

Fizyka neutrin - wykład 12

Agnieszka Zalewska

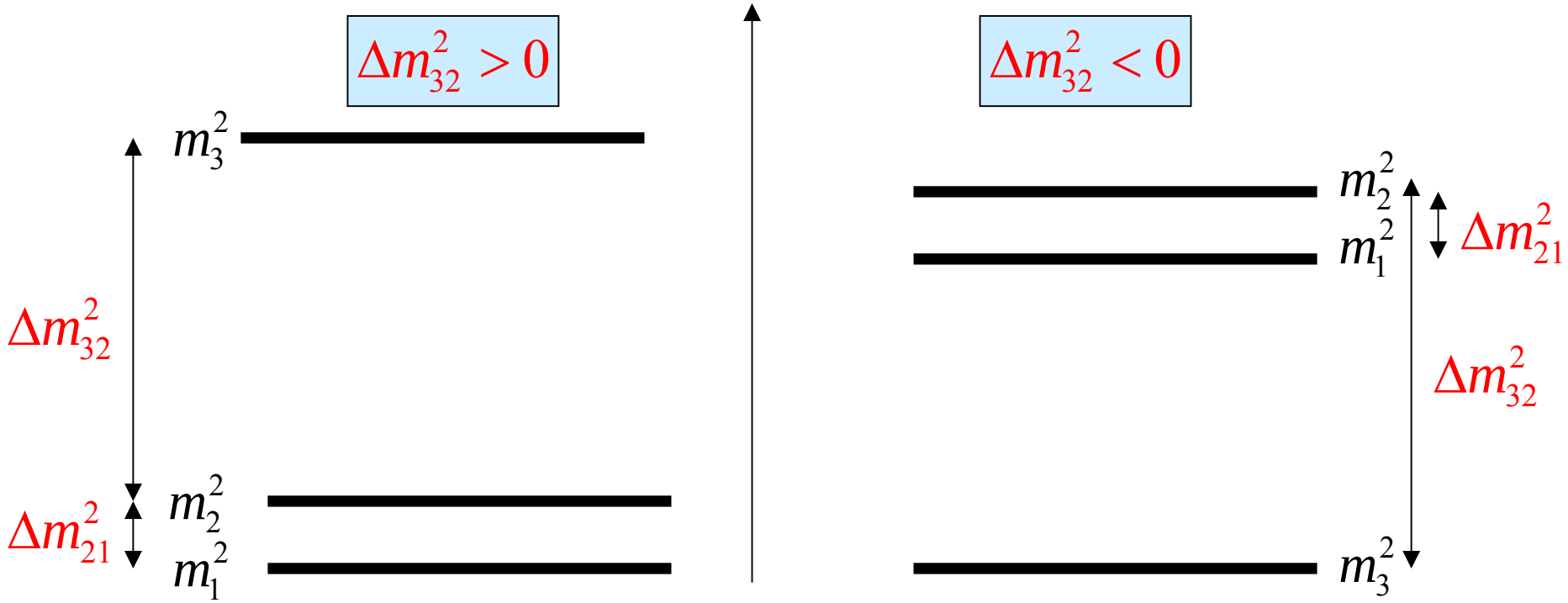
28.05.2008

- Metody pomiaru masy neutrin
- Pomiar masy poprzez analizę rozpadu beta trytu
- Podwójny bezneutrinowy rozpad beta ($0\nu\beta\beta$)

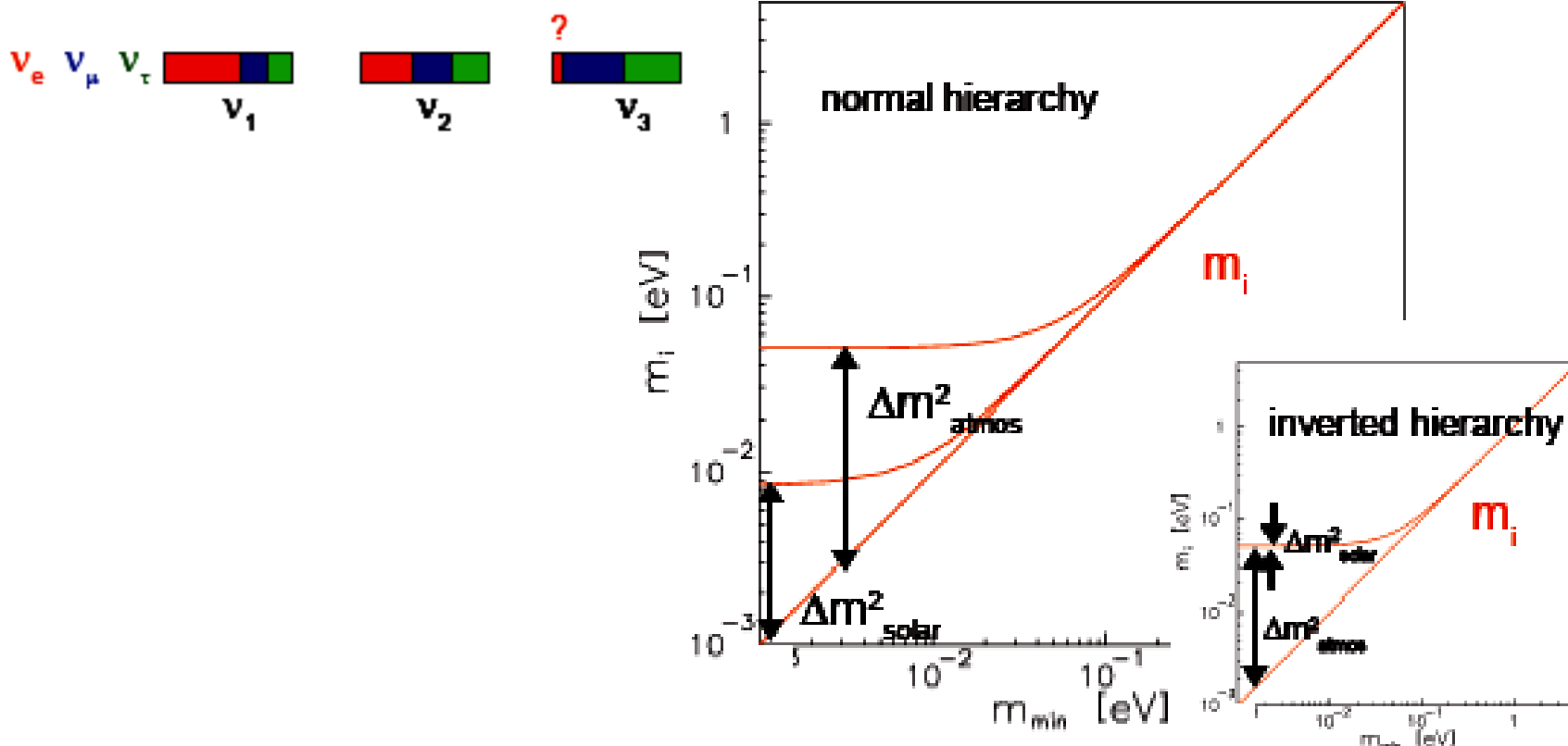
Pomiary nieoscylacyjne

Pytania:

- Jakie są wartości mas neutrin?
- Czy neutrino są cząstkami Diraca czy Majorany?
- Czy neutrino są źródłem istotnych informacji astrofizycznych i kosmologicznych?



Co da pomiar masy neutrin?



Odpowiedzi na pytania:

Czy masy neutrin są zhierarchizowane czy zdegenerowane?

Jaki jest wkład neutrin do niewidocznej materii we Wszechświecie?

Jak można zmierzyć masy neutrin?

Bezpośredni pomiar masy:

-- w oparciu o analizę kinematyczną słabych rozpadów

(pomiar naładowanych produktów rozpadu i zastosowanie prawa zachowania energii i pędu)

-- z czasu przelotu neutrin z wybuchu gwiazdy supernowej

W oparciu o podwójny bezneutrinowy rozpad β :

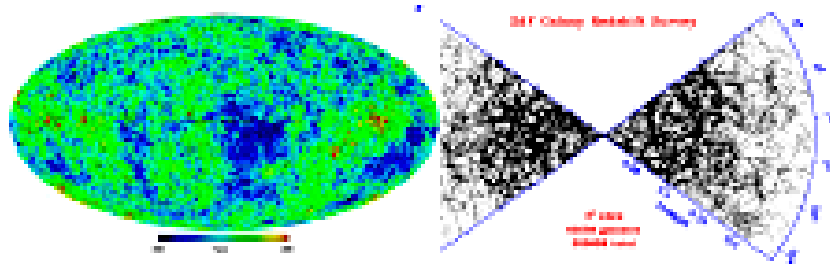
bardzo czuła metoda, ale neutrino musi być cząstką Majorany

W oparciu o pomiary kosmologiczne :

bardzo czuła metoda, ale silnie zależna od modelu

Jak można zmierzyć masy neutrin?

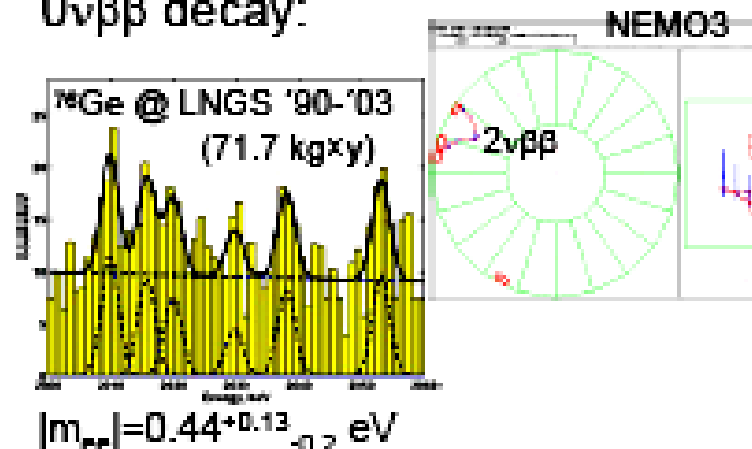
cosmology &
structure formation



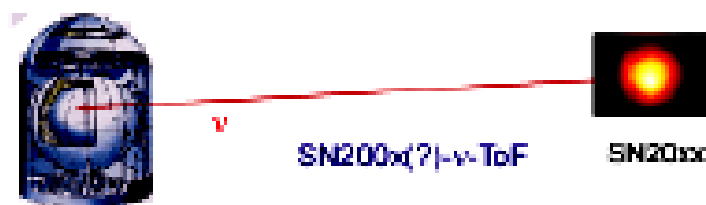
D.N. Spergel et al: $\Sigma m_\nu < 0.69 \text{ eV}$ (95%CL)

S.W. Allen et al: $\Sigma m_\nu = 0.58 \text{ eV}$ (best fit)

$0\nu\beta\beta$ decay:



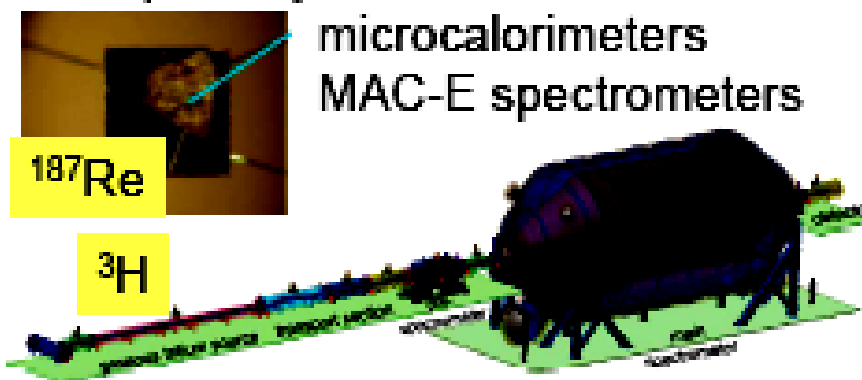
astrophysics:
SN ToF measurements



SuperK, SNO, OMNIS + grav.waves:
potential for $\sim 1 \text{ eV}$ sensitivity?

