REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA **28s**, 16–21, 2016
ISSN 1562–3823. INDEXADA EN: SCIELO, LATINDEX, PERIÓDICA

MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE LOS NEUTRINOS DEL FLUJO CNGS CON EL DETECTOR DE GRAN VOLUMEN*

MEASUREMENT OF THE VELOCITY OF NEUTRINOS FROM THE CNGS BEAM WITH THE LARGE VOLUME DETECTOR

N. YU. AGAFONOVA[1], M. AGLIETTA[2], P. ANTONIOLI[3], V. V. ASHIKHMIN[1], G. BARI[3], R. BERTONI[2], E. BRESSAN[4,5], G. BRUNO[6], V. L. DADYKIN[1], W. FULGIONE[2], P. GALEOTTI[7,2], M. GARBINI[3], P. L. GHIA[8], P. GIUSTI[3], E. KEMP[9], A. S. MALGIN[1], B. MIGUEZ[9,6], A. MOLINARIO[2], R. PERSIANI[3,4], I. A. PLESS[10], V. G. RYASNY[1], O. G. RYAZHSKAYA[1], O. SAAVEDRA[7,2], G. SARTORELLI[3,4], I. R. SHAKYRIANOVA[1], M. SELVI[3], G. C. TRINCHERO[2], C. VIGORITO[7,21], V. F. YAKUSHEV[1], A. ZICHICHI[3,4,5,11], A. RAZETO[6]

(La colaboración LVD)

[1]Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia
[2]INFN-Torino, OATO-Torino, 10100 Torino, Italy
[3]INFN-Bologna, 40126 Bologna, Italy
[4]University of Bologna, 40126 Bologna, Italy
[5]Centro Enrico Fermi, 00184 Roma, Italy
[6]INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 67100 Assergi LAquila, Italy
[7]University of Torino, 10125 Torino, Italy
[8]Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies (LPNHE), Universités Paris 6 et Paris 7, CNRS-IN2P3, Paris, France
[9]University of Campinas, 13083-859 Campinas, SP, Brazil
[10]Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139-4307, USA &
[11]CERN, Geneva, Switzerland

RESUMEN

Se reporta la medida del tiempo de vuelo de ν_μ de $\sim$ 17 GeV en la línea base del CNGS (732 km) con el Detector de Gran Volumen (LVD) (por su sigla en ingés). El acelerador CERN-SPS ha sido maniobrado desde el 10 de mayo de 2012, con una estructura de haz fuertemente agrupado para permitir que la velocidad de los neutrinos sea medida cuidadosamente evento por evento. LVD ha detectado 48 eventos de neutrinos, asociados al haz, con una alta y absoluta precisión de tiempo. Estos eventos permiten establecer el siguiente límite en la diferencia de velocidad entre los neutrinos y la luz: $-3.8 \times 10^6 < (v_\nu c)/c < 3.1 \times 10^6$ (al 99% C.L.). Esta velocidad es un orden de magnitud menor que la medida directa previa.

ABSTRACT

We report the measurement of the time-of-flight of $\sim$ 17 GeV ν_μ on the CNGS baseline (732 km) with the Large Volume Detector (LVD) at the Gran Sasso Laboratory. The CERN-SPS accelerator has been operated from May 10th to May 24th 2012, with a tightly bunched-beam structure to allow the velocity of neutrinos to be accurately measured on an event-by-event basis. LVD has detected 48 neutrino events, associated to the beam, with a high absolute time accuracy. These events allow to establish the following limit on the difference between the neutrino speed and the light velocity: $-3.8 \times 10^6 < (v_\nu c)/c < 3.1 \times 10^6$ (at 99% C.L.). This value is an order of magnitude lower than previous direct measurements.

