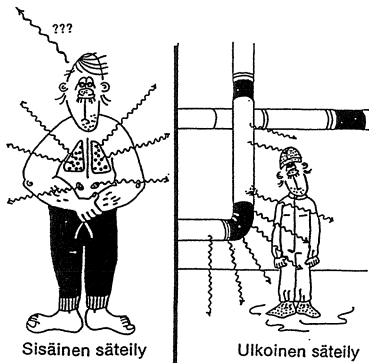


Arto Passoja:

190305 5 op

SÄTEILYFYSIIKKA

LUENTORUNKOMONISTE



* 79 *

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 Bquerel
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

Huom.

Esim.

Bq on pieni yksikkö.

Jokaistm 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 50000-250000 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.
(→ ~10000 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

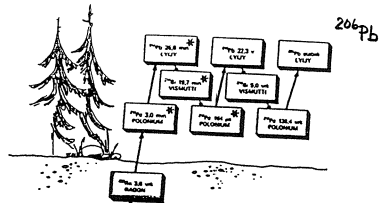
Huom.

Uraanisarjassa:

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

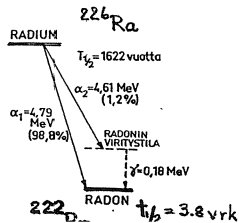
↳ voi kulkeutua syvältä maan sisältä maan pinnalle (jos maa on huokoista!)

Hajoamisketjut



^{238}U

Kuva 1.8. Uraanisarja.





Kuv. Raskas ydin fissioitu...

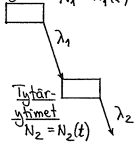
↳ fissio tuotteet neutronirikkaita ytimiä
 β^- -haj. ketjun kautta → stab. ytimiksi

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.

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

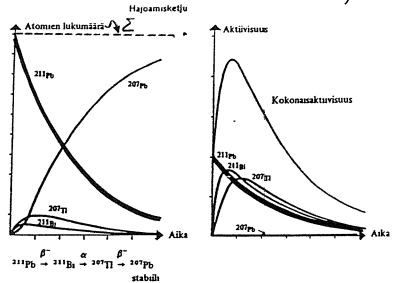
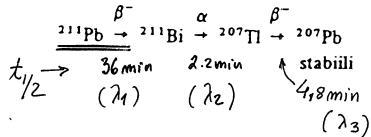
↳ ääritapaukset: a) $t_{1/2}(2) \ll t_{1/2}(1)$

tytär hajoaa \approx emon puoliintumisaikaa noudattaen

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

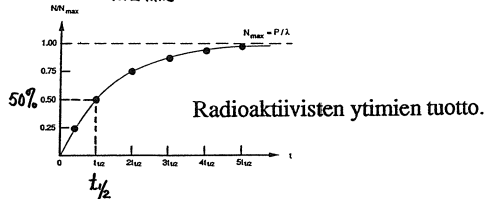
hajoamiset \approx riippumattomia

(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 hiukkaskiihtytimestä soadilla suihkulla
tai
asettamalla näyte reaktorin neutronivirran:

jos suihkun virta tai neutronivirta = 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!

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

mukaisesti,

ja tuotettu aktiivisuus on:

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

Huom

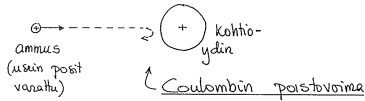
Saturaatioarvoista (= max. arvoista)

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

\hookrightarrow (Kävi edell. sivulla)

1.4. YDINREAKTIOT

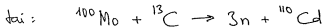
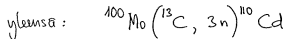
(Esim. kiihdytetystä saataavan hiukkassuihkun avulla) (37)



jos ammus pääsee ydinvoiman kantaman alueella, niin → nukleonijoukko järjestyy uudelleen.

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

Reaktiota merkitään



Reaktiotyyppejä:

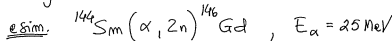
1) Sironna

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

Huom ($m_n \sim m_p$) neutronin sironna protonista → tärkeä prosessi neutroneja hidastettaessa

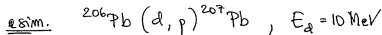
Kimmoiton ⇒ yleensä kohtioydin viritetty (neutroni voi menettää ~ koko liike-energiansa)

2) Välyreaktio



muodostavat välyytimen, joka elää suht. kauan
 ennenkuin sitä höyrystyy muuttamaan neutroni

3) Siirtoreaktiot

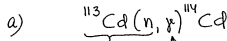


- muorovaikutusaika lyhyt
- ei muodosta välyytintä
- kohtioydin sieppaa ammukselta yhden tai useampia nukleoneja: STRIPPING; (d,p), etc.
- luovuttaa ammukselle yhden tai useampia nukleoneja: PICK-UP; (p,d), etc.

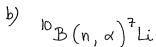
4) Neutronisieppaus

↳ ei varausta, ei Coulombin välttä

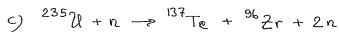
jos ytimen B_n (= neutronisidosenergia) > 0, niin se voi sieppata neutronin & neutronin sidosenergia vapautuu:



^{114}Cd , jonka viritys-energia = reaktiossa vapautunut neutronin sidosenergia
 ko. viritys purkautuu gammaemission kautta.



↑ tai: hiukkasemission kautta



↑ tai: viritys ^{vai} aiheuttaa raskaiden ydinten tapauksessa Fission!

39

Neutronin sieppaus todennäköisyys

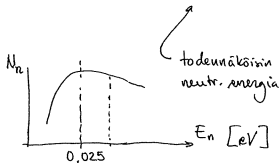
$P_n \propto \frac{1}{\sqrt{E_n}}$ (ts. P_n on suuri hitailta neutroneilla)

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

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

$E_n = \frac{3}{2} \times 8.6174 \times 10^{-5} \times 300 \text{ eV} = 0.039 \text{ eV}$

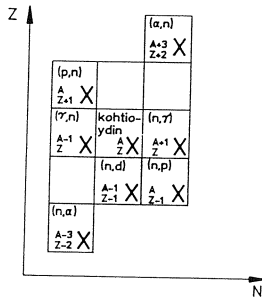
(Vrt. moniste: 0.025 eV)



40

Ydinreaktiot

↳ saadaan aikaan esim. pommittamalla kohtiontimia kiihdyttimestä soatavalla hiukkassuutella.

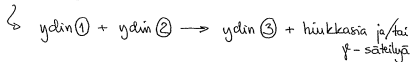


↳ palataan myöhemmin asiaan...

Jatkupäivi: (YDINREAKTIOT)

41

5) FUSIO



- keveiden ydinten fuusiossa vapautuva sidosenergia nukleonia kohden on suurin

- ytimien varaus positiivinen \rightarrow Coulombin valli

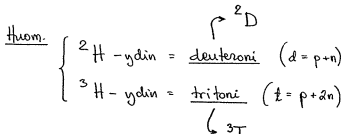
\hookrightarrow tarvitaan: "korkea energia" E
tai
lämpötilasta T puhuttaessa:

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

\hookrightarrow puhutaankin: LÄMPÖYDINREAKTIO

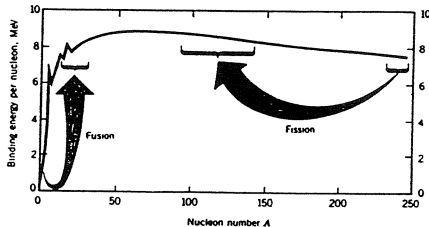
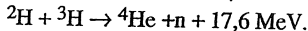
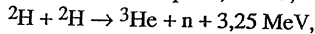
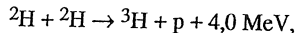
Keveiden ytimien fuusio on tärkeä prosessi

- tähtien energiantuotannossa
 - alkaneiden synnyssä
- } ≈ 2



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:

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

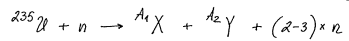
esim. $E_n = \frac{3}{2} \times 8,62 \times 10^{-5} \frac{eV}{K} \times 300 K = 0,04 eV$

Energiaspektrin max.

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

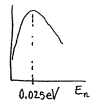
se nautta nopeutta 2200 m/s.

Fissio:



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

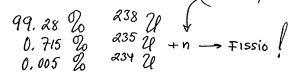
keskiraskailta ytimillä sidosenergia/nukleoni on n. 8,4 MeV



Joten fissionissa vapautuva kokonaisenergia on likimäärin:

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

Luonnonuraani:



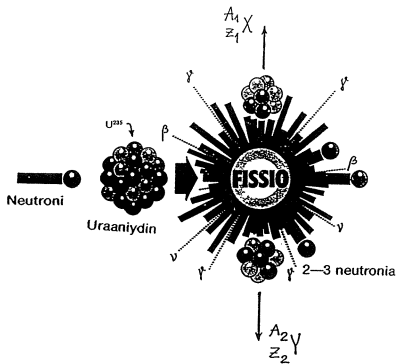
FISSIOREAKTORIN IDEA VALMIS:

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

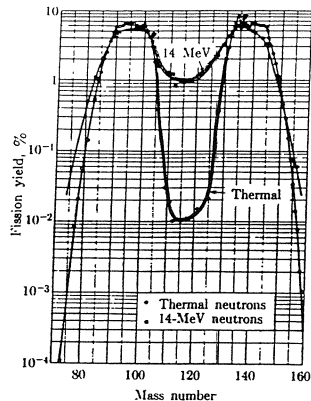
\rightarrow Lämmöksi

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 neutriinoiden 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 epäsymmetrinen & riippuu ammuksen energialta. \rightarrow Kuv. 1.12.

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

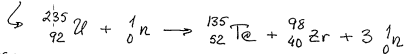
On tunnistettu yli 60 erilaista p-
määristä fissiotuotetta.

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.
 - Niiden energia muuttuu termiseksi tyypillisesti muutaman mikrometrin alueella fission tapahtumapaikasta.
- (Vrt. kemiall. reaktiossa vap. $\sim 3 \cdot 10^{-19}$ eV/atomi) \leftarrow fission ~ 200 MeV/atomi

Huom.

fission tuotteiden haj. ketjuun voi liittyä

ns. viivästyneiden neutronien emissio.

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

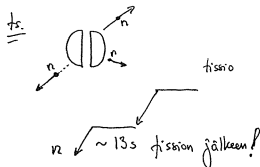
MUTTA:

niiden merkitys ydinreaktoreiden toiminnassa on ratkaisevan tärkeä!

ts.

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

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



Reaktion vaikutusala = σ

σ = reaktion todennäköisyyden mitta

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

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



F_i → Ammukkeen osuessa kohtioon on reaktion tapahtumata todennäköisyys:

$P_r = \sigma n_t x$ kohtion paksuus
 kohtioytimen määrä tilavuusyksikössä
 [$\frac{\text{kp}}{\text{cm}^3}$]

Merk.

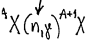
$\sigma n_t = \Sigma$ = makroskooppinen vaikutusala

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

σ : siirtoreaktioille ~ nanobarn = 10^{-9} barn
 neutronisieppaus ~ 10^5 barn
 Vrt. ytimen pinta-ala $(A \cdot 10^{-10})^2$
 neutro. sieppaus $\sim \pi (10^{-14})^2 \approx 3 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2 = 3 \text{ barn}$

Esim.

ydinreaktorissa tietty neutronivuo ϕ [$\frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$] = 3 barn
 neutronisieppauksen vaik. ala = σ [cm^2]
 säteilytetäviä ytimien lukum. tiheys = n_t [$\frac{\text{kp}}{\text{cm}^3}$]
 $\phi n_t \sigma$ = muodostuneiden $A+1$ ydinten lukumäärä sekunnissa ja 1 cm^3 :ssä



1.5. Röntgensäteily

gammasäteily = sähkömagn. säteilyä; peräisin atomin ytimestä

röntgensäteily = " " ; seurausta atomin elektroniverhon virityksen purkautumisesta

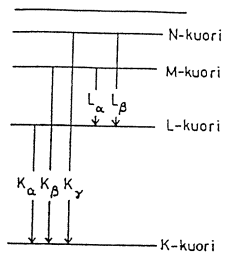
$E_{\text{rtg}}: 1 - 100 \text{ keV} = h \frac{c}{\lambda}$

Karakteristinen röntgensäteily

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

$f_s: 1.00 \rightarrow 0.01 \text{ nm}$

a) Karakteristisen röntgensäteilyn spektri on diskreetti



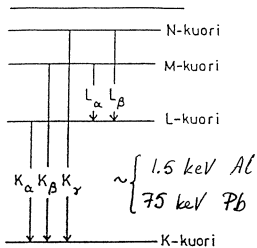
voimakkaimpia pikkejä ovat K-piikit:
 ts. kun ulomman elektronin kuoren elektroni täyttää K-kuoren aukon.

(ks. kuva 1.13.)

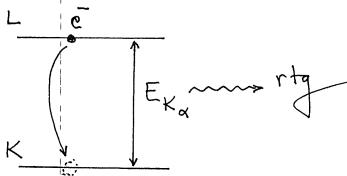
Energiat K-piikeillä:

- Al ~ 1.5 keV
- ⋮
- Pb ~ 75 keV

Kuva 1.13. Yleisimmät röntgensäsiirtymät.



Kuva 1.13. Yleisimmät röntgensiiirtymät.



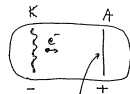
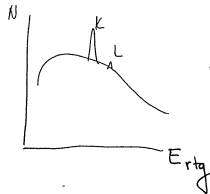
Karakteristista rtg-säteilyä havaitaan niissä prosesseissa, joissa syntyy K-aukkoja:

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

b) Jarrutussäteily (röntgenputkea käytettäessä)

- katodista irronneet elektronit kiihdytetään suurjännitteen avulla
- elektronien osessa \oplus anodiin:

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



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

2. Ydinenergia energialähteenä

2.1. Fuusio energialähteenä

keveiden 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.

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

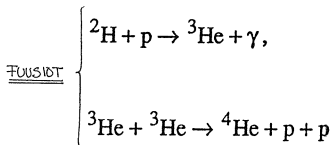
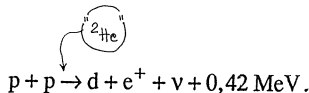
$$\approx 80 \times 10^6 \text{ K}$$

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

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

AURINGON ENERGIANTUOTTO

PROTONIKIERTO



\hookrightarrow Energiaa vap. 26.7 MeV.

\hookrightarrow 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 ...

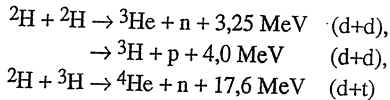
↳ He-kierto mahdollinen,

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)

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

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

FUUSIOTUTKIMUS JET-KOELAITOKSELLE

Samaan aikaan vuonna 1989 fyysikoita hämmentäneiden kylmäfuusioitusten kanssa raportoitiin todellisesta edistyksestä fuusioenergian toteuttamiseksi perinteisellä lämpödynfuusioon perustuvalla menetelmällä. Maa-ilman suurimmalla, Englannissa sijaitsevalla Euratomin JET-tokamakilla osoitettiin syyskuussa 1989 fuusion tieteellinen toteutettavuus ja astuttiin askel lähemmäksi kooreaktorien rakentamispäätöstä.

Tokamakissa toruksen muotoinen plasma pidetään koossa voimakkailla magneetikentillä, jotka saadaan aikaan ulkoisilla käämeillä sekä kierrättämällä induktioperiaatteella suurta virtaa plasmassa. Tokamakissa plasmaa pystytään ylläpitämään huomattavasti kauemmin ja plasman lämpötila nostettiin merkittävästi korkeammaksi kuin muilla laitteilla.

Fuusiotulo on plasman ionitiheyden n_i (ionien lukumäärä tilavuusyksikössä), ionilämpötilan T_i ja energian koossapitoajan τ_E tulo ja se mitataan parhaiten plasman koossapidon hyvyttä. Energian koossapitoaika plasmassa on luonnostaan rajoitettu (noin sekunti nykyisissä koelaitteissa) suurten lämpötilagradienttien aiheuttaman diffuusion takia ja sen lyhyys on toistaiseksi ollut suurin este fuusion toteutumiselle. Ensimmäisen sukupolven fuusioereaktoreissa tehoa tuluaan tuottaamaan reaktioon

$$D + T \rightarrow \text{He}^4 + n + 17.6\text{MeV}$$

kautta, jossa plasmaan jäävän alfapartikkelin energian (3.52 MeV) lisäksi saadaan energiaa 14.06 MeV neutronista, jonka annetaan hidastua plasmaa ympäröivässä, lämmönsiirtoon ja tritiumin hyötyn tarkoitettussa vai-passa. DT-reaktorissa fuusiotulolta edellytetään arvoa $5 \times 10^{21}\text{m}^{-3}\text{skeV}$, jolloin alfapartikkeleilta plasmaan ab-

sorboitua energia riittää kompensoimaan plasman energiahäviöt (diffuusio ja säteily) ja plasma ns. syytty.

Parhaat tulokset on saavutettu Euratomin JET-tokamakilla (Joint European Torus) ja Yhdysvaltain TFTR-tokamakilla (Tokamak Fusion Test Reactor), joissa korkeat yli 100 miljoonan asteen (10–35 keV) lämpötilat on saavutettu rutiininomaisesti. JET:n pääosat ovat tyhjiökammio, joka pitää sisällään plasman eristään sen ilmakehästä, toroidaalikentäkelat, poloidaalikentäkelat ja muunta-ja.

JET:n Plasman poikkileikkauksen säde a horisontaalisuunnassa on 1.2 m ja vertikaalisuunnassa 2.1 m (poikkileikkaus on D-muotoinen) keskipisteen etäisyyden R laitteen keskustasta ollessa 2.96 m. Laitetta ajetaan 20 s pulseissa muuntajan rajallisen volt-tisekuntien määrän (34 Vs) takia. Laitteen suuren koon ansiosta energiahäviöt ovat pienet ja fuusiotulo siten suuri. Paras tulos $n_i T_i \tau_E = 8 \times 10^{20}\text{m}^{-3}\text{skeV}$ saavutettiin JET:lla syyskuussa 1989 deuteriumplasmalla. Jos kokeissa olisi käytetty deuteriumtritiumplasmaa, yh 80 % käytetystä plasman kuumennustehosta olisi saatu takaisin fuusioneutronien energian muodossa. Tilannetta, jossa fuusiotehon suhde kuumennustehoon eli ns. Q-arvo on yksi ja joka siis nyt käytännössä saavutettiin JET-tokamakis-

sa, on pidetty fuusion tieteellisen toteutettavuuden määritelmänä.

