

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

Timo Enqvist

Taustasäteily
maanalaisissa mittauksissa

Taustasäteily maanalaisissa mittauksissa

- ① Johdanto: Radioaktiivisuudesta luonnossa
- ② Luonnollinen radioaktiivisuus taustasäteilynä
- ③ Kosminen säteily ja Indusoitu aktiivisuus taustasäteilynä
- ④ Keinotekoisesti tuotettu aktiivisuus taustasäteilynä
- ⑤ $2\beta 2\nu$ taustasäteilynä $2\beta 0\nu$ -hajoamisessa
- ⑥ Esimerkkispektrejä
- ⑦ Esimerkki: GENIUS-TF
- ⑧ Radioaktiivisuus Pyhäsalmen kaivoksessa

1. Radioaktiivisuus Luonnossa

- Radioaktiivisuutta on esiintynyt maapallolla aina
- Luonnosta löytyvät radioaktiiviset aineet jaetaan yleisesti kolmeen luokkaan
 - ① primordial-aineet
 - ② cosmogenic-aineet
 - ③ keinotekoiset aineet
- ★ luonnossa on yli 60 radioaktiivista alkuainetta
- Luonnon radioaktiivisuus on yleistä kalliossa ja maaperässä, valtamerissä ja vesistöissä, ja rakennusmateriaaleissa

→ sitä esiintyy kaikkialla !

1.1 Primordial-aineet

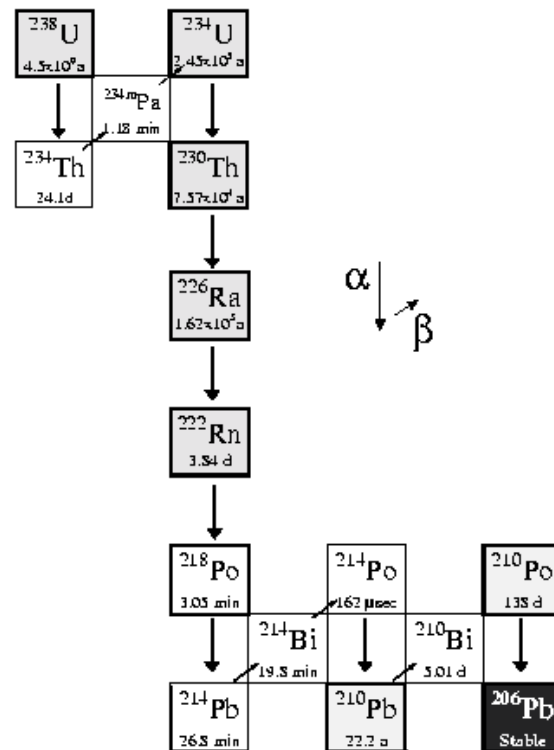
- Vanhempia kuin maapallo
- tyypillisesti pitkäikäisiä, puoliintumisaika jopa miljardeja vuosia
- Esimerkiksi

①	^{232}Th	$1.41 \times 10^{10} \text{ yr}$	torium-sarja	esiintyy maaperässä
②	^{238}U	$4.47 \times 10^9 \text{ yr}$	uraani-sarja	$\delta=99.2745\%$, esiintyy maaperässä
③	^{235}U	$7.04 \times 10^8 \text{ yr}$	aktinium-sarja	$\delta=0.72\%$
④	^{237}Np	$2.2 \times 10^6 \text{ yr}$	neptunium-sarja	
⑤	^{40}K	$1.28 \times 10^9 \text{ yr}$	$\delta=0.012\%$, 0.04-1.1 Bq/g maaperässä	
⑥	Muita: ^{50}V , ^{87}Rb , ^{113}Cd , ^{115}In , ..., ^{190}Pt , ^{209}Bi			
★	^{226}Ra	$1.60 \times 10^3 \text{ yr}$	uraani-sarjan jäsen	
★	^{222}Rn	3.82 d	jalokaasu, uraani-sarjan jäsen	
- Neljän hajoamisketjun lopputuloksena syntyvät raskaimmat pysyvät isotoopit: ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{209}Bi

