

Radioaktiivsus ja ioniseeriva kiirguse vastastikmõju ainega

E. Realo

Enn.Realo@ut.ee

TÜ Füüsika Instituut
tuumaspektroskoopia labor



Institute *of* **Physics**

Ioniseeriv kiirgus

Kiirgus	Kiirgusvoo pindtihedus (W / m ²)	Kiirguskandjate energia (eV)
Päikese kiirgus (UV, nähtav ja IP kiirgus)	100	1
Ioniseeriv foonikiirgus, sh radionukliidid kosmiline kiirgus	10 ⁻⁹	10 ³ ... 10 ¹¹ 10 ³ ... 10 ⁷ > 10 ¹¹ max .. 3 x 10 ²⁰ = 50 J = 5 kgm !!!

Universaalsed vastastikmõjud

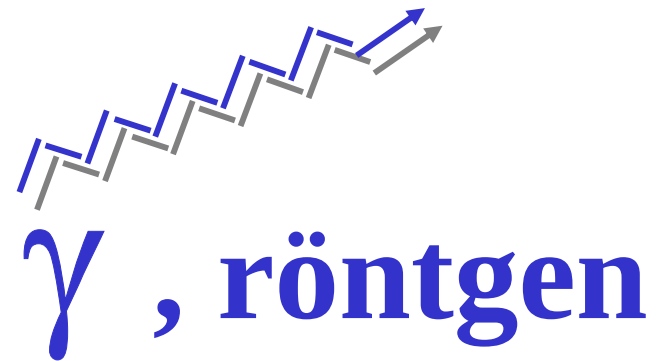
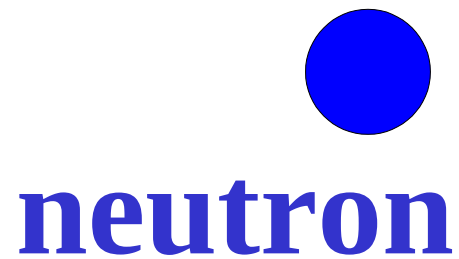
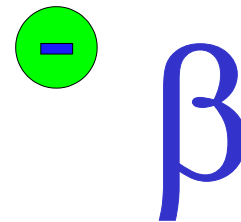
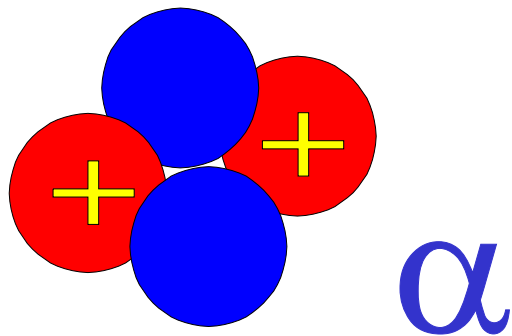
tugev (tuuma)

elektromagnetiline

nõrk

gravitatsiooniline

Ioniseeriva kiirguse liigid



Radioaktiivne aatom

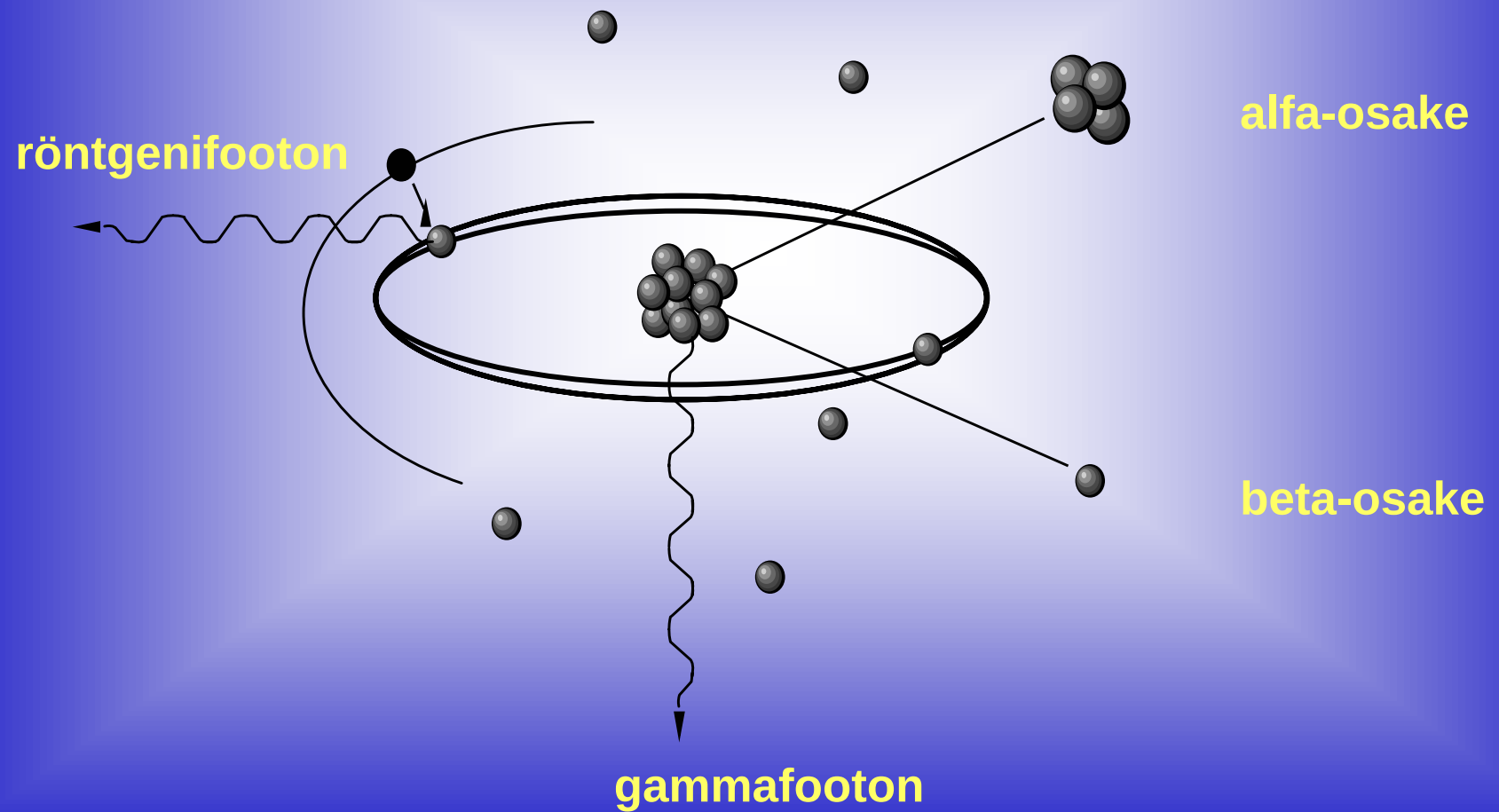
Ioniseeriv kiirgus

röntgenifooton

alfa-osake

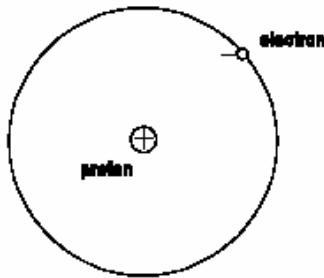
beta-osake

gammafooton

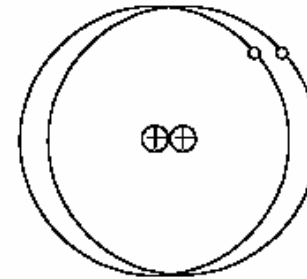


Aatom ja tuum

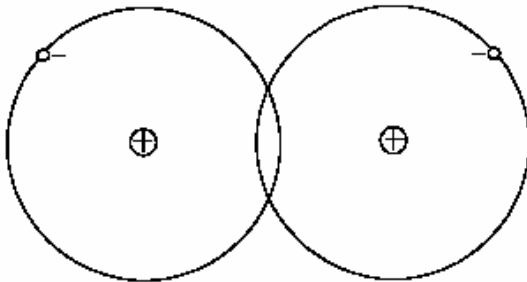
$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



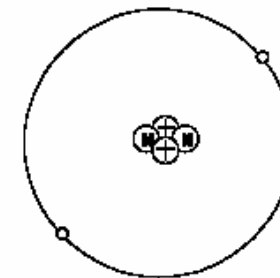
Vesiniku aatom H: Coulomb'i jõud -e ja +p vahel



Heeliumi aatom?: Coulomb'i jõud +p ja +p vahel purustab tuumasünteesitud tuuma (**tuumalõhestumine**)



Vesiniku molekul H₂: Kovalentne side kahe aatomi vahel



Heeliumi tuum: neutronid seovad prootonid (**tugev vastastikmõju nukleonide vahel**)

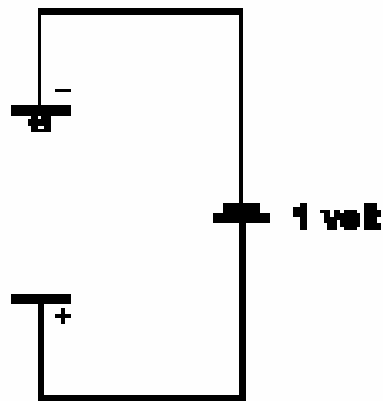
Energiaühik eV

1 eV on kineetiline energia, mille elektron saab kiirendusel potentsiaalide vahes 1 V

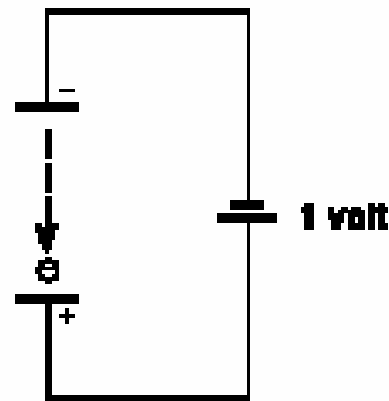
$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$



0 eV



1 eV

Aatomi ehitus

1899

J.J. Thompson - “ploomipuding”

ca 1900

Ernest Rutherford - tuumad on väga väikesed

1900

Max Planck - kvandid (footonid) kiirguses

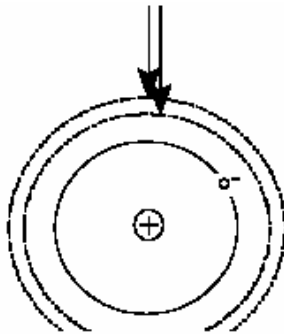
1913

Niels Bohr - H-aatomi kvantteooria

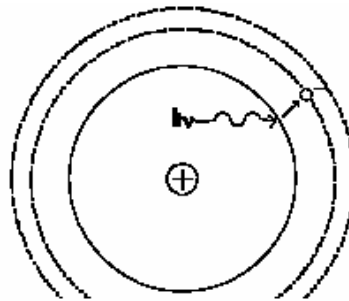
Footoni energia:

$$E = h\nu, h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eVs}$$

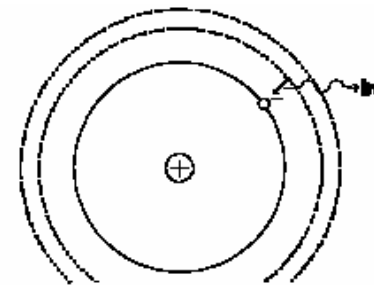
lubatud ergastatud seisundid



Bohri aatom: e **põhiseisundis**



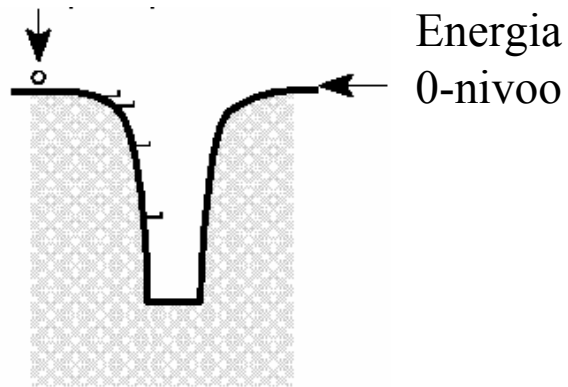
Ergastus: e **põhiseisundist**
ergastatud seisundisse footoni
neeldumise tulemusel



Kiirgus: e kiirgab footoni ja langeb
põhiseisundisse

Energianivooode diagramm: H

Vaba elektron



Auk H-aatomi
põhiseisundis

Nõrgalt seotud
elektron

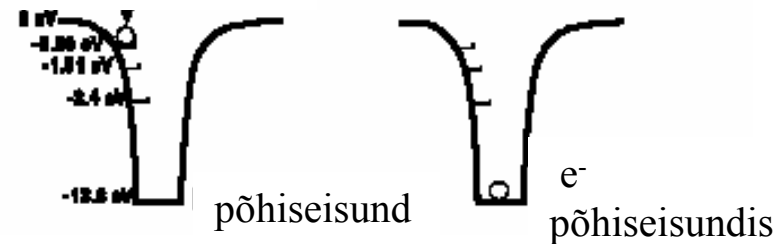
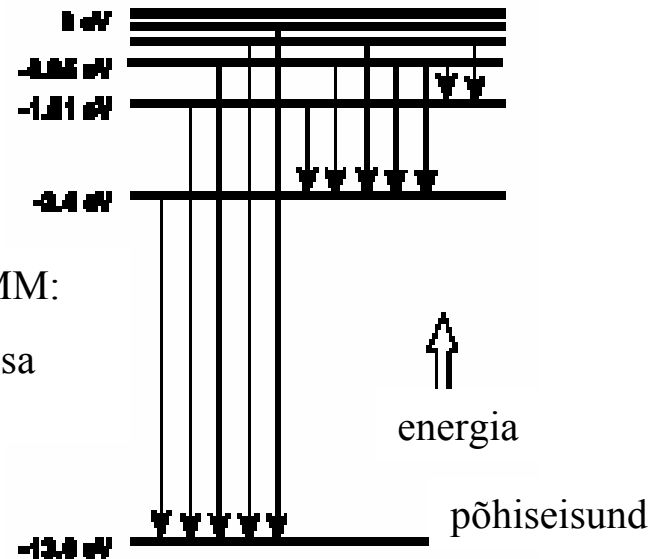


DIAGRAMM:

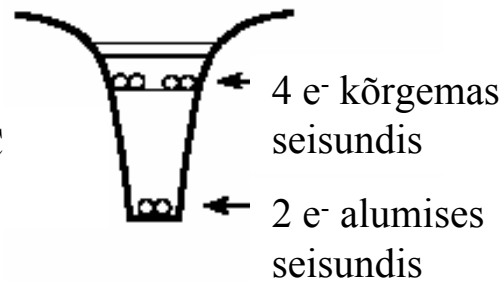
nivood ja osa
siirdeid



Raskemad aatomid

^{12}C

Süsiniku ^{12}C
aatom



Pauli printsiip:

**kahel elektronil ei saa
olla täpselt ühesuguseid
kvantarve**

Rasketes aatomites:

tugev elektriväli

potentsiaalkaev sügav

sise-elektronid tugevalt seotud

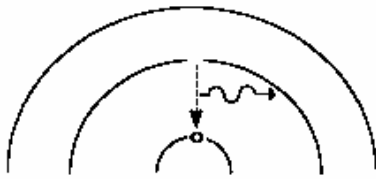
**energiavahed alumiste nivoode
vahel suured**

Elektronkattes erinevad elektronide
orbiidi kuju, orientatsioon ja
elektronspinn.

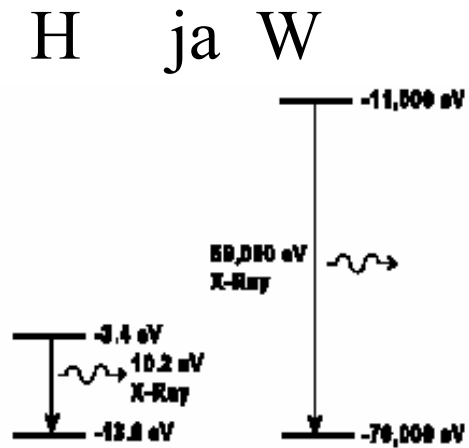
Erinevate orbiitide v. energiaseisundite
arv elektronkattes on määratud 4
kvantarvuga. Nt alumisel nivool 2
spinni poolest erinevat elektroni

Röntgenikiirgus ja Auger' efekt

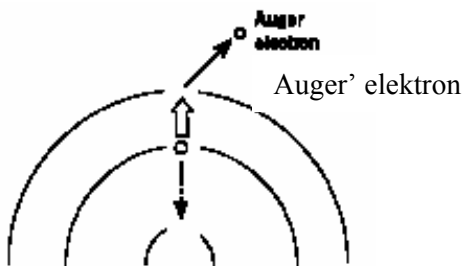
1. Elektroni siire ergastatud nivooalt madalamale nivoole - **röntgenifootoni kiirgamine**



*Röntgenifootoni kiirgamine -
siire põhikattele,
karakteristlik energia*



2. Elektroni siire ergastatud nivooalt madalamale nivoole - energia ülejäägi andmine teisele orbitaalelektronile ja selle - **Auger' elektroni - kiirgamine** aatomist

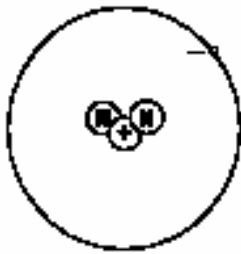


*Auger' elektroni kiirgamine - siire põhikattele,
karakteristlik energia - seosenergia*

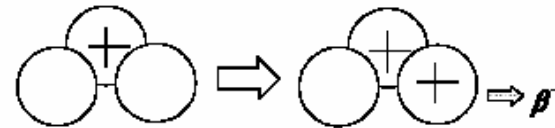
*Elektronide käsitus lainetena ja energiasiire
elektronide kattuvate lainefunktsioonide vahel*

Tuumamuundumine

Radioaktiivus – iseeneslik tuumamuundumine, mille tulemusena tekkivad uued elemendid



Triitiumi aatom ^3H : vesiniku radioaktiivne isotoop



Beetalagunemine: neutronite liig, st $n \rightarrow p + e$ kiiratakse elektron ja antineutriino: $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}$

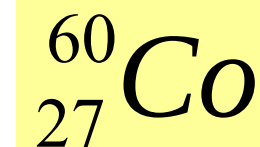
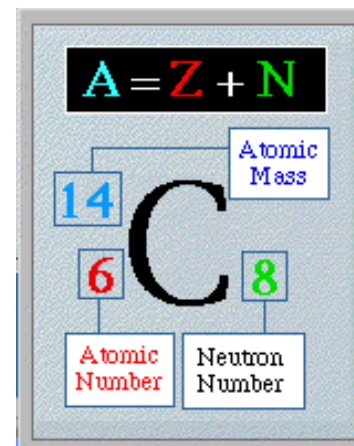
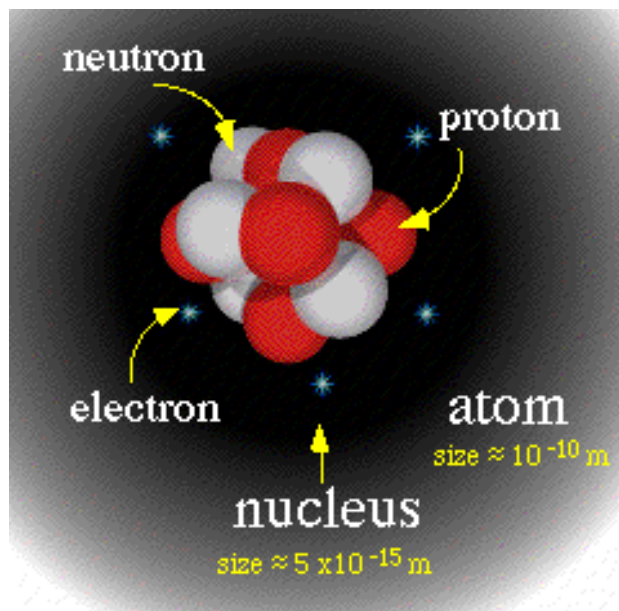
Radioaktiivsus on neutronite ja prootonite arvu tasakaalustamatuse tulemus tuumas - liiga palju neutroneid või liiga palju prootoneid, tagajärjeks - tuumamuundumine, transmutatsioon

Laengu jäävuse seadus: enne ja pärast muundumist laengud võrdsed

lähtetuuma mass > lõpptuuma ja osakeste masside summa

– vabaneb energia $E = \Delta m c^2$

Radioaktiivsus - termini juurutas Marie Curie, 20.saj. algus. Radionukliid - radioaktiivne nukliid



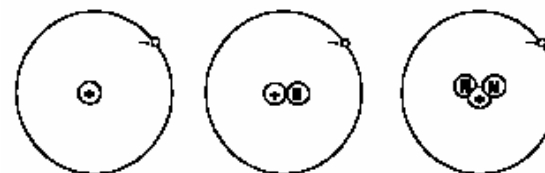
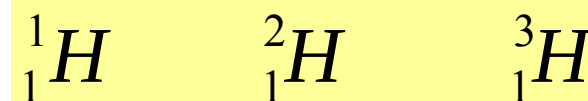
n & p ARV STABIILSETES TUUMADES

Nukliid	p arv $Z=p$	n arv	aatommass $A = n+p$
He	2	2	4
Ne	10	10	20
Ca	20	20	40
Zn	30	34	64
Sn	40	50	90
Nb	60	90	150
Hg	80	122	202

Koobalt-60, Co-60

aatommass A (nukleonide arv)

