

# Problemi correnti nella fisica dei neutrini

D.Orestano

AA 2011/12

# Sommario II

- La scoperta del terzo neutrino
-

# Le famiglie fermioniche

u	
d	s

1964

e	$\mu$
$\nu_e$	$\nu_\mu$

# Le famiglie fermioniche

u	c
d	s

1964

1974

e	$\mu$
$\nu_e$	$\nu_\mu$

# Le famiglie fermioniche

u	c
d	s

1964

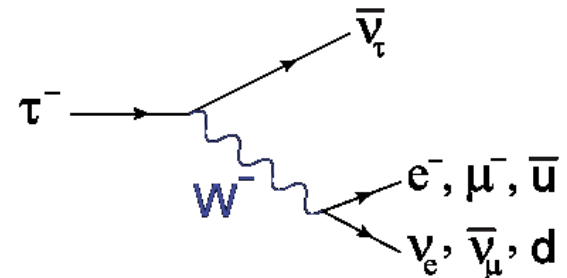
1974

1975

e	$\mu$	$\tau$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	

# Il leptone tau: proprieta'

- Leptone carico  $\Leftrightarrow$  solo interazioni em e deboli, come elettrone e muone
- Ma piu' pesante: 1777 MeV (contro 0.5 MeV e 106 MeV)
- Decadimento tramite corrente carica debole, come per il muone
  - Ma massa piu' elevata
  - Maggiore spazio delle fasi
  - Minore vita media ( $5 \times 10^{-13}$  s contro  $2 \times 10^{-6}$  s)
  - Possibilita' di decadere anche in quark



Modes with one charged particle			
$\Gamma_1$	particle <sup>-</sup> $\geq$ 0 neutrals $\geq$ 0 $K^0 \nu_\tau$ ("1-prong")	(85.36 $\pm$ 0.07) %	S=1.3
$\Gamma_2$	particle <sup>-</sup> $\geq$ 0 neutrals $\geq$ 0 $K_L^0 \nu_\tau$	(84.72 $\pm$ 0.08) %	S=1.3
$\Gamma_3$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	[a] (17.39 $\pm$ 0.04) %	S=1.1
$\Gamma_4$	$\mu^- \nu_\mu \nu_\tau \gamma$	[b] ( 3.6 $\pm$ 0.4 ) $\times 10^{-3}$	
$\Gamma_5$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	[a] (17.82 $\pm$ 0.04) %	S=1.1
$\Gamma_6$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau \gamma$	[b] ( 1.75 $\pm$ 0.18) %	
$\Gamma_7$	$h^- \geq$ 0 $K_L^0 \nu_\tau$	(12.13 $\pm$ 0.07) %	S=1.1
$\Gamma_8$	$h^- \nu_\tau$	(11.61 $\pm$ 0.06) %	S=1.1
$\Gamma_9$	$\pi^- \nu_\tau$	[a] (10.91 $\pm$ 0.07) %	S=1.1
$\Gamma_{10}$	$K^- \nu_\tau$	[a] ( 6.96 $\pm$ 0.23 ) $\times 10^{-3}$	S=1.1
$\Gamma_{11}$	$h^- \geq$ 1 neutrals $\nu_\tau$	(37.06 $\pm$ 0.10) %	S=1.2
$\Gamma_{12}$	$h^- \geq$ 1 $\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	(36.54 $\pm$ 0.10) %	S=1.2
$\Gamma_{13}$	$h^- \pi^0 \nu_\tau$	(25.94 $\pm$ 0.09) %	S=1.1
$\Gamma_{14}$	$\pi^- \pi^0 \nu_\tau$	[a] (25.51 $\pm$ 0.09) %	S=1.1
$\Gamma_{15}$	$\pi^- \pi^0$ non- $\rho(770) \nu_\tau$	( 3.0 $\pm$ 3.2 ) $\times 10^{-3}$	
$\Gamma_{16}$	$K^- \pi^0 \nu_\tau$	[a] ( 4.29 $\pm$ 0.15 ) $\times 10^{-3}$	
$\Gamma_{17}$	$h^- \geq$ 2 $\pi^0 \nu_\tau$	(10.85 $\pm$ 0.11) %	S=1.2
$\Gamma_{18}$	$h^- 2\pi^0 \nu_\tau$	( 9.51 $\pm$ 0.11) %	S=1.2
$\Gamma_{19}$	$h^- 2\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	( 9.35 $\pm$ 0.11) %	S=1.2
$\Gamma_{20}$	$\pi^- 2\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	[a] ( 9.29 $\pm$ 0.11) %	S=1.2
$\Gamma_{21}$	$\pi^- 2\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ ), scalar	< 9 $\times 10^{-3}$	CL=95%
$\Gamma_{22}$	$\pi^- 2\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ ), vector	< 7 $\times 10^{-3}$	CL=95%
$\Gamma_{23}$	$K^- 2\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	[a] ( 6.5 $\pm$ 2.3 ) $\times 10^{-4}$	
$\Gamma_{24}$	$h^- \geq$ 3 $\pi^0 \nu_\tau$	( 1.34 $\pm$ 0.07) %	S=1.1
$\Gamma_{25}$	$h^- \geq$ 3 $\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	( 1.25 $\pm$ 0.07) %	S=1.1
$\Gamma_{26}$	$h^- 3\pi^0 \nu_\tau$	( 1.18 $\pm$ 0.07) %	
$\Gamma_{27}$	$\pi^- 3\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	[a] ( 1.04 $\pm$ 0.07) %	
$\Gamma_{28}$	$K^- 3\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0, \eta$ )	[a] ( 4.9 $\pm$ 2.2 ) $\times 10^{-4}$	S=1.1
$\Gamma_{29}$	$h^- 4\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	( 1.5 $\pm$ 0.4 ) $\times 10^{-3}$	
$\Gamma_{30}$	$h^- 4\pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0, \eta$ )	[a] ( 1.1 $\pm$ 0.4 ) $\times 10^{-3}$	
$\Gamma_{31}$	$K^- \geq$ 0 $\pi^0 \geq$ 0 $K^0 \geq$ 0 $\gamma \nu_\tau$	( 1.57 $\pm$ 0.04) %	S=1.1
$\Gamma_{32}$	$K^- \geq$ 1 ( $\pi^0$ or $K^0$ or $\gamma$ ) $\nu_\tau$	( 8.72 $\pm$ 0.32 ) $\times 10^{-3}$	S=1.1
Modes with $K^0$ 's			
$\Gamma_{33}$	$K_S^0$ (particles) <sup>-</sup> $\nu_\tau$	( 9.2 $\pm$ 0.4 ) $\times 10^{-3}$	S=1.4
$\Gamma_{34}$	$h^- K^0 \nu_\tau$	(10.0 $\pm$ 0.5 ) $\times 10^{-3}$	S=1.8
$\Gamma_{35}$	$\pi^- K^0 \nu_\tau$	[a] ( 8.4 $\pm$ 0.4 ) $\times 10^{-3}$	S=2.0
$\Gamma_{36}$	$\pi^- K^0$ (non- $K^*(892)^-$ ) $\nu_\tau$	( 5.4 $\pm$ 2.1 ) $\times 10^{-4}$	
$\Gamma_{37}$	$K^- K^0 \nu_\tau$	[a] ( 1.59 $\pm$ 0.16 ) $\times 10^{-3}$	
$\Gamma_{38}$	$K^- K^0 \geq$ 0 $\pi^0 \nu_\tau$	( 3.18 $\pm$ 0.23 ) $\times 10^{-3}$	
$\Gamma_{39}$	$h^- K^0 \pi^0 \nu_\tau$	( 5.5 $\pm$ 0.4 ) $\times 10^{-3}$	

Molteplici modi  
di decadimento  
ma in sostanza  
W+neutrino

A queste energie

W-> e nu

W-> mu nu

W-> ud (x 3 colori)  
democraticamente

BR~20% in ciascuno di  
questi canali

$\Gamma_{40}$	$\pi^- \bar{K}^0 \pi^0 \nu_\tau$	[a]	$(3.9 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{41}$	$\bar{K}^0 \rho^- \nu_\tau$		$(2.2 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{42}$	$K^- \bar{K}^0 \pi^0 \nu_\tau$	[a]	$(1.59 \pm 0.20) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{43}$	$\pi^- \bar{K}^0 \geq 1 \pi^0 \nu_\tau$		$(3.2 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{44}$	$\pi^- \bar{K}^0 \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$		$(2.6 \pm 2.4) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{45}$	$K^- \bar{K}^0 \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$		$< 1.6 \times 10^{-4}$	CL=95
$\Gamma_{46}$	$\pi^- \bar{K}^0 \bar{K}^0 \nu_\tau$		$(1.7 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	S=1
$\Gamma_{47}$	$\pi^- K_S^0 K_S^0 \nu_\tau$	[a]	$(2.4 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{48}$	$\pi^- K_S^0 K_L^0 \nu_\tau$	[a]	$(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	S=1
$\Gamma_{49}$	$\pi^- \bar{K}^0 \bar{K}^0 \pi^0 \nu_\tau$		$(3.1 \pm 2.3) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{50}$	$\pi^- K_S^0 K_S^0 \pi^0 \nu_\tau$		$< 2.0 \times 10^{-4}$	CL=95
$\Gamma_{51}$	$\pi^- K_S^0 K_L^0 \pi^0 \nu_\tau$		$(3.1 \pm 1.2) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{52}$	$K^0 h^+ h^- h^- \geq 0$ neutrals $\nu_\tau$		$< 1.7 \times 10^{-3}$	CL=95
$\Gamma_{53}$	$K^0 h^+ h^- h^- \nu_\tau$		$(2.3 \pm 2.0) \times 10^{-4}$	

### Modes with three charged particles

$\Gamma_{54}$	$h^- h^- h^+ \geq 0$ neutrals $\geq 0 K_L^0 \nu_\tau$		$(15.19 \pm 0.08) \%$	S=1
$\Gamma_{55}$	$h^- h^- h^+ \geq 0$ neutrals $\nu_\tau$ (ex. $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ) ("3-prong")		$(14.56 \pm 0.07) \%$	S=1
$\Gamma_{56}$	$h^- h^- h^+ \nu_\tau$		$(9.80 \pm 0.07) \%$	S=1
$\Gamma_{57}$	$h^- h^- h^+ \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(9.46 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{58}$	$h^- h^- h^+ \nu_\tau$ (ex. $K^0, \omega$ )		$(9.43 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{59}$	$\pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$		$(9.31 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{60}$	$\pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(9.02 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{61}$	$\pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$ (ex. $K^0$ ), non-axial vector		$< 2.4 \%$	CL=95
$\Gamma_{62}$	$\pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$ (ex. $K^0, \omega$ )	[a]	$(8.99 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{63}$	$h^- h^- h^+ \geq 1$ neutrals $\nu_\tau$		$(5.38 \pm 0.07) \%$	S=1
$\Gamma_{64}$	$h^- h^- h^+ \geq 1 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(5.08 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{65}$	$h^- h^- h^+ \pi^0 \nu_\tau$		$(4.75 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{66}$	$h^- h^- h^+ \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(4.56 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{67}$	$h^- h^- h^+ \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0, \omega$ )		$(2.79 \pm 0.08) \%$	S=1
$\Gamma_{68}$	$\pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$		$(4.61 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{69}$	$\pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(4.48 \pm 0.06) \%$	S=1
$\Gamma_{70}$	$\pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0, \omega$ )	[a]	$(2.70 \pm 0.08) \%$	S=1
$\Gamma_{71}$	$h^- \rho \pi^0 \nu_\tau$			
$\Gamma_{72}$	$h^- \rho^+ h^- \nu_\tau$			
$\Gamma_{73}$	$h^- \rho^- h^+ \nu_\tau$			
$\Gamma_{74}$	$h^- h^- h^+ \geq 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(5.17 \pm 0.33) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{75}$	$h^- h^- h^+ 2 \pi^0 \nu_\tau$		$(5.05 \pm 0.32) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{76}$	$h^- h^- h^+ 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(4.95 \pm 0.32) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{77}$	$h^- h^- h^+ 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0, \omega, \eta$ )	[a]	$(10 \pm 4) \times 10^{-4}$	

