

Nyt fra
Niels Bohr International Academy
25. November, 2012

Neutrinoer
- deres betydning og masser

Af Christine Hartmann

Opdagelsen

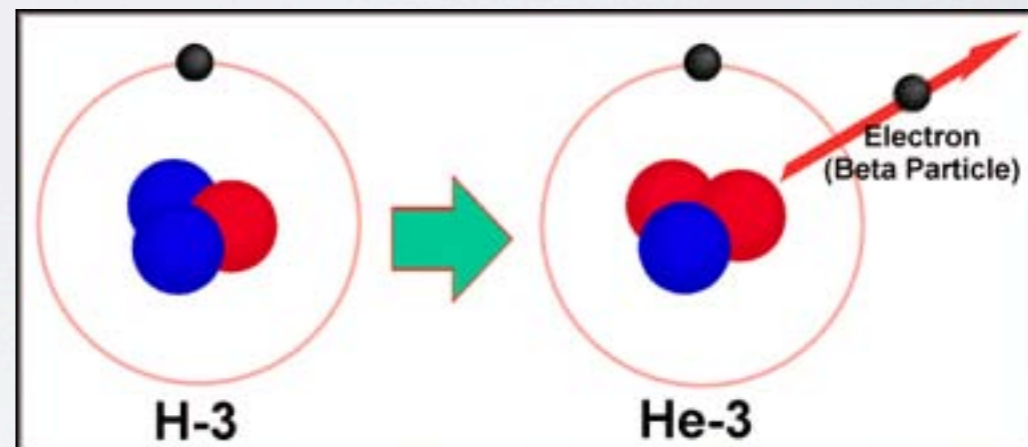
En af fysikkens vigtigste love: Energi bevarelse!

1911-1930:

Forsøg med Beta henfald: Forskere fandt tegn på brudt lov!

Henfald: $n \rightarrow p + e^-$

Eksempel: Tritium \rightarrow Helium-3:



Elektronen “manglede” energi under henfaldet.
Ikke samme størrelse hver gang!

Hvor blev energien af??

Wolfgang Pauli

(1900-1958)

1930: Foreslog eksistensen af neutrinoen!

Eneste måde at forklare hvor energien blev af, uden at bryde loven for energi bevarelse.



Ifølge Pauli, havde det sin pris:



- Nobel pris i 1945

“Jeg har gjort noget forfærdeligt. Jeg har postuleret en partikel, der ikke kan måles.”

Neutrinoens egenskaber

- Ingen elektrisk ladning - nærmest usynlig!
- (Næsten) masseløs
- Elementar partiklen, der er flest af i universet.
Fra solen flyver ca 100 milliarder neutrinoer gennem en fingernegl per sekund!
- Vekselvirker svagt
For hver 100 milliard neutrino, der flyver gennem jorden, vekselvirker kun en med, hvad jorden består af. Enormt udfordrende at arbejde med.
- Den elementar partikel, vi ved mindst om!

Unikke egenskaber med unikke betydninger: Universets budbringere. De kan fortælle os meget om solens indre, Big Bang og måske meget mere.

Pauli havde ikke ret!

Frederick Reines

(1918-1998)



Manhattan projekt - deltog i udvikling af atom bomben.

Eget projekt: **Måle neutrinoer!**

Kaldet neutrino fysikkens far.

- Nobel pris i 1995



Clyde Cowan

(1918-1998)



Reines fik Cowan interesseret i projektet.

Ultimativ udfordring - alment kendt, at det ikke kunne lade sig gøre.

Inspiration fra fortiden

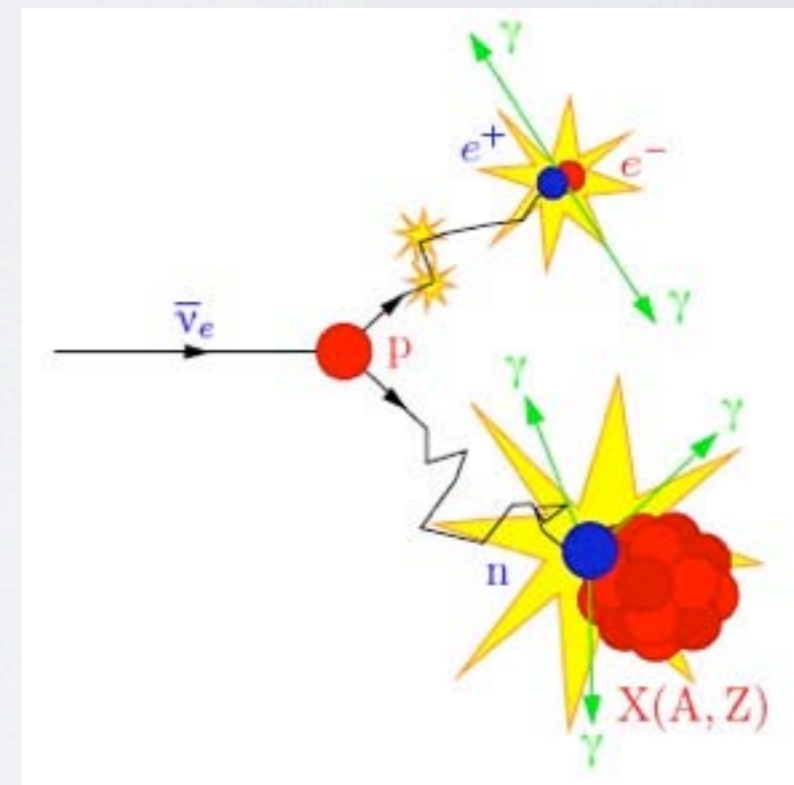
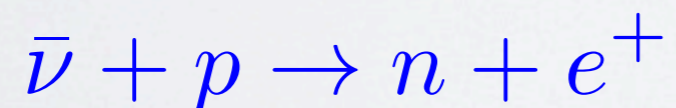
Niels Bohr
(1885-1962)



“Et dybt spørgsmål er et, hvor både svaret ja og nej er interessant.”

Reines og Cowan stod netop over for et sådant spørgsmål: Eksisterer neutrinoen?

Idé til opdagelsen af neutrinoen:
Positron måles i omvendt beta henfald:



www.quantumdiaries.org

“Projekt Poltergeist”

Formål: at måle neutrinoen.

Eksperiment kræver intens neutrino kilde eller meget stor detektor.

Reines idé: Brug atom bomben!

Setup af eksperiment i Nevada:

Detektor 50 m fra 20 kT bombe

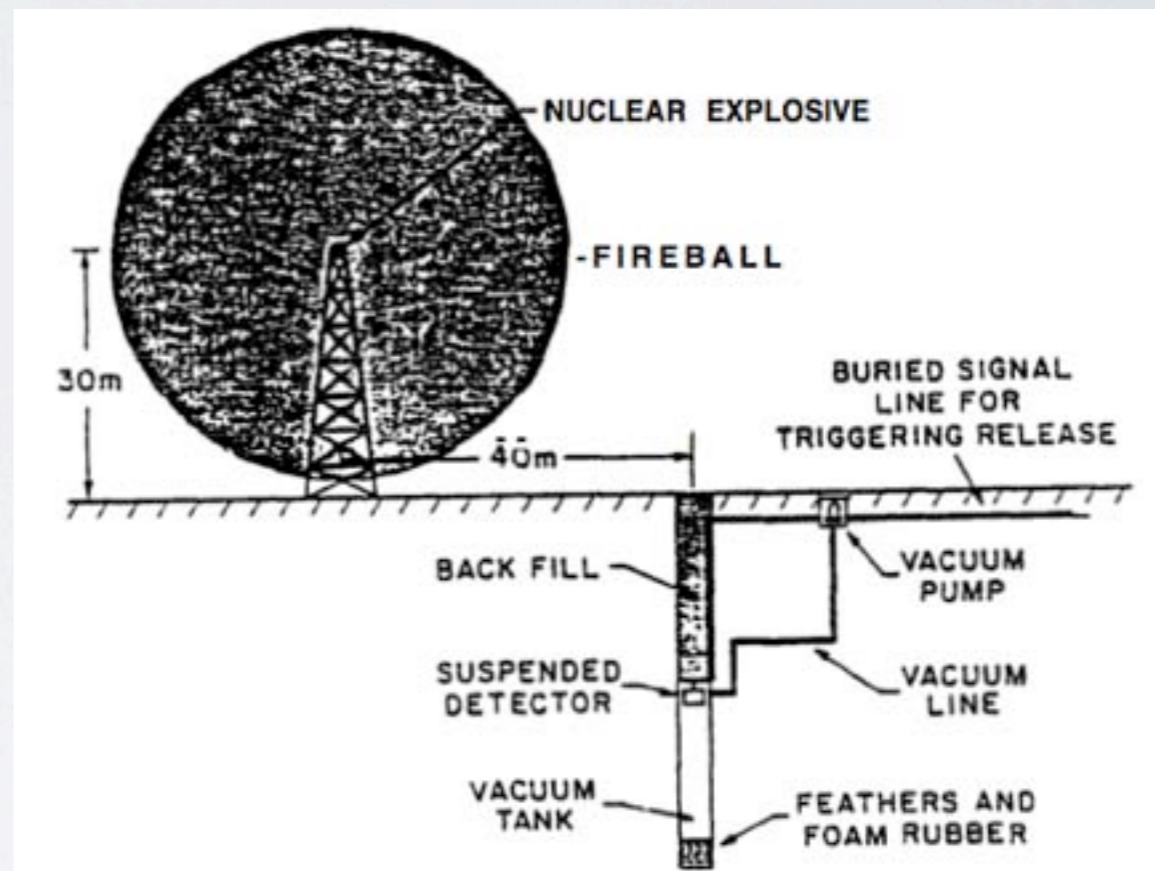
El Monstro:

$3m^3$ flydende scintillator
(kun set højst 1 L før.)

Undgå baggrundsstøj fra jordens rystelser: Detektor i *frit fald* under eksplosion. Måling i *2 sekunder*.

Eksperiment godtaget af Norris Bradbury!

- Direktør i laboratoriet.