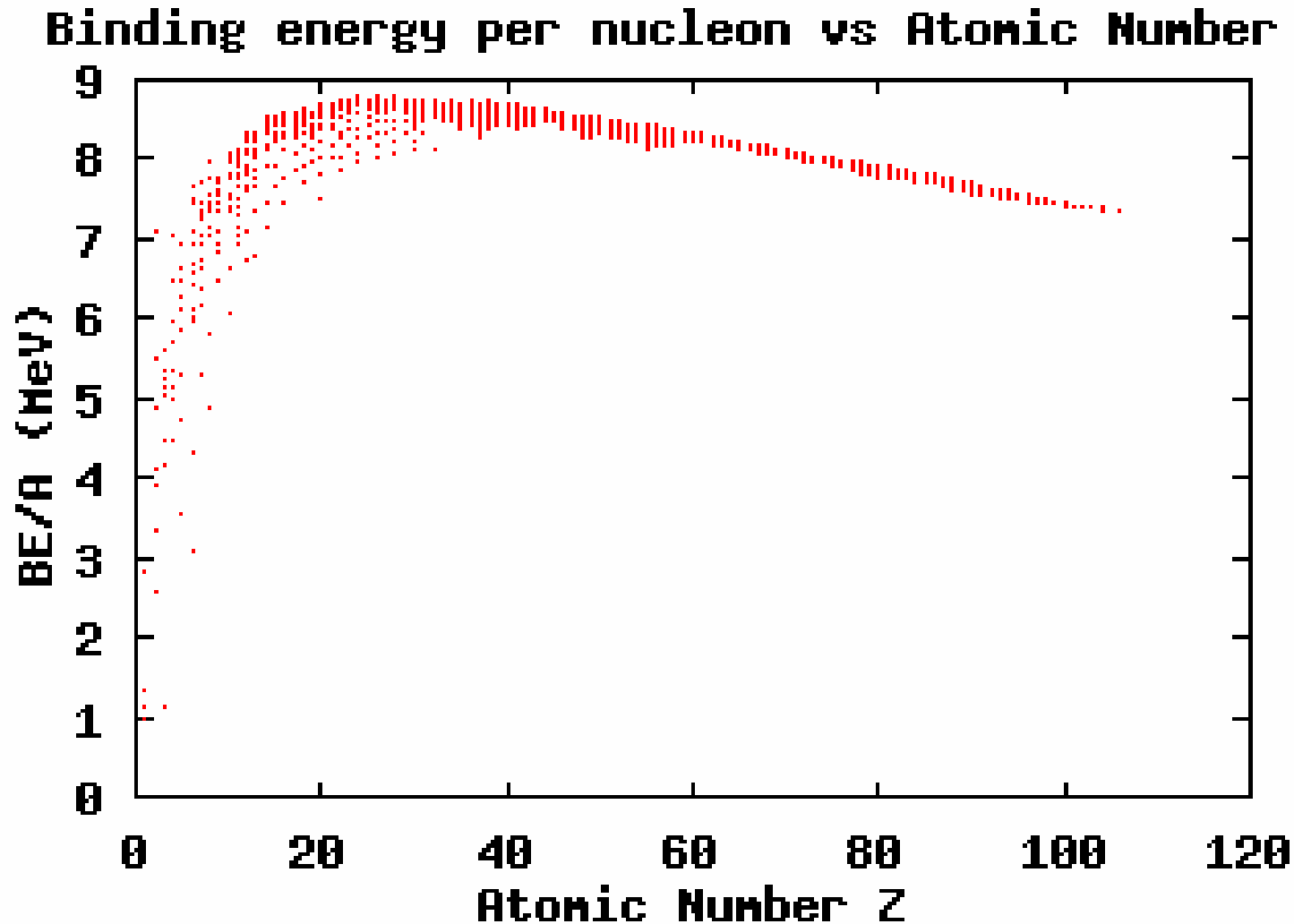
aatomnumber Z (p arv)



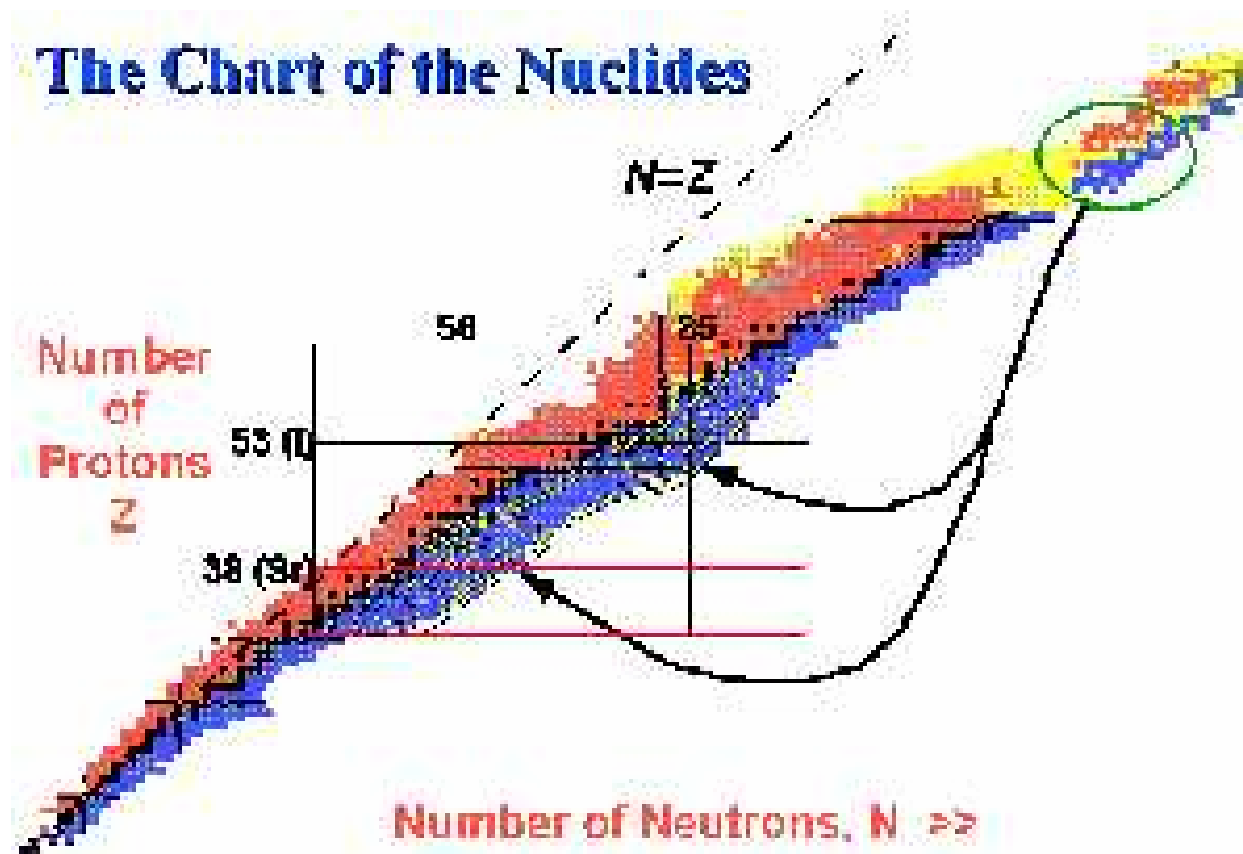
Vesiniku isotoobid

vesinik deuteerium triitium

Nukleonide seosenergia



Z vs N



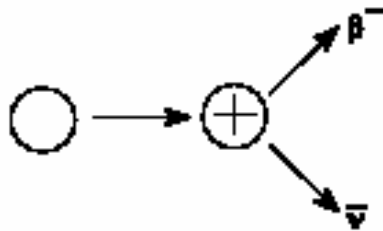
Beeta-lagunemine

Neutronite liig tuumas:

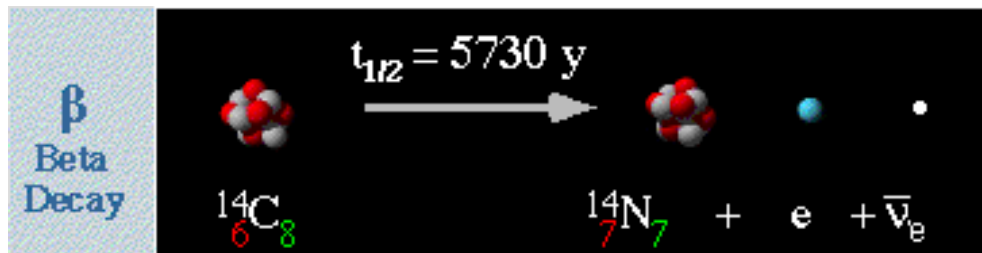
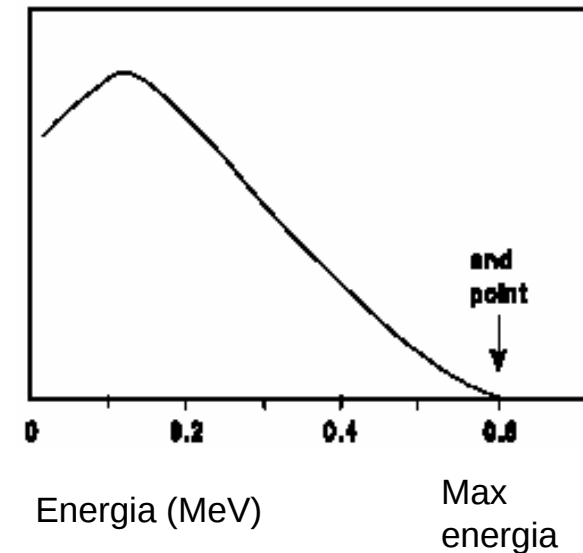
$$n \rightarrow p^+ + \beta^- + \bar{\nu}$$

Kiiratakse **beetaosake** (elektron) ja **antineutriino**

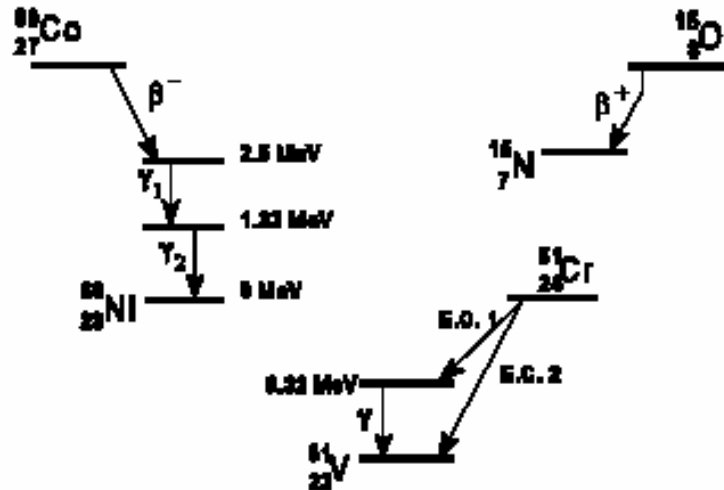
Vabanev energia jaguneb kahe osakese vahel - **pidevspekter**



β -osakeste arv



Lagunemisskeemid



• ^{60}Co beetalagunemine

• ^{16}O positronkiirgus

• ^{51}Cr e-haare (E.C.)

Nool paremale - Z kasvab

Nool vasakule - Z väheneb

Keerulistel lagunemisskeemidel toodud veel lisaks

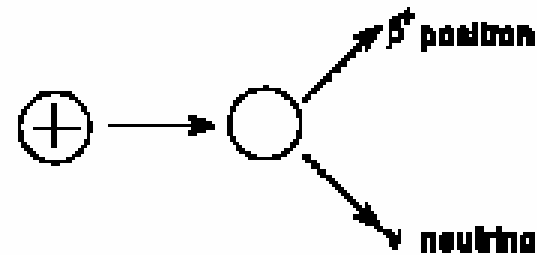
- erinevate siirete tõenäosused,
- gamma, sisekonversioon IC,
- poolestusajad jms

Positronlagunemine ja e-haare

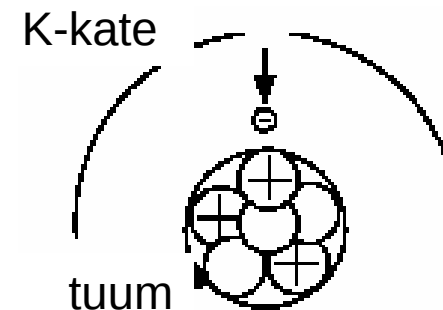
Prootonite liig tuumas:

$$p^+ \rightarrow n^0 + \beta^+ + \nu$$

1) Kiiratakse **positron**
(positiivne elektron) ja
neutriino



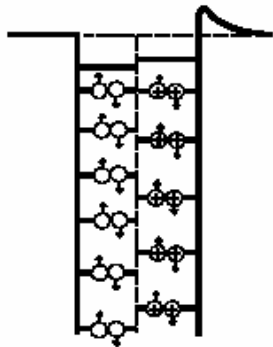
2) Tuuma haaratakse K-,
L-,... katte elektron,
kiiratakse **footon** ja
neutriino, **Auger'**
elektron, röntgenfooton



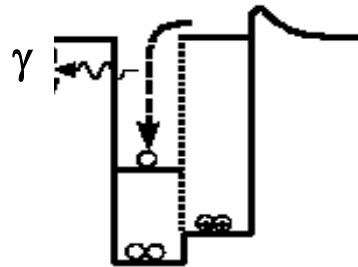
Gammakiirgus ja sisekonversioon

- Nukleonid tuumas on seotud sadu-tuhandeid kordi tugevamate vastastikmõjudega kui elektronid aatomis
- Tuumapotentsiaalikaev sügavam ja vahe energianivoode vahel palju suurem (keV ja MeV suurusjärgus) – **joonspekter** 5 keV .. 10 MeV

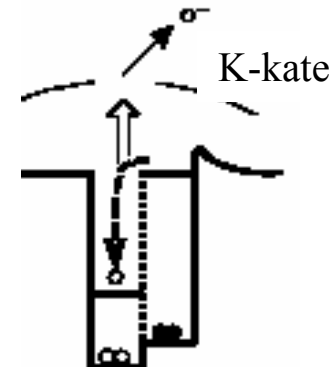
n ja p nivood



γ -footon



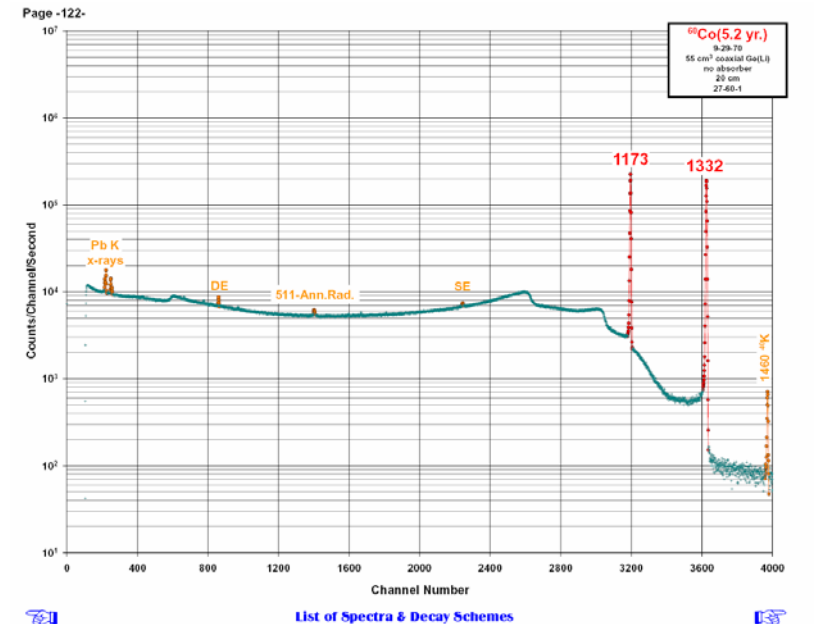
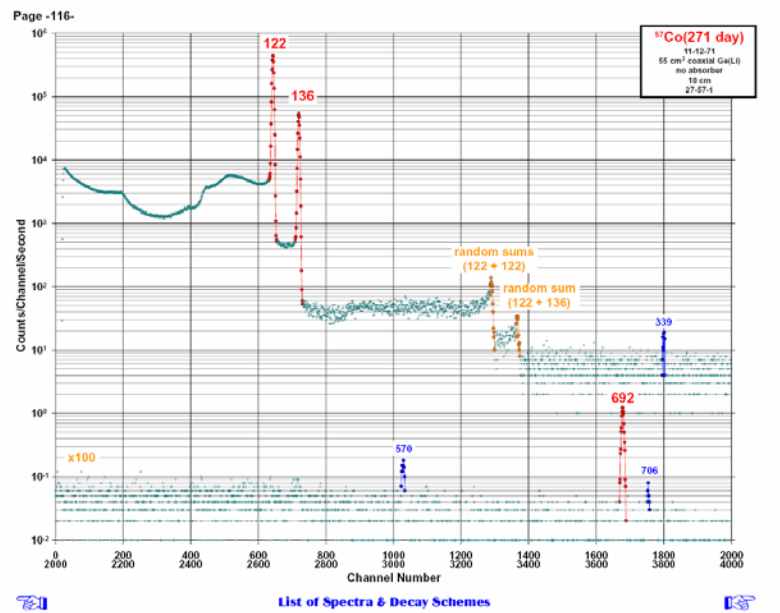
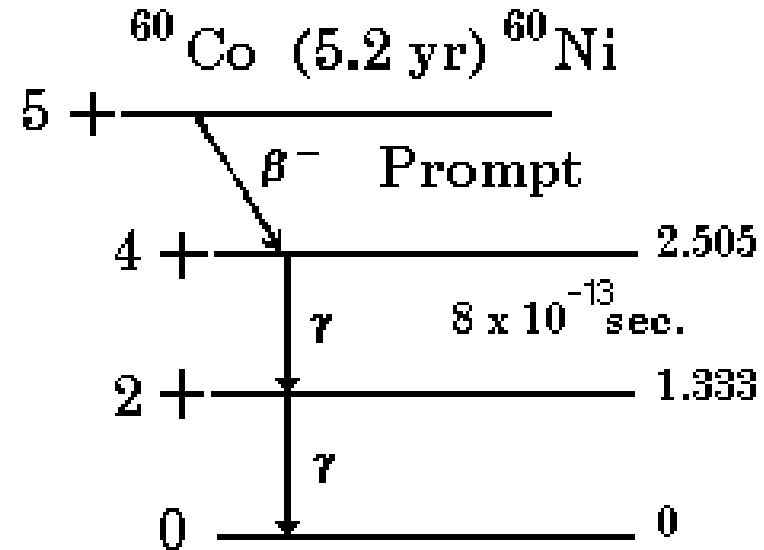
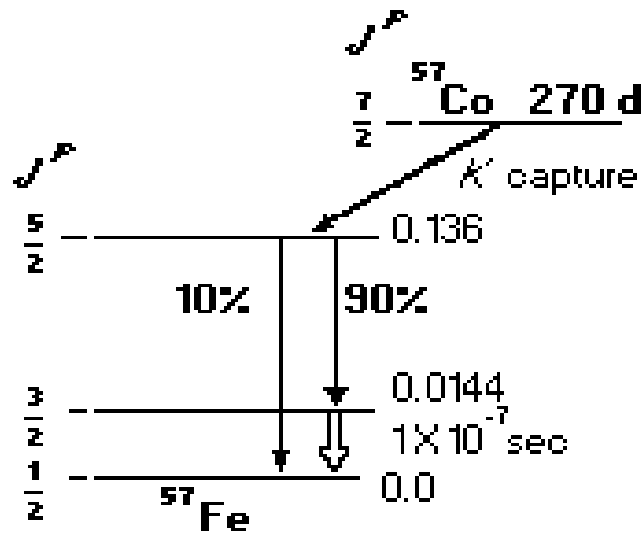
K-konversioon



Auger' efekti tuumaanaloog!

Isomeerid - lähte- ja lõpptuumas sama arv n ja p

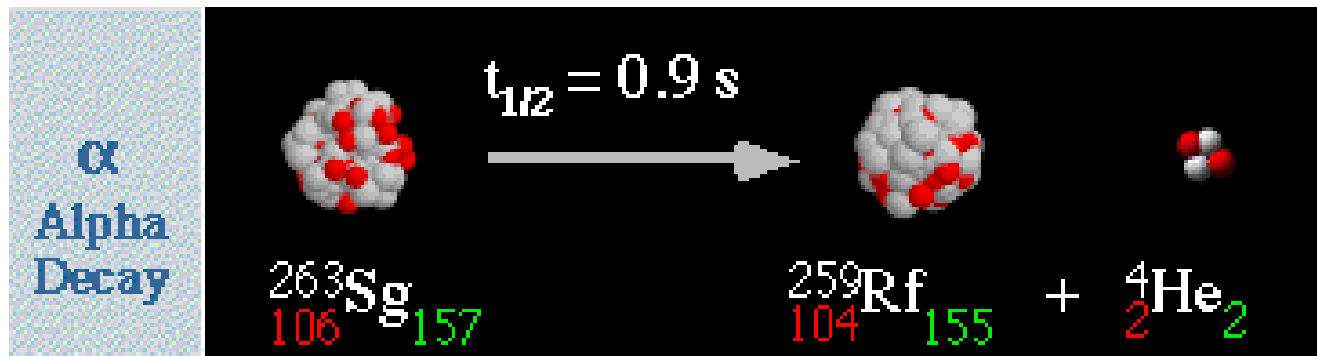
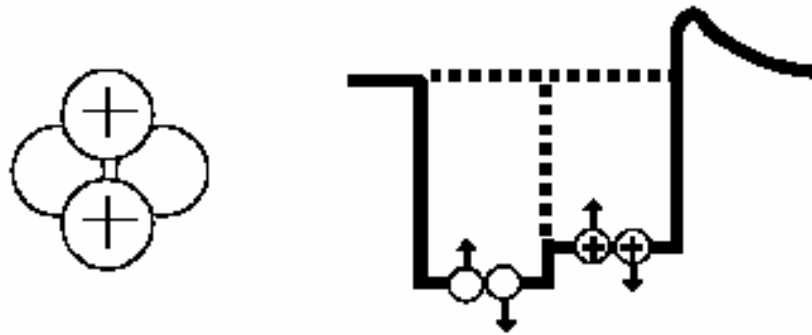
Gammakiirgus



Alfa-lagunemine

α -osake: 2n ja 2p = ${}^4\text{He}$ -tuum; paaris-paaristuum - väga stabiilne!