1. INTRODUCCIÓN

Las mediciones cosmológicas (26) proporcionan límites estrictos a la suma de masas de los neutrinos. Incluso suponiendo que el más pesado de los estados propios de los neutrinos, la desviación relativa esperada respecto de la velocidad de la luz es inferior a 10^{-20} para neutrinos $\approx$ 10 GeV. Sin embargo, en el pasado se plantearon teorías permitiendo que algunos o todos los neutrinos tengan velocidades aparentes que son diferentes de la velocidad de la luz, c, (ver por ejemplo (24)). Un límite estricto en E $\approx$ 10 MeV, $|v_\nu - c|/c < 2 \times 10^{-9}$, se ha obtenido a partir de la observación de antineutrinos electrónicos de la SN1987A (18; 14; 8; 20). A mayores energías (E $>$ 30 GeV), la desviación ha sido probada hasta $|v_\nu - c|/c < 4 \times 10^{-5}$ (19; 9). La colaboración MINOS (2) ha realizado una medición del tiempo de vuelo (TOF) de los neutrinos sobre una línea de base $\approx$ 735 km, con un haz de energía media $< E >= 3$ GeV. El resultado MINOS es de $(v_\nu - c)/c = (5.1 \pm 2.9) \times 10^{-5}$ a 68% C.L. Recientemente la colaboración OPERA ha informado (Adam et al.) de un TOF para la medición de neutrinos muónicos de la línea CNGS (el haz

*Traducción autorizada de "Measurement of the velocity of neutrinos from the CNGS beam with the Large Volume Detector", N. Yu. Agafonova et al., *Physical Review Letters* **109** (2012) 070801.

de neutrinos CERN - Gran Sasso). La evidencia reportada de una propagación de ν_μ superlumínicos posteriormente fue atribuida a un problema técnico (27; 28; 5; 22). Esta explicación también fue confirmada por los resultados de otro experimento en el Laboratorio Nacional Gran Sasso (10).

El detector de gran volumen (LVD) del INFN en el Laboratorio Nacional Gran Sasso (LNGS), tiene una profundidad media de 3600 m.e.a. El LVD es un detector con 1 $kton$ de centellador líquido, cuyo propósito principal es el monitoreo de la galaxia para estudiar explosiones de neutrinos provenientes de colapsos gravitacionales estelares (6). El LVD comenzó a funcionar en 1992, y desde 2006 funciona también monitor lejano del haz CNGS (7; 3). El LVD es sensible a las interacciones de neutrinos con protones y núcleos de carbono en el contador de centelleo líquido y con el hierro de la estructura del detector. Los muones, que se producen por interacciones de corriente cargada de los neutrinos muónicos en la roca, y son responsables de la mayor parte de los eventos CNGS detectados en el LVD. Aquí presentamos una medición de la velocidad de los neutrinos obtenida a través de la detección de ν_μ del haz CNGS. Se demuestra que la velocidad de los neutrinos es compatible con c, siendo su desviación $< 3.8 \times 10^{-6}$ con 99% C.L. La sensibilidad de esta medición es de un orden de magnitud mejor que la de los anteriores en un rango de energía similar.

2. EL DETECTOR

El LVD consiste en 840 contadores de centelleo, de 1.5 m^3 cada uno. El arreglo está dividido en "torres" idénticas, que tienen alimentación de alto voltaje, disparadores y sistema de adquisición de datos y un reloj absoluto (ESAT Slave RAD100) independientes. Este último está conectado al Reloj Maestro (ESAT RAD100) a través de un enlace óptico de 8 km, ubicado en los edificios externos al LNGS. Cada una de las torres consta de 35 "módulos" que contienen un grupo de 8 contadores. Cada contador se observa desde la parte superior por tres tubos fotomultiplicadores (PMT) de 15 cm, FEU49b ó FEU125. La electrónica estándar el LVD se describe en detalle en (13; 4).

