary vertex z coordinate (SPD).
fPrimaryVertexZError	Float_t	Error in primary V_z coordinate.
fTriggerMask	ULong64_t	The trigger type.
fTriggerCluster	UChar_t	The trigger cluster.
fZDCNeutronEnergy	Float_t	The ZDC neutron energy.
fZDCProtonEnergy	Float_t	The ZDC proton energy.
fZDCEMEnergy	Float_t	The ZDC e/m energy.
fT0VertexZ	Float_t	The z coordinate of the vertex (T0).
fNumberOfTracks	Int_t	The number of reconstructed tracks.
fNumberOfPositiveTracks	Int_t	Number of positive tracks.
fNumberOfNegativeTracks	Int_t	Number of negative tracks.
fNumberOfNeutralTracks	Int_t	Number of neutral tracks.
fNumberOfV0s	Int_t	The number of V0s.
fNumberOfCascades	Int_t	The number of cascades.
fNumberOfKinks	Int_t	The number of kinks.
fNumberOfPMDTracks	Int_t	The number of PMD tracks.
fNumberOfPHOSTracks	Int_t	The number of PHOS tracks.
fNumberOfEMCALTracks	Int_t	The number of EMCAL tracks.
fNumberOfFMDTracks	Int_t	The number of FMD tracks.
fNumberOfJetCandidates	Int_t	The number of jet candidates.
fMaxJetEnergy	Float_t	Maximum of the charged jet energy.
fNumberOfHardPhotonsCandidates	Int_t	Number of hard photon candidates.
fMaxNeutralEnergy	Float_t	Maximum of the neutral jet energy.

Table A.8: Event tag fields (cont.).

Field name	Field type	Description
fNumberOfChargedAbove1GeV	Int_t	$N_{charged}$ particles with $P_T > 1\text{GeV}/c$.
fNumberOfChargedAbove3GeV	Int_t	$N_{charged}$ particles with $P_T > 3\text{GeV}/c$.
fNumberOfChargedAbove10GeV	Int_t	$N_{charged}$ particles with $P_T > 10\text{GeV}/c$.
fNumberOfMuonsAbove1GeV	Int_t	Number of muons with $P_T > 1\text{GeV}/c$.
fNumberOfMuonsAbove3GeV	Int_t	Number of muons with $P_T > 3\text{GeV}/c$.
fNumberOfMuonsAbove10GeV	Int_t	Number of muons with $P_T > 10\text{GeV}/c$.
fNumberOfElectronsAbove1GeV	Int_t	Number of electrons with $P_T > 1\text{GeV}/c$.
fNumberOfElectronsAbove3GeV	Int_t	Number of electrons with $P_T > 3\text{GeV}/c$.
fNumberOfElectronsAbove10GeV	Int_t	Number of electrons with $P_T > 10\text{GeV}/c$.
fNumberOfElectrons	Int_t	The number of electron (combined PID).
fNumberOfMuons	Int_t	The number of muons (combined PID).
fNumberOfPions	Int_t	The number of pions (combined PID).
fNumberOfKaons	Int_t	The number of kaon (combined PID).
fNumberOfProtons	Int_t	The number of protons (combined PID).
fNumberOfLambdas	Int_t	The number of Λ (combined PID).
fNumberOfPhotons	Int_t	The number of photons (combined PID).
fNumberOfPi0s	Int_t	The number of π^0 (combined PID).
fNumberOfNeutrons	Int_t	The number of neutrons (combined PID).
fNumberOfKaon0s	Int_t	The number of K^0 (combined PID).
fTotalP	Float_t	Total event momentum (all tracks).
fMeanPt	Float_t	The $\langle P_T \rangle$ of the event (all tracks).
fMaxPt	Float_t	The maximum P_T of the event (all tracks).
fTotalNeutralP	Float_t	Total event momentum (neutral tracks).
fMeanNeutralPt	Float_t	The $\langle P_T \rangle$ of the event (neutral tracks).
fMaxNeutralPt	Float_t	The maximum P_T of the event (neutral tracks).
fEventPlaneAngle	Float_t	The value of the event plane angle.
fHBTRadii	Float_t	The value of the fireball's radius (HBT).

Table A.9: Event tag methods.

Setter	Getter
SetEventId(Int_t Pid)	Int_t GetEventId()
SetGUID(TString Pid)	const char *GetGUID()
SetTURL(TString Pid)	const char *GetTURL()
SetPath(TString Pid)	const char *GetPath()
SetNumOfParticipants(Int_t P)	Int_t GetNumOfParticipants()
SetImpactParameter(Float_t Pimpact)	Float_t GetImpactParameter()
SetVertexX(Float_t Pvx)	Float_t GetVertexX()
SetVertexY(Float_t Pvy)	Float_t GetVertexY()
SetVertexZ(Float_t Pvz)	Float_t GetVertexZ()
SetVertexFlag(Int_t i)	Int_t GetVertexFlag()
SetVertexZError(Float_t f)	Float_t GetVertexZError()
SetTriggerMask(ULong64_t Ptr)	ULong64_t GetTriggerMask()
SetTriggerCluster(UChar_t n)	UChar_t GetTriggerCluster()
SetZDCNeutronEnergy(Float_t Pen)	Float_t GetZDCNeutronEnergy()
SetZDCProtonEnergy(Float_t Pen)	Float_t GetZDCProtonEnergy()
SetZDCMEnergy(Float_t Pen)	Float_t GetZDCMEnergy()
SetT0VertexZ(Float_t Pvz)	Float_t GetT0VertexZ()
SetNumOfTracks(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfTracks()
SetNumOfPosTracks(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfPosTracks()
SetNumOfNegTracks(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfNegTracks()
SetNumOfNeutrTracks(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfNeutrTracks()
SetNumOfV0s(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfV0s()
SetNumOfCascades(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfCascades()
SetNumOfKinks(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfKinks()
SetNumOfPMDTracks(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfPMDTracks()
SetNumOfPHOSTracks(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfPHOSTracks()
SetNumOfEMCALTracks(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfEMCALTracks()
SetNumOfFMDTracks(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfFMDTracks()
SetNumOfJetCandidates(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfJetCandidates()
SetNumOfHardPhotonsCandidates(Int_t Ptr)	GetNumOfHardPhotonsCandidates()
SetMaxJetEnergy(Float_t f)	Float_t GetMaxJetEnergy()
SetMaxNeutralEnergy(Float_t f)	Float_t GetMaxNeutralEnergy()

Table A.10: Event tag methods.

Setter	Getter
SetNumOfChargedAbove1GeV(Int_t i)	Int_t GetNumOfChargedAbove1GeV()
SetNumOfChargedAbove3GeV(Int_t i)	Int_t GetNumOfChargedAbove3GeV()
SetNumOfChargedAbove10GeV(Int_t i)	Int_t GetNumOfChargedAbove10GeV()
SetNumOfMuonsAbove1GeV(Int_t i)	Int_t GetNumOfMuonsAbove1GeV()
SetNumOfMuonsAbove3GeV(Int_t i)	Int_t GetNumOfMuonsAbove3GeV()
SetNumOfMuonsAbove10GeV(Int_t i)	Int_t GetNumOfMuonsAbove10GeV()
SetNumOfElectronsAbove1GeV(Int_t i)	Int_t GetNumOfElectronsAbove1GeV()
SetNumOfElectronsAbove3GeV(Int_t i)	Int_t GetNumOfElectronsAbove3GeV()
SetNumOfElectronsAbove10GeV(Int_t i)	Int_t GetNumOfElectronsAbove10GeV()
SetNumOfElectrons(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfElectrons()
SetNumOfMuons(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfMuons()
SetNumOfPions(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfPions()
SetNumOfKaons(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfKaons()
SetNumOfProtons(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfProtons()
SetNumOfLambdas(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfLambdas()
SetNumOfPhotons(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfPhotons()
SetNumOfPi0s(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfPi0s()
SetNumOfNeutrons(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfNeutrons()
SetNumOfKaon0s(Int_t Ptr)	Int_t GetNumOfKaon0s()
SetTotalMomentum(Float_t P)	Float_t GetTotalMomentum()
SetMeanPt(Float_t Pt)	Float_t GetMeanPt()
SetMaxPt(Float_t Pt)	Float_t GetMaxPt()
SetNeutralTotalMomentum(Float_t f)	Float_t GetNeutralTotalMomentum()
SetNeutralMeanPt(Float_t f)	Float_t GetNeutralMeanPt()
SetNeutralMaxPt(Float_t f)	Float_t GetNeutralMaxPt()
SetEventPlaneAngle(Float_t f)	Float_t GetEventPlaneAngle()
SetHBTRadii(Float_t f)	Float_t GetHBTRadii()

Appendix B

Curriculum Vitae

PANAGIOTIS CHRISTAKOGLOU

B.1 Personal Details

Full name: Panagiotis E. Christakoglou

Date of birth: 13th of November, 1976

Place of birth: Athens, Greece

Citizenship: Hellenic

Current address: Route de Versonnex 89, 01170 Segny, France

Home address: Mitr. Kidonion Grigoriou 66, 14576 Dionisos - Athens, Greece

Phone number: (33) 450 429143, (41) 22 76 71 995

E-mail: Panos.Christakoglou@cern.ch

B.2 Education

10/1995–09/2000 B. Sc. Studies in Physics at the University of Athens, Greece.

Degree awarded in February 2001.

Thesis: “*Study of resonances in $p+p$ and $p+A$ interactions at $158\text{GeV}/c$* ”.

Supervisor: Ass. Prof. M. Vassiliou.

09/1999–06/2001 Institute of Professional Preparation Athens, Greece.

Specialization: Computer applications, programming languages, databases.

Degree awarded in September 2001.

10/2000–10/2003 M. Sc. Studies in Nuclear and Elementary Particle Physics at the University of Athens, Greece.

Degree awarded in October 2003.

Thesis: “*Study of the charge Balance Function in $p+p$ and $Pb+Pb$ collisions at the CERN SPS*”.

Supervisor: Ass. Prof. M. Vassiliou.

11/2003–Present Ph. D. Studies in Nuclear and Elementary Particle Physics at the University of Athens, Greece.

Thesis: “*Study of electric charge correlations in $p+p$ and $A+A$ collisions in the experiments NA49/SPS and ALICE/LHC*”.

Supervisor: Ass. Prof. M. Vassiliou.

09/2003–12/2004 Project Associate at CERN.

Project: “*Measuring mechanical deformation for the space frame of ALICE.*”.

Supervisor: Werner Riegler.

03/2005–02/2007 Marie Curie fellow at CERN.

Project: “*Development of tools to test the GRID infrastructure for the ALICE collaboration.*”.

Supervisor: Peter Hristov.

B.3 Research Experience

My main research topic since 1998 is Heavy Ion Physics. In particular:

NA49

- 10/1998–10/1999 Study of resonances in p+p and p+A interactions at 158GeV/c for the NA49 experiment at CERN. In particular, I studied the $\rho(770)$ meson resonance production in p+p and p+A interactions at 158GeV/c.
- 10/2002 Participation in the data taking for the NA49 experiment at CERN.
- 11/2002–03/2003 Study of the properties of the Balance Function (BF) in order to apply the method to NA49 data.
- 03/2003–06/2004 Analysis of NA49 Pb+Pb data at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV in order to investigate the centrality dependence of the BF.
- 06/2003–09/2004 Analysis of NA49 Si+Si, C+C and p+p data at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV in order to extend the method to a system size study.
- 10/2004–Present Analysis of NA49 central Pb+Pb data throughout the whole SPS energy range in order to extend the method to an energy scan study.
- 11/2004–Present Study of models in order to distinguish the mechanisms that lead to the decrease of the BF's width with centrality.
- 10/2005–Present Analysis of NA49 experimental data for different particle species in order to extend the method to a particle species study.

ALICE

Participation in the ALICE experiment at the LHC/CERN: “*A Large Ion Collider Experiment*”.

- 10/2003–10/2004 Development and implimentation of a system that will be used by the ALICE collaboration in order to monitor the mechanical deformations of the outer structure of the detectors (space frame). In particular, I've studied the properties of several electronic and optical systems, I proposed the design of the geometry for the selected system and I developed a large portion of the corresponding software.
- 11/2004 Participation in the data taking for the test beam of the TR detector for the ALICE experiment at CERN.