uraani-sarja

Uranium Series

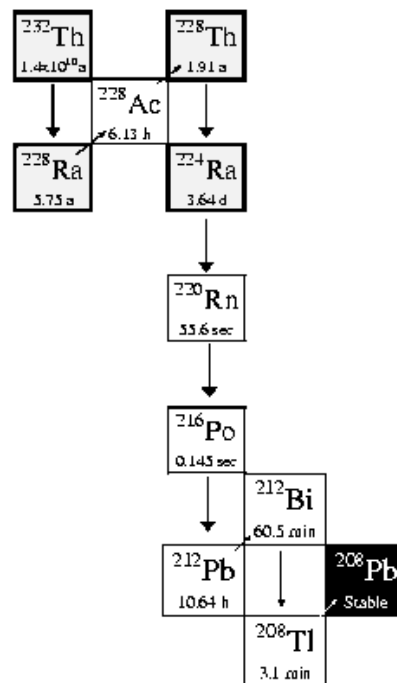
$$A = 4n + 2$$



torium-sarja

Thorium Series

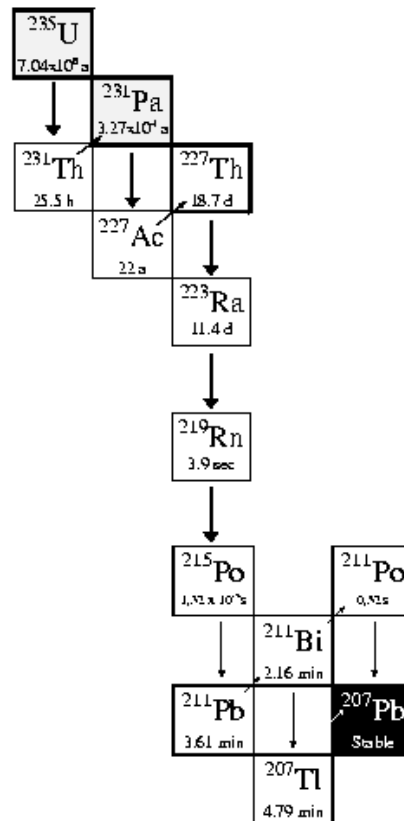
$$A = 4n$$



aktinium-sarja

Actinium Series

$$A = 4n + 3$$



1.2 Cosmogenics

- Kosmisen säteilyn synnyttämät radioaktiiviset isotoopit
- Kosminen säteily jaetaan yleensä kahteen tyyppiin, primääri- ja sekundäärisäteilyyn
 - ★ yläilmakehässä vuorovaikutukset suurienergisten protonien kanssa
 - ★ lähempänä maan pintaa vuorovaikutus elektronien, neutronien, fotonien ja muonien kanssa
 - vuorovaikutukset ilmakehän ja maanpinnan atomien kanssa
- Tyypillisesti kevyempiä ja paljon lyhytikäisempiä kuin primordial-aineet
- Esimerkkejä
 - ① ^{14}C 5730 yr $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 0.22 Bq/g orgaanisissa aineissa
 - ② ^3H 12.3 yr CR: N,O; spall: $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$
 - ③ ^7Be 53.3 d CR: N,O
 - ④ Muita: ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , $^{37,39}\text{Ar}$, ..., ^{38}Mg , ^{80}Kr
- Suuri osuus kosmisesta säteilystä tulee aurinkokunnan ulkopuolelta, osa auringosta

1.2 Cosmogenics

- Kosmisen säteilyn synnyttämät isotoopit germanium-kiteessä, altistunut säteilylle 10 päivää, sitten viety maan alle yhdeksi vuodeksi [H.V. Klapdor-Kleingrothaus et al., NIM 481 (2002) 149]

Isotooppi	Hajoamismuoto	$T_{1/2}$	Energia kiteesen [keV]	Aktiivisuus [$\mu\text{Bq/kg}$]
^3H	β^-	12.33 yr	$E_{\beta^-}=18.6$	3.6
^{49}V	EC	330 d	$E_K(\text{Ti})=5$, no γ	0.79
^{54}Mn	$\text{EC}+\beta^+$	312.3 d	$E_\gamma=840.8$, $E_K(\text{Cr})=5.5$	10.3
^{55}Fe	EC	2.73 yr	$E_K(\text{Mn})=6$, no γ	0.52
^{57}Co	EC	271.8 d	$E_\gamma=20.81$, $E_K(\text{Fe})=6.4$	1.17
^{58}Co	$\text{EC}+\beta^+$	70.9 d	$E_\gamma=817.2$, $E_K(\text{Fe})=6.4$	0.49
^{60}Co	β^-	5.27 yr	$E_{\beta^-}=318$, $E_\gamma=1173, 1133$	0.24
^{63}Ni	β^-	100.1 yr	$E_{\beta^-}=66.95$, no γ	0.01
^{65}Zn	$\text{EC}+\beta^+$	244.3 d	$E_\gamma=1124.4$, $E_K(\text{Cu})=8-9$	9.08
^{68}Ge	EC	270.8 d	$E_K(\text{Ga})=10.37$	676
^{68}Ga	$\text{EC}+\beta^+$	67.6 m	$Q\text{-value}=2921.1$	676

1.3 Keinotekoisesti Tuotetut Radioaktiiviset Aineet

- Keinotekoinen tuotto alkoi 1930- ja 1940-luvuilla, ja siitä lähtien pääasiassa ydinlatausten ja ydinvoimaloiden kautta kerääntynyt luontoon
 - määrät kuitenkin pieniä, ja puoliintumisajat lyhyitä, verrattuna primordiaalisiin tai cosmogenics-aineisiin
- Esimerkkejä

①	^3H	12.3 yr	ydinasetestit ja valmistus, fissioreaktorit
②	^{131}I	8.04 d	ydinasetestien ja reaktoreiden fissiotuote, käytetään lääketieteessä
③	^{129}I	1.57×10^7 yr	ydinasetestien ja reaktoreiden fissiotuote
④	^{137}Cs	30.17 yr	ydinasetestien ja reaktoreiden fissiotuote
⑤	^{90}Sr	28.78 yr	ydinasetestien ja reaktoreiden fissiotuote
⑥	^{99}Tc	2.11×10^5 yr	lääketieteessä käytetyn ^{99}Mo :n hajoamistuote
⑦	^{239}Pu	2.41×10^4 yr	$^{238}\text{U} + n \longrightarrow ^{239}\text{Np} (\beta^-) \longrightarrow ^{239}\text{Pu}$

