

1. Panoramica generale

L'esercizio proposto consiste nella ricerca di particelle strane (cioè dotate del numero quantico di stranezza) prodotte da collisioni di protoni in LHC e registrate dall'esperimento ALICE. Tale ricerca si basa sul riconoscimento di due tipi di decadimento: i 'V0', come $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ e $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$, e i 'cascade' (dall'inglese 'a cascata') come $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$ (seguito da $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$). L'analisi degli eventi viene effettuata usando il software di visualizzazione di eventi di ALICE, realizzato in ambiente ROOT. L'identificazione delle particelle strane è basata sulla configurazione geometrica dei loro decadimenti combinata con l'identificazione delle particelle prodotte; le informazioni sulle tracce sono usate per calcolare la massa invariante della particella decaduta, come ulteriore conferma del tipo di particella identificata.

Nel seguito vengono dapprima presentati brevemente l'esperimento ALICE e i suoi obiettivi, e poi le motivazioni fisiche di questa analisi. Il metodo e gli strumenti utilizzati per l'identificazione di particelle strane vengono descritti in dettaglio; poi vengono spiegati tutti i passi dell'esercizio, seguiti dalla presentazione dei risultati. Alla fine viene presentato il metodo per raccogliere e analizzare insieme tutti i dati, e viene anche proposto qualche possibile argomento di discussione.

2. Introduzione

ALICE (A Large Ion Collider Experiment), uno dei quattro grandi esperimenti al Large Hadron Collider del CERN, è stato progettato per studiare collisioni di ioni pesanti, dove per ioni si intendono nuclei atomici privi di elettroni. Inoltre ALICE studia anche le collisioni protone-protone, che principalmente forniscono dei dati di riferimento per le collisioni nucleo-nucleo, ma che consentono anche un certo numero di studi specifici. In particolare il rivelatore ALICE è stato progettato per far fronte all'altissimo numero di particelle previsto in collisioni tra nuclei di piombo alle energie estreme di LHC.

3. La fisica di ALICE

I quark sono particelle che si trovano dentro i protoni e i neutroni, e che sono tenute insieme da una forza chiamata interazione forte, trasmessa mediante lo scambio di particelle portatrici di forza chiamate gluoni. L'interazione forte è anche responsabile del legame tra i protoni e i neutroni dentro i nuclei degli atomi.

Sebbene molti aspetti dell'interazione forte siano oggi ben capiti, due questioni fondamentali restano non risolte: l'origine del cosiddetto 'confinamento' e il meccanismo della generazione della massa. Si pensa che entrambi i fenomeni nascano dal modo in cui le proprietà del vuoto vengono modificate dall'interazione forte.

Malgrado sia noto che i quark sono particelle elementari che costituiscono tutte le particelle note come 'adroni', nessun quark è mai stato osservato come particella isolata: i quark, così come i gluoni, sembrano cioè essere uniti tra loro in modo permanente e intrappolati dentro particelle composte, come i protoni e i neutroni.

Tale fenomeno è noto come 'confinamento'. Il meccanismo esatto che lo provoca rimane tuttora sconosciuto.

L'attuale teoria delle interazioni forti (chiamata cromodinamica quantistica) predice che a temperature e densità molto elevate i quark e i gluoni non dovrebbero più essere confinati dentro particelle composte. Invece essi dovrebbero potersi muovere liberamente in un nuovo stato della materia noto come 'plasma di quark e gluoni' (in inglese: quark-gluon plasma, o più brevemente QGP).

Tale transizione dovrebbe verificarsi quando la temperatura supera un valore critico che si stima intorno ai 2.000 miliardi di gradi... circa 100.000 volte più calda del nucleo centrale del Sole! Tali temperature sono esistite in Natura solo ai tempi della nascita dell'Universo. Abbiamo ragioni per credere che la temperatura sia stata effettivamente al di sopra di questo valore critico per pochi milionesimi di secondo dopo il Big Bang, e che l'intero Universo si trovasse a quel tempo in uno stato di plasma di quark e gluoni.