Plasman magnetohydrodynaaminen (MHD) stabiilisuus edellyttää, että plasmapaine $2n_i T_i$ täyttyä ehdon

$$2n_i T_i \leq \beta B^2 / 2\mu_0 \quad (2)$$

jossa B on koossapitavan magneettikentän vuontiheys ja μ_0 vakuumin permeabiliteetti. β :lle on kokeellisesti löydetty skaalaus

$$\beta = C_T I(MA) / [a(m)B(T)] \quad (3)$$

jossa $C_T = 0.03 - 0.045$ on ns. Troyonin kerroin. Ehto (2) estää fuusiotulon kasvattamisen yksinomaan ionitihyettä lisäämällä, mikä sinänsä saattaisi olla helppoa. Tosiasiassa nykyisissä tokamakissa tiheyttä ei ole voitu nostaa ehdon (2) asettamaan rajan suurilla magneettikentän B arvoilla (3–5 T). Tämä johtuu plasman termisestä epastabiilisuudesta, joka aiheutuu kasvaneista säteilyhäviöistä suurella elektronitihyellä epäpuhtaassa plasmassa.

JET-tokamakkin paras tulos saavutettiin sen jälkeen, kun keuhon seinämäpinnat peitettiin berylliummetallilla. Berylliumin varausluku on pienempi kuin aikaisemmin käytetyillä grafiitilla ja sillä on myös kyky sitoa happa, joka on eräs tyypillisiä plasman epäpuhtauksia. Berylliumin ansiosta plasman happi- ja hiilipääpuhtauskonsentraatio putosivat yli dekadilla ja ionitiheys kaksinkertaistui. Saavutettu tulos osoittaa, että plasman kuumentamiseen ja koossapitoon liittyvät ongelmat on nyt ratkaistut kuten JET-projektin johtaja P-H Rebut asian ilmaisi. Tulosten mukaan fuusiotulo skaalautuu puhtaassa plasmassa kuten $C_T I^2 R^{1/2} B$. Koska plasmavirtalla I on ylaraja, joka koetulosten mukaan skaalautuu kuten $a^{2B/R}$, fuusiotulo kasvaa tokamakkin kokoa ja plasmavirtaa suurennettaessa (toroi-

JET:n paaparametrit

plasman säde (horisontaalinen), a	1.25 m
plasman säde (vertikaalinen), b	2.10 m
toruksen säde, R	2.96 m
plasmapurkauksen kesto	20s
toroidaalinen magneetikenttä, B	3.45T
plasmavirta, I	7MA
kuumennusteho	40MW
ionitiheys, n_i	$10^{19} - 10^{20}\text{m}^{-3}$
ionilämpötila, T_i	3–30keV
energian koossapitoaika, τ_E	0.3–1.6s

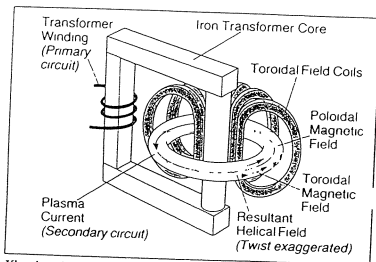
daalikenttä B on teknistä syistä rajoitettu arvoihin 4–5 T)

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.

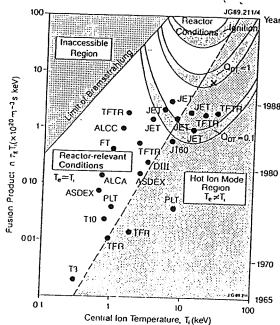
Suurvalloilla omat suunnitelmansa

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:lla 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

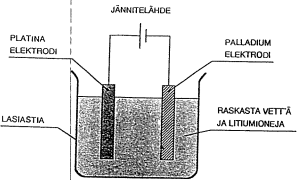
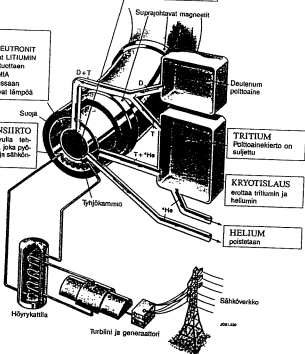
M. Keilhacker et al., Overview of JET results using a beryllium first wall, Bull. Am Phys. Soc 34 (1989) 9, s 1912.

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

PLASMA
Fuusioenergiaa NEUTRONIN 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 avulla teh-
dään höyryä, jota pyö-
rittää turbiinina sähkö-
tuotossa



Kylmäfuusiokokeissa käytetyt elektroylläritteen kaavakuva. Raskaassa vedessä oleva deuterium kulketaan 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 ydinmalleja

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. professori Rainer Salomaaan opetusalan ovat teknillinen fyysikka (ydin- ja energiatekniikka) Teknillisessä korkeakoulussa, teknillisen fyysikan laitoksella, ydin- ja energiatekniikan laboratoriossa. Salomaa 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 tutkimusalaan on ydinfyysikan tutkimus hiukkaskihtiymien avulla ja erityisesti kaukana beetaetasuuden alueesta olevien eksotisten ymiäen ja radioaktiivisuuksien tutkimus

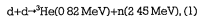
Fuusiotutkimus on perinteisesti kohdistunut "kuumaan" fuusioon. Tätä suuntausta edustaa niin plasman kahteleminen Tokamak-laitteissa kuin myös suurteholasereilla tehtävä tutkimus "Kylmä" fuusio on entuudestaan tunnettu ns. myönten katalysoimasta fuusiosta¹. Viime viikkojen tuloksien^{2,3} mukaan kylmä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

Kohu-uutiset ovat jakaneet fyysikan tutkijat "uskovaisiin" ja niihin, jotka suhtautuvat "ateistiseen" miittaukseen 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.

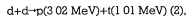
Ydinten fuusio on verrannollinen todennäköisyyteen sille, että kaksi ydintä esiintyy samassa paikassa. Vedyn raskaassa isotoopissa, deuteriumissa (molekyylimuodossa D₂), missä ytimien (d) välinen tasapainoetasuus on 0.74 Ångströmiä, on d-d fuusioopeus D₂-molekyylillä Kohin van suuruisuutta 10¹⁹ sekunnissa. 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 titään- ja palladiumelektrodissa. On havaittu seuraava ydinreaktio (d on deuteroni ja n neutroni):

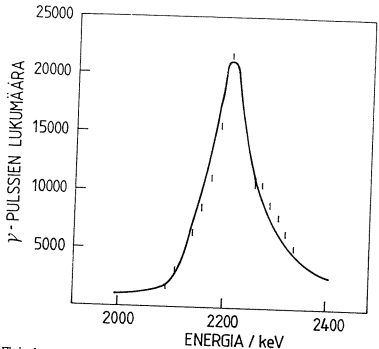


jossa kaksi deuteronia fuusioituu muodostaen heliumin kevyen isotoopin (³He) ytimen sekä neutronin. Neutronien tuotto on havaittu herkillä neutronispektrometrilla. Tuloksia toisesta mahdollisesta ydinfuusiokanavasta ei ole (p on protoni ja t tritium).



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

Huomattakoon, että Fleischmann ja Pons puolestaan ovat tietävästi rapor-

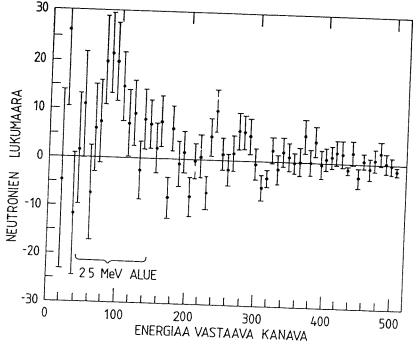


Fleischmannin ja Ponsin² mittaama elektrolyysiprosessissa syntyvien gammasäteiden spektri.

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

esitetty neutronien nettotuotto puuttuu 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 tasavirtajännitettä 3-25 volttia, joka ai-



Jonesin ryhmän³ mittaama kylmäfuusioprosessien aiheuttama neutronien nettotuotto

heutti 10-500 miljampeerin sähkövirran. Materiaaleja ja olosuhteita ei suunkaan ole tarkkaan optimoitu. Mahdollisesti myös muut neljännes sivuryhman metalleista titaanin lisäksi, zirkoniumin ja hafniumin, tulisivat kysymykseen; palladiumin lisäksi rutenium ja rodium ovat kevyitä platinametalleja. Raskaana platinametalleina osiumin ja iridiumin voisivat platinan ohella toimia aktiivisina kylmäfuusion katalyysaattoreina. Vedyn isotooppien liike metalleissa on oleellisesti kvanttifysiikan lakien hallitsema ilmiö.

Havaittu kunteen aineen katalysoima kylmäfuusioprosessi on arviolta suuruusluokkaa 10^{20} fuusiota deuteroniparalle kohti sekunnissa. Tämä on saavutettavissa "pustamalla" deuteronit puoleen tasapainoetäisyydestään molekyyli muodossa. Saavutettu fuusioprosessin voimavarojen kasvu ehdottaa tunnetun pienten sähkölaitteiden kanssa analoogisen ns. pietsoidin fuusion⁴ havaitsemisen eräänä mahdollisuutena selityksenä. Mainitut pienet fuusioprosessit selittävät joukon sängin mielenkiintoisia planeetaarisia lampöilmiöitä, mutta ne eivät anna aiheutta uskoa siihen ylitoimituksiin fuusioprosessin tuottamasta, johon Fleischmannin ja Ponsin julkastamat ensi tulokset ovat johtaneet.

Tuntuu hämmästyttävältä, että fuusion nopeuteen ("ydinkemiaan") pysyvyyteen vaikuttamaan sellaisia ulkoisilla muuttujilla kuten paineella, lämpötilalla ja sähkömagneettisilla kentillä. Tämä pätee kuitenkin myöskin katalysoimassa kylmässä ydinfuusiossa. Kylmäfuusion kiinteässä aineessa⁵ todistaa monipuolisen ja poikkeittomaisen fyysikan akateemisen perustutkimustoumman hyödyllisyyttä, jonka ansiosta on löytynyt mielenkiintoisia materiaalfysiikan kannalta erittäin haastavaa uusi lahestymistä fuusioprosessin 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 kerralukuja 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

Fuusioenergioiden 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 viivassuunnin tämä voidaan tehdä kuumentamalla polttoaine nün korkeaan lämpötilaan, että hukkasten termien energia riittää Coulombin vallin ylittämiseen. Lisäksi nettoenergian tuottamiseen edellyttää polttoameen pitämistä koossa nün kauan, että fuusioenergiä 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 t tulo on tuikeä ylittää tietty lämpötilasta riippuva arvo. Tässä mielessä helpoin on DT-reaktio, jolle $Nt > 10^{20} m^{-3} s$ lämpötilassa 10 keV (n. 10⁸ K).

Pelkätetysti 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 tekijan 3 päässä. Tulokset on saatu suunnilla (okamakkeilla) JET (Joint European Torus, Culham) ja JT-6U (Tokamak Fusion Test Reactor, Princeton)

Kylmäfuusio Myonikatalysoitu fuusio

Kevyiden ytimen fuusioituminen ei välttämättä edellytä miljoonien asteiden lämpötilää. Tämä on kustaatta osoitettu nk myonikatalysoidussa fuusiossa Teoreettisesti myonikatalysoituminen ennustav F.C. Frank ja A.D. Jarov 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 huokkaskehäydymällä Myonin muodostav deuterium ja tritium ytimen kanssa mesootomeja D_μ ja T_μ sekä edelleen mesomolekyylejä T_μD⁺. Myonin suuresta massasta (106 MeV) johuttav deuterium ja tritium ytimet joutuvat mesomolekyylin muodostuessa niin 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 μs elinaikanaan Myonin kustannuksiksi voidaan karkeasti arvioida 10

W, mikä merkitsee, että nettoenergian tuottaminen myonikatalyysillä on ainakin periaatteessa mahdollista. Väkempänä ongelmana on myonin tarkentuminen DT-fuusiosta syntyvän He⁺-ytimen seuralaseksi, jonka jälkeen myonin vapautuminen loppuelinäkanaan on epätodennäköistä. He-tarkentuminen todennäköisyydeksi on saatu kokeellisesti 0,5 % Tämä merkitsee keskimäärän 200 fuusiota myonia kohden (3 S 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

Sähkökemiallisesti indusoitu fuusio kiinteässä aineessa

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

maa hyvin yksinkertaisella elektrolyysi-laitteistolla [1] Se muodostuu palladium-katodista ja sitä ympäröivästä plattina-anodista Katodin geometriaa vaihdeltun (sauva, levy ja kuutio) Luokseena on raskas vesi D₂O ja litium-hydroksidi LiOD. Elektrolyysi on standardimenetelmä pyritessä suurin vetytittu-suukuun metallissa Kyseessä kokeessa Pd-katodin deuterium-pitoisuudeksi arvioidaan 0,5-1 D/Pd, mikä vastaa hyvin suurta deuteriumin theytta n 10²⁶cm³.

Kokeessa havaittu lämmontuotto palladium-katodissa rippuu voimakkaasti katodin geometriasta. Parhaat mitaustulokset saatu sauvakatodista (0,4x10 cm), jossa tehotehdydet ylittävät 10 W/cm² tason Lisäksi lämmontuotto kestää luokkaa 120 tuntia, joten energiantuotoksi saadaan noin 4 Mj/cm². Tämä vastaa 2,5 keV energiaa deuterium atomia kohden, jota on vaikea selittää kemiallisten prosessien kautta. Tämä on Fleischmann-Pons kokeen vahvin argumentti sille, että ilmiön takana on ydinreaktio.

Tekijät väittävät tuottavansa enemmän energiaa (lampöä) kuin elektrolyysin ylläpitämiseen kuluu (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 oletteen polttoaineeksi deuterium-tritium seos.

Fleischmann ja Pons ehdottavat lämmontuototekemiseksi DD-fuusioreaktiota. Fuusioitotena syntyvä 2.5 MeV:n neutroneja todellakin havaittu ja arvioitu neutronituotto Pd-katodissa (0.4x10 cm) oli noin 4x10⁴s⁻¹. Tritiumtuotto oli konsistentti neutronin kanssa olettaen sama todennäköisyys molemille DD-reaktion haaroille. Havaittuun fuusiotuotteiden perusteella arvioitu tehotehdy (DD-reaktio) on noin 5x10⁴W/cm², mikä on lahes kahdeksan kertalukua vähemmän kuin suoraan mittauksessa havaittiin Siten DD-fuusio ei voi selittää Fleischmann-Pons lämmontuottoa amakaan näiden tulosten valossa. Erääksi selitykseksi on tarjottu DL⁺-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 julkastamisen jälkeen tiedotti Steven Jonesin ryhmä (Brigham Young Yliopisto, Utah) omasta kokeestaan, joka oli hyvin samantapainen [2] Jonesin ryhmä on tehnyt aiemmin erittäin korkeatasoista työtä myonikatalysoitun fuusion alueella [3] Myös Jonesin ryh-

män koe perustu elektrolyysiin, jossa katodina käytettyn 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 tuusua eikä lämmontuottoa. Arvioitu fuusioopeus on luokkaa 10⁻³ fuusioita/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 fuusioopeus olla jottakin kertalukua yllämainittua suurempi. Jonesin kokeen fuusioilammun tehotehdydeksi saadaan hyvin vaatmaton arvo n. 10¹⁸W/cm². Kyseinen fuusiotuotto on fyysikaalisesti erittäin mielenkiintoinen, mutta energiantuottoosvelliutuksen kannalta toivoton alhainen. Spekulaatiivnen "raskas elektroni" metallialussa, jonka massa vastaa muutamaa elektronia, voisi selittää Jonesin ryhmän havaitseman DD-fuusionopeuden [2] (analogia myonikatalysoitun fuusion).

Tätä artikkelia kirjoitettaessa, ennen perusteellista teteellistä kritiikkää, 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

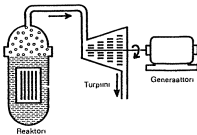
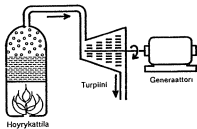
Käytössä olevien ydinvaimaloiden reaktorin sydämessä fissiona vapautunut energia muuntuu lämmöksi,

jota käytetään vesihöyryn muodostamiseen.

Tästä eteenpäin ydinvaimala toimii kuin muutkin voimalat:

höyry johdetaan turbiiniin, jotka pyörittävät sähkögeneraattoria ...

Ydinvaimalatokeksessa 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 kiehettään. Kummassakin tapauksessa höyry tämän jälkeen johdetaan korkean paineen alaisena turbiiniin, siivillä varustettuun pyörään, jonka voimakas höyrysuuhku saa pyörimään suurella nopeudella. Turbiini vuorostaan on suorassa yhteydessä generaattoriin, jota se pyörittää ja jossa lopputuote, sähkö, syntyy.



Mutta mitä 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)

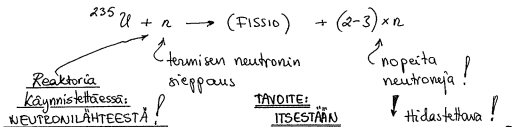
yleisin: ²³⁵U:n suhteen väkevöitetty uraanioksidiksi

rikastusaste 2-3%

(Luonnonuraani):

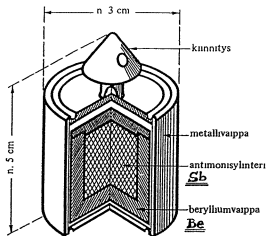
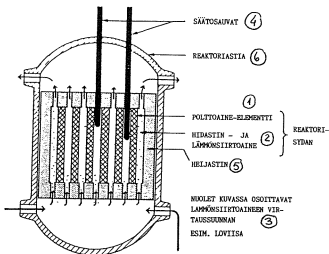
99.28 %	²³⁸ U
0.715 %	²³⁵ U
0.005 %	²³⁴ U

→ x 4



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

- esim.
- tavallinen vesi (H₂O) (nmsaasti protoneja!)
 - raskas vesi (D₂O)
 - grafiitti (¹²C)
 - 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

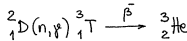
- hyvä hidastin, halpa
- absorptiovaikutusala melko suuri → maami-
polttainen oltava väkevoiteltu nä-
hintaan 2 % ²³⁵U:ia

• Raskas vesi

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

- toinen haitta: neutronisieppauksella muod. radio-aktiivista tritiumia

↳ β-hajoo; t_{1/2} = 12 vuotta



(t_{1/2} = 12 vuotta)

(12C)

(69)

• Grafiitti hidastimena

- jäähtyvä tavallisesti kaakua (hiilidioksidia tai heliiumia)
- 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 lähe-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 säteilynsuoja 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 $^9_4Be(\alpha, n)^8_4Be$ Neutronilähteen $t_{1/2} = 60$ 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
↳ neutronispektri

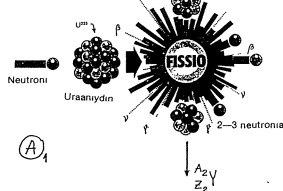
jossa havaitaan kolme aluetta:

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

Aikaskaalasta:

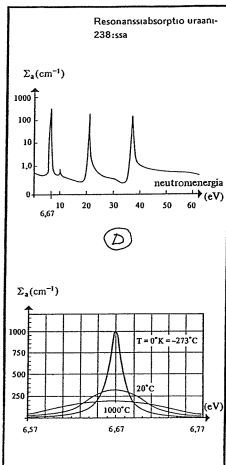
- ^{235}U :n neutronisieppaus → fissioni $\sim 10^{-13}$ s
- Nopeiden fissioni-neutronien hidastuminen termisiksi $\sim 10^{-5}$ s
- Terminen elinikä (ennen absorptiota tai vuotoa reaktorisydäimestä) $\sim 100 \mu\text{s} = 10^{-4}$ s
($= 10^{-3}$ s D_2O :ssa)

PISIN!
(Korkein P.)
max.

