

Nötrinolardan Standard Model ve Ötesine Kısa Bir Yolculuk

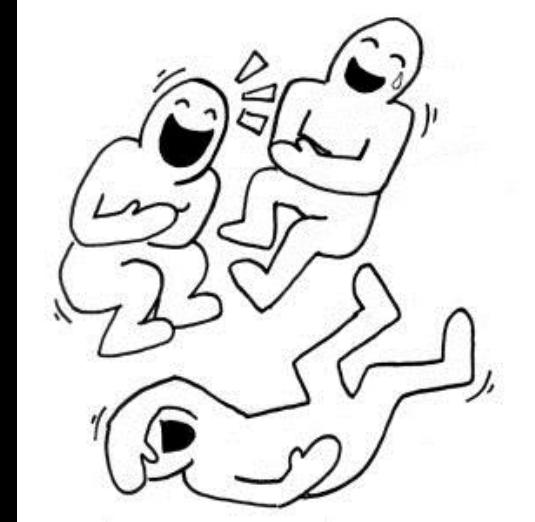
Umut Kose



Turkish Teachers Programme
28 July-01 August 2014
CERN



**Sunum sırasında glmek,
kahkaha atmak serbest hatta
yaşam için bir gerekliliktir.**



Sanırım daha önceki derslerde bahsi geçmişti! Değil mi?

Toplamda kaç parçacık var?
Bunların kaçı temel parçacık?
Bu parçacık ailesinde nötrinonun yeri ve önemi nedir?

???

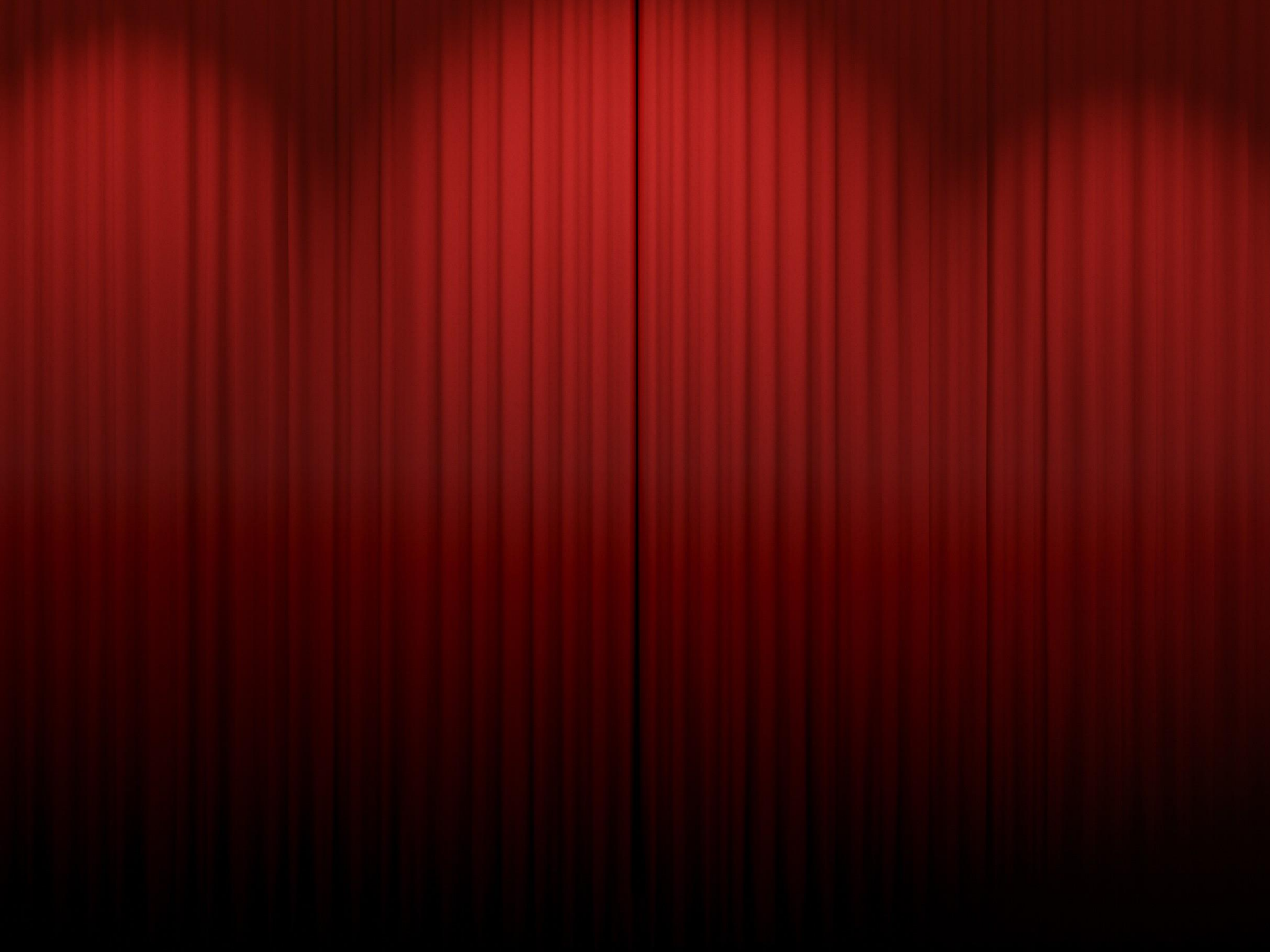


Fotondan sonra evrende en yüksek yoğunlukta bulunan parçacıklar nötrinolardır.

Evreni anlamak nötrinoları anlamaktan başlar!

Nötrinolar her yerde! Bir nötrino okyanusu içinde yaşıyoruz!
Asosyal, şizofren bir o kadar da gizemli ve sürprizlere açık....





X-ışınlarının keşfi: W. Röntgen 1895.



1901



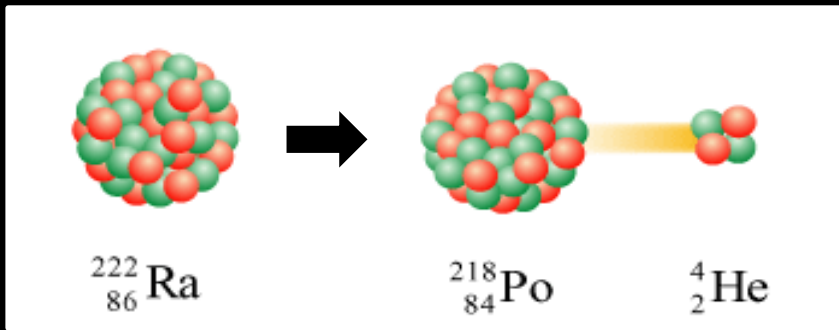
Radyoaktivite'nin keşfi: H. Becquerel 1896



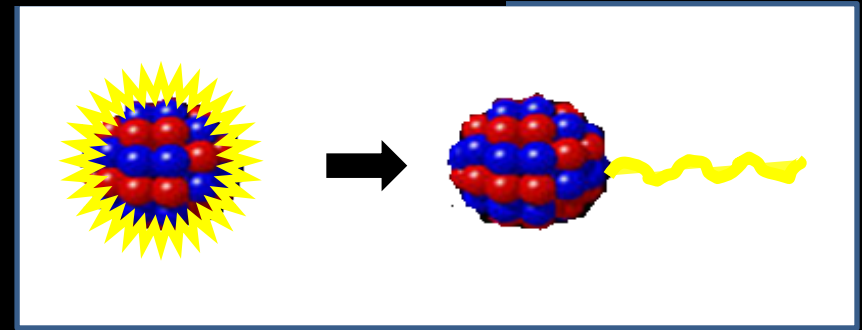
1903

, E. Rutherford 1899

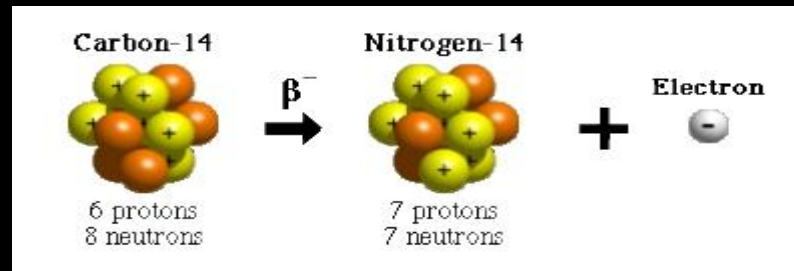
Alpha bozunumu



Gamma ışıması



Beta bozunumu (1900'lerin başında bilinen hali)



PROBLEM: beta ışımada açığa çıkan elektronların kinetik enerjilerinin
→ **SÜREKLİ (CONTINUOUS)** veya **KESİKLİ (DISCRETE) SPEKTRUM?**

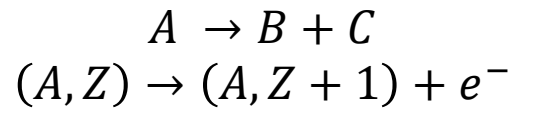
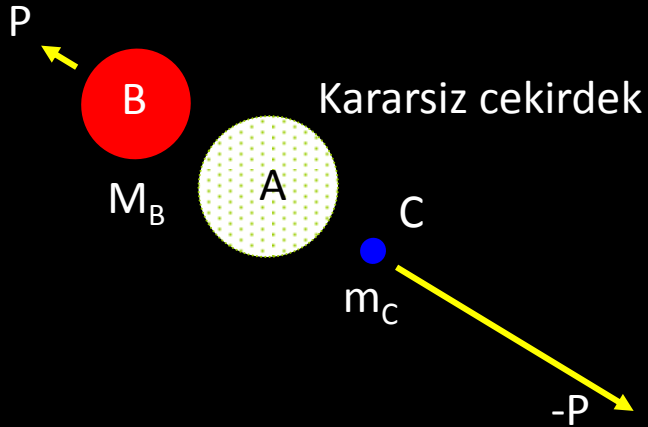
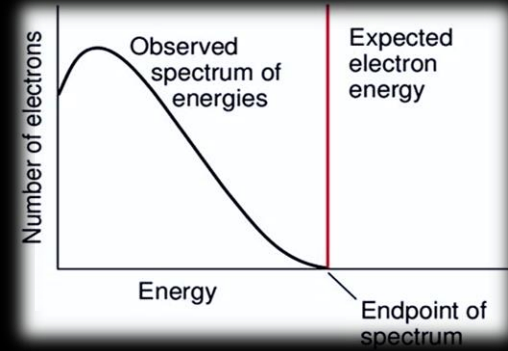
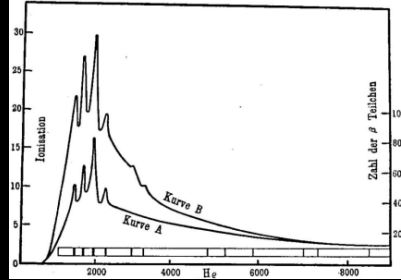
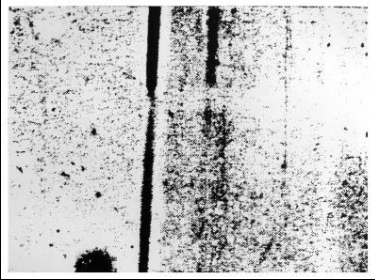


15 yıl boyunca süren araştırmalar:

1911-1912: Van Bayer, O. Hahn, L. Meitner → kesikli spektrum Z. Physik 12 (1911) 273.

J. Chadwick 1914 → elektronlar tek enerjili değil!! Verh. Deutsch. Phys. Ges. 16 (1914) 383

1927 Ellis & Wooster → Sürekli!! Proc. R. Soc. London. Ser. A 117 (1927) 109.



$$P = \frac{1}{2M_A} \sqrt{[M^2 - (M_B - m_C)^2][M^2 - (M_B + m_C)^2]}$$

Elektronun tek enerjili bir değere sahip olması gerekmektedir!

ENERJİ KORUNUM YASASI ÇIĞNENMEKTEDİR!



Niels Bohr, 1929, “At the present stage of atomic theory, however, we may say that we have no argument, either empirical or theoretical, for upholding the energy principle in the case of β -ray disintegrations” “ *β -ray spectra and Energy Conservation, 1929 unpublished manuscript*”:
N. Bohr collected works, Vol. 9, Nuclear Physics (1929-1952).

Zamanın bir diğ er problemi “Spin istatistik problemi”: Atom  ekirdeđi proton ve elektronlardan meydana geldiği d ş n l yordu. Li (6 proton+3 elektron) ve N (14 proton + 7 elektron) bu durumda her ikisinin Fermi-Dirac istatistiğine uyması beklenirken, deneysel veriler Bose-Einstein istatistiğinin ge erli olduğunu g stermekte!!”



Nötrino Hipotezi

Open letter to the group of radioactive people at the Gauverein meeting in Tübingen.

Copy/Dec. 15, 1956 PM

Copy

Physics Institute
of the ETH
Zürich

Zürich, Dec. 4, 1930
Gloriastrasse

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, because of the "wrong" statistics of the N- and Li-6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin 1/2 and obey the exclusion principle and that further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton mass. ~~The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.~~

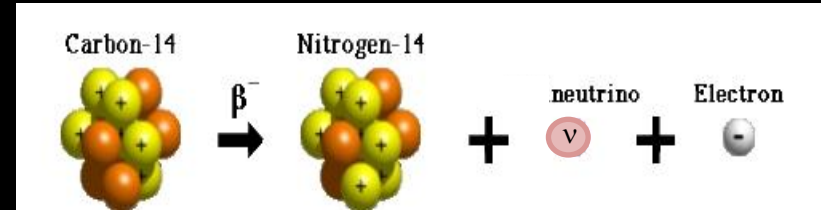
Now it is also a question of which forces act upon neutrons. For me, the most likely model for the neutron seems to be, for wave-mechanical reasons (the bearer of these lines knows more), that the neutron at rest is a magnetic dipole with a certain moment μ . The experiments seem to require that the ionizing effect of such a neutron can not be bigger than the one of a gamma-ray, and then μ is probably not allowed to be larger than $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

But so far I do not dare to publish anything about this idea, and trustfully turn first to you, dear radioactive people, with the question of how likely it is to find experimental evidence for such a neutron if it would have the same or perhaps a 10 times larger ability to get through [material] than a gamma-ray.

I admit that my remedy may seem almost improbable because one probably would have seen those neutrons, if they exist, for a long time. But nothing ventured, nothing gained, and the seriousness of the situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is illuminated by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's better not to think about this at all, like new taxes." Therefore one should seriously discuss every way of rescue. Thus, dear radioactive people, scrutinize and judge. - Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. With my best regards to you, and also to Mr. Back, your humble servant

signed W. Pauli

Wolfgang Pauli, 1930,
 β -bozunumunun enerji spektrumunu ve "spin istatistik" problemini çözmek için "umutsuz çare (desperate remedy)" olarak yüksüz, spini $\frac{1}{2}$ olan bir parçacık önermiştir.



! Lepton numarası korunum yasası bilinmiyordu.

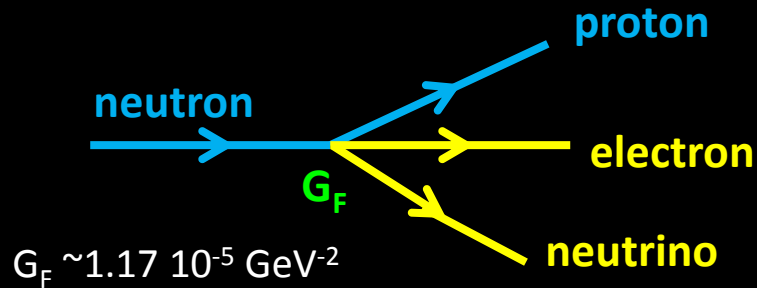
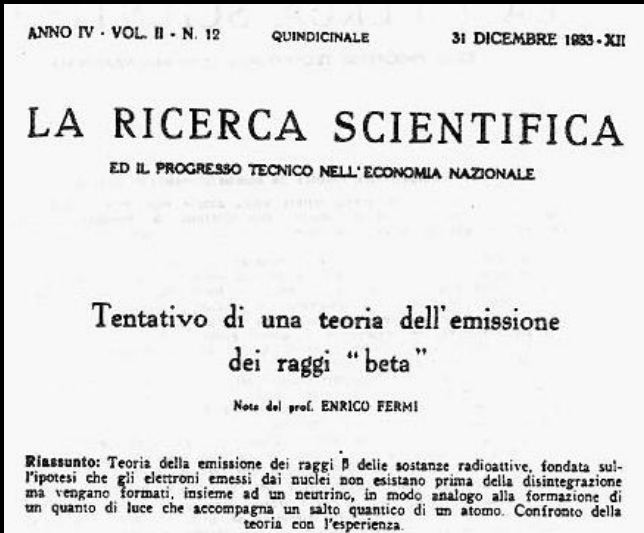


1935

J. Chadwick, 1932, Nötronun keşfi: yüksüz, kütlesi protonun kütlesine yakın, $M(p)=938.3 \text{ MeV}$ ve $M(n)=939.6 \text{ MeV}$ Pauli'nin önerdiği parçacık olamaz. *Nature* 192, 312 (1932).

Ettore Majorana, Werner Heisenberg, Dimitri Iwanenko, 1932, birbirlerinden bağımsız olarak atom çekirdeğinin nötron-proton modelini önerdiler. *W. Heisenberg, Z. Phys.* 77, 1 (1932); *D. Ivanenko, Nature* 129, 798 (1932).

Enrico Fermi, 1933-1934, nötron-proton çekirdek modeli ve Pauli'nin nötrino hipotezini temel alarak beta bozunumunun dinamiğini açıklayan kuramını ortaya atmıştır. *Il Nuovo Cimento*, volume 11, issue 1, p. 1-19 (1933). *Nature* dergisine gönderilen makale "contained speculations too remote from reality to be interest to the reader..." gerekçesiyle kabul edilmemiştir.



$$H = G_F \bar{p} \gamma_\alpha n \bar{e} \gamma^\alpha \nu + h.c.$$

4-Fermion Hamiltonian (V x V)

"Fermi's theory of beta decay" → Standard model uzanan yol

<http://microboone-docdb.fnal.gov/cgi-bin/RetrieveFile?docid=953;filename=FermiBetaDecay1934.pdf;version=1>

conformity with the proposal of Pauli, that not only an electron but also a new particle, the so-called "neutrino" (mass of the order of or smaller than the mass of the electron and no electric charge) is emitted in β decay. We base the proposed theory on the hypothesis of the neutrino.

There is an additional difficulty for the theory of nuclear electrons in that the present relativistic theories of lightweight particles (electrons or neutrinos) are not capable of explaining, in a satisfactory manner, how such particles can be bound in orbits of nuclear dimensions.

