

Kansallinen Maanalaisen Fysiikan Kesäkoulu
Pyhäjärvi, 9. – 13. kesäkuuta 2003

Timo Enqvist

Kaksoisbeetahajoamisen Kokeellinen Tutkiminen

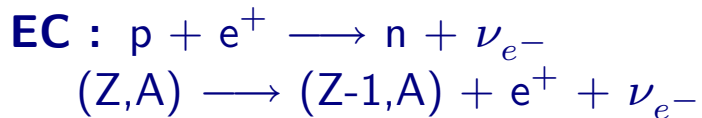
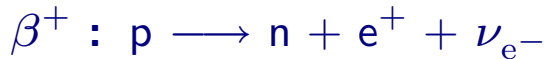
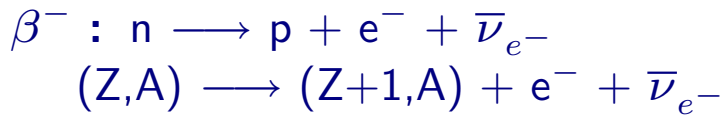
Kaksoisbeetahajoamisen Kokeellinen Tutkiminen

- ① Johdanto: Hajoamisprosessit
- ② Motivaatio
- ③ Kandidaattiytimet 2β -hajoamisessa
- ④ Neutriinon massan kokeellinen määrittäminen
- ⑤ Ideaalinen experimentti
- ⑥ Mooren laki
- ⑦ Taustasäteilystä
- ⑧ Tehtyjä $2\beta 0\nu$ -mittauksia
- ⑨ Tulevista $2\beta 0\nu$ -mittauksista
- ⑩ Muuta

1. Hajoamisprosessi

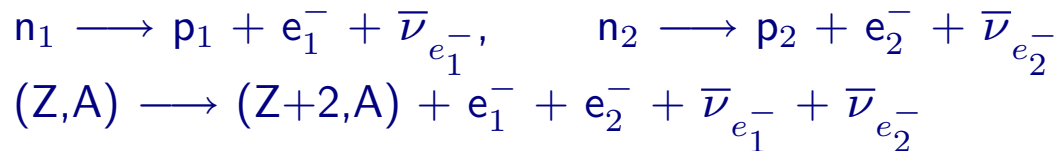
β - ja $\beta\beta$ -hajoamiset

Normaali β -hajoaminen

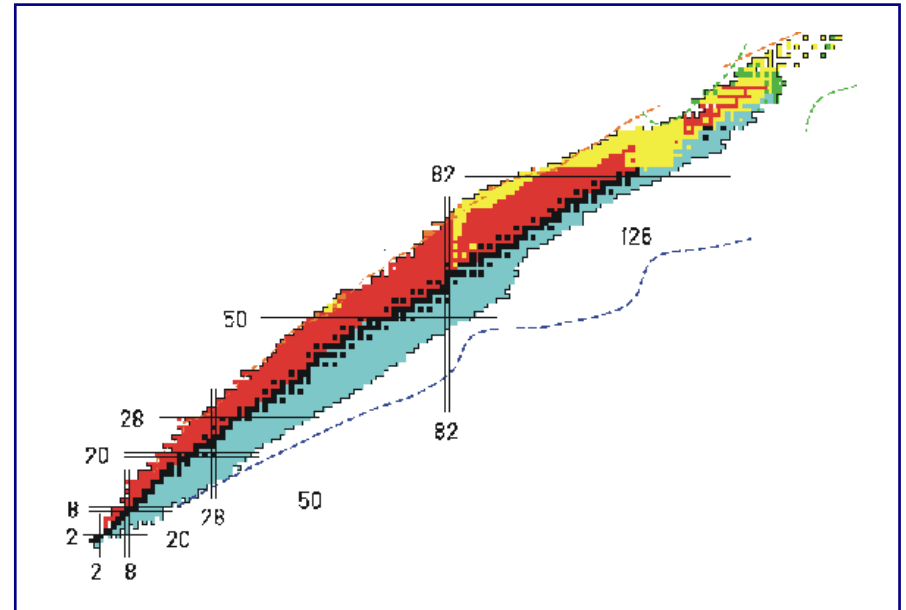
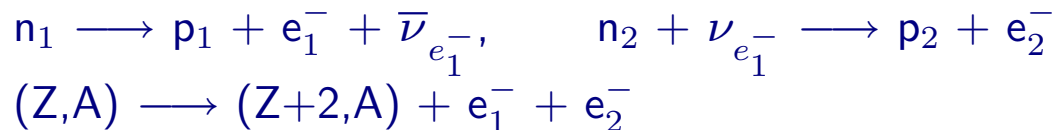


Kaksois- β^- -hajoaminen

(1) neutriinollinen tapaus ($2\beta 2\nu$) :



(2) neutriinoton tapaus ($2\beta 0\nu$) :



1. Hajoamisprosessi massaparaabeli

Puolikokeellinen massakaava

$$M(Z,A) = Zm(^1\text{H}) + Nm_n - B(Z,A)/c^2$$

$$B(Z,A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1)A^{-1/3} - a_{\text{sym}}(A-2Z)^2/A + \delta$$

$$a_v = \text{tilavuustermi} = 15.5 \text{ MeV}$$

$$a_s = \text{pintatermi} = 16.8 \text{ MeV}$$

$$a_c = \text{Coulombin termi} = 0.72 \text{ MeV}$$

$$a_{\text{sym}} = \text{symmetriatermi} = 23 \text{ MeV}$$

1. Hajoamisprosessi massaparaabeli

Puolikokeellinen massakaava

$$M(Z,A) = Zm(^1\text{H}) + Nm_n - B(Z,A)/c^2$$

$$B(Z,A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1)A^{-1/3} - a_{\text{sym}}(A-2Z)^2/A + \delta$$

$$\delta = \text{parivuorovaikutus} = \begin{array}{ll} +a_p A^{-3/4} & \text{Z, N parillisia (A parillinen)} \\ 0 & \text{Z tai N pariton (A pariton)} \\ -a_p A^{-3/4} & \text{Z, N parittomia (A parillinen)} \end{array}$$

