

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO ALICE PARA LA FÍSICA DE RAYOS CÓSMICOS[†]

RESULTS OF ALICE EXPERIMENT FOR THE COSMIC RAY PHYSICS

MARTIN A. SUBIETA VASQUEZ

Dipartimento di Fisica Università di Torino e INFN, Italia

Instituto de Investigaciones Físicas

Universidad Mayor de San Andrés

c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario. Casilla 8635

La Paz, Bolivia

(Recibido 11 de Marzo de 2014; aceptado 21 de Abril de 2014)

RESUMEN

Durante el verano de 2009 e invierno de 2010 se registró un gran número de eventos de muones atmosféricos, dicho registro se utilizó para la calibración, alineamiento y puesta en marcha de la mayoría de los detectores del experimento ALICE (A Large Hadron Collider Experiment) localizado en el CERN (Ginebra, Suiza). En este artículo se presenta el análisis de una parte de estos datos con el fin de estudiar, por un lado, el desempeño del aparato experimental y, por otro lado, el estudio de las mediciones realizadas que están conectadas con la física de rayos cósmicos. Se presentan los resultados de las mediciones preliminares de la razón μ^+/μ^- para muones atmosféricos casi verticales (ángulo cenital entre 0° y 20°) registrados por los detectores centrales de ALICE, y para muones casi horizontales (ángulo cenital entre 70° y 85°) registrados por el espectrómetro de muones de ALICE. Finalmente, se realiza una comparación entre los resultados hallados y los datos de experimentos pasados.

Código(s) PACS: 14.60.Ef — 95.55.Vj

Descriptores: Muones — Detectores de partículas elementales y rayos cósmicos.

ABSTRACT

A large number of events of atmospheric muons was registered and used to calibrate, align and set to work several of the ALICE (A Large Hadron Collider Experiment) experiment detectors located at CERN (Geneve, Switzerland). In this article we present the analysis of a part of these data aimed at studying the performance of the experimental apparatus and also at studying the measurements connected with the cosmic ray physics. We present the results of preliminary measurements of the μ^+/μ^- ratio for quasi-vertical atmospheric muons (zenital angle between 0° and 20°) registered by the central detectors of ALICE and for quasi-horizontal muons (zenital angle between 70° and 85°) registered by the muon spectrometer of ALICE. Finally, we compare these results with the data of previous experiments.

Subject headings: Muons — Elementary particle and cosmic ray detectors.

1. INTRODUCCIÓN

ALICE es uno de los cuatro experimentos del LHC (Large Hadron Collider) localizado en el CERN, Ginebra, Suiza. ALICE está principalmente dedicado al estudio de una nueva fase de la materia conocida como QGP (Quark Gluon Plasma), el cual es creado en colisiones de iones pesados a energías de $\sqrt{s} = 14$ TeV. No obstante que sea éste el principal objetivo de ALICE, el experimento es capaz de detectar también muones atmosféricos producidos a grandes altitudes de la atmósfera terrestre, por el decaimiento de mesones (π^\pm, K^\pm), los cuales a su vez son producidos por colisiones de partículas muy

energéticas con los átomos de la atmósfera. Dichas partículas provienen del espacio exterior, y son conocidas como rayos cósmicos. Las sorprendentes capacidades de los detectores de ALICE hacen posible que se realicen mediciones con alta precisión. Como ALICE está localizado a 40 metros bajo tierra con ~ 30 metros de roca, solamente muones muy energéticos ($E_\mu > 15$) GeV pueden alcanzar los detectores de ALICE. En este sentido los detectores centrales han sido empleados para el estudio de los así llamados *muones casi-verticales*, y éstos son: ACORDE (Alice COsmic Ray Detector), TOF (Time Of Flight), TPC (Time Projection Chamber) and SPD (Silicon Pixel Detector). Además ha sido también empleado el espectrómetro de muones Forward Muon Spectrometer (FMS) para detectar los así llamados *muones casi-horizontales*.