Quando due nuclei pesanti si avvicinano a una velocità prossima a quella della luce e poi entrano in collisione, si ricreano tali condizioni estreme di temperatura, che sono sufficienti per liberare i quark e i gluoni. Quark e gluoni si scontrano tra loro creando un mezzo in equilibrio termico: il plasma di quark e gluoni. Il plasma si espande e si raffredda fino a una temperatura (10^{12} gradi), alla quale quark e gluoni si aggregano per formare materia ordinaria, circa 10^{-23} secondi dopo l'inizio della collisione. ALICE studierà la formazione e le proprietà di questo nuovo stato della materia.

4. Aumento di stranezza come segnale di formazione del plasma di quark e gluoni

La diagnosi e lo studio delle proprietà del plasma di quark e gluoni (QGP) può essere intrapresa usando quark che non sono presenti nella materia che vediamo intorno a noi. Uno dei segnali sperimentali della formazione del plasma di quark e gluoni (il primo ad essere proposto, nel 1980) si basa sull'idea di 'aumento di stranezza'. A differenza dei quark up e down, i quark strani (in inglese: strange) non sono trasportati dai nuclei collidenti. Perciò, tutti i quark e gli antiquark osservati negli esperimenti sono creati 'ex novo' dall'energia cinetica dei nuclei collidenti. Peraltro la massa dei quark e antiquark strani è molto vicina alla temperatura o energia alla quale i protoni, i neutroni e gli altri adroni si dissolvono in quark. Ciò significa che l'abbondanza di quark strani è sensibile alle condizioni, alla struttura e alla dinamica della materia nella fase deconfinata, e che se il loro numero è grande si può ipotizzare che le condizioni per il deconfinamento siano state raggiunte.

In pratica, l'aumento di stranezza si può osservare contando il numero di particelle strane, cioè di particelle che contengono almeno un quark strano, e poi calcolando il rapporto tra particelle strane e non strane. Se questo rapporto risulta essere maggiore di quello dato da modelli teorici che non prevedono la creazione di QGP, allora questo significa che è stato osservato un aumento di stranezza.

5. Particelle strane

Le particelle strane sono adroni contenenti almeno un quark strano, e come quest'ultimo sono caratterizzate da un numero quantico chiamato 'stranezza'. Tra gli adroni distinguiamo poi i mesoni (formati da un quark e un antiquark) e i barioni (formati da tre quark). Il mesone strano neutro più leggero è la K_S^0 ($d\bar{s}$), mentre il barione strano neutro più leggero è la Λ (uds). I barioni strani sono anche noti come iperoni.

Qui noi studieremo i loro decadimenti, per esempio $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ oppure $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$. In questi decadimenti il numero quantico di stranezza non viene conservato, dato che i prodotti finali di decadimento sono composti solo da quark up e down. Perciò essi non sono 'decadimenti forti', che conservano la stranezza e sono molto veloci, con una vita media $\tau = 10^{-23}$ s, ma invece 'decadimenti deboli', nei quali la stranezza può essere conservata ($\Delta S=0$) oppure cambiare di 1 ($\Delta S=1$). Tali decadimenti deboli sono molto più lenti, e la loro vita media τ si aggira tra 10^{-8} s e 10^{-10} s. Per particelle che viaggiano a velocità prossima a quella della luce, questo significa che la particella decade a una distanza (in media) di qualche cm dal punto di produzione (cioè dal punto dell'interazione protone-protone o nucleo-nucleo).

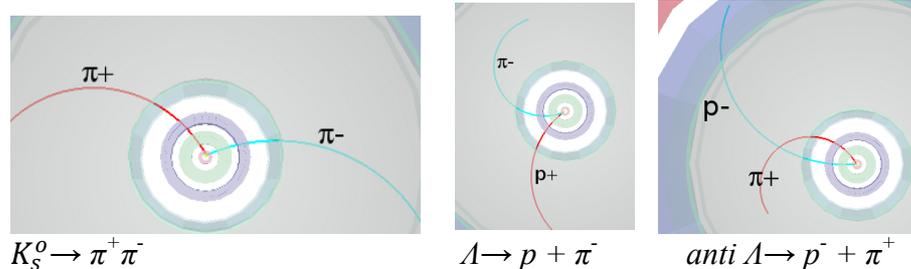
6. Come cerchiamo particelle strane

Lo scopo dell'esercizio è di cercare particelle strane prodotte da collisioni protone-protone in LHC e registrate dall'esperimento ALICE.