Klaus Eitel, Forschungszentrum Karlsruhe

β decay kinematics:
microcalorimeters
MAC-E spectrometers



IDM 2004, Edinburgh, September 6-10, 2004

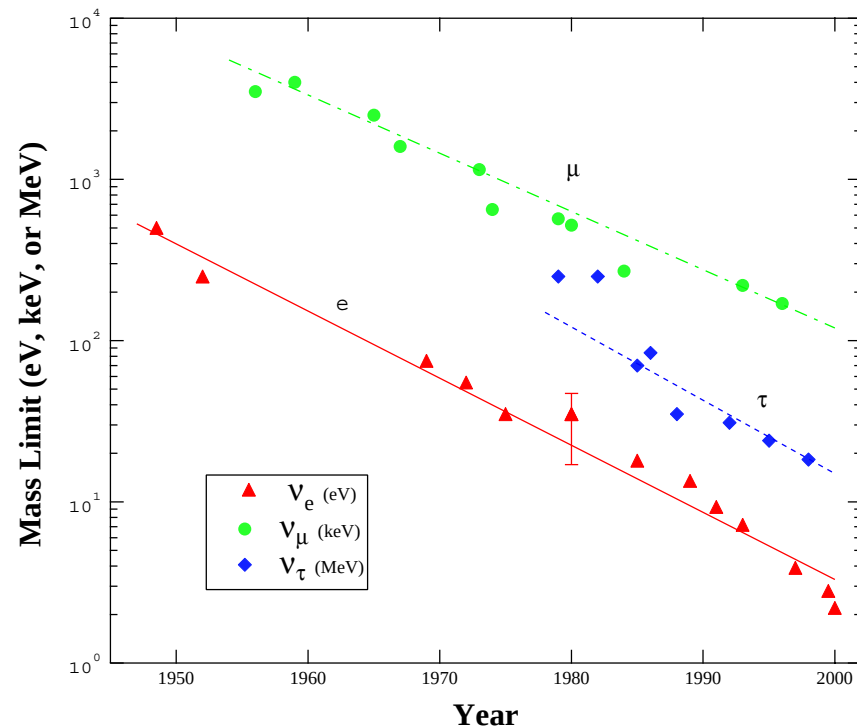
Bezpośredni pomiar masy neutrin w oparciu o słabe rozpady

ν_e : w oparciu o rozpad β trytu $m_{\nu_e} < 2.3 \text{ eV}$ (95% c.l.)

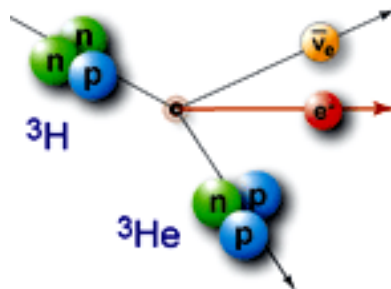
ν_μ : w oparciu o rozpad mezonu π (pomiar w PSI) $m_{\nu_\mu} < 190 \text{ keV}$ (90% c.l.)

ν_τ : w oparciu o najwyżej krotne rozpady leptonu τ (LEP)
 $m_{\nu_\tau} < 18.2 \text{ MeV}$ (90% c.l.)

Postęp w pomiarach masy
neutrin (J.Wilkerson)
-uwaga na różne skale masy
dla każdego rodzaju neutrin



Pomiar masy ν_e w oparciu o rozpad β trytu



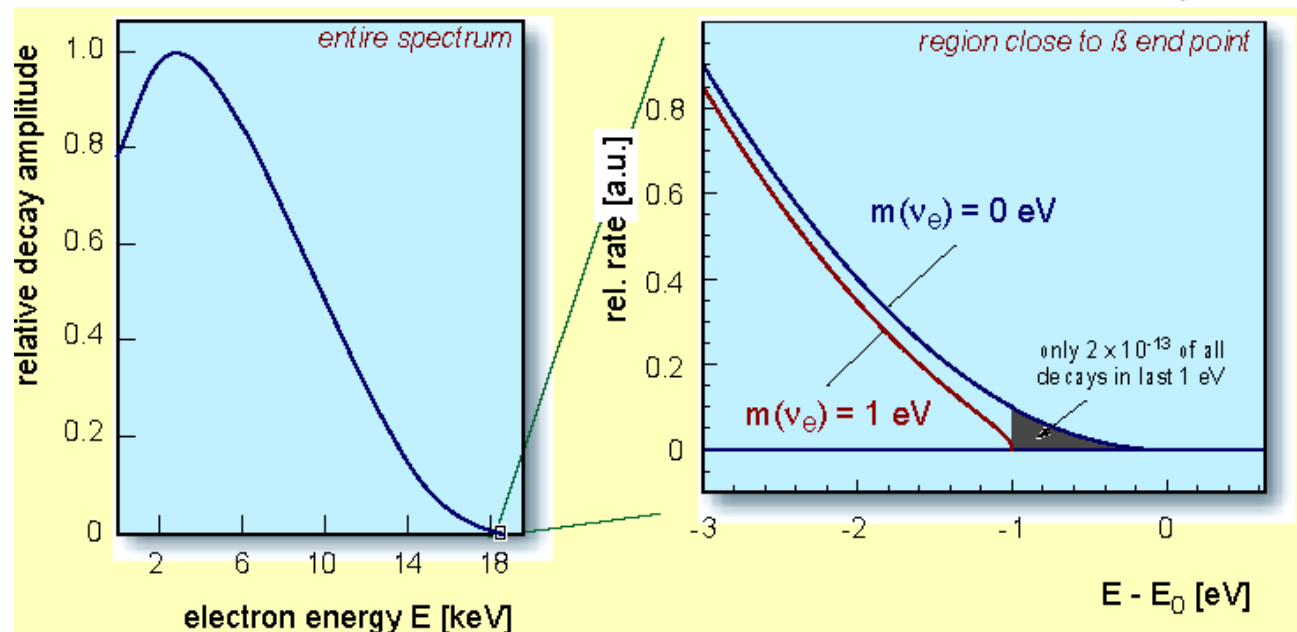
$$E_0 = M(^3H) - M(^3He) - m_e$$

$$= 18.6 \text{ keV}$$

$$\tau_{1/2} = 12.3 \text{ years}$$

$$E_0 = E_e + E_{\nu} \text{ (+ recoil corrections)}$$

$$\frac{dn}{dE} = F(Z, E) p_e E (E_0 - E) ((E_0 - E)^2 - m_{\nu}^2)^{1/2} \quad K(E) = \frac{1}{F p_e E} \frac{dn}{dE}$$



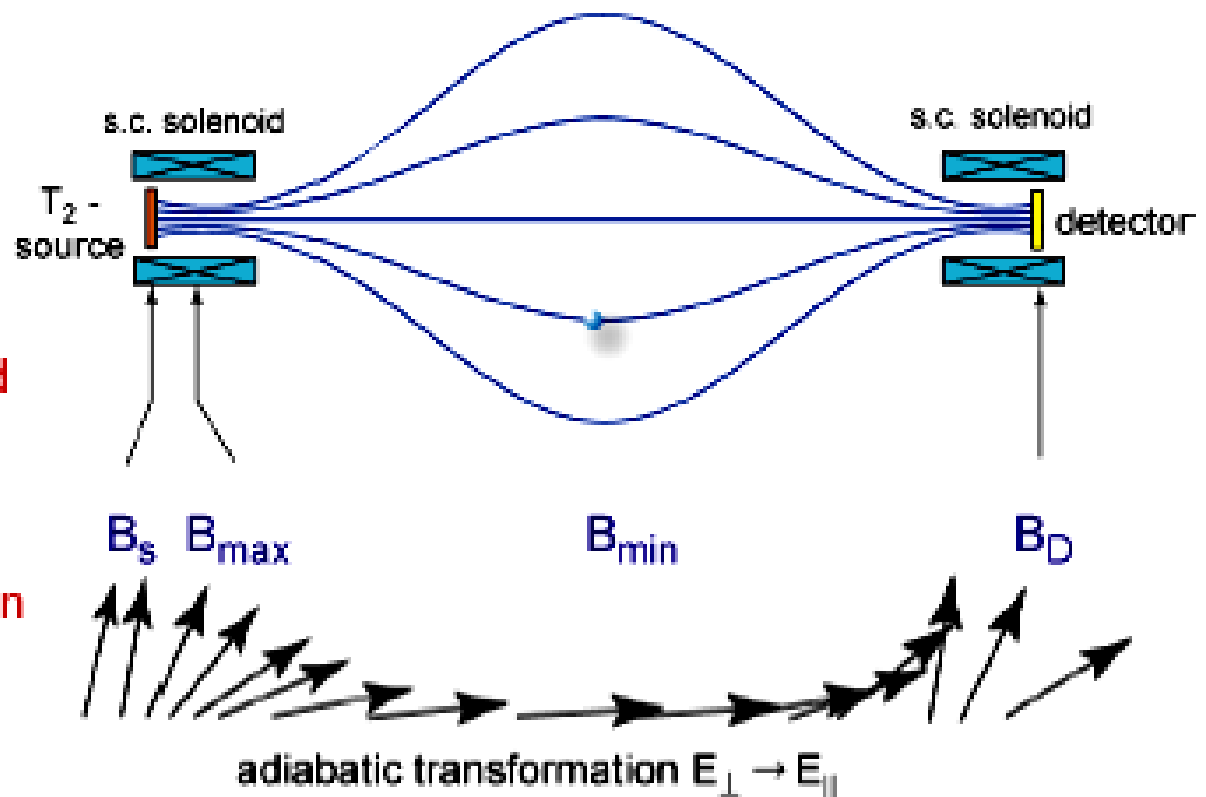
principle of an electrostatic filter with magnetic adiabatic collimation (MAC-E)

adiabatic magnetic guiding
of β 's along field lines
in stray B-field of
s.c. solenoids:

$$B_{\max} = 6 \text{ T}$$
$$B_{\min} = 3 \times 10^{-4} \text{ T}$$

energy analysis by
static retarding E-field
with varying strength:

high pass filter with
integral β transmission
for $E > qU$



Klaus Eitel, Forschungszentrum Karlsruhe

IDM 2004, Edinburgh, September 6-10, 2004

$$\Delta\Omega = 2\pi$$

T_2 source

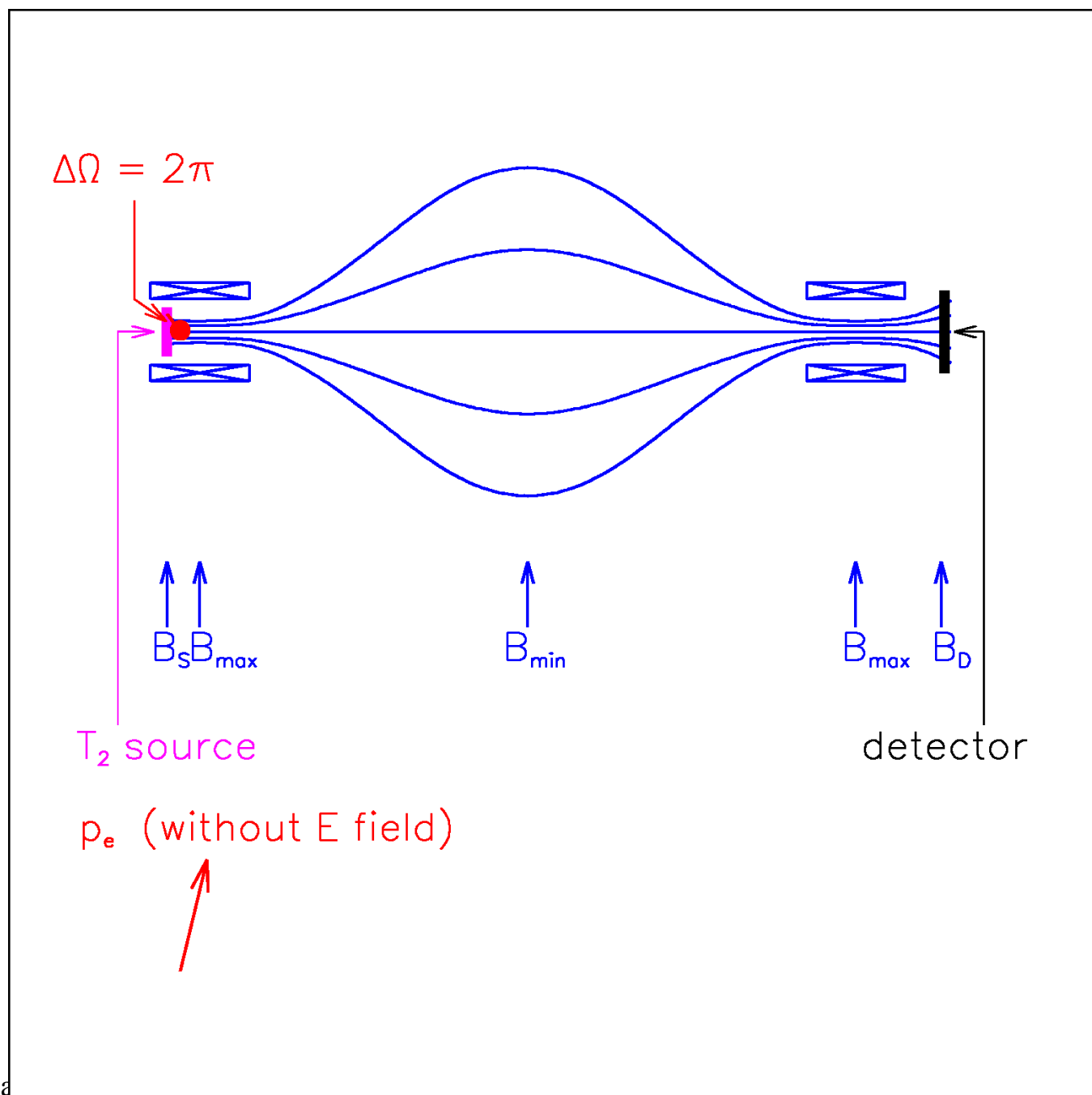
p_e (without E field)

$B_S B_{\max}$

$B_{\min}$

$B_{\max} B_D$

detector



latest results from the MAINZ experiment

frozen T_2 on HOP graphite

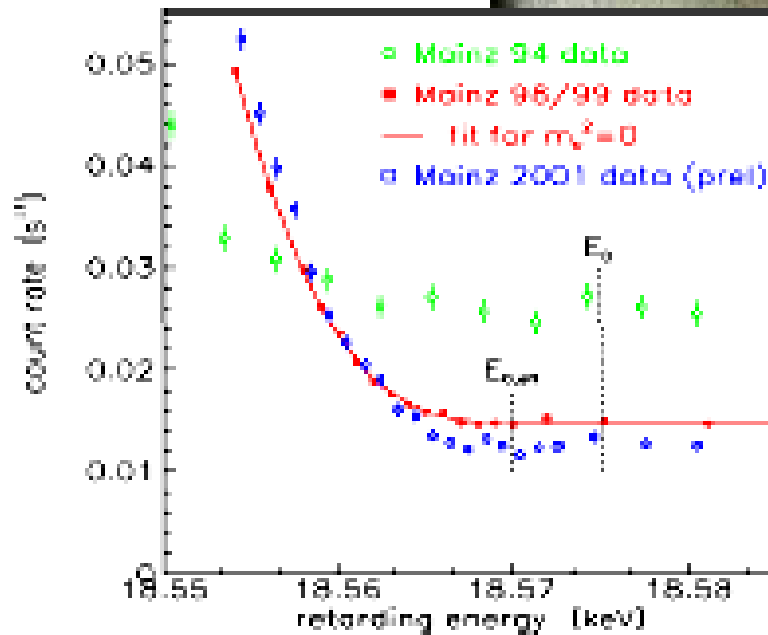
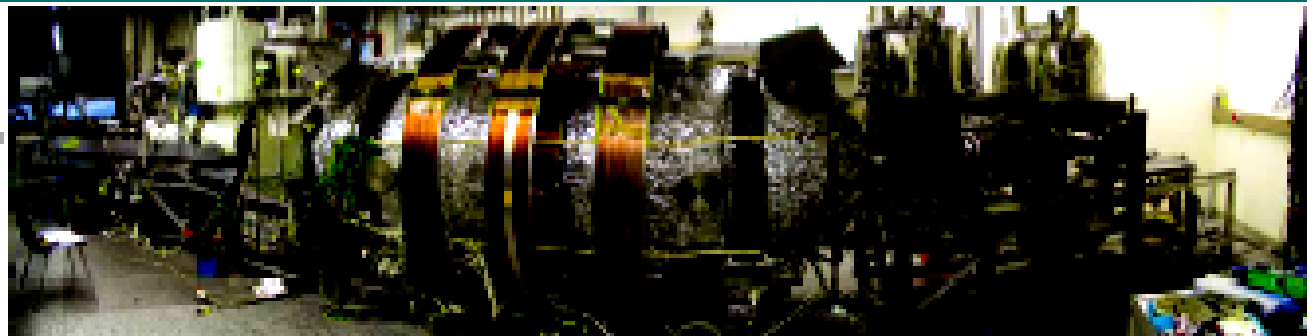
$T=1.80K$

$A=2cm^2$, $d\sim 130ML$ ($\sim 45nm$)

20mCi activity

spectr.: $l=2m$, $\varnothing=0.9m$

$\Delta E=4.8eV$



1994-2001 improvements in systematics:

- roughening of T_2 film
- inelastic scattering
- self charging of T_2 film

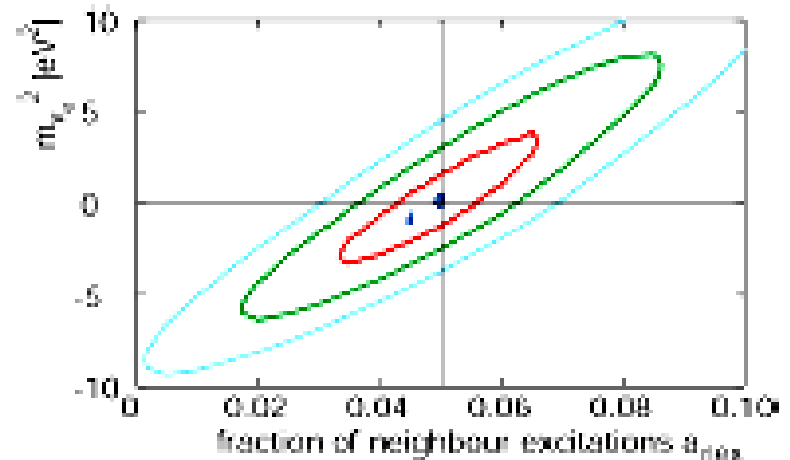
condensed T_2 film $\rightarrow$ neighbour excitations

W.Kolos et al., PRA37(1988): $a_{\text{max}}=5.9\%$; $\varepsilon=14.6eV$

Mainz 1998-2001: $a_{\text{max}}=(5\pm 1.6\pm 2.2)\%$ with $\varepsilon=16.1eV$

C. Kraus, Eur.Phys.J. C33, s01 (2004), v'04

free fit for a_{max} , m_v^2 for last 170eV



From current to future experiments

Mainz:

$$m_\nu^2 = -1.2(-0.7) \pm 2.2 \pm 2.1 \text{ eV}^2$$
$$m_\nu < 2.2(2.3) \text{ eV (95\%CL)}$$

C. Weinheimer, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 118 (2003) 279
C. Kraus, Eur.Phys.J. C33 (neighbour excit & self-consistent)

Troitsk:

$$m_\nu^2 = -2.3 \pm 2.5 \pm 2.0 \text{ eV}^2$$
$$m_\nu < 2.05 \text{ eV (95\%CL)}$$

V. Lobashev, Nucl.Phys. A719 (2003) 153c
(allowing for a step function near endpoint)

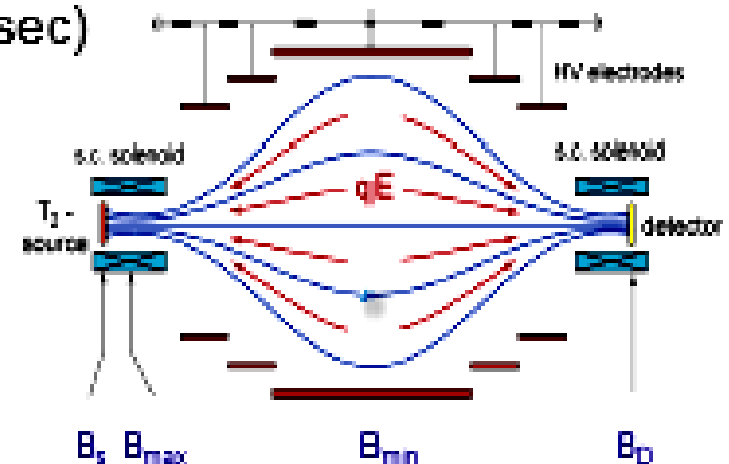
aim: improvement of m_ν by one order of magnitude ($2\text{eV} \rightarrow 0.2\text{eV}$)
 $\rightarrow$ improvement of uncertainty on m_ν^2 by 100 ($4\text{eV}^2 \rightarrow 0.04\text{eV}^2$)

statistics:

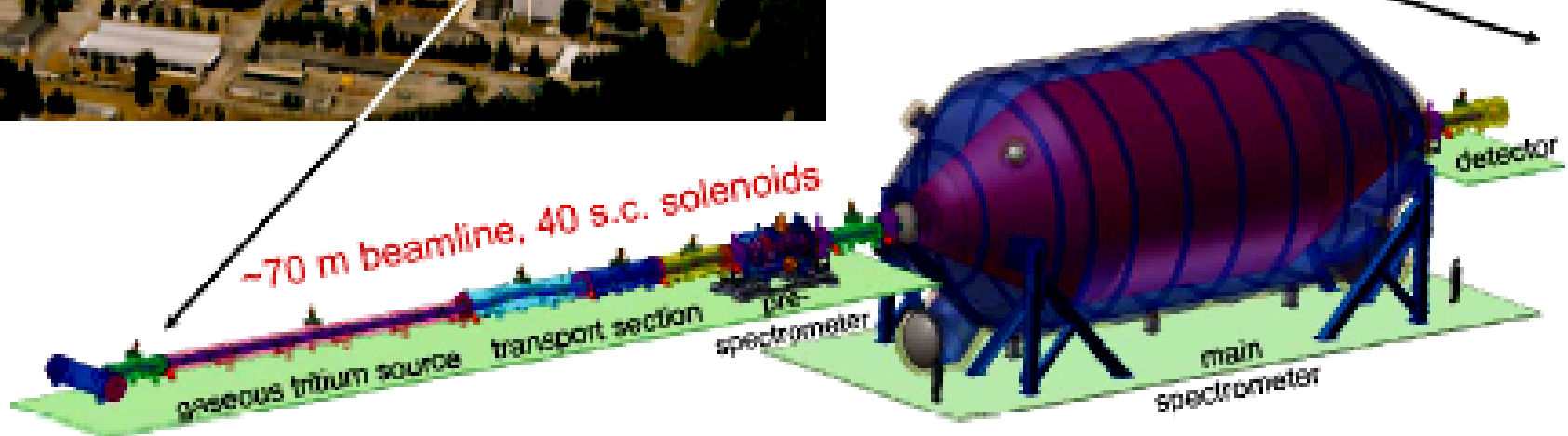
- stronger Tritium source ($\gg 10^{10} \beta'/\text{sec}$)
- longer measurement
(~ 100 days $\rightarrow \sim 1000$ days)

energy resolution:

- $\Delta E/E = B_{\min}/B_{\max}$
 $\rightarrow$ spectrometer with $\Delta E = 1\text{eV}$
 $\rightarrow \varnothing 10\text{m UHV vessel}$



KATRIN location at FZKarlsruhe



Start w 2008 roku, wyniki po 3 latach

electrostatic spectrometers

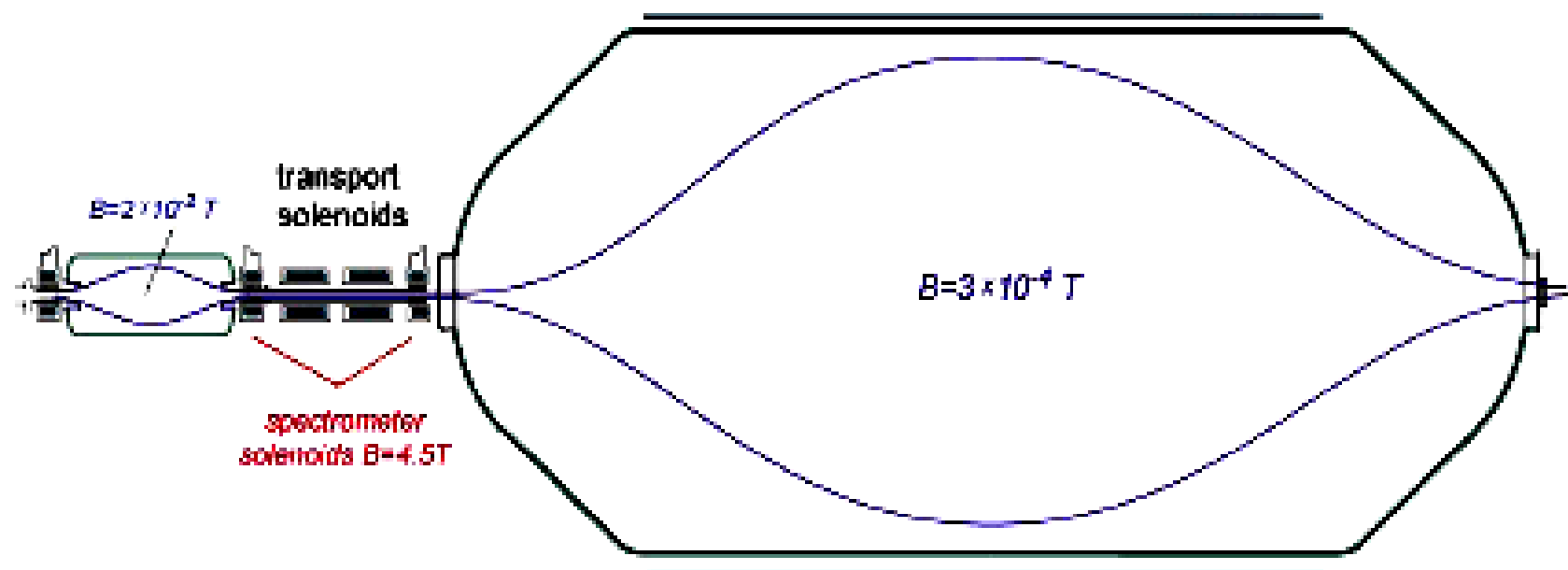
tandem design

electrostatic pre-filtering & analysis of tritium β -decay electrons

$\sim 10^{10}$ β 's/sec

$\sim 10^3$ β 's/sec

~ 10 β 's/sec ($qU = E_0 - 25\text{eV}$)



pre-spectrometer

fixed retarding potential $\approx 18.45\text{kV}$

$\varnothing = 1.7\text{m}$; length = 3.5m

$\Delta E \approx 60 \text{ eV}$

main spectrometer

variable retarding potential $18.5 - 18.6 \text{ kV}$

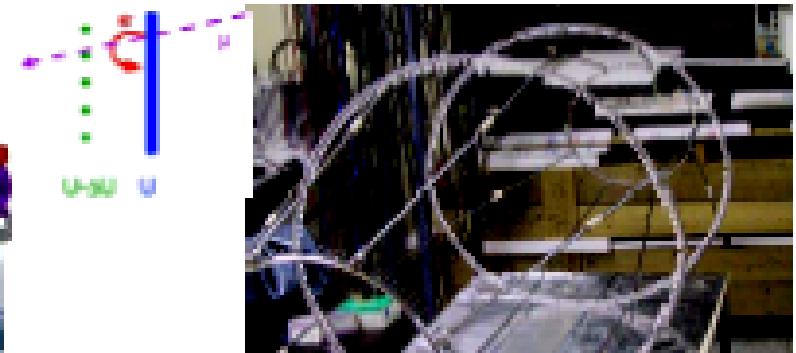
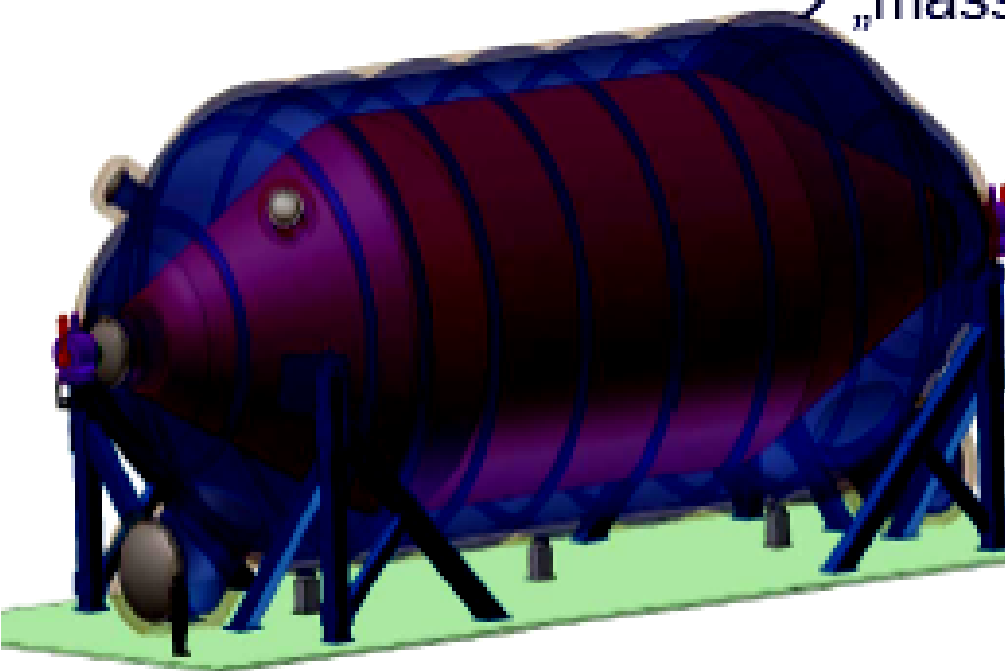
$\varnothing = 10\text{m}$; length = 24m

$\Delta E = 0.93 \text{ eV}$ (18.575keV)

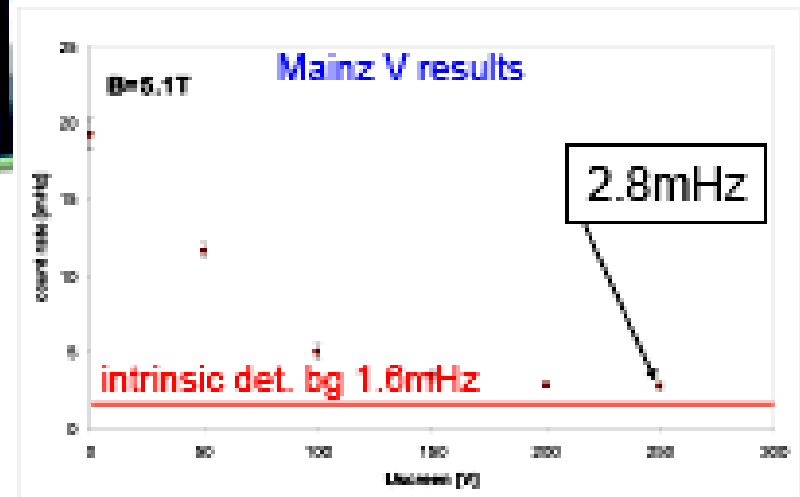
→ detailed el.-magn. design!

KATRIN Main Spectrometer

- stainless steel vessel ($\varnothing=10\text{m}$ & $l=24\text{m}$) on HV potential
- minimisation of bg → UHV: $p \leq 10^{-11}$ mbar
- „massless“ inner electrode system



UHV requirements:
outgassing $< 10^{-13}$ mbar l/s
inner surface $\sim 800\text{m}^2$
volume to pump $\sim 1500\text{m}^3$

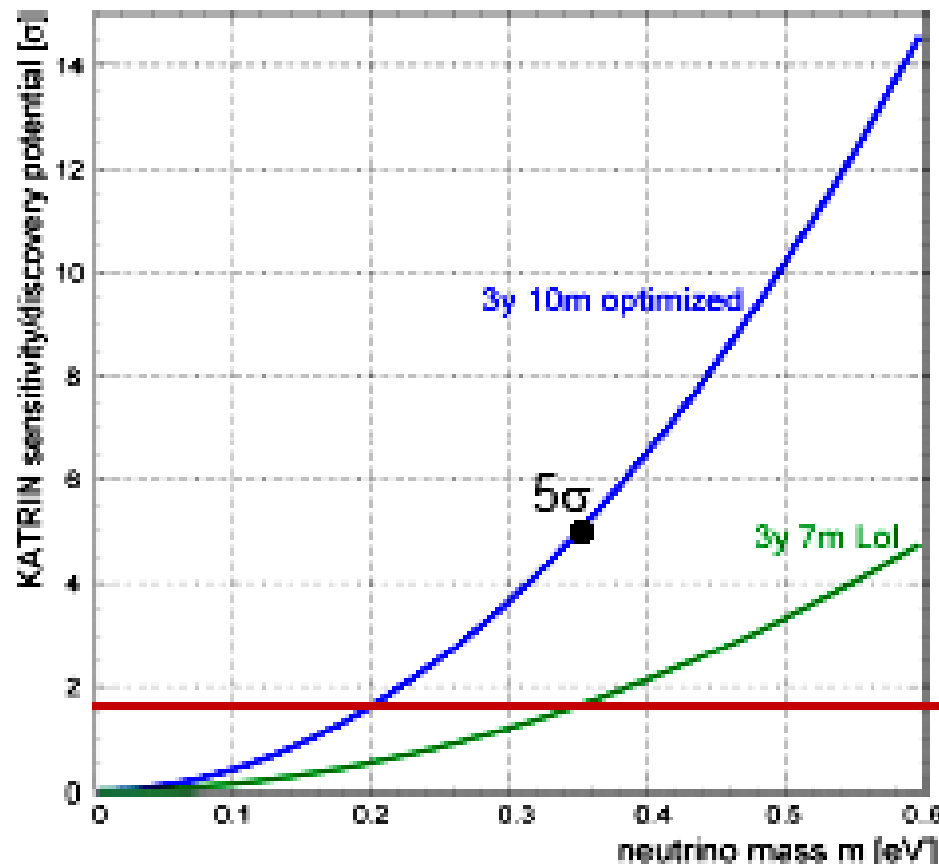


Transport głównego spektrometru - jesień 2006



A.Zalewska, w. 28.5.2008

KATRIN sensitivity & discovery potential



expectation:

after 3 full beam years

$$\sigma_{\text{syst}} \sim \sigma_{\text{stat}}$$



$$m_\nu = 0.35\text{eV} (5\sigma)$$

$$m_\nu = 0.3\text{eV} (3\sigma)$$

discovery potential

$$m_\nu < 0.2\text{eV} (90\%\text{CL})$$

sensitivity

Jak można zmierzyć masy neutrin?

