



TARTU ÜLIKOOL

Fermioni suvekool 2025

Kiirgus meie ümber ja sees

Siiri Salupere, PhD

kiirguskaitse teadur
Tartu Ülikooli Füüsika Instituut,

Kiirgusohutuse nõunik
AS ALARA

siiri.salupere@ut.ee

06.08.2025

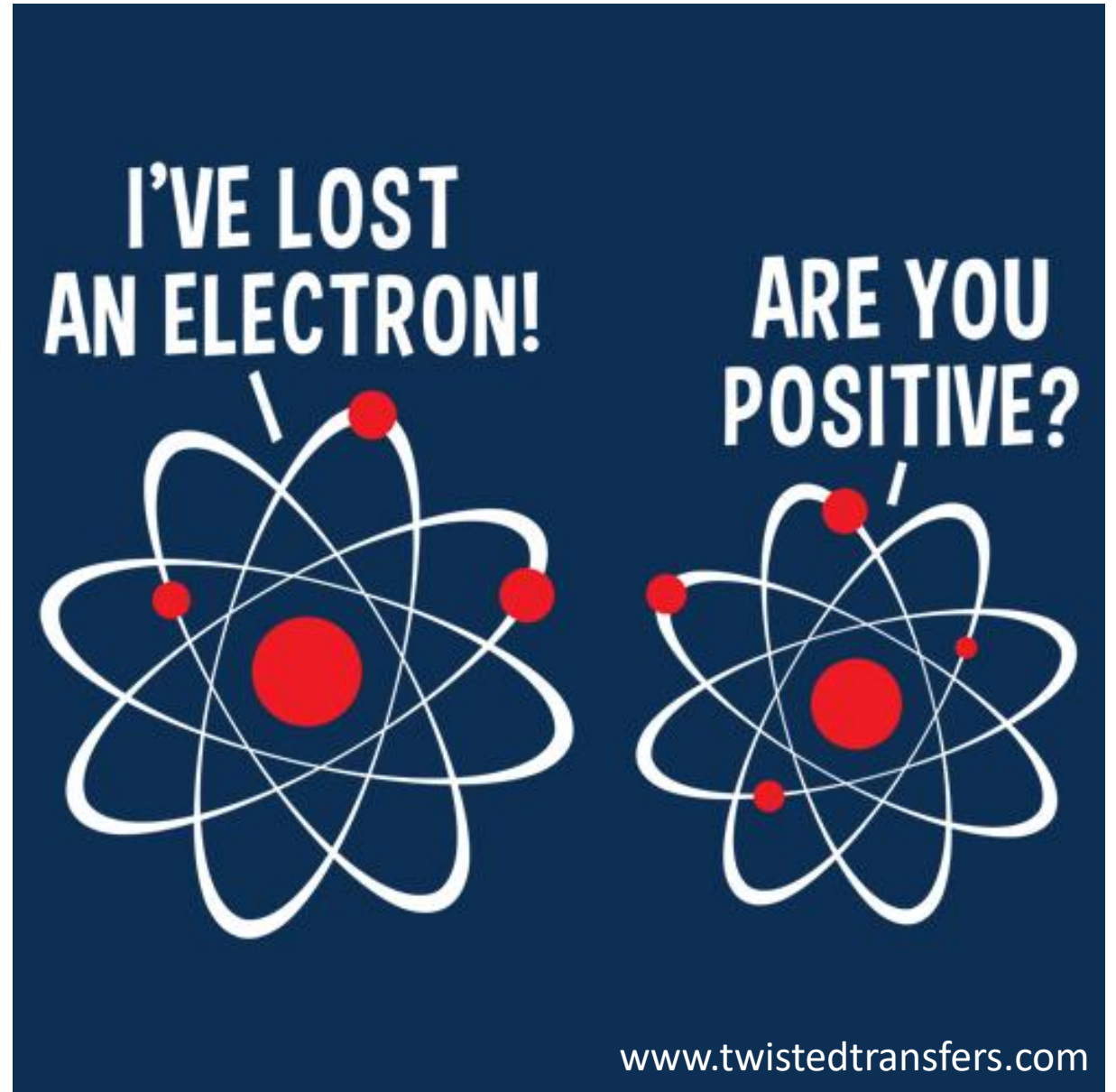
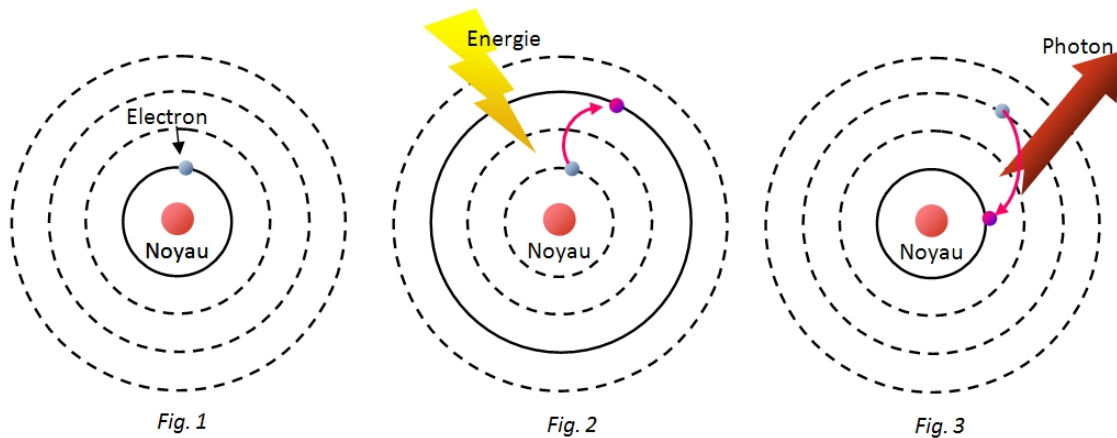
Millest juttu tuleb?

