

Αναζητώντας παράξενα σωματίδια στο πείραμα ALICE

1. Περίληψη

Η άσκηση που προτείνεται εδώ έχει να κάνει με την αναζήτηση παράξενων σωματιδίων, που παράγονται από συγκρούσεις στο LHC και καταγράφονται από το πείραμα ALICE. Βασίζεται στην αναγνώριση του τρόπου διάσπασής τους, που είναι γνωστή σαν διάσπαση V0, όπως οι διασπάσεις $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ή “cascade”, όπως η διάσπαση $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$ ($\Lambda \rightarrow p + \pi^-$). Η ταυτοποίηση των παράξενων σωματιδίων βασίζεται στην τοπολογία της διάσπασής τους σε συνδυασμό με την ταυτοποίηση των προϊόντων της διάσπασης. Η πληροφορία από τα ίχνη των σωματιδίων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αμετάβλητης μάζας του σωματιδίου που διασπάται, σαν επιπλέον επιβεβαίωση του είδους του διασπώμενου σωματιδίου.

Στα επόμενα καταρχήν παρουσιάζεται σύντομα το πείραμα ALICE και οι στόχοι του και στη συνέχεια το κίνητρο γι'αυτή την ανάλυση από άποψη φυσικής. Περιγράφονται αναλυτικά η μέθοδος για την ταυτοποίηση παράξενων σωματιδίων και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλα τα βήματα της άσκησης, ο τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων και η μέθοδος συλλογής και συγχώνευσης όλων των αποτελεσμάτων.

2. Εισαγωγή

Το πείραμα ALICE (A Large Ion Collider Experiment), ένα από τα τέσσερα μεγάλα πειράματα στο μεγάλο επιταχυντή αδρονίων (LHC) στο CERN, έχει σχεδιαστεί για να μελετήσει συγκρούσεις βαριών ιόντων. Επίσης μελετάει συγκρούσεις πρωτονίων, που κατά κύριο λόγο χρησιμεύουν σαν αναφορά για τις συγκρούσεις βαριών ιόντων. Επιπλέον τα δεδομένα από συγκρούσεις πρωτονίων δίνουν τη δυνατότητα μελέτης ορισμένων καναλιών φυσικής. Το πείραμα ALICE έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να καταγράψει τα χιλιάδες σωματίδια που παράγονται συγχρόνως από συγκρούσεις πυρήνων μολύβδου στις πολύ υψηλές ενέργειες του LHC.

3. Η φυσική του πειράματος ALICE

Τα κουάρκ συνδέονται μεταξύ τους μέσα στα πρωτόνια και τα νετρόνια με μια δύναμη που είναι γνωστή ως ισχυρή αλληλεπίδραση, μέσω της ανταλλαγής των σωματιδίων –φορέων της δύναμης που ονομάζονται γκλουόνια. Η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι επίσης υπεύθυνη για τη σύνδεση των πρωτονίων και των νετρονίων μέσα στους πυρήνες των ατόμων.

Αν και ξέρουμε ότι τα κουάρκ είναι στοιχειώδη σωματίδια από τα οποία αποτελούνται όλα τα γνωστά αδρόνια, ποτέ δεν έχει παρατηρηθεί ελεύθερο κουάρκ: τα κουάρκ, όπως και τα γκλουόνια, φαίνεται ότι είναι μόνιμα συνδεδεμένα και περιορισμένα μέσα σε σύνθετα σωματίδια όπως τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Αυτό είναι γνωστό σαν “εγκλωβισμός” των κουάρκ (confinement) και ο ακριβής μηχανισμός που τον προκαλεί παραμένει άγνωστος.

Αν και σήμερα καταλαβαίνουμε μεγάλο μέρος της φυσικής της ισχυρής αλληλεπίδρασης, δύο βασικά ζητήματα παραμένουν άλυτα: η προέλευση του

“εγκλωβισμού” και ο μηχανισμός που δημιουργεί τη μάζα. Και τα δύο πιστεύεται ότι έχουν να κάνουν με τον τρόπο που οι ιδιότητες του κενού τροποποιούνται από την ισχυρή αλληλεπίδραση.

Η τρέχουσα θεωρία της ισχυρής αλληλεπίδρασης (που ονομάζεται Κβαντική Χρωμο-Δυναμική, QCD) προβλέπει ότι σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και/ή πολύ υψηλές πυκνότητες, τα κουάρκ και τα γκλουόνια δε θάπρεπε να μένουν περιορισμένα μέσα σε σύνθετα σωματίδια, αλλά θάπρεπε να υπάρχουν ελεύθερα σε μια νέα κατάσταση της ύλης, που είναι γνωστή σαν πλάσμα κουάρκ και γκλουονίων.

Μια τέτοια μεταβολή θάπρεπε να συμβεί όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή που υπολογίζεται γύρω στις 100 000 φορές θερμότερη από τον πυρήνα του ήλιου! Τέτοιες θερμοκρασίες δεν έχουν υπάρξει στη Φύση από τη γέννηση του Σύμπαντος. Πιστεύεται ότι μερικά εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου μετά τη Μεγάλη Έκρηξη η θερμοκρασία ξεπερνούσε την κρίσιμη τιμή και ολόκληρο το Σύμπαν βρισκόταν σε κατάσταση πλάσματος κουάρκ και γκλουονίων.