Suure $Z > 83$ ja $A > 209$ tuumadel - α -kiirgus (joonspekter 4 .. 10 MeV)



Alfa-lagunemine 2

Looduslike ridade ^{238}U +, ^{232}Th +,
 ^{235}U + radioaktiivse lagunemise
 peamine mehhanism

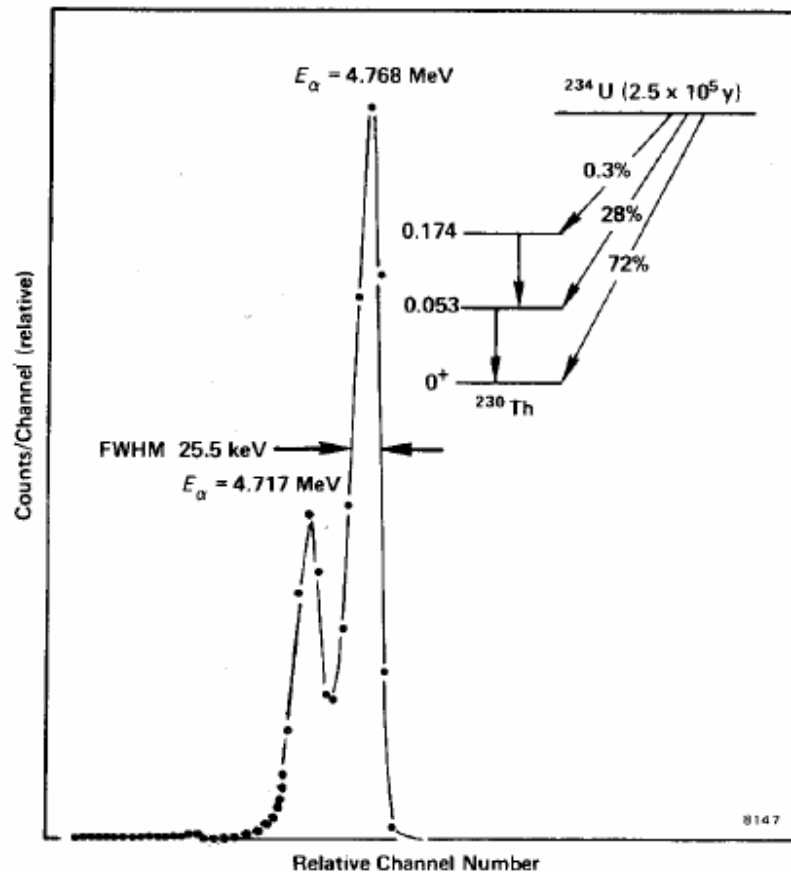
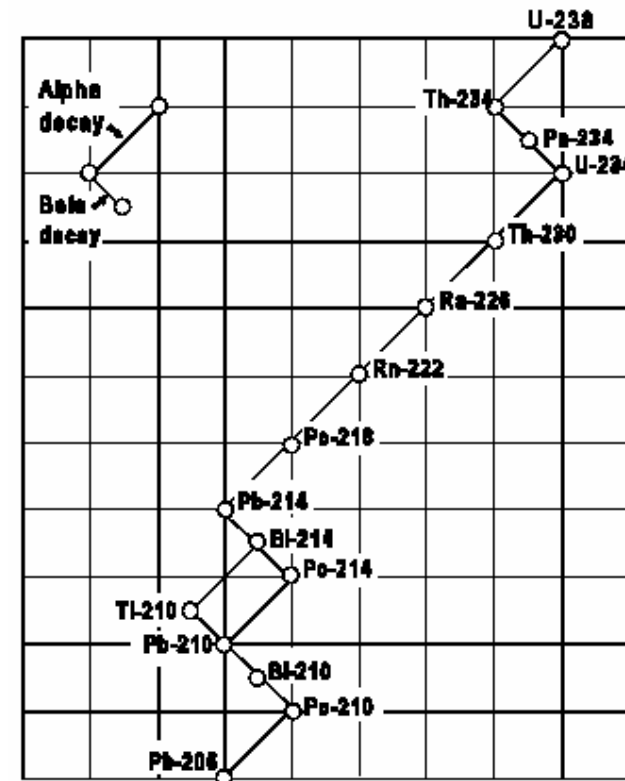


Fig. 4.6. Typical Alpha Spectrum from ^{234}U Showing Alphas from the Two States in ^{230}Th .



aktiivsus A

Mingis kindlas energias seisundis oleva radionukliidi koguse aktiivsus etteantud ajal on

$$A = \frac{dN}{dt}$$

dN on sellest energias seisundist toimuvate spontaansete tuumasiirete ooteväärtus (arv) ajavahemiku dt jooksul.

Aktiivsus on radionukliidi **koguse** mõõt, $A \sim m$.

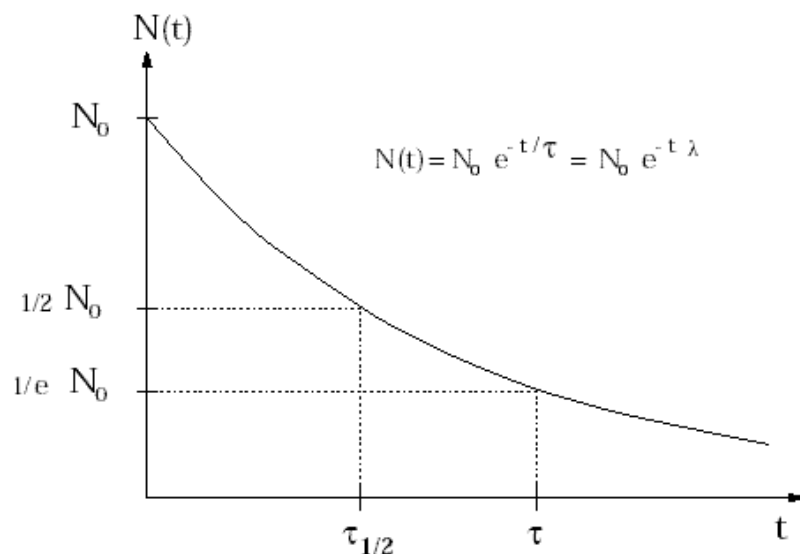
SI-ühik on **bekerel** (Bq). $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$

vana ühik **kürri** (Ci):

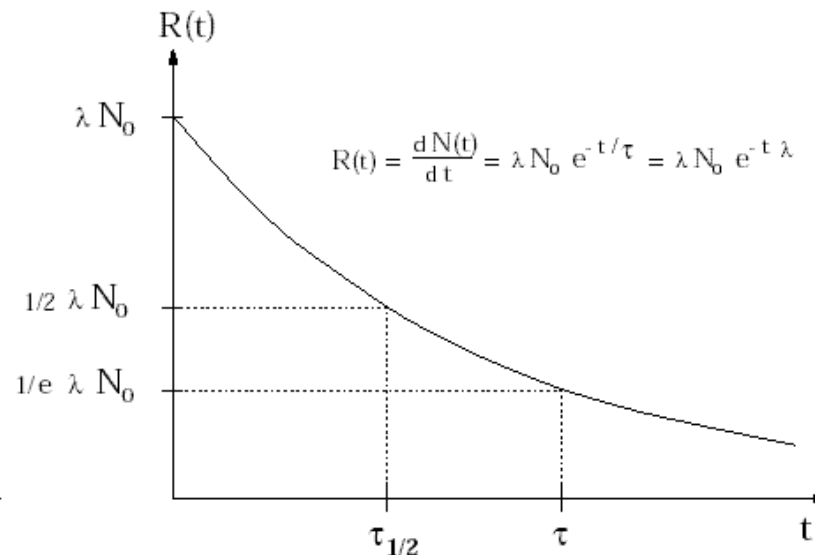
$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}.$$

Lagunemiskonstant ja poolestusaeg

Tuumade arv aja t funktsioonina



Aktiivsus aja t funktsioonina



$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad \tau = \frac{1}{\lambda} \quad \tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$$

Lagunemiskonstant λ , poolestusaeg $t_{1/2}$,
eluiga τ

Eksponentsiaalne
lagunemisseadus

$$e^{-\lambda t}$$

lagunemiste arv sekundis on alati
võrdeline radioaktiivsete tuumade
arvuga sel ajal

Muud kiirgused

Radioaktiivsel lagunemisel **ei kiirata neutroneid ja prootoneid** - energiabarjäär tuumas liiga kõrge

Neutronkiirgus Pu-Be, Am-Be jm allikas:



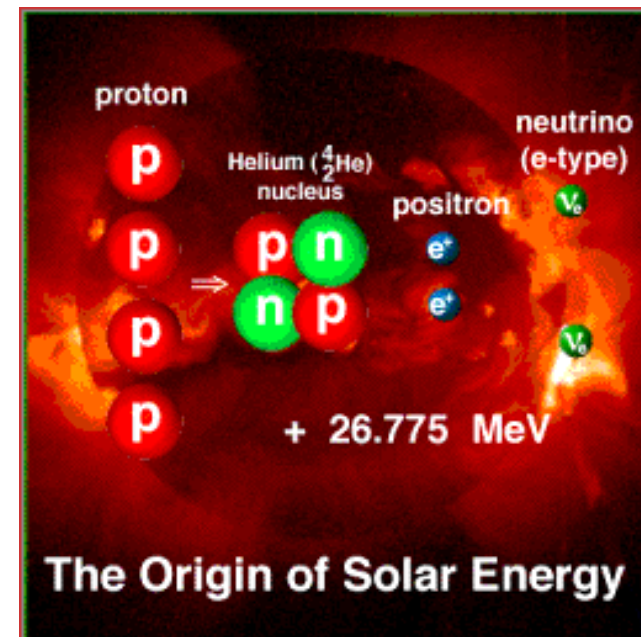
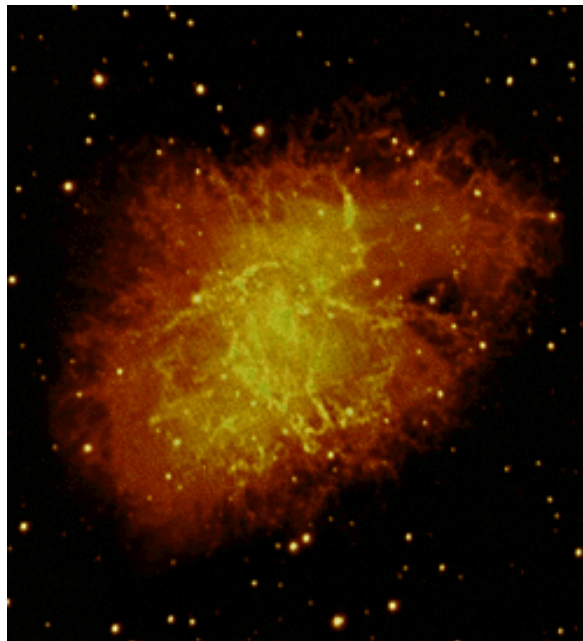
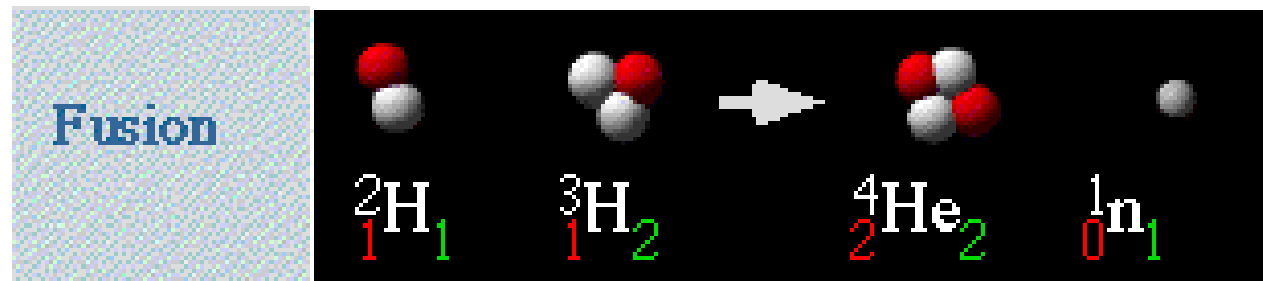
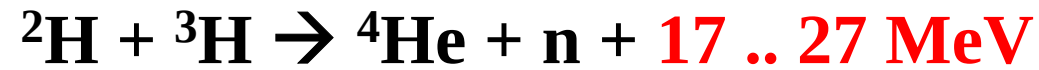
Spontaanne tuumalõhestumine - väike tõenäosus!

Reaktorid

Kiirendid

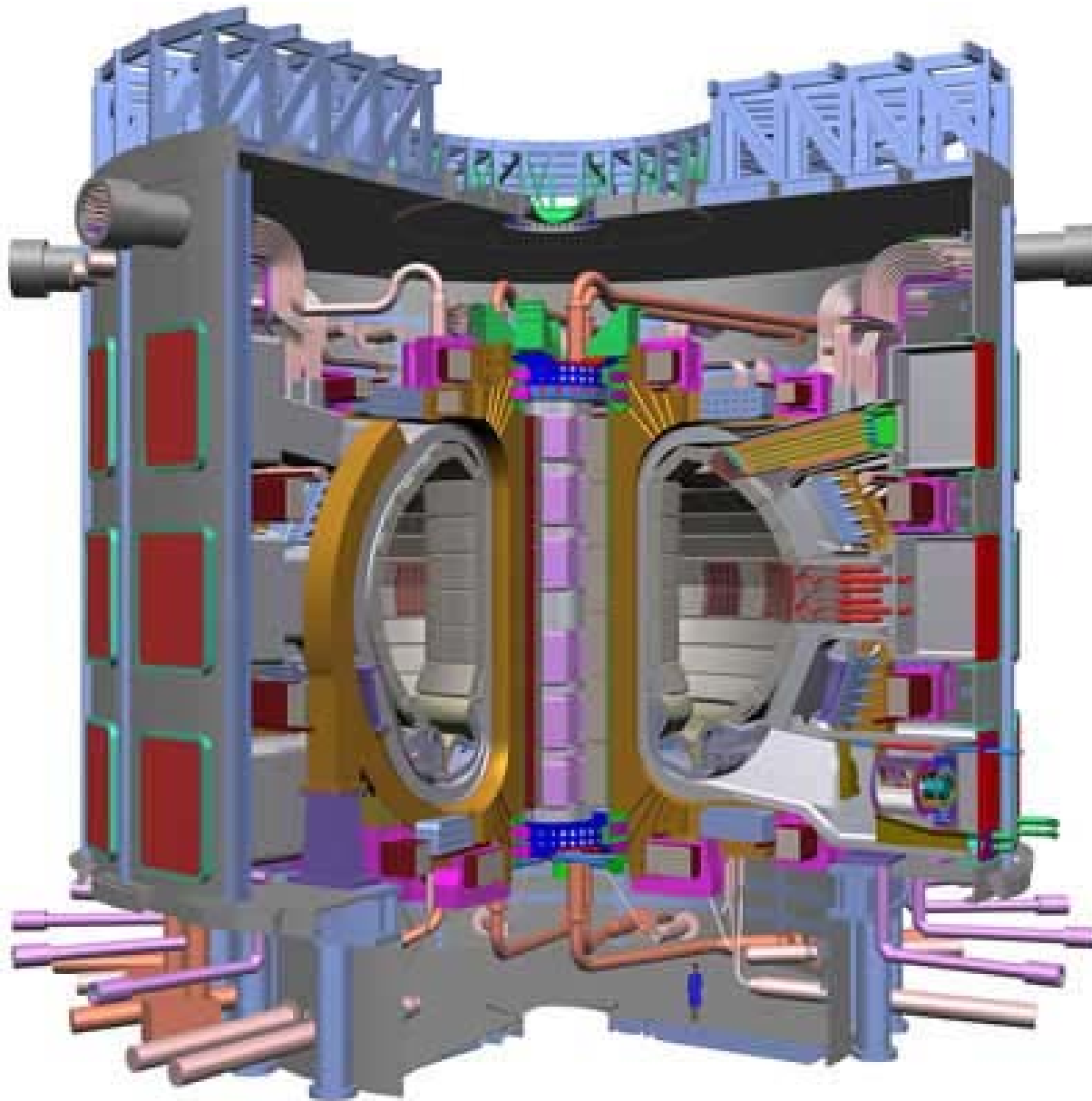
Röntgeniseadmed

Tuumasüntees

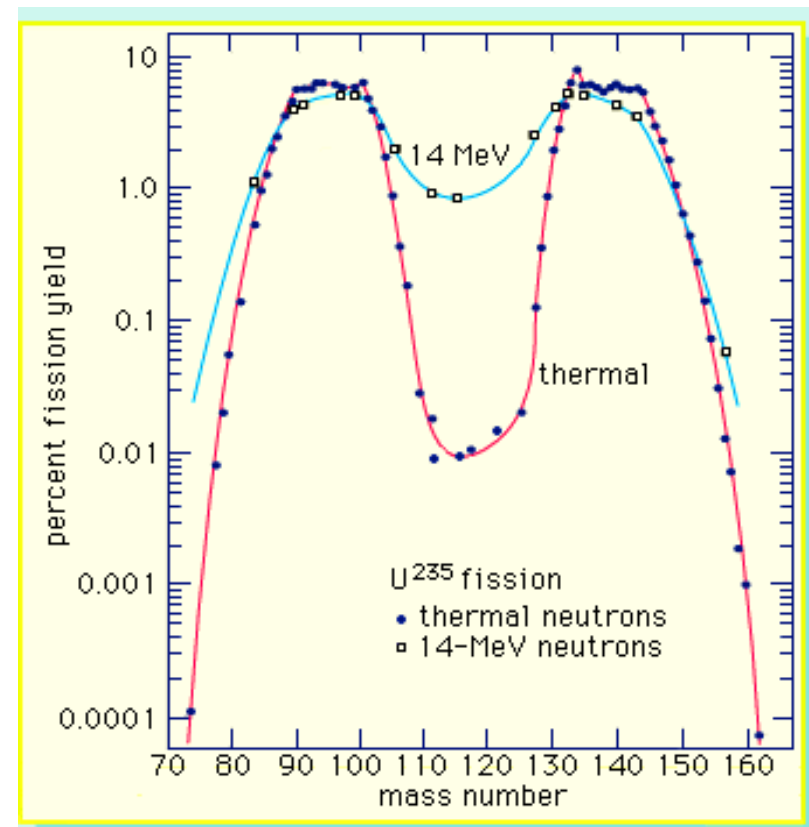
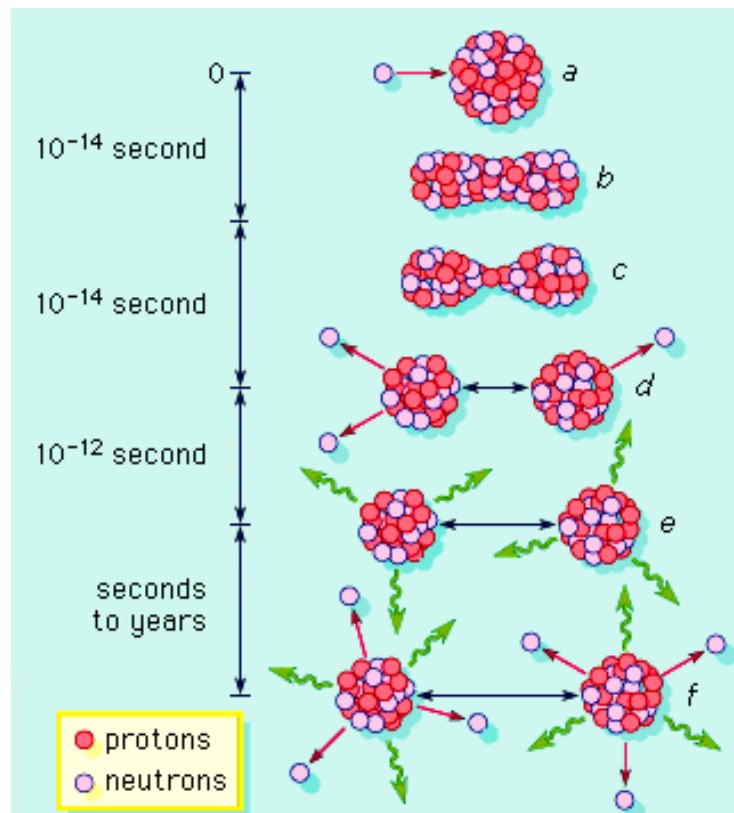
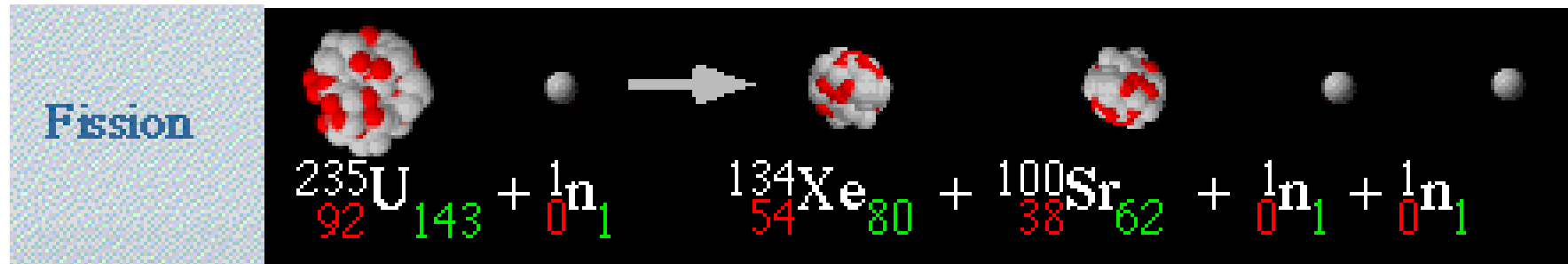
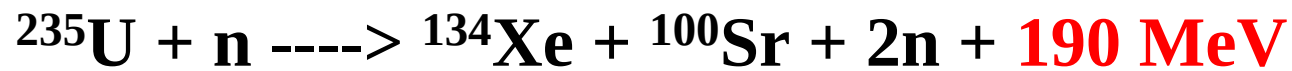


Rasked elemendid – supernoova plahvatustes

ITER – energietika tulevik?