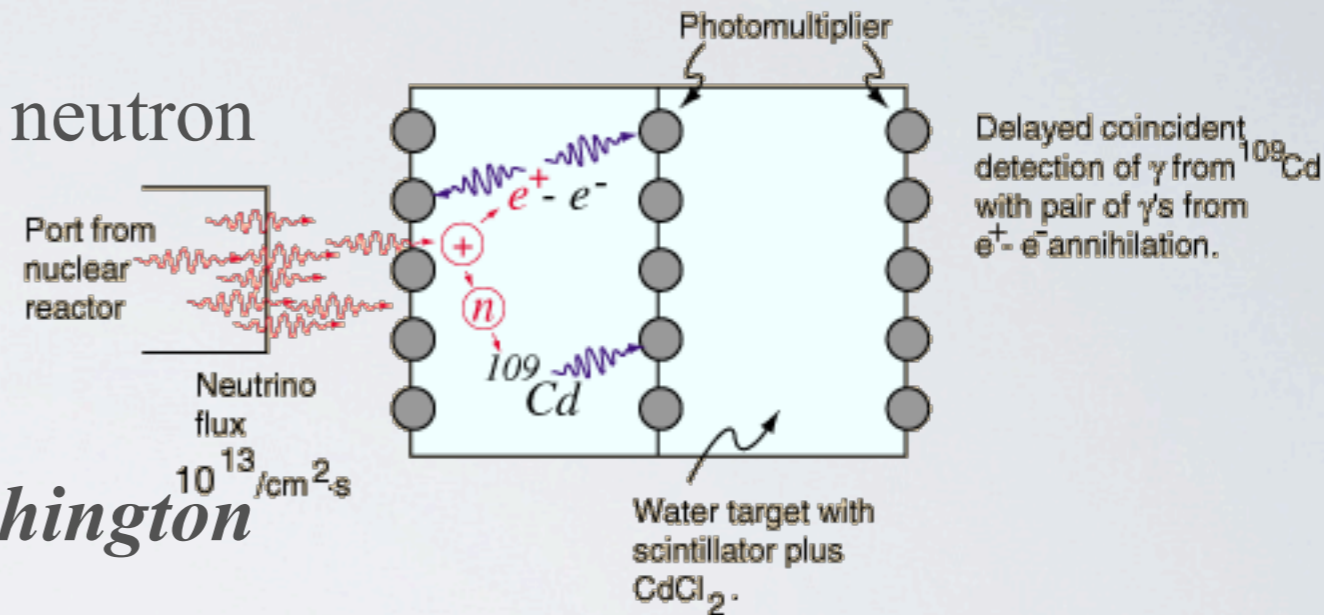


Nobel lecture - Frederic Reines, 1995

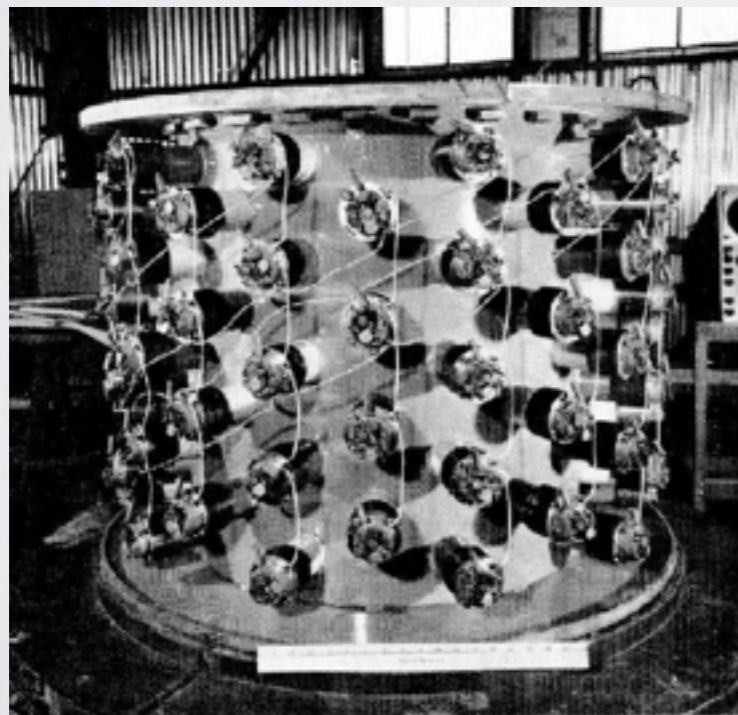
Kellogg til undsætning!

Leder af fysik afdeling: Foreslog fissions reaktorer i stedet.
Færre neutrinoer → nødvendigt at reducere baggrund.

Måling af stråler fra både positron og neutron
→ To lyssignaler i træk



Fra Hanford neutrino detektor, Washington til Savannah River - mere beskyttet.



11 m fra reaktor, 12 m under jorden, 2 x 100 L

Mere tid til målingen!

1956: Neutrinoen blev opdaget!

hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

Endnu et umuligt projekt...

Raymond Davies

(1914-2006)



Davies' drøm: Måle neutrinoer fra solen!

Som for Reines - et nærmest umuligt projekt.

Han ville dog komme til at gøre meget mere end det...

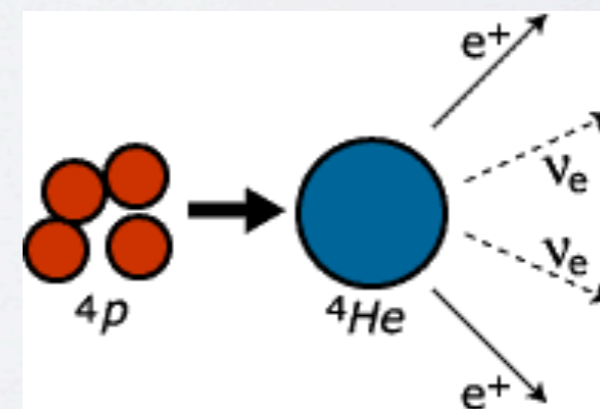
- Nobel pris i 2002

John Bahcall

(1934-2005)



Davies bad Bahcall om at beregne flux af neutrinoer fra solen:



J. Bahcall

Eksperimentet begyndes...



R. Davies & J. Bahcall
Homestake Mine eksperiment, South
Dakota i 1960'erne

600 Ton vaskemiddel!!
(højt Chlor indhold.)

Bahcalls udregning: 10 Argon
atomer om ugen.
Værre end nål i høstak!

Boble Helium gennem tanken for at skubbe Argon atomer ud.
Fragtet til NY laboratorie for at blive talt.

1968: Første målinger...

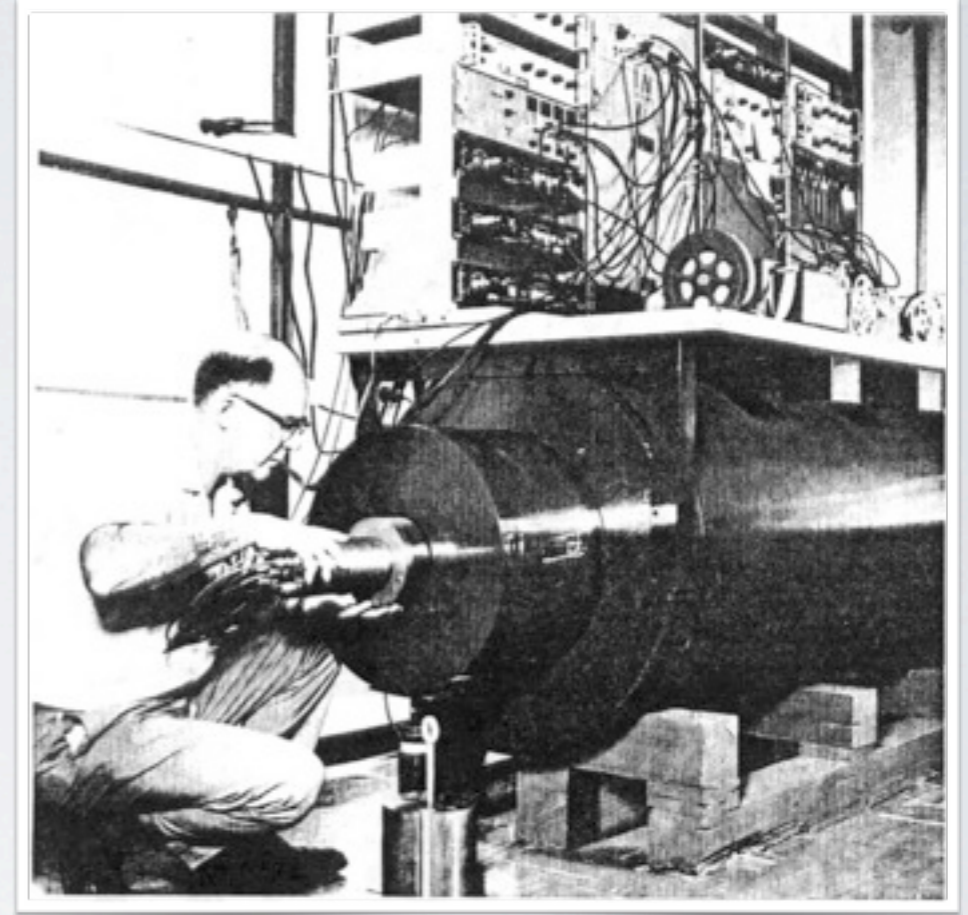
Sol neutrino problemet

“Mysteriet om de forsvundne neutrinoer”

Meget kontroversielt resultat:
Davies målte kun ca 3 Argon atomer!

Bahcall: *“Socialt uacceptabelt resultat.”*

Årsag måtte være:
Eksperiment/beregninger forkerte.
De manglende neutrinoer måtte dukke op på et tidspunkt...



Andre årsager med enorme konsekvenser:
Solens kerne koldere end regnet med? Ved at lukke ned? Stod jorden over for en kold afslutning? Noget i vejen med solen?

Neutrino anomalien - det største mysterium i partikelfysikken!

Nyt eksperiment

- jagten på de manglende neutrinoer!