1.4 Luonnollisen Radioaktiivisuuden Esiintyminen

(a) Maaperän Radioaktiivisuus

Laskelma

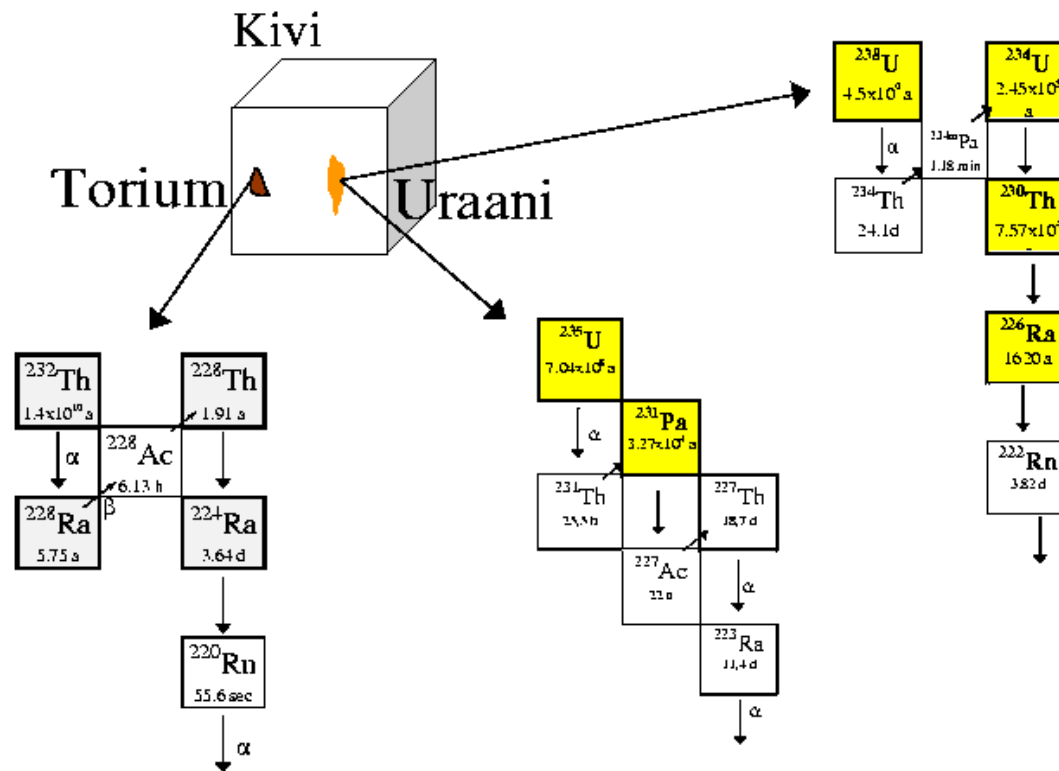
Maapalan koko 1 neliömaili ja syvyys 1 jalka. Kokonaistilavuus siten $7.9 \times 10^5 \text{ m}^3$.

Ydin	Aktiivisuus	Ytimen massa	Aktiivisuus maapalassa
Uraani	25 Bq/kg	2200 kg	31 GBq
Torium	40 Bq/kg	12000 kg	52 GBq
Kalium (^{40}K)	400 Bq/kg	2000 kg	500 GBq
Radium	48 Bq/kg	1.7 g	63 GBq
Radon	10 kBq/m ³	11 μg	7 GBq
TOTAL			>653 GBq

Laskussa käytetty tyypillisiä arvoja, ja luvut voivat vaihdella paikasta riippuen.

1.4 Luonnollisen Radioaktiivisuuden Esiintyminen

Kiven radioaktiivisuus



1.4 Luonnollisen Radioaktiivisuuden Esiintyminen

(b) Valtamerien Luonnollinen Radioaktiivisuus

Vesimäärät (tilavuudet) [Lähde: 1990 Wolrd Almanac]

- Tyyni valtameri = $6.6 \times 10^{17} \text{ m}^3$
- Atlantint valtameri = $3.1 \times 10^{17} \text{ m}^3$
- Kaikki valtameret = $1.3 \times 10^{18} \text{ m}^3$

Ydin	Aktiivisuus	Aktiivisuus		
		Tyyni	Atlantti	Kaikki
Uraani	33 mBq/l	22 EBq	11 EBq	41 EBq
^{40}K	11 Bq/l	7400 EBq	3300 EBq	14000 EBq
Tritium	0.6 mBq/l	370 PBq	190 PBq	740 PBq
^{14}C	5 mBq/l	3 EBq	1.5 EBq	6.7 EBq
^{87}Rb	1.1 Bq/l	700 EBq	330 EBq	1300 EBq

Aktiivisuudet otettu: 1971 Radioactivity in the Marine Environment, National Academy of Sciences

1.4 Luonnollisen Radioaktiivisuuden Esiintyminen

(c) Luonnollinen Radioaktiivisuus Rakennusmateriaaleissa

Material	uraani		torium		kalium	
	ppm	[mBq/g]	ppm	[mBq/g]	ppm	[mBq/g]
graniite	4.7	63	2	8	4	1184
sandstone	0.45	6	1.7	7	1.4	414
cement	3.4	46	5.1	21	0.8	237
limestone concrete	2.3	31	2.1	8.5	0.3	89
sandstone concrete	0.8	11	2.1	8.5	1.3	385
dry wallboard	1.0	14	3	12	0.3	89