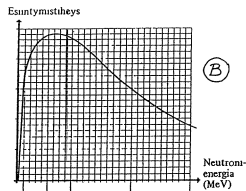


(A)₁

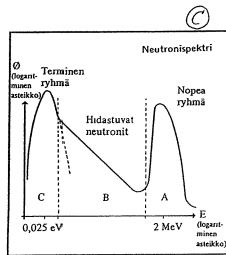
(72)



(D)

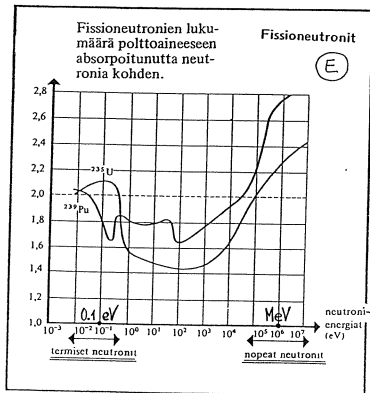


(B)



(C)

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



Nk. konversioprosessi

Tiettyillä termisten neutronien energioilla todennäköisyys ^{238}U :n neutronisieppaukselle on erittäin suuri

↳ nk. "resonanssiasorptio"

Kun reaktorin lämpötila kasvaa, niin ko. sieppausvaikutusala kasvaa!

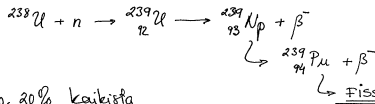
↳ Reaktori säätää siis itse itsensä, sillä:

^{238}U :n sieppaama neutroni ei voi osallistua ^{235}U :n ketjureaktioon.

LUVUSTO!

Tänkeä reaktorin stabilin käynnin kannalta!

Mutta:



n. 20% kaikista kevytvesireaktorin fissioista on ^{239}Pu :n fissioita!

Huom.

- todennäköisyys sille, että nopea neutroni halkaisee ^{238}U :n on erittäin pieni
- hitat neutronit eivät halkaise ^{238}U :ia
- Asteyänjatkuva ketjureaktio on mahdotonta saada aikaan puhtaassa ^{238}U :ssa, samoin pelkästään luonnon uraaneissa.

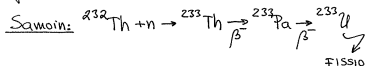
Karkeasti ottaen 1 MW:n teholla fissiossa kuluu n. 1g polttoainetta vuorokaudessa. (Kts. harj.)

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 saatuva ^{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>TSHERNOBYL</u>
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)

$= \frac{1 \text{ N}}{\text{mm}^2}$

$\sim 7 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

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 → primääripiirissä kulkeva vesi ei kiehu.

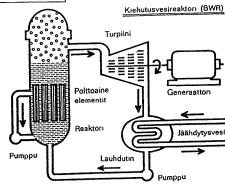
Höyryn muodostus erillisessä sekundääripiirissä (höyrystinessä).

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 keuhavesireaktorissa ei voida käyttää!

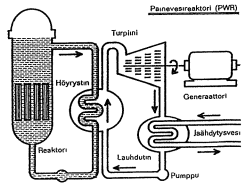
REAKTORITYYPPI, JOTA KAYTETAAN OLKILUOTOSSA



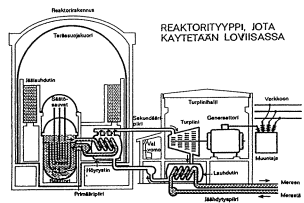
Energia, joka on varastoituneena uraanitymissä, vapautuu reaktorin lämpönä, kun halkeminen tapahtuu. Tämä lämpö siirretään veteen, joka muuttuu höyryksi ja joka vuorostaan saa turbiinin pyörimään. Turbiini pyörittää generaattoria ja silloin syntyy sähköä.

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 sekundääripiiriksi. Siis tällä tavalla.



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



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 hajoissa

(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

Vakiooteho

Vakiooteholla toimiva reaktori tuottaa aikayksikössä yhtä monta neutronia kuin mitä 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	alikäyttöinen	pienenee
1	0	käyttöinen	pysyy vakiona
> 1	> 0	ylikäyttöinen	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 neutronisukuplivi: n

seuraava " " : kn

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

ts. ajassa L tapahtuu neutronitiheyden muutos:

$$\Delta n = kn - n$$

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

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

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

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

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!

Viivästynneiden neutronien ansiosta reaktorin teho on säädettävissä halutulle tasolle.

LUONTO!
(taas!!)

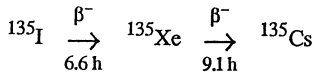
2.2.4. Reaktorimyrkyt

Reaktorissa syntyy fissiotuotteita, joilla on erittäin suuri neutronisieppauksen vaikutusala

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

↳ nk. "reaktorimyrkyt"

Esim.



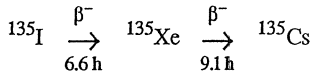
↳ ^{135}Xe :lle $\sigma_n = 2.6 \times 10^6 \text{ b}$

Reaktorin toimissa vakioteholla: Xe-tasapaino!

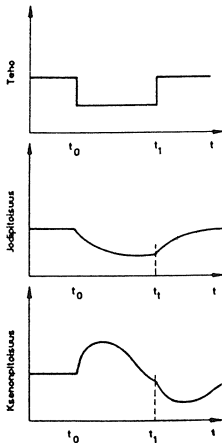
Jos reaktorin tehoa a) lasketaan, b) nostetaan

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

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



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



1.1.00-22.59 HÄTÄJÄÄHDYTYKSEN KIINNI

■ KUN peranta alkua, Tshernobyl syöntä vertaa sähköverkkoon täydellä teholla. Reaktorin kehitettiin 3200 MW lämpötehoon. Lämpö otetaan talteen paineistetulla vedellä, joka pumpataan reaktorissa olevien 1600 putken läpi. Kussakin putkessa on zirkoniumvaipainen uraanipolttoaine. Paineputket sijaitsevat grafitissa, joka hidastaa uraanin halkeamisen vapauttamaa nopeita neutronia. Tätä on tarpeen, koska vain suurtehoiset hitaat neutronit saavat aikaan uraanin halkeamisen ja siten jatkuva keuhureaktion ja lämmön tuoton. Jäähdytysvesi lämpiää reaktorin yläosassa 284°C:een, josta se johdetaan neilään höyrynerottimeen ja edelleen 70 bar paineessaan höyrynä kahteen generaattoriin käytävään turbiiniin. Molemmat generaattorit tuottavat 500 megawatin (MW) huipputehon.

Kello yksi yövuoro alkua laskea reaktorin tehoa. Se tapahtuu siten, että reaktorin sydämeen lasketaan muutamia 211 ohjussauvaa. Ne absorboivat neutronia ja vähentävät siten ytimien halkeamista ja lämmön tuottoa.

Käsiteltäessä turina myöhemmin teho on laskettu puoleen turbiini ja generaattori kytketään irti ja valmistelut eräisiin kokeisiin alkavat. Tarkoituksena on kokeilla, kuinka kauan generaattori tuottaa sähköä pelkän liike-energian voimalla sen jälkeen kun käytävä höyry on suljettu turbiinilla. Näin saadulla sähköllä voitaisiin käyttää häätäjäjärjestelmää muutama sekunnin ajan. Tätä oli kokeiltu jo aiemmin huonolla menestyksellä ja nyt oli tarkoitus testata uusia ohjauks- ja säätöjärjestelmiä.

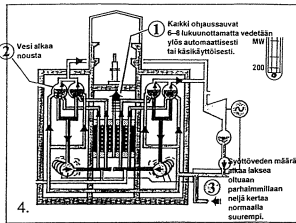
Koska siltu koe tuloksien häätäjäjärjestelmän ja huutaus sydämeen veteen, henkilökunta ottaa ensimmäisen askelen kohti katastrofia: häätäjäjärjestelmää lykätään irti kello 14.00. Samanaikaisesti kokeen suunnittelijat kokevat ensimmäisen pettymyksen. Säätötuotannon ohjauskeskus Kveessä määrää Tshernobyl 4:n toimittamaan sähköä 500 MW vielä muutama tunnin ajan.

Vaikka koetta on lykättävä, ei häätäjäjärjestelmää kytkeä päälle. Täysin säännötön vastastoitus talous tuottaa sähköä puolelta tehtaalta ilman häätäjäjärjestelmää.

3.1.01- 1.19.14 NOIDANKEHA

■ MINNUTEJA myöhemmin, kello 03:n ja 1.07:n välillä, kaksi järeiltä olevaa pääkiertopumppua kytketään käyttöön niin, että kaikki kahdeksan on käytössä. Tätä ei normaaliolosuhteissa saisi tehdä, sillä vain kuusi pumpua saa olla käytössä. Näin siksi, että halutaan testata, voitaisiinko uuden säätöjärjestelmän avulla saavuttaa virralla pyörittää neitä pumppua. Muut neit pumppua savat virtansa muualta (eräs harvoina turvallisuus-toimenpiteistä, jota ei ajateltu).

Näin menetellen koko jäähdytysjärjestelmää menee epäoikeasuoraksi. Kaikki kahdeksan pumppua käyvät täysin kierroksilla ja lisäävät kylmää vettä reaktorin niin kiivaasti, ettei reaktorin kykene lämmittämään tulvaa. Höyryntuotanto vähenee ja järjestelmän paine laskee. Myös veden pinta laskee järjestelmässämme. Tällainen tasapainotus on niin vaarallinen, että turvallisuusjärjestelmää automaattisesti sulkee reaktorin. Jotta tämä välttyäisiin, käyttäjät löytävät tämänkin turvajärjestelmän.



Sen sijaan menetetty höyrymäärä korvataan kolmen minuutin ajan kello 1.19.00-1.21.50 syöttämällä täysivoimalla kylmää syöttövedellä lähtien. Ja mitä enemmän vettä syötetään, sitä kylmemmäksi jäähdytysvesi tulee ja sitä alemmaksi höyry-

4.1.19.15- 1.22.44 AIKAPOMMI

■ TSHERNOBYLIN reaktorista nurehtava on nyt tullut aikapommi. Syntyi lähtien on lähtö, joka on luonnollisesti sydämen reaktiivisuus lisääntynyt voimakkaasti, kun polttoaine-elementtien ympärillä paneutuksessa oleva vesi korvautuu höyryllä.

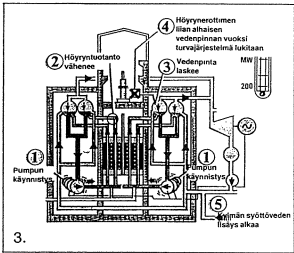
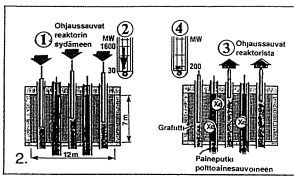
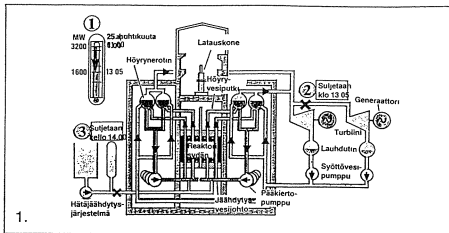
Koska reaktorin sydän on täynnä kylmää jäähdytysvettä, niin höyryntuotanto putoaa. Seurauksena automaattiset ohjussauvat kohoavat myös sydäimestä.

Kello 1.19.30 käynnistetään aikapommi kello 1.21.00 näitä vedetään käsikäyttöisesti säätävät ohjussauvat ylös.

Neuvostoliitolaismääräysten mukaan 30 saunan täytyy aina olla reaktorin sydämessä estämässä edellä kerotun ilmiön aiheuttamaa tehoa lisääntyä. Vuoropäällikkö voi poikkeuksellisesti vähentää saavojen määrää 15 kappaalaiseen, mutta nyt vedetään ylös kaikki muut paitsi 6-8 kappaletta.

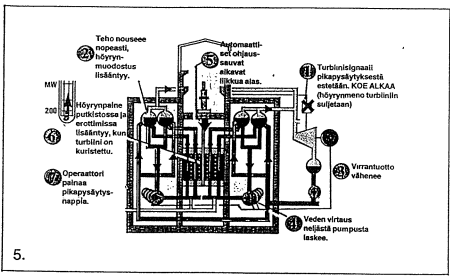
Toiminnan lisäksi ei heti huomaa, kylmä syöttövesi läinetti järjestelmässä tulvimaista.

Kello 1.22.30 reaktorin sydän toimittavat valvova tehtokone on lähtenyt. Sen mukaan reaktorin mirta on nyt pysäytetty. Käy läkivät liuskat, mutta reaktorin säilytti, vaan koetta päättyä jatkua.



2.23.00-1.00 KÄYTTÖVIRHEITÄ

■ VASTA yhdeksän tunnin kuluttua noin kello 23.00 kivi antaa luvan tehoon laskeun. Tänä aikana, uusi vuoro on tullut lähtien. Henkilökunnasta kolme on ohjauskeskuksessa ja neljä generaattori- ja turbiinialueella kello 23.10 lämpötehoa aletaan laskea - ennalla suunnitelluun 700-1000 MW:in. Kun ohjauksjärjestelmä kytketään uuteen kokeellamaan järjestelmään, tapahtuu kohtalokas virhe. Käyttöhenkilökunta ei huomaa, että uusi järjestelmä on asetettu väärälle teholtasolle. Tämän seurauksena ohjussauvat painuvat liian syvästi sydämeen ja ennen kuin assaan erittäin puuttua, lämpöteho on kello 00.28 laskettu 30 MW:in, alle prosentin maksimitasosta. Reaktorin on nyt hyvin vaikeasti hallittavissa tilassa Nopea tehoraskus seurauksena se on xenon-kaasun kyllästäminen, limo on tullut kaikkina reaktorin ytimessä ja merkitsee sitä, että xenon "varastaa" niin paljon neutronia, että ytimen halkeaminen lähes lakkaa. Koska xenon häviää hitaasti, teho voidaan lisätä vain nostamalla ohjussauvat ylös sydäimestä. Vaikka kaikki 211 saavaa nostetaan, teho on noussut kello 1.00 mennessä vain 200 MW:in, kuitenkin prosentin kokonaisuudessaan. Vaikka oli kiellettyä käyttää reaktiota kaikki ohjussauvat nostettiin, vaikka reaktorin oli vaikeasti hallittavassa tilassa ja vaikka teho oli suunniteltu nopeampi, päätettiin koetta jatkaa.



5.

5. 1.22.45-1.23.42 SYDÄN RIISTÄYTY HALLINNASTA

■ VALVOMOSSA henkilökuunta kuulee kello 1.22.45 reaktorin sydämen olevan stabiilii, koska syötöveden laadys ja höyrymuodostus kumoavat toistensa vaikutukset. Reaktor näyttää vakaalta, mutta sitä se ei ole kello 1.23.04 aloitetaan generaattorikoe lukkuuttamalla pikäpysäytin, joka muuten olisi pysäyttänyt ja kortes petastanut reaktorin, kun viimeinen jällellä oleva turbiini pystähtyy. Koe tulee tärkeämmäksi kuin reaktorin turvallisuus Kokeen ratkaiseva vase aikaa, kun höyry ohjataan turbiiniin oli hahduttuimeen.

Ensimmäisten sekunen aikana ohjaussauvat saavat nosto- ja laskuimpulseja ja reaktorin teho vaihtelee. Siitten kylmä syötövesi 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 valvomöpyttään päin ja painaa 1.23.40 nappia AZ 5. Se käynnistää ohjaussauvat pikäpysäytykseen. Mutta kun myöhään, reaktorin sydän on setsemän metrin syydydessä ja sauvat liikkuvat vain 40 cm sekunnessa Sydämen hallinta on karannut käsistä ja käihyvä tehon nousu jatkuu.