Bezpośredni pomiar masy:

✓ -- w oparciu o analizę kinematyczną słabych rozpadów
(pomiar naładowanych produktów rozpadu i zastosowanie prawa zachowania energii i pędu)

-- z czasu przelotu neutrin z wybuchu gwiazdy supernowej

W oparciu o podwójny bezneutrinowy rozpad β :

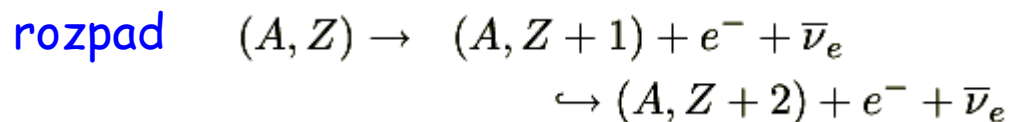
bardzo czuła metoda, ale neutrino musi być cząstką Majorany

W oparciu o pomiary kosmologiczne :

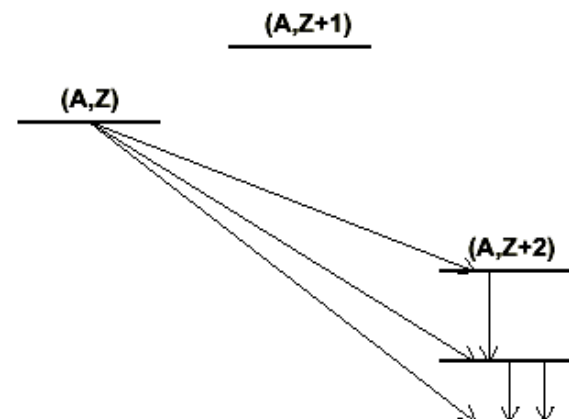
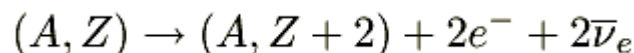
bardzo czuła metoda, ale silnie zależna od modelu

Podwójny rozpad β - $2\nu\beta\beta$

Dla niektórych jąder parzysto-parzystych



jest zabroniony przez prawo zachowania energii,
natomiast możliwy jest rozpad:



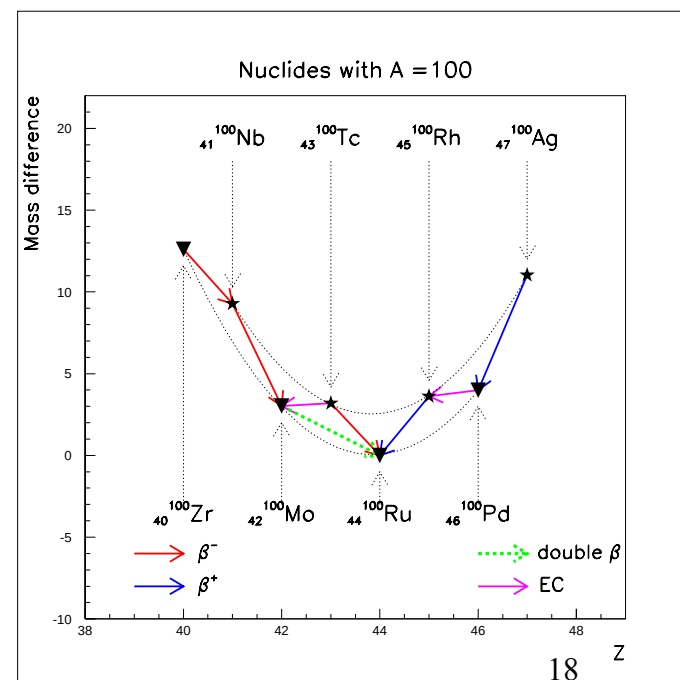
Najniższy stan energetyczny osiągany jest na drodze dwu jednoczesnych rozpadów β :

-proces przewidziany przez M.Geppert-Mayer w 1935 roku

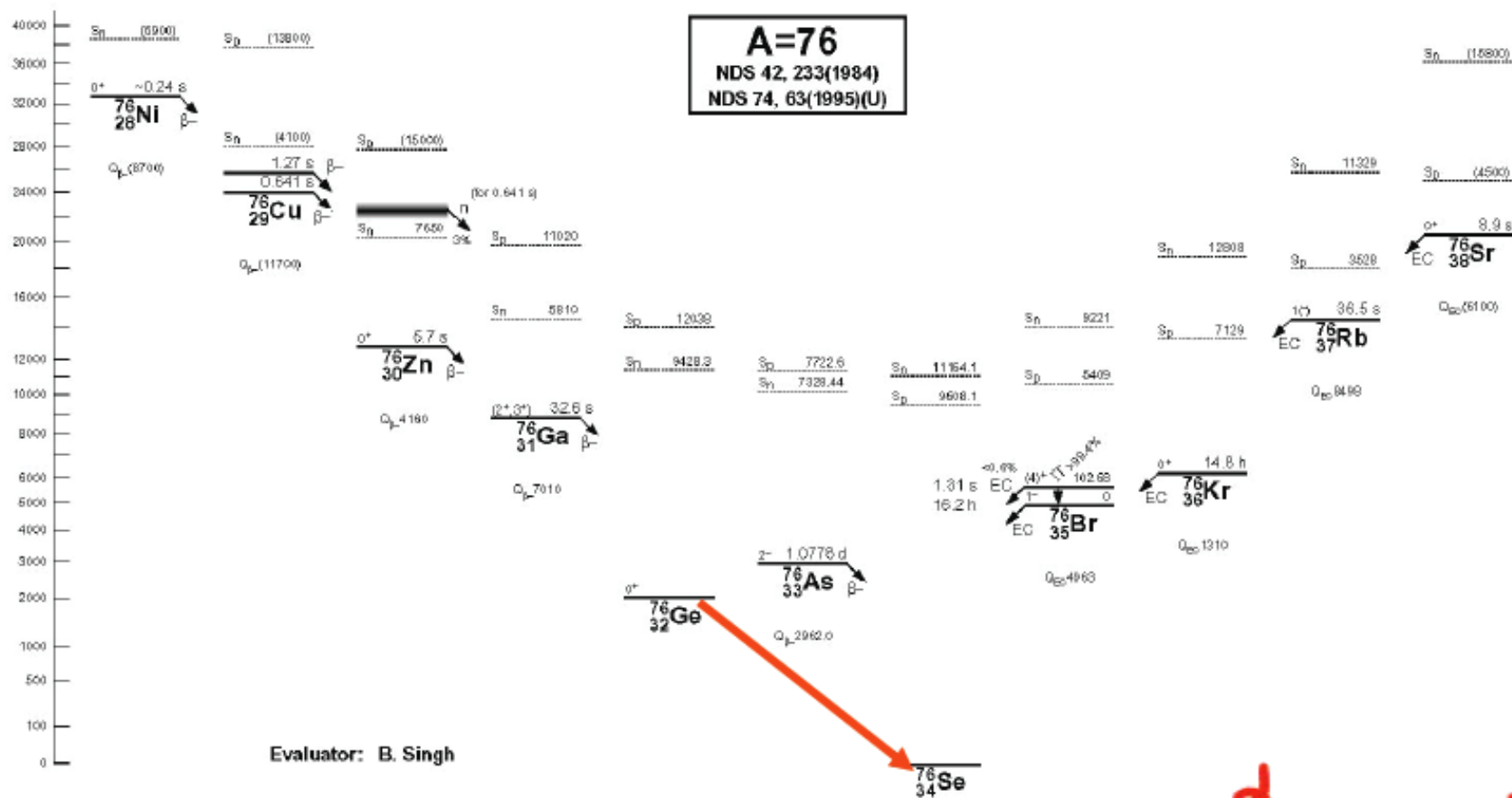
-dozwolony przez Model Standardowy

-ale bardzo rzadki - typowe czasy połowicznego rozpadu są dłuższe od wieku wszechświata (m.in. bardzo mała energia musi być rozdzielona między 4, a nie 2 leptony)

A.Zalewska, w. 28.5.2008



Podwójny rozpad β ^{76}Ge



Podwójny rozpad β - $2\nu\beta\beta$

Zestawienie izotopów, dla których zachodzi podwójny rozpad β :

-dla $Q > 1.7$ MeV (im mniejsza całkowita energia pary elektronów, tym większe tło)

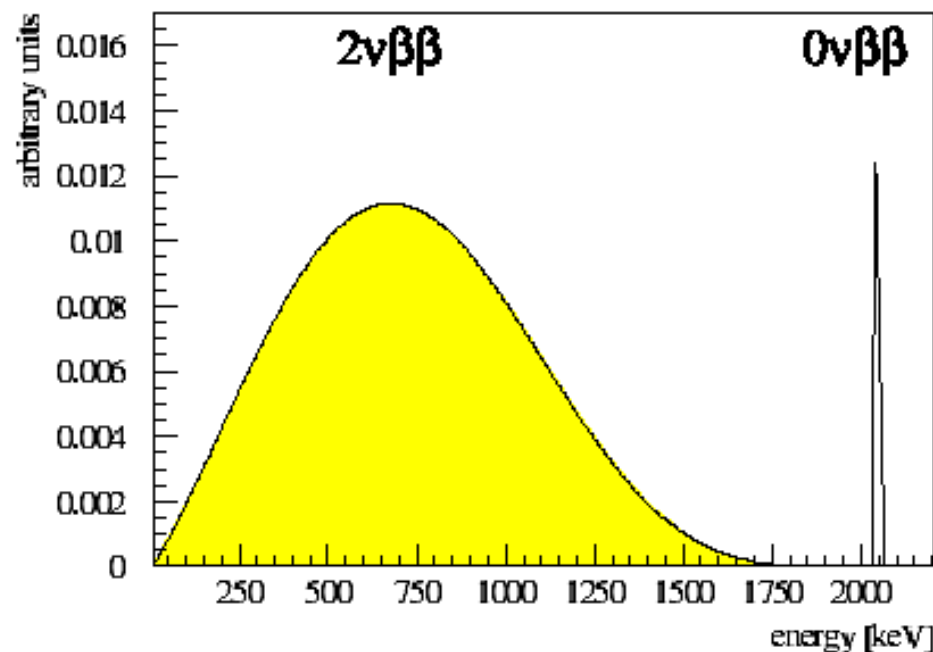
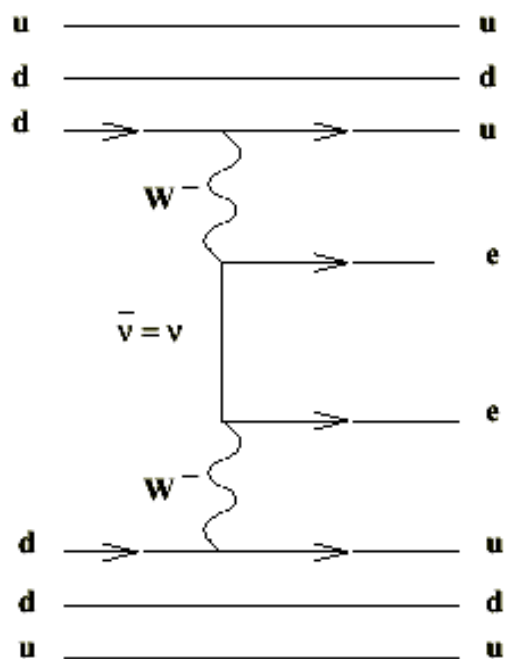
-parametr r oznacza procentowy udział tego izotopu wśród wszystkich izotopów danego pierwiastka (im większy, tym mniejsze tło od ewentualnych zwykłych rozpadów innych izotopów)