It seems appropriate, therefore, to assume with Heisenberg,² that a nucleus consists only of heavy particles—the protons and neutrons. Nevertheless, in order to understand that β emission is possible, we want to try to construct a theory of the emission of lightweight particles from the nucleus in analogy with the theory of emission of light quanta from an excited atom by the usual radiation process. In radiation theory, the total number of light quanta is not constant. Light quanta are created when they are emitted from an atom, and are annihilated when they are absorbed. In analogy with this, we wish to base the β -ray theory on the following assumptions:

(a) The total number of electrons, as well as neutrinos, is not necessarily constant. Electrons (or neutrinos) can be created or annihilated. This possibility, however, is not analogous to the creation or annihilation of an electron-positron pair. If one interprets a positron as a Dirac "hole," one is able to understand that this latter process is simply a quantum jump of an electron between a state of negative energy and a state with positive energy, with conservation of the total number (infinitely great) of electrons.

(b) The heavy particles (neutrons, protons) may be treated (as by Heisenberg) as two internal quantum states of the heavy particle. We formulate this by the introduction of an intrinsic coordinate, ρ , of the heavy particle which can assume only two values: $\rho = 1$ if the particle is a neutron, $\rho = -1$ if the particle is a proton.³

² W. Heisenberg, *Z. Physik* **77**, 1 (1932).

³ Translator's note: The choice of the sign is clearly arbitrary. However, Fermi's choice is opposite to the one which is more commonly used today. See F. Mandl, *Introduction to Quantum Field Theory* (Interscience Publishers, Inc., New York, 1961), p. 79.

(c) The Hamiltonian function of the system consisting of heavy and lightweight particles must be so chosen that each transition from a neutron to a proton is associated with the creation of an electron and a neutrino. The reverse process (change of a proton into a neutron) must be associated with the annihilation of an electron and a neutrino. Note that by this, conservation of charge is assured.

VII. MASS OF THE NEUTRINO

The shape of the continuous β spectrum is determined from the transition probability, Eq. (32). We want to discuss first how this shape depends on the rest mass of the neutrino, μ , in order to determine this constant by comparison with

empirical curves. The mass, μ , is contained in the factor p_σ^2/v_σ . The dependence of the form of the energy distribution curve on μ is most pronounced near the end point of the distribution curve. If E_0 is the maximum energy of the β rays, then one sees without difficulty that the distribution curve for energy E near E_0 , up to a factor independent of E , behaves as

$$p_\sigma^2/v_\sigma = c^{-3}(\mu c^2 + E_0 - E)[(E_0 - E)^2 + 2\mu c^2(E_0 - E)]^{1/2}. \quad (36)$$

In Fig. 1, the end of the distribution curve for $\mu = 0$ and for large and small values of μ is sketched. The greatest similarity to the empirical curves is given by the theoretical curve for $\mu = 0$.

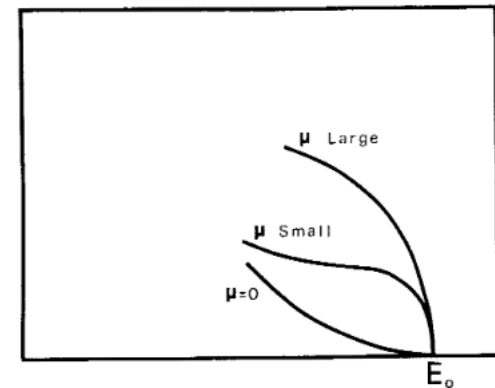


FIG. 1. The end of the distribution curve for $\mu = 0$ and for large and small values of μ .

Hence, we conclude that the rest mass of the neutrino is either zero, or, in any case, very small in comparison to the mass of the electron.¹⁰ In the following calculation, we make the simplest hypothesis that $\mu = 0$. Then Eq. (30) becomes

H. Bethe, R. Peierls, 1934, Fermi'nin önerdiği teoriyi kullanarak, nötrinoların tesir kesitini hesapladılar → “cross-section for inverse beta reaction”, Nature 133 (1934) 532 → $\sigma \sim 10^{-44} \text{ cm}^2$



The “Neutrino”
Nature 133. 532



$$\sigma < \frac{\hbar^3}{m^3 c^4 t}$$

For an energy of 2.3×10^6 volts, t is 3 minutes and therefore $\sigma < 10^{-44} \text{ cm}^2$ (corresponding to a penetrating power of 10^{16} km. in solid matter). It is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with the neutrinos created in nuclear transformations.

With increasing energy, σ increases (in Fermi's model³ for large energies as $(E/mc^2)^2$) but even if one assumes a very steep increase, it seems highly improbable that, even for cosmic ray energies, σ becomes large enough to allow the process to be observed.

If, therefore, the neutrino has no interaction with other particles besides the processes of creation and annihilation mentioned — and it is not necessary to assume interaction in order to explain the function of the neutrino in nuclear transformations — one can conclude that there is no practically possible way of observing the neutrino.

H. BETHE, R. PEIERLS

Bir hedefe bombardıman edilen her parçacık hedefte belli bir kesit görür. Bu kesite yönelen her parçacık hedef madde ile etkileşir. Dolayısıyla gelen parçacık ne kadar büyük bir kesit görürse etkileşme olasılığı o kadar büyüktür.

An illustration may show that a serious practical question is raised. Just now nuclear physicists are writing a great deal about hypothetical particles called *neutrinos* supposed to account for certain peculiar facts observed in β -ray disintegration. We can perhaps best describe the neutrinos as little bits of spin-energy that have got detached. I am not much impressed by the neutrino theory. In an ordinary way I might say that I do not believe in neutrinos.* But I have to reflect that a physicist may be an artist, and you never know where you are with artists. My old-fashioned kind of disbelief in neutrinos is scarcely enough. Dare I say that experimental physicists will not have sufficient ingenuity to *make* neutrinos? Whatever I may think, I am not going to be lured into a wager against the skill of experimenters under the impression that it is a wager against the truth of a theory. If they succeed in making neutrinos, perhaps even in developing industrial applications of them, I suppose I shall have to believe—though I may feel that they have not been playing quite fair.

A. Eddington, The Philosophy of Physical Science, 1939



vμ

Vasat enerjili bir nötrino kurşun içinden bin ışık yılı hiçbir etkileşme oluşturmadan geçer¹³

G. Gamov, E. Teller, 1936, beta bozunum deneylerinden elde edilen veriler açıklamak için daha genel bir formülasyon önerdiler → Scalar (S), Vector (V), Tensor (T), PseudoVector (A) and PseudoScalar (P) terms.

$$\mathcal{H}(x) = \sum_{i=S,V,T,A,P} G_i \bar{p} O_i n(x) \bar{e} O^i \nu(x) + h. c.$$

burada

$$O \rightarrow 1, \gamma_\alpha, \sigma_{\alpha\beta}, \gamma_\alpha \gamma_5, \gamma_5$$

Fermi ve Gamov-Teller Hamiltonian'ları uzaydaki dönmeler (space inversion) altında değişmezdir (invariant) → Parite, ayna simetrisi (Parity) korunumludur!

Hangi terimler daha baskın? S, V mi yoksa T, A terimleri mi?



Soru: Aşağıdakilerden hangisi vektörel bir niceliktir?

A) Elektrik alan

B) Sıcaklık

C) Manyetik akım

D) kütle

E) Açısal momentum

E. Majorana, 1937, neutrinos and anti-neutrinos could be considered the same particle, Nuovo Cimento 14 (1937) 171 → Majorana neutrino hypothesis

TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE E DEL POSITRONE

Nota di ETTORE MAJORANA

A symmetric theory of electrons and positrons

Sunto. - Si dimostra la possibilità di pervenire a una piena simmetrizzazione formale della teoria quantistica dell'elettrone e del positrone facendo uso di un nuovo processo di quantizzazione. Il significato delle equazioni di DIRAC ne risulta alquanto modificato e non vi è più luogo a parlare di stati di energia negativa; nè a presumere per ogni altro tipo di particelle, particolarmente neutre, l'esistenza di « antiparticelle » corrispondenti ai « vuoti » di energia negativa.

The fact that the reduced formalism cannot be applied to the description of positive and negative electrons may well be attributed to the presence of the electric charge, and it does not invalidate the statement that, at the present level of knowledge, eqs. (12) and (13) constitute the simplest theoretical representation of neutral particles. The advantage, with respect to the elementary interpretation of the Dirac equation, is that there is now no need to assume the existence of antineutrons or antineutrinos (as we shall see shortly). The latter particles are indeed introduced in the theory of positive β -ray emission⁽³⁾; the theory, however, can be obviously modified so that the β -emission, both positive and negative, is always accompanied by the emission of a neutrino.

Translation by L. Maiani

<http://www2.phys.canterbury.ac.nz/editorial/Majorana1937-Maiani2.pdf>



Günümüzün en önemli problemlerinden biri: Majorana/Dirac nötrino!

"Dünyada birkaç kategoride bilim insanı vardır; ikinci ve üçüncü derecede olanlar ellerinden geleni yapar ama daha fazla ileri gidemezler. Bilimsel gelişmelere temel olan önemli keşifler yapan birinci derecede olanlar da vardır. Fakat bunun yanında Galilei ve Newton gibi dahiler de vardır. Majorana bu dahilerden biriydi." E. Fermi

Muonun keşfi, 1936-1937, cosmic rays çalışmalarında gözlemlenmiş, kütlesi 105.6 MeV, yüklü (+, -), spin $\frac{1}{2}$, ortalama ömrü $2.2 \cdot 10^{-6}$ s.

C. D. Anderson, S. H. Neddermeyer, Phys. Rev., Vol. 51, 884 (1937),

J. C. Street, E. C. Stevenson, Phys. Rev. Vol. 52, 1003 (1937),

Pion'un keşfi, C. F. Powell et al., 1947, muon parçacıkları pion bozunumlarından elde edilebileceğini göstermişlerdir: Nature, 159 (1947) 126.



Nötrinoların varolmasına bir kanıt daha!!

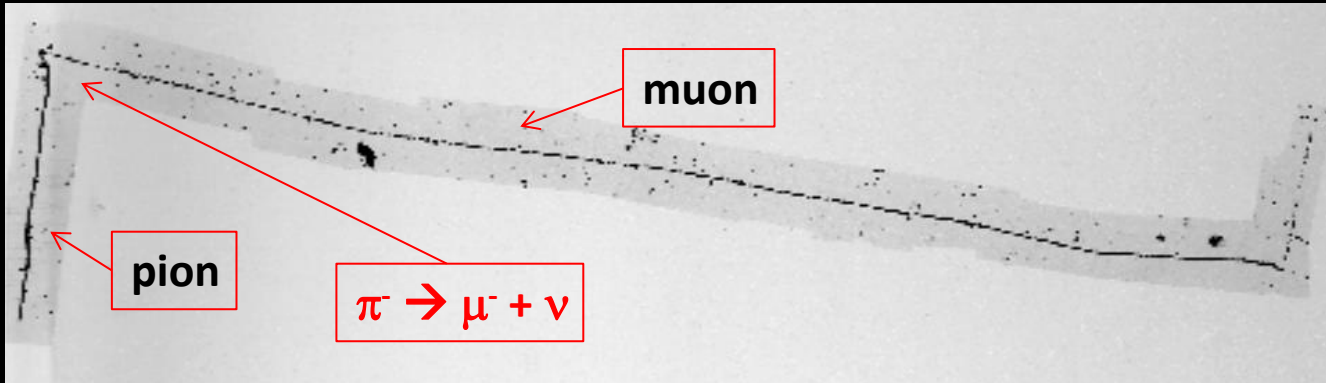


1950

Kütlesi 140 MeV, spin 0, ortalama ömrü $2.6 \cdot 10^{-8}$ s (yüklü parçacık için).

Pion'un bozunumunda muon'un enerji dağılımı sabit olduğundan (tek enerjili), pion'un iki-cisme bozunması gerekmektedir. Böylece pion muon'un yanısıra bir de Pauli nötrinosa bozunur.

**“Bunu (Muon) kim ismarladı?”
İsidore Rabi (1947)**



Note: nötrinolar henüz deneysel olarak gözlemlenmiş değil!

Muonun keşfi, 1936-1937, cosmic rays çalışmalarında gözlemlenmiş, kütlesi 105.6 MeV, yüklü (+, -), spin $\frac{1}{2}$, ortalama ömrü $2.2 \cdot 10^{-6}$ s.

C. D. Anderson, S. H. Neddermeyer, Phys. Rev., Vol. 51, 884 (1937),

J. C. Street, E. C. Stevenson, Phys. Rev. Vol. 52, 1003 (1937),

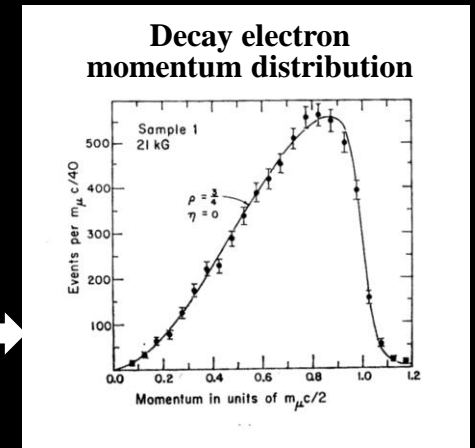
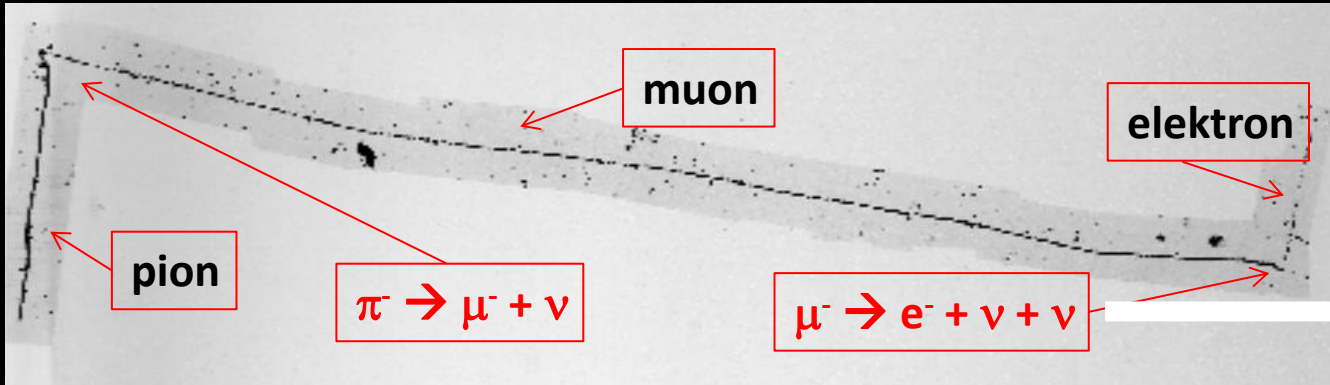
Pion'un keşfi, C. F. Powell et al., 1947, muon parçacıkları pion bozunumlarından elde edilebileceğini göstermişlerdir: Nature, 159 (1947) 126.



Kütlesi 140 MeV, spin 0, ortalama ömrü $2.6 \cdot 10^{-8}$ s (yüklü parçacık için).

Pion'un bozunumunda muon'un enerji dağılımı sabit olduğundan (tek enerjili), pion'un iki-cisme bozunması gerekmektedir. Böylece pion muon'un yanısıra bir de Pauli nötrinosa bozunur.

J. Steinberger, 1948, Phys. Rev. 74, 500 (1948), Muon'un bozunumunda ortaya çıkan elektron'un enerji dağılımı sabit olmadığı yani sürekli olduğu için (beta bozunumunda ki gibi), muon elektron'un yanısıra iki tane nötrino'ya bozunur.



Note: nötrinolar henüz deneysel olarak gözlemlenmiş değil!



1950'lerin başında nötrinoların varlığına yönelik çok güçlü kuramsal kanıtlar vardı, ancak deneysel doğrulaması hala yapılabilmemiş değildi.

- **Radyoaktif beta bozunumu**
- **Fermi'nin beta kuramı**
- **Pionun muona bozunumu**
- **Muonun elektrona bozunumu**

B. Pontecorvo, 1946, Inverse β -process, $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$ yöntemini önermiştir. Report PD-205, Chalk River, Canada.

Bu yöntemle göre nötrino etkileşimi sonucunda klorun bir izotopu olan ${}^{37}\text{Cl}$ (doğada %24.47 oranında bulunur) radyoaktif argona, ${}^{37}\text{Ar}$, dönüşürken bir elektron yayınlar. Yarılanma ömrü yaklaşık 34 gün olan ${}^{37}\text{Ar}$ düşük enerjili elektron yayarak tekrar ${}^{37}\text{Cl}$ 'e dönüşür. Argon asal gaz ailesinden olduğu için kendi aralarında veya başka atomlarla bileşik yapmaz, böylece chlorinden ayırılması daha kolay olacaktır. Detektörde ortaya çıkan argon miktarından nötrinoların varlığının yanı sıra etkileşime giren nötrino sayısı da belirlenebilir.

E. J. Konopinski, H. M. Mahmoud, 1953, Lepton numarası korunumu (Baryonlar p, n için 0, leptonlar e^-, μ^- ve ν için 1 antileptonlar e^+, μ^+ ve $\bar{\nu}$ için -1) Phys. Rev. 92, 1045 (1953).

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

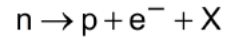
$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$$

Ray Davis 1954 yılında, Cl-Ar yöntemini kullanılarak nötrinin gözlemlenmesinin yanısıra nötrino ve karşıt nötrinin benzer veya farklı parçacıklar olup olmadığını reaktörlerden yayılan nötrinoları bakarak sınamıştır. Deney sonucunda herhangi bir etkileşimle karşılaşmamış.

LYS2 2014'te fizik sorusu:

2014 – LYS2 / FİZ

30. Bir elementin çekirdeğinde gerçekleşen



radyoaktif bozunma eşitliğinde, lepton sayısının korunabilmesi için X ile gösterilen parçacık aşağıdakilerden hangisi olmalıdır?