Come menzionato precedentemente, le particelle strane non vivono a lungo; esse decadono poco dopo la loro produzione. Tuttavia, esse vivono abbastanza a lungo da poter percorrere qualche cm di distanza dal punto di interazione (IP), dove esse sono state prodotte. La loro ricerca si basa quindi sull'identificazione dei loro prodotti di decadimento, che devono avere origine da un vertice secondario in comune.

Particelle strane neutre, come i kaoni e le lambda, decadono dando origine a una configurazione caratteristica, chiamata V0. La particella 'madre' scompare ad una distanza di alcuni cm dal punto d'interazione, e due particelle di carica opposta appaiono al suo posto, incurvate in direzioni opposte dentro il campo magnetico del solenoide di ALICE.

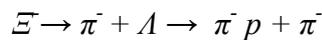
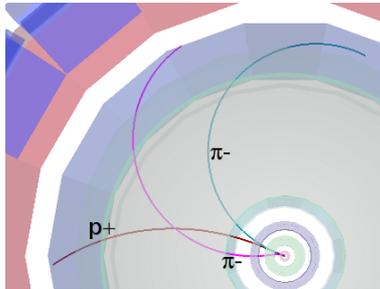
Nelle figure che seguono le tracce rosse indicano particelle di carica positiva; le tracce verdi indicano particelle di carica negativa. I decadimenti che cercheremo sono del tipo:



Vediamo che per uno stato finale pione-pione la configurazione di decadimento è quasi simmetrica, mentre invece per lo stato finale pione-protone il raggio di curvatura del protone è più grande di quello del pione: infatti a causa della sua

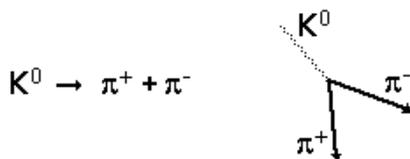
massa più grande il protone trasporta la maggior parte della quantità di moto iniziale.

Noi cercheremo anche decadimenti “a cascata” di particelle strane cariche, come quello della Ξ^- ; in un primo momento essa decade in π^- e Λ ; poi la Λ decade a sua volta in π^- e un protone; il pione iniziale è denominato “bachelor” (traccia carica isolata) e nel disegno viene rappresentato in viola.



La ricerca di $V0$ si basa dunque sull'analisi della topologia del decadimento e sull'identificazione delle particelle prodotte; una conferma ulteriore dell'identità della particella viene poi dal calcolo della sua massa; ciò viene fatto basandosi sulle informazioni (massa e quantità di moto) dei prodotti di decadimento, come viene spiegato nella prossima sezione.

7. Il calcolo della massa (invariante)



Consideriamo il decadimento del kaone neutro in due pioni carichi.

Siano E , \mathbf{p} ed m l'energia totale, la quantità di moto (che è un vettore!) e la massa della particella-madre (K^0). Siano E_1 , \mathbf{p}_1 ed m_1 l'energia totale, la quantità di moto e la massa della particella-figlia numero 1 (π^+); ed E_2 , \mathbf{p}_2 ed m_2 l'energia totale, la quantità di moto e la massa della particella-figlia numero 2 (π^-).

$$\text{Conservazione dell'energia} \quad E = E_1 + E_2 \quad (1)$$

$$\text{Conservazione della quantità di moto} \quad \mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 \quad (2)$$

$$\text{Dalla relatività (supponendo } c=1\text{):} \quad E^2 = p^2 + m^2 \quad (3)$$

dove $p=|\mathbf{p}|$ è il modulo del vettore \mathbf{p} , cioè la lunghezza della freccia usata come rappresentazione grafica del vettore quantità di moto.

Quest'ultima formula può venire applicata, naturalmente, anche alle particelle-figlie:

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

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

dove $p_1=|\mathbf{p}_1|$ e $p_2=|\mathbf{p}_2|$ sono i moduli di \mathbf{p}_1 e \mathbf{p}_2 .