La condición de activación para cada torre es una triple coincidencia de los PMT en cualquiera de sus contadores, lo que corresponde, en promedio, a un umbral de energía $E_H \simeq 4$ MeV. La energía liberada en cada contador se mide, a través de un ADC de 12 bits, con una media de resolución $\sigma_E/E \sim 15\%$ para 10 MeV. El tiempo de arribo se mide con una granularidad de 12.5 ns. Un oscilador de cristal de citrino de alta estabilidad (40 MHz) alimenta al reloj general para todo el experimento. Una milésima de segundo después de la ocurrencia de un disparador, se leen en conjunto los buffers de memoria (que contienen la información de la energía y el tiempo de todas las señales detectadas) con la señal de tiempo asociada al reloj de cada torre (ESAT Slave). La precisión del tiempo absoluto del LVD es del orden de un microsegundo. Esta es más de la necesaria para buscar, entre los diferentes telescopios de neutrinos, coincidencias que fuesen generados por un colapso gravitacional y para guiar la búsqueda de posibles señales de ondas gravitacionales (23).

A pesar de su resolución de tiempo absoluto limitado, el LVD ha detectado, hasta finales de 2011, 32 eventos de neutrinos de las prueba del haz CNGS agrupado (16). La diferencia entre tiempo de vuelo del neutrino tof_ν y el correspondiente valor esperado tof_c a la velocidad de luz que se ha encontrado que es:

$$\delta t = tof_\nu - tof_c = 3.1 \pm 5.3_{stat} \pm 8_{sys} ns. \qquad (1)$$

Para realizar esta medición, hemos recalibrado cuidadosamente todos los componentes del LVD así como los retardos de tiempo con el fin para mejorar la precisión en la medida del tiempo. Las incertidumbres se deben a la resolución del tiempo absoluto; a las fluctuaciones en el tiempo de respuesta de los distintos detectores (a veces se utilizan valores medios de tránsito cuando no se los conoce); y para la incertidumbre en la determinación de la posición de evento. Esta medida preliminar ha demostrado que, dentro de la incertidumbre, la velocidad de los neutrinos CNGS es compatible con la velocidad de la luz. Por otra parte, ha ayudado a la identificación de qué características de los detectores podrían mejorarse para una medición más precisa de la velocidad de los neutrinos.

3. ACTUALIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES

Para permitir una medición muy precisa del TOF de los neutrinos, el acelerador del CERN - SPS estuvo operando con una nueva estructura de haz desde 10 al 24 de mayo del 2012. Se utilizó un juego de cuatro lotes separados por unos 300 ns, con 16 paquetes en cada lote, con un ancho de banda de ~ 3 ns cada uno, separados entre sí por 100 ns. La estructura por lotes se conoce por la forma de onda obtenida desde el transformador de corriente de haz (BCT) (ver fig. 2, líneas grises).

Para esta ocasión, se diseñó una nueva Instalación para Tiempo con Alta Precisión (HPTF) por la colaboración Borexino (15) e instalados en los edificios exteriores del LNGS. Un receptor GNSS Septentrio PolaRx4, sincronizado con la frecuencia de 10 MHz de reloj de rubidio de un GPS, el cual proporciona una señal de salida de tiempo de GPS y XPPS (10 Hz). El HPTF está equipado con Contadores de Intervalo de Tiempo (TIC) de Péndulo con alta precisión (50 ps), CNT-91; a los que se pueden conectar las señales de los factores desencadenantes de los diferentes experimentos del LNGS.

En vista del nuevo haz de neutrinos, hemos modificado un subconjunto de los contadores del LVD, para mejorar su funcionamiento temporal. Hemos elegido 58 de ellos (Super-Set, ver fig. 1) para maximizar la aceptación de los neutrinos CNGS mientras se redujo al mínimo el número de detectores modificados. A partir de los datos tomados desde el año 2006 con el haz CNGS (y de acuerdo con simulaciones Monte

Carlo (7)) se ha medido que los contadores de Super-Set están implicados en un ∼40% de los eventos detectados por el conjunto CNGS LVD, mientras que representa menos del 7% de toda la matriz. Por un lado, para evitar las fluctuaciones de tiempo en el desencadenante a nivel de un solo contador, se ha modificado el cableado de los PMT, retrasando sólo uno de ellos. Este cambio garantiza que las coincidencias triples entre los PMT en cada contador siempre se forman debido al mismo tubo. Por otra parte, para realizar una medición del tiempo de tránsito en cada contador, los hemos equipado con un sistema de LED. El tiempo de tránsito, denominado δ_{LVD}, es el tiempo entre la generación de luz dentro de un contador y la formación del desencadenante. Por medio del sistema de LED, hemos medido el comportamiento del tiempo de tránsito como función de la energía para cada contador. Se han simulado diferentes valores de energía variando la intensidad del LED en cada uno de ellos, y se mide el tiempo de tránsito en función de la energía. Para cada contador, que mejor ajuste a los resultados es una ley de potencias de la forma:

$$\delta_{LVD}(E_m) = P_1 \times E_m^{P_2} + k, \qquad (2)$$

donde E_m es la liberación de energía medido por el ADC, mientras que P_1, P_2 y k son parámetros libres del ajuste, para cada contador.

También se actualizó el desencadenante de la matriz. Se ha implementado una lógica de disparo rápido independiente por la extracción (desde los discriminadores) de la coincidencia de los contadores disparados, con el desencadenante enviados al HPTF. El desencadenante está conectado a una de las TIC, que es detenido por la señal del XPPS. Esto proporciona una alta precisión diferencia de tiempo, δ_{TIC}, entre el tiempo del desencadenante del LVD el del GPS absoluto. Gracias a esta mejora, la exactitud de tiempo absoluto del LVD es del orden de unos pocos nanosegundos.

Finalmente, se realizó una medida geodésica nueva, independiente y de alta precisión. El valor inicial de la línea CNGS-LVD, es decir, la distancia entre el centro del haz BFCTI.400344 del transformador de corriente (BCT) del detector en el CERN y el Super-Set del LVD en la pared superior (se toma como referencia el LVD), se encuentra que es 731291.87 ± 0.04 m (Barzaghi). El tiempo de vuelo correspondiente a la velocidad de la luz, cuando se incluye la contribución de 2.2 ns debido a la rotación de la Tierra, es $tof_c = 2439329.32 \pm 0.13$ ns.

4. LA MEDICIÓN

El tiempo de vuelo de los neutrinos, tof_ν, es la diferencia entre el tiempo absoluto en el cual el evento activa un contador en LVD (t_ν) y el tiempo absoluto en que el grupo de protones cruza el monitor de intensidad BCT en el CERN (t_p), ambos expresados en el tiempo de referencia de la LNGS, es decir, $tof_\nu = t_\nu - t_p$. t_ν está dado por :

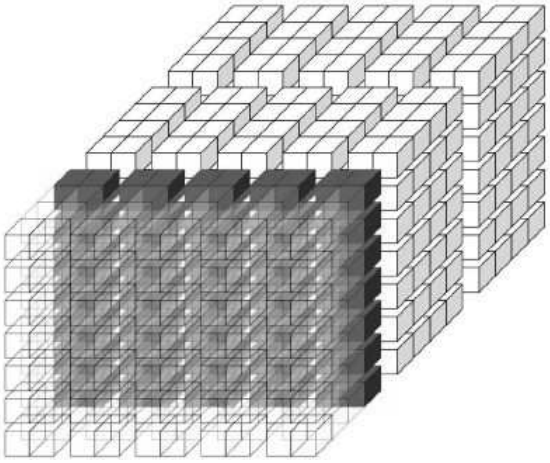

FIG. 1.— Esquema de los contadores LVD. Los oscuros representan el "Super-Set".

$$t_\nu = t_{XPPS}^{GPS} - \delta_{TIC} - \delta_{LVD} - \delta_h + \Delta_{const}^{LVD}, \qquad (3)$$

donde t_{XPPS}^{GPS} es la señal de tiempo del GPS absoluto de la primera señal XPPS la después del desencadenante. δ_h es una corrección para la diferencia de camino causada por eventos de neutrinos que llegan a los contadores diferentes alturas (el ángulo de incidencia del haz CNGS con respecto al plano horizontal es ≈ 3 grados). $\Delta_{const}^{LVD} = 180.8 \pm 1.5$ ns resume todos los retrasos constantes en el LVD. δ_{LVD} y δ_{TIC} se han introducido previamente, y representan la corrección del tiempo de tránsito en cada contador y el retraso entre el desencadénate y el tiempo GPS absoluto, respectivamente. t_p está dada por :