6. 1.23.43-1.23.47 RÄJÄHDYS

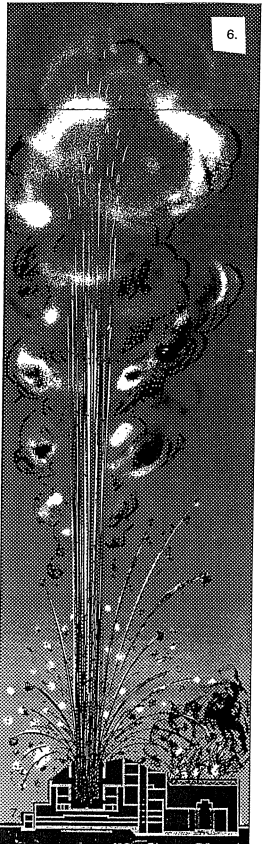
■ KOLME sekuntia myöhemmin - 1.23.43 - reaktorin teho on 540 MW. Kehityskulku on nyt niin nopea, etteivät ohjaussauvat pysy enää mukana eivätkä pysty estämään prosessia. Tämä joutuu siitä, että polttoaine-elementtien painalle on muodostunut höyrykuplia, jolloin teho nousee räjähdysmäisesti Sekuntia myöhemmin teho on yli sata kertaa reaktorin nimellistehon: se on 350 000 megawattia Hiihlin keijureiko 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 reaktorsäiliön kanssi ohjaussauvamekanismineen lentää pois Reaktorissa tapahtunut räjähdys vastaa voimalta 50 tonnia troytyitä Tämä tapahtuu 1.23.47

7. 1.23.48 KATASTROFI

■ VÄLITTÖMÄSTI sydämessä tapahtuneen räjähdysksen jälkeen höyry ja zirkoniu reagoivat vetykaasuun - myös muita reaktiota saattaa tapahtua Sekuntia myöhemmin - 1.23.48 - tapahtuu ensimmäinen räjähdys Ennenkämätön voima sinkoa katon ja seinät taivaan tuuliin. Sydäimestä liinkoutuu tuhansiltain särkyneitä polttoaine-elementtejä ja grafitimökykyä taivaalle. 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 syytyttää yä 30 tulipalaa en puolella. Valtava lämmönkehitys nostaa hienompaa radioaktiivista ainesta korkealle ja se aikaa levitä. Katastrofi on tosiasia



2.3. Ydinaseet

2.3.1. Fissiopommit

Rikastettava

m. 95%

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

Toiminnan kannalta tärkeää:

a) $\frac{1}{4}$
b) neutroniheijastin

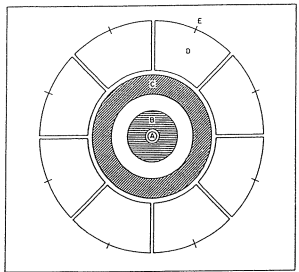
- neutronien vuoto estettävä tehokkaasti,
- Pommin pysyttävä mekaanisesti kaasussa riittävän monen neutronisukupolven ajan

"Kriittinen massa"

↙ pieni massa fissiiliä 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.

- Alikritiiset massat pidetään erillään; esim. kosmisen säteilyn neutroneja osuu muutama kpl/s fissiomassaan...
- Fissionpommissa kritinen massa saadaan aikaan: (Haj.)
 - a) työkimenetelmällä tai
 - b) implusio - eli sisäänpäänräjäytys-tekniikalla (puristus → suuri tiheys!)
 (kts. edell. sivu: Plutonium - pommi)
- Ketjureaktion käynnistys: tarvitaan neutronilähde (vrt. fissioreaktori)
 - räjäytysketkellä
 - esim. Be & α -lähde yhteen → vapautuu neutroneja
- Tärkeää:
 - fissiomateriaalin tiheys, pakkaus, ympäröivä aine (neutroniheijastin: Be + U)
- Vapautuva energia:

Fissio → $200 \text{ MeV} = 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

$= 32 \times 10^{-12} \text{ J} = 32 \text{ pJ}$ (osa karkaa neutrit)

→ 2-3 neutronia, nopeus $\sim 2 \times 10^7 \text{ m/s}$

→ liikkuvat muutaman cm:n ennen törm. seuraavaan ytimeen (ts. $< 10^{-8} \text{ s}$) → 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 (aika < 1 μs); 99% energiasta vapautuu 5 viimeisen neutr. sukupolven aikana (aika ~ 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?

$$\frac{4.2 \times 10^{12}}{2.9 \times 10^{-12}} = 1.45 \times 10^{23} \text{ kpl} = \frac{m}{235} \times 6 \times 10^{23}$$

↳ Fissionoitunut massa = ?

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

• Entäs sitten se Nagasaki:

$$\frac{3.2 \times 10^{24}}{N_4} \times \frac{2.9 \times 10^{-12} \text{ J}}{E_f} = 92 \times 10^{12} \text{ J} = 92 \text{ TJ}$$

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% fuusiosta.

↳ Mutta: vap. energia/nukleoni = ?

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

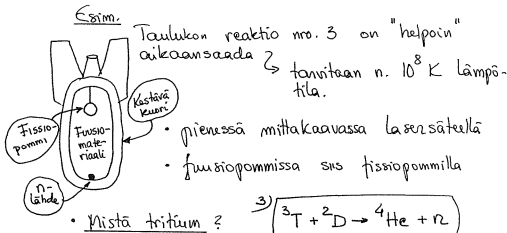
b) Fuusio: $2,82 \text{ pJ} / 5 = 0,56 \text{ pJ/nukleoni}$

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

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

(94)

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



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

↳ käytettävä tritium tuotetaan räjäytysketjällä:

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

↳ fissiosytyttimen räjähdys tuottaa neutroneja: ${}^6Li + n = {}^4He + {}^3T$

ts. fissiosytyttimen merkitys: ${}^6Li + n \rightarrow {}^4He + {}^3T$ & fuusio

- a) tuottaa riittävän lämpötilan
- b) tuottaa materiaalia fuusioreaktiota varten.

- 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 röntgensäteily muodossa.

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

ts.

röntgensäteily saaruttaa fuusiomateriaalin ~ yht'äkkiä.

- Neuvostoliiton koeräjäytys n. 1961 oli vastasi

$$\begin{aligned} n. 60 \times 10^6 \text{ tn} &= 60 \text{ Mtn TNT} \\ (= \frac{60000}{22} &\approx 2700 \times \text{Nagasaki}) \end{aligned}$$

- 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

Fissionpommissa plutonium onton pallon muodossa

↳ keskustassa pieni määrä fuusiomateriaalia

implosioon aiheuttama puristus ja kuumeneminen aikaansaa pienimittaisen fuusioreaktion

↳ tuottaisi paljon neutroneja

↳ osuvat plutoniumiin ja tuottavat fissionia (alkuper. ketjureaktion lisäksi)

ts.
fissionisaalis kasvaisi 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

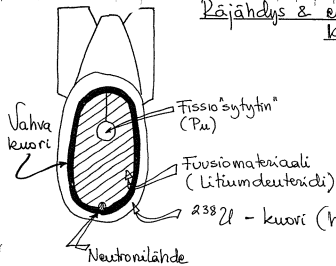
↳ voisivat aikaansaada fission ^{238}U :ssa!

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

↳ Käyttöä?

Räjähdyks & energian vapautus kolmessa vaiheessa:

98



- 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% fissionista ja n. 50% fuusioista.

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

Huom.

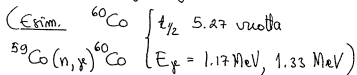
Neutronien tunkeutuminen ^{238}U -ytimiin aiheuttaa myös ^{239}Pu :n muodostumista
↳ naltavasti

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

↳ ts. lisäämättä räjähdysvoimaa
lisätään säteilyriskiä

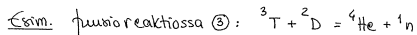
↳ valitsemalla

- 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,

näin

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

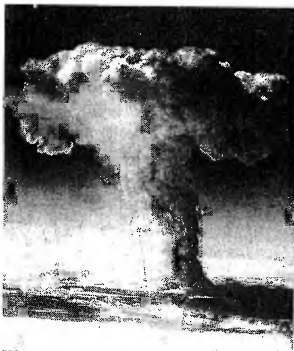
Sitä on kutsuttu historian tärkeimmäksi tieteelliseksi keksinnöksi. Tutkijat, jotka olivat paikalla tanskalaisen fyysikon Niels Bohrin kerteossa ratkaisevasta kokeesta, muistelevat vuosien kulluttua kuunnelleensa hänen puhettaan hiljaisina ja kasvavan hämmästyksen vallassa.

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 versoa 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 kokoaisivat arsenaaleihinsa tuhoivoimaltaan käsittämättömät 50 000 ydinasetta. Se toimisi voimanlähteenä sydämen-tahdistajissa ja pitäisi avaruusaluksset toiminnassa niiden kiitälässä kohti auringokuntamme rajoja satojen miljoonien kilometrien päähän maasta.

Samalla keksintö on jättänyt perinnökseen tonneittain ydinjätettä, jota kertyy ydinasetehaitaista 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 uraaniatomuja 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 veljenpöikansa 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 lahti matkalle Yhdysvaltoihin Tammikuun 13. päivänä Frisch pommitti Bohrin laboratoriossa uraania hitailla

neutroneilla ja mittasi vapautuneen energiamäärän oskilloskoopilla: 200 miljoonaa elektroniivoltia.

Energia oli ollut yhtä kuin massa kerrottuna valon nopeuden neljöllä. Ilmoitettuaan asasta Washingtonissa Bohr vieraili Einsteinin luona Princetonissa ja pohdiskeli kokeen tulosta hänen kanssaan. Keskustelun sallostä 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 juolahtanut mieleeni.")

"... 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 irtaa 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.)

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

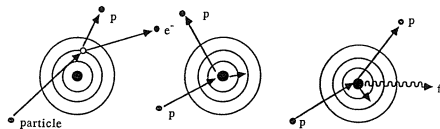
Huom.

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

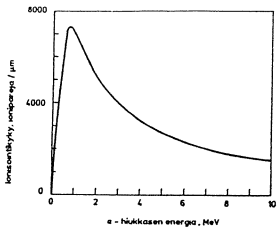
LUKU 3

Säteilyn ja aineen välinen vuorovaikutus

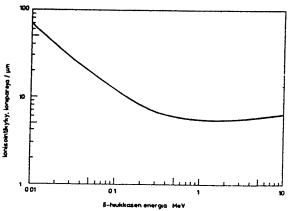
3.1. SÄHKÖVARAUKSISTEN HIUKKASTEN VÄLISET VUOROVAIKUTUKSET



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:

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

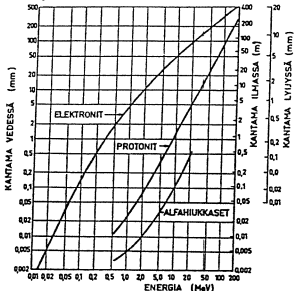
Kuva 3.4.

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

Esim. 1 MeV kantamat vedessä (kudoksessa):

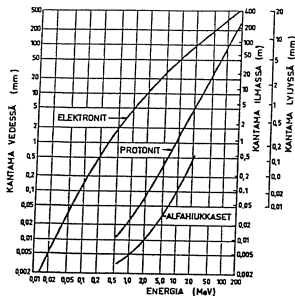
	1 MeV	10 MeV
β	5 mm	50 mm
p	25 μ m	1.5 mm
α	5 μ m	0.1 mm

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

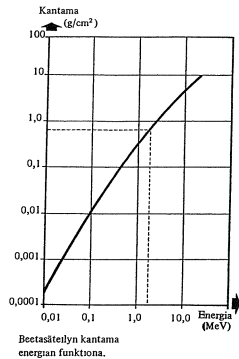


Kuva 3.4. Elektronien, protonien ja alfahiukkasten kantamat vedessä. Lähde: [illegible]

3.2. HIUKKASTEN KANTAMA VÄLIAINEESSA

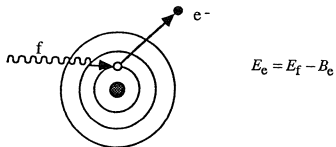
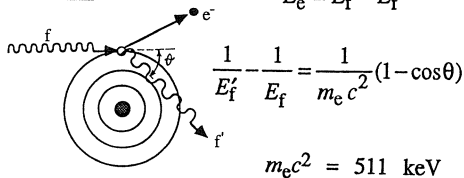
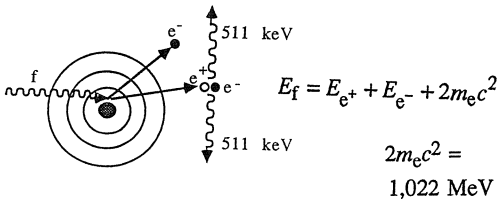
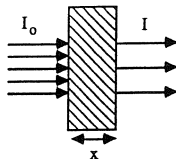


Kuva 3.4. Elektronien, protonien ja alfahiukkasten kantamat vedessä, ilmassa ja lyijyssä.



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

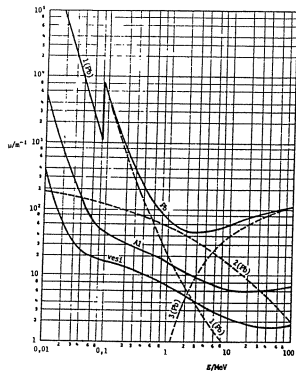
ValosähköilmiöComptonin ilmiöParinmuodostus ja annihilaatio3.4. SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN
VAIMENEMINEN VÄLJAINNESSA

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

$\mu =$ 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.)

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

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

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

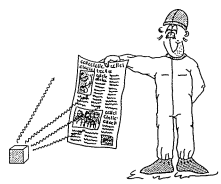
$$\text{Al: } \mu \approx 17 \text{ m}^{-1} \quad d_{1/2} = \frac{\ln 2}{17} \text{ m} \approx \underline{40 \text{ mm}}$$

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

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

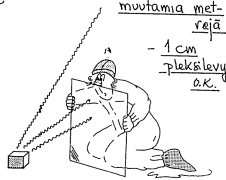
Alfasäteily

- kantama ilmassa ~ 10cm



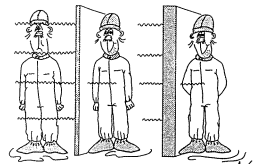
Betasäteily

- kantama ilmassa
muutamaa metreja
- 1 cm
- pleksi levy
a.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)

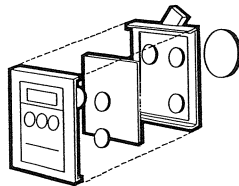
- filmi pakataan valotuttuun paperikuoreen
- sijoitetaan erityisiin pidikkeisiin
- vaihdetaan tietyin väliajoin
- kehitetään yhdessä kalibrointi-filmien kanssa (ts. niiden samaa säteilyannos tunnetaan)
- tummuutta vertaamalla → tuntematon annos selvälle!
- mustuminen riippuu säteilyn energiasta: siksi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

Käyttö: mm. henkilökohtaisen säteilyannoksen 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.

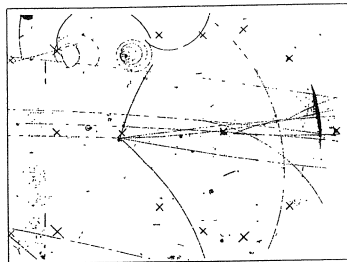
Lankakammio

↳ Käyt. suurenergiisten hiukkasen törmäyskokeissa hiukkasilmaisimena.

Tasavälein anodilankoja.

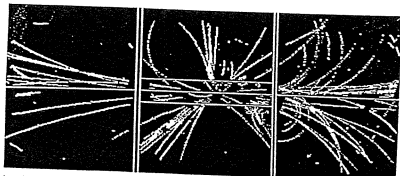
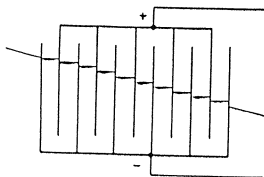
Jonisaatio → elektronit kootaan sähkökentän avulla langoilte

↳ 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

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

Kun jännite taas nousee, putki voi rekistroida uuden sät. kvantin.

Sovellus: KVNÄDOSIMETRI (työntekijöiden annosmittarina)

Muistuttaa ulkoisesti kynää.

On kaasutäytteen, sylinterinmuotoinen kondensaattori.

Ladataan ensin tiettyyn jännitteeseen.

Ionisoiva säteily laskee jännitettä: ionit kulkevat varauksia elektrodien välillä.

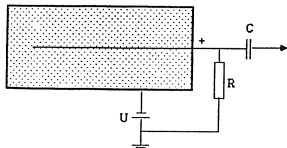
Jos C = kammion kapasitanssi ja jännitteen lasku = ΔU , niin ionisaation synnyttämä kok.varaus on

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

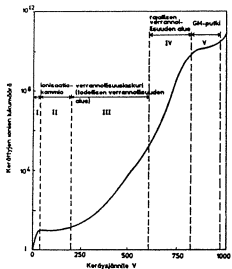
Kond:n varauksen lukulaitte void. kalibroida näyttämään henkilön saamaa sät.annosta.

Säteilyn mittaussmenetelmät

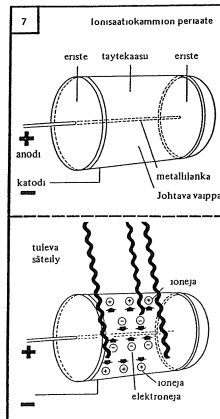
4.1. KAASUTÄYTTIESET ILMAISIMET



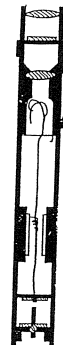
Kuva 4.1. Kaasutäyteen ilmaisimen toimintaperiaate.



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 jännitepulssi on verrannollinen säät:n 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 jännitepulssi on helppo havaita.

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

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

↳ hiukka-aikaa!

- yksinkertainen, halpa, toimintavarma → käyt. yleisesti säät:n aktiivisuuden mittaamiseen

Ioniparin muodostamiseen tarvittava energia W

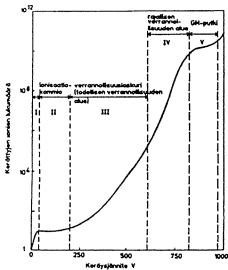
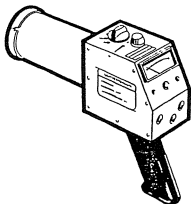
Aine	W
He	41.4 eV
N ₂	34.7
O ₂	31.1
Ar	26.1
ilma	34.0
Ge	3.0
Si	3.5

Luonnossa

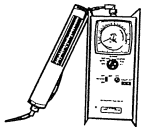
β, γ : 0 → 3 MeV \Rightarrow 90000 ioniparia ilmassa

α : 5 → 9 MeV \Rightarrow 150000 - 260000 ioniparia

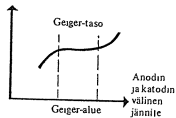
Verrannollisuuslaskuri



Geiger-putki



Varaus



Säteilyn energiaspekttrin mittaaminen

↳ tuke- tai puolijohdeilmaisimia käyttäen

γ : NaI(Tl), Ge(Li), Ge, HPGe

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

(Si toimii myös huoneenlämpötilassa)

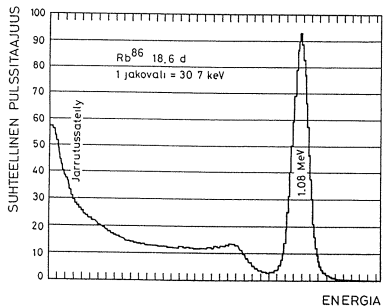
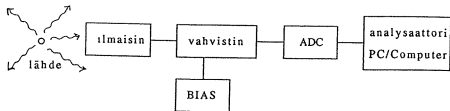
ilmaisimesta saatava pulssi \propto havaitun säteilykvantin tai hiukkasen energiaan

energia-akseli kalibroidaan tunnetuilla lähteillä

↳ tuntemattomia mittaamaan...

