

RECORDANDO LA SN1987A DESPUÉS DE 23 AÑOS*

THE 23 YEAR REMINISCENCE OF THE SN1987A

O. SAAVEDRA SAN MARTIN

Dipartimento di Fisica Generale
Università di Torino and INFN Torino Italy

RESUMEN

Hace veinte tres años, el 23 de febrero de 1987, la explosión de la SN en el L.M.C. fue observada tanto en forma óptica como por los detectores subterráneos. Las observaciones ópticas se realizaron con telescopios en Chile y Australia, mientras que la explosión de neutrinos fue detectada por varios experimentos subterráneos en el Hemisferio Norte, que estaban funcionando en ese momento: en el Monte Blanco en Italia, Kamioka en Japón, y Baksan en Rusia, y el IMB en los EE.UU. Esta es la primera vez en la historia de la humanidad, que un evento astrofísico fue observado por los detectores subterráneos. En este evento, el experimento del Monte Blanco detectó cinco pulsos en forma instantánea, que no eran los detectados por los otros experimentos cinco horas después. Aún no queda claro por qué se detectaron dos explosiones en dos momentos diferentes y cómo una SN puede generar dos explosiones de neutrinos. Después de 23 años, se ha propuesto un modelo con una explicación de un colapso en etapas, con dos momentos diferentes, como recientemente sugirieron V.S. Imshennik y O. Ryazhskaya. En este trabajo se presentan los detalles de algo extraño que ocurrió el 23 de febrero, mientras que la mayoría de la información científica ya se expuso en otros trabajos publicados.

ABSTRACT

Twenty three years ago on February 23, 1987, the explosion of the SN in the L.M.C. was observed both optically and by underground detectors. The optical observations were done in Chile and Australian observatories while the neutrino burst was detected by several underground experiments in the Northern Hemisphere, running at that time: Mt. Blanc in Italy, Kamioka in Japan, and Baksan in Russia and IMB in the USA. For the first time in the history of human existence, an astrophysical phenomenon has been observed in underground detectors. In this astrophysical event, the Mt. Blanc experiment detected five pulses on-line that were not at the same time, as detected by the other three detectors around five hours later. It is still not clear to astrophysicists why two bursts at two different times have been detected and how an SN can generate two neutrino bursts. After 23 years a model has proposed an explanation for a double stage collapse at two different times, as recently suggested by V.S. Imshennik and O. Ryazhskaya. In this paper, a detailed occurrence of something strange that happened on February 23rd is presented while most of the scientific information has been exhibited in other published papers.

1. INTRODUCCIÓN

La primera sugerencia acerca de la papel de los neutrinos en fenómenos astrofísicos dada por G. Gamow y Schoenberg (Gamow , Schoenberg 1941) fue quince años antes del descubrimiento real de su existencia por F. Reines en 1956.

Después de 24 años de la idea de Gamow y de Schoenberg, el trabajo de G.V. Domogatsky y G. T. Zatsepin (Domogatsky , Zatsepin 1965) demostró que el sueño de la detección de neutrinos de las explosiones de SN podría hacerse realidad. De acuerdo con su idea debería ser posible la detección de los neutrinos

de supernovas a través de la emisión de electrones en procesos β , inducidos por los neutrinos, dentro de detectores que tengan de muchas toneladas de material de blanco.

Pasaron otros 35 años para que el sueño de Domogatsky y Zatsepin se convierta en realidad . De hecho, con el actual sistema SNEWS (Super Nova Early Warning System - Sistema de Alerta Temprana de SuperNovas), (Sholberg 1999) podemos proporcionar a la comunidad astronómica, una alerta temprana de aparición de SN, muy robusta, al utilizar un sistema de coincidencia de las señales de neutrinos en todo el mundo.

A partir de las ideas de Domogatsky y Zatsepin (1965), los científicos soviéticos comenzaron experimentos para detectar neutrinos de SNs, con la con-

*Traducción autorizada de "The 23 Year Reminiscence of the SN1987A", O. Saavedra, *Astronomy Letters* **36** 7 (2010) 467.

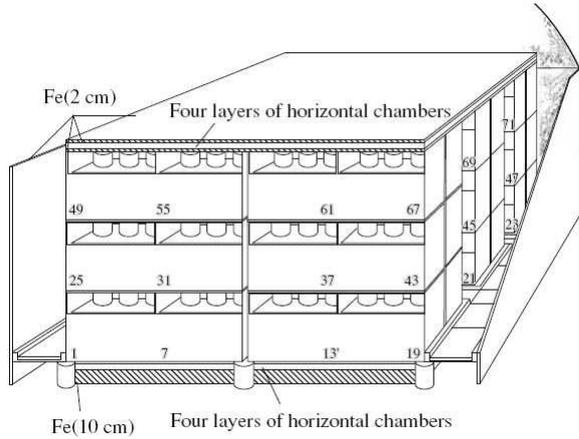


FIG. 1.— Las 90 toneladas del LSD en el laboratorio del Monte Blanco. En la figura no se muestran las 200 toneladas de la cubierta de Fe.

strucción de grandes detectores en Baksan, en el Cáucaso (Alekseyev et al. 1979), y en Artewmosk en Ucrania (Beresnev et al. 1979), mientras que se realizaba un intento para detectar neutrinos del SN mediante la búsqueda de coincidencias entre dos detectores intercontinentales, con una colaboración italiana - EE.UU. (Lande et al. 1974).

Se construyó el detector de centelleo líquido (LSD) con una colaboración italo-rusa, entre la Academia Rusa de Ciencias, la Universidad de Turín y el Instituto de Cosmogeofísica; en el túnel del Monte Blanco. Este detector tuvo un papel importante en la detección de neutrinos de SN 1987A. Aquí se presenta y discute una reminiscencia de la ocurrencia en la forma original de los hechos reales de entonces.

2. EL DETECTOR DE NEUTRINOS DEL MONTE BLANCO

La colaboración entre Italia y Rusia (entonces parte de la URSS) previó, desde el inicio, la construcción de un detector de centelleo líquido (LSD) dedicado a la detección de neutrinos de el colapso de estrellas. Este experimento se encuentra dentro de un túnel en el Monte Blanco, a una profundidad de 5200 m.e.a. (metros equivalentes de agua), a unos 150 km al norte de Turín. La cavidad era de $12 \times 6 \times 8 m^3$.

El detector elegido era de centelleo líquido tanto como un objetivo y como detector contenidos en 72 tanques de acero con blindaje de hierro.