- ☐ Mis on ioniseeriv kiirgus?
 - ☐ Kust see tuleb ja kus me sellega kokku puutume?
- ☐ Suured ja väikesed kiirgusdoosid
 - ☐ Teeme suurusjärgud selgeks!
- ☐ Ioniseeriva kiirguse bioloogiline mõju
 - ☐ Kust me seda teame?
 - ☐ Kui vähe me sellest tegelikult teame?!

Ioniseeriv kiirgus

Kiirgus, mis suudab
ainet ioniseerida.

Lisaks ionisatsioonile toimub ioniseeriva
kiirguse mõjul alati ka aine ergastumine.

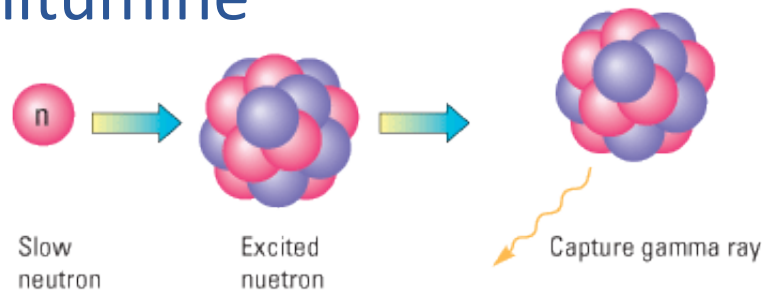


Kuidas ioniseeriv kiirgus tekib?

