

Nötrinolar

Umut Kose

Turkish Teachers Programme

June 2016

CERN



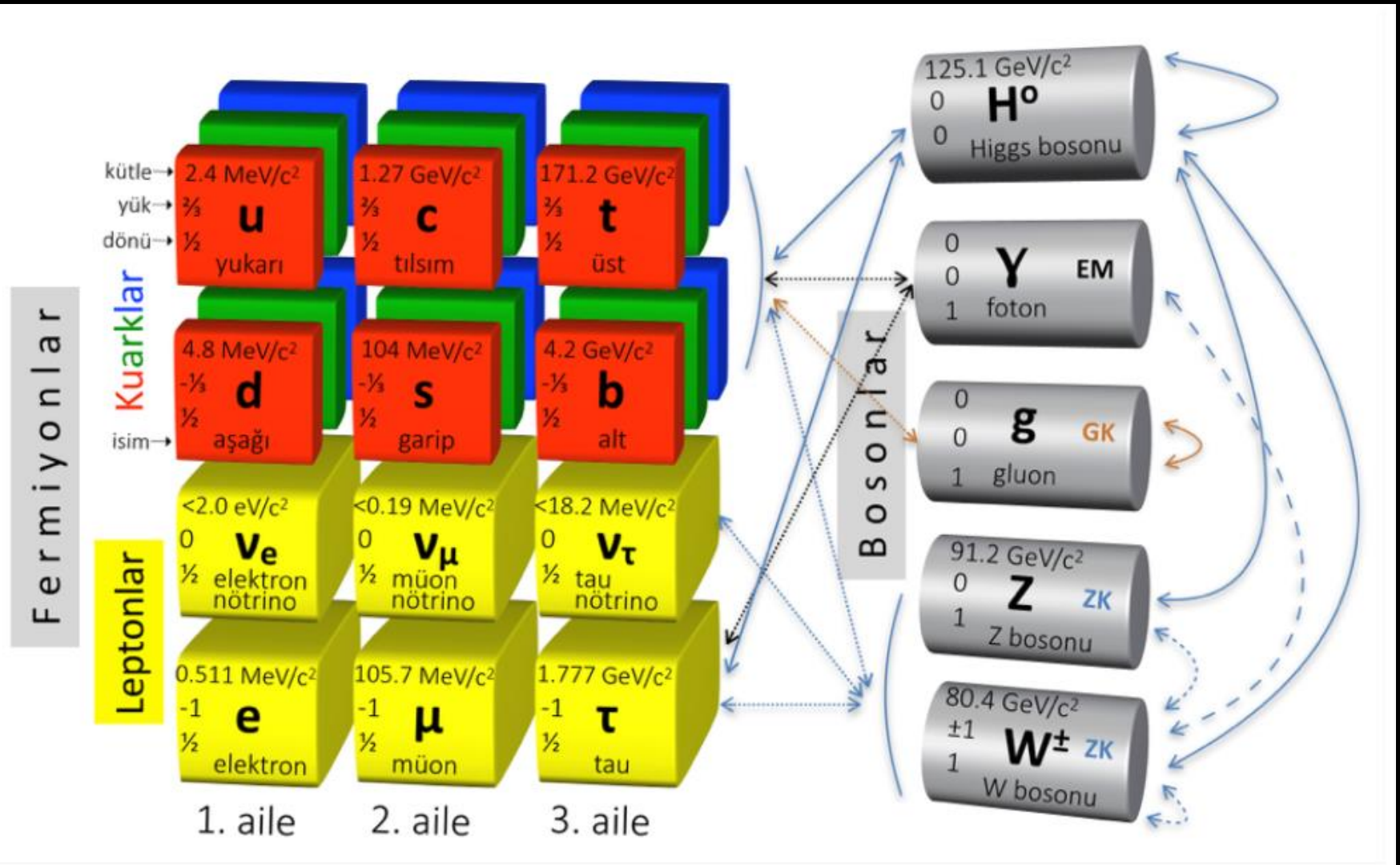
- Bern Universitesi
- CERN Neutrino Platform

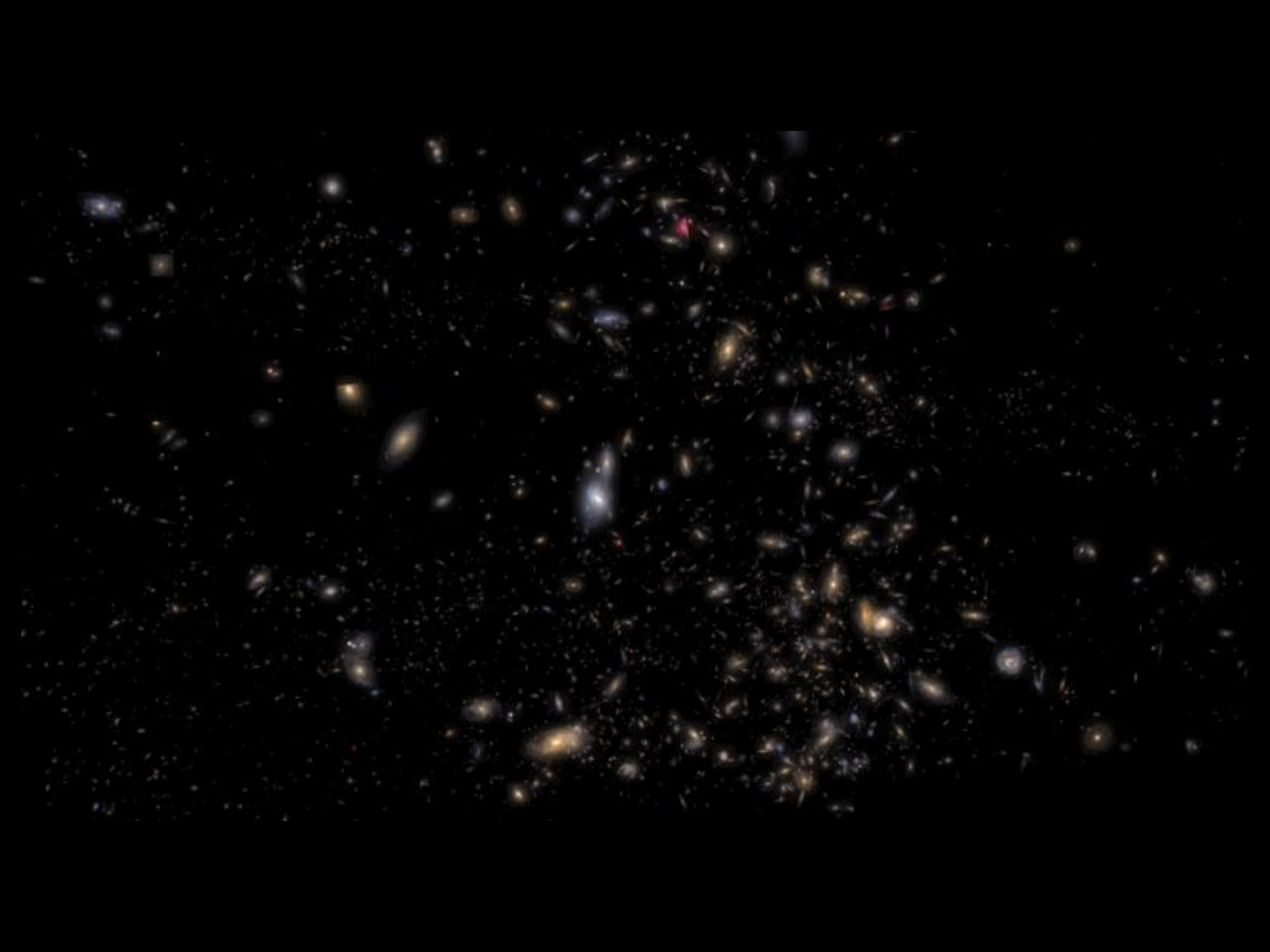


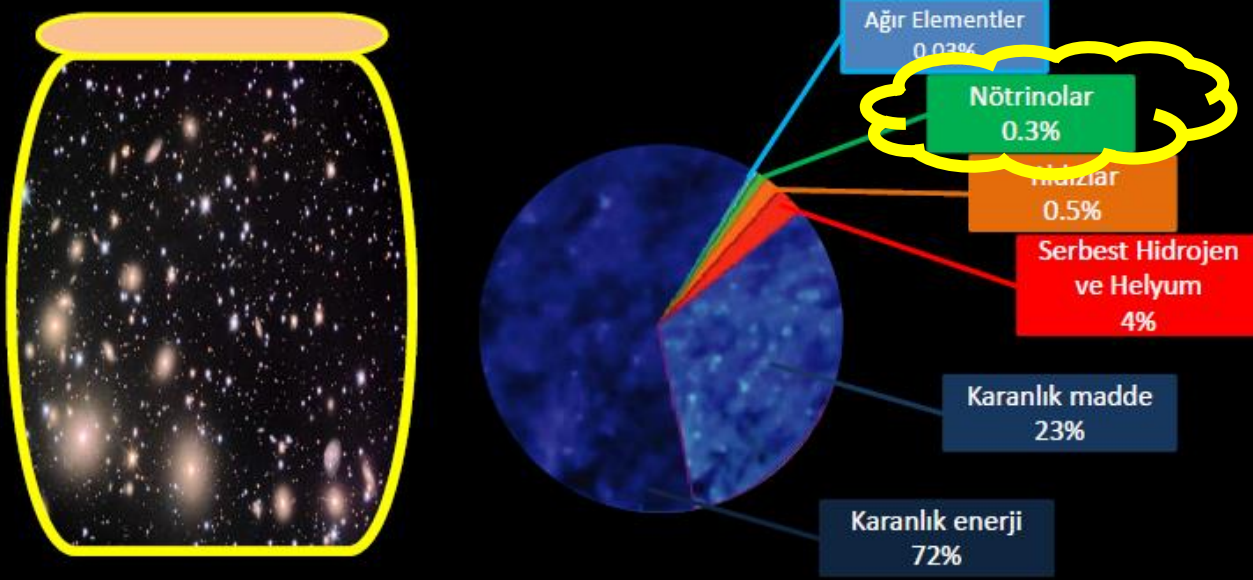


Notrinolar neden önemli?

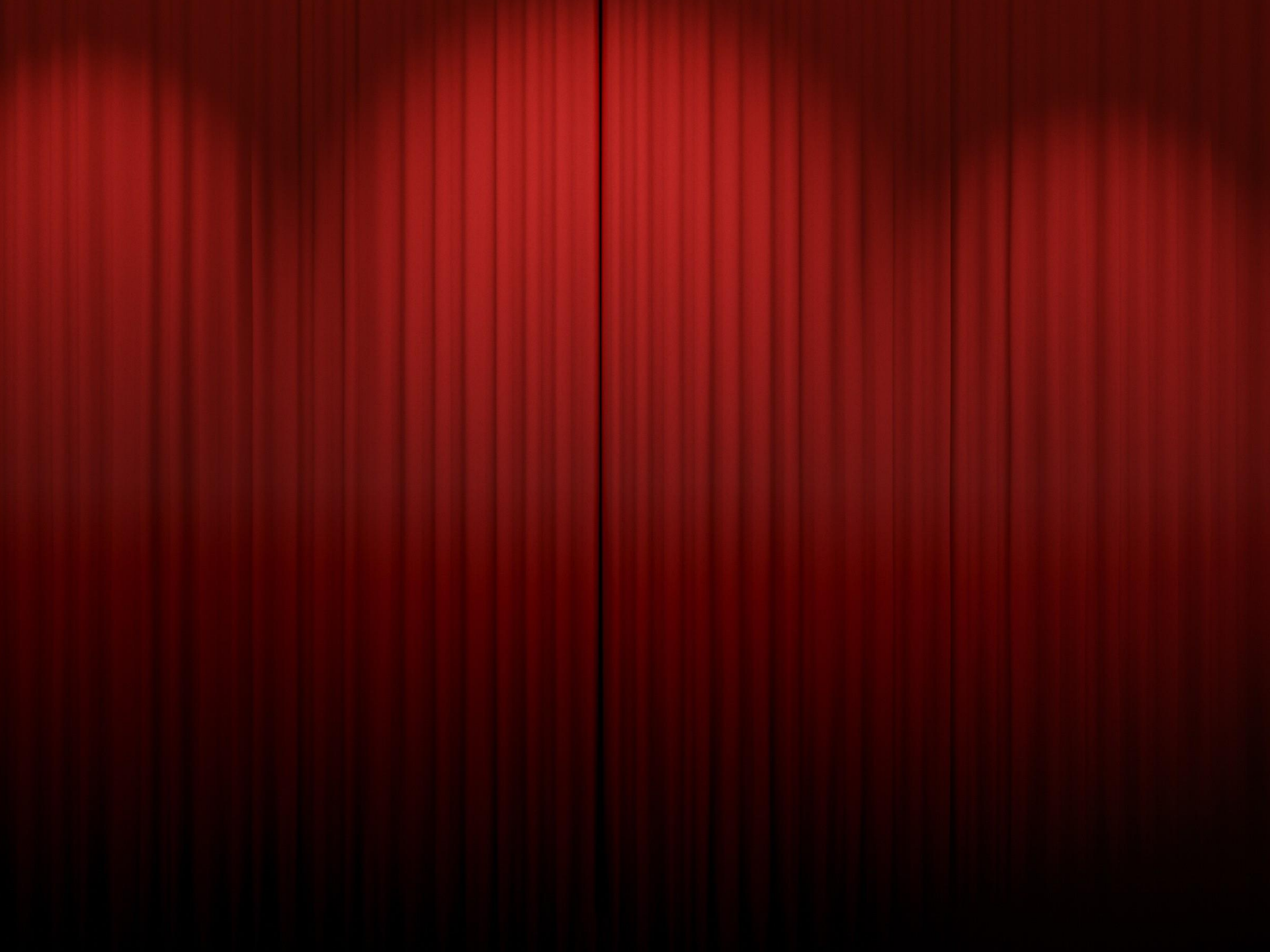
Maddenin temel yapıtaşları ve etkileşimleri

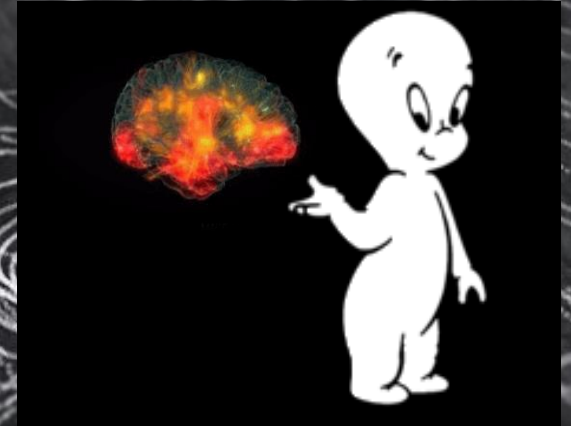






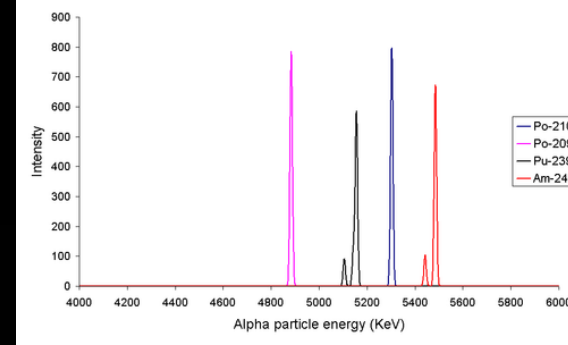
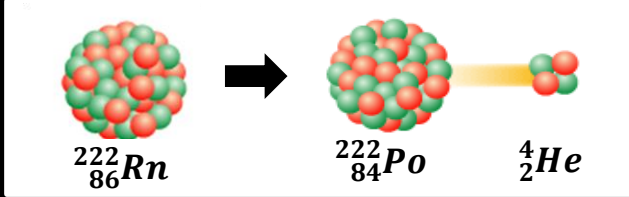
- Evrenin ~%5'i bildiğimiz maddeden oluşmaktadır!
- Fotondan sonra evrende en yüksek yoğunlukta bulunan parçacıklar nötrinolardır!
- Evreni ve evrenin evrimleşme sürecini anlamak gizemli parçacık olan nötrinoları anlamaktan başlar.





Radyoaktivite; kararsız çekirdeklerin (örneğin nötronların sayısı proton sayısına göre oldukça fazla olan çekirdekler, U_{92}^{238} gibi) üzerindeki enerji fazlalığından kurtulup kararlı bir duruma geçiş yaparken “**alfa, beta, gamma**” gibi çeşitli ışımlar yaparak parçalanması olayıdır. Çevresine bu şekilde ışın saçarak parçalanan maddelere radyoaktif madde (ışınımsal madde) denir.

Alpha bozunumu



Radon gazı (Bulut Odası deneyi)

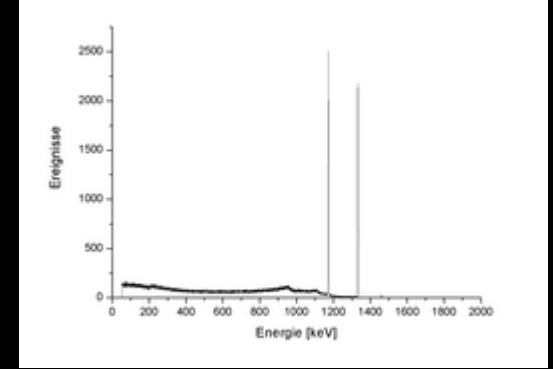
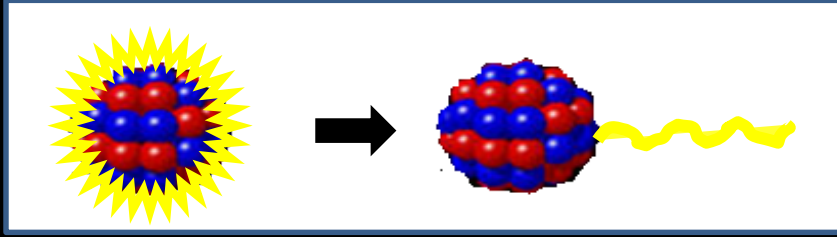


Uranyum (Bulut Odası deneyi)

Alpha bozunumunda salınan He_2^4 çekirdeği havada 1-2 cm erime sahiptir: ince bir kağıt parçası ve ölü deri tarafından tamamen soğrulabilir. Alpha bozunumuna uğrayan radyoaktif maddeler solunum veya sindirim yoluyla vücuda alındığında risk oluşturabilir!

Evlerimizde bol miktarda bulunan Radon gazı (yarılanma ömrü 3.8 gün) örnek olarak verilebilir.