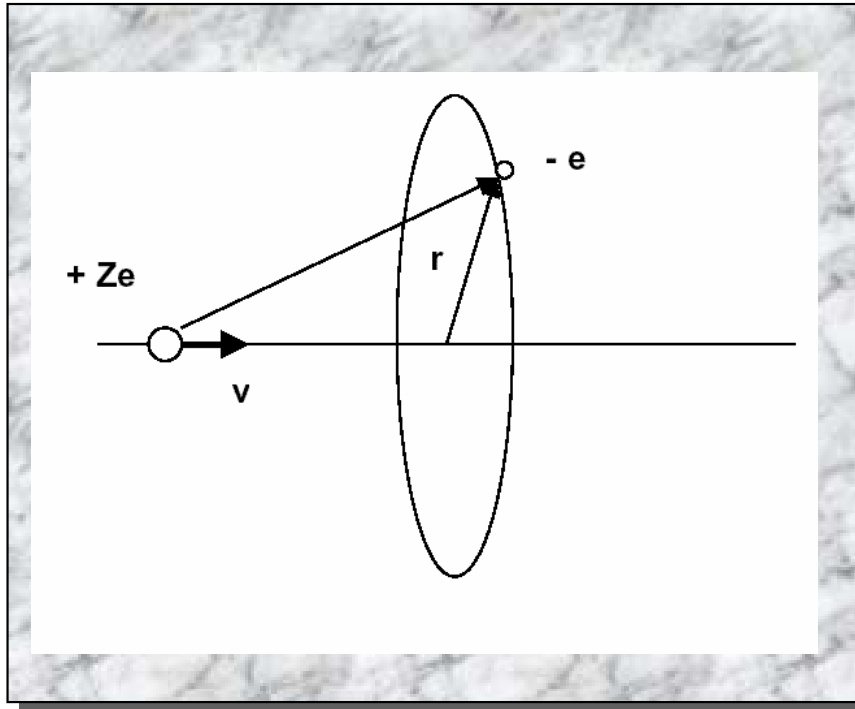
Tuumalõhestumine



Loviisa TEJ



Kiirguse vastastikmõju



Vastastikmõju laetud osakese (seisumass M , laeng $+Ze$) ja keskkonna elektroni vahel. Elektron asub trajektooriga kaugusel r . Osakeste vahel mõjub kuloniline tõmbejõud (F_c). Osake kineetilise energiaga $E = Mv^2/2$, kus v on kiirus, annab möödudes elektronile impulsi ja kaotab üleantud energia $E_e \sim M/(r^2 E)$. Energiakadu on väiksem, kui E on suurem ja r ning NZ - väiksem. NZ (cm^{-3}) - elektronide tihedus, aatomnumber Z

- Ioniseeriva kiirguse läbimine aines
- Kiirgusenergia salvestumine aines

- ☐ Vastastikmõju mehhanism oleneb kiirguse ja aine omadustest
- ☐ Elektronid - põhiroll kiirguse nõrgenemisel ja energia neeldumisel aines, tuumade osa - tühine

Kiirgusliigid:

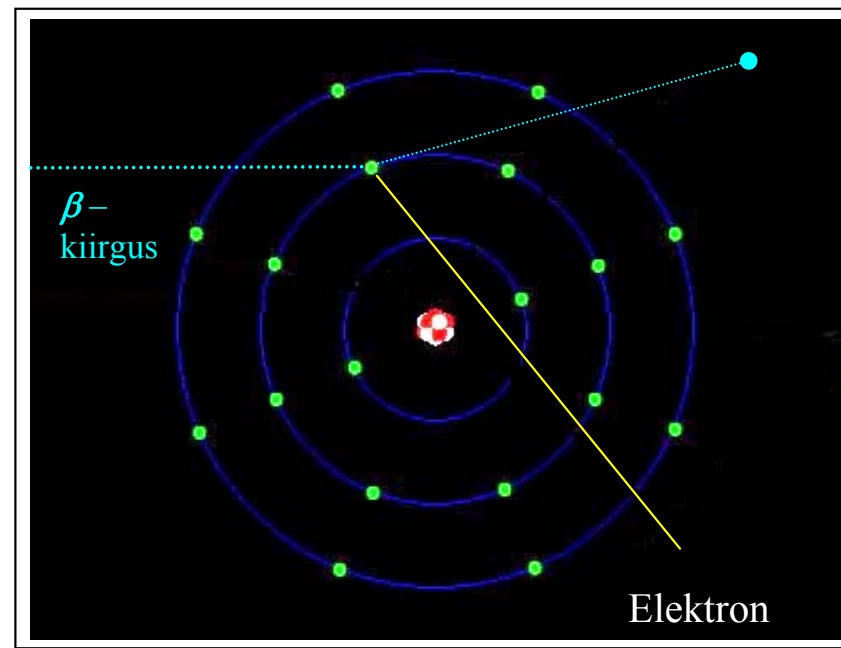
- raske laetud osake (prooton, α -osake, kildtuum jm)
- elektron v. positron
- suure energiaga footon (γ -kiirgus ja kalk röntgenikiirgus)

$$F_c \sim \frac{Ze^2}{r^2}$$

$$E_c \sim \frac{M}{r^2 E}$$

α - ja β -kiirgus: ionisatsioon ja ergastus

Laetud osakesed nagu α - ja β -kiirgus kaotavad oma energia aines **ionisatsiooni- ja ergastusprotsessides**, tekitades aines elektrone ja ioone (gaasis) või positiivseid auke (tahkises). Keskmine energia elektron-ioon-paari tekitamiseks w gaasis on 25-35 eV, elektron-auk-paari tekkeks pooljuhis ~ 3 eV.

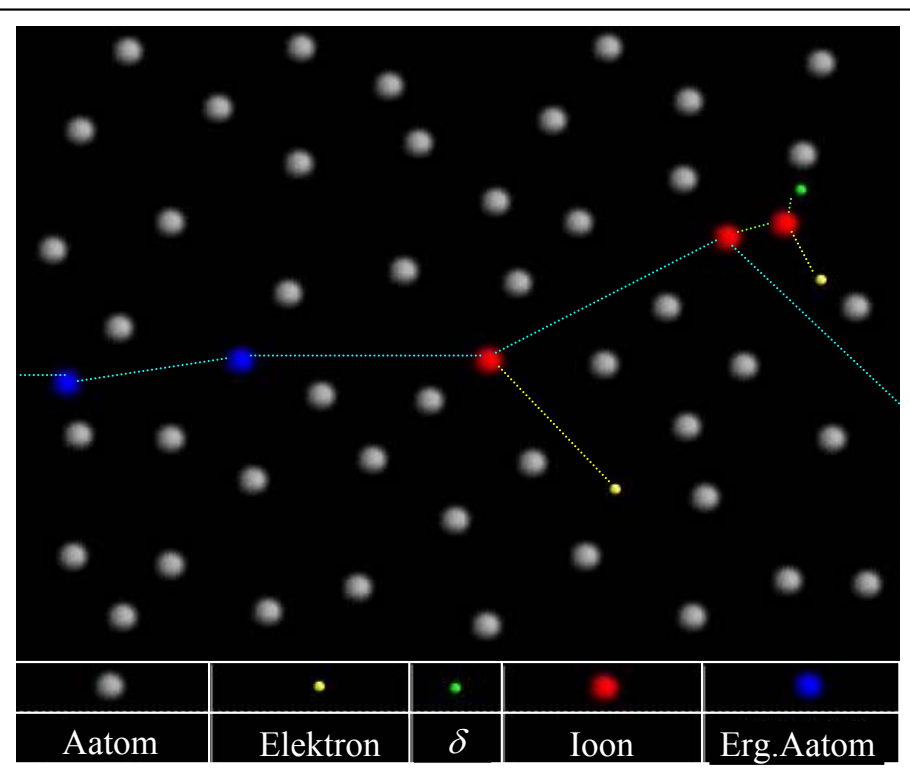
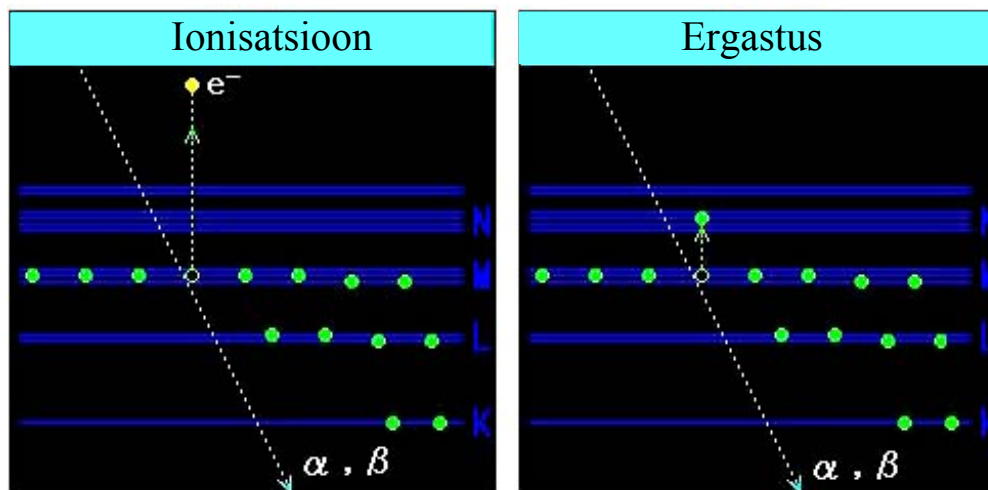


suurendus!

Elektroni energiatasemed aatomis

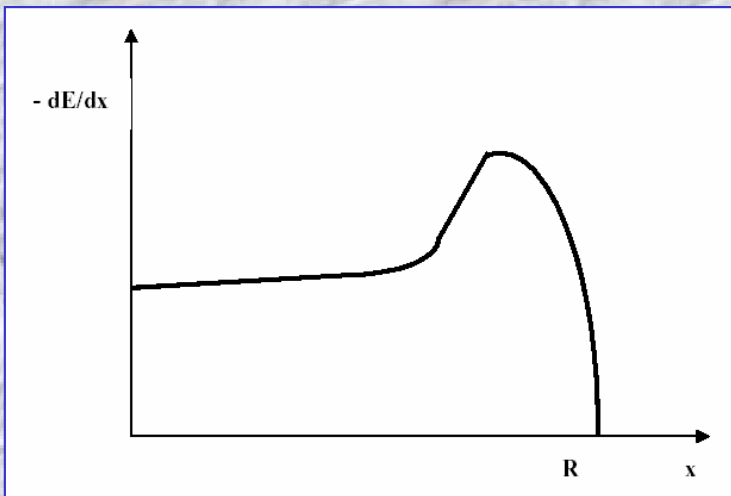
Ionisatsioon

Ergastus



δ -elektroni kineetiline energia ~ 1 keV on piisav ioniseerimaks teisi aatomeid. Kui neutraalne aatom haarab elektroni, tekib negatiivneioon.

α -osakese teepikkus



Bragg'i kõver - osakese energiakadu teepikkusel

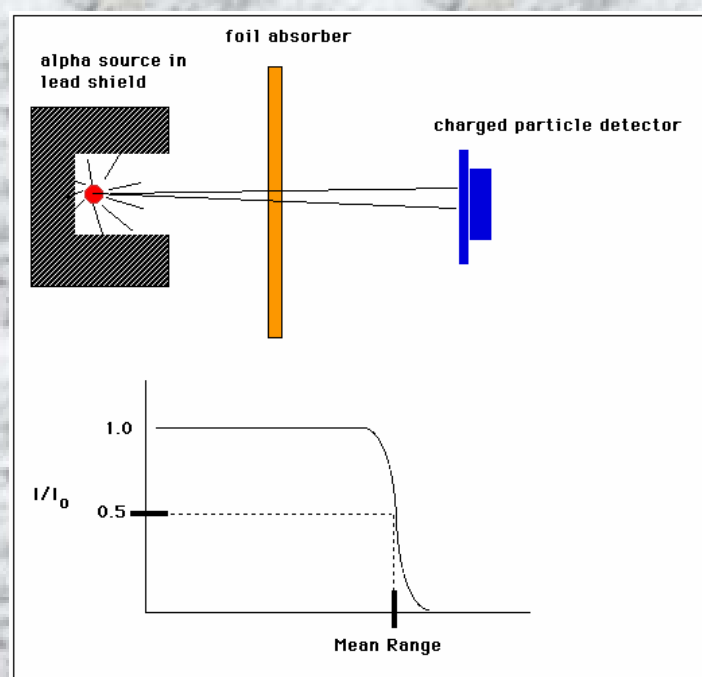
- suurim kadu teepikkuse läbimise lõppfaasil
- sama pilt - elektron- ioon-paaride arv aines
- oluline kiiritusravis

Teepikkus keskkonnas, mille osake läbib (teekond täieliku peatumiseni aines):

- ☐ paksus pikkusühikutes R
- ☐ massikogus pindalaühiku kohta R_m

$$R_m (g/cm^2) = \rho R (cm)$$

$$R (cm) = R_m (g/cm^2) / \rho, \rho - \text{aine tihedus.}$$



Teepikkus õhus:

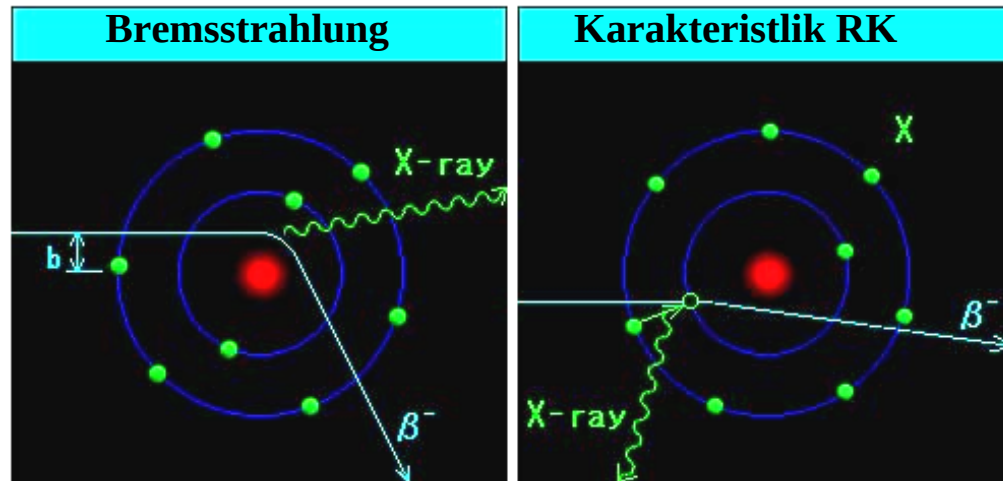
$$R (cm) = 0,56E (MeV); \quad E < 4 MeV$$

$$R (cm) = 1,24E (MeV) - 2,62; \quad 4 < E < 8 MeV$$

α -osakeste neeldumiskõver

Ainet läbinud osakeste arv - läbitud aine paksus
keskmise teepikkus R

β -kiirguse tekitatud röntgenikiirgus



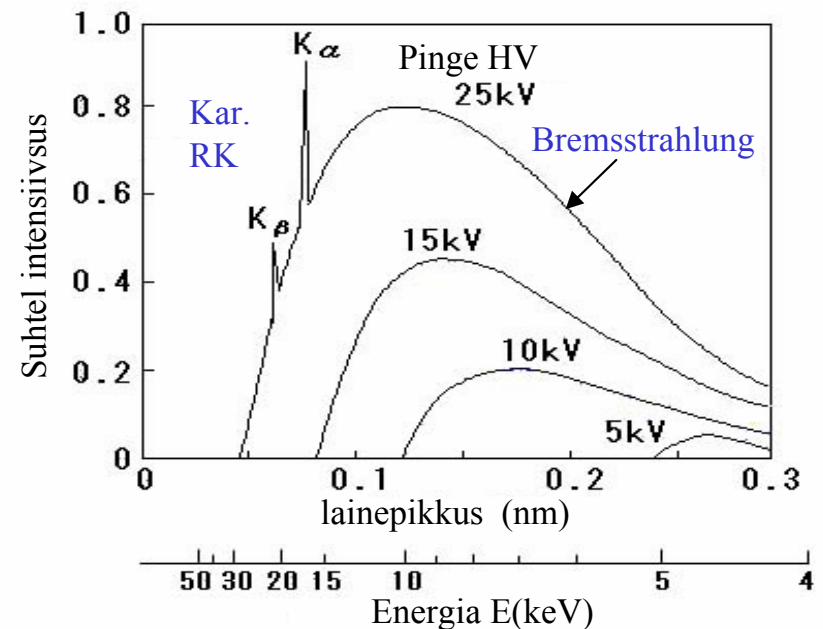
Bremsstrahlung (pidev röntgenikiirgus - RK v. X-ray)

Kiire elektroni tee paindub tuuma elektriväljas ja ta kaotab osa energiat elektromagnetilist kiirgust kiirates (RK). Energiaspekter on pidev.

$$\text{Tõenäosus } f = 3,5 \times 10^{-4} Z$$

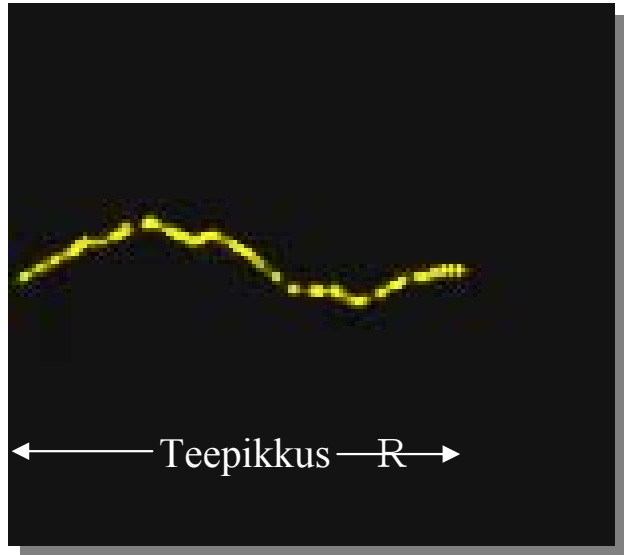
Karakteristlik röntgenikiirgus RK

K- või L-katte orbitaalelektroni ioniseerimisel täidab vakantsi mingi muu katte elektron, millega kaasneb RK footoni kiirgamine. Footoni energia = elektroni seosenergiate vahe.



Pinge röntgenitorul HV ja Mo-antikatoodi spekter:
Mo-K_α = 17,5 keV Mo-K_β = 19,6 keV

β -kiirguse neeldumisomadused



β -osakese trajektoor

β -kiirguse neeldumine

β -kiirgus nõrgeneb eksponentsiaalselt aine paksuse suurenedes. Nõrgenemiskoeffitsient μ ja maksimaalne teepikkus R_m (mg/cm^2) – kõikides ainetes!:

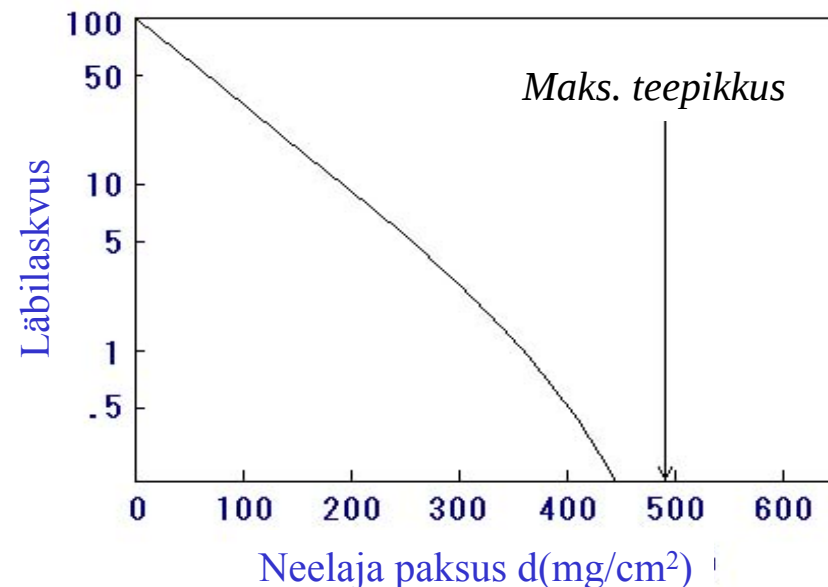
$$A / A_0 = \exp (- \mu d) \quad \mu = 0,017 E^{-1,43}$$

$$R_m = 414 E^m \quad (0,01 \text{ MeV} < E < 3 \text{ MeV})$$

$$m = 1,265 - 0,0954 \ln E$$

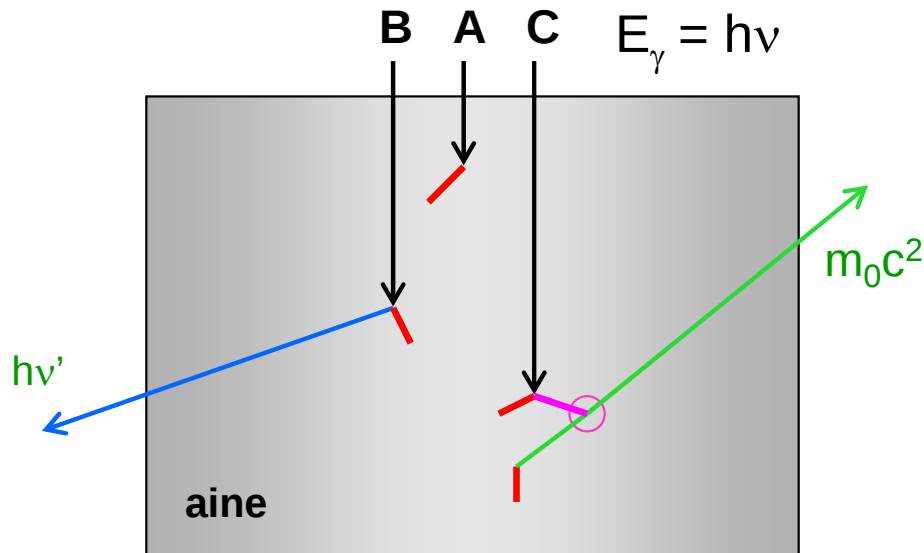
β -osakese trajektoor

β -osakese energiakao protsessid aines:
põrked elektronidega
ja *Bremsstrahlung* tuumade lähedal.
 β – osakese trajektoor on keerukas.
Keskmiselt antakse
iga põrkega ainele ca **100 eV**.