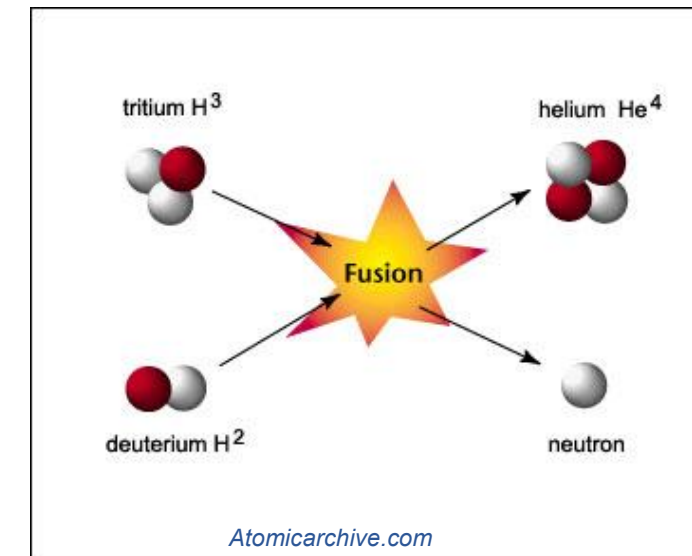
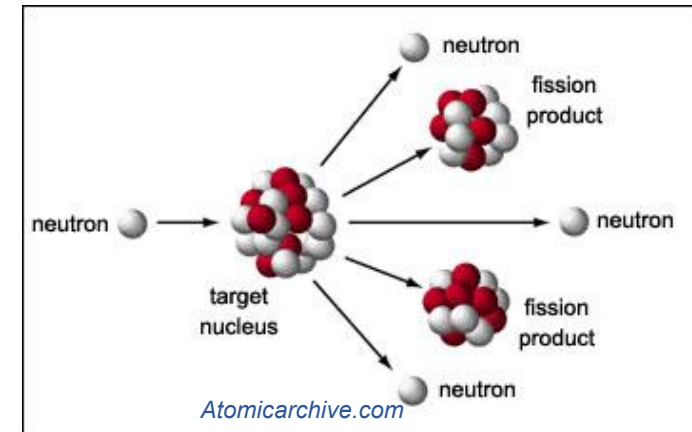
Aatomituumade muundumine

- **Tuumareaktsioonid**

- Mitu osapoolt!
- Tuumalõhustumine
- Fusioon ehk tuumade liitumine
- Neutronneeldumine
- Jne