Gamma ışıması



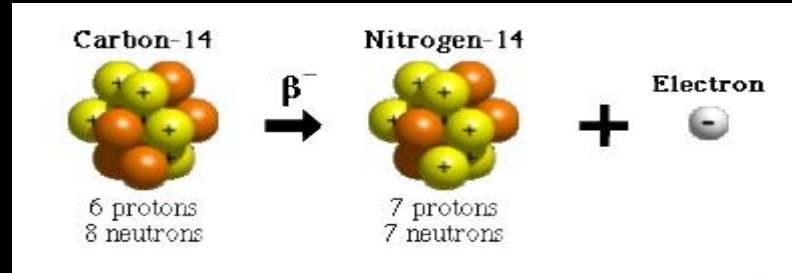
Bazı radyoaktif çekirdekler alpha ve beta bozunumu sırasında tüm enerjisini dışarıya veremez ve yüksek enerjili durumda kalır. Kararlı duruma geçiş yapmak için yüksek enerjili foton, yani gamma ışıması yapar. Salınan yüksek enerjili foton madde içinden geçerken elektronlarla etkileşime geçer böylece atomlarda iyonlaşma meydana gelir. Kurşun ya da çelik gibi yoğunluğu yüksek ve kalın malzemeler kullanılarak bir zırhlama sağlanabilir.

Gıdaların sterilizasyonunda ve hastanelerde kanser tedavilerinde (radyoterapi) kullanılmaktadır.



Beta bozunumu

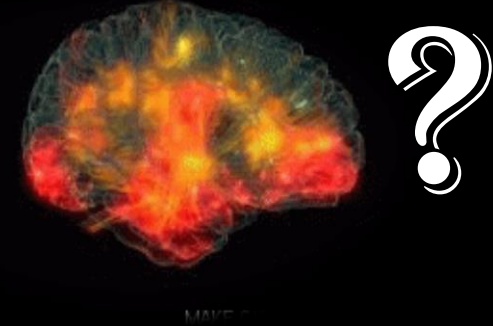
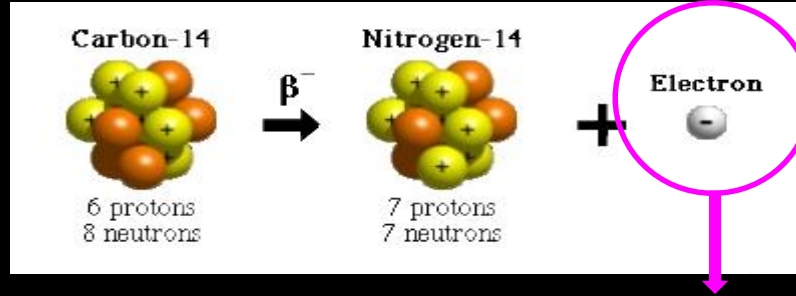
(1900'lerin başında bilinen hali)



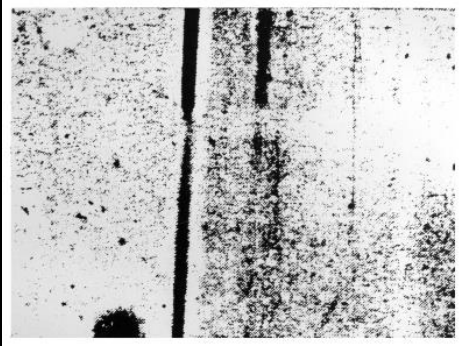
Bir diğer bozunum şeklide kararsız çekirdeklerin beta parçacığı yani elektron salınımı yaparak kararlı duruma geçiş yapmalarındır: “beta bozunumu”.

Beta bozunumunda salınan elektronlar plastik, cam veya metal plakalar tarafından tamamen soğurulabilir. Normalde cildimizin üst tabakasından daha içrilere geçmez ama yüksek enerjili beta radyasyonuna maruz kalınırsa cilt yanıkları oluşur. Ayrıca solunum veya sindirim yoluyla vücuda alınması risk oluşturabilir.

Beta bozunumu (1900'lerin başında bilinen hali)

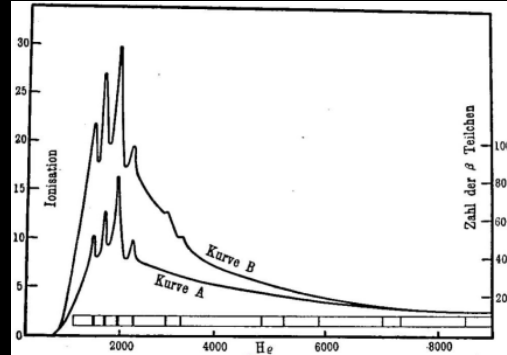


Beta ışımasında açığa çıkan elektronların kinetik enerjileri:



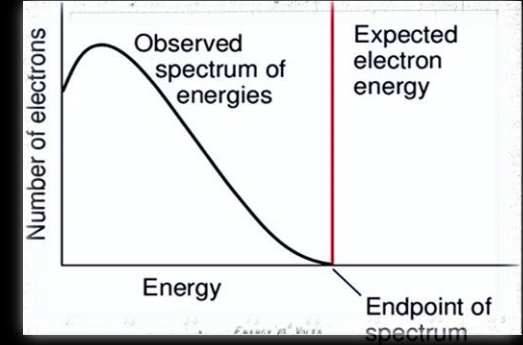
V. Bayer, O. Hahn, L. Meitner, 1911

→ kesikli spektrum



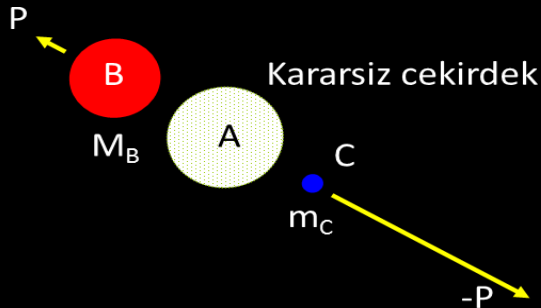
J. Chadwick, 1914

→ elektronlar tek enerjili değil!!



Ellis & Wooster, 1927

→ Sürekli!!



$$A \rightarrow B + C$$

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^-$$

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

Elektronun tek enerjili bir değere sahip olması gerekmektedir!



ENERJİ KORUNUM YASASI ÇİĞNENMEKTEDİR!

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 diğer problemi “Spin(dönü) istatistik problemi”: Atom çekirdeği proton ve elektronlardan meydana geldiği düşünülüyordu. Li (6 proton+3 elektron) ve N (14 proton + 7 elektron) atomlarının Fermi-Dirac istatistiğine uyması beklenirken, deneysel veriler Bose-Einstein istatistiğinin geçerli olduğunu göstermekte!!”



Nötrino Hipotezi

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

Copy

Physics Institute
of the ETH
Zürich

Copy/Dec. 15, 1956 PM

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.

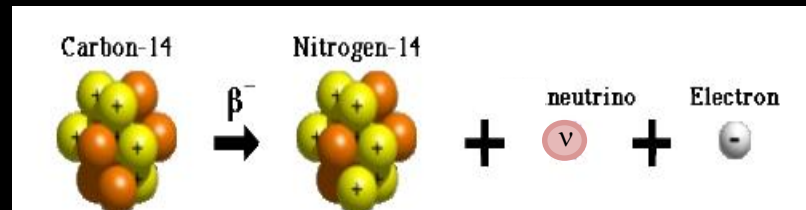
Now it is also a question of which forces act upon neutrons. For me, the most likely model for the neutron seems to be, for wave-mechanical reasons (the bearer of these lines knows more), that the neutron at rest is a magnetic dipole with a certain moment μ . The experiments seem to require that the 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

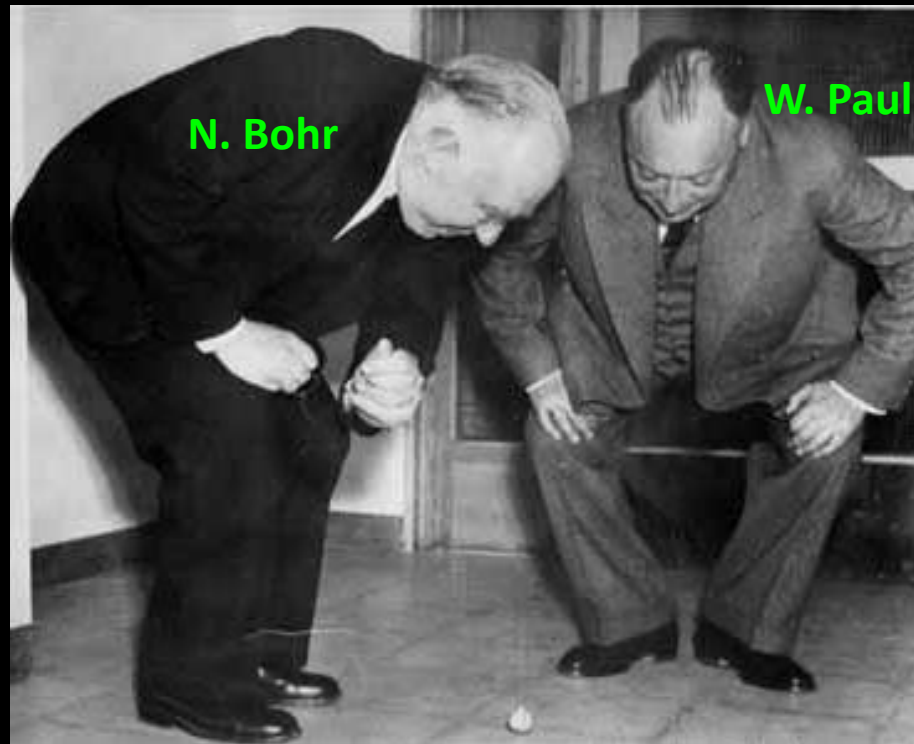
Wolfgang Pauli, 1930,
 β -bozunumunun enerji spektrumunu ve
"spin istatistik" problemini çözmek için
"umutsuz çare (desperate remedy)"
olarak yüksüz, spini $\frac{1}{2}$ olan bir parçacık
önermiştir.



! Lepton numarası korunum yasası
bilinmiyordu.

“I have done a terrible thing. I have postulated a particle that cannot be detected.”

W. Pauli



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.

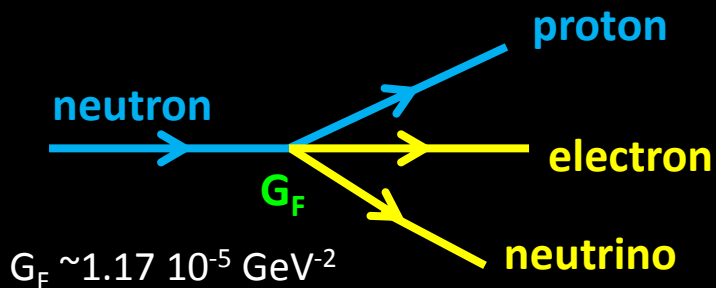
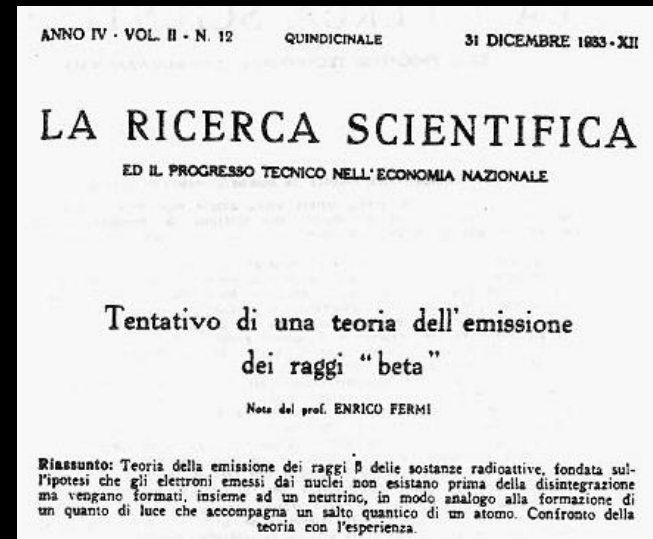


1935

→ E. Fermi, Pauli'nin önermiş olduğu parçacığa “neutrino” ismini önermiştir.

Ettore Majorana, Werner Heisenberg, Dimitri Iwanenko, 1932, birbirlerinden bağımsız olarak atom çekirdeğinin nötron-proton modelini önerdiler.

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 modele 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_ν^2/v_ν . 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

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

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 $\mu = 0$.

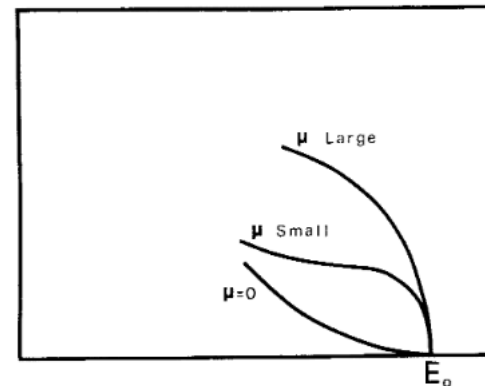


FIG. 1. The end of the distribution curve for $\mu = 0$ and for large and small values of μ .

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”, → $\sigma \sim 10^{-44} \text{ cm}^2$



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

“Söylemek gerekirse nötrinoların varlığına inanmıyorum, var olsa dahi nötrinoları oluşturacak ve gözlemleyebilecek yetenek ve dahilikte bir deneysel fizikçi bulunmamaktadır!”

A. Eddington, *The Philosophy of Physical Science*, 1939

Vasat enerjili bir nötrino kurşun içinden bin ışıkyılı hiçbir etkileşme oluşturmadan geçer.

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.

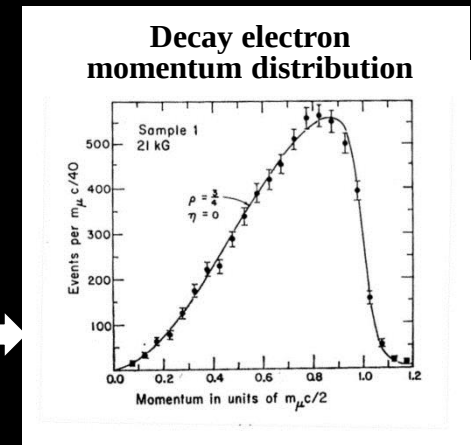
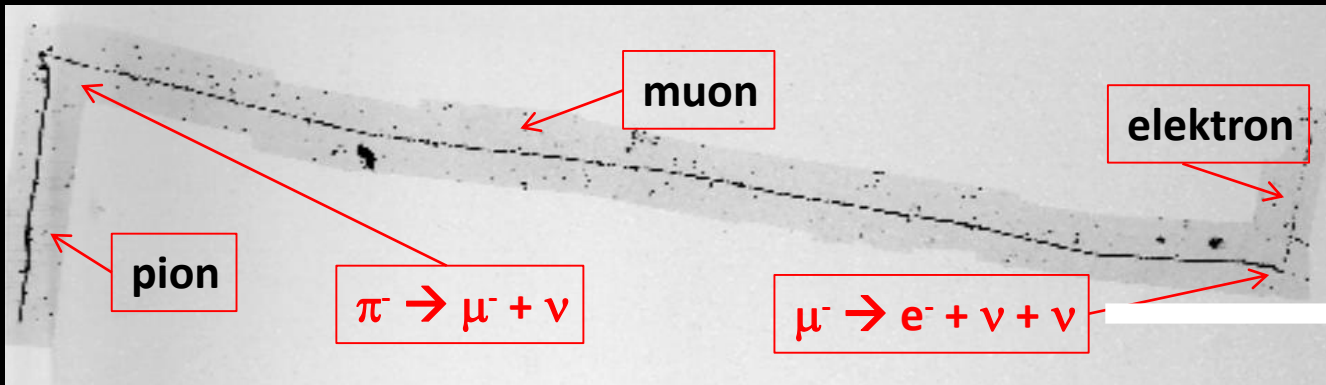


Nötrinoların varolmasına bir kanıt daha!!

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

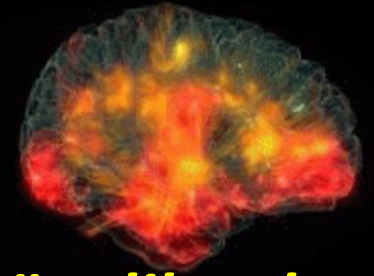
Pion'un bozunumunda muon'un enerji dağılımı sabit olduğundan (tek enerjili), pion'un iki-cisme bozunması gerekmektedir. Böylece pion muon'un yanısıra bir de Pauli nötrinosuna bozunur.

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**

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

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

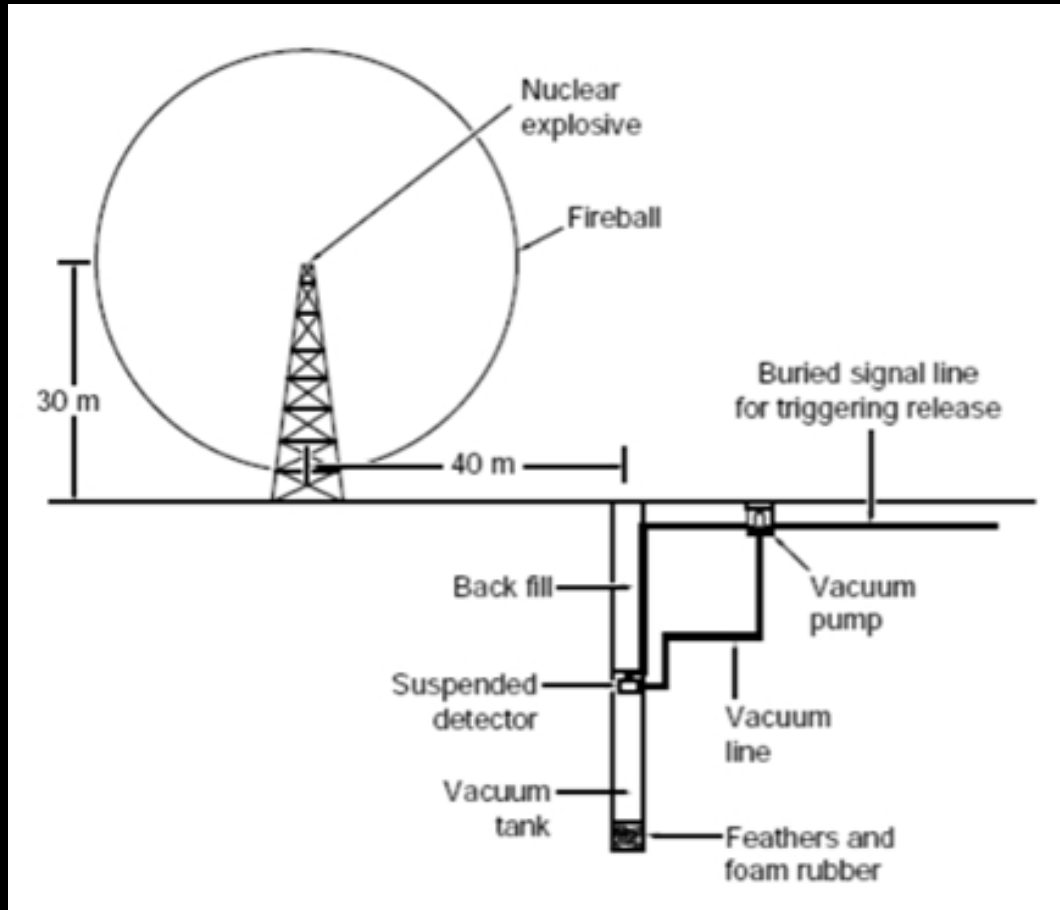
$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

***Lepton sayısı korunumu**

Nötrino'nun gözlemlenmesi yolunda ilk adım!

