

Neutrinos, les pantasmes del universu

(c) Kamioka Observatory, ICRR (Institute of Cosmic Ray Research),
The University of Tokio

Por **Pablo Fernández Menéndez**
Miembro d'EGADS, Super Kamiokande, T2K
Hyper Kamiokande, T2HK
Departamentu de Física Teórica
Universidá Autónoma de Madrid

Notes del Editor:

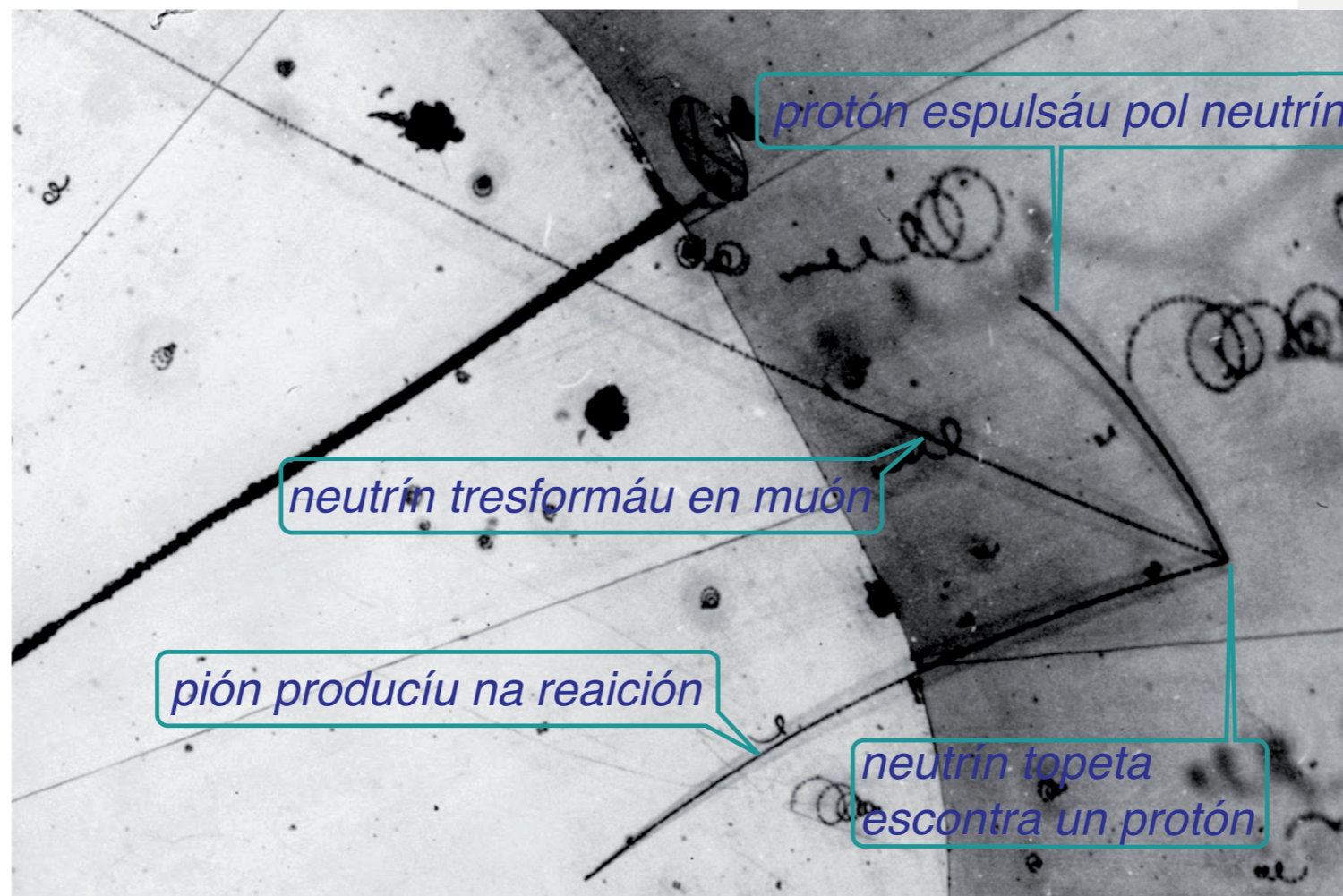
Nesti artículu empléguese términos propios de la física de partícules, como les “especies” o los niveles enerxéticos de los neutrinos y de los quarks («sabor», «lo baxo» etc.). Otramiente, los estremaos «experimentos» que se citen puen ser asimilaos a instalaciones pa la investigación nes materies («Kamiokande», «Baksan», «Super Kamiokande», «IceCube», etc.). Nes referencies bibliográfiques respetámosles como les apurre l'autor, faciendo esceición a la norma que ye vezu nesta publicación.

ENTAMU

Los neutrinos son, güei, les partícules más desconocíes, misterioses ya interesantes nel llamáu Modelu Estándar de la Física de Partícules, que describe toles partícules y les sos interaiciones. Magar que los neutrinos namás interaicionen por aciu de les fuerces débil y gravitatoria, tán rellacionaos con munchos campos de la física fundamental por cuenta de les sos peculiaridaes.

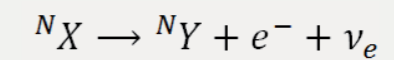
Nesti artículu –y cola escusa del premiu Nobel de 2015 que se-yos concedió a Takaaki Kajita y Arthur McDonald– recuéyense a cencielles y accesible a tolos públicos los descubrimientos más señalaos rellacionaos colos neutrinos, percorriendo la so historia dende'l so postuláu teóricu hasta los últimos descubrimientos y futures investigaciones p'afayar les sos propiedaes ya implicaciones na conocencia de la naturaleza del universu onde vivimos.

Esperando qu'esta llectura sía namás un primer pasu nesti tema y que nun sía'l postreru, les referencies bibliográfiques indicaes son abundoses.



