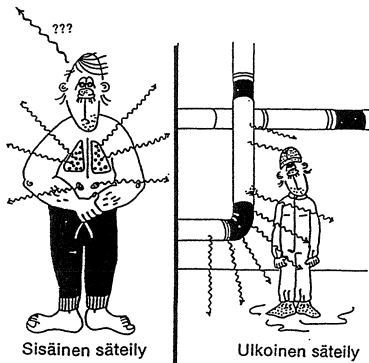


Arto Passoja:

190305 5 op

SÄTEILYFYSIIKKA

LUENTORUNKOMONISTE



* 74 *

2007

Säteilyfysiikka

1. IONISOIVAN SÄTEILYN FYSIKAALISET PERUSTEET	1
1.1. ATOMI JA YDIN.....	
1.2. YTIMEN MASSA JA SIDOSENERGIA.....	
1.3. RADIOAKTIIVINEN HAJOAMINEN	
1.3.1. Viritystilat ja gammaemissio	
1.3.2. Alfahajoaminen	
1.3.3. Beetahajoaminen	
1.3.4. Hajoamislaki ja aktiivisuus.....	
1.3.5. Hajoamisketjut	
1.4. YDINREAKTIOT	
1.4.1. Sironta.....	
1.4.2. Väliydinreaktio.....	
1.4.3. Siirtoreaktiot	
1.4.4. Neutronisiappaus	
1.4.5. Fuusio	
1.4.6. Fissio.....	
1.4.7. Vaikutusala.....	
1.5. RÖNTGENSÄTEILY.....	
1.6. KIRJALLISUUTTA.....	
2. YDINENERGIA ENERGIALÄHTENÄ	53
2.1. FUUSIO ENERGIALÄHTENÄ.....	
2.1.1. Auringon energiantuotto.....	
2.1.2. Alkuaineiden synty.....	
2.1.3. Hallittu fuusio	
2.1.4. Kylmäfuusio.....	
2.2. FISSIOREAKTORI.....	
2.2.1. Reaktorisydämen osat.....	
2.2.2. Reaktorityypit.....	
2.2.3. Reaktoridynamiikka.....	
2.2.4. Reaktorimyrkyt	
2.3. YDINASEET	
2.3.1. Fissiopommit.....	
2.3.2. Fuusiopommit	
3. SÄTEILYN JA AINEEN VÄLINEN VUOROVAIKUTUS	101
3.1. SÄHKÖVARAUKSISTEN HIUKKASTEN VÄLISET VUOROVAIKUTUKSET	
3.2. HIUKKASTEN KANTAMA VÄLIAINEESSA.....	
3.3. SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN VUOROVAIKUTUKSET	
3.3.1. Valosähköilmiö	
3.3.2. Comptonin ilmiö	
3.3.3. Parinmuodostus	
3.4. SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN VAIMENEMINEN VÄLIAINEESSA.....	

4. SÄTEILYN MITTAUSMENETELMÄT	113
4.1. KAASUTÄYTTEISET ILMAISIMET	
4.1.1. Ionisaatiokammio	
4.1.2. Verrannollisuuslaskuri	
4.1.3. Geigerin laskuri	
4.2. TUKEILMAISIN	
4.3. PUOLIOHDEILMAISIN	
4.4. JÄLKI-ILMAISIMET	
4.4.4. Filmi	
4.4.5. Sumukammio	
4.4.6. Kuplakammio	
4.4.7. Lankakammio	
4.5. ANNOSSUUREISTA JA MITTAAMISESTA	
5. RADIOAKTIIVISUUS LUONNOSSA	157
5.1. LUONNOLLINEN RADIOAKTIIVISUUS	
5.2. KOSMINEN SÄTEILY	
5.3. KEINOTEKOINEN RADIOAKTIIVISUUS	
5.4. YDINPOLTTOAINEHUOLTO	
5.5. IONISOIVAN SÄTEILYN MUU KÄYTTÖ	
5.5.1. Säteilyn käyttö lääketieteessä	
5.5.2. Säteilyn käyttö teollisuudessa	
5.5.3. Säteilyn käyttö kotitalouksissa	
5.6. TEHTÄVIÄ	
5.7. KIRJALLISUUTTA	
6. SÄTEILYN BIOLOGISET VAIKUTUKSET	STUK
7. RADIOAKTIIVISUUS IHMISESSÄ	STUK
8. IONISOIMATON SÄTEILY	STUK
9. SÄTEILYSUOJELU	213
	STUK

Bq?

Ranskal. Henri B^equerel
havaiti
v. 1896 (100 vuotta sitten!)
ensimmäisenä
radioakt. aineita.

HUOM.!

SIVUT
1-26
JAETAAN
LUENNOLLA

Esim.

Jos ainemäärässä tapahtuu
1000 ydinhajoamista sekunnissa,
sanotaan, että

"aktiivisuus on 1000 Bq"

Esim.

Jos Poronlihan aktiivisuuspitoisuus on

"300 Bq/kg", niin kilossa lihaa
tapahtuu 300 haj./s.

Esim.

Maidon akt. pitoisuus on "50 Bq/l",
ts.

litrassa maitoa tapahtuu 50 haj./s.

Arvoja:

Uudisrakennuksissa on huoneilman
korkeimmaksi sallittu
radonpitoisuudeksi suositeltu

200 Bq kuutiometrissä ilmaa

Vanhille rakennuksille suositellaan radon-
remonttia, jos suorituskielto ylittää 400 Bq/m³

(28)

Huom.

Esim.

Bq on pieni yksikkö.

Jokaism. ihmisen luonnollinen ⁴⁰K-aktiiv-
suus on

3000 - 4000 Bq

Radiumia on enemmän! (Hajaa radoniksi...)

Henkellä mittarilla void. mitata
ihmiskehon aktiivisuus.

Esim.

Kuutiometrissä maata on
radioakt. radiumia n. 5000 Bq

Meriveden akt. on suurempi!

Kuutiometrissä kevytbetonia voi
olla jopa 50 000 - 250 000 Bq
kaliumaktiivisuutta!

Ulkoilman luonnollinen radon-
pitoisuus on yleensä n. 5 - 40 Bq/m³

Astroissa radonpitoisuus
on useimmiten välillä

5 - 15000 Bq/m³

Siis: Bq on pieniyksikkö.
(→ ~ 10 000 Bq esinettä emme edes pidä radioakt.)

Hajoamisketjut:

Raskaille ytimille ($Z > 82$) tyypillisiä pitkiä hajoamissarjoja (α - & β -haj.):

luonnossa mm. uraanisarja \rightarrow Kuva 1.8.
aktiniumsarja
toriumsarja

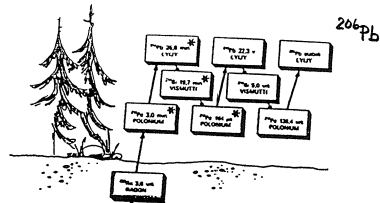
Huom.

Uraanisarjassa:

^{222}Rn on jalokaasu, $t_{1/2} = 3.8 \text{ vrk}$

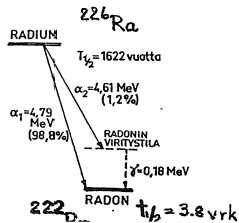
↳ voi kulkeutua syvältä maan sisältä maan pinnalle (jos maa on huokoista!)

Hajoamisketjut



^{238}U

Kuva 1.8. Uraanisarja.





Kuv. Raskas ydin fissioituu ...

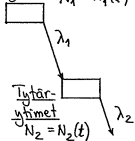
↳ fissioituokset neutronirikkaita ytimiä
 β^- -haj. ketjun kautta → stab. ytimiksi

Huom

Ketjun loppupäässä $t_{1/2}$ pitenevät:
 mm. ↳ fissioreaktoreiden hankalat ydinjätteet ovat näitä!

matemaattinen Hajoamisketjun käsitely:

Emoytimet $N_1 = N_1(t)$ & $N_2 = N_2(t)$, kun $t = 0$



Ratk.

$$\begin{cases} N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \\ N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \end{cases}$$

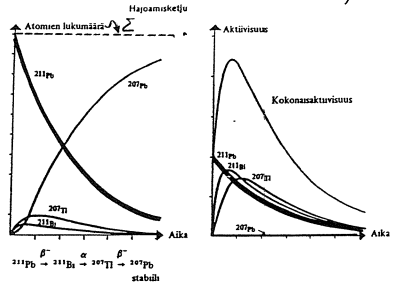
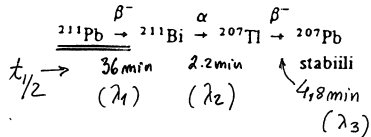
↳ ääritapaukset: a) $t_{1/2}(2) \ll t_{1/2}(1)$

tytär hajoaa \approx emon puoliintumisaikaa noudattaen

b) $t_{1/2}(2) \gg t_{1/2}(1)$

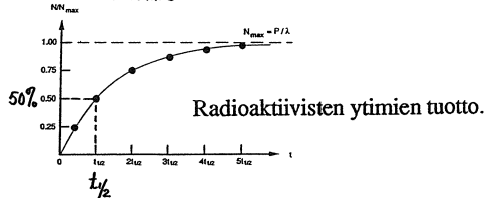
hajoamiset \approx riippumattomia

(ts. N_1 ja hajoamiset, kun N_2 alkaa hajota...)



Kuva 1.9. ${}^{211}\text{Pb}$:n hajoaminen ${}^{207}\text{Pb}$:ksi. Puoliintumisaikat $t_{1/2}$ ovat 36 min (${}^{211}\text{Pb}$) (${}^{211}\text{Bi}$) ja 4,8 min (${}^{207}\text{Tl}$).

$t_{1/2} = 2.2$ min.



Radioaktiivisten ytimien tuotto.

Epästabiilita ytimiä voidaan tuottaa:

esim.

pommitamalla näytettä hiukkaskäilytyimestä soadilla suihkulla
tai
asettamalla näyte reaktorin neutronivirran:

jos suihkun virta tai neutronivirra = vakio,
noin tuotettavia ytimiä
syntyy vakioaajuudella P ,

mutta samalla niitä hajoaa
taajuudella λN .

ts.

$$\text{ytimiä kertyy lisää taajuudella } P - \lambda N = \frac{dN}{dt}$$

ja siten näiden lukumäärä kasvaa kaavan \rightarrow sijoita & totea!

$$N = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \rightarrow \frac{\text{saturaatio-}}{\text{arvo}} = \frac{P}{\lambda} = N_{\text{max}}$$

mukaisesti,

ja tuotettu aktiivisuus on:

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = P (1 - e^{-\lambda t}) \rightarrow \frac{\text{saturaatio-}}{\text{arvo}} = P = A_{\text{max}}$$

Huom

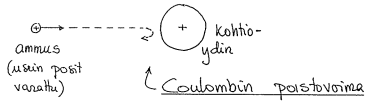
Saturaatioarvoista (= max. arvoista)

on puolet tuotettu
ajan $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ kuluttua.

\hookrightarrow (Kävi edell sivulla)

1.4. YDINREAKTIOT

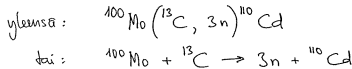
(Esim. kiihdytetystä saataavan hiukkassuihkun avulla) (37)



Jos ammus pääsee ydinvoiman kantaman alueelle, niin → nukleonijoukko järjestyy uudelleen.

Huom Poikkeus: neutronilla ei Coulombin välttä ("termiset neutronitkin"...) (ts. ammuksella on oltava riittävästi energiaa...)

Reaktiota merkitään

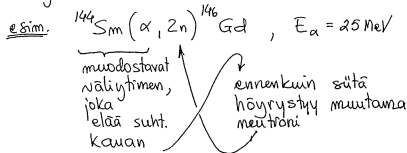


Reaktiotyyppejä: ammuksen ja kohtioydin massaluvut eivät muutu!

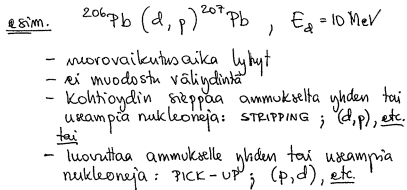
- 1) Sirona
 - kimmoinen → kumpikaan ei viritä; ammuksen liike-energia jak. molemmille (ytimelle vain pieni energia)

Huom ($m_n \sim m_p$) neutronin sirona protonista → tärkeä prosessi neutroneja hidastettaessa. (neutroni voi menettää ~ koko liike-energiansa)

2) Välyreaktio



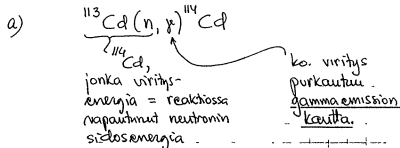
3) Siirtoreaktiot

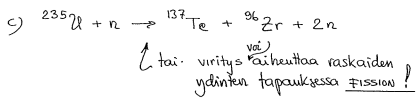
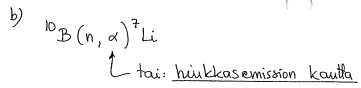


4) Neutronisieppaus

↳ ei varausta, ei Coulombin välttä

Jos ytimen B_n (= neutronisidosenergia) > 0, niin se voi sieppata neutronin & neutronin sidosenergia vapautuu:





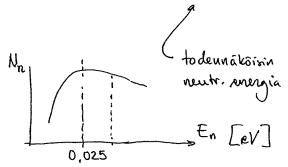
Neutronin sieppaus todennäköisyys

$P_n \propto \frac{1}{\sqrt{E_n}}$ (ts. P_n on suuri hitailta neutroneilla)

↳ ns. termiset neutronit: $E_n = \frac{3}{2}kT$

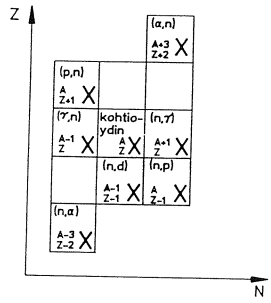
$$\begin{cases} k = \text{Boltzmannin vakio} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \\ T = \text{lämpötila [K]} = 8.6174 \times 10^{-5} \text{ eV/K} \end{cases}$$

$E_n = \frac{3}{2} \times 8.6174 \times 10^{-5} \times 300 \text{ eV} = 0.039 \text{ eV}$
 (Vrt. moniste: 0.025 eV)



Ydinreaktiot

↳ saadaan aikaan esim. pommittamalla kohtiontimia kiihdyttimestä soatavalla hiukkassuutella.

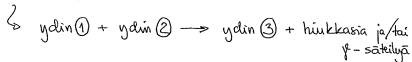


↳ palataan myöhemmin asiaan...

Jatkkuopi: (YDINREAKTIOT)

41

5) Fuusio



- keveiden ydinten fuusiossa vapautuva sidosenergia nukleonia kohden on suurin

- ytimien varaus positiivinen \rightarrow Coulombin valli

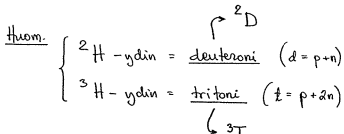
\hookrightarrow tarvitaan: "korkea energia" E
tai
lämpötilasta T puhuttaessa:

$$\text{"korkea lämpötila"} \leftrightarrow E = \frac{3}{2} kT$$

\hookrightarrow puhutaankin: LÄMPÖYDINREAKTIO

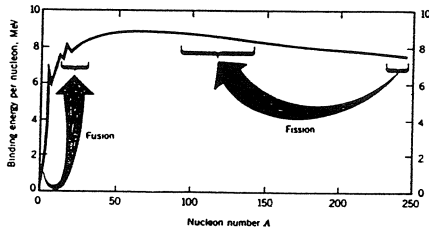
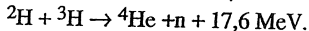
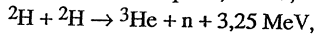
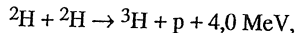
Keveiden ytimien fuusio on tärkeä prosessi

- tähtien energiantuotannossa
- alkaneiden synnyssä



42

Fuusio



Kuva 1.11. Stabiilien ytimien sidosenergia yhtä nukleonia kohti.

6) FISSIO

Eräissä tapauksissa termisen neutronin energia riittää tunkeutumaan ytimeen (ei Coulombin valtia) \rightarrow ydin virittyy.

Termisen neutronin sieppauksessa vapautuva energia voi olla riittävä FISSION aikaansaamiseen,

erityisesti jos sieppaavan ytimen massaluku on pariton! ($E_n \sim 0,03 eV$)

Esim.

a) Luonnossa: ^{235}U (= 0,72% luonnon uraanista)

b) Keinotekoiset: $^{233}U, ^{239}Pu$ } Muodostuu ydinreaktorissa

Mutta esim. ^{238}U :n fissionon tarvitaan nopeita neutroneja $\rightarrow E_n \sim 1 MeV$

Huom.

Raskailta ytimillä $N \sim 1,55 \times Z$

Keskiraskailta ytimillä $N \sim 1,3 \times Z$

\rightarrow fissionissa vapautuu heti 2-3 nopeaa neutronia fissiona kohti.

(Sen jälkeenkin fissionituotteet ovat neutronirikkoita, joten

$\rightarrow \beta^-$ hajoamisen kautta \rightarrow kohti stabiileja ytimiä.)

Termiset neutronit:

$$E = \frac{3}{2} kT$$

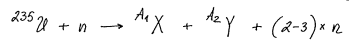
esim. $E_n = \frac{3}{2} \times 8,62 \times 10^{-5} \frac{eV}{K} \times 300 K = 0,04 eV$

Energiaspektrin max.

ts. termisen spektrin neutronien todennäköisin energia huoneenlämpötilassa = 0,025 eV ja

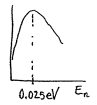
se nautta nopeutta 2200 m/s.

Fissio:



sidosenergia nukl. kohden $\sim 7,5 MeV$

keskiraskailta ytimillä sidosenergia/nukleoni on n. 8,4 MeV



Joten fissionissa vapautuva kokonaisenergia on likimäärin:

$$^{235}U \times (8,4 - 7,5) MeV \approx 200 MeV$$

Luonnonuraani:

99,28 %	^{238}U	$+ n \rightarrow$ Fissio!
0,715 %	^{235}U	
0,005 %	^{234}U	

(termisen)

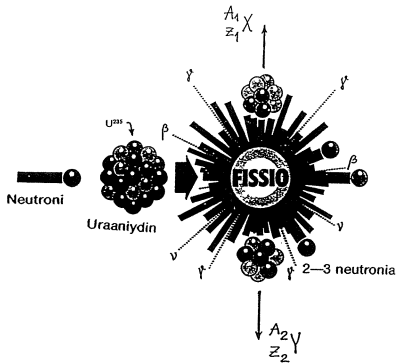
FISSIOREAKTORIN IDEA VALMIS:

^{235}U & termisiä neutroneja \rightarrow energia vapautuu n. 200 MeV / Fissio!

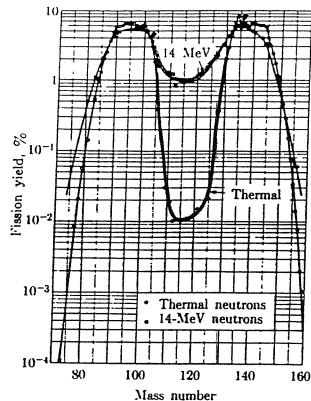
\rightarrow Lämmöksi

Miten energia jakautuu eri osasten kesken \rightarrow Sähköksi

Uraaniytimen halkeaminen



Fissionissa vapautuvan energian tyyppi	Energia [MeV]
Fissionituotteiden liike-energia	167
Fissionineutronien liike-energia	5
Fissionissa syntyvän gammasäteilyn energia	7
Fissionituotteiden beetasäteilyn energia	5
Beetahajoamisen neutriinonien energia	11
Fissionituotteiden gammasäteilyn energia	5
Kokonaisenergia	200



Kuva 1.12. Fissionituotteiden massajakaumat hitaiden ja nopeiden neutronien aiheuttamassa fissionissa.

Syntymäiden fission fragmenttien massa, kovuus

on epäsymmetrisen & riippuu ammuksen energialta. \rightarrow Kuv. 1.12.

Huom. $^{235}_{92}\text{U}$ voi hajeta yli 30 eri tavalla.

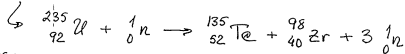
On tunnistettu yli 60 erilaista p-
määristä fissiotuotetta.

Esim. $^{235}_{92}\text{U}$:n fission muodostuu fissio-
tuote $^{135}_{52}\text{Te}$.

Mikä on toinen komponentti?

Oletetaan, että fission vapautuu 3 neutronia.

Ratk.



Comments:

- Neutronojen energiaa ei pystytä hyödyntämään.
- Fission tuotteet ovat aluksi ioneina, varausluvun ollessa n. +20.
- Ne hidastuvat väliaineessa hyvin nopeasti kappaten itselleen elektroneja väliaineen atomeilta.
- Niden energia muuttuu termiseksi tyypillisesti muutaman mikrometrin alueella fission tapahtumapaikasta. (Vrt. kemiall. reaktiossa vap. $\sim 3-10\text{ eV/atomi}$)

\leftarrow fission $\sim 200\text{ MeV/atomi}$

Huom.

fission tuotteiden haj. ketjuun voi liittyä

ns. viivästyneiden neutronien emissio.

\hookrightarrow niiden osuus koko neutronituotosta on pieni (n. 0.65%)

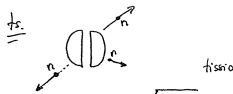
MUTTA:

niiden merkitys ydinreaktoreiden toiminnassa on ratkaisevan tärkeä!

ts.

fission tuotteiden hajotessa emittoituu nk. "viivästyneitä neutronia" keskimäärin 13 sekuntia fission jälkeen.

(Vrt. fission neutronien keskim. elin aika $\approx 100\text{ }\mu\text{s}$ reaktorissa)



$\sim 13\text{ s}$ fission jälkeen!

Reaktion vaikutusala = σ

σ = reaktion todennäköisyyden mitta

= kohtioytimen "tehollinen pinta-ala", johon osuessaan ammus saa aikaan ko. reaktion

$[\sigma] = 1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ cm}^2 = 1 \text{ b}$



\vec{F}_i → Ammukkeen osuessa kohtioon on reaktion tapahtumata todennäköisyys:

$P_r = \sigma n_t x$ — kohtion paksuus

kohtioytimen määrä tilavuusyksikössä $[\text{kg}/\text{cm}^3]$

Merk.

$\sigma n_t = \Sigma = \text{makroskooppinen vaikutusala}$

$[\Sigma] = \frac{1}{\text{cm}}$

σ :

- siirtoreaktioille ~ nanobarn = 10^{-9} barn
- neutronisieppaus ~ 10^5 barn

Vrt. ytimen pinta-ala $A \sim 100 \text{ fm}^2$
siirtoreaktioille $\sigma \sim \pi (10^{-14} \text{ m})^2 \approx 3 \times 10^{-28} \text{ cm}^2 = 3 \text{ barn}$

Esim.

ydinreaktorissa tietty neutronivuo ϕ $[\frac{n}{\text{cm}^2 \text{ s}}] = 3 \text{ barn}$

neutronisieppauksen vaik. ala = σ $[\text{cm}^2]$
 säteilytettävien ytimien lukum. tiheys = n_t $[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}]$



$\phi n_t \sigma =$ muodostuneiden $A+1$ ytimien lukumäärä sekunnissa ja 1 cm^3 :ssä

1.5. Röntgensäteily

gammasäteily = sähkömagn. säteilyä; peräisin atomin ytimestä

röntgensäteily = " " ; seurausta atomin elektroniverhon virityksen purkautumisesta

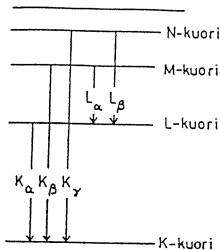
$E_{\text{rtg}}: 1 - 100 \text{ keV} = h \frac{c}{\lambda}$

↳ Karakteristinen röntgensäteily

↳ $\lambda: 1.2 \text{ nm} \rightarrow 12 \text{ pm}$

ts. $1.00 \rightarrow 0.01 \text{ nm}$

a) Karakteristisen röntgensäteilyn spektri on diskreetti



↳ voimakkaimpia pikkejä ovat K-piikit:

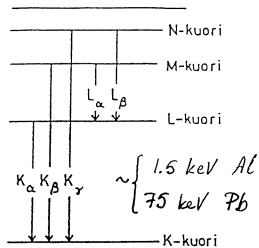
ts. kun ulomman elektronikuoren elektroni täyttää K-kuoren aukon.

(ks. kuva 1.13.)

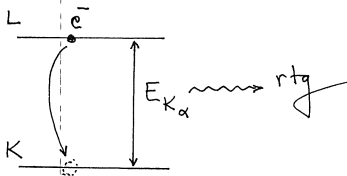
Energiat K-piikeillä:

- Al ~ 1.5 keV
- ⋮
- Pb ~ 75 keV

Kuva 1.13. Yleisimmät röntgensäiliytymät.



Kuva 1.13. Yleisimmät röntgensiiirtymät.



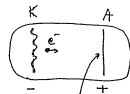
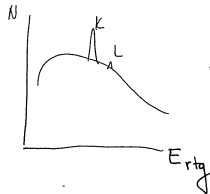
Karakteristista rtg-säteilyä havaitaan niissä prosesseissa, joissa syntyy K-aukkoja:

- radioaktiivinen hajoaminen (esim. sisäinen konversio)
- pommittauksessa ainetta suurenerg. hiukkasilla

b) Jarrutussäteily (röntgenputkea käytettäessä)

- katodista irronneet elektronit kiihdytetään suurjännitteen avulla
- elektronien omissa anodun:

- emittoituu nk. "jarrutussäteilyä", jota myös kutsutaan rtg-säteilyksi (jatkuva energiaspektri)
- emittoituu myös anodille ominaista karakteristista rtg-säteilyä.



varaus jarrun-
tuu
se lähettää
sähkömagn.
säteilyä, ts.
rtg-säteilyä!

2. Ydinenergia energialähteenä

2.1. Fuusio energialähteenä

Kevyiden ytimien fuusiossa vapautuu enemmän energiaa nukleonin kohden kuin raskaiden ytimien fissionissa.

Mutta: Coulombin valli!

ts. tarvitaan tietty energia:
- kvanttimekaniikassa tunnelituminen
riippuu vahvasti energiasta

Esim.

$p + p$ / Coul.-vallin korkeus n. 200 keV

Läpäisy todennäköisyys: $10 \text{ keV} \quad 10^{-3}$
 $1 \text{ keV} \quad 10^{-13}$

Missä lämpötilassa protonin keskim. energia olisi 10 keV / 1 keV?

Ratk.

$$E = \frac{3}{2} kT \rightarrow T = \frac{2E}{3k} = \frac{2 \times 10 \times 10^3}{3 \times 8.6 \times 10^{-5}} \text{ K}$$

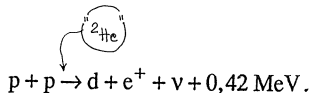
$$\approx 80 \times 10^6 \text{ K}$$

$$\& \begin{cases} E = 1 \text{ keV} \\ T \approx 8 \times 10^6 \text{ K} \end{cases}$$

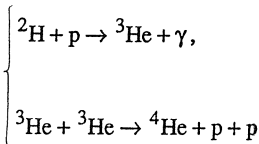
Vuorovaikutukseen tarvittavaa liike-energiaa tarpeeksi, kun $T \approx 12 \times 10^6 \text{ K}$ (AURINKO!)

AURINGON ENERGIANTUOTTO

PROTONIKIERTO



FUUSIOT



↳ Energiaa vap. 26.7 MeV.
↳ Lämmöksi...

Em. prosessi on äärimmäisen epätodennäköinen ilmiö.

↳ aurinko ei pala hetkessä loppuun, vaan elää vielä n. 5×10^9 vuotta.

Auringon tämänhetkessä lämpötilassa

- protonikierto on hallitseva ilmiö
- raskaampia ytimiä kuin ${}^4\text{He}$ ($= \alpha$) ei voi syntyä. (Tarvittava tiheys $\sim 100 \text{ g/cm}^3$
ts. $T \sim 12 \times 10^6 \text{ K}$;
vrt. $T_A \sim 15 \times 10^6 \text{ K}$!)

Raskaampien alkuaineiden synty

- kun vety on palanut loppuun, niin
- tähti alkaa kutistua ja lämpötila nousee (hiukkastormäykset!)
- uusia reaktioita ...

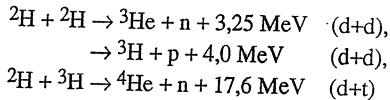
↳ He - kierto mahdollinen,

kun tiheys $\sim 100 \text{ kg/cm}^3$

↳ $T \sim 100 \times 10^6 \text{ K} = 10^8 \text{ K}$

etc.

2.1.3. Hallittu fuusio



↳ oltava täysin ionisoituneita (plasmaa)

$$E = \frac{3}{2} kT \approx 10 \text{ keV}$$

$$\underline{\underline{T \approx 10^8 \text{ K}}}$$

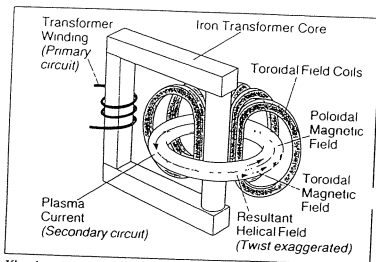
daalikenttä B on teknistä syistä rajoitettu arvoihin 4–5 T)

Skaalaus perusteella on ehdotettu sellaisen koereaktorin rakentamista, jossa $I = 25\text{--}30\text{ MA}$, $B = 5\text{ T}$ ja joka kooltaan olisi noin kaksi kertaa JET-tokamakia suurempi. Sen fuusio-teho olisi noin 1 GW ja plasman sytyminen suuren koon ansiosta olisi varmaa. Reaktorin kustannukset 20 vuoden käyttöajalle olisivat noin kahdeksan miljardia ECU:a.