Όταν δυο βαρείς πυρήνες πλησιάζουν ο ένας τον άλλο με ταχύτητα πολύ κοντά σ’αυτήν του φωτός και συγκρούονται, αναδημιουργούνται αυτές οι ακραίες συνθήκες πυκνότητας και θερμοκρασίας και έτσι απελευθερώνονται τα κουάρκ και τα γκλουόνια. Αυτά συγκρούονται μεταξύ τους δημιουργώντας μια κατάσταση σε θερμική ισορροπία: το πλάσμα κουάρκ και γκλουονίων. Το πλάσμα διαστέλεται και ψύχεται στη θερμοκρασία στην οποία τα κουάρκ και τα γκλουόνια ανασυντάσσονται και σχηματίζουν συνηθισμένη ύλη (10^{12} βαθμοί), μόλις 10^{-23} δευτερόλεπτα μετά από την αρχή της σύγκρουσης. Το πείραμα ALICE μελετάει τον σχηματισμό και τις ιδιότητες αυτής της νέας κατάστασης της ύλης.

4. Ενίσχυση της παραδοξότητας σαν σήμα για το πλάσμα κουάρκ και γλουονίων

Η διάγνωση και μελέτη των ιδιοτήτων του πλάσματος κουάρκ και γκλουονίων (QGP) μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας κουάρκ που δεν είναι παρόντα στην ύλη που μας περιβάλλει. Ένα από τα πειραματικά σήματα βασίζεται στην ιδέα της ενίσχυσης της παραδοξότητας. Αυτή ήταν ένα από τα πρώτα παρατηρήσιμα μεγέθη για το πλάσμα κουάρκ και γκλουονίων, που προτάθηκε το 1980. Αντίθετα με τα πάνω και κάτω κουάρκ, τα παράξενα κουάρκ δεν υπάρχουν στους συγκρουόμενους πυρήνες. Επομένως, οποιοδήποτε παράξενο κουάρκ ή αντικουάρκ παρατηρείται πειραματικά έχει δημιουργηθεί από την κινητική ενέργεια των συγκρουομένων πυρήνων. Η μάζα των παράξενων κουάρκ και αντικουάρκ είναι ισοδύναμη με τη θερμοκρασία ή ενέργεια στην οποία τα πρωτόνια, νετρόνια και άλλα αδρόνια διαλύονται σε κουάρκ. Αυτό σημαίνει ότι η αφθονία των παράξενων κουάρκ εξαρτάται από τις συνθήκες, τη δομή και τη δυναμική της απεγκλωβισμένης φάσης της ύλης, και αν ο αριθμός τους είναι μεγάλος, μπορεί να υποτεθεί ότι έχουμε φθάσει στις συνθήκες απεγκλωβισμού.

Στην πράξη, η ενίσχυση της παραδοξότητας μπορεί να παρατηρηθεί μετρώντας τον αριθμό των παράξενων σωματιδίων, δηλαδή σωματιδίων που περιέχουν τουλάχιστον ένα παράξενο κουάρκ, και υπολογίζοντας τον λόγο των παράξενων προς τα όχι παράξενα σωματίδια. Αν αυτός ο λόγος είναι μεγαλύτερος από ό τι δίνουν τα θεωρητικά μοντέλα που δεν προβλέπουν τη δημιουργία πλάσματος κουάρκ και γκλουονίων, τότε έχει παρατηρηθεί ενίσχυση της παραδοξότητας.

Εναλλακτικά, για τις συγκρούσεις ιόντων μολύβδου, ο αριθμός των παράξενων σωματιδίων κανονικοποιείται ως προς τον αριθμό των νουκλεονίων που συμμετέχουν στη αλληλεπίδραση και συγκρίνεται με τον ίδιο λόγο για συγκρούσεις πρωτονίων.

5. Παράξενα σωματίδια

Παράξενα σωματίδια είναι αδρόνια που περιέχουν τουλάχιστον ένα παράξενο κουάρκ. Αυτό χαρακτηρίζεται από τον κβαντικό αριθμό της “παραξενιάς”. Το ελαφρύτερο ουδέτερο παράξενο μεσόνιο είναι το $K_S^0(d\bar{s})$ και το ελαφρύτερο ουδέτερο παράξενο βαρυόνιο είναι το Λ (uds), που χαρακτηρίζεται σαν υπερόνιο.

Εδώ θα μελετήσουμε τις διασπάσεις τους, για παράδειγμα $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$. Σ’αυτές τις διασπάσεις ο κβαντικός αριθμός της “παραξενιάς” δεν διατηρείται, αφού τα προϊόντα της διάσπασης αποτελούνται μόνο από πάνω και κάτω κουάρκ. Επομένως δεν πρόκειται για ισχυρές διασπάσεις (που επιπλέον θα ήταν πολύ γρήγορες, με χρόνο $\tau = 10^{-23}$ s) αλλά για ασθενείς διασπάσεις, στις οποίες η παραξενιά μπορεί να διατηρείται ($\Delta S=0$) ή να αλλάζει κατά 1 ($\Delta S=1$). Γι’αυτές τις διασπάσεις ο μέσος χρόνος ζωής τ είναι ανάμεσα σε 10^{-8} s και 10^{-10} s. Για σωματίδια που ταξιδεύουν με ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα του φωτός, αυτό σημαίνει ότι διασπώνται σε μια απόσταση (κατά μέσο όρο) μερικών εκατοστών από το σημείο παραγωγής τους (δηλαδή από το σημείο της αλληλεπίδρασης).