DESCUBRIMIENU

La historia de los neutrinos empecipia nel añu 1930, cuando'l físicu W. Pauli los propunxo per primer vegada teóricamente. Pauli [23], [25], postuló la existencia d'una partícula neutra y de masa mui pequeña que surdiría en dalgunos decayimientos radioactivos, en concreto los llamaos decayimientos β . Estos procesos asoceden cuando un nucleu nun ye estable y decái a otru nucleu emitiendo delles partícules. Los decayimientos β . espresense asina:

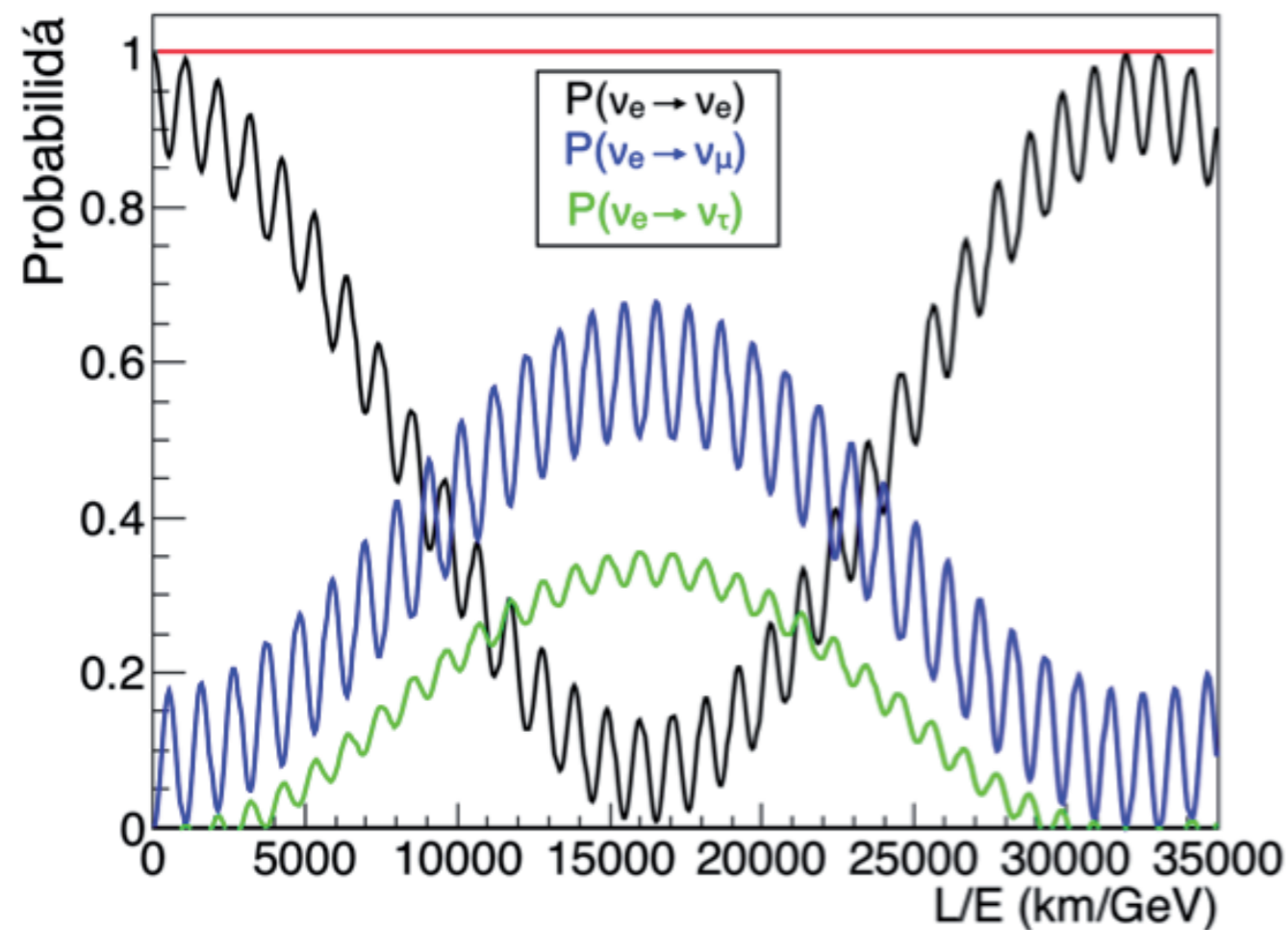


onde X ye un elementu cualquiera de la tabla periódica, Y ye l'elementu que tien un protón más que X , N ye'l númberu de protones y neutrones del isótopu, e^{-} ye un electrón y ν_e ye'l neutrín collaciú del electrón.

Nos experimentos que midíen les propiedaes del electrón víase que la so enerxía nun yera lo que s'esperaría si los neutrinos nun existieren, ye dicir un valor fixu, la diferencia de les mases de ${}^N Y$ y ${}^N X$. Pela cueta, la enerxía del electrón tomaba tolos valores posibles ente cero y la diferencia de mases. Esto violaba'l caltenimientu de la enerxía total del conxuntu. Asumiendo la existencia del neutrín soluciónase darréu que la suma de les enerxías d'electrón y neutrín sí puen sumar la diferencia de mases d'entrambos dos.

Figura 1. El primer neutrín interaicionando nuna cámara d'hidróxenu detectóse'l 13 de payares de 1970. Argonne National Laboratory.

Los neutrinos supónense ensin masa por cuenta lo difícil que ye detectar ún: traviesen el planeta y apenes interaicionen col restu la materia. Unos 3×10^{15} neutrinos traviesen el nuesu cuerpu cada segundu pero namái 1 ó 2 interaicionarán con elli a lo llargo de la nuesa vida



IZQUIERDA

Figura 2. Probabilidad de qu'un neutrín electrónicu camude de sabor según la distancia que percuere (L) y de la so enerxía (E)

Esta nueva partícula propuesta nun s'afitó nun esperimentu hasta l'añu 1956 por C. Cowan y F. Reines cuando afayaron el *neutrín electrónicu* [24].

Col tiempu y pola mor del continuu desendolque del entendimientu de la interaición débil, otros físicos decatáronse de que yera natural pensar que si l'electrón tenía otros dos xeneraciones de **leptones** cargaos, el **muón** y el **tau**, tendría d'haber neutrinos qu'acompañaren a estos leptones como nel casu electrónicu. Los neutrinos del muón y del tau descubriéronse tamién experimentalmente nos años 1962, por L. Lederman, M. Schwartz y J. Steinberg, y 2000 per aciu del esperimentu DONUT respetivamente.

Esto dexa una imaxe del Modelu Estándar con un neutrín pa caúna de les xeneraciones de leptones y tamién habiendo una analogía ente *quarks* y *leptones*, entrambos dos con dos tipos pa caúna de les xeneraciones.