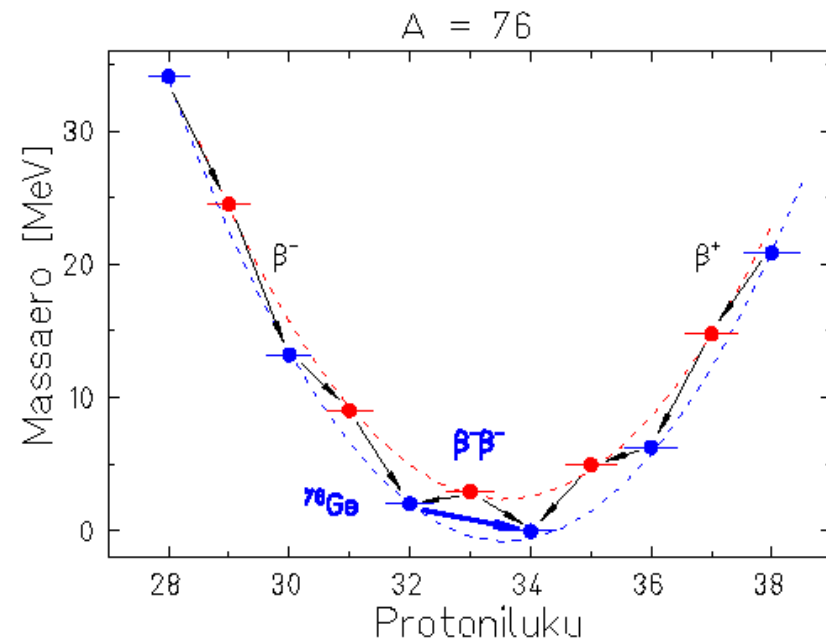
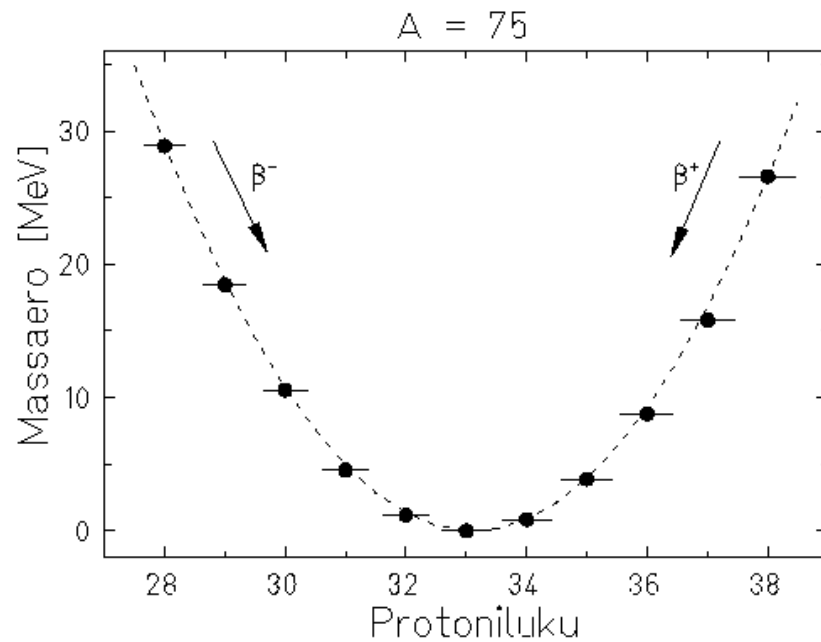
$$a_p = 34 \text{ MeV}$$

1. Hajoamisprosessi massaparaabeli

Puolikokeellinen massakaava

$$M(Z,A) = Zm(^1\text{H}) + Nm_n - B(Z,A)/c^2$$

$$B(Z,A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1)A^{-1/3} - a_{\text{sym}}(A-2Z)^2/A + \delta$$



1. Hajoamisprosessi

Eli

- 2β -hajoaminen voi tapahtua stabiilisuuslaakson pohjalla oleville parillis-parillisille ytimille
- Kandidaatteja on noin 40, joista suurin osa $2\beta^-$ -tyyppiä

Lisäksi

- 2β -hajoaminen on toisen kertaluvun heikon vuorovaikutuksen prosessi
→ puoliintumisajat pitkiä
- Neutriinoton 2β -hajoaminen rikkoo leptoniluvun säilymislakia (kielletty standardissa sähköheikossa teoriassa)
- Ensimmäiset ideat: Racah (1937) ja Furry (1939)

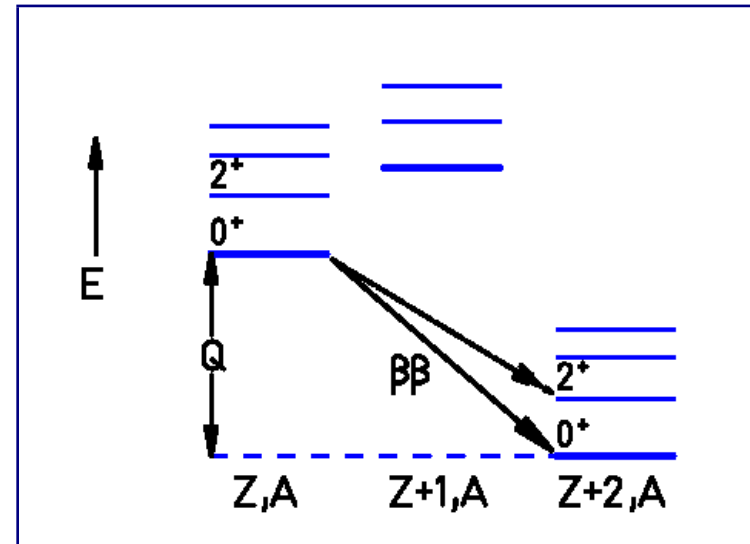
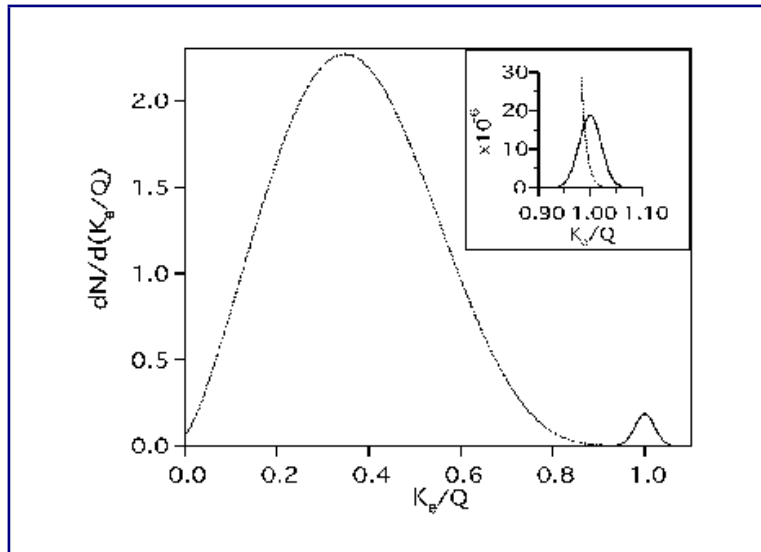
1. Hajoamisprosessi Energiaspektrit