Nuestro sistema de contadores de centelleo puede detectar todas las reacciones de neutrinos, de cualquier sabor, pero debido a la relativamente pequeña masa de nuestro detector, tan sólo 90 toneladas, y porque la sección eficaz para las reacciones de neutrinos es muy pequeña, la reacción más importante fue la captura de antineutrinos por protones del escintilador.

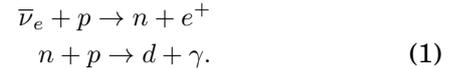
Desde el inicio fuimos extremadamente cuidadosos con el ruido de fondo de baja energía y estudiamos con precisión sus posibles efectos en el detector LSD.

El LSD comenzó a funcionar en enero de 1985. Antes de eso, se celebró en Dormund, Alemania en junio de 1984, la Conferencia de Astrofísica y Física

de Neutrinos. Allí se expusieron las principales características de las predicciones del detector de neutrinos LSD, (entonces en construcción) en el Laboratorio del Monte Blanco, también se indicó que podrían detectarse 1 ó 2 eventos de neutrinos por el LSD si una SN apareciese en la LMC (Saavedra, 1985).

Las características experimentales del aparato están bien descritas con anterioridad, como en Badino et al. (1984). Brevemente, el detector consiste de 90 toneladas de un centellador líquido ($C_{10}H_{22}$) contenidas en 72 tanques de acero inoxidable ($1.0 \times 1.0 \times 1.5 m^3$) colocados en tres capas, tal como se muestra en la Fig. 1. Cada contador tiene además, tres tubos fotomultiplicadores (PM) FEU49 rusos, de 15 cm de diámetro.

Desde su concepción, el experimento LSD ha estado dedicado a la detección de explosiones de antineutrinos provenientes del colapso gravitacional de las estrellas dentro de nuestra galaxia, (Saavedra et al., 1985) a través de la captura de un antineutrino los protones libres, como en las reacciones 1 (umbral de energía $E_{th} = 1.8$ MeV):



Esta interacción da dos señales dentro del tiempo de coincidencia: El pulso rápido de los positrones con energía: $E_{el} = E_{\bar{\nu}_e} - 0.8$ MeV seguido por un pulso gamma con energía $E_\gamma = 2.2$ MeV con un retraso medio de $\sim 190 \mu s$. Esta detección pulsos dobles es una buena firma para la reacción de captura de neutrinos en uno de nuestros detectores.

Se llevó a cabo el estudio cuidadoso y sistemático de la radiación de fondo del espectro de baja energía durante varios años, con un seguimiento continuo.

Con el fin de eliminar la radiación de baja energía proveniente de elementos naturales de las rocas circundantes de la cavidad, que representa el ruido de fondo principal en el LSD; este detector, desde su inicio, está protegido por ~ 200 toneladas de Fe; el cual también es considerado como un blanco de material pesado para las interacciones de neutrinos.

La electrónica fue diseñada para dar una buena firma para ambas reacciones en (1). La señal rápida debido a los e^+ con energía > 5 MeV da la señal de disparo y abre una puerta de $600 \mu s$ para todos los contadores en los 72 tanques. Durante ese tiempo de $600 \mu s$, la electrónica es capaz de bajar el umbral de energía a 0.8 MeV, nivel que permite la detección de la captura n-gamas de 2.2 MeV. Se determinan tanto el tiempo como la altura de pulsos para cada uno de los 72 contadores.

El contador se dividió según su tasa de recuento: los contadores cercanos a las paredes, donde la radiación de fondo era alta, y los tanques internos donde la radiación fue eliminada casi por completo. Se fijó un umbral de 7 MeV en los primeros, mientras que los segundos tenían un umbral de 5 MeV. En ambos casos, el umbral de baja energía fue de 0.8 MeV.

Cada pulso fue marcado por un reloj que daba la hora estándar italiana, con una precisión de 2 ms. Cada 7 min se le daba una revisión electrónica a todo el detector, con el fin de tener el sistema bajo control permanente.

Bajo esas condiciones de umbral, la tasa total fue 0.012/s, mientras que la tasa de conteo para muones fue de 3.5/h.

En nuestro sistema de adquisición de datos LSD, el software en línea identifica en tiempo real e imprime cualquier candidato de explosión a los datos de salida de la computadora. La explosión de neutrinos fue reconocido en el análisis estadístico en línea por nuestra computadora, sobre la base de la frecuencia real de eventos. Con tal sistema, nuestro equipo es capaz de detectar cualquier explosión de N impulsos, grabado en un intervalo de tiempo Δt entre 1 ms y 600 s. Además el este programa calcula una simulación del ruido de fondo de acuerdo con la distribución estándar:

$$F_{imit} = f \sum_{n=N-1}^{\infty} P(n, \Delta t) = f \sum_{n=N-1}^{\infty} \frac{e^{-f\Delta t} (f\Delta t)^n}{n!}$$

donde f es la tasa bruta de inicio.

En el análisis en línea, si aparece una explosión anormal de impulsos, que está fuera de la estadística de Poisson calculada, nuestra computadora imprime la explosión, a partir de la información principal del estallido: la duración del tiempo de la explosión, los tanques que dieron el inicio, la altura del pulso inicial, los pulsos de baja energía, y si la hubiera, la simulación de la probabilidad, así como el tiempo en que ocurrió. El análisis posterior se hace de una manera similar, pero incluyendo un análisis más detallado del pulso solitario en la explosión.

3. LOS CINCO PULSOS DETECTADOS POR EL LSD

El 23 de febrero de 1987, a las 3:52 hora italiana (02:52 UT) el equipo de LSD imprimió, como alarma en línea, una explosión de 5 pulsos dentro de un tiempo de 7 s de duración. La explosión fue analizada en línea por el equipo, determinado la probabilidad de la simulación por ruido de fondo de $\sim 10^{-3}$ considerando como base la frecuencia real de la tasa de fondo de 0.012 evento/s. Este tipo de evento nunca se había dado antes, desde el inicio del experimento con nuestro equipo, en enero de 1985.

Como la explosión se detectó a las 3:52 de la madrugada del lunes 23 febrero, no fue observada por ningún operador de turno en el laboratorio. Sólo fue vista en la mañana del mismo día a las 8:30 por un miembro de nuestro grupo que estaba de turno en el experimento, quien llamó a la sede en Turín y nos informó acerca de lo que el equipo había impreso. El registro ráfaga consistía en 5 pulsos, distribuidos uniformemente en todo el detector LSD. En la salida de la computadora se puede ver que los tanques involucrados son el 31, 14, 25, 35 y 33. A partir de la altura del pulso pareciera que todos los pulsos son de baja energía y solamente en un tanque el

TABLA 1

LA EXPLOSIÓN DE 5 PULSOS DETECTADA POR EL LSD. ADEMÁS INCLUYE LOS DOS PULSOS DETECTADOS CERCA DEL MOMENTO IMB.