Al contrario de la mayoría de les partícules descubiertes, daqué tan fundamental como la masa de los neutrinos sigue siendo una incógnita y asina, de fechu, nel Modelu Estándar supónense ensin masa. Les demás propiedaes son abondo bien conocíes y coincidentes cola predicción teórica. Esto ye por cuenta de lo difícil que ye detectar un neutrín: la mayoría traviesa'l nuesu planeta ensin problema y apenes in-

teraicionen col restu de la materia. Afortunadamente, los neutrinos, magar ser una de les partícules más llixeres del universu, conformen aproximao'l 0,3% de tola masa del mesmu, polo que la cantidá de neutrinos ye impresionante, faciendo posible la so deteición. Talo ye asina, qu'unos 3×10^{15} neutrinos traviesen el nuesu cuerpu cada segundu, pero namái ún o dos d'ellos interaicionarán con él a lo llargo de la nuesa vida.

OSCILACIONES DE NEUTRINOS

Cuasi en paralelo colos descubrimientos anteriores, la física teórica yá formulara la teoría cuántica de la fuerca débil, lo más intenso pa los neutrinos. Con esto predíxose cómo se portaríen y produciríen.

Les fontes más abondoses de neutrinos son el sol, les supernoves y los rayos cósmicos al interaicionar.

En 1957, B. Pontecorvo estudió per primer vegada l'impautu que tendría nes midíes de neutrinos d'estes fontes si los neutrinos tuvieren masa. Les consecuencias del calter masivu de los neutrinos ye qu'estos podríen camudar d'un tipu de neutrinos a otru conforme s'arrobinaeren. Les oscilaciones determínense por una matriz ortogonal nomada *PMNS* (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata).

A lo cabero de la década de los 60, l'esperimentu Homestake midió per primer vegada neutrinos solares, pero nunes cantidaes que yeren más o menos un terciu de les predicciones teóriques feches por J. Bahcall acordies col so modelu solar [22].

Esti desalcuerdu ente les midíes y el modelu teóricu permaneció cuasi trenta años hasta los esperimentos Sudbury Neutrín Observatory (SNO, Fig. 3) en Canadá y Super Kamiokande (SK) en Xapón (Fig. 5). Estos dos esperimentos foron los responsables del Nobel de 2015 otorgáu a A. MacDonald y a T. Kajita.

El primeru d'ellos midía los neutrinos solares con muncha más precisión que Homestake; inda qu'asina nun dexó de ver un defectu de cuasi dos tercios nos neutrinos que midía en comparanza col modelu solar. SNO yera un esperimentu asitiáu cerca d'Ontario, 2.100 m baxo tierra nuna antigua mina de níquel. SNO consistía en 1.000 tonelaeas d'agua pesao contenío nuna esfera de 6m de radiu ya instrumentau con 9.600 deteutores de lluz llamaos fotomultiplicadores. La lluz que deteuten ye lo produció poles partícules cargaes surdies nes interaiciones de neutrinos (de normal estes partícules cargaes son los leptones cargaos correspondientes al sabor del neutrín qu'interaciona). Esta lluz produzse por

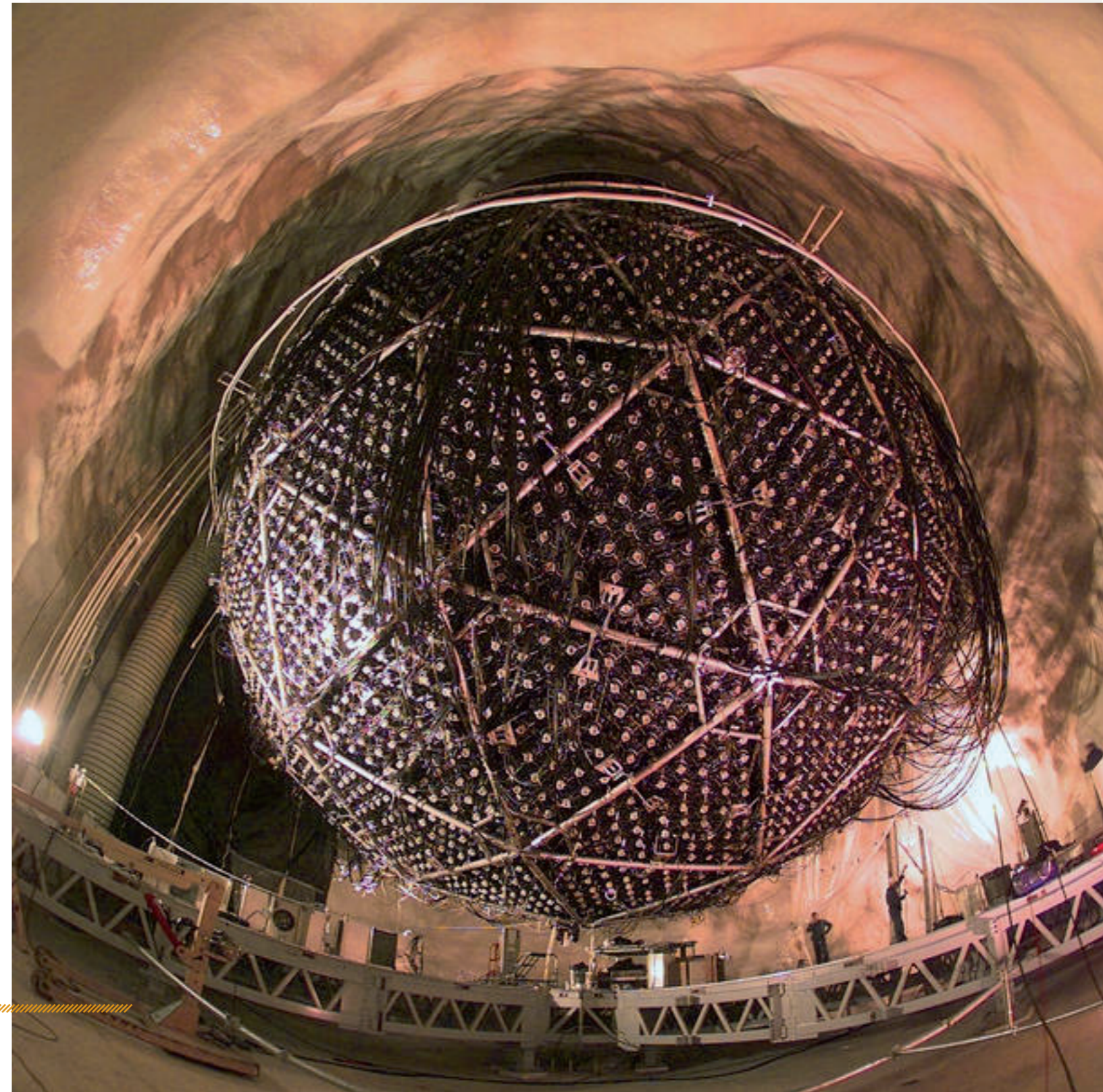
cuenta de que la velocidá d'estes partícules ye mayor que la velocidá de la lluz nesi mediu –nesi casu l'agua pesao–.