Fred Reines & Clyde Cowan, 1956 hayaletin peşinde

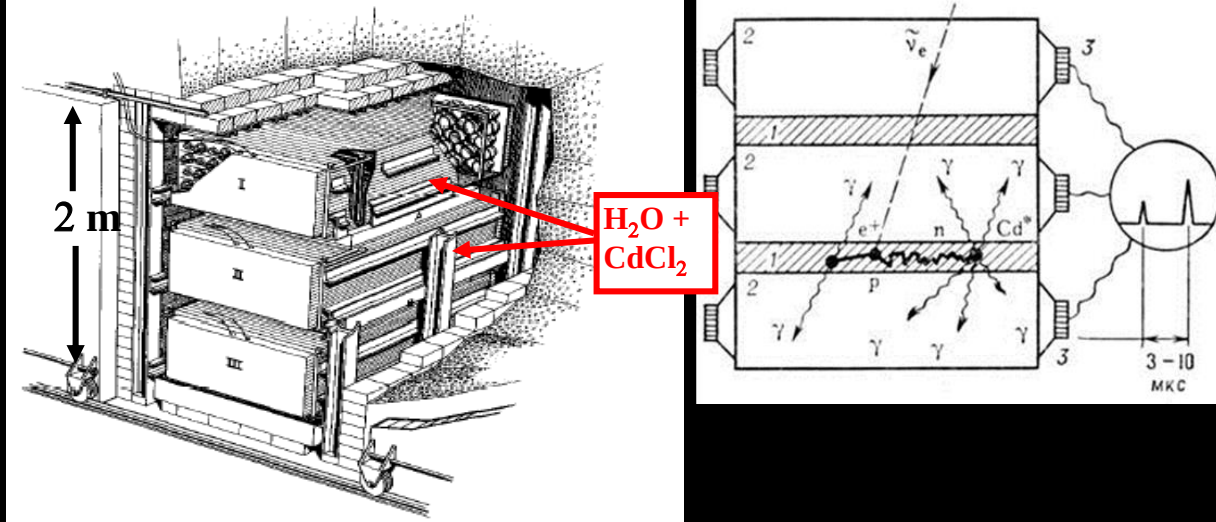
Plan A: Atom bombası



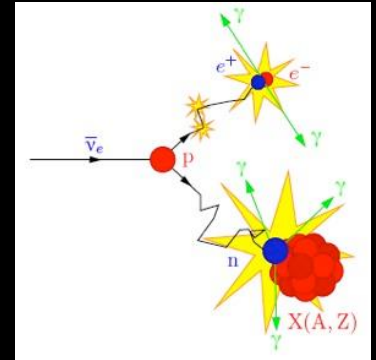
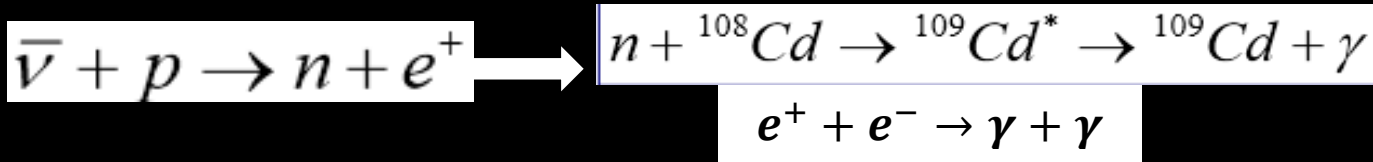
Nötrino'nun gözlemlenmesi:

Fred Reines & Clyde Cowan, 1956 hayaletin peşinde

Plan B: Nükleer reaktörlerin kullanımı



→ *Svannah River nükleer reaktöründe yürüttükleri deneylerde tersinir beta-bozunumu reaksiyonuna baktılar*



THE UNIVERSITY OF CHICAGO

CHICAGO 37 - ILLINOIS

INSTITUTE FOR NUCLEAR STUDIES

October 8, 1952

Dr. Fred Reines
Los Alamos Scientific Laboratory
P.O. Box 1663
Los Alamos, New Mexico

Dear Fred:

Thank you for your letter of October 4th by Clyde Cowan and yourself. I was very much interested in your new plan for the detection of the neutrino. Certainly your new method should be much simpler to carry out and have the great advantage that the measurement can be repeated any number of times. I shall be very interested in seeing how your 10 cubic foot scintillation counter is going to work, but I do not know of any reason why it should not.

Good luck.

Sincerely yours,

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Enrico". The script is fluid and cursive, with a large initial 'E'.

Enrico Fermi

Nötrino'nun gözlemlenmesi:

Fred Reines & Clyde Cowan, 1956 *hayaletin peşinde*



1995



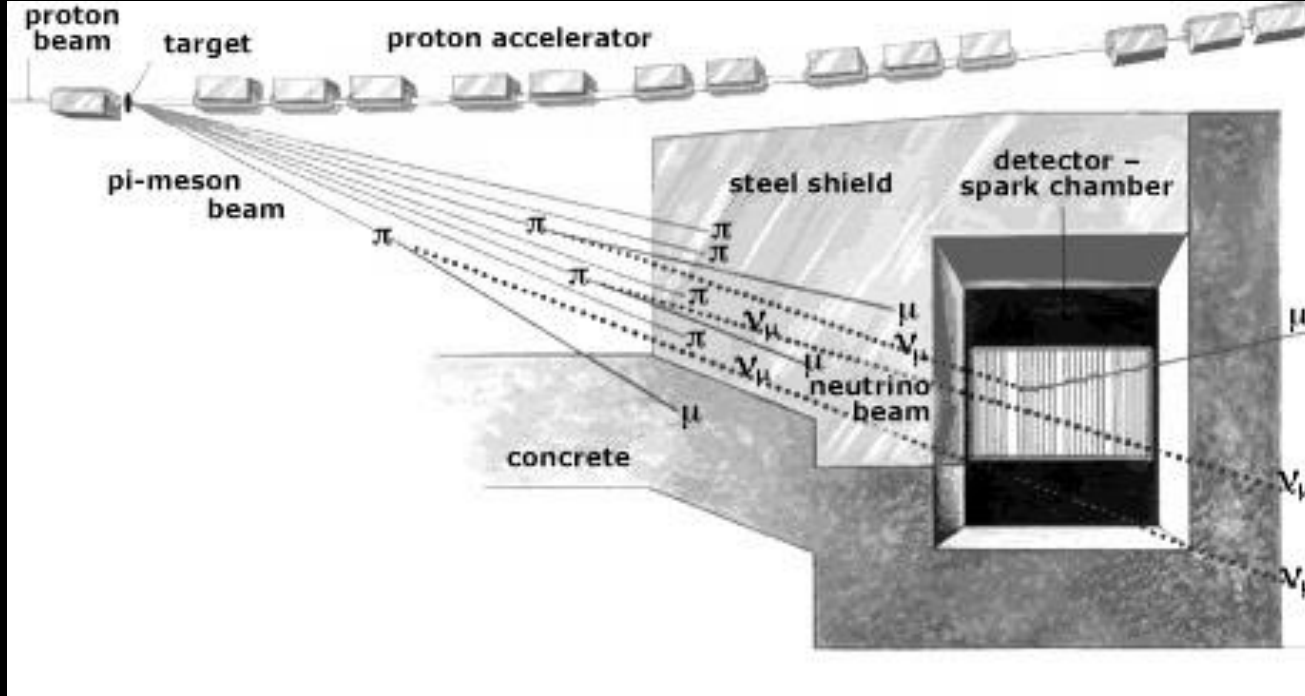
RADIO-SCHWITZ AG. RADIOGRAMM - RADIOGRAMME
SDZ1311 ZHM 101044 FM SZJ116 MH CHICAGOILL
PLC 002573

Erhalten - Rece. "VIA RADIOSUISSE"
von - de NEWYORK
NACHLASS PROF. W. PAULI
Brieftelegramm
LT
PROFESSOR W. PAULI
ZURICH UNIVERSITY ZURICH
NACHLASS PROF. W. PAULI
Per Post ①
74 15.11.58 -1 10

WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED
NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY
OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX
TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS
FREDERICK REINES AND CLYDE COWAN
BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO

1930 → 1956 hipotezden gerçeklğe

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.

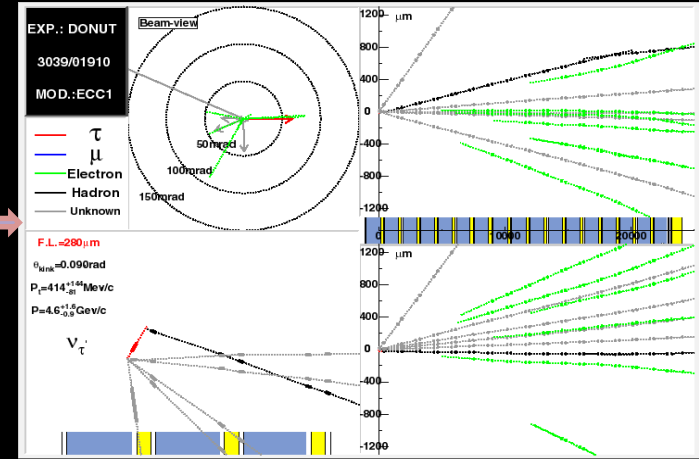
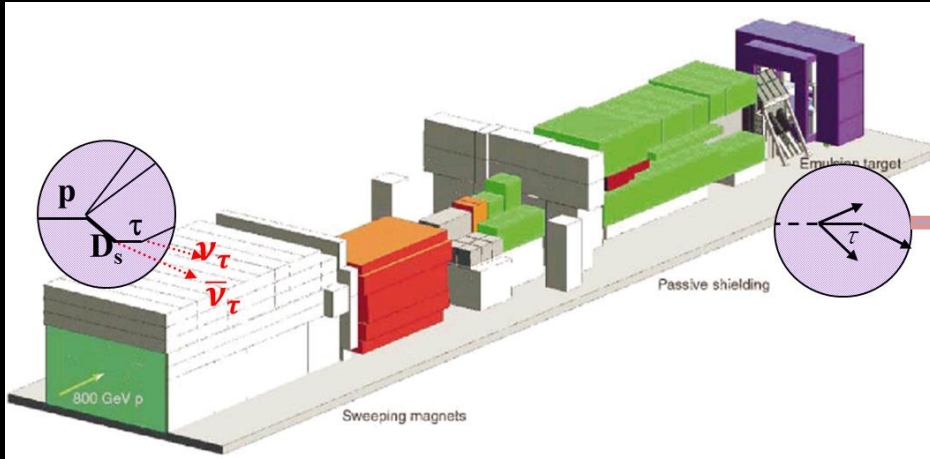


Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda Alternate Gradient Synchrotron kullanılarak 15 GeV enerjili protonun Berilyum hedefine bombardıman edilmesi sonucunda pion ve kaon parçacıklarının bozunumundan yayılan nötrinoların etkileşimlerinden toplam 56 adet müona ait izler gözlemlenirken herhangi bir elektron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

M. L. Perl et al. 1975, tau leptonun keşfi, *Phys. Rev. Lett.* 35, 1489 (1975). Kutlesi 1776 MeV, spin $\frac{1}{2}$ lepton, ortalama omru $2.9 \cdot 10^{-13}$ s. **Üçüncü nötrinin varlığına işaret ediyor.**

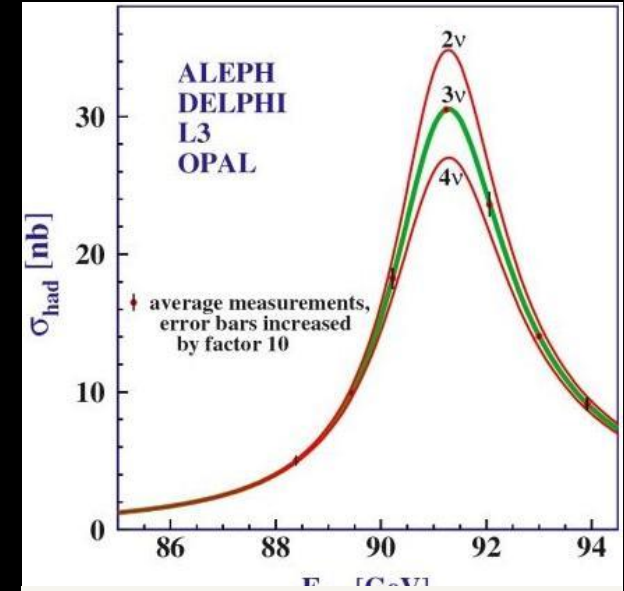
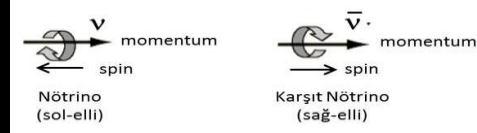


Donut deneyi, 2000, tau nötrinin gözlemlenmesi (toplamda 9 adet ν_τ etkileşimi gözlemlenmiştir).



Standard Modelde nötrinolar:

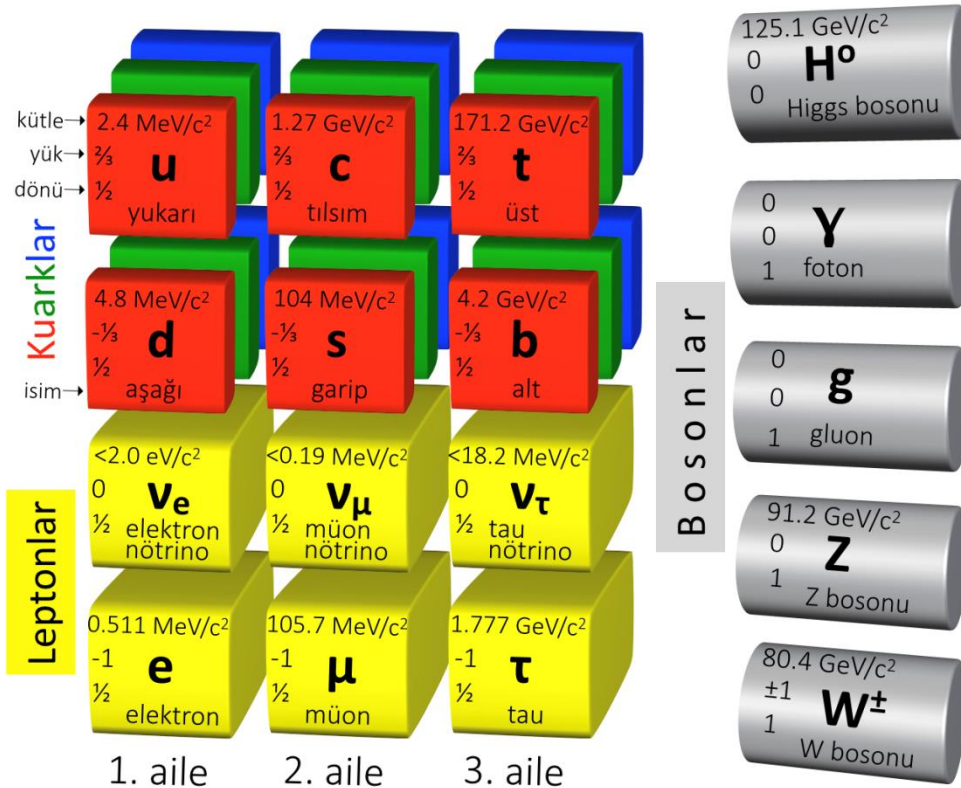
- ν_e, ν_μ, ν_τ
- Yüksüz,
- **kütlesiz**,
- $spin-1/2$,
- sol-elli parçacıklardır,



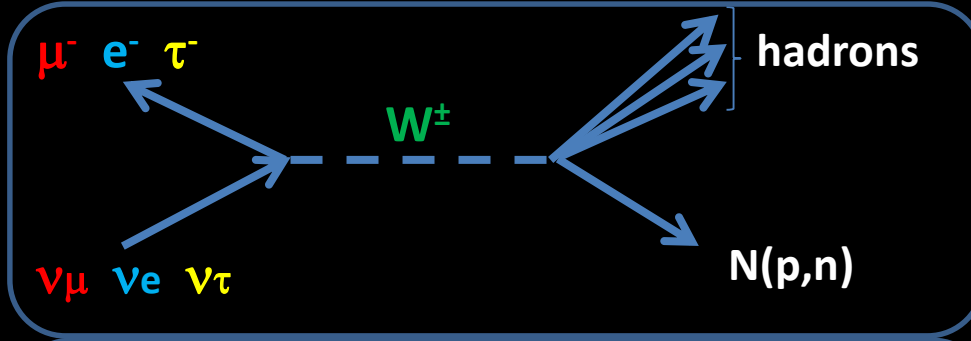
Z^0 production cross-section and width

$$\Gamma_{inv} = \Gamma_Z - \Gamma_{had} - \Gamma_{ee} - \Gamma_{\mu\mu} - \Gamma_{\tau\tau}$$

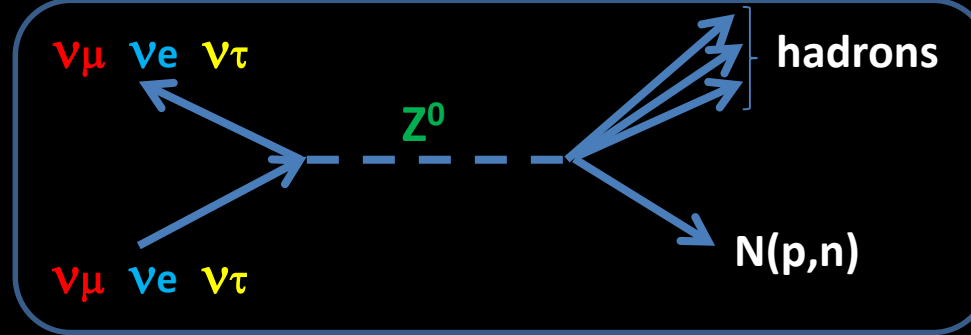
$N_\nu \sim 2.984 \pm 0.008$
(standard model fits to LEP data)