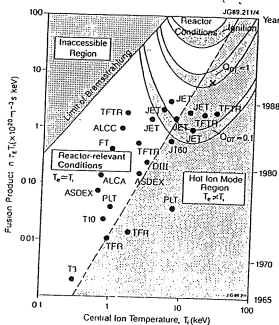
Suurvalloilla omat suunnitelmansa

Kullakin suurvallalla (Eurooppa, Yhdysvallat, Japani ja Neuvostoliitto) on omat kansalliset suunnitelmat koereaktorin rakentamiseksi. Kalliiden kustannusten johdosta näiden rinnalla pohditaan koereaktorin rakentamista kansainvälisenä yhteistyönä. Ns. ITER-projekti (International Thermonuclear Experimental Reactor) käynnistyi 1985 pääsihteeri Gorbatschovin aloitteesta IAEA:n alaisuudessa ja on nyt edennyt yksityiskohdallisen suunnittelun asteelle. Koereaktorin rakentamispäätös ajoittuu vuoteen 1993, johon mennessä koereaktorin sijoituspaikasta ja kustannusten jaosta toivottavasti on päästy sopimukseen. Tekninen suunnittelu vaihe, johon osallistumisesta jäsenmaat ymmärrettävästi tulevat olemaan erityisen kiinnostuneita, kestää 1990-luvun puoliväliin, jolloin koeket deuterium-tritiumplasmalla JET- ja TFTR-tokamakilla suoritetaan. ITER:n rakennusvaiheen kustannuksiksi on arvioitu neljä miljardia ECU:a ja sen kestoksi kuusi vuotta. Koetointia alkaisi siten nykyisen suunnitelman mukaan ensi vuosikymmenen alussa.

Euratomin koko energiatutkimusrahastuksesta yli puolet menee fuusiotutkimukseen ja JET on sen suurin yksittäinen hanke. JET- projekti käynnistettiin 1973 ja kokeet aloitettiin 1983. Euroopan yhteisön maiden lisäksi kokeeseen ovat osallistuneet Ruotsi ja Sveitsi. Se on tullut maksamaan tähän asti vajaan miljardi ECU:a ja on tarjonnut merkittäviä alihankintoja ja tutkimusprojekteja jäsenmaiden korkean teknologian teollisuudelle. Totuudessaan fuusio tarjoaisi ehtymättömän polttoainereservin lisäksi samat edut kuin fissioon perustuva ydinvoima, joskin fuusiosähkön hinta on vielä vaikeasti ennustettavissa. Fuusiolle on myös huomattavia turvallisuuteen liittyviä etuja fis-



Yksinkertaistettu kaavio tokamak-in toimintaperiaatteesta.



Fuusiotulo-ionilämpötiladiagrammi eri tokamak-koelaitteiden tuloksille. Syksyllä 1989 JET-illa saavutettu paras tulos merkitty ristillä. Vasemmassa ylänurkassa näkyvillä matalalämpötila-alueella sateliyhäviöt muodostavat liian suuriksi, eikä siitä aluetta ole mahdollista saavuttaa.

soon verrattuna johtuen sen passiivisesta turvallisuudesta (plasmapalo sammuu pieninkin häiriön sattuessa) ja siitä, ettei siinä synny radioaktiivista polttoainejätettä.

Kirjallisuutta

J. A. Heikkinen ja M. A. Kovanen, Joint European Torus, Sähkö, Electricity and Electronics 61 (1988) 12, s 36–41

J. A. Heikkinen, S. J. Karttunen, R. R. E. Salomaa, M. Alava ja T. Pat-

tikangas, Fuusioteknologian nykytila ja tulevaisuuden näkyvät, julkaistaan Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tiedotteena

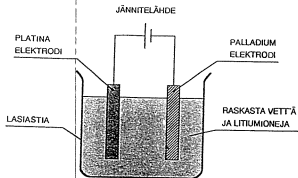
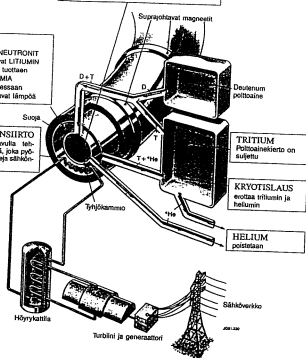
M. Keilhacker et al., Overview of JET results using a beryllium first wall, Bull. Am Phys. Soc 34 (1989) 9, s 1912.

¹ plasmafysiikassa lausutaan lampotila usen energiayksiköissä ts $k_B T$, missä k_B on Boltzmannin vakio Siten 1 eV vastaa 11600 K.

PLASMA
Fuusioenergiaa NEUTRONEN osuus on 80 %
Magnetiikasta ei pysäytä neutronia, joka hidastuu
plasmassa ympäröivään LITIAM-vaippaan
Loppuosa fuusioenergiasta, joka vapautuu α -hiuk-
kasten sika-energiaksi, jää plasmassa ylläpitämään
fuusiolämpötilaa.

VAIPPA
Vapaina NEUTRONIT
• reagoivat LITIAMIN
kautta tuottaen
TRITIUMIA
• hidastuessaan
luovuttavat lämpöä

LÄMMÖNSIIRTO
Lämpöä siirrä teh-
dään kiviä, jotta pö-
ntää karkaiseva säteily-
tuotos



Kylmäfuusiokokeissa käytetyt elektroylläytteen kaavakuva. Raskaassa vedessä oleva deuterium karkautuu palladiumelektrodin sisään, jossa väditetty fuusioreaktio tapahtuu

Mitä on kylmäfuusio?

Fuusioreaktiossa kaksi kevyttä atomiydintä sulautuu yhdeksi raskaammaksi ytimeksi. Reaktiossa vapautuu paljon energiaa (miljoonakertaisesti verrattuna kemialliseen reaktioon) ja tavallisesti myös voimakasta radioaktiivista säteilyä. Sen sijaan radioaktiivista jätettä ei synny samalla tavalla kuin ydinvoimalassa, joka perustuu fissioon, eli raskaan ytimen hajoamiseen kahteen pienemmäksi ytimeksi. Hyvin korkeissa lämpötiloissa, esimerkiksi auringon keskustassa, atomiytimet liikkuvat suurella nopeudella ja pääsevät sen takia niin lähelle toisiaan, että fuusioituminen tapahtuu. Tällainen **kuumafuusio** osataan toteuttaa laboratorionissa jo hetkellisesti, mutta sen soveltaminen energiantuotantoon on vielä kaukana tulevaisuudessa. **Kylmäfuusiossa** deuterium-atomien ytimet yritetään saada lähelle toisiaan kemiallisesti. Jo vuonna 1940 ennustettiin teoreettisesti, että myönteisiä alkeishiukkasia käyttäen saadaan kylmäfuusio käyntiin. Myöneja tuotetaan erittäin suurilla hiukkaskiihdyttimillä, joten niiden synnyttäminen vaatii enemmän energiaa kuin myönteisen aiheuttama fuusioreaktio vapauttaa. Myönteisen aiheuttama kylmäfuusio on kokeellisesti osoitettu mahdolliseksi muutama vuosi sitten, mutta ainakin toistaiseksi sen mahdollisuudet energian tuotantoon näyttävät pieniltä.

Nyt huomiota herättänyt kylmäfuusio ei käytä myöneja, vaan deuterium-ytimet yritetään saada lähemmäs luottamalla deuterium kiteään palladium-metalliin elektroylyttisesti. Vedyä ja palladiumin sekä deuteriumin ja palladiumin muodostamia yhdisteitä on tutkittu jo kymmeniä vuosia. Palladiumin sisältä deuteriumin tiheys on paljon suurempi kuin esimerkiksi raskaassa vedessä. Fuusioreaktion kannalta tärkeää on kahden vierekkäisen deuterium-ytimen välinen etäisyys ja se on palladium-metallissakin vielä paljon suurempi kuin deuterium-molekyylissä, jossa fuusiota ei tapahdu. Nykyinen kokeellinen ja teoreettinen tieto vedyn ja deuteriumin käyttäytymisestä metalleissa ei anna mahdollisuutta fuusion tarvitsemiin pieniin etäisyyksiin.

Kylmä Ydinfuusio Kiinteässä Aineessa

Martti M. Salomaa
Kylmälaboratorio
Teknillinen korkeakoulu

Kylmä ydinfuusio kiinteässä aineessa avaa uuden suuntauksen fuusiotutkimukselle. Kysymyksessä on mahdollisesti kvanttifyysiikan monihiukkasilmiö.

FT Tom Lonnroth on Åbo Akademin fyysikan dosentti. Hänen tutkimusalaan on ydinten rakenne sekä kokeellisesti ydispektroskooppisiin menetelmiin että soveltamalla ydinalleja

FK Olli Pilvio toimii Neste Oy konsernin T&K:ssa mittaustekniikkaryhman päällikkönä. Tehtävänä on mittaustekniisten palvelujen ja mittalaitteiden kehittämisen konsernin käyttöön. Tavoitteena on tuottavuuden parantaminen mittausteknisillä ratkaisulla

Vs. professorin Rainer Salomaan opetusala on teknillinen fyysikka (ydin- ja energiatekniikka). Teknillisessä korkeakoulussa, teknillisen fyysikan laitoksella, ydin- ja energiatekniikan laboratoriossa. Salomaan tutkimusalueita ovat kvanttielektronikka sekä plasma- ja fuusiofyysikka

FT Juha H. E. Aysto on Jyväskylän yliopiston fyysikan dosentti ja Suomen Akatemian vanhempi tutkija. Hän on ollut fyysikkoseuran hallituksen jäsen 1980. Aystön tutkimusala on ydinfyysikan tutkimus hiukkaskehittyminen avulla ja erityisesti kaukana beetaetasuuden alueesta olevien eksotisten ymien ja radioaktiivisuuden tutkimus

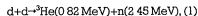
Fuusiotutkimus on perinteisesti kohdistunut "kuumaan" fuusioon. Tätä suuntausta edustaa niin plasman kahteleminen Tokamak-laitteissa kuin myös suurteholasereilla tehtävä tutkimus "Kylmä" fuusio on entuudestaan tunnettu ns. myönten katalysoimasta fuusiosta¹. Viime viikkojen tuloksien^{2,3} mukaan kylmä ydinfuusio olisi myös mahdollista katalysoida kiinteässä aineessa.

Kohu-uutiset ovat jakaneet fyysikan tutkijat "uskovaisiin" ja niihin, jotka suhtautuvat "ateistisesti" muutokseen kylmästä ydinfuusiosta. Syy yleiseen hämmennykseen on osan yllättävä tietämättömyys myönten katalysoimasta kylmästä fuusiosta¹ ja eritoten professorin Fleischmann ja Pons² julkustamat, sängen uskomattomat, tulokset energian tuotosta. Korostettakoon, että professori Steven Earl Jonesin ryhmän³ tulokset on varmennettu useissa laboratorioissa.

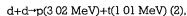
Ydinten fuusio on verrannollinen todennäköisyyteen sille, että kaksi ydintä esiintyy samassa paikassa. Vedyn raskaassa isotopissa, deuteriumissa (molekyyli muodossa D₂), jossa ydinten (d) välinen tasapainoetasuus on 0.74 Ångströmiä, on d-d fuusioopeus D₂-molekyyliä kohti van suuruisuutta 10¹⁹ sekunnissa. Elektronin korvaava monta kertaa painavampi hiukkanen kasvattaisi kylmäfuusionopeuden havaittavaan arvoon 10²⁰ sekunnissa

Uutta Jonesin tuloksissa on, että taman suuruksen vety-ytimien sähköfunktion peiton on osoitettu syntyvän pakkamalla deuterium elektrolyysissa vuorokautukseen kondensoituneen aineen kanssa. Jonesin ryhmän keksintö on nimenomaan se, että on osoitettu mahdolliseksi kasvattaa kylmän ydinfuusioprosessin nopeutta katalyyttisesti - arviolta jopa 50 kertalukua - ilman radioaktiivista myoneja!!!

Bingham Youngin yliopiston tutkijat ovat suoraan havaanneet deuteriumen välisen ydinfuusion elektrolyysiprosessin aikana titaan- ja palladiumelektrodissa. On havaittu seuraava ydinreaktio (d on deuteroni ja n neutroni):

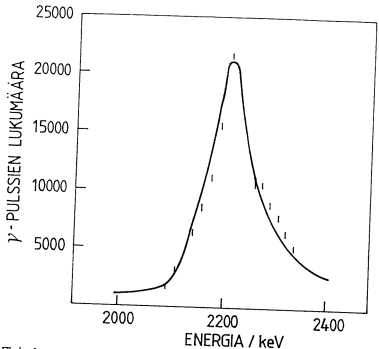


jossa kaksi deuteronia fuusioituu muodostaen heliumin kevyen isotoopin (³He) ytimen sekä neutronin. Neutronien tuotto on havaittu herkällä neutronispektrometrilla. Tuloksia toisesta mahdollisesta ydinfuusiokanavasta ei ole (p on protoni ja t tritium).



silla sen havaitseminen vaatisi erilaista mittausten etelämä. On kuitenkin arvioitava, että myös jalkammissa prosessin on esiintyttävä lähes samalla nopeudella.

Huomattakoon, että Fleischmann ja Pons puolestaan ovat tietävästi rapor-

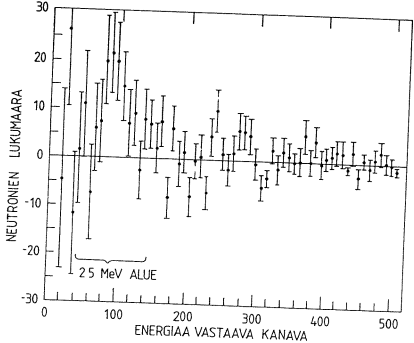


Fleischmannin ja Ponsin² mittaama elektrolyysiprosessissa syntyvien gammasäteiden spektri.

toineet anostaan lammon tuotosta elektrolyyttiliuoksessa. Tama mittaus ei sunkaan ole selektiivinen vain ydinfuusioprosesseille, sillä myös kemialliset prosessit elektrolyyttiliuoksessa voivat tuottaa lampöä. Engham Youngin yhtiöstä usean viime vuoden ajan kehitetty neutronispektrometri on ollut ratkaiseva kylmäfuusioprosessin identifiointissa Alla olevassa kuvassa

esitetty neutronien nettotuotto puhtyy 2.45 MeV:n kohdalle, joka merkitsee deuteronien fuusiota kaavan 1 mukaisesti.

Titaani ja palladium valittu elektrodien materiaaleiksi, koska niillä on kyky varastoida paljon vetyä sekä muodostaa lukuista vety-yhdisteitä eli hydridejä. Elektrolyysissä käytettiin savittajannutetta 3-25 volttia, joka ai-



Jonesin ryhmän³ mittaama kylmäfuusioprosessien aiheuttama neutronien nettotuotto

heutu 10-500 miljampeerin sähkövirran Matenaaleja ja olosuhteita ei sunkaan ole tarkkaan optimoitu. Mahdollisesti myös muut neljännes sivuryhman metalleista titaanin lisäksi, zirkonium ja hafnium, tulisivat kysymykseen; palladiumin lisäksi rutenium ja rodium ovat kevyitä platinametalleja. Raskaana platinametalleina osium ja iridium voisivat platinan ohella toimia aktiivisina kylmäfuusion katalysaattoreina Vedyn isotooppien liike metalleissa on oleellisesti kvanttifysiikan lakien hallitsema ilmiö.

Havaittu kunteen aneen katalysaattorin kylmäfuusionopeus on arviolta suuruusluokkaa 10²⁰ fuusiota deuteroniparalle kohti sekunnissa. Tämä on saavutettavissa "pustamalla" deuteronit puoleen tasapainotäisyydestään molekyyli muodossa. Saavutettu fuusionopeuden valtava kasvu ehdottaa tunnetun pietoosähköisen ilmiön kanssa analogisen ns. pietoindufusion⁴ havaittujen eräänä mahdollisena selityksenä. Mainitut pienet fuusionopeudet selittävät joukon sängen mieleenkiintoisia planetaarisia lampöilmiöitä, mutta ne eivät anna aiheutta uskoa siihen ylitoimituksiin fuusion energian tuottamisesta, johon Fleischmannin ja Ponsin julkastamat ensi tulokset ovat johtaneet.

Tuntuu hämmästyttävältä, että fuusion nopeuteen ("ydinkemiaan") pysyvyytään vaikuttamaan sellaisia ulkoisilla muuttujilla kuten paineella, lämpötilalla ja sähkömagneettisilla kentillä. Tämä pätee kuitenkin myöskin katalysaattorissa kylmässä ydinfuusiossa. Kylmäfuusion kiinteässä aineessa todistaa monipuolista ja poikkeittoliteollisen fysiikan akateemisen perustutkimustoumman hyödyllisyyttä, jonka ansiosta on löytynyt mieleenkiintoinen materiaalfysiikan kannalta erittäin haastava uusi lähestymistapa fuusion energian tutkimuksessa.

Kirjallisuusviitteet

- 1 J Rafelski ja S.E. Jones, "Cold Nuclear Fusion", Scientific American heinäkuu 1987, ss. 66-71.
- 2 M Fleischmann ja S. Pons, "Electrochemically induced nuclear fusion in deuterium", J. Electroanal. Chem 261, 301 (1989).
- 3 S.E. Jones, E.P. Palmer, J.B. Czirr, D.L. Decker, G.L. Jensen, J.M. Thorne, S.F. Taylor ja J. Rafelski, "Observation of Cold Nuclear Fusion in Condensed Matter", lahetetty julkaistavaksi aikakauslehdessä NATURE.
- 4 C DeW Van Siclen ja S.E. Jones, "Piezonuclear fusion in isotopic hydrogen molecules", J Phys G 12, 213 (1986)

KYLMÄFUUSIO - RATKAISU VAIKO UNELMA?

Seppo Karttunen
Valtion teknillinen tutkimuskeskus
Ydinvoimatekniikan laboratorio

Maaliskuun lopulla 1989 saatiin hätkähdyttävä uutinen, jonka mukaan deuteriumin fuusioreaktioita olisi pystytty tuottamaan merkittävässä määrin huoneenlämpötilassa hyvin yksinkertaisella koelaitteistolla. Kokeen suorittajat Martin Fleischmann ja Stanley Pons väittävät tuottavansa tavallisessa elektrolyysilaitteistossa enemmän energiaa kuin elektrolyysin ylläpitoon kuluu. Kokeessa on havaittu myös fuusioreaktiotuotteita neutroneja ja tritiumia, mutta niiden määrä on kertalukuja liian pieni selittämään suuren lämmöntuoton palladiumkatodissa.

Kevyiden ytimen fuusioreaktiot huolehtivat auringon ja muiden tähtien energiantuotannosta. Lisäksi lähes kaikki alkuaineet rautaan saakka ovat muodostuneet tähtien sisuksissa fuusioreaktioiden kautta. Siten fuusiolla on myös keskeinen rooli maailman-kaikkeuden alkuaineiden tuotannossa. Auringon fuusioenergia on valtaimon elämän ylläpitämiseksi maan päällä ja lähes kaikki ilmsen käyttämät energiamuodot ovat epäsuoraan auringon fuusioreaktioiden seurausta. Poikkeuksena on fissioenergia, jossa vapautetaan supernovaräjähdyksissä muodostuneeseen uraaniin sitoutunutta energiaa.

Fuusioenergian suora valjastaminen ihmiskunnan käyttöön on unelma, jota on suunnitellutkin yrittetty toteuttaa aina 50-luvulta lähtien, jolloin rauhanomaiseen käyttöön tahtivaa osa suurvaltojen fuusiotutkimuksista julkistettiin. Tutkimustyö on ollut intensiivistä ja jättänyt merkittävän edistysaskelin vuosien varrella. Tällä hetkellä ollaan "perinteisessä fuusiotutkimuksessa" aivan fuusioenergian tekemis-tieteellisen toteutettavuuden kynnyksellä. Energiantuotannon kannalta kimmottavimmat fuusioreaktiot ovat vedyn isotooppien deuteriumin (D) ja tritiumin (T) väliset reaktiot: $D+T \rightarrow He^4+n+17.6$ MeV ja $D+D \rightarrow T+p+4.03$ MeV tai yhtä todennäköinen haara $D+D \rightarrow He^3+n+3.27$ MeV. Nämä paljastavat myös, että fuusioenergia ei ole täysin puhdasta, sillä DT- ja DT-reaktiosta vapautuvat neutronit johtavat aktivoitumisongelmaan ja tritium itsessään on radioaktiivinen (β -säteilijä, radiomyrkkyä heva). Fuusioon liittyvät radioaktiivisuuskysymyksiä voidaan kuitenkin pitää merkittävästi helpompina fissioon verrattuna

Lämpöydinfuusio

Fuusioenergian esteenä on ytimien välinen sähkönen poistovuonna nk. Coulombin valli, jonka ylittäminen vaatii hukkasilta kymmenien kiloelektronivolttien energian. Koska ytimien tornäystilläntilanteessa siirtoa on fuusioitumista huomattavasti todennäköisempi, on tilanne järkevää silten, että törmäyksiä voi tapahtua toistuvasti. Suoraan viivassuunnan tämä voidaan tehdä kuumentamalla polttoaineen korkeaan lämpötilaan, että hukkasten termien energia riittää Coulombin vallin ylittämiseen. Lisäksi nettoenergian tuottamiseen edellyttää polttoaineen pitämistä koossa niin kauan, että fuusioenergiat ehti vapautua enemmän kuin kuumentamiseen ja koossapitoon on käytetty. Koossapitoheito nettoenergian saamiseksi, joka tunnetaan nimellä Lawsonin kriteeri, lausuu että polttoaineen tiheyden N ja energian koossapitoajan τ tulon tulee ylittää tietty lämpötilasta riippuva arvo. Tässä mielessä helpoin on DT-reaktio, jolle $N\tau > 10^{20} m^{-3} s$ lämpötilassa 10 keV (n. 10⁸ K).

Pelkätystyn fuusiolaitteen hyvyttä voidaan kuvata nk fuusiotulolla N-T, jossa T on polttoameen lämpötila. Edistysvauhtia konventionaalisessa fuusiotutkimuksessa kuvaa se, että kyseisen fuusiotulon on parantunut 50-luvun puolivälissä noin tekijällä kymmenen aina viiden vuoden välein. Tällä hetkellä fuusiotulon ennätysarvo on $3-4 \times 10^{20} m^{-3} s$ keV, joten "breakeven" taso on vain tekijän 3 päässä. Tulokset on saatu suunnilla tokamakkeilla JET (Joint European Torus, Culham) ja JT-6U (Tokamak Fusion Test Reactor, Princeton)

Kylmäfuusio Myonikatalysoitu fuusio

Keuyden ytimen fuusioituminen ei välttämättä edellytä miljoonien asteiden lämpötilää. Tämä on kustaatta osoitettu nk myonikatalysoidussa fuusiossa Teoretisesti myonikatalysoituminen ennustav F.C Frank ja A.D. Sarov jo 1940-luvun lopulla ja kokeellisesti sen havaitsi L.W Alvarezin ryhmä noin kymmenen vuotta myöhemmin

Perusedeana on korvata osa DT-polttoaineen elektroneista negatiivisesta varauksella, mutta n 200 kertaa raskaimmilla j- mesoneilla eli myoneilla, joita voidaan tuottaa huokkaskehnydyillä Myonin muodostav deuterium ja tritium ydinten kanssa mesootomeja D μ ja T μ sekä edelleen mesomolekyylejä T μ D μ . Myonin suuresta massasta (106 MeV) joutuvat deuterium ja tritium ytimet juhtuvat mesomolekyylin muodostuessa mm lähelle toisiaan, että fuusioituminen seuraa välittömästi tunneloimalla. (Bohnn vetyatomin sade kääntäen verrannollinen elektronin massaan). Tietyssä olosuhteissa mesomolekyylin muodostus voi tapahtua hyvin nopeassa l nsn aikaskaalassa, joten ideaalipaauksessa yksi myoni voi katalysoida luokkaa 1000 DT-fuusiota 2,2 μ s elinaikanaan Myonin kustannuksiksi voidaan karkeasti arvioida 10

W, mikä merkitsee, että nettoenergian tuottaminen myonikatalyysillä on ainakin periaatteessa mahdollista. Vaukempina ongelmana on myonin tarkentuminen DT-fuusiosta syntyvän He $^+$ -ytimen seuralaiseksi, jonka jälkeen myonin vapautuminen loppuelinäkanaan on epätodennäköistä. He-tarkentuminen todennäköisyydeksi on saatu kokeellisesti 0,5 % Tämä merkitsee keskimäärän 200 fuusiota myonia kohden (3 δ CeV/myoni), mikä ei riitä kattamaan myonin valmistuskustannuksia Siten myonikatalysoitu fuusio voi tulevaisuudessa soveltua energian tuottamiseen vain, mikäli myonin tekemiseen tarvittavaa energiaa ja He-tarkentuminen todennäköisyyttä voidaan merkittävästi alentaa

Sähkökemialisesti indusoitu fuusio kiinteässä aineessa

Martin Fleischmann ja Stanley Pons (Utahun Yhioistto) hatkähdyttivät maailmaa maaliskuun lopulla ilmoittamalla onnistuneensa fuusioimaan deuterium

ma hyvin yksinkertaisella elektrolyysi-laitteistolla [1] Se muodostuu palladium-katodista ja sitä ympäröivästä plannaa-anodista Katodin geometriaa vaihdeltun (sauva, levy ja kuutio) Luokseena on raskas vesi D $_2$ O ja litium-hydroksidi LiOD. Elektrolyysi on standardimenetelmä pyritäessä suurin vetytittuoksuksen metallissa Kyseessä kokeessa Pd-katodin deuterium-pitoisuudeksi arvioidaan 0,5-1 D/Pd, mikä vastaa hyvin suurta deuteriumin theytta n 10 22 cm 3 .

Kokeessa havaittu lämmontuotto palladium-katodissa rippuu voimakkaasti katodin geometriasta. Parhaat mitaustulokset saatu sauvakatodista (0,4x10 cm), jossa tehotehdet ylittävät 10 W/cm 2 tason Lisäksi lämmontuotto kestää luokkaa 120 tuntia, joten energiantuotoksi saadaan noin 4 Mj/cm 2 . Tämä vastaa 2,5 keV energiaa deuterium atomia kohden, jota on vaikea selittää kemialisten prosessien kautta. Tämä on Fleischmann-Pons kokeen vahvin argumentti sille, että ilmiön takana on ydinreaktio.

Tekijät väittävät tuottavansa enemmän energiaa (lampöä) kuin elektrolyysin ylläpitämiseen kullu (sähköä). Vahvistukseksi on arvioitu 1.1-1.5 Fuusioikokeena se merkitsi "break-even"-tilanteen ylittämistä, jota ei ole toistaiseksi saavutettu rauhanomaisessa lämpöydinfuusiotutkimuksessa, jossa vahvistukselle on saatu parhaimmillaan 0.5 olettaen polttoaineeksi deuterium-tritium seos.

Fleischmann ja Pons ehdottavat lämmontuottomekanismiksi DD-fuusioreaktiota. Fuusioitotena syntyvä 2.5 MeV:n neutroneja todellakin havaittuun ja arvioitu neutronituotto Pd-katodissa (0.4x10 cm) oli noin 4x10 4 s $^{-1}$. Tritiumtuotto oli konsistentti neutronin kanssa olettaen sama todennäköisyys molemille DD-reaktion haaroille. Havaittuun fuusioitotteiden perusteella arvioitu tehotehdys (DD-reaktio) on noin 5x10 4 W/cm 2 , mikä on lahes kahdeksan kertalukua vähemmän kuin suoraan mittauksessa havaittiin Siten DD-fuusio ei voi selittää Fleischmann-Pons lämmontuottoa amakaan näiden tulosten valossa. Erääks selitykseksi on tarjottu DL $_2^+$ -fuusiota, jossa syntyy kaksi He $^+$ -ydintä ja 22.4 MeV energiaa Todennäköisempi vaihtoehto selitykseksi tätä kirjoitettaessa on jokin huomaamatta jäänyt tai uusi sähkökemiallinen ilmiö tai mittausvirhe

Valittomasti Fleischmann-Pons kokeen julkustamisen jälkeen tiedotti Steven Jonesin ryhmä (Bringham Young Yhioistto, Utah) omasta kokeestaan, joka oli hyvin samantapainen [2] Jonesin ryhmä on tehnyt aiemmin erittäin korkeatasoista työtä myonikatalysoitun fuusioin alueella [3] Myös Jonesin ryh-

man koe perustu elektrolyysin, jossa katodina käytettun joko palladiumia tai titanaa Luos oli raskasta vettä, mutta metallisuulojen osalta koostumus poikkesi Fleischmann-Pons kokeesta

Jonesin ryhmä mutaa neutronien energiaksi 2.5 MeV, joten kyseessä on kiistatta DD-fuusio Sitävastoin he eivät mutaa tuusioa eikä lämmontuottoa. Arvioitu fuusioiteho on luokkaa 10 13 fuusiota/s D-para kohden. Neutronituotto suuruusluokaksi saadaan siten 1 n/s, mikä on merittävästi alhaisempi kuin Fleischmann-Pons kokeessa Mikäli fuusioitot tapahtuu ohuessa pintakerroksessa voi fuusioiteho olla jotakin kertalukua yllämainittua suurempi. Jonesin fuusioin mallin mukaan tehotehdetyksi saadaan hyvin vaatmaton arvo n. 10 12 W/cm 2 . Kyseinen fuusioitot on fyysikaalisesti erittäin mielenkiintoinen, mutta energiantuottoosvelliutuksen kannalta toivoton alhainen. Spekulaatiivnen "raskas elektroni" metallihalassa, jonka massa vastaa muutamaa elektronia, voisi selittää Jonesin ryhmän havaitseman DD-fuusionopeuden [2] (analogia myonikatalysoitun fuusioon).