Número de evento	Tiempo UT \pm 2 ms	Energía MeV
994	2 h 52 min 36.79 s	6.2-7
995	2 h 52 min 40.65 s	5.8-8
996	2 h 52 min 41.01 s	7.8-11
997	2 h 52 min 42.70 s	7.0-7
998	2 h 52 min 43.80 s	6.8-9
1285	7 h 36 min 00.5 s	9.0
1286	7 h 36 min 18.9 s	6.4

pulso inicial fue seguido de un segundo pulso 259 μ s después, dentro de la ventana temporal de los 500 μ s. El tiempo de duración de la explosión es 7.00 s mientras la probabilidad de ocurrencia según la simulación imitación es 1.7×10^{-3} por día (Saavedra, 2007). La Tabla 1 muestra la explosión de 5 pulsos detectados en línea en el LSD. La misma tabla también muestra los dos pulsos detectado al mismo tiempo por el IMB.

No fue hasta el miércoles 25 de febrero que recibimos la noticia de que una SN había sido observada ópticamente en observatorios del hemisferio sur. Inmediatamente trajimos la cinta y analizamos nuestros datos del Monte Blanco, con el fin de ver si los pulsos detectados en nuestro experimento tenían algo que ver con la explosión ópticamente observada en la SN LMC.

El análisis posterior de nuestros datos muestran que todos los datos concordaban antes del 23 de febrero y también después de los controles y discusiones con nuestros colegas italo-rusos, y, en particular, el control de registro del tiempo de ocurrencia de explosión SN con el momento del probable de inicio de la explosión por comparación con las mediciones ópticas, decidimos anunciar la detección del evento del Monte Blanco, el sábado 28 de febrero en la circular No. 4323 (Castagnoli et al., 1987).

La figura 2 muestra el número de explosiones como función de su duración y la multiplicidad de pulsos en la explosión (> 5 , > 10 y > 15) en el plazo de 2 días. La explosión de 5 pulsos con 7 s de duración se muestra como un punto suelto en la figura 2.

4. LAS ANTENAS GRAVITACIONALES Y LOS EVENTOS DEL LSD

Poco después de la detección de la explosión por el detector LSD nosotros comunicamos al grupo del profesor E. Amaldi que estaba a cargo del Geograv (que llamaremos GWA) que es una antena de onda gravitacional que está en funcionando Roma a temperatura ambiente.

Inmediatamente después de esta información, el grupo de Roma encontró una señal de coincidencia en el tiempo de la apertura de LSD. Los primeros informes fueron publicados por el LSD (Aglietta y col., 1987) y por RGW (Amaldi et al., 1987).

El grupo de Roma también supo que la antena Weber estaba operando a temperatura ambiente, al mismo tiempo, en Maryland. Un intercambio de

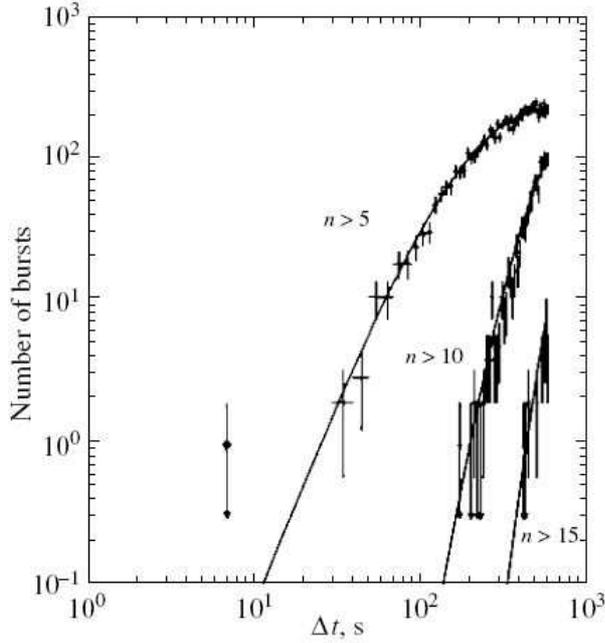


FIG. 2.— Número de explosiones detectados en el LSD en función al tiempo de duración de la explosión, para 1.96 días de funcionamiento, con multiplicidad de pulsos >5 , >10 y >15 . La explosión de 5 pulsos y 7 s de duracin se observa como un punto.

datos hizo una primera comparación posible.

Los datos de RGW y MGW consisten en dos secuencias de variaciones del estado energético de las GWA, en intervalos equidistantes, con $\delta t = 1s$.

Desde el inicio, el análisis de los datos de las antenas de Roma y Maryland, en coincidencia con los pulsos del LSD, mostraron que, además de la explosión de los 5 pulsos del LSD, ocurrieron otros pulsos en coincidencia con GWA durante un período de pocas horas alrededor de la explosión a las 2 h 52 min.

Esa fue la razón por la cual decidimos analizar un período de tiempo mucho más largo y no restringir el análisis sólo a la explosión del Mt. Blanco. En Aglietta y col. (1988) se describe bien nuestro análisis.

Para representar las correlaciones de nuestro interés, se ha utilizado la cantidad:

$$C(\varphi) = \frac{1}{N} \sum_i^{1,N} x(t_i + \varphi) \quad (2)$$

que se calcula durante un período determinado de tiempo τ que puede ser todo el período en estudio o parte del mismo, donde $x(t)$ indica una de las cuatro cantidades que representan los datos de la GWA:

$$E_R(t), E_M(t), E_R(t) + E_M(t), E_R(t) \times E_M(t);$$

N es el número de eventos de impulsos que ocurrieron período τ dado; t_i es el tiempo en el cual ocurrió el i -ésimo pulso; φ es el tiempo de retardo entre los eventos en el Monte Blanco y las antenas. Hay que remarcar que la cantidad $C(\varphi)$ es la función de correlación cruzada con tiempo de retardo φ entre las dos series de tiempo de los eventos LSD y GWA (Aglietta y col., 1989).