Isotope	$Q_{\beta\beta}$ (keV)	r (%)
^{48}Ca	4272	0.187
^{76}Ge	2039	7.61
^{82}Se	2995	8.73
^{96}Zr	3350	2.80
^{100}Mo	3034	9.63
^{110}Pd	2000	11.72
^{116}Cd	2805	7.49
^{124}Sn	2287	5.79
^{130}Te	2529	34.08
^{136}Xe	2468	8.87
^{148}Nd	1929	5.7
^{150}Nd	3367	5.6
^{160}Gd	1730	22.86

Podwójny bezneutrinowy rozpad β - $0\nu\beta\beta$

Hipoteza Majorany: neutrino jest identyczne z antyneutrinem - jeśli tak, to możliwy byłby proces bezneutrinowego podwójnego rozpadu β (neutrino anihiluje z antyneutrinem i w stanie końcowym są tylko dwa elektrony):

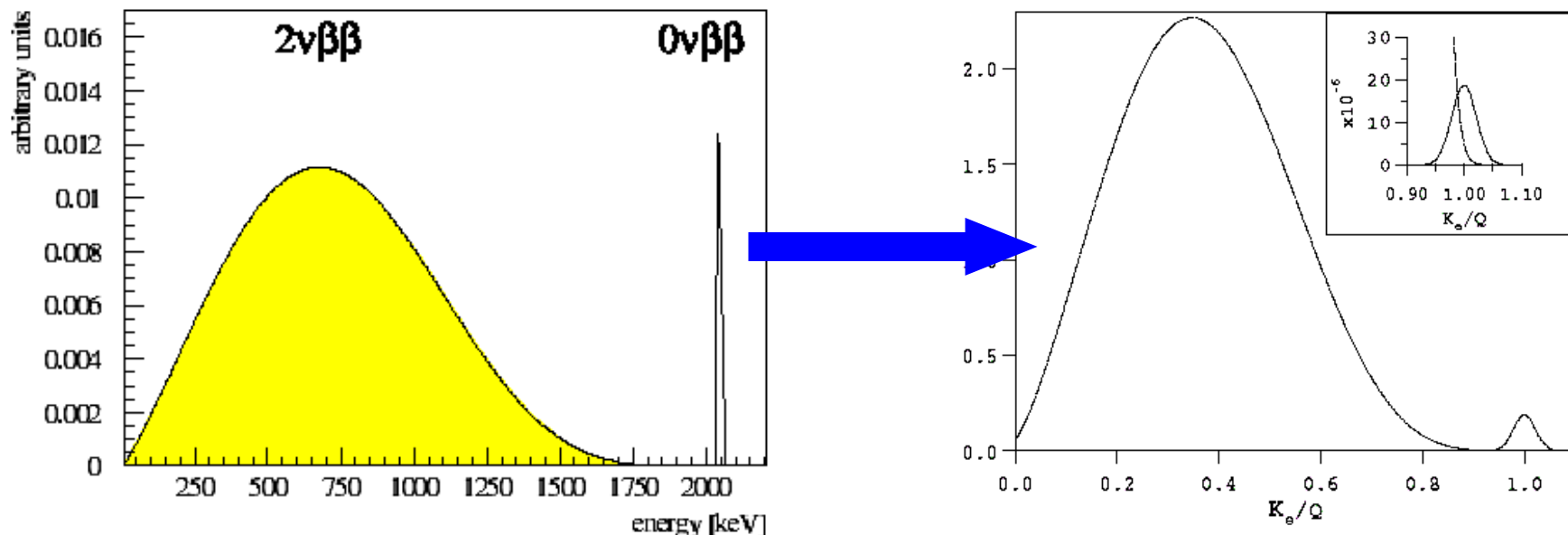
$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^{-}$$



Podwójny bezneutrinowy rozpad β - $0\nu\beta\beta$

Eksperymentalnie to nie takie proste (wręcz ogromnie trudne!):

- Rozkład energii odpowiadającej rozpadowi $0\nu\beta\beta$ rozmyty - im lepsza zdolność rozdzielcza detektora, tym mniej przekrywa się z rozkładem energii dla znacznie silniejszego rozpadu $2\nu\beta\beta$
- Występuje na tle sygnałów od zwykłych rozpadów innych izotopów danego pierwiastka, zanieczyszczeń radioaktywnymi izotopami innych pierwiastków czy od przejść jądrowych wywołanych oddziaływaniami mionów kosmicznych lub neutronów i fotonów wnikaających do detektora z zewnątrz



Podwójne rozpady $\beta - 2\nu\beta\beta$ i $0\nu\beta\beta$

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2$$

$G^{0\nu}$

czynnik przestrzeni fazowej

$|M^{0\nu}|^2$

element macierzy przejścia jądrowego

$\langle m_\nu \rangle^2$

efektywna masa neutrina

$$\langle m_\nu \rangle = \sum_k \phi_k m_k U_{e,k}^2$$

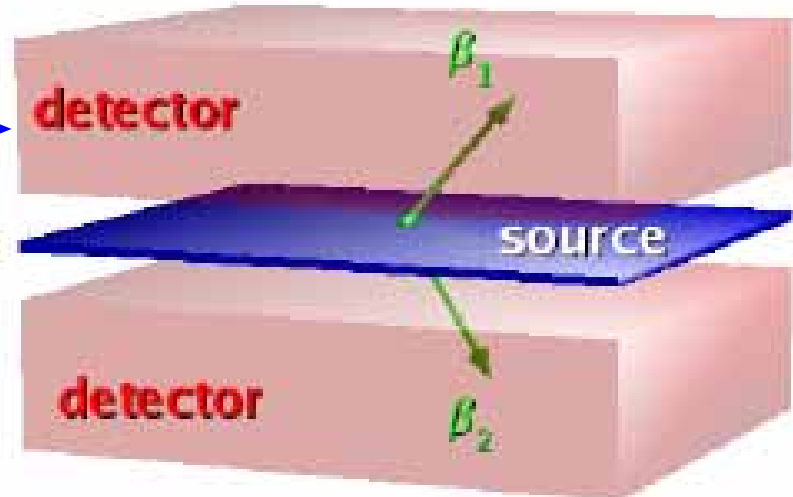
Table I A selection of the past and present experiments giving the best limits for neutrino mass m_ν from $0\nu\beta\beta$ decays. The values in the first column are lower (upper) limits with the exception of the Heidelberg-Moscow experiment where the 99.9973% CL value is given. The spread in $\langle m_\nu \rangle$ is due to the uncertainties on the nuclear factor F_N .

isotope	experiment	latest result	$Q_{\beta\beta}$ [keV]	i. a. nat.	enrich.	exposure [kg×y]	technique	material	$\tau_{1/2}^{0\nu}$ [10^{25} y]	$\langle m_\nu \rangle$ [eV]
^{48}Ca	Elegant VI	2004[11]	4271	0.19	–	4.2	scintillator	CaF_2	0.14	$7.2 \div 44.7$
^{76}Ge	Heidelberg/Moscow	2004[17]	2039	7.8	87	71.7	ionization	Ge	120.0	0.44
^{82}Se	NEMO-3	2007[22]	2995	9.2	97	1.8	tracking	Se	2.1	$1.2 \div 3.2$
^{100}Mo	NEMO-3	2007[22]	3034	9.6	95÷99	13.1	tracking	Mo	5.8	$0.6 \div 2.40$
^{116}Cd	Solotvina	2003[12]	2805	7.5	83	0.5	scintillator	CdWO_4	1.7	1.7
^{130}Te	Cuoricino	2007[20]	2529	33.8	–	11.8	bolometer	TeO_2	30.0	$0.16 \div 0.84$
^{136}Xe	DAMA	2002[23]	2476	8.9	69	4.5	scintillator	Xe	12.0	$1.10 \div 2.9$
^{150}Nd	Irvine TPC	1997[14]	3367	5.6	91	0.01	tracking	Nd_2O_3	0.012	3.0
^{180}Gd	Solotvina	2001[13]	1791	21.8	–	1.0	scintillator	Gd_2SiO_5	0.013	26.0

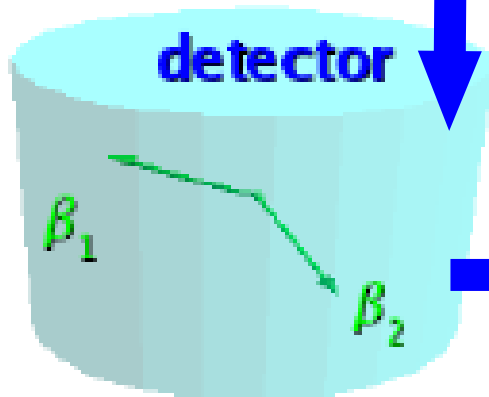
Współczesne eksperymenty $0\nu\beta\beta$ - zasady detekcji

Zawsze bezpośrednie pomiary elektronów z rozpadów $\beta\beta$, ale dwie różne techniki:

- Źródło rozpadów i detektor oddzielnie



- Źródło rozpadów i detektor tożsame



Współczesne eksperymenty $0\nu\beta\beta$ - zasady detekcji

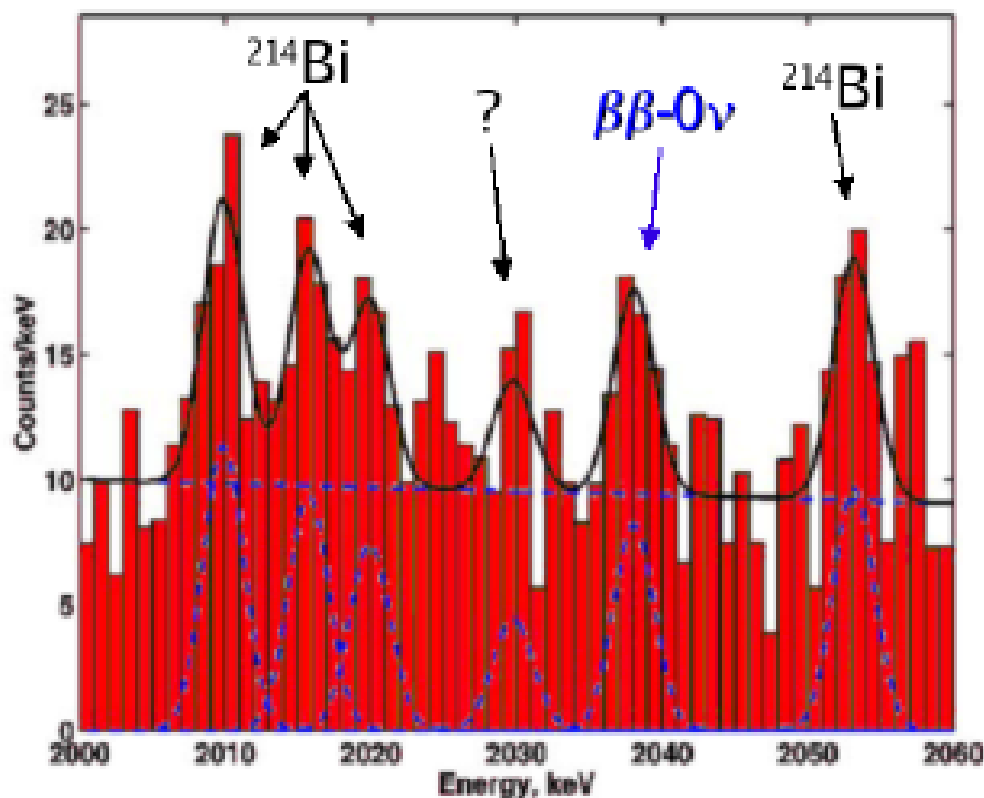
W eksperymentach $0\nu\beta\beta$ wykorzystuje się następujące zjawiska fizyczne dla detekcji elektronów z rozpadów:

- scyntylacje
- jonizację w gazach i cieczach szlachetnych
- zjawisko tworzenia par elektron-dziura w półprzewodnikach
- pomiar ciepła reakcji (coraz częściej używane detektory zwane bolometrami)

Eksperyment Moskwa-Heidelberg - $0\nu\beta\beta$?