- 03/2005–Present Study of the BF for the ALICE experiment as a function of centrality and particle species.
- 03/2005–Present Development of tools that are used in order to analyze simulated data that are distributed world-wide by using the grid middleware of ALICE.
- 05/2005–Present Developer of the AliRoot framework.
- 05/2005–Present Design and development of the Event Tag System for the ALICE collaboration which defines the metadata scheme of the experiment.
- 09/2005–Present Design and implementation of an analysis framework prototype that uses the metadata catalog in a distributed environment.
- 02/2006–Present Software coordinator for the Physics Working Group 2 (PWG2 - Soft physics) for the ALICE collaboration.
- 02/2006–Present Software coordinator for the Physics Working Group 2 (PWG2 - Soft physics) for the ALICE collaboration.
- 02/2006–Present Software coordinator for the Event by Event topic of the PWG2 for the ALICE collaboration.
- 09/2006–Present Responsible for the distributed analysis in the Analysis Task Force (ATF) for the ALICE collaboration.
- 09/2006–Present Responsible for the GRID analysis tutorials for the ALICE collaboration.

B.4 Publications and Preprints

1. C. Alt et al., "Strangeness from 20 AGeV to 158 AGeV", published in J. Phys. G 30, S119-S128 (2004).
2. C. Alt et al., "Observation of an exotic $s = -2$, $Q = -2$ baryon resonance in proton proton collisions at the CERN SPS", published in Phys. Rev. Lett. 92, 042003 (2004).

3. T. Anticic et al., "Transverse momentum fluctuations in nuclear collisions at 158 AGeV", published in Phys. Rev. C 70, 034902 (2004).
4. T. Anticic et al., " Λ and $\bar{\Lambda}$ production in central Pb+Pb collisions at 40 AGeV, 80 AGeV and 158 AGeV", published in Phys. Rev. Lett. 93, 022302 (2004).
5. C. Alt et al., "Multistrange hyperon production in Pb+Pb collisions at 30 AGeV, 40 AGeV, 80 AGeV and 158 AGeV", published in Prog. Part. Nucl. Phys. 53, 269-272 (2004).
6. T. Anticic et al., "Energy and centrality dependence of the deuteron and proton production in Pb+Pb collisions at relativistic energies", published in Phys. Rev. C 69, 024902 (2004).
7. M. Gazdzicki et al., "Report from NA49", published in J. Phys. G 30, S701-S708 (2004).
8. S. Kniege et al., "Rapidity and transverse momentum dependence of $\pi^-\pi^-$ Bose-Einstein correlations measured at Event by event fluctuations of particle ratios in central Pb+Pb collisions at 20 AGeV, 30 AGeV, 40 AGeV, 80 AGeV and 158 AGeV beam energy", published in J. Phys. G 30, S1073-S1078 (2004).
9. C. Roland et al., "Event by event fluctuations of particle ratios in central Pb+Pb collisions at 20 AGeV to 158 AGeV", published in J. Phys. G 30, S1381-S1384 (2004).
10. C. Alt et al., "Electric charge fluctuations in central Pb+Pb collisions at 20 AGeV, 30 AGeV, 40 AGeV, 80 AGeV and 158 AGeV", published in Phys. Rev. C 70, 064903 (2004).
11. C. Alt et al., "System size dependence of strangeness production in nucleus nucleus collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV", published in Phys. Rev. Lett. 94, 052301 (2005).
12. C. Alt et al., " Ω^- and $\bar{\Omega}^+$ production in central Pb+Pb collisions at 40 AGeV and 158 AGeV", published in Phys. Rev. Lett. 94, 192301 (2005).
13. C. Alt et al., "System size and centrality dependence of the Balance Function in A+A collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV", published in Phys. Rev. C 71, 034903 (2005).

14. M Rybczynski et al., "Multiplicity fluctuations in nuclear collisions at 158 AGeV", published in J. Phys. Conf. Ser. 5, 74-85 (2005).
15. P. Christakoglou et al., "System size and centrality dependence of the electric charge correlations in A+A and p+p collisions at the SPS energies", published in Nucl. Phys. A 749, 279-282 (2005).
16. D. Flierl et al., "Indications for the onset of deconfinement in nucleus nucleus collisions", to appear in the proceedings of 32nd International Conference on High-Energy Physics (ICHEP 04).
17. G. Georgopoulos, P. Christakoglou, A. Petridis, M. Vassiliou, "Wavelet analysis in Pb+Pb collisions at the CERN SPS", published in *Crete 2002, Correlations and fluctuations in QCD* 282-292 (2003).
18. D. Flierl et al., "Indications for the onset of deconfinement in nucleus nucleus collisions", published in AIP Conf. Proc. 756, 433-435 (2005).
19. P. Seyboth et. al, "Indications for the onset of deconfinement in Pb+Pb collisions at the CERN SPS from NA49", published in Acta Phys. Polon. B36, 565-573 (2005).
20. C. Alt et. al, "Upper limit of D0 production in central Pb+Pb collisions at 158-A-GeV.", nucl-ex/0507031.
21. C. Alt et al., "Inclusive production of charged pions in p+p collisions at 158-GeV/c beam momentum.", submitted to Eur.Phys.J.C, hep-ex/0510009.
22. P. Christakoglou et al., "Energy and rapidity dependence of electric charge correlations at 20-GeV - 158-GeV beam energies at the CERN-SPS (NA49).", to appear in the proceedings of 35th International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD 05), Kromeriz, Czech Republic, 9-15 Aug 2005, nucl-ex/0510045.
23. C. Hohne et al., "Report from NA49", to appear in the proceedings of 18th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2005 (QM 2005), Budapest, Hungary, 4-9 Aug 2005, nucl-ex/0510054.
24. C. Alt et al, "High P_T spectra of identified particles produced in Pb+Pb collisions at 158-GeV/nucleon beam energy", to appear in the proceedings of

18th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2005 (QM 2005), Budapest, Hungary, 4-9 Aug 2005, nucl-ex/0510054.

25. C. Alt et al, "Elliptic flow of Lambda hyperons in Pb + Pb collisions at 158- AGeV", to appear in the proceedings of 18th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2005 (QM 2005), Budapest, Hungary, 4-9 Aug 2005, published in Nucl.Phys.A774:499-502,2006.
26. A. Adronic et al., "Transition radiation spectra of electrons from 1 to 10 GeV/c in regular and irregular radiators.", submitted to Elsevier Science.
27. C. Alt et al., " Main physics results and further analysis plans of the NA49 collaboration on nucleus nucleus collisions at SPS energies.", ERN-SPSC-2005-041, CERN-SPSC-P-264-ADD-12, Nov 2005.
28. C. Alt et al, "Rapidity dependence of Bose-Einstein correlations at SPS energies.", published in AIP Conf.Proc.828:473-478,2006.
29. T. Anticic et al., "Recent results from the NA49 experiment.", published in "Camyuva-Kemer 2003, Structure and dynamics of elementary matter" 53-60.
30. C. Alt et al., "Energy and centrality dependence of anti-p and p production and the anti-Lambda/anti-p ratio in Pb+Pb collisions between 20/A-GeV and 158/A-GeV.", published in Phys.Rev.C73:044910,2006.
31. M. Mitrovski et al., "Strangeness production at SPS energies.", published in J.Phys.G32:S43-S50,2006.
32. T. Schuster et al., "High p(T) spectra of identified particles produced in Pb+Pb collisions at 158-A-GeV beam energy.", published in J.Phys.G32:S479-S482,2006.
33. C. Alt et al., "Inclusive production of charged pions in p+C collisions at 158-GeV/c beam momentum.", hep-ex/0606028 - Submitted to Eur.J.Phys.
34. C. Alt et al., "Elliptic flow of Lambda hyperons in Pb + Pb collisions at 158A- GeV", nucl-ex/0606026 - Submitted to Phys.Rev.Lett.

35. N. Antoniou et al., "Study of hadron production in hadron nucleus and nucleus nucleus collisions at the CERN SPS", CERN-SPSC-2006-034, CERN-SPSC-P-330, Nov 2006.
36. P. Christakoglou et al., "Using the Balance Function to study the charge correlations of hadrons", nucl-ex/0611015 - To appear in the proceedings of the "Quark Confinement and Hadron Spectrum VII".
37. P. Christakoglou et al., "Study of charge correlations using the Balance Function", to appear in the proceedings of the SPHIC06.
38. B. Alessandro et.al, (ALICE Collaboration)J. Phys. **G30** (2004) 1517.
39. B. Alessandro et.al, (ALICE Collaboration)J. Phys. **G32** (2006) 1295.
40. F Carminati et al., "ALICE: Computing technical design report.", CERN/L-HCC 2005.

B.5 Conferences

Correlations and Fluctuations 2002 Crete, June 2002.

"Search for dynamical fluctuations in Pb+Pb collisions", published in the proceedings of *"Correlations and Fluctuations 2002"*.

HEP 2003 Athens, April 2003.

"Centrality dependence of the Balance Function in Pb+Pb collisions", <http://www.inp.demokritos.gr/eesfye/proceedings.html>.

QUARK MATTER 2004 Oakland, January 2004

"Charge correlations and fluctuations in Pb+Pb, Si+Si, and p+p collisions at 20-158 GeV beam energies at the CERN-SPS", poster presented at the conference.

NPDC18 Prague, August 2004

"System size and centrality dependence of the electric charge correlations in A+A and p+p collisions at the SPS energies", published in Nucl. Phys. A 749, 279-282 (2005).

- ISMD05 Kromeriz, August 2005
 “Energy and rapidity dependence of the electric charge correlations at 20-158 GeB beam energies at the CERN-SPS (NA49)”, to be published in the conference’s proceedings.
- SC05 Seattle, November 2005
 “ALICE distributed analysis demo.”, application demonstrated at the conference.
- LHC Physics School Lecce, June 2006
 Participation in the *“Italo-Hellenic LHC Physics School”*.
- QCHS7 Azores, September 2006
 “Using the Balance Function to study the charge correlations of hadrons”, to be published in the conference’s proceedings.
- SPHIC06 Catania, September 2006
 “Study of charge correlations using the Balance Function”, to be published in the conference’s proceedings.
- Physics Week 07 Muenster, February 2007
 “Baryon yields in p+p collisions”.

B.6 Internal Notes

- NA49 Internal note P. Christakoglou et al. *“Is there any boost invariance or multiplicity dependence in the Balance Functions?”*], NA49 internal note.
- ALICE Internal note P. Christakoglou et al. *“Event by event physics in ALICE.”*, ALICE internal note (ALICE-INT-2005-047 v.1).
- ALICE internal note P. Christakoglou, *“Measuring mechanical deformation of the outer structure of ALICE detectors”*, ALICE internal note.
- ALICE Internal note P. Christakoglou and P. Hristov, *“The Event Tag System”*, ALICE-INT-2006-023.

ALICE Internal note P. Christakoglou and M. Oldenburg, “Distributed Analysis - Overview of the framework and practical examples”, ALICE internal note (to be submitted).

ALICE Internal note F. Carminati et al., “ALICE offline primer”, ALICE internal note (to be submitted).

B.7 Teaching Experience

1997–2003	Tutor Private lessons in Physics, Chemistry, Mathematics, Biology for high school students.
2001–2003	Teaching assistant in nuclear physics laboratory at the University of Athens, Physics Department.
2001-2003	Tutor Lessons in Physics to University candidates.
2006	ALICE Tutor Responsible for presenting the official ALICE tutorials for the PROOF framework to the collaborators.
2006-Present	ALICE Tutor Responsible for presenting the official ALICE tutorials for the distributed analysis framework to the collaborators (GRID).

B.8 Language Knowledge - Computer Skills

English:	University of Cambridge - Proficiency in English.
French:	Institute de Francais d’ Athenes - Certificat de Lange Francaise.
Greek	Native
Operation Systems:	Windows 95/98/NT/2000/Me/XP MS-Dos

Unix, Linux (several platforms like Redhat, Suse, Fedora, Mandrake, SLC)

Mac OS X

Programming Languages: Clipper, C, C++, Pascal, Fortran, Visual Basic, Delphi.