Hajoamisenergia ($Q_{\beta\beta}$ -arvo)

$$Q_{\beta\beta} = \Delta\left(\frac{A}{Z}X\right) - \Delta\left(\frac{A}{Z+2}X\right)$$

$\Delta\left(\frac{A}{Z}X\right)$ on ytimen $\left(\frac{A}{Z}X\right)$ **massavaje**, joka on yleensä taulukoitu massan sijasta

Esim. $Q_{\beta\beta}({}^{76}_{32}\text{Ge}) = \Delta({}^{76}_{32}\text{Ge}) - \Delta({}^{76}_{34}\text{Se}) = -73212 \text{ keV} + 75251 \text{ keV} = 2039 \text{ keV}$



2. Motivaatio

Miksi 2β -hajoamista tutkitaan

- ✓ Neutriinofysiikan kannalta $2\beta 0\nu$ -hajoaminen (eli neutriinoton kaksoisbeetahajoaminen) on mielenkiintoisempi $2\beta 2\nu$ -hajoaminen
 - ovatko neutriinot **Dirac**- vai **Majorana**-hiukkasia
 - pystyy määrittämään neutriinon **ABSOLUUTTISEN** massan
- ✓ Viimeaikaiset kokeelliset tulokset **ilmakehän**, **auringon** ja **reaktoreiden** neutriinomittauksista osoittavat, että
 - ① ainakin yhdellä neutriinotyypillä on massa suurempi kuin **50 meV**
 - ② neutriinot oskilloivat
 - seuraavan sukupolven $2\beta 0\nu$ -kokeiden herkkyys efektiiviseen Majorana-neutriinon massaansa on (pitäisi olla) tämän rajan alapuolella

3. 2β -kandidaattiytimetkun $Q_{\beta\beta} \geq 1.7$ MeV

Nuclide	$Q_{\beta\beta}$ [keV]	Abundance δ [%]	$T_{1/2}^{2\nu}(\text{exp.})$ [years]	$T_{1/2}^{0\nu}(\text{exp.})$ [years]	$\langle m_\nu \rangle$ [eV]	comments
^{48}Ca	4272	0.187	$(4.2 \pm 1.2) \times 10^{19}$	$> 9.5 \times 10^{21}$	< 8.3	(a) , (b) ,
^{76}Ge	2039	7.61	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^{21}$	$> 1.9 \times 10^{25}$	< 0.35	
				$> 1.6 \times 10^{25}$	$< 0.33 - 1.35$	
^{82}Se	2995	8.73	$(9.2 \pm 1.0) \times 10^{19}$	$> 2.7 \times 10^{22}$	< 5	
^{96}Zr	3350	2.80	$(1.4^{+3.5}_{-0.5}) \times 10^{19}$			(a)
^{100}Mo	3034	9.63	$(8.0 \pm 0.6) \times 10^{18}$	$> 5.5 \times 10^{22}$	< 2.1	
^{110}Pd	2000	11.72				
^{116}Cd	2805	7.49	$(3.2 \pm 0.3) \times 10^{19}$	$> 7 \times 10^{22}$	< 2.6	
^{124}Sn	2287	5.79				
^{130}Te	2529	34.08	$(2.7 \pm 0.1) \times 10^{21}$	$> 1.4 \times 10^{23}$	$< 1.1 - 2.6$	
^{136}Xe	2468	8.87	$> 8.1 \times 10^{20}$	$> 4.4 \times 10^{23}$	$< 1.8 - 5.2$	
^{148}Nd	1929	5.7				
^{150}Nd	3367	5.6	$(7.0^{+11.8}_{-0.3}) \times 10^{18}$	$> 1.2 \times 10^{21}$	< 3	
^{160}Gd	1730	21.86				

 (a) β -hajoaminen energettisesti sallittu. (b) Materiaali erittäin kallis.

4. Neutriinon Massan Määrittäminen Kokeellisesti

$2\beta 0\nu$ -hajoamisen puoliintumisajasta

Neutriinottoman 2β -hajoamisen hajoamistodennäköisyys (puoliintumisaika) $T_{1/2}(0\nu)$ on (kääntäen) verrannollinen efektiivisen Majonara-neutriinon massan $\langle m_\nu \rangle$ neliöön, vaihetekijään $G_{0\nu}$ ja ytimen matriisielementtiin NME

$$T_{1/2}(0\nu)^{-1} = G_{0\nu} \times |\text{NME}|^2 \times \langle m_\nu \rangle^2$$

- puoliintumisaika (tai sen alaraja) $T_{1/2}(0\nu)$ saadaan mittaamalla
- vaihetekijä $G_{0\nu}$ on helppo laskea
- ytimen matriisielementti, joka sisältää informaation ytimen rakenteesta, on vaikea laskea (osataan laskea riittävän hyvin vai muutamille 2β -ytimille)