1983: “Kamiokande”, Kamioka, Japan

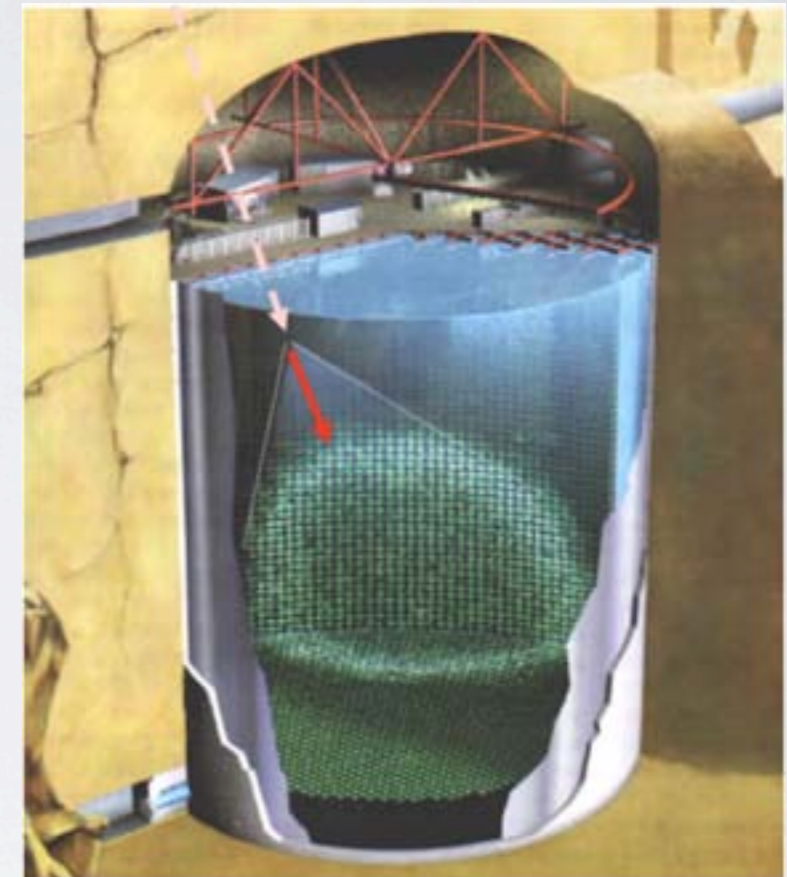
- bekræftede manglende neutrinoer
3000 tons rent vand.

Begrænsning - målte kun en type neutrinoer -
elektron neutrinoer.

1998: “Super - Kamiokande”, Japan

50.000 tons rent vand!

- observere muon neutrinoer og skelne mellem
neutrinoer oppefra og nedefra.



Super-Kamiokande hjemmeside.

Resultat: kun halvt så mange neutrinoer nedefra som oppefra.

Forklaring?

Neutrinoer masseløse \longrightarrow bevæger sig med lysets hastighed.
For neutrinoen står tiden stille!

Mangel på neutrinoer på længere rejse \longrightarrow neutrinoer har en tid.

Neutrinoer bevæger sig ikke med lysets hastighed - de har en masse!

Ny mulighed: en slags neutrino omdannes til en anden slags!

Neutrinoer, ν_e produceret i solen “forsvandt” før de nåede jorden!

Årsag: “skizofrene” neutrinoer

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$$

$$\nu_e \rightarrow \nu_\tau$$

Neutrino oscillationer \longrightarrow neutrinoer er blandede \longrightarrow neutrino masser!

SNO, Canada

- bekræfte neutrino oscillationer

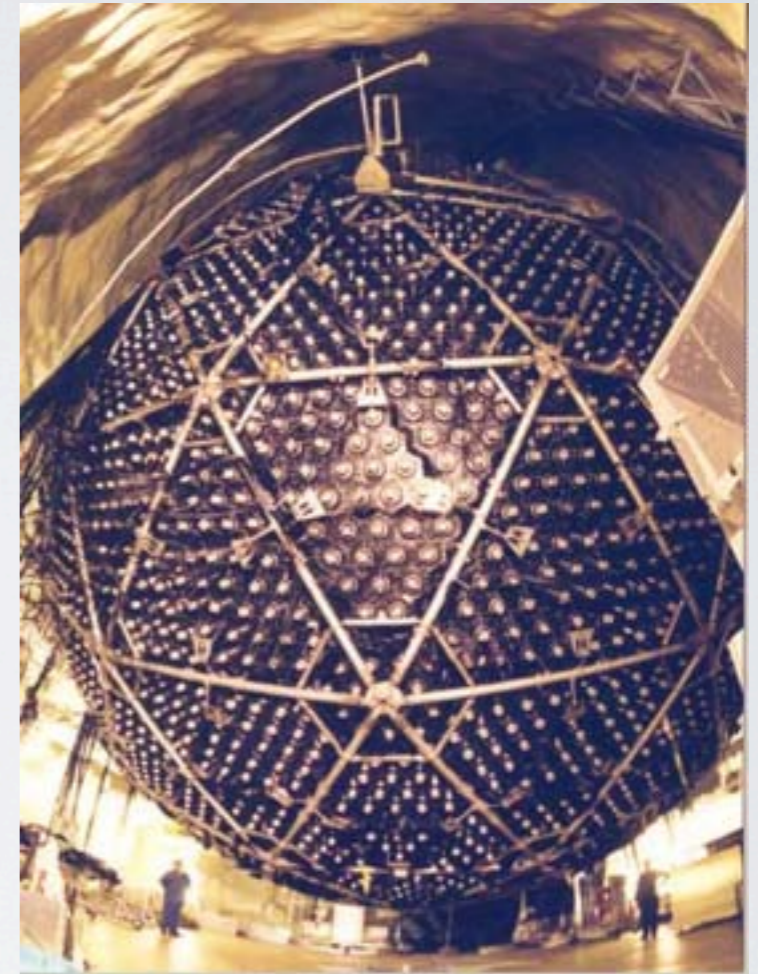
- 1000 tons tungt vand
- 2000 reaktioner over 19 måneder.

To typer målinger:

1. *Måling af elektron neutrinoen.*
2. *Måling af alle typer neutrinoer.*

2001: Fundet manglende neutrinoer fra solen -
forvandlet! Sol neutrino problemet løst!

Både Davies og Bahcall havde ret!



30 år efter Davies eksperiment: Fysikere overbeviste om, at sol neutrino forskning havde afsløret noget omkring neutrinoer...

Neutrino oscillationer

Neutrinoer kan beskrives på to måder:

1. Ved deres masse = masse egentilstande:

$$\nu_1, \nu_2, \nu_3$$

2. Ved deres “flavor” = de partikler, de optræder i forbindelse med, eller som kan “smage” dem:

$$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$$

Masse egentilstande er en sammensætning af flavor egentilstande:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Hvorfor stor blanding?

Blandingsmatricen U indeholder 3 vinkler, der beskriver hvor meget neutrinoer oscillerer.

Kvarker har også 3 vinkler, og blandingsmatricen er tæt på enhedsmatricen:

$$|U_{CKM}| \sim \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.004 \\ 0.2 & 1 & 0.04 \\ 0.008 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$

Neutrinoernes blandingsmatrice har 2 store vinkler

➔ neutrinoer oscillerer meget kraftigere end kvarker.

$$|U_{PMNS}| \sim \begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

Hvorfor denne forskel mellem blandingen af kvarker og leptoner?

Neutrino oscillations eksperimenter

Vigtige for at opnå forståelse for konsekvenser af neutrinoers masse

Efterfølgende neutrino eksperimenter, med neutrinoer fra

- Solen

Kan sige noget om sol fysik og teste Standard modellen, idet denne type eksperimenter er sensitive over for sol stof effekter.

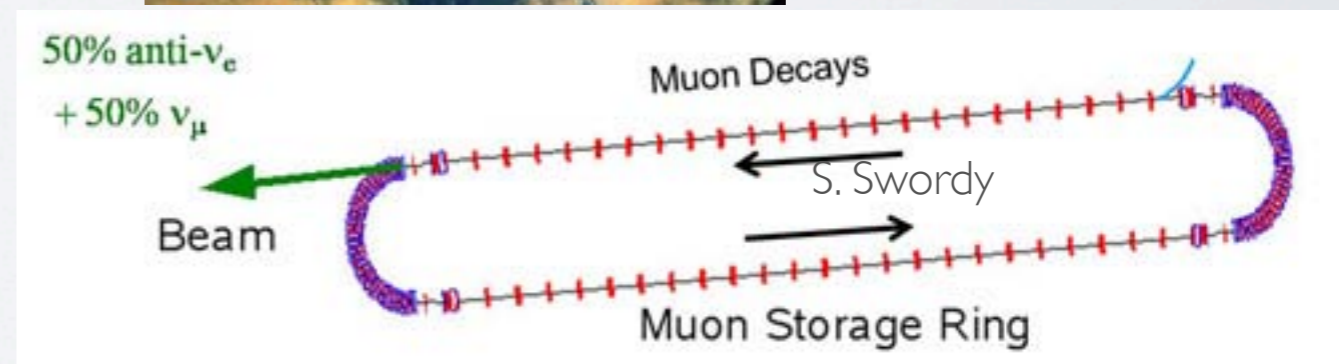
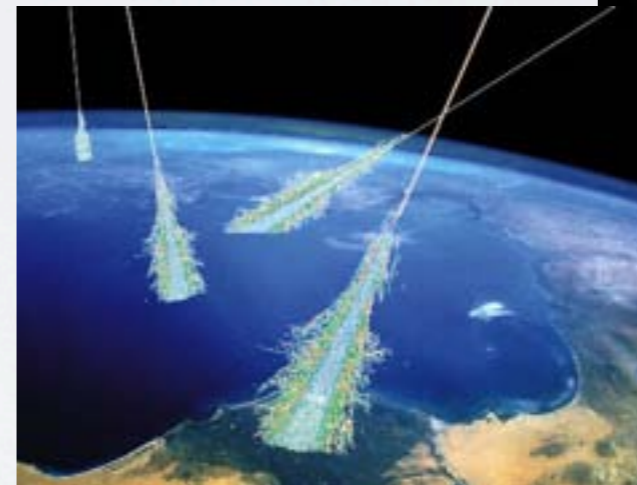
- Kerne reaktioner