Tätä artikkelia kirjoitettaessa, ennen perusteellista teteellistä kritiikkiä, on syytä yhtyä vain Jonesin ryhmän varovaiseen johtopäätökseen, että havainto merkitsevät mahdollisesti uuden lähestymistään löytymistä fuusioenergiatutkimukselle.

Kirjallisuusviitteet

- [1] M. Fleischmann and S. Pons, "Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium", J. Electroanal. Chem. 261 (1989) 301.
- [2] S.E. Jones, E.P. Palmer, J.B. Czizir, D.L. Decker, G.L. Jensen, J.M. Thorne, S.F. Taylor and J. Rafelski, "Observations of cold nuclear fusion in condensed matter", Preprint, March 1989.
- [3] J. Rafelski and S.E. Jones, "Cold nuclear fusion", Sci. American, July 1987, p. 66.

2.2. Fissionreaktori

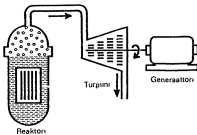
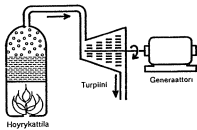
Käytössä olevien ydinvoimaloiden reaktorin sydämessä fissiona vapautunut energia muuntuu lämmöksi,

jota käytetään vesihöyryn muodostamiseen.

Tästä eteenpäin ydinvoimala toimii kuin muutkin voimalat:

höyry johdetaan turbiiniin, jotka pyörittävät sähkögeneraattoria ...

Ydinvoimalaitoksessa ei ole mitään erikoisen kunnallista. Luonnollisesti asiantuntijat ovat ratkaisseet vaikean ja monimutkaisen ongelman, mutta itse periaate on helppolitteinen. Kaikki perustuu siihen, että vesi muutetaan höyryksi käyttäen hyökkäyslampöä, joka syntyy uraanipolttoaineen sisältämien atomiydinten haljetessa. Oily- tai hiilikäyttöisissä voimalaitoksissa palava liekki lämmittää veden niin, että se muuttuu höyryksi. Ero on siis vain tavassa, jolla vesi kiehetaan. Kummassakin tapauksessa höyry tämän jälkeen johdetaan korkean paineen alaisena turbiiniin, siivillä varustettuun pyörään, jonka voimakas höyrysuihku saa pyörimään suurella nopeudella. Turbiini vuorostaan on suorassa yhteydessä generaattoriin, jota se pyörittää ja jossa lopputuote, sähkö, syntyy.



Mutta miu tehtäisiin höyrylle sen jälkeen, kun se on käytetty turpiinissa? Niin, nyt tarvitaan ns. lauhdutinta, jossa höyry jäähdytetään jälleen vedeksi. Tarvitaan myös pumppu viemään vesi takaisin reaktoriin, jotta sitä voidaan käyttää yhä uudelleen ja uudelleen. Siis näin

Reaktorisydämen osat

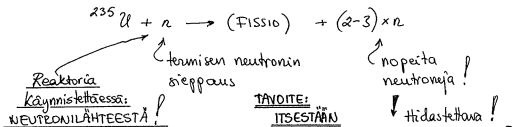
1) Polttoaine-elementit (suojakuoriset polttoainesauvat → nippuja)

yleisin: ^{235}U :in suhteen väkevöitetty uraanioksidiksi

rikastusaste 2-3%

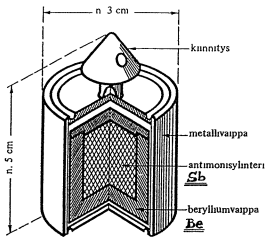
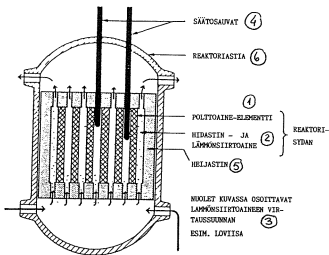
(Luonnonuraani: ^{238}U 99.28%, ^{235}U 0.715%, ^{234}U 0.005%)

$\rightarrow \times 4$



2) Hidastin = aine, elastisesti josta sirotessaan neutroni menettää mahd. paljon liike-energiastaan ja jonka neutroni sieppauskerroin vaikutusala on mahd. pieni

- esim.
- tavallinen vesi (H_2O) (nnsaasti protoneja!)
 - raskas vesi (D_2O)
 - grafiitti (^{12}C)
 - beryllium (Be)



(67)

Hidastinaineet

(käyt-)

Vesi H₂O

Raskas vesi D₂O

Beryllium Be

Grafiitti ¹²C

(68)
Sisältää raskasta
vettä ²D

Protoni (= vetyydin) soveltuu erinomaisesti hidastin-
... ytimeksi.

Muita:

hidastinmateriaalin tulisi absorboida vain vähän
neutroneja!

• Tavallinen vesi

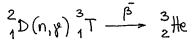
- hyvä hidastin, halpa
- absorptiovaikutusala melko suuri → maami-
polttainen oltava väkevoitettu nä-
hintaan 2 % ²³⁵U:ia

• Raskas vesi

- hyvä hidastin
- absorptiovaikutusala hyvin pieni → void
käyttää
luonnon
maama
poltto-
aineena
- hidastinainem oltava 99.5%:sti
raskasta vettä → valmistusprosessi
hyvin kallis

- toinen haitta:
neutronisieppauksella muod. radio-
aktiivista tritiumia

β - hajoaa; t_{1/2} = 12 vuotta



(t_{1/2} = 12 vuotta)

(12C)

(69)

• Grafiitti hidastimena

- jäähtyvä tavallisesti kaakua (hiilidioksidia tai heliumpia)
- void. saada huomattavasti korkeampia lämpötiloja kuin vesireaktoreissa
- raskasta vettä huonompi hidastin
- void. puri ja juuri käyttää luonnon uraania
- huomattavasti halvempaa kuin raskas vesi

• Beryllium

- kallista
- myrkyllistä (voikea käsitellä)
- Esim. Ruotsissa Studsvikin R2 -reaktorissa sydän on ympäröity berylliumilla, joka heijastaa takaisin sydämeen sieltä vuotavia neutroneja

Hidastinainevertailu:

Aine	Sopivuus
Tavallinen vesi (H_2O)	60
Raskas vesi (D_2O)	5000
Beryllium (Be)	145
Grafiitti (^{12}C)	165

(70)

3) Jäädytysaine

- ↳ kuljettaa pois sydämessä syntyvän lämmön (\approx peräisin fissioituotteiden lämpö-energiasta)
- yleisimmin: tavallista vettä

4) Säätösauvat

- neutronien määrää (\leftarrow reaktorin tehoa) reaktorin sydämessä void. säätää käyttämällä aineita, joiden neutronisieppauksen vaikutusala on suuri.
- ↳ esim. Cd, B, Gd

5) Heijastin

- reaktorisydän ympäröi heijastin, jonka tehtävänä on pienentää syntyvien neutronien vuotoa ulos reaktorista.

6) Reaktoriastia

- reaktorisydän sijaitsee paineastiassa, jota ympäröi säteily suoja syntyvän säteilyn haitallisten vaikutusten estämiseksi.

7) Neutronilähde (tarvitaan reaktorin käynnistykseen!)

- Antimoniydän "varataan" reaktorissa: $^{123}_{51}Sb(n, \gamma)_{51}^{124}Sb$
- $^{124}_{51}Sb$ lähettää β^- -säteilyä, sen $t_{1/2} = 60$ vrk
- Tämä säteily irrottaa neutroneja berylliumkuoresta $^9_4Be(\alpha, n)^8_4Be$ Neutronilähden $t_{1/2} = 60$ vrk.

Uraaniytimen halkeaminen

Kuva
(A)_{1,2}

(71)

Kuva

(B)

^{235}U :n fissionissa vapautuneiden neutronien lukumäärä niiden kite-energian funktiona.

↳ max. edustaa neutronien todennäköisintä energiaa: 0.6-0.8 MeV

Kuva

(C)

Reaktorisydämessä on joka hetki eri energian omaavia neutroneja

jossa havaitaan kolme aluetta:

- fissionissa vapautuvat nopeat neutronit (keskim. energia n. 2 MeV)
- hidastuvat neutronit (törmäävät hidastimen ytimin ja fissionuotteen)
 - ↳ lukumäärä on likimain suoraan verrannollinen $1/E$:hen.
- termiset neutronit; reaktorisydämen lämpötila määrää keskim. energian.

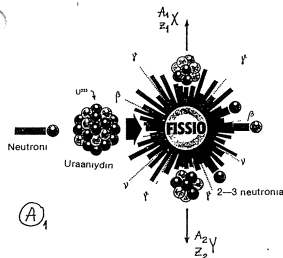
Aikaskaalasta:

- ^{235}U :n neutronisieppaus → fissioni $\sim 10^{-13}$ s
 - Nopeiden fissioni-neutronien hidastuminen termiseksi $\sim 10^{-5}$ s
 - Terminen elinikä (ennen absorptiota tai vuotoa reaktorisydäimestä) $\sim 100 \mu\text{s} = 10^{-4}$ s
- (= 10^{-3} s D_2O :ssa)

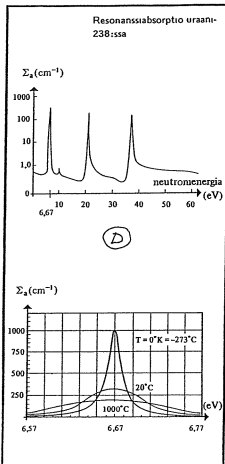
PISIN!
(Korkein P.)
max.

(72)

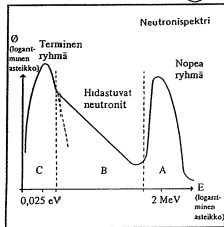
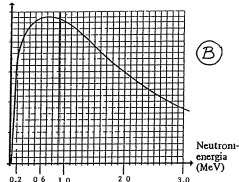
⊕ Proton
⊙ Neutron



(A)₁



Essintymistiheys



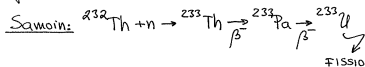
Karkeasti ottaen 1 MW:n teholla fissiossa kuluu n. 1g polttoainetta vuorokaudessa. (Kts. harj.)

Samalla, kun reaktorissa kuluu fissiokelpoista polttoainetta, voidaan sitä myös valmistaa.

↳ kts. edell sivu:

^{233}U ei ole fissiokelpoinen (termisillä neutroneilla)

mutta sitä voidaan valmistaa fissiokelpoista materiaalia \rightarrow ^{239}Pu



Isotooppeja ^{238}U ja ^{232}Th sanotaan hyönte-aineiksi.

Näitä käyttävät reaktorit: hyönte-reaktorit.

Huom. ^{238}U :sta saatu ^{239}Pu on tärkeä materiaali fissioräjähkeen aikaansaamiseen.
 ↳ palataan asiaan...

2.2.2. Reaktorityypit

Lyhenne

PWR	<u>P</u> ressurized <u>W</u> ater <u>R</u> eactor } <u>LOVIISA</u> Painevesireaktori
BWR	<u>B</u> oiling <u>W</u> ater <u>R</u> eactor } <u>OLKILUOTO</u> Kiehuvesireaktori
AGR	Advanced Gas-Cooled Reactor Kaasujäähdytteinen reaktori, grafiittihidastin
RBMK	Grafiittihidasteinen kiehuvesi-reaktori ↳ <u>T</u> SHERNOBYL
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor Raskasvesireaktori
Breeder	Hyötöreaktori

KIEHUTUSVESIREAKTORI (BWR)

OLKILUOTO

Fissiassa vapautuva energia → lämmöksi, joka siirretään veteen sydämen läpi kulkevana → muuttuu höyryksi, joka puolestaan saa turbiinin pyörimään. Turbiini pyörittää generaattoria → syntyy sähköä...

* Paine n. 70 baria!

1 bar = 10^5 Pa (= 0.987 atm) $\left(= \frac{1 \text{ N}}{\text{mm}^2} \right) \sim 7 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Tehon säätö: 100-200 kpl säätösauvoja alhaalta päin.

PAINEVESIREAKTORI (PWR)

LOVIISA

$\sim 15 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Paine n. 150 baria → primääripöirissä kulkeva vesi ei kiehu.

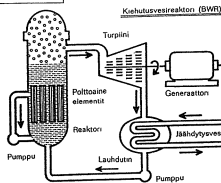
Höyryn muodostus erillisessä sekundääripöirissä (höyrystimessä).

Tehon säätö:

Jäähdytyseseen sekoitettavan boorin* (absoroi neutronoja) ylhäältä päin tuomettavien säätösauvojen (50-60 kpl) avulla.

* Mandollista käyttöä ko. neutroniabsorbattoria, koska ko. vesi ei kierrä turbiinin kautta! Vastavasti keuhovesireaktorissa ei voida käyttää!

REAKTORITYYPPI, JOTA KAYTETAAN OLIKILUOTOSSA



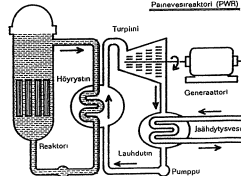
Energia, joka on varastoituneena uraanitymissä, vapautuu reaktorin lämpönä, kun halkeaminen tapahtuu. Tämä lämpö siirretään veteen, joka muuttuu höyryksi ja joka vuorostaan saa turbiinin pyörimään. Turbiini pyörittää generaattoria ja silloin syntyy sähköä.

REAKTORITYYPPI, JOTA KAYTETAAN LOVIISASSA

Reaktorit, jota käytetään Loviisan voimalaitoksella, ovat niin kutsuttuja painevesireaktoreita. Tätä nimeä käytetään siitä syystä, että reaktorissa oleva vesi pidetään niin korkean paineen alaisena, ettei se pääse kiehumaan. Höyry muodostuu erillisessä suljetussa piirissä, jota sanotaan sekundääripöiriksi. Siis tällä tavalla.

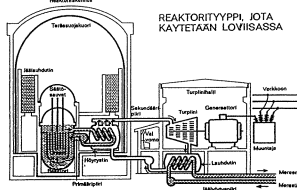
Painevesireaktorissa vesi lämmitetään korkean paineen alaisena. Vesi johdetaan niin kutsuttuun höyrystimeen. Siellä se kuumentaa sekundääripöirin vettä, jolloin turbiiniin menevä höyry syntyy.

Painevesireaktori (PWR)



Reaktorilaitos

REAKTORITYYPPI, JOTA KAYTETAAN LOVIISASSA



2.2.3. Reaktoridynamiikkaa

Jos reaktorin polttoainemäärä ylittää nk.

"kriittisen koon" → reaktori saadaan kriittiseksi eli

fissionituminen saadaan jatkamaan ketjureaktiona.

ts. Kyse on reaktorissa syntyvien ja siellä absorboituvien vapaiden neutronien määrästä:

a) Tuotto: ^{235}U :n, ^{238}U :n, ^{239}Pu :n hajotessa

(tiettyt hajoamistuotteet lähettävät myös neutronia)

b) Absorptio:

- neutronisieppaus polttoainenuklideissa ^{235}U :ssa ja ^{238}U :ssa
- hidastinainessa
- rakenneainessa
- absorbaattorissa (säätösauvat)

c) Vuoto

- vapaita neutronia vuotaa ulos reaktorisydäimestä

Vakioteho

Vakioteholla toimiva reaktori tuottaa aikayksikössä yhtä monta neutronia kuin niitä häviää absorptiossa sekä vuotamalla

ts. symbolisesti:

$$\text{Tuotto} = \text{Absorptio} + \text{Vuoto}$$

Tasapainotilassa ^{FISSIO}hajoamisten lukumäärä aikayksikössä = vakio.

↳ reaktorin sanotaan tällöin olevan kriittinen.

Määr. reaktorin kasvutekijä k :

$$k = \frac{\text{neutronisukupolven neutronien lukumäärä}}{\text{edellisen sukupolven neutronien lukumäärä}}$$

↳ kriittisellä reaktorilla $k = 1$.

(Kyse on hyvin suuresta hajoamisten määrästä:

n. 3×10^{13} hajoamista/s jokaista kW:ia kohden)

Reaktori voi olla myös:

- alikriittinen → teho pienenee nk. jälkiteho-arvoa kohti
- yli kriittinen → teho kasvaa

Kun neutronivuota muutetaan \rightarrow k muuttuu.

(81)

Muutosta kuvaa REAKTIIVISUUS:

$$\beta = \frac{k-1}{k}$$

Silloin:

k	β	Reaktori on	Teho
< 1	< 0	alikuittinen	pienenee
1	0	kriittinen	pysyy vakiona
> 1	> 0	ylikuittinen	kasvaa

Käynnissä oleville reaktoreille $k \approx 1$
(ts. hyvin lähellä ykköstä).

$$\rightarrow \beta = \frac{k-1}{k} \approx k-1$$

$\leftarrow \approx 1$

(vastaa hyvin normaaleja käyttöolosuhteita)

Reaktorin neutronitiheys? [kp/m^3]

(82)

eräs neutronisukuplvi: n

seuraava " " : kn

teemisten neutronien keskim. elin aika: L ($\approx 100 \mu\text{s}$)

ts. ajassa L tapahtuu neutronitiheyden muutos:

$$\boxed{dn = kn - n}$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{kn - n}{L} = \frac{k-1}{L} n$$

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \frac{k-1}{L} \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{n}{n_0} = \frac{k-1}{L} t$$

$$\boxed{n = n_0 e^{\frac{k-1}{L} t} = n_0 e^{\frac{\beta}{L} t}}$$

Esim.

$k = 1.001$ (ts. reaktiivisuus $\beta = 0.001$)

$$\frac{L}{t} = \frac{100 \mu\text{s}}{1\text{s}}$$

$$\frac{n}{n_0} = e^{\frac{0.001}{100 \times 10^{-6}} \times 1} = e^{10} \approx 22000$$

ts. teho kasvaisi sekunnissa 22000 kertaiseksi

\leftarrow ei olisi enää hallittavissa!

(§ 1.4.6. Fissio): ssa huomautettiin, että

fission tuotteiden hajotessa emittoituu viivästynyt neutroni keskim. 13 s fission jälkeen.

↳ niiden osuus kaikista syntyneistä neutroneista on vain n. 0.65%,

Muuta ↳ ne pidentävät neutronien keskim. elin-aikaa L_t arvoon:

$$L_t = (1 - 0.0065)L + 0.0065 \times \tau = 0.088 \text{ s}$$

$$\begin{cases} L = 100 \text{ } \mu\text{s} \\ \tau = 13 \text{ s} \end{cases}$$

$$\frac{n}{n_0} = e^{\frac{\rho}{L_t} t}$$

↳ sim.

$$\begin{aligned} k &= 1.001 & (\text{ts. reaktiivisuus } \rho &= 0.001) \\ L_t &= 0.088 \text{ s} \\ t &= 1 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\frac{n}{n_0} = e^{\frac{0.001}{0.088} \times 1} = e^{0.0114} = 1.012$$

↳ ts. jos neutronitiheys kasvaa yhden promillen, niin reaktorin teho kasvaa noin yhdellä prosentilla sekunneissa!

Viivästyneiden neutronien ansiosta reaktorin teho on säädettävissä halutulle tasolle.

LUONTO!
(taas!!)

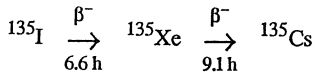
2.2.4. Reaktorimyrkyt

Reaktorissa syntyy fissiotuotteita, joilla on erittäin suuri neutronisieppauksen vaikutusala

↳ näillä on merkittävä vaikutus reaktorin käyttäytymiseen
 ts. "vastaa" neutroneja pääprossilta

↳ nk. "reaktorimyrkyt"

Esim.



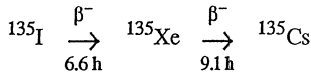
↳ ^{135}Xe :lle $\sigma_n = 2.6 \times 10^6 \text{ b}$

Reaktorin toimissa vakioteholla: Xe-tasapaino!

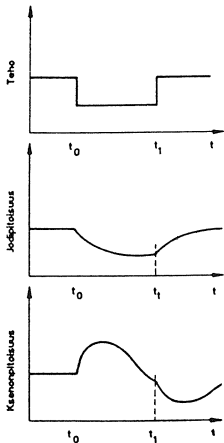
Jos reaktorin tehoa a) lasketaan, b) nostetaan

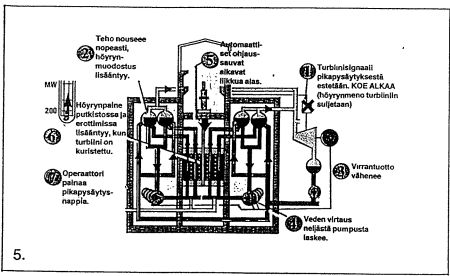
↳ on Xe-pitoisuuden muutokset otettava huomioon (kts. kuva →)

(koska se taas vaikuttaa neutronien määrään & siten tehoon!)



↳ $\sigma_n = 2.6 \times 10^6 \text{ b}$
 ↳ $^{135}\text{Xe}(n, \gamma)^{136}\text{Xe}$





5.

5. 1.22.45-1.23.42 SYDÄN RIISTÄYTY HALLINNASTA

■ VALVOMOSSA henkilökuunta kuulee kello 1.22.45 reaktorin sydämen olevan stabiilii, koska syöttöveden laadun ja höyrymuodostus kumoavat toistensa vaikutukset. Reaktor näyttää vakaalta, mutta sitä se ei ole kello 1.23.04 aloitetaan generaattorikoe lukkaamalla pikäpysäytin, joka muuten olisi pysäyttänyt ja kortes petastanut reaktorin, kun viimeinen jäljellä oleva turbiini pysähtyy. Koe tulee tärkeämmäksi kuin reaktorin turvallisuus Kokeen ratkaiseva vaahe alkaa, kun höyry ohjataan turbiiniin oli huuduttuun.

Ensimmäisten sekunten aikana ohjaussauvat saavat nosto- ja laskuimpulssseja ja reaktorin teho vaihtelee. Siitten kylmä syöttövesi vähenee, koska neilän kokeen piiriin kuuluvan pumppu teho laskee samanaikaisesti hidastuvan generaattorin kanssa. Sydän tulee kuumeemmaksi, höyry muodostuu yhä enemmän, teho nousee. Kello 1.23.31 tehon nousu on niin nopea, että automaattiset ohjaussauvat eivät pysy perässä.

Nyt kaikki riippuu käyttäjien huomiokyvystä. Kaikki turvajärjestelmät on kytketty pois automaattikaa myöten Yhdessänsä sekuntia myöhemmin eräs käyttäjästä kääntyy valvomöpytään päin ja painaa 1.23.40 nappia AZ 5. Se käynnistää ohjaussauvat pikäpysäytykseen. Mutta kun myöhään, reaktorin sydän on seitsemän metrin syvyydessä ja sauvat liikkuvat vain 40 cm sekunnissa Sydämen hallinta on karannut käsistä ja kiihtyvä teho nousu jatkuu.

6. 1.23.43-1.23.47 RÄJÄHDYS

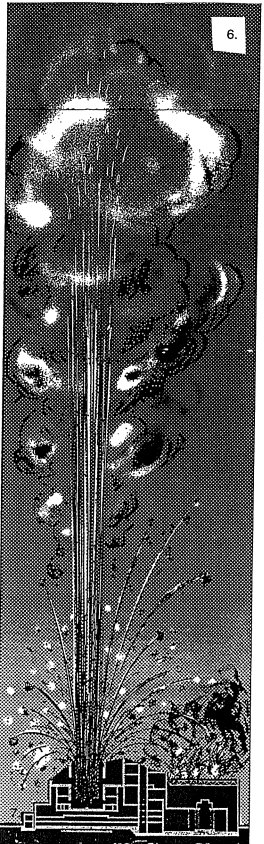
■ KOLME sekuntia myöhemmin - 1.23.43 - reaktorin teho on 540 MW. Kehityskulku on nyt niin nopea, etteivät ohjaussauvat pysy enää mukana eivätkä pysty estämään prosessia. Tämä joutuu siitä, että polttoaine-elementtien painalle on muodostunut höyrykuplia, jolloin teho nousee räjähdysmäisesti Sekuntia myöhemmin teho on yli sata kertaa reaktorin nimellistehon: se on 350 000 megawattia Hiihlin keuhkoko kuumentaa polttoaineen ja 0,9-milliset zirkonitumpukset halkeavat

1.23.45. Jauhemanen uraanipolttoaine joutuu kosketuksiin suoraan jäähdytysveden kanssa ja höyryä alkaa kehittyä suunnattomasti. Alhaisissa paineputkissa höyry ei pääse nittävän nopeasti pois sydäimestä, jolloin paine nousee valtavaksi. Se räjäyttää painepukset ja 1000 tonnia painava reaktorisäiliön kanssi ohjaussauvamekanismineen lentää pois Reaktorissa tapahtunut räjähdys vastaa voimalta 50 tonnia troytyä Tämä tapahtuu 1.23.47

7. 1.23.48 KATASTROFI

■ VÄLITTÖMÄSTI sydämessä tapahtuneen räjähdysen jälkeen höyry ja zirkoniu reagoivat vetykaasuun - myös muita reaktioita saattaa tapahtua Sekuntia myöhemmin - 1.23.48 - tapahtuu ensimmäinen räjähdys Ennenkämätön voima sinkoa katon ja seinät taivaan tuuliin. Sydäimestä linkeutuu tuhansittain särkyneitä polttoaine-elementtejä ja grafiittimökykyä tavaalle. Räjähdys muistuttaa tulivoirepurkauksa: 20 metriä yli 70 metriä korkeasta reaktorinrukkuksesta on kadonnut. Ala-puolella olevat tasanteet pyyhkyty-

vät ensin putpuhtaisi ja hautautuivat san jälkeen putoavan rojun alle rytekköksi, joka ulottuu maanpinnan tasolle. Sinkoileva palava materiaali syytytti yä 30 tulipalaa en puolella. Valtava lämmönkehitys nostaa hienompaa radioaktiivista ainesta korkealle ja se alkaa leviää. Katastrofi on tosiasiassa



6.

2.3. Ydinaseet

2.3.1. Fissiopommit

Rikastettava

m. 95%

Fissionava (fissionä) materiaalina ^{239}Pu
tai ^{235}U .

Toiminnan kannalta tärkeää:

a) $\frac{1}{A}$
b) neutroniheijastin

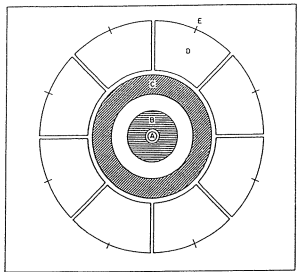
- neutronien vuoto estettävä tehokkaasti,
- Pommin pysyttävä mekaanisesti kaasussa riittävän monen neutronitukupolven ajan

"Kriittinen massa"

↙ pieni massa fissiilä ainetta, jossa ketjureaktio lähtee käyntiin jo yhden neutronin aiheuttamana!

Kriittiset massat normaaliitiheyksisille aineille.

Nuklidi	Heijastin	Heijastimen paksuus [cm]	Kriittinen massa [kg]
^{235}U	-	-	49
^{235}U	beryllium	10	14
^{235}U	luonnonuraani	10	18
^{239}Pu	-	-	12,5
^{239}Pu	beryllium	5,2	5,4
^{239}Pu	beryllium	32	2,5
^{239}Pu	luonnonuraani	5	6,4
^{239}Pu	luonnonuraani	24	4,4



Fissionpommin rakenneosat ovat:

- A) fission sytytin (neutronilähde)
- B) fissioituva ydin (plutoniumia tai ^{235}U)
- C) tehostin ja heijastin (uraani ja beryllium)
- D) tavanmukaisen räjähteen linssi
- E) tavanmukaisen räjähteen sytytin.

- Alienäitiset massat pidetään erillään; esim. kosmisen säteilyn neutronreja osuu muutama kepl/s fissiomassaan...
- Fissionpommissa kriittinen massa saadaan aikaan:
 - a) työkimenetelmällä tai (Harj.)
 - b) implosio - eli sisäänpäänräjäytys-tekniikalla (puristus \rightarrow suuri tiheys!)
 (ks. edell. sivu: Plutonium - pommi)
- Ketjureaktion käynnistys: tarvitaan neutronilähde (vrt. fissioreaktori)
 - \rightarrow räjäytysketkellä
 - esim. Be & α -lähde yhteen \rightarrow vapautuu neutronreja
- Tärkeää:
 - fissiomateriaalin tiheys, pakkaus, ympäröivä aine (neutroniheijastin: Be + ^2U)
- Vapautuva energia:

Fissio $\rightarrow 200 \text{ MeV} = 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
 $= 32 \times 10^{-12} \text{ J} = 32 \text{ pJ}$

\rightarrow 2-3 neutronia, nopeus $\sim 2 \times 10^7 \text{ m/s}$ (osa karkaa neutronit)

\rightarrow liikkuvat muutaman cm:n ennen törm. seuraavaan ytimeen (ks. $< 10^{-8} \text{ s}$) \rightarrow tuott. fission ...