Dalle equazioni di sopra ricaviamo che :

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

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

dove si è introdotto il prodotto scalare $\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2$ dei due vettori \mathbf{p}_1 e \mathbf{p}_2 , il cui valore è dato dalla somma dei prodotti delle componenti x , y e z dei due vettori:

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

e quindi in particolare:

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

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

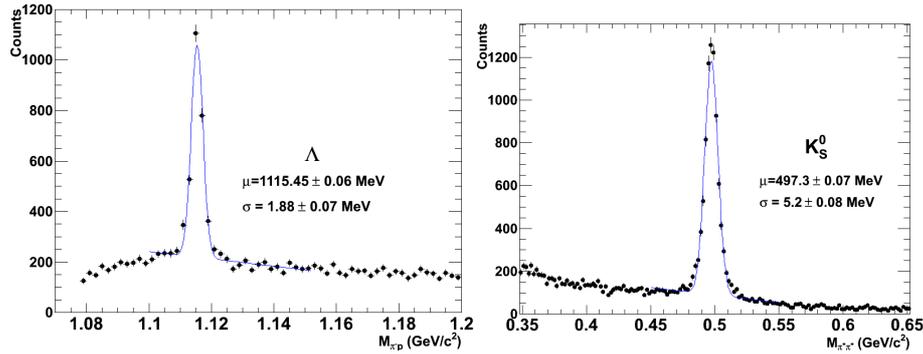
La formula (6) diventa allora:

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

Possiamo pertanto calcolare la massa della particella decaduta a partire dalla massa e dalle componenti della quantità di moto delle particelle-figlie. Le masse delle particelle-figlie m_1 e m_2 sono note (vari rivelatori vengono utilizzati in ALICE per identificare le particelle).

Le quantità di moto delle particelle-figlie, p_1 e p_2 , possono essere trovate misurando il raggio di curvatura della loro traiettoria all'interno del campo magnetico noto. Nell'esercizio usiamo le tre componenti del vettore quantità di moto di ogni traccia associata al decadimento di tipo V0, come nell'equazione vista sopra.

Tipicamente il calcolo della massa invariante dà origine a distribuzioni come quelle mostrate nella figura di sotto. La distribuzione sulla sinistra è la massa calcolata per coppie pione-protone; il picco corrisponde alle lambda, e la regione piatta sottostante è il 'fondo' originato da combinazioni casuali di pioni e di protoni che sembrano provenire dallo stesso vertice secondario o che sono stati identificati male. La distribuzione sulla destra è la massa calcolata per coppie di pioni negativi e positivi; il picco corrisponde alla massa delle K_S^0 .



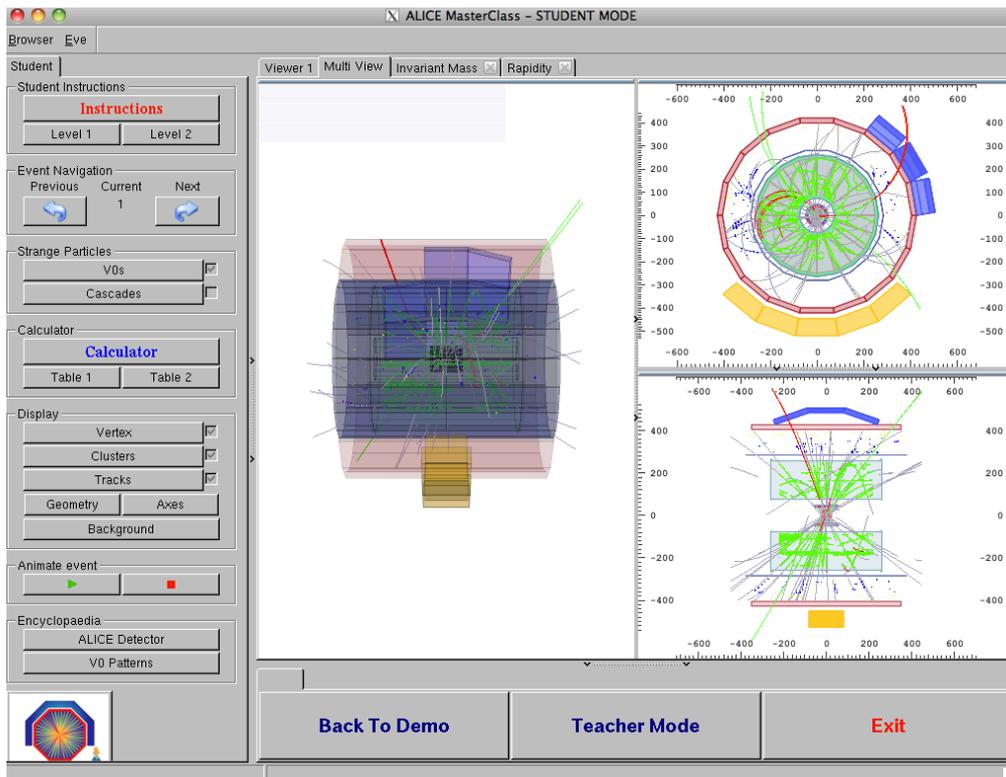
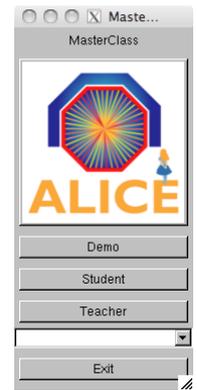
8. Gli strumenti e come usarli