Este análisis de los datos se aplicó al intervalo de

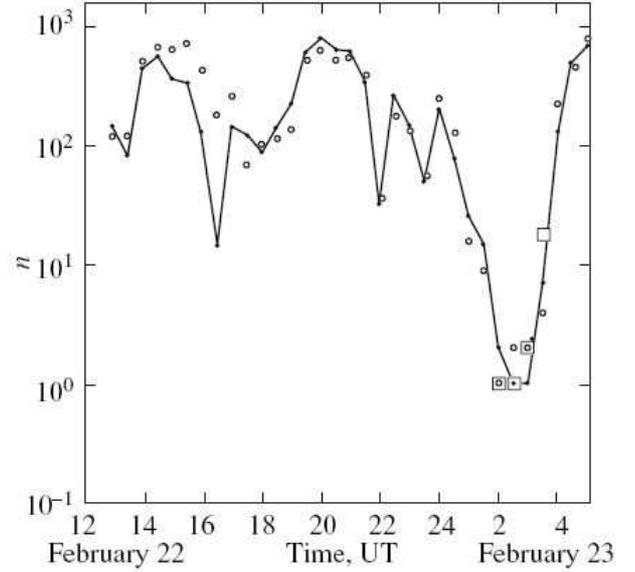


FIG. 3.— La cantidad n con $N = 1000$ en función al tiempo, para el periodo completo de análisis calculado para periodos de dos horas que son movidos en pasos de media hora. Los círculos vacíos son la suma y los puntos los productos del RWG y MGW, respectivamente. Los cuadrados se calculan excluyendo los 5 pulsos de la explosión LSD. Ésta figura muestra un gran efecto de correlación alrededor del momento del evento del Monte Blanco. Ver Aglietta et al. 1989 para mas detalles.

tiempo a partir de las 13 h del 22 de febrero hasta las 5 h del 23 de febrero. La Figura 3 muestra la cantidad n , que indica cuántas veces el nivel de la señal fondo es más grande que el valor correspondiente de la función de correlación, (la relación n/N es una estimación de la probabilidad de que la correspondiente valor de $C(\varphi)$ se deba al cambio) y los resultados de los cálculos moviendo el periodo de dos horas en pasos de media hora para todo el período que se estudió, como función de la suma $E_R(t) + E_M(t)$ y para el producto $E_R(t) \times E_M(t)$. Nos damos cuenta de que la correlación se hace muy grande alrededor de 1 a 3 h en el 23 de febrero. Se repitieron los cálculos sin incluir los 5 pulsos de la explosión detectada en LSD. Aún así, el efecto es todavía muy claro, lo que indica que la contribución que se debe principalmente a otros pulsos del LSD.

Estas coincidencias no comunes ocurrieron aproximadamente en dos horas, alrededor de las 02:52 h de la explosión detectada en el Monte Blanco. Pudimos extraer los pulsos en coincidencia al poner un límite en los datos GWA: $E(t) = E_R(t) + E_M(t) \geq 150K$ y en la ventana $W = 120$ min con centro en 2 h 45 min durante los cuales tenemos $N_{LSD} = 96$ y $N_{GA} = 172$ eventos respectivamente en el LSD y en GWAS. Hemos encontrado 13 eventos en coincidencia. El número esperado de eventos sin correlación es:

$$\bar{n} = \frac{N_{LSD} \times N_{GA} \times 1s}{120min} = 2.29.$$

Suponiendo una distribución de Poisson, la probabilidad de 13 eventos por azar es $p(\geq 13) = 9.4 \times 10^{-7}$. La Figura 4 muestra la distribución de las coinciden-

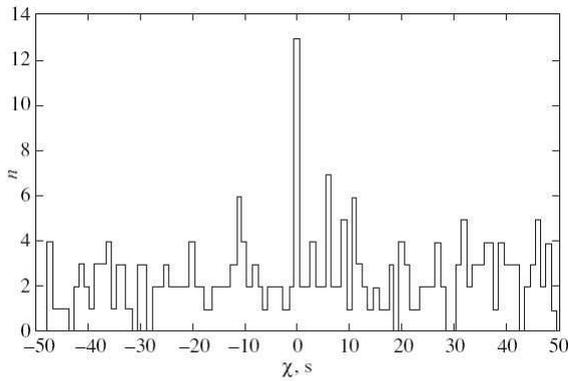


FIG. 4.— Las coincidencias entre 96 N_{LSD} y la suma de 172 N_{GA} sobre 150 K. Ver Aglieta et al. 1989 para mas detalles.

cias.

A partir de esas coincidencias quedaba muy claro para nosotros que era de suma importancia para poder continuar con nuestra investigación de la coincidencia, el tener en cuenta también, a los otros detectores de neutrinos subterráneos que funcionaron el 23 de febrero.

5. LOS EVENTOS DE KAMIOKA, IBM Y BASKAN

El lunes 9 de marzo, el grupo japonés anunció en una rueda de prensa que el experimento Kamiokande II (a partir ahora le llamaremos K2) había detectado 12 pulsos, pero cerca de 5 horas después del evento del Mt. Blanco (Hirata et al., 1987). Casi al mismo tiempo, los grupos del IMB, (Bionta et al., 1987) y del Baksan (a partir ahora le llamaremos BST), (Alekseyev et al., 1987) dieron sus resultados en coincidencia con el experimento Kamioka.

Como se sabe, el K2 y el IMB utilizan agua como detector, mientras que el Mt. Blanco y el Baksan utilizan líquidos escintiladores como detector. La reacción de los neutrinos es igual en ambos tipos de detectores.

¿Qué pulsos fueron detectados por el experimento del Monte Blanco? Una interpretación rápida esas dos explosiones fue dada por De Rujula (1987) como una manifestación de dos explosiones. El análisis de Rujula se basó en dos de los eventos en los cuales, los datos del Kamioka están en coincidencia con tiempo del Mt. Blanco. Parece muy plausible, aunque la idea de dos explosiones no era muy aceptable por la teoría estándar canónica de explosiones de las SN.

Los eventos de los detectores de Kamioka, IMB y Baksan mostraron una serie de “anomalías”. Por ejemplo, las energías promedio $\bar{\nu}_e$ inferidas de las observaciones IMB y Kamiokande son diferentes entre sí.

La gran diferencia de tiempo de 7.3 s entre los primeros 8, y los últimos 3 eventos en Kamiokande es algo que preocupa.

La distribución de los positrones en el estado final de la reacción de captura $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ debería ser isotrópica, pero se confirma que tiene un significativamente alejado de la dirección de la SN, ver Dadykin y Ryahzskaya (2008) En todo caso, en ausencia de otra explicación, estas características se atribuyen a fluctuaciones estadísticas en los datos

TABLA 2

TODOS LOS PULSOS GRAVADOS EN EL LSD DE 2:37:43 A 3:01:47 DEL 23 DE FEBRERO DE 1987. LOS EVENTOS 983, 1003 Y 1007 SON MUONES.