Luvut tyypillisiä arvioita

2. Luonnollinen Radioaktiivisuus Taustasäteilynä

- Luonnossa esiintyvät uraani- ja torium-isotoopit sekä niiden tytäraktiivisuudet (esimerkiksi radon) epäpuhtauksina kaikissa materiaaleissa
 - ① torium-sarja : ^{232}Th
 - ② uraani-sarja : ^{238}U → ongelma yleensä: ^{208}Tl ja ^{214}Bi
 - ③ aktinium-sarja : ^{235}U
- Suojautuminen
 - ★ nestemäiset tuikeilmaisimet [J.B. Benzinger et al., NIM A417 (1998) 278]
 - ★ 'electroformed' kupari [R.L. Brodzinski et al., NIM A292 (1990) 337]
 - ★ CVD (Chemical Vapor Deposited) nikkeli [J. Boger et al., NIM A449 (2000) 172]
- Radon (^{220}Rn ja ^{222}Rn)
 - ★ kaasumainen → kulkeutuu helposti eri paikkoihin
→ diffuuntuvat helposti aineen läpi
 - ★ tytäraktiivisuudet takertuvat helposti pölyyn tai sähköstaattisiin pintoihin
 - ★ suojautuminen
 - ① tiivis rakenne, paineistus
 - ② tehokas ilmastointi

- $2\beta 0\nu$ -mittaus : hajoamissarjojen puoliintumisajat verrannollisia maailmankaikkeuden ikään, mutta hyvin lyhyitä verrattuna $2\beta 0\nu$ -aktiivisuuksiin
 - pienikin määrä U- tai Th-isotooppia aiheuttaa taustasäteilyä
 - ^{208}Tl ja ^{214}Bi isotoopeilla suuret Q -arvot
- ^3H , ^{14}C , ^{40}K : matala $Q_{\beta\beta}$ -arvo
 - eivät häiritse $\beta\beta$ -mittauksia
 - häiritsevät niitä $\beta\beta$ -mittauksia, joissa herkkyys riittävä myös pimeän aineen etsintään (WIMPien elastinen sironta → matala energia)

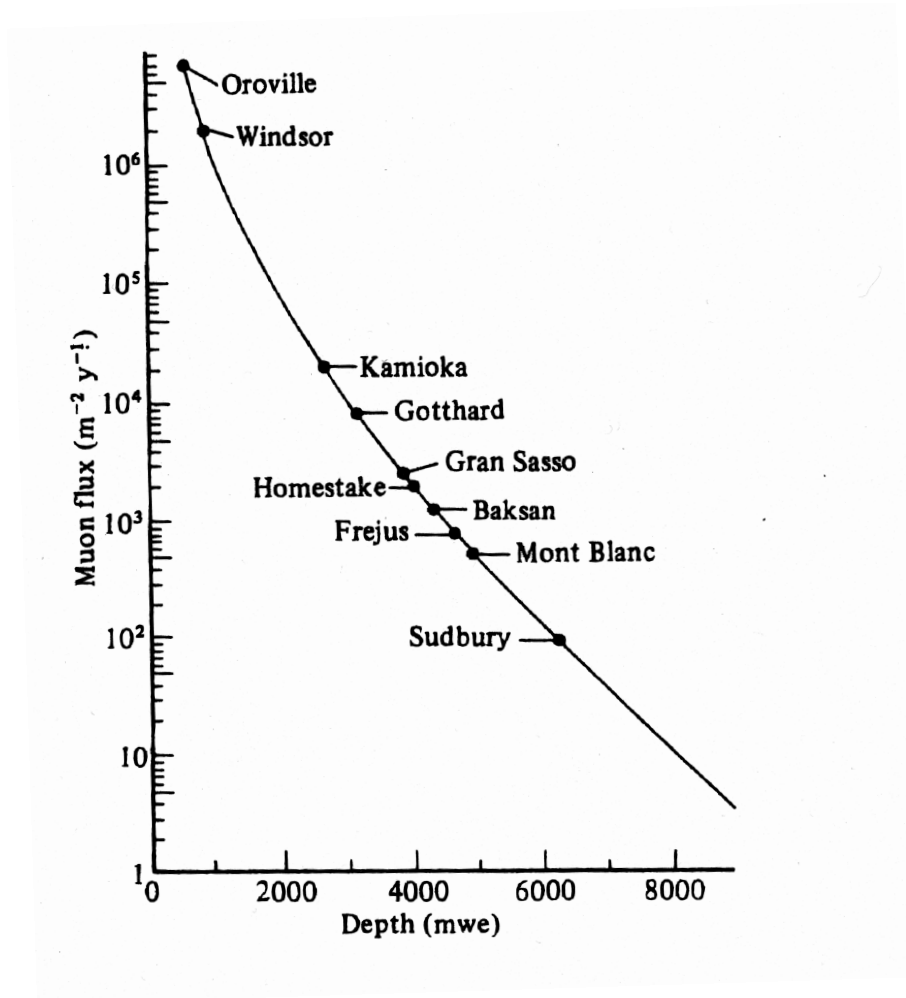
3. Kosminen Säteily ja Indusoitu Aktiivisuus Taustasäteilynä Cosmogenics