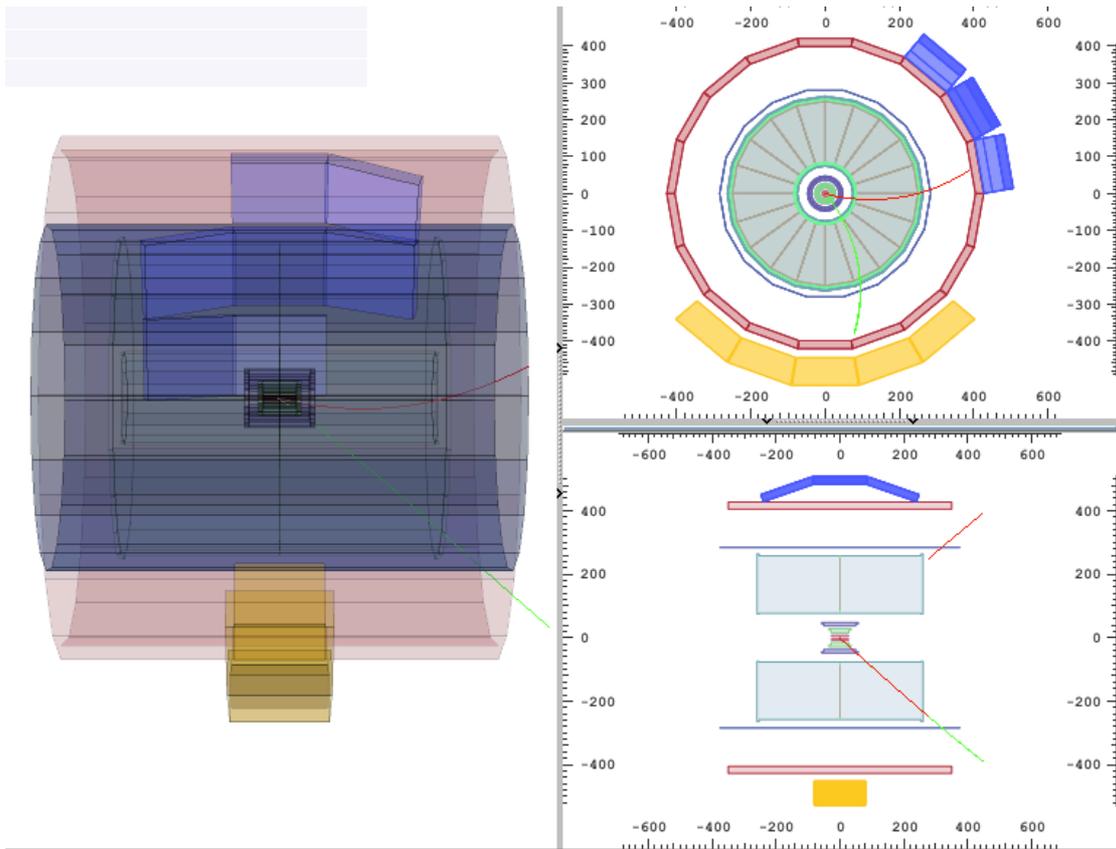
L'esercizio viene effettuato in un ambiente ROOT: in una finestra già aperta sul vostro computer (in modo che siate già nella directory giusta) digitate `root masterclass.C`. Vi si aprirà una finestra, come mostrato nella figura a lato. Questa vi offre la possibilità di scegliere tra il modo "dimostrazione" (Demo), "studente" (Student) per l'analisi degli eventi ed il modo insegnante (Teacher) per la raccolta e la gestione dei risultati.