Databases: Development of applications using

MySQL

Delphi

Power Builder

Access

SQL-4GL (Informix)

Oracle

Software Packages: Microsoft Office, Open Office, LaTeX, Tcl/Tk, ROOT, AliRoot.

Version Management Package: Concurrent Versions System (CVS).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- [1] T. D. Lee, G. C. Wick, Phys. Rev. **D9** (1974) 2291;
T. D. Lee, Rev. Mod. Phys. **47** (1975) 267.
- [2] J. Collins, M. J. Perry, Phys. Rev. Lett. **34** (1975) 1353.
- [3] A. M. Polyakov, Phys. Lett. **B72** (1978) 477.
- [4] L. Susskind, Phys. Rev. **D20** (1979) 2610.
- [5] E. V. Shuryak, Phys. Lett. **D78** (1978) 150.
- [6] R. Hagedorn, Nuovo Cimento Sppl **6** (1965) 147.
- [7] N. Cabibbo, G. Parisi, Phys. Lett. **B59** (1975) 67.
- [8] G. Baym, S. A. Chin, Phys. Lett. **B62** (1976) 241.
- [9] J. Cleymans et al., Z. Phys. **C33** (1986) 151.
- [10] F. Karsch et al., Phys. Lett. **B478** (2000).
- [11] C. Bernard et al., Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 3087.
- [12] T. Blum et al., Phys. Rev. **D51** (1995) 5153.
- [13] B. Muller, Rep. Prog. Phys. **58** (1995) 611.
- [14] R. Stock, Nucl. Phys. **A661** (1999) 282c.
- [15] P. Braun-Minziger et al., Phys. Lett. **D465** (1999) 15.
- [16] A. Bamberger et al. [NA35], Z Phys. C. Particles and Fields **38** (1988) 19.
- [17] A. Bamberger et al. [NA35], Phys. Lett. **B203** (1988) 320.
- [18] A. Bamberger et al. [NA35], Z Phys. C. Particles and Fields **38** (1988) 79.
- [19] <http://cern.web.cern.ch/CERN/Announcements/2000/NewStateMatter>.

- [20] D.H. Rischke, Prog. Part. Nucl. Phys. **52** (2004) 197.
- [21] F. Karsch, Lecture Notes in Physics **583** (2002) 209.
- [22] O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann and M. Lutgemeir, Phys. Rev. **D62** (2000) 0340021.
- [23] T. Matsui and H. Satz, Phys. Lett. **B178** (1986) 416;
F. Karsch, M. T. Mehr and H. Satz, Z. Phys. **C37** (1988) 617.
- [24] M. Asakawa and T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 012001;
S. Datta et al., J. Phys. **G30** (2004) S1347.
- [25] A. Laermann and O. Philipsen, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **53** (2003) 163.
- [26] Z. Fodor and S.D. Katz, JHEP **0404** (2004) 050.
- [27] Z. Fodor and S.D. Katz, Phys. Lett. **B534** (2002) 87;
Z. Fodor and S.D. Katz, JHEP **0203** (2002) 014.
- [28] M. van Leeuwen et al., Nucl. Phys. **A715** (2003) 161c.
- [29] E. Schnedermann, J. Sollfrank and U. Heinz, Phys. Rev. **C48** (1993) 2462.
- [30] C. Adler et al., Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 092301;
J. Adams et al., Phys. Rev. **C70** (2004) 041901;
J. Adams et al., Phys. Lett. **B595** (2004) 143;
J. Adams et al., nucl-ex/0406003.
- [31] S.S. Adler et al., Phys. Rev. **C69** (2004) 034909.
- [32] E. Yamamoto et al., Nucl. Phys. **A715** (2003) 466c.
- [33] K. Schweda et al., J. Phys. **G30** (2004) S693.
- [34] F. Becattini et al., Phys. Rev. **C69** (2004) 024905.
- [35] F. Retiere and M. Lisa, Phys. Rev. **C70** (2004) 044907.
- [36] C. Alt et al., Phys. Rev. **C68** (2003) 034903.
- [37] A. Laszlo, T. Schuster et al., nucl-ex/0510054.
- [38] M. Gazdzicki and M.I. Gorenstein, Acta Phys. Polon. **B30** (1999) 2705.

- [39] I. Arsene et al., Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 072305.
- [40] S.S. Adler et al., Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 072303.
- [41] B.B. Back et al., Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 072302.
- [42] J. Adams et al., Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 072304.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- [1] H. Heiselberg, Phys.Rep. **351** (2001) 161.
- [2] L. Van Hove, Phys.Lett. **B118** (1982) 138.
- [3] M. A. Stephanov, K. Rajagopal and E. Shuryak, Phys.Rev.Lett. **81** (1998) 4826.
- [4] A. Barducci *et al.*, Phys.Lett. **B231** (1989) 463.
- [5] J. Berges and K. Rajagopal, Nucl.Phys. **B538** (1999) 215.
- [6] A. Halasz *et al.*, Phys.Rev. **D58** (1998) 096007.
- [7] M. A. Stephanov, K. Rajagopal and E. Shuryak, Phys.Rev. **D60** (1999) 114028.
- [8] O. Philipsen, hep-lat/0510077.
- [9] S. Gavin, Phys.Rev.Lett. **92** (2004) 162301.
- [10] T. Anticic *et al.*, (NA49 Collaboration), Phys.Rev. **C70** (2004) 034902.
- [11] H. Appelshauser *et al.*, (NA49 Collaboration), Phys.Lett. **B459** (1999) 679.
- [12] St. Mrowczynski, Phys.Lett. **B439** (1998) 6.
- [13] G. Baym and H. Haiselberg, Phys.Lett. **B469** (1999) 7.
- [14] M. Gazdzicki and St. Mrowczynski, Z.Phys. **C54** (1992) 127.
- [15] C. Pruneau, S. Gavin, S. Voloshin, Phys.Rev. **C66** (2002) 044904.

- [16] K. Adcox *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys.Rev. **C66** (2002) 024901.
- [17] S.S. Andler *et al.*, (PHENIX Collaboration), Phys.Rev.Lett. **93** (2004) 092301.
- [18] D. Adaamova *et al.*, (CERES Collaboration), Nucl.Phys. **A727** (2003) 97.
- [19] C. Pruneau *et al.*, (STAR Collaboration), preprint nucl-x/0401016.
- [20] Z. Ahammed *et al.*, (STAR Collaboration), Pramana **60** (2002) 993.
- [21] M. Rybczynski *et al.*, (NA49 Collaboration), J.Phys.Conf.Ser. **4** (2005) 74;
C. Alt *et al.*, (NA49 Collaboration), nucl-ex/0612010.
- [22] M.M. Aggerwal *et al.*, (WA98 Collaboration), Phys.Rev. **C65** (2002) 054912.
- [23] J. Rafelski, Phys.Rep. **88** (1982) 331.
- [24] J.I Kapusta, A. Mekjian, Phys.Rev. **D33** (1986) 1304.
- [25] S.V. Afanasiev *et al.*, (NA49 Collaboration), Phys.Rev.Lett **86** (2001) 1965.
- [26] C. Roland, PhD Thesis University of Frankfurt (1999).
- [27] M. Gazdzicki, Nucl.Phys. **A590** (1995) 197c.
- [28] C. Roland, J.Phys. **G30** (2004) S1381.
- [29] M. Bleicher *et al.*, J.Phys. **G25** (1999) 1859.
- [30] S. Das *et al.*, (STAR Collaboration), nucl-ex/0503023.
- [31] C. Roland, J.Phys. **G31** (2005) S1075.
- [32] S. Jeon and V. Koch, Phys.Rev.Lett. **85** (2000) 2076.
- [33] C. Alt *et al.*, (NA49 Collaboration), Phys.Rev. **C70** (2004) 034902.
- [34] K. Adcox *et al.*, (PHENIX Collaboration), Phys.Rev.Lett. **89** (2002) 082301.
- [35] J. Adams *et al.*, (STAR Collaboration), Phys.Rev. **C68** (2003) 044905.

- [36] C. Pruneau *et al.*, (STAR Collaboration), nucl-ex/0401016.
- [37] J. Zaranek, Phys.Rev. **C66** (2002) 024905.
- [38] S. Mrowczynski, Phys.Rev. **C66** (2002) 024904.
- [39] A. Bialas, Phys.Lett. **B532** (2002) 249.
- [40] M. Asakawa, U. Heinz, B. Muller, Phys.Rev.Lett. **85** (2000) 2072.
- [41] M. Gazdzicki and St. Mrowczynski, Z.Phys. **C54** (1992) 127.
- [42] C. Alt *et al.*, (NA49 Collaboration), Phys.Rev. **C70** (2004) 064903.
- [43] J.T. Michell, nucl-ex/0404005.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- [1] S. A. Bass, P. Danielewicz and S. Pratt, Phys.Rev.Lett. **85** (2000) 2689.
S. Pratt, Nucl.Phys. **A698** (2002) 531c-534c.
- [2] D. Drijard *et al.*, Nucl.Phys. **B155** (1979) 269.
D. Drijard *et al.*, Nucl.Phys. **B166** (1980) 233.
- [3] R. Brandelik *et al.*, Phys. Lett. **B100** (1981) 357.
M. Althoff *et al.*, Z.Phys. **C17** (1983) 5.
H. Aihara *et al.*, Phys.Rev.Lett. **53** (1984) 2199.
H. Aihara *et al.*, Phys.Rev.Lett. **57** (1986) 3140.
P.D. Acton *et al.*, Phys.Lett. **B305** (1993) 415.
- [4] J. Adams *et al.*, (STAR Collaboration), Phys.Rev.Lett. **90** (2003) 172301.
G. Westfall *et. al.*, J.Phys. **G30** (2004) S345.
- [5] C. Alt *et al.*, (NA49 Collaboration), Phys.Rev. **C71** (2005) 034903.
P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), Nucl.Phys. **A749** (2005) 279.
P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), AIP Conf.Proc.**828** (2006) 107.
- [6] S. Pratt and S. Cheng, Phys.Rev. **C68** (2003) 014907.

- [7] S. Pratt, Phys.Rev. **D33** (1986) 1314.
G.F Bertch, Nucl.Phys. **A498** (1989) 173c.
- [8] A. Bialas, Phys.Lett. **B579** (2004) 31.
A. Bialas and J. Rafelski, Phys.Lett. **B633** (2006) 488-491.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

- [1] See for recent results: Proc. of Quark Matter 2001, Nucl.Phys **A698** (2002).
- [2] S. Afanasiev *et al.*, Nucl.Instr. and Methods **A430** (1999) 210-244.
- [3] J. Günter, Diplomarbeit, Universität Frankfurt am Main (1998).
- [4] C. Bormann, Dissertation, Universität Frankfurt am Main (1998).
- [5] A. Billmeier, Dissertation, Universität Frankfurt am Main (2000).
- [6] F. Gabler, Dissertation, Universität Frankfurt am Main (1998).
- [7] R. Barton, Doktorarbeit, University of Birmingham (2000).
- [8] C. Markert, Dissertation, Universität Frankfurt am Main (2000).
- [9] V. Friese, Dissertation, Universität Marburg (1998).
- [10] S. Afanasiev *et al.*, hep-ex/000905 2 (2000).
- [11] C. Roland Dissertation, Universität Frankfurt am Main (1999).
- [12] H. Appelshäuser, Dissertation, Universität Frankfurt am Main (1997).
- [13] R. Ganz *et al.*, Nucl.Phys. **A661** (1999) 448-451.
- [14] CPS Magnet Handbook, 1976.
- [15] J. Harris *et al.*, Nucl.Instr. and Meth. **A135** (1992) 33.
- [16] G. Rai *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-37** (1990) 56.
- [17] A. Kühmichel, Nucl. Instr. and Meth. **A360** (1995) 52-56.
- [18] T.Alber *et al.*, Nucl. Instr. and Meth.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

- [1] S. Afanasiev *et al.*, Nucl.Instr. and Methods **A430** (1999) 210-244.
- [2] C. Hoehne, private communication;
C. Blume, private communication;
M. Gazdzicki, private communication;
K. Perl, private communication;
P. Seyboth, private communication.
- [3] P. Christakoglou, Master Thesis;
C. Alt *et al.*, (NA49 Collaboration), Phys.Rev. **C71** (2005) 034903;
P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), Nucl.Phys. **A749** (2005) 279-282;
P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), ISMD05;
P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), QCHS7.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

- [1] P. Christakoglou, Master Thesis.
C. Alt *et al.*, (NA49 Collaboration), Phys.Rev. **C71** (2005) 034903.
P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), Nucl.Phys. **A749** (2005) 279-282.
P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), AIP Conf.Proc.**828** (2006) 107.
P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), AIP Conf.Proc.**892** (2007).
- [2] J. Adams *et al.*, (STAR Collaboration), Phys.Rev.Lett. **90** (2003) 172301.
G. Westfall *et. al.*, J.Phys. **G30** (2004) S345.
- [3] Xin-Nian Wang, Miklos Gyulassy, Phys.Rev.D **3501-3516**, 44 (1991).
- [4] M. Bleicher *et al.*, Nucl. Part. Phys. **25**, 1859-189 (1999).
- [5] W. Ehehalt, W. Cassing, *Nucl. Phys. A* **602**, 449-486 (1996).
- [6] S. A. Bass, P. Danielewicz and S. Pratt, Phys.Rev.Lett. **85** (2000) 2689.
S. Pratt, Nucl.Phys. **A698** (2002) 531c-534c.