6. Πώς αναζητούμε παράξενα σωματίδια

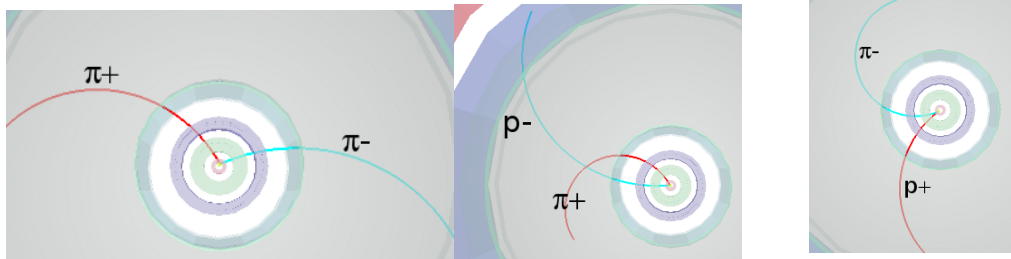
Σκοπός της άσκησης είναι η αναζήτηση παράξενων σωματιδίων που παράγονται από συγκρούσεις στο LHC και καταγράφονται από το πείραμα ALICE.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, τα παράξενα σωματίδια δεν ζουν πολύ: διασπώνται πολύ σύντομα μετά την παραγωγή τους. Ωστόσο, ζουν αρκετά ώστε να ταξιδέψουν σε απόσταση μερικών εκατοστών από το σημείο της αλληλεπίδρασης (IP) όπου παράγονται (primary vertex). Η αναζήτησή τους βασίζεται στην ταυτοποίηση των προϊόντων της διάσπασής τους, που πρέπει να προέρχονται από ένα κοινό σημείο (secondary vertex).

Ουδέτερα παράξενα σωματίδια, όπως τα K_S^0 και Λ , διασπώνται δίνοντας ένα χαρακτηριστικό αχνάρι διάσπασης, που ονομάζεται V0. Το αρχικό σωματίδιο εξαφανίζεται σε απόσταση μερικών εκατοστών από το σημείο της αλληλεπίδρασης και στη θέση του εμφανίζονται δύο αντίθετα φορτισμένα σωματίδια, που καμπυλώνονται σε αντίθετες διευθύνσεις μέσα στο μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς του ALICE.

Στα επόμενα κόκκινα ίχνη υποδηλώνουν θετικά φορτισμένα σωματίδια και πράσινα ίχνη υποδηλώνουν αρνητικά φορτισμένα σωματίδια.

Θα αναζητήσουμε τις ακόλουθες διασπάσεις:



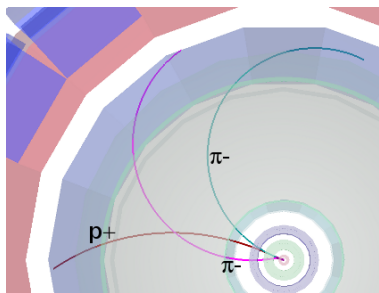
$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$

$$\text{αντι-}\Lambda \rightarrow p^- + \pi^+$$

Βλέπουμε ότι για τελική κατάσταση με δύο πιόνια η διάσπαση είναι περίπου συμμετρική, ενώ για τελική κατάσταση με πiónιο και πρωτόνιο η ακτίνα καμπυλότητας του πρωτονίου είναι μεγαλύτερη από του πιονίου: λόγω της μεγαλύτερης μάζας του, το πρωτόνιο παίρνει το μεγαλύτερο μέρος από την αρχική ορμή.

Θα αναζητήσουμε επίσης διασπάσεις φορτισμένων παράξενων σωματιδίων όπως το Ξ^- που διασπάται σε π^- και Λ ; το Λ στη συνέχεια διασπάται σε π^- και πρωτόνιο. Το αρχικό πiónιο χαρακτηρίζεται σαν bachelor (μονό ίχνος από φορτισμένο σωματίο) και φαίνεται μωβ στην εικόνα.



$$\Xi^- \rightarrow \pi^- \Lambda \rightarrow \pi^- p + \pi^-$$

Η αναζήτηση των V0 βασίζεται στην τοπολογία της διάσπασης και την ταυτοποίηση των προϊόντων της διάσπασης. Επιπλέον επιβεβαίωση της ταυτότητας του σωματιδίου αποτελεί ο υπολογισμός της μάζας, που γίνεται από την πληροφορία (μάζα και ορμή) των προϊόντων της διάσπασης, όπως περιγράφεται στα επόμενα.

7. Υπολογισμός της (αμετάβλητης) μάζας

Θεωρούμε τη διάσπαση του ουδέτερου καονίου σε δύο φορτισμένα πιόνια, $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$.

Έστω E , $\mathbf{p}$ και m η ολική ενέργεια, ορμή (διάνυσμα!) και μάζα του αρχικού σωματιδίου (K_S^0).

Έστω E_1 , $\mathbf{p}_1$ και m_1 η ολική ενέργεια, ορμή και μάζα του θυγατρικού σωματιδίου 1 (π^+) και E_2 , $\mathbf{p}_2$ και m_2 η ολική ενέργεια, ορμή και μάζα του θυγατρικού σωματιδίου 2 (π^-).

Διατήρηση ενέργειας

$$E = E_1 + E_2 \quad (1)$$

Διατήρηση ορμής

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 \quad (2)$$

Από τη σχετικότητα (για $c=1$)

$$E^2 = p^2 + m^2 \quad (3)$$

Όπου $p=|\mathbf{p}|$ είναι το μήκος του διανύσματος της ορμής $\mathbf{p}$.

Η εξίσωση (3) ισχύει φυσικά και για τα θυγατρικά σωματίδια:

$$E_1^2 = p_1^2 + m_1^2 \quad (4)$$

$$E_2^2 = p_2^2 + m_2^2 \quad (5)$$

όπου $p_1=|\mathbf{p}_1|$ και $p_2=|\mathbf{p}_2|$ είναι τα μήκη των διανυσμάτων $\mathbf{p}_1$ και $\mathbf{p}_2$.