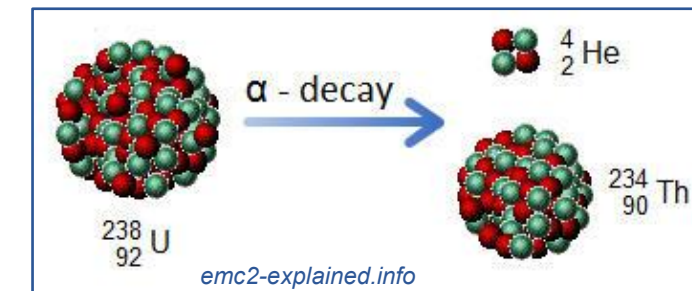


glossary.oilfield.slb.com/en/terms/n/neutron_capture



- **Radioaktiivsus ehk tuumalagunemine**

- Üks osapool
- Aatomituumade omadus spontaanselt laguneda

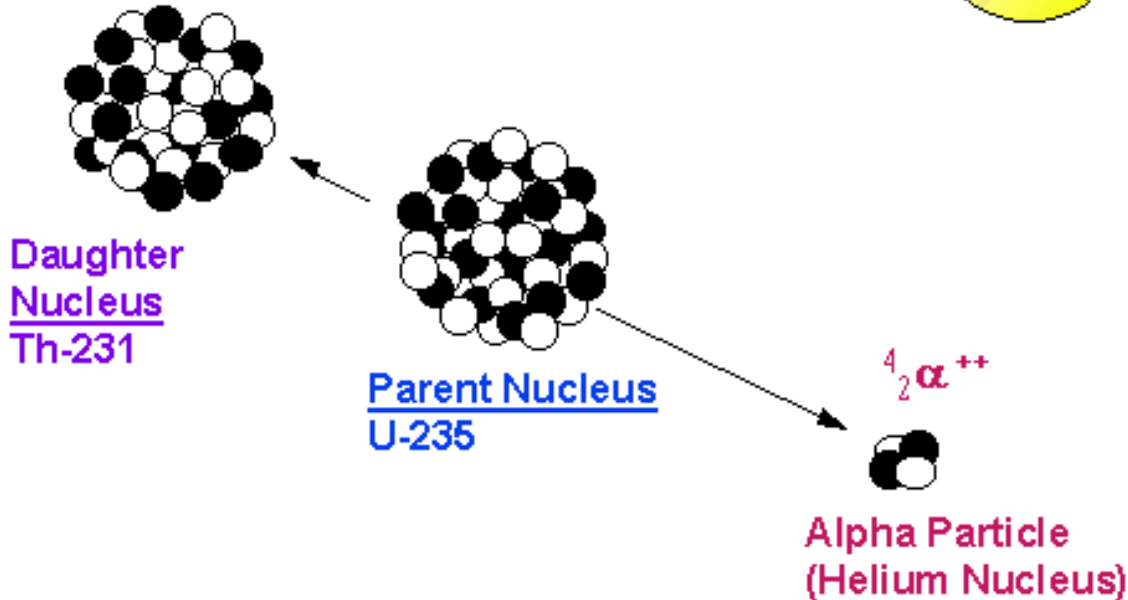


Peamised radioaktiivse lagunemise viisid

Alfalagunemine

Alfaosake ehk ${}^4_2\text{He}$

Alpha Particle Radiation

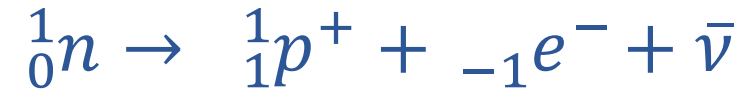


Beetalagunemine

Beetaosake ehk elektron või positron

β^- lagunemine

Neutron laguneb prootoniks ja elektroniks:



β^+ lagunemine

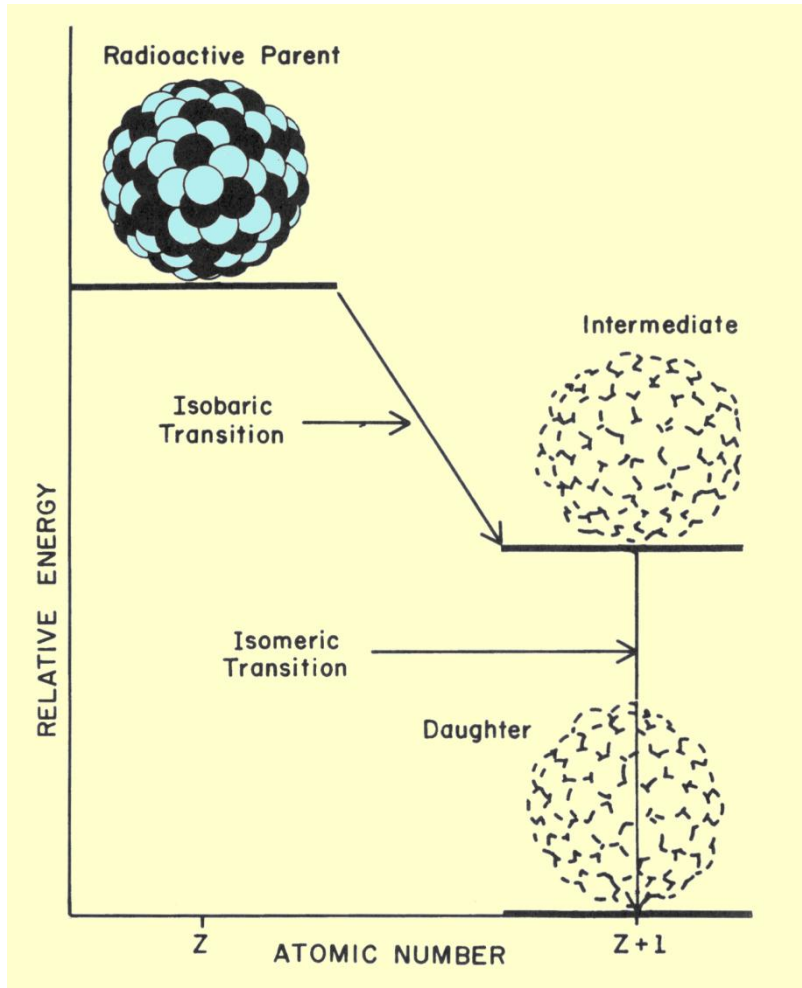
Prooton laguneb neutroniks ja positroniks:



Aga gamma ja röntgen?