4. 2β -puoliintumisajan Kokeellinen Määrittäminen

Puoliintumisajan alaraja $T_{1/2}(0\nu)$ saadaan kaavasta

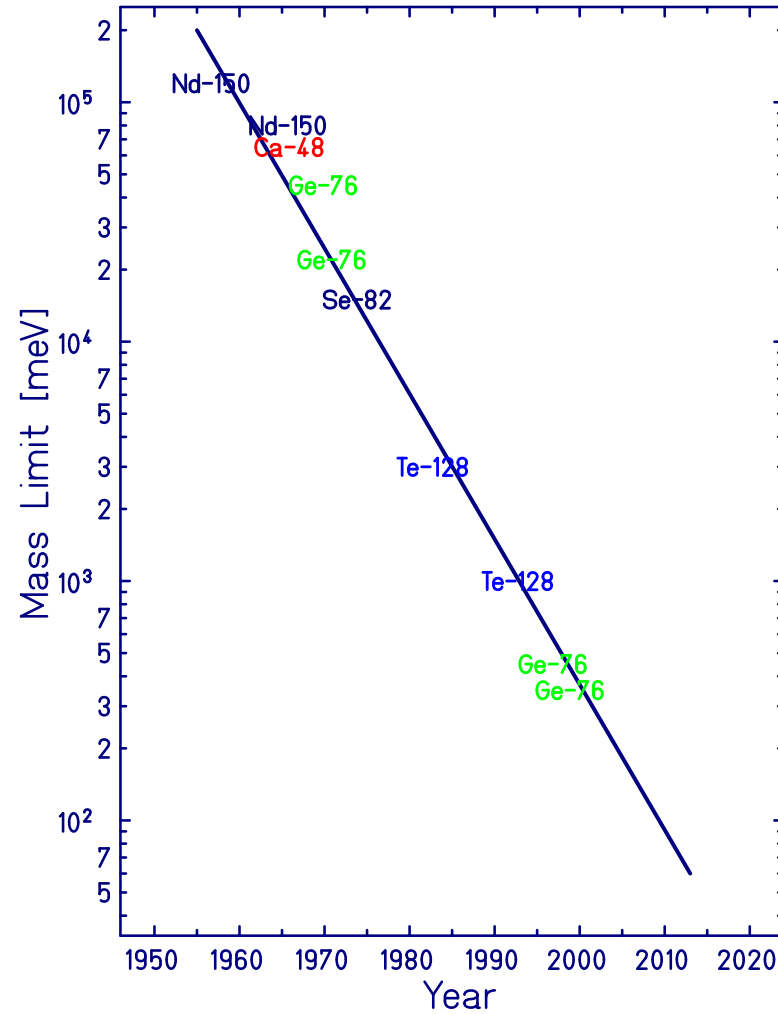
$$T_{1/2} \sim \epsilon \cdot \delta \cdot \left[\frac{M \cdot \tau}{\Delta E \cdot R_{bg}} \right]^{1/2}$$

- ϵ on ilmaisimen tehokkuus,
- δ on kandidaattitytimen runsaus tai rikastusaste,
- τ on mittausaika (vuosissa),
- M kokonaismassa (kilogrammoissa),
- ΔE ilmaisimen energioresoluutio (FWHM) (yksikkö: keV),
- R_{bg} taustasäteilyn osuus $Q_{\beta\beta(0\nu)}$ -energian kohdalla (counts/(yr·keV·kg))

5. An Ideal Double- β Decay Experiment

- The detector mass must be large enough to reach the 50-meV limit (~ 1 ton of isotope)
- The $\beta\beta(0\nu)$ source must be extremely low in radioactive contamination
- Although the use of natural isotope will be less costly, the enrichment process provides a good level of purification and also results in a (usually) smaller volume detector
- A small detector volume minimises internal background (which scale with the detector volume). It also minimises external background by allowing smaller shields and structures (active detector)
- Good energy resolution
- Ease of operation due to long experiments and remote locations
- A large $Q_{\beta\beta}$ -value gives faster $\beta\beta(0\nu)$ rate and places the region of interest above many potential background activities
- A relatively slow $\beta\beta(2\nu)$ rate helps to control the experiment
- Identifying the daughter in coincidence with the $\beta\beta$ decay would eliminate most potential background events except $\beta\beta(2\nu)$
- Good spatial resolution and timing information can help reject background processes
- The nuclear theory is better understood in some isotopes than others.

6. Mooren laki



7. Taustasäteily maanalaisissa mittauksissa

$2\beta 0\nu$ -mittaukset ovat oleellisesti **kamppailua ja suojautumista taustasäteilyä vastaan**

Taustasäteily, joka vaikeuttaa $2\beta 0\nu$ -mittausten suorittamista, voidaan jakaa kolmeen ryhmään

① Luonnollinen ja ihmisen aikaansaama radioaktiivisuus

- uraani- ja torium-ketjut (^{208}Tl ja ^{214}Bi), ^{40}K
- keinotekoisesti tuotetut $^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{42}Ar , ^{85}Kr

② Kosminen säteily

- kosmisten hiukkasten (esimeriksi myonit) vuorovaikutus ilmaisimen kanssa

③ $2\beta 2\nu$ -hajoaminen

8. Tehtyjä $\beta\beta(0\nu)$ mittauksia

Ensimmäinen $2\beta 0\nu$ -mittaus : Fireman 1948 [Phys. Rev. 74 (1948) 1238]

28 eri ytimen $2\beta 0\nu$ -hajoamista tutkittu (suorissa) mittauksissa

Yhtään $2\beta 0\nu$ -hajoamista ei ole havaittu, $2\beta 2\nu$ -hajoaminen on havaittu 7 ytimelle