• Jos fission jälkeen > 1 neutronia on käytettävissä seur. fission

↳ neutr. määrä & vapautunut energia lisääntyvät eksponentiaalisesti

Esim. Nagasakin pommi (v. 194)

↳ n. 3.2×10^{24} fissiota a' n. 29 pf

• tarvittin 56 neutronisukupolvea (aikaa < 1 μs); 99% energiasta vapautuu 5 viimeisen neutr. sukupolven aikana (aikaa ~ 0.05 μs)

↳ pommin pysyttävä mekaanisesti kasassa nuo tärkeimmät n. 0.05 μs!

• vapautunut energia = ?

↳ vrt. kun 1000 tn = 1 ktn = 10⁶ kg tavannukasta räjähdettä, trinitrotolueneaa (TNT) räjähtää, niin vapautuu n. 4.2×10^{12} J = 4.2 TJ

↳ montako fissiota tarvittaisiin?

$$\frac{4.2 \times 10^{12}}{29 \times 10^{-12}} = 1.45 \times 10^{23} \text{ kpl} = \frac{m}{235} \times 6 \times 10^{23}$$

↳ Fissionitunut massa = ?

$$m = \frac{235 \times 1.45}{6} \text{ g} = 57 \text{ g}$$

• Entäs sitten se Nagasaki:

$$\frac{3.2 \times 10^{24}}{N_4} \times \frac{29 \times 10^{-12}}{E_f} \text{ J} = 92 \times 10^{12} \text{ J} = 92 \text{ TJ}$$

vrt. TNT ?
 $\frac{92 \times 10^{12}}{4.2 \times 10^{12}} \text{ ktn} = 22 \text{ ktn} = 22000 \text{ tn TNT!}$

↳ fissionimateriaalia kului:

$$22 \times 57 \text{ g} = 1.25 \text{ kg}$$

↳ vrt.

Kriittinen massa, kun heijastimena

- Beryllium 14 kg
- Uraani 18 kg

ts. < 10% ehti fissioitua...

Fissionpommin max. teho?

• implusio tekniikalla void. tuottaa enemmän fissiokehoista materiaalia & saada se fissioitumaan tehokkaammin

↳ kattoon n. 500 ktn TNT ≈ 23 x Nagasaki

• toisaalta esim. tykeisten kranaatteihin "pieni" räjähdysvoima

↳ alarajana n. 10 ktn TNT

2.3.2. Fuusio pommit

(93)

vapautuva energia saadaan vetyisotooppien fuusiossa: ("vetypommi")

Reaktio	Vapautunut energia [pJ]
1. $2D + 2D \rightarrow {}^3He + n$	0,15
2. $2D + 2D \rightarrow {}^3T + {}^1H$	0,64
3. ${}^3T + 2D \rightarrow {}^4He + n$	2,82
4. ${}^3T + {}^3T \rightarrow {}^4He + n + n$	1,81

Fuusio pommissa (vetypommi) tarvittavan energian tuottamiseen käytettävät vetyisotooppien reaktiot.

Huom. Reaktiot 1, 3 & 4 tuottavat neutroneja!

Vapautuva energia oli fuusiossa ~ 30 pJ/fuusio

Fuusiossa vap. energia on 0,15 - 2,82 pJ/fuusio, ts. suurimmillaankin vain 10% fuusioista.

↳ Mutta: vap. energia/nukleoni = ?

a) Fuusio: $30 \text{ pJ} / 235 = 0,13 \text{ pJ/nukleoni}$

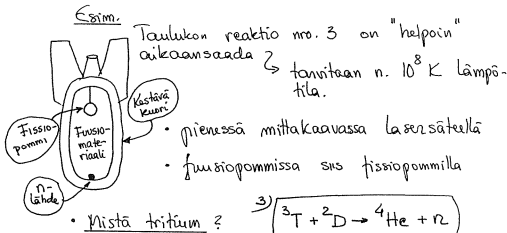
b) Fuusio: $2,82 \text{ pJ} / 5 = 0,56 \text{ pJ/nukleoni}$

↳ fuusio reaktiot tuottavat keskimäärin 3 kertaa enemmän energiaa/nukleoni kuin fissioreaktiot.

• Fuusio mahdollistamiseksi ytimet on saatava riittävän lähele toisiaan (vastassa Coulombin pirstovoimat).

(94)

↳ tarvitaan energiaa: fuusio pommissa tämä energia saadaan fissio pommin tavoin toimivasta sytyttimestä.

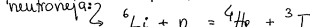


↳ radioakt. kaasu ($t_{1/2} = 12,3$ vuotta)

↳ käytettävä tritium tuotetaan räjäytyshetkellä:

litium deuteridi (küntä, sis. vain rikastettua 6Li - isotooppia)

↳ fissio sytyttimen räjähdys tuottaa neutroneja:



ts.

fissio sytyttimen merkitys:

- a) tuottaa riittävän lämpötilan
- b) tuottaa materiaalia fuusio reaktiota varten.

↳ 2D
& fuusio

- Fuusioreaktiolla ei ole kriittistä massaa, ei ylärajaa räjähdysenergialle.

↳ ongelmana: tuottaa riittävä energia koko fuusiomateriaalin kuumentamiseksi; ko. energia olisi tuotettava ~ valon nopeudella kaikkeialle fuusiomateriaalin?

Miten?

↳ Fissionisytyttimen eritt. korkeassa lämpötilassa pääosa energiaa emittoituu röntgensäteilyn muodossa.

↳ $\sim 10^8 K$
↳ etenevät valon nopeudella & siroavat takaisin heijastimesta

ts.

röntgensäteily saaruttaa fuusiomateriaalin ~ yht'äkkiä.

- Neuvostoliiton koeräjäytys n. 1961 oli vastasi
n. 60×10^6 tn = 60 Mtn TNT
(= $\frac{60000}{22} \approx 2700 \times$ Nagasaki)

- Räjähdysenergia kasvattaminen on edullista:

↳ esim. 100 000 ktn:n (= 100 Mtn:n) pommi saattaisi maksaa vain 2 x enemmän kuin 100 ktn:n pommi.

ts. tuhon x 1000

Fuusiopommin kasvattaminen:

- n. 1 kg fuusiomateriaalia lisää räjähdysvoimaa n. 10 ktn:lla

↳ esim. 100 Mtn:n fuusiomateriaali painaisi vain n. 15 tn.

Vrt. Fuusiopommin
max. ~ 0.5 Mtn!

- overkill-ilmio ts. tarpeettoman suuri räjähdysenergia asettaakin käytännön ylärajan...

Radioaktiiviset saasteet:

- ↳ fuusioreaktioista vain tritiumia, jonka vaarallisuus on suhteell. pieni
- suurilla vetypommeilla pääosa energiasta saadaan fuusiosta

↳ fissionisytyttimen tuottama radioakt. saaste on suhteell. vähäistä

↳ puhutaankin vetypommista "puhtaana" aseena!?

Boosteripommi (tehostettu pommi)

97

Fissiopommissa plutonium onton pallon muodossa

↳ keskustassa pieni määrä fuusiomateriaalia

implosioon aiheuttama puristus ja kuumeneminen aikaansaa pienimittaisen fuusioreaktion

↳ tuottaisi paljon neutroneja

↳ osuvat plutoniumiin ja tuottavat fissiosta (dikeurien ketjureaktion lisäksi)

ts.
fissiotaalis kasvavasti oleellisesti

Fissio-fuusio-fissio (f-f-f) pommit

Hitaat neutronit aikaansaavat fission ^{235}U :ssa mutta eivät ^{238}U :ssa.

Fuusioreaktiossa vapautuvat neutronit ovat erittäin nopeita

↳ voisivat aikaansaada fission ^{238}U :ssa!

- Esim.
- Luonnonuraani
 - Rikastuotehtaiden jätteenuraani (^{235}U -pitoisuus pienempi kuin luonnonuraanissa)

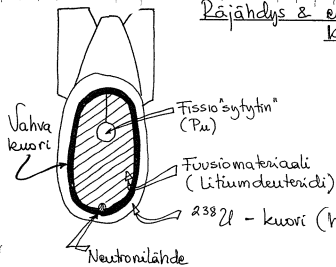
↳ Käyttöä?

Räjähdyks & energian vapautus

98

kolmessa vaiheessa:

- 1) Pu-sytytin räjähtää,
- 2) Fuusiopommi räjähtää
- 3) Fissio heijastimessa.



Radioaktiivinen saaste:

- ①-vaihe: "vähän" neutroneja → "kontrollisesti" soastetta
- ②-vaihe: tuottaa paljon neutroneja
- ③-vaihe: ↳ hyrin paljon rad.akt. saasteita...

Ydinasekirjallisuudessa oletetaan yleisesti, että fuusiopommit ovat juri f-f-f-pommeja, joissa energiasta n. 50% fissiosta ja n. 50% fuusioista.

↳ "erittäin likaisia" (rad.akt. tuotteiden määrä tuhansia kertoja suurempi kuin fissiopommissa)

Huom.

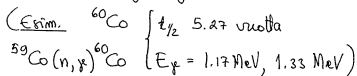
Neutronien tunkeutuminen ^{238}U -ytimiin aiheuttaa myös ^{239}Pu :n muodostumista
↳ naltavasti

Sekoitetaan fuusiomateriaalin joukkoon aineita, jotka nopeat neutronit muuttavat rad.aktiiviseen muotoon...

↳ ts. lisäämättä räjähdysvoimaa
lisätään säteilyriskiä

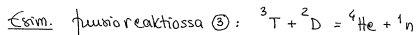
↳ valitsemalla

- optimaalinen $t_{1/2}$
- suuri säteilyenergia



↳ saadaan
kauhistuttava radiologinen a&...

Neutronipommi



kinett. energia jak. massojen
käänteislukujen suhteessa ts. $\frac{1}{5} \approx \frac{4}{5}$

↳ n. 80% pommin kokonaisenergiasta
neutroneille!

Jos
pommit rakennemateriaali sellaista, että se
absorboi vähän neutroneita,

niin

vain n. 20% energiasta \rightarrow tavannuk. paine- ja
lämpövaik.

ts. hyvin alhainen
räjähdysenergia $\approx 1 \text{ kt}$.

samalla maksimoidaan neutronivaikeutus:

↳ neutronit absorboituvat
parhaiten runsaasti vetyä (vesi!)
sisältävään materiaaliin

↳ tuhoja
elävässä organismissa

Tarkitus

tappaa panssarivaunujen miehistö
aiheuttamatta muita vaurioita.

(tappava säteilyvaikutus \leftarrow suurempi
kuin enttään likaisilla fissiopommeilla)

↳ Silti:
syntyy hyvin vähän radioakt. isotoppeja.

ts. tulisi kutsua "puhtoaksi aseksi"

Tänään on kulunut 50 vuotta siitä, kun tanskalaisfyysikko Niels Bohr julkisti tiedon: Atomiydin oli halkaistu Kööpenhaminassa tehdyssä kokeessa. Tiedotusta hämmästyneinä kuunnelleet tiedemiehet arvioivat, että kokeella voi olla ”moninaisia vaikutuksia”.

Puoli vuosisataa atomiainiaikaa

#S 26.1.89

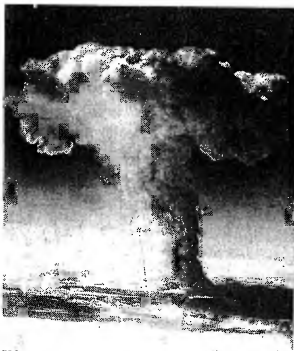
Sitä on kutsuttu historian tärkeimmäksi tieteelliseksi keksinnöksi. Tutkijat, jotka olivat paikalla tanskalaisen fyysikon Niels Bohrin kerteossa ratkaisevasta kokeesta, muistelevat vuosien kulluttua kuunnelleensa hänen puhettaan hiljaisina ja kasvavan hämmästyksen vallassa.

Puhueksaan tammikuun 26. päivänä 1939 George Washingtonin yliopistossa Washingtonissa parille tusinalle kollegalleen Bohr ilmoitti, että hänen kaksi tutkijaveriaan olivat Kööpenhaminassa onnistuneet halkaisemaan uraaniatomien ja mitanneet tapahtumaan liittyneen energiapurkauksen.

Samanlaisia kokeita tehtiin myös keisari Wilhelmn instituutissa Berliinissä, Bohr kertoi.

Laboratorioitten kontrolloiduissa, objektiivisen havainnoinnin mahdollistavissa oloissa ihminen oli puhkaisuksen piskuisen reiän muuriin, joka oli saakka erottanut aineen energian. Atomiainia oli alkanut.

”Emme osanneet odottaa tietoa”, George Washingtonin yliopistossa fyysikan professorina toiminut tohtori Edward Teller kertoo. ”Kun Bohr julkisti uutisen, hän puhui 15 minuuttia, korkeintaan puoli tuntia, minkä jälkeen kävimme lyhyen keskustelun.”



Ydinvoimaa on käytetty sodan ja rauhan toimissa viisikymmentä vuotta.

Tietoa ei osattu odottaa

”Keskustelu tyrehti pian, sillä tajusimme, etteivät tietomme ehkä enää riittäneet mielekkääseen pohdiskeluun ja että kaikenlaisia monimutkaisia ilmiöitä saattaa versota tästä kokeesta.”

Sitä versoi. Muutaman vuoden kulluttua atomiytimen halkaisemisesta syntyvää energiaa käytettäisiin kahdessa pommissa, jotka surmasivat tuhansia ihmisiä Hiroshimassa ja Nagasakissa. Atomytimet toimisivat myös voimaloiden polttoaineena — yli neljäsadan, jotka kansainvälisen atomienergiajärjestön tilastojen mukaan tuottavat tällä hetkellä lähes 300 000 megawattia sähköä.

Ilmiö panisi alulle suurvaltojen asevarustelukilvan, jonka kuluksa Yhdysvallat ja Neuvostoliitto kokoasivat arsenaaleihinsa tuhoivoimaltaan käsittämättömät 50 000 ydinasetta. Se toimisi voimanlähteenä sydämen-tahdistajissa ja pitäisi avaruusaluksset toiminnassa niiden kiitäessä kohti auringokuntamme rajoja satojen miljoonien kilometrien päähän maasta.

Samalla keksintö on jättänyt perinnökseen tonneittain ydinjätettä, jota kertyy ydinasetehtaista ja ydinvoimaloista. Jätteen aiheuttamat kustannukset kohoavat tähtitieteellisiin, satojen miljardien dollarien summiin.

”Se oli uutta tietoa ja kaiken uuden tiedon tavoin sitä käytettiin monenlaisiin tarkoituksiin”, Teller sanoo. Omien tutkimustensa ansiosta Telleriä on kutsuttu ”vetypommin isäksi”.

Bohrin tiedotusta kuunnelleet tiedemiehet osallistuivat George Washingtonin yliopiston ja Carnegie-instituutin järjestämään teoreettisen fyysikan konferenssiin. Samat laitokset järjestivät askettäin Washingtonissa muistokokouksen, johon oli ilmoitautunut yksitoista vuoden 1939 tapaamisessa mukana ollutta tutkijaa.

Teller toteaa, että samalla kun hän ja muut fyysikot ällistyivät ja pelastyivätkin tiedosta, että atomi voidaan halkoa vielä pienemmiksi atomeiksi, koe herätti innostusta ja monet halusivat heti toistaa sen.

"Itse asiassa peruskoe tehtiin jo samana iltana Carnegie-instituutissa Washingtonissa", hän kertoo.

Joukko kolmekymmenluvun kuudessa tehtyjä kokeita, joiden tuloksia ei osattu heti selittää, oli johtanut fyysikot ytimen halkaamisen eli fisioareaktion keksimiseen.

Brittitutkijoinen löydettyä atomiyimestä neutronin italialaiset fyysikot alkoivat pommittaa uraaniatomoa tällä vastakeksityllä hiukkasella. Vuonna 1935 Enrico Fermi havaitsi, että jos hän pani radioaktiivisesta berylliumista sinkoutuvat neutronit kulkemaan parafiniinikimpaleen läpi, niiden vauhti hidastui. Kun hitaat neutronit pakotettiin törmäämään uraaniatomeihin, ne tuntuivat tuottavan uusia aineita.

Juutalaistutkija pakeni Ruotsiin

Fermi kumppaneineen uskoi, että nämä uudet aineet olivat yksinkertaisesti uraaniatomeja, joiden peryni oli kasvanut, kun niihin oli lisätty berylliumista peräisin olevia hitaita neutronia.

Vuosina 1935 — 1938 useissa tutkimuslaitoksissa, muun muassa juuri berliiniläisessä keisari Wilhelm instituutissa, tehtiin työtä samanlaisten

kokeiden parissa. Epatietoisuus valitsi siitä, mitä nama niin sanotut transuraanit, joita uraaniatomin laborioripommituksissa saatiin aikaan, loppujen lopuksi olivat.

Syyskuussa 1938 keisari Wilhelm instituutissa työskennellyt, syntyperältään juutalainen fyysikko Lise Meitner pakeni natsi-Saksasta Ruotsiin. Myöhemmin hänen veljenpoikansa Otto Frisch siirtyi työskentelemään Bohrin tutkimuslaitokseen Kööpenhaminaan. Marraskuussa Fermi sai työstään Nobelin palkinnon ja käytti palkinnonjakotilaisuutta hyväkseen paetakseen Italiasta. Hän muutti New Yorkiin.

Einsteinin yhtälö piti paikkansa

Joulukuussa saksalaistutkijat, jotka tekivät työtä kellon ympäri selvittääkseen mystisten uusien aineiden olemuksen, kirjoittivat entiselle kollegalleen Meitnerille, että bariumin oli havaittu liittyvän uraanin ja neutronien väliseen vuorovaikutukseen.

Koska barium on paljon kevyempää kuin uraani, he mainitsivat kirjeessään varovasti mahdollisuuden, että uraaniatomi olisi saattanut haljeta kahta.

Viikkoa myöhemmin lomamatkalla ollut Frisch vieraili tätinsä luona Ruotsissa ja saksalaistutkijoiden kaavailut otettiin esille. He laskivat, että Albert Einsteinin kuuluisan yhtälön $E=mc^2$ perusteella uraaniatomin halkaamisesta vapautuisi tietty määrä energiaa, 200 miljoonaa elektroniivoltia.

Kööpenhammaan palattuaan Frisch kertoi näistä laskelmista Bohrille ja pani toimeen kokeen tammikuun alussa.

Tammikuun 7. päivänä Bohr lähti matkalle Yhdysvaltoihin Tammikuun 13. päivänä Frisch pommitti Bohrin laboratoriossa uraania hitaalla

neutroneilla ja mittasi vapautuneen energiamäärän oskilloskoopilla: 200 miljoonaa elektroniivoltia.

Energia oli ollut yhtä kuin massa kerrottuna valon nopeuden neliöllä. Ilmoitettuaan asasta Washingtonissa Bohr vieraili Einsteinin luona Princetonissa ja pohdiskeli kokeen tulosta hänen kanssaan. Keskustelun salissa ei ole kuitenkaan jäänyt tietoja jälkipolville.

Kaksi kuukautta myöhemmin kaksi muuta fyysikköä, Leo Szilard ja Eugene Wigner, kuitenkin vierailivat Einsteinin luona hänen loma-asunnollaan Long Islandilla ja keskustelua käytiin laajenevasta atomitutkimuksesta.

Szilard kirjoitti myöhemmin, että Einstein tutkiskeli uudemman kerran kokeen tuloksia, jotka olivat vahvistaneet hänen kuuluisan yhtälönsä paikkansapitävyyden, ja -totesi hiljaisella äänellä saksaksi: "*Daran habe Ich gar nicht gedacht.*" ("Tämä ei kuulaisi minulle.")

"... saattaisi johtaa pommin valmistamiseen"

Siihen mennessä keksintöön liittyvät mahdollisuudet olivat alkaneet näyttää pelottavilta, erityisesti koska Hitlerin Saksa oli liittynyt itseensä uraanisäilytymiltään rikkaan Tšekoslovakian, Szilard ja Wigner painostivat Einsteinia kirjoittamaan presidentti Franklin D. Rooseveltille sittemmin kuuluisaksi tulleen kirjeensä. Einstein kirjoitti:

"... saattaa tulla mahdolliseksi aiheuttaa massallaan suuressa uraanimäärässä ydinketjureaktioita, joiden avulla luotaisiin suuria energiamääriä ja suuria määriä radiumin kaltaisia aineita. Nyt vaikuttaa lahes varmalta, että tämä pystytään tekemään välittömässä lähitulevaisuudessa."

"Tämä uusi ilmiö saattaisi johtaa myös pommin valmistamiseen..." (New York Times).

Jeff Nesmith

3. Säteilyn ja aineen välinen vuorovaikutus

Sähkövarauksisten hiukkasten väliset vuorovaikutukset (3.1.)

↳ Kuva 3.1

Tärkein!

sironna väliainan atomien elektroneista

↳ jos elektroni irtuu atomista, niin: IONISAATIO!

Jos hiukkasen energia \gg ionisaatioenergia, niin yhdessä proksissa sitä kuluu vain vähän, energian vähenemistä void. pitää jatkuvana

Esim. (Kuvat 3.2 ja 3.3.)

↳ Synnetyttyjen ioniparien lukum./ μm hiukkasen energian funktiona (vedessä ts. elävässä kudoksessa!)

α -hiukk. (kuva 3.2.)

↳ max. ~ 7000 kpl/ μm ,
kun $E_\alpha \sim 0.5 - 1 \text{ MeV}$

β -hiukk. (kuva 3.3.)

↳ maksio ~ 7 kpl/ μm
kun $E_\beta \sim 0.5 - 10 \text{ MeV}$

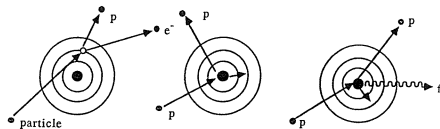
Huom.

α -säteily on huomattavasti voimakkaammin ionisoivaa säteilyä kuin β -säteily.

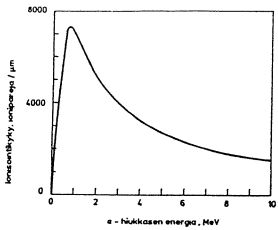
LUKU 3

Säteilyn ja aineen välinen vuorovaikutus

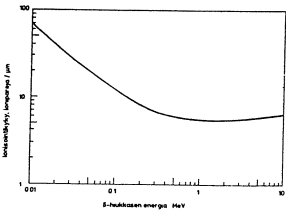
3.1. SÄHKÖVARAUKSISTEN HIUKKASTEN VÄLISET VUOROVAIKUTUKSET



Kuva 3.1. Sironna elektronista, kimmoinen sironna ytimestä ja kimmoton sironna ytimestä.



Kuva 3.2. Alfahiukkasten ionisointikyky $S(E)/W$ vedessä (kudoksessa) energian funktiona.



Kuva 3.3. Beetahiukkasten ionisointikyky $S(E)/W$ vedessä (kudoksessa) energian funktiona.

3.2. Varauksisten hiukkasten kantama R väliainessa on kääntäen verrannollinen luovuttuun energiaan:

↪ Kääntökeelpoisia ovat esim. kuvan 3.4. kaltaiset graafit esitykset.

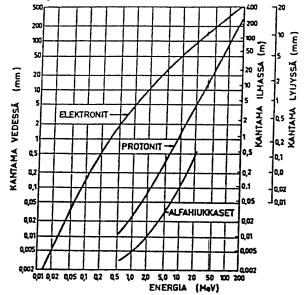
Kuva 3.4.

↪ elektronien, protonien ja alfahiukkasten kantamat vedessä, ilmassa ja lyijyssä:

Esim. 1 MeV kantamat vedessä (kudoksessa):

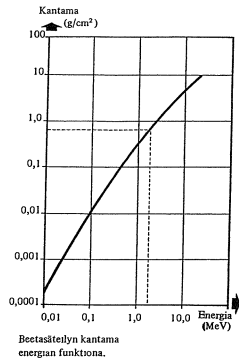
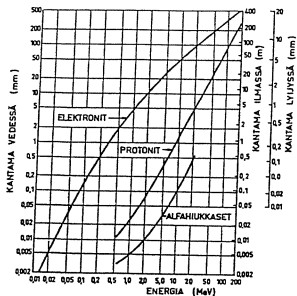
	1 MeV	10 MeV
β	5 mm	50 mm
p	25 μ m	1.5 mm
α	5 μ m	0.1 mm

() Ilmassa kantamat kasvavat ~ väliaineiden tiheyksien suhteessa ts. noin $\times 1000$.



Kuva 3.4. Elektronien, protonien ja alfahiukkasten kantamat vedessä, ilmassa ja lyijyssä.

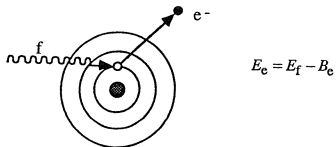
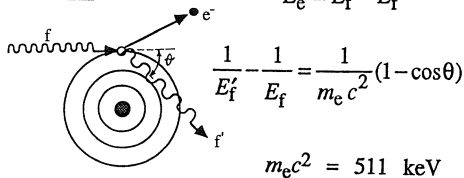
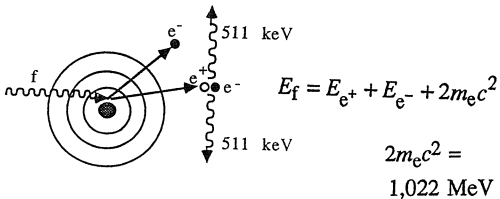
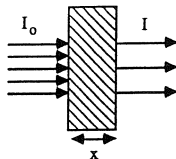
3.2. HIUKKASTEN KANTAMA VÄLIINEESSA



Kuva 3.4. Elektronien, protonien ja alfahiukkasten kantamat vedessä, ilmassa ja lyijyssä.

Kantama	1 MeV	10 MeV
β	5 mm	50 mm
p	$25 \mu\text{m}$	1,5 mm
α	$5 \mu\text{m}$	0,1 mm

3.3. SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN VUOROVAIKUTUKSET

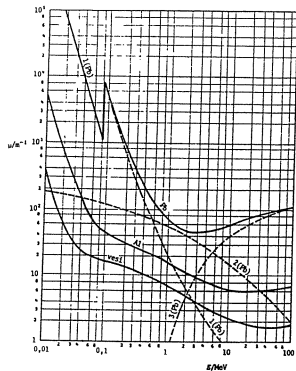
ValosähköilmiöComptonin ilmiöParinmuodostus ja annihilaatio3.4. SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN
VAIMENEMINEN VÄLJAINNESSA

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$\mu =$ matkavaimennus-
kerroin

gamma-säteilyn puoliintumispaksuus

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$



Kuva 3.9.

Lyijyn, alumiinin ja veden matkavaimennuskertoimet energian funktioina. 1 (Pb) tarkoittaa valosähköilmiön, 2 (Pb) Comptonin ilmiön ja 3 (Pb) parinmuodostuksen vaikutusta lyijyn matkavaimennuskertoimessa.

Esim. (kts. kuva 3.9.)

$$E_{\gamma} = 1 \text{ MeV} \quad d_{1/2} = ? \quad \begin{array}{l} \text{Pb: ssa} \\ \text{Al: ssa} \\ \text{H}_2\text{O: ssa} \end{array}$$

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$\text{Pb: } \mu \approx 75 \text{ m}^{-1} \quad d_{1/2} = \frac{\ln 2}{75} \text{ m} \approx \underline{9 \text{ mm}}$$

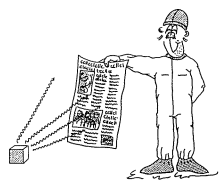
$$\text{Al: } \mu \approx 17 \text{ m}^{-1} \quad d_{1/2} = \frac{\ln 2}{17} \text{ m} \approx \underline{40 \text{ mm}}$$

$$\text{H}_2\text{O: } \mu \approx 7.5 \text{ m}^{-1} \quad d_{1/2} = \frac{\ln 2}{7.5} \text{ m} \approx \underline{90 \text{ mm}}$$

Gammaenergia MeV	Pistemäisen lähteen säteilyn vaimentamiseksi tekijällä 10 tarvitaan seuraavat suojuspaksuudet.	
1,25	n. 60 cm vettä n. 30 cm betonia n. 8 cm terästä n. 4 cm lyijyä	Reaktorin primäärisysteemin korroosiotuotteet reaktorin ollessa suljettuna (etupäässä Co-60 ja Fe-59)
2,5	n. 80 cm vettä n. 40 cm betonia n. 12 cm terästä n. 6 cm lyijyä	Fissio tuotteet reaktorin primäärisysteemissä reaktorin käydessä täydellä teholla
6,2	n. 115 cm vettä n. 50 cm betonia n. 13 cm terästä n. 6 cm lyijyä	N-16 primääripiirissä reaktorin ollessa käynnissä

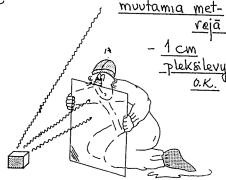
Alfasäteily

- kantama ilmassa ~ 10cm



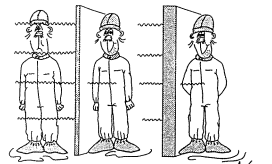
Betasäteily

- kantama ilmassa
muutamaa metreja
- 1 cm
- pleksi levy
o.k.



Gamma säteily

- läpituokevaa



3 cm lyijyä 15 cm betonia x 1/10
6 cm Pb 30 cm bet. x 1/100

$$(E_{\gamma} = 1 \text{ MeV})$$

4. Säteilyn mittausmenetelmät

Ionisoivaa säteilyä emme voi nähdä emmekä tunkea.

Miten havaita?