Gammakiirgus

Alfa- ja beetalagunemisele järgnev energia vabanemine

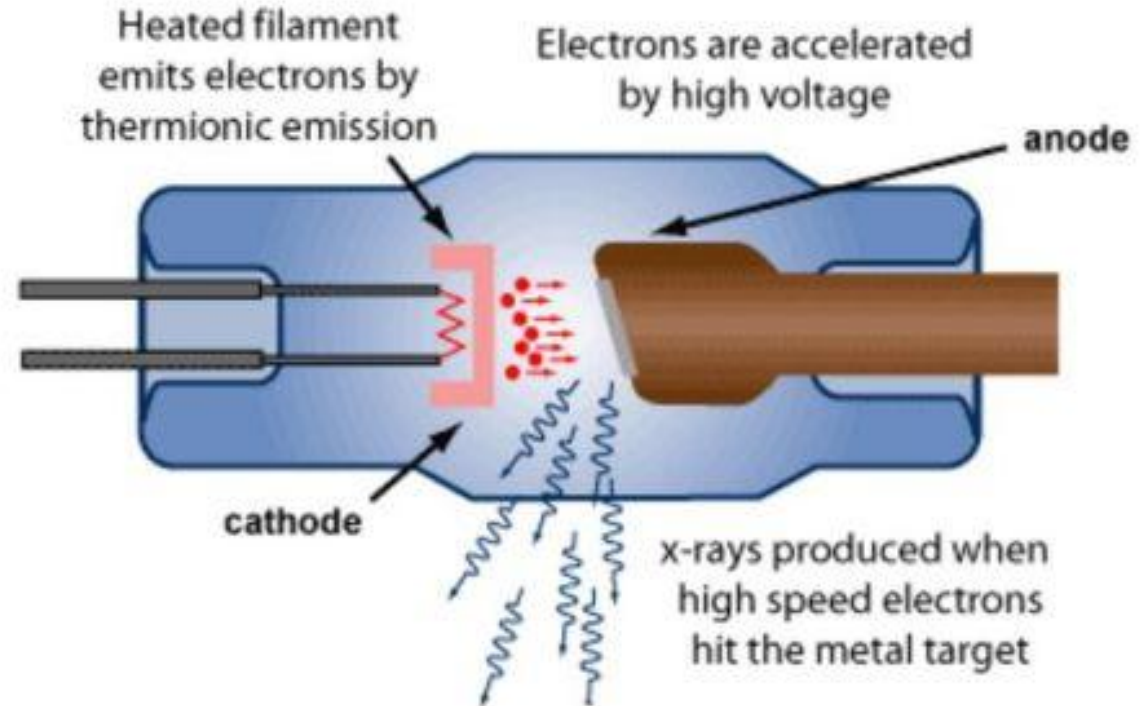


www.sprawls.org/ppmi2/RADIOTRANS/

Röntgenkiirgus

Muudatused elektronkattes.
Saab tekitada elektrikiirgusseadme abil.