Los datos de SNO foron afechos al fluxu de neutrinos del sol y asumiendo la existencia de les oscilaciones de neutrinos, llogrando la resultancia de qu'estes oscilaciones teníen d'esistir pa esplicar les midíes.

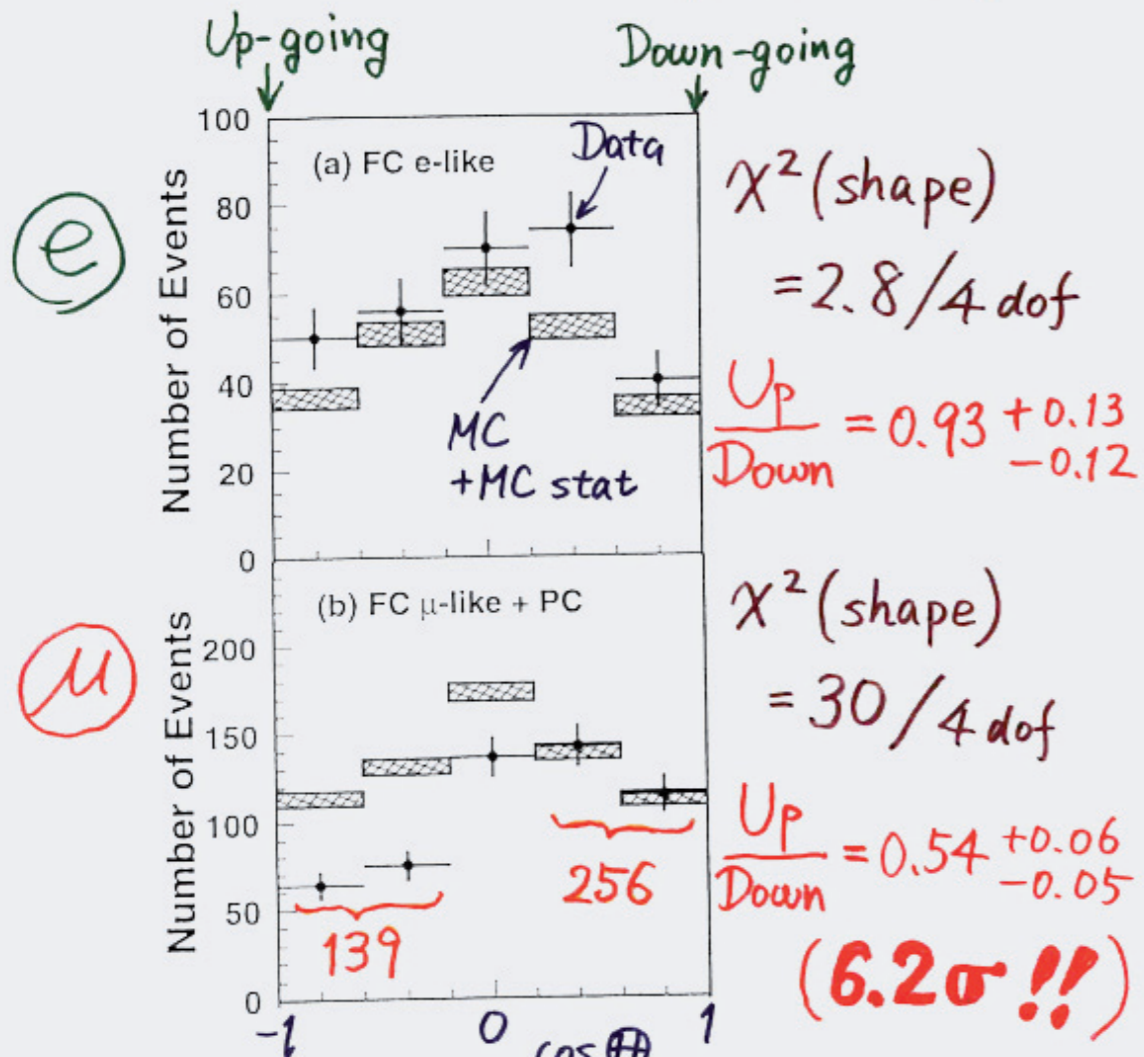
El segundu esperimentu produxo la evidencia necesaria pa les oscilaciones de los neutrinos al midir los neutrinos atmosféricos. Super Kamiokande ye asemeyáu a SNO, pero utilizando agua perpuro en llugar d'agua pesao y con un volume de 50.000 tonelaeas. Esti ta asitiáu nuna antigua mina de zinc na costa oeste de Xapón ya instrumentáu con más de 11.000 fotomultiplicadores de mediu metru de diámetru y onde se produz lluz pol mesmu mecanismu esplicáu enantes [1-13]. Gracias al so tamañu y a lo avanzaos de los sos fotomultiplicadores, Super Kamiokande sigue siendo'l mayor deteutor soterrañu del mundiu y líder na física fundamental, sobre manera la de neutrinos.

DERECHA

Figura 3. Vista dende fuera del deteutor SNO. The Sudbury Neutrino Observatory.



Zenith angle dependence (Multi-GeV)



* Up/Down syst. error for μ -like

Prediction (flux calculation $\dots \lesssim 1\%$
 1km rock above SK $\dots 1.5\%$) 1.8%

Data (Energy calib. for $\uparrow \downarrow \dots 0.7\%$
 Non ν Background $\dots < 2\%$) 2.1%