Número de evento	Tiempo UT	Número de contador	Disparador ADC
980	2:37:43.5	11	35
981	2:38:24.9	13	49
982	2:39:22.7	50	36
983	2:39:35.6	3	255
		9	208
		19	255
		16	255
		23	255
984	2:42:03.2	Prueba TDC	
985	2:42:11.1	69	37
986	2:42:27.6	31	42
987	2:43:47.4	35	33
988	2:43:58.5	61	39
989	2:44:29.2	41	45
990	2:45:26.4	42	45
991	2:45:38.8	59	50
992	2:49:12.7	Prueba TDC	
993	2:52:02.0	16	35
994	2:52:36.8	31	33
995	2:52:40.6	14	37
996	2:52:41.0	25	46
997	2:52:42.7	35	32
998	2:52:43.8	33	40
999	2:53:47.3	63	40
1000	2:55:51.2	11	49
1001	2:56:12.1	55	44
1002	2:56:22.2	Prueba TDC	
1003	2:56:24.6	5	255
		11	59
		29	113
1004	2:58:14.8	31	43
1005	2:59:28.3	42	44
1006	2:59:46.6	43	39
1007	2:59:50.6	11	255
		35	255
		59	255
1008	3:00:01.5	25	44
1009	3:01:04.7	61	44
1010	3:01:39.6	1	38
1011	3:01:47.2	3	34

dispersos .

Hemos analizado con precisión todos nuestros datos del Mt. Blanco, no sólo durante el tiempo de las dos explosiones, sino también varios días antes y después de esos dos tiempos. Las tablas 2 y 3 dan la lista de todos nuestros datos durante unos 20 minutos alrededor de los dos eventos. De ambas tablas es fácil reconocer los muones por involucrar a varios tanques y saturan el umbral ADC. Además existía la prueba TDC cada ~ 7 min.

Es evidente que en ambos intervalos, el experimento del Mt. Blanco estaba funcionando correctamente y que no hay cortes ni en las estadísticas ni en la energía de los acontecimientos, lo cual era necesario; y que puede ser visto por el número correlativo que también fue incluso grabado.

Los resultados inesperados de los análisis de las

TABLA 3
 TODOS LOS PULSOS GRAVADOS EN EL LSD CERCA DEL
 K2-IMB-BST EL 23 DE FEBRERO DE 1987. LOS EVENTOS
 1270, 1281 Y 1300 SON MUONES.

Número de evento	Tiempo UT	Número de contador	Disparador ADC
1270	7:13:35.2	10	255
		11	184
		28	106
		29	255
		53	255
1271	7:14:04.1	Prueba TDC	
1272	7:17:35.5	4	26
1273	7:21:13.6	Prueba TDC	
1274	7:23:19.0	14	34
1275	7:25:46.4	1	42
1276	7:26:28.1	12	48
1277	7:28:23.1	Prueba TDC	
1278	7:28:25.3	10	36
1279	7:29:57.1	6	45
1280	7:32:43.9	41	41
1281	7:32:53.9	25	255
1282	7:33:39.7	20	37
1283	7:34:21.6	17	36
1284	7:35:32.6	Prueba TDC	
1285	7:36:00.5	2	34
1286	7:36:18.9	14	38
1287	7:37:12.6	20	42
1288	7:37:50.1	31	35
1289	7:39:25.2	27	35
1290	7:42:42.1	Prueba TDC	
1291	7:44:09.1	41	40
1292	7:44:33.0	53	42
1293	7:45:08.6	14	33
1294	7:47:24.9	33	40
1295	7:49:51.6	Prueba TDC	
1296	7:56:47.4	35	42
1297	7:57:01.1	Prueba TDC	
1298	7:58:11.3	41	35
1299	7:59:08.2	54	45
1300	7:59:17.1	25	255
1301	7:59:18.5	17	42

coincidencias de pulsos con el GWA en un período de aproximadamente dos horas, incluyendo el evento del Mt. Blanco, y nos llevó a buscar un análisis similar con otros detectores de partículas. Por lo tanto, después de pedir los datos del grupo de Kamioka, que amablemente nos reenviaron los datos de alrededor de 32 h, período que incluye a los eventos del Monte Blanco y Kamioka.

Una de las cosas que nos llamó la atención fue que los detectores de Kamioka y Baksan tenían errores en sus relojes, ± 60 s para Kamioka y $+2$ s -54 s para Baksan, mientras que la precisión del reloj del IMB era de 50 ms. Por lo tanto, supusimos que el tiempo del IMB era el correcto para la llegada de la explosión. El problema era cómo conciliar el tiempo de los pulsos detectados por los otros dos detectores.

Hicimos un análisis preciso de los datos y buscamos coincidencias, con la misma técnica, entre los dos conjuntos de datos con la GWA, pero en este caso, nos vimos obligados a utilizar un cambio δt (0.1 a 2.0 s) para los datos del K2 en el intervalo de ± 60 s

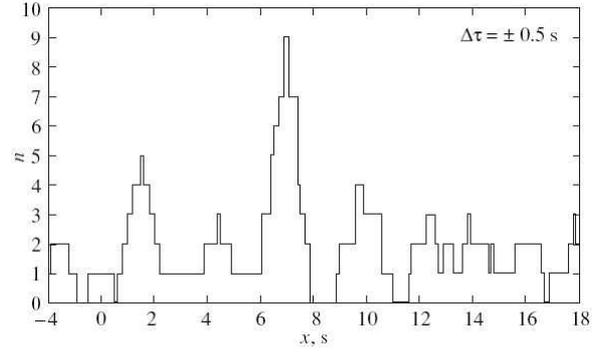


FIG. 5.— Distribución del número de coincidencias entre Kamioka y LSD en el periodo de 1:45 a 3:45 UT del 23 de febrero de 1987 como función del cambio de tiempo del tiempo absoluto de Kamioka. La ventana temporal $\Delta\tau$ fue considerada como 0.5 s.

para todos los datos disponibles entonces. Los tiempos del K2 fueron reportados con una precisión de milisegundos y una incertidumbre global de un minuto. Podemos imaginar, por tanto, que las diferencias de tiempo del K2 en el intervalo de tiempo considerado, podría haber tenido errores no más grandes que una fracción de segundo.

El resultado de nuestro análisis muestra resultados inesperados. Un pico de coincidencia se veía sólo cuando se desplazaban todos los datos del Kamioka por $+7$ s. Esto significa que todos los datos del Kamioka tendrían que desplazarse en $+7$ segundos para todo el período de tiempo considerado. Suponiendo una ventana de coincidencia de $\Delta t = \pm 0.5$ s, tal como lo hicimos en el análisis con los datos del GWA, el número esperado de coincidencias aleatorias está dado por $N = (91 \times 191 \times 2 \times 0.5) / 7200 = 2.41$, donde 91 y 191 son la tasa de conteo del LSD y del K2, respectivamente; en el intervalo de 01:45 a 03:45 UT. Lo más sorprendente fue que el desplazamiento del tiempo para los eventos del Kamioka debe ser $+7$ s con el fin de sincronizar su explosión con el detectado por el IMB (Aglietta et al., 1989).