[†]Presentado en Epiphany 2011, conferencia desarrollada en Cracovia, Polonia

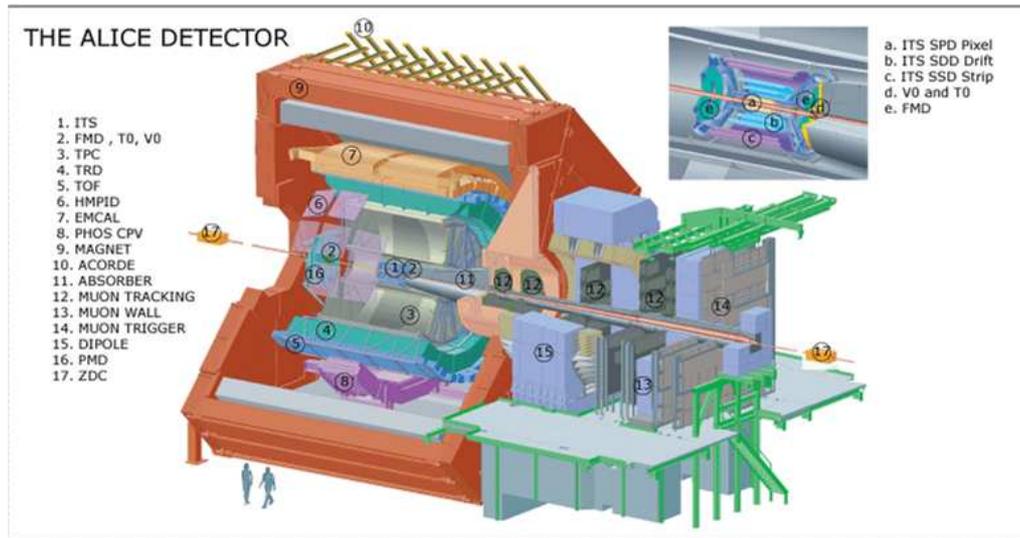


FIG. 1.— El experimento ALICE.

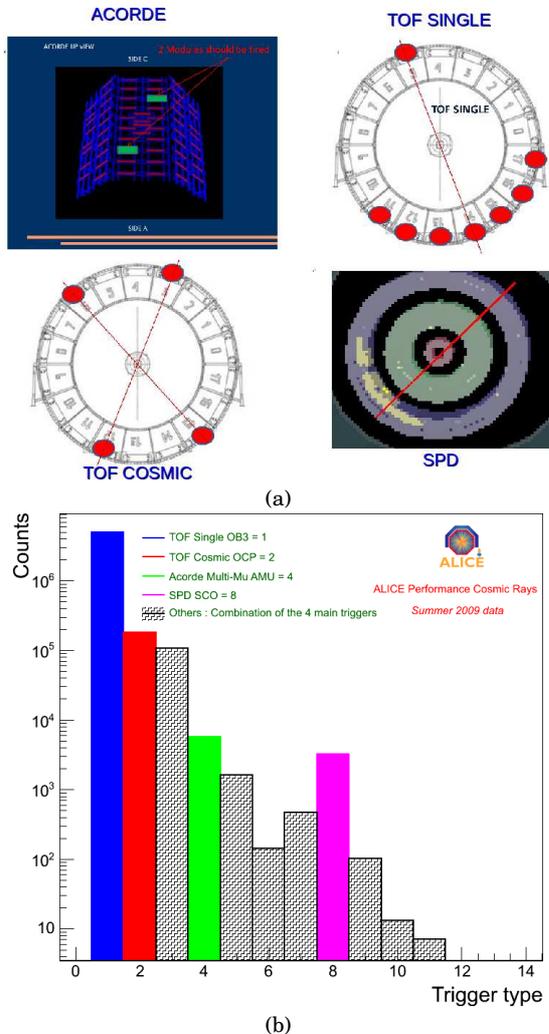


FIG. 2.— Vista esquemática de los cuatro triggers implementados (a). Distribución del sistema de trigger implementado y combinaciones de éste TOF SINGLE azul, TOF COSMIC en rojo, ACORDE en verde y SPD en violeta (b).

2. SISTEMA DE TRIGGER (DISPARO) DE LOS DETECTORES CENTRALES USADO PARA LOS MUONES ATMOSFÉRICOS

Triggers específicos han sido implementados para detectar los muones atmosféricos, los cuales atraviesan los detectores centrales de ALICE (véase Fig. 1). Para éste propósito, tres detectores han sido considerados: ACORDE, TOF y SPD.

ACORDE tiene 60 centelladores plásticos localizados encima del magneto de ALICE. El trigger es dado por una doble coincidencia (dos centelladores) llamada ACORDE MULTIMU (AMU) (véase Fig. 2(a)).

TOF con una geometría cilíndrica que rodea completamente la TPC, esta compuesto por un arreglo de MRPC (Multi Resistive Plate Chambers). Dos tipos de triggers fueron implementados. El primero fue llamado TOF SINGLE (OB3), el cual requería al menos un pad activado (por un muón atravesando el TOF) en la parte superior del detector y otro pad en la parte inferior o cualquiera de los tres pads más próximos, en ambos casos. En la Fig. 2(a) se muestra la idea del trigger implementado. El segundo trigger llamado TOF COSMIC (OCP) fue dado por la coincidencia de cuatro pads independientemente de su posición en el arreglo (véase Fig. 2(a)).

SPD está conformado por dos capas de módulos de silicio localizados muy cerca del punto de interacción del aparato. El trigger para muones atmosféricos fue dado por la coincidencia de dos módulos en la parte opuesta de la mitad de la capa más externa del detector (véase Fig. 2(a)).