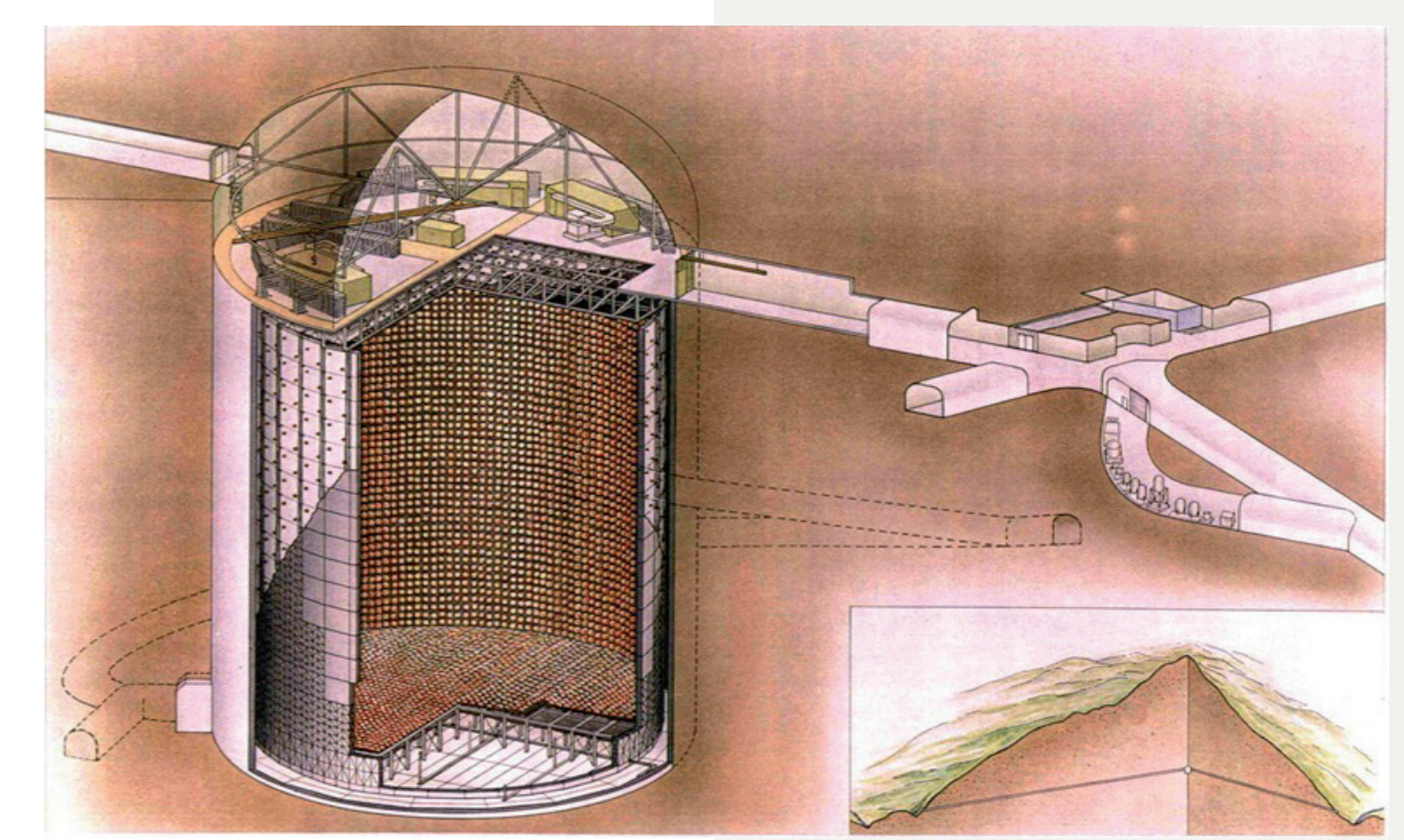
Entrambos esperimentos midieron escesos y defeutos nos neutrinos de dellos tipos, siendo les sos resultancias consistentes ente sigo y coles predicciones teóricas de Pontecorvo asumiendo la existencia de les oscilaciones de neutrinos.

IZQUIERDA
 Figura 4. Trespáncia presentada por T. Kajita esplicando los resultaos de neutrinos atmosféricos midíos por sk en 1998

ABAXO
 Figura 5. Vista interior del deteutor Super Kamiokande. The Kamioka Observatory.

LOS NEUTRINOS COMO ASTROPARTÍCULES

La física de neutrinos nun apara namái na física de partícules, sinón que son producidos na mayoría de procesos astrofísicos. Como diximos enantes, lo baxo produz neutrinos y de la mesma manera toles estrelles del universu. Pero ensin dulda, onde más neutrinos se producen y nes esplosiones d'estrelles muncho más masives que'l nuesu sol cuando algamen el final de la so vida. Estes esplosiones llámense *supernoves* y son más brillantes que galaxies enteres. Magar la cantidá de lluz qu'emite ye magnífico, la cantidá de neutrinos qu'emite ensombrécelo, y que'l 99% de tola enerxía desatao na esplosión ye en forma de neutrinos.



El 24 de febreru de 1987 [32], l'esperimentu precursor de Super Kamiokande, Kamiokande, y otros dos esperimentos, IMB, nos Estaos Xuníos y Baksan en Rusia, tuvieron la fortuna de qu'una estrella españare en forma de supernova diba unos 160.000 años na Gran Nube de Magallanes. Nesta supernova estímase que se produxeron 10^{58} neutrinos, de los que 1.013 nos travesaron a caún. Pero por cuenta de nueves de lo esmucidizos que son los neutrinos, ente los tres deteutores, namái se midieron 25 d'ellos, 12 Kamiokande, 8 IMB y 5 Baksan (Fig. 6). Estos neutrinos llegaron a la Tierra tres hores primero que los fotones, esto ye, primero que pudiera vese la supernova. Esto nun ye por cuenta de que los neutrinos viaxen a mayor velocidá que

L'españíu d'una supernova produxo 10^{58} neutrinos, de los que 1.013 travesáronnos a caún. Pero namái 25 d'ellos foron midíos polos 3 deteutores que funcionaben nesi momentu, febreru del 1987

la lluz, como se llegó a pensar colos resultaos del esperimentu OPERA, sinón que viaxen práuticamente a la velocidá de la lluz y por cuenta de qu'apenes interaicionen col restu de la materia puen escapar enantes al traviés de tola materia espardío pola supernova.

Con too y con eso, de los pocos neutrinos deteutaos, espublizáronse miriades d'artículos en rellación a los neutrinos d'esta supernova, tanto de física de partícules y fundamental como d'astrofísica, ayudando al desenvolvimientu y entendimientu de la complicada física de les supernoves. Esti descubrimientu tradúxo-se n'otru premiu Nobel pa los neutrinos, personificáu en M. Koshiba y R. Davis Jr., direutores de Kamiokande ya IMB respetivamente.