Typical X-ray tube operation

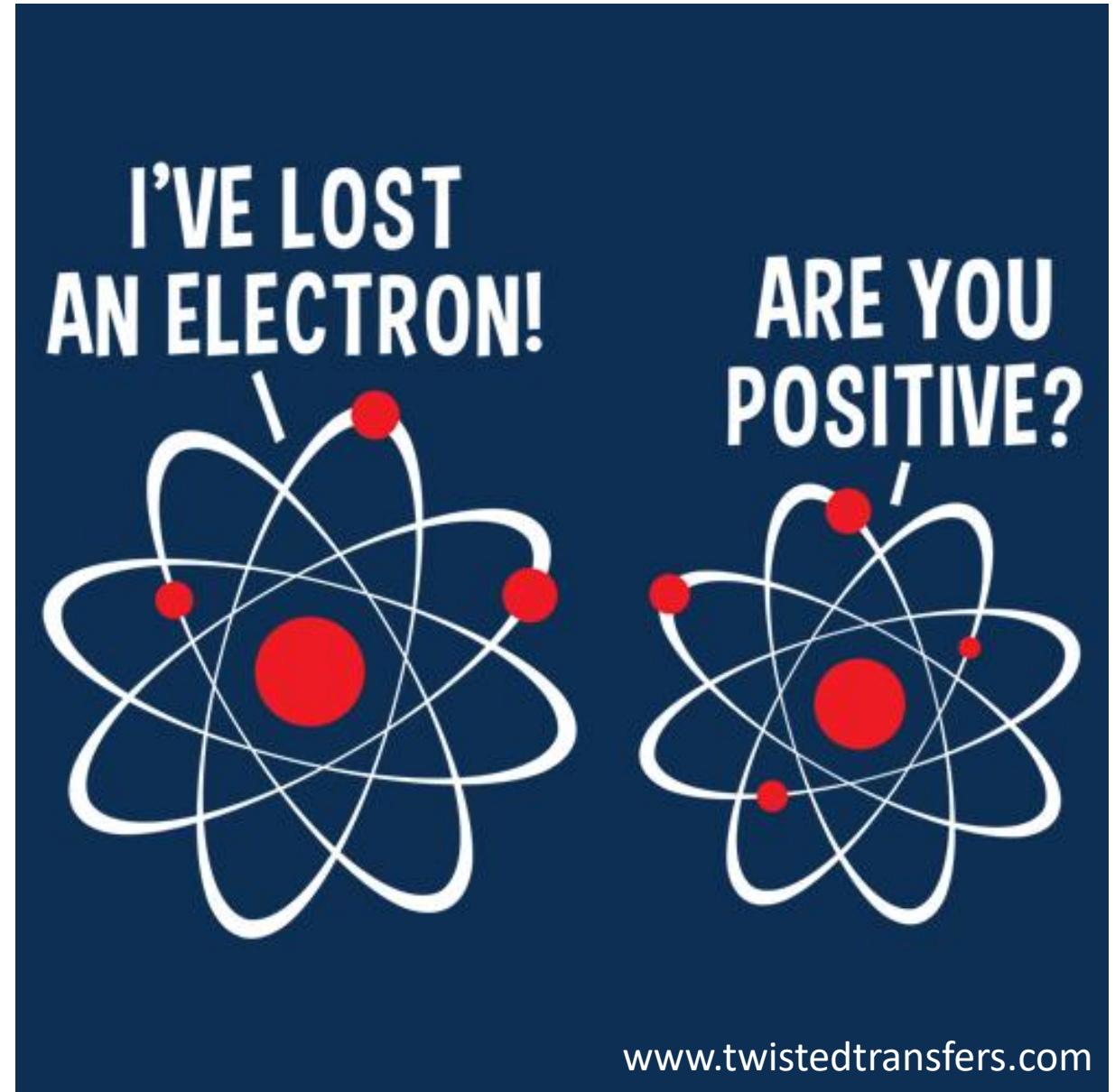


www.designworldonline.com/x-rays-and-ionizing-radiation/

Ioniseeriv kiirgus

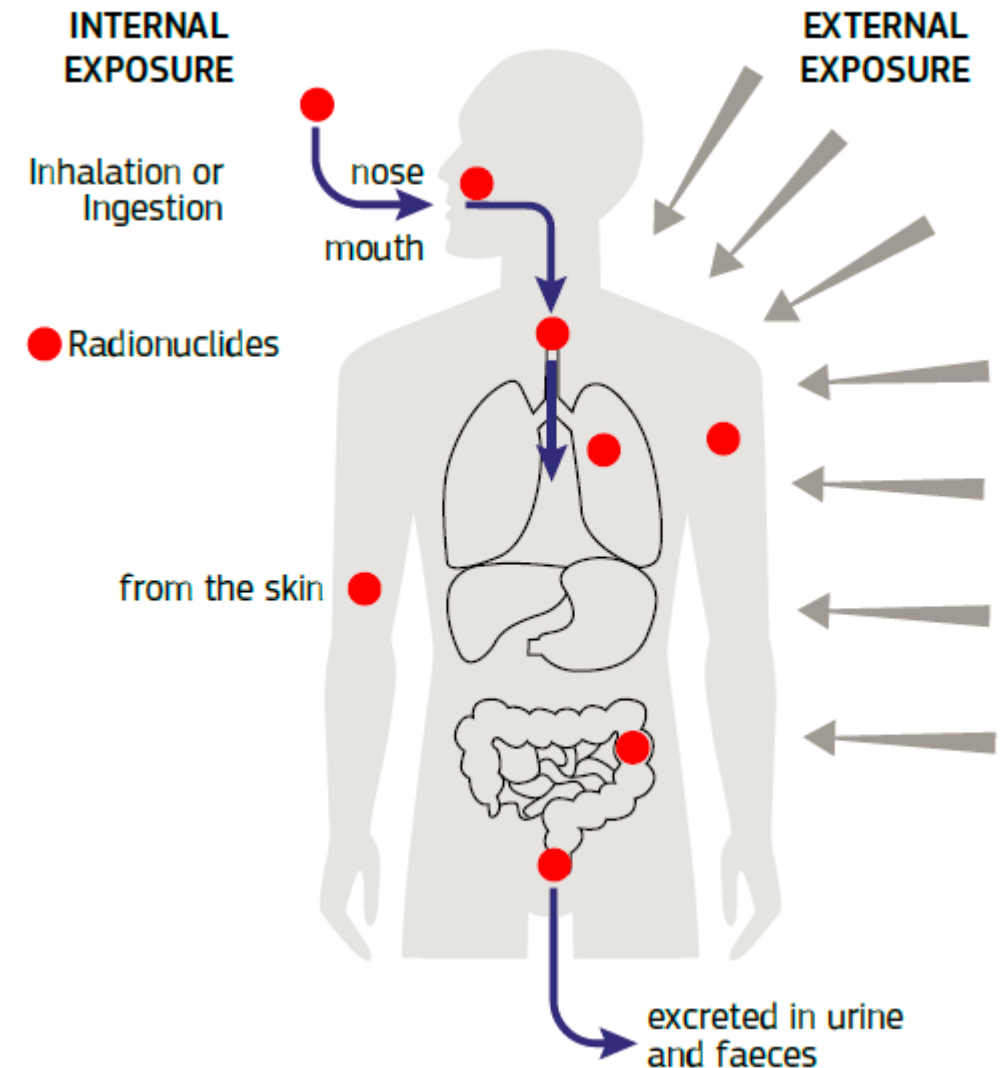
Kiirgus, mis suudab
ainet ioniseerida.