$\Gamma_{78}$	$h^- h^- h^+ 3 \pi^0 \nu_\tau$	[a]	$(2.3 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	S=1.2
$\Gamma_{79}$	$K^- h^+ h^- \geq 0$ neutrals $\nu_\tau$		$(6.35 \pm 0.24) \times 10^{-3}$	S=1.5
$\Gamma_{80}$	$K^- h^+ \pi^- \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(4.38 \pm 0.19) \times 10^{-3}$	S=2.6
$\Gamma_{81}$	$K^- h^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(8.7 \pm 1.2) \times 10^{-4}$	S=1.1
$\Gamma_{82}$	$K^- \pi^+ \pi^- \geq 0$ neutrals $\nu_\tau$		$(4.85 \pm 0.21) \times 10^{-3}$	S=1.4
$\Gamma_{83}$	$K^- \pi^+ \pi^- \geq 0 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(3.75 \pm 0.19) \times 10^{-3}$	S=1.4
$\Gamma_{84}$	$K^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$		$(3.49 \pm 0.16) \times 10^{-3}$	S=1.9
$\Gamma_{85}$	$K^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	[a]	$(2.94 \pm 0.15) \times 10^{-3}$	S=2.2
$\Gamma_{86}$	$K^- \rho^0 \nu_\tau \rightarrow$ $K^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$		$(1.4 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{87}$	$K^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$		$(1.35 \pm 0.14) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{88}$	$K^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )		$(8.1 \pm 1.2) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{89}$	$K^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0, \eta$ )	[a]	$(7.8 \pm 1.2) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{90}$	$K^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0, \omega$ )		$(3.7 \pm 0.9) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{91}$	$K^- \pi^+ K^- \geq 0$ neut. $\nu_\tau$		$< 9 \times 10^{-4}$	CL=95%
$\Gamma_{92}$	$K^- K^+ \pi^- \geq 0$ neut. $\nu_\tau$		$(1.50 \pm 0.06) \times 10^{-3}$	S=1.8
$\Gamma_{93}$	$K^- K^+ \pi^- \nu_\tau$	[a]	$(1.44 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	S=1.9
$\Gamma_{94}$	$K^- K^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$	[a]	$(6.1 \pm 2.5) \times 10^{-5}$	S=1.4
$\Gamma_{95}$	$K^- K^+ K^- \geq 0$ neut. $\nu_\tau$		$< 2.1 \times 10^{-3}$	CL=95%
$\Gamma_{96}$	$K^- K^+ K^- \nu_\tau$		$(3.52 \pm 0.21) \times 10^{-5}$	
$\Gamma_{97}$	$K^- K^+ K^- \nu_\tau$ (ex. $\phi$ )		$< 2.5 \times 10^{-6}$	CL=90%
$\Gamma_{98}$	$K^- K^+ K^- \pi^0 \nu_\tau$		$< 4.8 \times 10^{-6}$	CL=90%
$\Gamma_{99}$	$\pi^- K^+ \pi^- \geq 0$ neut. $\nu_\tau$		$< 2.5 \times 10^{-3}$	CL=95%
$\Gamma_{100}$	$e^- e^- e^+ \bar{\nu}_e \nu_\tau$		$(2.8 \pm 1.5) \times 10^{-5}$	
$\Gamma_{101}$	$\mu^- e^- e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$		$< 3.6 \times 10^{-5}$	CL=90%

### Modes with five charged particles

$\Gamma_{102}$	$3h^- 2h^+ \geq 0$ neutrals $\nu_\tau$ (ex. $K_S^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ ) ("5-prong")		$(1.02 \pm 0.04) \times 10^{-3}$	S=1.1
$\Gamma_{103}$	$3h^- 2h^+ \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	[a]	$(8.39 \pm 0.35) \times 10^{-4}$	S=1.1
$\Gamma_{104}$	$3h^- 2h^+ \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	[a]	$(1.78 \pm 0.27) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{105}$	$3h^- 2h^+ 2 \pi^0 \nu_\tau$		$< 3.4 \times 10^{-6}$	CL=90%

### Miscellaneous other allowed modes

$\Gamma_{106}$	$(5\pi)^- \nu_\tau$		$(7.6 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{107}$	$4h^- 3h^+ \geq 0$ neutrals $\nu_\tau$ ("7-prong")		$< 3.0 \times 10^{-7}$	CL=90%
$\Gamma_{108}$	$4h^- 3h^+ \nu_\tau$		$< 4.3 \times 10^{-7}$	CL=90%
$\Gamma_{109}$	$4h^- 3h^+ \pi^0 \nu_\tau$		$< 2.5 \times 10^{-7}$	CL=90%
$\Gamma_{110}$	$X^-(S=-1) \nu_\tau$		$(2.86 \pm 0.07) \%$	S=1.3
$\Gamma_{111}$	$K^*(892)^- \geq 0$ neutrals $\geq$ $0 K_L^0 \nu_\tau$		$(1.42 \pm 0.18) \%$	S=1.4
$\Gamma_{112}$	$K^*(892)^- \nu_\tau$		$(1.20 \pm 0.07) \%$	S=1.8
$\Gamma_{113}$	$K^*(892)^- \nu_\tau \rightarrow \pi^- \bar{K}^0 \nu_\tau$		$(7.8 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	



# Le famiglie fermioniche

u	c	
d	s	b

1964

1974

1975

1977

e	$\mu$	$\tau$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	

**LEP :**  
le famiglie di neutrini  
“leggeri” sono 3

# Le famiglie fermioniche

u	c	t
d	s	b

e	$\mu$	$\tau$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	

1964

1974

1975

1977

1995

# Le famiglie fermioniche

u	c	t
d	s	b

e	$\mu$	$\tau$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$

1964

1974

1975

1977

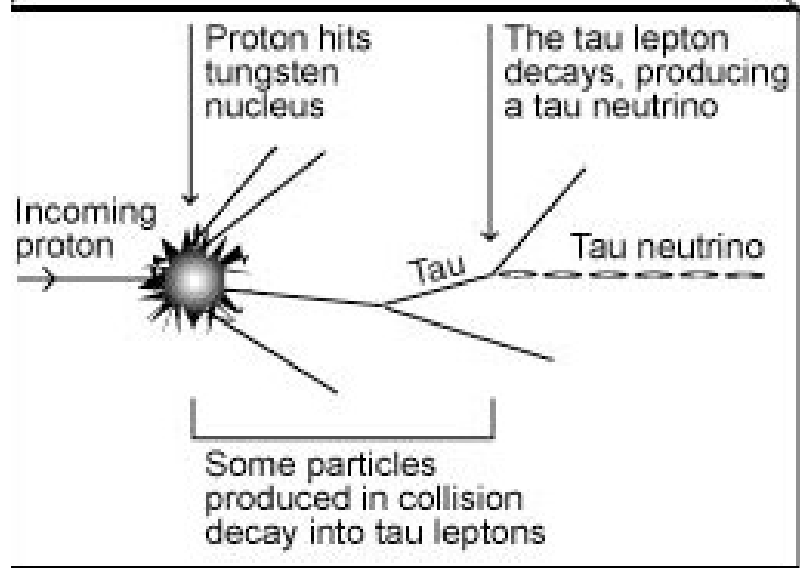
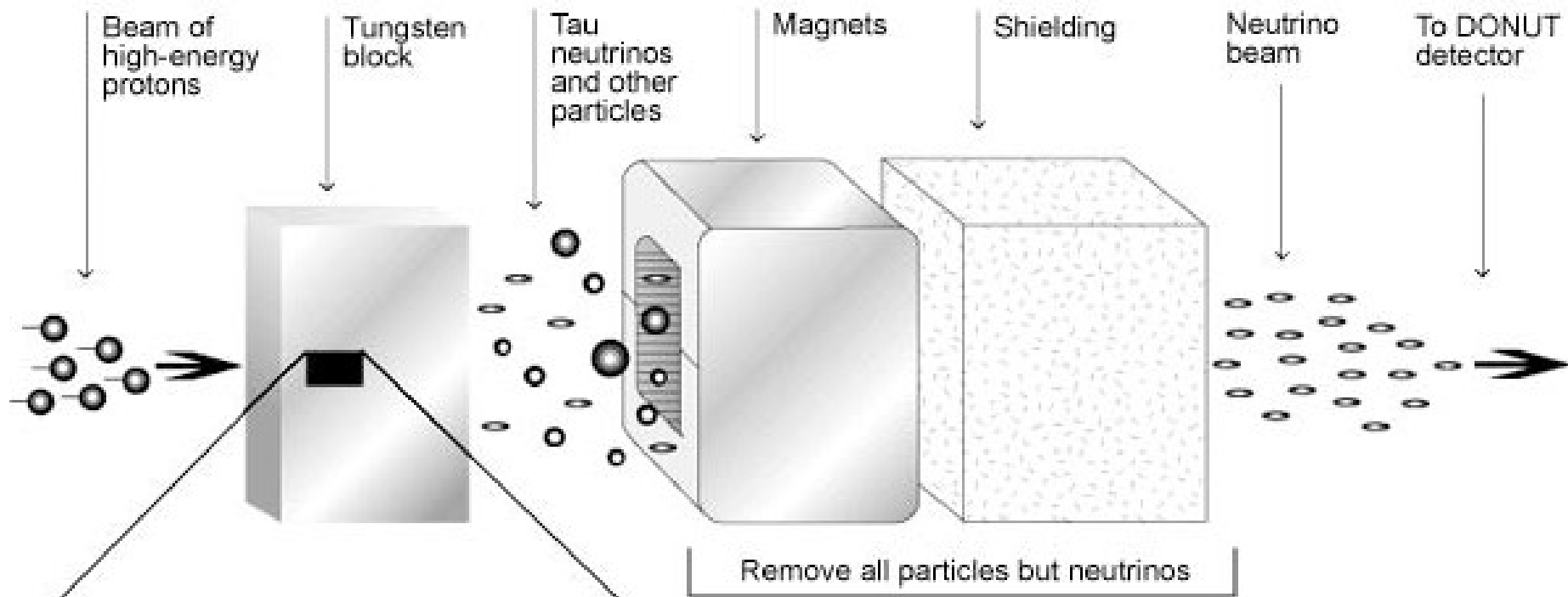
1995

2000

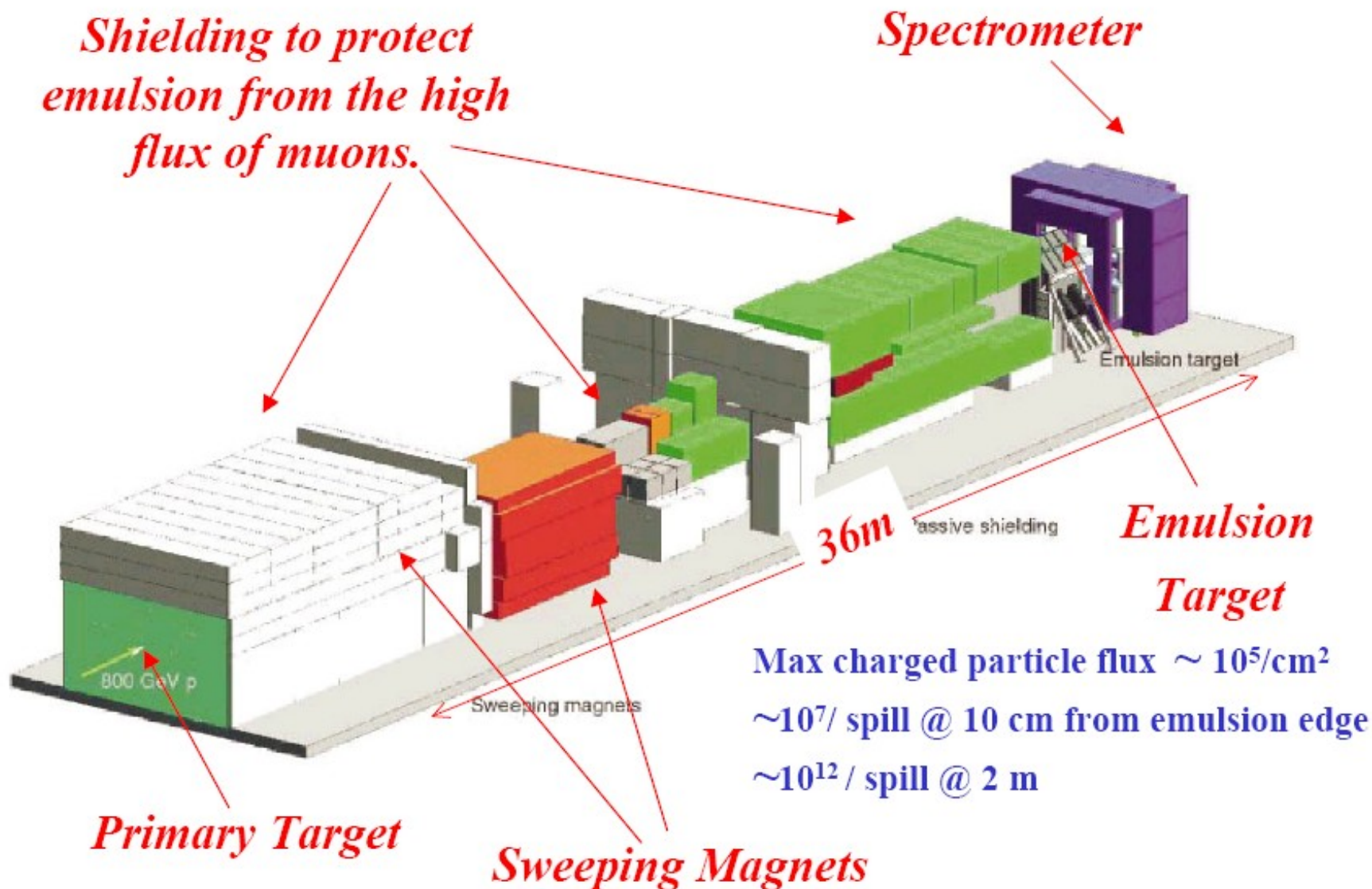
# DONUT: scoperta del neutrino tau

- Dove cercare il neutrino tau?
- Un fascio di neutrini di alta energia può contenere neutrini del tau se l'energia dei protoni primari è sufficiente a produrre il mesone  $D_s$ , che può decadere nel tau e nel suo neutrino (il tau ha una massa di 1777 MeV, il  $D_s$  di 1968 MeV)
- Il fascio a banda larga del CERN, usato da NOMAD e CHORUS, aveva una "contaminazione" di  $10^{-7}$
- Il fascio usato da DONUT è prodotto in interazioni di protoni da 800 GeV, non c'è "tunnel di decadimento" in modo da assorbire subito i mesoni leggeri e osservare solo i neutrini di decadimento dei mesoni pesanti. Si ottiene così un fascio con 10% di neutrini tau e una popolazione simmetrica di neutrini elettronici e muonici