La demo fornisce esempi di decadimento delle particelle K_S^0 , Λ , anti- Λ e Ξ^- . La scelta dello "student mode" per l'analisi degli eventi e la ricerca visuale dei V0 apre una finestra così come mostrato nella figura seguente.

La colonna a sinistra offre un certo numero di opzioni cliccabili: istruzioni, navigazione dell'evento, ricerca di V0 e cascade, calcolatore, la possibilità di selezionare cosa viene mostrato (tracce, geometria del rivelatore, ecc.). In aggiunta trovate un'animazione dell'evento e l'"Encyclopedia", con una breve descrizione del rivelatore ALICE e delle sue principali componenti, nonché delle traiettorie del decadimento V0.

Il display dell'evento mostra tre panoramiche del rivelatore ALICE (vista 3-dimensionale, proiezione $r\phi$ e proiezione rz). Questa è una versione semplificata del vero display degli eventi utilizzato in ALICE. Potrete selezionare le informazioni mostrate per ogni evento. Cliccando nel box corrispondente, vedrete i cluster e le tracce dell'evento; se si clicca sul box per la ricerca di V0 (e cascade), i V0 (e i cascade), se esistono, vengono evidenziati. Una volta che un V0 viene trovato, il resto delle tracce e dei cluster dell'evento possono essere rimossi dal display in modo che solo le tracce associate al V0 siano mostrate. Il codice dei colori mostra in rosso le tracce positive provenienti dal V0, in verde le tracce negative ed in viola le tracce "bachelors" presenti nel caso di eventi cascade.





Cliccando sulla singola traccia appaiono, in un piccolo box (prossima figura sulla destra), i valori delle tre componenti della quantità di moto e la massa della particella associata alla traccia (quella considerata più probabile dall'algoritmo di identificazione). Tali informazioni possono essere copiate sulla calcolatrice, con la quale si può poi calcolare la massa invariante della particella madre, utilizzando la formula spiegata nella sezione precedente.

Calculator Instructions

Instructions

Particle type	Mass [GeV/c ²]
Electron	0.000511
Pion	0.139
Neutral Kaon	0.497
Proton	0.938
Lambda	1.115
Charged Xi	1.321

Calculator

	(-)	(+)	Bachelor
p _x	-2.2321	-0.829966	0
p _y	1.42188	0.592987	0
p _z	-0.85757	0.094862	0
mass	0.13957	0.13957	0

Invariant Mass

0.494622

Rapidity

0

That's a Kaon!

That's a Lambda!

That's an Anti-Lambda!

That's a Xi!

Load

Save

Close

(-) Particle

MomentumX: [GeV/c]

MomentumY: [GeV/c]

MomentumZ: [GeV/c]

Mass: [GeV/c²]

Copy to calculator

Close

(+) Particle

MomentumX: [GeV/c]

MomentumY: [GeV/c]

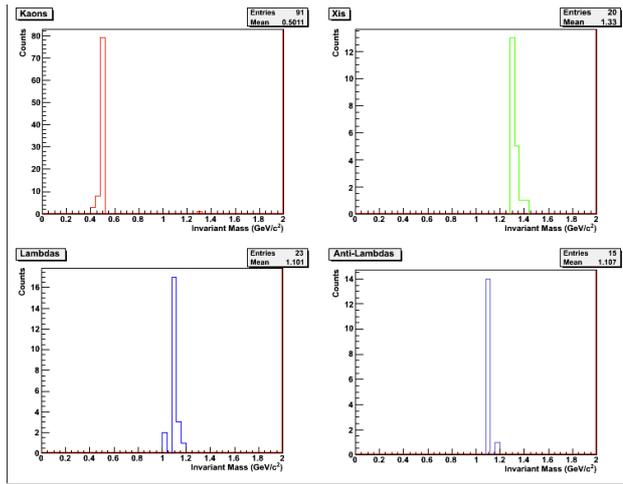
MomentumZ: [GeV/c]

Mass: [GeV/c²]

Copy to calculator

Close

Il programma include quattro istogrammi di massa invariante (per K_S^0 , Λ , anti- Λ e Ξ). Dopo aver ispezionato ogni decadimento $V0$ potrete identificare la particella madre dai prodotti di decadimento e dal valore della massa invariante (nella calcolatrice è presente una tavola di riferimento con i valori delle masse di alcune particelle, vedi figura). Premete quindi il tasto corrispondente (questo è un kaone; questa è una lambda, ecc...). In questo modo potrete aggiungere un conteggio all'istogramma corrispondente. Gli istogrammi di massa invariante possono essere mostrati cliccando sul tasto della massa invariante, al di sopra del display dell'evento. Per aggiornare il loro contenuto dovrete cliccare all'interno di ciascun istogramma.