Από τις παραπάνω εξισώσεις βρίσκουμε ότι:

$$m^2 = E^2 - p^2 = (E_1+E_2)^2 - (\mathbf{p}_1+\mathbf{p}_2)^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{p}_2 - 2 \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2 \quad (6)$$

όπου $\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2$ είναι το αριθμητικό γινόμενο των δύο διανυσμάτων $\mathbf{p}_1$ και $\mathbf{p}_2$, που ισούται με το άθροισμα των γινομένων των συνιστωσών x, y και z των δύο διανυσμάτων:

$$\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2 = p_{1x} p_{2x} + p_{1y} p_{2y} + p_{1z} p_{2z} \quad (7)$$

$$\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_1 = p_{1x}^2 + p_{1y}^2 + p_{1z}^2 = p_1^2 \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{p}_2 = p_{2x}^2 + p_{2y}^2 + p_{2z}^2 = p_2^2 \quad (9)$$

Επομένως η εξίσωση (6) γίνεται:

$$\begin{aligned} m^2 &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2 \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2 \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2 \end{aligned} \quad (10)$$

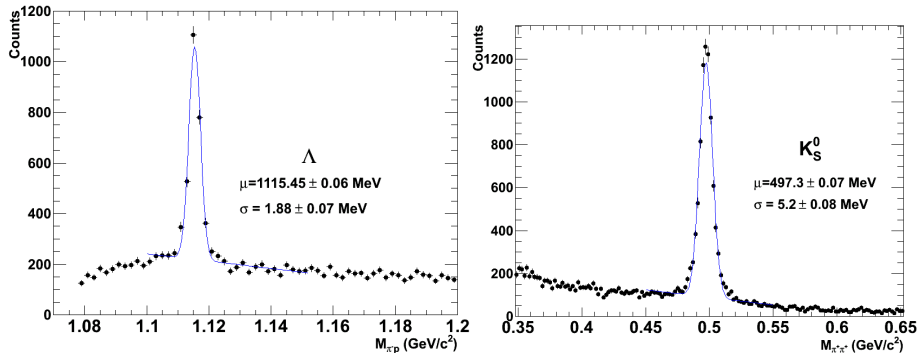
Μπορούμε επομένως να υπολογίσουμε τη μάζα του αρχικού σωματιδίου από τις μάζες και τις συνιστώσες της ορμής των θυγατρικών σωματιδίων.

Οι μάζες των θυγατρικών σωματιδίων m_1 και m_2 είναι γνωστές: ένας αριθμός διαφορετικών ανιχνευτών του πειράματος ALICE ταυτοποιούν τα σωματίδια.

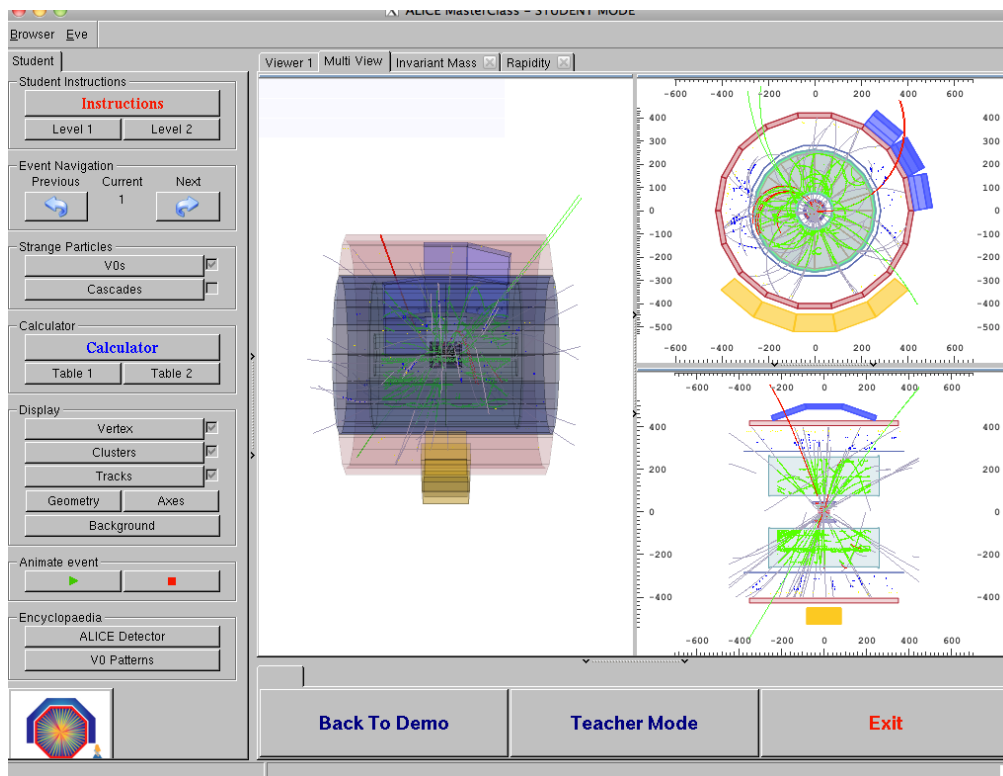
Οι ορμές των θυγατρικών σωματιδίων p_1 , p_2 βρίσκονται από τη μέτρηση της ακτίνας καμπυλότητας της τροχιάς τους λόγω του μαγνητικού πεδίου, που η τιμή του είναι γνωστή.

Στην άσκηση χρησιμοποιούμε τις τρεις συνιστώσες του διανύσματος της ορμής κάθε ίχνους από τη διάσπαση του V0, όπως στις παραπάνω εξισώσεις.

Ο υπολογισμός της αμετάβλητης μάζας δίνει κατανομές όπως οι παρακάτω. Η κατανομή στα αριστερά είναι η μάζα που έχει υπολογιστεί για ζεύγη πιονίου-πρωτονίου. Η κορυφή αντιστοιχεί στο Λ και το συνεχές “υπόστρωμα” προέρχεται από τυχαίους συνδυασμούς πιονίων και πρωτονίων, που φαίνονται σαν να προέρχονται από το ίδιο σημείο (secondary vertex) ή που έχουν ταυτοποιηθεί λανθασμένα. Η κατανομή στα δεξιά είναι η μάζα που έχει υπολογιστεί για ζεύγη αρνητικού και θετικού πιονίου. Η κορυφή αντιστοιχεί στο K_S^0 .