En la figura Fig. 2(b) se muestra la distribución del sistema de trigger utilizado en la muestra de datos que corresponden a eventos de muones atmosféricos registrados durante el verano del 2009.

La mayoría de los eventos ha sido proporcionado por el trigger TOF SINGLE (OB3), mientras que TOF COSMIC (OCP) hace una selección de eventos con alta multiplicidad pero el rate de eventos es más bajo que OB3 por un factor casi 20. ACORDE MULTIMU ha tenido un rate muy bajo por que requería

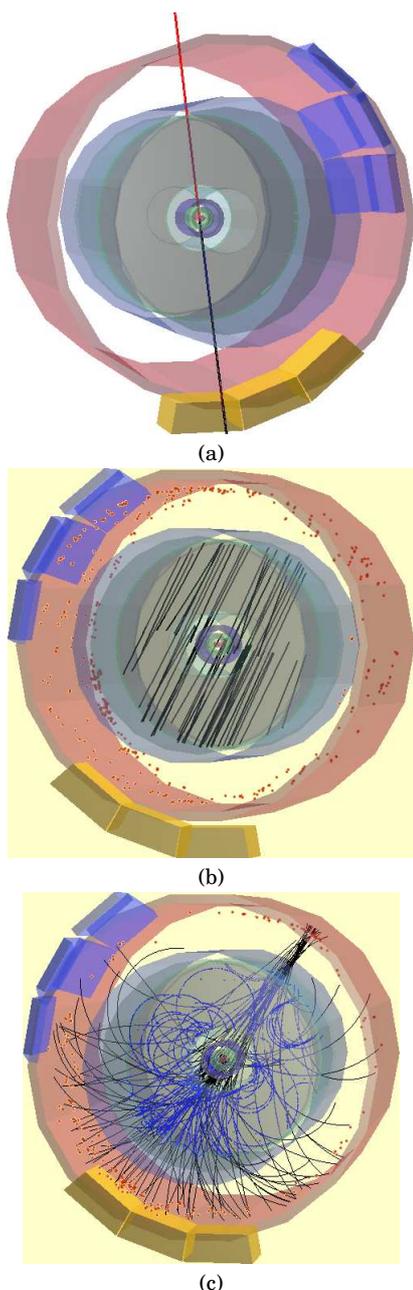


FIG. 3.— Un solo muón atravesando la TPC (a), Ejemplo de un evento de alta multiplicidad (b) y ejemplo de un evento de interacción del muón con el material circundante (c).

una coincidencia de al menos dos centelladores mientras que el SPD también muestra un rate bajo debido al área reducida del detector.

3. MUONES ATMOSFÉRICOS REGISTRADOS POR LA TPC

Los muones atmosféricos normalmente atraviesan toda la TPC, desde la parte superior hasta la inferior. El método estándar utilizado para reconstruir las trayectorias de los muones (tracks), que en principio fue optimizado para reconstruir partículas producidas en las colisiones p-p, Pb-Pb, usando dos tracks por trayectoria, una superior (track up) y otra inferior (track down) considerando un semi-cilindro en ambos casos. La idea central se muestra en la