- A) Elektron
- B) Nötron
- C) Nötrino
- D) Karşınötrino
- E) Karşınötron

Nötrino'nun gözlemlenmesi:

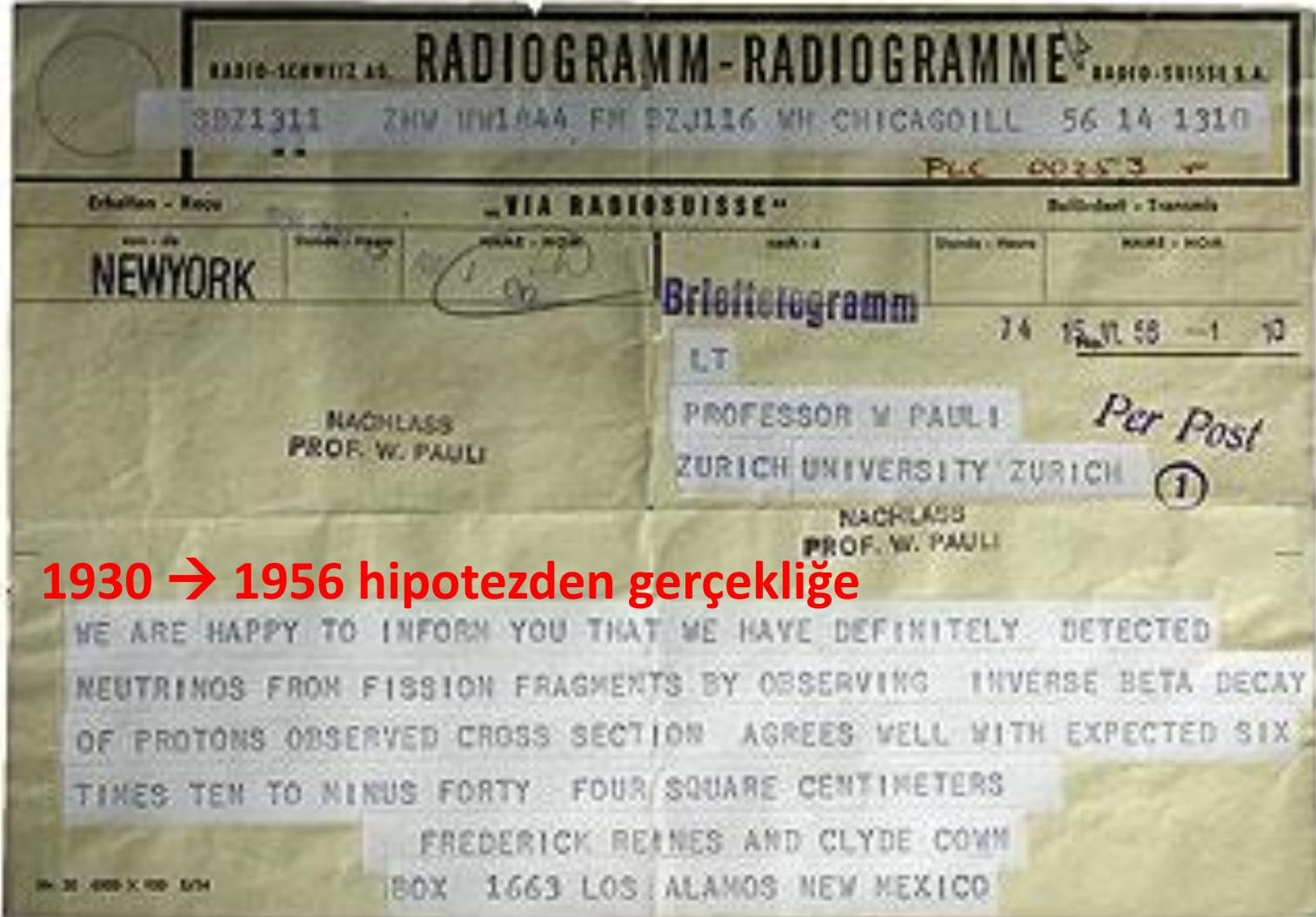
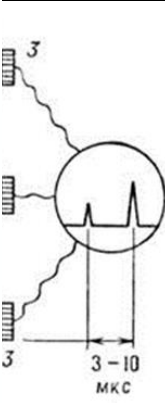
Fred Reines & Clyde Cowan, 1956 *hayaletin peşinde*



1995



Plan



1930 → 1956 hipotezden gerçekliğe

→ Svd
reaks

θ - τ bilmecesi: $\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$
 $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$

Deneysel sonuçlar benzer kütle değer ve yaşam sürelerine işaret etmektedir! Pariteleri farklı!

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 104, NUMBER 1

OCTOBER 1, 1956

Question of Parity Conservation in Weak Interactions*

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG, *Brookhaven National Laboratory, Upton, New York*

(Received June 22, 1956)

The question of parity conservation in β decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.



1957

T. D. Lee, C. N. Yang, 1956, zayıf etkileşimlerde parite korunumunun deneysel olarak sınanmasını önerdiler (literatürde güçlü ve elektromanyetik etkileşimlerde parite korunumuna kanıt sunan birçok deneysel sonuç olmasına karşın, zayıf etkileşimlerle ilgili hiçbir veri bulunmuyordu!).

discussed.

One way out of the difficulty is to assume that parity is not strictly conserved, so that θ^+ and τ^+ are two different decay modes of the same particle, which necessarily has a single mass value and a single lifetime. We wish to analyze this possibility in the present paper against the background of the existing experimental evidence of parity conservation. It will become clear that existing experiments do indicate parity conservation in strong and electromagnetic interactions to a high degree of accuracy, but that for the weak interactions (i.e., decay interactions for the mesons and hyperons, and various Fermi interactions) parity conservation is so far only an extrapolated hypothesis unsupported by experimental evidence. (One might even say that the present θ - τ puzzle may be taken as an indication that parity conservation is violated in weak interactions. This argument is, however, not to be taken seriously because of the paucity of our present knowledge concerning the nature of the strange particles. It supplies rather an incentive for an examination of the question of parity conservation.) To decide unequivocally whether parity is conserved in weak interactions, one must perform an experiment to determine whether weak interactions differentiate the right from the left. Some such possible experiments will be discussed.

C. S. Wu et al., 1957, polarize edilmiş radyoaktif Co⁶⁰ çekirdeğinde beta bozunumu kullanarak parite'nin korunmadığını gösterdiler.

Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay*

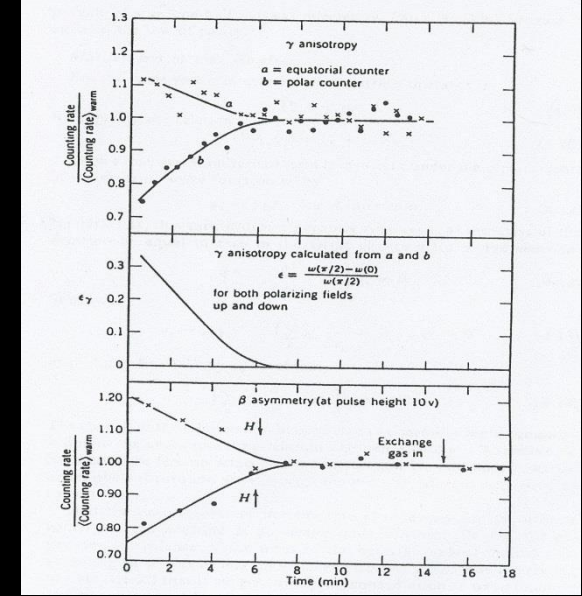
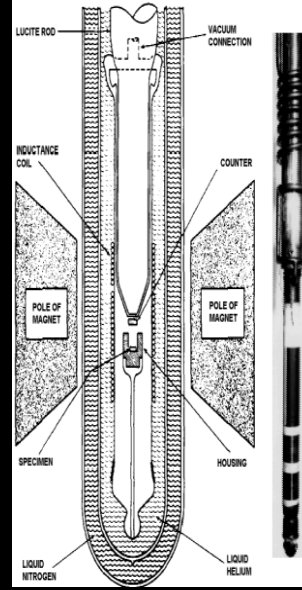
C. S. WU, *Columbia University, New York, New York*

AND

E. AMBLER, R. W. HAYWARD, D. D. HOPPES, AND R. P. HUDSON,
National Bureau of Standards, Washington, D. C.

(Received January 15, 1957)

IN a recent paper¹ on the question of parity in weak interactions, Lee and Yang critically surveyed the experimental information concerning this question and reached the conclusion that there is no existing evidence either to support or to refute parity conservation in weak interactions. They proposed a number of experiments on beta decays and hyperon and meson decays which would provide the necessary evidence for parity conservation or nonconservation. In beta decay, one could measure the angular distribution of the electrons coming from beta decays of polarized nuclei. If an asymmetry in the distribution between θ and $180^\circ - \theta$ (where θ is the angle between the orientation of the parent nuclei and the momentum of the electrons) is observed, it provides unequivocal proof that parity is not conserved in beta decay. This asymmetry effect has been observed in the case of oriented Co⁶⁰.



R. L. Garwin, L. M. Lederman, M. Weinrich, 1957, C. S. Wu grubunun sonucunu duyar duymaz harekete geçen ekip, pion'un muon oradan elektron bozunumuna giden kanalı kullanarak parite'nin korunmadığını gösterdiler.

W. Pauli V. F. Weisskopf'a gönderdiği mektupta C. S. Wu'nun deney sonucunda herhangi bir asimetriyle karşılaşmayacağına dair büyük miktarda paraya iddiaya girmeye niyetlendiğini dile getirmiş. Deney sonucu yayımlandıktan sonra gönderdiği diğer mektupta, yaşadığı şoku ve iddiaya girmemiş olmanın mutluluğundan bahsetmiştir. *Collected Scientific Papers by Wolfgang Pauli, Vol 1, R. Kronig, V. F. Weisskopf.*

R. Feynman'da girmis olduğu iddiada 50\$ kaybetmiştir. "Surely You're Joking Mr. Feynman", R. Feynman.



T. D. Lee, C. N. Yang & A. Salam & L. Landau, 1957, Fermi kuramının genişletilmesi, "two-component theory of the neutrino".

PHYSICAL REVIEW VOLUME 105, NUMBER 5 MARCH 1, 1957

Parity Nonconservation and a Two-Component Theory of the Neutrino

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*
 (Received January 10, 1957; revised manuscript received January 17, 1957)

A two-component theory of the neutrino is discussed. The theory is possible only if parity is not conserved in interactions involving the neutrino. Various experimental implications are analyzed. Some general remarks concerning nonconservation are made.

IL NUOVO CIMENTO Vol. V, N. 1 1° Gennaio 1957

On Parity Conservation and Neutrino Mass.

ABDUS SALAM
St. John's College - Cambridge

(ricevuto il 15 Novembre 1956)

1. - YANG and LEE⁽¹⁾ have recently suggested that present experimental evidence does not exclude the possibility that parity is not conserved in β -decay. If future experiments confirm this, it may be possible to relate parity-violation in neutrino-decays to the vanishing of neutrino mass and self-mass. The argument is as follows: the free neutrino Lagrangian is invariant for the substitution $\psi_\nu \rightarrow \gamma_5 \psi_\nu$ ($\bar{\psi}_\nu \rightarrow -\bar{\psi}_\nu \gamma_5$). If it is further postulated that neutrino interactions produce no self-mass, one way to secure this is to require that the total Lagrangian also remain invariant for the same substitution⁽²⁾ (so that $\bar{\psi}_\nu \psi_\nu \rightarrow -\bar{\psi}_\nu \psi_\nu$) while other fields (barring degeneracies which we consider later) remain unchanged. In so far as ψ_ν and $\gamma_5 \psi_\nu$ have opposite intrinsic parity, most neutrino interactions would then violate parity conservation.

Nuclear Physics 3 (1957) 127—131; North-Holland Publishing Co., Amsterdam

ON THE CONSERVATION LAWS FOR WEAK INTERACTIONS

L. LANDAU
Institute for Physical Problems, USSR Academy of Sciences, Moscow

Received 9 January 1957

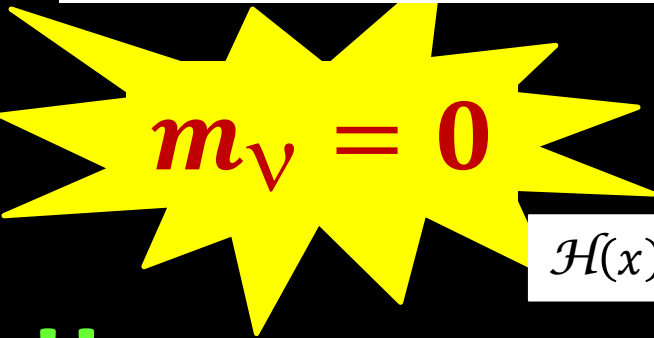
Abstract: A variant of the theory is proposed in which non-conservation of parity can be introduced without assuming asymmetry of space with respect to inversion. Various possible consequences of non-conservation of parity are considered which pertain to the properties of the neutrino and in this connection some processes involving neutrinos are examined on the assumption that the neutrino mass is exactly zero.

$$(i\gamma^\alpha \partial_\alpha - m_\nu)v(x) = 0$$

$$v(x) = v_L(x) + v_R(x)$$

$$i\gamma^\alpha \partial_\alpha v_L(x) - m_\nu v_R(x) = 0$$

$$i\gamma^\alpha \partial_\alpha v_R(x) - m_\nu v_L(x) = 0$$



$$v_L(x) = \left(\frac{1 - \gamma_5}{2}\right)v(x)$$

$$v_R(x) = \left(\frac{1 + \gamma_5}{2}\right)v(x)$$

$$\mathcal{H}(x) = \sum_{i=S,V,T,A,P} G_i \bar{p} O_i n(x) \bar{e} O^i (G_i - G'_i \gamma_5) v(x) + h. c.$$

!! Nötrinolar kütesizdir, zayıf etkileşimlerde ya sol-elli (left-handed), ya da sağ-elli (right-handed) nötrino/antinötrinolar bulunur.

M. Goldhaber, L. Grodzins, A. W. Sunyar, 1957,
Bütün nötrinolar sol-ellidir. Phys. Rev. 109, 1015 (1958).

Helicity of Neutrinos*

M. GOLDHABER, L. GRODZINS, AND A. W. SUNYAR

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

(Received December 11, 1957)

A COMBINED analysis of circular polarization and resonant scattering of γ rays following orbital electron capture measures the helicity of the neutrino. We have carried out such a measurement with Eu^{152m} , which decays by orbital electron capture. If we assume the most plausible spin-parity assignment for this isomer compatible with its decay scheme,¹ 0^- , we find that the neutrino is "left-handed," i.e., $\sigma_\nu \cdot \hat{p}_\nu = -1$

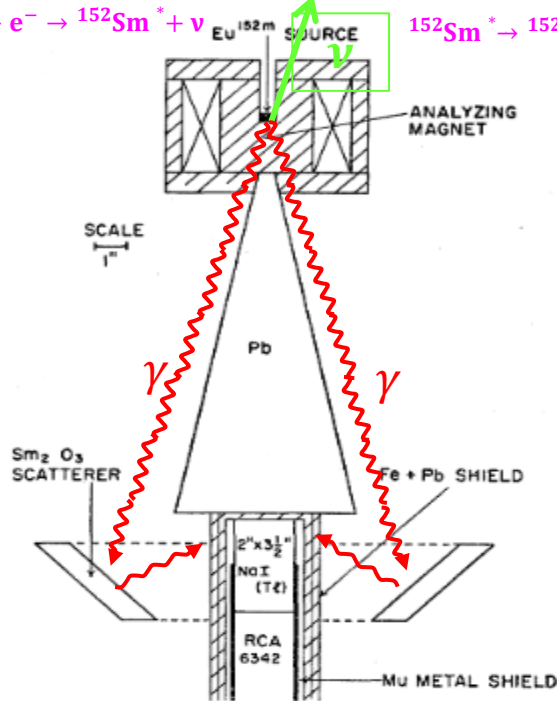
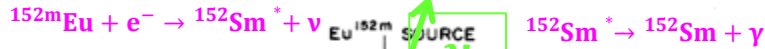
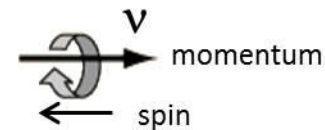
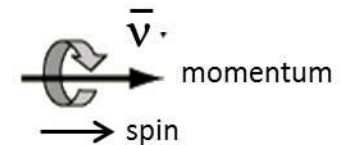


FIG. 1. Experimental arrangement for analyzing circular polarization of resonant scattered γ -rays. Weight of Sm_2O_3 scatterer: 1850 grams.



Nötrino
(sol-elli)



Karşit Nötrino
(sağ-elli)

**“Nötrinonun ayna yansması alınır
hiçbirşey göremezsiniz.”**

A. Salam



K. Nishijima, 1957 Phys. Rev. 108, 907 (1957) **ve J. Schwinger, 1957** Ann. Phys. 2, 407 (1957), **muon ve elektronların kuantum sayıları farklı.**

Bruno Pontecorvo,

1957, Zh.Eksp.Teor.fiz,34 (1957)247, **(analogously to K0-antiK0) $\nu \rightarrow \bar{\nu}$ salınımını ortaya atıyor .**

1959, ЖЭТФ т. 37, вып. 6, с. 1751-1757 (1959) **Lepton korunumunun elektron ve muon'lar için ayrı ayrı ele alınması gerektiğini öne sürdü. L_e (e^- , ν_e için 1, e^+ , $\bar{\nu}_e$ için -1) L_μ (μ^- , ν_μ için 1, μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$ için -1). Buna göre:**

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

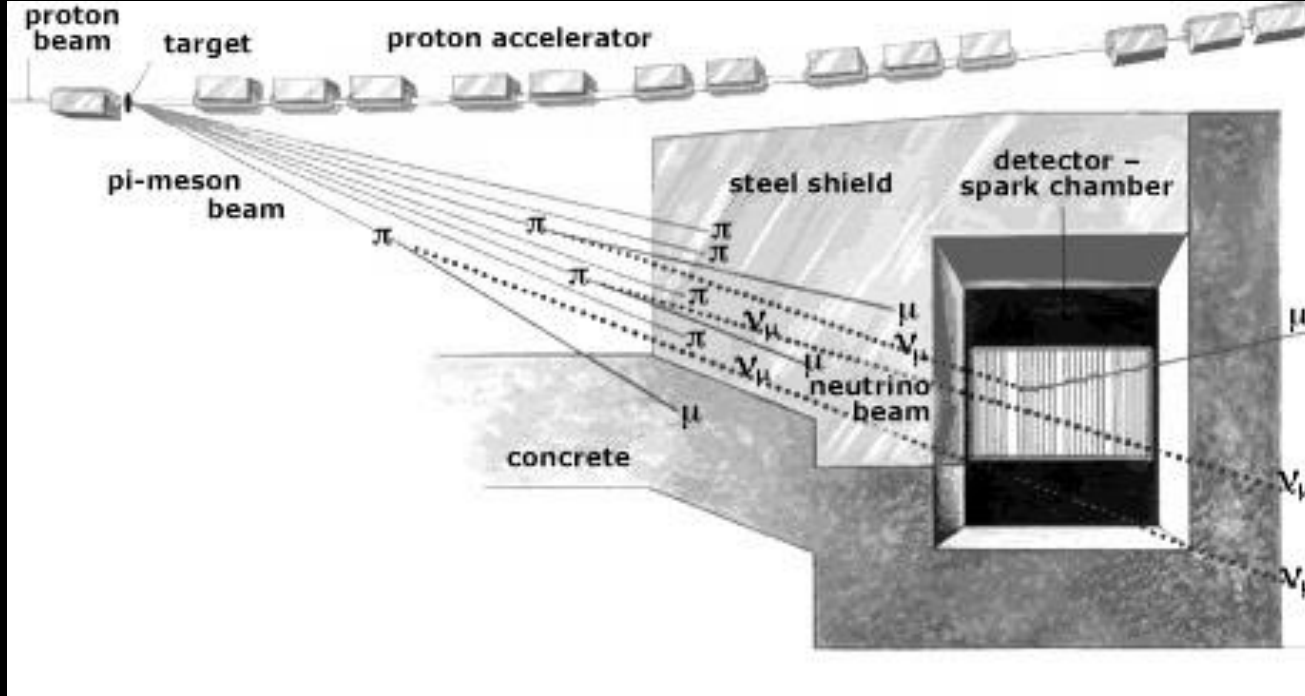
Cevaplanması gereken soru: Burada ki ν_e ve ν_μ nötrinoları aynı mı yoksa farklı parçacıklar mı?