8. Τα εργαλεία και η χρήση τους

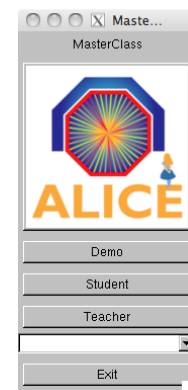


Η άσκηση γίνεται στο πλαίσιο του πακέτου ROOT και χρησιμοποιεί μια απλοποιημένη μορφή του προγράμματος απεικόνισης γεγονότος (event display) του ALICE. Σ'ένα τερματικό ήδη ανοιχτό στον υπολογιστή σας (ώστε να βρίσκεστε στο σωστό directory) γράψτε *root masterclass.C*. Θα εμφανιστεί ένα μικρό παράθυρο, όπως στην εικόνα πιο κάτω. Μπορείτε να επιλέξετε “demo”, “student” για την ανάλυση των γεγονότων και “teacher” για την συλλογή και πρόσθεση των αποτελεσμάτων.

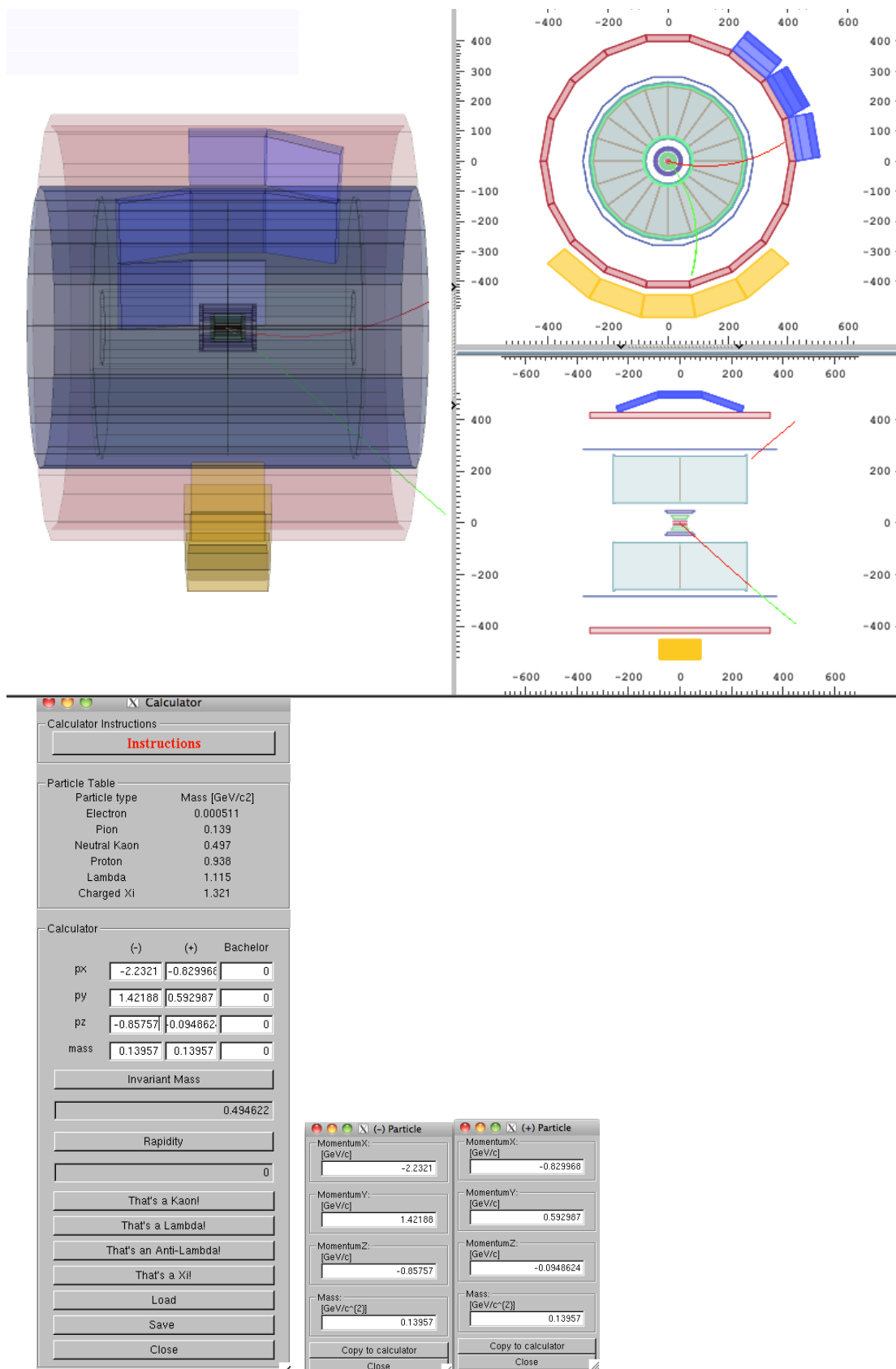
“demo” : δίνει παραδείγματα διασπάσεων K_S^0 , Λ , αντι- Λ και Ξ^- . Διαλέγοντας “student” για την ανάλυση των γεγονότων και οπτική αναζήτηση των V0 ανοίγει ένα παράθυρο όπως στην παραπάνω εικόνα.

Στα αριστερά υπάρχει ένας αριθμός επιλογών: Instructions, Event Navigation, V0 και cascade finder, calculator, επιλογή του τί εμφανίζεται (ίχνη, γεωμετρία του ανιχνευτή). Στην “Encyclopedia”, υπάρχει μια σύντομη περιγραφή των ανιχνευτών του ALICE, παραδείγματα από διασπάσεις V0 και παραδείγματα γεγονότων από συγκρούσεις πυρήνων μολύβδου.