β -kiirguse neeldumiskõver

γ -footoni vastastikmõju ja spekter



A) Fotoelektriline efekt

Kogu energia antakse **sekundaarelektronile**.

$$E_e = h\nu - B_{K,L},$$

$E_{K,L}$ - K-,L- elektroni seosenergia

FEA = joonspekter

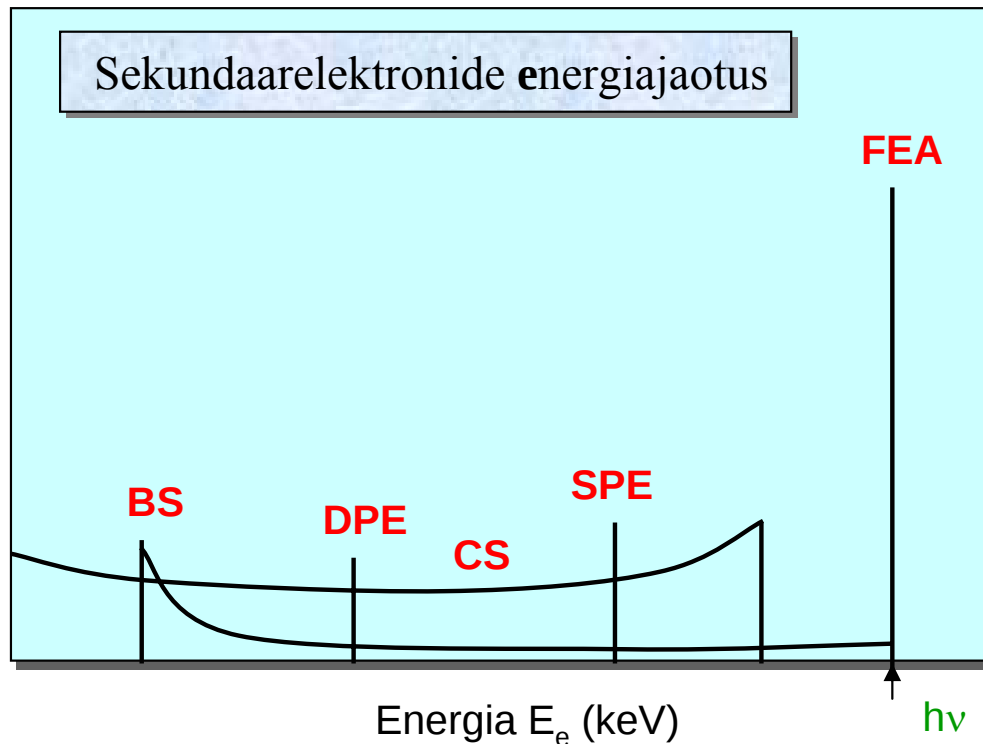
B) Comptoni hajumine

Osa energiat antakse **sekundaarelektronile** ja hajunud γ -foton võib väljuda ainest.

$$E_e = h\nu - h\nu'$$

CS BS: Pidevspekter

Mitmik-vastastikmõju : Kui hajunud γ -foton tekitab fotoelektrilise efekti, siis koguenergia saab samuti võrdseks **FEA**



C) Paaride teke

Koguenergia muundub **elektron+positron- paariks** ja nende kineetiliseks energiaks.

$$E_e + p = h\nu - 2m_0c^2 \quad (m_0c^2 = 511 \text{ keV})$$

Mitmik-vastastikmõju: **Positron-annihilatsioon**

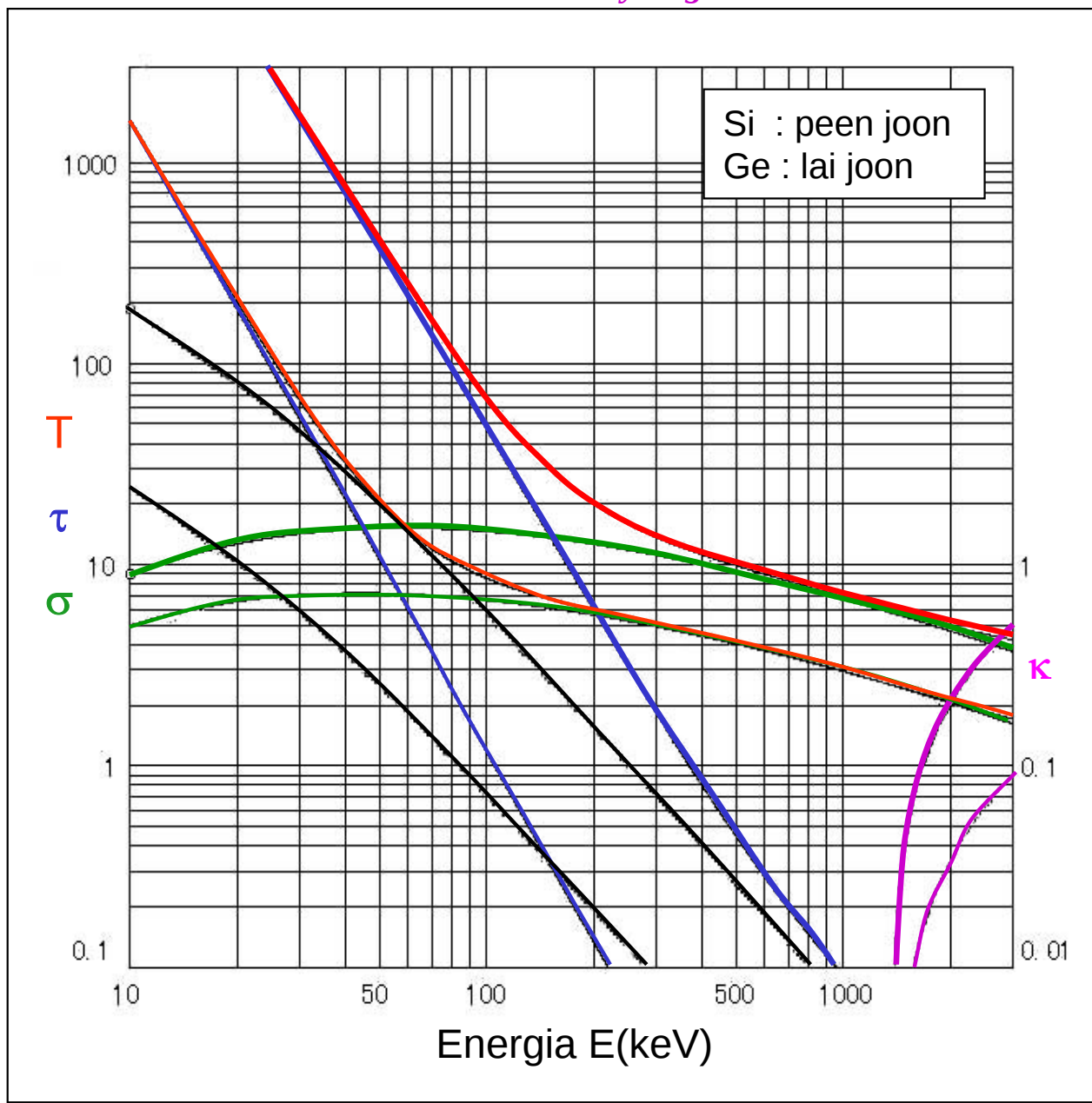
$$\text{FEA} = h\nu$$

$$\text{SPE} = h\nu - 511$$

$$\text{DPE} = h\nu - 1022$$

Vastastikmõju ristlõige ja nõrgenemiskoeffitsient

NB! Paaride teke - y-telg nihutatud!



Fotoelektriline efekt τ

Comptoni hajumine σ

Paaride teke κ

Koherentne hajumine

Summaarne $T = \tau + \sigma + \kappa$

Ühik: $10^{-24} \text{ cm}^2 = 1 \text{ barn}$

Ge $Z = 32$ **Si** $Z = 14$

Nõrgenemiskoeffitsient μ_m

$\mu_m (\text{cm}^2 / \text{g}) = 0.6022 T/A$

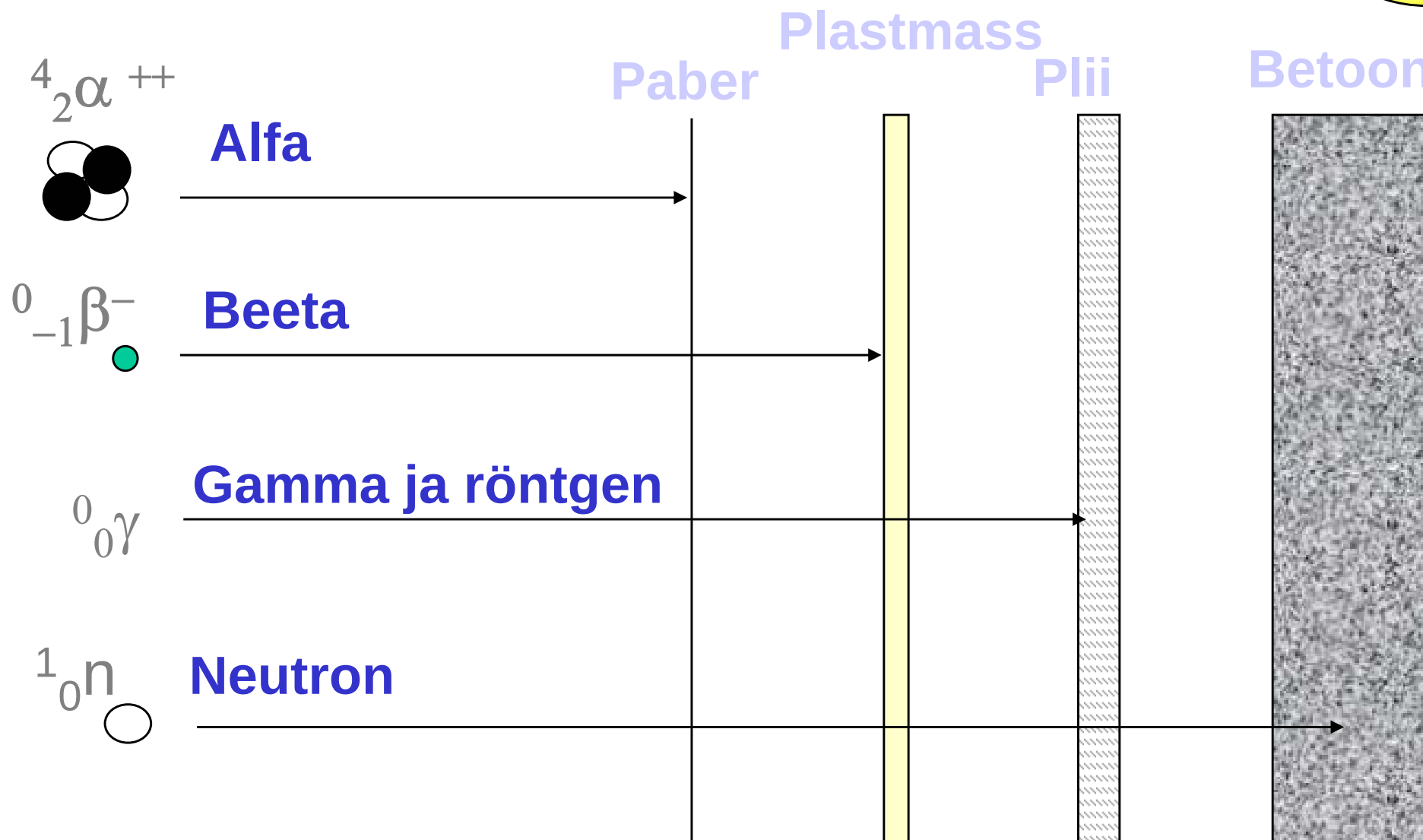
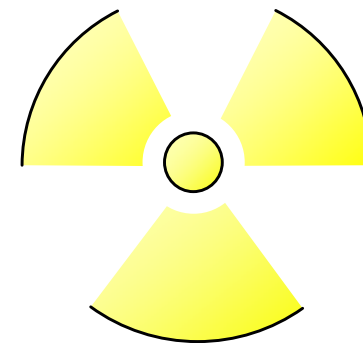
$\mu_m (\text{cm}^2 / \text{g}) = \rho \mu_\mu$

$A = 28.09$ Si $A = 72.59$ Ge

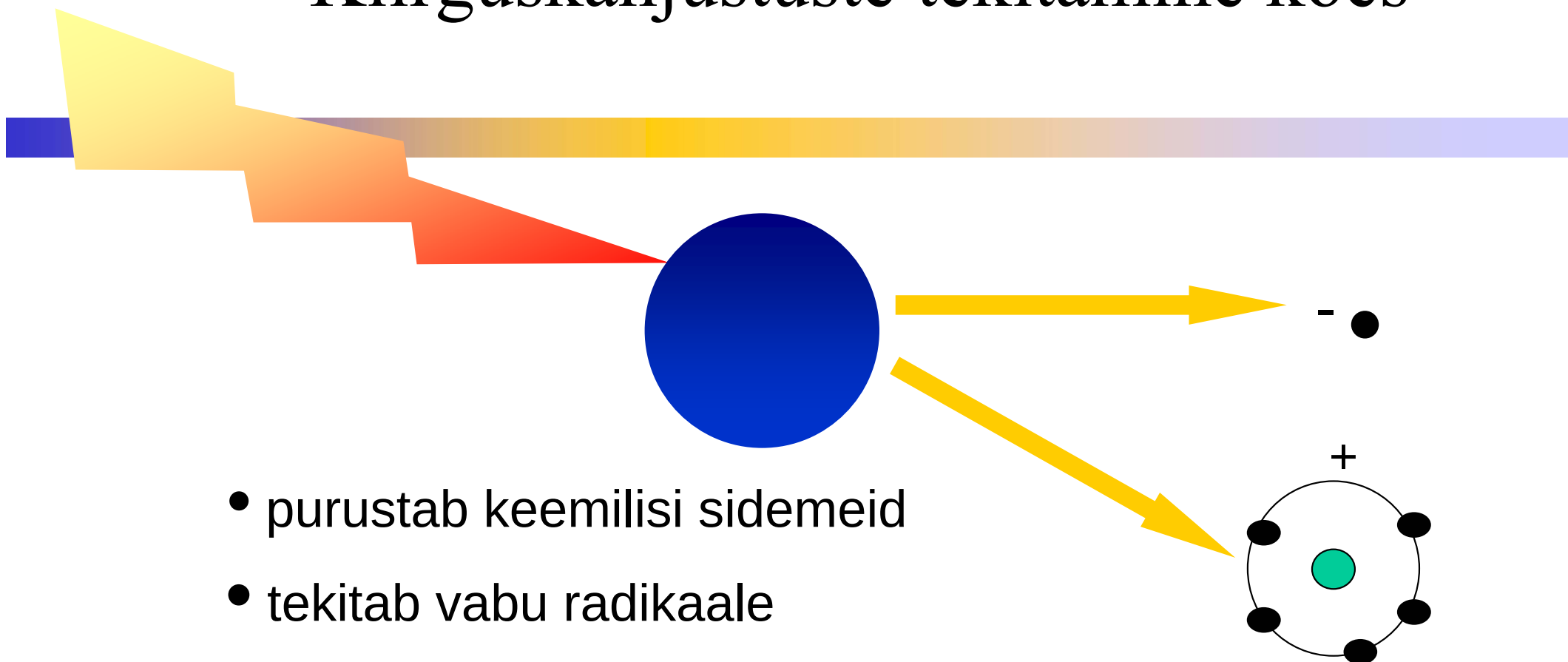
Ainekihi x (g/cm^2) läbinud
intensiivsus $I(x)$

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu_m x)$$

Kiirguse neeldumine aines



Kiirguskahjustuste tekitamine koes



- purustab keemilisi sidemeid
- tekitab vabu radikaale
- keemilised muutused kehas
- rakufunktsioonide muutumine, rakkude surm, kasvavad

Otse tekitavad ionisatsioonid

- Prootonid
- Alfa-osakesed
- Beeta-osakesed
- Positronid

Kaudselt tekitavad ionisatsiooni

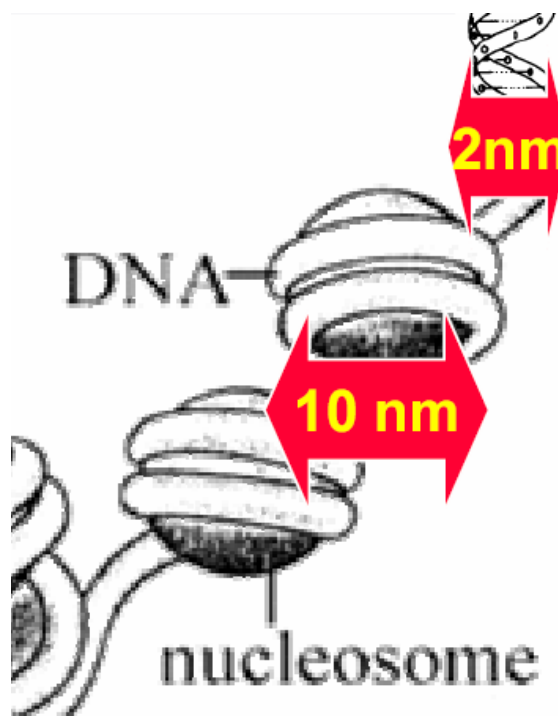
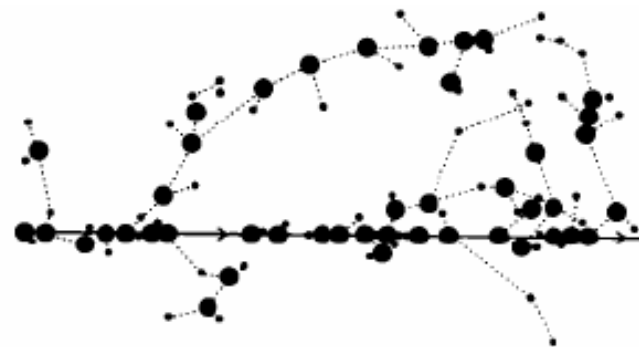
- Neutronid
- Gammakiirus
- Röntgenikiirus