SÄTEILYSPEKTRIN MITTAAMINEN

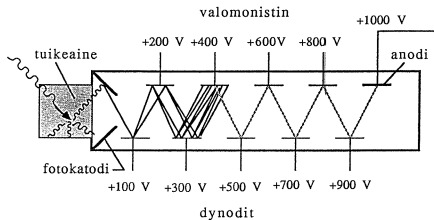
125



TUIKEILMAISIN

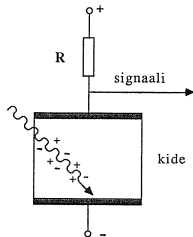
126

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.

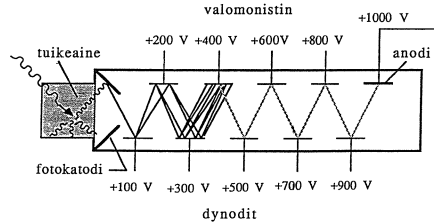
tavallisesti
valomonistimessa 4-10 dynodia

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

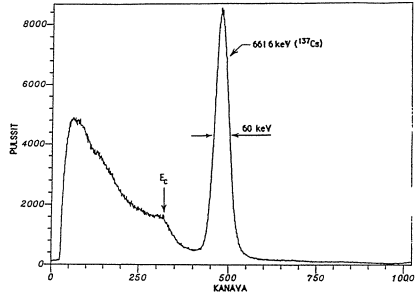
- hyvä havaitsemistehokkuus (koska tiheys suhteell. suuri ja ainakin voi olla suuri)
- pulssin kesto hyvin lyhyt (lyhyt hukka-aika!) \rightarrow void. resistanssista pulssoja n. 1 ns:n välein!
- energiaeroituskyky (puokamokeruus, resoluutio) $\sim 10-12\%$

saadaan siis sekä N että E!

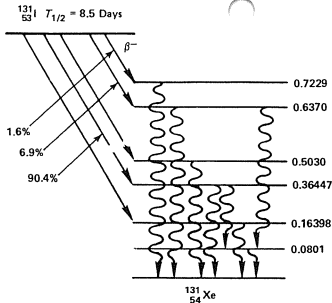
4.2. TUIKEILMAISIM



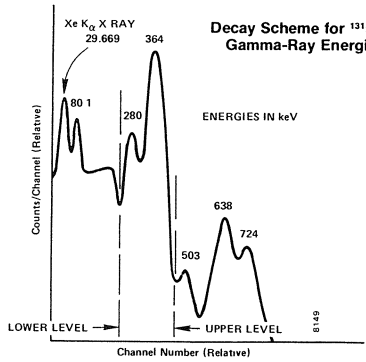
Kuva 4.3. Tuikeilmaisimen rakenne ja toimintaperiaate.



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



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.

(129)

4.3. Fusijohdeilmaisim (Ge, Si)

(130)

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

joita toimivat varauksenkuljettajina (vrt. elektroni-ionipari ionisaatiokammiossa)

Estosuuntaisella jännitteellä sad. syntymään laaja katoalue

↳ , jossa hyvin vähän varauksenkuljettajia.

Katoalueen paksumuuta void. kasvattaa litiumin avulla:
nk. Ge(Li) & Si(Li) -ilmaisimet.

Nykyisin käytetään myös nk. itäisgermanium- ilmaisimia
↳ HP Ge 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_{stim} 1MeV → Ge 330 000 paraja (ts. x yli 10 vrt. ionisaatiokammiossa)
Si 290 000 - - -

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 mittauksiin ts. pyrittäessä tunnistamaan radioakt. aineita ja niiden energia-tiloja. (Esim. radioakt. laskeuma & mitä aktiivisuuksia?)

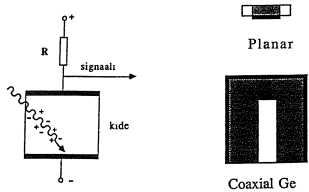
HPGe & Ge(Li) toimivat vain jäähdytettynä (tavallisesti nestetypen lämpötilassa, 77 K)

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

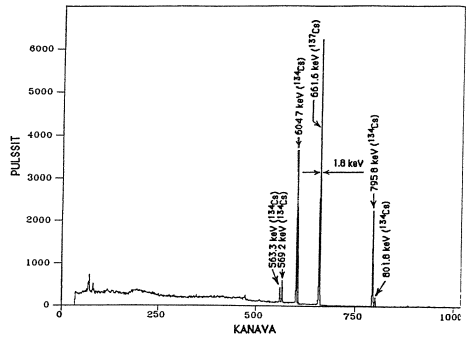
↳ (n. -30 °C riittäisi)

Säteily → keideaurioita; ilmaisimilla on rajallinen käyttöikä.

4.3. PUOLIJOHDEILMAISIN

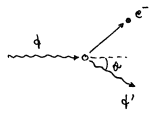


Kuva 4.5. Puolijohdeilmaisimen toimintaperiaate ja tyypillisiä rakenteita.



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

$$\frac{E_{\phi'}}{E_{\phi}} = \frac{E_{\phi} - (E_{\phi'})_{\text{min}}}{E_{\phi}}$$

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

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

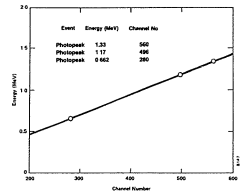
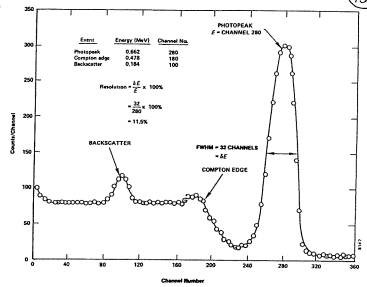
Gamma spektrissä havaitaan:

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

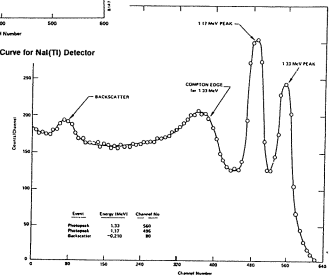
Häntä $O \rightarrow C$: sironta on tapahtunut kiteessä; elektroni on absorboitunut, kvantti karsunut

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

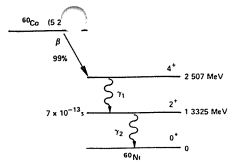
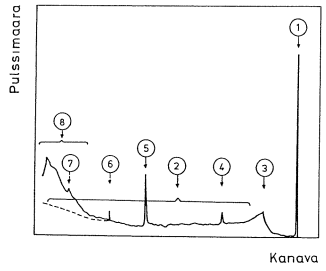
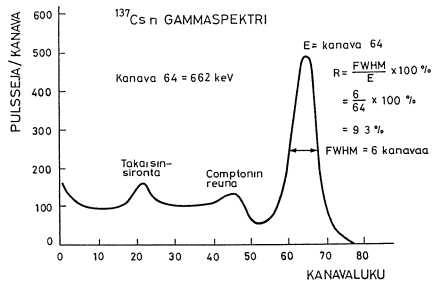
Huom $E_B + E_C = E_A$!



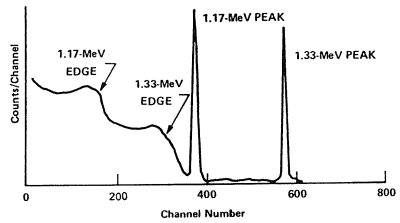
Energy Calibration Curve for NaI(Tl) Detector



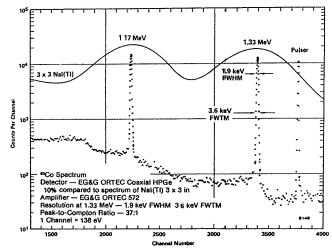
NaI(Tl) Spectrum for ^{137}Cs



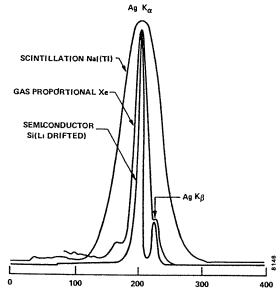
The Decay Scheme of ⁶⁰Co.



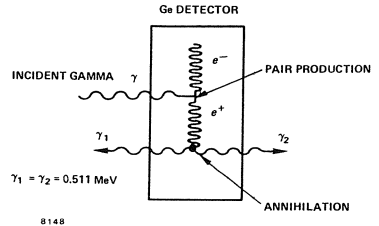
Locating the Two Photopeaks for ⁶⁰Co in the HPGe Spectrum.



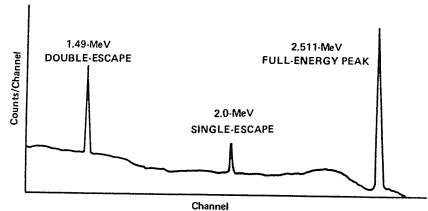
⁶⁰Co Spectrum Showing Resolutions and Peak-to-Compton Ratios for an HPGe Coaxial Detectors and an NaI(Tl) Detector



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.

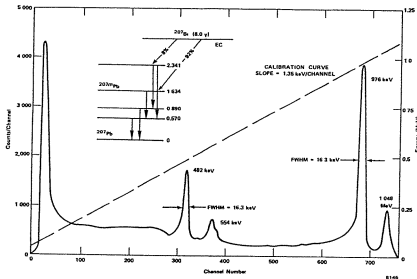
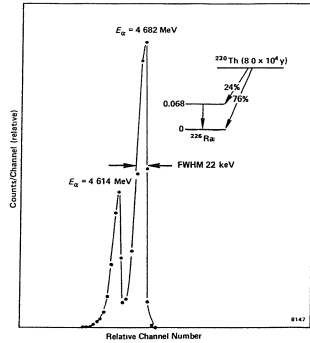
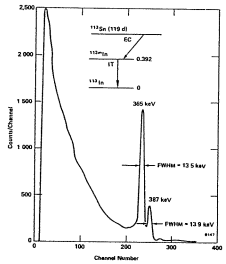


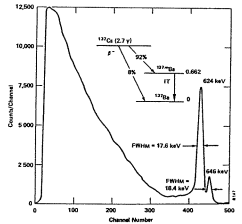
Fig. 6.2. ²⁰⁸Bi Conversion Electron Spectrum.



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



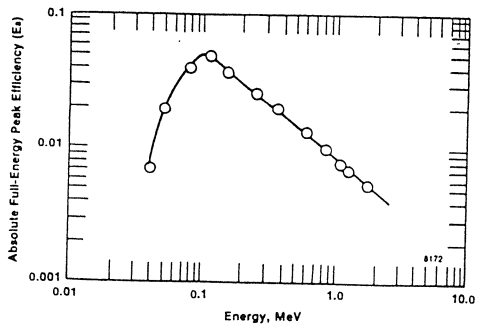
¹¹³Sn Conversion Electron Spectrum.



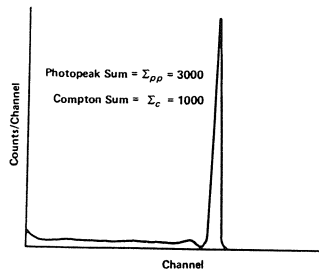
¹³⁷Cs Beta and Conversion Electron Spectrum.

Photon Detectors

(141)



(142)



Typical Spectrum Expected for 100-keV Energy in HPGe.

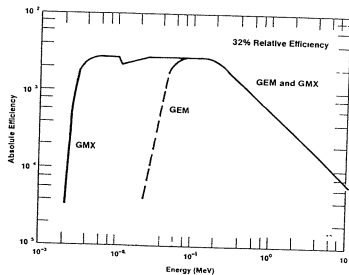
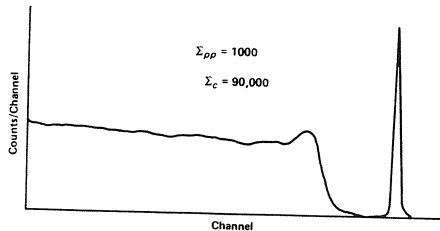


Fig. 21. Absolute Efficiency vs Energy for 32% GEM and GAMMA-X HPGe Coaxial Detectors.



Typical Spectrum Expected for 1-MeV Energy in HPGe.

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

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
jolloin saavutetusta 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 ^R painotuskertoimilla w_R korjattujen keskimääräisten absorboituneiden annosten summa:

Määr.

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

Esim $\frac{R}{D_T} = 0.1 mGy$
↳ $H_T = 0.1 mSv$

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

w_R :	γ, β , myönit	1	
	n	5-10	(riippuu energiasta!)
(Kansainvälinen)	p	5	($E_p \geq 2 MeV$)
	α	20	
säteilynsuojelutoimikunnan suositus \Rightarrow)	(fissionfragmentit)	20	
	(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 sitou-
tuneiden 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.
(= ekvivalenttiansiokekerin, = annoksekeri P)

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

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

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

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 :

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

(Vat kukaan rad. akt. n. 0.4 mSv, radon n. 4 mSv, etc.)

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:

lääm. $E = \sum_T w_T H_T$ (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 keskeisim kudoksen suhteellisen osuuden kokonaishaitasta silloin, kun koko keho on tasaisesti altistunut säteilylle. Kertoimien summa = 1.

<u>esim.</u>	sukurauhaset	$w_T = 0.20$	<u>Riski kerroin</u> [Sv ⁻¹]
	luuydin	0.12	
	maha-laukku	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 riskikerrointa, 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

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

(Huom. $Q = w_R$ = kerrin 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

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

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 likiarvo = SYVÄANNOS

Kehon pinta-annos(ekvivalentti) $H_p(0,07)$ antaa likiarvon ihon ekvivalentti-annokselle = 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 elämäntapaa 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 alhaaltaan saatu hyötyä pienempi erityisesti syövin hoitoissa.

Säteilyaltistukseen liittyy läheellisesti ja aiheuttomilla peiloilla on myös paljon psykologisia syitä johtuva häiriövaikutuksia.

Esimerkiksi Tshernobylin onnettomuudet tuntuvat pitävän säteilyä lähes kaikkien varojen syynä hämähäköistä alkaneen. Myös asukkaat saavat joutua liioitella säteilyaltistuksen vaarallisuutta. Niinpä Tshernobylin ydinurman jälkeisiä kuukausina jossakin Euroopan maissa tehdyin tarpeellisesti lähes kaikkiä 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 urman 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 koulutuksen virheitä.

"Kymmenen vuoden ajan maailman lisääntyvä energiantarve on lähinnä katettu rakentamalla hiiltä, öljyä ja kaasua käyttäviä voimaloita. – Jo nykyisellä koulutuksella fossiilisten polttoainoiden polttamisesta aiheutuvia haittoja voidaan vähentää huomattavasti. Tilanteeseen on tähän saakka saatu ottaa huomioon ympäristön. Suomi joutuu laskea saavansa siitä paljon miljardien markan arvoisen hyödyn".

"Viimeaikaiset tiedot maapallon mervirtoja ja sitä kautta säteilyolosuhteiden Oddenin pumpun toiminnan yksikäsitteiset ovat vakavimmat ilmenneet. Jos kylmiä alueita lämmittävät mervirrat jäävät, paltu jääkauten voi alkaa".
"Tilanteesta ei tietystikään helpota se, että kehitysmaat haluavat saavuttaa länsimaisten kulutustason. Se lisää energiainkuluja tuntuvasti".

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

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

SÄTEILYKEHÄ

156

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

VIRANOMAISTEN ILMOITUSRAJA,
VALVOITAVIRASTONASELÄT JA VALVOITAVIRASTON
ASELÄT OTTAVAT YHTYTTÄ TOISIIN
SA JA TEHOVAT VALVOITAMASSA

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

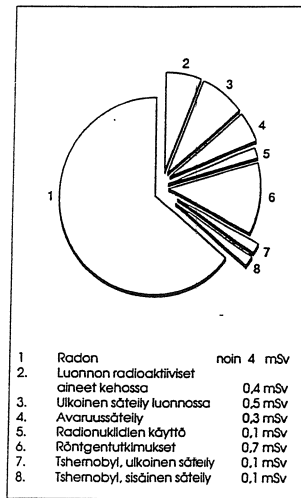
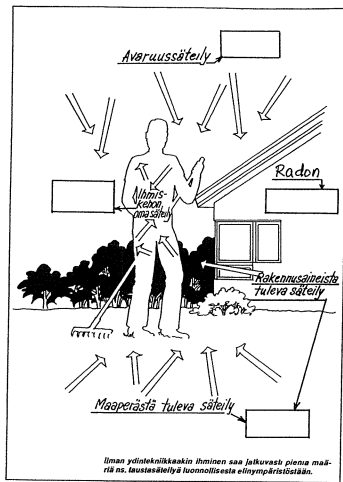
100 $\mu\text{Sv/h}$

VÄESTÖN VAROITUSRAJA,
VIRANOMAISTEN ON AKILLISESSÄ
SÄTEILYVAARATILANTEESSA
VAROITETTAVA VÄESTÖÄ

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

VÄESTÖN SUOJAUTUSRAJA,
ON RYHDYTTÄVÄ VALITTOIMIIN
SUOJAUTUSTOIMENPITEISIIN.

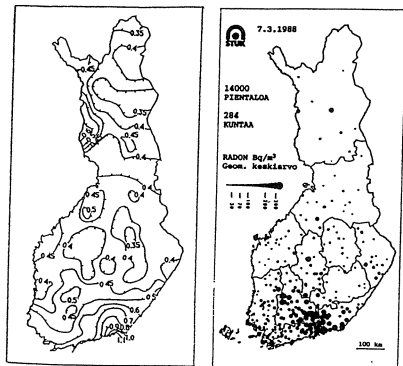
VANHOJEN JA UUSIEN
YKSIKÖIDEN MUUTOS



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/m^3) 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

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

Keskim. aktiivisuudet / maaperä kilogrammaa kohti (Suomessa):

TAULUKKO 5.1

^{238}U	38 Bq/kg	} (kun huomioidaan niiden pitoisuudet luonnossa)
^{232}Th	41 Bq/kg	
^{40}K	640 Bq/kg	

aih. suomalaisille joka vuosi noin 0.5 mSv ulkoisten annosten.

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

Maapallolla keskimäärin n. 0.3 mSv. Suomessa syntyy granittikalkeperä!

	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

Voitetaan laskea, että 1g kaliumia nästää 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
 $\underbrace{30.4 \text{ Bq}}$

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

vert. 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 luonnonradioaktiiviset...