Çözüm yöntemi: (benzer bir yöntemi M. Schwartz düşünup hayata gecirmiştir)

- *Pion'un muon'a bozunumundan elde edilen nötrinolar \rightarrow yeterince kütleli bir detektöre yönlendir, nötrino etkileşimlerinden elektron veya muon oluşacak.*
- *Eşit sayıda elektron ve muon görülmesi takdirde \rightarrow sadece tek tip nötrino vardır.*
- *Sadece muon oluşuyorsa \rightarrow muon nötrino elektron nötrinodan farklıdır.*



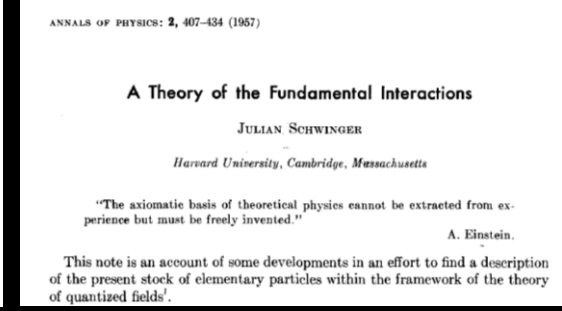
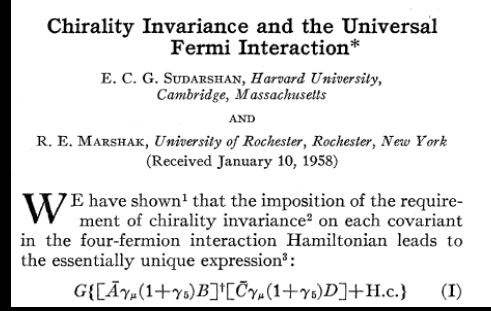
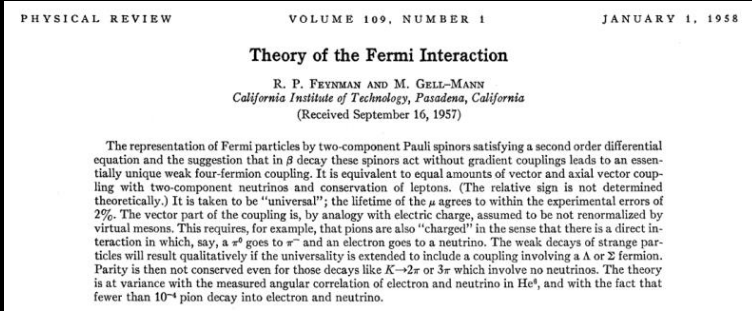
L. Lederman, M. Schwartz, Jack Steinberger at BNL, 1962, muon nötrino'nun kesfi $\nu_e \neq \nu_\mu$, Phys. Rev. Lett. 9, 36 (1962). Accelerator nötrino fiziğinin başlangıcı.



Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda Alternate Gradient Synchrotron kullanılarak 15 GeV enerjili protonun Berilyum hedefine bombardıman edilmesi sonucunda pion ve kaon parçacıklarının bozunumundan yayılan nötrinoların etkileşimlerinden toplam 56 adet müona ait izler gözlemlenirken herhangi bir elektron görülmemiştir.

Globe exhibition bir adet 'Spark Chamber' (Kıvılcım Odası) bulunmaktadır görmeye değer.

R. P. Feynman, M. Gell-Mann, E.C.G.Sudarshan, J. Schwinger, 1958, V-A (V minus A) teorisi,



Beta bozunumu ve zayıf etkileşimlerde sadece sol-elli alanlar rol alır!

$$H_I = \frac{G_F}{\sqrt{2}} J^\alpha J_\alpha^\dagger$$

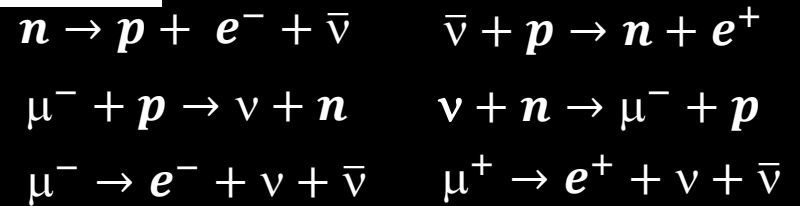
$$\Psi = \Psi_L + \Psi_R$$

$$\bar{\Psi} \frac{1}{2} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \Psi = \bar{\Psi}_L \gamma^\mu \Psi_L$$

"V - A"

$$J^\alpha = J_{had}^\alpha + J_{lep}^\alpha = 2(\bar{p}_L \gamma^\alpha n_L + \bar{\nu}_L \gamma^\alpha e_L + \bar{\nu}_L \gamma^\alpha \mu_L)$$

$$H_I = \frac{4G_F}{\sqrt{2}} \{ [(\bar{p}_L \gamma^\alpha n_L)(\bar{e}_L \gamma^\alpha \nu_L) + h.c.] + [(\bar{p}_L \gamma^\alpha n_L)(\bar{\mu}_L \gamma^\alpha \nu_L) + h.c.] + [(\bar{e}_L \gamma^\alpha \nu_L)(\bar{\nu}_L \gamma^\alpha \mu_L) + h.c.] + [(\bar{\nu}_L \gamma^\alpha e_L)(\bar{e}_L \gamma^\alpha \nu_L) + h.c.] + [(\bar{\nu}_L \gamma^\alpha \mu_L)(\bar{\mu}_L \gamma^\alpha \nu_L) + h.c.] + [(\bar{p}_L \gamma^\alpha n_L)(\bar{n}_L \gamma^\alpha p_L)] \}$$



Yukarıda ki etkileşimler gözlemlenmiş yüklü akım (Charged Current) etkileşimleri

$\nu + e \rightarrow \nu + e$ $e^- + e^+ \rightarrow \nu + \bar{\nu}$
Yüksüz akım (Neutral Current) etkileşimler
öngörölmüş ve gözlemlenmiş değil!

Ferminin genelleştirilmiş kuramı (V-A) düşük enerjili zayıf etkileşimleri sorunsuz bir şekilde açıklarken, yüksek enerjilerde bir takım problemlerle karşı karşıya kalınmıştır.



→ Kuantum Elektrodinamiğinde elektromanyetik etkileşimler spini 1, kütsüz, vektörel bir parçacık olan fotonun değiş-tokuşu yoluyla gerçekleşir.

→ Benzer çözümler zayıf etkileşimler içinde düşünülür.

P. Higgs Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964), **R. Brout & F. Englert** Phys. Rev. Lett. 13, 321 (1964)

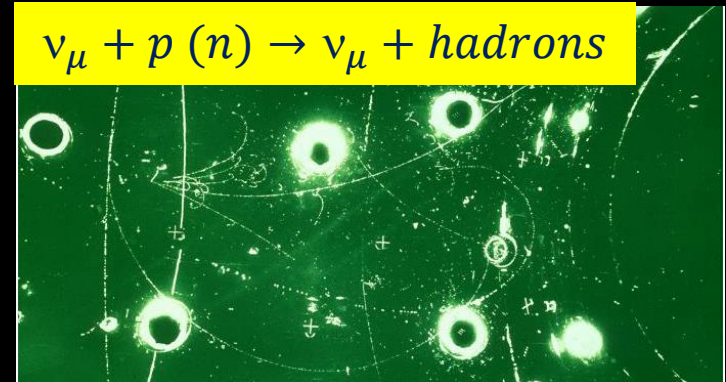


1964, BEH mekanizması

Sheldon Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg, 1967, elektrozayıf etkileşimlerin W, Z bozonları GWS standard model



Gargamelle Deneyi CERN-PS, 1973 Yüksüz akım (NC) etkileşimi



M. L. Perl et al. 1975, tau leptonun keşfi, *Phys. Rev. Lett.* 35, 1489 (1975). Kutlesi 1776 MeV, spin ½ lepton, ortalama omru $2.9 \cdot 10^{-13}$ s. **Üçüncü nötrinin varlığına işaret ediyor.**

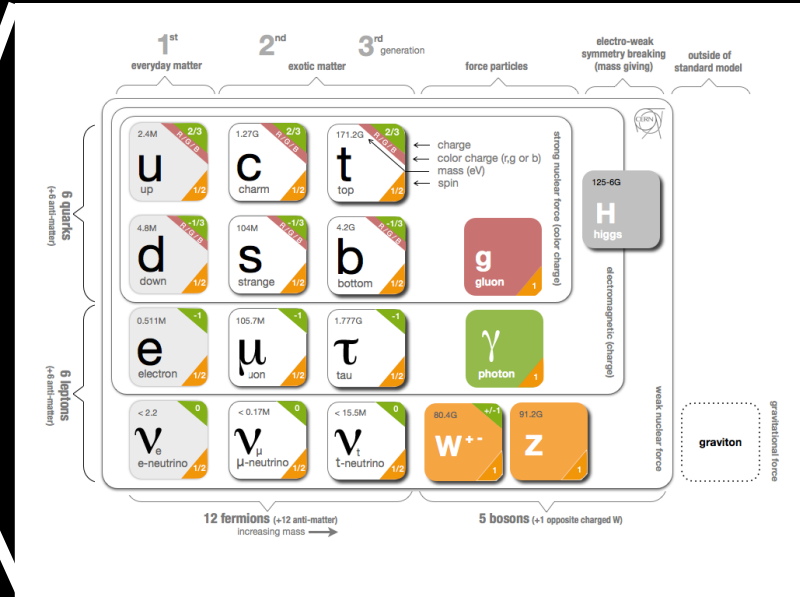


C. Rubia, S. van der Meer, 1983, UA1-UA2 deneyleri CERN-SPS, W^\pm ve Z^0 bozonun keşfi, $M(W^\pm) = 80.4 \text{ GeV}$ and $M(Z^0) = 91.2 \text{ GeV}$ spin-1, gauge boson.



Donut deneyi, 2000, tau nötrinin gözlemlenmesi (toplamda 9 adet ν_τ etkileşimi gözlemlenmiştir).

Standard model



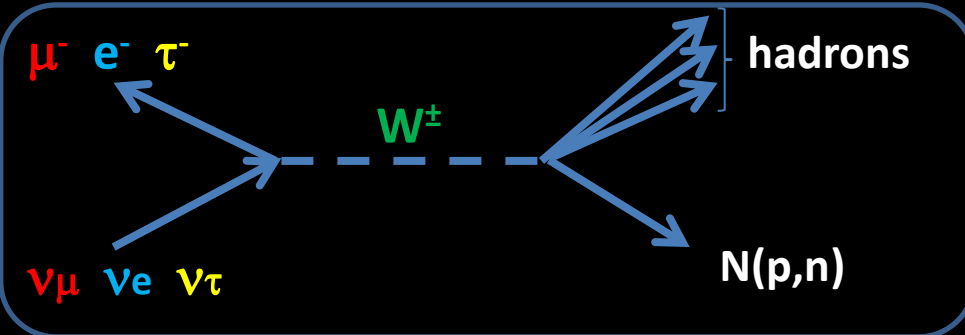
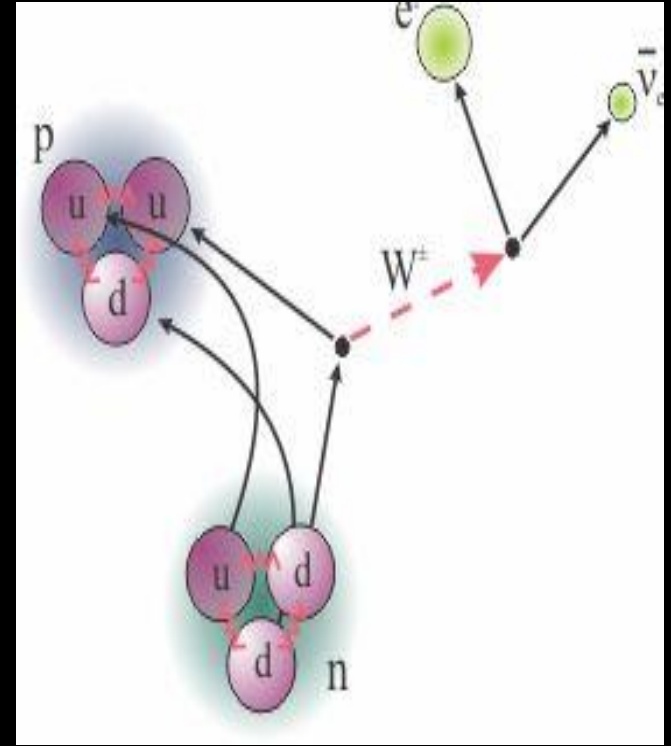
Standard Modelde nötrinolar:

Yüksüz, **kütlesiz**, spin-1/2, sol-elli parçacıklardır.

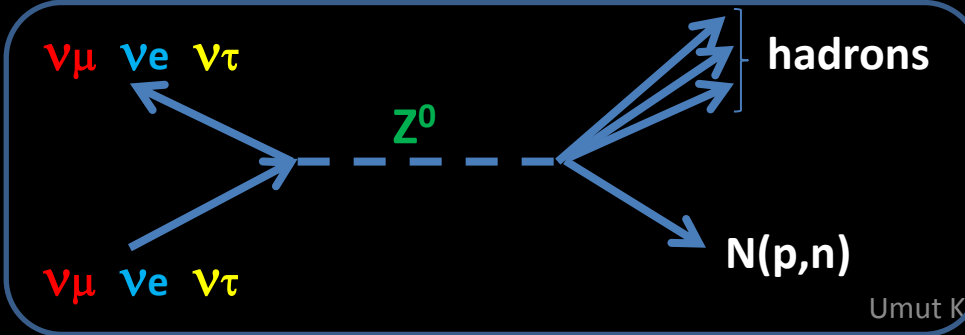
ν_e , ν_μ , ν_τ olmak üzere 3 çeşit nötrino vardır.

Sadece zayıf kuvvetle etkileşirler.

Beta bozunumunun günümüzde ki gösterimi



Yüklü Akım (Charged-Current) etkileşimleri

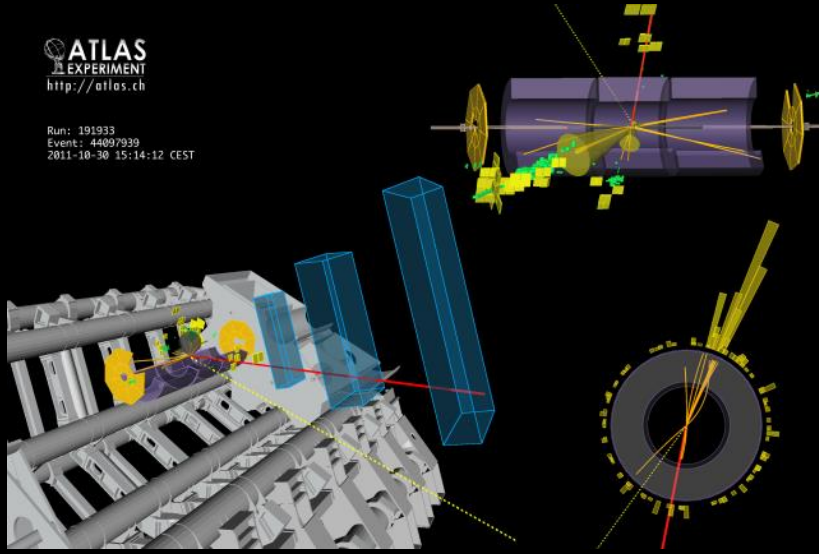


Yüksüz Akım (Neutral-Current) etkileşimleri

Higgs parçacığının keşfi, 2012, ATLAS deneyi, Phys. Lett. B 716, 1 (2012), CMS deneyi, Phys. Lett. B 716, 30 (2012). Kütlesi 125 GeV, spin-0, gauge boson.

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

Run: 191933
Event: 44097939
2011-10-30 15:14:12 CEST



Nötrinolar kayıp enerji olarak karşımıza çıkıyor.

$Higgs \rightarrow WW \rightarrow 2jets + \mu + \bar{\nu}_\mu$

<https://cds.cern.ch/record/1631397>



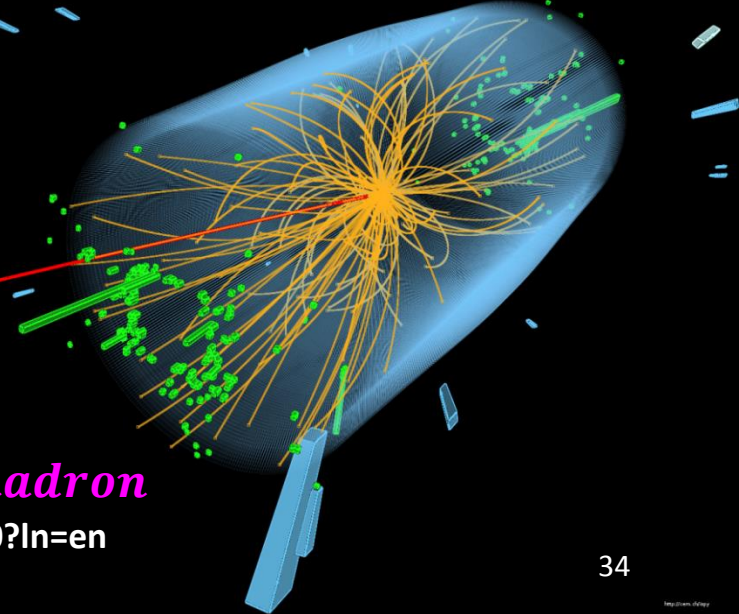
CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-jun-05 09:58:43.400262 GMT+11:58:43 CEST
Run / Event: 195552 / 61758463

$Higgs \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu + hadron$

<http://cds.cern.ch/record/1633370?ln=en>

Umut KOSE



***ATLAS/CMS gibi deneylerde kayıp enerji
olarak karşımıza çıkan nötrinoların
kaynağı nedir?***



Soru: Asagidakilerden hangi bir notrino kaynagi degildir?