- Neutrino accelerators

- Kosmiske strålinger fra atmosfæren

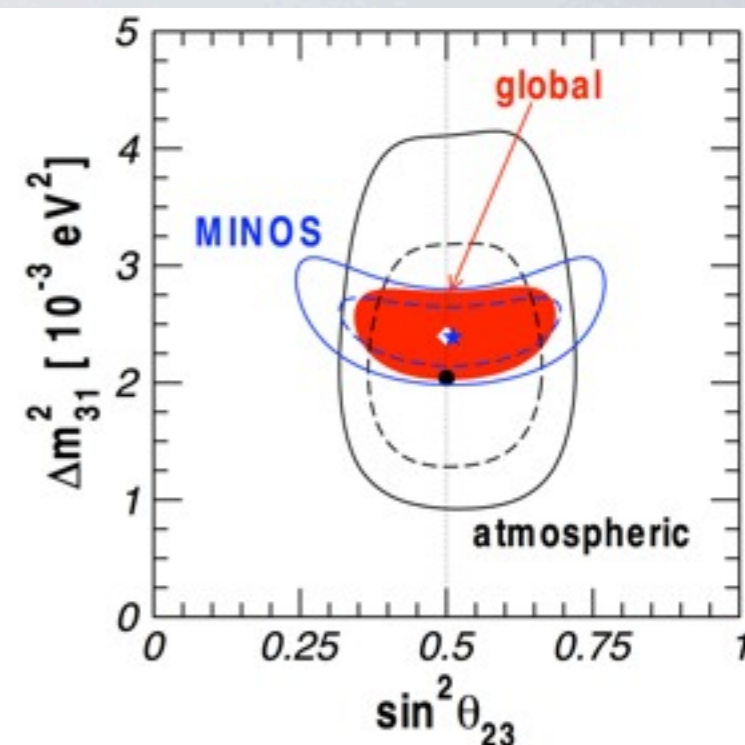
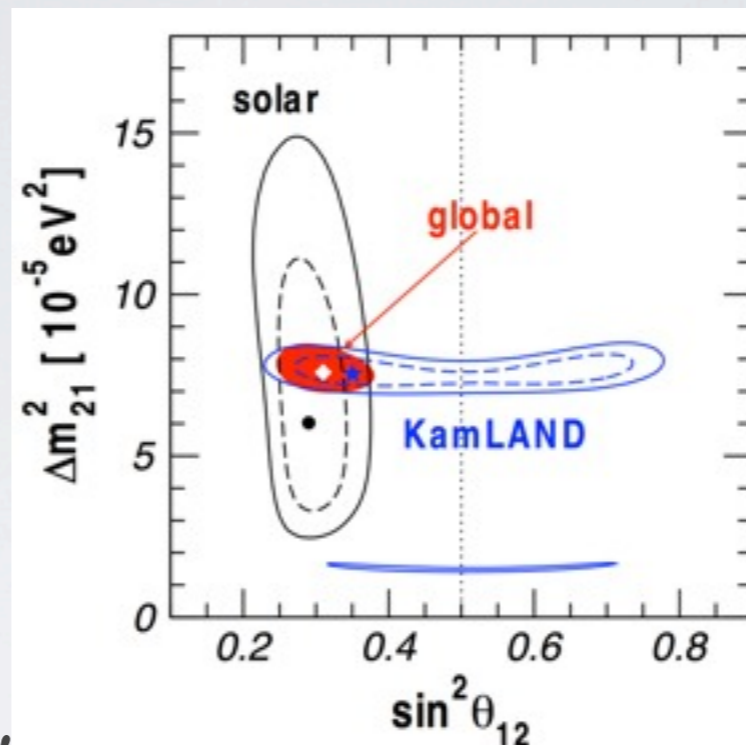
- Neutrino fabrikker

Muoner holdt i en ring klar til at sende afsted. Dette giver veldefinerede energier for muoner og præcise målinger på neutrinoer.

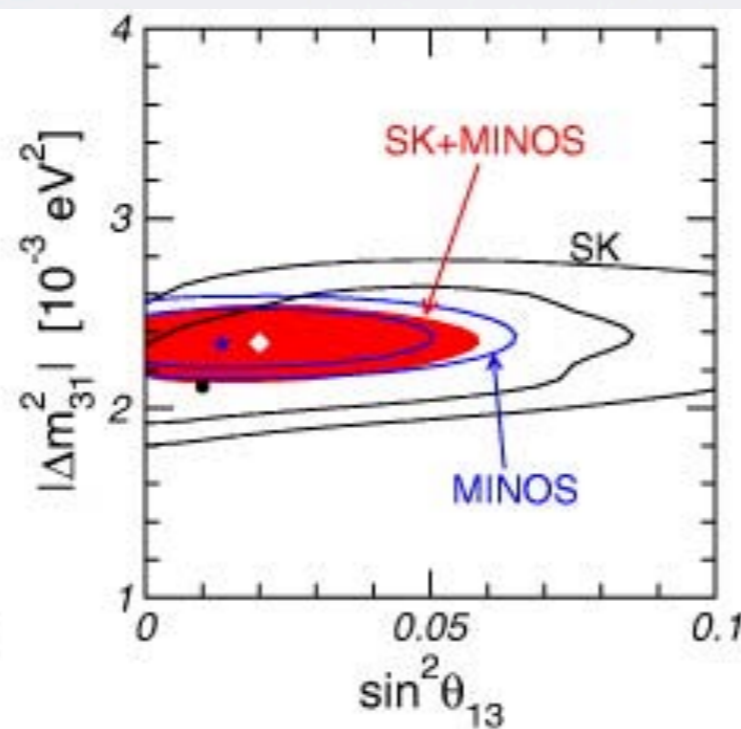
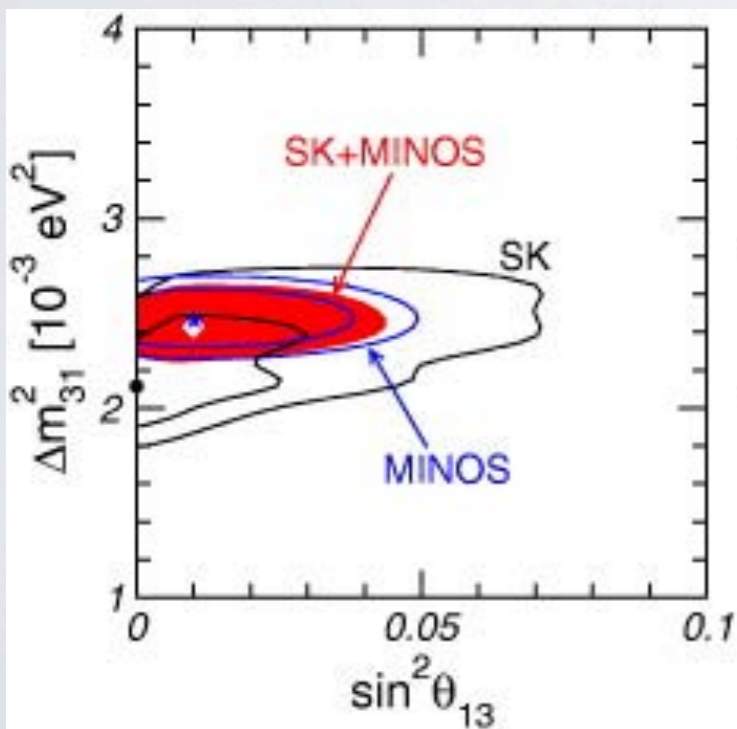


Data i dag

Vinkler og masse forskelle.
Meget lidt at arbejde med...



Nu også at den sidste vinkel ikke er nul!:

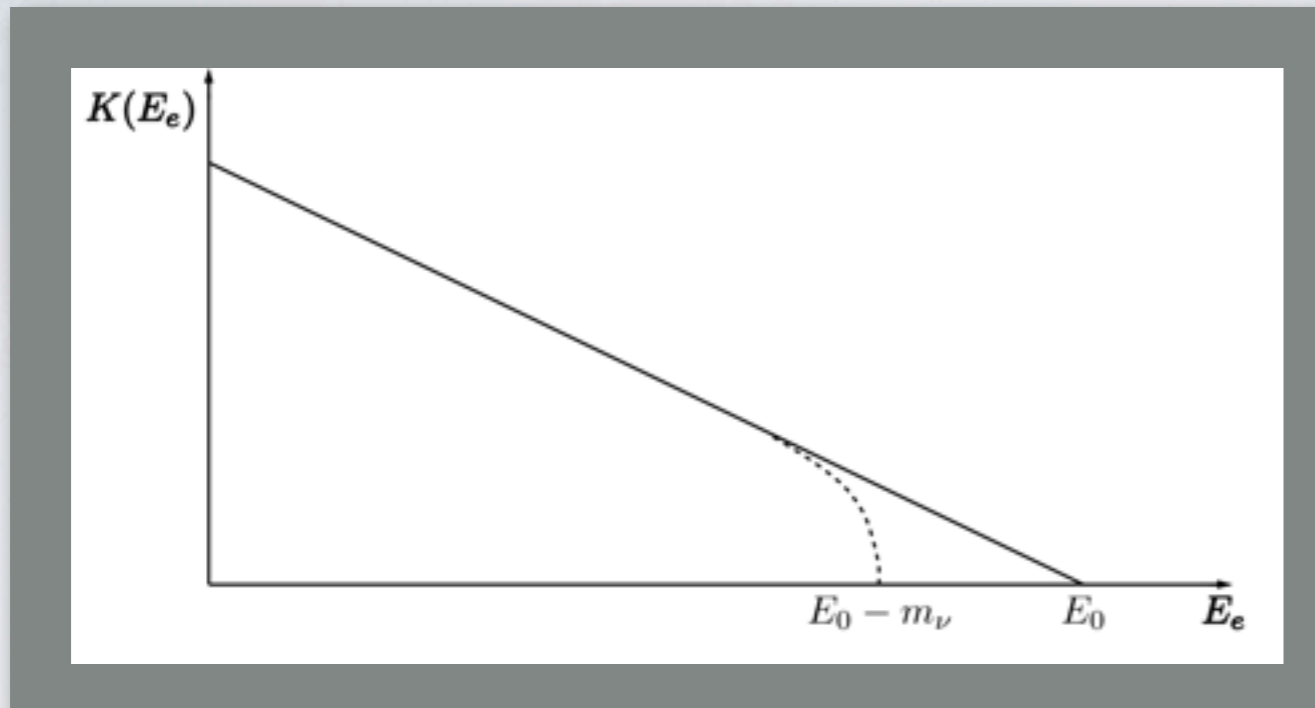


Schwetz, Tortola, Valle

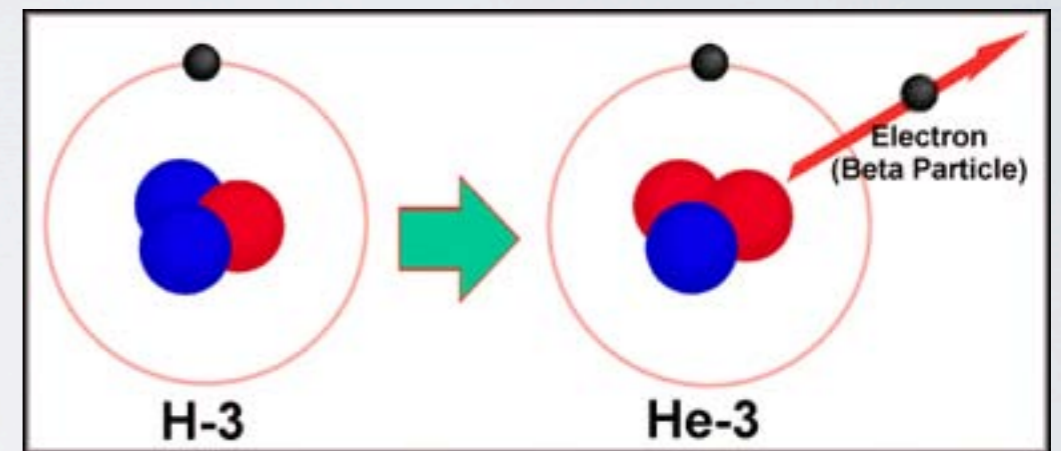
Ultimative spørgsmål:
*Hvad er neutrinoernes
 absolutte masse?*