Isotope	Experimental $T_{1/2}(2\nu)$ [yr]	Experimental $T_{1/2}(0\nu)$ [yr]	$\langle m_\nu \rangle$ [eV]	Experiment / Reference
^{48}Ca	$(4.2 \pm 1.2) \times 10^{19}$	$> 9.5 \times 10^{21}$	< 8.3	You Ke <i>et al.</i> , Phys. Lett B265 (1991) 53
^{76}Ge	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^{21}$	$> 1.9 \times 10^{25}$	< 0.35	Heidelberg Moscow (1999)
		$> 1.6 \times 10^{25}$	$< 0.33 - 1.35$	IGEX (1999)
^{82}Se	$(9.2 \pm 1.0) \times 10^{19}$	$> 2.7 \times 10^{22}$	< 5	S.R. Elliott <i>et al.</i> , Phys. Rev. C46 (1992) 1535
^{100}Mo	$(8.0 \pm 0.6) \times 10^{18}$	$> 5.5 \times 10^{22}$	< 2.1	ELEGANTS (2001)
^{116}Gd	$(3.2 \pm 0.3) \times 10^{19}$	$> 7.0 \times 10^{22}$	< 2.6	F.A. Danevich <i>et al.</i> , Phys. Rev. C62 (2000) 044501
^{128}Te		$> 7.7 \times 10^{24}$	$< 1.1 - 1.5$	T. Bernatowicz <i>et al.</i> , Phys. Rev. C47 (1993) 806
^{130}Te		$> 1.4 \times 10^{23}$	$< 1.1 - 2.6$	MIBETA (2000)
^{136}Xe		$> 4.4 \times 10^{23}$	$< 1.8 - 5.2$	GOTTHARD TUNNEL (1998)

→ verrattuna nykytilanteeseen: neutriinon massan mittausherkkyyys pitäisi saada vähintään pari kertaluokkaa matalammaksi

8.1. MIBETA-mittaus

Materiaali: $^{128,130}\text{Te}$

Ilmaisoin: BOLOMETRI

- Hyödyntävät kiteen matalaa lämpökapasiteettia matalassa lämpötilassa. Pienestä energijätöstä syntyy merkittävä kiteen lämpötilannousu, omaavat erittäin hyvän energioresoluution
- koostui 20 kpl TeO_2 kiteestä, kunkin koko $3 \times 3 \times 6 \text{ cm}^3$ ja kokonaismassa 6.8 kg
- jäähdytetty $\sim 10 \text{ mK}$
- lämpö- ja taustasuojaus:
 - ★ superpuhdasta (high-purity) elektrolyyttistä kuparia 2.2 cm
 - ★ matala-aktiivista lyijyä (Roman lead, $< 4 \text{ mBq/kg } ^{210}\text{Pb}$) 10 cm
 - ★ tavallista lyijyä ($16 \pm 4 \text{ Bq/kg } ^{210}\text{Pb}$)
- Energiaresoluutio (FWHM) 2615 keV:n kohdalla : $\Delta E \sim 9 \text{ keV}$
- $\delta(^{130}\text{Te}) = 34\% \rightarrow$ rikastusta ei välttämättä tarvittaisi, silti
 - 2 kidettä $\delta(^{130}\text{Te}) = 93\%$, ja
 - 2 kidettä $\delta(^{128}\text{Te}) = 95\%$

Tausta:

- $R_{bg} \sim 0.5 \text{ counts}/(\text{yr} \cdot \text{kg} \cdot \text{keV}) @ Q_{\beta\beta}(^{130}\text{Te}) = 2529 \text{ keV}$
- suurin osa pintaosien α -aktiivisuuksista

Mittaus:

- Milanon ryhmä
- maan alla, 3500 mwe, Gran Sasso
- $66995 \text{ h} \times \text{kide} \rightarrow 0.66 \text{ kg} \times \text{yr } ^{130}\text{Te} :$

$$T_{1/2}(0\nu) \geq 1.44 \times 10^{23} \text{ yr } (^{130}\text{Te})$$

$$T_{1/2}(0\nu) \geq 8.6 \times 10^{22} \text{ yr } (^{128}\text{Te})$$

8.2. Gotthardin tunneli

Materiaali: ^{136}Xe

Ilmais: TPC (Time Projection Chamber)

- aktiivinen tilavuus 180 l koostuen 24.2 moolista Xe-kaasua ($\delta(^{136}\text{Xe}) = 62.5\%$) 5 atm paineessa (9.1×10^{24} atomia)
- e^- :n lentoradan määrittäminen $\rightarrow$ pienentää taustaa
- Energiaresoluutio (FWHM) $Q_{\beta\beta}(^{136}\text{Xe}) = 2481$ keV kohdalla : $\Delta E \sim 165$ keV (6.6 %)

Tausta:

- $R_{bg} \sim 0.02$ counts/(yr·kg·keV) @ $Q_{\beta\beta}(^{136}\text{Xe}) = 2480$ keV
- hallitseva tausta $2\beta 0\nu$ -alueella johtui Compton-sironneista elektroneista, jotka syntyivät luonnon aktiivisuuksien seurauksena

Mittaus:

- Caltech-Neuchatel-PSI kollaboraatio
- maan alla, Gotthardin maantietunneli (Sveitsi?)
- 6830 h + 6013 h (~ 530 days) $\rightarrow 4.9 \text{ kg} \times \text{yr}$:

$$T_{1/2}(0\nu) \geq 4.4 \times 10^{23} \text{ yr } (^{136}\text{Xe})$$

8.3. Heidelberg & Moscow + IGEX

Heidelberg & Moscow

Ilmaisina

- 5 Ge-ilmaisinta (HPGe), $\delta(^{76}\text{Ge}) = 86\%$, massa 10.96 kg (125.5 moolia)
- passiivinen ja aktiivinen taustasuojaus, pulssin muodon analyysi
- Energiaresoluutio (FWHM) $Q_{\beta\beta}(^{76}\text{Xe}) = 2039 \text{ keV}$ kohdalla : $\Delta E \sim 3.9 \text{ keV}$

Tausta:

- $R_{bg} \sim 0.06 \text{ counts}/(\text{yr} \cdot \text{kg} \cdot \text{keV})$ (PSAn kanssa)
 $R_{bg} \sim 0.20 \text{ counts}/(\text{yr} \cdot \text{kg} \cdot \text{keV})$ (ilman PSAta)
@ $Q_{\beta\beta}(^{76}\text{Xe}) = 2039 \text{ keV}$

Mittaus:

- Heidelbergin ja Moskovan kollaboraatio
- maan alla, Gran Sasso
- $24 \text{ kg} \times \text{yr} : T_{1/2}(0\nu) \geq 1.6 \times 10^{25} \text{ yr } (^{76}\text{Ge})$