Το event display δείχνει τρεις απόψεις του ALICE (τρισδιάστατη, προβολή $\eta\phi$ και προβολή rz). Μπορείτε να επιλέξετε τις πληροφορίες που θέλετε να εμφανίζονται για κάθε γεγονός. Πατώντας το σχετικό κουμπί, βλέπετε όλα τα ίχνη (tracks) του γεγονότος. Πατώντας V0 (και cascade), τα V0 (και cascades) εμφανίζονται με διαφορετικά χρώματα, αν υπάρχουν. Όταν βρείτε ένα V0, μπορείτε να ξαναπατήσετε “tracks” ώστε να μη φαίνονται τα υπόλοιπα ίχνη του γεγονότος, αλλά μόνο αυτά που ανήκουν στο V0. Τα χρώματα που χρησιμοποιούνται είναι: κόκκινο για τα θετικά ίχνη από V0, πράσινο για τα αρνητικά (και μωβ για τα “bachelors”, στην περίπτωση cascades).

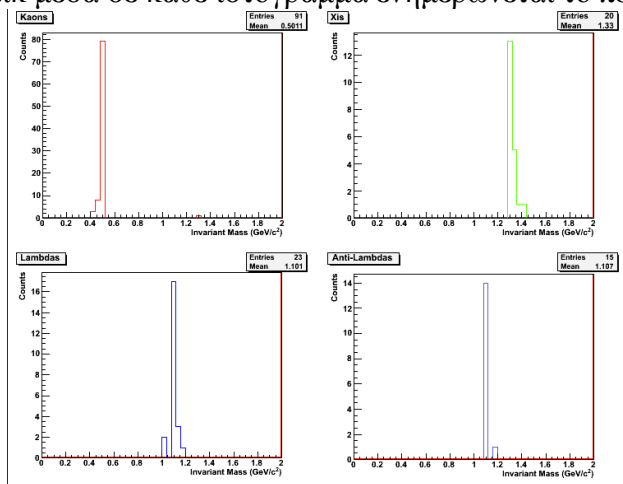


Κάνοντας κλικ σε κάθε ίχνος εμφανίζεται ένα κουτάκι με τις τιμές των συνιστωσών της ορμής και της μάζας του σωματιδίου (αυτού με τη μέγιστη πιθανότητα, από τους αλγορίθμους για ταυτοποίηση σωματιδίων). Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να αντιγραφούν στον υπολογιστή (calculator), που υπολογίζει την αμετάβλητη μάζα του αρχικού σωματιδίου, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα.



Το πρόγραμμα περιλαμβάνει τέσσερα ιστογράμματα αμετάβλητης μάζας (για K_S^0 , Λ , αντι- Λ and Ξ^-). Για κάθε διάσπαση V0 μπορείτε να αναγνωρίσετε το αρχικό σωματίο από τα προϊόντα της διάσπασης και από την τιμή της αμετάβλητης μάζας (στον

calculator υπάρχει ένας πίνακας με τις μάζες μερικών σωματιδίων). Πατάτε το σχετικό κουμπί (That's a kaon; that's a Lambda,...). Έτσι το καταχωρείτε στο αντίστοιχο ιστόγραμμα. Μπορείτε να δείτε τα ιστογράμματα αμετάβλητης μάζας κάνοντας κλικ στο κουμπί “invariant mass”, πάνω από το event display. Κάνοντας κλικ μέσα σε κάθε ιστόγραμμα ενημερώνεται το περιεχόμενό του.



9. Η άσκηση – αναλύστε γεγονότα και βρείτε τα παράξενα αδρόνια

Η ανάλυση που έχετε να κάνετε εδώ είναι ταυτοποίηση και μέτρηση των παράξενων σωματιδίων σ'ένα μικρό δείγμα που περιέχει 30 γεγονότα. Όταν αρχίζετε την άσκηση, κάντε κλικ στο “student” και διαλέξτε το δείγμα γεγονότων που θα αναλύσετε. Υπάρχουν 6 διαφορετικά δείγματα με δεδομένα από συγκρούσεις πρωτονίων στα 7 TeV.

Κοιτάζοντας την απεικόνιση του κάθε γεγονότος παρατηρήστε πόσο σύνθετα είναι – παρατηρήστε τον μεγάλο αριθμό ιχνών στους ανιχνευτές από τις συγκρούσεις. Τα περισσότερα από αυτά τα ίχνη είναι πιόνια.

Πατώντας V0 (ή cascade), τα ίχνη από διασπάσεις V0 (ή cascades), αν υπάρχουν, εμφανίζονται με διαφορετικά χρώματα. Από την τοπολογία του V0 προσπαθήστε να μαντέψετε για τι σωματίο πρόκειται. Κάνοντας κλικ σε κάθε ίχνος εμφανίζονται οι σχετικές πληροφορίες – το φορτίο, οι τρεις συνιστώσες της ορμής και η μάζα του πιθανότερου σωματιδίου (που έχει βρεθεί με τη βοήθεια των διαφόρων ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται για ταυτοποίηση σωματιδίων). Ήδη από τα προϊόντα της διάσπασης μπορείτε να μαντέψετε το αρχικό σωματίο. Για επιβεβαίωση, υπολογίζετε την αμετάβλητη μάζα όπως περιγράφεται στο 7 και συγκρίνετε την τιμή της με τις τιμές του πίνακα.

Αν η μάζα είναι $497 \text{ MeV} \pm 13 \text{ MeV}$ (στο διάστημα $[484, 510] \text{ MeV}$) πρόκειται για K_s^0 .