Måling af absolutte masser

KATRIN: Karlsruhe
Direkte måling



Tritium beta decay -
Electron spektrum tæt på total energi



$$m_\beta = (|U_{ei}|^2 m_i^2)^{1/2} \leq 2.2 eV$$

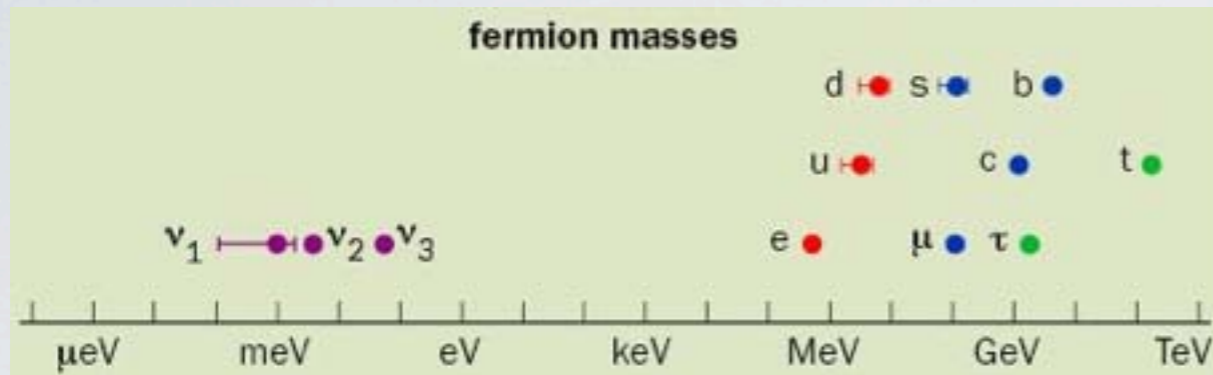
Kosmologi:

Øvre grænse for samlede masse
for alle typer neutrinoer

$$\sum_i m_i < 10^{-1} eV$$

Hvorfor små masser?

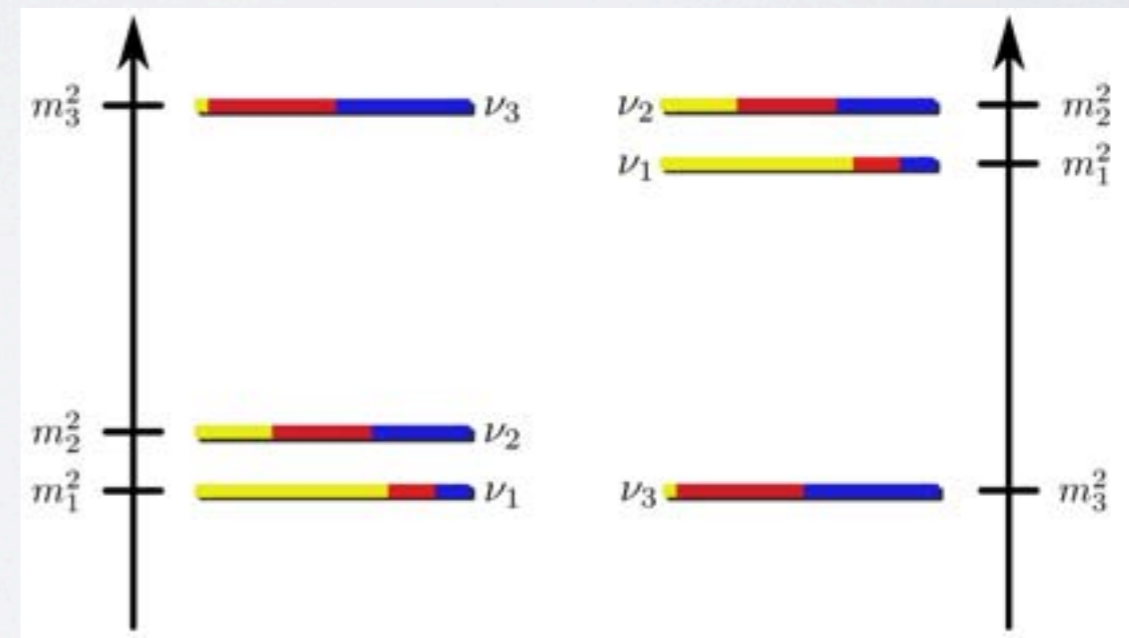
100 millioner gange mindre end elektronens masse!



H. Murayama

Naturens måde at fortælle os, at neutrinoer er anderledes? Dannes deres masse skab på en anden måde?

Absolutte masse ikke kendt!
- kun deres differencer.
Masse hierarki - endnu et ubesvaret spørgsmål.



Kismalac

Ubesvarede spørgsmål i neutrino fysik i dag

- Hvad er deres absolutte masser, hvilken neutrino er tungest?
- Hvorfor er neutrinoers masse så små?
- Hvilken mekanisme er ansvarlig for deres masse?
- Er der nogle underliggende symmetrier, der kan fortælle mere om neutrinoer?
- Er neutrinoer deres egne antipartikler?
- Kan neutrinoer forklare stof-antistof asymmetrien??
- Kan neutrinoer fortælle os, hvorfor vi eksisterer?
- Hvilken rolle spillede neutrinoerne under Big Bang?
- Hvad kan neutrinoer fortælle om levende og døende stjerner?

Mere om det efter pausen...

Standard modellen

Beskriver hvad vores verden består af!

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson

Gauge bosons

Wiki

- Partikler
- Vekselvirkninger
- Masser
- Ladninger
- Kræfter

- Også det, der endnu ikke er opdaget eksperimentelt!

Men standard modellen kan være ufuldendt...

Er standard modellen svaret på alt?

Nej!

(Heldigvis for teoretikere!)

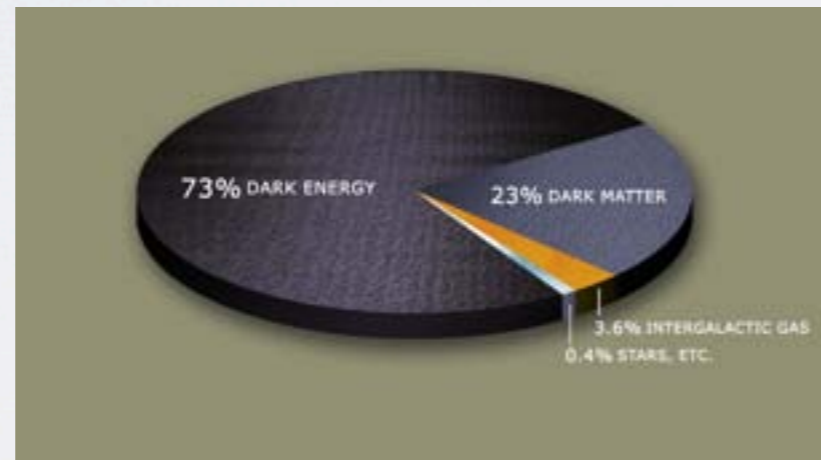
Standard modellen kan ikke forklare:

- *Neutrinoer med masse.*

- *Mørkt stof/
energi*

- *Tyngdekraften.*

- *Mange andre ting...*



Standard modellen er ikke fuldendt!

Kan standard modellen være forkert?

- højst usandsynligt da den har forudset eksistensen af elementarpartikler før de blev opdaget!

Vi har brug for “ny fysik” til at forklare standard modellens mangler!

Finde på en ny model



Udvide standard modellen
så lidt som muligt



Ny fysik!

“Ny” Standard Model, der indeholder neutrinoers masse: νSM

*Eksperimenter
fortæller os, at
neutrino fysikken
bærer ny fysik med sig.*

*Teorien skal nu
inddrage den nye
fysik i nye modeller.*



A. Bannykh



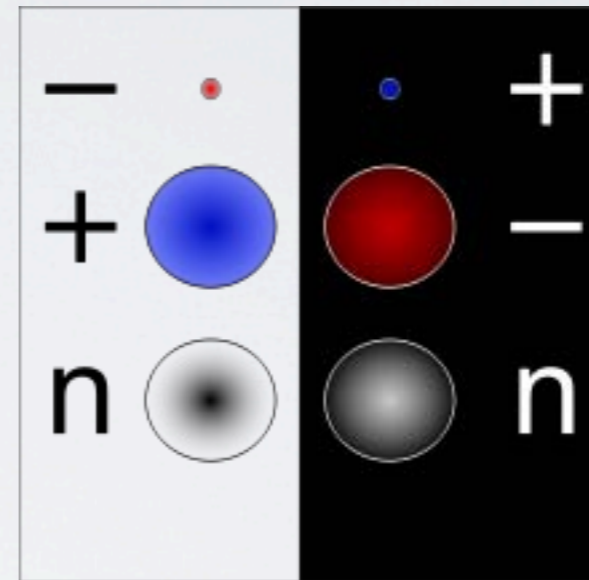
Alphaspirit

Majorana neutrinoer?

Eneste fermion uden elektrisk ladning!

Mulighed for Majorana neutrinoer:

Neutrinoer kan være deres egne antipartikler!



Wiki

Majorana: Lepton symmetri brudt.

Forklaring på stof-antistof antisymmetrien og hvorfor vi eksisterer?

Dirac vs Majorana

Lidt teknisk...

Dirac: Som i Standard Modellen:
Lette, venstre-håndede neutrinoer
kobler til tunge, højre-håndede
neutrinoer og Higgs partiklen.

$$\bar{N}_R \phi \nu_L$$

Majorana: Neutrinoer er deres
egne antipartikler \rightarrow Vi
introducer en ny kobling mellem
neutrinoen og dens antipartikel -
sig selv:

$$(\phi \nu_L)(\phi \nu_L)$$

\rightarrow lepton symmetri brydning,
måske godt!