DERECHA

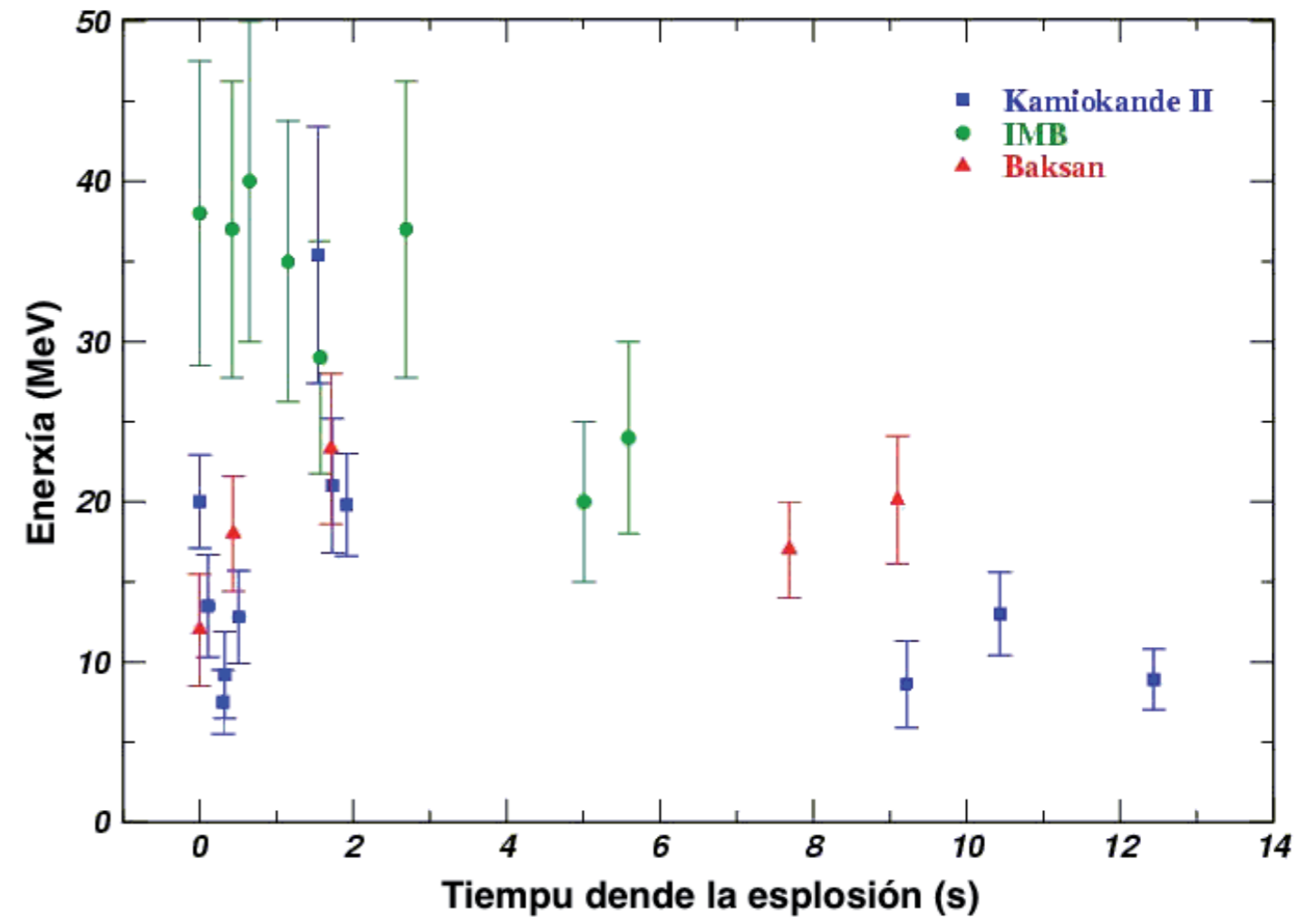
Figura 6. Enerxía y tiempu de tolos neutrinos detectaos en Kamiokande, IMB y Baksan de la supernova 1987a. S. L. Shapiro et al.

LA MASA DE LOS NEUTRINOS Y LA SO TRECENDENCIA NA FÍSICA FUNDAMENTAL

El que los neutrinos camuden, como dicimos d'un sabor a otru significa que los neutrinos tienen masa, polo que se tuvo que camudar el Modelu Estándar de la física fundamental. Darréu que los neutrinos nun tienen carga llétrica nin de color, ábrese la posibilidá de que los neutrinos

sían partícules Majorana, esto ye, que los neutrinos sían la so mesma antipartícula. Anguaño, namás qu'hai valores llende de les mases de los neutrinos pola so masa pequeña, de fechu los neutrinos son hasta güei la partícula masiva más llixera que'l Modelu Estándar contién.

Los neutrinos namás interaicionen con otros partícules por aciu de les fuerces de la gravedá y la débil; magar el nome, la fuerca gravitatoria ye enforma menor que la débil. Cola conocencia actual, los neutrinos camuden igual que los quarks, pero siendo l'amiestu ente los distintos tipos de neutrinos enforma mayor, esto podría indicar la existencia d'una simetría adicional a les del Modelu Estándar nel sector de los quarks.



Lo mesmo asocede al respetive de la violación de la simetría ente partícules y antipartícules, tamién llamada simetría CP. Nel sector de los quarks apenes hai violación de CP, ente que les últimes resultancies, anque non definitives, indiquen que nel sector de los neutrinos esta simetría ta fuertemente rota.

Los neutrinos son importantes tamién en cosmología porque'l so númeru d'especies

determina la bayura de caún de los elementos nel universu.

Munches incógnites hai al rodiu de los neutrinos, siendo estes de gran importancia pa la descripción de la física de partícules elementales [34].

EL FUTURU DE LOS NEUTRINOS

Ta claro que'l futuru de cualquier neutrín tará perllón pa nós al viaxar práuticamente a la velocidad de la lluz respeto a nós y ser asina la dilatación temporal enorme. Otra cosa ye lo que podamos depender nel nuesu futuru de los pocos que queden nos nuestos deteutores y de qué nuevos llugares del universu nos lleguen.

Güei, la física de neutrinos ye una de les puertes al descubrimientu de nueves partes de la física fundamental qu'entá nun conocemos. Dende'l puntu de vista teóricu especular cola conexón que pueda existir cola física d'altos enerxíes, cercana a la de la unificación de toles fuerces físiques que conocemos, col descubrimientu de nueves simetrías del universu y de nuevos oxetos cósmicos.

Gustárame albidrar cuatro descubrimientos que se fadrán nel curtiu plazu: la masa de los neutrinos, la so violación de la simetría CP , fenómenos astrofísicos nos que tán implicaos, y los neutrinos ultraenerxéticos.