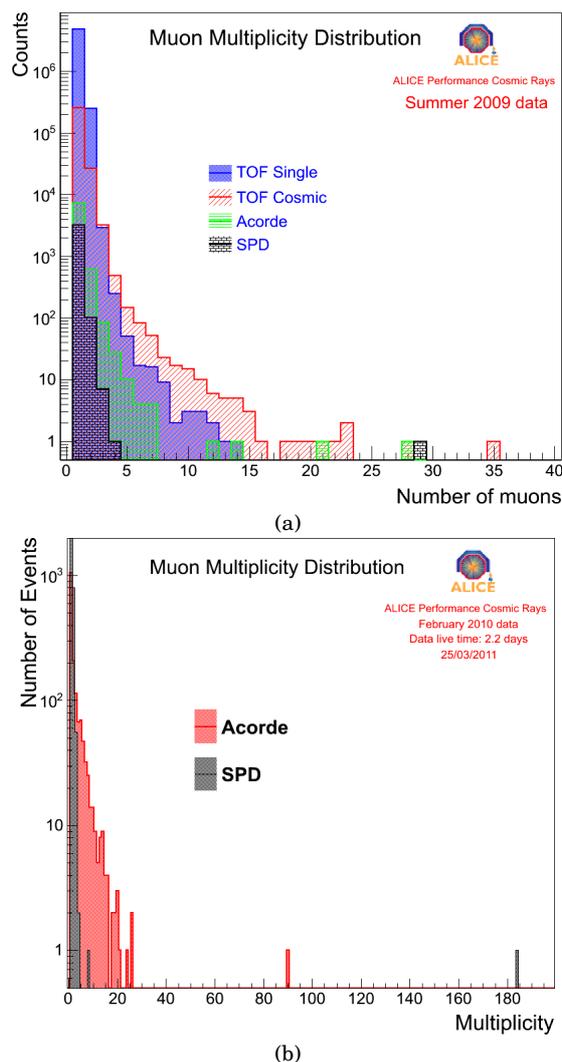


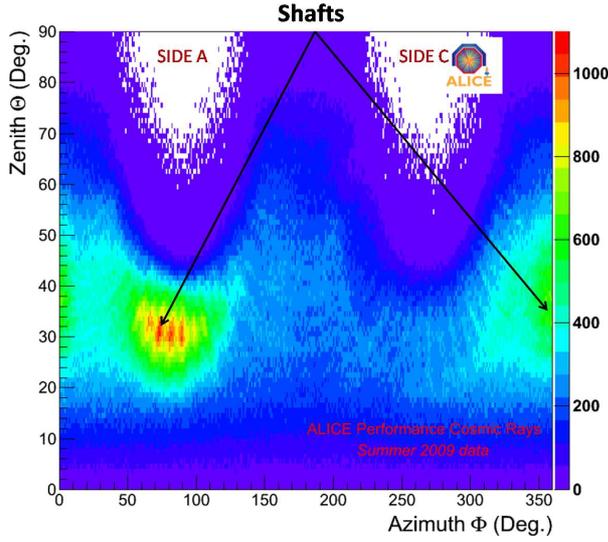
FIG. 4.— Distribución de la multiplicidad de muones: para los datos del 2009 (4 triggers usados) (a), para los datos de febrero del 2010 (2 triggers usados) (b).

Fig. 3(a). A cada track es asociado un momento, es decir (P_{up} and P_{down}) respectivamente.

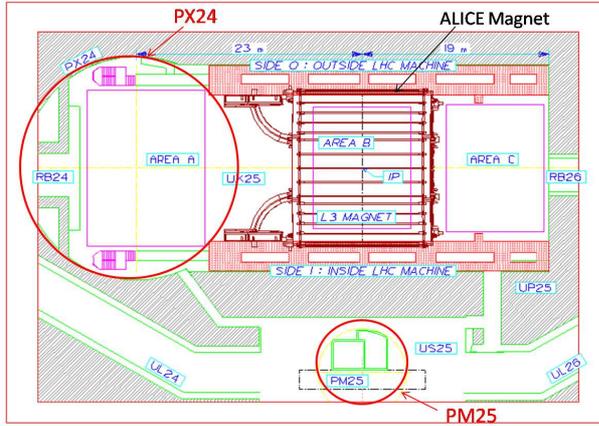
Con el fin de obtener el entero track del muón, y contar el exácto número de estos, especialmente en eventos con alta multiplicidad, ha sido implementado un algoritmo especial para unir ambos tracks (up y down) correspondiente a cada track del muón atmosférico.

Además aplicando nuestro algoritmo fuimos capaces de distinguir entre eventos de alta multiplicidad (véase Fig. 3(b)) con los de interacción del muón, los cuales pueden ser producidos cuando un muón muy energético interactúa con el magneto de hierro y produce un chubasco de partículas que atraviesan la TPC como se muestra en la Fig. 3(c).

Como el método estándar media el momento P_{up} and P_{down} de las partículas separadamente asociada a cada track (up-down), fue desarrollado un nuevo método para el caso de los muones atmosféricos. Éste calculaba el momento del muón tomando en cuenta todo el track es decir (up+down). Para ello se desarrollaron también simulaciones MC para estudiar



(a)



(b)

FIG. 5.— Ángulos zenital vs azimutal de muones llegando en ALICE (a). La estructura de los shafts de ALICE se hacen visibles en correspondencia al número de muones y sus direcciones (b).

y mejorar éste nuevo método, obteniéndose así una resolución en momento de $\sim 30\% - 35\%$ a $100 \text{ GeV}/c$.

4. ANÁLISIS DE LOS DATOS CON LOS DETECTORES CENTRALES

La muestra de datos registrados durante el verano de 2009 correspondía a 2.5 días de tiempo efectivo, con más de 5 millones de eventos de muones atmosféricos, mientras que los datos de febrero del 2010 correspondían solo a 25000 eventos registrados en 2 días de tiempo efectivo. La diferencia se debió a la ausencia del detector TOF en el sistema de trigger usado en 2010. En las siguientes secciones se muestra solo el análisis de los datos de eventos estándar es decir (eventos de un solo muón o eventos de alta multiplicidad), descartándose así los eventos de interacción.