$$t_p = t_{HCA} + \delta_{wf} + \Delta_{const}^{CERN} + \delta_{LNGS}^{CERN}, \qquad (4)$$

donde t_{HCA} es la señal temporal de extracción de la señal del protón incidente (inicio de la digitalización de forma de onda BCT); δ_{wf} es el retraso del primer grupo de protones con respecto al comienzo de la adquisición de la señal (t_{HCA}); $\Delta_{const}^{CERN} = 9521.1 \pm 2.0$ ns suma todas los retrasos de tiempo en el CERN y el δ_{LNGS}^{CERN} es la diferencia de tiempo entre los sistemas de referencia del LNGS y el CERN (15).

El LVD estuvo en pleno funcionamiento en mayo de 2012 con un haz agrupado. Para cada evento detectado en ese periodo, hemos determinado la diferencia entre el tiempo de la detección en el LVD y el tiempo de la señal de extracción del incidente en el CERN, después de contar el valor inicial de la CERN-LVD, es decir, $\delta T_{batch} = (t_\nu - t_p) - tof_c$. δT_{batch} no incluye la identificación del grupo de neutrinos que dan origen al evento. Para comprobar el funcionamiento del detector, se han buscado coincidencias en todo el LVD en un tiempo de ventana amplia, a saber $|\delta T_{batch}| < 100\mu s$. Tenemos que se han encontrado 190 eventos en total, en consonancia con el 1.89×10^{17} protones en el blanco (p.o.t.) existentes durante el periodo del haz (7).

Para la medición de la velocidad de neutrinos sólo se utilizan los eventos que involucran al menos uno de los contadores del Super-Set. Hemos encontrado

79 eventos de un total de 190, es decir, el 40% como se esperaba (ver sección anterior). Cuatro de ellos no son utilizables para una medición precisa del tiempo de vuelo: uno no tiene información completa en la base de datos del CERN, mientras que los otros tres el ADC tuvo un mal funcionamiento. Para limitar las fuentes de incertidumbre sistemática, se han aplicado cortes de calidad para los 75 eventos restantes. En primer lugar, porque el número de fotoelectrones necesarios para liberar la energía E<10 MeV es demasiado baja para garantizar que el contador se active por la luz directa (es decir, rápido), por lo que se han seleccionado sólo los eventos donde E>10 MeV (diez eventos excluidos). En segundo lugar, hemos requerido la no saturación del ADC del contador de activación, porque la saturación no permitiría una medición precisa de la expresión δ_{LVD} en (2) (siete eventos excluidos). Por último en los 58 eventos restantes, hemos probado diferentes cortes de energía, entre 10 y 100 MeV. Mientras que el valor medio del tiempo de medio de la distribución se mantiene constante para cualquier corte, el r.m.s. decrece a medida que aumenta el umbral; y se convierte en estable para E>50 MeV, siendo este valor nuestra elección final para el corte de energía. Los cortes descritos reducen la muestra a 48 eventos, que serán utilizados para el análisis final. Nosotros notamos que entre todos los eventos excluidos, hay cinco cuyos tiempo-de-vuelo se desvían significativamente de la media de la distribución de los 79 eventos originales. Esos son cinco de los eventos para los cuales E<10 MeV, este número es coherente con el valor esperado del ruido de fondo. De hecho, la frecuencia del ruido de fondo del Super-Set, debido principalmente a la radiactividad de la roca, es $f_{bk} = 1.1s^{-1}$. Con $n \approx 25000$ extracciones, el número esperado de eventos de fondo es $N = nf_{bk}2 \times 10^{-4} \approx 5.5$.