La Figura 5 muestra la distribución de las coincidencias de los eventos LSD- Kamiokande en el intervalo de 1:45 a 03:45 UT como función del desplazamiento de los eventos Kamiokande, y para una ventana temporal $\Delta\tau = 0.5$ s. Se realizó el mismo análisis sobre los 17 intervalos de dos horas cada uno, desde 11:45 UT del 22 de febrero hasta las 21:45 de 23 de febrero. En ese período se registraron respectivamente 1462 y 2890 eventos en LSD y K2. Por lo tanto, el número de coincidencias aleatorias que se esperaba era de 2.03 por cada intervalo. Con el tiempo K2 desplazado entre $+6.9$ a $+7.0$ s, el único período con exceso significativo de coincidencias está en un lapso previamente considerado, que es de 01:45 a 3:45 UT durante el cual se han encontrado 9 coincidencias. En cada uno de los otros 16 intervalos, la cantidad de coincidencias observadas concuerda muy bien con el número esperado de una distribución de Poisson.

En la Fig. 6 podemos ver claramente que un pico de la distribución se encuentra en el intervalo de dos

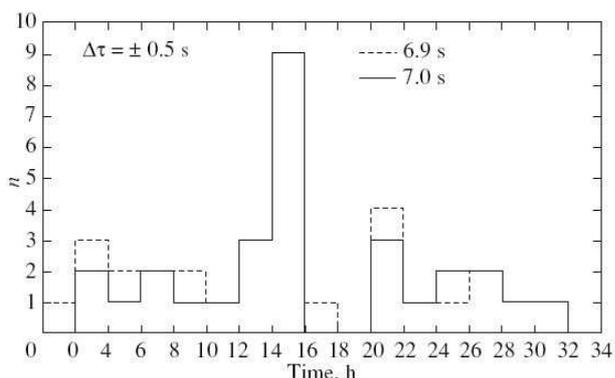


FIG. 6.— Número de coincidencias entre Kamioka y LSD observadas durante 34 horas, a partir de la 1:45 UT del 22 de febrero, en 17 intervalos de dos horas cada uno.

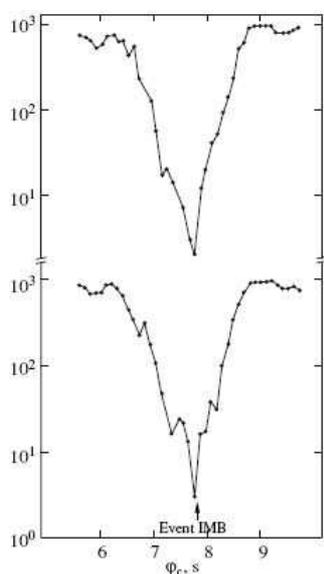


FIG. 7.— Correlación de tiempo entre los datos del Kamiokande y los datos del GWA para el periodo de 2:00 h a 3:00 h del 23 de febrero. La línea superior es el producto de las señales del GWA, mientras que la inferior es la suma de las señales del GWA. Existe un claro pico de coincidencia en ~ -7 s.

horas, de 1:45 a 03:45 UT del 23 de febrero, de la distribución de la coincidencia en el intervalo de 2 horas, al tomar todos datos disponibles del Kamioka, desde las 11:45 del 22 de febrero a las 21:45 del 23 de febrero, con dos valores de corrimiento: 6.9 y 7.0 s.

El análisis del GWA y del K2, (ver Amaldi et al., 1989) también da resultados excepcionales, que se muestran en la Fig. 7. Es evidente que hay un pico en las correlaciones cuando se corrigió el reloj del K2 por +7 s con el fin de ser coincidente con el reloj del IMB. (ver Amaldi et al., 1989 para obtener más detalles).

Tras estos resultados interesantes que decidimos realizar el mismo análisis con los datos de Baksan. De hecho, y después de conversaciones con el Prof. Chudakov decidimos intercambiar nuestros datos, y realizar el análisis de datos de manera independiente. Nuestros resultados son prácticamente los mismos que fueron encontrados por Chudakov (1989) y

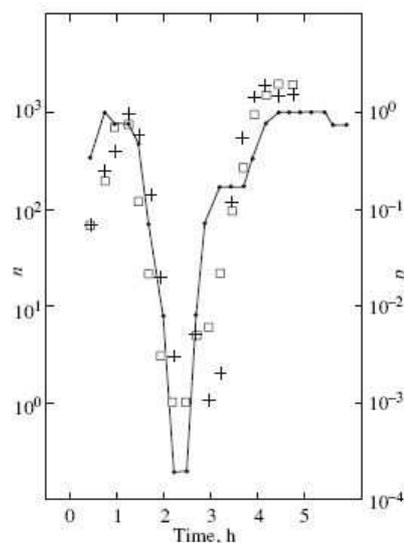


FIG. 8.— La significancia de la correlación observada para GWA-LSD (cuadrados y cruces) y LSD-Baksan (puntos y líneas sólidas) en función de la posición del periodo T en escala UT.

que se muestran en la figura 8.

Podemos ver claramente un pico de coincidencias sólo cuando los datos de Baksan se desplazan por -30 segundos. Esto es fantástico, porque es exactamente el mismo el tiempo de desplazamiento que necesitan los datos de Baksan para poder sincronizar con la explosión detectada en el IMB. De nuevo, estas coincidencias positivas se presentan sólo en el intervalo de las dos horas que abarca la explosión en el Monte Blanco, de 2.52 entre las 01:45 y las 3:45, exactamente el mismo intervalo en el que se producen las coincidencias LSD- K2. El mismo análisis se hizo para todo el conjunto de datos de BST y LSD, para la observación de las coincidencias por hora calculados con distintos desplazamientos temporales y ventanas de coincidencia $\Delta\tau$. Los únicos periodos con un exceso significativo de coincidencias está en el intervalo de 2:00 a 3:00 UT.

No esperábamos un resultado tan positivo, porque de la naturaleza fantástica del fenómeno, tal como fue mencionado por Chudakov (1989). Podemos ver (en particular de la Fig. 8) que tres análisis independientes de los datos, por parte de los grupos de Roma, Torino, y Baksan llegaron a las mismas conclusiones: existen coincidencias en un intervalo de dos horas alrededor de la explosión detectada en el Mt. Blanco.