A) Süpernova patlaması

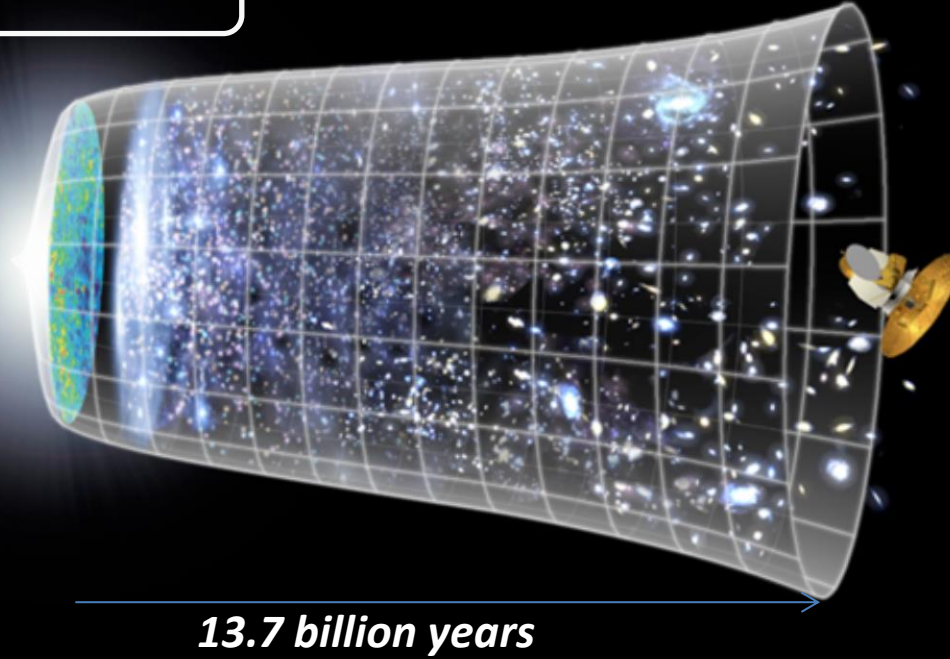
B) Güneş

C) Büyük patlama

D) Muz

E) Alfa bozunumu

Relic (kalıntı) nötrino



R. W. Wilson & A. Penzias, 1965, Kozmik mikrodalga arkaplan ışıması,

$T_\gamma \sim 2.725$ K. **Relic nötrino: $T_\nu \sim 1.945$ K $\rightarrow \lambda_\nu \sim 2$ mm**

Her 1 cm^3 hacimde, büyük patlamadan arta kalan **$4 \mu\text{eV}$** enerjili yaklaşık **330 ν** bulunmaktadır. Şu ana kadar relic nötrinoları gözlemleyebilen bir deney yok.

Nobel ödülü; yöntemi ve gözlemlemeyi başarabilecek ilk gruba verilmek için hazır bekliyor.



Supernova nötrino

Yıldızların devasa gaz veya toz bulutlarından oluşmasında ayrıca büyük kütleli olan yıldızların, kütle baskısını dengeleyebilmek için merkezlerindeki yakıtları harcaması sonucunda kendi içine çöküp patlayarak, **süpernova**, ~10 MeV enerjili nötrinolar yayılır.

Patlama öncesi
February 1984



Patlama esnasında
8 March 1987



Galaksimiz içerisinde
her 50 yılda bir
süpernova patlaması
olabileceği tahmin
edilmektedir!

Patlama sonrası

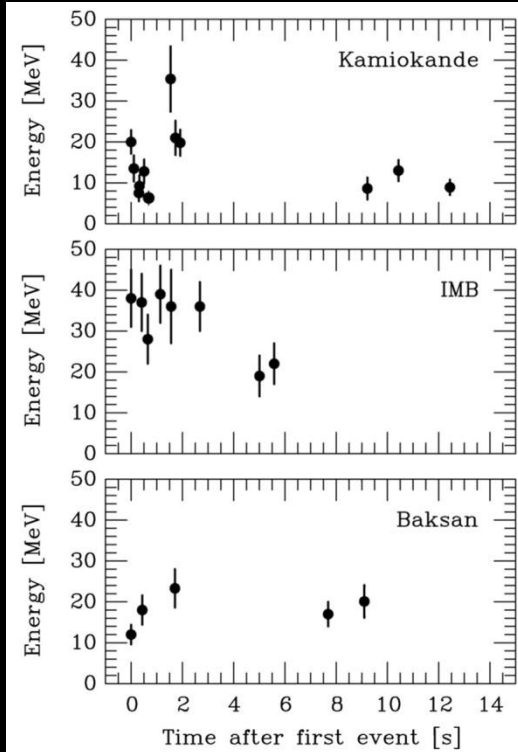


Büyük Macellan Bulutu



Patek Philippe 5101G

Patlamanın ışığı dünyaya ulaşmadan 2-3 saat önce 24 nötrino parçacığı dünyanın farklı yerlerindeki Nötrino detektörleri tarafından gözlemlendi. Kısa süre içerisinde yüksek sayılabilecek bir nötrino akısı gözlemlenmiştir.



Gözlemlenen (SN1987A dan gelen) nötrinoların etkileşimleri:

Kamiokande (Japonya) → 11

Irvine-Michigan-Brookhaven (ABD) → 8

Baksan (SSCB) → 5

→ Neutrino Astronomy

M. Koshiba, Süpernova nötrinolarının keşfi

Kamiokande deneyi Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1490



2002

Extragalaktik nötrinolar

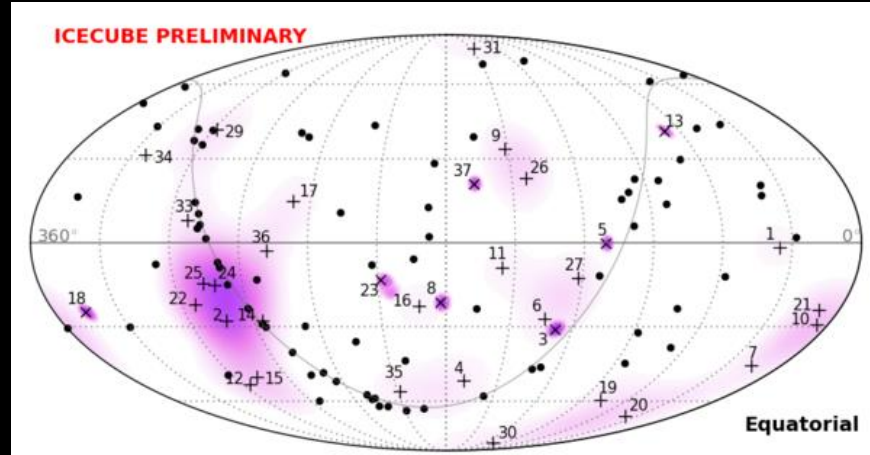
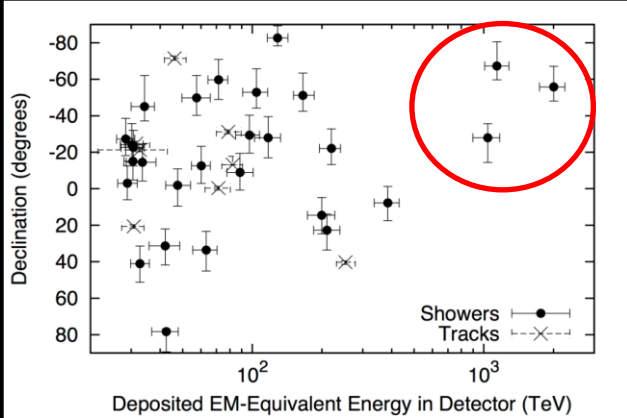
LHC → 14 TeV

IceCube nötrino gözlemevi

1 PeV'lik $\nu = 10^3 \text{ TeV} - 10^{15} \text{ eV}$

Güneş sisteminin dışından gelen 37 adet yüksek enerjili (TeV ve PeV mertebesinde) nötrino etkileşimi gözlemlendi! M.G. Aartsen et al.

<http://www.sciencemag.org/content/342/6161/1242856> (22 Kasım 2013) and arXiv:1405.5303 [astro-ph.HE]



1.04 PeV ν -etkileşiminin
Berlin üzerine düşümü

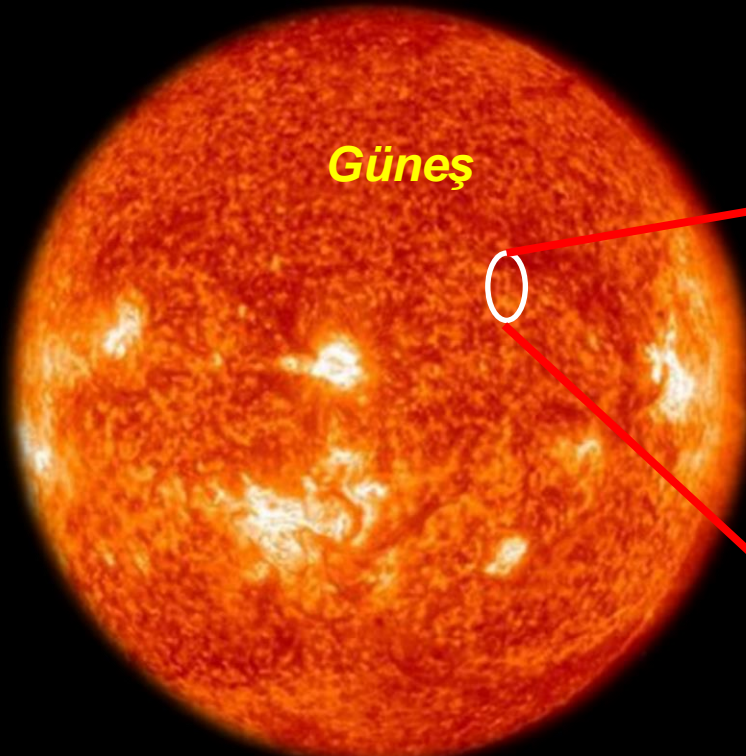


PeV mertebesindeki nötrinoların kaynağı nedir?



İsimplendirmede
Susam sokağında
esinlenilmiştir:
Bert, Ernie, Big bird

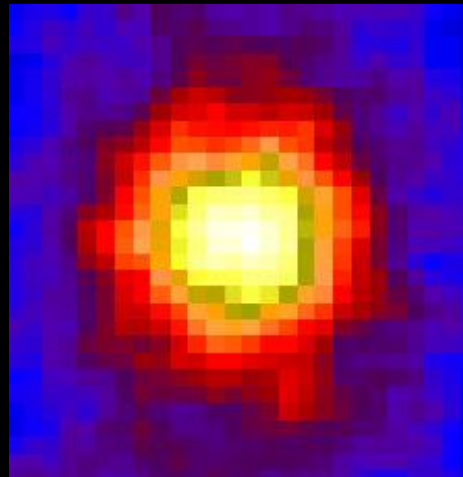
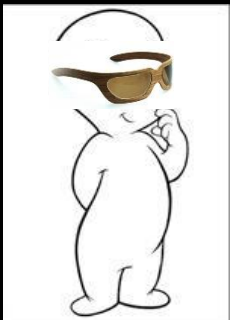
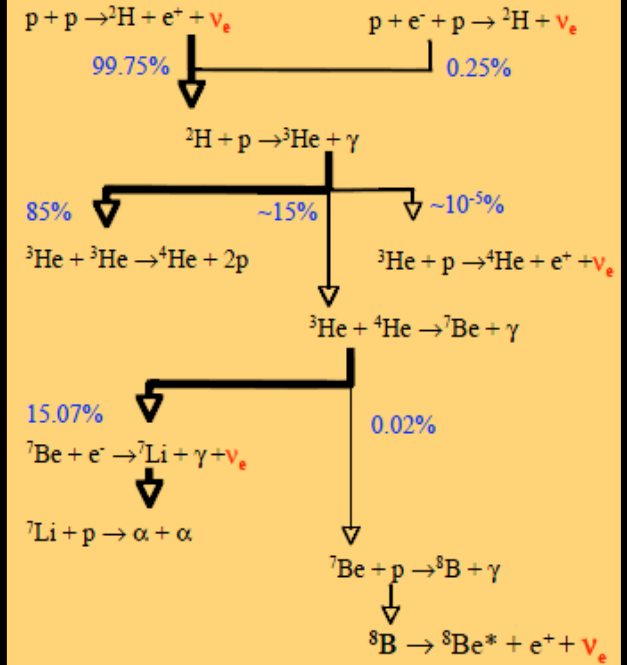
Solar nötrinolar



Güneş

Dünyaya ulaşan **0.3-3 MeV** enerjili nötrino akısı $6.5 \times 10^{14} / (m^2 s)$

Light Element Fusion Reactions



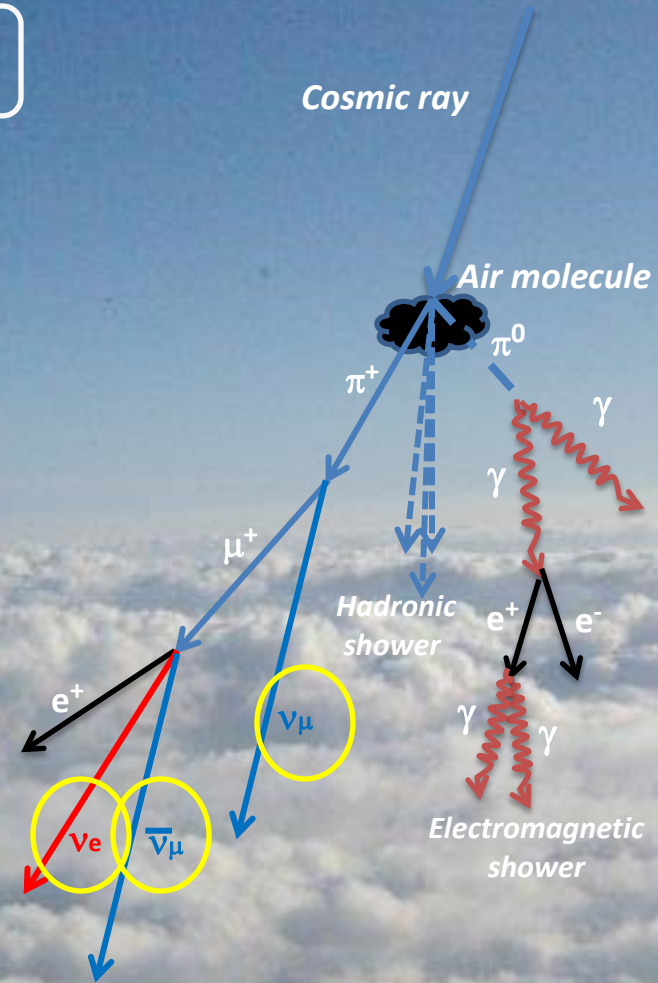
Süper Kamiokande

Ray Davis, 1968, Homestake Madeni, solar nötrinoların gözlemlenmesi, "solar neutrino problem"



Atmosferik nötrinolar

$$R \equiv \frac{N_{(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu})}}{N_{\nu_e}} = 2$$



Neutrino energy: **300 to 2000 MeV**
 $\sim 100 / (m^2 \cdot s)$

Reactor neutrinos



*Pure electron antineutrino beam
with an energy \sim a few MeV.*

1 GW nükleer santral için:

1GW \rightarrow 10^9 W (joule/s)

200 MeV enerji/fission

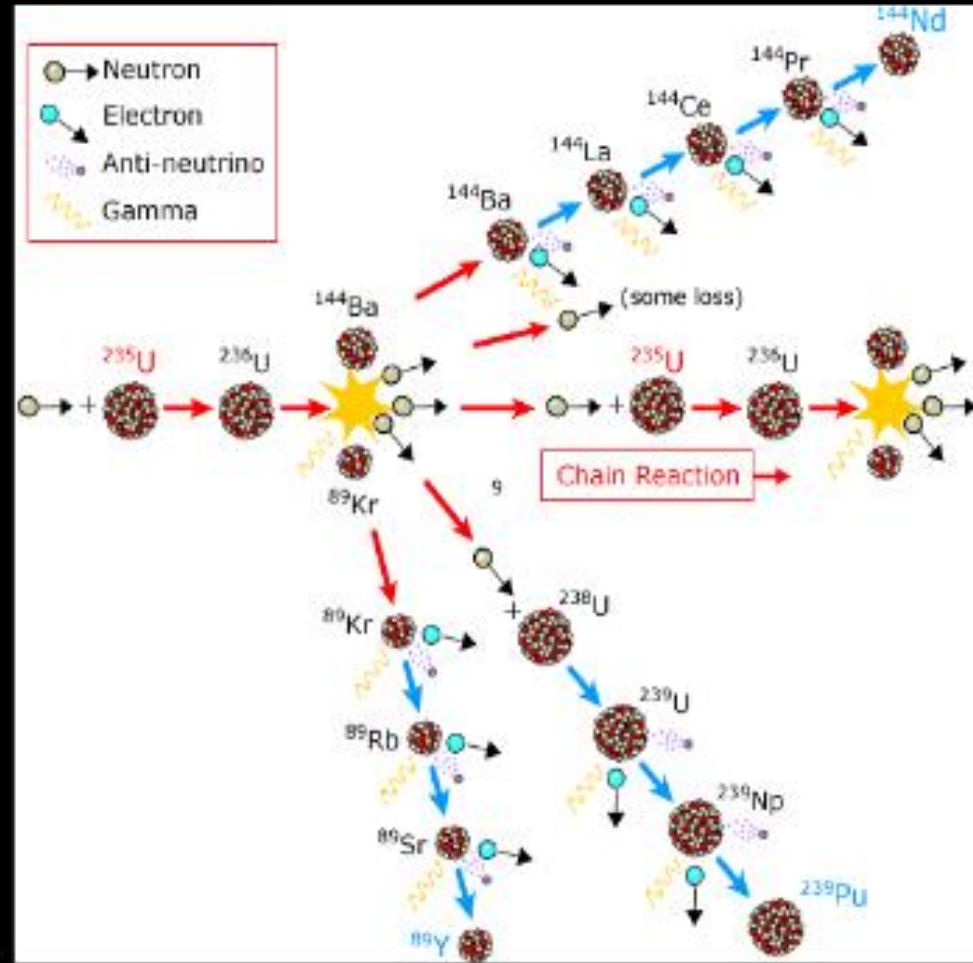
$\rightarrow 200 * 10^6 * 1.6 * 10^{-19}$ joules