IGEX – International Germanium EXperiment

Ilmaisin

- 2 kg rikastettua ^{76}Ge , $\delta(^{76}\text{Ge}) = 88\%$ (HPGe)
- PSA, muovituikeri kosmisten muonien vetoon
- taustasuojaus koostui 2.5 tonnista arkeologista ja 10 tonnista 70-vuotista matala-aktiivista lyijyä
- Energiaresoluutio (FWHM) $Q_{\beta\beta}(^{76}\text{Xe}) = 2039 \text{ keV}$ kohdalla : $\Delta E \sim 4 \text{ keV}$

Tausta:

- $R_{bg} \sim 0.06 \text{ counts}/(\text{yr} \cdot \text{kg} \cdot \text{keV})$ (PSAn kanssa) @ $Q_{\beta\beta}(^{76}\text{Xe}) = 2039 \text{ keV}$

Mittaus:

- maan alla, Danfranc Underground Laboratory (Espanja)
- $8.87 \text{ kg} \times \text{yr}$ (116.75 moolivuotta) : $T_{1/2}(0\nu) \geq 1.57 \times 10^{25} \text{ yr}$ (^{76}Ge)

HM versus IGEX

HM ja IGES saivat saman tuloksen puoliintumisajalle. Niiden tulkinta taustan aiheuttajalle oli kuitenkin erilainen:

- HM:
Hallitsevin taustasäteily syntyi Ge-kiteen ulkopuolella
- IGEX:
Rajoittavin tekijä oli Ge-kiteessä epäpuhtautena ollut ^{68}Ge

8.4. ELEGANTS-mittaus

ELEctron Gamma-ray Neutrino TeleScopy

Materiaali: ^{100}Mo

Ilmaisin: Spektrometri ELEGANT V

- kolme drift-kammiota e^- :n lentoradan mittaukseen
- muoviset tuikerit e^- :n energioiden ja aikojen mittaukseen
- NaI(Tl) tuikerit spektrometrin ympärillä gammojen ja röntgeneiden mittauksen
- suojattu kuparilla ja lyijyllä
- kaksi ^{100}Mo lähdettä ($\delta = 95\%$), 20 mg/cm^2 paksuja, kokonaismassa 171 g, asetettu keskimmäiseen kammioon:
 $171\text{ g } 95\% ^{100}\text{Mo} \rightarrow 1 \times 10^{24}\text{ atomia}$
- ilmaisimella heikompi havaitsemistehokkuus ja energioresoluutio kuin germanium-ilmaisimilla tai bolometreilla, mutta etuna hyvä taustasäteilyn erottelu

Tausta:

- Hallitsevan taustakomponentin $2\beta 0\nu$ -energiaikkunassa pääteltiin tulevan isotooppeista ^{208}Tl ja ^{214}Bi , jotka olivat epäpuhtauksina Mo-lähteessä ja muissa ilmaisinmateriaaleissa

Mittaus:

- maan alla, Oto Cosmo Observatory, Kamioka, (Japani)
- 7582 h + 7333 h (~ 620 days) : $T_{1/2}(0\nu) \geq 5.5 \times 10^{22}$ yr (^{100}Mo)

9. Tulevista $\beta\beta(0\nu)$ mittauksia

koe voi alkaa ~ 10 vuoden kuluessa

Tavoitteena päästä alle 50 meV (eli paria kertalukua suurempaan puoliintumisaikaan nykymittauksiin verrattuna)

$$T_{1/2} \sim \epsilon \cdot \delta \cdot \left[\frac{M \cdot \tau}{\Delta E \cdot R_{bg}} \right]^{1/2}$$

i Ilmaisimen valinta

- ilmaisimen tehokkuus ~ 100 % $\rightarrow$ aktiivinen ilmaisin, esim. ^{76}Ge , ^{116}Gd , ^{130}Te , ^{136}Xe
- hyvä energioresoluutio (FWHM) $\rightarrow$ vähintään ~ 4 % $Q_{\beta\beta}$ -arvosta

ii Materiaalin valinta

- HM: $m(^{76}\text{Ge}) \sim 10$ kg $\rightarrow$ satoja kiloja rikastettua materiaalia
- suuri $Q_{\beta\beta}$

iii Taustasäteily

$\rightarrow$ niin pieni kuin mahdollista $Q_{\beta\beta}$ -alueella

iv Mittausaika erittäin pitkä (10 vuotta)

$\rightarrow$ luotettava ja helppokäyttöinen ilmaisin

9.1. Ehdotettuja Tulevaisuuden $\beta\beta(0\nu)$ mittauksia

Experiment	Source	Detector description	Sensitivity to $T_{1/2}^{0\nu}$ [years]	Reference
COBRA	^{130}Te	10 kg CdTe semiconductors	1×10^{24}	K. Zuber, Phys. Lett B519 (2001) 1
DCBA	^{150}Nd	20 kg ^{enr}Nd layers between tracking chambers	2×10^{25}	N. Ishihara <i>et al.</i> , NIM A443 (2000) 101
NEMO-3	^{100}Mo	10 kg of $\beta\beta(0\nu)$ isotopes (7 kg Mo) with tracking	4×10^{24}	X. Sarazin, hep-ex/0006031
CAMEO	^{116}Cd	1 ton CdWO_4 crystals in liquid scintillator	$\geq 10^{26}$	G. Bellini <i>et al.</i> , EPJ C19 (2001) 43
CANDLES	^{48}Ca	several tons of CaF_2 crystals in liquid scintillator	1×10^{26}	T. Kishimoro <i>et al.</i> , Ann. Rep. Osaka Univ. Lab. Nucl. Studies (2000)
CUORE	^{130}Te	750 kg TeO_2 bolometers	2×10^{26}	F.T. Avignone <i>et al.</i> , hep-ex/0201038
EXO	^{136}Xe	1 ton ^{enr}Xe TPC (gas or liquid)	8×10^{26}	F.A. Danevich <i>et al.</i> , PR C62 (2000) 044501
GEM	^{76}Ge	1 ton ^{enr}Ge diodes in liquid N	7×10^{27}	Yu.G. Zdesenko <i>et al.</i> , J.Phys. G27 (2001) 2129
GENIUS	^{76}Ge	1 ton ^{76}Ge (enr. 86%) diodes in liquid N	1×10^{28}	H.V. Klapdor-Kleingrothaus, hep-ph/0103074
GSO	^{160}Gd	2 ton Gd_2SiO_5 crystal scintillator	2×10^{26}	F.A. Danevich <i>et al.</i> , NP A694 (2001) 375 S.C. Wang <i>et al.</i> , hep-ex/0009014
Majorana	^{76}Ge	0.5 ton 86% segmented ^{enr}Ge diodes	3×10^{27}	C.E. Aalseth <i>et al.</i> , hep-ex/0201021
MOON	^{100}Mo	34 ton ^{nat}Mo sheets between plastic scintillator	1×10^{27}	H. Ejiri <i>et al.</i> , PRL85 (2000) 2917
Xe	^{136}Xe	1.56 ton of ^{enr}Xe in liquid sci.	5×10^{26}	B. Caccianiga <i>et al.</i> , ApP14 (2001) 15
XMASS	^{136}Xe	10 ton of liquid Xe	3×10^{26}	S. Moriyama <i>et al.</i> , XENON01 Workshop, Tokyo