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

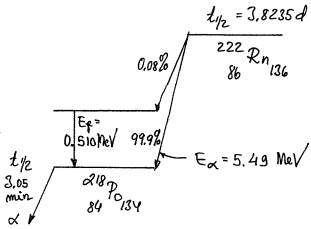
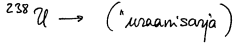
yhteensä: annosnopeus = $0.070 \mu \text{ Gy/h}$

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

↳ korjattava tekijällä 0.82.

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

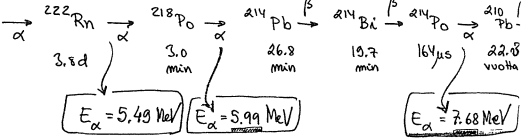
Radon



$t_{1/2}$ säis ~ 3.8 d

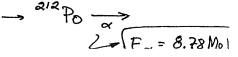
- kulkeutuu syvältäkin maaperästä
- aih. > 50% suomalaisten vuor-annokasta

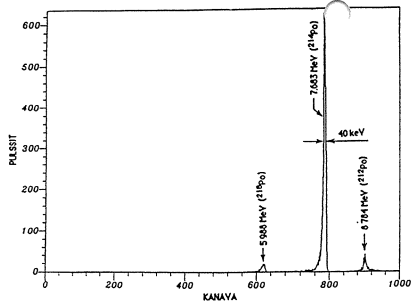
URAAANISARJA:



↳ Kts. luvua 5.3

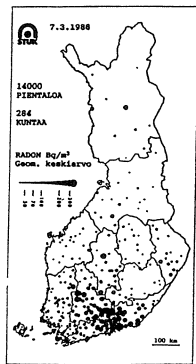
THORIUMSARJA:





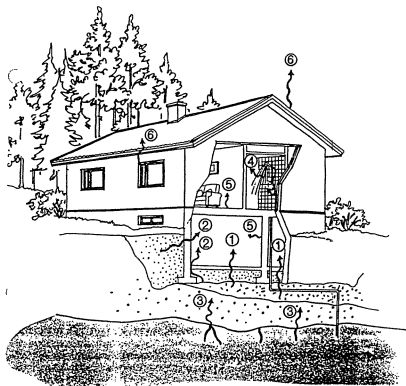
163

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

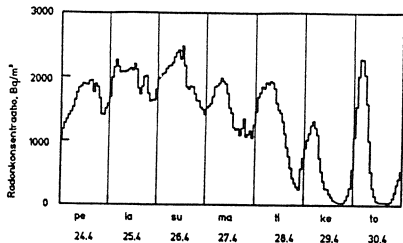


Kuva 5.1. Ulkoisen gammasäteilyn vuosiansokset (mSv/a) Suomessa ja pientalojen huoneilman radonkonsentraation (Bq/m^3) maantieteellinen jakautuma (Säteilyturvakeskus = STUK).

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).

Radon annos saad. asunnoissa!

↳ Suomessa
asunnoissa keskim. radonpitoisuus:
~ 120 Bq/m³
↳ annos ~ 4 mSv / vuosi

Es:
On turvallistem-
ään fyysikkonella
yhdenvoimalla kukaan
istokella kotona
suhalla...?

(Ulkona suuri ilmassa:
- pitoisuudet ~ 1-10 Bq/m³)

Asuntovaihtelut suuria:

- max. ~ 15000 Bq/m³
↓
annos ~ 500 mSv / vuosi

Miten radon kulkentuu asuntoihin?

↳ ks. suur. kuva 5.4.

Vuorokausivaihtelut suuria!

↳ kuva 5.5.

↳ Es lyhyt mittaus ei ole luotettava...

Asuntoasutus: < 400 Bq/m³

Uudet asunnot: < 200 Bq/m³

Radonmittaus

Säteilyturvakeskuksesta (tai kuntien vast. virastosta) saapi

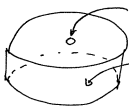
radonmittauspurkkeja

↳ integraalimittaus pöytä (~2kk)

pöytä ajankohhta: marras - huhtik.

Miksi?

(Maa jäässä...)



radon reiästä sisään

α-säteilylle herkkä kalvo

~5cm

α-sät. (Rn & hajtuot) aikaansaavat näkymättömiä jälkiä

ne suurennetaan sähkökemiallisella syövytyksellä näkyväksi

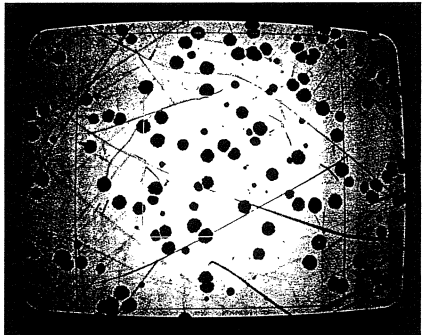
↳ jälkien määrä & mittausulos lask. automaattisesti

Mittaus hinnat (v.20)

- Sät. turvakäsky ~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 tuotantomenekit ovat korvien välissä. Säteilyturvakeskus on juuri antanut hyväksyntänsä yhtiön kehittämälle mittausmenetelmälle työpaikkojen läksikäsittein radonmittauksiin. Uuden laitteiston hinta on vain kymmenesosa nykyisin 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 säteilyturvaimittarin näyttöä

Työpaikoilla sallittavan radonpitoisuuden enimmäisarvo on 400 becquereliä kuutiometriä, jota nykyisiin asuntojen radonpitoisuuksien 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.



Sakari Lindel

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

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 työpaikkatietä. Sen tietojen mukaan Suomessa ilmestyi 1990-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. Yhden puolet kaikista naisten keuhkosyövistä olisi siis radonin aiheuttamia kasvaimia.

Syöpätieteen tietojen perusteella näiden keuhkosyöpien ilmenemisen ei keskity radonalueille. Se nousi ensin tietojen mukaan

ajatus 200 vuositietästä naisien radonperäisistä keuhko kasvaimista on lojosioiden vastainen.

Sosiaali- ja työterveysministeriön vastuussa ennalta ehkäisevistä terveydenhoitotyöistä. Väite siitä, että rakennusten korjauksella voidaan estää vuosittain 400 keuhko kasvainta on rajua. Jos säteilyturvakeskuksen väitte olisi totta, sosiaali- ja työterveysministeriö olisi syyllistynyt radonperäisten kasvainten osalta estävien toimenpiteiden laiminlyöntiin.

Ministeriön pitäisi viimeistään 400 radonperäistä keuhko kasvainta torjuntaohjelmalla. Se merkitäisi kattavaa rakennusten radonmittausta rikkumissa ja tulosten pohjalta tehtäviä korjaustoimenpiteitä. Tämä maksaa Sikiä kunnilla on oikeus saada ministeriöltä selviä toimenpidesuosituksia. 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 argumentteihin. Toisaalta kyse on suurista taloudellisista arvoista. Siksi Säteilyturvakeskuksen aineesta neutraalisia arvioita ensisijaisesti ja erikseen erikseen erikseen. Nyt ja mielestäni näin käynnin

ERKKI VAURAMO
Lähtökäsitteellinen
fyysikan dosentti
Helsinki

MELIPIDE

Radonistako keuhkosyöpää?

■ Vastan professori Märten Brennerin melipidepölytykseen (HS 6. 4. 94), jossa hän kertoi uutisen Yhdysvalloissa suoritetusta tutkimuksesta, joka mukaan huoneilman radoniläsnä vähenetä keuhkosyöpän määrät. Tämä perusteella hän asettii Suomessa noudatettua radonotorjuntastrategian kyseenalaiseksi.

Jo kymmenen vuotta sitten Suomessa julkaistiin ensimmäinen maadmaassa radonpölytyksen maantieteellisiä jakamaa esittävä kartta. Se osoitti, että alueilla, joilla oli paljon keuhkosyöpä, radonpölytyksen oli keskitään alipäässä, ja vastaavasti korkean radonpölytyksen alueella keuhkosyöpä ilmantuuta oli keskimäärästä alhaisempi.

Tieto julkaistiin 1984 Radation Protection Doometry -lehdestä ja jaksamäärä on ollut jatkuvi oella vironaattien sekä kopi-ettii alomassa tiedotusomina-nessa. Nyt maanostusta tutkimus-teen tekijä, professori Cohen, kehitti uusia jo 1994 ehtii peruste- lusa esittilykseen, joiden mukaan radonin riskiarvioissa on jot- an miä.

Voisiko professori Cohenin tuloksista sitten varmasti vetä se johtopäätös, että radonaalisen vähenetä keuhkosyöpän määrät? Tällaiset, us ekologiat tutkimukset ovat epäluottotavia, koska niissä ei voida ottaa kaikkia sekoittavia tekijöitä huo- rimpa. Vaikka em. Suomen ko- keva tieto on ollut riskiarvioita tekvien kansainvälisten tiede-

myörymisen tiedossa jo toiste- kymmentä vuotta, ei sen ole kat- soitta todistavan mitään, vaan ar- vion perusteella käsitömmäisen epidemiologian tutkimuksessa saatuihin riskiarvoihin.

Arvio siitä, että radon aiheut- taan Suomessa vuosittain 400 keuhkosyöpätapausta, on Kans- sauvallisen säteilysuojelukomis- sion (ICRP) riskiarvion mukai- nen. Monet kansalliset arviointir- yhmät ovat arvioineet riskin vie- liksi suuremmaksi.

Ruotsissa julkaistiin vuosi sit- ten laaja epidemiologinen tutkim- mus, joka oli tehty kaikin puolia oikeakoppisesti, us tapaus-verrok- kimenetelmällä. Tulokset julkaiti- ntiin tänään vuoden tammikuussa myös arvostetussa The New Eng- land Journal of Medicine -lehdessä. Sen mukaan sinänsä noin 10 prosenttia Ruotsin keuhkosyöpä- tii olisi radonin aiheuttamia. Te- kiä sitte pölytyt tää arvioita en- näksii uusia liian pölytyt ja uskovat oikeamman arvion olevan noin 15 prosenttia.

Kun tätä sovelletaan Suomen oloihin ja otetaan huomioon, että keskimääräinen radonpölytyksen on noin 15 prosenttia korkeampi kuin Ruotsissa, päällyttää radonin aiheuttaman keuhkosyöpän määrää arvioitavissa melko lähelle ICRP:n mukaisia arvoja 400 vuodessa.

Suomessa noudatettavaa strategia- ta valaissa on annettav: suu- rempi jano sellaiselle tutkimak- selle, joka on tehty oikeakoppisel- lä menetelmällä maassa, jossa

olosuhteet ovat samantapaiset kuin Suomessa Suomessa on käynnissä Ruotsin tutkimassa vie- lliä hiukan laajempi epidemiologi- nen tapaus-verrokkitutkimus, josta tulee varmankaan tulla vai- kuttavaa myös vironaattien strategiaan.

400 radonin aiheuttamaa keuh- kosyöpää koskeva arvio on ulko- maisia vertailukohtia ajatellen voinn mahdollinen. Arvonsa se tu- kaa on huomoonni kuu muutakin ympäristösaasteiden riskiarvot. Siinäpaan kansalla se uute yhti- hynä oli 40 vuodessa. Kun kor- keimman radonpölytyksen suun- nissa suoritetaan keskimäärin 7 500 mk maksava radonkorjaus, vuodessa suunnon nykytasa ja tie- lovien asukkaiden riskit pienene- tään. Jos 400 vuotuisen tapausku- nnon perästä puolesta tulee yh- den keuhkosyöpä ohjeksi mak- samaan 100 000–200 000 mk. Jos 40 on oikeampi arvio, tulee lunastaa 1–2 miljoonaa, joka se- kaia ei vielä yhtiä muia vasta- vaanlaisia laskemissa käytettyä summia.

OLLI CASTRÉN
laboratorionjohtaja
Säteilyturvakeskus
Helsinki

■ HS:n melipidessä on joh- dettu kajoitaja huihaan säätyin- heittävaikutuksesta ja erityisesti radoniläsnästä ja keuhkosyöpän välisestä yhteydestä (6. 4. Märten Brenner) ja 8. 4. Erko Vasuramo). Kirjoittajat yrittävät osoittaa, että radon ei voi Suomessa aiheuttaa

400 keuhkosyöpätapausta vuodessa.

Tässä yhteydessä on otta kantaa siihen, onko 400 tapaus lopullisesti oikea luku. Yrtäms on kuit- teikis se, että Säteilyturvakes- kuskes arvio on rationaalinen. Otetampaa yksinkertaistuksen vuoksi, että Suomessa ilmantuuta vuosittain 2 000 keuhkosyöpä- tapausta, ja että 90 prosenttia niistä on tupakkoiljoilla. On täysin mahdollista, ja oletama olevan epidemiologisen ja säteilylogi- sen tiedon perusteella jopa laulavaa, että 20 prosenttia tupakkoil- joiden keuhkosyöpästä olisi jättä- syntymättä, jos he eivät olisi istu- muneet radonille. Esimällä ra- doniläsnä voitaisiin siten arvio- ttaa hyviä ehkäisiä 400 keuhkosyöpä- tapausta vuodessa.

Ehdollis mentyynsi läheyn pe- rusteella on myös linnein selvitä, että keuhkosyöpäilmantuuden kartta muistuttaa tupakkoilkar- taa eikä radonkarttaa. Löskä on hyvä muistaa, että paikka, jossa vähenetä on alituttu radonille, ei vähenetä ole sama kuin se, josta hän asuu säteilyturvassa keuhkosyöpää.

Radonin merkityksestä keuh- kosyöpän aiheuttajana Suomessa saadaan ratkaisevaa lisätietoä, kun Säteilyturvakeskuksen ja Suomen Syöpätutkimusten yhteis- teistyksessä valmistuu lähiöko- na.

TAPO RYTÖMÄÄ
tutkimusjohtaja, professori
Säteilyturvakeskus
Helsinki

MELIPIDE

STM aktiivinen radonin vaarojen torjunnassa

■ Helsingin Sanomien melipide- sivulla on 6. 4. 8. 4. ja 11. 4. keuhkotietu radonin terveysva- roista. Koska keuhkotietu on viitattu sosiaal- ja terveysministeriön roolin radonin terveysvaarojen torjunnassa, haluan muistuttaa siitä seuraavaa.

Sosiaal- ja terveysministeriö on sen alaiset lähtökset kuten säteily- turvakeskus ja entinen lähiö- hallitus ovat osallistuneet aktiiv- isesti radonin terveysvaarojen torjuntaan jo vuosikymmenen ajan.

Sosiaal- ja terveysministeriön ohjelmallisuus lähtökset antoi vuonna 1985 radonin kokeva ohjelmien, jossa määrällisiä radonpölytyksen enimmäisarvoja ja kehoitettiin kunia selvittämään yhteistyössä säteilyturvakesku- sen kanssa kunnan alueella mah- dollisesti esiintyvii radonhaitta- alueet, eli alueet, joilla asuntojen määrävön Ohjekirjeen välistä esin- määrvön Ohjekirjeeseen kehoitettiin vironaattissa myös opasta- man radonmittauksien käyttösu- menpiteiden välillä.

Kunten terveyslautakunnat ovat vuodesta 1985 lähtien teh- neet yhteistyössä säteilyturvakes- kuskes kanssa korkeiden radon- pölytyksien löytymiseksi. Säteily- turvakeskus laatii kunnalle tai kansanterveysvirasto kunta/yhtymäl- le radonmittausuunnitelman, jonka avulla pyritään paikanta- man kunnan radonmittauksiin. Tässä Koska rakennuksen alla oleva määpiti on tärkein huone- tilan radonpölytyksen vaikutta- va tekijä, suunnitelmat perustu- vat geologien kartoitukseen ja suoritettuihin huoneilman radon-

mittauksiin. Samalla saadaan ar- vokasta tietoa uudisrakentamisen varten.

Tällä hetkellä radonmittausu- nneitelmat kattavat lähes kaikki Suomen kunnat. Kunnan to- teutettua mittausuunnitelman säteilyturvakeskus arvio läsnä- lausten tarpeen ja rajaa radon- haitta-alueet. Tällaisia raportteja on tähän mennessä laadittu noin 70 kunnalle. Vuodesta 1986 lähtien kunnat ovat toteuttaneet suun- nitelman mukaisia suostoja ra- donmittauksia kahdeksaa mi- litäksäytinä yhteensä noin 25 000 kpl.

Sosiaal- ja terveysministeriö on asettanut ohjartov asuntojen sisällään radonpölytykselle. Ohjartov vanteille rakennuksille on 400 Bq/m³ ja uusille 200 Bq/m³.

Sosiaal- ja terveysministeriö rahoittaa myös radonkorjautus- kinnasta. Tällä korvataan vilmutus arvio Suomen radonkorjosten tarpeesta ja kustannuksista. Sen mukana suunnon korjauksille on 400 Bq/m³ ja uusille 200 Bq/m³ ja enimmäisarvion yrittävien asuntojen luku noin 66 000.

Sosiaal- ja terveysministeriö ajatetta myös yhdessä lääninhallit- luseen kanssa koulutuslähtöis- tä radonitiedon lisäämiseksi. Tästäuuden on tarkoitettu kaunten terveys-, rakennus- ja kaavoitus- vironaattissa, yksityisille raken- nusliikkeille, rakennusmittail- joilla ja kielellä tahansa radonista kiinnostuneille kansalaisille.

JORMA TIKKANEN
ylläkäri, dosentti
sosiaal- ja terveysministeriö
Helsinki

MELIPIDE

Missä radon riehuu?

■ Palattua matkalta luumekiniinnolla Helsingin Sanomista (11. 4.) Säteilyturvakeskuksen puheenjohtajan radonkehitysoyvästä, jossa esitettiin keskeisiä kaipa jatkokommentin

Professori Tapio Rytymään mukaan meidän 2 000:stä keuhkoyöpätyöpästä 90 prosenttia on tupakoitsijoilla ja 20 pros. eli noin 400 olisi länsit syntyneitä, elleivät he olisi ilmoittaneet radonille. Niiden lukujen perusteella hän pitää ilmeisen selvänä, että (radon)keuhkoyöpä ilmansuorituksen kautta maistuttua tupakoitajista eikä radonkartiasta. Siis kaikilla tupakoitsijoilla on radonkehitysoyöpärisiä asunpaikkasta riippumatta.

Mielestäni tässä on ajatusvirhe. Jos radonkehitysoyöpä syntyy sekä tupakan että radonin yhteisvaikutuksesta, voi siitä syntyä vain asunnoissa, joiden radonpitoisuus on korkea. (1) Jos ei mahdollista, että eteläisten sorharpujen radon ikäsi jollain merkittävä tavalla tupakoitajien keuhkoinen satojen kilometriä päässä sieltä, jossa ei ole radonia. On siis olemassa riskiväestö.