↳ Säteily ionisoi läpäisemaansa ainetta.

↳ Ionien varaus voidaan rekisteröidä monin eri tavoin ...

Yksinkertaisin tapa: nk. JÄLKI-ILMAISIMET (§4.4.)

FILMIDOSIMETRI (ionisoiva säteily mustuttaa valokuvausfilmiä)

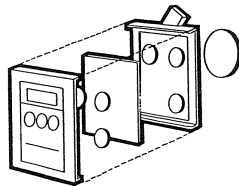
- filmi pakataan valotuttuun paperikuoreen
- sijoitetaan erityisiin pidikkeisiin
- vaihdetaan tietyn väliajoin
- kehitetään yhdessä kalibrointi-filmien kanssa (ts. niiden samaa säteilyannos tunnetaan)
- tummutta vertaamalla → tuntematon annos selvälle!
- mustuminen riippuu säteilyn energiasta: siksi filmin pidikkeessä useita suodattimia (Cu, Al, Sn)
 - ↳ suodattimien paksuus valitaan siten, että filmin tummutus olisi riippumaton sät:n energiasta.
 - ↳ suodattimien avulla saad. selvälle myös eri säteilylajit.

Käyttö: mm. henkilökohtaisen sät. annoksen tarkkailuun.

Miten radioaktiivinen säteily havaitaan



Filmidosimetri



Kuplakammio

↳ varatun hiukkasen lentorata saad. näkyviin kuplavanana (= vapautuva lämpö saa nesteen kiehumaan hiukkasen radan kohdalla).

Valokuvataan

Magn. kenttä → varauksellisten hiukkasen radat kaareutuvat

Saad. tunnistettua hiukkasia & laskettua niiden nopeudet ja energiat.

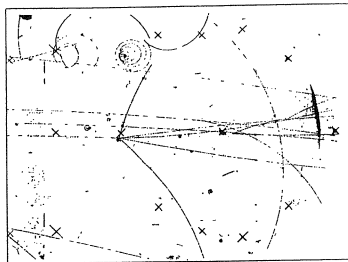
Lankakammio

↳ Käyt. suurenergiisten hiukkasen törmäyskokeissa hiukkasilmaisimena.

Tasavälein anodilankoja.

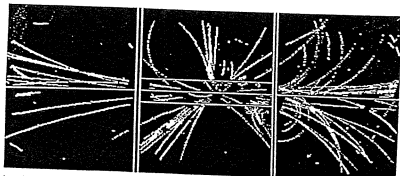
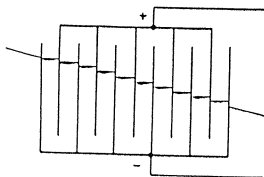
Jonisaatio → elektronit kootaan sähkökentän avulla langoilte

→ saaduista virtasykäyksestä tietokoneen avulla hiukkasen lentorata ...



Kuva 15.28.a. Kuplakammiokuva 12 GeV antiprotonin törmäyksestä raskaan vedyn ytimeen. Törmäyksessä antiprotoni on osunut neutroniin. Reaktiossa on syntynyt viisi varauksellista hiukkasta, joiden radat näkyvät törmäyskohdasta lahtevinä viivoina.

lankakammio



Lankakammioilla havaittu p \bar{p} -törmäysreaktio. Kaksi hadroniryöppyä keskiruudussa on ilmeisesti seurausta törmäyksessä syntyneestä kvarkki-antikvarkkiparista. (Photo Cern)

117

Kaasutäytteiset ilmaisimet (S 4.1.)

118

Ionisaatiokammio (sylinteri, kaasu, metallilanka; elektrodien välille jännite)

↳ lähes kaikki elektronit ja ionit kulkeutuvat elektrodeille (säikepurkaus)

ALUE II

Purkauksessa suuri vastus \rightarrow virtasysäys laskee putken jännitteen nopeasti & purkaus katkeaa

Kun jännite taas nousee, putki voi rekisteröidä uuden säteilykvantin.

Sovellus: KVNÄDOSIMETRI (työntekijöiden annosmittarina)

Muistuttaa ulkoisesti kynää.

On kaasutäytelinen, sylinterinmuotoinen kondensaattori.

Ladataan ensin tiettyyn jännitteeseen.

Ionisoiva säteily laskee jännitettä: ionit kulkeutuvat varauksia elektrodien välillä.

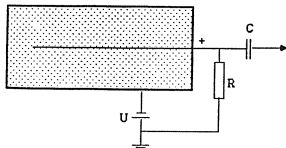
Jos C = kammion kapasitanssi ja jännitteen lasku = ΔU , niin ionisaation synnyttämä kok. varaus on

↳ $\Delta Q = C \cdot \Delta U$. (ts. = kond:n varauksen lasku!)

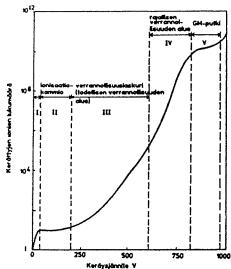
Kond:n varauksen lukulaitte voi kalibroida näyttämään henkilön saamaa säteilyannosta.

Säteilyn mittaussmenetelmät

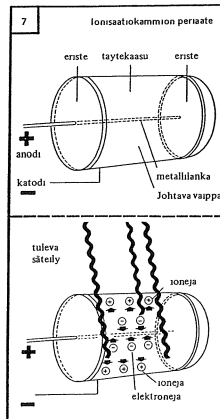
4.1. KAASUTÄYTTIESET ILMAISIMET



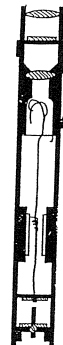
Kuva 4.1. Kaasutäyteen ilmaisimen toimintaperiaate.



Kuva 4.2. Kaasutäyteen ilmaisimien toiminta-alueet.



KYVÄDOSIMETRI



Ionisaatiokammio

Verrannollisuuslaskuri

↳ jännite suurempi, ALUEELLA III (kuva 4.2.)

ionisaatiossa vapautuvat elektronit kiihtyvät sähkökentässä → ionisoivat kaatua

↳ ionisaatiovyöry

alkuper. varaus vahvistuu tekijällä 10^{-5} !

Huom.

saatu jännitepulsso on verrannollinen säteilyn synn. ioniparien määrään ts. säteilyn energiaan.

↳ void. tunnistaa hiukkasia & määr. niiden energioita.

Geiger-putki

↳ jännite vieläkin suurempi, ALUEELLA V (kuva 4.2.)

jokainen vapautettu elektroni → voimakas purkaus

Muuta:

ts. suuri jännitepulsso on helppo havaita.

- pulssin korkeus on riippumaton hav:n säteilyn energiasta
↳ ts. ei voida käyttää säteilyn energian tutk.:een.

- pulssin kesto aika suhtell. pitkä (50-200 μ s)

↳ hiukka-aikaa!

- yksinkertainen, halpa, toimintavarma → käyt. yleisesti säteilyn aktiivisuuden mittaamiseen

Ioniparin muodostamiseen tarvittava energia W

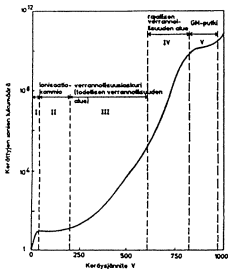
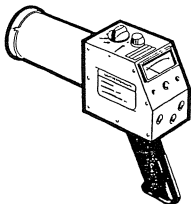
Aine	W
He	41.4 eV
N ₂	34.7
O ₂	31.1
Ar	26.1
ilma	34.0
Ge	3.0
Si	3.5

Luonnossa

β, γ : $0 \rightarrow 3 \text{ MeV} \Rightarrow 90000$ ioniparia ilmassa

α : $5 \rightarrow 9 \text{ MeV} \Rightarrow 150000 - 260000$ ioniparia

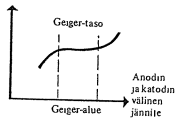
Verrannollisuuslaskuri



Geiger-putki



Varaus



Säteilyn energiaspekttrin mittaaminen

↳ tuke- tai puolijohdeilmaisimia käyttäen

γ : NaI(Tl), Ge(Li), Ge, HPGe

β, α : Si
jäähdytetään glyseriä nestetyypellä (77 K)

(Si toimii myös huoneenlämpötilassa)

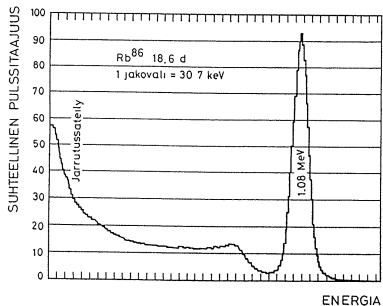
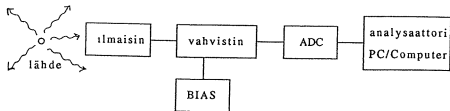
ilmaisimesta saatava pulssi α havaitun säteilykvantin tai hukkaseen energiaan

energia-akseli kalibroidaan tunnetuilla lähteillä

↳ tuntemattomia mittaamaan...

SÄTEILYSPEKTRIN MITTAAMINEN

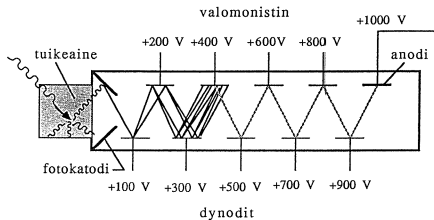
125



TUIKEILMAISIN

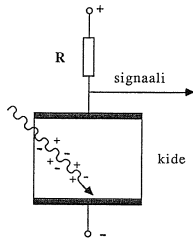
126

esim. NaJ(Tl)



PUOLIJOHDEILMAISIN

Si(Li), Ge(Li), Ge



Planar



Coaxial Ge



Thin Window Ge

Tuikeilmaisim (4.2.)

esim. natriumjodidi (NaI(Tl))

aktivoitu talliumilla!

ionisoiva säteily
auh. elektronien virityksiä,
jotka purkautuessaan lähettävät
näkyvää valoa

ohjataan fotokatodille,
josta fotonit irrottavat
elektroneja (lukum. \propto säteily-
energiaan!)

kähdyketään
valomonistimen dynodiketjussa

anodille saadaan elektroni-
pulsisi, joka on \propto säteily-
energiaan.

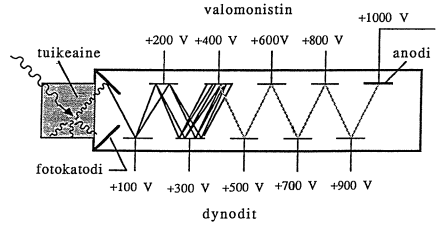
tavallisesti
valomonistimessa 4-10 dynodia

elektronien monistuskerto-
in $10^6 - 10^8$

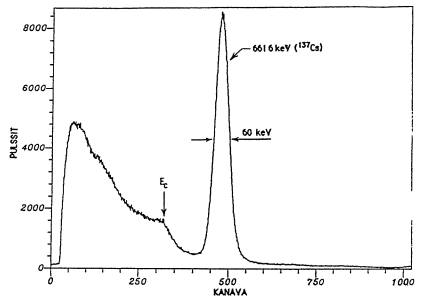
- hyvä havaitsemistehokkuus (koska tiheys suhteell. suuri ja ainakin voi olla suuri)
- pulsin kesto hyvin lyhyt (lyhyt hukka-aika!) void. resistanssista pulssoja n. 1 ns:n välein!
- energiaeroituskyky (puokamokeruus, resoluutio) $\sim 10-12\%$

saadaan siis sekä N että E!

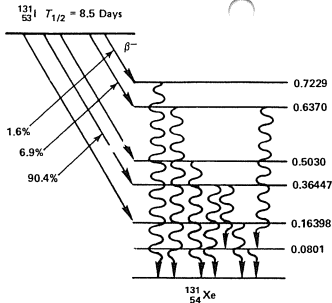
4.2. TUIKEILMAISIM



Kuva 4.3. Tuikeilmaisimen rakenne ja toimintaperiaate.



Kuva 4.4. NaI(Tl)-ilmaisimella (5 cm x 5 cm) mitattu ¹³⁷Cs:n gammaspektri. Kuvassa nähdään fotonipiikin lisäksi comptonreuna sekä jarrutus säteilyn osuus.



(129)

4.3. Fusijohdeilmaisim (Ge, Si)

(130)

↳ säteily aih. ionisoitumista → elektroni-aukkoparaja,
(Kts. kuva 4.5.)

jotka toimivat varauksenkuljettajina (vrt. elektroni-ionipari ionisaatiokammiossa)

Estosuuntaisella jännitteellä sad. syntymään laaja katoalue

↳ , jossa hyvin vähän varauksenkuljettajia.

Katoalueen raksuuta void. kasvattaa lähimmän avulla:
nk. Ge(Li) & Si(Li) -ilmaisimet.

Nykyisin käytetään myös nk. itäisgermanium - ilmaisimia
↳ HPGe ts. erit. puhtaita Ge - kiteitä.

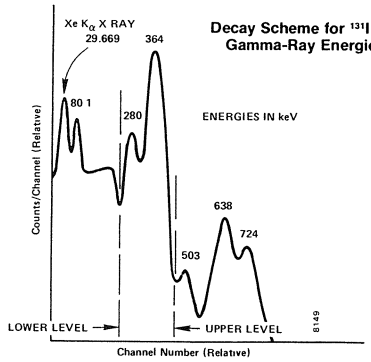
Katoalue = ilmaisimen aktiivinen alue,
josta tuotetut elektroni-aukkoparit kerätään jännitteen avulla elektrodeille.

Elektroni-aukkoparin synn. tarvittava energia:

Ge	2.98 eV
Si	3.5 eV

E_{sim} 1MeV → Ge 330 000 paraja (ts. x yli 10 vrt. ionisaatiokammiossa)
Si 290 000 - -

Decay Scheme for ^{131}I Showing Major Gamma-Ray Energies.



Sodium Iodide Spectrum of ^{131}I Showing Major Lines and the ^{131}Xe X Rays.

Puolijohdeilmaisimissa ei tapahdu nanauksen monistumista,

naan sähk. signaali voidaan nanausherkkään esivahvistimeen, etc.

↳ pulssien lajittelu energian mukaan → tutkittavan säteilyn spektri.

(Kts. kuva 4.6)

Erinomainen energian erotuskyky:

Esim ^{60}Co γ 1.332 MeV fotokvikille

puoliauonleveys:

NaI(Tl) \approx 100 keV

Ge(Li) \approx 2 keV

↳ soveltuu erinomaisesti spektrometriin mittaukseen ts. pyrittäessä tunnistamaan radioakt. aineita ja niiden energia-tiloja. (Esim. radioakt. laskeuma & mitä aktiivisuuksia?)

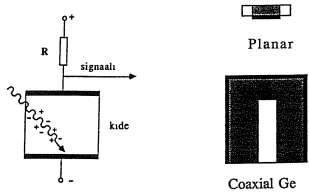
HPGe & Ge(Li) toimivat vain jäähdytettynä (tavallisesti nestetypen lämpötilassa, 77 K)

Si(Li) huoneenlämpötilassa puoliauonleveys 12-16 keV jäähdytettynä n. 3 keV

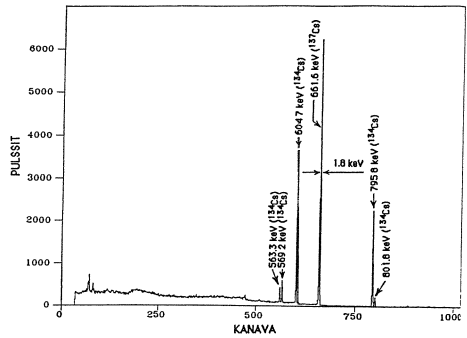
↳ (n. -30 °C riittäisi)

Säteily → keideaurioita; ilmaisimilla on rajallinen käyttöikä.

4.3. PUOLIJOHDEILMAISIN

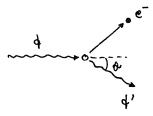


Kuva 4.5. Puolijohdeilmaisimen toimintaperiaate ja tyypillisiä rakenteita.



Kuva 4.6. Germaaniunilmaisimella (25% ns. Marnelli-geometriassa mitattu gamma-spektri muikkunytteestä (Summasjärvi, 21.10.1986, mittausaika 2000 s). Näytteessä oleva ^{134}Cs -aktiivisuus ($t_{1/2} = 2,1$ a) on 580 Bq/kg ja ^{137}Cs -aktiivisuus ($t_{1/2} = 30,1$ a) 1240 Bq/kg.

Comptonin ilmiö



$$\frac{1}{E_{\phi'}} - \frac{1}{E_{\phi}} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)$$

kun $\theta = 180^\circ \rightarrow (E_{\phi'})_{\text{min}}$
 nk. takaisinsironta

$$\frac{h\nu_{e^-}}{\text{max}} = E_{\phi} - (E_{\phi'})_{\text{min}}$$

$$\text{Esim } E_{\phi} = 1 \text{ MeV}$$

$$(E_{\phi'})_{\text{min}} = 0.204 \text{ MeV}$$

Gamma spektrissä havaitaan:

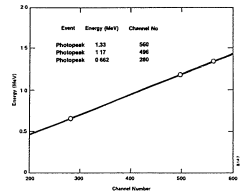
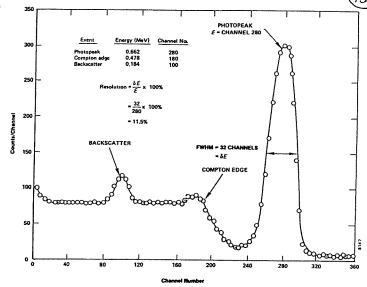
- A Kokonaisabsorptiopötkki
- B Takaisinsirontapötkki
 - ympäristössä tapahtuneen 180° :n sironnan jälkeen ilmaisevien fotonien Compton kvanttien energiaa vastaava pötkki
- C Comptonreuna
 - ilmaisimessa tapahtuneen 180° :n sironnan Compton elektronin energiaa vastaava pötkki (ts. Compton kvantti karkaa tai absorboituu vain osittain)

Häntä $O \rightarrow C$: sironta on tapahtunut kiteessä; elektroni on absorboitunut, kvantti karsunut

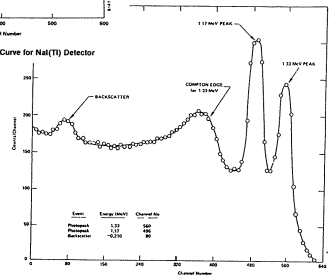
$B \rightarrow A$: sironta on tapahtunut ympäristössä; elektroni on jäänyt sinne, kvantti on tullut ja absorboitunut ilmaiseeseen.

Huom

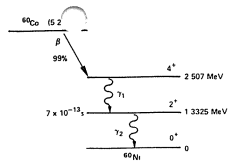
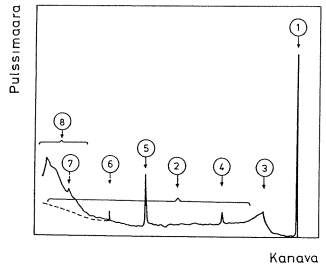
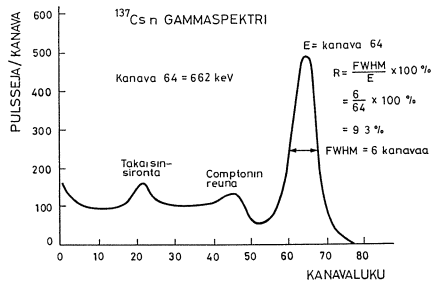
$$E_B + E_C = E_A !$$



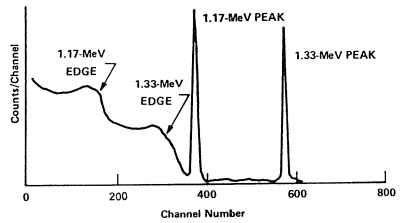
Energy Calibration Curve for NaI(Tl) Detector



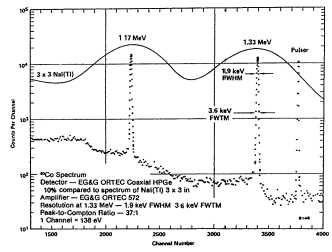
NaI(Tl) Spectrum for ^{137}Cs



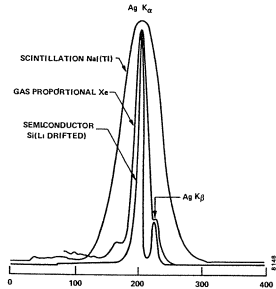
The Decay Scheme of ⁶⁰Co.



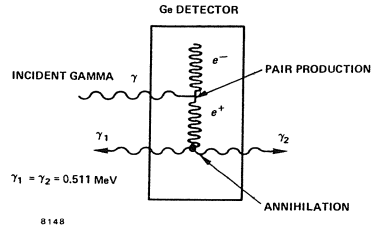
Locating the Two Photopeaks for ⁶⁰Co in the HPGe Spectrum.



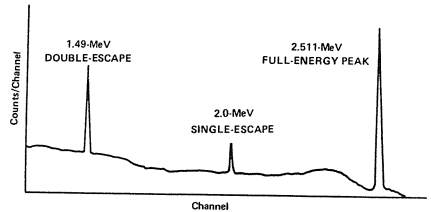
⁶⁰Co Spectrum Showing Resolutions and Peak-to-Compton Ratios for an HPGe Coaxial Detectors and an NaI(Tl) Detector



Demonstration of the Resolution Capability of the Three Types of X-Ray Detectors for the Silver K Spectra Obtained from ¹⁰⁹Cd Source.
 (Courtesy Philip G. Burkhalter and William J. Campbell, U S Bureau of Mines, College Park, Maryland)



Process of Pair Production in Germanium.



Typical Spectrum for an Incident Gamma Energy of 2.511 MeV.

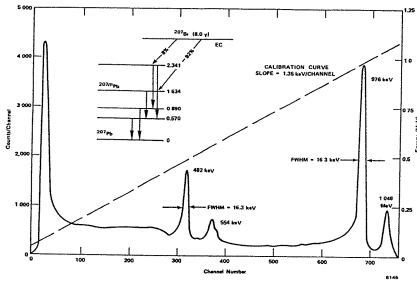
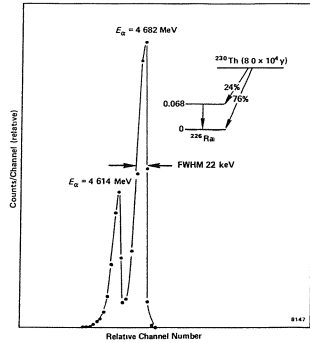
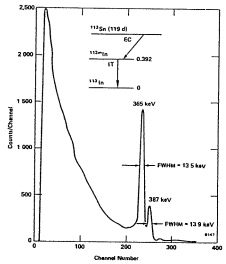


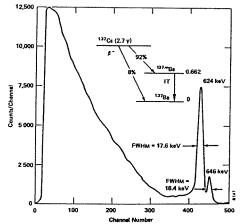
Fig. 6.2. ^{208}Bi Conversion Electron Spectrum.



Alpha Spectrum from the Decay of ^{228}Th Showing Alphas to the Ground and First Excited States in ^{228}Ra .



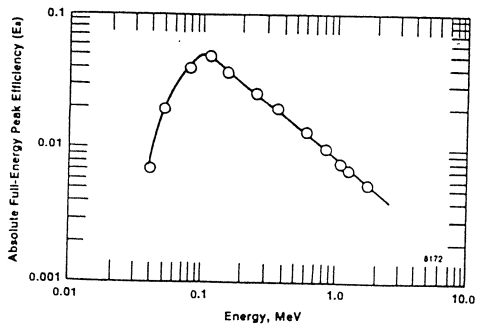
^{115}Sn Conversion Electron Spectrum.



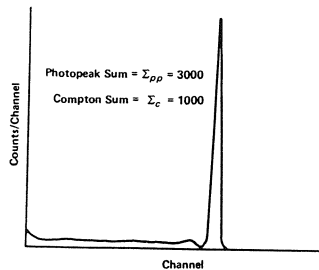
^{137}Cs Beta and Conversion Electron Spectrum.

Photon Detectors

(141)



(142)



Typical Spectrum Expected for 100-keV Energy in HPGe.

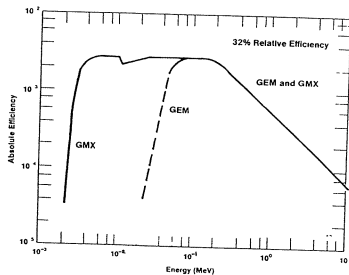
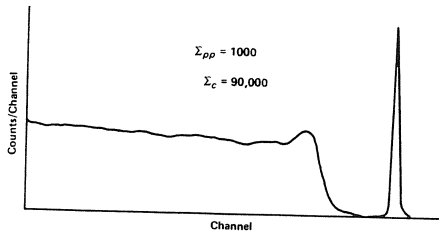


Fig. 21. Absolute Efficiency vs Energy for 32% GEM and GAMMA-X HPGe Coaxial Detectors.



Typical Spectrum Expected for 1-MeV Energy in HPGe.

4.5. Säteilyn mittayksiköt: (s.g.t. sta!)

Annossuureista:

Muistetaan aktiivisuus = kuinka monta atomiytimen hajoamista tietyssä tapauksessa sekunnin aikana

Yksikkö:

1 Becquerel = 1 Bq = 1 haj/s

Säteilyn vaikutuksia kuvataan annossuureilla:

a) Laskennalliset säteilynsuojelusvuo

↳ käytetään arvioitaessa säteilyn haitallisia myöhäisvaikutuksia.

b) Mittaussuureet

↳ tunnetaan ulkoisen säteilyn tenkkailussa antamaan annossuureiden likiarvoja.

A) Laskennalliset säteilynsuojelusvuo

a) Keskimäärin absorboitunut annos D_T

↳ kudoksen T massa = m_T
ja jomsoivasta säteilystä ko. kudokseen T siirtynyt kokonaisenergia = E_T

Määr.

$$D_T = \frac{E_T}{m_T}$$

$$[D_T] = 1 \frac{J}{kg} = 1 Gy = 1 gray$$

b) (Ekrivalentti)annos H_T kudoksessa T:

↳ eri säteilylajien ^Rpainotuskertoimilla w_R korotettujen keskimääräisten absorboituneiden annosten summa:

Määr.

$$H_T = \sum_R w_R D_{TR}$$

Esim $\frac{R}{D_T} = 0.1 m Gy$
↳ $H_T = 0.1 m Sv$

$$[H_T] = 1 \frac{J}{kg} = 1 Sv = 1 sievert$$

w_R :	γ, β , myonit	1	
	n	5-10	(riippuu energiasta!)
(Kansainvälisen	p	5	($E_p \geq 2 MeV$)
säteilynsuojelun	α	20	
toimikunnan	(fissionfragmentit)	20	
suositus \rightarrow)	(naskaat ytimet)	20	

Säteilylaji	Energia-alue	ω_R
Fotonit	kaikki energiat	1
Elektronit ¹⁾	kaikki energiat	1
Myonit	kaikki energiat	1
Neutronit	alle 10 keV	5
	10-100 keV	10
	100 keV - 2 MeV	20
	2 - 20 MeV	10
	yli 20 MeV	5
Protonit ²⁾	yli 2 MeV	5
Alfahiukkaset		20
Fissiofragmentit		20
Raskaat ytimet		20

Säteilyn painotuskertoimet ω_R . 1) Muiden kuin DNA-molekyyliin sitoutuneiden ydinten lähettämät Augerin elektronit. 2) Muut kuin rekyyliprotonit.

Huom.

- H_T luonnehti terveysriskiä
- ω_R on säteilyn nk. laatukerroin, jolla pyritään ottamaan huomioon eri säteilylajien erilainen kyky aiheuttaa haittavaikutuksia, erityisesti stokastisia myöhäisvaikutuksia

ts.

ω_R = kerroin, jolla absorboitunut annos muutetaan annosekvivalentiksi.
 (= ekvivalenttiansokkeeri, = annokseksi P)

Annosnopeus = $\frac{dH_T}{dt} = \dot{H}_T$

ts. aikavälin dt kuluessa saatu "annos" dH_T jaettuna aikavälillä dt .

$[\dot{H}] = 1 \text{ Sv/s} \rightarrow \begin{matrix} \text{sein:} & \text{Sv/h} \\ & \text{mSv/h} \\ & \mu\text{Sv/h} \end{matrix}$

Jos annosnopeus on vakio ajan Δt , niin ko. aikana saatu annos = $H_T = \dot{H}_T \Delta t$

Esim. Luonnon taustasäteily Suomessa (rad.akt. aineet luonnossa, avaruussäteily, laskeumat etc.)
 $\cong 0.12 \mu\text{Sv/h}$ ts. vuosiannos = H_T :

$H_T = 365 \times 24 \times 0.12 \times \mu\text{Sv} \cong \underline{1 \text{ mSv}}$

(Mut. vähen. rad. akt. n. 0.4 mSv; radon n. 4 mSv/zt)

Annosrajat säteilytyössä

147

Ekvivalenttiannos H_T (vuodessa):

- mykiö 150 mSv
- iho 500 mSv
- raajat 500 mSv

H_T luonnehtii säteilyä johtuvaa terveysriskiä.

H_T riippuu

- 1) abs. annoksesta ja
- 2) sät. lajista R & energiasta

↳ painokerroimet w_R

Effektiiivinen annos E

- viiden vuoden keskiarvo 20 mSv
- yhden vuoden efekt. annos 50 mSv

c) Effektiiivinen annos E

148

↳ kudoksen (tai elimen) painotuskertoimilla w_T korotetun ekvivalenttiannosten summa:

Maar. $E = \sum_T w_T H_T$ (E kuvaa rakavien sät. vaikutusten riskiä.)

$$[E] = 1 \frac{J}{kg} = 1 Sv = 1 sievert$$

Kudosten painotuskertoimet w_T on valittu siten, että kehoon ilmoittaa keskeisen kudoksen suhteellisen osuuden kokonaishaitasta silloin, kun koko keho on tasaisesti altistunut säteilylle. Kertoimien summa = 1.