$\rightarrow 3.2 * 10^{-11}$ joules

$\sim 6 \bar{\nu}_e$ /fission

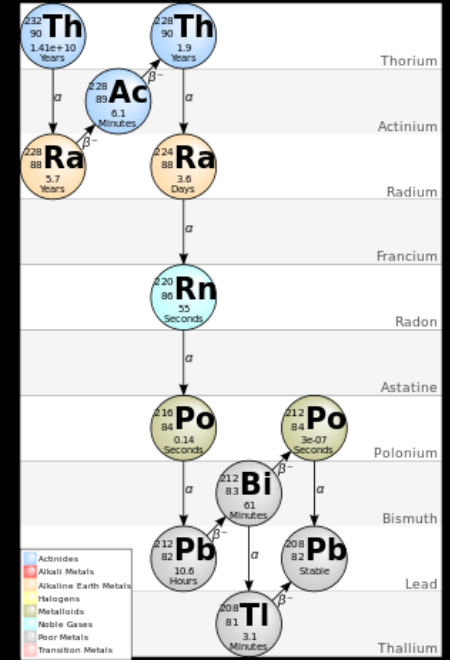
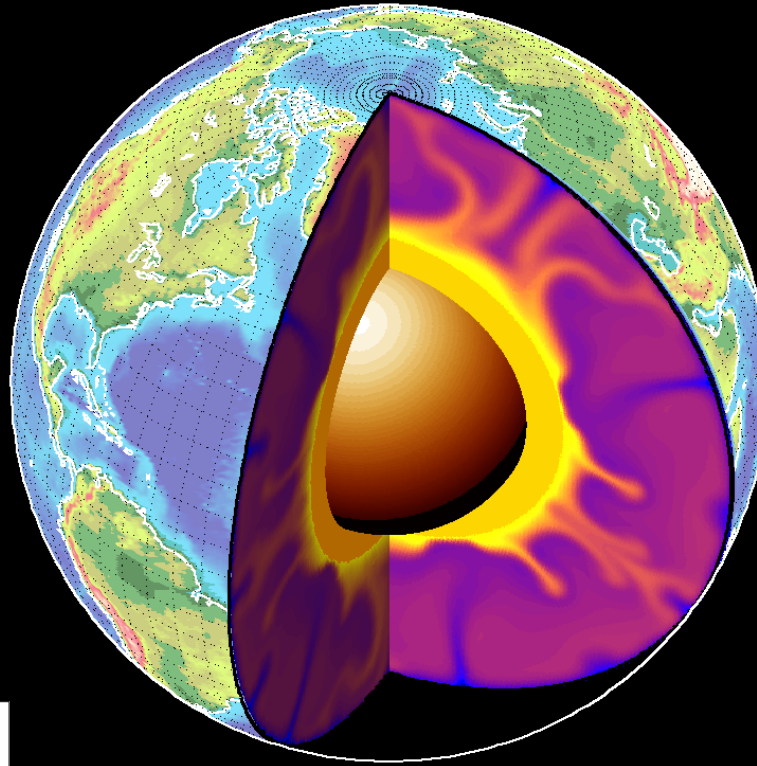
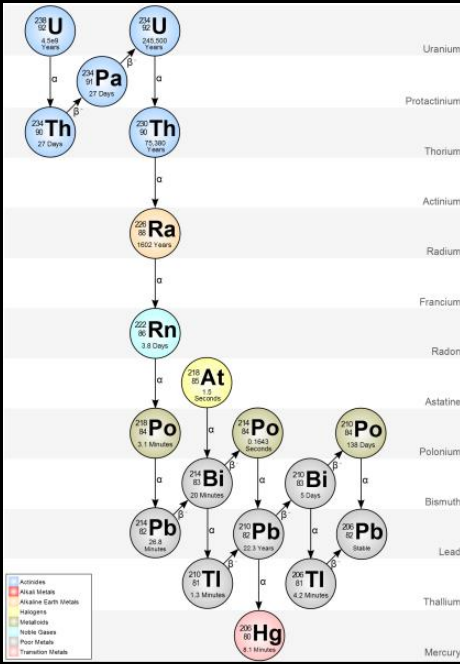
$\rightarrow 6 * 10^9$ W / ($3.2 * 10^{-11}$ joules)

$\sim 2 \times 10^{20} \bar{\nu}_e$ per second



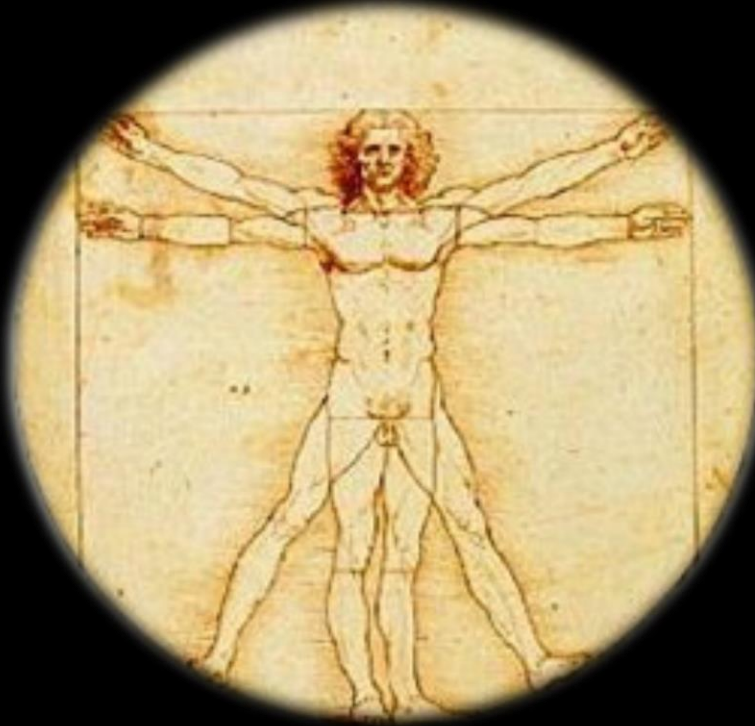
Geoneutrinos

Dünyamız yaklaşık olarak 40 TW'lik bir enerji yaymaktadır. Bu enerjinin yaklaşık %40'i radyoaktif çekirdeklerin bozunumundan (bu bozunum zincirlerinin %90 Uranyum ve Toryum bozunumlarıdır, 15TW'lik enerji) oluşmaktadır. Dünyanın içinden dünya yüzeyine yaklaşık olarak $5 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ nötrino ulaşmaktadır.



	Mass (in 10^{24}g)	Pb (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)	U/Pb (ppm)
Upper Crust	7.0	22.8	4.18	13.8	0.18
Lower Crust	17.8	6.5	0.62	3.6	0.10
Mantle	775.2	0.4	0.055	0.19	0.14

İlk defa KamLAND deneyi tarafından gözlemlenmiştir, *Nature* 436, 499-503 (2005).



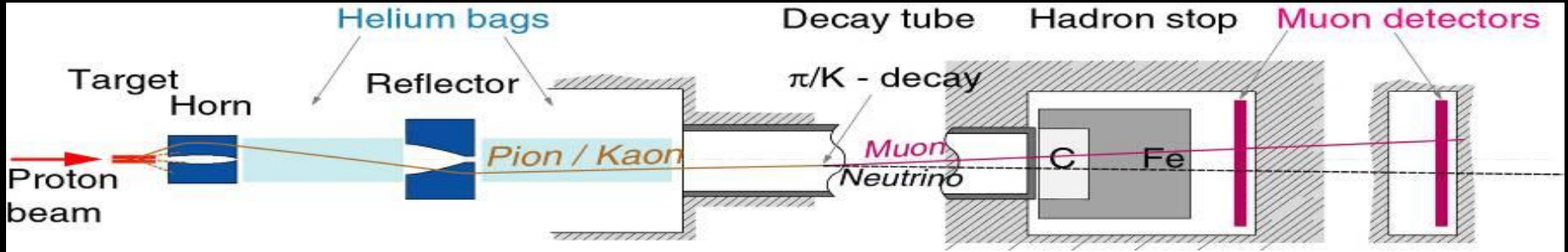
İnsan vücudu yaklaşık olarak 150-200 gram Potasyum (K) içermektedir, bunun 20 mg beta bozunumu yapan **K-40** izotopudur. Ortalama ağırlıkta bir insandan yaklaşık olarak günde **340 milyon nötrino** yayılarak evrenin en uzak noktasına doğru almış olduğu bilgiyi taşır.

150 gram **muzda** yaklaşık olarak 454 mg K bulunur, bunun 53.1 μg K-40 izotopudur. Günde milyonlarca nötrino yayar.



Accelerator neutrinos

Hızlandırıcılarda tipik nötrino hüzmesi oluşturma prensibi

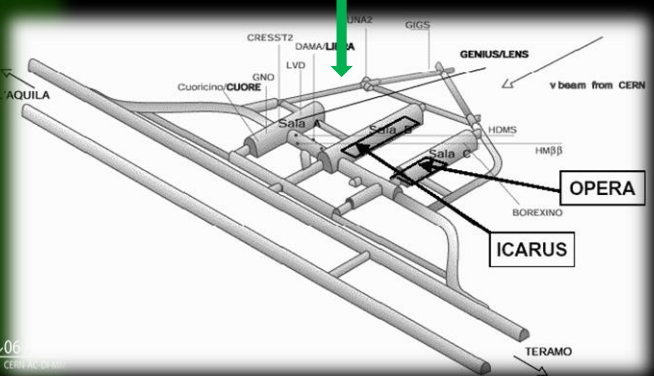
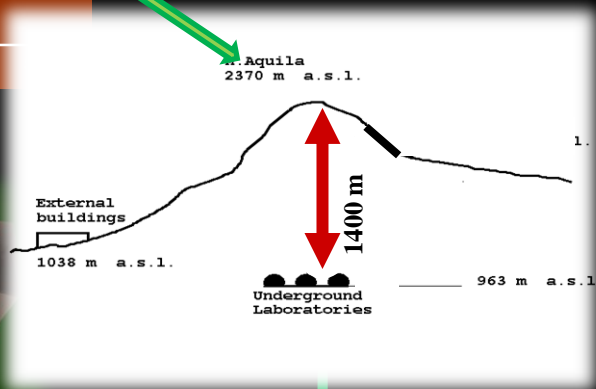
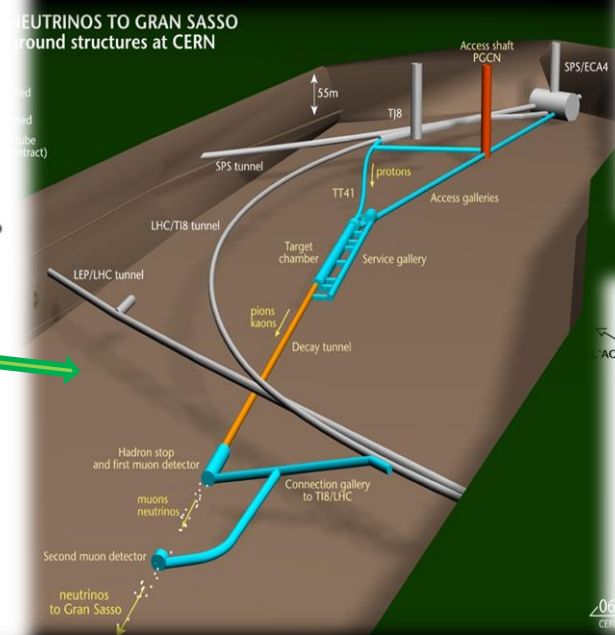
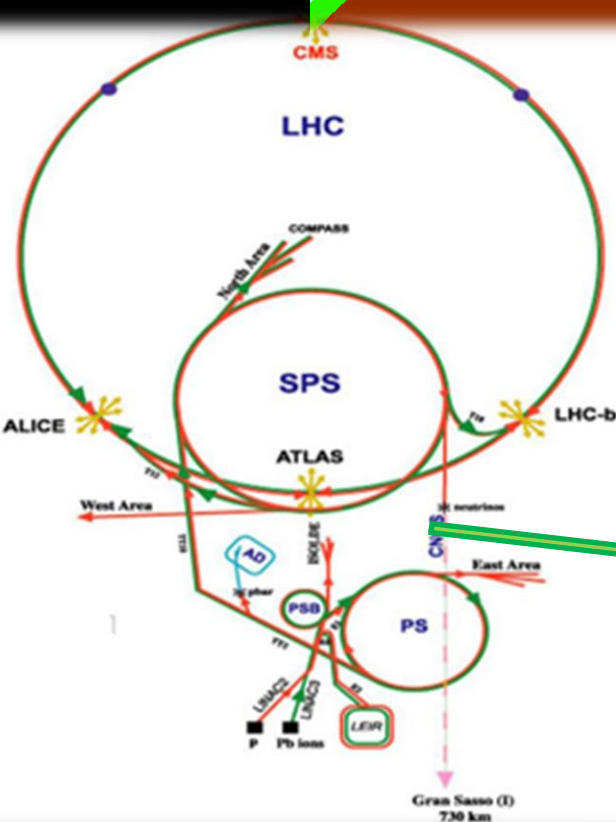
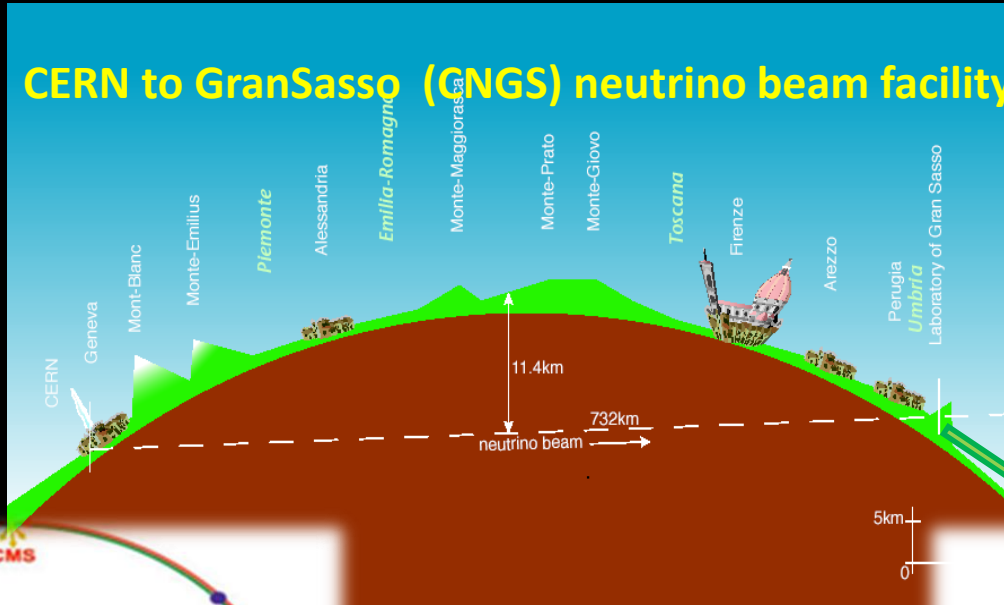


CERN: CNGS (CERN neutrino to GranSasso), 400 GeV proton, ~ 0.12 MW
ICARUS, OPERA deneyleri

Fermilab: Booster beamline, 8 GeV proton, ~ 0.05 MW
NuMI beamline, 120 GeV proton, 0.25 MW
MINOS, MiniBooNE, Nova deneyleri

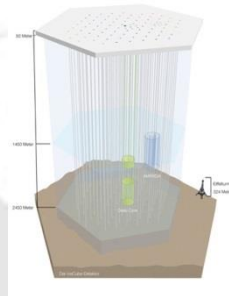
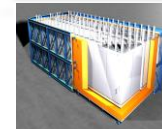
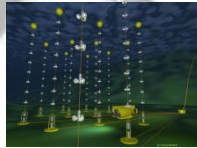
J-PARC: 30 GeV proton, ~ 0.2 MW, T2K deneyi

CERN to GranSasso (CNGS) neutrino beam facility



Umut KOSE

Neutrino experiment running around the world



* Majorana
* Minerva
* MiniBooNe
* Minos
* SNO
* NOVA*
* Exo-200

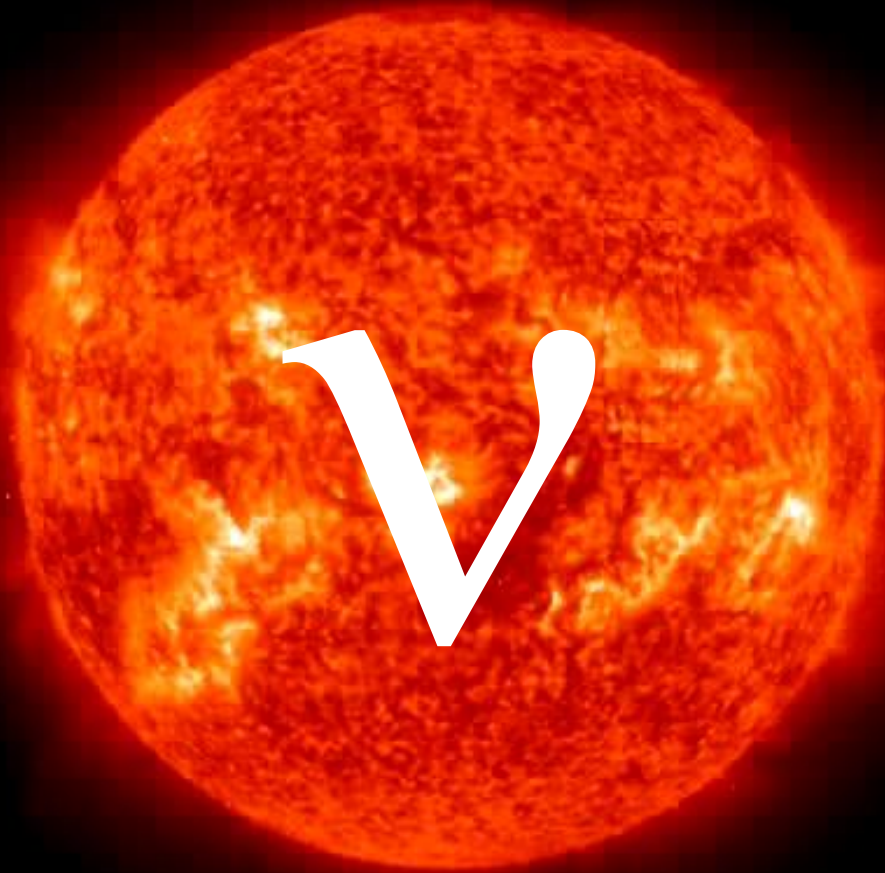
* Auger

* Borexino
* Cuore*
* Antares
* KM3Net
* Nemo
* Double Chooz
* Gerda
* Icarus
* Katrin*
* LVD
* Opera

* Reno
* KamLand
* K2K
* Super Kamiokande
* T2K
* DayaBay

* Particle accelerator
* Nuclear reactor
* Sun/Atmosphere
* Astrophysical sources
* Nuclear decay

* Amanda
* Anita
* IceCube
* Rice
* Pingu
* DeepCore



Standard modelin ötesinde yeni

2003/05/26 00:00

fiziğin ayak sesleri

Güneşten gelen nötrinoların keşfi ve Solar Standard Model Problemi:

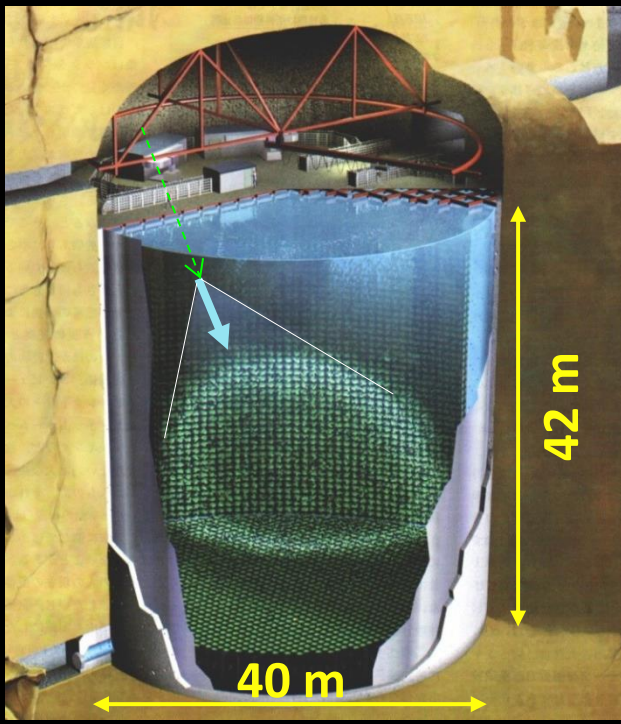
- 1964 **John Bahcall** nükleer fizik ve güneşin standard modelini birleştirerek güneşte farklı tepkimelerden üretilen nötrinoların enerji dağılımı ve akı miktarlarını hesaplamıştır. **Ray Davis** ise güneşten gelen nötrinoları gözlemlemek için B. Pontecorvo'nun önerdiği Cl-Ar yöntemine dayalı bir deney tasarladı.
- 1967 Homestake nötrino deneyi data alımına başladı.
- 1968 Deney sonucunda tahmin edilen nötrino etkileşimin **34%** gözlemlendi !