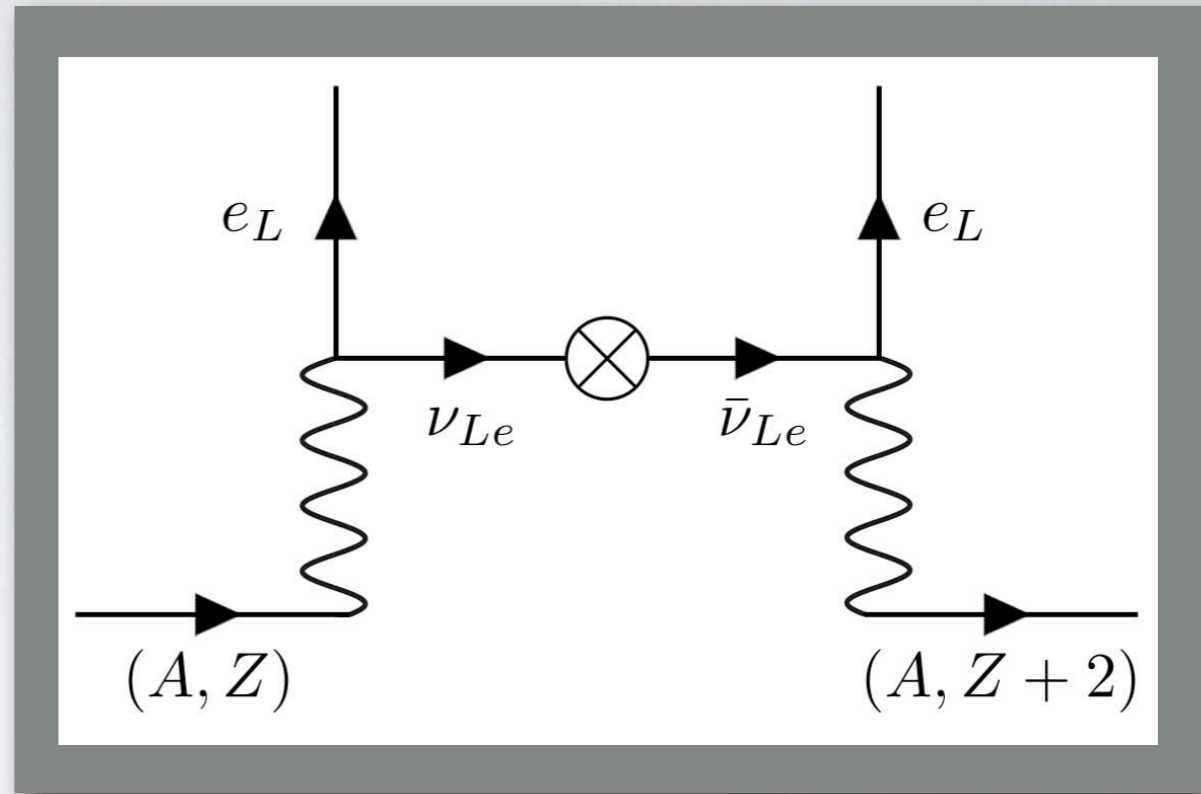
Ikke favorabelt: Kan ikke forklare
hvorfor neutrino masserne er så
små.

Denne mulighed giver neutrinoer
naturligt små masser.

Eksperiment - er neutrinoer Majorana partikler?

Neutrinoløst dobbelt
Beta henfald

$$|m_{ee}| \leq 0.38 \text{ eV}$$

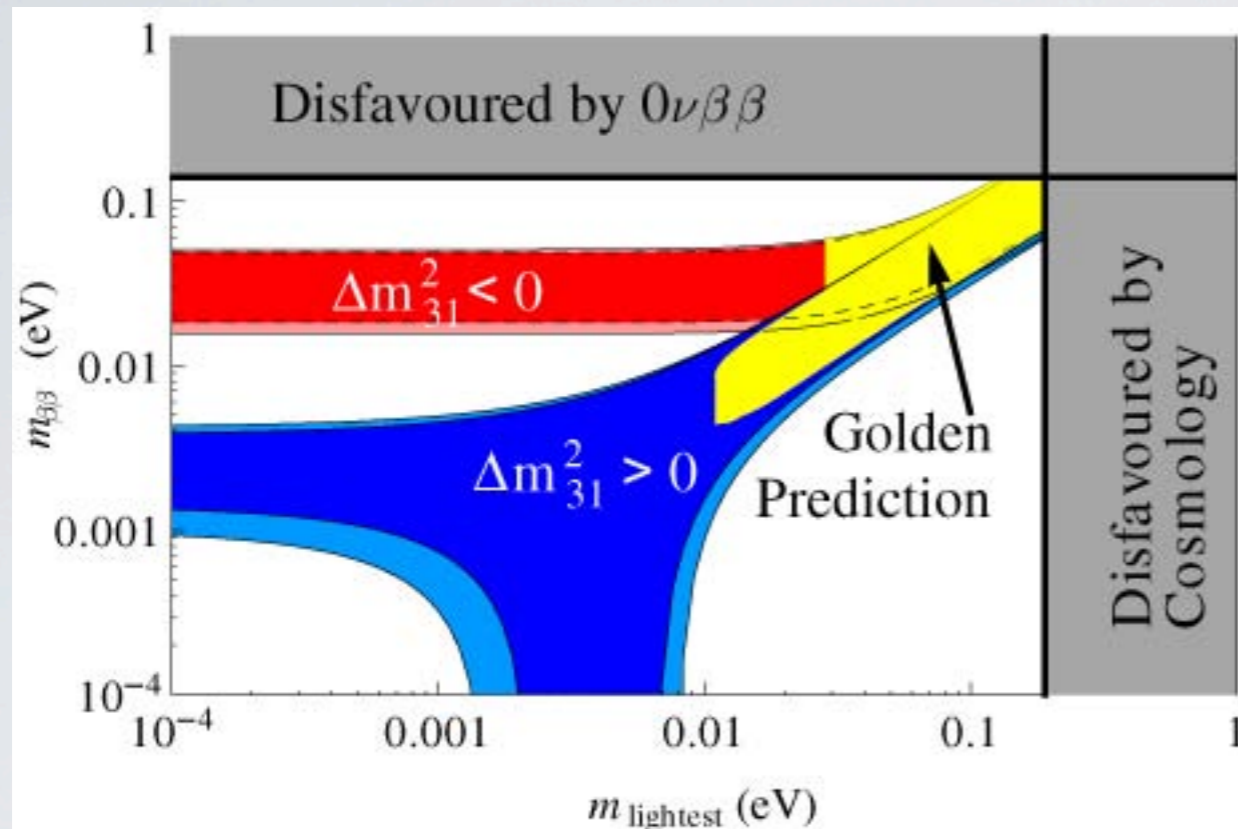


Heidelberg-Moskva eksperimentet viste resultater i 1995, hvor neutrinoløst dobbelt beta henfald blev observeret i ^{76}Ge , med

$$|m_{ee}| = 44 \text{ meV}$$

Men eksperimenterne EXO-200 og KamLAND med ^{136}Xe var i strid med dette resultat.

Begrænsninger



S.F. King, C. Luhn

Eksperimenter med Beta henfald, neutrinoløst dobbelt Beta henfald og kosmologi begrænser mulighederne en anelse...

Fremtidige neutrinoless double Beta decay eksperimenter - en størrelsesorden længere ned. Dette kan måske afsløre om neutrinoer er Majorana og hvilket masse hierarki er det rigtige.

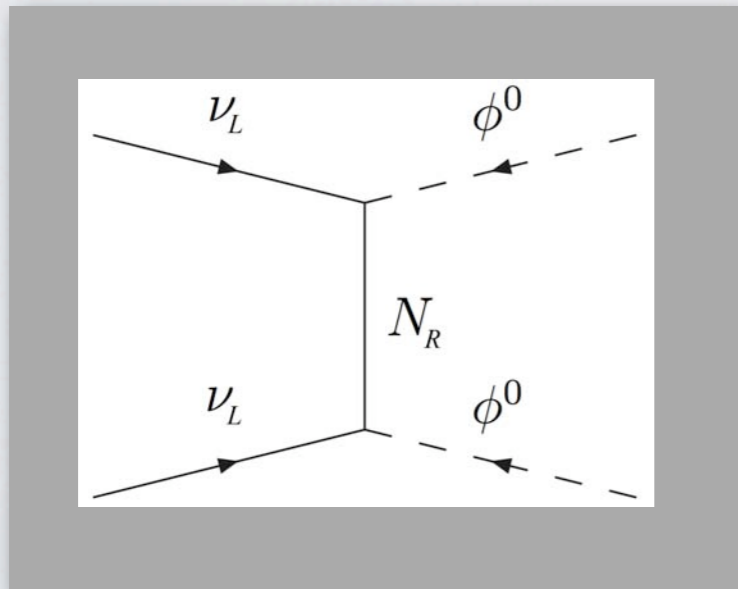
Neutrinoer har masse

Hvilken mekanisme står bag?