- Monia pitkäikäisiä isotooppeja voidaan tuottaa monissa erilaisissa ydinreaktioissa
 - ★ myonit, neutronit, protonit, ...
 - ★ useat isotoopit saattavat omata korkean hajoamisenergian (luokkaa 2-3 MeV)
 - ongelma $\beta\beta$ -mittaukselle
 - ★ useat isotoopit saattavat omata korkean hajoamisenergian (luokkaa - 100 keV)
 - ongelma pimeän aineen mittauksille
- Voidaan tuottaa suojamateriaalissa tai itse ilmaisinaineessa
 - Esimerkiksi ^{68}Ge ($T_{1/2} = 271$ d) : syntyy nopeiden neutroneiden ($E > 100$ MeV) ja stabiilin germaniumin vuorovaikutuksessa
 - GENIUS-ilmaisimen periaate (ulkoinen taustasäteily)
- kosmisten säteiden myonit
 - ★ vuo maan pinnalla $\sim 5 \times 10^9 \text{ m}^{-2}\text{yr}^{-1}$

- Suojautuminen

- ★ mittaukset maan alla

- Kosmisen myönivuon vaimeneminen kivessä



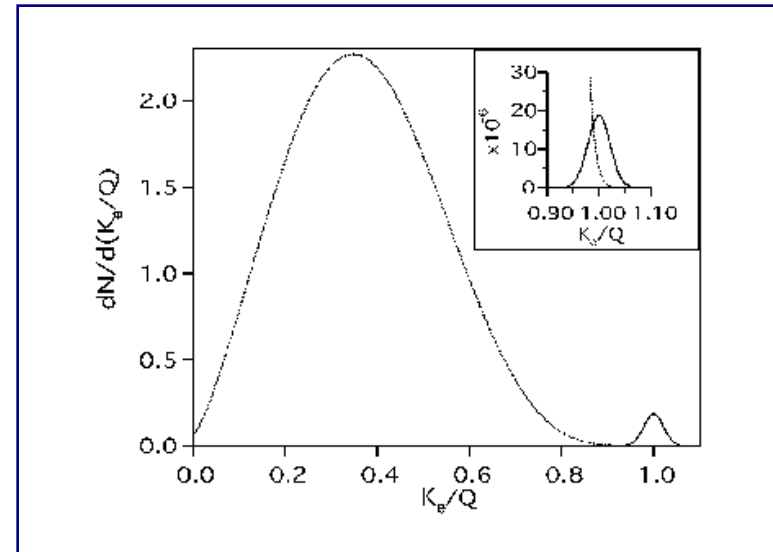
4. Keinotekoisesti Tuotettu Aktiivisuus Taustasäteilynä

Lähteet

- maanpäälliset ydinlataukset
→ 10^5 Bq $^{239,240}\text{Pu}$ levittäytynyt maanpinnalle
- ydinvoimalaonnettomuudet
→ pitkäikäiset isotoopit ^{90}Sr , ^{137}Cs , Pu levinnyt ympäristöön
→ radioaktiiviset jalokaasut ^{42}Ar ja ^{85}Kr
- ei ole yleensä ongelma

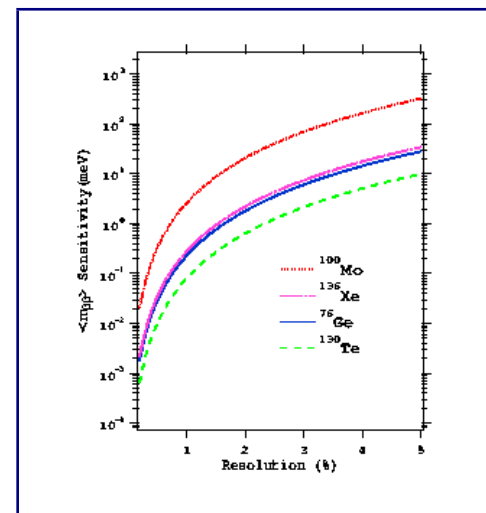
5. $2\beta 2\nu$ -hajoamisen Aiheuttama Tausta

- (1) Lähellä päätepiste-energiaa $2\beta 2\nu$ -spektrin voimakkuus on heikko,
- (2) $T_{1/2}(2\nu)$ paljon lyhyempi kuin $T_{1/2}(0\nu)$
- hyvä energioresoluution erotteluun



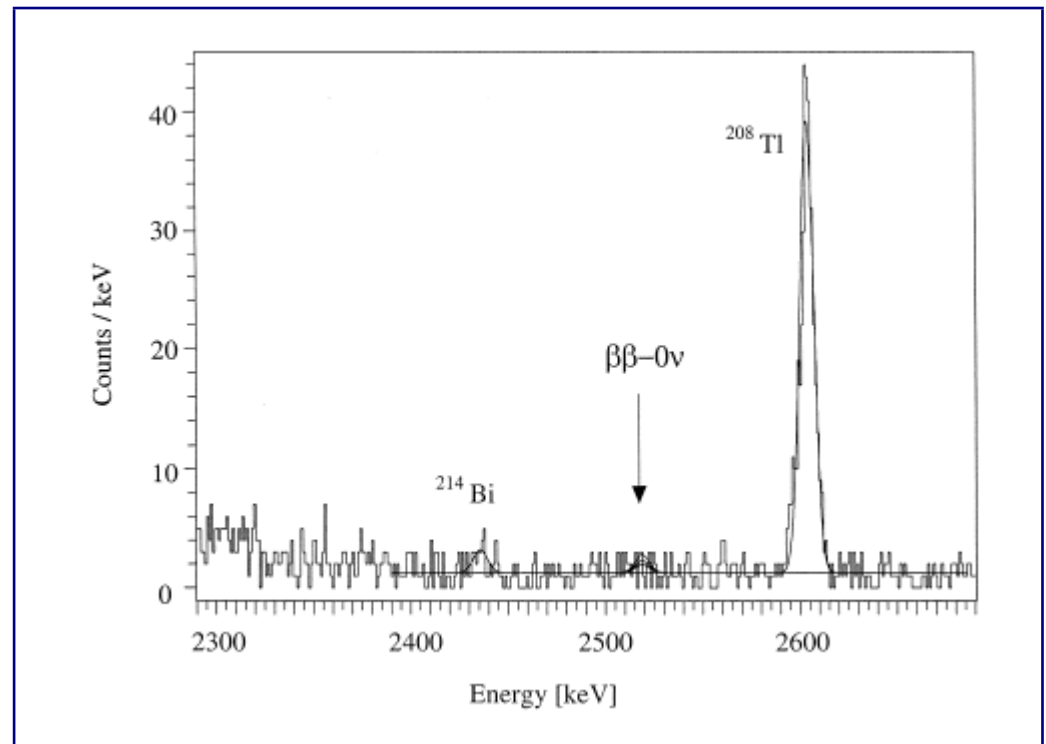
- massan herkkyysraja $2\beta 2\nu$ -taustasta johtuen