- *Nötrinolar sadece zayıf kuvvetle etkileşirler.*

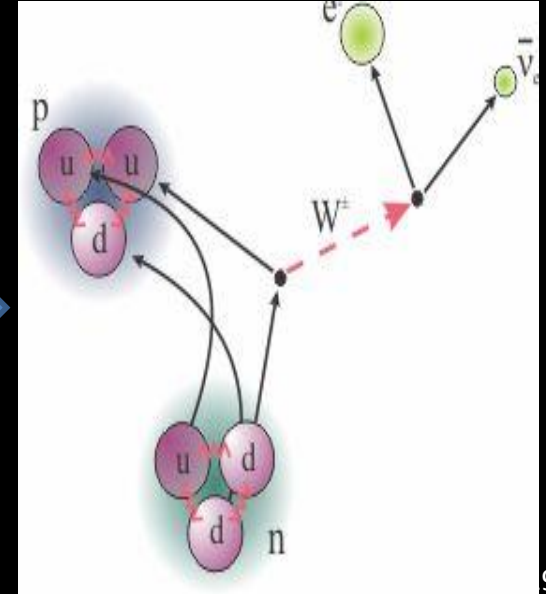


Yüklü Akım (Charged-Current) etkileşimleri



Yüksüz Akım (Neutral-Current) etkileşimleri

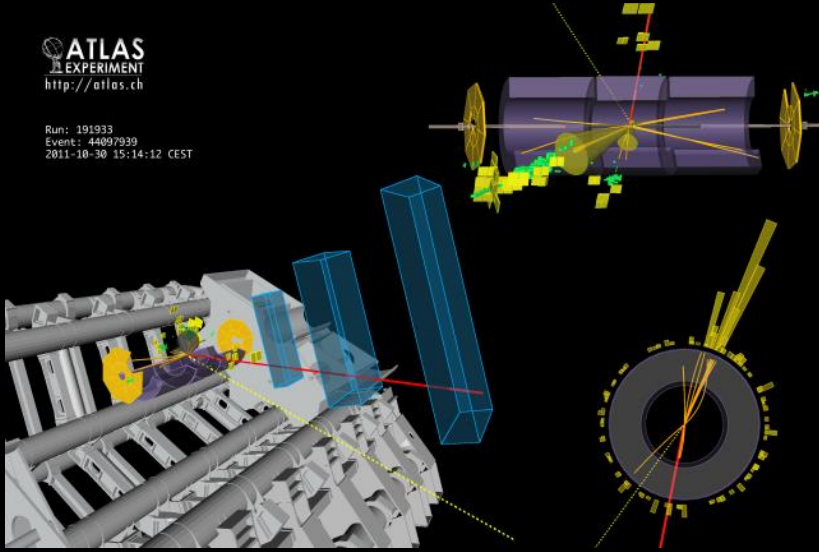
Beta bozunumunun günümüzde ki gösterimi



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

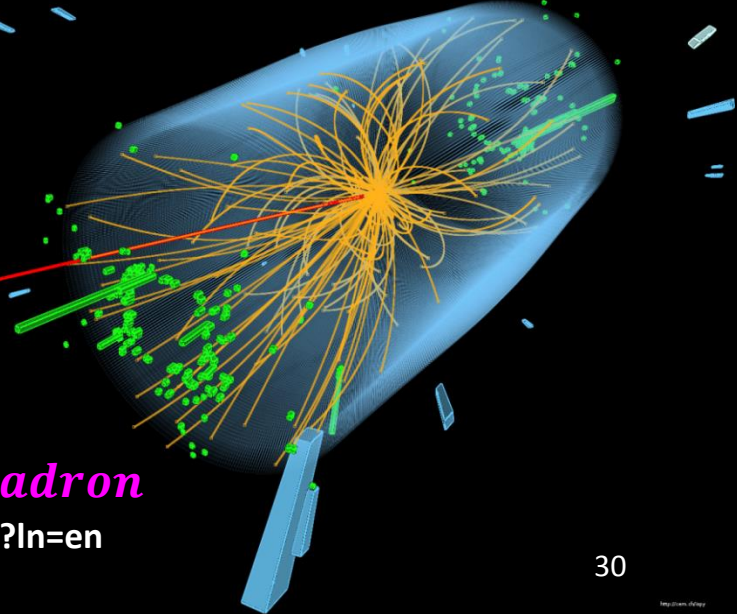
Data recorded: 2012-jun-05 09:58:43.400262 GMT+11:58:43 CEST

Run/Event: 195552 / 61758463

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

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

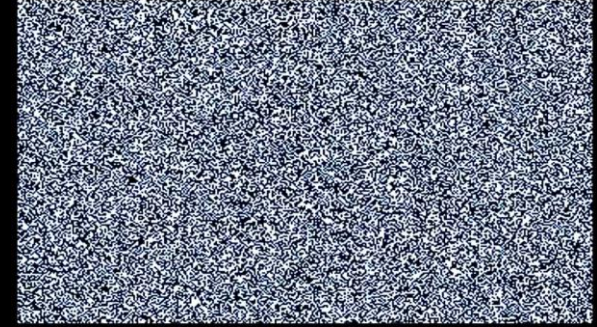
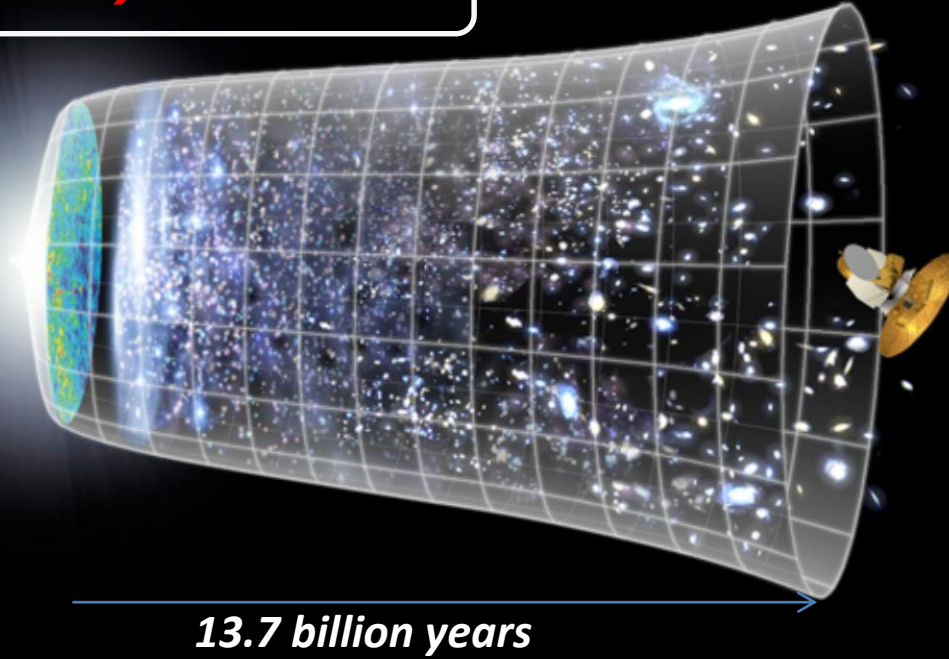
Umut KOSE



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



Relic (kalıntı) nötrino



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

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

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 üzere 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.



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

Y. B. Zeldovich ve O. H. Guseinov,
1965, yıldızların gravitasyonel çöküşü 10^{53} erg
civarındaki enerjinin %99'u nötrinolar tarafından
taşınır..

Patlama öncesi
February 1984



Patlama esnasında
8 March 1987



Patlama sonrası

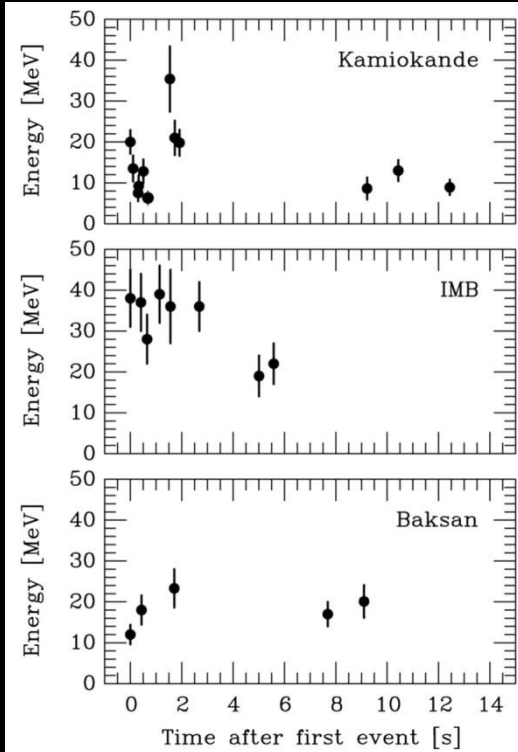


SN1987A

Dünya'dan yaklaşık 168 bin ılık yılı uzakta Samanyolu galaksimizde Büyük Macellan Bulutu içerisinde Tarantula Nebulasının eteklerinde gerçekleşen süpernova patlaması bilim tarihinde çok önemli bir yer tutmaktadır.



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

→ Nötrino Astronomi

M. Koshiba, Süpernova nötrinolarının keşfi

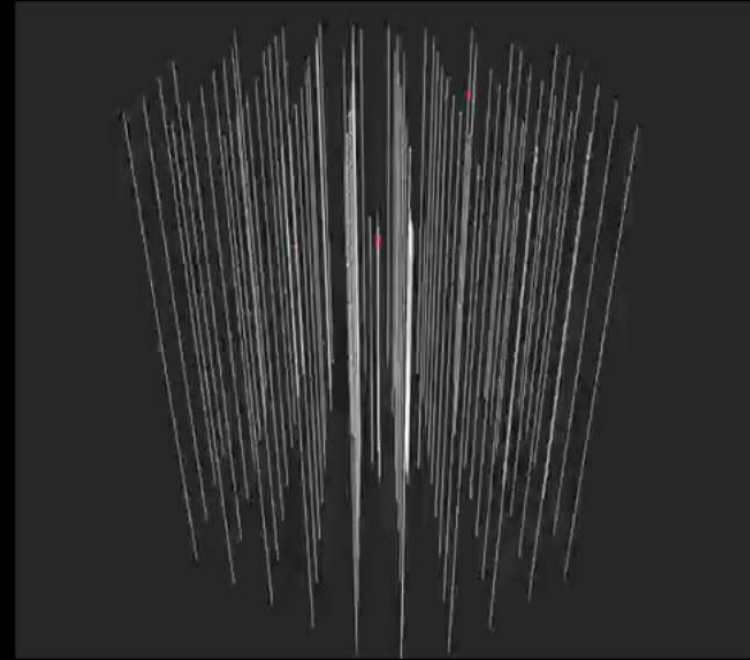
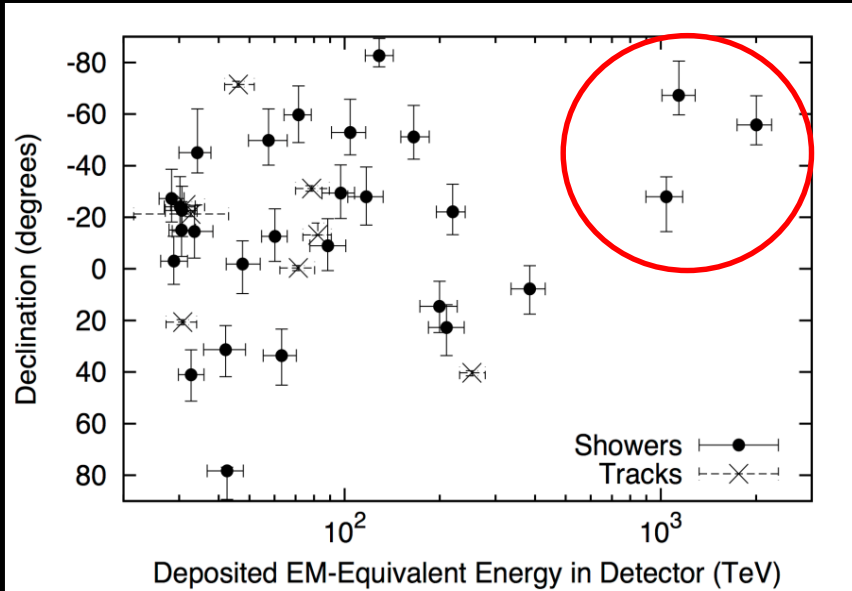
Kamiokande deneyi Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1490



Extragalaktik nötrinolar

IceCube nötrino gözlemevi*

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]



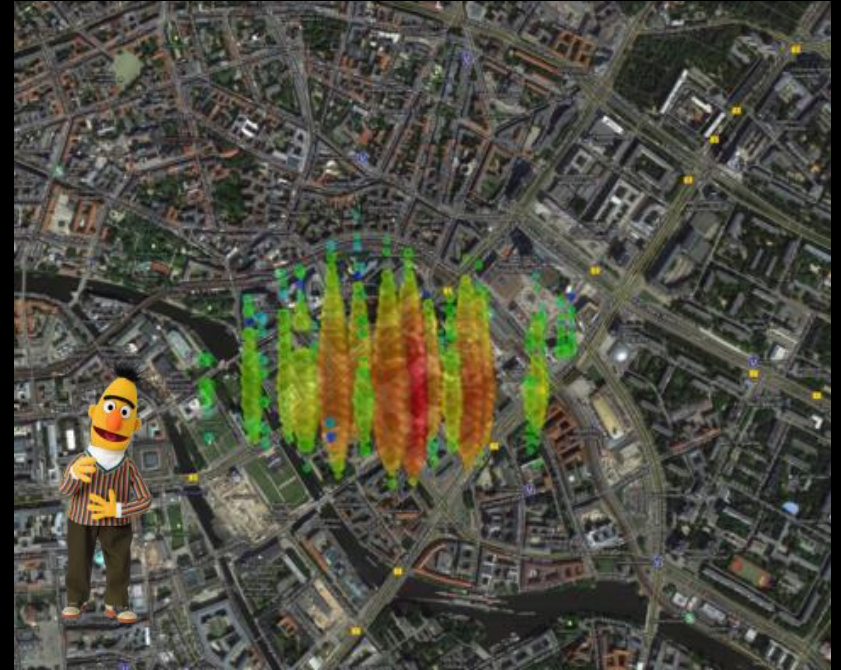
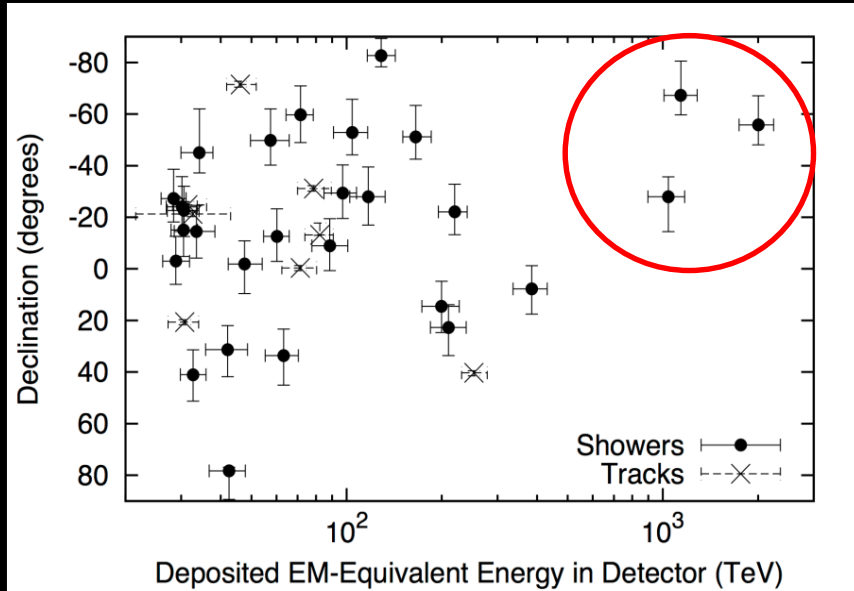
*daha sonra tartışılacak

Extragalaktik nötrinolar

IceCube nötrino gözlemevi*

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

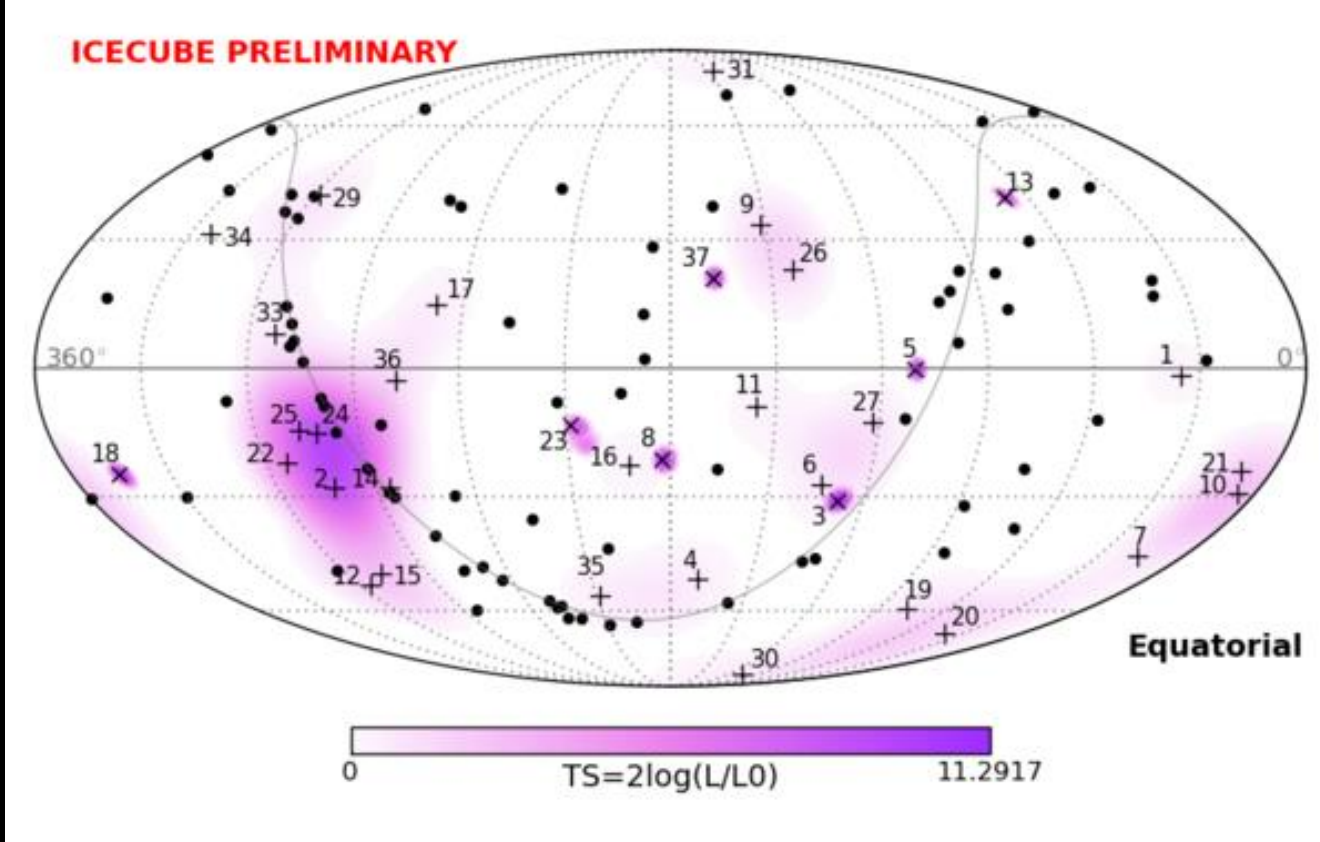
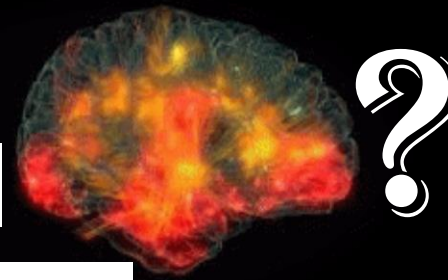
<http://www.sciencemag.org/content/342/6161/1242856> (22 Kasım 2013) and arXiv:1405.5303 [astro-ph.HE]



1.04 PeV ν -etkileşiminin Berlin üzerine iz düşümü

*daha sonra tartışılacak

PeV mertebesindeki nötrinoların kaynağı nedir?