- [7] P. Bozek et al., Heavy Ion Phys. **A21** (2004) 49.
P. Bozek et al., J. Phys. **G30** (2004) S1321.
P. Bozek et al., Acta Phys.Hung. **A22** (2005) 149.
- [8] S. Pratt and S. Cheng, Phys.Rev. **C68** (2003) 014907.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

- [1] S. A. Bass, P. Danielewicz and S. Pratt, Phys.Rev.Lett. **85** (2000) 2689.
S. Pratt, Nucl.Phys. **A698** (2002) 531c-534c.
- [2] P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), AIP Conf.Proc.**892** (2007).
- [3] M. Bleicher et al., J. Phys. **G25**, (1999) 1859.
- [4] S. Pratt and S. Cheng, Phys.Rev. **C68** (2003) 014907.
- [5] G. Westfall et. al, J.Phys. **G30** (2004) S345.
- [6] P. Bozek et al., Heavy Ion Phys. **A21** (2004) 49.
P. Bozek et al., J. Phys. **G30** (2004) S1321.
P. Bozek et al., Acta Phys.Hung. **A22** (2005) 149.
- [7] Z. W. Lin et al., Phys. Rev. **C72**, (2005) 064901.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

- [1] C. Alt *et al.*, (NA49 Collaboration), Phys.Rev. **C71** (2005) 034903.
- [2] J. Adams *et al.*, (STAR Collaboration), Phys.Rev.Lett. **90** (2003) 172301.
- [3] P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), Nucl.Phys. **A749** (2005) 279.
P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), AIP Conf.Proc.**828** (2006) 107.
- [4] P. Christakoglou *et al.*, (NA49 Collaboration), AIP Conf.Proc.**892** (2007).
- [5] G. Westfall et. al, J.Phys. **G30** (2004) S345.

- [6] M. Gyulassy and X. N. Wang, Comput. Phys. Commun. **83**, (1994) 307.
- [7] M. Bleicher et al., J. Phys. **G25**, (1999) 1859.
- [8] Z. W. Lin et al., Phys. Rev. **C72**, (2005) 064901.
- [9] W. Broniowski et al. Phys. Rev. **C73**, (2006) 064902.
- [10] S. Pratt and S. Cheng, Phys.Rev. **C68** (2003) 014907.
- [11] P. Bozek et al., Heavy Ion Phys. **A21** (2004) 49.
P. Bozek et al., J. Phys. **G30** (2004) S1321.
P. Bozek et al., Acta Phys.Hung. **A22** (2005) 149.
- [12] B. Zhang, Comput. Phys. Commun. **109**, (1998) 307.
- [13] T. Sjostrand, Comput. Phys. Commun. **82**, (1994) 74.
- [14] B. A. Li and C. M. Ko, Phys. Rev. **C52**, (1995) 2037.
- [15] F. Becattini et al., Phys. Rev. **C69** (2004) 024905.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

- [1] ALICE Collaboration, Technical Proposal, CERN/LHCC/95-71.
ALICE Collaboration, Technical Proposal, Addendum 1, CERN/LHCC/96-32.
ALICE Collaboration, Technical Proposal, Addendum 2, CERN/LHCC/99-13.
- [2] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the Inner Tracking System, CERN/LHCC/1999-22.
- [3] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the Time Projection Chamber, CERN/LHCC/2000-01.
- [4] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the transition Radiation Detector, CERN/LHCC/2001-21.

- [5] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the Time Of Flight Detector, CERN/LHCC/2000-12.
ALICE Collaboration, Technical Design Report of the Time Of Flight Detector, Addendum 1, CERN/LHCC/2002-16.
- [6] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the High Momentum Particle Identification Detector, CERN/LHCC/1998-19.
- [7] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the Photon Spectrometer, CERN/LHCC/1999-04.
- [8] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the EM Calorimeter.
- [9] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the Photon Multiplicity Detector, CERN/LHCC/1999-32.
- [10] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the Forward Multiplicity Detector.
- [11] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the Zero Degree Calorimeter, CERN/LHCC/1999-05.
- [12] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the Forward Muon Spectrometer, CERN/LHCC/1999-22.
- [13] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the V0 detector.
- [14] ALICE Collaboration, Technical Design Report of the T0 detector.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

- [1] P. Saiz *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A**502** (2003) 437-440.
<http://alien.cern.ch/>.
- [2] <http://lcg.web.cern.ch/LCG/>.
- [3] F. Carminati *et al.*, ALICE collaboration, CERN/LHCC 2005.
- [4] <http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/lhc-new-homepage/>.
- [5] <http://www.cern.ch/MONARC/>.

- [6] <http://www.cern.ch/ALICE/Projects/offline/aliroot/Welcome.html>.
- [7] <http://root.cern.ch/>.
- [8] R. Brun, F. Bruyant, M. Maire, A.C. McPherson, P. Zancarini, GEANT3 User Guide, CERN Data Handling Division DD/EE/84-1 (1985).
<http://wwwinfo.cern.ch/asdoc/geantold/GEANTMAIN.html>.
- [9] A. Fassò *et al.*, in *Proc. of Computing in High Energy and Nuclear Physics*, La Jolla, California (2003).
<http://www.slac.stanford.edu/econf/C0303241/proc/papers/MOMT004.PDF>.
- [10] S. Agostinelli *et al.*, Geant4 - A simulation toolkit, CERN-IT-20020003, KEK Preprint 2002-85, SLAC-PUB-9350, submitted to Nucl. Instrum. and Methods A.
<http://wwwinfo.cern.ch/asd/geant4/geant4.html>.
- [11] I. Hřivnáčová *et al.*, in *Proc. of Computing in High Energy and Nuclear Physics*, La Jolla, California (2003).
<http://www.slac.stanford.edu/econf/C0303241/proc/papers/THJT006.PDF>.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

- [1] <http://castor.cern.ch>
- [2] "ALICE Physics Performance Report", CERN/LHCC 2003-049.
- [3] F. Carminati *et al.*, ALICE collaboration, CERN/LHCC 2005.
- [4] P. Saiz *et al.*, Nucl. Instrum. Methods **A502** (2003) 437-440.
<http://alien.cern.ch/>.
- [5] <http://www.star.bnl.gov/>
- [6] <http://cern.ch/Oldenburg/MetaData/MetaData.doc>
- [7] <http://project-arda-dev.web.cern.ch/project-arda-dev/alice/apiservice/AA-UserGuide-0.0m.pdf>
- [8] <http://pcaliweb02.cern.ch/Offline/Analysis/RunEventTagSystem/RunTags.html#Run/File%20metadata%20query%20howto>

- [9] P. Christakoglou and P. Hristov, "The Event Tag System", ALICE-INT-2006-023.
- [10] A. Shoshani, A. Sim, and J. Wu, "Storage resource managers: Middleware components for grid storage", in Proceedings of Nineteenth IEEE Symposium on Mass Storage Systems, 2002 (MSS 2002).
- [11] K. Wu *et al.*, "Grid collector: An event catalog with automated file management".
- [12] <http://pcaliweb02.cern.ch/Offline/Analysis/CAF/>
- [13] <http://alicedcs.web.cern.ch/AliceDCS/>
- [14] <http://ph-dep-aid.web.cern.ch/ph-dep-aid/>
- [15] <http://www.cern.ch/ALICE/Projects/offline/aliroot/Welcome.html>.
- [16] <http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/lhc-new-homepage/>.
- [17] <http://alice-ecs.web.cern.ch/alice-ecs/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

- [1] B. Alessandro et.al, (ALICE Collaboration)J. Phys. **G32** (2006) 1295.
- [2] B. Alessandro et.al, (ALICE Collaboration)J. Phys. **G30** (2004) 1517.
- [3] G. Westfall et. al, J.Phys. **G30** (2004) S345-S349.

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Στον πίνακα φαίνονται τα διάφορα επιταχυντικά συστήματα, τα ιόντα που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι ενέργειες στο κέντρο μάζας αλλά και στο εργαστήριο (στην περίπτωση των πειραμάτων σταθερού στόχου του <i>SPS</i>	3
4.1	Διαστάσεις των ανιχνευτών προβολής χρόνου (<i>TPCs</i>) του πειράματος <i>NA49</i>	63
5.1	Τα διαφορετικά συστήματα αλλά και οι κατηγορίες κεντρικότητας για τα πειραματικά δεδομένα που αναλύθηκαν στην ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$. Στον πίνακα φαίνονται τα συστήματα και οι 6 κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων <i>Pb + Pb</i> , καθώς και το εύρος της ενέργειας στο καλορίμετρο που καθορίζει την κεντρικότητα μαζί με τον αριθμό των νουκλεονίων που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση. Τέλος, παρατίθεται και το αντίστοιχο εύρος της παραμέτρου κρούσης.	80
5.2	Οι αντίστοιχες πληροφορίες που υπάρχουν στον πίνακα 5.1 αυτή τη φορά για την περίπτωση της ενέργειας $\sqrt{s_{NN}} = 8.8\text{GeV}$. . .	81
5.3	Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται η ενέργεια της αλληλεπίδρασης, ο αριθμός των γεγονότων που αναλύθηκαν, η ενεργός διατομή που αντιστοιχείστις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις <i>Pb+Pb</i> ως ποσοστό της ολικής ανελαστικής ενεργού διατομής, καθώς και ο αριθμός των νουκλεονίων που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση. Στην τελευταία στήλη το πρώτο σφάλμα αντιστοιχεί στο στατιστικό σφάλμα, ενώ ο δεύτερος όρος (όπου υπάρχει) στο συστηματικό.	82

5.4	Οι τιμές των παραμέτρων A , B , C και D των καμπυλών του φίλτρου αποδοχής για τις χαμηλές ενέργειες του SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 6.3 - 7.6 - 8.8 GeV$) αλλά και για τα διαφορετικά διαστήματα της ωκύτητας υπολογισμένης στο κέντρο μάζας.	90
5.5	Οι τιμές των παραμέτρων A , B , C και D των καμπυλών του φίλτρου αποδοχής για τις δυο μεγαλύτερες ενέργειες του SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 12.3 - 17.3 GeV$) αλλά και για τα διαφορετικά διαστήματα της ωκύτητας υπολογισμένης στο κέντρο μάζας.	94
5.6	Οι περιοχές της μέσης ωκύτητας και αυτές της εμπρόσθιας ωκύτητας για τις ενέργειες του SPS που αναλύθηκαν.	95
6.1	Τα διαφορετικά είδη δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν για τον υπολογισμό των συστηματικών σφαλμάτων. Παραθέτονται το είδος της αλληλεπίδρασης, με τον αριθμό στην παρένθεση να ορίζει την αντίστοιχη κατηγορία δεδομένων, η περίοδος κατά την οποία καταγράφηκαν τα δεδομένα αλλά και η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου.	102
6.2	Το εύρος των κατανομών της Balance Function για τις διαφορετικές κατηγορίες πειραματικών δεδομένων που αναλύθηκαν.	102
8.1	Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται ο αριθμός των γεγονότων $Pb+Pb$ που έχουν παραχθεί με τη βοήθεια του μοντέλου AMPT, η κεντρικότητα αλλά και το εύρος της παραμέτρου κρούσης. Η τελευταία στήλη δίνει το μέσο χρόνο αδρονοποίησης των γεγονότων για κάθε κλάση κεντρικότητας.	155
9.1	Οι διαστάσεις των διαφόρων επιπέδων του ITS	172
9.2	Παράμετροι των διαφόρων επιπέδων του ITS	173
9.3	Παράμετροι του ανιχνευτή TPC	177
9.4	Παράμετροι του ανιχνευτή TRD	179
9.5	Παράμετροι του ανιχνευτή TOF	180
11.1	Τα πεδία metadata που χαρακτηρίζουν κάθε run	204
12.1	Η ενέργεια και ο αντίστοιχος αριθμός των γεγονότων που αναλύθηκε για τις αλληλεπιδράσεις $p + p$ καθώς και η περίοδος παραγωγής τους.	215