- Rasked laetud osakesed
 α
- Elektronid-positronid
 β^- β^+
- Elementaarosakesed
neutronid
- Footonid
 γ , röntgen
Elektromagnetkiirgus
energiaga > 100 eV



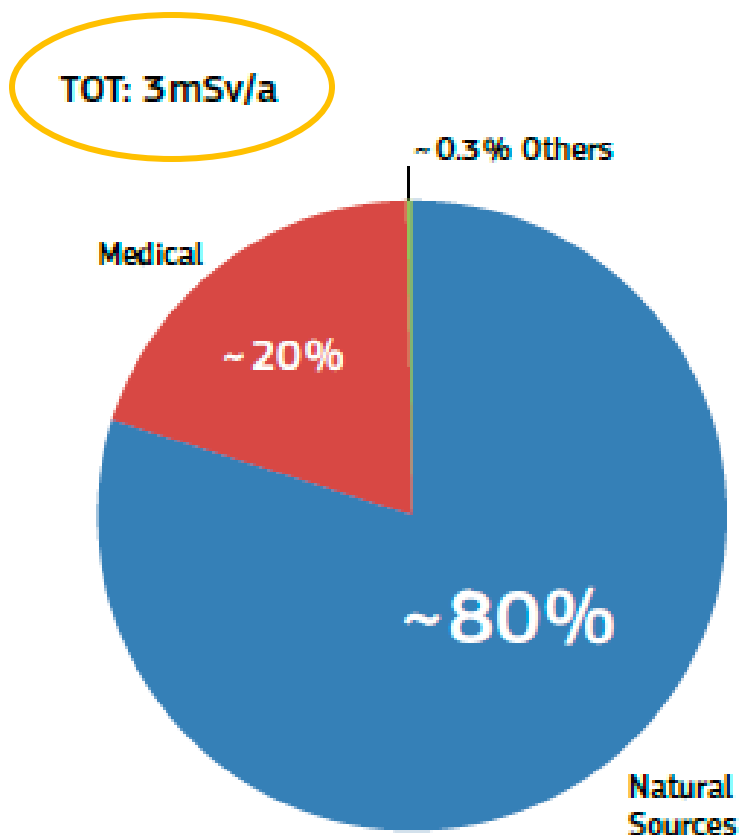
Inimese kokkupuude ioniseeriva kiirgusega