**Deneysel sonuçlar hatalı?
Teorik hesaplamalar hatalı?
İkisi de hatalı?**

Solar nötrino sorunu

Cevabı bulmamız için 20 yıl geçmesi gerekiyordu, 1998'de SüperKamiokande (SK) ve 2001'de Sudbury Neutrino Observatory (SNO) deneylerinde elde edilen sonuçlar yaşanan bu tartışmaya nokta koymuştur.

İZLE → <http://www.youtube.com/watch?v=rVz5Arx6WiM>

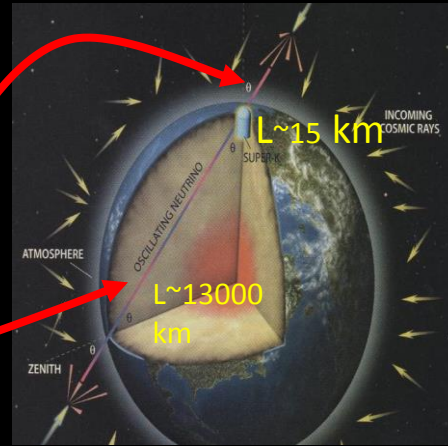
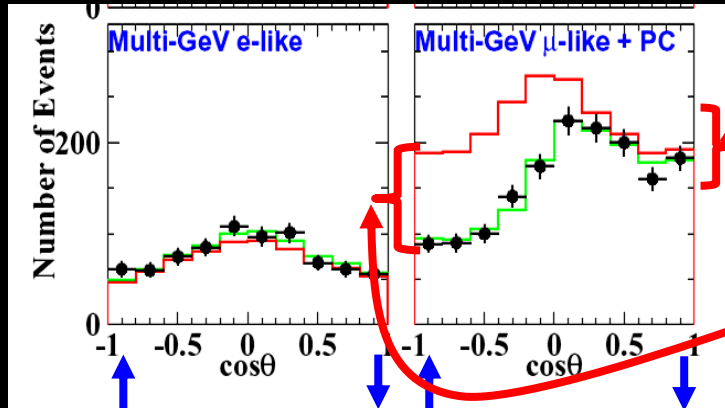
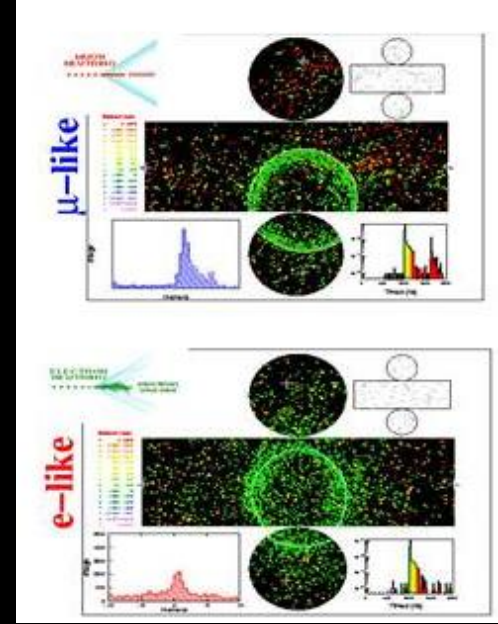
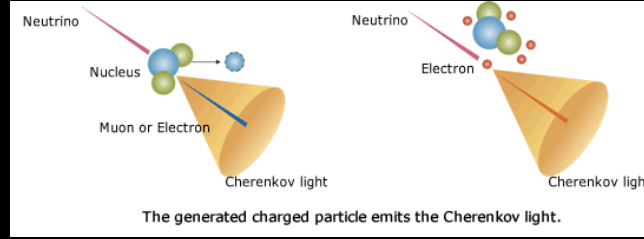


Super Kamiokande, Water Cherenkov

50,000 ton ultra saf su, 13,000 PMT, 1996 yılında Kamioka Mozumi madeninde faaliyete başladı. Proton bozunumunun yanısıra solar, atmosferik ve supernova'dan gelen nötrinoları üzerine çok önemli çalışmalar sürdürülmektedir.

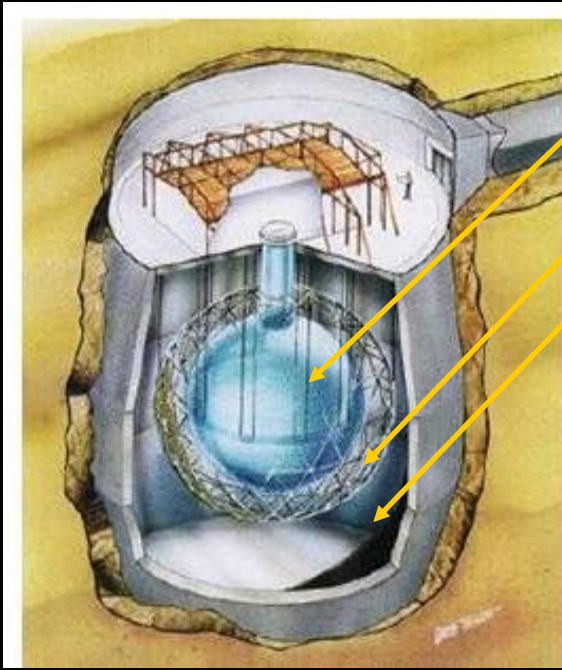
$$\nu_l + N \rightarrow l^- + X, \quad l = e, \mu$$

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$



Güneşten yayılan nötrinolar da olduğu gibi atmosferde oluşan nötrinolar da bir anomaly gözlenmiştir (SK 1998) → nötrinolar salınım uğrar dolayısıyla kütleli olmalıdır!

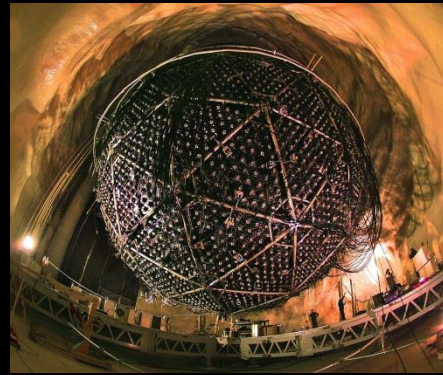
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



1000 tonnes D₂O (99.92% pure)

1700 tonnes of internal shielding H₂O

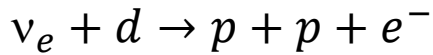
5300 tonnes of outer shielding H₂O



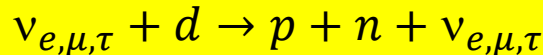
SNO deneyi güneşten gelen nötrinoları incelemiş ve Ray Davis'in sonuçlarını teyit etmiştir.

Teorik hesaplama
(Bachall et al.)

$$\Phi_{total} = (5.69 \pm 0.91) \times 10^6 / \text{cm}^2 \text{sec}$$



$$\Rightarrow \Phi_{\nu_e}$$



$$\Rightarrow \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}$$

$$\frac{\Phi_{\nu_e}}{\Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}} = 0.301 \pm 0.033$$

SNO deneyi
sonucu

$$\Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau} = (5.54 \pm 0.32 \pm 0.35) \times 10^6 / \text{cm}^2 \text{sec}$$

Nötrinolar kütleli!

Standard modelin ötesinde
yeni fiziğin ayak sesleri

- B. Pontecorvo 1957 nötrino salınım fikri
- 1962, iki farklı nötrininonun keşfi ν_e ve ν_μ
- Ziro Maki, Masami Nakagawa ve Shoichi Sakata, 1962, nötrino çeşnilerinin karışımı ve $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ salınım fikri
- Üç çeşit nötrino vardır: ν_e, ν_μ ve ν_τ bunlar kendi aralarında karışık ve salınıma uğrar.

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

Çeşni öz durumları

Kütle öz durumları

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Solar ve nükleer
reaktörlerde

CP phase
Nükleer reaktörlerde
ve hızlandırıcılarda

Atmosferik ve
hızlandırıcı nötrino
deneylerinde

Majorana phases
Nötrinosuz çift beta
bozunumunda



Escher Metamorphosis.

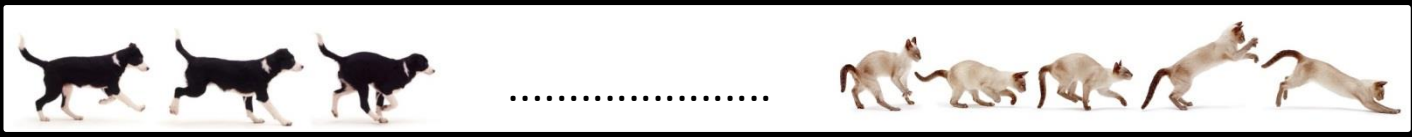
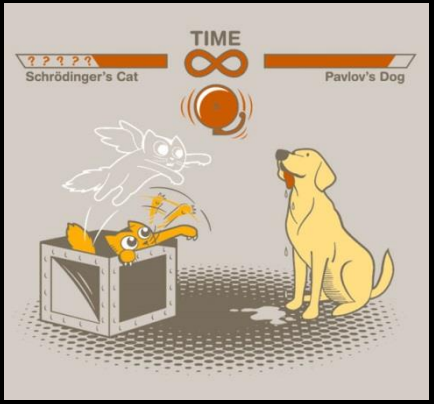
Karışım acısı

$\Delta m^2 \neq 0$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]} \right)$$

L nötrino kaynağı ve detektör arasındaki mesafe

E nötrinin enerjisi



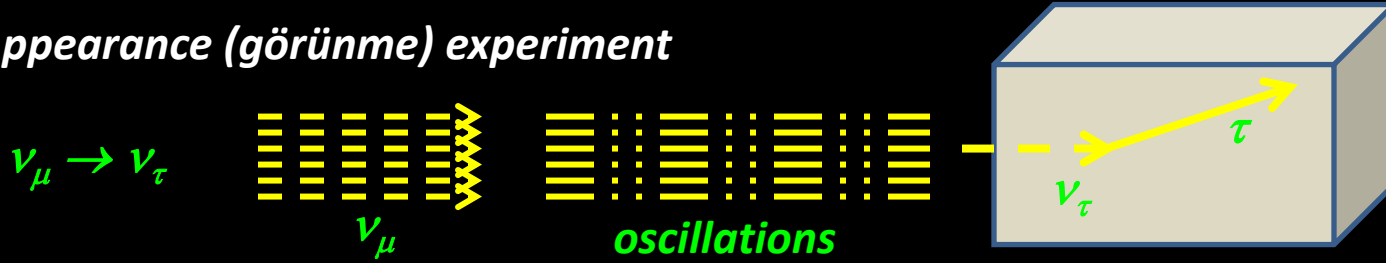
Umut KOSE



TRAFO

Kaybolma ve Görünme deneyleri

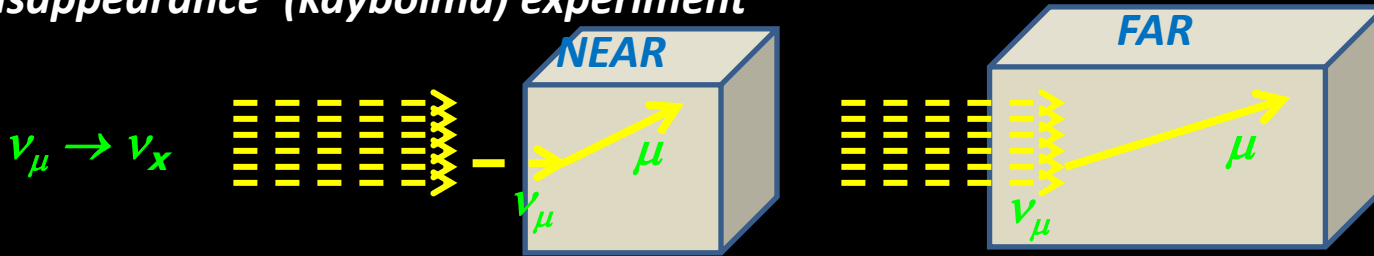
Appearance (görünme) experiment



ν_τ yüklü akım etkileşimleri sonucunda oluşan τ leptonunun gözlenmesi

- 1) Nötrino hüzmesinde ν_τ olmamalı,
- 2) Nötrininin enerjisi τ lepton oluşturacak düzeyde olmalı
- 3) Yüksek hassiyette detektör

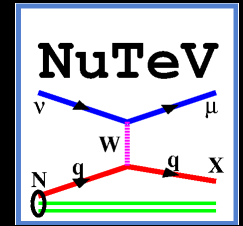
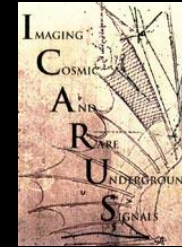
Disappearance (kaybolma) experiment



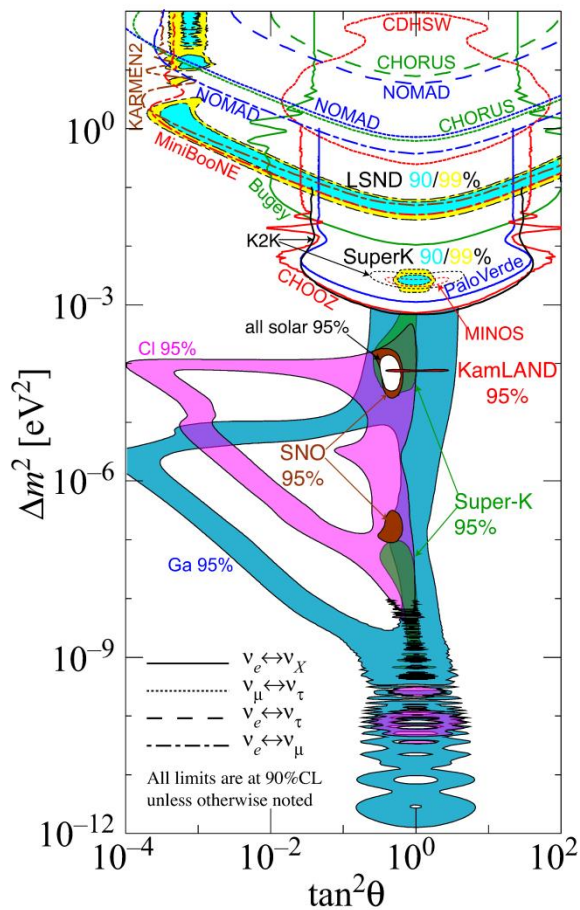
ν_μ yüklü etkileşimleri salınımın oluşmadığı ve salınımın etkin olduğu mesafede ölçülür,

- 1) Nötrino hizmesinin akısı yüksek hassiyetle bilinmesi ve detektördeki sistematik hataların kontrol altında tutulabilir ve düşük miktarda olması
- 2) Benzer sisteme ve teknolojiye sahip Yakın ve Uzak detektör kullanımı, etki kesiti ve detektörlerden kaynaklı sistematik hatalar birbirini yok eder
- 3) Her iki detektörde nötrininin enerji spektrumunda salınımdan kaynaklı bozukluk (distortion)

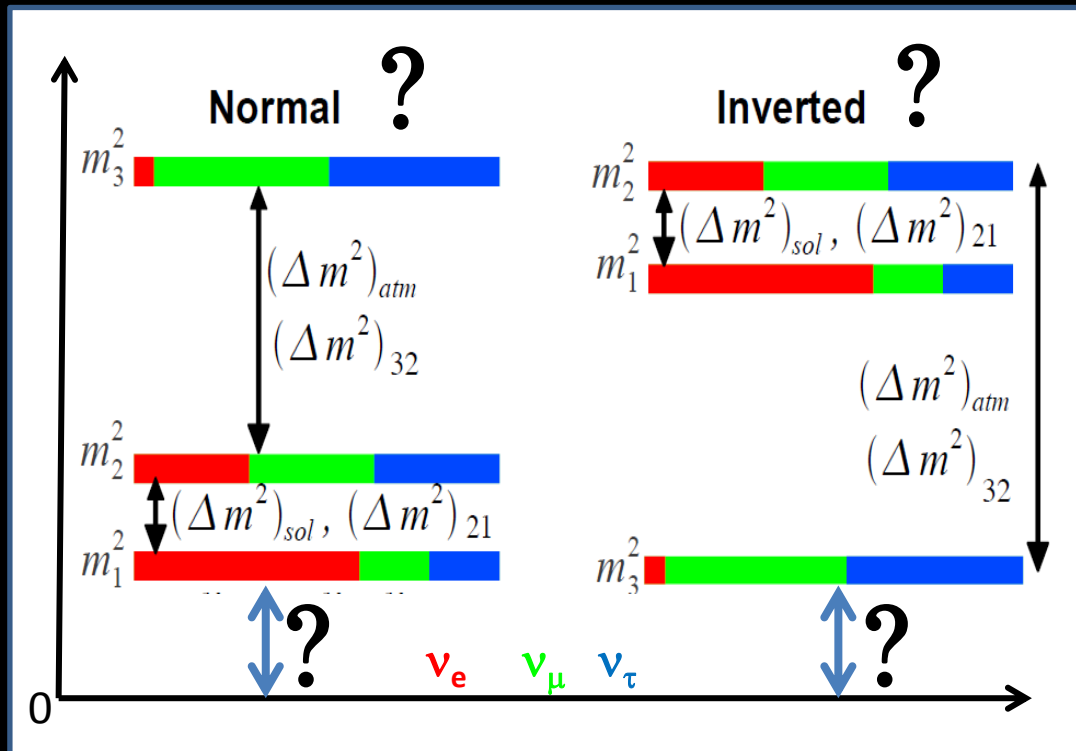
Günümüze kadar nötrino salınımlarını araştırmış olan deney grupları (eksik varsa af ola)



Octant (a)symmetric contours:



Particle Data Group
<http://pdg.lbl.gov/>



Global fit (E. Lisi et al.)	NH – IH
Δm_{21}^2 (eV ²)	$7.54 \cdot 10^{-5}$
Δm_{32}^2 (eV ²)	$2.44-2.40 \cdot 10^{-3}$
Δm_{31}^2 (eV ²) = $\Delta m_{32}^2 - \Delta m_{21}^2$	
$\sin^2 \theta_{12}$	0.308
$\sin^2 \theta_{23}$	0.425-0.437
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0234-0.0239
Umut KOSE δ/π	1.39-1.35

Mass hierarchy?