DNA ja vastastikmõjud

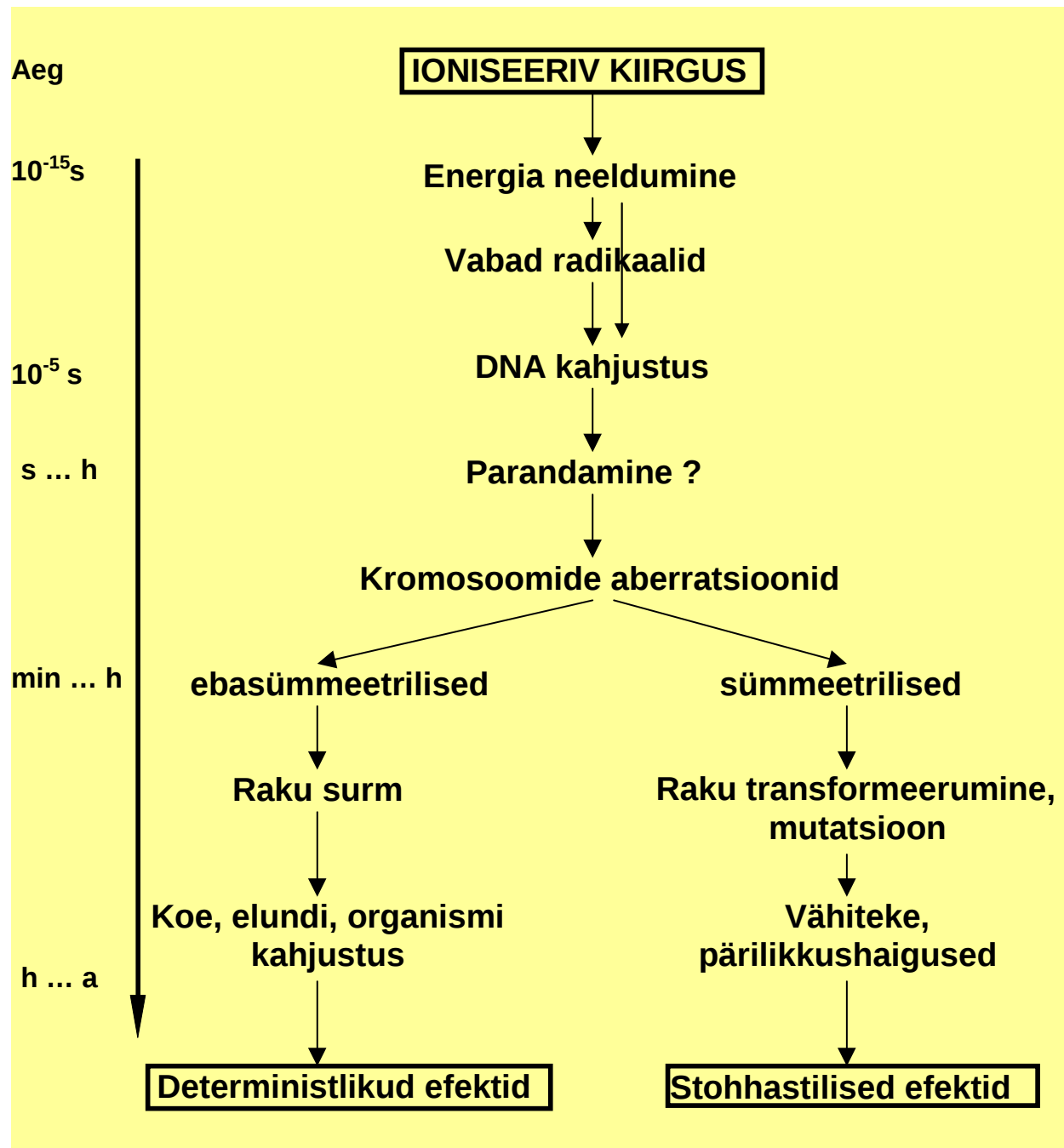
0,5 MeV γ -jälg



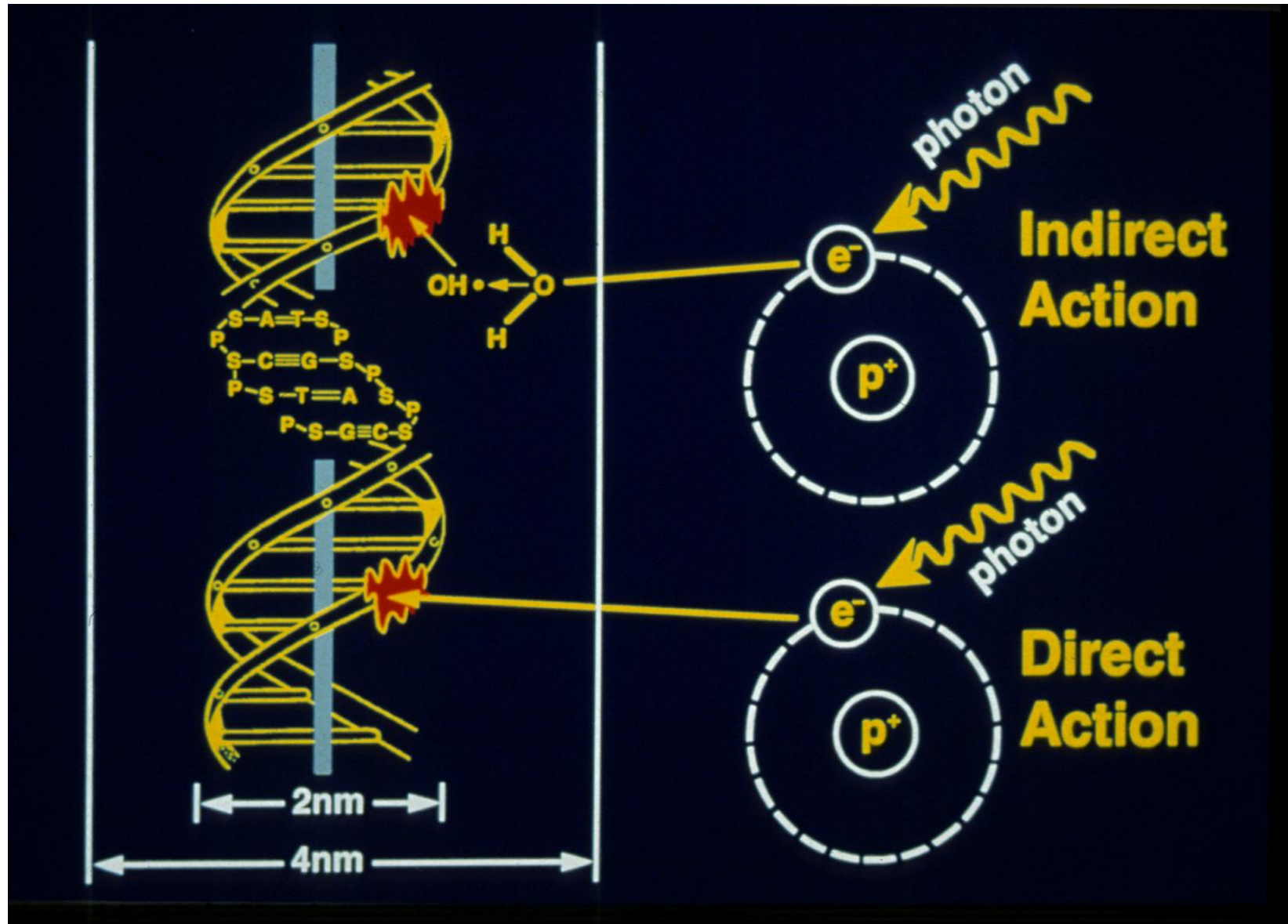
4 MeV α -jälg



Kiirguse ja bioloogilise koe vastastikmõju



Otsene ja kaudne toime



neeldumisdoos D

Dosimeetria põhisuurus, mis on defineeritud:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

kus $d\varepsilon$ on keskmine üleantud energia, mille ioniseeriv kiirgus annab ainele ruumielemendis massiga dm .

Ühik: 1 **grei** (Gy) = 1 J kg⁻¹.

vanem ühik 1 rad = 10⁻² Gy.

ekvivalentdoos $H_{T,R}$

Kiirgusfaktoriga W_R korrutatud neeldumisdoos koes või elundis:

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R} ,$$

$D_{T,R}$ on keskmine neeldumisdoos koes või elundis T , ja W_R on kiirguse R kiirgusfaktor.

Kui erineva W_R - väärtustega kiirgused, siis summa:

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} .$$

Ekvivalentdoosi ühik on **siivert** (Sv). $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$

kiirgusfaktor W_R

arvestab erinevate kiirgusliikide suhtelist tervisekahjulikkust.

Kiirguse liik	Energia piirkond	Kiirgusfaktor W_R
Footonid	kõik energiad	1
Elektronid ja müüonid	kõik energiad	1
Neutronid	< 10 keV	5
	10 keV - 100 keV	10
	100 keV - 2 MeV	20
	2 MeV - 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Prootonid	kõik energiad	5
α - osakesed, kildtuumad	kõik energiad	20

efektiivdoos E

Vastavate koefaktoritega W_T korrutatud kudede ekvivalentdooside summa:

$$E = \sum_T W_T H_T,$$

kus H_T on keskmine ekvivalentdoos koes või elundis T ja W_T on ICRP poolt koe T jaoks määratletud koefaktor.

SI-ühikuks on **siivert** (Sv). $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$

Vana ühik: $1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$

koefaktorid W_T

Faktor, millega korrutatakse koe või elundi ekvivalentdoose kudede ja elundite erineva kiiritustundlikkuse arvestamiseks stohhastiliste kiirgusefektide tekkimisel.

Kude või elund	Koefaktor W_T
Sugunäärmed	0,20
Luuüdi	0,12
Käärsool (jämesoole alaosa)	0,12
Kops	0,12
Magu	0,12
Põis	0,05
Rinnad	0,05
Maks	0,05
Söögitoru	0,05
Kilpnääre	0,05
Nahk	0,01
Luuümbris	0,05
Muu	0,05

Otsene toime

- **Letaalne doos** (50 % sureb 30 päeva jooksul)
LD50/30 = 4 Gy = 4 J/kg = 25×10^{18} eV/kg.

- ionisatsiooniaht koes nõuab 34 eV
- iga iooni kohta tuleb ca 9 ergastatud aatomit
- tekitab $7,4 \times 10^{18}$ iooni ja ergastatud aatomit 1/kg
- pehmes koes on $9,5 \times 10^{25}$ aatomit/kg

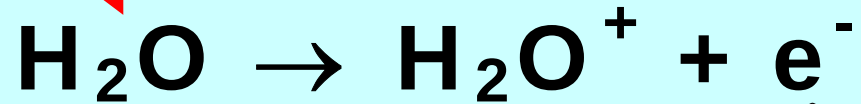
- **doos 4 Gy –**

ainult 1 igast 100000000 aatomist (10^{-7})

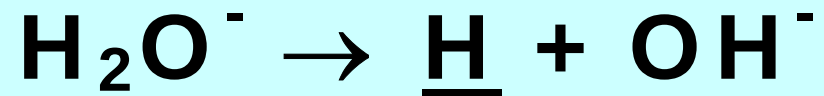
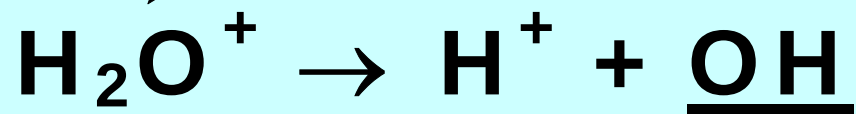
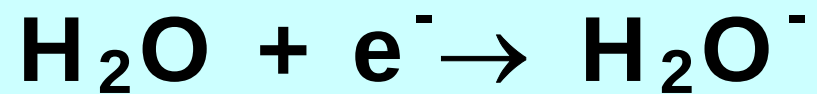
Otseionisatsiooni ahel

- Ioniseeriv osake või footon
- Ergastus või ionisatsioon
- Molekuli dissotsiatsioon tema mingi aatomi ergastuse või ionisatsiooni tulemusel
- Bioloogilised efektid olenevalt dissotsieerunud molekulist

Kaudne toime vees



$1 \mu\text{s}$



Kiirgus ja rakk

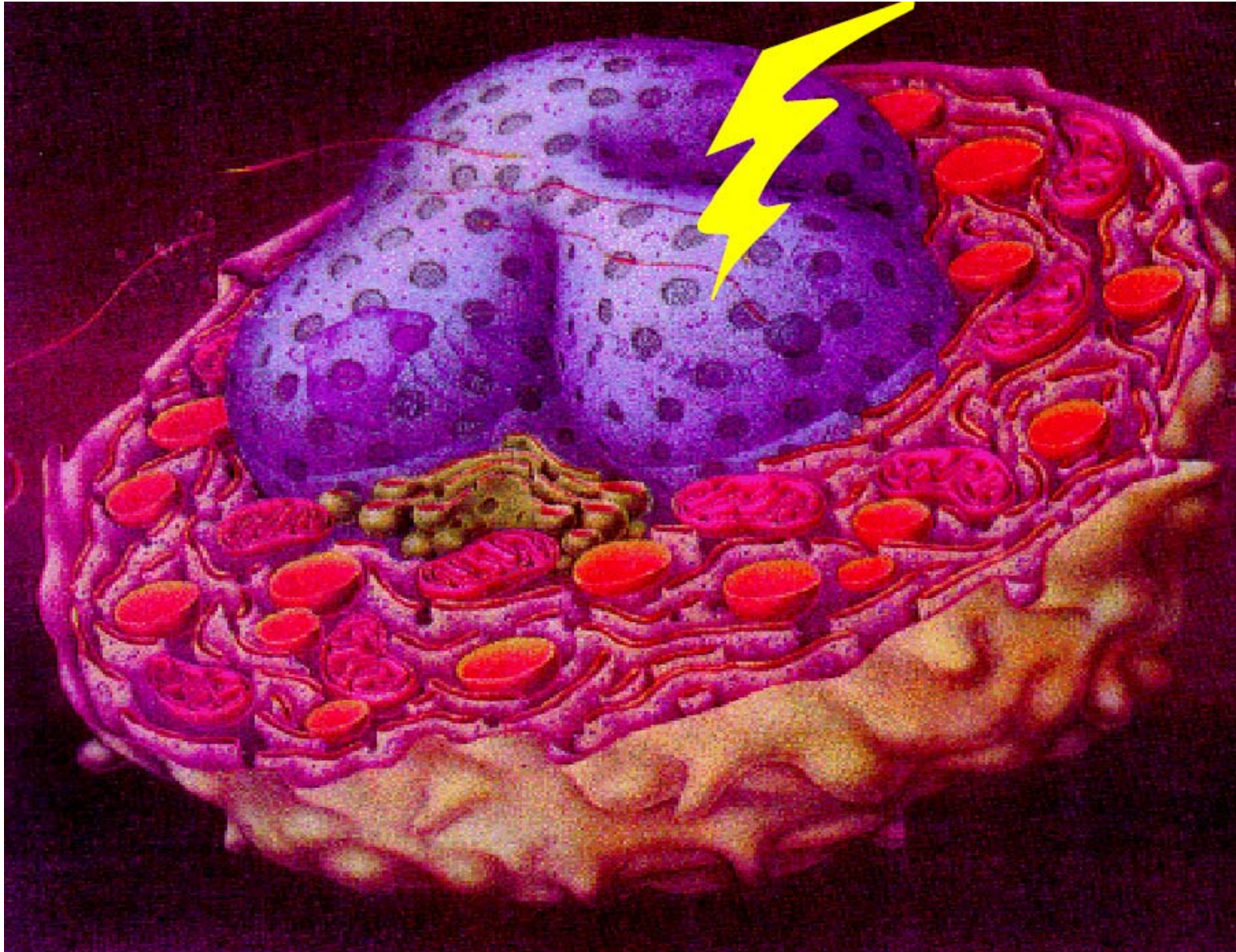
Inimkeha koosneb rakkudest: ca 10^{14} ,
enamik - *somaatilised*,
reproduktiivsed, sh *sugurakud* $10^{10} \dots 10^{11}$

Rakk

Membraanist $\sim \varnothing 10 \mu\text{m}$ kotikeses vedelik - *tsütoplasma* - ja *rakutuum*
Tuumas - *kromosoomid* (inimesel - 46), neis - *geenid*

Geenides paikneb DNA - *topeltheeliksi-kujuline kahe ahelaga molekul*
DNA koosneb *nukleotiididest*: *adeniin*, *guaniin*, *tümiin* ja *tsütosiin*, mille järgnevus määrab *geneetilise koodi*

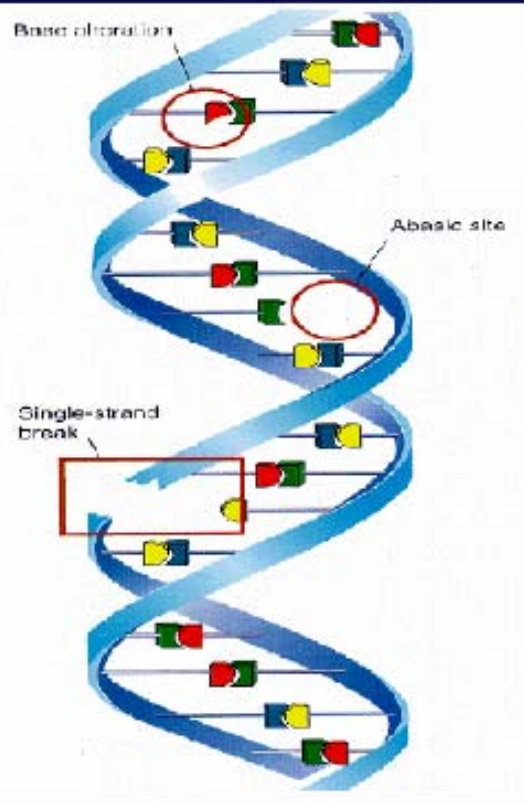
Rakk ja kiirgus



Ioniseeriva kiirguse toime (otsene ja kaudne)

- **Mutatsioon - nukleotiidide järjestuse muutus mutageeni** toimel põhjustab raku ja ta järglaste kuju ja talitluse muutusi - **fenotüübi muutus**
- **Punktmutatsioon** või **klastermutatsioon** - ka **klastogeenne mutatsioon** (lisamine, kustutamine, inversioon) kandub edasi reproduktiivrakkude kaudu
- **Mutageen - aine või mõjustus** (soojus - väga tugev, kiirgus - suhteliselt nõrk jms)
- **Korrektiivprotsessid, adaptatsioon**
- **Muteerunud rakk** →
 - **nekroos** (suremine)
 - **apoptoos** (süstemaatiline ja programmeeritud enesehävitus)
 - **kasvaja teke** (somaatiline rakk)
 - **pärilikkushaigused** (sugurakk)

Ioniseeriv kiirgus - peamine **kasvajate tekitamine**, vähem nende arengu soodustamine



DNA mutation

$$p_D \approx a D$$

1) Mutation repaired

Viable Cell

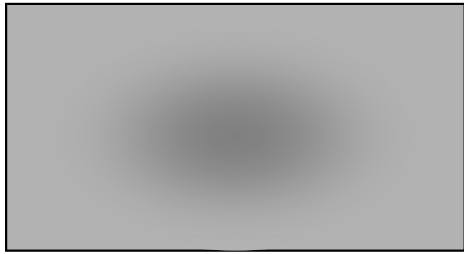
2) Cell dies

Unviable Cell

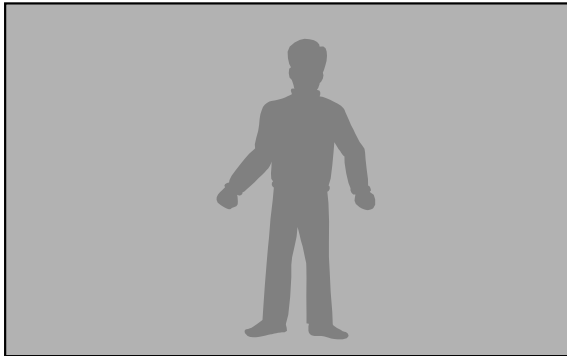
3) Cell survives but mutated

Stoch.effect

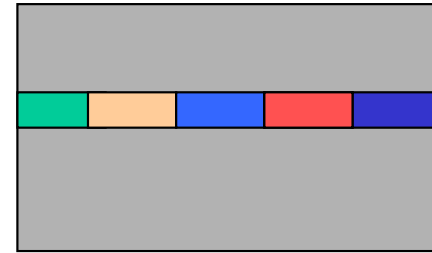
Kiirguse mõju inimesele



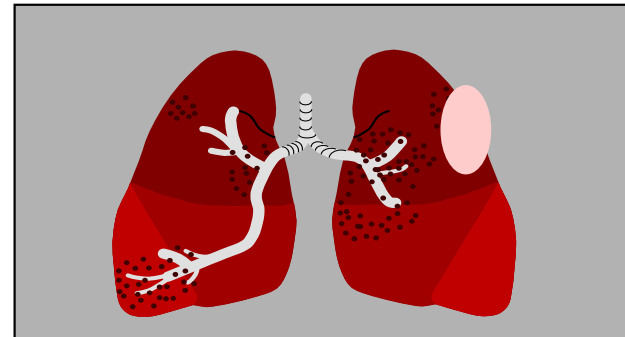
ulatuslik rakusurm



kiirgushaigus



oluline geneetiline
muutus



vähiteke

Kiiritusefektid

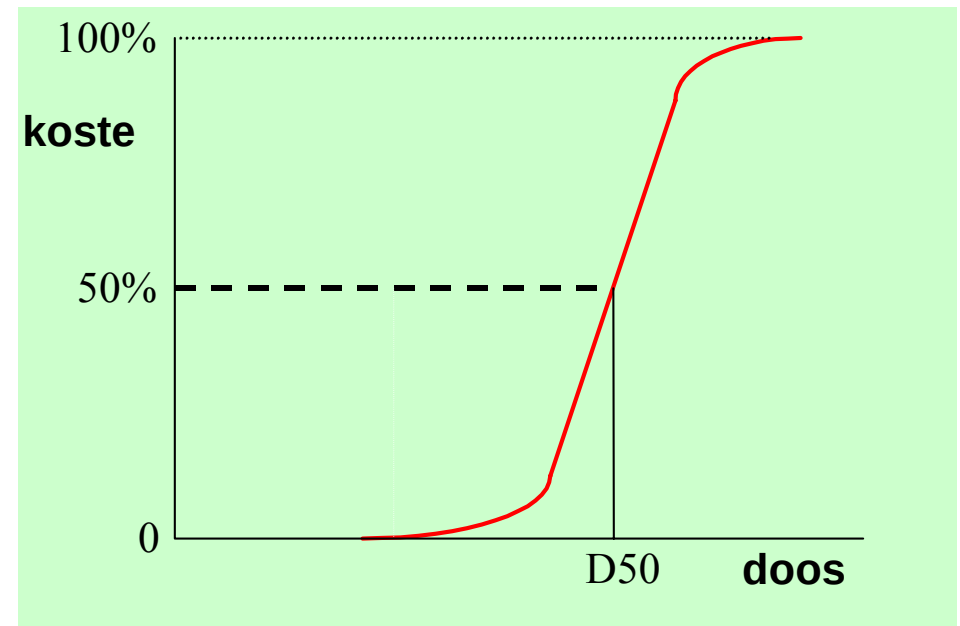
Kaht liiki:

1. deterministlikud (lävi)efektid

- ❖ tekkivad doosiläve ületamisel
(tavaliselt 50 % tekkelävi: LD50/30 jt)
- ❖ efekti suurus kasvab doosi suurenemisel
- ❖ ühetähenduslik põhjuslik seos kiirituse ja mõju vahel

Koste - kahjustuse raskus!

NB! bioloogiline variaablus - lävi ei ole aste!