A.1	Run tag fields.	234
A.2	Run tag methods.	235
A.3	LHC tag fields.	235
A.4	LHC tag methods.	235
A.5	Detector tag fields - the configuration will be retrieved from ECS.	236
A.6	Detector tag methods.	236
A.7	Event tag fields.	237
A.8	Event tag fields (cont.).	238
A.9	Event tag methods.	239
A.10	Event tag methods.	240

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	LQCD υπολογισμοί για το λόγο P/T^4 της ισχυρά αλληλεπιδρώσας ύλης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για διαφορετικές επιλογές του αριθμού και του είδους των γεύσεων των quarks .	4
1.2	Η εξάρτηση του λόγου $\mu(T)/T$ από την τιμή της θερμοκρασίας του συστήματος εκφρασμένης από το λόγο T/T_C . Οι καμπύλες δείχνουν τις αναμενόμενες συμπεριφορές του λόγου από τη μελέτη της pQCD.	5
1.3	LQCD αποτελέσματα για μη μηδενικό χημικό δυναμικό. Η συνεχής γραμμή δείχνει την περιοχή της μετάβασης φάσης πρώτης τάξης ενώ η διακεκομμένη καμπύλη υποδηλώνει την περιοχή της μετάβασης crossover.	6
1.4	m_T φάσματα όπως υπολογίστηκαν από αλληλεπιδράσεις $Pb+Pb$ του SPS σε ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 17.3GeV$ (για τα δυο αριστερά γραφήματα), $\sqrt{s_{NN}} = 6.3GeV$ και $\sqrt{s_{NN}} = 7.6GeV$ (για τα δυο δεξιά γραφήματα).	8
1.5	m_T φάσματα για την κεντρική περιοχή της ωκύτητας όπως υπολογίστηκαν από αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ του RHIC σε ενέργειες $\sqrt{s_{NN}} = 200GeV$	9
1.6	Οι κατανομές της ωκύτητας των παραγομένων σωματιδίων σε κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε όλο το ενεργειακό φάσμα του SPS. Τα κλειστά σύμβολα δείχνουν τις πραγματικές μετρήσεις ενώ τα ανοιχτά είναι τα αντικατοπτρισμένα, λόγω συμμετρίας, σημεία.	10
1.7	Τα αποτελέσματα μιας προσαρμογής ενός στατιστικού μοντέλου στα πειραματικά αποτελέσματα του NA49 (αριστερό γράφημα). Το διάγραμμα φάσης της αδρονικής ύλης που δείχνει τα πειραματικά σημεία όπως αυτά προέκυψαν από τη μελέτη στατιστικών μοντέλων (δεξί γράφημα).	11

- 1.8 Οι χωρικές παράμετροι της πηγής των πιονίων ως συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής των ζευγών πιονίων (αριστερό γράφημα). Παράμετροι που προκύπτουν από τη μελέτη blast wave παραμετροποιήσεων σε μελέτες HBT και φάσματα εγκάρσιων μαζών (δεξί γράφημα). 12
- 1.9 Η ενεργειακή εξάρτηση των ακτινικών παραμέτρων που υπολογίζονται από τη μελέτη συσχετισμών $\pi\pi$ σε κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ (SPS) και $Au + Au$ (AGS – RHIC) για μια τιμή της εγκάρσιας ορμής των ζευγών $k_T \approx 0.15 GeV/c$. . . 13
- 1.10 Πάνω αριστερά: Η ενεργειακή εξάρτηση της παραμέτρου v_2 για πόνια. Πάνω δεξιά: Ο λόγος της παραμέτρου v_2 ως προς την εκκεντρότητα της αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση της παραγόμενης σωματιδιακής πυκνότητας. Κάτω αριστερά: Η αζιμουθιακή κατανομή των Λ υπερονίων. Κάτω μέση: Η παράμετρος v_2 των Λ υπερονίων για τα πειράματα NA49 και STAR ως συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής. Κάτω δεξιά: Η παράμετρος v_2 των $\pi^\pm$, p και Λ για το πείραμα NA49 ως συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής 17
- 1.11 Πάνω αριστερά: Η εξάρτηση από την εγκάρσια ορμή των λόγων p/π^+ και Λ/K_s^0 για την κεντρική περιοχή της ωκύτητας και για τις κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ στη μέγιστη ενέργεια του SPS. Πάνω δεξιά: Η εξάρτηση από την εγκάρσια ορμή του λόγου $\bar{p}/\pi^-$ για τα διάφορες ενέργειες. Κάτω αριστερά: Η εξάρτηση από την εγκάρσια ορμή της παραμέτρου R_{CP} για πόνια και για διάφορες ενέργειες. Κάτω δεξιά: Η παράμετρος R_{CP} για πόνια και πρωτόνια στο SPS συγκρινόμενη με υπολογισμούς $pQCD$ 18
- 1.12 Αριστερά: Η ενεργειακή εξάρτηση του λόγου $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$. Μέση: Η ενεργειακή εξάρτηση του λόγου $\langle K^- \rangle / \langle \pi^- \rangle$. Δεξιά: Η ενεργειακή εξάρτηση του λόγου $\langle \Lambda \rangle / \langle \pi^\pm \rangle$ 19
- 1.13 Αριστερά: Η ενεργειακή εξάρτηση της παραμέτρου E_S . Μέση: Η ενεργειακή εξάρτηση του λόγου $\langle \pi \rangle / \langle N_W \rangle$. Δεξιά: Η ενεργειακή εξάρτηση της θερμοκρασίας που προκύπτει από την προσαρμογή μιας εκθετικής συνάρτησης στα m_T φάσματα των K^+ 19

1.14	Οι λόγοι $R_{AB}(P_T)$ για φορτισμένα αδρόνια και π^0 για αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ και $d + Au$ σε σχέση με αλληλεπιδράσεις νουκλεονίων για τα πειράματα BRAHMS [39] (πάνω αριστερά), PHENIX [40] (πάνω δεξιά), PHOBOS [41] (κάτω αριστερά) και STAR [42] (κάτω δεξιά).	20
2.1	Οι διακυμάνσεις της μέσης τιμής της εγκάρσιας ορμής για κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ όπως μετρήθηκαν από το πείραμα NA49.	24
2.2	Η εξάρτηση της παραμέτρου Φ_{P_T} από τον αριθμό των νουκλεονίων που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση για την ενεργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	24
2.3	Οι διακυμάνσεις της σωματιδιακής πολλαπλότητας για φωτόνια και φορτισμένα σωμάτια ως συνάρτηση του αριθμού των συμμετεχόντων νουκλεονίων όπως μετρήθηκαν από το πείραμα WA98 σε αλληλεπιδράσεις $Pb+Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα από ένα μοντέλο που αναπαριστά τη συμπεριφορά των συμμετεχόντων νουκλεονίων αλλά και από το <i>Venus</i>	26
2.4	Η νορμαλισμένη διασπορά της κατανομής του αριθμού των παραγόμενων σωματιδίων για αρνητικά φορτισμένα (πάνω γράφημα), για θετικά φορτισμένα (μεσαίο γράφημα) και για όλα τα σωματίδια (κάτω γράφημα) σε αλληλεπιδράσεις διαφόρων συστημάτων σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ στο πείραμα NA49. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διάφορα αδρονικά μοντέλα.	27
2.5	Οι κατανομές του λόγου $[K^+ + K^-]/[\pi^+ + \pi^-]$ για τα πειραματικά δεδομένα και για τα γεγονότα ανάμιξης για τρεις ενέργειες του <i>SPS</i>	28
2.6	Οι κατανομές του λόγου $[p + \bar{p}]/[\pi^+ + \pi^-]$ για τα πειραματικά δεδομένα και για τα γεγονότα ανάμιξης για τρεις ενέργειες του <i>SPS</i>	28
2.7	Η ενεργειακή εξάρτηση του σήματος των Event by Event διακυμάνσεων των λόγων $[K^+ + K^-]/[\pi^+ + \pi^-]$ (αριστερό γράφημα) και $[p + \bar{p}]/[\pi^+ + \pi^-]$ (δεξί γράφημα) για τα πειραματικά δεδομένα και για το μοντέλο <i>UrQMD</i> . Τα συστηματικά σφάλματα φαίνονται στα σχήματα ως γκρι ζώνες.	29

2.8	(a) Η κατανομή του λόγου K/π για τα πειραματικά δεδομένα και τα γεγονότα ανάμιξης σε αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 200 GeV$. (b) Η ενεργειακή εξάρτηση του σήματος των Event by Event διακυμάνσεων των λόγων K/π για ενέργειες που ξεκινούν από το SPS και καταλήγουν στο $RHIC$	31
2.9	Η εξάρτηση των Φ_q και $\Delta\Phi_q$ από το λόγο των σωματιδίων που αναλύονται για κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ στις ενέργειες του SPS	33
2.10	Αποτελέσματα των διακυμάνσεων του καθαρού φορτίου από το πείραμα $PHENIX$ [34] και $STAR$ [35] για αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 130 GeV$	34
3.1	Διάγραμμα που αναπαριστά τη εξέλιξη στο χώρο και στο χρόνο του διαχωρισμού των παραγομένων σωματιδίων μετά από μια σύγκρουση ιόντων.	38
3.2	Διάγραμμα που αναδεικνύει το κίνητρο για την εφαρμογή της Balance Function	41
3.3	Διάγραμμα που αναδεικνύει τις συνιστώσες που επηρεάζουν το εύρος της κατανομής της Balance Function	43
3.4	Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από την πολλαπλότητα των γεγονότων.	45
3.5	Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από τη μέση τιμή του καθαρού φορτίου των γεγονότων.	46
3.6	Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από το εύρος της κατανομής της ψευδοωκύτητας των σωματιδίων του υποβάθρου.	47
3.7	Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από το ποσοστό των σωματιδίων που απορρίπτονται. Τα σωματίδια αποτελούν το υπόβαθρο.	48
3.8	Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από το εύρος του φασικού χώρου που αναλύουμε κάθε φορά. Οι διαφορετικές καμπύλες αφορούν τα διαφορετικά εύρη των κατανομών της ψευδοωκύτητας των σωματιδίων του υποβάθρου.	49
3.9	Η εξάρτηση του εύρους της κατανομής στην ψευδοωκύτητα (Σχέση 3.13) από τον αριθμό των συσχετισμένων σωματιδίων που προσθέτονται στο αρχικό υπόβαθρο.	50