Sono stati inclusi anche l'istogramma ed il calcolo della rapidità per studenti universitari e quindi al di là dello scopo di questi esercizi.

9. L'esercizio - L'analisi degli eventi e la ricerca degli adroni strani

La parte di analisi consiste nell'identificazione e nel conteggio delle particelle strane in un dato campione di eventi, tipicamente di 100 eventi. Quando incomincerete l'esercizio, dovrete andare al modo "studenti" e selezionare il campione di eventi che vorrete analizzare. Esistono 8 differenti campioni di eventi provenienti da dati di collisioni protone-protone con energie nel centro di massa di 900 GeV, acquisiti nel periodo novembre/dicembre 2009.

Nell'esaminare il display dell'evento, dovrete inizialmente cliccare sul vertice, sui cluster e sulle tracce; potrete osservare la complessità degli eventi e l'alto numero di tracce nel rivelatore prodotte nelle collisioni.

Cliccando su 'V0' e 'cascade' le tracce dai decadimenti $V0$ – se esistono - e dai decadimenti cascade – se esistono – appariranno evidenziate. Cliccando su ogni singola traccia si otterranno le varie informazioni – la carica, le tre componenti della quantità di moto e la massa della particella associata alla traccia (quella considerata più probabile dall' algoritmo di identificazione). Queste vengono estratte dalle informazioni fornite dai diversi rivelatori usati per l'identificazione di particelle. Dai prodotti di decadimento potrete già ipotizzare quale possa essere la particella madre; per confermarla, calcolerete la massa invariante come descritto nella sezione 7 e confronterete il valore ottenuto con i valori della tabella della calcolatrice.

Se la massa risulta essere di $497 \text{ MeV} \pm 13 \text{ MeV}$ (cioè se si trova nell'intervallo $[484, 510] \text{ MeV}$) sarà un kaone;

Se la massa risulta essere di $1115 \text{ MeV} \pm 5 \text{ MeV}$ (cioè se si trova nell'intervallo

[1110, 1120] MeV) e le particelle figlie sono un protone ed un pione negativo, allora si tratta di una lambda.

Se la massa risulta essere di $1115 \text{ MeV} \pm 5 \text{ MeV}$ (cioè se si trova nell'intervallo [1110, 1120] MeV) e le particelle figlie sono un antiprotone ed un pione positivo, allora si tratta di un'anti-lambda.

Per un decadimento cascade, se la massa calcolata dalle tre tracce è di $1321 \pm 10 \text{ MeV}$ (cioè se si trova nell'intervallo [1311, 1331] MeV) allora si tratta di un Ξ .

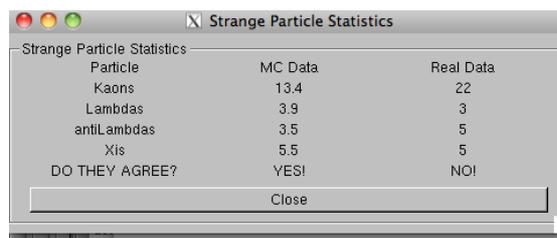
A seconda del risultato ottenuto, potrete cliccare sul tasto "It is a Kaon, Lambda etc". In tale modo il conteggio viene aggiunto al corrispondente istogramma di massa invariante.

Potrebbe accadere che la massa calcolata non corrisponda a nessuno dei valori descritti; questo è il "fondo": le tracce appaiono come provenienti da un vertice secondario ricostruito per errore. In questi esercizi trascureremo tali V0.

Non tutti i 100 eventi del campione contengono decadimenti V0 e cascade. In realtà, il campione contiene una più alta proporzione di particelle strane rispetto ai dati reali, altrimenti sarebbe stato molto più raro vederne qualcuno. Per i più rari Ξ ogni campione di 100 eventi è stato arricchito rispetto ai reali numeri misurati nell'analisi dati (vi è un fattore 10).