Αν η μάζα είναι $1115 \text{ MeV} \pm 5 \text{ MeV}$ (στο διάστημα $[1110, 1120] \text{ MeV}$) και τα θυγατρικά σωματίδια είναι πρωτόνιο και αρνητικό πιόνιο, πρόκειται για Λ .

Αν η μάζα είναι $1115 \text{ MeV} \pm 5 \text{ MeV}$ (στο διάστημα $[1110, 1120] \text{ MeV}$) και τα θυγατρικά σωματίδια είναι αντιπρωτόνιο και θετικό πιόνιο, πρόκειται για αντι- Λ .

Για διάσπαση cascade, αν η μάζα που υπολογίστηκε από τα 3 ίχνη είναι $1321 \pm 10 \text{ MeV}$ (στο διάστημα $[1311, 1331] \text{ MeV}$) πρόκειται για Ξ^- .

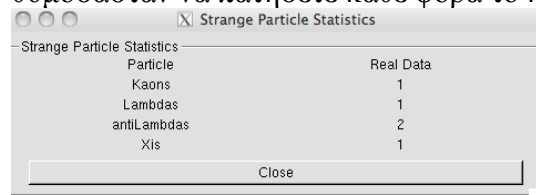
Ανάλογα με το αποτέλεσμα, πατάτε το κουμπί “It is a Kaon, Lambda etc”. Έτσι το

προσθέτετε στο αντίστοιχο ιστόγραμμα αμετάβλητης μάζας.

Είναι δυνατόν η μάζα που υπολογίστηκε να μην αντιστοιχεί σε καμιά από τις παραπάνω τιμές. Πρόκειται για “υπόστρωμα”. Για το σκοπό της άσκησης θα αγνοήσουμε αυτά τα V0.

10. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει περίληψη των αποτελεσμάτων. Η στήλη “real data” περιέχει τον αριθμό από K_s^0 , Λ , αντι- Λ και Ξ^- που βρήκατε (υπό την προϋπόθεση ότι θυμόσασταν να πατήσετε κάθε φορά το κουμπί “This is a Kaon, Lambda etc”).



Particle	Real Data
Kaons	1
Lambdas	1
antiLambdas	2
Xiis	1

Μπορείτε επίσης να δείτε το περιεχόμενο από τα ιστογράμματα αμετάβλητης μάζας για κάθε τύπο σωματιδίου. Όταν αναλύσετε όλα τα γεγονότα στο δείγμα σας, σώστε τα αποτελέσματα σε ένα αρχείο, ακολουθώντας τις οδηγίες.

11. Συλλογή των αποτελεσμάτων

Επιλέγοντας “Teacher” στο αρχικό μενού, μπορείτε να προχωρήσετε στη συλλογή όλων των αποτελεσμάτων. Κάτω από το “Teacher Controls” επιλέγετε “Get Files” και ανοίγετε τα αρχεία με τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κάθε δείγματος γεγονότων (ένα κάθε φορά). Προφανώς πρέπει πρώτα να μεταφέρετε τα αρχεία με τα αποτελέσματα στον υπολογιστή του Δασκάλου! Έτσι, στα “Results”, μπορείτε να δείτε τον πίνακα με όλη τη στατιστική.

12. Ανάλυση μεγάλου αριθμού γεγονότων

Το event display είναι ένα εργαλείο που βοηθάει να ελεγχθεί η ποιότητα των δεδομένων και της ανακατασκευής τους και δίνει μια ιδέα (οπτική) για το πώς μοιάζουν τα γεγονότα από τις συγκρούσεις. Ωστόσο στην πραγματικότητα η ανάλυση των δεδομένων δε γίνεται έτσι: κάτι τέτοιο θα ήταν υπερβολικά κουραστικό και χρονοβόρο. Για να αναλύσουμε τα εκατομμύρια γεγονότα που συλλέγουμε καθημερινά στο LHC τρέχουμε προγράμματα, και αυτό ακριβώς θα κάνουμε για να αναζητήσουμε V0 σε πολύ μεγαλύτερα δείγματα με δεδομένα.

Στο τερματικό σας αλλάξτε directory (με την εντολή: `cd MasterClass_extended`) και γράψτε `root MasterClassExtended.C`. Διαλέξτε τα δεδομένα που θα αναλύσετε (υπάρχει ένα δείγμα με δεδομένα από συγκρούσεις pp και άλλο ένα με δεδομένα από συγκρούσεις PbPb). Διαλέξτε “student” και προχωρήστε με την ανάλυση.

Επιλέγοντας V0, συνδυάζονται μόνο ζεύγη ιχνών που προέρχονται από ένα κοινό σημείο που δεν είναι το σημείο της αλληλεπίδρασης (secondary vertex). Η αμετάβλητη μάζα τους υπολογίζεται από τις συνιστώσες της ορμής των ιχνών και από τη μάζα των προϊόντων της διάσπασης που έχουν ταυτοποιηθεί. Μπορείτε να επιλέξετε K_s^0 , Λ ή αντι- Λ . Μόλις τελειώσει η ανάλυση όλων των γεγονότων του δείγματος (μπορείτε να βλέπετε τα μηνύματα στο τερματικό πίσω από το μενού) εμφανίζεται στην οθόνη η κατανομή της αμετάβλητης μάζας.