4.1. Multiplicidad de los muones y su distribución angular

Adoptando el nuevo algoritmo de reconstrucción y el criterio de trigger previamente explicado, se hizo el estudio de la muestra de datos. La distribución de la multiplicidad de muones para los diferentes tipos de trigger de los datos de 2009 se muestra en la Fig. 4(a) mientras que para los datos de 2010 se muestra en la Fig. 4(b). Hemos comparado las distribuciones obtenidas con las simulaciones suponiendo una composición del rayo cósmico primario de solo protones o hierro, correspondientes a 30 días de toma de datos, con el fin de estudiar la correspondencia entre los datos experimentales y los simulados. Para las simulaciones se usó Corsika con el modelo de interacción hadrónica conocido como QGSJET2. Sorpresivamente se encontraron dos eventos de muy alta multiplicidad con los datos de 2010, los cuales resultan muy difícil de explicar con los actuales modelos de interacción hadrónica que se tienen. En uno de los eventos se cuentan (usando nuestro algoritmo) 89 muones con una densidad de $\sim 6\mu/m^2$ y en otro evento se contaron 182 muones con una densidad de $\sim 12\mu/m^2$. Hemos estimado que ambos eventos han debido ser generados por un primario con una energía más grande de 10^{16} eV . La probabilidad de detectar eventos de alta multiplicidad en 5 días de toma de datos es muy baja, especialmente para eventos con más de 100 muones, el cual se estimó en un evento por tres días de toma de datos.

La distribución de los ángulos zenital vs azimutal de los muones seleccionados con el trigger TOF SINGLE (OB3) se muestra en la Fig. 5(a). La correlación de éstos dos ángulos muestra un incremento en el número de muones en la dirección correspondiente a los dos shafts PX24 y PM25 de ALICE localizados cerca del aparato experimental los cuales se muestran en la Fig. 5(b). La pérdida de energía de los muones atravesando toda la roca encima de ALICE es $\sim 15 - 16 \text{ GeV}$ y disminuye cuando los muones pasan a través de los shafts, incrementándose así el número de muones en esas direcciones (las regiones verde, amarillo y rojo en la figura). Considerando que los muones con ángulo zenital en el rango $0^\circ - 20^\circ$ (*muones casi-verticales*) no son afectados por los shafts, por lo cual son tomados en cuenta para la medida de la razón μ^+/μ^- .

4.2. Medida de la razón μ^+/μ^- para muones casi-verticales

Se toma en cuenta la muestra de datos obtenida para los (*muones casi-verticales*) con el trigger TOF SINGLE y seleccionando eventos con solo dos tracks en la TPC y por tanto un solo muón reconstruido. Se pudo deducir de Fig 6, en la cual se grafica la distribución del momento de los muones *no corregida* para μ^+ and μ^- al nivel de ALICE hasta $P = 200 \text{ GeV}/c$, lo cual nos da un muestra de eventos limpia en la cual no se observaron anomalías.

Por lo tanto, estudiamos la razón $R_\mu = \frac{N_{\mu^+}}{N_{\mu^-}}$ en

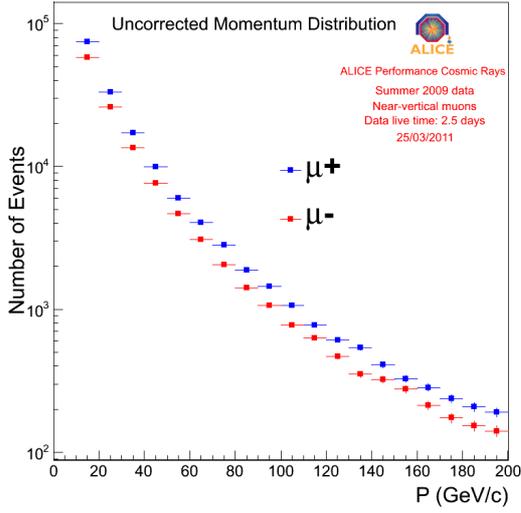
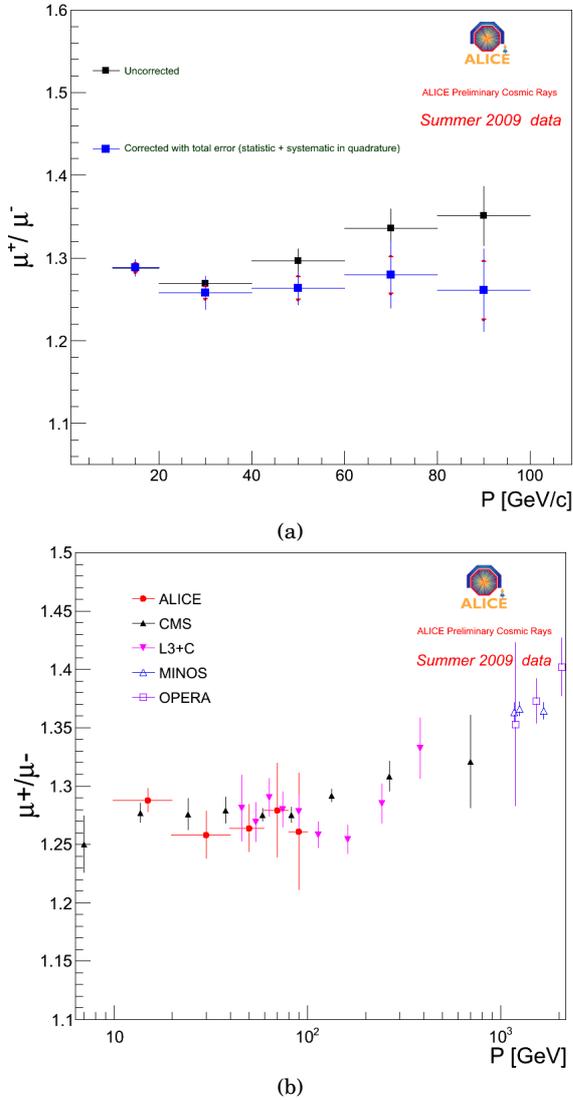
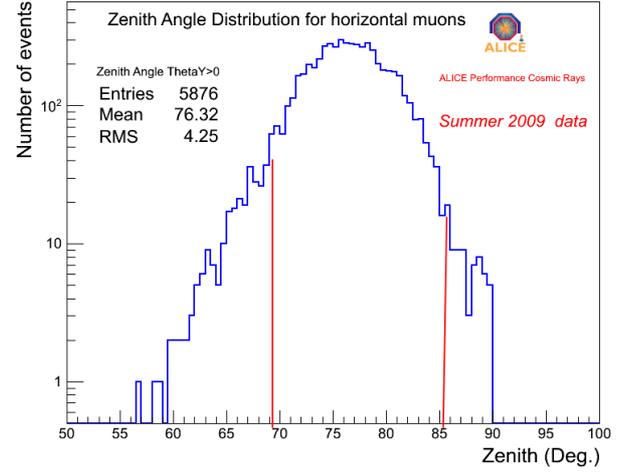