$$\langle m_\nu \rangle \sim \frac{7Q\delta^6}{m_e} \cdot \frac{G_{2\nu}}{G_{0\nu}} \cdot \frac{|M_{2\nu}|^2}{|M_{0\nu}|^2} \delta_{0n} \Delta E/Q$$



6. Esimerkkejä Taustaspektreistä I

- $^{128,130}\text{Te}$ $2\beta 0\nu$ -mittaus, Gran Sasso [A. Alessandrello et al., PLB 486 (2000) 13-21]
- TeO_2 bolometri, massa 6.8 kg
- Statistiikka: $0.66 \text{ kg} \times \text{year}$ ^{130}Te



- Kontaminaatiot

- ① uraani- ja toriumsarjat

- ^{208}Tl ($E_\gamma=2614$ keV): $r = 0.0055$ counts/h (0.13 counts/d)

- ^{214}Bi ($E_\gamma=2448$ keV): $r = 0.0003$ counts/h (0.007 counts/d)

- ② ^{40}K ($E_\gamma=1461$ keV): $r = 0.032$ counts/h (0.77 counts/d)

- ③ ydinlaskeumat

- ^{54}Mn ($E_\gamma=835$ keV): $r = 0.0020$ counts/h (0.048 counts/d)

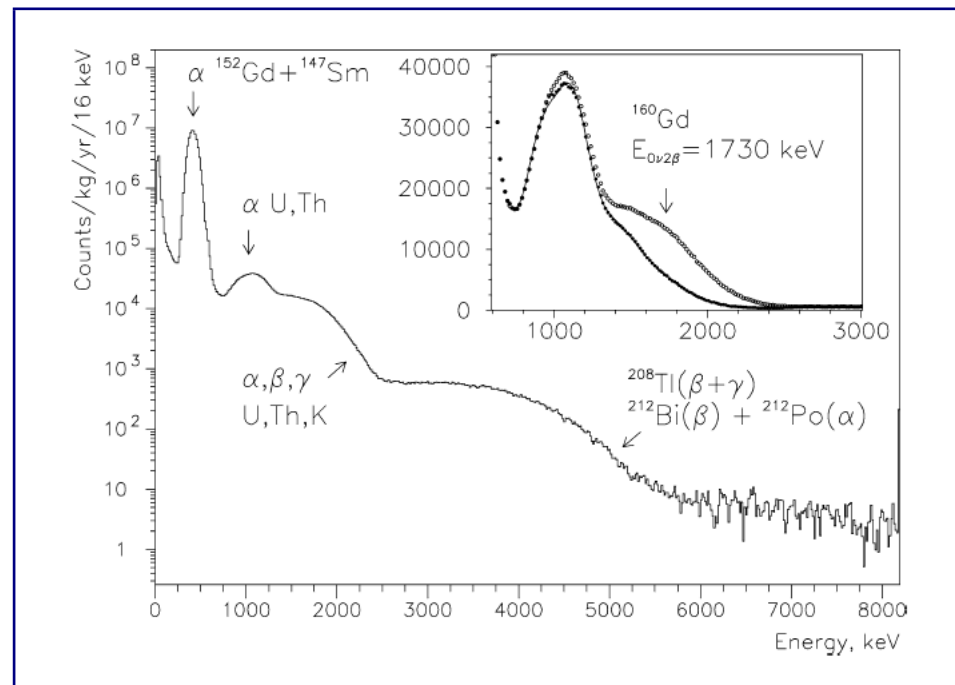
- ^{137}Cs ($E_\gamma=662$ keV): $r = 0.0027$ counts/h (0.065 counts/d)