Niektórzy fizycy z tego eksperymentu twierdzą, że widzą sygnał odpowiadający rozpadowi $0\nu\beta\beta$ jądra ^{76}Ge

Klapdor-Kleingrothaus et al. Mod. Phys. Lett. 16 (2001) 2409



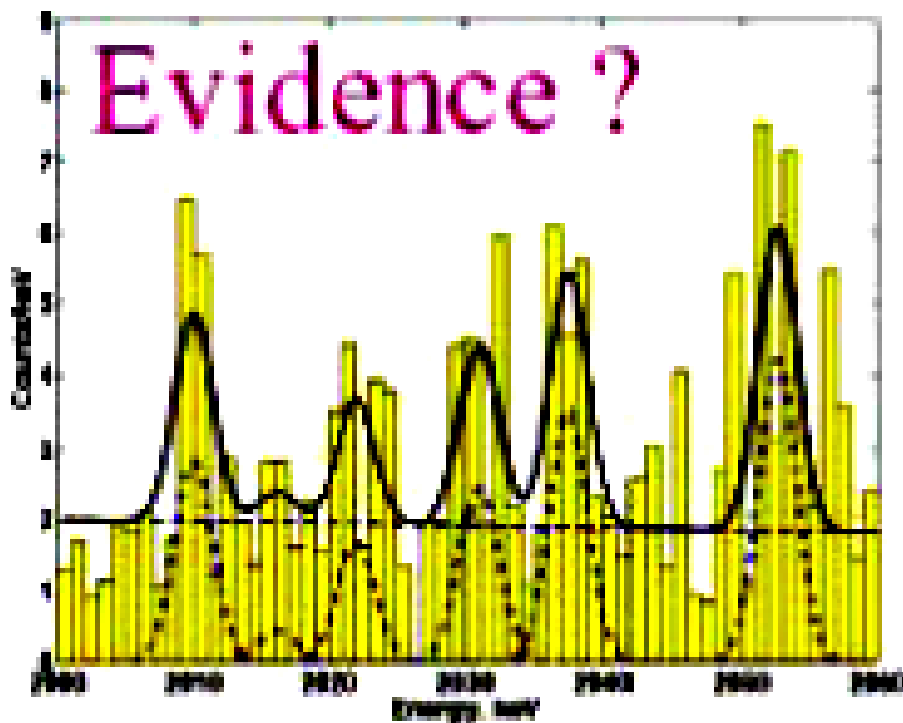
- Eksperyment prowadzony w Gran Sasso
- 5 kryształów Ge wzbogaconych do 86% ^{76}Ge
- Całkowita masa około 11 kg
- Tło - od rozszczepień U/Th

Praca spotkała się z bardzo silną krytyką fizyków z innych eksperymentów $0\nu\beta\beta$

Eksperyment Moskwa-Heidelberg - $0\nu\beta\beta$?

Nowa publikacja w 2004 roku w oparciu o dane z okresu 1990-2003

Klapdor-Kleingrothaus Phys. Lett. B586 (2004) 198



Maximum przy energii 2039 keV

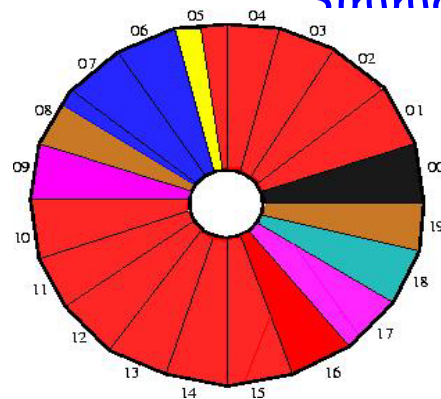
$$T_{1/2} = 0.6-8.4 \times 10^{25} \text{ lat}$$

$$\rightarrow m\nu = 0.17-0.63 \text{ eV}$$

Wynik musi być zweryfikowany przez inny eksperyment, np. przez eksperyment GERDA (faza 1) lub eksperyment NEMO3, które za kilka lat powinny osiągnąć wystarczającą czułość

Eksperyment NEMO3

Simmar@EPS2003



7.2 kg ^{100}Mo

1 kg ^{82}Se

0.4 kg ^{116}Cd

0.6 kg ^{130}Te

1 kg $^{\text{nat}}\text{Te}$

0.6 kg Cu

48 g ^{150}Nd

20 g ^{96}Zr

7 g ^{48}Ca

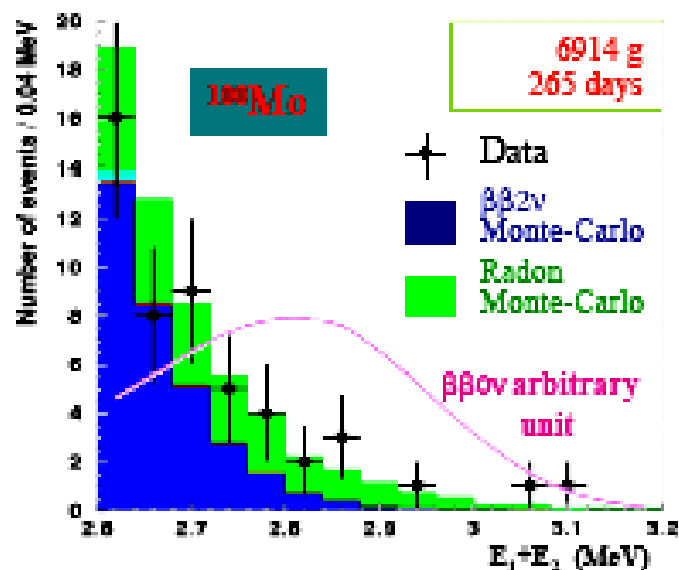
$\beta\beta 0$,
 $\beta\beta 2\nu$

t_{10}

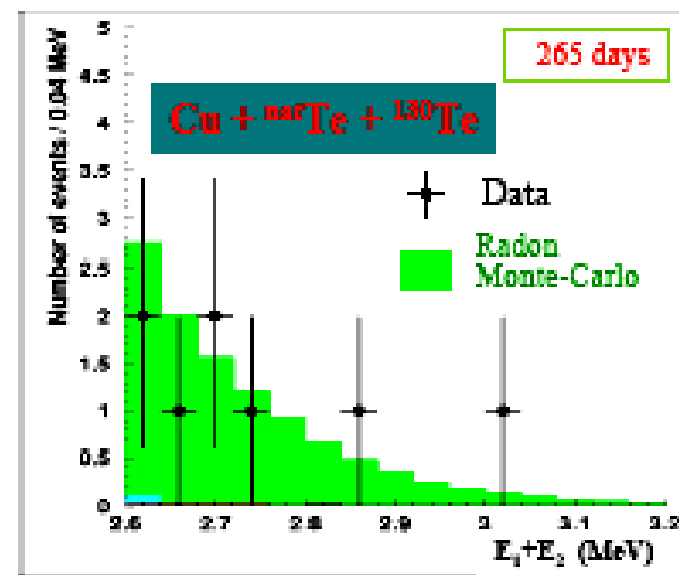
$\beta\beta 2\nu$
($\beta\beta 0\nu$)

Eksperyment NEMO3

$\beta\beta 0\nu$ Analysis with ^{100}Mo



^{100}Mo



$\text{Cu} + {}^{\text{nat}}\text{Te} + {}^{130}\text{Te}$

$$T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 3 \cdot 10^{23} \text{ y}$$

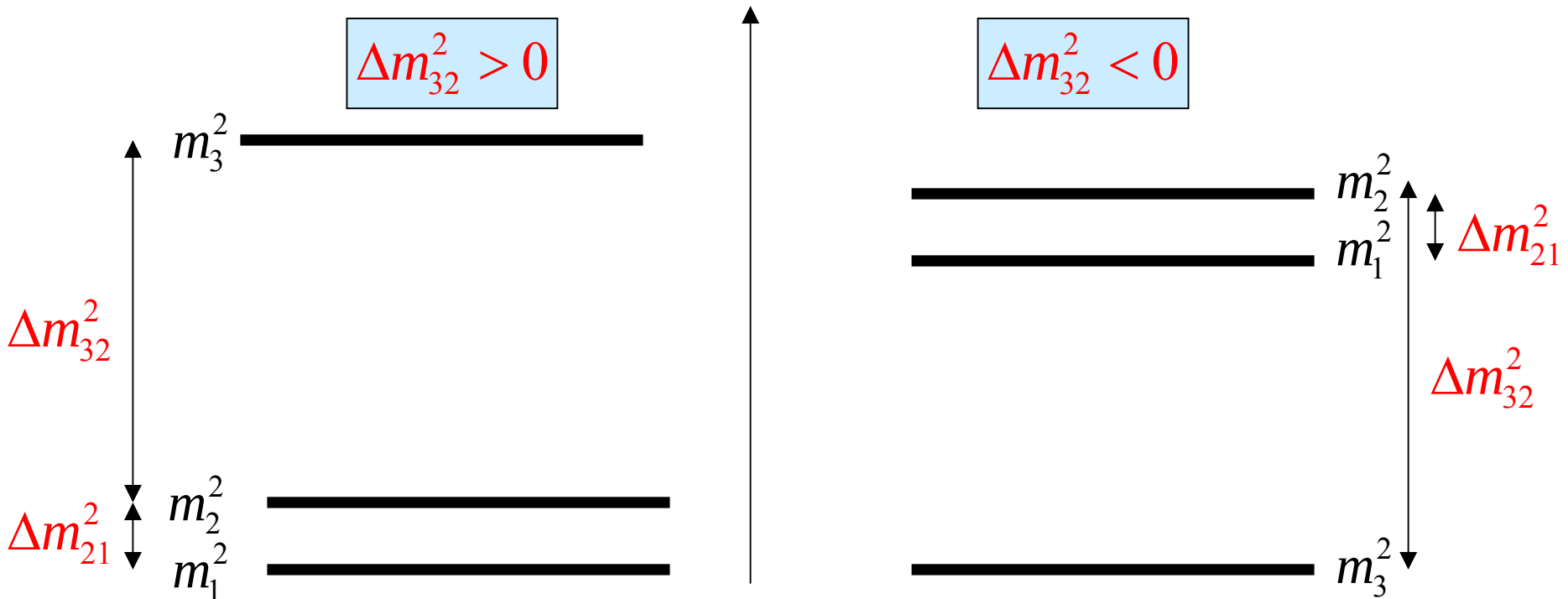
5 years of data

$$T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 4 \cdot 10^{24} \text{ y} \quad (90\% \text{ C.L.})$$

$$\langle m_n \rangle < 0.2 - 0.35 \text{ eV}$$

Przyszłe eksperymenty $0\nu\beta\beta$

Potrzebna byłaby czułość rzędu 10 meV ($\sqrt{\Delta m^2_{23}}=50\text{meV}$), aby rozstrzygnąć, czy masy neutrin są hierarchiczne i czy jest to hierarchia odwrócona