3.10	Η Balance Function ως συνάρτηση της διαφοράς στην ωκύτητα για διάφορα ζεύγη σωματιδίων για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, ξεκινώντας από την υψηλότερη (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στη χαμηλότερη (δεξί γράφημα)	52
3.11	Η Balance Function ως συνάρτηση της διαφοράς στην ωκύτητα για τις 3 διαφορετικές θερμοκρασίες και για τα τρία διαφορετικά είδη σωματιδίων, ξεκινώντας από τα πρωτόνια (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στα πιόνια (δεξί γράφημα).	53
3.12	Η Balance Function ως συνάρτηση της σχετικής αναλλοίωτης ορμής Q_{inv} . για διάφορα ζεύγη σωματιδίων για τις 3 διαφορετικές θερμοκρασίες, ξεκινώντας από την υψηλότερη (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στη χαμηλότερη (δεξί γράφημα).	54
3.13	Η Balance Function σαν συνάρτηση της σχετικής αναλλοίωτης ορμής Q_{inv} . για τις 3 διαφορετικές θερμοκρασίες και για τα τρία διαφορετικά είδη σωματιδίων, ξεκινώντας από τα πρωτόνια (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στα πιόνια (δεξί γράφημα)	54
3.14	Η Balance Function ως συνάρτηση των διαφορετικών συνιστωσών της σχετικής αναλλοίωτης ορμής Q_{inv} . για ζεύγη πιονίων και για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, ξεκινώντας από την Q_{side} (αριστερό γράφημα) και καταλήγοντας στην Q_{long} (δεξί γράφημα)	55
4.1	Το επιταχυντικό σύστημα του CERN.	58
4.2	Αποτύπωση οριζόντιας τομής πάχους (7μm) στο επίπεδο της δέσμης, για μία κεντρική σκέδαση ($Pb+Pb$) των (158GeV) νουκλεόνιο.	59
4.3	Η πειραματική διάταξη του πειράματος NA49 με διαφορετικές διευθετήσεις στόχων για σκεδάσεις a) $Pb+Pb$, b) $p+p$ και c) $p+A$. Η θέση του στόχου είναι στο μπροστινό μέρος του μαγνήτη VTX-1.	62
4.4	Ταυτοποίηση σωματιδίων από ταυτόχρονη μέτρηση dE/dx και TOF.	65
4.5	Ταυτοποίηση σωματιδίων από ταυτόχρονη μέτρηση dE/dx και TOF.	66
4.6	Η κατανομή της ενέργειας που εναποτίθεται στο Veto καλορίμετρο σε αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$	67

4.7	Η παράμετρος κρούσης και ο λόγος της ενεργού διατομής ως συνάρτηση της ενέργειας που εναποτίθεται στο Veto καλορίμετρο σε αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$	68
4.8	Η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής ως συνάρτηση της ορμής των θετικά φορτισμένων σωματιδίων που παράγονται σε συγκρούσεις $p + p$ και $Pb + Pb$	71
4.9	Η τιμή της dE/dx για συγκεκριμένο εύρος ορμής σε συγκρούσεις $p + p$ και $Pb + Pb$	72
4.10	Η τιμή της dE/dx για συγκεκριμένο εύρος ορμής σε συγκρούσεις $p + p$ και $Pb + Pb$	73
4.11	Η κατανομή του vertex στον άξονα x για κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$	75
4.12	Η κατανομή του vertex στον άξονα z για κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ και αλληλεπιδράσεις $p + Pb$	75
4.13	Η διακριτική ικανότητα στο διαχωρισμό δυο τροχιών όπως προκύπτει από ανάμιξη γεγονότων (event mixing) στον VTPC-2. . .	77
4.14	Η ικανότητα ανακατασκευής των τροχιών σε δυο περιοχές, μακριά και κοντά στον άξονα της δέσμης σαν συνάρτηση του μήκους ολίσθησης.	78
5.1	Η κατανομή της ενέργειας που αποτίθεται στο καλορίμετρο της διάταξης του NA49 από τα νουκλεόνια που δεν λαμβάνουν μέρος στις αλληλεπιδράσεις των πλέον βαρέων ιόντων ($Pb + Pb$) για τη μέγιστη ενέργεια του SPS ($\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$).	81
5.2	Οι κατανομές των V_x (αριστερό γράφημα), V_y (μεσαίο γράφημα) και V_z (δεξί γράφημα) που αντιστοιχούν στα minimum bias γεγονότα αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$. Με κόκκινο περιγράφεται η περιοχή που επιλέγεται να αναλυθεί, ενώ με μαύρο αυτή που απορρίπτεται.	83
5.3	Η κατανομή του λόγου του αριθμού των τροχιών που σχετίζονται με το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης ως προς τον ολικό αριθμό των τροχιών.	83
5.4	Η συσχέτιση του αριθμού των τροχιών που καταγράφονται από τους ανιχνευτές με την ενέργεια που αποτίθεται από τα νουκλεόνια που δεν λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση (E_{VETO}). Τα σημεία προέρχονται από τις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$	84

5.5	Η κατανομή του αριθμού των τροχιών. Τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν στην περιοχή που απορρίπτεται στην περίπτωση συγκρούσεων $C + C$, $Si + Si$ ή $Pb + Pb$	84
5.6	Οι κατανομές των b_x (αριστερό γράφημα) και b_y (δεξί γράφημα) που δίνουν την απόσταση των τροχιών από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης. Με κόκκινο περιγράφεται η περιοχή που επιλέγεται να αναλυθεί, ενώ με μαύρο αυτή που απορρίπτεται.	85
5.7	Η κατανομή της θέσης του πρώτου σημείου αλληλεπίδρασης της τροχιάς με το υλικό του ανιχνευτή. Τα μαύρα σημεία που αντιστοιχούν σε περιοχές μακριά από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης απορρίπτονται.	86
5.8	Οι κατανομές του αριθμού των σημείων των τροχιών που καταγράφονται από τους κύριους TPC (αριστερό γράφημα) καθώς και ο λόγος του αριθμού αυτού ως προς το συνολικό αριθμό των σημείων μιας τροχιάς.	86
5.9	Η κατανομή της εγκάρσιας ορμής όλων των φορτισμένων σωματιδίων.	87
5.10	Ο φασικός χώρος που είναι διαθέσιμος για την περίπτωση των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$ ύστερα από όλους τους ελέγχους.	87
5.11	Η απώλεια ενέργειας του σωματιδίου ως συνάρτηση του μέτρου της ορμής του, όπως αυτή καταγράφεται από τους $VTPC - 1$ (πάνω αριστερά), $VTPC - 2$ (πάνω δεξιά), $MTPC$ (κάτω αριστερά) αλλά και η συνδυασμένη πληροφορία από όλους τους TPC (κάτω δεξιά).	88
5.12	Οι έντονες γραμμές δείχνουν τις Bethe-Bloch καμπύλες που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ απώλειας ενέργειας και ορμής του σωματιδίου για τα διάφορα είδη των σωματιδίων (πράσινο - πιόνια, κόκκινο - καόνια, μπλε - πρωτόνια, μαύρο - ηλεκτρόνια). Οι διακεκομμένες γραμμές περιγράφουν τις ζώνες στο επίπεδο $dE/dx - P$ που καθορίζουν την επιλογή της ταυτοποίησης των σωματιδίων.	89

5.13	Οι καμπύλες του φίλτρου αποδοχής στο επίπεδο $P_T - \phi$. Τα δυο πρώτα γραφήματα αφορούν την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 6.3\text{GeV}$ για δυο περιοχές της ωκύτητας: $1.7 < y < 1.9$ (αριστερό γράφημα) και $3.3 < y < 3.5$ (δεξί γράφημα). Τα δυο γραφήματα της κάτω περιοχής αφορούν την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ για δυο διαστήματα της ωκύτητας: $2.5 < y < 2.7$ (αριστερό γράφημα) και $4.1 < y < 4.3$ (δεξί γράφημα).	91
5.14	Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ κατά την αρχική φάση της μελέτης.	92
5.15	Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$. Το αριστερό γράφημα δείχνει την περιοχή της mid-rapidity ενώ το δεξί την περιοχή της forward rapidity	93
5.16	Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 12.3\text{GeV}$ (πάνω γραφήματα) και για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8\text{GeV}$ (κάτω γραφήματα). Τα αριστερά γραφήματα δείχνουν την περιοχή της mid-rapidity ενώ τα δεξιά την περιοχή της forward rapidity	95
5.17	Ο φασικός χώρος που αναλύθηκε για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 7.6\text{GeV}$ (πάνω γραφήματα) και για την ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 6.3\text{GeV}$ (κάτω γραφήματα). Τα αριστερά γραφήματα δείχνουν την περιοχή της mid-rapidity ενώ τα δεξιά την περιοχή της forward rapidity	96
6.1	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα αλλά και για το μοντέλο HIJING [3] για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα.	99
6.2	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα αλλά και για το μοντέλο HIJING [3] για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si + Si$, $C + C$ και $p + p$) ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα.	100
6.3	Το εύρος των κατανομών της Balance Function ως συνάρτηση του εύρους της κατανομής του V_z (πρώτο γράφημα) και του εύρους της κατανομής της $ d_x _{max}$ και $ d_y _{max}$ (μεσαίο και κάτω σχήμα αντίστοιχα).	103

6.4	Η εξάρτηση του εύρους όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές της Balance Function με τη βοήθεια της σχέσης 3.13 για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα αλλά και γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο HIJING [3] από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση.	104
6.5	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις πιο πειφερειακές αλλά και τις πιο κεντρικές αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 130 GeV$ του πειράματος <i>STAR</i> . Στις γραφικές παραστάσεις φαίνονται οι κατανομές των πειραματικών δεδομένων, των αναμεμιγμένων με τις μεθόδους shuffling και event mixing γεγονότων αλλά και οι αντίστοιχες κατανομές που προκύπτουν από τη μελέτη του μοντέλου HIJING	105
6.6	Η εξάρτηση του εύρους για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling και τα HIJING [3] γεγονότα για τις αλληλεπιδράσεις $Au + Au$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 130 GeV$ του πειράματος <i>STAR</i> από το νορμαλισμένο λόγο b/b_{max}	106
6.7	Η εξάρτηση του εύρους για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα για τα δυο πειράματα από το νορμαλισμένο λόγο b/b_{max}	107
6.8	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. Η περιοχή της ψευδοωκύτητας που αναπαριστάται είναι η κεντρική.	108
6.9	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. Η περιοχή της ψευδοωκύτητας που αναπαριστάται είναι η εμπρόσθια.	109
6.10	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. Οι κατανομές προέρχονται από τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα, ενώ η περιοχή της ψευδοωκύτητας που αναπαριστάται είναι η κεντρική.	110

- 6.11 Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. Οι κατανομές προέρχονται από τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο **shuffling** γεγονότα, ενώ η περιοχή της ψευδοωκύτητας που αναπαριστάται είναι η εμπρόσθια. 111
- 6.12 Η εξάρτηση του εύρους όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές της **Balance Function** με τη βοήθεια της σχέσης 3.13 για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο **shuffling** γεγονότα αλλά και γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο **HIJING** [3] από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση. Το αριστερό γράφημα αφορά την κεντρική περιοχή του φασικού χώρου, ενώ το δεξί την εμπρόσθια περιοχή. 112
- 6.13 Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. 113
- 6.14 Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si + Si$ και $C + C$) σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. 114
- 6.15 Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. 115
- 6.16 Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si + Si$ και $C + C$) ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα. . . 116
- 6.17 Η εξάρτηση του εύρους όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές της **Balance Function** με τη βοήθεια της σχέσης 3.13 για τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο **shuffling** γεγονότα αλλά και γεγονότα προσομοίωσης που έχουν παραχθεί με το μοντέλο **UrQMD** [4] από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση. 117

6.18	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα για την εμπρόσθια περιοχή.	118
6.19	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si + Si$ και $C + C$) σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 8.8 GeV$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα για τη forward rapidity.	119
6.20	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα για τις διαφορετικές κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα για τη forward rapidity.	120
6.21	Οι κατανομές της συνάρτησης ισοζυγίου για τα πειραματικά και τα αναμεμιγμένα γεγονότα για τα πιο ελαφριά αλληλεπιδρώντα συστήματα ($Si + Si$ και $C + C$) ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς των φορτισμένων σωματιδίων στην ψευδοωκύτητα για τη forward rapidity.	120
6.22	Η εξάρτηση του εύρους, όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές της Balance Function με τη βοήθεια της σχέσης 3.13 για την εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας, από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση. Στο σχήμα φαίνονται τα πειραματικά, τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling γεγονότα αλλά και γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο UrQMD.	121
6.23	Οι κατανομές της Balance Function για τα πειραματικά δεδομένα και για όλες τις ενέργειες του SPS	122
6.24	Οι κατανομές της Balance Function για τα αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling δεδομένα και για όλες τις ενέργειες του SPS	122
6.25	Η εξάρτηση της νορμαλισμένης παραμέτρου W από την ενέργεια, για τα πειραματικά δεδομένα αλλά και για τα δυο μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν (UrQMD [4] και HSD [5]).	123
6.26	Η εξέλιξη της τιμής της νορμαλισμένης παραμέτρου W από το ενεργειακό φάσμα του SPS σε ανώτερες ενέργειες του $RHIC$	123