Kiirgushaigus D50

muutused veres

hemopoeetiline sündroom

gastrointestinaalne sündroom

kesknärvisüsteemi sündroom

> 0,2 Gy

> 2 Gy

> 10 Gy

> 20 Gy

Kiiritusefektid 2

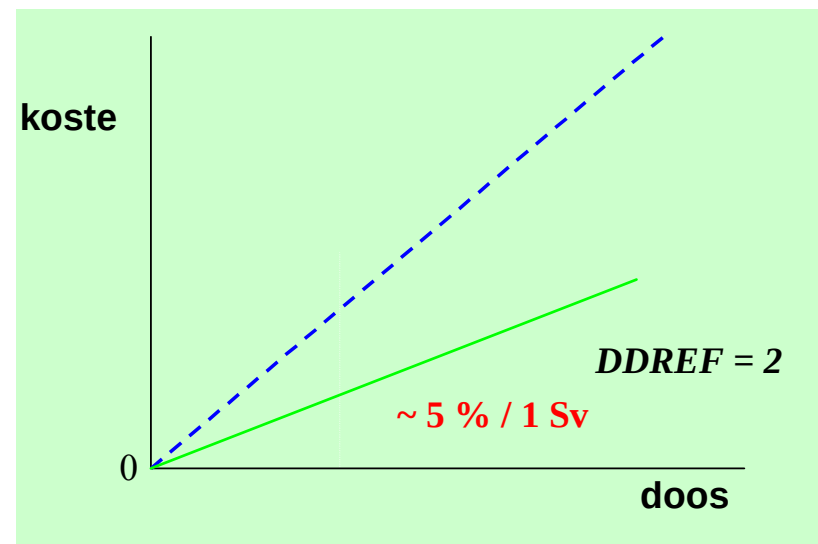
2. stohhastilised (tõenäosuslikud) efektid

- ❖ puudub doosilävi - algab nullist!
- ❖ efekti esinemise tõenäosus p_D suureneb lineaarselt doosiga D - nn **LNT** (*linear non-threshold*)
- ❖ puudub ühetähenduslik põhjuslik seos kiirituse ja mõju vahel

Koste - tõenäosus

Tegelikult

lähend - **LNT**:

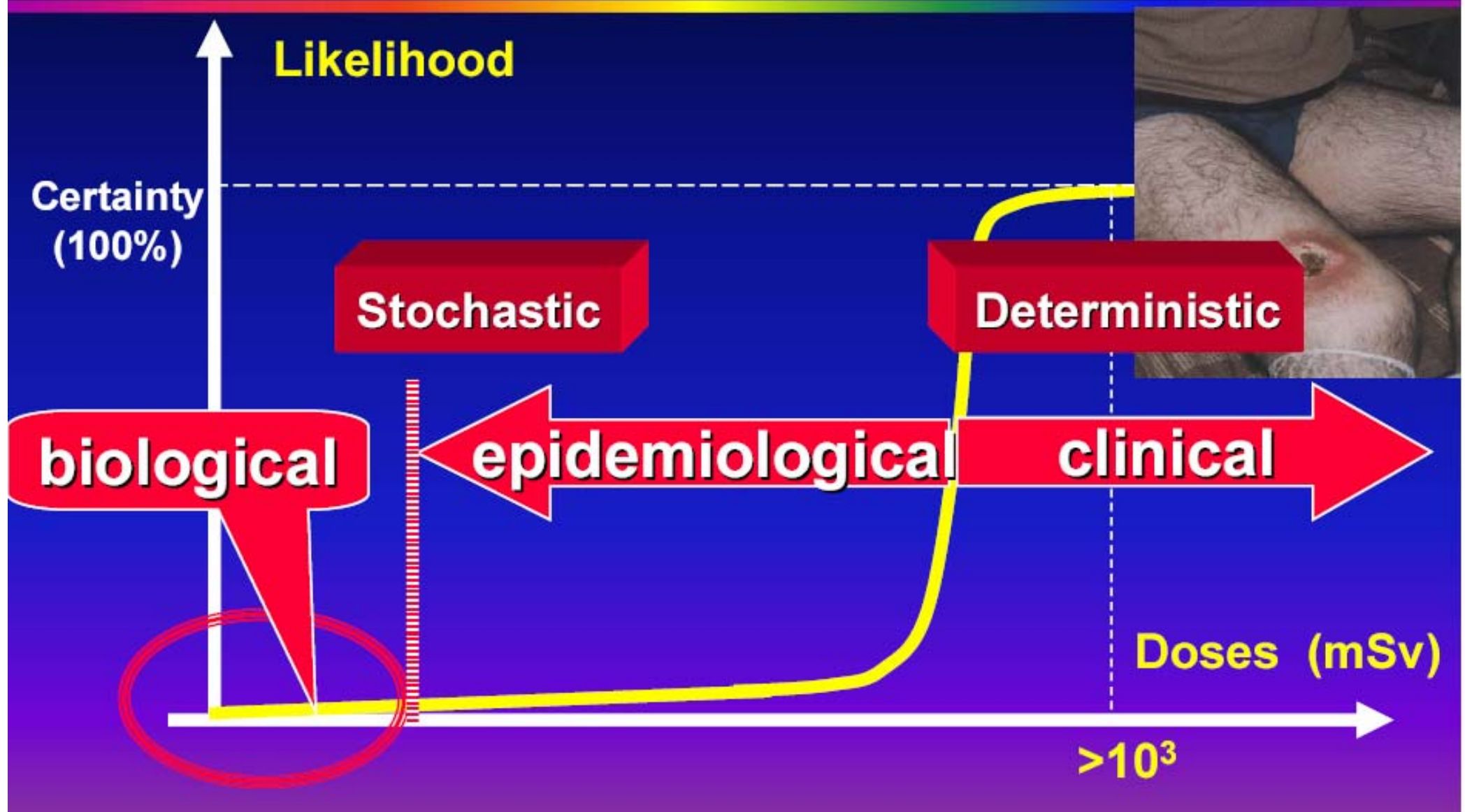


$$p_D \approx (a D + b D^2) e^{-cD}$$
$$p_D \cong a D$$

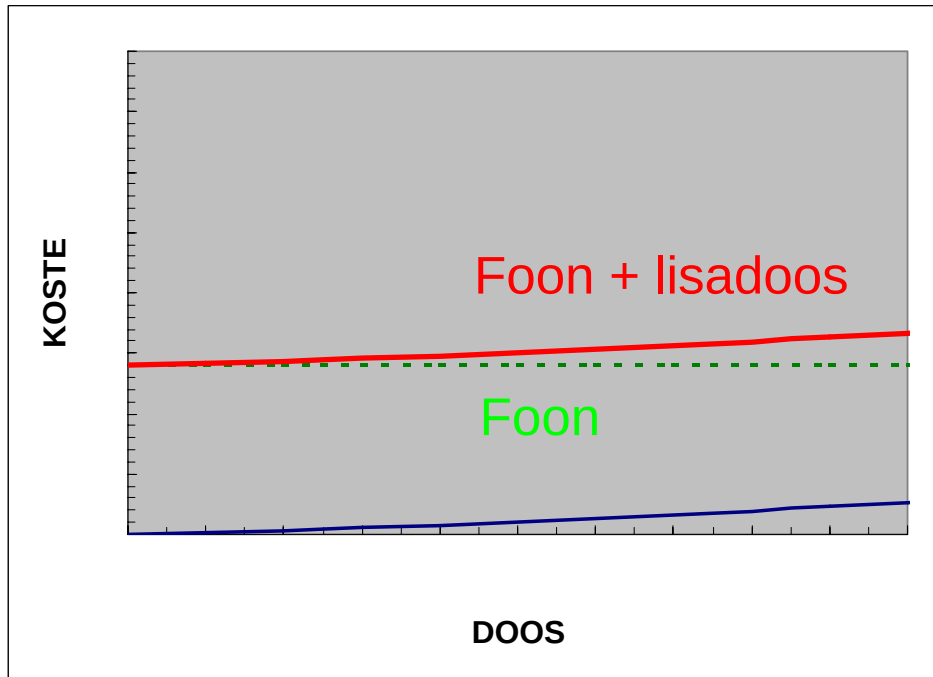
ICRP soovituslikud a-väärtused väikestel doosidel ($DDREF = 2$) :

leukeemia	0,0005	% / mSv
vähiteke	0,005	% / mSv
pärilikkus	0,0004	% / mSv

Attributability of radiation health effects



Väikesed doosid



Epidemioloogia andmed

doosivahemikust 0,5 .. 2 Sv

Hiroshima LSS jm andmed annavad a:

leukeemia 0,9 %/Sv

vähiteke 11 %/Sv

Statistika:

*epidemioloogia ei saa anda tõendeid
LNT kehtivusest ja mõju suurusest
väikeste dooside piirkonnas!*

$$N = \frac{const}{D^2}$$



$$D = 1 \text{ mSv} \rightarrow N > 10^9 \text{ inimest}$$

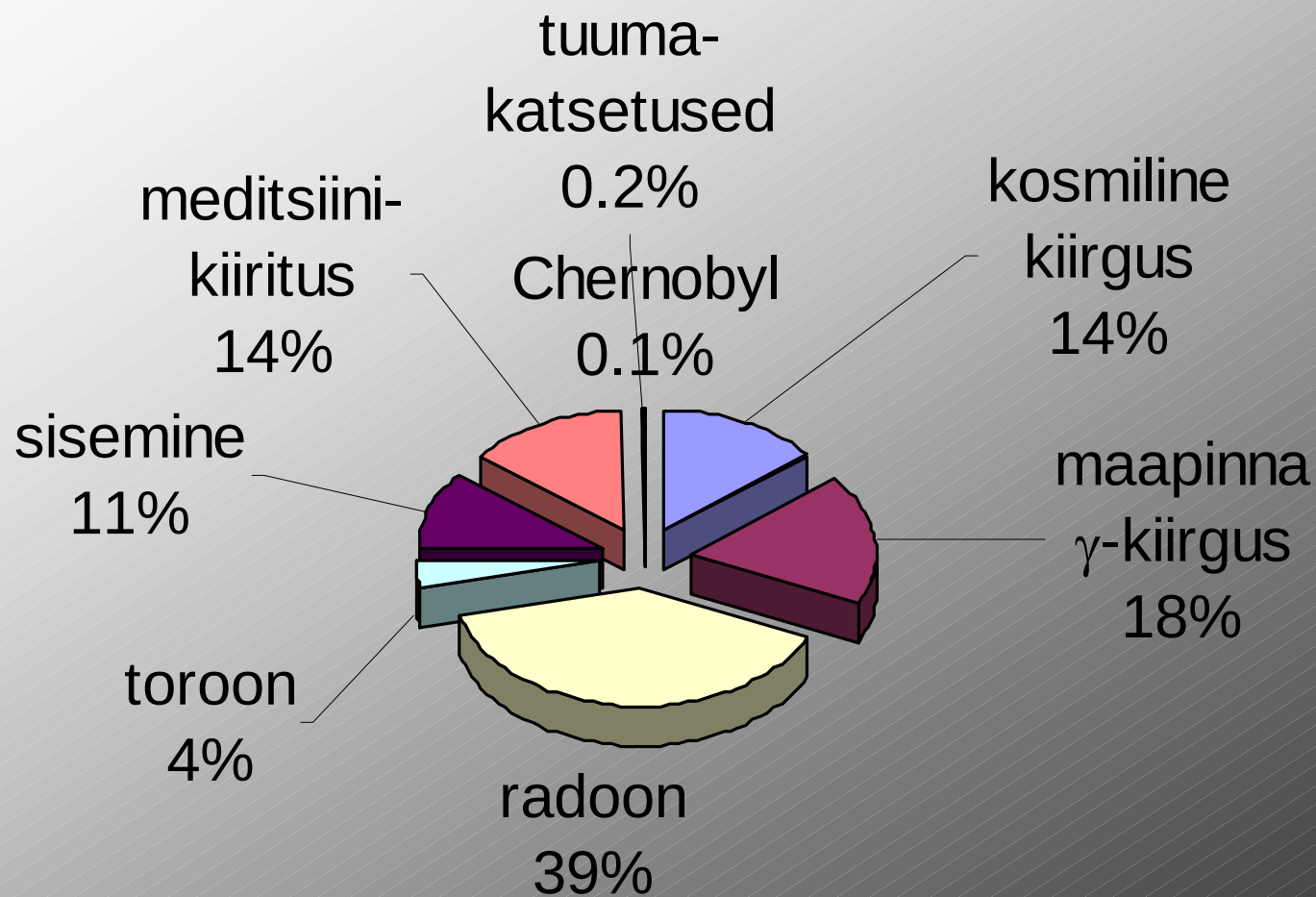
Stohhastilised kiirgusefektid (UNSCEAR, 1994)

- **Tõenäosus kasvaja tekkeks*** (1 mSv/a) **10⁻⁴ /a**
ioniseerivast kiirgusest tingitud ainult 2,5 % kasvajaid
- **Suremus** (pärast 1 Sv kogu elu kestel)**
Lineaarne sõltuvus 0,2 Sv ... 4 Sv.
 - Leukeemia **1,1 %**
 - Kasvajad **10,9 %**
- **Pärilikkushaigused** (doos 1 Sv) **1,2%**
- **Lootekahjustus** (doos 1 Sv, 8. ... 15. nädal) **- 30 IQ**

* **Väikesed doosikiirused: ICRP soovitusel faktor DDREF = 2, seega 5×10^{-5} /mSv**

** **NB! Erinevus akuutse ja kroonilise kiirituse vahel!**

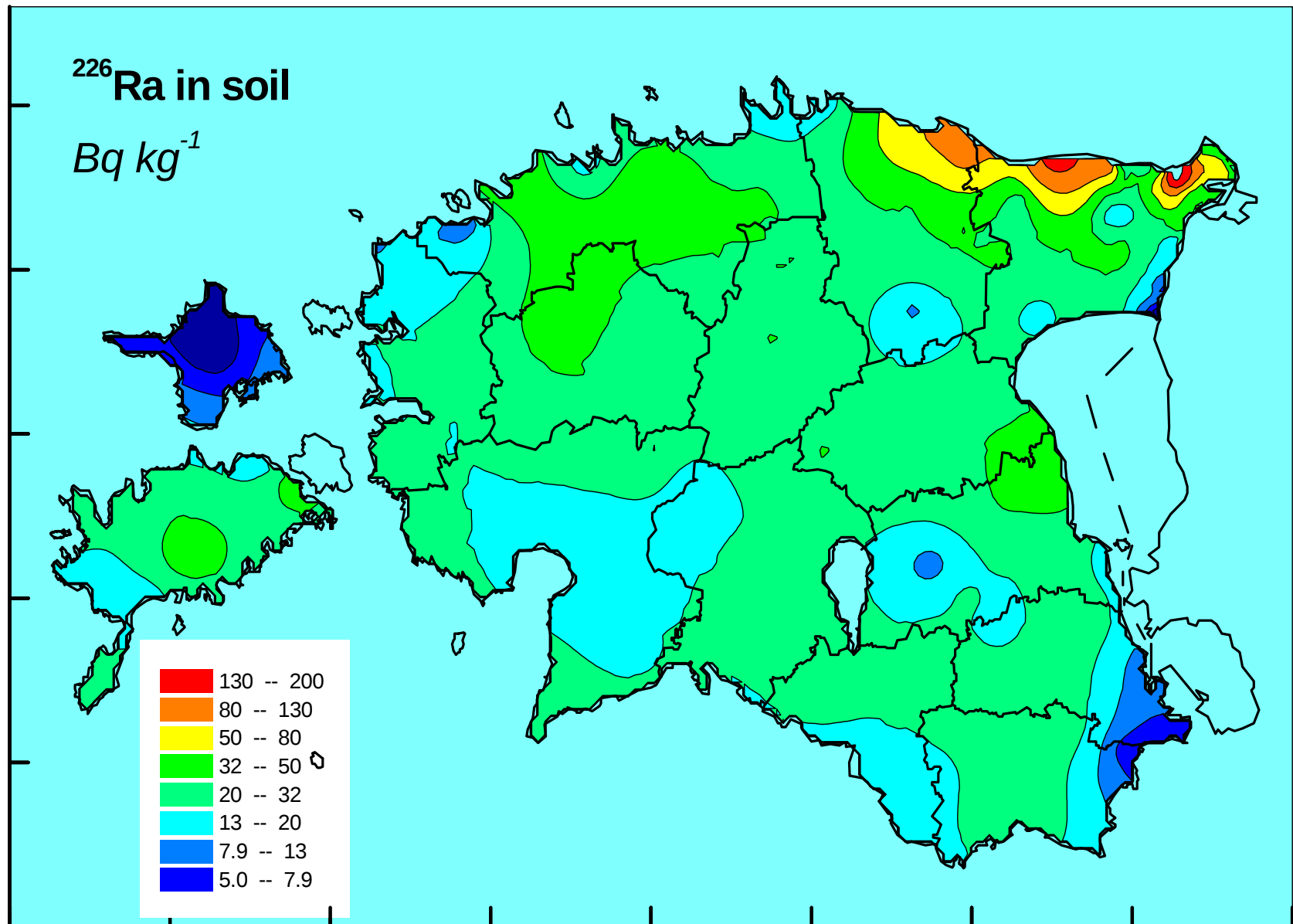
Aastane efektiivdoos 2,8 mSv/a, UNSCEAR 2000



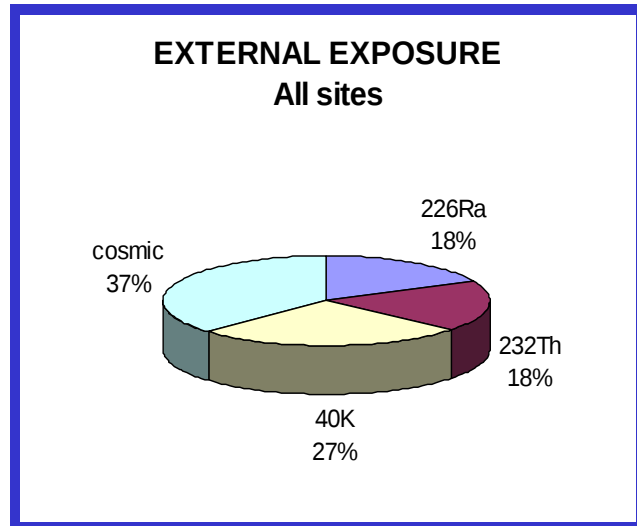
Kosmiline kiirgus - virtualised



Radionukliidid maapinnas



Väliskiirituse doosikiirus

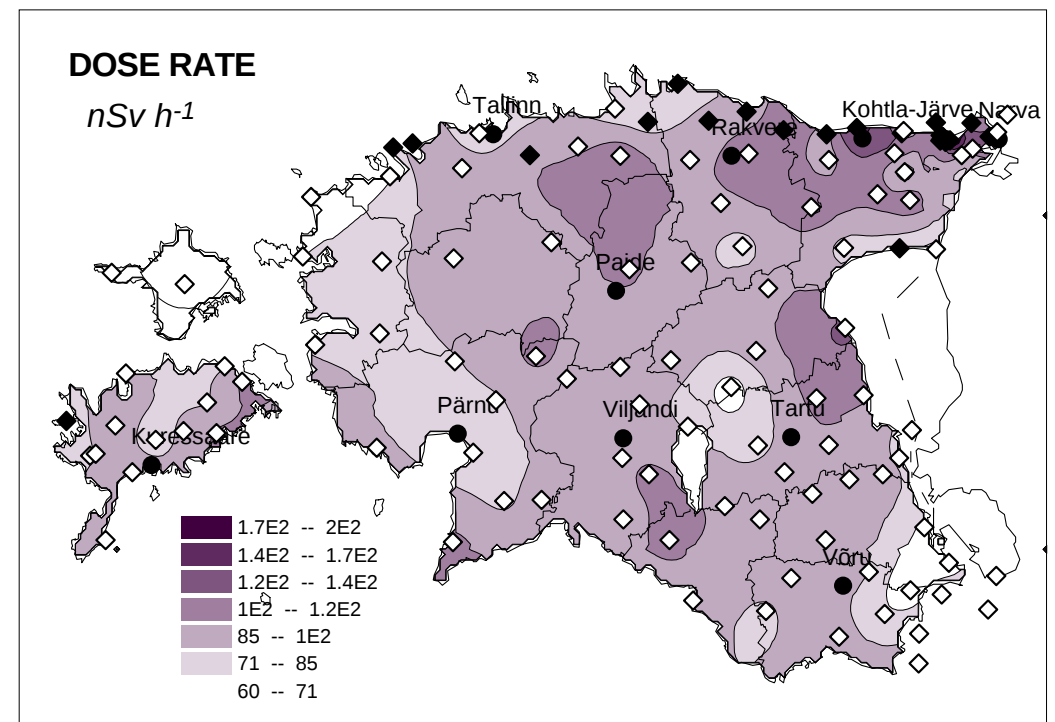


Estonia

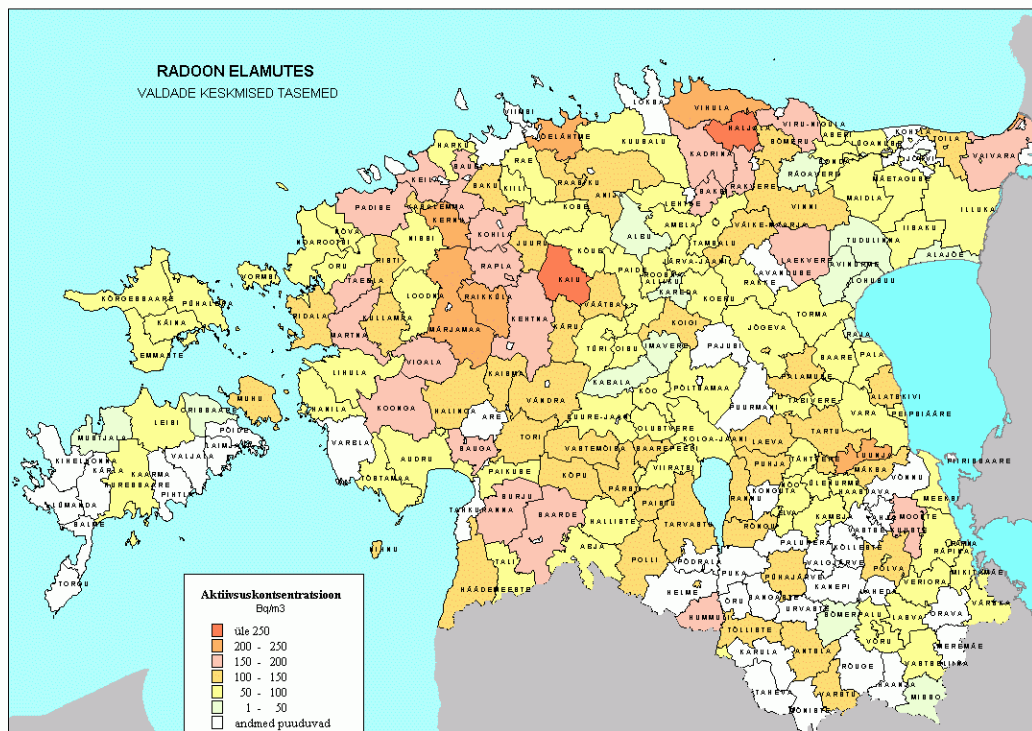
- mean **94 nSv h⁻¹**

NE Estonia

- mean (37 sites) **138 nSv h⁻¹**
- range **76 .. 263 nSv h⁻¹**
- components:
 - ^{226}Ra 40%
 - cosmic radiation 25%