Ovvero si sfrutta la grande differenza di vita media tra pioni ( $2.6 \times 10^{-8}$  s), kaoni ( $1.2 \times 10^{-8}$  s) e  $D_s$  ( $5 \times 10^{-13}$  s)

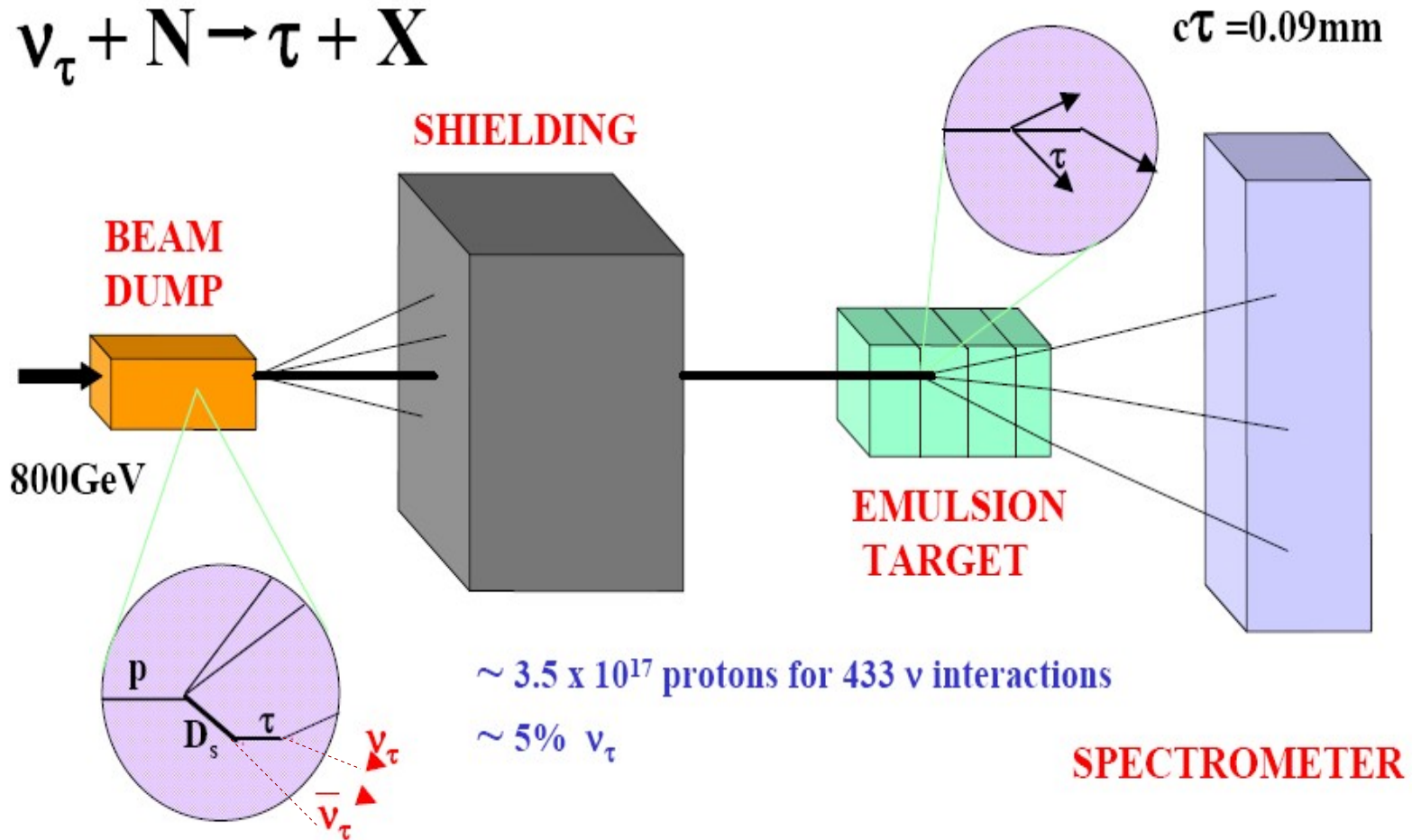
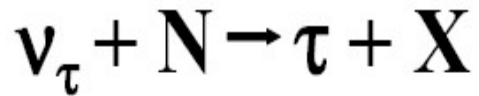


# Experimental Setup - Purify the Neutrino Beam

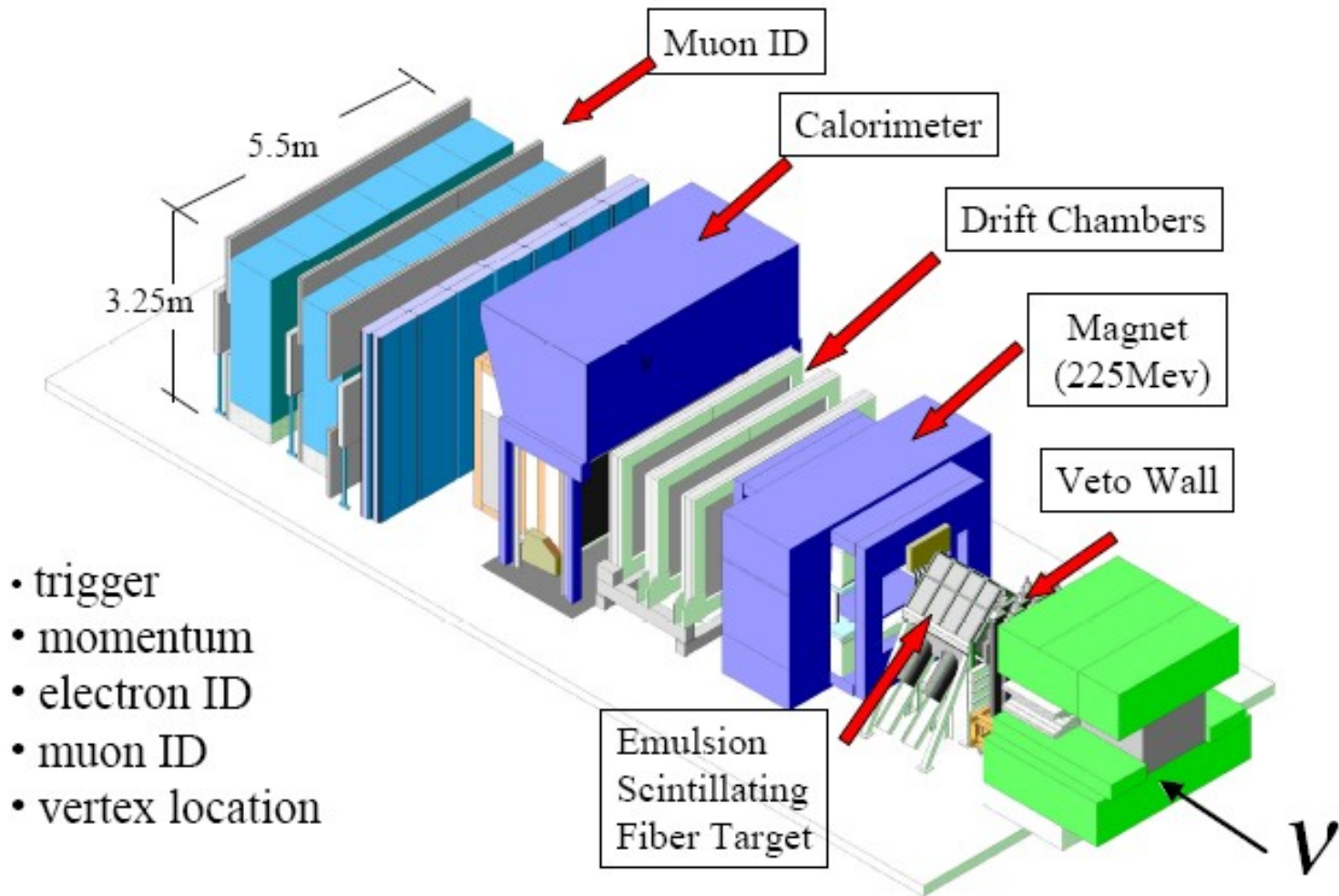


# Experimental Setup – Block Diagram

directly observe cc interactions of the  $\nu_\tau$



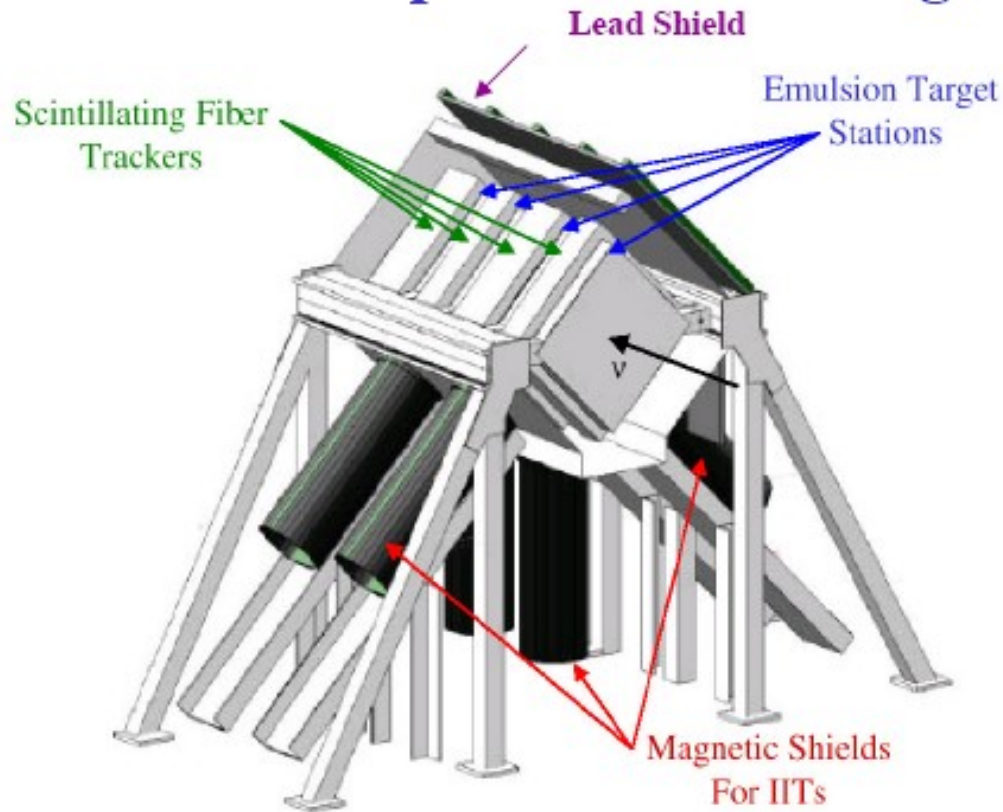
# Experimental Setup - Spectrometer



- trigger
- momentum
- electron ID
- muon ID
- vertex location



# Experimental Setup - Emulsion Target Stand



**260 kg total mass**

***500 $\mu$  Scintillating Fibers***  
***Image Intensifier - CCD Readout.***

# Experimental Setup - Emulsion Target Designs

Emulsion modules consist stacks of sheets made of **emulsion**, **acrylic**, and steel.  
Three configurations were used.