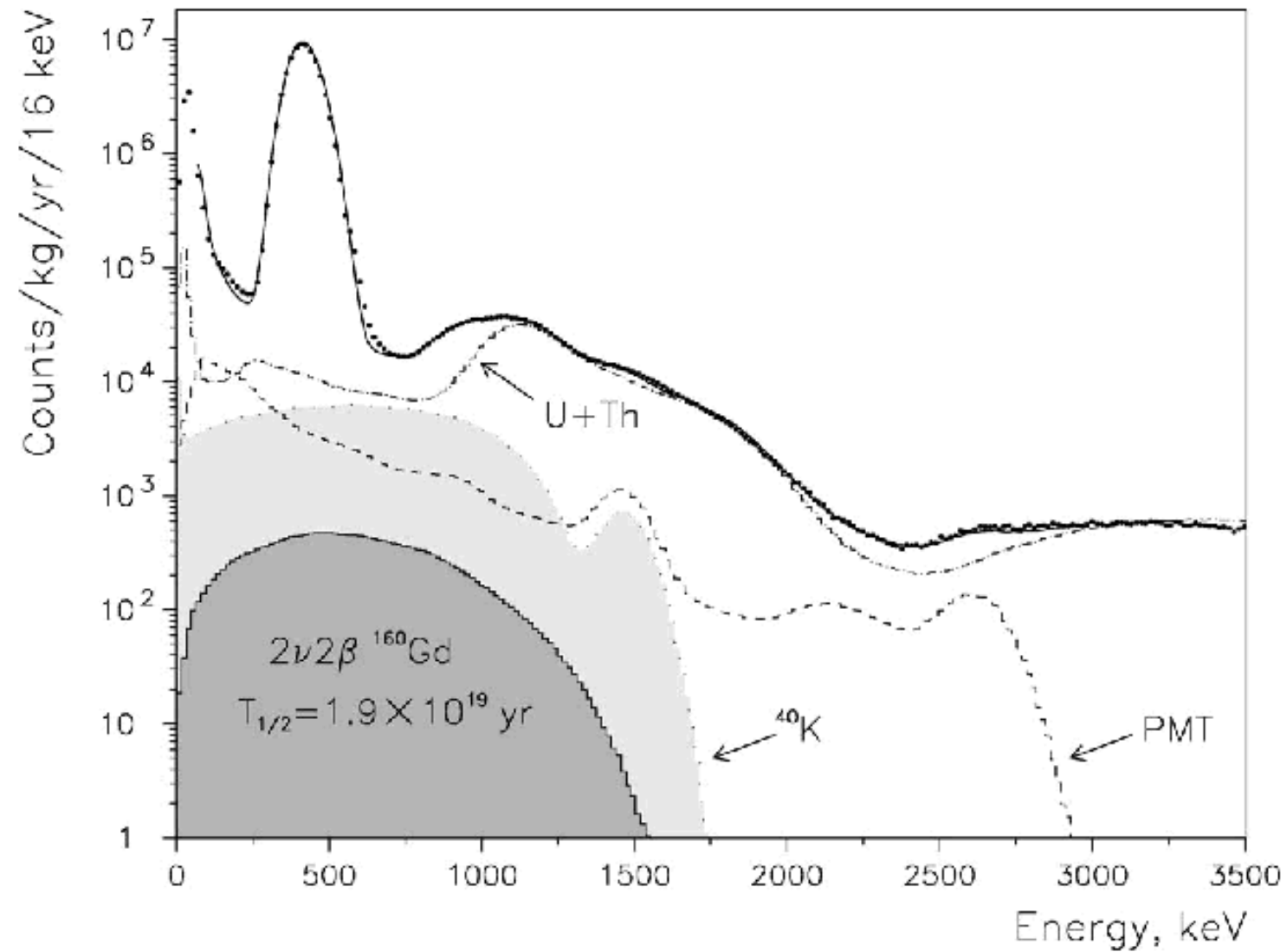
- ^{207}Bi ($E_\gamma=570$ keV): $r = 0.0051$ counts/h (0.012 counts/d)

- ^{207}Bi ($E_\gamma=1064$ keV): $r = 0.0071$ counts/h (0.017 counts/d)

6. Esimerkkejä Taustaspektreistä II

- Ilmais: $\text{Gd}_2\text{SiO}_5\text{:Ce}$ (GSO)
(Cerium-doped gadolinium silicate -
tuikeri) [F.A. Danevich et al., NPA
694 (2001) 375-391]
- Solotvina Underground Laboratory,
suolakaivos 430 m maan alla (1000
mwe)
- Mittausaika: 13950 h
- GSO-kiteen koko: 95 cm^3
- kosminen myonivuo: $1.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- neutronivuo: $2.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- radon ilmassa: $< 30 \text{ Bq/m}^3$





7. Esimerkki: GENIUS-TF simuloitu taustakontribuutio

- GERmanium in liquid NItrogen Underground Setup (GENIUS) Test-Facility
- Saanut rahoituksen ja rakennusvaiheessa, sijoitetaan Gran Sasso

Tutkimuskohteet (GENIUS)

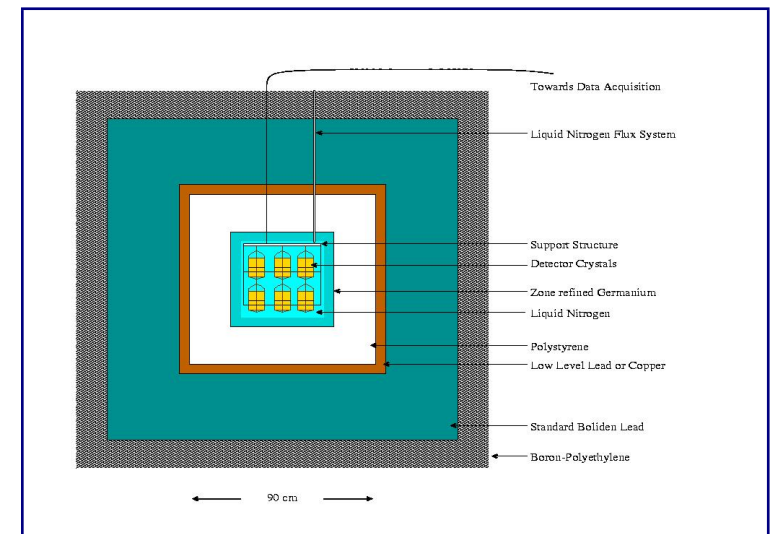
- pimeään aineen etsiminen
- neutriinoton kaksoisbeetahajoaminen
- auringon neutriinot