 FIG. 6.— Distribución de momento no corregido para μ^+ and μ^- .

 FIG. 7.— Comparación de la razón μ^+/μ^- corregido con la no corregida, en función del momento, tomando en cuenta los errores estadísticos y experimentales (a). Comparación de la razón μ^+/μ^- con otros experimentos (b).


FIG. 8.— Distribución del ángulo zenital para muones casi horizontales

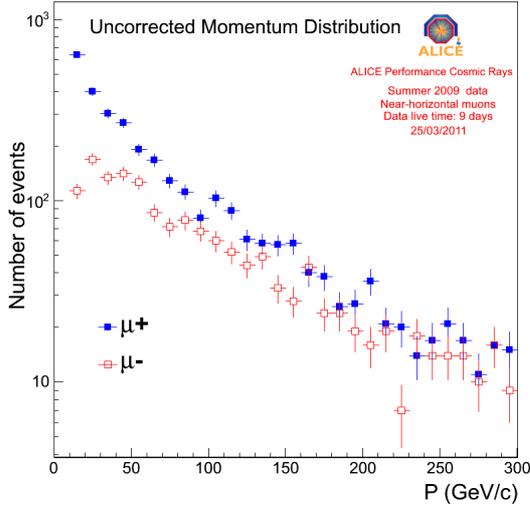
el rango de momento $10 < P < 100$ GeV/c a nivel de ALICE. Se han seleccionado muones con $P > 10$ GeV/c con el fin de eliminar efectos de borde de la roca encima de ALICE, y grandes diferencias en las eficiencias entre μ^\pm a bajo momento debido a la gran curvatura de los tracks provocado por el campo magnético. Limitamos la medida experimental hasta $P = 100$ GeV/c porque la resolución encontrada con este valor del momento es razonable ($\sim 30\% - 35\%$). En la figura Fig 7(a) se muestra la razón corregida¹ comparada con la no corregida. El valor de la razón μ^+/μ^- corregida incluyendo los errores estadísticos y sistemáticos por cada bin, en el intervalo $10 < P < 100$ es $R_\mu = 1.275 \pm 0.006(stat.) \pm 0.01(syst.)$.

Uno de los resultados más significativos fue obtenido por la colaboración L3+C la cual publicó el valor de la razón μ^+/μ^- $1.285 \pm 0.003(stat.) \pm 0.019(syst.)$ (Archad *et al.* 2004), una medida más reciente y precisa de μ^+/μ^- fue reportada por la colaboración CMS (Compact Muon Solenoid), publicando un valor de la razón de carga μ^+/μ^- de $1.2766 \pm 0.0032(stat.) \pm 0.0032(syst.)$ considerando $P < 100$ GeV/c (CMS-Collaboration 2010). En la figura Fig 7(b) se muestran nuestros resultados comparados con los de los otros dos experimentos L3+C y CMS, en la cual se puede ver el buen acuerdo de nuestros resultados con los otros dos citados en la región del momento $P < 100$ GeV/c.