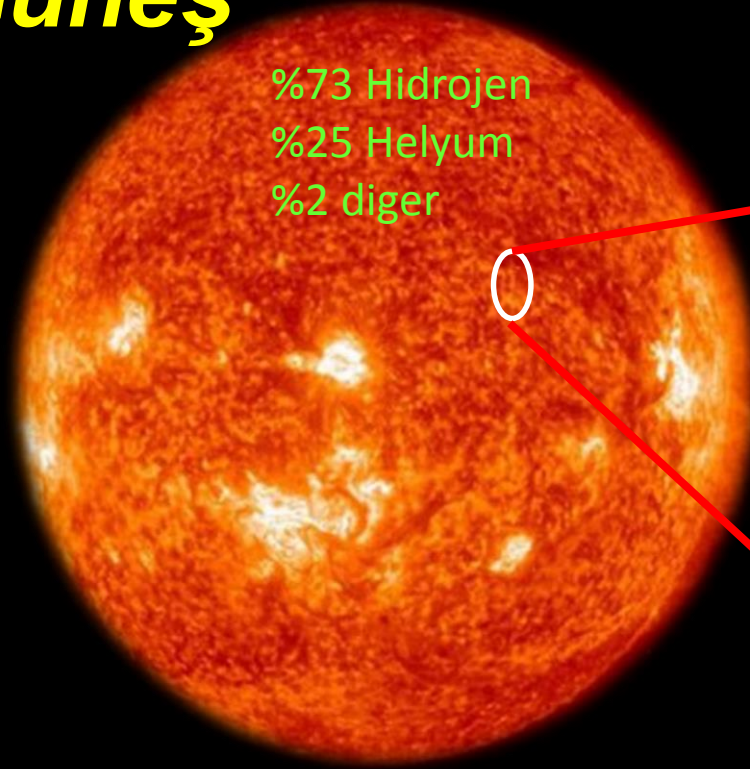


LHC → 14 TeV

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

Nötrino Astronomi

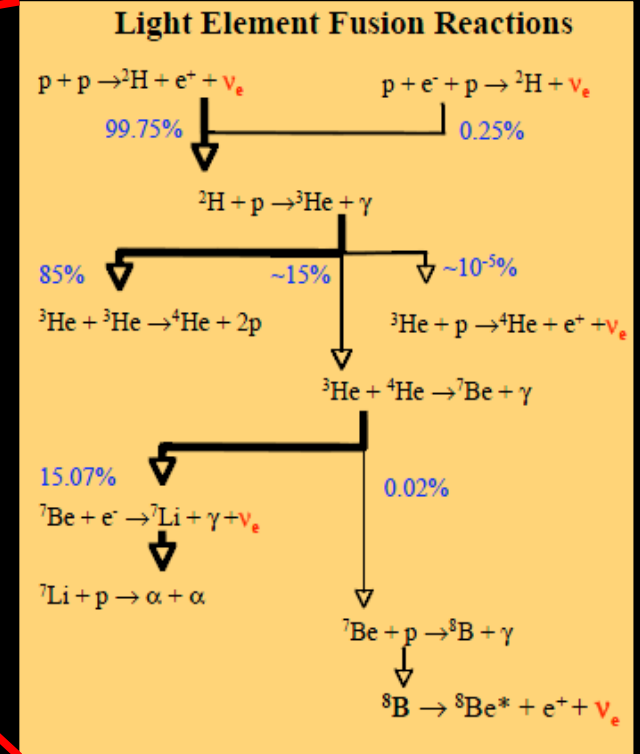
Güneş



%73 Hidrojen
%25 Helyum
%2 diğer

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

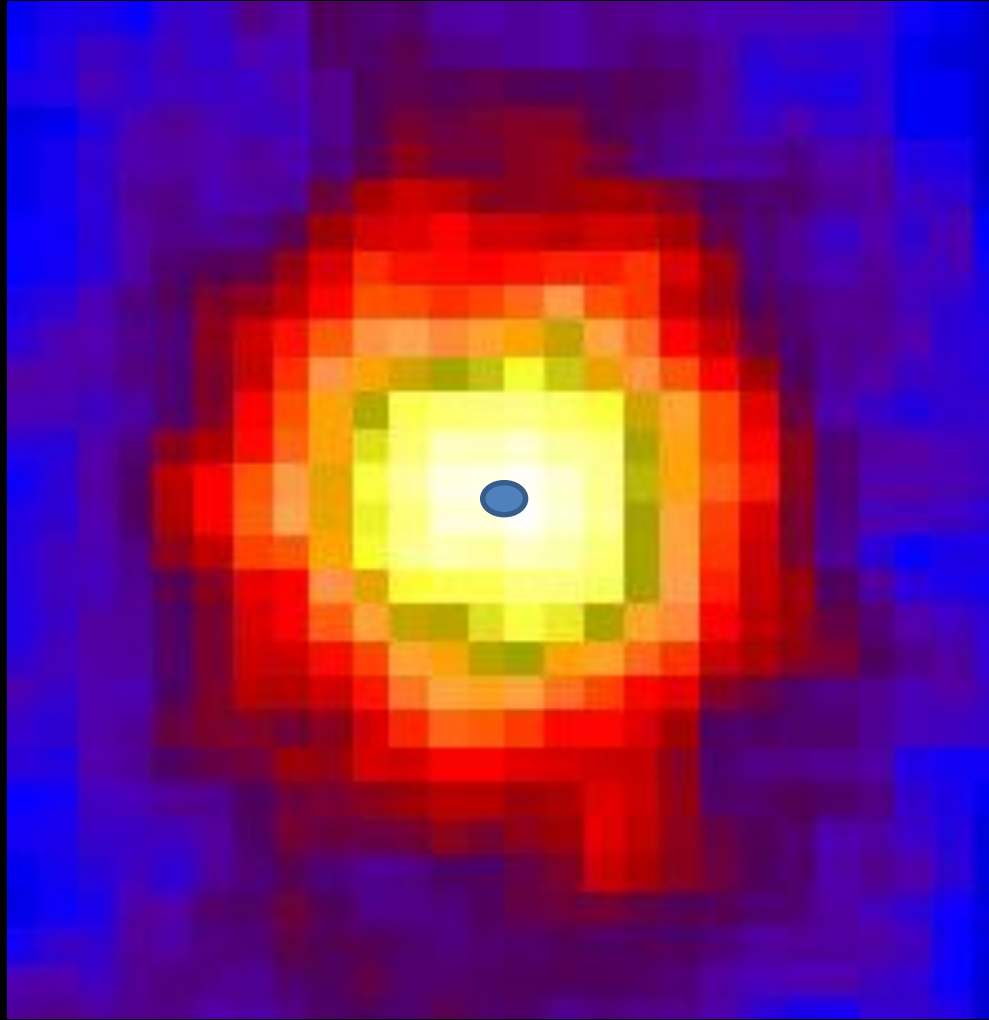
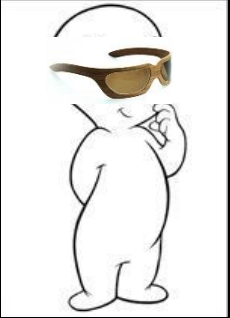
Güneş nötrinoları



Ray Davis, 1968, Homestake Madeni, solar nötrinoların gözlemlenmesi,



“solar neutrino problem”

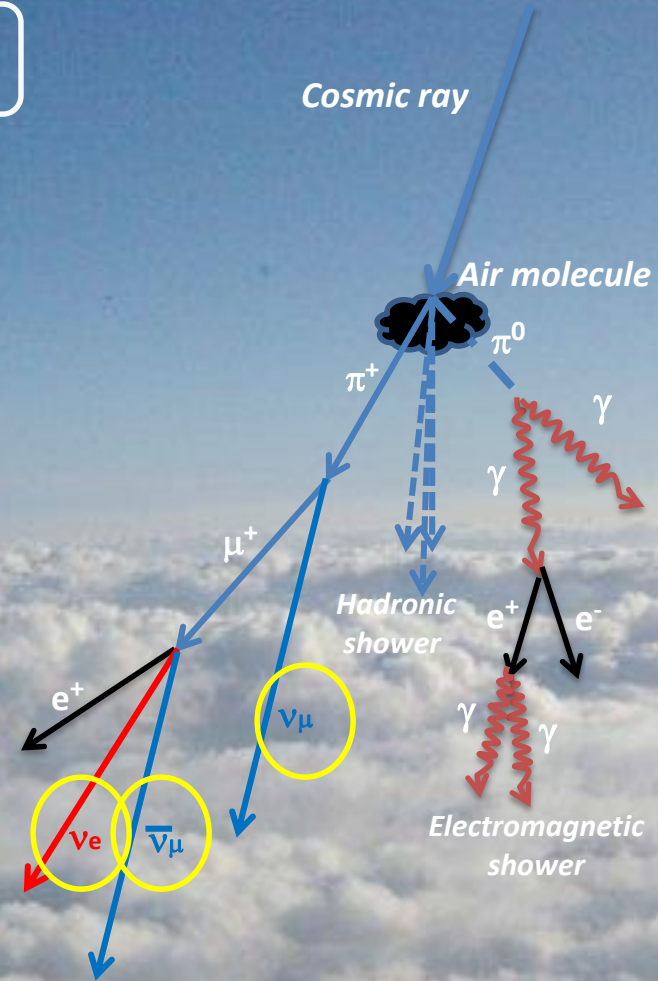


Süper Kamiokande

Fotoğrafta ki mavi nokta güneşin görünür spektrumda
yani güneş ışığını kullanarak elde edeceğiniz
büyüklüğe denk geliyor.

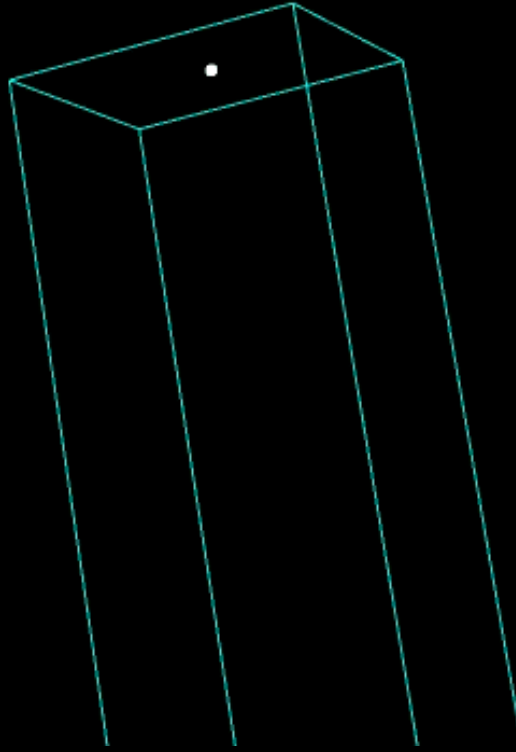
Atmosferik nötrinolar

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



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

Dış uzaydan gelen kozmik ışınlar: %90 proton, %9 helyum, %1 ağır çekirdekler



Reaktör nötrino



Saf elektron antinötrino
~ birkaç MeV enerjisinde.

1 GW nükleer santral için:

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

200 MeV enerji/fission

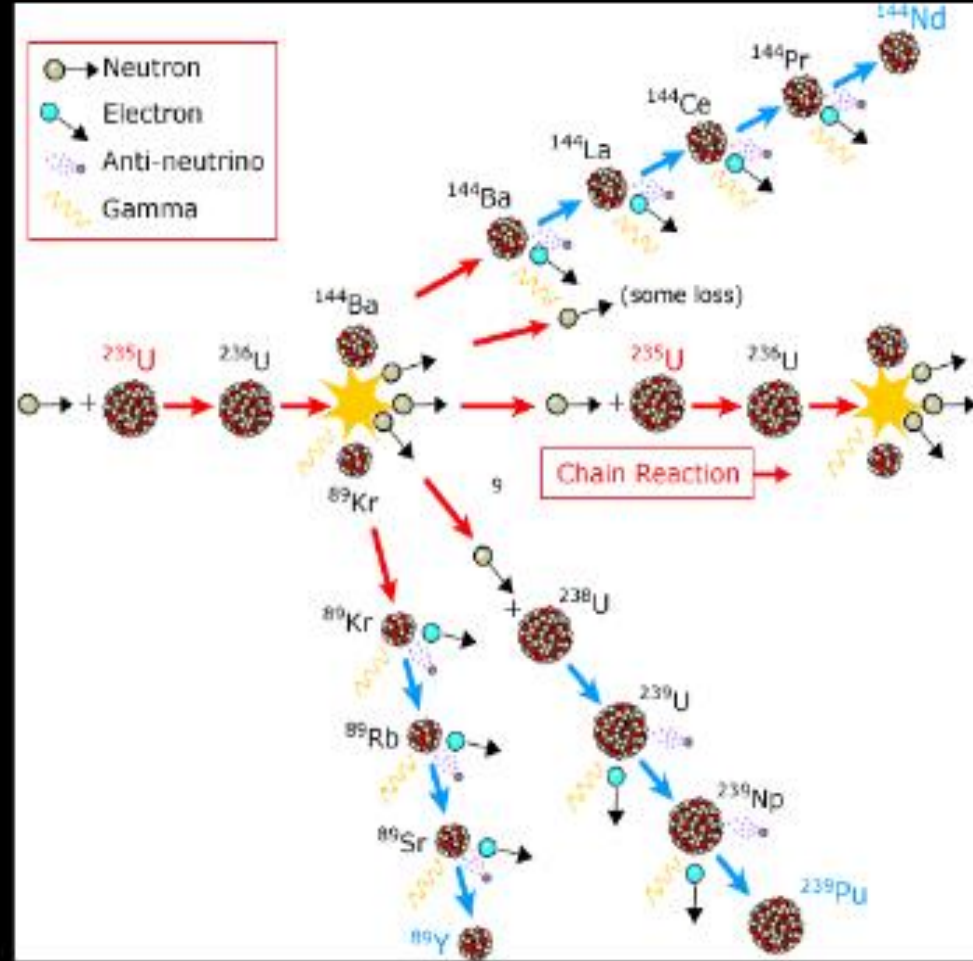
$\rightarrow 200 * 10^6 * 1.6 * 10^{-19}$ joules

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

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

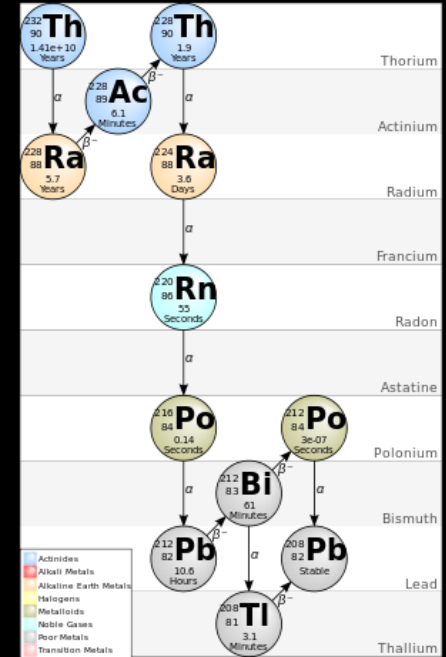
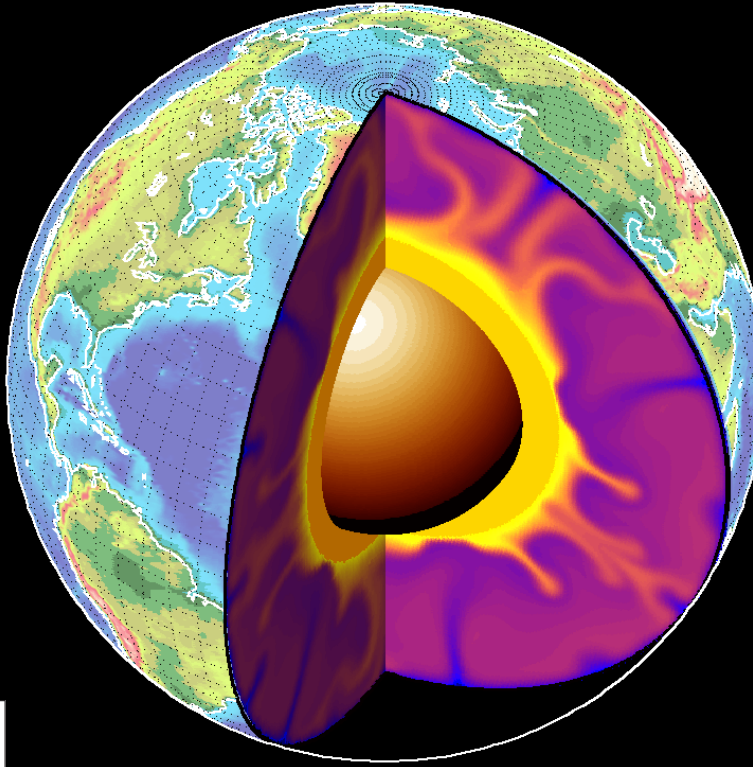
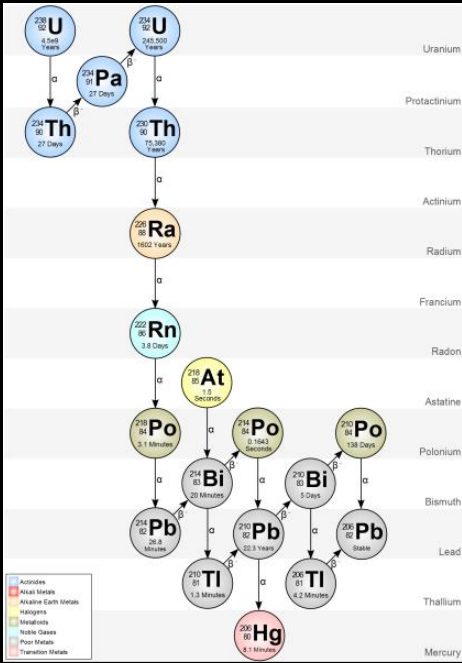
$\rightarrow 6 * 10^9$ W / ($3.2 * 10^{-11}$ joules)