Los 48 eventos seleccionados han sido inspeccionados de forma individual: casi todos ellos muestran la presencia de una señal de muones, como se espera de una interacción de corriente de ν_μ. La distribución de la medición δT_{batch} se muestra en la figura 2 (líneas negras), donde también se muestra la suma de las formas de onda digitalizadas asociados al monitor de intensidad del haz (líneas grises). La estructura del haz viga es claramente identificable, y cada evento del LVD se puede asociar al pico más cercano de la forma de onda del haz. Para cada evento que calculamos la diferencia de tiempo, δ_t, con respecto al máximo de intensidad del pico. La distribución de δ_t para los 48 eventos se muestran en la figura 3 (histograma negro) en comparación con la superposición de todos los picos de las formas de onda correlacionadas con eventos detectados (curva gris). La cola positiva en el histograma gris es un artefacto de la función de transferencia del sistema BCT (17). Este efecto no influye en nuestra medida ya que las calibraciones de tiempo se realizaron respecto a la posición del máximo. El valor medio de la distribución medida es:

$$\delta t = tof_\nu - tof_c = 0.9 \pm 0.6_{stat} ns. \quad (5)$$

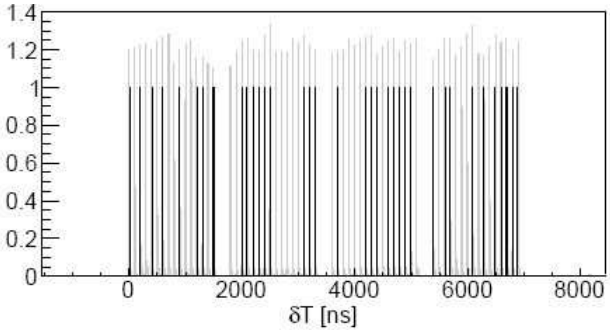

FIG. 2.— Comparación de los valores de δT de los 48 eventos seleccionados (lineas negras) con las formas de ondas sumadas de la extracciòn de protones (lineas grises). El origen del tiempo de las formas de ondas están dados por el máximo del primer grupo.

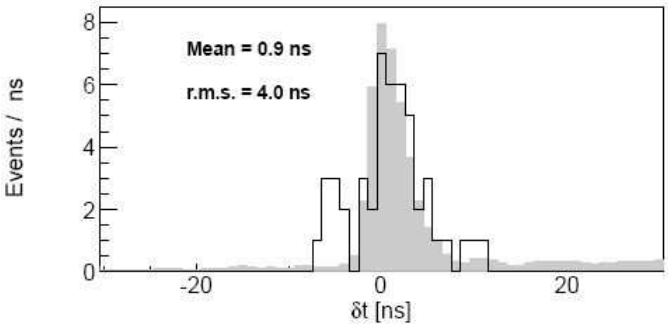

FIG. 3.— Distribución de los δt, la diferencia entre el tiempo de vuelo del neutrino y el tiempo de vuelo a la velocidad de la luz, para los 48 eventos seleecionados (histograma en negro), copmparado con la superpisición de los picos de las formas de onda correlacionados con los eventos edtectados (histograma en gris).

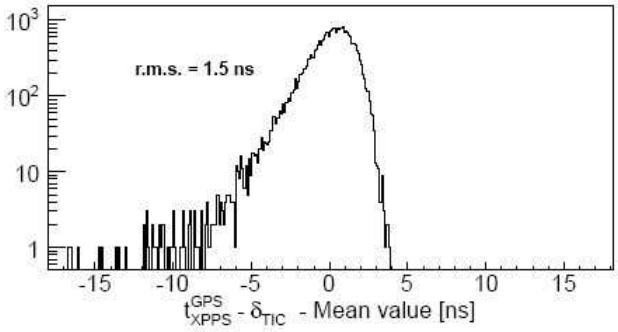

FIG. 4.— Estabilidad del sistema durante la medida: cada 10 minutos el tiempo de transito de un contador "Super-Set" fue medido.

La estabilidad a largo plazo de la configuración experimental está monitoreada durante la medición mediante la activación el LED en uno de los contadores del Super- Set, cada 10 minutos y midiendo el retardo de la cadena (ver Figura 4). Durante todo el período de las mediciones, el sistema tuvo una fluctuación con una $r.m.s.$ = 1.5 ns. La asimetría de la distribución se debe a prepulsos PMT (21).