Este resultado, junto con el LSD- K2 es muy rara y parecía fantástica al mismo tiempo, ya que las diferencias de -30 s y $+7$ s son exactamente los intervalos con los cuales se ajustaron los relojes de Baksan y Kamioka a la hora del reloj IMB.

En cuanto a que los acontecimientos parece que no son nada más que parte del ruido de fondo de tres detectores subterráneos que están en coincidencia. La Tabla 4 muestra las coincidencias con el K2, también indican el ángulo θ calculado por el grupo Kamiokande. La Tabla 5 muestra la coincidencia del LSD con el BST en las dos horas alrededor del evento del Monte Blanco para los dos casos.

TABLA 4
COINCIDENCIAS ENTRE LSD Y KAMIOKA EN EL PERIODO DE 1:45 A 3:45 UT EL 23 DE FEBRERO DE 1987^a.

LSD			Kamiokande				
Número de evento	Tiempo	Energía (MeV)	Número de evento	Tiempo	N golpe	$\cos \theta^b$	Diferencia de tiempo LSD-Kam
957	2:11:37.04	6.4	124037	2:11:29:72	23	-0.647	7.31
970	2:29:30.77	7.5	124948	2:29:23:39	21	-0.807	7.37
971	2:31:23.31	6.8	125041	2:31:16:51	20	-0.805	6.80
979	2:36:17.75	6.5	125275	2:36:10:91	20	0.170	6.84
1017	3:05:35.37	7.1	126600	3:05:28:82	34	-0.028	6.55
1026	3:12:39.10	7.2	126905	3:12:32:57	21	-0.842	6.53
1027	3:12:39.46	7.3	126905	3:12:32:57	21	-0.842	6.89
1040	3:28:33.18	7.2	127782	3:28:25:99	39	-0.845	7.19
1044	3:31:06.14	5.5	127904	3:30:59:18	21	0.321	9.96

^a La ventana de coincidencia es ± 0.5 s.

^b θ es la dirección desde SN 1987A.

El evento No. 979 del LSD coincidente con el evento No. 125275 del K2 es también coincidente con el BST.

TABLA 5
COINCIDENCIAS ENTRE LSD Y BAKSAN (BST) EN EL PERIODO DE 1:45 A 3:45 UT EL 23 DE FEBRERO DE 1987.

Índice ^a	Número de evento	Tiempo	Energía (MeV)	Tiempo	Energía (MeV)	Diferencia de tiempo LSD-Baksan
1 2 3 4	931	1:47:48.80	8.4	1:48:18.12	22.9	-29.32
1 3 4	934	1:52:22.45	6.3	1:52:52.63	17.5	-30.18
1 2 3 4	945	2:03:00.48	7.9	2:03:30.04	8.8	-29.56
1 2 3 4	954	2:10:40.10	6.2	2:11:09.70	35.6	-29.60
1 2 3 4	955	2:10:40.32	6.8	2:11:09.70	35.6	-29.38
2 3	962	2:17:05.05	7.2	2:17:33.84	22.9	-28.79
2 3 4	966	2:22:31.19	7.5	2:23:00.33	12.5	-29.14
1 3 4	968	2:26:42.26	7.4	2:27:12.49	35.9	-30.23
1 2 3 4	977	2:34:35.62	6.9	2:35:05.00	19.2	-29.38
1 3 4	979	2:36:17.75	6.5	2:36:47.80	29.1	-30.05
1 2 3 4	981	2:38:24.89	7.8	2:38:54.41	24.7	-29.52
1 2 3 4	1036	3:25:15.53	7.0	3:25:45.11	23.5	-29.58
2 3 4	1047	3:38:21.10	7.8	3:38:50.08	20.6	-28.98
4	1051	3:43:03.69	6.9	3:43:34.09	22.1	-30.40

^a El significado del índice es como sigue: (1) ventana de coincidencia $\Delta t = \pm 0.5$ s, tiempo de desfase BST $\delta t = -29.8$ s; (2) $\Delta t = \pm 0.5$ s, tiempo de desfase BST $\delta t = -29.1$ o -29.2 s; (3) $\Delta t = \pm 0.75$ s, tiempo de desfase BST $\delta t = -29.5$ s; (4) $\Delta t = \pm 0.75$ s, tiempo de desfase BST $\delta t = -29.7$ s. El evento No. 979 del LSD coincidente con el BST es también coincidente con el evento K2.

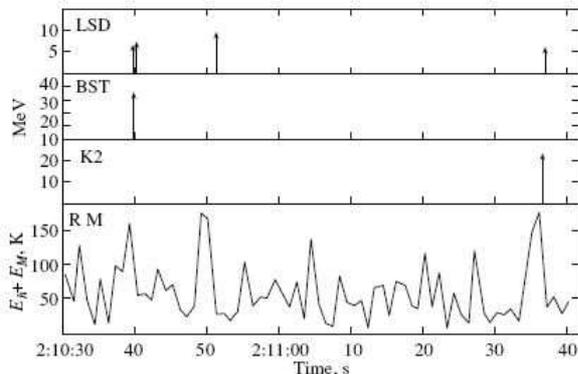


FIG. 9.— Datos gravados durante 57 s en diferentes experimentos bajo tierra y GWA, a partir de 2:10:40 UT en febrero de 1987. En este periodo 4 eventos LSD (LSD tiene una tasa de disparo de 0.7 eventos por minuto) están en coincidencia con los eventos en otros experimentos. La curva inferior es el gráfico temporal de la suma de los pulsos cada 0.1 s para GWA de Maryland y Roma.

El evento LSD No. 979 es coincidente con el BST y también es coincidente con el evento K2.

En la Fig. 9 podemos ver la distribución de pul-

sos en el período comprendido entre las 02:10:30 UT y las 02:11:40 UT medidos en el LSD (4 pulsos), Baksan (1 pulso), Kamioka (1 pulso) y la suma de las das GWA (3 pulsos). Es muy intrigante tener en cuenta que durante este corto tiempo (menos de 60 s) se presentó una cuádruple coincidencia entre el LSD (dos pulsos) con Baksan y las GWA; y una coincidencia triple entre el LSD y los pulsos Kamioka y GWA. Si tenemos todas estas coincidencias en aproximadamente un minuto obtenemos que la probabilidad de ocurrir estas coincidencias por casualidad es de $\sim 10^{-7}$.