BULK

ECC 800

ECC 200

0.32 mm  
0.08 mm

1.0 mm

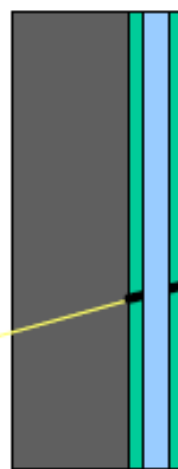
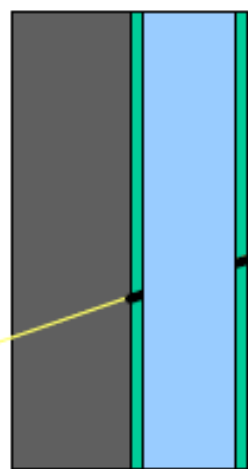
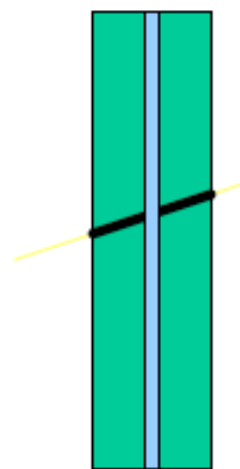
0.10 mm  
0.80 mm

1.0 mm

0.10 mm  
0.20 mm

Stainless Steel

Emulsion  
Acrylic



- **AgBr** suspended in a gel (Fuji ET7C) coated on plastic sheets.
- $29 \pm 2$  grains per  $100 \mu\text{m}$  for minimum ionizing track

95% emulsion

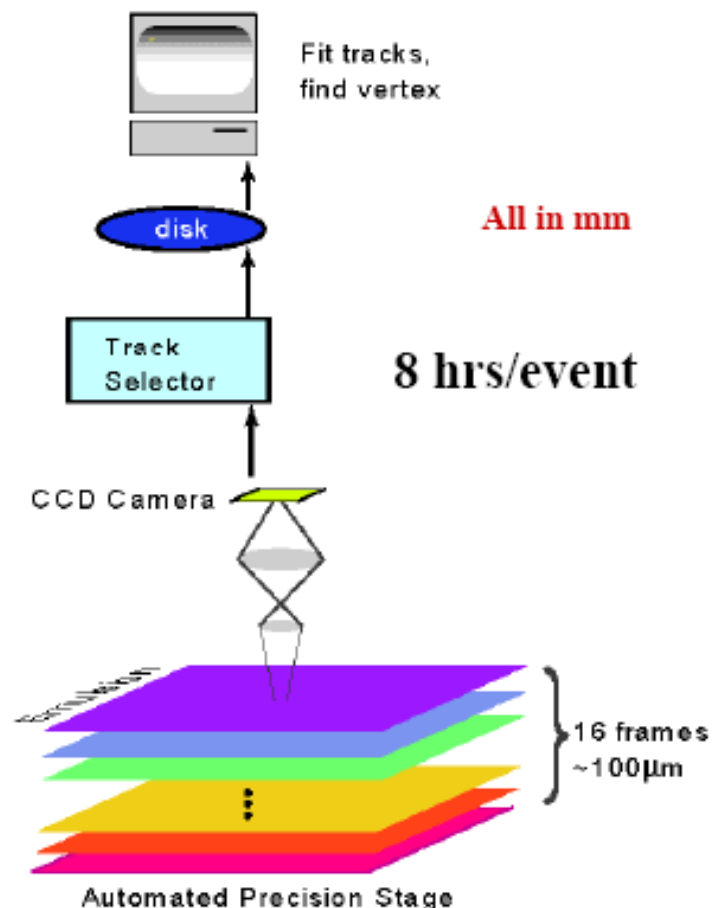
5% emulsion

Resolution  
Spatial Resolution:  $.3 \mu\text{m}$

## Data Analysis – Overview of Analysis

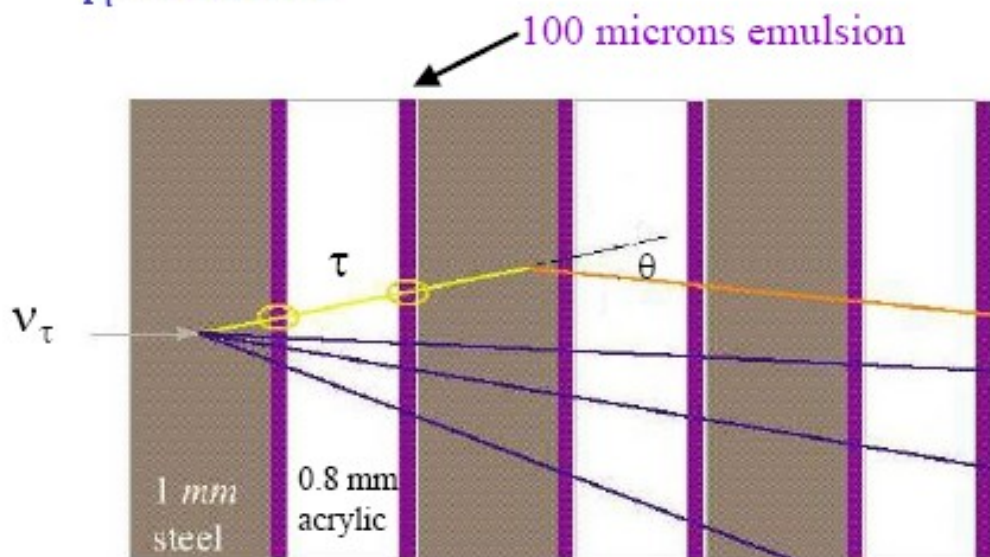
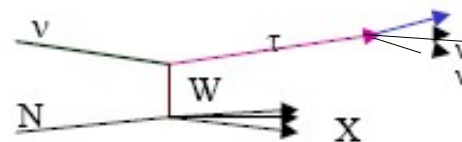
- **Predict interaction point from spectrometer tracks** (software + humans)
  - **Fermilab/Minnesota/Pittsburgh/Athens**
- **Search emulsion around predicted interaction and digitize track segments** (hardware processor)
  - **Nagoya**
- **Find interaction events** (software pattern recognition)
  - **Nagoya**
  - **Minnesota/Fermilab/Athens**
- **Find  $V_\tau$  interactions** (software pattern recognition)
  - **Nagoya**
  - **Minnesota/Fermilab/Athens**

Scanning method getting better because electronics are getting better ~100 times faster



## Data Analysis – Finding $\nu_\tau$ Interactions

- **No  $e, \mu$  from primary vertex**
- **At least one segment on parent**  
76% of  $\tau$ 's have visible track
- **Decay with one or three charged products**  
85% of decays are single charge
- **Minimum  $p_t$**   
 $p_t > 250 \text{ MeV}/c$

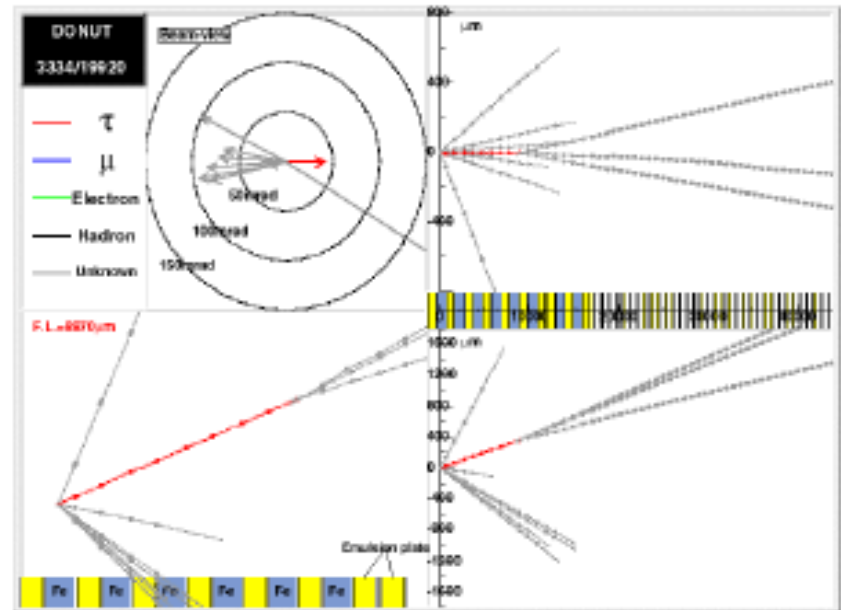
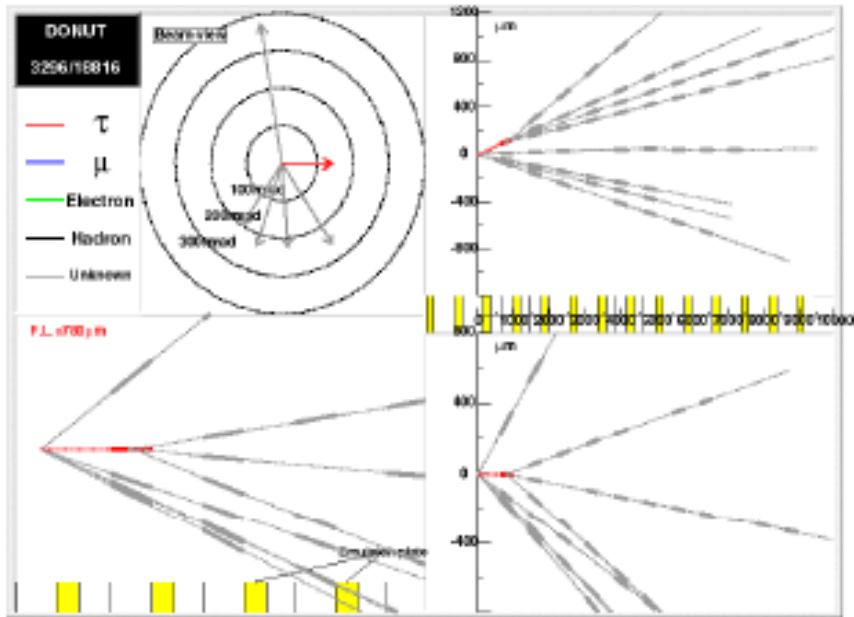


Single Prong

- **Short decay length**  
length  $< 10 \text{ mm}$  (mean 2.5 mm)
- **Small production angle**  
angle  $< 200 \text{ mr}$  (mean 40 mr)

# 9

## Results $\nu_\tau$ Candidates



Final analysis: 9 with an estimated background of 1.5 events, from a total of 578 observed neutrino interactions

# DONUT

- PHYSICAL REVIEW D 78, 052002 (2008)
- <http://www-donut.fnal.gov/>
- <http://www.hep.umn.edu/e872/presentations/HepSem.pdf>

# Misura diretta della massa dei $\nu_e$

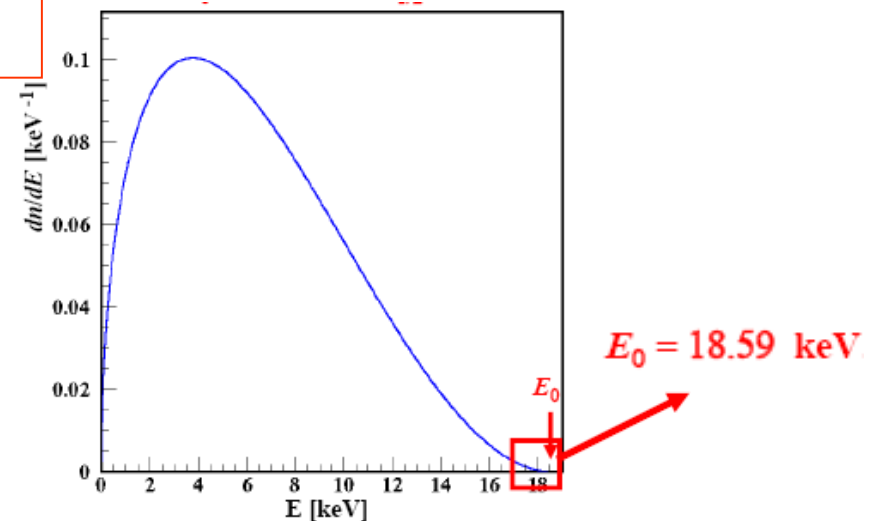
- Si misura lo spettro degli elettroni da decadimento  $\beta^-$  e se ne studia l'end-point
- Si sceglie il trizio perché è il nucleo più leggero (meno complesso)