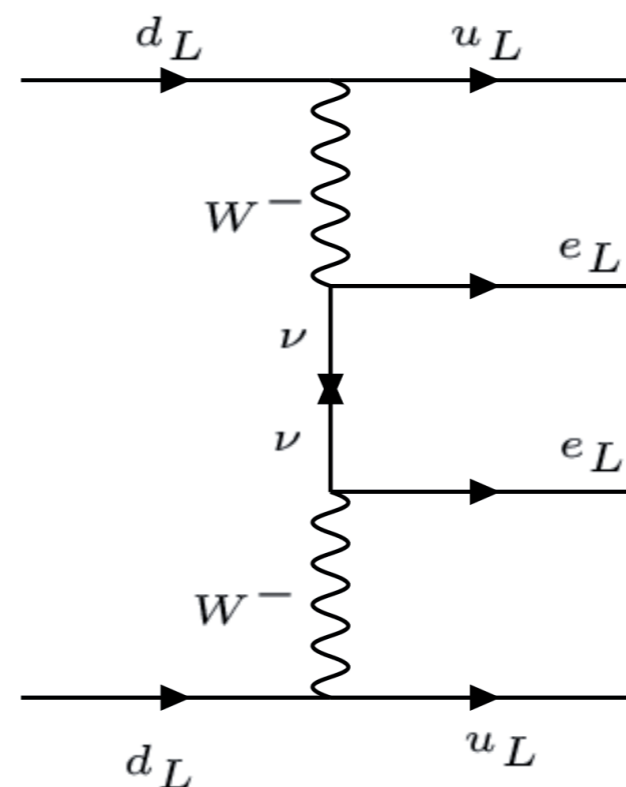
Los neutrinos son tán estraños respetive del restu de les partícules qu'inclusive pue que sían la so propia antipartícula: esti tipu de partícules son llamaes *de Majorana*, n'honor al gran físicu que les formuló teóricamente. Esa sigue siendo una gran incógnita y vien amestada a la masa de los neutrinos, y que esti ye un mecanismu alternativu d'alquisición de masa a la interacción col bosón de Higgs. Esti descubrimientu depende en gran parte de la masa que tengan los neutrinos, pero anguaño existen munchos esperimentos en tol mundiu buscando respuestes que se podríen llograr nunos 10 años. Ente ellos destaquen GERDA [29], COBRA [30], KamLAND-Zen [35] o SNO+ [36].

Acordies colos últimos datos, la simetría carga-paridá (CP) ye fuertemente violada polos

neutrinos, al contrariu que polos quarks, onde la fase que mide esti caltenimientu ye práuticamente nula. Esta diferencia ente entrambos sectores abre munches entrugues sobre'l porqué de les sos diferencies y el so orixe. Per otru llau, la gran violación de CP nos neutrinos ye clave pa explicar l'asimetría ente materia y antimateria nel nuesu universu. Esto ensin dulda, va poder resolverse nos próximos 10 o 15 años cola ayuda de los presentes esperimentos como $\tau 2\kappa$ [14] (Fig. 7), Nova o'l futuru $\tau 2HK$ [20], con neutrinos de aceleradores y Super Kamiokande o los futuros Hyper Kamiokande [19] y DUNE [31], midiendo neutrinos atmosféricos.

Ensin dulda, Super Kamiokande y tolos esperimentos de neutrinos de gran tamañu tán sollertes énte'l casu de qu'asoceda una supernova como 1987a. Colos deteutores actuales la información que podría atopase d'estos neutrinos sedría de gran relevancia pa la física fundamental y l'astrofísica. Nesti sentíu, Super Kamiokande ta un pasu per delante y ta entamando una gran meyor llamada SuperK-Gd, que consiste n'amestar gadolinu al agua pa poder deteutar tamién los neutrones que produzan los neutrinos al interaccionar nel deteutor. Esto va dexar estremar ente neutrinos y antineutrinos, lo que va facer posible estudiar les sos diferencies apurriendo información crucial de los procesos que caún d'ellos traviesa. Amás de les supernoves cercanes que puedan asoceder, SuperK-Gd [21], [15], va poder tamién midir los antineutrinos de toles supernoves qu'asocedieron en tola historia del universu, dando información sobre la evolución estelar y galáctica de la mesma.

La incógnita postrera y abondo recién al rodiu de los neutrinos ye la existencia de neutrinos d'enerxíes enormes y en cantidaes enforma mayores a les esperaes. Estos neutrinos midié-

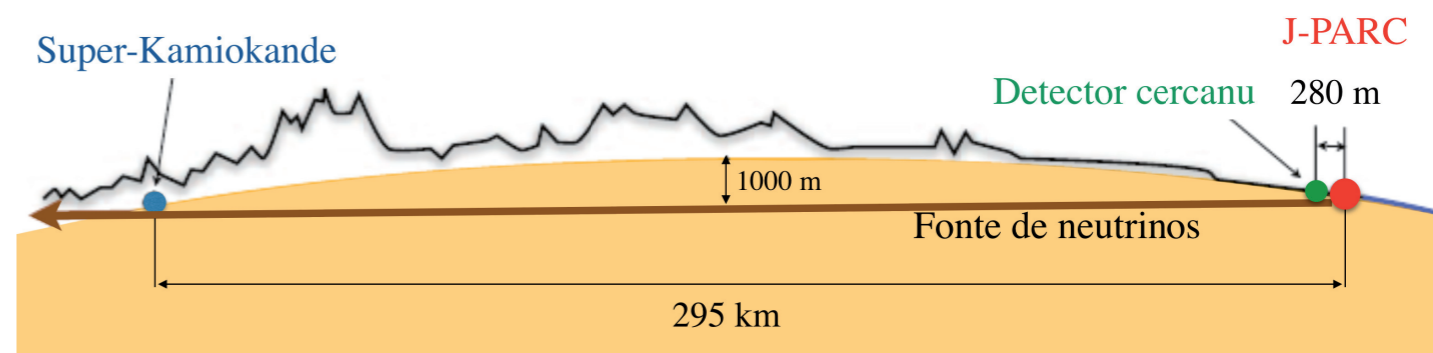


ARRIBA

Figura 7. Esquema del Experimentu $\tau 2\kappa$ en Xapón. Experimentu $\tau 2\kappa$.