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



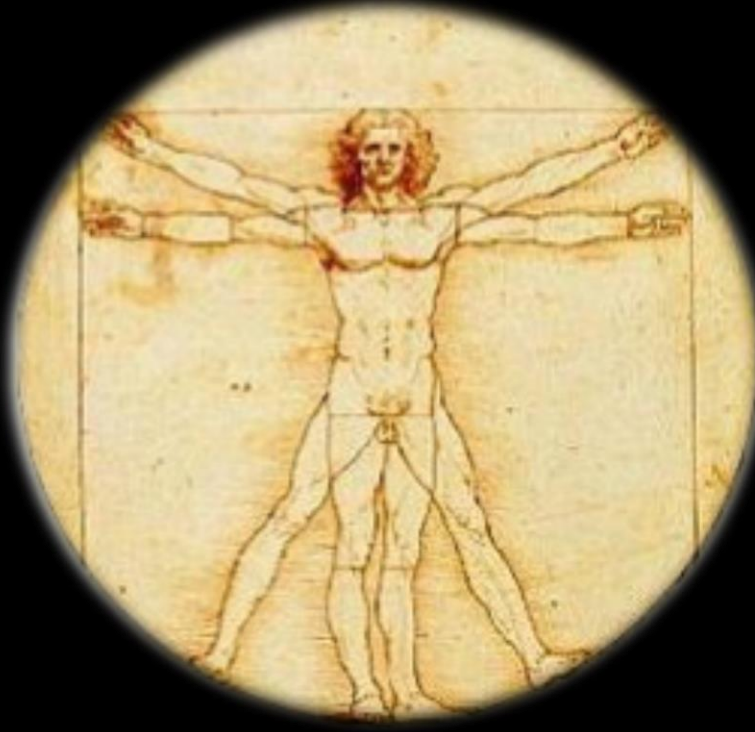
Geonötrino

Dünyamız yaklaşık olarak 40 TW'lik bir enerji yaymaktadır. Bu enerjinin yaklaşık %40'i radyoaktif çekirdeklerin bozunumundan (bu bozunum zincirlerin %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).**



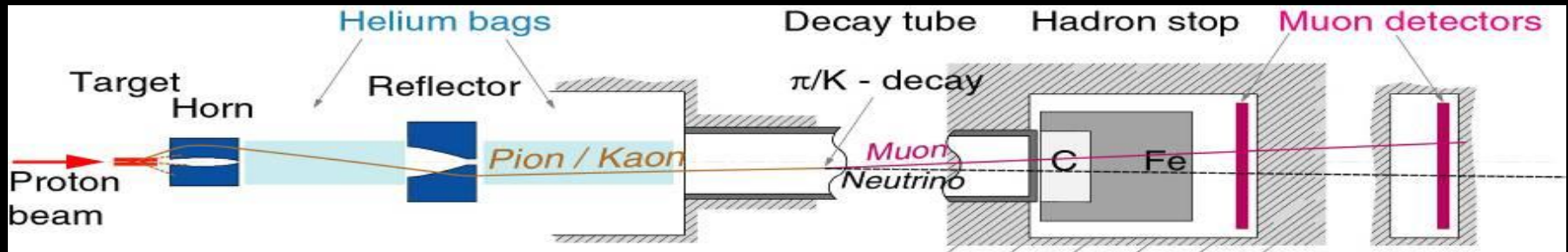
İnsan vücudu yaklaşık olarak 150-200 gram Potasyum (K) içermektedir, bunun 20 mg beta bozunumu yapan **K-40** izotopudur. Ortalama ağırlıkta bir insandan yaklaşık olarak günde **340 milyon nötrino** yayılarak evrenin en uzak noktasına doğru almış olduğu bilgiyi taşır.

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

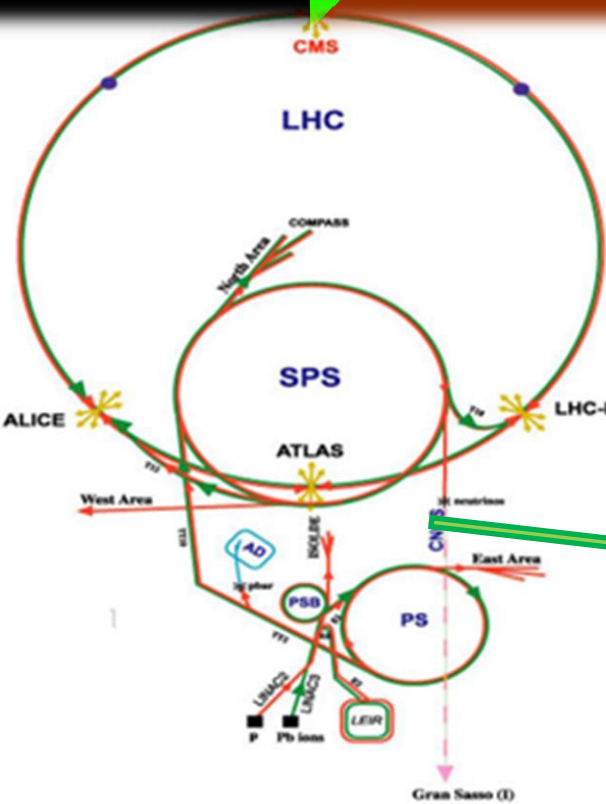
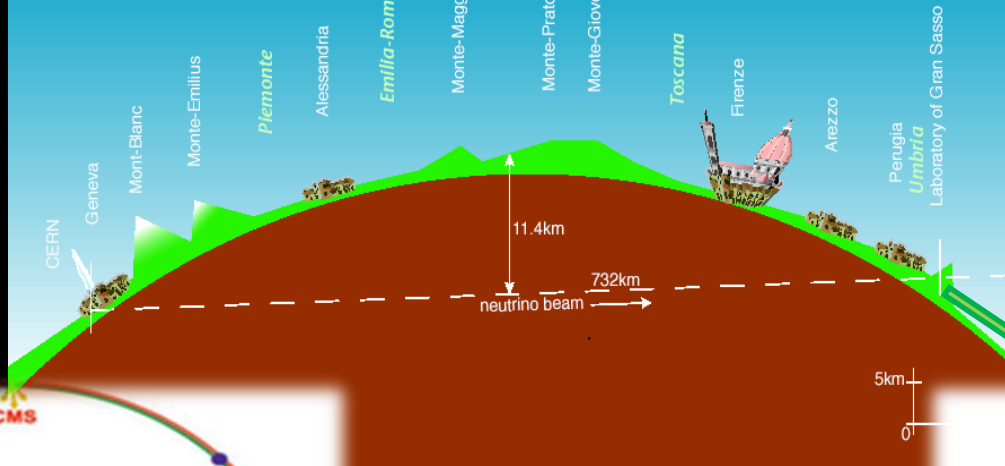


CERN: CNGS (CERN neutrino to GranSasso), 400 GeV proton, ~0.12MW
ICARUS, OPERA deneyleri

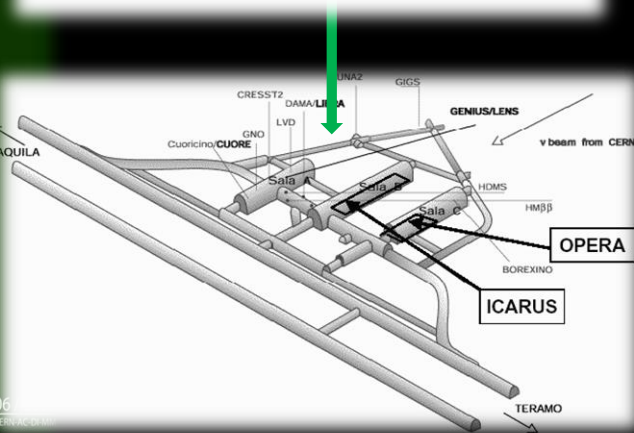
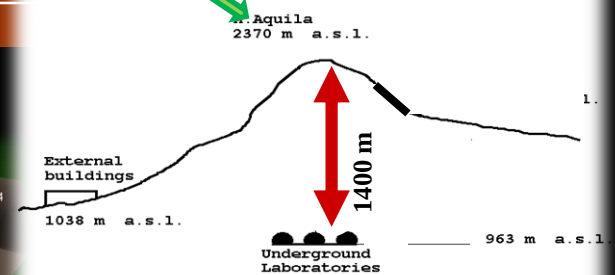
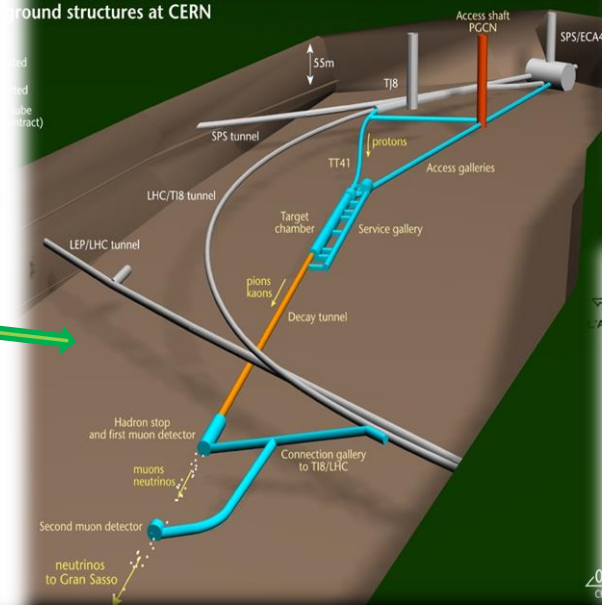
Fermilab: Booster beamline, 8 GeV proton, ~0.05MW
NuMI beamline, 120 GeV proton, 0.25MW
MINOS, MiniBooNE, Nova deneyleri

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

CERN to GranSasso (CNGS) neutrino beam facility



NEUTRINOS TO GRAN SASSO
ground structures at CERN



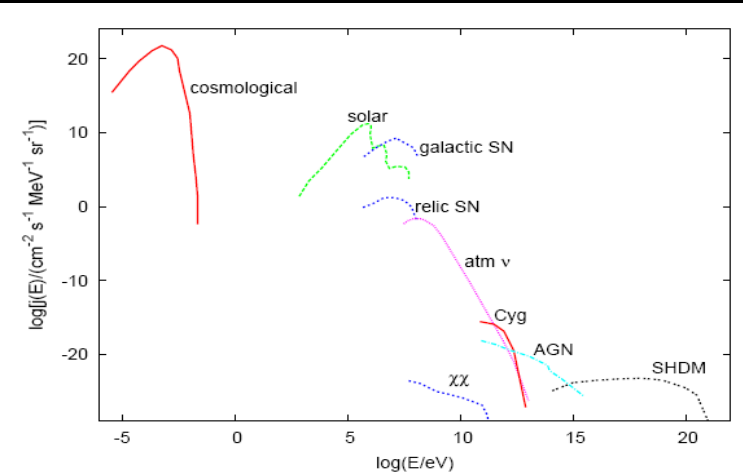


"Quarks. Neutrinos. Mesons. All those damn particles
you can't see. That's what drove me to drink.
But now I can see them!"

Nötrino etkileşim sayısı

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

Nötrino akısı (sizin nötrino kaynağınıza bağlı)



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

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

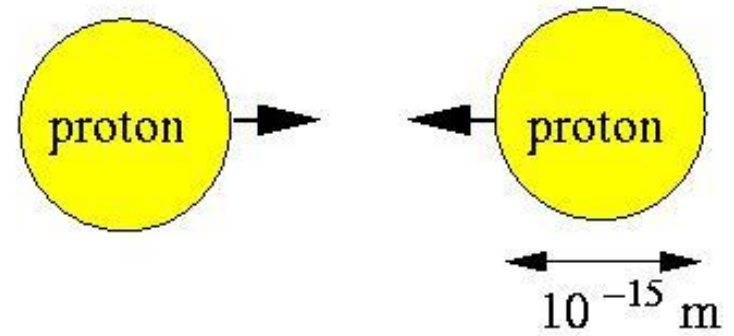
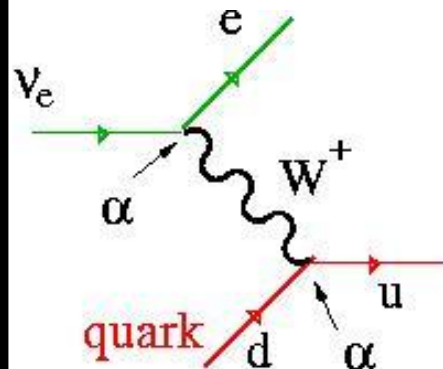
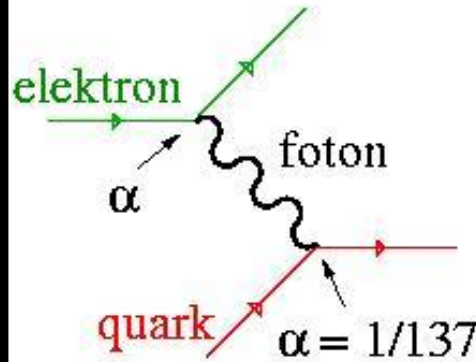
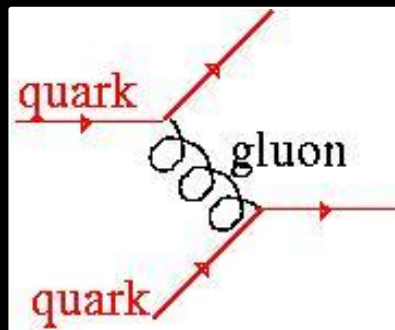
Algıç çeşitleri:

- 1) Radyokimyasal
- 2) Cherenkov ışıması
- 3) Scintillator
- 4) Sıvı argon
- 5) RPC, demir levhalar

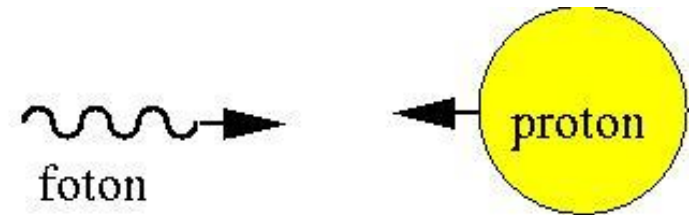
Nötrino enerjisine bağlı etkileşme yöntemleri:

- 1) Atomik yörüngede bulunan elektronlarla
- 2) Atomun kendisiyle
- 3) Çekirdeğin içinde bulunan proton veya nötron ile
- 4) Kuarklarla