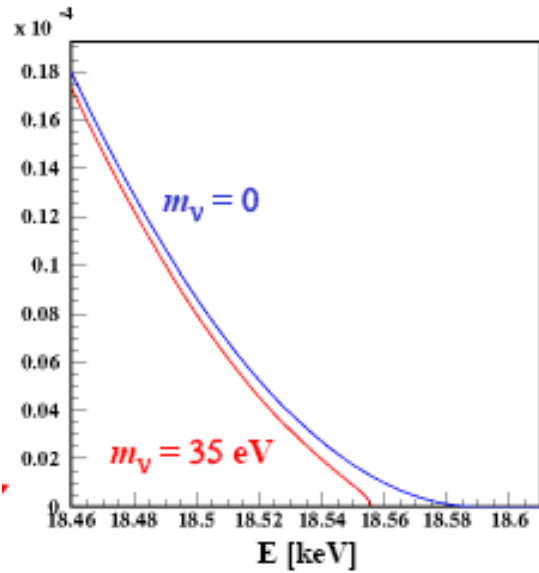


$$\tau_{1/2} = 12.33 \text{ anni}$$

$$\frac{dn}{dE} \propto F(Z, E) p(E + m_e) (E_0 - E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_\nu^2}$$

$F(Z, E)$ : correzione Coulombiana calcolabile  
 $p$ : impulso dell'elettrone  
 $E$ : energia cinetica dell'elettrone  
 $E_0$ : energia massima ("end point")

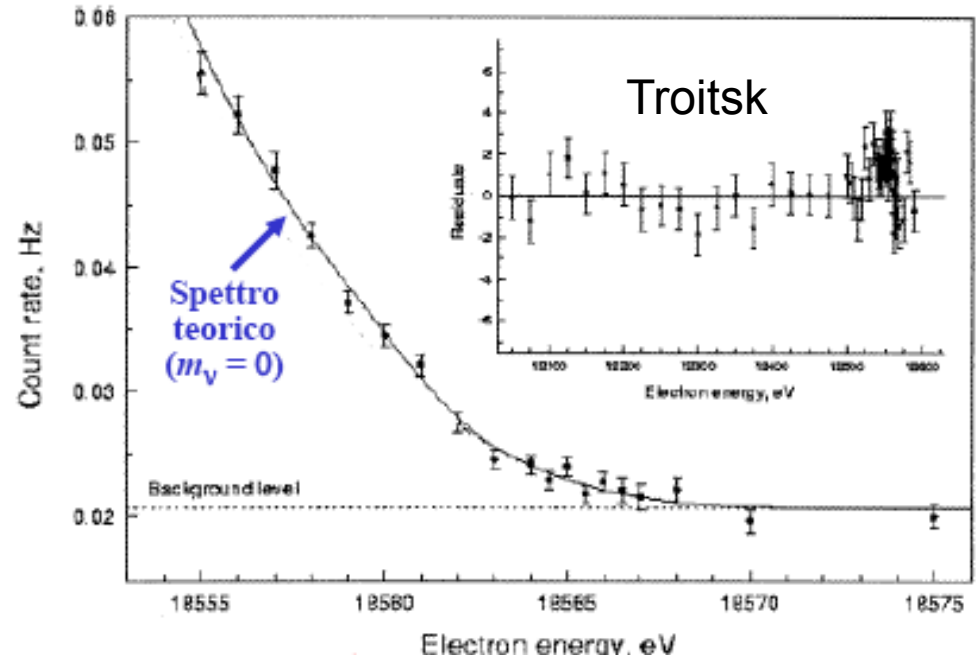




- Esperimento concettualmente semplice ma di difficile realizzazione:
  - Statistica bassa in prossimità dell'endpoint
  - Necessità di usare una sorgente intensa e al tempo stesso trasparente agli elettroni (→ gas o strati sottili)
  - Spettrometro magnetico con grande apertura angolare e ottima risoluzione energetica



Katrin





# Dal sito di TROITSK

Год	Масса
1994	$m_{\nu}^2 = -2.7 \pm 10.1(\text{fit}) \pm 4.9 (\text{syst}), eV^2/c^4$
1996	$m_{\nu}^2 = +0.5 \pm 7.1(\text{fit}) \pm 2.5 (\text{syst}), eV^2/c^4$
1997	1 $m_{\nu}^2 = -8.6 \pm 7.6(\text{fit}) \pm 2.5 (\text{syst}), eV^2/c^4$
	2 $m_{\nu}^2 = -3.2 \pm 4.8(\text{fit}) \pm 1.5 (\text{syst}), eV^2/c^4$
1998	$m_{\nu}^2 = -0.6 \pm 8.1(\text{fit}) \pm 2.0 (\text{syst}), eV^2/c^4$
1999	$m_{\nu}^2 = +1.6 \pm 5.6(\text{fit}) \pm 2.0 (\text{syst}), eV^2/c^4$
2001	1 $m_{\nu}^2 = -5.5 \pm 6.5(\text{fit}) \pm 2.0 (\text{syst}), eV^2/c^4$
	2 $m_{\nu}^2 = -5.2 \pm 6.7(\text{fit}) \pm 1.5 (\text{syst}), eV^2/c^4$
с 1994 по 2001	$m_{\nu}^2 = -2.3 \pm 2.5(\text{fit}) \pm 2.0 (\text{syst}), eV^2/c^4$
<p>Предел на масу нейтрино <math>m_{\nu} &lt; 2.05 eV/c^2</math> at 95% C.L.                      (Универсальный предел)</p>	

- Gli esperimenti misurano  $m^2$

## $\bar{\nu}$ MASS SQUARED (electron based)

Given troubling systematics which result in improbably negative estimators of  $m_{\nu_e}^{2(\text{eff})} \equiv \sum_i |U_{ei}|^2 m_{\nu_i}^2$ , in many experiments, we use only KRAUS 05 and LOBASHEV 99 for our average.

VALUE (eV <sup>2</sup> )	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
- 1.1± 2.4	OUR AVERAGE			
- 0.6± 2.2± 2.1		<sup>15</sup> KRAUS 05	SPEC	<sup>3</sup> H β decay
- 1.9± 3.4± 2.2		<sup>16</sup> LOBASHEV 99	SPEC	<sup>3</sup> H β decay

(Mainz e Troitsk rispettivamente)

## $\bar{\nu}$ MASS (electron based)

Those limits given below are for the square root of  $m_{\nu_e}^{2(\text{eff})} \equiv \sum_i |U_{ei}|^2 m_{\nu_i}^2$ . Limits that come from the kinematics of <sup>3</sup>Hβ<sup>-</sup> $\bar{\nu}$  decay are the square roots of the limits for  $m_{\nu_e}^{2(\text{eff})}$ . Obtained from the measurements reported in the Listings for "ν Mass Squared," below.

VALUE (eV)	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
< 2	OUR EVALUATION			
< 2.3	95	<sup>1</sup> KRAUS 05	SPEC	<sup>3</sup> H β decay
< 2.5	95	<sup>2</sup> LOBASHEV 99	SPEC	<sup>3</sup> H β decay

# Misura diretta della massa dei $\nu_\mu$

$$m_\nu^2 = m_\pi^2 + m_\mu^2 - 2m_\pi \sqrt{p_\mu^2 + m_\mu^2}$$

- Misurando l'impulso del muone nel decadimento del pione (in quiete)
- Utilizzando misure molto precise delle masse di pione e muone provenienti da
  - Energia di transizioni in atomi pi mesici
  - Momento magnetico + rapporto giromagnetico del muone

$$m_\pi = 139.57018 \pm \underline{0.00035} \text{ MeV} \leftarrow$$

$$m_\mu = 105.658357 \pm 0.000005 \text{ MeV} \leftarrow$$

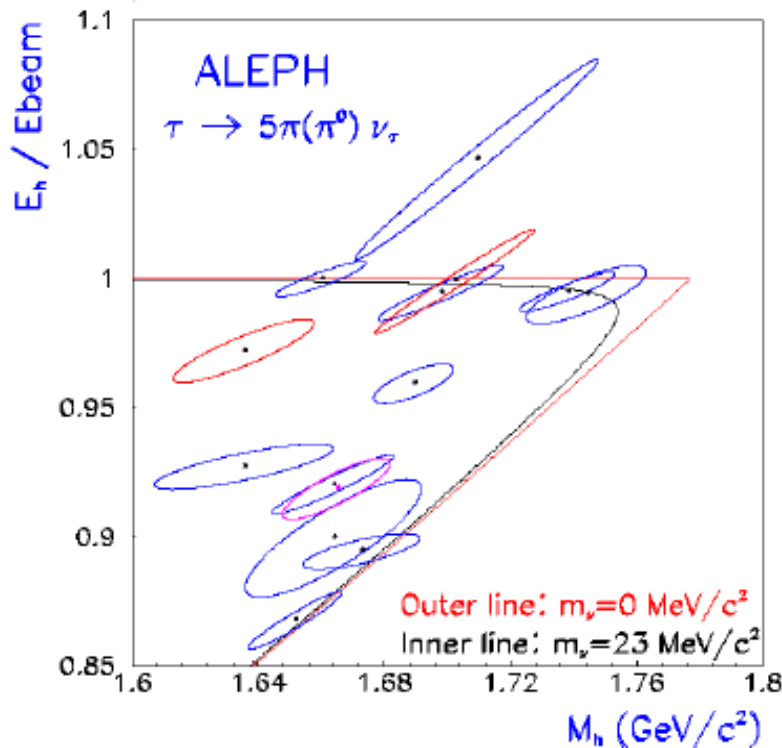
$$p_\mu = 29.79200 \pm 0.00011 \text{ MeV (misurato)}$$

$$m_\nu^2 = -0.001 \pm 0.022 \text{ MeV}^2$$

$$m_\nu < 0.19 \text{ MeV (livello di confidenza 90\%)}$$

# Misura diretta della massa dei $\nu_\tau$

- Studio degli eventi  $e^+e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$  a LEP (ALEPH)
- Selezione di eventi con un  $\tau$  che decade in 1 prong (identificando così l'evento) e l'altro in più prong  $\rightarrow$  almeno 4 carichi nello stato finale



$$E_h = \sum E_\pi$$

$$\vec{p}_h = \sum \vec{p}_\pi$$

$$M_h^2 = E_h^2 - |\vec{p}_h|^2$$

$$m(\nu_\tau) < 18.2 \text{ MeV}$$

livello di confidenza 95%)

## SUM OF THE NEUTRINO MASSES, $m_{\text{tot}}$

(Defined in the above note), of effectively stable neutrinos (i.e., those with mean lives greater than or equal to the age of the universe). These papers assumed Dirac neutrinos. When necessary, we have generalized the results reported so they apply to  $m_{\text{tot}}$ . For other limits, see SZALAY 76, VYSOTSKY 77, BERNSTEIN 81, FREESE 84, SCHRAMM 84, and COWSIK 85.

<u>VALUE (eV)</u>	<u>CL%</u>	<u>DOCUMENT ID</u>	<u>TECN</u>	<u>COMMENT</u>
● ● ● We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ● ● ●				
< 1.1		54 ICHIKI	09	COSM
< 1.3		55 KOMATSU	09	COSM WMAP
< 1.2		56 TERENO	09	COSM
< 0.33		57 VIKHLININ	09	COSM
< 0.28		58 BERNARDIS	08	COSM
< 0.17–2.3		59 FOGLI	07	COSM
< 0.42	95	60 KRISTIANSEN	07	COSM
< 0.63–2.2		61 ZUNCKEL	07	COSM
< 0.24	95	62 CIRELLI	06	COSM
< 0.62	95	63 HANNESTAD	06	COSM
< 1.2		64 SANCHEZ	06	COSM
< 0.17	95	62 SELJAK	06	COSM

$$\Omega_\nu h^2 = \frac{\sum m_\nu}{93 \text{ eV}},$$

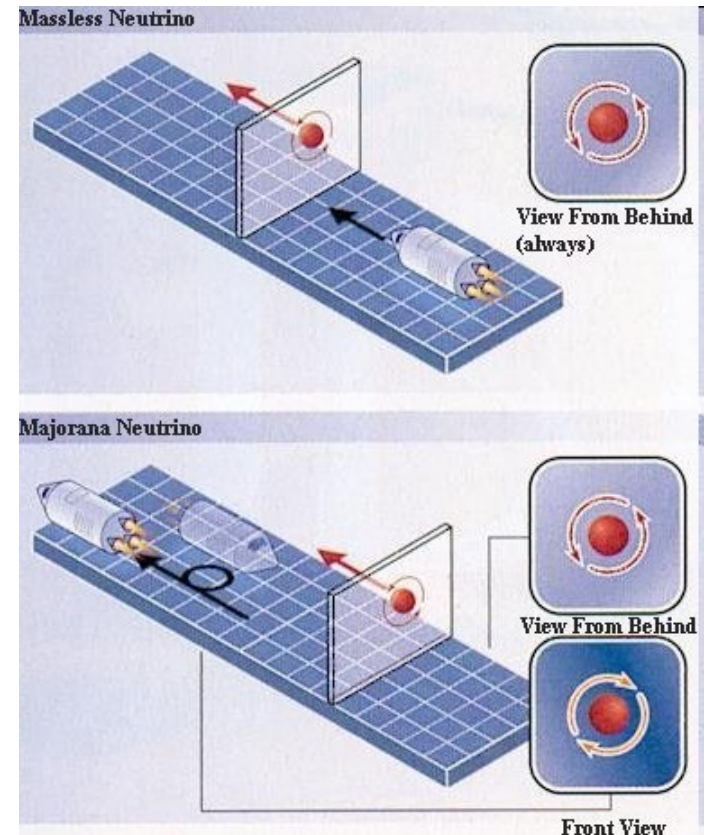
The Cosmic Microwave Background (CMB) data of the WMAP experiment, combined with supernovae data and data on galaxy clustering can be used to obtain an upper limit on the sum of neutrinos masses [118] (see review on Cosmological Parameters):  $\sum_j m_j \lesssim 0.68 \text{ eV}$ , 95% C.L. A more conservative estimate of the uncertainties in the astrophysical data leads to a somewhat weaker constraint (see *e.g.*, Ref. 119):  $\sum_j m_j \lesssim 1.7 \text{ eV}$ , 95% C.L.