<u>esim.</u>	sukurauhaset	$w_T = 0.20$	<u>Riskikerroin</u> [Sv ⁻¹]
	lunydin	0.12	
	mahaaukku	0.12	:
	kilpirauhanen	0.05	5×10^{-4}
	iho	0.01	:
	⋮		
	<u>Yhteensä:</u>	<u>1.00</u>	<u>1.65×10^{-2}</u> (N, 1988)

Muuttuvat kun saad. lisää analys. tietoa...

Perustuvat mm. Hiroshiman ja Nagasakin ydinpommin aiheuttamien säteilyannosten riskien suuruuksien arviointiin:

kullekin elimelle oma riskikerroinensa, joiden summa = $1.65 \times 10^{-2} \frac{1}{Sv}$

(otettu huomioon vain kuolemaan johtaneet syöpätapaukset) (=koko keho)

(149)

Kudos tai elin	ω_T	Riski- kerroin [Sv^{-1}]
Sukurauhaset	0,20	
Punainen luuydin	0,12	
Paksusuoli	0,12	
Keuhkot	0,12	:
Mahalaukku	0,12	:
Virtsarakko	0,05	
Rintarauhaset	0,05	
Maksa	0,05	
Ruokatorvi	0,05	
Kilpirauhanen	0,05	5×10^{-4}
Iho	0,01	:
Luun pinta	0,01	:
Muut kudokset yhteensä	0,05	:

Kudosten ja elinten painotuskertoimet ω_T .

$$\sum \omega_T = 1.00 \quad 1.65 \times 10^{-2} \quad (v. 1988)$$

Efekttiivinen annos

$$E = \sum_T \omega_T H_T$$

$$H_T = \sum_R \omega_R D_{TR}$$

ts.

$$E = \sum_T \omega_T \sum_R \omega_R D_{TR}$$

Ekvivalenttiannoksen kertymä

Kerralla kehoon joutuneen radioaktiivisen aineen tietyllä kudoksella aiheuttama ekvivalenttiannos:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt$$

(↻) aikuisten kertymäaika 50 vuotta, lasten 70 vuotta

Efekttiivisen annoksen kertymä

Kudosten painotuksilla kerrottujen ekvivalenttiannosten kertymän summa:

$$E(\tau) = \sum_T \omega_T H_T(\tau)$$

(kertymäajat τ samat kuin edellä)

(150)

(B) Mittaussuureet

Säteilymittauksen perussuure = absorboitunut annos D

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (\text{ts. ionisoivasta säteilystä aineen massa-alkioon dm siirtynyt keskimääräinen energia } d\bar{E} \text{ jaettuna massa-alkion massalla dm})$$

$$[D] = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ gray} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Annos(ekvivalentti) H

$$H = QD \quad (\text{missä } Q \text{ on säteilyn nk. laatu-kertoimen, jolla pyritään ottamaan huomioon eri säteilylajien erilainen keuhon aih. haittavaikutuksia, erityisesti stokastisia myrkyäsvaikeuksia})$$

(Huom. $Q = w_R$ = kerrain jolla absorboitunut annos muutetaan annos(ekv.)ksi)

(= "ekvivalenttiannos" = "annos")

$$\text{Annos(ekvivalentti)nopeus} = \frac{dH}{dt} = \dot{H}$$

aikavälin dt kuluessa saatu "annos" dH jaettuna aikavälillä dt

$$[\dot{H}] = \text{Sv/s} \rightarrow \text{usein } \mu\text{Sv/h}$$

Huom.

Ekvivalenttiannoksen ja efektiivisen annoksen arvioimiseksi on annos-ekvivalentista johdettu henkilödosimetriaa varten apusuure,

$$\text{kehon annos(ekvivalentti) } H_p(d) \text{ syvyydellä } d \text{ kehon pehmytkudoksessa:}$$

Syväysdosi valitaan yleensä

↪ 10 mm tai 0,07 mm

⇒

Kehon syväannos(ekvivalentti) $H_p(10)$ on hyvä efektiivisen annoksen H likiarvo = SYVÄANNOS

Kehon pinta-annos(ekvivalentti) $H_p(0,07)$ antaa likiarvon ihon ekvivalenttiannokselle = PIINTA-ANNOS

Silmän mykiön tapauksessa käytetään annos(ekvivalentti) 3 mm syvyydellä $H_p(3)$.

Radionuklidin pitoisuus eli konsentraatio C näinäineessä:

$$C = \frac{A}{V}, \text{ missä } A = \text{ko. nuklidin kokonaisaktiivisuus tilavuudessa } V.$$

ti, että paikallinen annos jossakin edessä on hyvin suuri, mutta lääkärekoannos on vielä syntyä säteilyä säteilyaurauksia.

Herkkään vaurioituvaa elämänsä muun muassa nimään myös ja rauhaset: etenkin siittiösolut vaurioituvat tilapäisesti jo melko pienillä annoksilla. Suuret paikalliset annokset aiheuttavat yhtenäisesti saattavat johtaa kausittain arvovaurioihin, mutta haitta on käytännössä alha saattaan hyötyä pienempi erityisesti syövän hoitossa.

Säteilyaltistukseen liittyy läheellisesti ja aiheuttamalla peiloilla on myös paljon psykologisia syitä johtuva haittavaikutuksia.

Esimerkiksi Tshernobylin onnettomuus tuntuu pitävän säteilyä lähes kaikkien varojen syynä hämähäköistä alkaen. Myös asukkaat saavat joutua liioitella säteilyaltistuksen vaarallisuutta. Niinpä Tshernobylin ydinurman jälkeisiä kuukausina jossakin Euroopan maissa tehniin tarpeellisesti läänissä lallista raskauden keskeytyksiä sikiövaurioiden pelon takia.

Ionisoiva säteily ei aiheuta ihmiselle edellä kuvattujen lisäksi muita terveyshaittoja, ja on erittäin epätodennäköistä, että merkittäviä uusia terveyshaittoja paljastuisi.

Tshernobylin säteily lisää syöpiä Suomessakin

Tasan kymmenen vuotta sitten tapahtuneen Tshernobylin ydinurman vuoksi arvolla muutama sata ihmistä sairastuu Suomessa syöpään 50 vuodessa.

Lisäystä ei kuitenkaan voi nähdä tilastoista, sillä Suomessa sairastuu vuosittain noin 20 000 ihmistä syöpään. Jos syöpätapausten määrä lisääntyy Tshernobylin turman vuoksi muutamalla kymmenellä vuodessa, ei se erotu tilastoista piikkinä, sillä satunnainen vuosittainen vaihtelu on huomattavasti suurempaa.

TAPIO RYTÖMÄÄ

■ Kirjoittaja on Säteilyneuvokeskuksen tutkimusjohtaja

MUUT LEHDET

Mitä Tshernobylin turma todistaa?

■ Tekniikka & Talous näkee, ettei ydinvoiman julistamista panosna voida perustella Tshernobylin turmalla, koska se johtaa ennen kaikkea väkivaltainen kolumbian virheitä.

"Kymmenen vuoden ajan maailman lisääntyvä energiantarve on lähinnä katettu rakentamalla hiiltä, öljyä ja kaasua käyttäviä voimaloita. – Jo nykyisellä kulutuksella fossiilisten polttoainoiden polttamisesta aiheutuvia hiilidioksidin lämmittäviä maapallon ilmastoa. Tilanteeseen on tähän saakka saatua ottaa huomioon. Suomi joutuu laskea saavansa siitä paljon miljardien markan arvoisen hyödyn".

"Viimeaikaiset tiedot maapallon mervivirtoja ja sitä kautta sähkönsiirtojen säteilyä Oddenin pumpun toiminnan ylläpidetyt ovat vakavoitaneet äänensyöjiä. Jos kylmiä alueita lämmittävät mervivirrat jäävät, palttu jääkauten voi alkaa".
"Tilanteesta ei tietystikään helpota se, että kehitysmaat haluavat saavuttaa länsimaisten kulutustason Se lisää energiankulutusta tuntuvasti".

0.19 $\mu\text{Sv/h}$

NORMAALI TAUSTASÄTEILY
VAIHELEE ALUEELLA
0.10...0.20 $\mu\text{Sv/h}$

SÄTEILYKEHÄ

156

0.70 $\mu\text{Sv/h}$

VIRANOMAISTEN ILMOITUSRAJA,
VALVOITAVIRANOMAISET JA VALVOITTA-
ASEMAT OTTAVAT YHTYTTÄ TOISII-
SÄ JA TEHOVAT VALVOITTAAMISA

0,05 - 10 000 mikroSv/h

10 $\mu\text{Sv} =$
1 mrem $\mu\text{Sv/h}$

1 milliRöntgen

Virta on | O ei

Ääni on/ei | Valo on

Annos näyttö | Annoksen nollaus

10.00 $\mu\text{Sv/h}$

VIRANOMAISTEN VAROITUSRAJA,
KOSKEE ESIM. PUOLUSTUSVOIMIA,
SISÄSIÄNTIIMISTEERIOITA JA
ILMAITTEELLAITOSTA

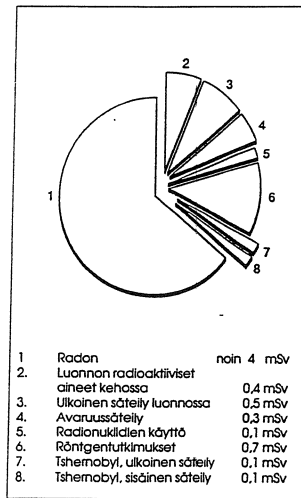
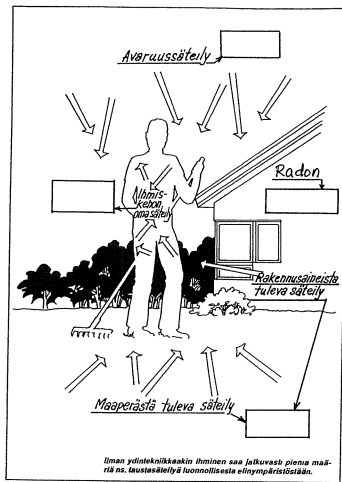
100 $\mu\text{Sv/h}$

VÄESTÖN VAROITUSRAJA,
VIRANOMAISTEN ON AKILLISESSÄ
SÄTEILYVAARATILANTEESSA
VAROITETTAVA VÄESTÖÄ

1000 $\mu\text{Sv/h}$

VÄESTÖN SUOJAUTUSRAJA,
ON RYHDYTTÄVÄ VALITTOIMIIN
SUOJAUTUSTOIMENPITEISIIN.

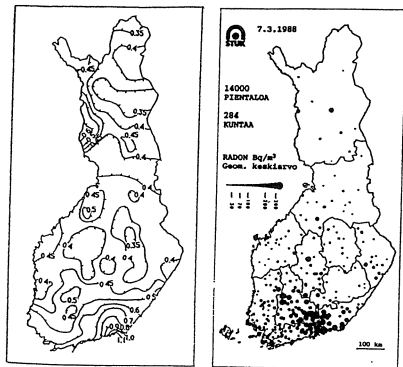
VANHOJEN JA UUSIEN
YKSIKÖIDEN MUUTOS



Kuva 7.1. Suomalaisen keskimääräisen säteilyannoksen (6 mSv) jakautuminen säteilylähteiden kesken vuonna 1987.

Radioaktiivisuus luonnossa

Luonnossa esiintyy ionisoivaa radioaktiivista säteilyä, joka on peräisin maaperästä ja rakennusmateriaaleista sekä avaruudesta. Ydinräjähdys tai -onnettomuus lisäävät maaperän aktiivisuutta tuottamalla ympäristöön ns. keinotekoisia radioaktiivisia aineita.



Kuva 5.1. Ulkoisen gammasäteilyn vuosiansokset (mSv/a) Suomessa ja pientalojen huoneilman radonkonsentraation (Bq/m³) maantieteellinen jakautuma (Säteilyturvakeskus = STUK).

5.1. Luonnollinen radioaktiivisuus

ulkoista gammasäteilyä aiheuttavat alkupeitännuklidit:

$$^{238}\text{U} \quad t_{1/2} = 4.5 \times 10^9 \text{ vuotta}$$

$$^{232}\text{Th} \quad = 1.4 \times 10^{10} \text{ vuotta}$$

$$^{40}\text{K} \quad = 1.3 \times 10^9 \text{ vuotta} \quad E_{\beta} = 1.46 \text{ MeV}$$

↳ U:n ja Th:n hajoamiskehityksissä

$$E_{\beta}: 0.1 \rightarrow 2.6 \text{ MeV} \quad ; \quad E_{\alpha}: 4.5 - 8.8 \text{ MeV}$$

Keskim. aktiivisuudet / maaperä kilogrammaa kohti (Suomessa):

^{238}U	38 Bq/kg	} (kun huomioidaan niiden pitoisuudet luonnossa) aih. suomalaisille joka vuosi noin <u>0.5 mSv</u> ulkoisten annosten.
^{232}Th	41 Bq/kg	
^{40}K	640 Bq/kg	

TAULUKKO 5.1

(Annos vaihtelee hieman; max. kaakkois-Suomessa 1.1 mSv)

Maapallolla keskimäärin n. 0.3 mSv. Suomessa syntä granitekalliopestä!

	Annosnopeus [nGy/h]			
	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
Ulkona	0,431	0,668	0,0423	0,146
Sisällä	0,79	0,89	0,0696	-

Taulukko 5.1. Luonnonaktiivisuuden aiheuttama annosnopeus (nGy/h) ulkona metrin korkeudella ja betonisessa huoneessa, jonka mitat ovat 4x5x2,8 m ja jonka seinämän paksuus on 20 cm. Annosnopeudet on laskettu pitoisuuksille 1 Bq/kg. Taulukkoon on myös merkitty tasaisesti maaperää jakautuneen cesiumin aiheuttama annosnopeus [1].

	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	Yhteensä
Pitoisuus [Bq/kg]	38	41	640	719
Annosnopeus [μGy/h]	0,016	0,027	0,027	0,070

Taulukko 5.2. Suomen maaperän keskimääräinen aktiivisuus ja siitä aiheutuvat säteilyannokset metrin korkeudella ulkona [1].

Aine	Radioaktiivisuus [Bq/kg]		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Betoni	53	38	840
Kevytbetoni (Siporex)	49	36	360
Savitiili	80	62	990
Tulitiili	23	21	620
Sementti	40	20	250
Puu	0,4	0,7	9,6
Eristevilla	16	7	160

Taulukko 5.3. Rakennusmateriaalien keskimääräisiä radioaktiivisuuksia Suomessa [5].

Ihmissä

↳ Kaliumia n. 0.2 % massasta

↳ josta 0.0117 % on isotooppia ⁴⁰K

Voitaaan laskea, että 1g kaliumia nästaa aktiivisuutta 30.4 Bq.

Siten kaliumin aktiivisuus 75 kg paina-
nassa ihmissä on:

$$0.2 \times 10^{-2} \times 75 \times 10^3 \times 30.4 \text{ Bq} = 4560 \text{ Bq}$$

$\underbrace{0.2\%}$
 $\underbrace{75 \text{ kg}}$
 \times
 $\underbrace{30.4 \text{ Bq}}$

$$\text{ts. } \frac{4560}{75} \approx 60 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$$


vet. Maaperä ~ 640 Bq/kg

(Vaihtelee 2000 - 6000 Bq, koska kaliumia on enemmän lihaskudoksessa.)
Kaliumin määrä kehossa ≈ vakiona!

⁴⁰K $E_\gamma = 1.46 \text{ MeV}$ ts. absorboituu vain osittain!

VOE Kehon kaliumista saatava keskim. annos on n. 0.17 mSv vuodessa.

Yhteensä luonnon radioakt. aineet kehossa aiheuttavat n. 0.4 mSv annoksen vuodessa.

ts. Bodarit ovat aidosti "aktiivisempia" kuin luonnon...


Taulukot 5.1. & 5.2 :

Esim.

Ulkona: ^{238}U

aih. annosnopeuden (1m korkeudella)

$0.431 \text{ n Gy/h} / 1 \text{ Bq/kg}$ jos pitoisuus olisi

[5.2.]
Suomen maaperässä

$^{238}\text{U} : n \text{ pitoisuus} = 38 \text{ Bq/kg}$

luten & aih. annosnopeuden (1m korkeudella):

$(0.431 \text{ n Gy/h}) \times 38 \approx 16 \text{ n Gy/h}$
 $= 0.016 \mu \text{ Gy/h}$

[5.2.] ^{238}U , ^{232}Th & ^{40}K

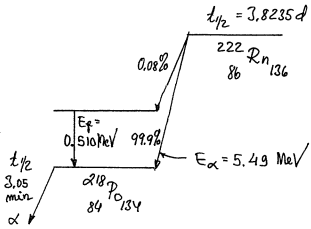
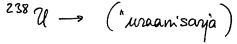
yhteensä: annosnopeus = $0.070 \mu \text{ Gy/h}$

Mutta ihmiskeho ei absorboi koko energiaa!
(ts. suurenerg. gammat ositt. läpi)

↳ korjattava tekijällä 0.82.

Vuosiannos siten = $0.070 \times 0.82 \times 10^{-6} \times 24 \times 365 \text{ Sv}$
 $\approx 500 \times 10^{-6} \text{ Sv} \approx 0.50 \text{ mSv}$

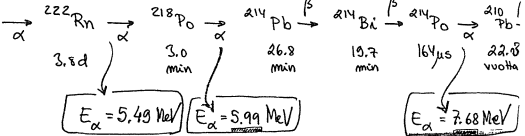
Radon



$t_{1/2}$ säis ~ 3.8 d

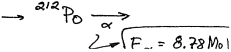
- kulkeutuu syvätkin maaperästä
- aih. > 50% suomalaisten vuor-annokasta

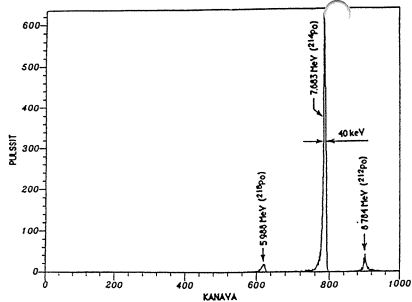
URAAANISARJA:



↳ Kts. luvu 5.3

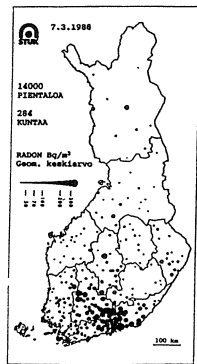
THORIUMSARJA:





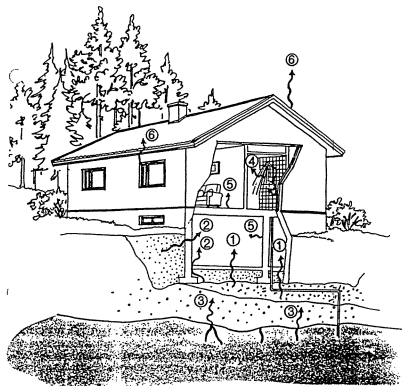
163

Kuva 5.3. Puolijohdeilmäsimellä Si(Au) mitattu alfaspaktri huoneilmasta kerätystä näytteestä (mittausaika 30 min). Näyte on kerätty alumiinilevyille inemällä 1 m^3 ilmaa kapillaarin läpi.

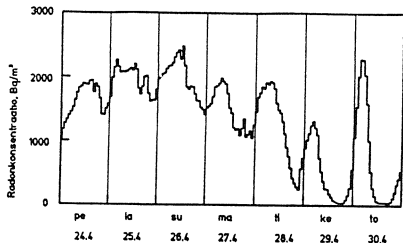


Kuva 5.1. Ulkoisen gammasäteilyn vuosiansokset (mSv/a) Suomessa ja pientalojen huoneilman radonkonsentraation (Bq/m^3) maantieteellinen jakautuma (Säteilyturvakeskus = STUK).

164



Huoneilman radonpitoisuuteen vaikuttavat: 1) rakennuksen alla ja ympärillä oleva maaperä, 2) täytemaa, 3) kallioperä, 4) talousvesi, 5) rakennusmateriaalit ja 6) ilmanvaihto.



Kuva 5.5. Radonkonsentraation vuorokausivaihtelu harjualueella sijaitsevassa talossa keväällä 1987 (STUK).

Radonannos saad. asunnoissa!

↳ Suomessa
asunnoissa keskim. radonpitoisuus:

Es:
On turvallisem-
paa työkennellä
yhdenvoimalla kuin
istukella kotona
sähköllä...!

$$\sim 120 \text{ Bq/m}^3$$

$$\hookrightarrow \text{annos} \sim 4 \text{ mSv/vuosi}$$

(Ulkona suuri ilmassa:
- pitoisuudet $\sim 1-10 \text{ Bq/m}^3$)

Asuntovaihtelut suuria:

$$\text{- max.} \sim 15000 \text{ Bq/m}^3$$

$$\downarrow$$

$$\text{annos} \sim 500 \text{ mSv/vuosi}$$

Miten radon kulketaan asuntopihin?

↳ ks. suur. kuva 5.4.

Vuorokausivaihtelut suuria!

↳ kuva 5.5.

↳ Es lyhyt mittaus ei ole luotettava...

$$\text{Asuntovaikutus:} < 400 \text{ Bq/m}^3$$

$$\text{Uudet asunnot:} < 200 \text{ Bq/m}^3$$

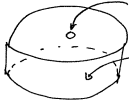
Radonmittaus

Säteilyturvakeskuksesta (tai kuntien vast. virastosta) saapi

radonmittauspurkkeja
↳ integraaliva mittaus pörsä (~ 2kk) 1vk → 2

pörsän ajankohhta: marras - huhtik.

radon reiästä sisään Miksi? (Maa jäässä...)



α-säteilylle herkkä kalvo

~ 5cm

α-sät. (Pn & hajinot) aikaansaavat näkymättömiä jälkiä

ne suurennetaan sähkökemiallisella syövytyksellä näkyväksi

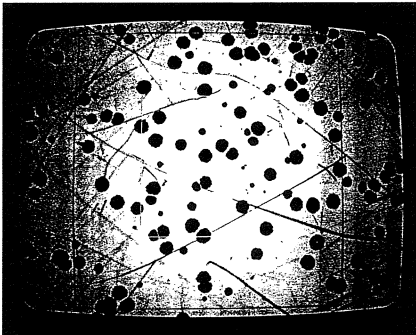
↳ jälkien määrä & mittausulos lask. automaattisesti

Mittaushinat (v. 20)

- Sät. turvakastus ~ 150mk
- kunnat ~ 70mk

Kts. kalvo sininen alue (~ 3x3mm) lask. kerrallaan

Purkki ollut 2kk huoneessa, jonka radonpiti. ~ 800 Bq/m³.



Jälkien lukumäärä ja mittausulos lasketaan automaattisesti. Kuvassa on suurennos syövytetystä kalvosta. Kerrallaan laskettava alue on noin 3x3 mm (siniset rajat). Kyseinen mittauspurkki on ollut kaksi kuukautta asunnossa, jonka radonpitoisuus on 800 Bq/m³.

Radonmittari Polvijärveltä

Uuden hinta on vain kymmenesosa entisistä

Polvijärveläinen satelityn mitallaitesta ja -yhteistyömiä valmistava Kata-Electronics Oy on tyypiesimerkki Risto E. J. Penttilän kuuluttamasta tuotannosta, jossa tuotantomerkittävät ovat korvien välissä. Säteilyturvakeskus on juuri antanut hyväksyntänsä yhtiön kehittämälle mittausmenetelmälle työpaikkojen läksikäsittein radonmittauksiin. Uuden laitteiston hinta on vain kymmenesosa nykyisiin käytössä olevien radonmittareiden hinnasta, sanoo toimitusjohtaja Kauko Tanskanen.

Uudessa mittausmenetelmässä radonmittausominaisuudet on yhdistetty toiseen läksikäsitteeseen säteilymittariin väistösuojelumuuttarin Huonelman radonmittauksessa näytelaatikon asetetaan mitattavaan huoneeseen

seitsemän vuorokauden ajaksi. Tulos becquerelleinä kuutiometriä kohti nähdään suoraan säteilyturvamittarin näyttöä

Työpaikoilla sallittavan radonpitoisuuden enimmäisarvo on 400 becquereliä kuutiometriä, jota nykyisiin asuntojen radonpitoisuudet ei saisi ylittää. Uudet asunnat tulee suunnitella niin, ettei 200 becquereliä ylity.

Suomessa on Euroopan korkean radonpitoisuuden keuhkarvo. Radonin on arvioitu aiheuttavan yhden keuhkosyöpätapauksen joka päivä. Puhumalla radonahullu taloja radonpitoisuudet voivat olla jopa useita tuhansia becquereliä. 400 becquerelin raja ylittyy noin 70 000 asunnossa ja 800 becquereliä 20 000 asunnossa.



Kauko Tanskanen

Toimitusjohtaja Kauko Tanskanen esittelee uuteen radonmittausmenetelmään kuuluvia säteilymittaria sekä keräily-yksikköä, joiden hinnaksi hänen mukaansa tulee kymmenesosa nykyisiin käytössä olevien radonmittareiden hinnoista.

Helsingin Sanomat, perjantaina 8. huhtikuuta 1994

MIELIPIDE

Naisten keuhkosyövät eivät keskity radonalueillemme

■ Säteilyturvakeskuksen antamin tietoihin viitaten Helsingin Sanomissa 23.3. kuluttajapalatalle todettiin, että maamme radon aiheuttaa vuosittain 400 keuhkosyöpää. Laski mainostetaan maksallista radonmittausta ja suosittelua kallista rakennuksen korjauspakettia.

Maamme on ehkä maailman paras työpärekisteri. Sen tietojen mukaan Suomessa linneli 1980-luvun puolivälissä noin 2 300 uutta keuhkosyöpätapausta vuosittain. Niistä oli naisilla noin 300.

Kun voidaan olettaa, että säteily vaikuttaa miehiin ja naisiin samalla tavalla, pitäisi siis näillä ihmisillä puolet radonkeuhkosyövistä eli noin 200 keuhkosyöpää vuosittain. Yh puolet kaikista naisten keuhkosyövistä olisi siis radonin aiheuttamia kasvaimia.

Syöpärekisterin tietoihin perustuen näiden keuhkosyöpien ilmenemisen ei keskity radonalueille. Se nousi ensin tietojen mukaan alueellisista tupakoinnista. Ajatus 200 vuositietäistä naisista radonperheistä keuhko kasvaimesta on lojosioiden vastainen.

Soisasi- ja terveysministeriö on vastuussa ennalta ehkäisevistä terveydenhoitotyöistä. Väite siitä, että rakennusten korjauksella voidaan estää vuosittain 400 keuhko kasvainta on rajua. Jos säteilyturvakeskuksen väitte olisi totta, sosiaali- ja terveysministeriö olisi syyllistynyt radonperheisten kasvaimien osalta estävien toimenpiteiden laiminlyöntiin.

Ministeriön pitäisi viimeistään nyt ryhtyä johtamaan vuosittaisen 400 radonperheistä keuhko kasvainta torjuntajohdusta. Se merkitäisi kattavaa rakennusten radonmittausta rikkumissa ja tulosten pohjalta tehtäviä korjaustoimenpiteitä. Tämä maksaa Sikiä kunnilla on oikeus saada ministeriöltä selvä toimenpiteiden suositus. Ohjan suomalaisilla oikeus asia turvallisesti siten, että

rakennukset ovat terveydelle vaarattomia.

Jos Säteilyturvakeskus ei pyyri osoittamaan terveysvaaroille riittäviä perusteita radon kasvainten arvioilleen, ollaan myös vakavien kysymysten edessä. Onko liitos syyllistynyt kuitenkin pelotteiluun ja markkinointiin kansalaisille hyödyttään kysyneistä terveysmittauspalveluista?

Säteilypolitiikkaamme vaikuttaa välillisesti myös yleiseen mielipiteeseen ja siten etätyöpolitiikkaan. Sitä usein käytetään hyvin tunneperäisiin argumentteina. Toisaalta kyse on suurista taloudellisista arvoista. Siksi Säteilyturvakeskuksen aineita neutraalisia arvoiltaan asiantuntijajärjestelmän ei pitäisi vaarantaa. Nyt ja mielestäni näin käyntä

ERKKI VAURAMO
Lähtökiteellinen
Jyväskylän äänestäjä
Helsinki

MIELIPIDE

Radonkasvaimia ei näy syöpärekisterissä

■ Radonpölykeskusten käynnisti säteilyturvakeskuksen väle (HS 23. 3.) vuosittain ilmenevät 400 rakennusrekisterin keinoin ehkäisiviä radonkeuhkopyöristä, jotka nyt ovat paljastuneet laskennalliseksi. Säteilyturvakeskuksen mukaan lukuun on pitänyt laskea koko väestön radonannos (HS 5. 4.). Tästä kohden olen laskentaperusteista eri mieltä. Kun koko väestön lisäksi radonallisuutta ei voida estää, tulisi nauttimaan esittävien radonkasvainten arvioinnissa käytä vain sitä kohdeväestöä, jonka syöpärisiä voidaan pienentää vaikuttamalla asuntojen radonpitoisuuksiin.