Riskiväestöön perustava arvo voidaan tehdä säteilyturvakeskuksen omista luvuista seuraavasti: Jos yhden asunnon korjauksessa 7 500 mk ja 400 keuhkoyöpätyöpästä 100 000–200 000 mk kasvainta kohti, merkittävää näin luvut noin 5 300–10 600 riskisuorasta. Jos asunnossa suoraan keuhkoinen väkän alle 2 henkeä, on riskiväestö noin 70 000–20 000 henkeä eli 0,2–0,4 pros väestöstä. Tästä väestöstä on odotettavissa vuosittain noin 4–8 tupakan aiheuttaman keuhkokuumeita Radonin väkän väkän näihin 10–20 pros. lisääksen eli

0,4–1,6 kasvainta vuodessa. Yhden radonkehitysoyövän esittämisen maksain noin 0,10–0,30 milj. mk.

Näin ajateltuna vuosittaisesta 2 000 keuhkoyöpästä ehkä 1 ehkä 400 voisi olla radonin aiheuttamia. Miksi säteilyturvakeskuksella on sellaisia säteilyturvakeskuksien yleisiä riskiväestöperusteita omia radonkehitysoyöpätyöpätyöselämissä?

Säteilyturvakeskuksessa viitataan Suomessa tehtyyn havaintoon siitä, että radonilla on matlamäki keuhkoyöpätyöpätyöselämissä. Alueesta oli jo 1980-luvun alussa viitattu julkaisussa Erityisen mietintäsi tutkitut ovat Kiinan korkean taustatason omaava alueen pienemmällä syöpäfrekvenssillä. Arvoväliset tutkitut (Löfke, Feinendogen, Investigative Radiology 5/1993) lausuttavat huomiotu siihen, että säteilyturvakeskuksien nykyinen opparekseenä. (1) säteily on laadullista, (2) säteilyturvakeskuksella on laadullista kaikilla asunnoissa, (3) matlamäki asunnoissa on eli mitään efektiä kuin korkeilla asunnoissa tasaita ei-olla vanhentunut.

He kiinnittivät huomiotu matlamäkiin säteilyturvakeskuksessa si pienten sädeannostusten terveydelle positiivisiin vaikutuksiin. He kiinnittivät radonitortunnan kustannuksiin ja ovat vähänsä muututtamassa säteilyturvakeskuksien opparekseenä toista kööbiä siihen, että myös teollisuuden väkänmuututtu muut lämmit ovat mahdollisia.

Tutkimusmaailma ei ole siis suinkaan yksimielinen pienten annosten väkänmuututtu ja niihin liittyvistä riskeistä.

ERKKI VAURAMO

lakiesittelyllisen jynkan
toimittaja
Helsinki

MELIPIDE

Radonkriittien kritiikkiä

■ Dosentti Erkki Vauramo on jatkanut pohdintojaan radonriskin suuruudesta (HS 30. 4.). Tästä yhteydestä hän on tullut antaneeksi luvun luhansuojottavan kuvan radonin torjunnan vähäisvähin toiminnan luonteesta ja esittänyt radonriskin suuruudesta optimaalisen laskelman, joka kyseensäläistää radonitortunnan kannattavuuden.

On täysin ymmärrettävää, että väkänmuututtu keuhkoyöpätyöpätyöselämissä "mikä on radonin vaikutus" -mikä, herättää epäilyksiä. Viitataan olemassa valmista maksimissaan paljon suurempa summa, säteilyturvakeskuksella on käsitetty viittu miljoonassa markassa joukkoläsnä yleisillatut. Mikä radonitortunnan voisi olla 50 kertaa halvempaa? Tähän on kaksi syytä. Toinen on, kesän tahansa, oivallitavissa

Kun asunnon radonpitoisuutta alennetaan, niin sen vaikutus tuottaa kaikkien asukkaiden riskin pienentämiseen koko sen aikana, jona asunnossa asutaan. Jos asunnon lämpöä oleva käyttöaika on 50 vuotta ja siinä asuu 3,2 henkeä (perheolosuhteiden keskimääräinen maksimiarvo) niin riskin pienentäminen 160-kertaisesti siihen nähden mitä yhden asukkaan vuotuisen riskin pienentäminen.

Tomara syy, joka tekee radonkorjauksen Suomessa erityisen edulliseksi, on se, että suuret radonpitoisuudet pyydetään myös riski pienentäen enemmän kuin pienin pitoisuuksiin ulmen-

leasta, vaikka korjauksensaatus on suoraan piirittin sama. Päätti että asuntujen radonpitoisuuksien keskiarvo on Suomessa korkeampi koko maassamme, ellei on olemassa, että suurten pitoisuuksien vaikutus keskiarvoon on vähäisempi. Jos eliminoitaisiin kaikki 400 Bq/m³ ylittävät pitoisuudet, joita on noin 66 000 asunossa, pienempi koko kansan radonriski noin 25 prosenttia. Käytännössä radonpitoisuutta ei saada nolliin, vaan sitä saadaan pienennettyksi noin 80 prosenttia, joka merkitsee sitä, että omistussuhteissa tällainen korjauksiohjelma pienentää koko kansan riskin korkeintaan 20 prosenttia.

Olettakaamme, että arvo 400:stä radonin vuotuisen aiheuttamasta keuhkoyöpätyöpästä on 7 500 mk maksava korjaus joka vuosi 80 tulevaa syöpätyöpästä, jotka ilmeisesti jokuks nykyisin on tulevien sukupolvelle elämänsä eli yhteensä noin sadan vuoden aikana Suorittamalla 66 000 asunossa keskimäärin 7 500 mk maksava korjaus ei panostamalla siihen noin 500 miljoonassa markassa ehkäistään siis kaikkiaan 4 000 syöpätapausta. Tästä tulee yhden tapauksen korjausyön hinnaksi 125 000 mk. Tämä yksikkökustannus pyydetään toteuttamaan osittain valtion rahoituksesta.

Vauramon laskelmissaan käyt-

ämällä malli olettaa, että riski on muulla mualla päititi tietyn riskiväestön asunnossa, jona se on 10–20 prosenttia tupakan aiheuttamasta riskistä. Tällaista riskiväestöä ei voida johtaa eikä riskiryhmän suuruutta arvioida Vauramon esittämällä tavalla säteilyturvakeskuksien taloutta ilmoittavista luvuista, vaan ne on muulla tavalla todistettava oikeiksi.

Olisi tehty havaittavissa, jos Vauramon väkänmuututtu malli olisi oikea. Suopissa harjoitettua suhteellisen mallin radonin torjunnan vähäisvähin toiminnan sijaista kritiikkiä tulaisiin kohdistaa ensen kaikkea Kansainvälisen säteilyturvakeskuksien ICRP:n natsiiviarvoon ja sitä välttäköyksenpiin Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston EPA:n ja jeteleitämmin NAsAn arvotilassa. Edellisen olii kerättävä, omiksi Ruotsin ympäristöhallituksen laioitteen tulikkujen tulokset eivät päititi myös Suomessa.

Olipa lopullinen totuus mikä tahansa, Suomessa päititi olla valmiudet löytää korkean radonpitoisuutta asunnosta ja taitoa pienentää niiden radonpitoisuutta tehokkaasti ja halvalla. Tämä on ainakin säteilyturvakeskuksessa suoritetun radonin kokeiden tutkimustulosten lähtien päititiä.

OLLI CASTRÉN
hallintouronvastaaja
säteilyturvakeskuksessa
Helsinki

MIELIPIDE

Radonkasvaimia ei näy syöpärekisterissä

■ Radonryöpäkeskusten käynnisti säteilyturvakeskuksen väle (HS 23. 3.) vuosittain ilmenevät 400 rakennusarkkitehtuurin keinoin ehkäisiviä radonkeuhkosyöpäistä, 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 kaikkien radonaltistusta ei voida estää, tulisi suunnitella estettävien radonkasvainten arvioinnissa käytä vain sitä kohdeväestöä, jonka syöpärisiä voidaan vaimentaa vaikuttamalla asuntojen radonpoistauksiin.

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

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

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

Mieliniussa 400 asunnossa esuu

noin 1 000 ihmistä. He saavat keskimäärin vuosittain 1 000 as/5 000 000 as x 2 000 tupakka-keuhkosyöpäistä 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 keuhkosyöpää asukkaan 2 000 asemasta. Onko nyt korjauksen hyöty tietoisesti vai vahingossa liioiteltu yli dekadilla?

Niin lausa sikana terveydenhuollossa 500 milj. mk on iso raha. Todellista sydäntätkuolehtiausta vähennettiin Puolijoh-Karjaan-projektilla paljon vähemmällä rahalla. Itseurimiehen ekkäisyprojektin verrattuna radonprojektin hinta on kaikkea. Sepehlyäimöiden ohitustilauksia voitaisiin 500 milj. mk:lla tehdä lähes 7 000, eli parin vuoden tarve. Näillä toimenpiteillä estetäksää zäta reaalisia kuolemia.

Ehkäisemällä laskennallista radonkasvainta ei näy syöpärekisterissä, laskelmat ovat ristiriitaisia ja ehkäisevä radonohjelma on kaalis. Säteilyturvakeskus vaikuttaa enemmän yhdessä asiaa liikkeellä kuin viikköksi asiantuntijaviranomaiselta Olinkohun nyt soisala- ja terveysministeriön asiantuntijaryhmien paikka.

ERKKI VÄURAMO

lakketieteilisen
fyysikan dosentti
Helsinki

MIELIPIDE

Aiheuttaako radon 400 keuhkosyöpää?

■ Vuosittaisesta kahdestatuhannesta keuhkosyöpätapauksesta noin 400 on radonin aiheuttama. Näin HS:n kuluttajapöytälailla viikkokeskiviikkona (23. 3.). Iloni on uutinen vastakkaisesta lietyksestä länsessä. Health Physics lehdessä marraskuun numerossa. Yhdysvalloissa 1 600 kunnassa on verrattua keuhkosyöpätapauksen radonaltistuksen ja tupakapolitron. Näin on tutkittu samalla tutkimusmenetelmällä kahta olettettua syöpäaiheuttajaa. Kivi ilmi, että tupakapolitron lisää keuhkosyöpään sairastumisen vaaraa, mikä onkin yleinen käsitys. Yllättäviä tuloksia oli, että huoneilman radonaltistus vähentää keuhkosyöpätapusta määrää melkein saman verran.

Syitä tähän yllättävään tulokseen liittyyte siihen, että radonin säteilyvaikutus rajoittuu vain kudoksen makrokoopiin. Siis lähtee keuhkoihin pääsääntöisesti radonin jälkiliittosäteilystä, josta syntyy keuhkon luonne onkin alihäikkäällä erikoisen. Se on enemmän rikkokäteen rakennetta kuin niuhon osuva vastara, siis tehokkaasti

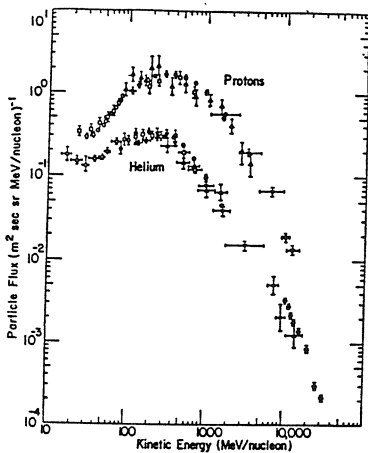
mutta alueluokiteltui rajoitetusti. Beette-, röntgen- ja gamma säteily, joista yleensä on kysymys säteilyhäädössä puheiden, pikemmin synnyttävät voimakkaasti vaikuttava kemiallinen yhdisteitä, joiden myrkyllisyys aiheuttaa solujen kuolemaa kaikilla kudoksissa.

Health Physics on laittavassa muun muassa Kokkakuulujen ja Säteilyturvakeskuksen kirjastossa. Lehdetä tulavat melkein kaikki Pohjoismaissa Säteilysuojusosastosta eikä viikkokeskiviikkona suomalaisista jäsenteistä, joten asiasta kiinnostuneen on helppo tutustua tähän mielenkiintoiseen marraskuun numeroon. Siinä on pitkä tauko keuhkosyöpään esiintymisestä, jossa kiy muun muassa ilmi, että radonia voina syntää leikkimäärän aiheuttamisesta.

HS:n kirjoituksessa on ilmeisesti esitetty virallisesti hyväksytty käsitys huoneilman radonin rikkestä. On siis todettava, että on suuri ero yhden perustellisen tutkimuksen tulosten ja viranomaisen noudattaman strategian välillä. Pääkö ihmiset pelottaa vai rauhoittaa?

MARTIN 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.)

↳ Eivät silti pääse maanpinnalle asti,
 vaan aih. sekund. säteilyä
 $E_{max} \sim 10^{11}$ eV oho!
^{b)} ytimistä: $E_{max} < 10$ MeV

↳ 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

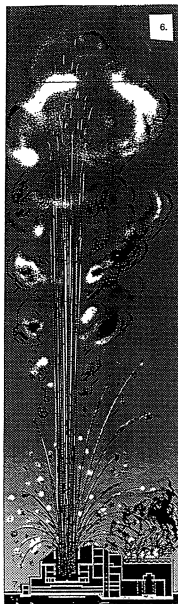
5.3. KEINOTEKOINEN RADIOAKTIIVISUUS

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

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.

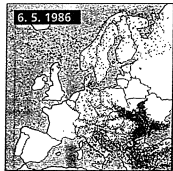
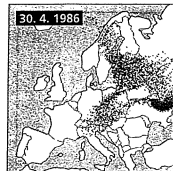
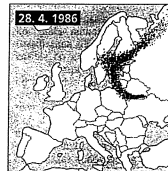
Eräiden Windscalen, Harrisburgin ja Tshernobylin reaktorionnettomuuksissa ympäristöön päässeiden radionuklidien määrät yksiköissä 10^{15} Bq verrattuna ydinkokeissa vapautuneisiin määriin [1].



Tshernobyl

26.4.1986

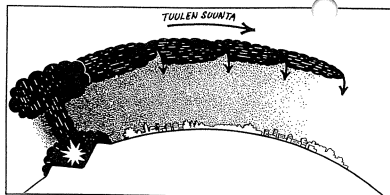
Radioaktiivisen päästöpilven liikkeet



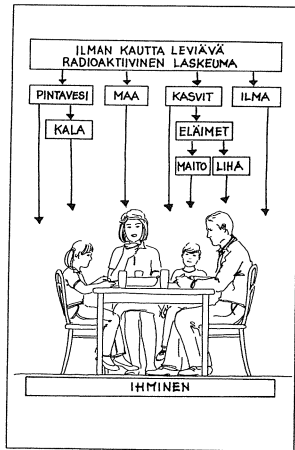
¹⁾Ilven aiheuttamat laskeumat vaihtelivat radioaktiivisen aineen ja sääolojen, etenkin sateiden mukaan.

- 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.
- Säteily sairauten 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.

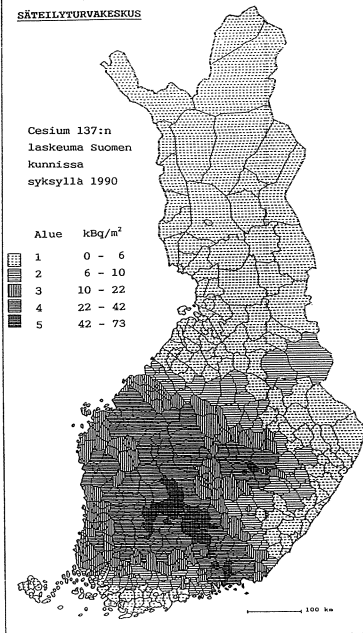


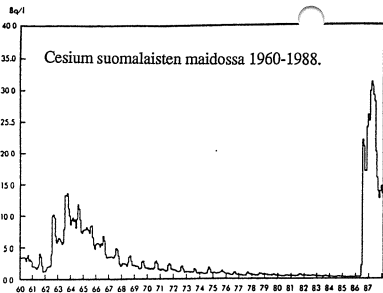
Radioaktiivisia aineita kulkeutuu laskeumasta ihmiseen elintarvikkeiden, juomaveden ja hengitysilman välityksellä

SÄTEILYTURVAKESKUS

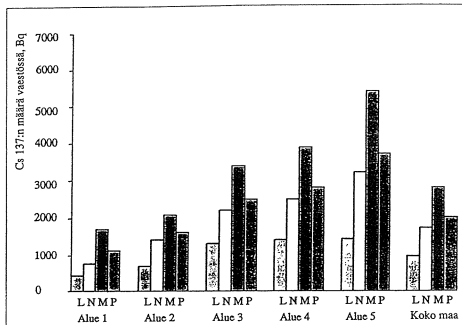
Cesium 137:n
laskeuma Suomen
kunnissa
syksyllä 1990

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





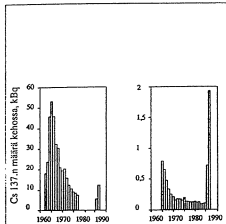
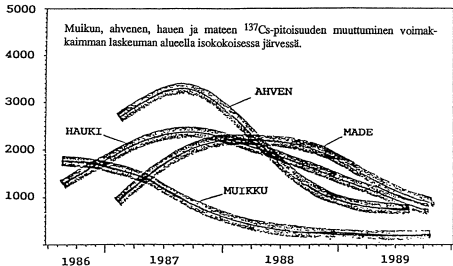
(187)



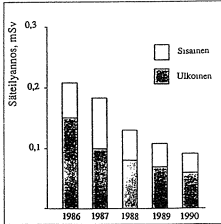
(188)

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 ollessuorinmilloin 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 laskeumaa saaneella alueella cesiumin määrä väestössä oli noin kaksinkertainen ja lievimman laskeuman alueella noin puolet koko väestön keskiarvoon verrattuna.

Inariista, Pudasjärveltä, Tampereelta, Viitasaarelta ja Ämmässaaressa 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.