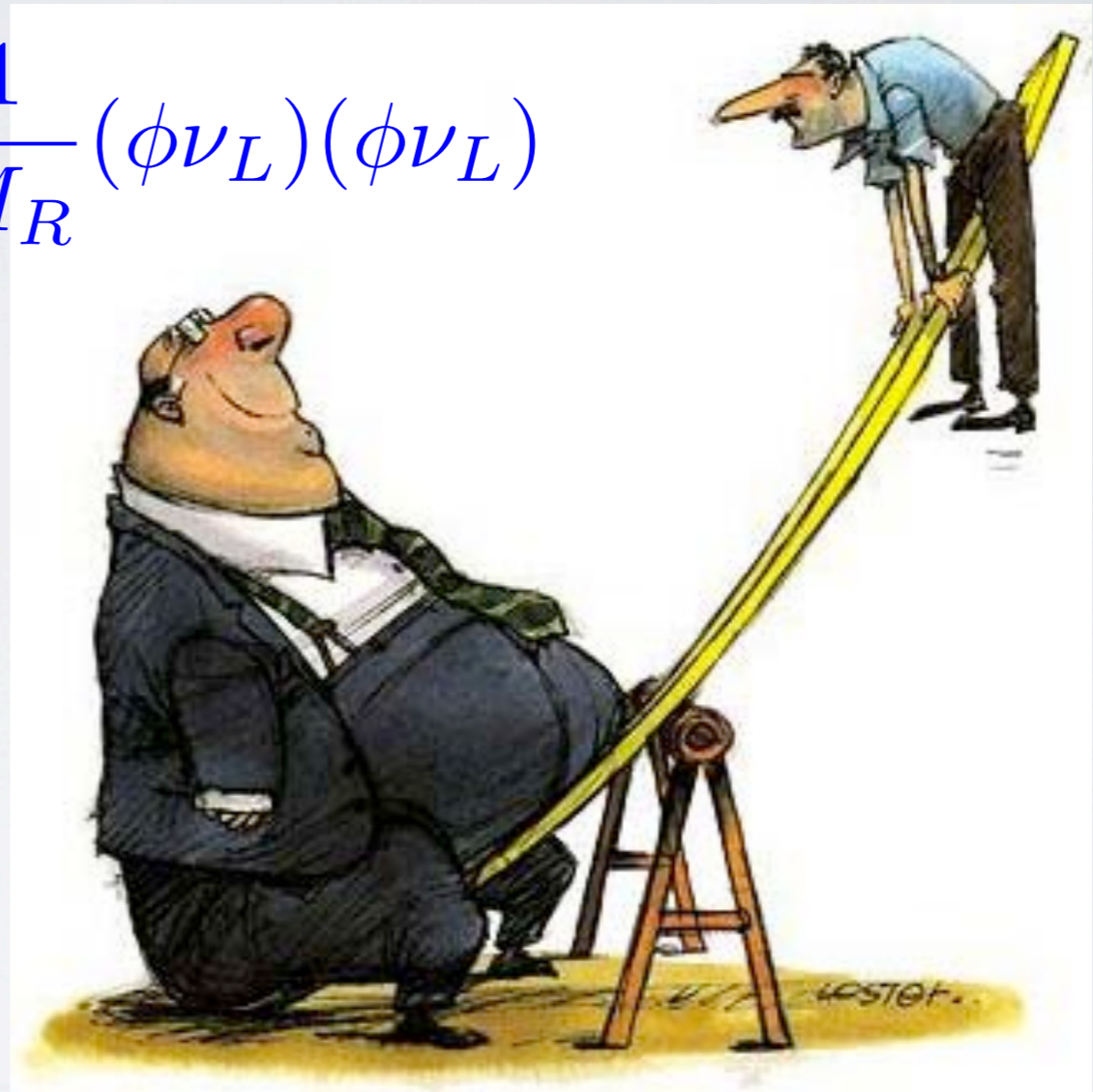
Majorana neutrinoer

See-saw mekanisme:

Inddrager tunge højre-håndede neutrinoer:



$$\frac{1}{M_R} (\phi \nu_L) (\phi \nu_L)$$



mrcheeky.com

Flere modeller, der ligner denne...

Loop rettelsler!

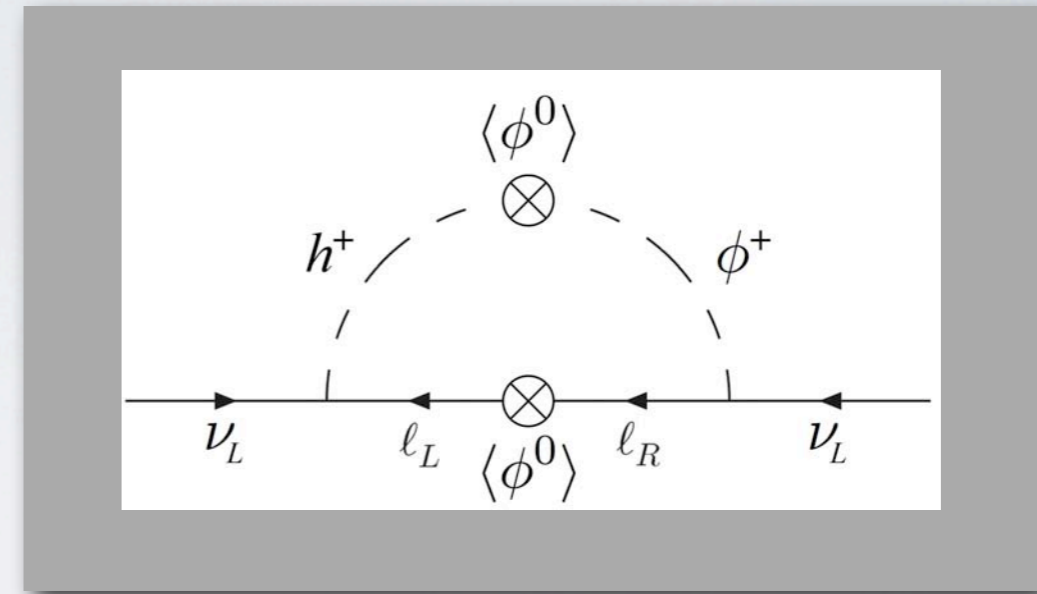
Zee model:

Introducerer ny partikel h

Partikelfysik: Loop niveau

- mindre størrelser

➔ naturligt små masser...

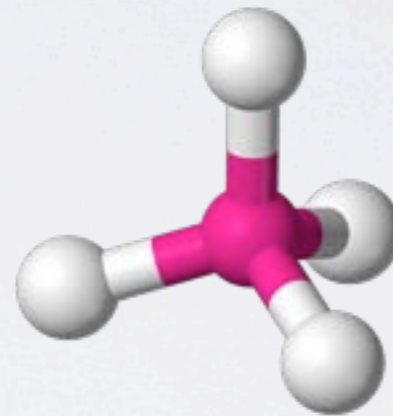


Seesaw og loop mekanismer danner kobling mellem neutrinoen og sig selv (sin antipartikel):

$$\frac{1}{M_R} (\phi \nu_L) (\phi \nu_L)$$

Symmetrier

Det vigtigste redskab, Standard modellen bruger til at beskrive vores verden...



Idé: Udvid standard model ved at

bruge flere symmetrier!

Naturen er en interessant størrelse

Ligesom i eventyr er tallet 3 vigtigt...

Mange partikler findes i 3 varianter!



Three generations of matter (fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson

Gauge bosons

Også 3 neutrinoer!

Mulighed: Anvend symmetrier der kan beskrive dette.

Nyt spændende fra NBIA...

Danmark er lige blevet medlem af Ice Cube!

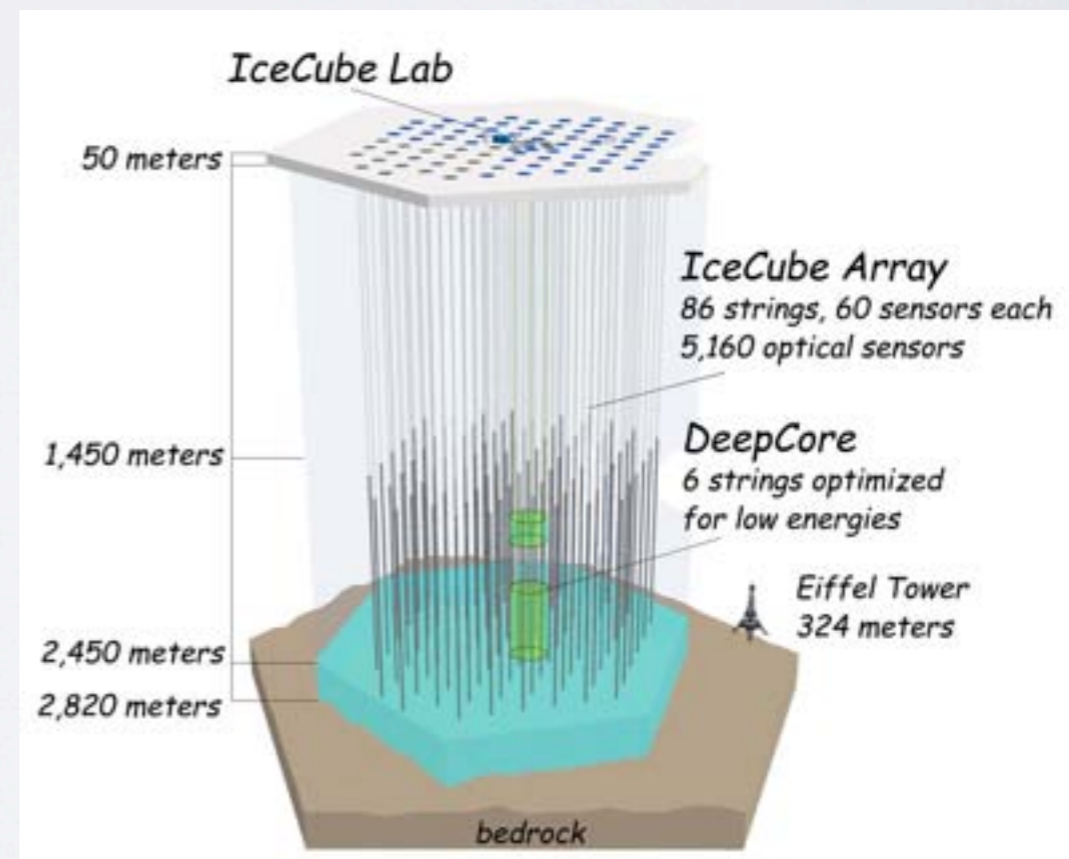
Sydpolen - Antarktis.

Måler neutrinoer med ultrahøje energier.

Kosmiske neutrinoer fra atmosfæren,
kollisioner af kosmiske stråler.

Neutrinoer, der medbringer
budskaber fra Big Bang!