Podwójny bezneutrinowy rozpad β - przyszłość

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2$$

nucl-ex/0707.2216

Table II A selection of the proposed experiments. Except for CUORE and GSO all experiments use isotopically enriched material. Background bkg is calculated on an energy interval equal to σ_E . For all tracking experiments the quoted background is due only to the $\beta\beta$ - 2ν tail.

experiment	isotope	$Q_{\beta\beta}$ [keV]	tech.	i.a. [%]	mass [kmol]	t_M [y]	σ_E [keV]	bkg [c/y]	$\tau_{1/2}^{0\nu}$ [10^{28} y]	$\langle m_\nu \rangle$ [meV]	project status
CANDLES IV+[37]	^{48}Ca	4271	scint.	2	1.8	5	73	0.35	0.3	30	R&D (III: 5 mol)
Majorana 120[26]	^{76}Ge	2039	ion.	86	1.6	4.5	2	0.1	0.07	90	R&D - reviewing
GERDA II[30]	^{76}Ge	2039	ion.	86	0.5	5	2	0.1	0.02	90÷290	funded/R&D (I: 0.3 kmol)
MOON III[42]	^{100}Mo	3034	track.	85	8.5	10	66	3.8	0.17	15	R&D (I: <i>small</i>)
CAMEO III[36]	^{116}Cd	2805	scint.	83	2.7	10	47	4	0.1	20	proposed
CUORE[34]	^{130}Te	2529	bol.	33.8	1.7	10	2	7.5	0.07	11÷57	construction
EXO[45]	^{136}Xe	2476	track.	65	60.0	10	25	1	4.1	11÷15	R&D (1.5 kmol)
SuperNEMO[44]	^{180}Nd	3367	track.	90	0.7	–	57	10	0.01	50	R&D
DCBA-F[43]	^{180}Nd	3367	track.	80	2.7	–	85	–	0.01	20	R&D (T2: <i>small</i>)
GSO[13]	^{180}Gd	22	scint.	22	2.5	10	83	200	0.02	65	proposed

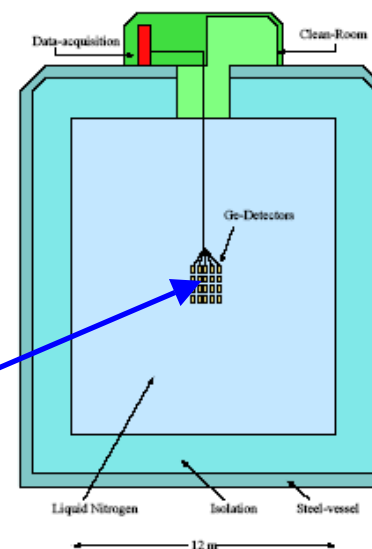
Podwójny bezneutrinowy rozpad β - przyszłość

Wymagania stawiane
przyszłym eksperymentom:

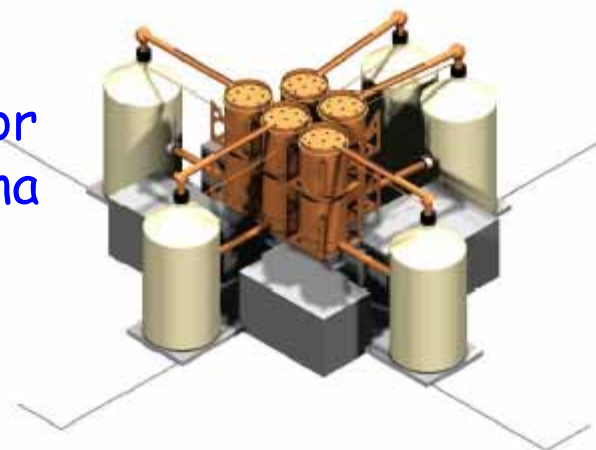
- wielki detektor
- bardzo dobra rozdzielczość energetyczna detektora
- maksymalna możliwie eliminacja tła (maksymalne wzbogacenie o potrzebny izotop, specjalne wymagania co do czystości używanych materiałów konstrukcyjnych, porządne ekranowanie detektora od zewnętrznego tła: gruba „otoczka”, laboratoria głęboko pod ziemią)

Detektor
GERDA

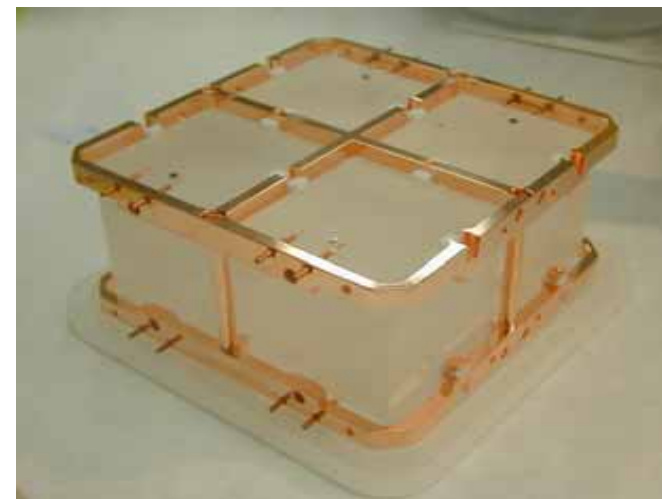
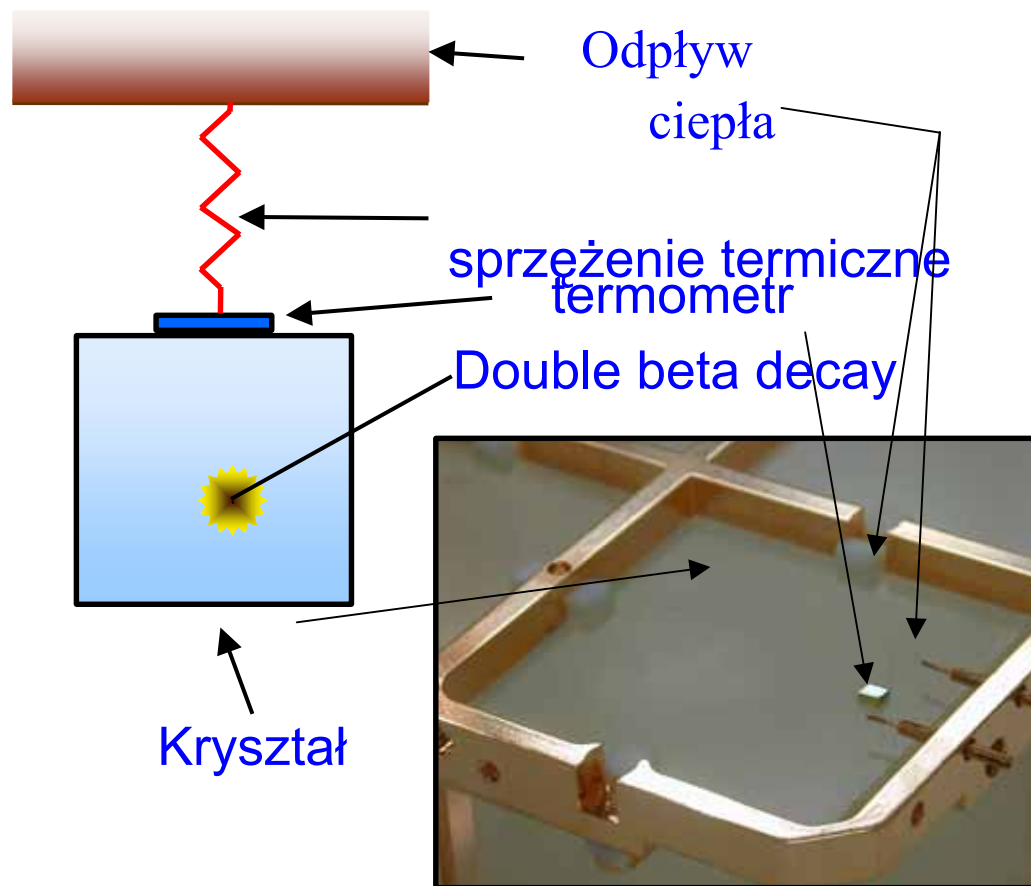
1 tona Ge!



Detektor
Majorana

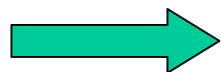


Eksperyment CUORE - zasada działania

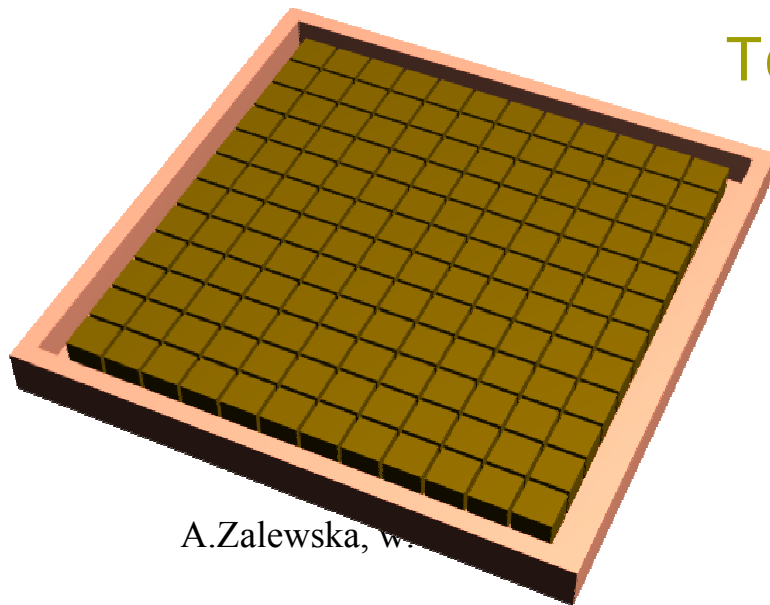


przykład: 750 g TeO_2 @ 10 mK
 $C \sim T^3$ (Debye) $\Rightarrow C \sim 2 \times 10^{-9} \text{ J/K}$
1 MeV γ -ray $\Rightarrow \Delta T \sim 80 \mu\text{K}$
 $\Rightarrow \Delta U \sim 10 \text{ eV}$

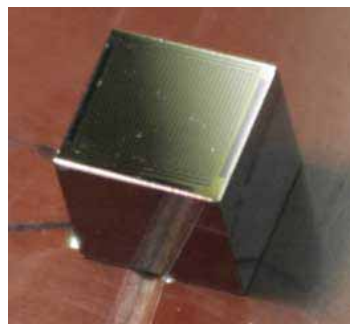
Eksperyment COBRA - zasada działania



Zn70	0.62	1001	β - β -
Cd114	28.7	534	β - β -
Cd116	7.5	2809	β - β -
Te128	31.7	868	β - β -
Te130	33.8	2529	β - β -
Zn64	48.6	1096	β + / EC
Cd106	1.21	2771	β + β +
Cd108	0.9	231	EC/EC
Te120	0.1	1722	β + / EC



A.Zalewska, w.



Matryca detektorów
CdTe o obj. 1cm³