Las incertidumbres sistemáticas asociadas a la medición de δ_t se resumen en la Tabla 1. La línea de base entre el CERN y el LVD se conoce con una incertidumbre inferior a 0.3 ns. De hecho, los neutrinos muónicos inducidos que son la causa de los

TABLA 1
FUENTES DE LAS INCERTIDUMBRES SISTEMÁTICAS EN LAS MEDIDAS.

Incertidumbres sistemáticas	ns	Dist. de Error
Baseline (< 10 cm)	< 0.3	Gaus.
Const. de corr. en el CERN	2.0	Gaus.
Calibración BCT	1.0	Gaus.
Calibración de tiempo de enlace	1.1	Gaus.
Precs. de sinc. de GPS	1.0	Gaus.
Correc. de tiempo de trans. PMT	0.4	Gaus.
Calin. abs. de tiempo de trans.	1.5	Plana
Largo de Fibra Óptica	0.5	Gaus.
Tiempo de vida de Fluores.	0.6	Exp.
Error Sist. Total	± 3.2	

eventos en el Super- Set se pueden generar a distancias hasta de varios cientos de metros del LVD. Esto acorta la línea base real de los neutrinos, ya que parte de la distancia se recorre por muones de diferentes energías. Este efecto fue analizado a través de simulaciones de Monte Carlo y tiene un impacto insignificante en la medición. Los retrasos constantes en el CERN dan una incertidumbre adicional de 2.0 ns. La incertidumbre debida al tiempo del sistema de intercalibración ha sido medida (15) y es de 1.1 ns. También se ha medido, el retraso entre el tiempo de extracción de protones y el registro de las formas de onda por un digitalizador BCT, con una incertidumbre de 1.0 ns. La corrección de la variable δ_{LVD} (que es dependiente de la energía y el contador) introduce una incertidumbre sistemática adicional de 0.4 ns, evaluados a través la propagación de la señal de energía asociada a la medición. Por último, los tres últimos términos de la Tabla I están relacionados con las correcciones constantes en la calibración del tiempo absoluto de los contadores del Super set. Representan el retardo de tiempo desconocido entre el desencadenante y la generación de luz LED: 2.6 ± 1.5 ns; la incertidumbre asociada a la longitud de la fibra óptica, 0.5 ns, y la diferencia entre la respuesta del detector de luz LED y de ionización de las partículas de 1.1 ± 0.6 ns (el tiempo de decaimiento de centelleo es $\tau = 3.32$ ns (11)). Sumando cuadráticamente todas esas contribuciones, se obtiene una incertidumbre sistemática total de 3.2 ns.

5. CONCLUSIONES

Hemos presentado la medición de la velocidad de los neutrinos con el experimento LVD, a través de la detección del haz de neutrinos muónicos CNGS. Durante 10 días de medidas del haz agrupado, el LVD ha detectado 190 eventos en coincidencia con los neutrinos del haz. De esos eventos, 79 han involucrado al menos un contador en el Super- set, que es un conjunto de 58 contadores actualizados para mediciones precisas del tiempo. A fin de limitar las fuentes sistemáticas de incertidumbre, se han aplicado cortes de calidad a estos eventos. Los 48 eventos resultantes se han utilizado para determinar el tiempo de vuelo de ν_μ con $< E >= 17$ GeV en la línea de base CNGS. Se encontró que la desviación prevista del tiempo de la propagación a la velocidad de la luz es:

$$\delta t = 0.9 \pm 0.6_{stat} \pm 3.2_{sys} ns. \quad (6)$$

El límite de confianza del 99% correspondiente en la velocidad de neutrino es:

$$-3.8 \times 10^{-6} < (v_\nu - c)/c < 3.1 \times 10^{-6}. \quad (7)$$

Estos valores son un orden de magnitud inferior a las mediciones previas directas. Mediante el uso de la energía media del haz de neutrinos, $< E >= 17$ GeV, se encuentra un límite para la masa relativista de neutrinos:

$$m_{\nu_\mu} < 47 MeV/c^2 (99\% C.L.). \quad (8)$$

AGRADECIMIENTOS

Esta medición fue posible por el esfuerzo de G. Di Carlo , S. Parlati y P. Spinnato del Centro de Cómputo LNGS; G. Korga, de la Colaboración Borexino; P. álvarez y J. Serrano del personal del CERN; G. Cerretto, V. Pettiti y C. Plantard deI INRIM Torino; Héctor Esteban del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA), San Fernando, España y la División de Electrónica INFN Torino. Agradecemos a F. Vissani por las discusiones de gran valor para nuestro trabajo.