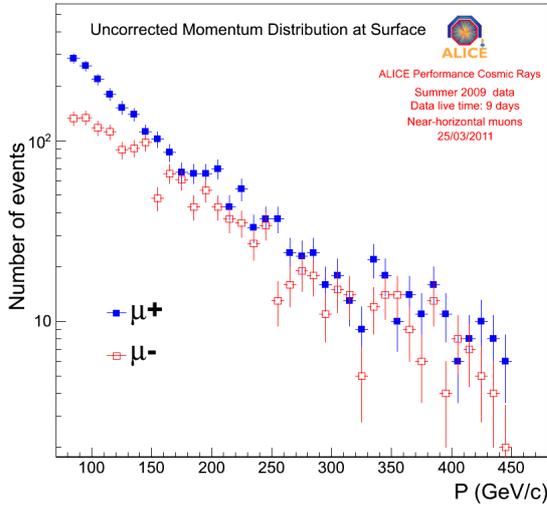
5. MUONES CASI-HORIZONTALES DETECTADOS POR EL FORWARD MUON SPECTROMETER (FMS) DE ALICE

El FMS consiste en 5 cámaras de tracking (2 para el trigger) y un dipolo magnético (véase Fig. 1). Aunque este fue diseñado para detectar específicamente muones producidos en colisiones en el LHC, es también posible detectar los muones atmosféricos con gran ángulo zenital, y por consiguiente estudiarlos. Cerca a 9 días de datos han sido

¹ La corrección del valor de la razón μ^+/μ^- , fue obtenida por estudios detallados basados en simulaciones MC, con el fin de estimar los efectos de la migración de las entradas en los diferentes bins debido a la resolución del momento y a la eficiencia del aparato experimental en la detección de μ^\pm .



(a)



(b)

FIG. 9.— Distribución de momento no corregido para μ^+ and μ^- hasta $P = 400$ GeV/c al nivel de ALICE (a) y al nivel de la superficie (b).

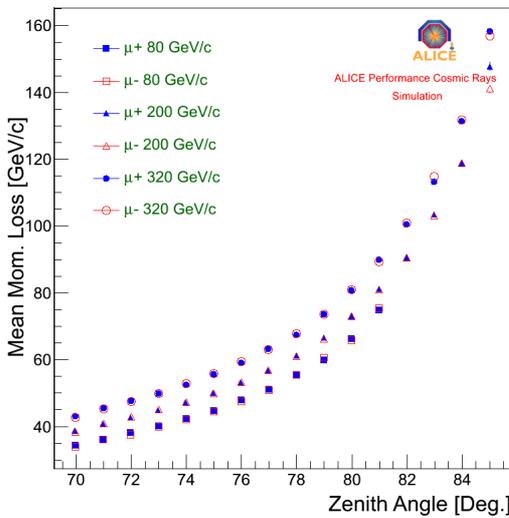
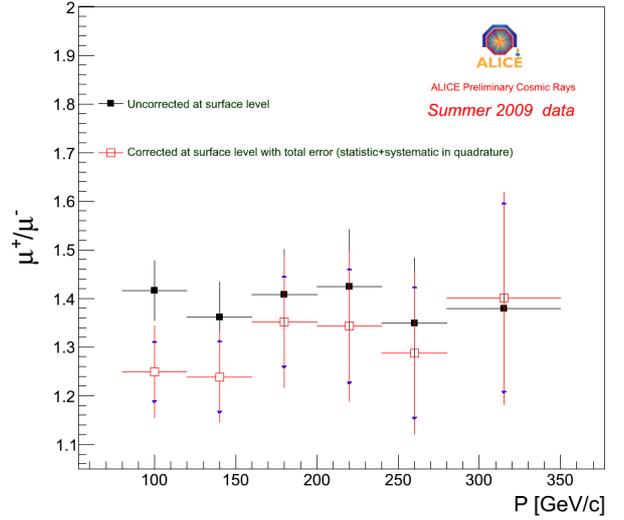
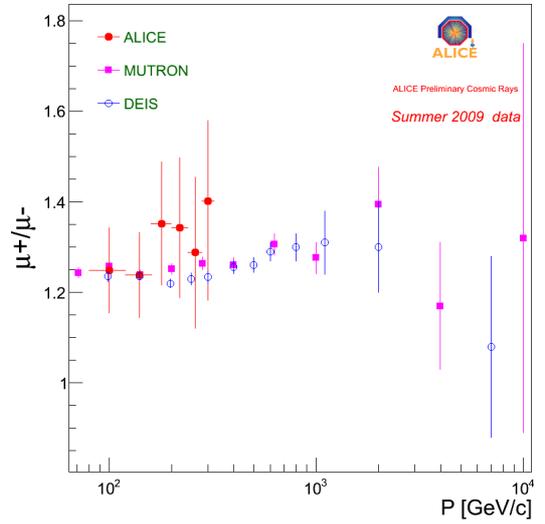


FIG. 10.— Momento perdido medio en función del ángulo zenital para tres valores fijos de la energía.