Etki kesitlerini karşılaştırılması



$$\sigma = 4 \times 10^{-30} \text{ m}^2$$



$$\sigma = 10^{-32} \text{ m}^2$$



$$\sigma = 10^{-34} \text{ m}^2$$



$$\sigma = 10^{-42} \text{ m}^2$$

ν_μ yüklü akım etkileşime ilişkin ilk örnek

muon

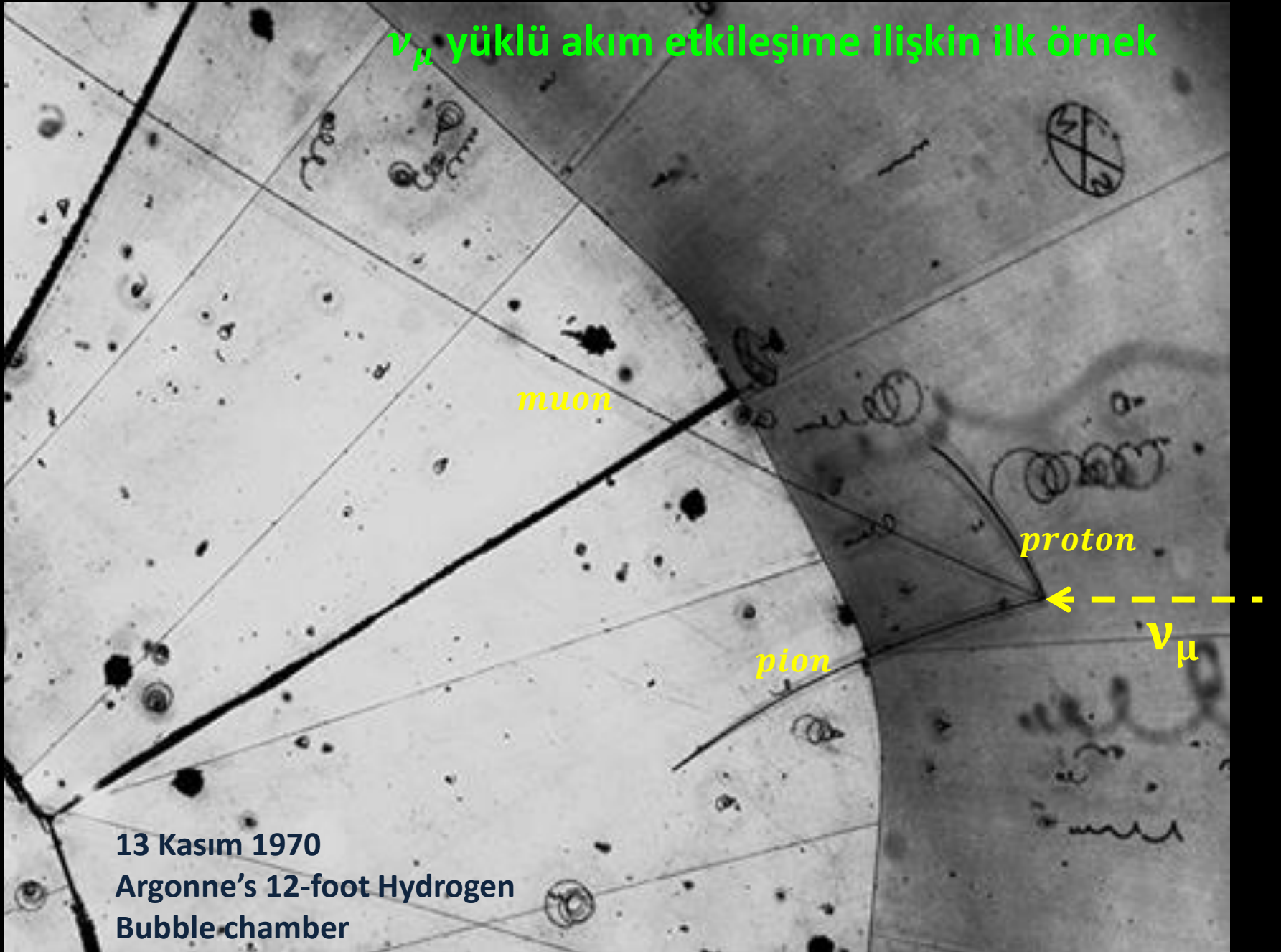
proton

pion

ν_μ

13 Kasım 1970

Argonne's 12-foot Hydrogen
Bubble chamber



Yüksüz akım etkileşime ilişkin ilk örnek

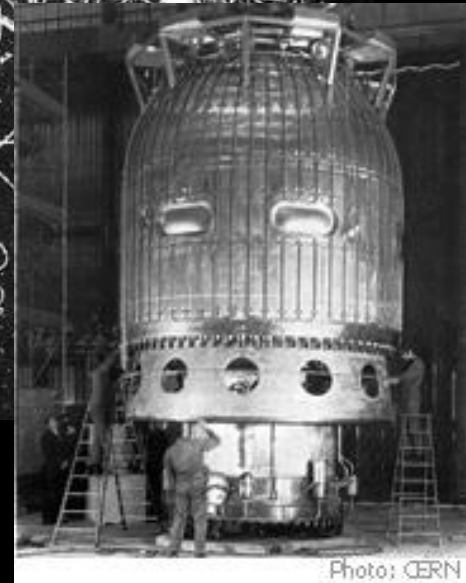
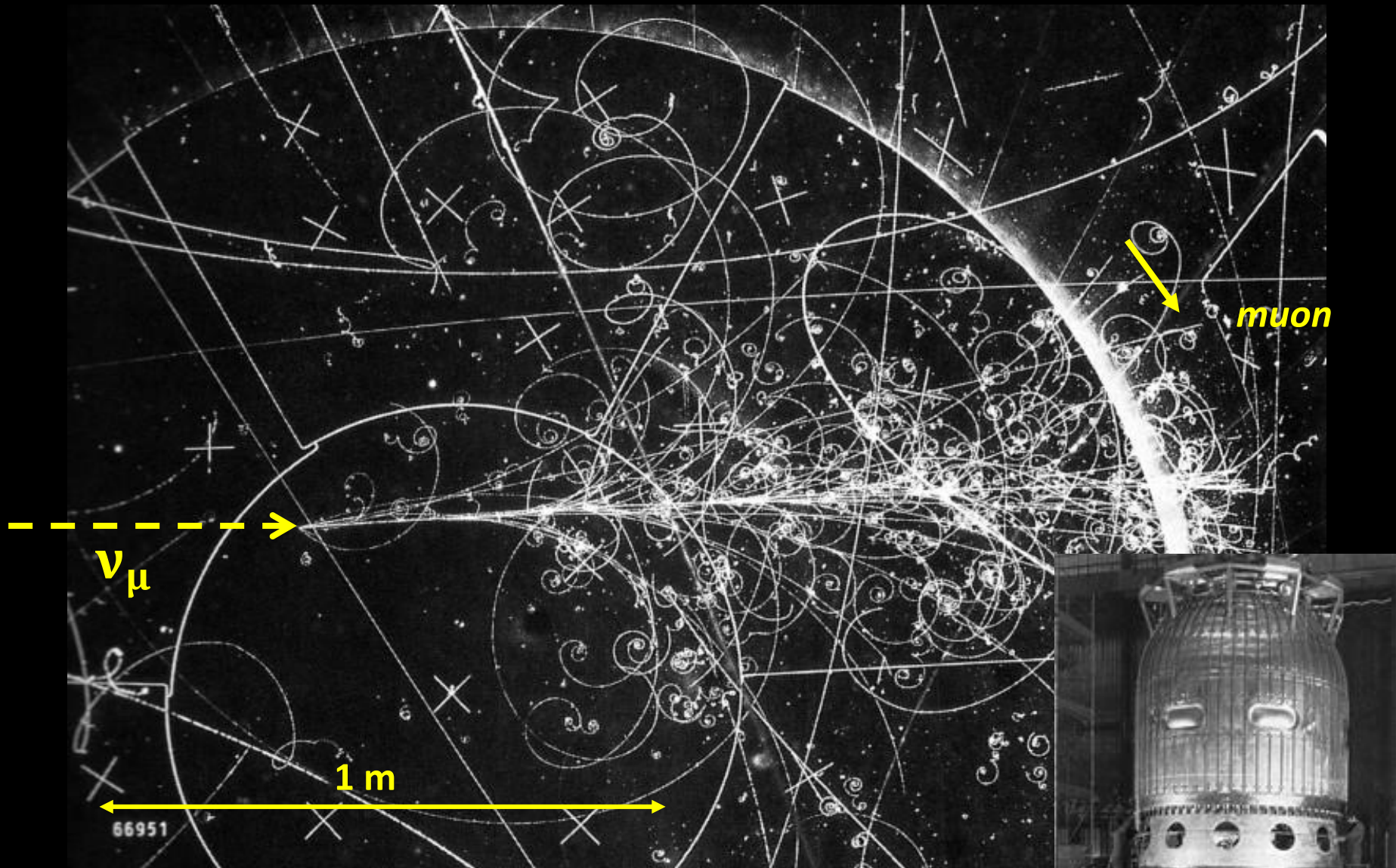
$$\bar{\nu}_{\mu} + e^{-} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} + e^{-}$$



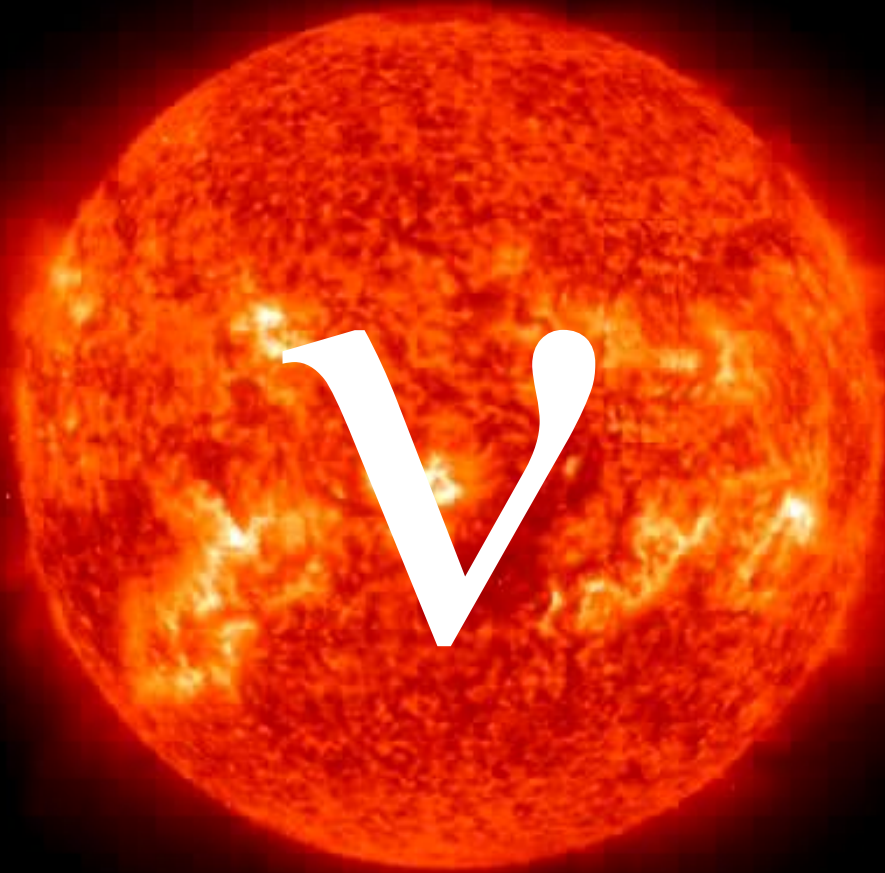
Gargamelle Bubble Chamber, Temmuz 1973, CERN



275 GeV enerjili muon nötrino yüklü akım etkileşimi



Big European Bubble Chamber, BEBC, 1981 CERN



Standard modelin ötesinde yeni

2003/05/26 00:00

fiziğin ayak sesleri

Radyokimyasal algıç çalışmalarına ilk örnek:

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 yakalayarak 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.

Ray Davis 1954 yılında, Cl-Ar yöntemini kullanılarak nötrinin gözlemlenmesinin yanı sıra nötrino ve karşıt nötrinin benzer veya farklı parçacıklar olup olmadığını reaktörlerden yayılan nötrinoları bakarak sınamıştır. Deney sonucunda herhangi bir etkileşimle karşılaşılmamış. Reaktörlerden yayılan karşıt nötrinolar yukarıda adı geçen yöntemle ölçülemez.

Güneşten gelen nötrinoların keşfi

- 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 tasarlamıştır.

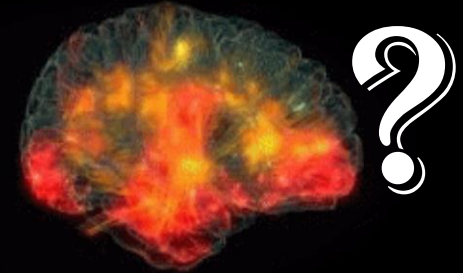




- 4850 feet (1500 m) derinlikte bulunan Homestake altın madeninde 100,000 Gallons C_2Cl_4 , temizlik sıvısı içeren bir tank kullanılmış
- ^{37}Ar atomu 35 günlük bir yarı ömre sahiptir ve bir elektron yakalayarak tekrar ^{37}Cl atomuna bozunur. ^{37}Ar radyokimyasal yöntemle çıkartılır.
- elde edilen ^{37}Ar atomlarının bozunum sayımı yapılarak kaç tane nötrino etkileşimi gerçekleştiği belirlenir.
- beklenen etkileşim miktarı: günde ~ 1 nötrino!

- **1967** Homestake altın madeninde nötrino algıç veri alımına başlamıştır.

- 1968 Deney sonucunda tahmin edilen nötrino etkileşimin **34%** gözlemlendi !



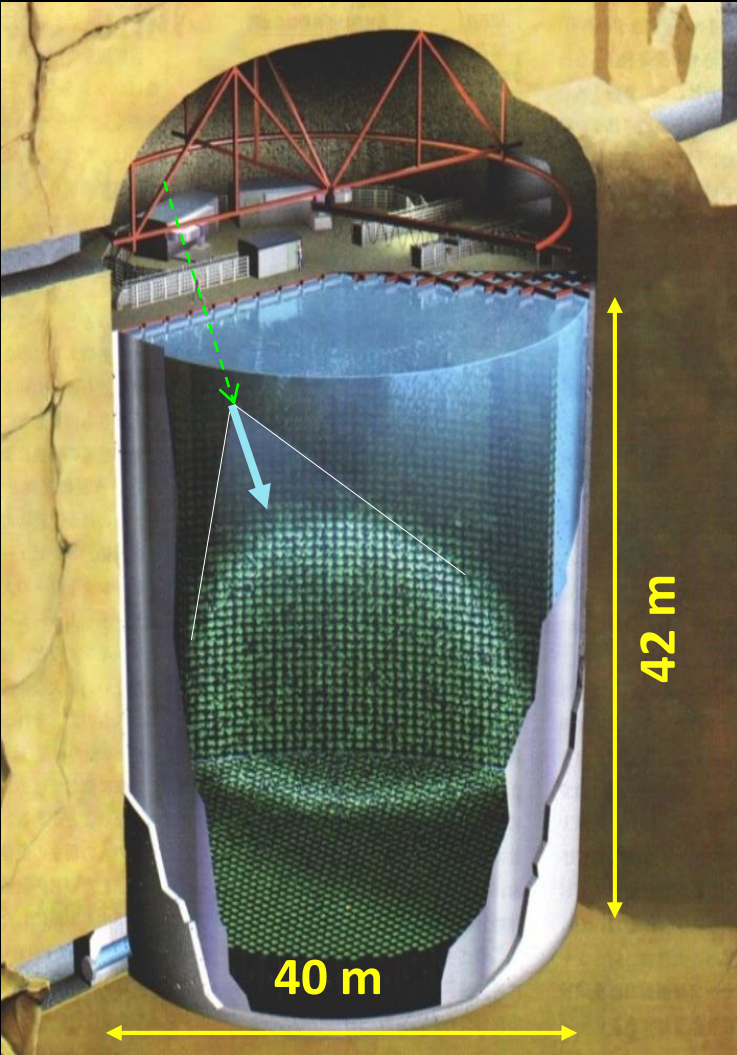
**Deneysel sonuçlar hatalı?
Teorik hesaplamalar hatalı?
İkisi de hatalı?**

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 tartışmalara son noktayı koymuştur.

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

Cherevkov ışıması temelli algıç çalışmalarına örnek:

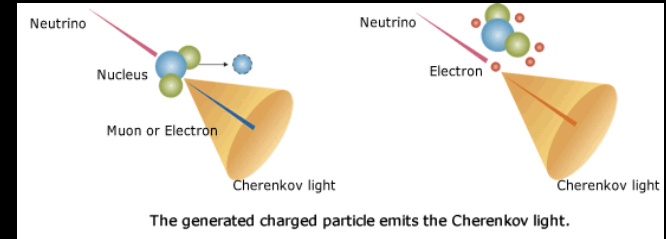


Super Kamiokande, Water Cherenkov

Algıç 50,000 ton ultra saf su ve 13000 PMT'den oluşmaktadır. 1996 yılında Japonya'da bulunan Kamioka Mozumi madeninde faaliyete başlamıştır. Proton bozunumunun yanısıra solar, atmosferik ve supernova'dan gelen nötrinolar üzerine çok önemli çalışmalar sürdürülmektedir.

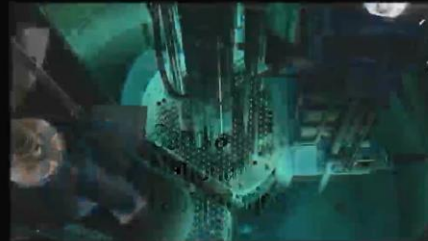
Cherenkov ışıması:

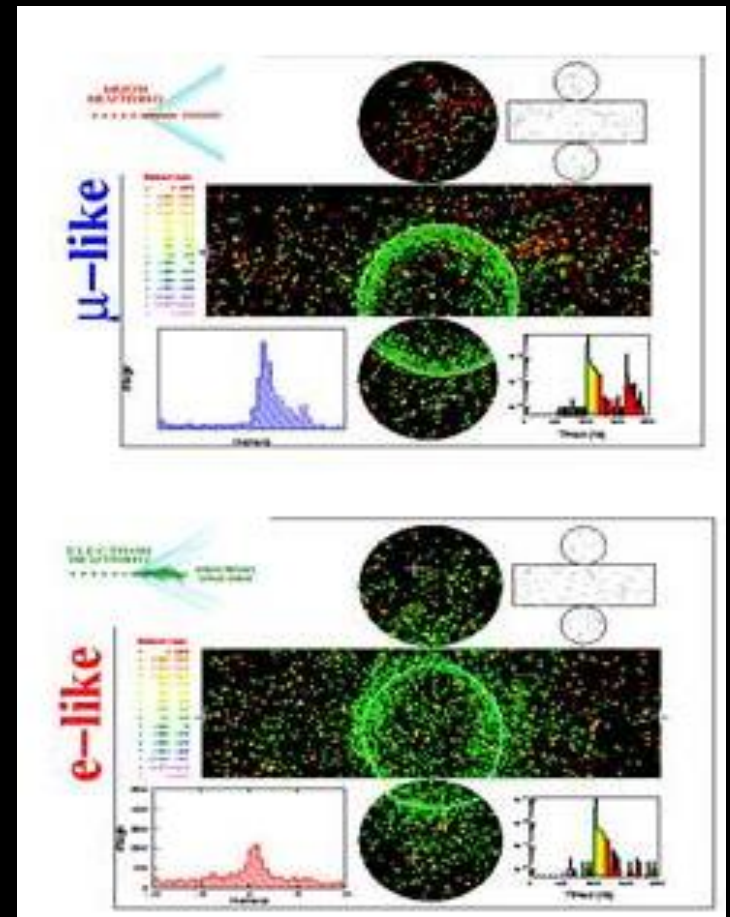
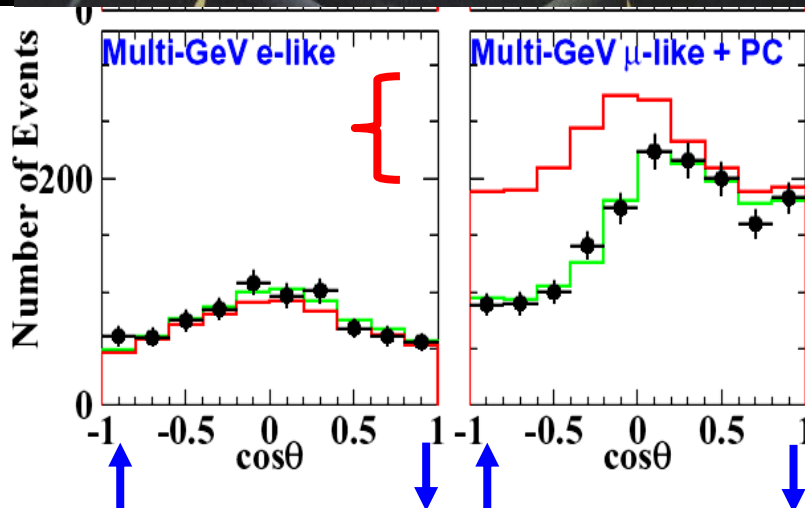
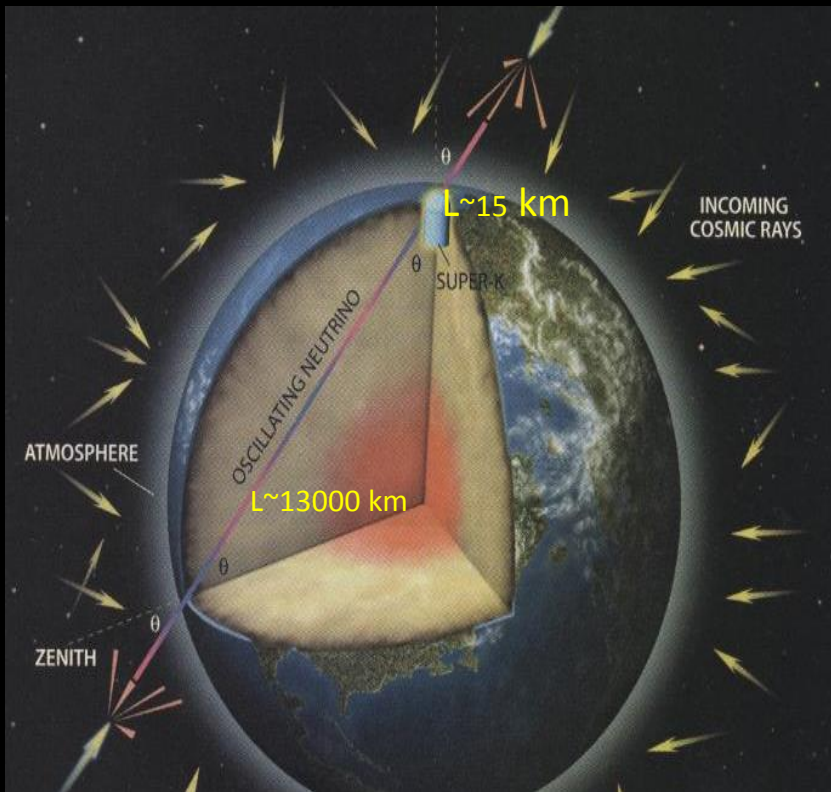
Yüklü parçacıklar maddesel ortamdan geçerken ışığın bu ortamdaki hızından hızlı hareket ederlerse cherenkov ışıması yayarlar, PMT'ler sayesinde bu ışıma yakalanır.