6.27	Η εξάρτηση της νορμαλισμένης παραμέτρου W από την ενέργεια, για τα πειραματικά δεδομένα στις δυο περιοχές του φασικού χώρου.	124
7.1	Αριστερό γράφημα: Οι κατανομές της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής για διαφορετικά είδη σωματιδίων. Δεξί γράφημα: Η εξάρτηση της dE/dx από την εγκάρσια ορμή. . .	126
7.2	Διάγραμμα που δείχνει την ολική καταγεγραμμένη πολλαπλότητα των διαφορετικών ειδών σωματιδίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb+Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$. 126	
7.3	Διάγραμμα που δείχνει τις κατανομές της εγκάρσιας μάζας (m_T) των διαφορετικών ειδών σωματιδίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$. .	127
7.4	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	129
7.5	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη καονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	129
7.6	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για αναμειγμένα με τη μέθοδο shuffling ζεύγη πιονίων (δεξί γράφημα) και καονίων (αριστερό γράφημα) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	130
7.7	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο UrQMD [3] για ζεύγη πιονίων (δεξί γράφημα) και καονίων (αριστερό γράφημα) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	131
7.8	Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη πιονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμειγμένων με τη μέθοδο shuffling γεγονότων (πράσινα σημεία) καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD.	132

7.9	Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη καονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο shuffling γεγονότων (πράσινα σημεία) καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD	133
7.10	Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη πιονίων και καονίων από το αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου HIJING	134
7.11	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων για την εμπρόσθια περιοχή της ωχύτητας και για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	135
7.12	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη καονίων για την εμπρόσθια περιοχή της ωχύτητας και για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	135
7.13	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου (εμπρόσθια περιοχή) για αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling ζεύγη πιονίων (αριστερό γράφημα) και καονίων (δεξί γράφημα) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	136
7.14	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου (εμπρόσθια περιοχή) για γεγονότα που έχουν παραχθεί με το μοντέλο UrQMD για ζεύγη πιονίων (αριστερό γράφημα) και καονίων (δεξί γράφημα) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	137
7.15	Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη πιονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση για την εμπρόσθια περιοχή της ωχύτητας. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο shuffling γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD	138

7.16	Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta y \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη καονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση για την εμπρόσθια περιοχή της ωκύτητας. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο shuffling γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου UrQMD	139
7.17	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη πιονίων στην αναλλοίωτη ορμή για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	140
7.18	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για ζεύγη καονίων στην αναλλοίωτη ορμή για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	141
7.19	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling ζεύγη πιονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	142
7.20	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για αναμεμιγμένα με τη μέθοδο shuffling ζεύγη καονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	143
7.21	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου για γεγονότα που έχουν παραχθεί με τη βοήθεια του μοντέλου AMPT . Τα σχήματα αφορούν την ανάλυση ζευγών πιονίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	144
7.22	Η εξάρτηση του εύρους $\langle Q_{inv.} \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη πιονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο shuffling γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου AMPT	145
7.23	Η εξάρτηση του εύρους $\langle Q_{inv.} \rangle$ της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ζεύγη καονίων από το μέσο αριθμό των νουκλεονίων που λαμβάνουν μέρος στην αλληλεπίδραση. Στο γράφημα φαίνονται τα πειραματικά σημεία (κόκκινο χρώμα), τα σημεία που προέκυψαν από την ανάλυση των αναμεμιγμένων με τη μέθοδο shuffling γεγονότων (πράσινα σημεία), καθώς και αυτά που αφορούν την ανάλυση του μοντέλου AMPT	146

8.1	Η εξάρτηση των ευρών των κατανομών της Balance Function από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων για τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινα σημεία) και το πρότυπο HIJING , για αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	150
8.2	Οι κατανομές της Balance Function για πιόνια που προέρχονται από συντονισμούς και για πιόνια που δημιουργούνται στο στάδιο της αδρονοποίησης.	151
8.3	Οι κατανομές των συναρτήσεων ισοζυγίου που προκύπτουν από ανάλυση γεγονότων του προτύπου HIJING για δυο ακραίες κλάσεις κεντρικότητας αλληλεπιδράσεων $Pb+Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$: για τις πιο κεντρικές συγκρούσεις (αριστερό γράφημα) και τις πιο περιφερειακές (δεξί γράφημα). Οι δυο διαφορετικές κατανομές αντιστοιχούν στις δυο διαφορετικές, ως προς τη διάσπαση του ρ^0 μεσονίου, περιπτώσεις.	152
8.4	Η εξάρτηση των ευρών των κατανομών της Balance Function από την κεντρικότητα των αλληλεπιδράσεων για τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινα σημεία) και το πρότυπο UrQMD , για αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$	154
8.5	Οι κατανομές των πολλαπλοτήτων όλων των παραγόμενων σωματιδίων (πάνω αριστερά), των πιονίων (πάνω δεξιά), των καονίων (κάτω αριστερά) αλλά και των πρωτονίων (κάτω δεξιά) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$, όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο AMPT	156
8.6	Ο μέσος αριθμός των παραγόμενων σωματιδίων (αριστερά), πιονίων, καονίων και πρωτονίων (δεξιά) ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση.	157
8.7	Η εξάρτηση της θερμοκρασίας όπως αυτή προκύπτει από την προσαρμογή μιας εκθετικής συνάρτησης στα φάσματα των εγκάρσιων ορμών, όλων των φορτισμένων σωματιδίων, των πιονίων, των καονίων αλλά και των πρωτονίων, ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση.	158
8.8	Οι κατανομές του μέσου χρόνου αδρονοποίησης όλων των παραγόμενων σωματιδίων για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 GeV$, όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο AMPT	158

- 8.9 Οι κατανομές της **Balance Function** ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς $\Delta\eta$ των μη ταυτοποιημένων σωματιδίων για όλες τις κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ όπως προκύπτουν από την ανάλυση γεγονότων που παράχθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου **AMPT**. 159
- 8.10 Τα εύρη των κατανομών της συνάρτησης ισοζυγίου ως συνάρτηση του μέσου χρόνου αδρονοποίησης των γεγονότων, όπως αυτός υπολογίζεται από τη σχέση 8.1. 159
- 8.11 Τα εύρη των κατανομών της συνάρτησης ισοζυγίου ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση για τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινα σημεία), το μοντέλο **AMPT** (μπλε σημεία) καθώς και τα άλλα δυο μικροσκοπικά μοντέλα που μελετήθηκαν (**HIJING - UrQMD**). 160
- 8.12 Οι κατανομές του μέσου χρόνου αδρονοποίησης των πιονίων (αριστερά), των καονίων (μέση) αλλά και των πρωτονίων (δεξιά) για όλες τις κεντρικότητες των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$ όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο **AMPT**. 161
- 8.13 Οι κατανομές της **Balance Function** ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς Δy των ταυτοποιημένων πιονίων για όλες τις κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$, όπως προκύπτουν από την ανάλυση γεγονότων που παράχθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου **AMPT**. . . 162
- 8.14 Η εξάρτηση του εύρους των κατανομών της **Balance Function** για ζεύγη πιονίων από το μέσο χρόνο αδρονοποίησης των γεγονότων (αριστερό γράφημα). Η σύγκριση των τιμών των ευρών μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των μοντέλων **AMPT** και **UrQMD** ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση (δεξί γράφημα). 163
- 8.15 Οι κατανομές της **Balance Function** ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς Δy των ταυτοποιημένων καονίων για όλες τις κλάσεις κεντρικότητας των αλληλεπιδράσεων $Pb + Pb$ σε ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 17.3\text{GeV}$, όπως προκύπτουν από την ανάλυση γεγονότων που παράχθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου **AMPT**. . . 164

8.16	Η εξάρτηση του εύρους των κατανομών της Balance Function για ζεύγη καονίων από το μέσο χρόνο αδρονοποίησης των γεγονότων (αριστερό γράφημα). Η σύγκριση των τιμών των ευρών μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των μοντέλων AMPT και UrQMD ως συνάρτηση του μέσου αριθμού των νουκλεονίων που μετέχουν στην αλληλεπίδραση (δεξί γράφημα).	165
8.17	Η εξάρτηση του εύρους της Balance Function ως συνάρτηση της εγχάρσις ταχύτητας της ροής του συστήματος όπως προκύπτει από τη μελέτη του προτύπου THERMINATOR	166
9.1	Στο σχήμα φαίνονται όλοι οι ανιχνευτές που απαρτίζουν την πειραματική διάταξη του ALICE	171
9.2	Τα 7 module του ανιχνευτή HMPID καθώς είναι τοποθετημένο στο πλαίσιο στήριξης (space frame), όπως αναπαριστάται μέσα στο πακέτο AliRoot	182
9.3	Ο συνδυασμός της πληροφορίας των αδρονικών καλοριμέτρων και του ηλεκτρομαγνητικού για τον καθορισμό της κεντρικότητας μιας αλληλεπίδραδης.	185
9.4	Η εξάρτηση από την ορμή της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους (πληροφορία από τον TPC) για διάφορα είδη σωματιδίων.	188
9.5	Η απόδοση της ταυτοποίησης σωματιδίων αλλά και τα διάφορα ποσοστά πρόσμιξης ως συνάρτηση της ορμής (πληροφορία μόνο από τον TPC) για τρία είδη: πιόνια (αριστερό γράφημα), καόνια (μεσαίο γράφημα) και πρωτόνια (αριστερό γράφημα).	189
9.6	Η εξάρτηση από την ορμή της ταχύτητας πτήσης (πληροφορία από τον TOF) για διάφορα είδη σωματιδίων.	190
9.7	Η απόδοση της ταυτοποίησης σωματιδίων αλλά και τα διάφορα ποσοστά πρόσμιξης ως συνάρτηση της ορμής (πληροφορία μόνο από τον TOF) για τρία είδη: πιόνια (αριστερό γράφημα), καόνια (μεσαίο γράφημα) και πρωτόνια (δεξί γράφημα).	190
9.8	Η απόδοση της ταυτοποίησης σωματιδίων αλλά και τα διάφορα ποσοστά πρόσμιξης ως συνάρτηση της ορμής για τρία είδη: πιόνια (αριστερό γράφημα), καόνια (μεσαίο γράφημα) και πρωτόνια (δεξί γράφημα).	191

9.9	Η απόδοση της ταυτοποίησης σωματιδίων αλλά και τα διάφορα ποσοστά πρόσμιξης ως συνάρτηση της ορμής (τροχιές που περνούν από τον <i>TOF</i>) για τρία είδη: πιόνια (αριστερό γράφημα), καόνια (μεσαίο γράφημα) και πρωτόνια (δεξί γράφημα).	191
10.1	Σχηματική αναπαράσταση των υπολογιστικών εργασιών του <i>ALICE</i> στο πλαίσιο του μοντέλου <i>MONARC</i>	193
10.2	Σχηματική αναπαράσταση της ιεραρχικής δομής που ακολουθείται στο μοντέλο που έχει υιοθετηθεί από το <i>ALICE</i>	195
10.3	Σχηματική αναπαράσταση της σύνδεσης του <i>Virtual Organisation (VO)</i> του <i>ALICE</i> με τα εξωτερικά συστήματα.	196
10.4	Τα διάφορα στοιχεία που αποτελούν το πακέτο ανάλυσης <i>ROOT</i> .197	
10.5	Η αλυσίδα που ακολουθείται για την επεξεργασία των δεδομένων στα πλαίσια του <i>AliRoot</i>	198
10.6	Η δομή του πακέτου <i>AliRoot</i>	199
11.1	Το πλαίσιο ανάλυσης του πειράματος <i>ALICE</i> και η θέση του <i>Event Tag System</i> μέσα σε αυτό.	205
11.2	Οι πηγές των διαφορετικών επιπέδων του συστήματος.	208
11.3	Η δένδροειδής μορφή ενός αρχείου <i>tag</i> όπως αυτό προκύπτει από το πρόγραμμα ανακατασκευής του <i>AliRoot</i>	209
11.4	Εικόνα που δείχνει τη δημιουργία των <i>tag</i> αρχείων ως το τελευταίο βήμα του προγράμματος ανακατασκευής των γεγονότων. Κατά αυτό ακριβώς τον τρόπο πραγματοποιείται και η δημιουργία των επίσημων <i>tag</i> αρχείων του πειράματος.	210
11.5	Η διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία των αρχείων <i>tag</i>	211
11.6	Η ροή της διαδικασίας ανάλυσης: Έχοντας ως παραμέτρους μια συλλογή αρχείων <i>tag (tag xml collection)</i> την οποία δημιουργούμε με την αλληλεπίδραση με τον κατάλογο αρχείων του <i>GRID</i> καθώς και τα κριτήρια επιλογής, ζητούμε από το <i>Event Tag System</i> και είτε παίρνουμε την αλυσίδα των αρχείων μαζί με τη λίστα των γεγονότων που πληρούν τα κριτήρια που επιβλήθηκαν ή δημιουργούμε μια καινούρια συλλογή αρχείων <i>ESD</i> από την οποία πάλι δημιουργούμε την αλυσίδα των γεγονότων που πληρούν τα κριτήρια. Τα γεγονότα αυτά μπορούν να αναλυθούν είτε τοπικά, είτε στο <i>GRID</i> ή ακόμα και στο <i>PROOF</i>	213