# Neutrino di Majorana

- Neutrino a due componenti, perché?
  - Massa nulla + interazione debole solo per particelle levogire, la soluzione più facile adottata per lungo tempo
  - Massa non nulla, 4 componenti, neutrino di Dirac:

$$-m_D (\bar{\nu}_L \nu_R + \bar{\nu}_R \nu_L)$$

- Massa non nulla ma 2 sole componenti, neutrino di Majorana! Neutrino ed antineutrino sono i due stati di elicità della stessa particella  
 → il numero leptonico non è un buon numero quantico



$$-\frac{1}{2}m_M^L \left( \bar{\nu}_L (\nu_L)^c + \overline{(\nu_L)^c} (\nu_L) \right) - \frac{1}{2}m_M^R \left( \bar{\nu}_R (\nu_R)^c + \overline{(\nu_R)^c} (\nu_R) \right)$$

# See-saw

- Perché le masse dei neutrini sono così piccole?
- Il meccanismo See-Saw spiega in modo naturale questa gerarchia
- Se la Lagrangiana contiene termini di massa di entrambi i tipi può essere riscritta come

$$\mathcal{L}_{mass} = -\frac{1}{2} \left( \overline{\nu_L} \overline{(\nu_R)^c} \right) \mathcal{M} \begin{pmatrix} (\nu_L)^c \\ \nu_R \end{pmatrix} + h.c.$$

- Introducendo la matrice
- Qualora le masse fossero molto diverse e si avesse ad esempio  $\mu$  molto piccolo o nullo

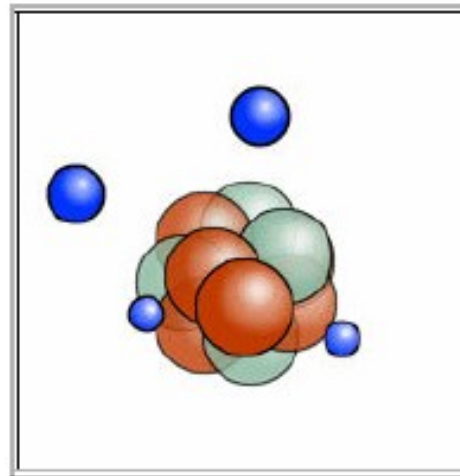
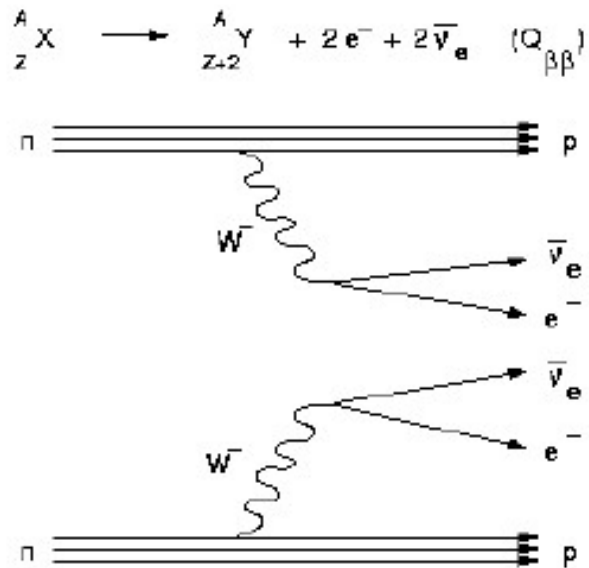
$$m_M^R = M \gg m_D \gg m_M^L = \mu$$

- La diagonalizzazione della matrice porterebbe ad avere alcune particelle molto leggere ed altre molto pesanti
- Nel modello più semplice

$$\frac{m_{D1}^2}{M_1}, \frac{m_{D2}^2}{M_2}, \frac{m_{D3}^2}{M_3}, M_1, M_2, M_3$$

# Doppio decadimento beta

- Alcuni nuclei possono decadere mediante due transizioni  $\beta$  simultanee con conseguente emissione di due elettroni e due antineutrini (o di due positroni e due neutrini)
- Trattandosi di un processo debole di ordine superiore questo è osservabile solo quando altre transizioni non siano possibili
- Si tratta comunque di un processo molto raro ed è stato osservato solo in una frazione dei nuclei per i quali è previsto teoricamente



## Doppio decadimento $\beta$ "convenzionale" (numero leptonico conservato):



misurato in diversi esperimenti. (Articolo di rassegna: Elliott & Vogel, hep-ph/0202264 v1)

**IGEX** (8 cristalli di Germanio, arricchiti in  $^{76}\text{Ge}$ )

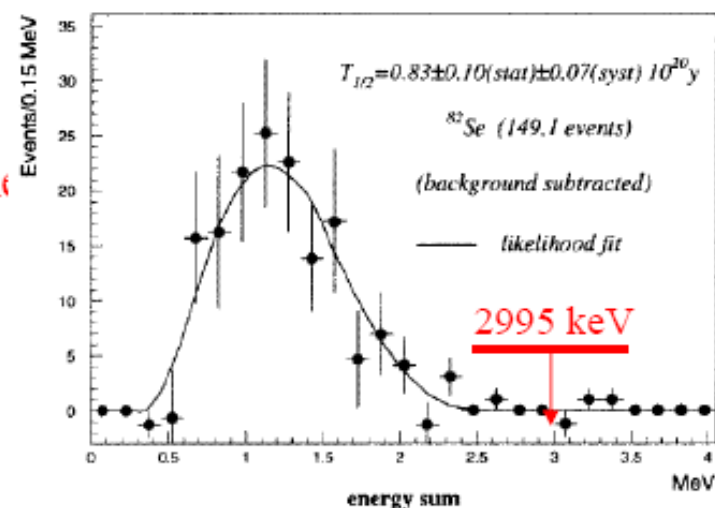
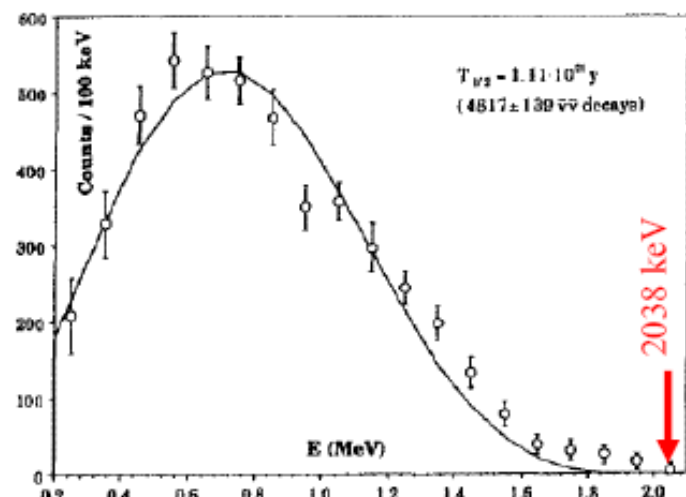
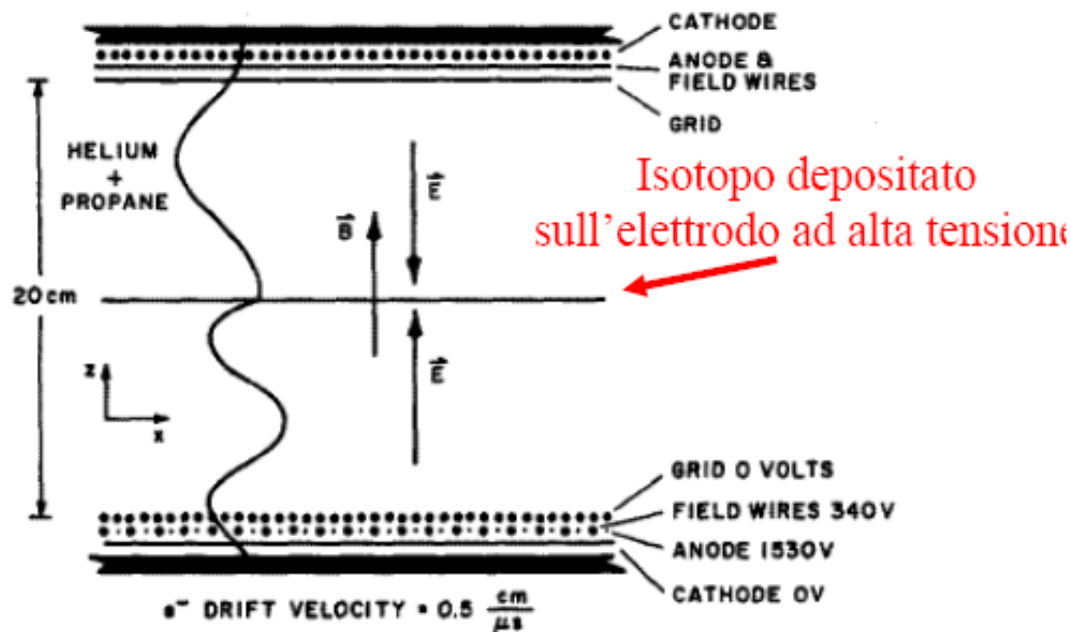
Esposizione di 1.8 kg x anno  $\Rightarrow 4817 \pm 139$  eventi



$\tau_{1/2} = (1.3 \pm 0.1) \times 10^{21}$  anni

## Rivelazione delle tracce dei due elettroni

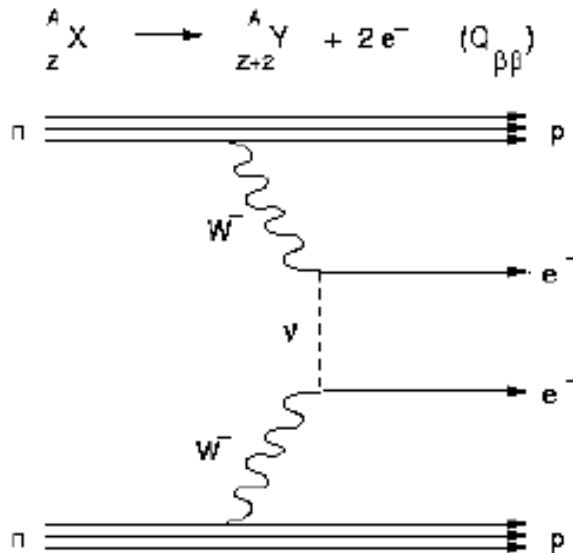
Esempio: camera a proiezione temporale (TPC)





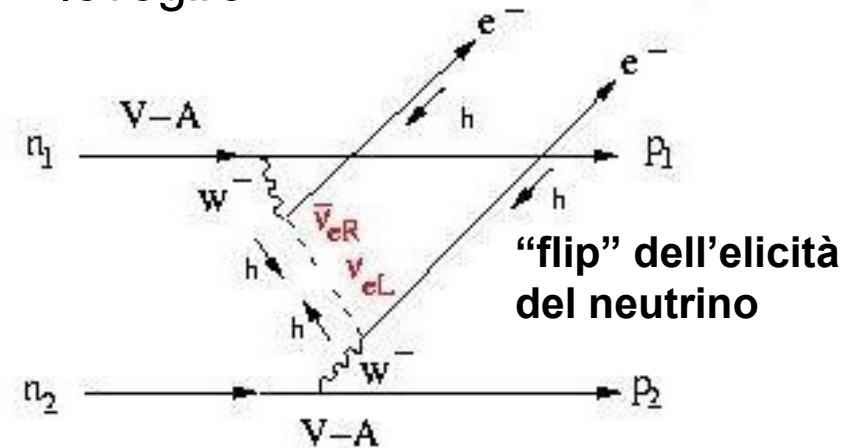
# Neutrinoless double $\beta$ decay

- Qualora i neutrini fossero particelle di Majorana con massa non nulla dovrebbe poter aver luogo il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini

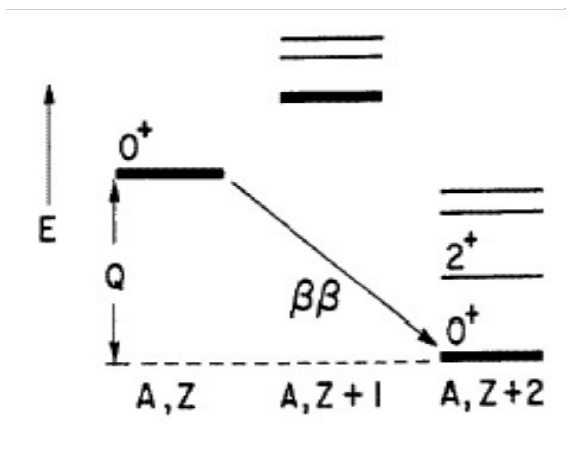


Violazione di 2 unita' del numero leptonico!