6. NOTA AÑADIDA EN LA PRUEBA

Recientemente hemos recibido los datos de otro proyecto acerca de una nueva medición del Δ^{CERN}_{const}, es decir, la suma de los retrasos constantes en el CERN (Sanchez). El nuevo valor es: $\Delta^{CERN}_{const} = 9522.4 \pm 2.0$ ns. Utilizando este valor, nuestro resultado se convierte en:

$$\delta t = -0.3 \pm 0.6_{stat} \pm 3.2_{sys} ns.$$

La diferencia respecto de los resultados previos está dentro del rango de nuestras incertidumbres. El límite correspondiente a la velocidad del neutrino con 99% C.L., se hace más restrictivo:

$$-3.3 \times 10^{-6} < (v_\nu - c)/c < 3.5 \times 10^{-6}$$

y para la masa del neutrino:

$$m_{\nu_\mu} < 44 MeV/c^2 (99\% C.L.).$$

REFERENCIAS

[Adam et al.]Adam T. et al. [OPERA Coll.] (2007) and arXiv:1109.4897
[2]Adamson P. et al. [MINOS Collaboration] (2007), *Phys. Rev. D* **76**, 072005 and arXiv:0706.0437
[3]Agafonova N. Yu. et al. (2007), *Eur. Phys. J. C* **52**, 849
[4]—. (2008), *Astropart. Phys.* **28**, 516
[5]—. (2012), *Eur. Phys. J. C* **127**, 71
[6]Aglietta M. et al. (1992), *Il Nuovo Cimento A* **105**, 1793

[7]—. (2004), *NIM A* **516**, 96
[8]Alekseev E. N., Alekseeva L. N., Krivosheina I. V. & Volchenko V. I. (1988), Phys. Lett. B **205**, 209
[9]Alspector J. et al. (1976), *Phys. Rev. Lett.* **36**, 837
[10]Antonello M. et al. (2012), *Phys. Lett. B* **713**, 17
[11]Barabanov I. R. et al. (2010), *JINST* **5**, 04001
[Barzaghi]Barzaghi R. *(private communication)*
[13]Bigongiari A., Fulgione W., Passuello D., Saavedra O. & Trinchero G. (1990), *NIM A* **288**, 529
[14]Bionta M. et al. (1987), *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1494
[15]Caccianiga B. et al. (2012), submitted to JINST and arXiv:1207.0591
[16]CERN. (2011), *Bulletin*, 45
[17]—. BE/CO, (2012)
[18]Hirata K. et al. (1987), *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1490
[19]Kalbfleisch G. R., Baggett N., Fowler E. C. & Alspector J. (1979), *Phys. Rev. Lett.* **43**, 1361
[20]Longo M. J. (1987), *Phys. Rev. D* **36**, 3276
[21]Lubsandorzhiev B. K., Pokhil P. G., Vasiljev R. V. & Wright A. G. (2000), *NIM A* **442**, 452
[22]The OPERA Collaboration, (2012), NEUTRINO 2012 *Conf. Proceedings*, (in press.)
[23]Pagliaroli G., Vissani F., Coccia E. & Fulgione W. (2009), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 0311102
[24]Pas H., Pakvasa S. & Weiler T. J. (2005), Phys. Rev. D **72**, 095017
[Sanchez]Sanchez P. A. *(private communication)*
[26]Thomas S. A., Abdalla F. B., & Lahav O. (2010), *Phys. Rev. Lett.* **105**, 031301
[27]Zichichi A. (2012), *Int. J. Mod. Phys. A* **27**, 1230017
[28]—. (2012), *La Rivista del Nuovo Cimento* **35**