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

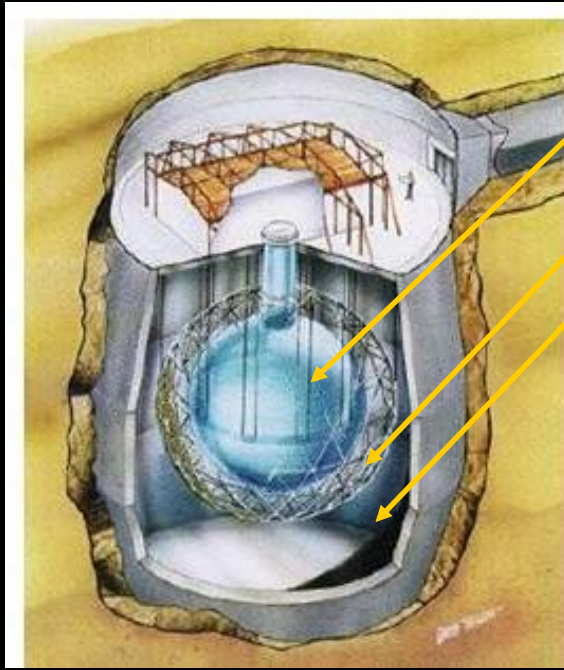
$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$





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

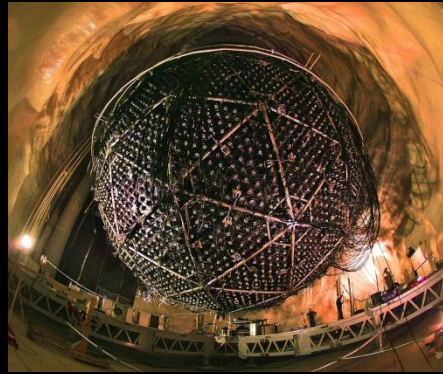
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



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.)

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

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \Rightarrow \Phi_{\nu_e}$$

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

$$\nu_{e,\mu,\tau} + d \rightarrow p + n + \nu_{e,\mu,\tau} \Rightarrow \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}$$

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

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

SNO deneyi sonucunu

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

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

$$U = \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\phi_3} \end{pmatrix}$$

Solar ve nükleer
reaktörlerde

CP phase
Nükleer reaktörlerde
ve hızlandırıcılarda

Atmosferik ve
hızlandırıcı nötrino
deneylerinde

Majorana phases
Nötrinosuz çift beta
bozunumunda

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

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

**Karışım acısı max.
olasılığı belirler**

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

**L/E Salınım
terimi**

CP korunumlu ise 0

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

Oscillation length

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

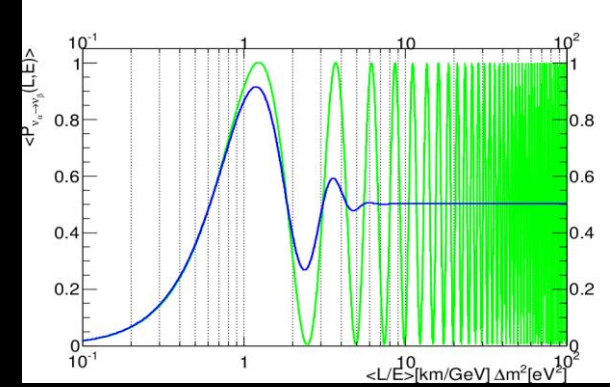
Karışım açısı

$\Delta m^2 \neq 0$

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

L nötrino kaynağı ve detektör arasındaki mesafe

E nötrinin enerjisi



$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ Üç nötrino çerçevesinde CP terimini, low mass scale ve vakumda

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

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

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 nötrinin majorana tip bir parçacık olup olmadığı konusunda herhangi bir cevap sunmaz! Bunun testi için nötrinoların çift beta bozunum deneylerine gereksinim vardır.



Escher Metamorphosis.

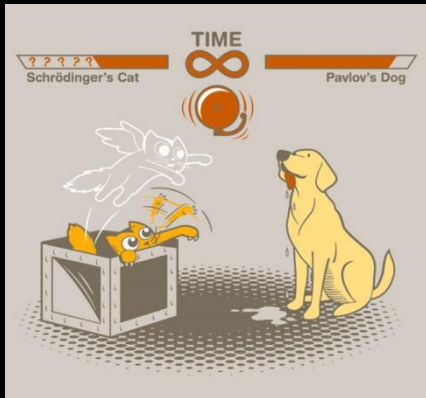
Karışım acısı

$\Delta m^2 \neq 0$

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

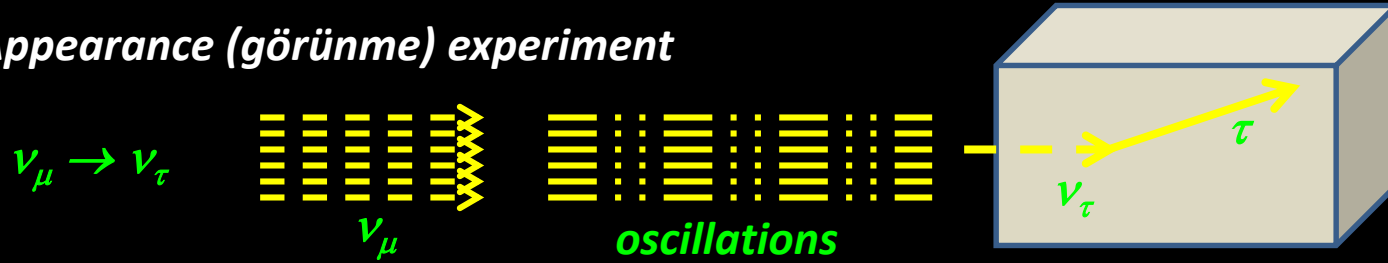
L nötrino kaynağı ve detektör arasındaki mesafe

E nötrinin enerjisi



Görünme deneyleri

Appearance (görünme) experiment

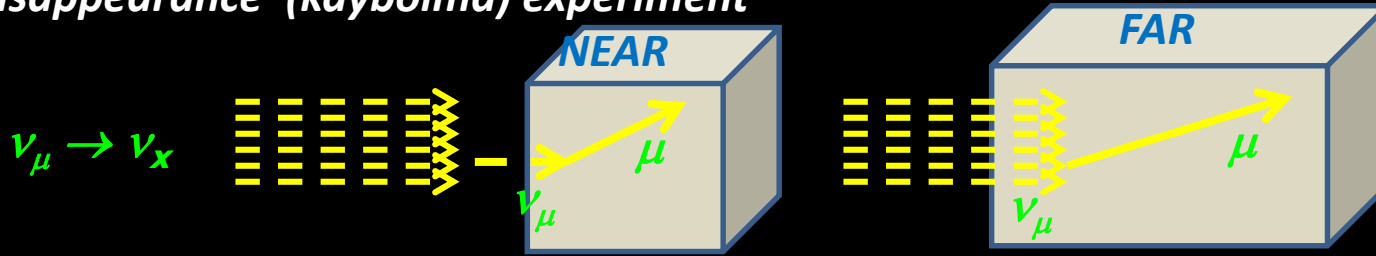


ν_τ yüklü akım etkileşimleri sonucunda oluşan τ leptonunun gözlenmesi

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

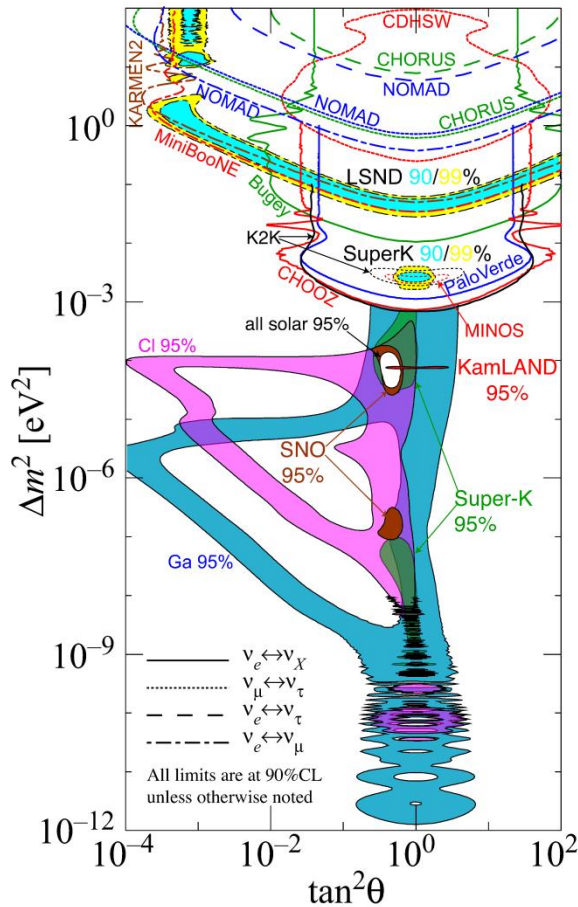
Kaybolma deneyleri

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 nötrinin enerji spektrumunda salınımdan kaynaklı bozukluk (distortion)

Octant (a)symmetric contours:



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

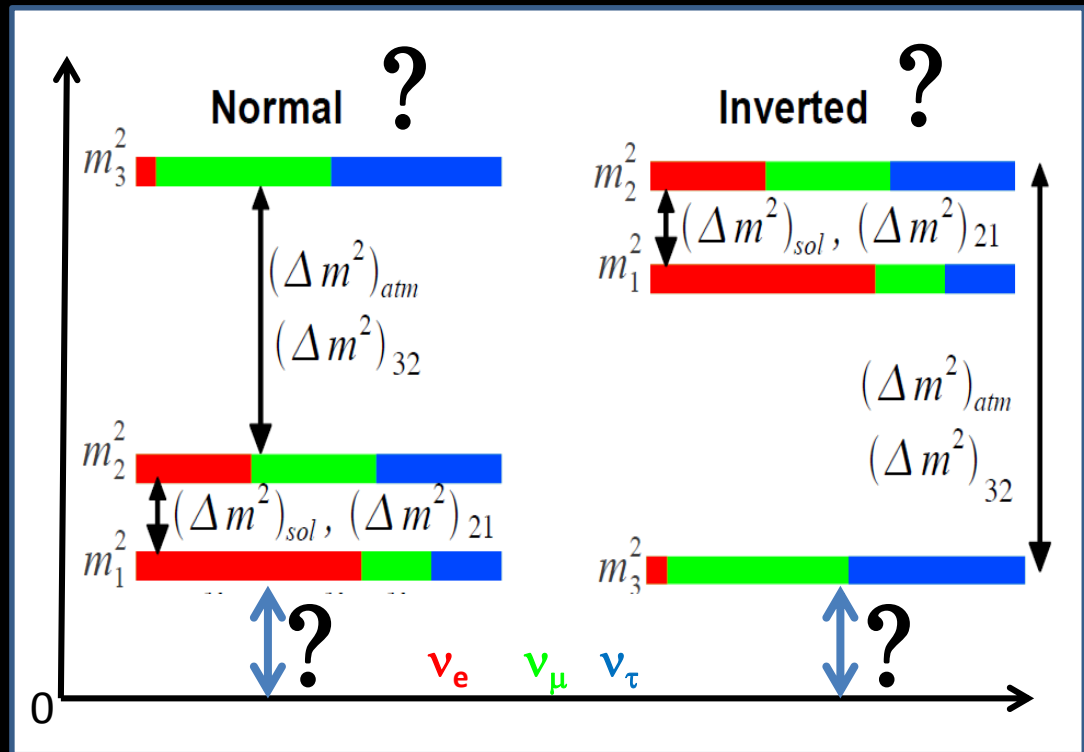
HyperK



JUNO

LBNE

02/07/2016



Global fit (E. Lisi et al.)	NH – IH
Δm_{21}^2 (eV ²)	$7.54 \cdot 10^{-5}$
Δm_{32}^2 (eV ²)	$2.44\text{-}2.40 \cdot 10^{-3}$
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

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 reaktorlerden 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.

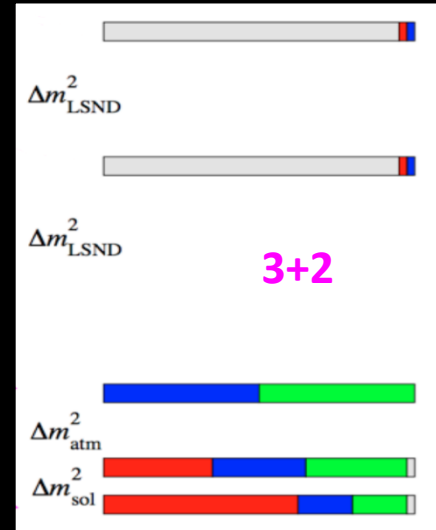
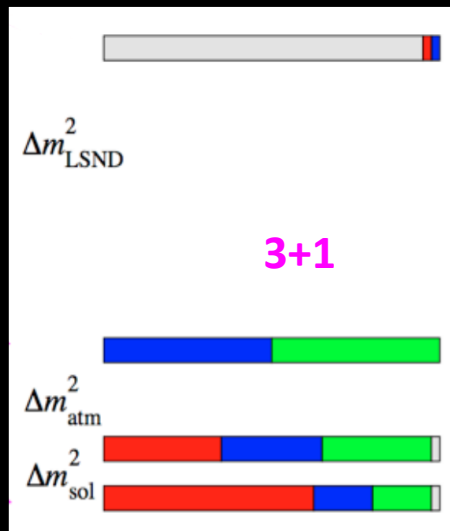
**Doğanın bize söylemek
istediği
bir şeyler mi var?**



STEREO

LAr1ND

JPARC-MLF



Nötrinin kütlesini doğrudan ölçüm tekniği:

- Elektron nötrino'nun kütlesi,

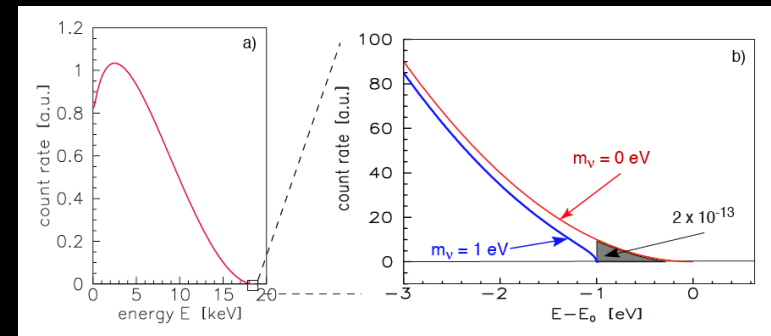
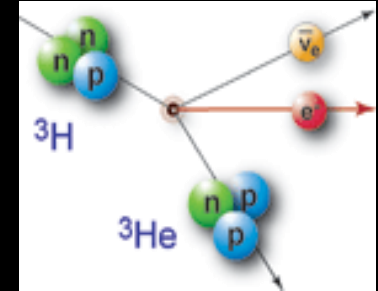
$$^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \nu_e + e^-$$
 β -bozunum spektrumunun end-point bölgesini hassas olarak ölçmek gerekmektedir.
 $m(\nu_e) < 2.2 \text{ eV (95\% C.L.)}$
- Muon nötrino'nun kütlesi,

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$$
 P_μ , muon momentumunun hassas bir şekilde ölçülmesi gerekiyor:
 $m(\nu_\mu) < 170 \text{ keV (90\% C.L.)}$
- Tau nötrino'nun kütlesi

$$\tau^- \rightarrow n\pi + \nu_\tau$$
 $n\pi$ toplam kütleyi hassas ölçmek gerekecek.
 $m(\nu_\tau) < 18.2 \text{ MeV (95\% C.L.)}$



24 Kasim 2006, Leopoldshafen



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

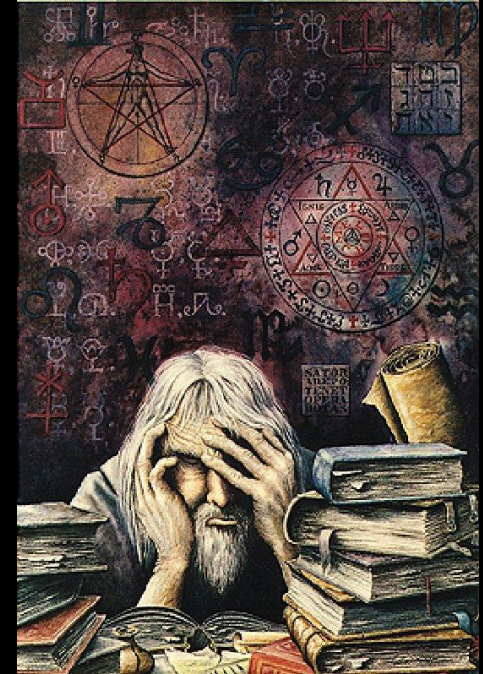
10 saniye içerisinde 10-20 kton'luk TNT den yaklaşık olarak $8 \cdot 10^{23}$ anti-nötrino yayılacak.

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?*
- ❖ *.....*



Teşekkürler..