Jos radonallisuudesta syntyy 400 ylimääräistä keuhkopyöpää vuosittain, pitäisi näiden keuhkopyöpien ilmenemisluvut olla huomattavasti korkeammat. Siksi on syytä uskoa radonin aiheuttavan keuhkopyöpää vain tupakoitsijalukusta ryhtymään (HS 11. 4.) toteaa. Tästä kohden olen samaa mieltä.

Säteilyturvakeskus perustelee kaavailusta noin 500 milj. mika korjausrakennusohjelman jalkisussaan Asuntojen radonkorjauksen kustannukset (STUK A 114, s. 26) seuraavasti: "Suoritetut 400 (asunon) korjausta säästävät seuraavan 50 vuoden aikana 60 keuhkopyöpätapusta".

Käytetäänkö tilastullisesti säteilyturvakeskuksen laskelmatapaa (HS 11. 4.), eli Suomea 5 milj. asukkaasta kootti syntyy 2 000 keuhkopyöpää, joista noin 20 prosenttia, eli noin 400, olisi voinut estää ehkäisemällä radonallisuus

Mainituissa 400 asunnossa esuu

noin 1 000 ihmistä. He saavat keskimäärin vuosittain 1 000 as/5 000 000 as x 2 000 tupakka-keuhkopyöpää eli 0,4 kasvainta vuodessa. Näistä kertyy 50 vuodesta 20 kasvainta. Jos niistä on 20 prosenttia radoon aiheuttama, syntyy 50 vuoden kuluessa kohdeväestöön 4 radonkasvainta.

Miten sitten voidaan ehkäistä 60 kasvainta, jos säteilyturvakeskuksen esittämien laskentamallin mukaan syntyy vain 4 ehkäistävää radonkasvainta? Laskelma olisi oikein, jos vuosittain syntyy 30 000 uutta keuhkopyöpää asukasyksien 2 000 asemasta. Onko nyt korjauksen hyöty tietoisesti vai vahingossa liioiteltu yli dekadilla?

Niin lausa sikana terveydenhuollossa 500 milj. mk on iso raha. Todellista sydäntäsiivouksellisuutta vähennettiin Puolijoh-Karja-projektilla paljon vähemmän rahalla Itsemurhien ehkäisyprojektin verrattuna radonprojektin hinta on kuitenkin Sepseläy-möiden ohitustilauksissa voitaisiin 500 milj. mk la tehdä lähes 7 000, eli parin vuoden tarve. Näitä toimenpiteitä estetään astopa reaalisia kuloja.

Ehkäisimäärin laskennalla radonkasvaimia ei näy syöpärekisterissä, laskelmat ovat ristiriitaisia ja ehkäisevä radonohjelma on kaalis Säteilyturvakeskus vaikuttaa enemmän johon asiaa liikkeeltä kun viikkuti asiantuntijaviranomaiselta Olinkuhan nyt soisala- ja terveysministeriön asiantuntijatyöryhmän paikka

ERKKI VÄURAMO

lakketieteilisen
fyysikan dosentti
Helsinki

MIELIPIDE

Aiheuttaako radon 400 keuhkopyöpää?

■ Vuosittaisesta kahdestatuhannesta keuhkopyöpätapauksesta noin 400 on radonin aiheuttama. Näin HS:n kuluttajapöytäla viikkokeskiviikkona (23. 3.). Ilonni uutinen vastakkaisesta kietyksestä ilmestyy Health Physics lehdessä marraskuun numerossa. Yhdysvalloissa 1 600 kunnassa on verrattu keuhkopyöpätapauksen radonallisuutta ja tupakapolitron. Näin on tutkittu samalla tutkimusmenetelmällä kahta olettettua syöpäaiheuttajaa. Kivi ilmi, että tupakapolito lisää keuhkopyöpään sairastumisen vaaraa, mikä onkin yleinen käsitys. Yllättävä tulos oli, että huoneilman radonallisuus vähentää keuhkopyöpätapusta määrää melkein saman verran.

Syitä tähän yllättävään tulokseen liittyy siihen, että radonin säteilyvaikutus rajoittuu vain kudoksen makrokoopiin. Säteily on näet alfa-säteilyä, joka kulkee kudoksessa vain muutamaa tuhannetta millimetriä. Siis lähtee keuhkoihin pääsääntöisesti radonin jälkiseläitöooppista, joita syntyy kun radon hajoo. Säteilyvaikutuksen luonne onkin alhainkalla erikoisen. Se osentaa rikkokone aineen rakennetta kuin niuhon osuva vastara, siis tehokkaasti

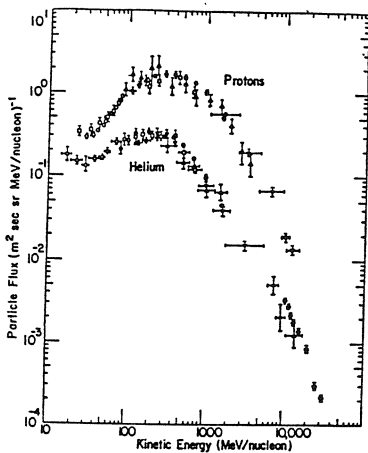
mutta aluelucessi rajoitetusti. Beette-, röntgen- ja gamma-säteily, joista yleensä on kysymys säteilyhäädissä pahehdotteen, pikemmin synnyttävät voimakkaasti vaikuttava kemiallinen yhdisteitä, joiden myrkyllisyys aiheuttaa solujen kuolemaa kaikilla kudoksissa.

Health Physics on laittavassa muun muassa Kokkakuulujen ja Säteilyturvakeskuksen kirjastossa. Lehtiä tilaavat melkein kaikki Pohjoismaissa Säteilysuojusosastoa eikä viikkokeskiviikkona suomalaisista jäsenti, joten asiasta kiinnostuneen on helppo tutustua tähän mielenkiintoiseen marraskuun numeroon. Siinä on pitkä tauko keuhkopyöpään esiintymisestä, jossa kity muun muassa ilmi, että radonia voinä syntyy leikkimäärän aiheuttamisesta.

HS:n kirjoituksessa on ilmeisesti esitetty virheellisesti kykyty kistyy huoneilman radonin rikentä. On siis todettava, että on suuri ero yhden perustellisen tutkimuksen tulosten ja virheellisten uutisten strategian välillä. Pääkö ihmisille pelottaa vai rauhoittaa?

MÄRTEN BRENNER
fyysikan professori, emeritus
Turku

5.2. KOSMINEN SÄTEILY



Kuva 5.6. Protonien ja alfahiukkasten energiaspektrit kosmisessa säteilyssä

177

Kosminen säteily:

178

30% p 9% α 1% e^- & raskampia
ytimiä (jopa 28 !)

↳ keskim. energia 100-1000 MeV
 $E_{max} \sim 10^{20}$ eV / vrt. ^{a)} hiukkaskiihdytinten
 (Kuva 5.6.)

$E_{max} \sim 10^{11}$ eV OHO!
 b) ytimistä: $E_{max} < 10$ MeV

↳ eivät silti pääse maanpinnalle asti,
 vaan aih. sekund. säteilyä

↳ aih. Suomessa
 ruosiannoksen
 ~ 0.28 mSv

Mutta ko. annos kasvaa kun nousetaan korkeammalle!

↳ lts. Taulukko 5.4.

Korkeus [km]	Annos [mSv/a]
0	0,28
6	4
9	13
12	35
15	110

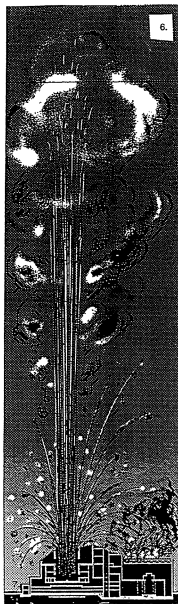
Taulukko 5.4. Kosmisen säteilyn voimakkuus eri korkeuksissa [6].

5.3. KEINOTEKOINEN RADIOAKTIIVISUUS

Nuklidi	$t_{1/2}$	Windscale	Päästöt [10^{15} Bq]		
			Harrisburg	Tshernobyl	Ydinasekokeet 1945-1980
^{90}Sr	28,6 a	0,00022	-	8	600
^{131}I	8,04 d	0,60	0,00055	260	700 000
^{133}Xe	5,25 d	12	370	1700	1 900 000
^{137}Cs	30,2 a	0,046	-	38	960

Taulukko 5.5.

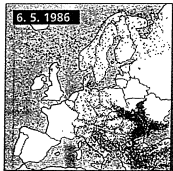
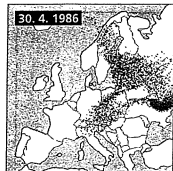
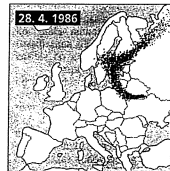
Eräiden Windscalen, Harrisburgin ja Tshernobylin reaktorionnettomuuksissa ympäristöön päässeiden radionuklidien määrät yksiköissä 10^{15} Bq verrattuna ydinkokeissa vapautuneisiin määriin [1].



Tshernobyli

26.4.1986

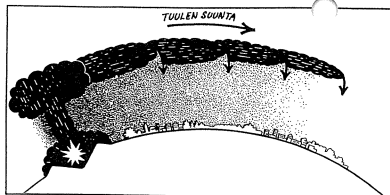
Radioaktiivisen päästöpilven liikkeet



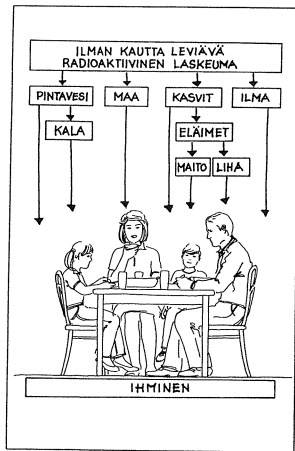
¹⁾Ilven aiheuttamat laskeumat vaihtelivat radioaktiivisen aineen ja sääolojen, etenkin sateiden mukaan.

- Tshernobylin ydinvoimalan nelosreaktori räjähti ja syttyi palamaan. Tulipalo jatkui kymmenen päivää.
- Onnettomuus vaikutti YK:n mukaan yhdeksään miljoonaan ihmiseen Ukrainassa, Valko-Venäjällä ja Venäjällä.
- Unicefin mukaan lasten kilpirauhassyöpä on yleistynyt voimakkaasti, samoin hermosto- ja verenkiertohäiriöt sekä pahanlaatuiset kasvaimet. Maailman terveysjärjestön WHO:n mukaan leukemia on lisääntynyt vain hieman – tosin huippu saattaa vasta olla tulossa.
- Säteilysairauten kuoli välittömästi 26 ihmistä.
- Arviot 10 vuoden aikana menehtyneiden ja tulevaisuudessa kuolevien määrästä vaihtelevat tuhansista satoihin tuhansiin uhreihin halki Euroopan.
- Lähes puoli miljoonaa ihmistä evakuoitiin voimalan läheisyydestä.
- Noin 160 000 neliökilometriä maata saastui.





Ilmaan päässyt radioaktiivinen pöly saattaa kulkeutua tuulen ja ilmavirtausten mukana satoja ja jopa tuhansia kilometrejä. Radioaktiivinen laskeuma syntyy, kun radioaktiiviset hiukkaset laskeutuvat maahan.

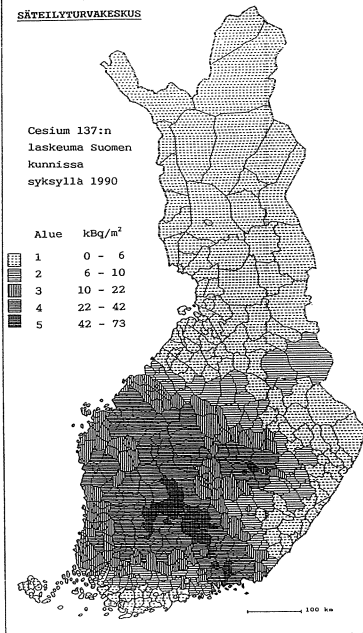


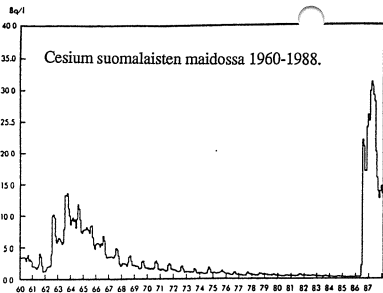
Radioaktiivisia aineita kulkeutuu laskeumasta ihmiseen elintarvikkeiden, juomaveden ja hengitysilman välityksellä

SÄTEILYTURVAKESKUS

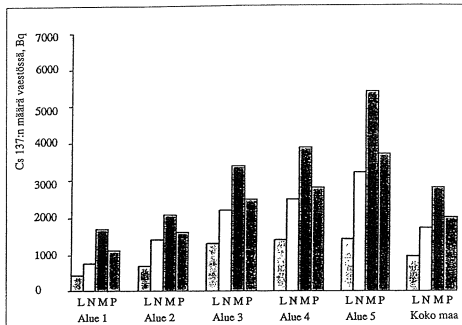
Cesium 137:n
laskeuma Suomen
kunnissa
syksyllä 1990

Alue	kBq/m ²
1	0 - 6
2	6 - 10
3	10 - 22
4	22 - 42
5	42 - 73





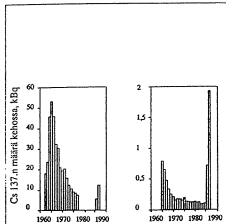
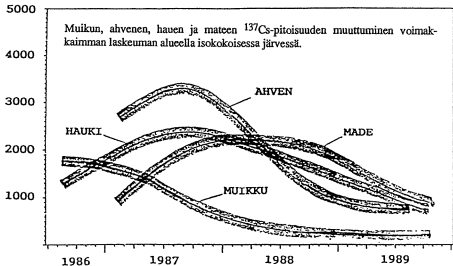
(187)



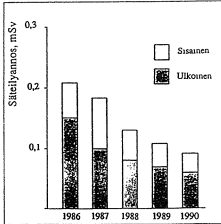
(188)

Cesiumin keskimääräinen määrä väestössä laskeuma-alueittain: lapset (L), naiset (N) ja miehet (M) sekä alueen painotettu keskiarvo (P) vuoden 1987 lopussa. Alueet 1-5 viittaavat cesiumlaskeumaan (kuva sivulla 4). Cesiumin määrä kehossa lisääntynyt vähitellen ravinnosta saadun cesiumin vaikutuksesta. Aktiivisuus ollessuunnilleen kesästä 1987, jolloin suomalaista oli keskimäärin noin 2 400 Bq cesium 137:ää ja noin 1000 Bq cesium 134:ää. Sen jälkeen cesiumin määrä on vähitellen pienentynyt. Vuoden 1990 lopussa suomalaista oli cesiumia keskimäärin vähemmän kuin puolet vuoden 1987 huippuarvoista. Eniten laskeuma saaneella alueella cesiumin määrä väestössä oli noin kaksinkertainen ja lievimman laskeuman alueella noin puolet koko väestön keskiarvoon verrattuna.

Inariista, Pudasjärveltä, Tampereelta, Viitasaarelta ja Ämmänsaaresta valituissa ryhmissä cesium 137-määrät vaihtelivat vuonna 1990 välillä 100 - 32 000 Bq. Eniten cesium 137:ää, keskimäärin noin 10 000 Bq on edelleen inarilaissa poroniehissä. Tästä noin kolmannes on peräisin ydinvoimalasumasta.



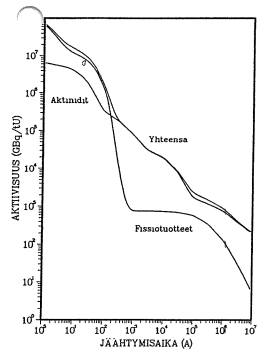
Cesium 137 marilaissa poroniehissä ja pääkaupunkiseudun vertailuryhmässä, johon kuuluu 16 miestä ja 10 naista. Huomaa, että asteikot ovat erilaisia



Tshernobylinonnettomuuden seurauksena Suomeen levinneiden radioaktiivisten aineiden aiheuttamat säteilyannokset sekä sisäisten ja ulkoisten säteilyannosten osuudet vuosina 1986-1990

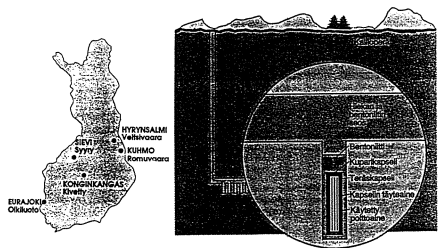
Laji	Päästöt [10^{12} Bq]	
	PWR	BWR
Päästöt ilmaan		
Jalokaasut	430	8800
^3H	7,8	3,4
^{14}C	0,2	0,5
Jodit	0,005	0,4
Muut	0,002	0,05
Päästöt veteen		
^3H	40	1,4
Muut	0,2	0,3

Radioaktiivisten aineiden tyypilliset päästöt ydinvoimaloissa [1].
 PWR = painevesireaktori (esimerkiksi Loviisan ydinvoimala) ja
 BWR = kiehutusvesireaktori (esimerkiksi Olkiluodon ydinvoimala).



5.4 ydin-
 polttoaine-
 huolto...

Kuva 5.9. Käytetyn ydinpoltoaineen aktiivisuuden ajallinen muuttuminen.



Kuva 5.10. Alustaviin sijoituspaikkatutkimuksiin valittujen tutkimusalueiden sijainti ja käytetyn polttoaineen loppusijoituksen periaate.

Ydinvoimalaitoksen polttoainehuolto käsittää monta eri vaihetta alkaen uraanimalmin louhinnasta ja päättyen ydinjätteiden loppusijoitukseen. Uraanimalmia louhitaan esiintymistä, joissa uraanipitoisuus on tavallisimmin 0,1-0,3 %. Malmista valmistetaan 70-80-prosenttista uraanirikastetta kemiallisin menetelmin rikastamossa, joka yleensä sijaitsee uraanikaivoksen yhteydessä. Uraanin louhinnan ja rikastuksen yhteydessä syntyy suuria määriä vähäaktiivisia jätteitä. Pohjoismaissa ei nykyisin louhita uraania, ja aiemminkin sitä on louhittu vain vähän.

Kevytvesireaktorin polttoaineen valmistukseen tarvitaan noin 5-7 tonnia luonnonuraania kytäkin valmiissa polttoaineessa olevaa uraanionnia kohden. Tämä johtuu siitä, että luonnon-uraanissa on helkeavan isotoopin ^{235}U osuus vain 0,7 %, kun taas kevytvesireaktorin polttoaineeksi kelpaavassa uraanissa sen osuuden tulee olla noin 3 %. Tämän takia uraanirikaste muutetaan kaasumaiseen muotoon ja väkevöidään erityisissä laitoksissa. Väkevöidystä uraanioksidista puristetaan pieniä sylinterimäisiä nappeja, jotka sijoitetaan muutaman metrin pituisiin zirkoniumputkiin, ja näistä putkista kootaan suunnilleen 100 polttoainesauvaa käsiteltävä nippuja.

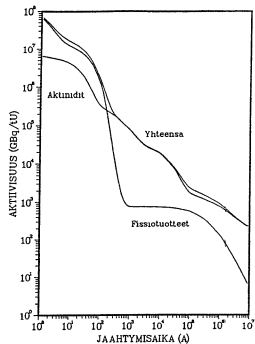
Ydinreaktorissa ^{235}U muuttuu halkeamistuotteiksi, joista suuri osa on radioaktiivisia. Useimmat niistä ovat lyhytikäisiä, mutta jotkut ovat hyvin pitkäikäisiä. Halkeamistuotteiden lisäksi muodostuu ^{238}U -isotoopin kaapatessa neutroneja ns. transuraaneja (esimerkiksi plutoniumia), joista monet ovat hyvin pitkäikäisiä.

Reaktorisydämissä olevasta polttoaineesta korvataan vuosittain kolmasosa viidesosaan, jolloin muodostuu ns. käytettyä polttoainetta. Se on varsinkin alkuaikoina hyvin voimakkaasti säteilevää ja lämpöä kehittävä. Käytettyä polttoainetta säilytetään tavallisesti vesiallasvarastoissa. Loviisan voimalaitoksella käytettyä polttoainetta varastoidaan noin viisi vuotta ennen kuin se vieään Venäjälle. Olkiluodon ydinvoimalan polttoainetta on varauduttu väliavaroitamaan usean vuosikymmenen ajan.

Käytetystä polttoaineesta huolehtimiseen on kaksi päävaihtoehtoa: jälleenkäsittely tai suora loppusijoitus. Jälleenkäsittelyssä polttoaineesta erotetaan käyttökelpoiset aineet, uraani ja plutonium, jolloin jäljelle jää erilaisia jätteitä. Näistä kaikkein aktiivisimpiin, ns. runsasaktiivisiin jälleenkäsittelyjätteisiin, sisältyvät lähes kaikki ydinreaktioissa muodostuneet halkeamistuotteet ja osa transuraaneja. Suuria jälleenkäsittelylaitoksia on nykyisin käytössä Ranskassa, Englannissa ja Venäjällä.

Runsasaktiiviset jälleenkäsittelyjätteet on tarkoituksenaan kiinnettävä lasiin tai keraamisiin aineisiin loppusijoitusta varten. Jätteiden kiinnetyksi lasiin on harjoitettu vasta jonkin aikaa ja loppusijoitus toiminta alkanee vasta vuoden 2000 tienoilla.

Suorassa loppusijoituksessa käytetyt polttoainepiiput sijoitetaan sellaisinaan kestäviin kapselisiin ja sijoitetaan lopullisesti samalla tavalla kuin runsasaktiiviset jälleenkäsittelyjätteet. Käytetyn polttoaineen aktiivisuus aiheutu aluksi pääosin lyhytikäisistä fissiotuotteista, joiden aktiivisuus pienenee nopeasti (kuva 5. 9). Aktiividit ($Z=89-103$) ovat hyvin pitkäikäisiä, ja ne pysyvät aktiivisina hyvin pitkään. Vasta muutaman miljoonan vuoden kuluttua jäljellä on pääasiassa uraania (^{238}U) ja sen tytärtymiiä.

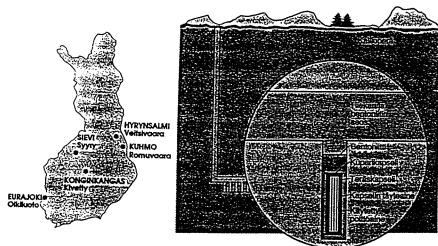


Kuva 5.9. Käytetyn ydinpolttoaineen aktiivisuuden ajallinen muuttuminen.

Kun otetaan huomioon nykyiset hyödyntämiskelpoiset uraaniesiintymät, termiset reaktorit voivat tuottaa käytettyä ydinpolttoainetta enintään 1 000 000 tonnia. Tuhannen vuoden eristysajan jälkeen tämän polttoainemäärän aktiivisuus olisi noin 1020 Bq. Maan kuoreessa yhden kilometrin syvyyteen asti sijoitettujen alfasäteilijöiden (uraanin, toriumin ja niiden tytärnuklidien) kokonaisaktiivisuus on vähintään 1023 Bq. Vertailu jätteiden ja luonnon alfasäteilijöiden välillä osoittaa, etteivät jätteet pysty globaalisesti pitkällä aikavälillä jirkkyttämään radioaktiivisten aineiden tasapainoa elinympäristössä. Tällainen vertailu ei kuitenkaan anna varmuutta siitä, etteivätkö loppullisesti sijoitetuista jätteistä aiheutuvat ympäristövaikutukset voisi olla paikallisesti merkittäviä.

Suomen ydinvoimaloiden 40 vuoden käytöstä arvioidaan syntyvän käytettyä polttoainetta yhteensä noin 1840 tonnia. Loviisan ydinvoimalaitoksen käytetyn polttoaineen viemisestä Venäjälle on sopimus. Olkiluodon voimalaitoksen käytetyille polttoaineeille ei ole vastaavia sopimusjärjestelyjä, minkä vuoksi Teollisuuden Voima Oy on valmistelemassa sen suora loppusijoitusta maamme kallioperään. Tavoitteena on valita loppusijoituspaikka vuonna 2000 ja aloittaa loppusijoitus vuonna 2020. Suunnitelmien mukaan loppusijoitustila suljetaan lopullisesti noin vuoteen 2055 mennessä.

Käytettyä polttoainetta varastoidaan aluksi usean kymmenen vuoden ajan, jotta sen lämmön-
tuotto vähäisen riittävästi. Sitten polttoainemeni put suljetaan sellaisenaan kuparikapseliin, joi-
den arvioidaan kestävän loppusijoitusolosuhteissa erittäin pitkään. Kaavailtu loppusijoitusy-
veys on noin 500 metriä.



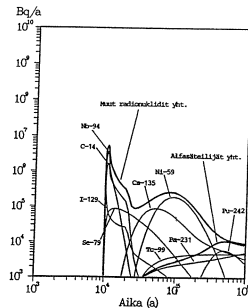
Kuva 5.10. Alustaviin sijoituspaikkaenkutimuksiin valittujen tutkimusalueiden sijainti ja
käytetyn polttoaineen loppusijoituksen periaate.

Ydinjätehuollon yleiset periaatteet ja turvallisuusvaatimukset määrätään ydinenergia- ja
säteilylainsäädännössä. Matala- ja keskiaktiivisen jätteen osalta läilliset ohjeet on ja annettu.
Runsaasaktiivisen jätteen loppusijoituksen turvallisuusvaatimuksia on valmisteltu pohjoismais-
ten säteily- ja ydinturvallisuusviranomaisen yhteistyönä. Työryhmä julkaisi lopulliset suosi-
tuksensa vuonna 1992 [6]. Yleisten säteilysuojeluperiaatteiden ja -vaatimusten lisäksi työ-
ryhmän ehdotus sisältää myös yksityiskohtaiset suositukset loppusijoituksen pitkäaikaistur-
vallisuuden arvioinnissa sovellettavista kriteereistä. Suosituksen mukaan keskeiset arviointi-
suureet ovat yksilönsuojia sekä radioaktiivisten aineiden aktiivisuusvirta elinympäristöön.

Yksilönsuojakriteerin mukaan loppusijoitustilasta odotettavissa olevista päästöistä yksilöille
koinuva säteilyannos saa olla enintään 0,1 mSv vuodessa.

Aktiivisuusvirtakriteeri edellyttää, että loppusijoitustilasta biosfääriin vapautuvien pitkä-
ikäisten alfasäteilyjoiden aktiivisuusvirran tulee olla pienempi kuin $10^4 - 10^5$ Bq vuodessa ja
muiden pitkäikäisten radionuklidien pienempi kuin $10^5 - 10^6$ Bq vuodessa laskettuna kutakin
loppusijoitustilassa olevaa polttoainetta valmistukseen käytettyä luonnonraanitionta kohti.

Kun loppusijoitustilassa oletetaan olevan käytettyä polttoainetta yhteensä noin 1840 urani-
tonnia ja yhden uranitionin valmistamiseen tarvitaan 7 tonnia luonnonurania, merkitsee
tämä, että pitkäikäisten alfasäteilyjoiden päästön loppusijoitustilasta biosfääriin tulee aktiivi-
suusvirtakriteerin mukaan olla keskimäärin pienempi kuin $10^8 - 10^9$ Bq vuodessa ja muiden
pitkäikäisten radionuklidien vastaavasti alle $10^9 - 10^{10}$ Bq vuodessa.

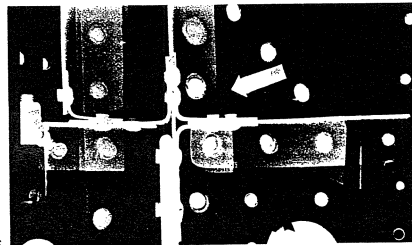
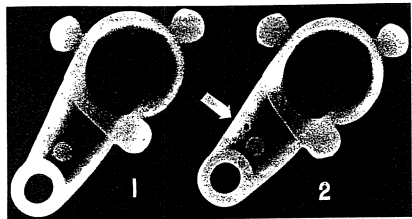
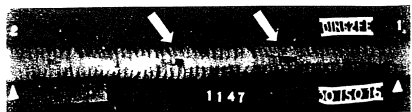
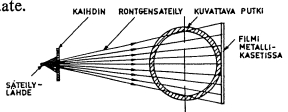


Kuva 5.11. Radionuklidien yhteenlasketut vapautumisnopeudet kallioperästä biosfääriin ver-
taluksenaarissa (kapseli hajoa 10 000 vuoden kohdalla).

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTI) ydinvoimatekniikan laboratoriossa suoritettu
turvallisuusanalyysin perusteella on arvioitu päästöjä ja säteilyannoksia useassa eri vaurio-
tilanteessa [7]. Pahinta mahdollista vaihtoehtoa esittää skenaario, jossa kaikki 1150 varas-
tointikapelia vaurioituisivat samanaikaisesti 10 000 vuoden kohdalla. Tällöin pitkäikäisten
fissio- ja aktivoitumistuotteiden vapautumisnopeus biosfääriin olisi enimmillään noin
 $9 \cdot 10^7$ Bq/a, mikä alittaa selvästi säteilyvaatimusten mukaisen yllärajan $10^9 - 10^{10}$ Bq/a. Pit-
käikäisiltä alfasäteilyjiltä vapautuisi loppusijoitustilasta biosfääriin hyvin vähän. Arvio kaik-
kien kapselien aiheuttamasta enimmäisannosnopeudesta olisi $3 \mu\text{Sv/a}$. Jos **kaikkien**
kapselien oletettaisiin vaurioituvan 1000 vuoden kuluttua, saataisiin annosnopeudeksi
 $6 \mu\text{Sv/a}$.