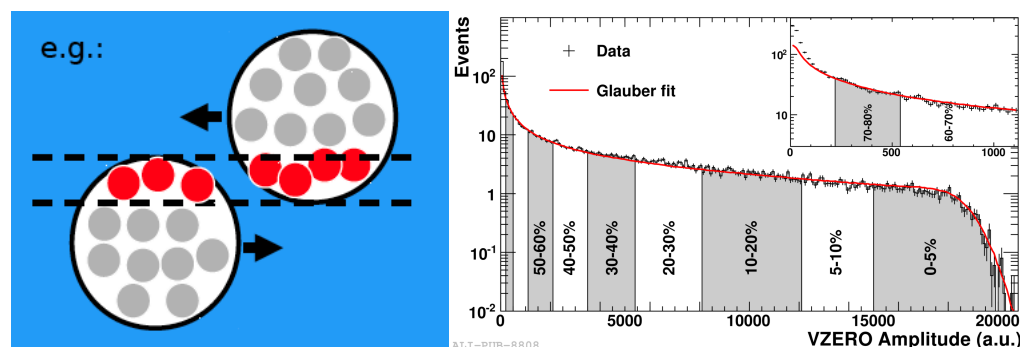
Για να βρούμε τον αριθμό των σωματιδίων ενός τύπου, για παράδειγμα τα K_s^0 , πρέπει να βρούμε τον αριθμό των γεγονότων στην κορυφή μετά από αφαίρεση του υποστρώματος. Για να περιγράψουμε το υπόστρωμα με μια συνάρτηση (πολυώνυμο δεύτερου βαθμού) επιλέγουμε πρώτα την περιοχή του fit. Το σήμα περιγράφεται με Γκαουσιανή κατανομή, για την οποία επίσης πρέπει να επιλέξουμε περιοχή. Πατώντας “Fit signal and background”, οι δύο συναρτήσεις εμφανίζονται πάνω στο ιστόγραμμα και μπορεί να ελεγχθεί οπτικά αν το fit είναι λογικό. Για την αφαίρεση του υποστρώματος χρησιμοποιούνται οι συντελεστές του δευτεροβάθμιου πολυωνύμου. Στο ιστόγραμμα εμφανίζονται ο συνολικός αριθμός γεγονότων στην κορυφή, ο αριθμός γεγονότων του υποστρώματος και αυτός του σήματος, καθώς και η μέση τιμή της Γκαουσιανής κατανομής (που είναι η μάζα του σωματιδίου) και το πλάτος της σίγμα (και τα δύο σε MeV/c^2).

13. Βρείτε K_s^0 , Λ , αντι- Λ σε συγκρούσεις PbPb σε διαφορετικές περιοχές κεντρικότητας

Όταν μελετάμε συγκρούσεις βαριών ιόντων συχνά κατατάσσουμε τα γεγονότα σε κατηγορίες, ανάλογα με την κεντρικότητα της σύγκρουσης.

Ο πυρήνας του μολύβδου είναι πολύ μεγαλύτερος από το πρωτόνιο, πράγμα που οδηγεί σε διαφορές στο πώς γίνονται οι συγκρούσεις. Στην περίπτωση πρωτονίου-πρωτονίου υπάρχει ένα μόνο είδος σύγκρουσης, ενώ οι συγκρούσεις μολύβδου διαφέρουν ανάλογα με το μέγεθος της περιοχής των πυρήνων που αλληλεπικαλύπτονται.

Για να αναζητήσουμε διαφορές ανάμεσα στις συγκρούσεις πρωτονίων και πυρήνων μολύβδου, ορίζουμε πρώτα διαφορετικές κατηγορίες γεγονότων για τις συγκρούσεις βαριών ιόντων. Ένα από τα κριτήρια που χρησιμοποιούμε είναι η κεντρικότητα της σύγκρουσης, που σχετίζεται με την παράμετρο σύγκρουσης (απόσταση μεταξύ των συγκρουομένων πυρήνων κάθετη στον άξονα της δέσμης). Αυτή η παράμετρος δεν είναι απευθείας μετρήσιμη. Ένας από τους τρόπους με τους οποίους το πείραμα ALICE προσδιορίζει την κεντρικότητα των γεγονότων είναι από το πλάτος του σήματος στους απ αριθμητές VZERO (δύο ομάδες από πλαστικούς σπινθηριστές τοποθετημένους σε απόσταση +330 cm και -90 cm από το σημείο της αλληλεπίδρασης). Αυτό φαίνεται στο δεξιό σχήμα. Ποσοτική εκτίμηση της κεντρικότητας της σύγκρουσης δίνεται από τον αριθμό των συμμετεχόντων νουκλεονίων N_{part} (κόκκινα στο αριστερό σχήμα).



Σ' αυτό το κομμάτι της άσκησης θα αναλύσετε γεγονότα από συγκρούσεις πυρήνων μολύβδου που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες κεντρικότητας αναζητώντας V0 και θα υπολογίσετε τον αριθμό των K_s^0 , Λ , αντι- Λ για κάθε κατηγορία.

Στο directory *MasterClass_cent* γράψτε *root MasterClassExtended.C*. Επιλέγετε "student" και στο νέο μενού που εμφανίζεται επιλέγετε τον τύπο του V0 και την κατηγορία κεντρικότητας πατώντας το σχετικό κουμπί. Όταν εμφανιστεί η κατανομή της αμετάβλητης μάζας, βρίσκετε τον αριθμό των σωματιδίων του συγκεκριμένου τύπου ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στα προηγούμενα.

14. Υπολογισμός της απόδοσης παραγωγής σωματιδίων

Αφού βρείτε τον αριθμό των K_s^0 , Λ , αντι- Λ μπορείτε να υπολογίσετε τον αριθμό των παραγομένων σωματιδίων ανά αλληλεπίδραση για κάθε τύπο V0 και για κάθε κατηγορία κεντρικότητας. Γι' αυτό τον υπολογισμό χρειάζεστε επιπλέον πληροφορίες, που θα σας δοθούν όταν τελειώσετε την ανάλυση (π.χ.: απόδοση ανακατασκευής των ιχνών για κάθε τύπο V0, ολικό αριθμό γεγονότων που αναλύθηκαν για να σας δώσουν τα συγκεκριμένα V0).