Ilmaisim

- koostuu 14 HPGe-ilmaisimesta, yhteensä ~ 40 kg luonnon-germaniumia
- upotettu nestemäiseen tyypeen, $V = 0.064 \text{ m}^3$ (vain jäähdyttämiseen, ei taustasuokaukseen)

Tavoite

- tausta $\sim 4 \text{ counts}/(\text{kg} \cdot \text{keV} \cdot \text{yr})$



7. Esimerkki: GENIUS-TF simuloitu taustakontribuutio

- Oletetut sisäiset epäpuhtaudet joissakin GENIUS-TF-materiaaleissa

Source	Nuclide	Purity	counts/(kg keV yr) 0 - 50 keV	counts/(kg keV yr) 2000 - 2080 keV
Ge-kide	^{238}U	1.8×10^{-15} g/g	1.2×10^{-3}	2×10^{-5}
	^{232}Th	5.7×10^{-15} g/g	0.5×10^{-3}	1×10^{-5}
Nitrogen	^{238}U	3.5×10^{-13} g/g	3×10^{-2}	7×10^{-5}
	^{232}Th	4.4×10^{-13} g/g	2×10^{-2}	4×10^{-5}
	^{222}Rn	$325 \mu\text{Bq/m}^3$	4×10^{-3}	6×10^{-5}
	^{40}K	1×10^{-11} g/g	3×10^{-2}	
Steel	^{238}U	3 mBq/kg	3×10^{-1}	6×10^{-4}
	^{232}Th	4 mBq/kg	4.5×10^{-1}	8×10^{-4}
	^{60}Co	2 mBq/kg	3×10^{-1}	1×10^{-5}
	^{40}K	2 mBq/kg	1.5×10^{-2}	
Ge shield	^{238}U	1.8×10^{-13} g/g	4.5×10^{-2}	4×10^{-5}
	^{232}Th	5.7×10^{-13} g/g	6×10^{-2}	2×10^{-4}
	^{40}K	1×10^{-11} g/g	4.5×10^{-4}	
Cu shield	^{238}U	5.4×10^{-12} g/g	2.5×10^{-1}	4×10^{-4}
	^{232}Th	3.0×10^{-12} g/g	6.5×10^{-2}	4×10^{-4}
	^{40}K	4.5×10^{-10} g/g	6×10^{-3}	
cosmogenics	$^{54}\text{Mn}, ^{57}\text{Co}, ^{58}\text{Co}, ^{60}\text{Co},$	$23,30,50,70 \mu\text{Bq/kg}$	8×10^{-1}	
anthropogenics	$^{125}\text{Sb}, ^{207}\text{Bi}, ^{134}, ^{137}\text{Cs},$	$50,8,150,11 \mu\text{Bq/kg}$	7.5×10^{-1}	
sum			3.9	3.3×10^{-3}

8. Radioaktiivisuus Pyhäsalmen Kaivoksessa

- Taustasäteilymittaukset tehtiin vuoden 2000 lopulla (elokuu-joulukuu)
 - CUPP ja China University of Geosciences (Beijing)
 - Mitattiin
 - ^{238}U :n, ^{232}Th :n, ^{226}Ra :n ja ^{40}K :n pitoisuudet eri syvyyksillä
 - radonpitoisuus ($^{220,222}\text{Rn}$) eri syvyyksillä
 - uraanin kulkeutuminen
 - Mittausmenetelmä
 - radon : 40 eri paikassa syvyyksillä 0 - 970 m, mitattiin 77-90 päivää, ilmaisimena 'CR-39 alpha track detection material' + kemiallinen analyysi
 - U, Th, Ra, K : murskatut kivi- ja hiukkanäytteet syvyyksiltä 0 - 970 m tutkittiin HPGe-ilmaisimella
- TULOS: Taustasäteilyn taso matala ja kaivos soveltuu maanalaisen fysiikan mittauksiin

8. Radioaktiivisuus Pyhäsalmen Kaivoksessa

- Tulokset (pienin ja suurin arvo) :
 - ^{238}U : 27.8 - 44.5 Bq/m³
 - ^{232}Th : 4.0 - 18.7 Bq/m³
 - ^{226}Ra : 9.9 - 26.0 Bq/m³
 - ^{40}K : 267 - 625 Bq/m³
 - radonpitoisuus 10 - 148 Bq/m³
 - joitakin viitteitä uraanin kulkeutumisesta hiukkasina (mutta määrät pieniä)
- Tulokset riippuvat paljon siitä, miten hyvin esimerkiksi tuuletus tai ilmanvaihto on järjestetty
- Myös nopeiden neutroneiden aiheuttama tausta mitattu (venäläiset), mutta raporttia ei vielä julkaistu