ABAXO

Figura 8. Neutrín más enerxéticu midíu por IceCube, nomáu Bert. Experimentu IceCube.



ronse nel esperimentu IceCube (Fig. 8), deteutor formáu por más de 5.000 fotomultiplicadores somorguiaos en fileres nel xelu del polu Sur. Deteútaronse, hasta'l día de güei unos 20 neutrinos de más de 100 TeV (unes 10 veces más enerxéticos que los protones del LHC). L'orixe d'estos neutrinos ye desconocíu entá, pero sí se tien la certidume de que provienen de fuera del sistema solar. Propunxéronse delles teoríes pa explicar esto magar que nun hai nada definitivo. Nel futuru cercanu más esperimentos van atacar el problema, como l'ampliación d'IceCube [26], [27], [28], KM3NET [33] (nel mar Mediterraneu) o Baikal (nel llagu Baikal en Rusia).

Amás de too esto, y probablemente de la que s'esclarien los problemes anteriores, entá quedará por midir los neutrinos producidos nel Big Bang, conocíos como'l fondu cósmicu de neutrinos [19]. Hai unos 300 neutrinos provenientes del Big Bang en cada centímetru cúbicu del universu, pero son esaxeradamente difíciles de deteutar pola so enerxía perbaxo, unos -271°C –cuasi el cero absolutu– pola mor de la espansión continua del universu, faciéndolos práuticamente imposibles de deteutar güei en día.

La conocencia y medida d'estos neutrinos dexaríanos viaxar a namás un segundu dempués del Big Bang, coles obvies ya importantes consecuencies qu'esto tendría pal nuesu entendimientu de la mayor de les entrugues que'l ser humanu foi a facese, ¿d'aú vien too y cómo funciona?

Referencies bibliográfiques

- [1] Solar Neutrino Measurements in Super-Kamiokande-IV, The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. D 94, 052010 (2016), arXiv: 1606.07538
- [2] Real-Time Supernova Neutrino Burst Monitor at Super-Kamiokande, The Super-Kamiokande Collaboration, Astropart. Phys. 81 (2016) 39-48, arXiv: 1601.04778
- [3] Supernova Relic Neutrino Search with Neutron Tagging at Super-Kamiokande-IV, The Super-Kamiokande Collaboration, Astropart. Phys. 60, 41 (2015), arXiv:1311.3738
- [4] First Indication of Terrestrial Matter Effects on Solar Neutrino Oscillation, The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 112, 091805 (2014), arXiv:1312.5176
- [5] Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande, The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 110, 181802 (2013), arXiv:1206.0328
- [6] Search for Differences in Oscillation Parameters for Atmospheric Neutrinos and Antineutrinos at Super-Kamiokande. The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 107, 241801 (2011)
- [7] Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562-1567
- [8] Measurements of the Solar Neutrino Flux from Super-Kamiokande's First 300 Days. The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1158-1162
- [9] Search for Proton Decay via $p \rightarrow e + \pi^0$ in a Large Water Cherenkov Detector. The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 3319
- [10] Study of the atmospheric neutrino flux in the multi-GeV energy range. The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Lett. B436 (1998) 33-41
- [11] Measurement of a small atmospheric ν_μ / ν_e ratio. The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Lett. B433 (1998) 9-18
- [12] Constraints on neutrino oscillation parameters from the measurement of day-night solar neutrino fluxes at Super-Kamiokande. The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 1810-1814
- [13] Measurement of the flux and zenith-angle distribution of upward through-going muons by Super-Kamiokande. The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 2644
- [14] Measurement of Muon Antineutrino Oscillations with an Accelerator-Produced Off-Axis Beam, Phys. Rev. Lett. 116, 181801 (2016)
- [15] GADZOOKS! Antineutrino Spectroscopy with Large Water Cherenkov Detectors. Phys.Rev.Lett. 93 (2004) 171101
- [16] First measurement of muon-neutrino disappearance in NOvA, Phys.Rev. D93 (2016) no.5, 05110
- [17] First measurement of electron neutrino appearance in NOvA, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.15, 151806
- [18] Can one measure the Cosmic Neutrino Background?, Nuclear Theory (nucl-th)
- [19] Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment Detector Design and Physics Potential —, High Energy Physics - Experiment (hep-ex)
- [20] T2HK: J-PARC upgrade plan for future and beyond T2K, High Energy Physics - Experiment (hep-ex)
- [21] Status of GADZOOKS!: Neutron Tagging in Super-Kamiokande, Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 353-360
- [22] Bahcall, John N.; Serenelli, Aldo M.; Basu, Sarbani (2005). "New Solar Opacities, Abundances, Helioseismology, and Neutrino Fluxes". The Astrophysical Journal. 621 (1): L85–8
- [23] E. Fermi (1934). "Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I". Zeitschrift für Physik A. 88 (3–4): 161–177
- [24] C. L. Cowan Jr.; F. Reines; F. B. Harrison; H. W. Kruse; et al. (1956). "Detection of the Free Neutrino: a Confirmation". Science. 124 (3212): 103–4.
- [25] "Liebe Radioaktive Damen und Herren", Lettre du 4 décembre 1930 adressée pour lecture au congrès des physiciens de Tübingen (Allemagne).
- [26] The Contribution of Fermi-2LAC Blazars to the Diffuse TeV-PeV Neutrino Flux
IceCube Collaboration: M. G. Aartsen et al
- [27] Very High-Energy Gamma-Ray Follow-Up Program Using Neutrino Triggers from IceCube. IceCube, MAGIC and VERITAS Collaborations: M. G. Aartsen et al
- [28] Constraints on Ultra-High-Energy Cosmic Ray Sources from a Search for Neutrinos Above 10 PeV with IceCube. IceCube Collaboration: M. G. Aartsen et al
- [29] Search of Neutrinoless Double Beta Decay with the GERDA Experiment
Nucl. Part. Physics Procs. 273 -- 275 (2016) 1876
- [30] Results of a search for neutrinoless double- β decay using the COBRA demonstrator, Physical Review C Vol. 94, 024603 (2016)
- [31] Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 1: The LBNF and DUNE Projects, Instrumentation and Detectors (physics.ins-det)
- [32] Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A, Phys. Rev. Lett. 58, 1490
- [33] Letter of Intent for KM3NeT 2.0, Instrumentation and Methods for Astrophysics (astro-ph.IM)
- [34] Theoretical Status of Neutrino Physics, High Energy Physics - Phenomenology (hep-ph)
- [35] Search for Majorana Neutrinos near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen
- [36] Current Status and Future Prospects of the SNO+ Experiment. Phys. Rev. Lett. 117, 082503 (2016)