Sin embargo, hay otra cosa más que es bastante inusual, y también que se presentó en ese día fatídico del 23 de febrero. A partir del análisis de los datos del LSD desde el 10 de febrero hasta el 1 de julio de 1987, buscando correlaciones entre todos los pulsos superiores a 5 MeV, encontramos una extraña correlación de nueve pares de pulsos, pulsos de alta energía, (muones) y pulsos de baja energía dentro de una ventana temporal de $\Delta t = 2$ s en un intervalo entre las 05:42 UT y las 10:43 UT del 23 de febrero

de 1987. La frecuencia de tal tipo de fluctuaciones aleatorias del fondo es $\sim 1/(10 \text{ años})$ (Dadykin et al., 1992). La pregunta es si este resultado indica una relación entre la correlación temporal de los pulsos y la SN 1987A.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo tenía la intención de centrarse principalmente en una la narración cronológica de los acontecimientos que se produjeron el 23 de febrero de 1987, y en la presentación del análisis de datos que ya fueron publicados por los diversos grupos involucrados en este problema. El punto crucial en el análisis era el problema de temporización para el Kamioka y detectores de Baksan. A partir de nuestro análisis, es evidente que los datos Kamioka deben ser corregidos por $\sim +7$ s, mientras que para los datos Baksan la corrección es ~ -30 s. No se requiere corrección para la GWA sin error, ya que tiene una precisión de tiempo absoluto de ± 0.1 s, por ejemplo ver la Fig 4.

En este caso las correlaciones simuladas para el ruido de fondo, calculadas independientemente y por separado por los grupos son: para el LSD-GWA: 10^{-5} ; LSD-Baksan: 4×10^{-3} ; LSD-Kamioka: 8×10^{-4} ; GWA-Kamioka: 5×10^{-4} y GWA-Baksan: 5×10^{-2} . Creo que es innegable que admitir que durante SN 1987A se produjo algo muy inusual en unas pocas horas en la mañana del 23 de febrero.

Me gustaría hacer hincapié en que los efectos han sido observados en forma independiente, con distintos métodos, y en diferentes continentes durante la SN 1987A. Además, el momento en que el exceso de coincidencias se ha encontrado, se centra en el momento de la explosión detectada por LSD en el Monte Blanco. Incluso las correlaciones de pulsos dobles encontrado por Dadykin et al. (1992) se produce sólo en la mañana del 23 de febrero y que se repite durante el análisis de varios otros analizados.

La pregunta es que, si la probabilidad para las coincidencias dobles y triples es muy pequeña, ¿éste

efecto puede ser aleatorio? Si no es así, entonces el problema es dar una explicación científica que tenga en cuenta todos efectos de las explosiones gravitacionales de las SN.

Podemos separar los dos efectos: Primero, la detección de los 5 pulsos de la explosión por el LSD a las 02:52 UT. Para ese evento, existe la posibilidad que el colapso de una supernova conduce al colapso de dos etapas con una diferencia de fase de ~ 5 horas, debido a la rotación inicial de masa. Esta idea fue propuesta por Imshennik y Ryazhskaya (2004). Un análisis muy amplio y convincente de los eventos de varios detectores está en Dadykin y Ryazhskaya (2008).

Las teorías recientes sobre el confinamiento de los quarks, (Drago et al., 2008) inducen a pensar que se puede tener dos explosiones de estrellas masivas con la posibilidad de tener dos explosiones de neutrinos.

Sobre el segundo efecto, no tenemos por el momento ninguna explicación plausible para las coincidencias de pulsos entre los varios detectores en el mundo.

AGRADECIMIENTOS

Realmente no sé cómo agradecer lo suficiente a O.G.Ryazhskaya por su apoyo, amable y continuo para escribir este documento, y para todos los colegas rusos, en particular, a V.A. Matveev, quien me dio el oportunidad de dar una charla en la ocasión del jubileo de 20 años de la SN en el Instituto de Investigación Nuclear de los RAS, en Moscú, Rusia.

Estoy también muy agradecido a todos los miembros italianos y rusos de la colaboración LSD que durante muchos años trabajaron juntos con la idea que se detectarían los neutrinos de SN. En particular, gracias a S. Vernetto por su contribución en el análisis de los datos. Muchas gracias al grupo del Prof. E. Amaldi, especialmente a G. Pizzella, porque la mayoría de las correlaciones con GWA fueron realizadas por él. Gracias también a A. Drago por sus conversaciones y discusiones sobre útiles este asunto.

REFERENCIAS

- Aglietta M. et al. (1987)a, *Europhys. Lett.* **3**, 1315
 —. (1987)b, *Proc. of the Rencontres de Phys. La Thuile March* (M. Greco (Frontieres 1988))
 —. (1989)a, *Nuovo Cimento C* **12**, 75
 —. (1989)b, *Annals of the New York Academy of Science* **571**, 584
 —. (1991)a, *Nuovo Cimento C* **14**, 171
 —. (1991)b, *Nuovo Cimento B* **106**, 1257
 Alekseyev E. N. et al. (1979), *Procc. XVI Inter. Cos. Rays Conf. (Kyoto)* **10**, 276
 —. (1987), *JETP Lett.* **45**, 589
 Amaldi E. et al. (1987)a, *Europhys. Lett.* **3**, 1325
 —. (1987)b, *Proc. of the Rencontres de Phys. La Thuile March* (M. Greco (Frontieres 1988))
 —. (1989), *Annals of the New York Academy of Science* **571**, 561
 Badino G. et al. (1984), *Nuovo Cimento* **7**, 573
 Beresnev V. I. et al. (1979), *Procc. XVI Inter. Cos. Rays Conf. (Kyoto)* **10**, 293
 Bionta R. et al. (1987), *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1494
 Castagnoli C. et al. (1987), *I. A. U. Circular*, 4323
 Chudakov A. E. (1989), *Annals of the New York Academy of Science* **577**, 561
 Dadykin V. L. et al. (1992), *JETP Lett.* **56**, 426
 Dadykin V. L. & Ryazhskaya O. G. (2008), *Astron. Lett.* **34**, 581
 De Rujula A. (1987), *Phys. Lett. B* **193**, 514
 Domogatsky G. V. & Zatsepin G. T. (1965), *Proc. 9th ICRC London* **39**, 1030
 Drago A. et al. (2008), *pre-print, private communication*
 Gamow G. & Schoenber M. (1941), *Phys. Rev.* **59**, 539
 Hirata K. et al. (1987), *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1490
 Imshennik V. S. & Ryazhskaya O. G. (2004), *Astron. Lett.* **30**, 14
 Lande K., Bozoki G., Frati W., Lee C. K., Fenyves E. & Saavedra O. (1974), *Nature* **251**, 485
 Saavedra O. et al. (1984), *Int. Conf. On Neutrino Phys. and Astrop. Neutrino'84*, 562
 O. Saavedra. (2007),
http://lvd.ras.ru/SN1987A/materials/posters/Saavedra_SN1987a_20071.ppt
 K. Scholberg. (1999),
 arXiv: astro-ph/9911359v1