9.2. CUORE

Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

MIBETA-ilmaisimen seuraaja, Gran Sasso Underground Laboratory

Ilmaisim: Bolometri

- 100 kpl TeO_2 kiteitä, kokonaismassa 750 kg
- toimintalämpötila ~ 10 mK
- hyvä energioresoluutio: 5-10 keV (FWHM) 2.5 MeV kohdalla

Suojaus ja Tausta:

- puhdasta kuparia ja matala-aktiivista lyijyä
- arvio: 0.5 - 0.05 counts/(kg·keV·yr)

Herkkyys: $T_{1/2}(0\nu) \geq (1-5) \times 10^{25}$ yr $\rightarrow m_\nu \leq 0.05 - 0.2$ eV

Prototyyppi: CUORICINO (proposal hyväksytty)

- 56 kpl TeO_2 , 42 kg
- $T_{1/2}(0\nu) \geq 10^{24} - 10^{25}$ yr $\rightarrow m_\nu \leq 0.1 - 0.5$ eV

9.3. EXO

The Enriched Xenon Observatory

Ilmaisín:

- 10 tonnia 60-80% rikastettua ^{136}Xe
- pyrkimys havaita myös tytärýdin ^{136}Ba
- joko kaasumainen Xe TPC, tai nestemäinen Xe (LXe) tuikeilmaisín
- TPC: kaksi 35 m^3 moduulia noin 20 atm, 8.4 tonnia Xe
LXe: $\sim$ sama massa, mutta paljon pienempi koko

Lab.: WIPP - Waste Isolation Pilot Plant, USA

Prototype: 100 kg ilmaisín ilman Ba-ytimen havaitsemista hyväksytty

9.4. GENIUS (GEM)

GErmanium NItrogen Underground Setup
(Germanium Experiment for neutrino Mass)

HM-mittauksen seuraaja, Gran Sasso

Idea: HM-mittauksessa dominoiva taustakomponentti Ge-ilmaisimen ulkopuolelta

(✗ Majorana)

→ Ge-ilmaisimien suojataan paksulla nestetyypikerroksella

(→ LN korvataan HP-vedellä)

Ilmaisimien:

- 1 tonni 86% rikastettua ^{76}Ge
- energioresoluutio (FWHM) ~ 6 keV eli ~ 0.3 %
- koko 12 m pitkä ja 12 m halkaisija

Tausta: LN-suojaus → tausta 300 kertaa pienempi kuin nykyisissä mittauksissa

Herkkyys: 10 yr mittausaika (7×10^{27} atomia ^{76}Ge)

→ $T_{1/2}(0\nu) \geq 10^{28}$ yr ja $m_\nu \leq 0.015 - 0.05$ eV

Prototyyppi: GENIUS-TF rakenteilla

9.5. Majorana

Idea: IGEX-mittauksessa taustan pääteltiin syntyvän ^{68}Ge -ytimestä (epäpuhtautena ^{76}Ge :ssa)
→ segmentointi ja PSA pienentämään taustaa (✗ GENIUS)

Ilmaisim:

- 210 HPGe, $\delta(^{76}\text{Ge}) = 86 \%$
- kokonaismassa 500 kg

Suojaus:

- konventionaalinen matala-aktiivinen gryostaatti, hyvin puhdasta kuparia ($< 25 \mu\text{Bq/kg}$ ^{226}Ra , $9 \mu\text{Bq/kg}$ ^{228}Th)
- ilmaisimet suojattu matala-aktiivisella lyijyllä ja kuparilla

Tausta: segmentoidut ilmaisimet ja PSA → $\sim 0.01 \text{ counts}/(\text{kg} \cdot \text{keV} \cdot \text{yr})$

Tavoite: $T_{1/2}(0\nu) \geq 10^{27} \text{ yr}$ ja $m_\nu \leq 0.05 - 0.15 \text{ eV}$

10. Onko $2\beta 0\nu$ jo havaittu ?

- H.V. Klapdor-Kleingrothaus et al.,
Modern Physics Letters A16 (2001) 2409 - 2420
Evidence for Neutrinoless Double Beta Decay

$$^{76}\text{Ge} : T_{1/2}(0\nu) = (0.8 - 18.3) \times 10^{25} \text{ yr} \quad (\rightarrow \text{best value: } T_{1/2} = 1.5 \times 10^{25} \text{ yr})$$

$$\rightarrow \langle m_\nu \rangle = (0.11 - 0.56) \text{ eV}$$

- C.A. Aalseth et al.,
Modern Physics Letters Axx (200x) xxxx
Comment on “Evidence for Neutrinoless Double Beta Decay”

EVIDENCE FOR NEUTRINOLESS DOUBLE BETA DECAY

H.V. Klapdor-Kleingrothaus^{1,3},
A. Dietz¹, H.L. Harney¹, I.V. Krivosheina^{1,2}

¹*Max-Planck-Institut für Kernphysik, Postfach 10 39 80, D-69029 Heidelberg, Germany*