10. Presentazione dei risultati

La tabella 1 riassume i risultati. La colonna sulla destra contiene il numero di K_S^0 , Λ , anti- Λ e Ξ che è stato trovato (conteggiato premendo il tasto "This is a Kaon, Lambda etc"). La colonna sulla sinistra contiene il numero di K_S^0 , Λ , anti- Λ e Ξ corrispondente a 100 eventi (in questo caso relativamente ad interazioni protone-protone a 900 GeV) come nei generatori Monte Carlo (ad esempio Pythia). Questi "numeri Monte Carlo" sono predetti da modelli teorici che non considerano la formazione di QGP; quando un fattore d'arricchimento viene usato per una particolare specie di particelle in un campione di dati, questo viene tenuto in considerazione per i calcoli dei "numeri Monte Carlo".

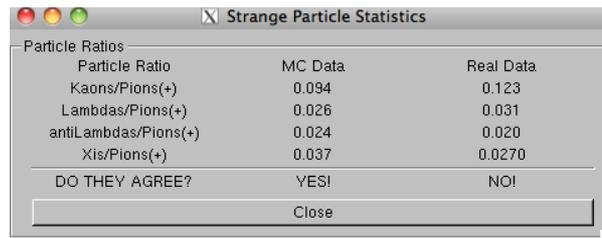


Particle	MC Data	Real Data
Kaons	13.4	22
Lambdas	3.9	3
antiLambdas	3.5	5
Xis	5.5	5
DO THEY AGREE?	YES!	NO!

Potete anche vedere gli istogrammi per la massa invariante e controllare il numero di conteggi per ogni tipo di particella. Quando avrete analizzato tutti gli eventi del campione di dati, salvate i risultati su un file seguendo le istruzioni all'interno del programma di analisi.

Nella tabella 2 il numero di ogni specie di particella strana (trovata in un campione di 100 eventi) è diviso per il numero medio di pioni corrispondente a 100 eventi. In questo caso, $\langle \text{numero di pioni} \rangle = 148$, per 100 eventi di collisioni protone-protone a 900 GeV. Questi rapporti tra i numeri di particelle con e senza stranezza vengono confrontati con i rapporti teorici, dove non è previsto aumento di stranezza.

Si potrà così stabilire se l'aumento di stranezza è stato effettivamente osservato.



Particle Ratios		
Particle Ratio	MC Data	Real Data
Kaons/Pions(+)	0.094	0.123
Lambdas/Pions(+)	0.026	0.031
antiLambdas/Pions(+)	0.024	0.020
Xis/Pions(+)	0.037	0.0270
DO THEY AGREE?	YESI	NOI
Close		

11. Raccolta di tutti i risultati

Selezionando l'opzione "Teacher" nel menu iniziale MasterClass, potrete salvare tutti i risultati. Sotto "Teacher Controls" potrete selezionare l'opzione Get Files e prendere, in una sola volta, i file con i risultati dell'analisi provenienti da ogni singolo campione di dati. Ovviamente, come prima cosa, dovrete trasferire i file con i risultati al computer "Teacher"! Di seguito, sotto "Results", potrete guardare la tabella 1 usando la statistica completa, e la tabella 2, trovando i rapporti di particelle strane/non-strane, esattamente come nella sezione precedente.

12. Discussione

L'analisi degli eventi protone-protone a 900 GeV mostra che il rapporto è leggermente aumentato, ma non sufficientemente da concludere che si sia creato il plasma di quark e gluoni (QGP). Il passo successivo è ripetere tali misure per eventi protone-protone ad alta molteplicità e, finalmente, per eventi piombo-piombo. A questo punto il rapporto di particelle strane/non-strane potrebbe aumentare, probabilmente, di un fattore 2.

Campioni di eventi provenienti da collisioni protone-protone a 7 TeV, raccolti tra il 30 marzo ed il 4 novembre 2010, verranno creati in futuro, una volta che i dati saranno analizzati e compresi pienamente; lo stesso vale per i dati registrati recentemente nelle collisioni piombo-piombo all'energia di 2.76 TeV per coppia di nucleoni (primo run LHC per ioni pesanti, 7 novembre – 6 dicembre 2010). A questo punto l'esercizio potrà cercare realmente il plasma di quark e gluoni basandosi sulla misura dell'aumento di stranezza.