- Questo processo richiede che un antineutrino destrogiro emesso da un vertice debole venga assorbito in un altro dove, nel caso di particelle di Dirac, ci saremmo aspettati venisse assorbito un neutrino levogiro



- Si tratta dell'unico processo che possa distinguere tra neutrini di Dirac e di Majorana
- L'ampiezza di transizione è proporzionale alla massa del neutrino e alla costante di Fermi al quadrato, quindi la probabilità di transizione va come la massa efficace del neutrino di Majorana al quadrato (può essere una combinazione lineare delle masse di più neutrini)
- Si deve scegliere un nucleo per il quale non si abbiano processi concorrenti che possano costituire un fondo, ed in particolare per il quale il decadimento  $\beta$  ordinario sia proibito per motivi energetici



**L'estrazione della massa efficace (o di un limite su essa) richiede che si conoscano gli elementi di matrice nucleari per la transizione in esame. Questi si possono calcolare dai modelli nucleari e possono essere misurati nel decadimento  $\beta\beta$  con neutrini dello stesso nucleo.**

**Table 1.** Results on two neutrino DBD

Nucleus	%	$Q_{\beta\beta}(\text{keV})$	$T_{1/2}^{2\nu}(\text{measured})(y)$	$T_{1/2}^{2\nu}(\text{calculated})(y)$
$^{48}\text{Ca}$	0.19	4271	$4.2_{-1.0}^{+2.1} \times 10^{19}$	$6 \times 10^{18} - 5 \times 10^{20}$
$^{76}\text{Ge}$	7.8	2039	$1.42_{-.07}^{+.09} \times 10^{21}$	$7 \times 10^{19} - 6 \times 10^{22}$
$^{82}\text{Se}$	9.2	2995	$(.9 \pm .1 \times 10^{23})$	$3 \times 10^{18} - 6 \times 10^{21}$
$^{96}\text{Zr}$	2.8	3350	$4.2_{-1.0}^{+2.1} \times 10^{19}$	$3 \times 10^{17} - 6 \times 10^{20}$
$^{100}\text{Mo}$	9.6	2995	$(8 \pm .7 \times 10^{18})$	$1 \times 10^{17} - 2 \times 10^{22}$
$^{100}\text{Mo}(0^{+*})$	9.6	2995	$(6.8 \pm 1.2 \times 10^{20})$	$5 \times 10^{19} - 2 \times 10^{21}$
$^{116}\text{Cd}$	7.5	3034	$3.3_{-.3}^{+.4} \times 10^{19}$	$3 \times 10^{18} - 2 \times 10^{21}$
$^{128}\text{Te}$	34	867	$(2.5 \pm .4 \times 10^{24})$	$9 \times 10^{22} - 3 \times 10^{25}$
$^{130}\text{Te}$	33.8	2530	$(.9 \pm .15 \times 10^{21})$	$.2 \times 10^{19} - 7 \times 10^{20}$
$^{150}\text{Nd}$	5.6	3367	$(7 \pm 1.7 \times 10^{18})$	$6 \times 10^{16} - 4 \times 10^{20}$
$^{238}\text{U}$	99.3	1145	$(2.0 \pm .6 \times 10^{21})$	$1.2 \times 10^{19}$

**Da notare che si tratta di processi rari (vita media molto lunga) e quindi di misure sperimentali difficilissime!**

# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$

- Segnatura sperimentale: la somma delle energie degli elettroni emessi deve essere una costante
- Due metodi
  - Sorgente e rivelatore coincidono: il rivelatore, di tipo calorimetrico, contiene il nuclide da studiare
  - Sorgente (in strati sottili) e rivelatore sono separati

Table 2. Results on neutrinoless DBD

Nucleus	Experiment	%	$Q_{\beta\beta}$ (keV)	Technique	$T_{0\nu}$ (y)	$ m_{0\nu} $ (eV)
$^{48}\text{Ca}$	Elegant IV	0.19	4271	Scintillator	$> 1.4 \times 10^{22}$	7-45
$^{76}\text{Ge}$	Heidelberg-Moscow	7.8	2039	Ionization	$> 1.9 \times 10^{25}$	.12-1
$^{76}\text{Ge}$	IGEX	"	"	"	$> 1.6 \times 10^{25}$	.14-1.2
$^{76}\text{Ge}$	Klapdor et al	"	"	"	$1.2 \times 10^{25}$	.44
$^{82}\text{Se}$	NEMO 3	9.2	2995	Tracking	$> 1 \times 10^{23}$	1.8-4.9
$^{100}\text{Mo}$	NEMO 3	"	"	"	$> 4.6 \times 10^{23}$	.7-2.8
$^{116}\text{Cd}$	Solotvina	7.5	3034	Scintillator	$> 1.7 \times 10^{23}$	1.7-?
$^{128}\text{Te}$	Bernatovitz	34	867	Geochemical	$> 7.7 \times 10^{24}$	.1-4
$^{130}\text{Te}$	CUORICINO	33.8	2530	Bolometric	$> 2 \times 10^{24}$	.2-1.0
$^{136}\text{Xe}$	DAMA	8.9	2476	Scintillator	$> 1.2 \times 10^{24}$	1.1-2.9
$^{150}\text{Nd}$	Irvine	5.6	3367	Tracking	$> 1.2 \times 10^{21}$	3-?

Un metodo per ricercare il decadimento  $\beta\beta 0\nu$  (E. Fiorini, 1967)



### Esperimento Heidelberg-Mosca:

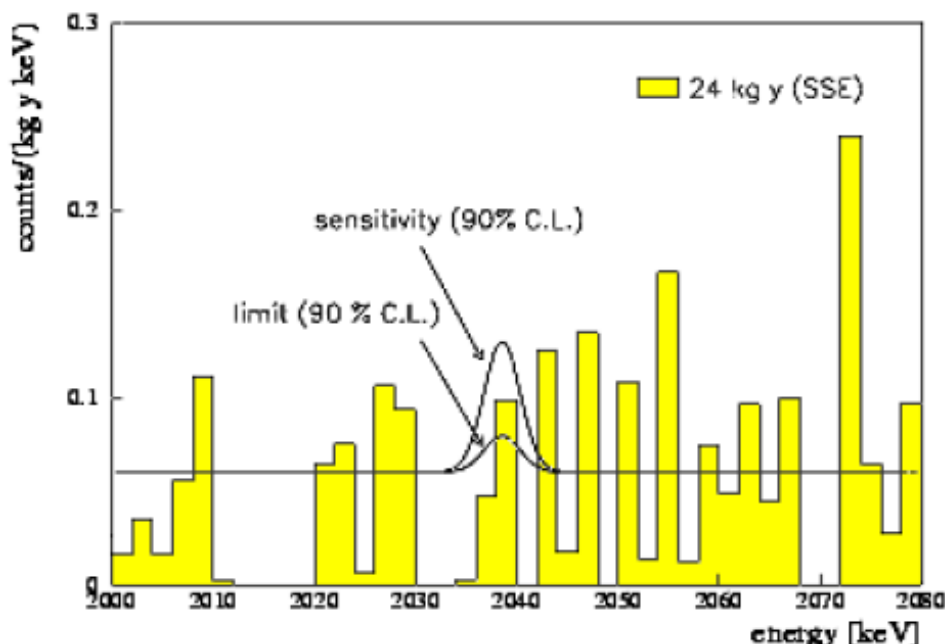
5 cristalli di Germanio arricchiti in  ${}^{76}\text{Ge}$  (rivelatori a stato solido)

Massa totale: 19.96 kg, 86%  ${}^{76}\text{Ge}$  ( ${}^{76}\text{Ge}$  contenuto nel Germanio naturale:  $\sim 7.7\%$ )

I cristalli sono circondati da contatori in anticoincidenza e installati nel laboratorio sotterraneo del Gran Sasso (ambiente a bassissimo rumore di fondo)

Ricerca di un segnale mono-energetico a 2038 keV (risoluzione in energia: 1 – 2 %)

### Risultati sperimentali da una esposizione di 24 kg x anno



**Nessuna evidenza  
di doppio decadimento  $\beta$   
senza emissione di neutrini**

**Assenza di segnale  
 $\Rightarrow$  limite sulla vita media del  ${}^{76}\text{Ge}$**

$$\tau_{1/2} > 5.7 \times 10^{25} \text{ anni}$$

**$\Rightarrow$  limite sulla massa del  $\nu_e$   
 $m(\nu_e) < 0.35 \text{ eV}$**

**se  $\nu_e$  è un neutrino di Majorana**

# NEMO3

Ricerca di doppio decadimento  $\beta$  senza emissione di neutrini  
nel laboratorio sotterraneo del Frejus



Rivelatore cilindrico in campo magnetico solenoidale  $B = 25$  Gauss diretto lungo la verticale

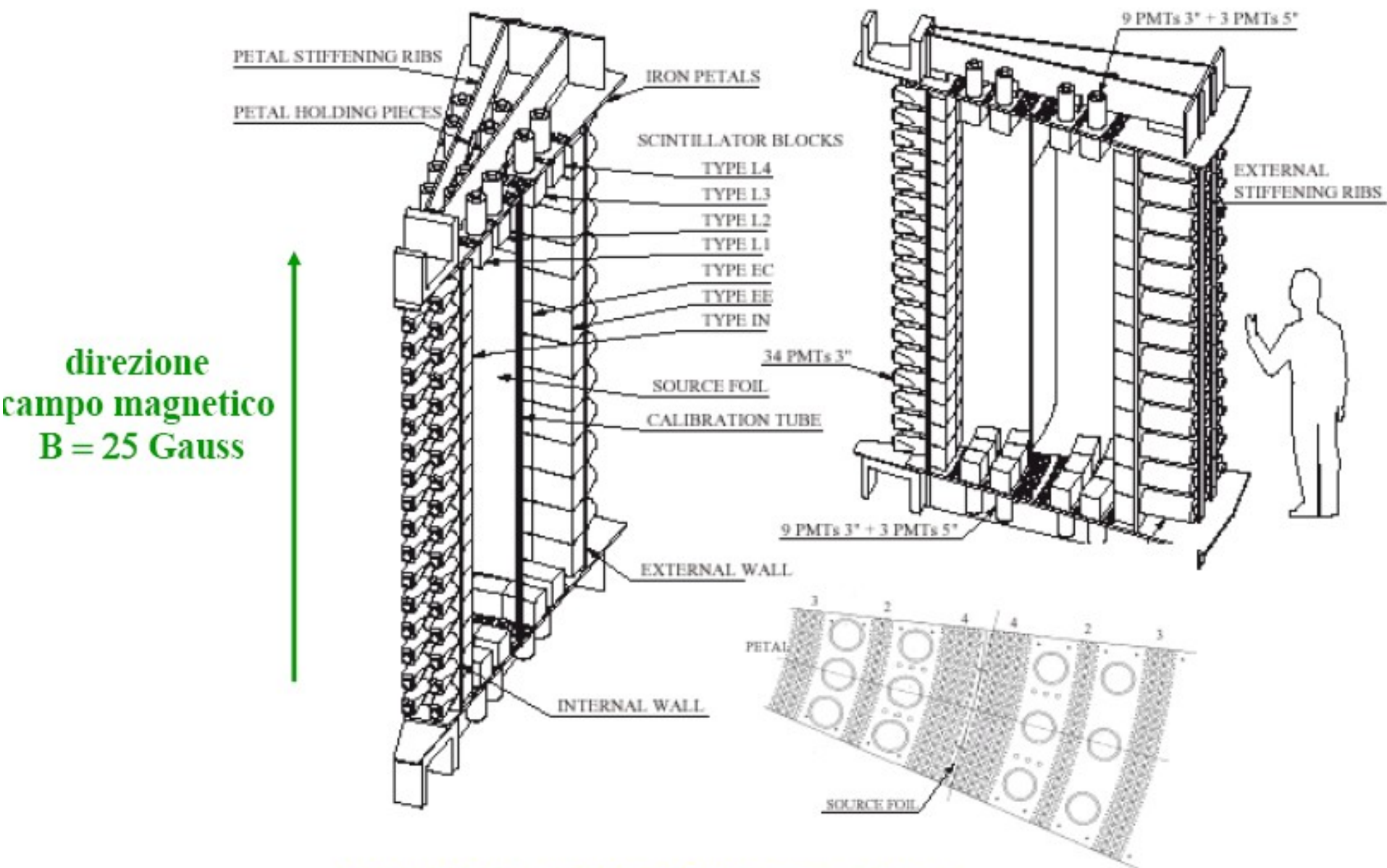
20 settori indipendenti con tracciatori a gas di bassa densità (principalmente  $\text{He}^4$ ) e scintillatori