²*Radiophysical-Research Institute, Nishnii-Novgorod, Russia*

³*Spokesman of the GENIUS and HEIDELBERG-MOSCOW Collaborations, e-mail: klapdor@gustav.mpi-hd.mpg.de, home page: http://www.mpi-hd.mpg.de/non_acc/*

The data of the HEIDELBERG-MOSCOW double beta decay experiment for the measuring period August 1990 - May 2000 (54.9813 kg y or 723.44 molyears), published recently, are analyzed using the potential of the Bayesian method for low counting rates. First evidence for neutrinoless double beta decay is observed giving first evidence for lepton number violation. The evidence for this decay mode is 97% (2.2σ) with the Bayesian method, and 99.8% c.l. (3.1σ) with the method recommended by the Particle Data Group. The half-life of the process is found with the Bayesian method to be $T_{1/2}^{0\nu} = (0.8 - 18.3) \times 10^{25}$ y (95% c.l.) with a best value of 1.5×10^{25} y. The deduced value of the effective neutrino mass is, with the nuclear matrix elements from ¹, $\langle m \rangle = (0.11 - 0.56)$ eV (95% c.l.), with a best value of 0.39 eV. Uncertainties in the nuclear matrix elements may widen the range given for the effective neutrino mass by at most a factor 2. Our observation which at the same time means evidence that the neutrino is a Majorana particle, will be of fundamental importance for neutrino physics. **PACS.** 14.69.Pq Neutrino mass and mixing - 23.40.Bw Weak-interaction and lepton (including neutrino) aspects - 23.40.-s Beta decay; double beta decay; electron and muon capture.

The neutrino oscillation interpretation of the atmospheric and solar neutrino data, deliver a strong indication for a non-vanishing neutrino mass. While such kind of experiments yields information on the difference of squared neutrino mass eigenvalues and on mixing angles, the absolute scale of the neutrino mass is still unknown. Information from double beta decay experiments is indispensable to solve these questions ^{11,10}. Another important problem is that of the fundamental character of the neutrino, whether it is a Dirac or a Majorana particle ^{2,3}. Neutrinoless double beta decay could answer also this question. Perhaps the main question, which can be investigated by double beta decay with high sensitivity, is that of lepton number conservation or non-conservation.

Double beta decay, the rarest known nuclear decay process, can occur in different modes:

KK-Evid-In J Mod Lett A: submitted to World Scientific on January 24, 2002

Modern Physics Letters A,
© World Scientific Publishing Company

COMMENT ON "EVIDENCE FOR NEUTRINOLESS DOUBLE BETA DECAY"

C. E. Aalseth¹, F. T. Avignone III², A. Barabash³, F. Boehm⁴, R. L. Brodzinski¹, J. I. Collar⁵, P. J. Doe⁶, H. Ejiri⁷, S. R. Elliott^{6*}, E. Fiorini⁸, R. J. Gaitskill⁹, G. Gratta¹⁰, R. Hazama⁶, K. Kazkaz⁶, G. S. King III², R. T. Kouzes¹, H. S. Miley¹, M. K. Moe¹¹, A. Morales¹², J. Morales¹², A. Piepke¹³, R. G. H. Robertson⁶, W. Tornow¹⁴, P. Vogel⁴, R. A. Warner¹, J. F. Wilkerson⁶

¹*Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 99352, USA*

²*Department of Physics and Astronomy, University of South Carolina, Columbia, SC 29208, USA*

³*Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow 117259, Russia*

⁴*Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA*

⁵*Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA*

⁶*Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA*

⁷*International Institute for Advanced Studies, Kizu-cho, Kyoto, 619-0025 and JASRI, SPring-8, Hyogo 679-5198, Japan*

⁸*Emeritus, Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Ibaraki, Osaka 567, Japan*

⁹*Dipartimento di Fisica dell' Università di Milano-Bicocca and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Milano, Italy*

¹⁰*Department of Physics, Brown University, Providence, RI 02912, USA*

¹¹*Physics Department, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA*

¹²*Emeritus, Department of Physics and Astronomy, University of California, Irvine, CA 92697, USA*

¹³*Laboratory of Nuclear and High Energy Physics, University of Zaragoza, 50009 Zaragoza, Spain*

¹⁴*Department of Physics and Astronomy, University of Alabama, Tuscaloosa, AL 35487, USA*

¹⁵*Department of Physics, Duke University, Durham, NC 27708, USA*

Received (received date)
Revised (revised date)

We comment on the recent claim for the experimental observation of neutrinoless double-beta decay. We discuss several limitations in the analysis provided in that paper and conclude that there is no basis for the presented claim.

1. Introduction

In a paper by Klapdor-Kleingrothaus, Dietz, Harney, and Krivosheina¹ (Hereafter referred to as KDHK) evidence is claimed for zero-neutrino double-beta decay in ⁷⁶Ge. The high quality data, upon which this claim is based, was compiled by the careful efforts of the Heidelberg-Moscow collaboration, and is well documented².

*Corresponding author

11. Rikastuksesta

Ainoastaan Venäjällä olevat rikastuslaitokset pystyvät tällä hetkellä tuottamaan satoja kiloja rikastettua materiaalia

Electro Chemical Plant (ECP), Krasnojarsk

Rikastustuotto tällä hetkellä

- ^{76}Ge : ~ 20 kg/yr (laitteistolla, jota ei ole koskaan käytetty uraanin rikastukseen)
- ^{136}Xe : ~ 300 kg/yr

Investoinneilla

- ^{76}Ge : ~ 30 kg/yr $\rightarrow \sim 50$ kg/yr $\rightarrow \sim 100$ kg/yr
- ^{136}Xe : ~ 2 tonnia/yr

Referenssiluettelo

- ① Steven R. Elliott,
Experiments for Neutrinoless Double-Beta Decay,
Int. Journal of Modern Physics A (2003), nucl-ex/0301011
- ② Steven R. Elliott, Petr Vogel,
Double Beta Decay
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci 52 (2002) 115-151
- ③ Yuri Zdesenko,
Colloquium: The future of double β decay
Rev. Modern Physics 74 (2002) 663 - 684