(a)



(b)

FIG. 11.— Razón μ^+/μ^- corregida en función del momento con los errores sistemáticos y estadísticos, comparado con el no corregido (a). Comparación de nuestros resultados con otros experimentos: MUTRON y DEIS (b).

recolectados durante el verano europeo del 2009, sumando así un total de poco más de 8000 eventos. Seleccionando de este modo solo los muones que atraviesan el FMS en la dirección de los detectores centrales de ALICE hacia las cámaras que dan el trigger del FMS (el mismo trigger utilizado para el caso de colisiones), la muestra se reduce a 5876 eventos los cuales tienen una distribución angular que se muestra en la figura Fig. 8. El análisis se realiza con muones de ángulos zenitales entre 70° y 85° .

5.1. Medida de la razón μ^+/μ^- para muones casi-horizontales

La distribución de momento no corregida para μ^\pm al nivel de ALICE para la muestra de datos seleccionados se muestra en la figura Fig. 9(a). Los muones con bajo momento ($P < 10$ GeV/c), son fuertemente afectados por la combinación de los campos magnéticos del L3 (circundando los detectores centrales) y por el dipolo magnético del FMS, provo-

cando una gran diferencia en la aceptancia y eficiencia entre μ^\pm . Haciendo un corte en $P > 10$ GeV/c asegura una mejor simetría entre las dos partículas cargadas.

La distribución de momento en la superficie ha sido obtenida calculando la pérdida de energía² de los muones en la roca con estudios detallados de Monte Carlo MC. En la figura Fig. 10 se muestra el momento medio perdido por los muones para μ^\pm para tres valores fijos de la energía que está dada en función del ángulo zenital. La distribución de momento no corregido para μ^\pm al nivel de la superficie después de incluir la pérdida de momento se muestra en la figura Fig. 9(b).

Como la estadística de los muones horizontales es baja, la medida de la razón R_μ se realizó en el rango de momento $80 < P < 320$ GeV/c con bins de momento $\Delta P = 40$ GeV/c. El límite más bajo ha sido elegido para evitar grandes asimetrías entre μ^\pm , mientras que el límite superior se estableció debido a que se tiene una resolución³ del momento razonable, reduciéndose así los efectos de un posible mal alineado de las cámaras de tracking del FMS.

La razón no corregida R_μ en función al momento el nivel de la superficie se muestra en la figura Fig. 11(a) comparado con la razón corregida⁴, tomando en cuenta los errores estadísticos y sistemáticos.

El valor encontrado para R_μ en todo el rango de momento $80 < P < 320$ GeV/c es: $R_\mu = 1.27 \pm 0.04(stat.) \pm 0.1(syst.)$. Los errores sistemáticos

grandes son debido principalmente a la incertidumbre en la estimación del alineado de las cámaras del detector.

En los resultados de los experimentos MUTRON y DEIS, se dedicaron a la medida de la razón de la carga para muones casi-horizontales como se muestra en la figura Fig 11(b) comparada con nuestros resultados. El valor reportado por MUTRON en la región del momento $100 < P < 600$ fue $R_\mu = 1.251 \pm 0.005(stat.)$ (Matsuno *et al.* 1984).

6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La medida de la razón R_μ desarrollada con los detectores centrales del experimento ALICE para muones casi-verticales y para los muones casi-horizontales con el detector FMS de ALICE están de acuerdo con las previas medidas realizadas por los experimentos CMS y L3+C para el primer caso y MUTRON, DEIS para el segundo. Nuestras mediadas experimentales son preliminares porque: primero, nuestra estadística es baja comparada con los otros experimentos, segundo, los datos han sido tomados durante el período de calibración del aparato experimental y finalmente, los datos han sido tomados siempre con la misma polaridad de los dos campos magnéticos. Pese a que todas estas mejoras pueden ser realizadas en el futuro, con este trabajo se demostró que mediciones precisas en la física de rayos cósmicos puede ser desarrollada con el experimento ALICE.

REFERENCIAS

Archad P. *et al.* (2004), *Phys. Lett.* **B598**, 15
CMS-Collaboration (2010)

Matsuno S. *et al.* (1984), *Phys. Rev. Lett.* **29**, 1

² El momento perdido medio es obtenido como el valor más probable de la distribución de Landau ajustada a los datos MC

³ Mediante estudios MC se encontró una resolución del momento $\sim 22\%$ a 200 GeV/c medido al nivel de ALICE

⁴ Tres correcciones han sido consideradas: la migración de los

valores del momento en los bins debido a la resolución del momento, la confusión en la asignación de la carga al muón por el aparato y la eficiencia en la detección de μ^\pm en función del ángulo zenital