Isotopo in esame depositato su fogli sottili nel mezzo di ciascun settore

Spessore del deposito:  $30 - 60 \text{ mg cm}^{-2}$

Isotopi studiati:

$\text{Mo}^{100}$ ,  $\text{Se}^{82}$ ,  $\text{Zr}^{96}$ ,  $\text{Cd}^{116}$ ,  $\text{Nd}^{150}$

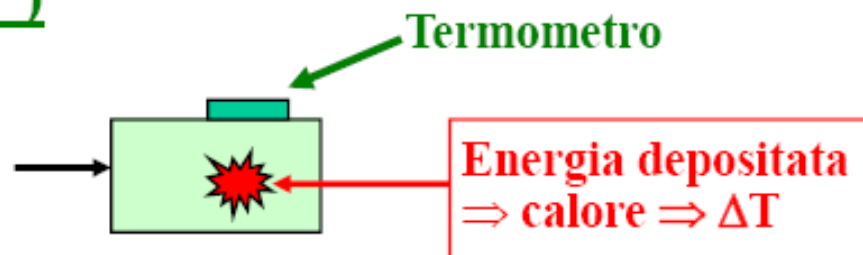


**NEMO3: dettagli di un settore**

# Rivelatori Criogenici (“Bolometri”)

## Principio di funzionamento:

Cristallo (Ge, TeO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaWO<sub>4</sub>, ...)  
raffreddato a  $12 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K} = 12 \text{ mK}$



Esempio: cristallo di TeO<sub>2</sub>, massa 0.76 kg

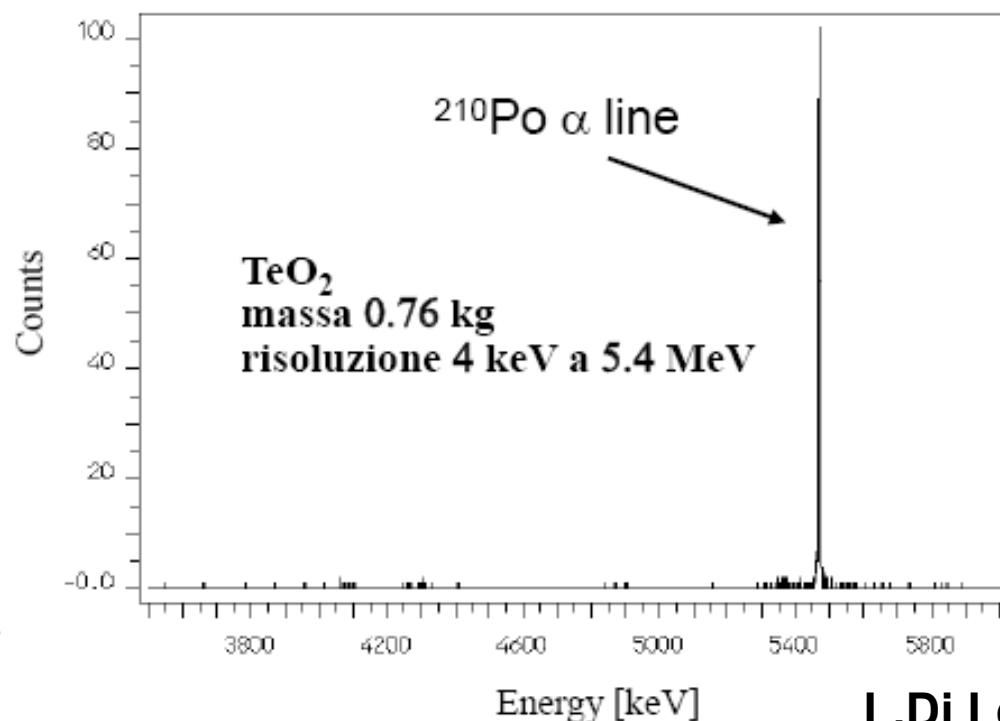
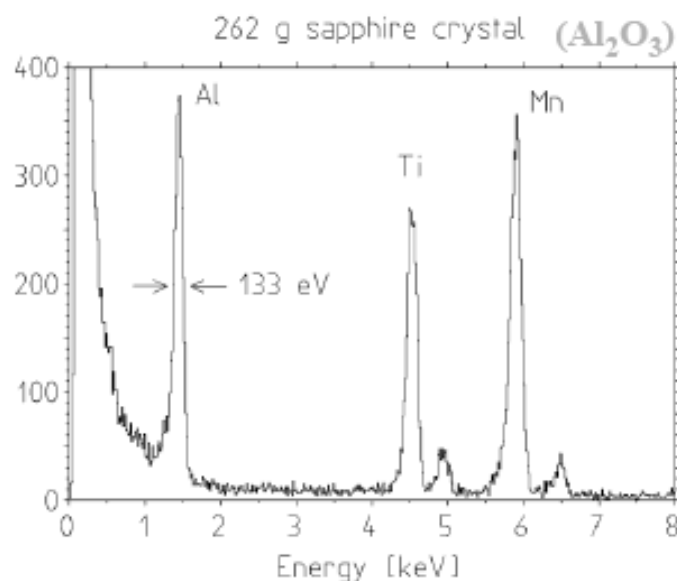
Capacità termica:  $C = \delta Q / dT \approx 1 \text{ MeV} / 0.1 \text{ mK}$  (per  $T \rightarrow 0$   $C \sim T^3$ )

Termometro: termistore al Ge,  $R = 100 \text{ M}\Omega$ ,  $dR/dT \approx 100 \text{ k}\Omega / \mu\text{K}$

Energia depositata  $E = 1 \text{ MeV} \rightarrow \Delta T = 100 \mu\text{K} \rightarrow \Delta R = 10 \text{ M}\Omega$

Tempo di risposta: qualche millisecondo

## Risoluzione in energia:



$\Delta T$  dipende solo da  $E$  e non dal tipo di particella (quenching factor = 1)



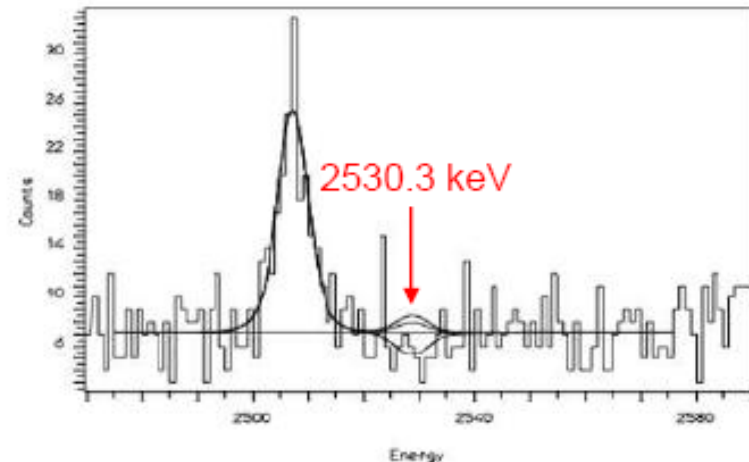
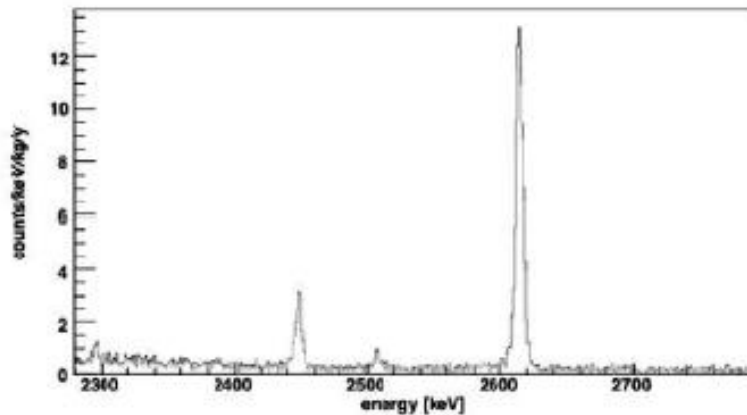
# 1<sup>a</sup> fase dell'esperimento CUORE presso i Laboratori del Gran Sasso (esperimento "CUORICINO")

44 cristalli di TeO<sub>2</sub> 5 x 5 x 5 cm<sup>3</sup> + 18 cristalli 3 x 3 x 6 cm<sup>3</sup> (massa 40.7 kg)



$$E(e_1) + E(e_2) = 2530.3 \pm 2.0 \text{ keV}$$

Risultati da un'esposizione di 11.83 kg · anno di <sup>130</sup>Te  
(pubblicati il 23.02.2008)



Origine del picco a 2505.68 keV: somma dei due fotoni (1173.21 + 1332.47 keV) dal decadimento  $\beta$  del <sup>60</sup>Co → <sup>60</sup>Ni\* → <sup>60</sup>Ni +  $\gamma$  +  $\gamma$ . (<sup>60</sup>Co prodotto da radiazione cosmica nella struttura meccanica in rame prima del trasporto al Gran Sasso)

Nessuna evidenza per doppio decadimento  $\beta$  senza emissione di neutrini:

$$\tau_{1/2}(^{130}\text{Te}) > 3.0 \times 10^{24} \text{ anni} \Rightarrow m(\nu_e) < \underbrace{0.38 - 0.46 \text{ eV}}$$

Incertezze teoriche  
sull'elemento di matrice nucleare

# Prossima generazione

**Table 3.** Second generation experiments on neutrinoless DBD

Experiment	Nucleu	%	$Q_{\beta\beta}$	$T_{0\nu}$ (y)	Technique	$ m_{0\nu} $ (meV)
CUORE	$^{130}\text{Te}$	34	2533	$1.8 \times 10^{27}$	Bolometric	9-57
GERDA	$^{76}\text{Ge}$	7.8	2039	$2 \times 10^{27}$	Ionization	29-94
Majorana	$^{76}\text{Ge}$	7.8	2039	$4 \times 10^{27}$	Ionization	21-67
GENIUS	$^{76}\text{Ge}$	7.8	2039	$1 \times 10^{28}$	Ionization	13-42
SuperNEMO	$^{82}\text{Se}$	8.7	2995	$2 \times 10^{26}$	Tracking	54-167
EXO	$^{136}\text{Xe}$	8.9	2476	$1.3 \times 10^{28}$	Tracking	12-31
MOON-3	$^{100}\text{Mo}$	9.6	3034	$1.7 \times 10^{27}$	Tracking	13-48
DCBA	$^{150}\text{Nd}$	5.6	3367	$1 \times 10^{26}$	Tracking	16-22
Candles	$^{48}\text{Ca}$	.19	4271	$3 \times 10^{27}$	Scintillation	29-54
CARVEL	"	"	"	$3 \times 10^{27}$	Scintillation	29-54
GSO	$^{160}\text{Gd}$	22	1750	$1 \times 10^{26}$	Scintillation	
COBRA	$^{116}\text{Cd}$	7.5	2805		Scintillation	
SNOLAB+	$^{150}\text{Nd}$	5.6	3367		Scintillation	

# bibliografia

- Ettore Fiorini 2006 *J. Phys.: Conf. Ser.* **39** 243
- Referenze in  
[http://www.nu.to.infn.it/Neutrinoless\\_Double\\_Beta\\_Decay/](http://www.nu.to.infn.it/Neutrinoless_Double_Beta_Decay/)