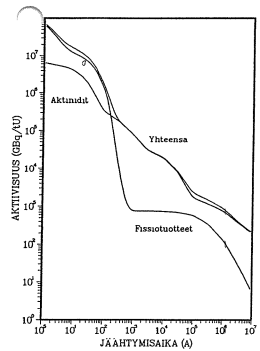
Cesium 137 marilaissa poroniehissä ja pääkaupunkiseudun vertailuryhmässä, johon kuuluu 16 miestä ja 10 naista. Huomaa, että asteikot ovat erilaisia



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

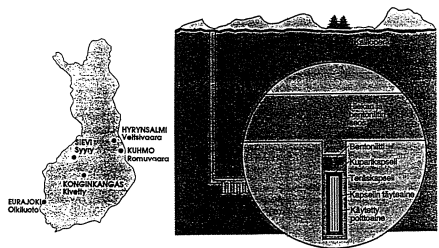
Laji	Päästöt [10^{12} Bq]	
	PWR	BWR
Päästöt ilmaan		
Jalokaasut	430	8800
^3H	7,8	3,4
^{14}C	0,2	0,5
Jodit	0,005	0,4
Muut	0,002	0,05
Päästöt veteen		
^3H	40	1,4
Muut	0,2	0,3

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 ydinpolttoaineen 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 helkaavan 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 suunnileen 100 polttoainesauvaa käsiteltävä nippuja.

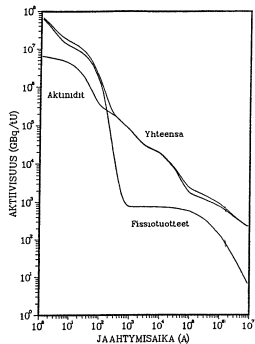
Ydinreaktorissa ^{235}U muuttuu halkeamistuotteiksi, joista suuri osa on radioaktiivisia. Useimmat niistä ovat lyhytikäisiä, mutta jotkut ovat hyvin pitkäikäisiä. Halkeamistuotteiden lisäksi muodostuu ^{238}U -isotoopin kaapattessa neutroneja ns. transuraaneja (esimerkiksi plutoniumia), joista monet 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 vietiään Venäjälle. Olkiluodon ydinvoimalan polttoainetta on varauduttu väliavaroitamaan uscan 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 tarkoin kiinteitä lasiin tai keraamiin aineisiin loppusijoitusta varten. Jätteiden kiinteystyöstä 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 tytärtyimiä.

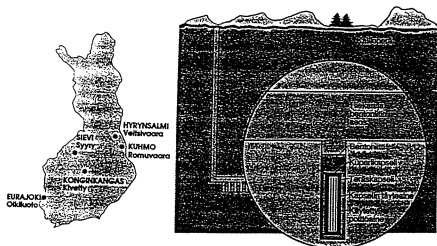


Kuva 5.9. Käytetyn ydinpoltoaineen aktiivisuuden ajallinen muuttuminen.

Kun otetaan huomioon nykyiset hyödyntämiskelpoiset uraaniesiintymät, termiset reaktorit voivat tuottaa käytettyä ydinpoltoainetta 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 kestäväin loppusijoitusolosuhteissa erittäin pitkään. Kaavailtu loppusijoitusy-
veys on noin 500 metriä.



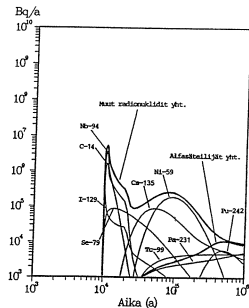
Kuva 5.10. Alustaviin sijoituspaikkaenkintuksiin valittujen tutkimusalueiden sijainti ja
käytetyn polttoaineen loppusijoituksen periaate.

Ydinjätehuollon yleiset periaatteet ja turvallisuusvaatimukset määrätään ydinenergia- ja
säteilylainäädinönsä. 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 suos-
ituksensa 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 luonnonraa-ainetta kohti.

Kun loppusijoitustilassa oletetaan olevan käytettyä polttoainetta yhteensä noin 1840 urani-
tonnia ja yhden uraanitonin valmistamiseen tarvitaan 7 tonnia luonnonuraania, 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.

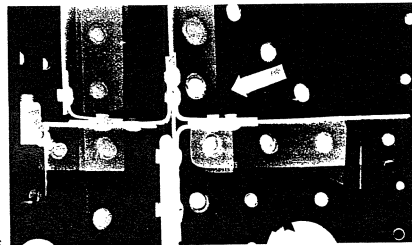
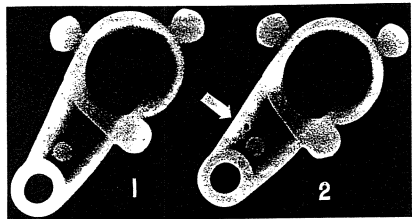
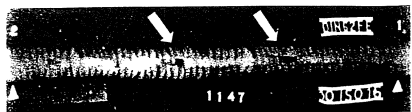
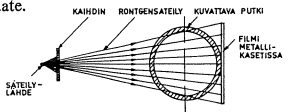


Kuva 5.11. Radionuklidien yhteenlasketut vapautumisnopeudet kallioperästä biosfääriin ver-
taluksenaarissa (kapseli hajoa 10 000 vuoden kohdalla).

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-
tointikapselia vaurioituisivat samanaikaisesti 10 000 vuoden kohdalla. Tällöin pitkäikäisten
fissio- ja aktiivisuusnopeuden vapautumisnopeus biosfääriin olisi enimmillään noin
 $9 \cdot 10^7$ Bq/a, mikä alittaa selvästi säteilyvaatimusten mukaisen yllärajan $10^9 - 10^{10}$ Bq/a. Pit-
käikäisistä alfasäteilyjoiden vapautuis 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.

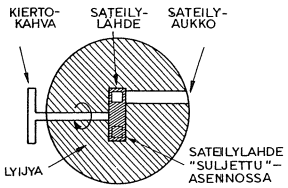
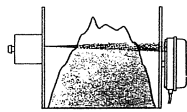
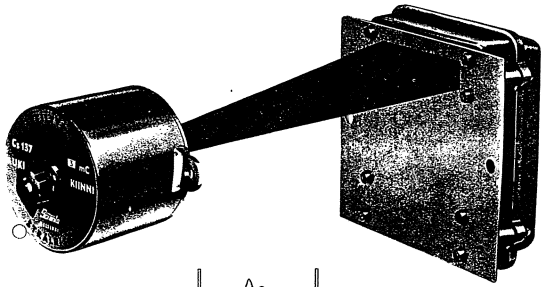
(133)



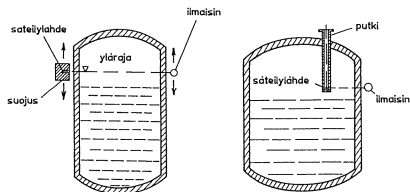
LÄHDE

(134)

ILMAISIN



Kuva 10.6. Radiografia- ja pinnankorkeusmittaria säteilylähteen rakenneperiaate.

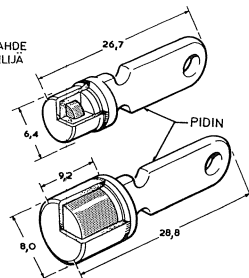
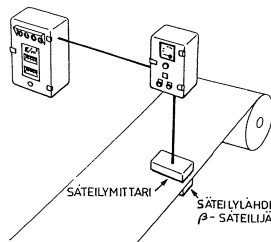


KUVA 7.19 Rajakytkin. (a) Säteilylähde säiliön ulkopuolella, (b) säteilylähde säiliössä.

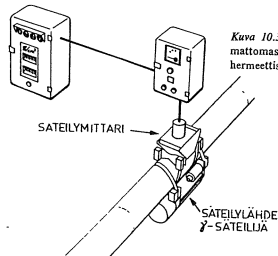
TAULUKKO 7.10 Teollisuudessa eniten käytettyjä säteilylähteitä.

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	rajakytkimet, tiheysmittarit, hihnavaa'at
⁶⁰ Co	5.27 a	γ	1.17, 1.32	pinnankorkeusmittarit, rajakytkimet, hihnavaa'at
⁵⁵ Fe	2.7 a	γ	0.0059	röntgenfluoresenssanalysaattorit
¹⁹² Ir	74.2 d	γ	0.136 - 1.157	gammaradiografia

NELIÖPAINOMITTI



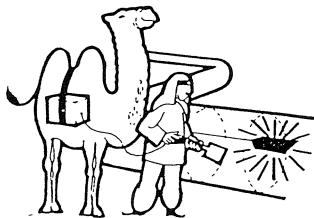
TIHEYSMITTAUS



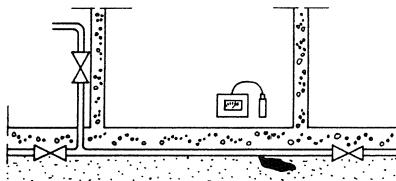
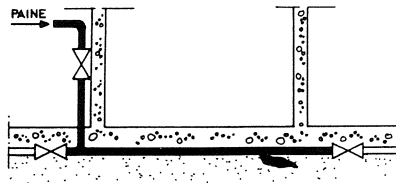
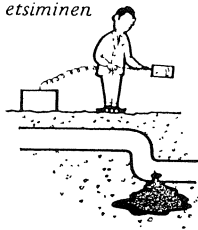
Kuva 10.3. Suljetun säteilylähteen rakenne. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu kuori on suljettu hermeettisesti hitsaamalla. (Mitat mm:jä)

Kuva 10.5. Neliöpainon ja tiheyden mittaamisen periaate.

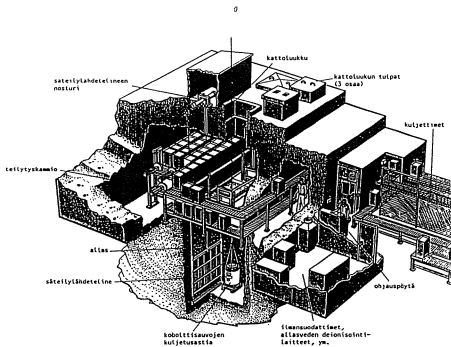
Putken tarkastus



Vuotojen etsiminen

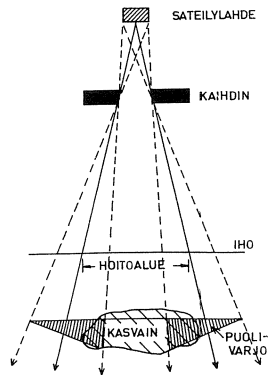
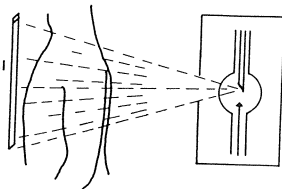


Kuva 10.7. Vesijohtovuototutkimuksen periaate.

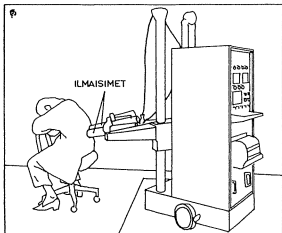


KUVA 7.20 Ilomantsissa käytössä olevan gammasterilointilaitoksen rakenne. Valmistaja AECL Industrial, Kanada.

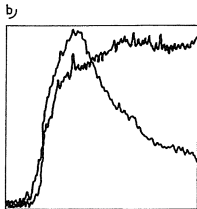
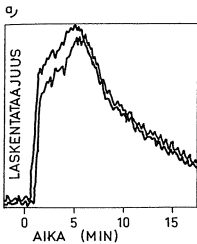
RÖNTGENFILMI TAI
LÄPIVALAISU-
VARJOSTIN



Kuva 1.22. Kaaviokuva kobolttikanuunan säteilykeilasta ja puolivarjon muodostumisesta.

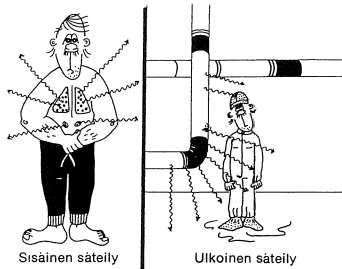


„Kuva 9.6. Mittausasetelma tutkittaessa munuaisten toimintaa.



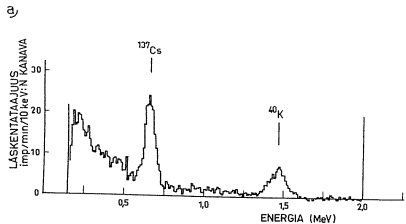
Kuva 9.7. Munuaisten toimintaa selvittäessä saatua mittauskäyrä. Kuvassa (a) molemmat munuaiset normaaliset, kuvassa (b) normaali ja epänormaali munuaisten.

Sisäinen ja ulkoinen säteily



Sisäinen säteily

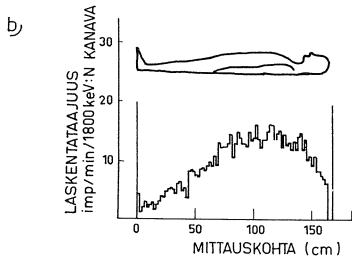
Ulkoinen säteily



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 säteilyttämistä koskeva asetetus 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 $0,1 - 0,2 \text{ kGy}$:n annos.

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

Rakenteista: (Suomi) ↔ Moninkertaiset turvasäteilysäilytyslaitteet

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

lauvojen 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 aiheuttavan 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

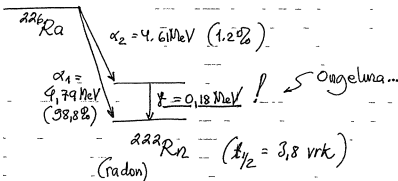
vain muutaman promilleksi tavusta-säteilyn aiheuttamasta.

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 1970-luvulla kuin esim. ydinkokeissa syntyneestä ihmisen koko elämänsä aikana vuosittain 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 läheltää α-säteilyä.

Lähde on koteloitu niin, ettei säteilyvaaraa.

Mutta: ei talousjätteisiin, vaan palautettava maahan tuojalle!

Mutta tällaisistakin on tehty:

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

joka viranomaiset pystyivät säteilymittailla 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 Selkäränka -kisaaja:

missiehdokkaiden selkärangan röntgenkuville oli oleellinen rooli valintaa suoritettaessa ...

↳ kun se kiellettiin, on päätös perustettava siihen, mitkä pin-nalla näky ...

- läiköiden ulkoeteisessä saattoi olla lämpövalaisulaitteet vanhaa estämiseksi

↳ nykyisin vain lentokentillä ja sielläkin vain tavaroille ...

Säteilyn käyttö lääketieteessä

(2/10)

Esim. vielä n. 84 Suomessa tehtiin

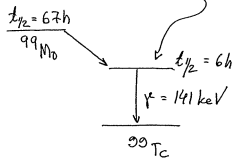
- n. 4,6 milj. röntgentutkimusta
- erilaisia isotoppi tutkimuksia n. 100 000

↳ 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 v sitten tyypillisesti 2 mSv)

Mutta esim.

verisuoni kuvaukset ja tietokone tomografia

↳ tyypilliset annokset n. 50 mSv

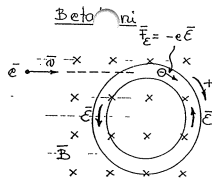
Mutta myös,

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 hiukkaskiihdytin, jossa käytetään hyväksi induusoituvaa SMV:ää.

Ontto 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. induusoituu 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).

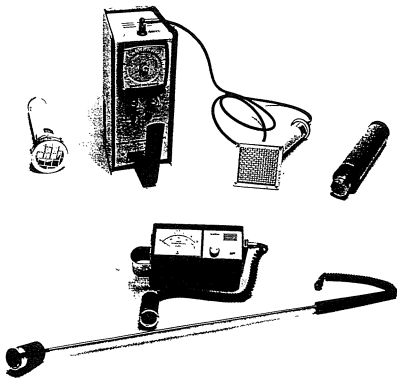
$$\begin{aligned} \text{Esim.} & \left\{ \begin{array}{l} \Delta E = +400V/\text{kiertos} \\ 250000 \text{ kiertosta} \times 400V \rightarrow 100 \times 10^6 eV \end{array} \right. \end{aligned}$$

Sovelluksia: sädehoito, fyysikan tutkimus, etc.

9. Säteilysuojelu

213

Kuva: Pentasaastutuksen tarkkailumittareita Yhdistyneillä tuokeilaskuri, alhalla geigerlaskuri.

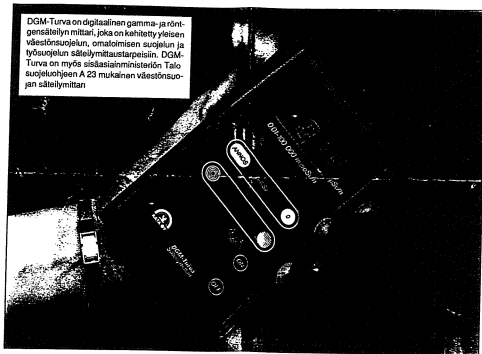


SÄTEILYMITTARI DGM-TURVA



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 näppäintoinnit 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 tiivissä yhteistyössä säteilyalan viranomaisen ja asiakkaiden kanssa vastaamaan vaativanikin ammattilaiskäyttäjien tarpeita. Sen luotettavuus ja kestävyys on testattu Säteilyturvakeskukseen ja VTT:llä (VT: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 kansainväliseen IEC 949 standardiin.

Monipuolinen

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

Isäkei käyttöä voi itse asettaa hälytysrajat sekä annosnopeudelle että kertuvälle annokselle. Monipuolisten toimintojensa 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

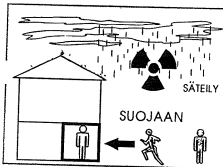
Yksikkö: Sievert (Sv)
Säteilyannos kuvaa säteilyn vaikutusta. Kun tietty määrä säteilyä on vaikuttanut esimerkiksi ihmiseen, puhutaan säteilyannoksesta, jonka ihmisen on saanut. Koska Sievert on erittäin suuri yksikkö puhutaankin yleensä milli- (mSv) tai mikro (µSv) sieverteistä.

Suojautuminen vähentää ihmisen kohdistuvaa säteilyä ja estää radioaktiivisten aineiden joutumista elmistöön. 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.

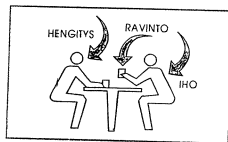
Ulkoiselta säteilyltä suojautuminen



Sisäiseltä säteilyltä suojautuminen

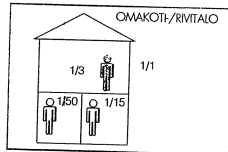
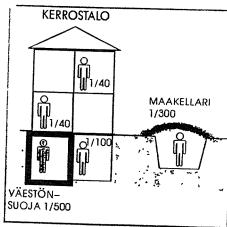
Pyrittävä estämään radioaktiivisten aineiden pääsy elmistöön

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



Rakenteiden antama suoja säteilyä vastaan

Suojakerrokselliset kellariva, säteilyn ollessa ulkona 1/1



Parannettu kellarisuoja
Hiikkakerros 15-20 cm
maa- tai kumiväli
Suojastoos 1/50
Kellarisuoja
Suojastoos 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 suhteellisen 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 (epörg)	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