Maximal?

CP phase

HyperK



JUNO

LBNE

31/07/2014

Anomaly



1. LSND deneyi, Los Alamos, 1993-1998. $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ salınımı, $E_\nu \sim 30$ MeV, $L \sim 30$ m. Beklenenden daha fazla nötrino etkileşimi gözlenmesi,
2. MiniBooNE deneyi, Fermilab, 2002-2012. LSND'nin sonucunu test etmek için design edildi. $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ ve $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ salınım sonuçları,
3. Nükleer reaktörlerden çıkan nötrinoların akısı yeniden hesaplanması, %3.5 lik bir artış bulundu. Bu yeni hesaba göre daha önce yapılan kısa menzilli reaktör antinötrino deneylerinin sonuçlarında ortaya çıkan sonuçlar,
4. Gallium solar nötrino deneyleri
5. Kozmolojiden gelen bazı öngörüler

Yukarıda sıralı deneysel sonuçların açıklanabilmesi için 4th nötrinoya ihtiyaç var. Bu nötrino Z bozonuna bağlanmadığı için **STERİLE nötrino** adı verilmektedir.

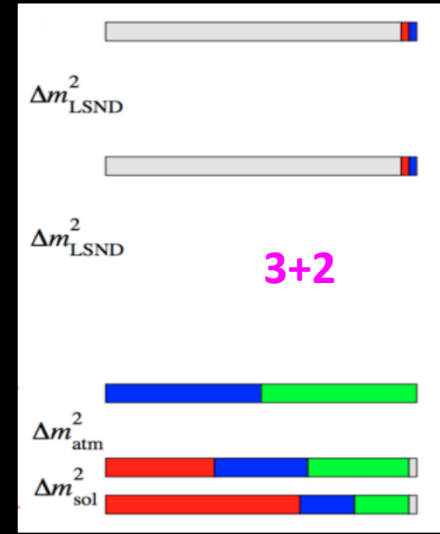
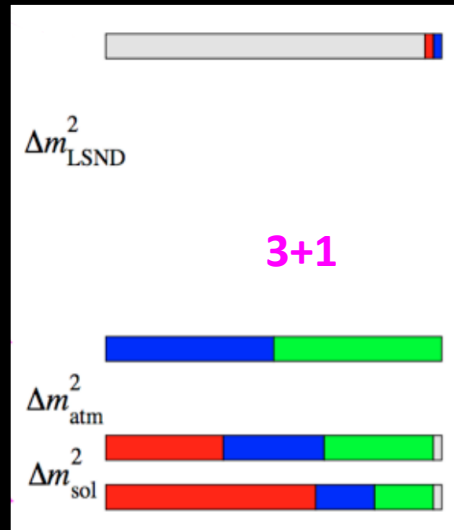
**Doğanın bize söylemek
istediği
bir şeyler mi var?**



STEREO

LAr1ND

JPARC-MLF



Nötrinin kütlesini doğrudan ölçüm tekniği:

- Elektron nötrino'nun kütlesi,



β -bozunum spektrumunun end-point bölgesini hassas olarak ölçmek gerekmektedir.

$$m(\nu_e) < 2.2 \text{ eV (95\% C.L.)}$$

- Muon nötrino'nun kütlesi,



P_μ , muon momentumunun hassas bir şekilde ölçülmesi gerekiyor:

$$m(\nu_\mu) < 170 \text{ keV (90\% C.L.)}$$

- Tau nötrino'nun kütlesi



$n\pi$ toplam kütleyi hassas ölçmek gerekecek.

$$m(\nu_\tau) < 18.2 \text{ MeV (95\% C.L.)}$$



24 Kasım 2006, Leopoldshafen

Nötrinolar nasıl kütle kazanır?

Standard modelde parçacıkların kütle kazanımı spontaneous symmetry breaking mekanizmasıyla açıklanır. Fermiyon kütleleri sol-elli fermiyon ile sağ-elli fermiyonun skaler Higgs alanıyla etkileşmesinden, Yukawa bağlaşımı (coupling) ve vakum beklenen değerinden elde edilir.

$$\frac{\lambda_{\psi} v}{\sqrt{2}} \bar{\psi} \psi + \frac{\lambda_{\psi}}{\sqrt{2}} H \bar{\psi} \psi \longrightarrow \text{Kütle terimi } \frac{\lambda_{\psi} v}{\sqrt{2}}$$

Standard modelde sağ-elli nötrinolar yoktur! Sağ-elli nötrinolar, ν_R , eklenirse higgs mekanizmasına göre **nötrinoların kütlesi** $m_{\nu}^i = \frac{\lambda_{\psi}^i v}{\sqrt{2}}$. **~1eV** bir kütle değeri için bilinen vakum beklenen değeri ışığında **nötrinoların Yukawa coupling** **~10⁻¹¹** gibi bir değere sahip olmak zorundadır. Standard model nötrinoların çok küçük kütle sahibi olmasını açıklamakta yetersizdir. Standard modelin ötesine geçmek gereklidir. Bu durum Dirac nötrinolar için geçerlidir ve toplam lepton korunumu sağlanır.

Majorana nötrinolar için düşündüğümüzde sağ-elli nötrino ν_L^c ile gösterilir.

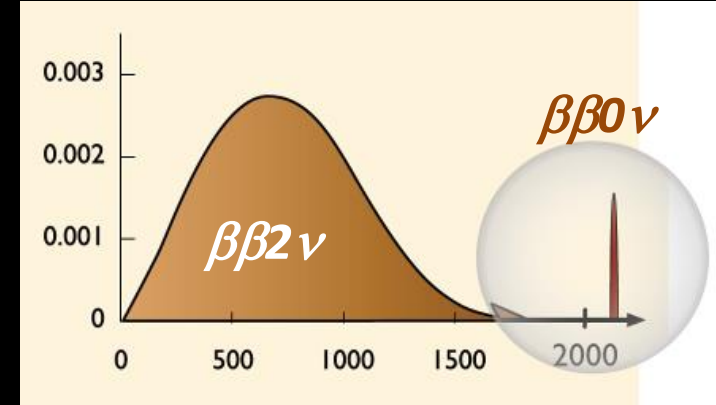
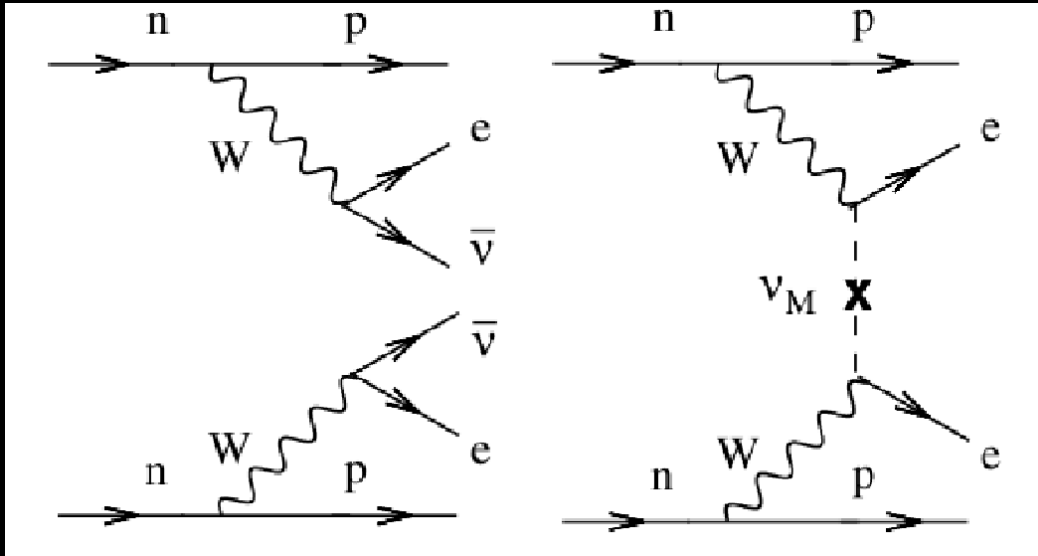
$$\mathcal{L}_{mass}^M = -\frac{m}{2} \overline{\nu_L^c} \nu_L + h.c. \text{ Toplam lepton korunumu iki birimle kırılmıştır } \Delta L = \pm 2.$$

Majorana nötrinoların kütlesi SM Higgs alanı ve Yukawa couplingten elde edilemez. Nötrinolar Majorana ise Standard modelin ötesinde yeni fizik çözümleri gereklidir.

Majorana nötrino:

$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$, $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$, $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ gibi bazı çekirdekler çift beta bozunumuna uğrarlar: $(A; Z) \rightarrow (A; Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}$

Nötrinosuz çift beta bozunumu nötrinolar majorana karakterinde ise gerçekleşebilir!



Dünya barışı için nötrinolar

Nötrinolar maddeyle etkileşimi çok zayıf olduğu için, nükleer reaksiyonlardan oluşan nötrinolar hiçbir şekilde durdurulamaz. Bu demek oluyor ki, nükleer faaliyetlerde (fission temelli nükleer silah, nükleer deneme testleri) bulunan ülkelerin bunu gizlemesi imkansızdır. Yapılacak herhangi bir test sonucunda oluşan anti-nötrinoların yakalanması ve sismik dalgalarla karşılaştırılması yeterli olacaktır.

1kton TNT → 4200 Giga-joule

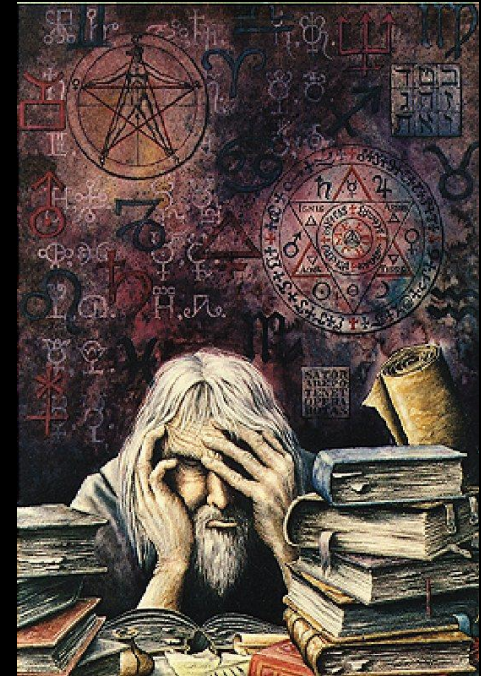
10 saniye içerisinde 10-20 kton'luk TNT den yaklaşık olarak $8 \cdot 10^{23}$ anti-nötrino yayılacak.

Sonsöz: Nötrinoların bilime katkısı ne olacak?

- ❖ *Evreni ve evrenin evrimini*
- ❖ *Maddenin karşıt maddeye üstünlüğünü*
- ❖ *Karanlık maddeyi anlamamıza olanak sağlayacak.*

Fizikcilerin aradığı cevaplar:

- ❖ *Üçten fazla nötrino var mıdır?*
- ❖ *Sterile nötrino var mı? Varsa kaç tane? Hafif veya ağır kütleli?*
- ❖ *Nötrinolar kendi karşıt parçacıkları mıdır? Dirac veya Majorana type?*
- ❖ ***Nötrinolar kütlelerini nasıl kazanıyor?***
- ❖ *Nötrinoların kütlesi nedir?*
- ❖ *Kütle hiyerarşi? Inverted or normal?*
- ❖ *CP, CPT violation?*
- ❖ *.....*



“Somewhere, something incredible is waiting to be known.”

Carl Sagan

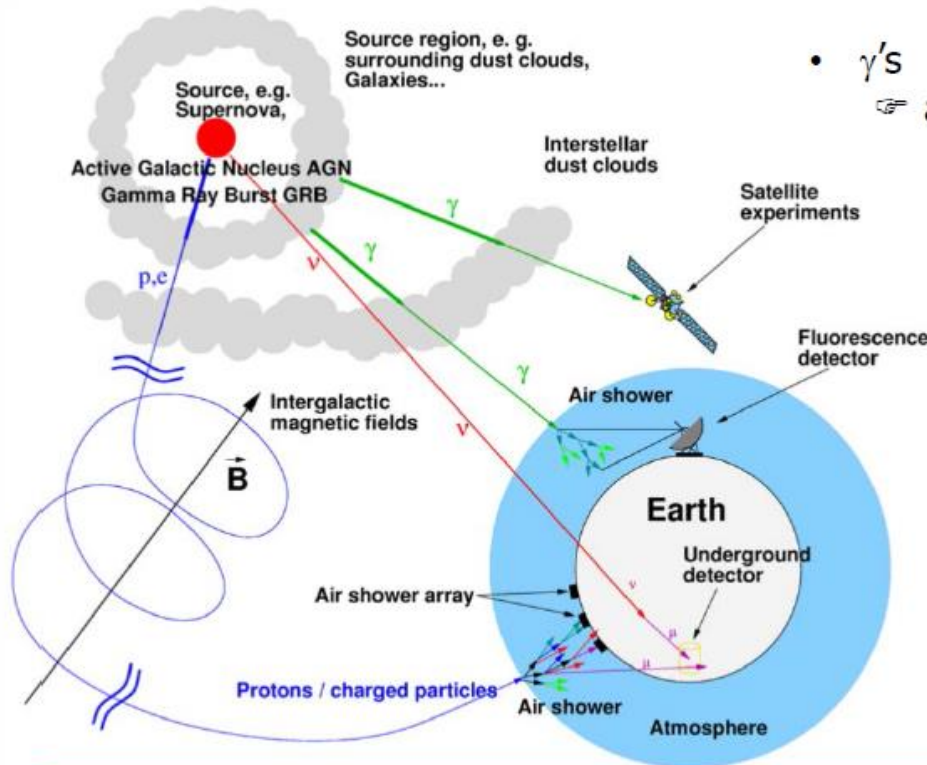
"That's all Folks!"





Teşekkürler..

the sources of UHE CRs also produce neutrinos



- γ 's
☞ absorbed on gas, dust, CMB
- CRs
☞ deflected, lose pointing
- UHE CRs point
☞ very rare
- UHE CRs interact with CMB
☞ GZK mechanism

to observe the UHE universe – need a messenger unaffected by gas, dust or magnetic fields – the neutrino

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \left| \langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t, x) \rangle \right|^2 = \sum_{i,j} U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left(-i \frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L\right)$$

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

**Karışım acısı max.
olasılığı belirler**

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \times \sum_{i>j} \text{Re}[U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L\right) + 2 \times \sum_{i>j} \text{Im}[U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L\right)$$

**L/E Salınım
terimi**

CP korunumlu ise 0

$$L_{ij}^{osc} [km] = \frac{2.47 E [GeV]}{\Delta m_{kj}^2 [eV^2]}$$

Oscillation length

İki nötrino çerçevesinde (kısa erimli nötrino salınımlarında ve mass dominant durumlarda kabul edilen yaklaşımlar) ve vakumda düşünüldüğünde

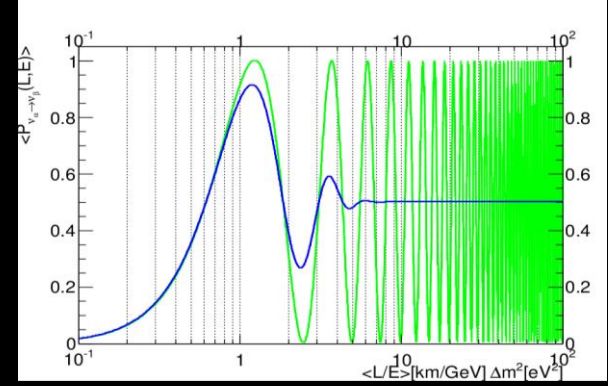
Karışım açısı

$\Delta m^2 \neq 0$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]} \right)$$

L nötrino kaynağı ve detektör arasındaki mesafe

E nötrininin enerjisi



$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ Üç nötrino çerçevesinde CP terimini, low mass scale ve vakumda

$$= \sin^2(\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) + \cos^2(\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \right) \\ \pm J \sin(\delta) \sin \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) + J \cos(\delta) \cos \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right)$$

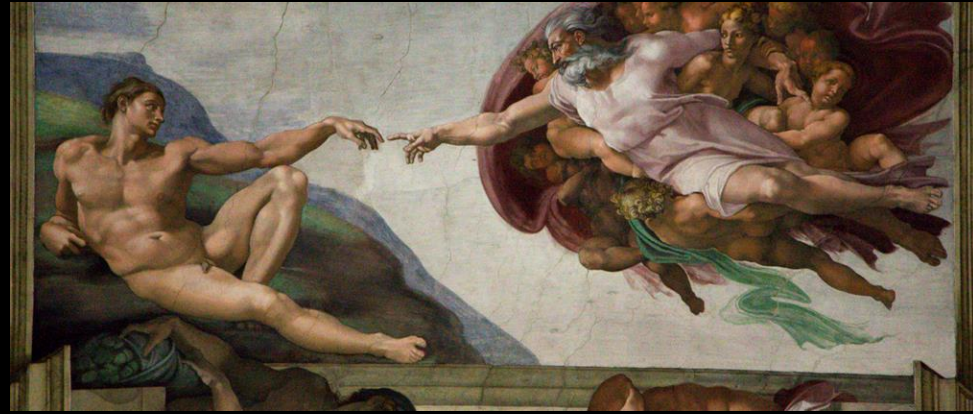
Burada $J = \cos(\theta_{13}) \sin(2\theta_{12}) \sin(2\theta_{13}) \sin(2\theta_{23}) \sin \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) \sin \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \right)$

Şayet karışım açılarından herhangi biri sıfır değilse, leptonic sektörde CP çalışmaya olanak sağlar! Uzun erimli nötrino salınım deneylerinde Matter effect etkisi hesaba katılmalı. Daha sonra sözünü edeceğimiz mass hierarchy problemide bu yöntemle çözüme ulaşabilir.

Nötrino salınımları nötrininin majorana tip bir parçacık olup olmadığı konusunda herhangi bir cevap sunmaz! Bunun testi için nötrinossuz çift beta bozunum deneylerine gereksinim vardır.



"Quarks. Neutrinos. Mesons. All those damn particles
you can't see. That's what drove me to drink.
But now I can see them!"



Nötrino etkileşim sayısı

$$N_{\nu}(E) \sim \phi_{\nu}(E) * \sigma_{\nu} * target$$

Nötrino akısı (sizin nötrino kaynağınıza bağlı)

Algıç

Nötrino tesir kesiti, $\sim 10^{-38} \text{ cm}^2$

$$\sigma_{\nu} \sim E_{\nu}$$

Detector types:

- 1) Radiochemical detectors
- 2) Detectors of Cherenkov radiation
- 3) Scintillation detectors
- 4) Detectors based on neutrino scattering on electrons