- 12.1 Η κατανομή των τροχιών όπως προκύπτει από την ανακατασκευή γεγονότων $p + p$ σε ενέργειες $\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ (αριστερό γράφημα) και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ (δεξί γράφημα). 215
- 12.2 Η κατανομή της τιμής του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης στον άξονα της δέσμης όπως προκύπτει από την ανακατασκευή γεγονότων $p+p$ σε ενέργειες $\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ (αριστερό γράφημα) και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ (δεξί γράφημα). 216
- 12.3 Ο αριθμός των clusters που έχουν οι τροχιές σε *ITS* και *TPC* (κάτω αριστερά και πάνω δεξιά γραφήματα αντίστοιχα) καθώς και η κατανομή της χ^2 ανά *TPC cluster* (πάνω αριστερά) όσο και η κατανομή της διακριτικής ικανότητας στη μέτρηση της καμπυλότητας της τροχιάς (κάτω δεξιά γράφημα). 217
- 12.4 Οι κατανομές των διακριτικών ικανοτήτων στη μέτρηση της y και z θέσης της τροχιάς (δύο πάνω γραφήματα) αλλά και στη μέτρηση του ημιτόνου της αζιμουθιακής γωνίας (κάτω αριστερά) και της εφαπτομένης της πολικής γωνίας της τροχιάς (κάτω δεξιά). 218
- 12.5 Η κατανομή της **Balance Function** ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς στην ψευδοωκύτητα για μη ταυτοποιημένα σωματίδια. Η ανάλυση έγινε σε γεγονότα $p + p$ σε ενέργειες $\sqrt{s} = 0.9\text{TeV}$ (αριστερό γράφημα) και $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ (δεξί γράφημα). 219
- 12.6 Η εξάρτηση του εύρους της **Balance Function** από το διάστημα της ψευδοωκύτητας που μελετάται. Τα γεγονότα που αναλύθηκαν προέρχονται από προσομοιώσεις $p + p$ αλληλεπιδράσεων σε ενέργεια $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ 219
- 12.7 Η εξάρτηση του εύρους της **Balance Function** από τα διάφορα κριτήρια επιλογής τόσο σε επίπεδο γεγονότων, όσο και σε επίπεδο τροχιών: ως προς το εύρος της κατανομής του σημείου της κύριας αλληλεπίδρασης στο z άξονα (a) και ως προς το εύρος των κατανομών των αποστάσεων των τροχιών από το σημείο της κύριας αλληλεπίδρασης στην ακτινική συνιστώσα (b) καθώς και στον άξονα της δέσμης (c). 220
- 12.8 Η εξάρτηση του εύρους της **Balance Function** για όλα τα φορτισμένα σωματίδια από την μέση πολλαπλότητα των γεγονότων. . . 221

12.9	Δεξί γράφημα: Οι κατανομές της Balance Function για τις αντιστοιχικές διαμερίσεις στο χώρο της εγκάρσιας ορμής ως συνάρτηση της διαφοράς στην ψευδοωκύτητα. Αριστερό γράφημα: Η εξάρτηση του εύρους $\langle \Delta \eta \rangle$ των κατανομών της Balance Function από τη μέση τιμή της εγκάρσιας ορμής των προς ανάλυση τροχιών.	222
12.10	Δεξί γράφημα: Η κατανομή της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής για διαφορετικά είδη σωματιδίων όπως καταγράφεται από τον <i>TPC</i> για συγκεκριμένη περιοχή τιμών της εγκάρσιας ορμής. Αριστερό γράφημα: Η κατανομή της απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής για διαφορετικά είδη σωματιδίων όπως καταγράφεται από τον <i>TPC</i> ως συνάρτηση της ορμής των σωματιδίων.	224
12.11	Δεξί γράφημα: Η κατανομή της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια ως συνάρτηση της διαφοράς στην ωκύτητα - Τα διαφορετικά χρώματα και σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικά είδη σωματιδίων. Αριστερό γράφημα: Το εύρος των κατανομών του προηγούμενου σχήματος ως συνάρτηση της μάζας των σωματιδίων.	225
12.12	Δεξί γράφημα: Η κατανομή της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια ως συνάρτηση της παραμέτρου Q_{long} . - Τα διαφορετικά χρώματα και σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικά είδη σωματιδίων. Αριστερό γράφημα: Το εύρος των κατανομών του προηγούμενου σχήματος ως συνάρτηση της μάζας των σωματιδίων.	226
12.13	Δεξί γράφημα: Η κατανομή της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια ως συνάρτηση της παραμέτρου Q_{out} . - Τα διαφορετικά χρώματα και σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικά είδη σωματιδίων. Αριστερό γράφημα: Το εύρος των κατανομών του προηγούμενου σχήματος ως συνάρτηση της μάζας των σωματιδίων.	227
12.14	Δεξί γράφημα: Η κατανομή της συνάρτησης ισοζυγίου φορτίου για ταυτοποιημένα σωματίδια ως συνάρτηση της παραμέτρου Q_{side} . - Τα διαφορετικά χρώματα και σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικά είδη σωματιδίων. Αριστερό γράφημα: Το εύρος των κατανομών του προηγούμενου σχήματος ως συνάρτηση της μάζας των σωματιδίων.	228

12.15H εξάρτηση του εύρους της κατανομής από το διάστημα της ψευδοωκύτητας που αναλύθηκε για αλληλεπιδράσεις $Pb + Pb$.	. 228
12.16H εξάρτηση του εύρους από την κανονικοποιημένη παράμετρο κρούσης b/b_{max} για τις πιο κεντρικές και τις πιο περιφερειακές συγκρούσεις $Pb + Pb$.	 229

REVIEW

This dissertation, was an attempt to cover two different, yet related subjects: the analysis of experimental data recorded from the NA49 experiment, part of the old generation of machines (SPS), and of simulated data produced for the the ALICE experiment which is one of the main experiments of the new generation of accelerators (LHC), and the development of the software framework that will be used by the members of the ALICE collaboration.

The first two chapters of this manuscript, were devoted in pointing out the theoretical physics background of the heavy ion collisions at sufficiently high energies. The goal of these studies is the determination and discovery of a new phase of matter which consists of quarks and gluons which are not confined. The main experimental results from both SPS and RHIC experiments concerning all physics topics were briefly mentioned. In addition, chapter 2 was dedicated to the main results of a very interesting and demanding part of the physics analysis which is well known as Event-by-Event physics. In the end of this chapter, there was the first attempt to introduce the main physics topic of this dissertation, which is a rather new method of analysis among the Event-by-Event topic: the Balance Function.

In chapter 3, I tried to set the stage by describing the motivation for studying the Balance Function (BF) along with its basic properties. The former comes from the prediction that its width may be sensitive to the creation of a deconfined phase in the early stage of central nucleus-nucleus collisions. The method is based on the observation that hadrons are produced locally in pairs of oppositely charged particle. Particles of such a pair are separated in rapidity (y) due to the initial momentum difference and secondary interactions with other particles. Particles of a pair that were created earlier are separated further in rapidity because of the expected large initial momentum difference and the long lasting rescattering phase. On the other hand, oppositely charged particles of a pair that were created later are correlated with a smaller difference Δy in rapidity.

In chapter 4, the NA49 experimental setup was described in detail. The NA49 detector, which was the machine used to collect the data analyzed in this book, is a wide acceptance hadron spectrometer for the study of hadron production in collisions of hadrons or heavy ions at the CERN SPS. The main components are four

large - volume Time Projection Chambers (TPCs) which are capable of detecting 80% of some 1500 charged particles created in a central Pb+Pb collision at 158A GeV. In this chapter, the tracking, particle identification as well as the centrality determination was described in terms of performance and resolutions.

In chapter 5, we took a first look at the experimental data, by defining the different quality criteria at both event and track level. These criteria were imposed in order to make our data sample as clean as possible from parameters that are considered to form the background that shadows the signal (such as secondary interactions of tracks etc). Furthermore, the phase space along with the acceptance filter of NA49 was introduced. Finally, in this chapter, we included different tables in order to list the event statistics and the main characteristics of the events that were analyzed.

Chapter 6, is the main chapter inside of which the first experimental results are listed. This chapter was devoted to the analysis of correlations of non-identified particles using the BF. Data from A+A collisions at 40A and 158A GeV are presented in two different rapidity intervals: The mid-rapidity region where we observe a decrease of the width of the Balance Function distribution with increasing centrality of the collision, and the forward rapidity region where this effect vanishes. This could suggest a delayed hadronization scenario. Results from an energy dependence study of the Balance Function through the whole SPS energy range are also presented. The scaled parameter of the Balance Function's width increases with energy towards the highest SPS and RHIC energies. The above energy dependence is not observed in simulation results from the UrQMD hadronic model.

Chapter 7, describes the main results from the study of correlations of identified tracks. In particular, the rapidity and momentum correlations of pion and kaon pairs were studied for A+A collisions at 158A GeV. The analysis, revealed a centrality dependence of the width of the BF for pion pairs but not for kaon pairs. As in the case of non-identified particles, this narrowing of the width with centrality seen for pions was not observed when the forward rapidity region was analyzed.

In an attempt to interpret the results, many microscopic along with thermal models were studied. In chapter 8, we describe one by one the underlying physics of each model and we concentrate on the main results obtained from its analysis. The main conclusion is that models, such as AMPT, that contain a quark-parton transport phase before hadronization can reproduce the narrowing of the BF's width with centrality, which can be a first strong indication of the relation of the method with the time of hadronization. On the basis of interpreting the results,

we tried to estimate the contribution of resonances in the narrowing of the width: the study revealed a 4% effect that can be attributed to the decay products of such particles.

In the second part of the dissertation, we concentrated in the (near) future of the heavy ion physics. As this was written right before the start of this new era, the operation of LHC, the detectors of the ALICE experiment were described in detail on the basis of their performance in tracking and particle identification (among other things) using Monte Carlo simulations. This was covered in chapter 9.

Chapters 10 and 11, covered the software that has been developed within the ALICE framework. In the former (chapter 10), the complexity of the GRID infrastructure along with its crucial role in the data analysis was briefly discussed. In addition, chapter 11, consists of the main contribution to the ALICE offline framework: the development of the Event Tag System. The system has been used in many Physics Data Challenges proving its stability and efficiency. It will also be used for the real data analysis reducing the analysis time significantly. The software has been validated for usage in all kind of conditions: local analysis, interactive analysis with files stored on the GRID, PROOF analysis and last but not least GRID batch analysis.

Finally, chapter 12, described the first attempt to extend the BF method in the very high energies of the LHC. In order to do that the relevant code had to be optimized in order to cope with the high multiplicity environment expected in this energy range. Furthermore, this study was performed with the help of the whole infrastructure described in the three previous chapters, providing a proof of their validity.