Rn: DOOSIHINDAMINE



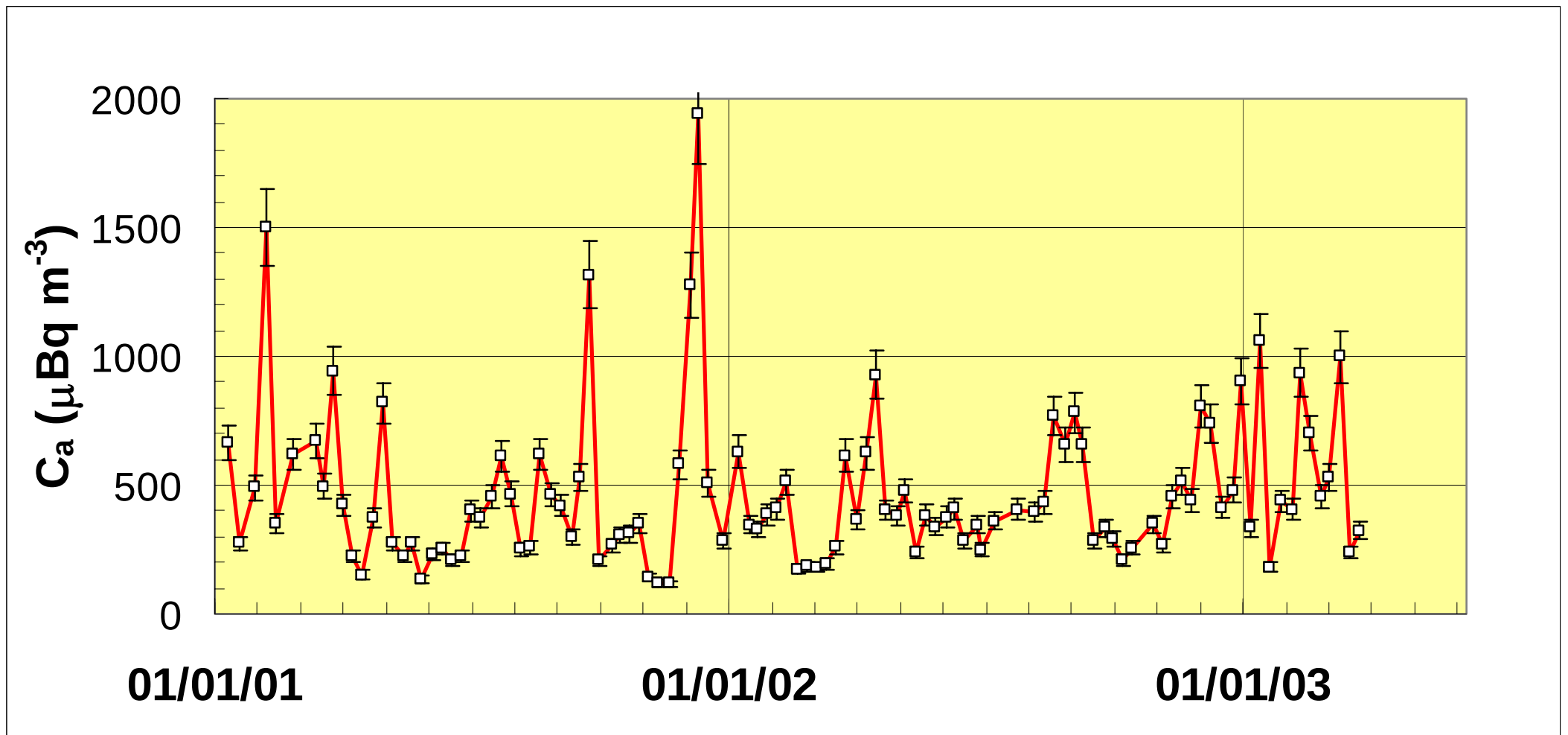
Andmed: L.Pahapill and R.Rajamäe. Radon in houses.
<http://www.envir.ee/ekk/radoon.html> , 2002 (in Estonian)

<i>Siseruumide keskmine</i>	101 Bq m⁻³
<i>Välisõhus (hinnang?)</i>	15 Bq m⁻³
<i>Doosikiiruse hinnang</i>	2,8 mSv a⁻¹
<i>Elanikkond (2001)</i>	1,43 x 10⁶
<i>Fataalne vähk (eluea risk)</i>	5 x 10⁻⁵ mSv⁻¹
<i>²²²Rn põhjustatud</i>	200 a⁻¹

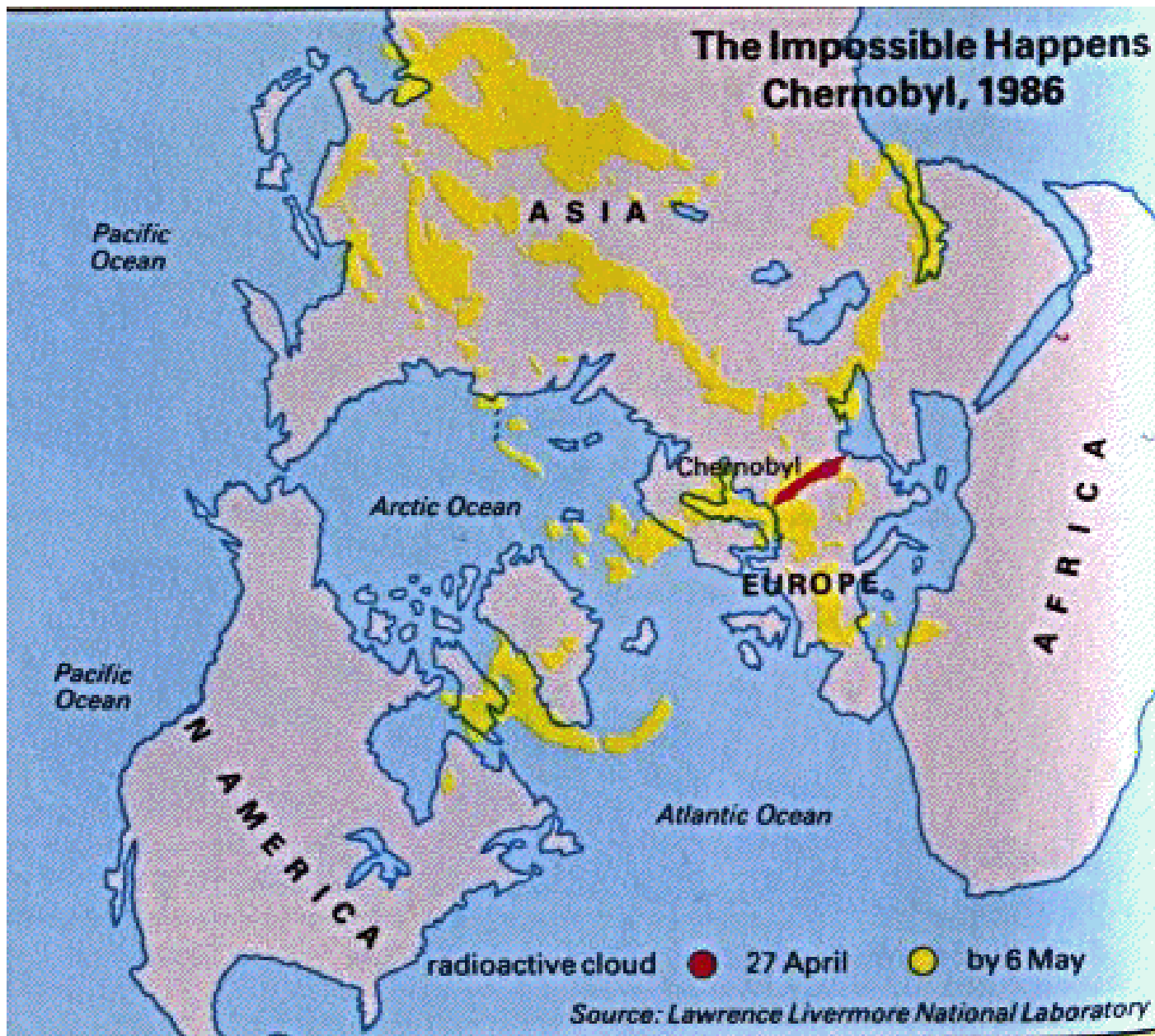
Rn tekitab efektiivdoos aastas:

$$E = C_{Rn} F t h$$

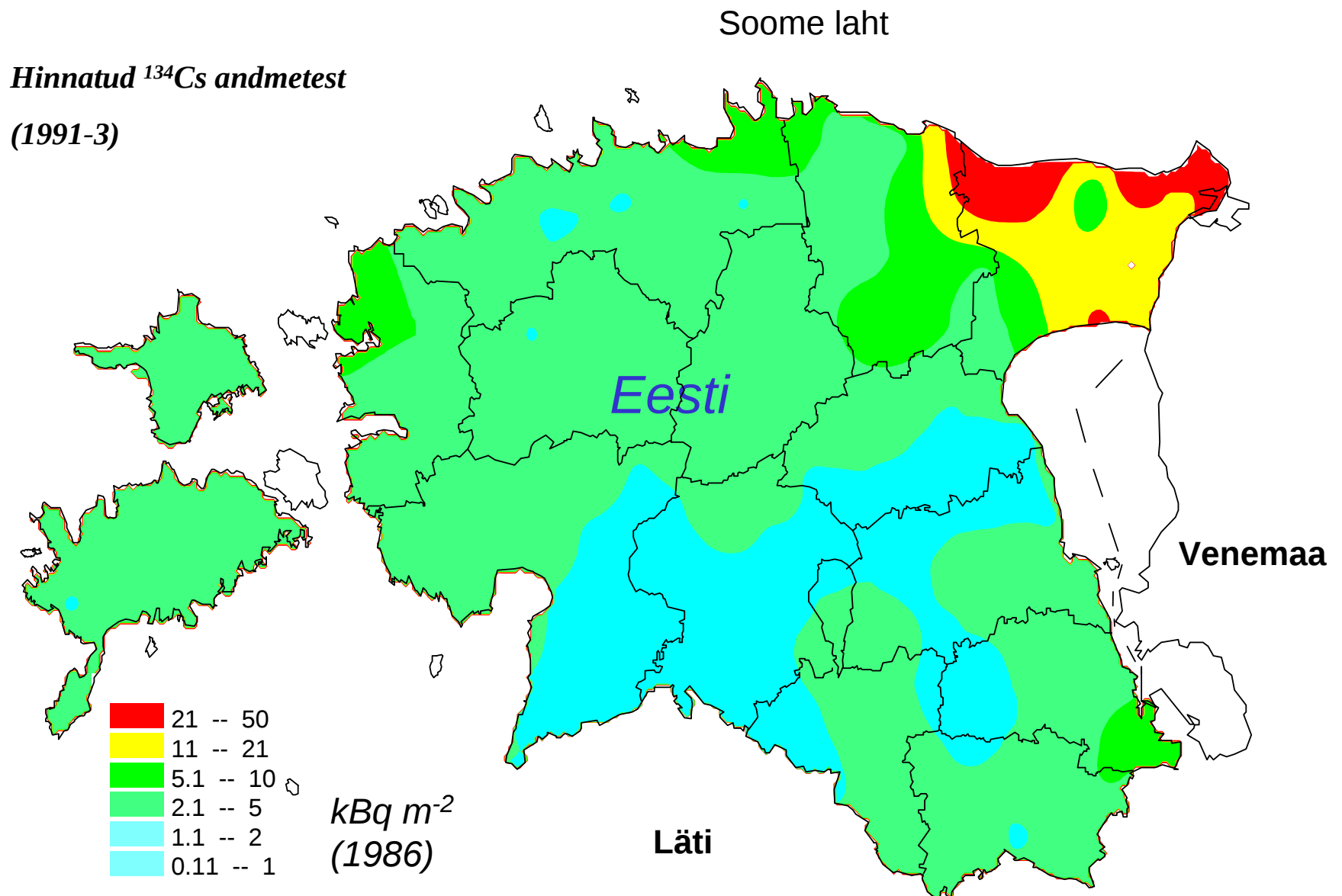
^{210}Pb air concentrations, C_a , Narva-Jõesuu, 2001-2003



Map of Chernobyl Pollution



Chernobõli ^{137}Cs pinnases, ref. 01.05.86



After Effects of Chernobyl



The deserted city of Pripjat, Chernobyl nuclear power plant in the background. Ukraine.

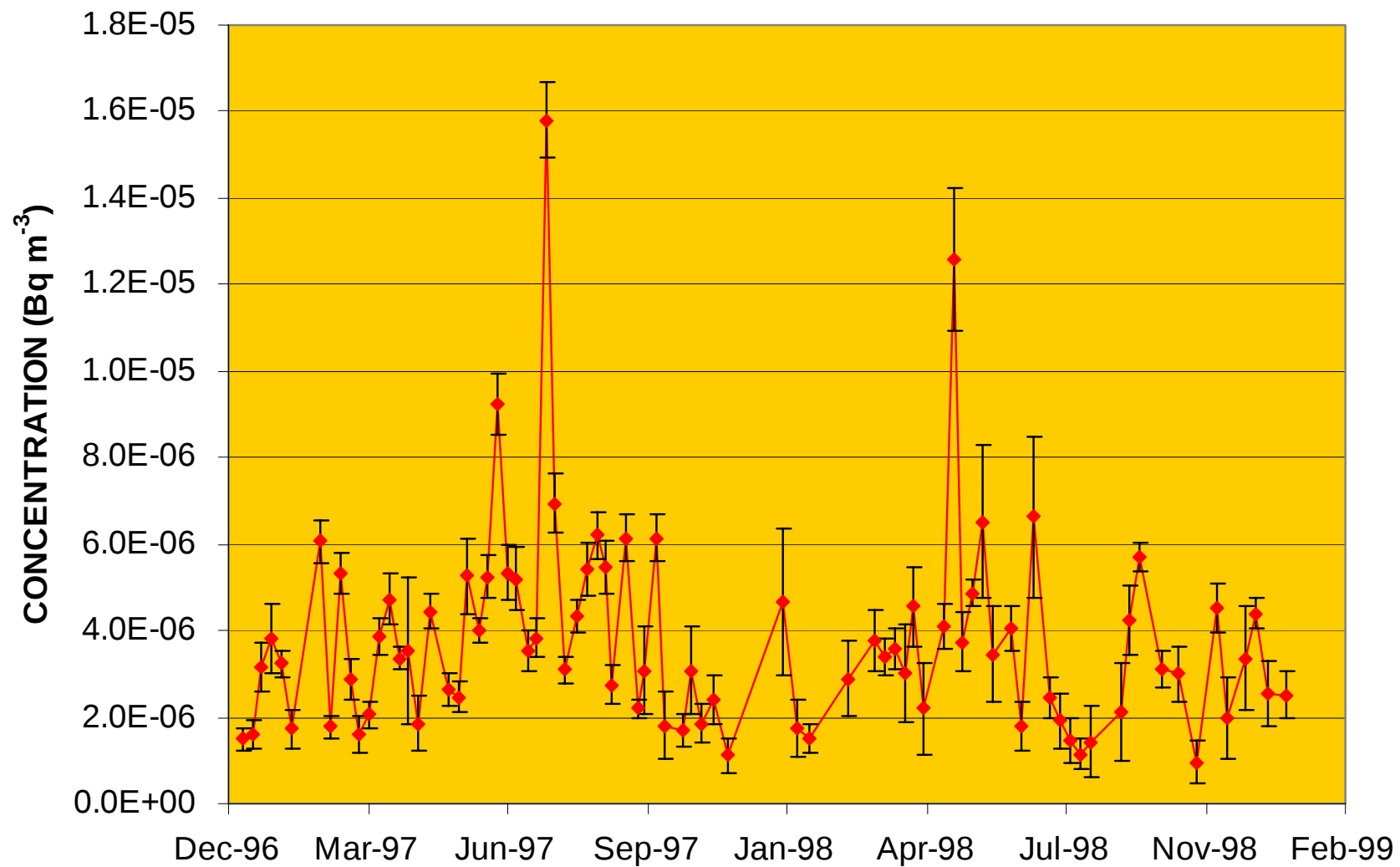
0.96.07.01.04 DEC 1995

CHERNOBYL UKRAINE D

© Greenpeace/Shirley

^{137}Cs õhus, HVAS, Kiirguskeskus

Narva-Jõesuu



Radioaktiivsed jäätmed



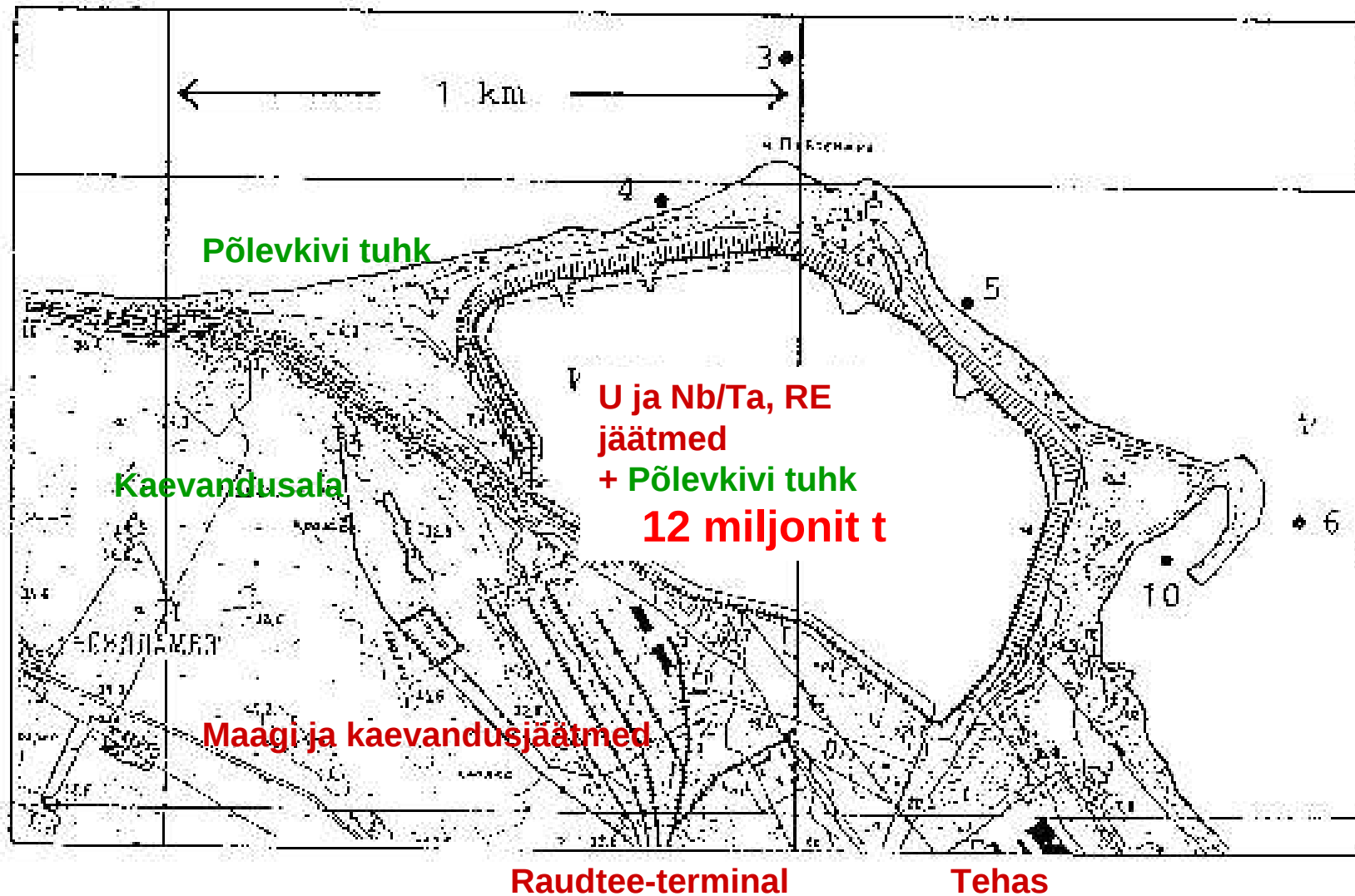
Storage Tunnel, Yucca Mountain



Paldiski end. NSVL tuuma-allveelaevnike treeningukeskus



Sillamäe jäätmehoidla (33 ha, 25 m)



Uued ohud



radioaktiivsus + lõhkeaine + hajutamine = RDD - TERROR



Täna

.. tähelepanu ja kannatlikkuse eest