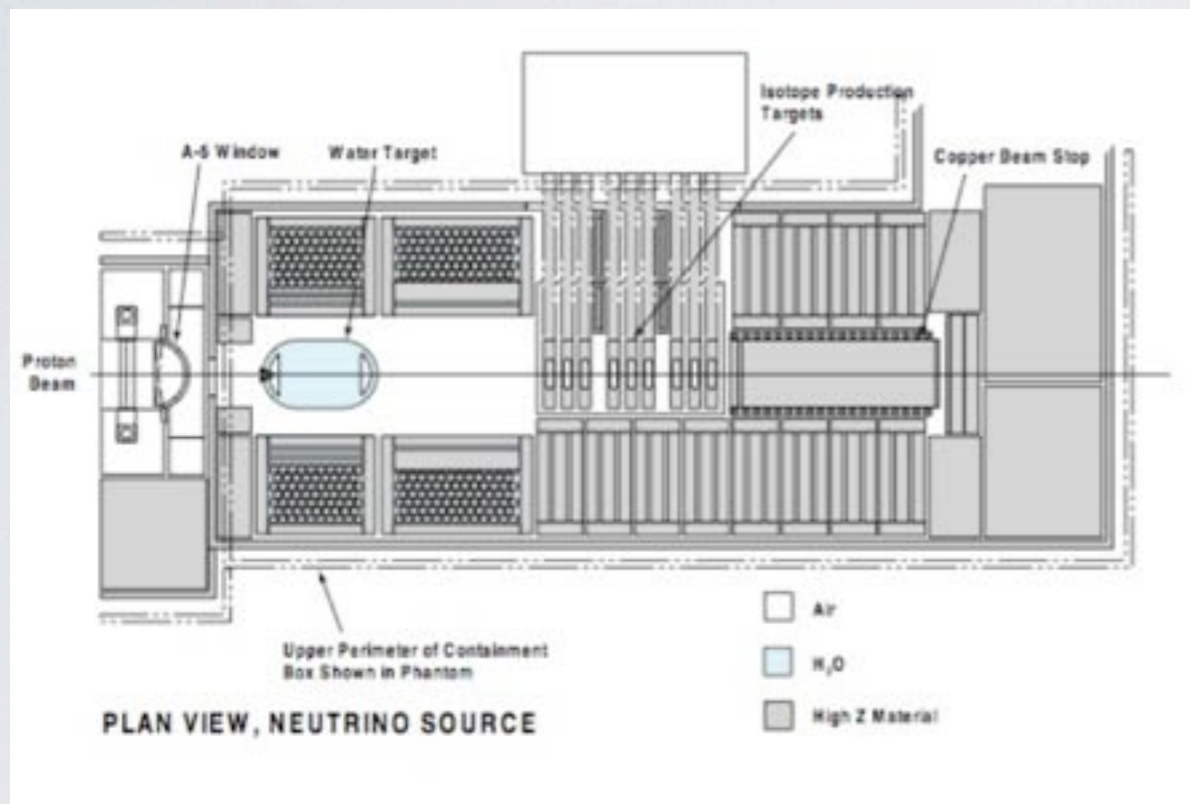
1 km³ is!! → verdens største
neutrino eksperiment!



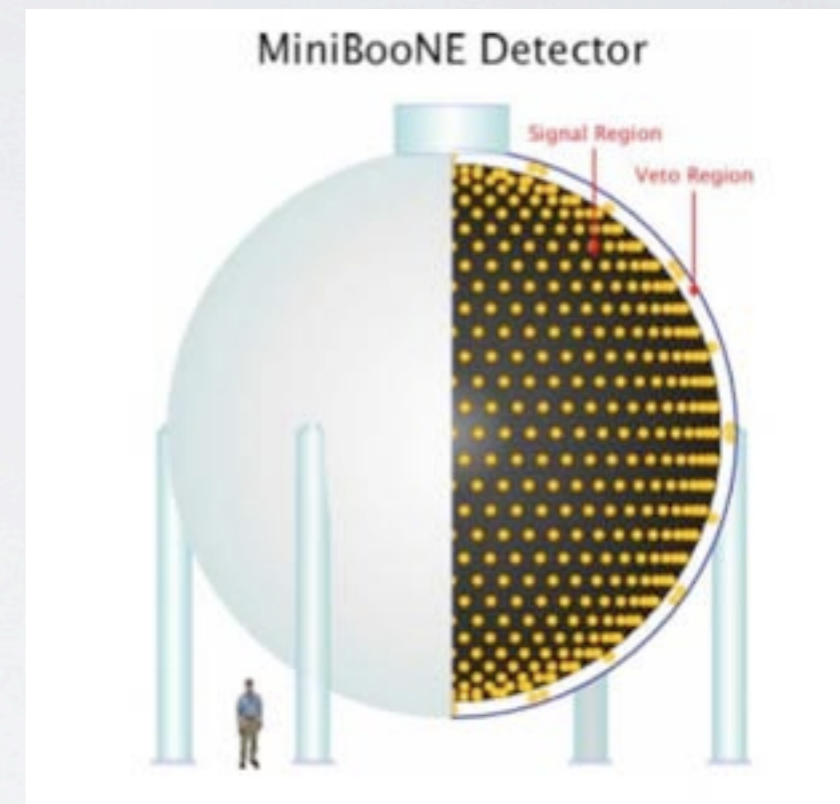
IceCube Collaboration

Kontroversielle eksperimenter:

LSND:
Los Alamos



MiniBoone:
FermiLab

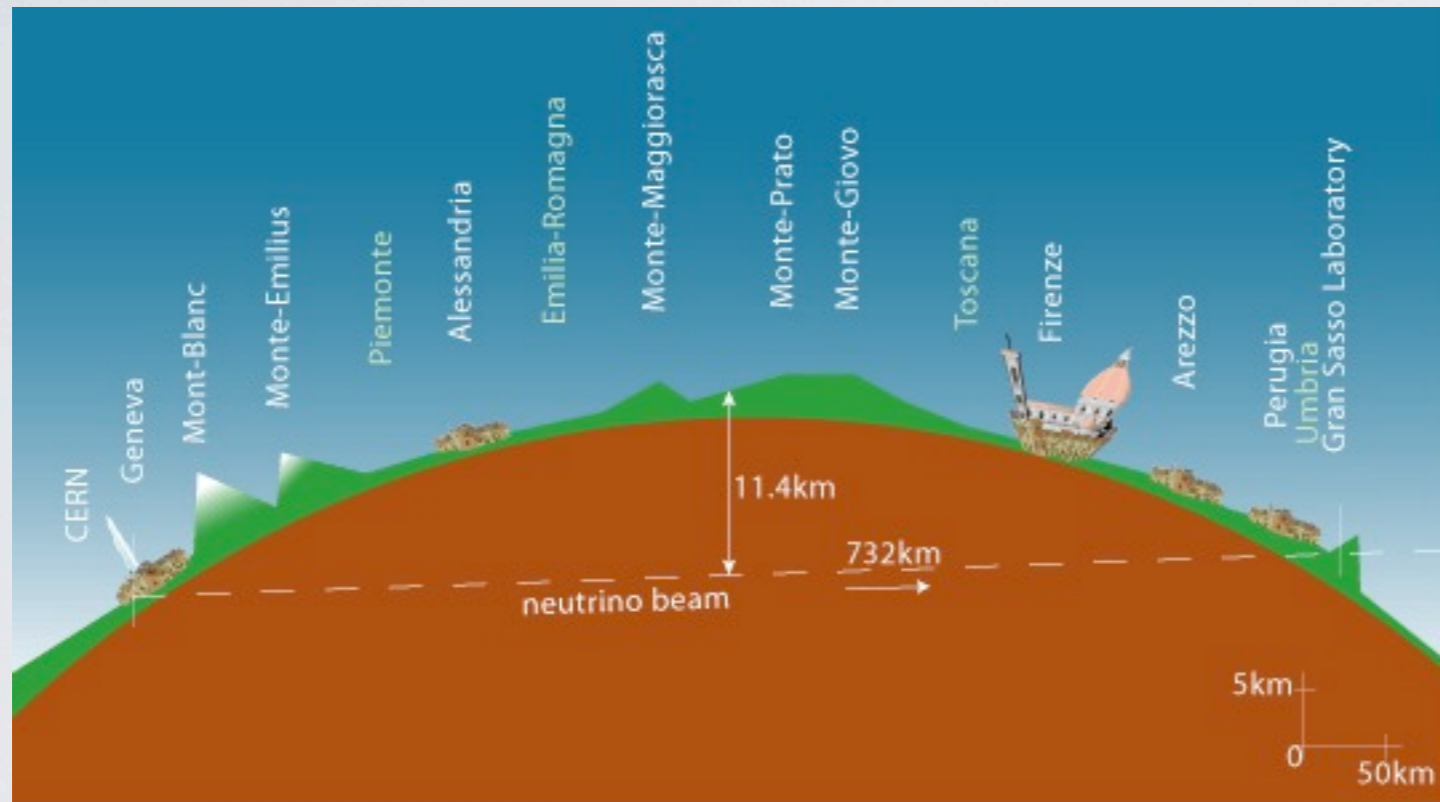


Viser endnu en masse forskel. Er der en fjerde neutrino?

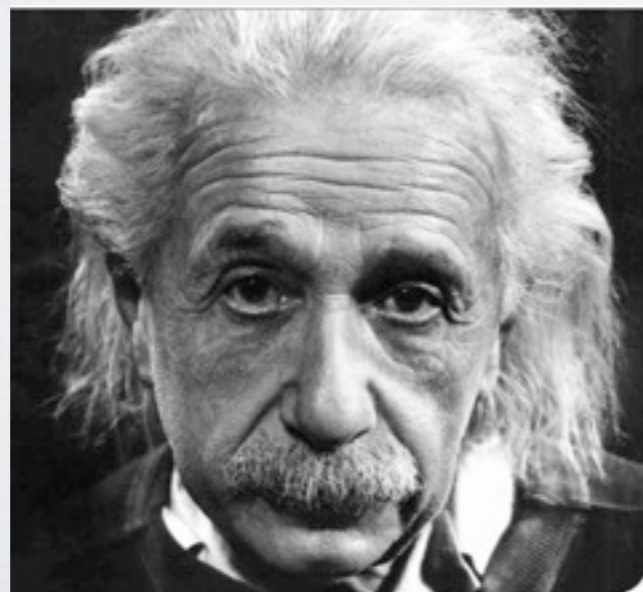
Planck data: Der er plads til en fjerde neutrino!

Flere kontroversielle eksperimenter:

Neutrinoer hurtigere end lysets hastighed?



Fra CERN til Gran Sasso...



Einstein var ikke helt galt på den...

Fysikere, der ikke stolede på Davies og Bahcall havde god grund til mistro.

Lidt spekulationer...

- Neutrinoen er den partikel, der er flest af i universet. Det er også den partikel, vi ved mindst om. Neutrino fysik er derfor et ekstremt vigtigt område at forstå for at kunne forstå resten af universets gåder.
- Neutrinoens egenskaber blev ikke dikteret af teoretiske modeller, men af eksperimenter. Måske er der interessante fænomener i vente fra nuværende eksperimenter.
- For 20 år siden havde vi ingen viden om neutrinoers masse og blandingsvinkler. Nu har vi en model, med 3 slags neutrinoer, der passer til stort set alle data.
- Neutrino masserne har skabt et “Ny fysik” problem, hvor Standard Modellen ikke længere rækker.
- To populære mekanismer bruger at neutrinoer er Majorana til at forklare eksistens af deres små masser.
- Eksperimenter kan ikke bestemme deres absolutte masser. Der er stadig brug for modeller med nok begrænsninger til at forudsige deres masser.
- Brugen af symmetrier kan være en god måde at afgrænse modeller nok til at bestemme masserne.