Radiografian periaate.

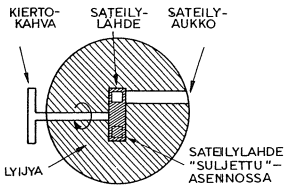
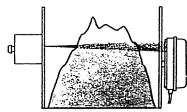
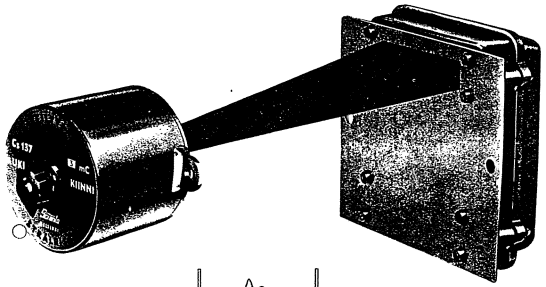
(133)



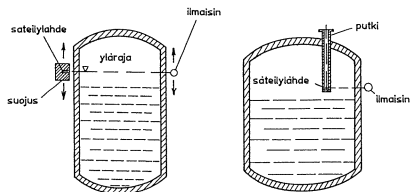
LÄHDE

(134)

ILMAISIN



Kuva 10.6. Radiografia- ja pinnankorkeusmittaria säteilylähteen rakennepiirite.

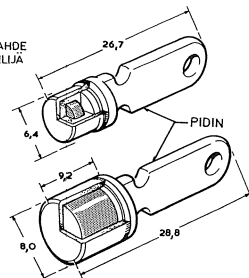
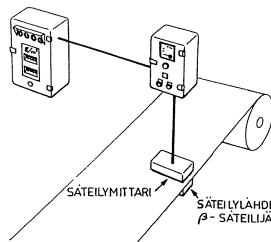


KUVA 7.19 Rajakytin. (a) Säteilylähde säiliön ulkopuolella, (b) säteilylähde säiliössä.

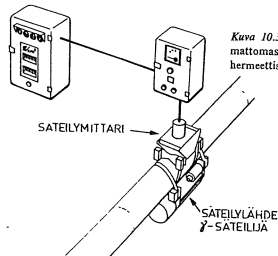
TAULUKKO 7.10 Teollisuudessa eniten käytettyjä säteilylähteitä.

Nuklidi	Puoliintumisaika	Säteilylaji	Energia, MeV	Käyttötarkoitus
²⁴¹ Am	433 a	α, γ	5.5, 0.060	ioni-ilmaisimet, neutronilähteet, tiheysmittarit
²¹⁰ Po	138 d	α	5.3	staattisen sähkön postajat
⁸⁵ Kr	10.72 a	β	0.687	piena-alapainon mittarit
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	28.6 a	β	0.61, 2.28	"
¹⁴⁷ Pm	2.6 a	β	0.223	"
¹⁰⁹ Cd	1.3 a	γ	0.022, 0.087	röntgenfluoresenssanalysaattorit
¹³⁷ Cs	30 a	γ	0.662	rajakytimet, tiheysmittarit, hihnavaa'at
⁶⁰ Co	5.27 a	γ	1.17, 1.32	pinnankorkeusmittarit, rajakytimet, hihnavaa'at
⁵⁵ Fe	2.7 a	γ	0.0059	röntgenfluoresenssanalysaattorit
¹⁹² Ir	74.2 d	γ	0.136 - 1.157	gammaradiografia

NELIÖPAINOMITTI



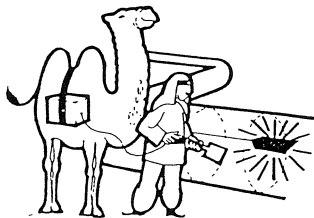
TIHEYSMITTAUS



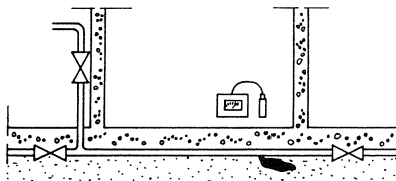
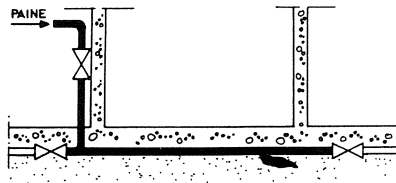
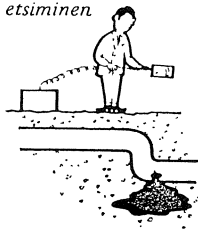
Kuva 10.3. Suljetun säteilylähteen rakenne. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu kuori on suljettu hermeettisesti hitsaamalla. (Mitat mm:jä)

Kuva 10.5. Neliöpainon ja tiheyden mittaamisen periaate.

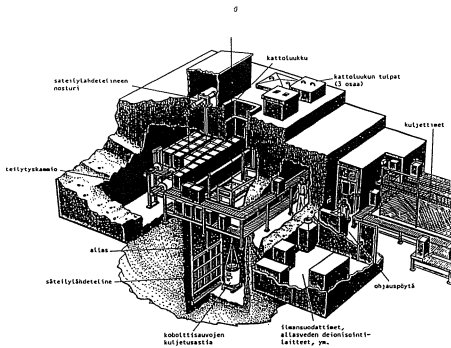
Putken tarkastus



Vuotojen etsiminen

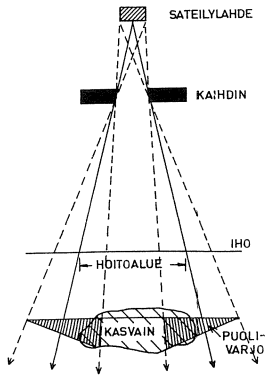
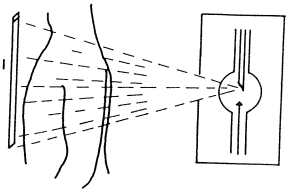


Kuva 10.7. Vesijohtovuototutkimuksen periaate.

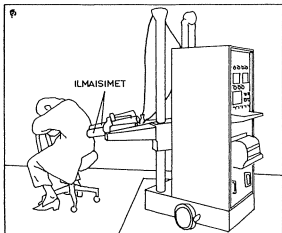


KUVA 7.20 Ilomantsissa käytössä olevan gammasterilointilaitoksen rakenne. Valmistaja AECL Industrial, Kanada.

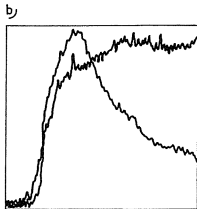
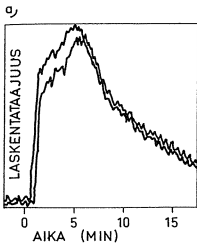
RÖNTGENFILMI TAI
LÄPIVALAISU-
VARJOSTIN



Kuva 1.22. Kaaviokuva kobolttikanuunan säteilykeilasta ja puolivarjon muodostumisesta.

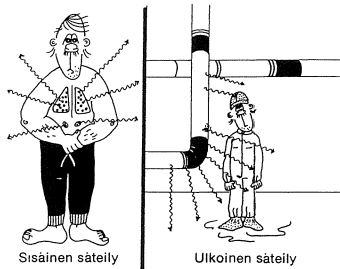


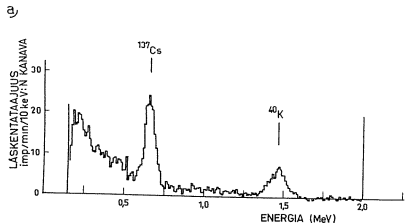
„Kuva 9.6. Mittausasetelma tutkittaessa munuaisten toimintaa.



Kuva 9.7. Munuaisten toimintaa selvittäessä saatua mittauskäyrä. Kuvassa (a) molemmat munuaiset normaaliset, kuvassa (b) normaali ja epänormaali munuaisten.

Sisäinen ja ulkoinen säteily

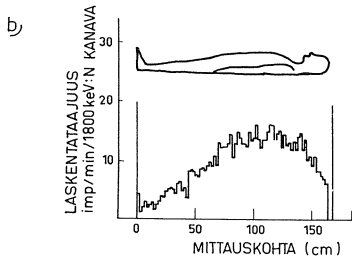




Kuva 8.18. Tyypillinen ihmisen radioaktiivisuuden mittaustulos.

a) Säteilyfysiikan laitoksella mitattu pulssinkorkeuspektri, jonka avulla elimistöön joutuneet radionuklidit määritetään. ¹³⁷Cs on peräisin ydinsaasteesta ja ⁴⁰K luonnosta.

b) Radioaktiivisuuden jakautuminen ihmisen pituussuunnassa. Yhden kanavan sisältö vastaa keskimääräistä laskentataajuutta, jonka ilmaisin rekisteröi liikkueensa potilaan yllä 2 cm:n matkan.



Säteilysterilointi (s. 199)

204

Esim.

elintarviketeollisuudessa

lääke - - - ja

sairaanhoidotarvikkeet → on usein

kiinnitettävä huomiota paitsi tuotteiden, myös

käytettävien pakkausmateriaalien mikrobiologiseen puhtauteen.

⇒

Sterilointi

- kostean tai kuivan lämmön avulla
- etyleenioksidikaasulla tai
- säteilyttämällä

Monet materiaalit eivät kestä lämpöä,

etyleenioksidilla

- työturvallisuus- ja jäämäongelmia

⇒ ionisoivan säteilyn käyttö yleistynyt erityisesti

- muovisten kanta- ja käyttötuotteiden ja
- pakkausmateriaalien käsittelyssä

Teollinen säteilysterilointi alkoi USA:ssa v. 1956

↳ ruokaa valmistettuja ommelaineita (katgutuja) steriloidtiin säteilyllä:

- ennen pakattiin avoimiin lasiputkuihin
- nyt suljetuihin alumiinipohjisiin ja
- sterilointi vasta pakkauksen jälkeen!

Mac massa n. 130 litasta Suomessa yksi (Jomantissa).

↳ (kts. s. 199)

205

Tavallisin säteilylähde: ^{60}Co

$A \sim 10^{15} - 10^{17} \text{ Bq}$

Suomessa elintarvikkeiden säteilyttämisestä koskeva asetukset tuli voimaan marraskuussa 1987:

↳ näin mausteiden sekä sterilioitu ruokavalioita tarvitsevien potilaiden ruoka-annosten säteilyttämisen sallittua.

Elintarvikkeiden säteilyannosten turvallinen yläraja on 10 kGy :

↳ vähentää mikrobin määrää, mutta ei sterioi elintarviketta

Pölyn ja sipulin itämisen estoon riittää jo $0,1 - 0,2 \text{ kGy}$ annos.

Varsinaisessa steriloinnissa annoksen suuruus on $10 - 50 \text{ kGy}$.

Rakenteesta: (Suomi) ↔ Moninkertaiset turvasäteilysäiliöt

- ohuita kobolttisauvoja (pystysuora teline)
- säteilysuojat: betonikammit, seinät 2 m
- lähde voidaan laskea alas 6 m syvän

sauvojen vesialtaan pohjalle (vesi abs. säteilyä);
mm. siirto kuljetusastasta telineeseen altaan pohjalle

Huom.

Sauvat kammissa → tappava annos muutamassa kymmenessä sekunnissa...

Säteily kotona

(206)

↳ ionisoivan säteilyn käyttö katsotaan(?) hyväksyttäväksi, kun saatava hyöty ylittää suuresti aiheuttaman riskin.

Esim. televisio, itsevalaisvat kellot, etc.

↳ röntgensäteilyä (mukaisin n. 15 kV:n jännitteellä diakooskopiaa, varsinkin vähän):
Seur.
siuru
↳

Peräisin kuvaputken etupinnasta (musta-valko-tv.)
tai metallilevystä kuvapinnan takana (väri-tv.)
johon katodista irronneet elektronit iskeytyvät.

↳ osa elektronien liike-energiasta muuttuu jarrutussäteilyksi jonka maksimienergia on sama kuin kiihdytettyjen elektronien energia (ts. 15 kV ↔ $E_{max} = 15 \text{ keV}$)

jo 70-luvulla

tv:n aiheuttama säteilyannos

arvioitiin

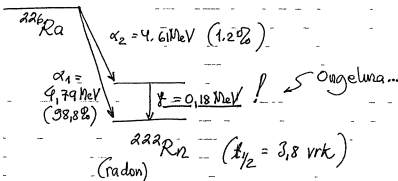
vain muutaman promilleksi tavusta-säteilyn aiheuttamasta.

Itsevalaisvat kellot

(207)

↳ vielä 1960-luvulla säteilylähteenä yksinomaan radiumia:

$t_{1/2} = 1622 \text{ vuotta}$



- paitoi synnyttää loisketaloa hyvin heikosti läpirtunkevilla alfa-säteilyllä, se lähettää myös paljon läpirtunkevaa γ -säteilyä

⇒ läpirtisee paitoi-lasin myös takakuoren
⇒ kohdistaa säteilyä koko kehoon...

Esim.

Huippuvuosina Sveitsin koko kansalle keskimäärin kohdistunut säteilyrasitus itsevalaisena kelloja (Ra) käyttäessä oli

n. $3,3 \text{ mrad/vuosi}$ ts. $3,3 \times 10^{-5} \text{ Gy} = 33 \mu\text{Gy}$

Vrt.: Tämä on samaa suuruusluokkaa 137 Cs:stä kuin esim. ydinkokeissa syntyneestä ihmisen koko aktiiviselle pihmpelmä vuonna tullut säteilyannos!

1 rad = 10⁻² Gy

Sittenminä radium vaihtui → ³H (tritium) ja ¹⁴⁷Pm (ei läpäise kellon lasia?)

↳ hyvin pienet sät.annokset
Sveitsissä tuli v.1963 pakolliseksi merkitä kelloihin käytetty radioakt. aine (T = tritium, Pm = ¹⁴⁷Pm, etc.).

Palovaroin

↳ useimmiten 37 kBq ²⁴¹Am -lähde, joka lähettää α-säteilyä.

Lähde on koteloitu niin, ettei säteilyvaaraa.

Mutta: ei talousjätteisiin, vaan palautettava maahan tulolalle!

Mutta tällaisistakin on tehty:

- vielä 1980-luvulla Ruotsissa merkittävien henkittöisyyss todistukset radioaktiivisella aineella,

joka viranomaiset pystyivät säteilymittareilla todentamaan todistuksen aitouden
⇒ väärennökset eivät säteilleet!

- hyvin varustetuissa kenkäkaupoissa saattoi aikoinaan röntgenkoneella katsoa kenkän lävitse sitä sovittaessa → ja todeta, oliko varpaille tarpeeksi tilaa ...

- USA:ssa järjestettiin vuosisadan alkupuolella Miss Selkäranka -kisaaja:

missiehdokkaiden selkärangan röntgenkuville oli oleellinen rooli valintaa suoritettaessa ...

↳ kun se kiellettiin, on päätös perustettava siihen, mitkä pinnalla näky ...

- liikkeiden ulkoetisessä saattoi olla lämpövalaisulaitteet vanhaa estämiseksi

↳ nykyisin vain lentokentillä ja sielläkin vain tavaralle ...

Säteilyn käyttö lääketieteessä

(2/10)

Esim. vielä n. 84 Suomessa tehtiin

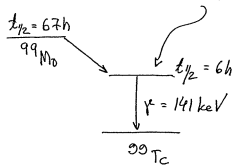
- n. 4,6 milj. röntgentutkimusta
- erilaisia isotoppi tutkimuksia n. 100 000

↳ rad. akt. merkkiainetta ruiskutetaan vereen tai annetaan suun kautta

⇒ aine kerääntyy tutkittavaan elimeen, josta γ -kameralla kuva...

Mm. ^{99m}Tc , ^{131}I , ^{201}Tl , ^{133}Xe ja ^{113m}In

Eräs parhaista: ^{99m}Tc ($t_{1/2} = 6,02\text{h}$)



Tavallisimmassa isotoppi tutkimuksissa - ruiskutettava ^{99m}Tc -aktiivisuus on 100-550 MBq

↳ aiheuttaa aikuisille n. 1-6 mSv säteily-annoksen.

Keskkojen röntgentutkimuksissa

(2/11)

↳ jopa vain 0,02 mSv.

Pienois röntgenlaitteilla tehtävissä joukko-tutkimuksissa 0,2 - 2,0 mSv

(vielä 15 a sitten tyypillisesti 2 mSv)

Mutta esim.

verisuoni kuvaukset ja tietokone tomografia

↳ tyypilliset annokset n. 50 mSv

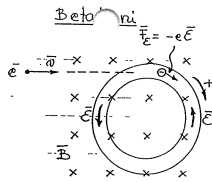
Mutta myös,

röntgen tutk. saatava annos riippuu potilaan tukevuudesta, rakenteesta & tutk. yksiköstä

⇒ erot 10 - 100 kertaisia!

Sädehoito ^{syöpäkasvaimen} suunnatulla säde kimpulla:

- Esim.
- Kobolttikanuuna: ^{60}Co γ -säteilyä
 - Betatroni β -säteilyä
 - Pieni voimakas säteilylähte kehon sisään joksikin aikaa



Betatroni on hiukkaskiihtytin, jossa käytetään hyväksi indusoituvaa SMV:ää.

Oltava lasiputki, joka on $\perp \vec{B}$.

Korkeajännitteellä (esim. 50000V) kiihdytetyt elektronit ohjataan lasiputkeen \Rightarrow ympyräradalle.

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Elektronisuihku void.

käsitellä suljetuksi virtapiiriksi \rightarrow jos sen läpi menevää magn.vuota kasvatetaan \rightarrow syntyy läisä-SMV:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} : \Delta B > 0 \rightarrow \Delta \Phi > 0 \rightarrow E < 0$$

ts. indusoituu rengasmainen sähkökenttä $\vec{E} \rightarrow \vec{F}_e = q\vec{E} = -e\vec{E}$

\uparrow ts. elektronien nopeus kasvaa

Vuon muutos valitaan sellaiseksi, että radalla pysyy vakiosäde.

$$B : 0 \rightarrow B_{max}$$

ts. r:n kaavassa pidetään $\frac{v}{B}$ vakiona!

Sitten menentämällä äkillisesti magn.kenttää, voidaan elektronisuihku poikkeuttaa pois radaltaan.

Elektronit saavat erittäin suuren nopeuden ja suuren liike-energian (klass. kaava: $v = \sqrt{\frac{2Ue}{m}}$ ei päde enää).

Esim.

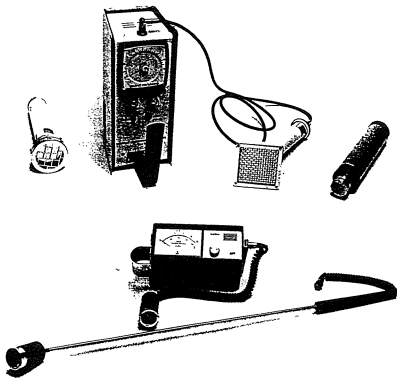
$$\begin{cases} \Delta E = +400V / \text{kiertos} \\ 250000 \text{ kiertosta} \times 400V \rightarrow 100 \times 10^6 eV \end{cases}$$

Sovelluksia: sädehoito, fyysikan tutkimus, etc.

9. Säteilysuojelu

213

Kuva: Pentasaastutuksen tarkkailumittareista Yhdistyneillä tuotelaskun, alhalla geigerlaskun.

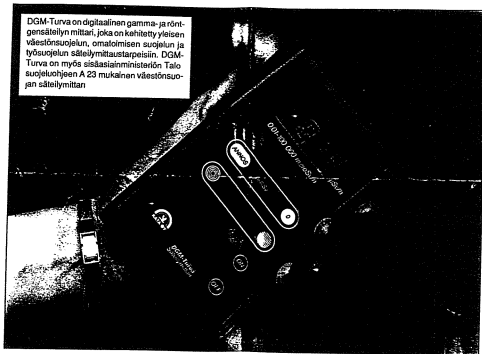


SÄTEILYMITTARI DGM-TURVA



MONIPUOLINEN SÄTEILYMITTARI JOKA
MITTAA AUTOMAATTISESTI JA LUOTETTAVASTI
SÄTEILYN ANNOSNOPEUDEN SEKÄ ANNOKSEN.

DGM-Turva on digitaalinen gamma- ja röntgensäteilyn mittari, joka on kehitetty yleisen väestönsuojelun, omatoimisen suojelun ja työsuojelun säteilymittaustarpeisiin. DGM-Turva on myös sisäasiainministeriön Talo suojeluohjelman A 23 mukainen väestönsuojan säteilymittari.



Helppokäyttöinen

DGM-Turva on pieni, kevyt ja helpposi mukana kannettava säteilymittari. Se mittaa automaattisesti sekä säteilyn annosnopeutta että kertuvaa annosta. Yksinkertaiset näppäinohjaimet ja iso digitaalinen numeronäyttö tekevät siitä helppokäyttöisen kaikissa olosuhteissa. Yksityökohtainen käyttöohje opastaa säteilymittaukseen eri mittaustilanteissa.

Luotettava

DGM-Turva edustaa alansa uusinta teknologiaa. Se on kehitetty tiiviissä yhteistyössä säteilyalan viranomaisen ja asiakkaiden kanssa vastaamaan vaativankin ammattilaiskäyttäjän tarpeita. Sen luotettavuus ja kestävyys on testattu Säteilyturvakeskukseen ja VTT:llä (VTT:n lausunto T/EL 9131, saatavissa valmiisista). Sen on sisäasiainministeriön hyväksymä väestönsuojelu käyttöön ja se täyttää Säteilyturvakeskukseen vaatimukset STP-B09: "Säteilymittarit säteilyvalvontaa, väestönsuojeluun: otteita ja omatoimista suojelua varten", jotka perustuvat kansalliseen IEC 949 standardiin.

Monipuolinen

DGM-Turva säteilymittari kattaa monipuolisesti säteilynsuojelun eri mittaustarpeet: laustasäteilyn valvontamittaukset, ympäristön kartioiden ja tiedustelumittaukset, elintarvikkeiden gamma-mittaukset sekä oman annoksen seurannan. Automaattisten perustointojensa lisäksi siinä on pikamittaus säteilylähdelteen rosoaan pakkaamisen ja tarkkuusmittaus mm. tarkkoihin tilastusäteilyn kartiomittauksiin ja elintarvikkeiden gamma-säteilyn sekä veden radonsäteilyn mittauksiin.

Isäkei käyttäjä voi itse asettaa hälytysrajat sekä annosnopeudelle että kertuvälle annokselle. Monipuolisen toimintonsa ja laajan mittausalueensa, 0,01 — 100.000 mikroSv/h, ansiosta mittari soveltuu erinomaisesti paitsi viranomaiskäyttöön, myös teollisuuteen, koulutus- ja opetuskäyttöön sekä helppokäyttöisyytensä ansiosta myös henkilökohtaiseksi säteilymittaukseen.

Radioaktiivista säteilyä ei voida aistein havaita, mutta sen olemassaolo voidaan todeta mittalaitteilla. Säteilyvaarallisuuden aikana on noudatettava viranomaisten antamia ohjeita ja pysyttävä sisätiloissa välttyäkseen säteilyn vaaroilta.

Säteilyn mittayksiköt

Aktiivisuus

Yksikkö: Becquerel (Bq)
Aktiivisuus ilmoittaa kuinka monta atomiytimen hajoamista aineessa tapahtuu sekunnin aikana.

Säteilyn annosnopeus

Säteilyn voimakkuus tarkoittaa aikayksikössä saatavaa säteilyannosmäärää.

Yksikkö: Sievert/tunti (Sv/h)
Annosnopeus saadaan jakamalla säteilyannos sillä ajalla, jonka henkilö on ollut radioaktiivisella säteilyllä alttiina

Radioaktiivisen säteilyn arvoja ja vaikutuksia

Olemme jatkuvasti alttiina säteilylle. Radioaktiivisia aineita esiintyy aina pieniä määriä ympäristössä. Yli puolet suomalaisten saamasta säteilystä aiheutuu maaperän radonista. Muita säteilyn lähteitä ovat avaruuden säteily, luonnon taustasäteily ja kehon oma luonnollinen radioaktiivisuus. Säteilyä saadaan myös mm. röntgentutkimuksista.

n. 0,12	µSv/h	Taustasäteilyn keskimääräinen arvo
4000-6000	µSv/h	Suomalaisen saama keskimääräinen säteilyannos vuodessa
0,7	µSv/h	Viranomaisten hehottettu toiminta aika

n. 4-keräinen normaaliin taustasäteilyyn verrattuna

100	µSv/h	Yleisölle annetaan säteilyvaroitus säteilytason noususta
1000	µSv/h	Väestölle annetaan säteilyhälytys (=yleinen hälytysmerkki) radlossa, TV:ssä, liikkuvilla kaitulinnoilla tm. keinoin.

Säteilyannos

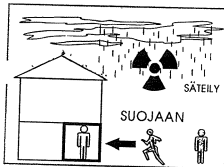
Yksikkö: Sievert (Sv)
Säteilyannos kuvaa säteilyn vaikutusta. Kun tietty määrä säteilyä on vaikuttanut esimerkiksi ihmiseen, puhutaan säteilyannoksesta, jonka ihmisen on saanut. Koska Sievert on erittäin suuri yksikkö puhutaankin yleensä milli- (mSv) tai mikro (µSv) sieverteistä.

Suojautuminen vähentää ihmisen kohdistuvaa säteilyä ja estää radioaktiivisten aineiden joutumista elimistöön. Oikealla suojautumisella säteilyn terveyshaittoja voi ratkaisevasti pienentää. Suojautumista tarvitaan vain, jos säteily lisääntynyt huomattavasti

Säteilyä on sitä paremmin suojassa, mitä enemmän ympärillä on rakennuksen seinä. Kellarikerros ja rakennuksen keskiosat ovat hyviä suojapaikkoja ulkoiselta säteilyltä. Jos käytettävissä on toimintavalmis väestönsuoja, se tarjoaa parhaan suojan.

Sulkemalla ikkunat ja ovet vähennetään merkittävästi radioaktiivisten aineiden pääsyä sisätiloihin. Myös tuuletusaukot ja ilmastointi suljetaan.

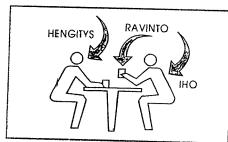
Ulkoiselta säteilyltä suojautuminen



Sisäiseltä säteilyltä suojautuminen

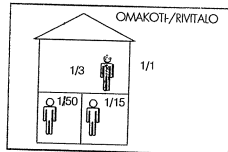
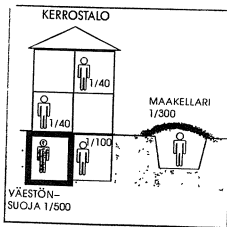
Pyrittävä estämään radioaktiivisten aineiden pääsy elimistöön

- Huolehdi hengitysilman puhtaudesta Käytä hengitysuojainta ollessat ulkona
- Estä laskeutumapölyn pääsy iholle
- Suojaa elintarvikkeet ja vesit laskeutumapölyltä
- Pakkaa ruokatarvikkeet muovipusseihin tai tiivisiin astioihin



Rakenteiden antama suoja säteilyä vastaan

Suojakerroksella kellariva, säteilyn ollessa ulkona 1/1



Parannettu kellarisuoja
Hiikkakerros 15-20 cm
maa- tai kumiväli
Suojasto 1/50
Kellarisuoja
Suojasto 1/15

JODITABLETTI

Kaliumjodidia (KI) käytetään suojaamaan kilpirauhasta radioaktiiviselta jodilta. Suomessa on varastoitu joditabletteja (200 mg) ydinvoimalaitoksiin, niiden lähikuntien terveyskeskuksiin ja Helsingin yliopistolliseen keskussairaalaan. Lisäksi kuka tahansa ihminen voi ostaa apteekista kymmenen tabletin pakkauksen ilman reseptiä. Stabiiliin jodin suojaava vaikutus perustuu siihen, että se laimentaa jodin ominaisaktiivisuuden verenkierrossa. Kilpirauhanen voi ottaa vain tietyn määrän jodia, joten ylimääräisen stabiilin jodin takia radioaktiivisen jodin otto pienenee. Verestä epäorgaaninen jodi erittyy virtsarakkoon.

Joditabletin suojauskerroin J_s määritellään pienentyneenä suhteellisenä annoksena seuraavasti:

$$J_s = \frac{\bar{A}_{KI} S}{\bar{A} S} = \tau_{KI} / \tau. \quad (9.17)$$

Suojauserrointa laskettaessa on tiedettävä ainoastaan kilpirauhasen aika-aktiivisuuskäyrät.

TAULUKKO Joditabletin kilpirauhasta suojaavan vaikutuksen analyysi. (a) Hengityksen kautta saadun ^{131}I :n vapaan kinetiikan simulointi, (b) 50 mg kaliumjodidia annettu puoli tuntia altistuksen jälkeen.

Viipymäaika (h)	(a)	(b)	suhde (b/a)
kilpirauhanen	63.7	3.9	0.06
veri (epäorg.)	9.1	11.8	1.30
veri (org.)	2.4	0.1	0.06
virtsarakko	1.9	2.5	1.29
keuhkot	0.2	0.2	1
koko keho	77.2	18.5	0.24

Säteilyannos (mGy/MBq)			
kilpirauhanen	374	23.1	0.06
virtsarakko	0.65	0.83	1.29
veri	0.33	0.28	0.86
kateenkorva	0.23	0.03	0.13
keuhkot	0.08	0.04	0.44
luuydin	0.06	0.02	0.36
luusto	0.05	0.02	0.34
munasarjat	0.03	0.03	1.11
kivekset	0.02	0.02	1.12
efektiivinen annosekvivalentti (mSv/MBq)	11.3	0.78	0.07