- Väliskiiritus – kui kiirgusallikas asub väljaspool meie keha
- Sisekiiritus – kui kiirgusallikas (radioaktiivsed elemendid) satuvad inimkeha sisse
 - Sissehingamine
 - Sissesöömine/-joomine

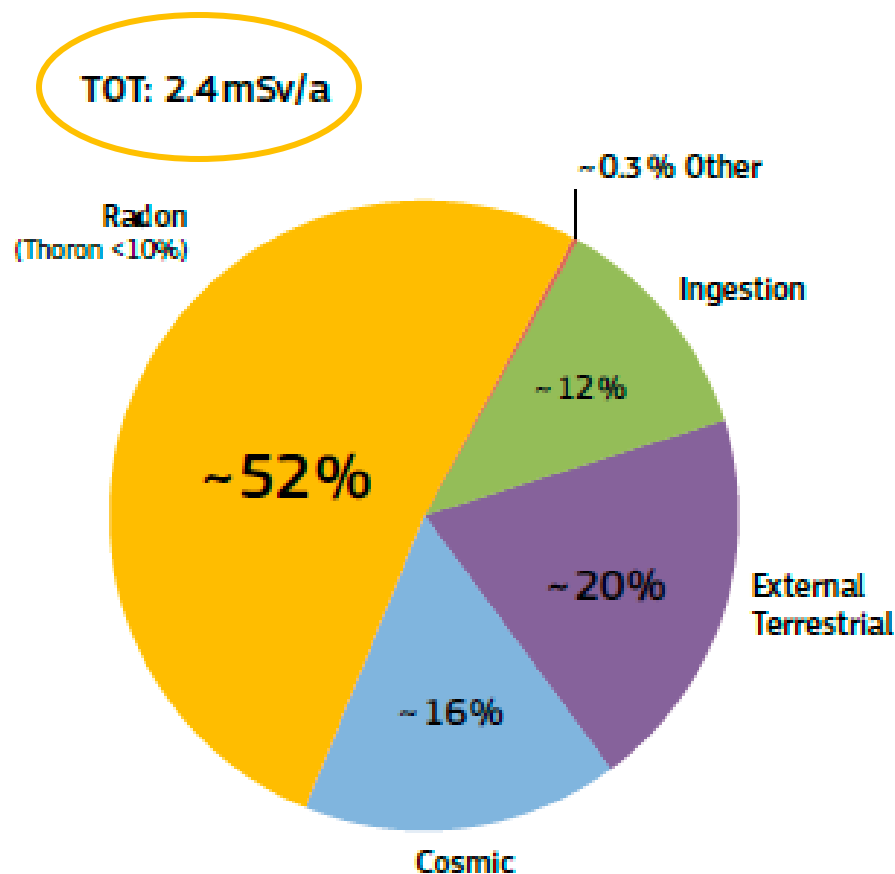


Aastane efektiivdoos, ülemaailmne keskmine

Contributions to Public Exposure



Public exposure to natural radiation



Joonis: Cinelli *et al.*, 2019 „European Atlas of Natural Radiation“

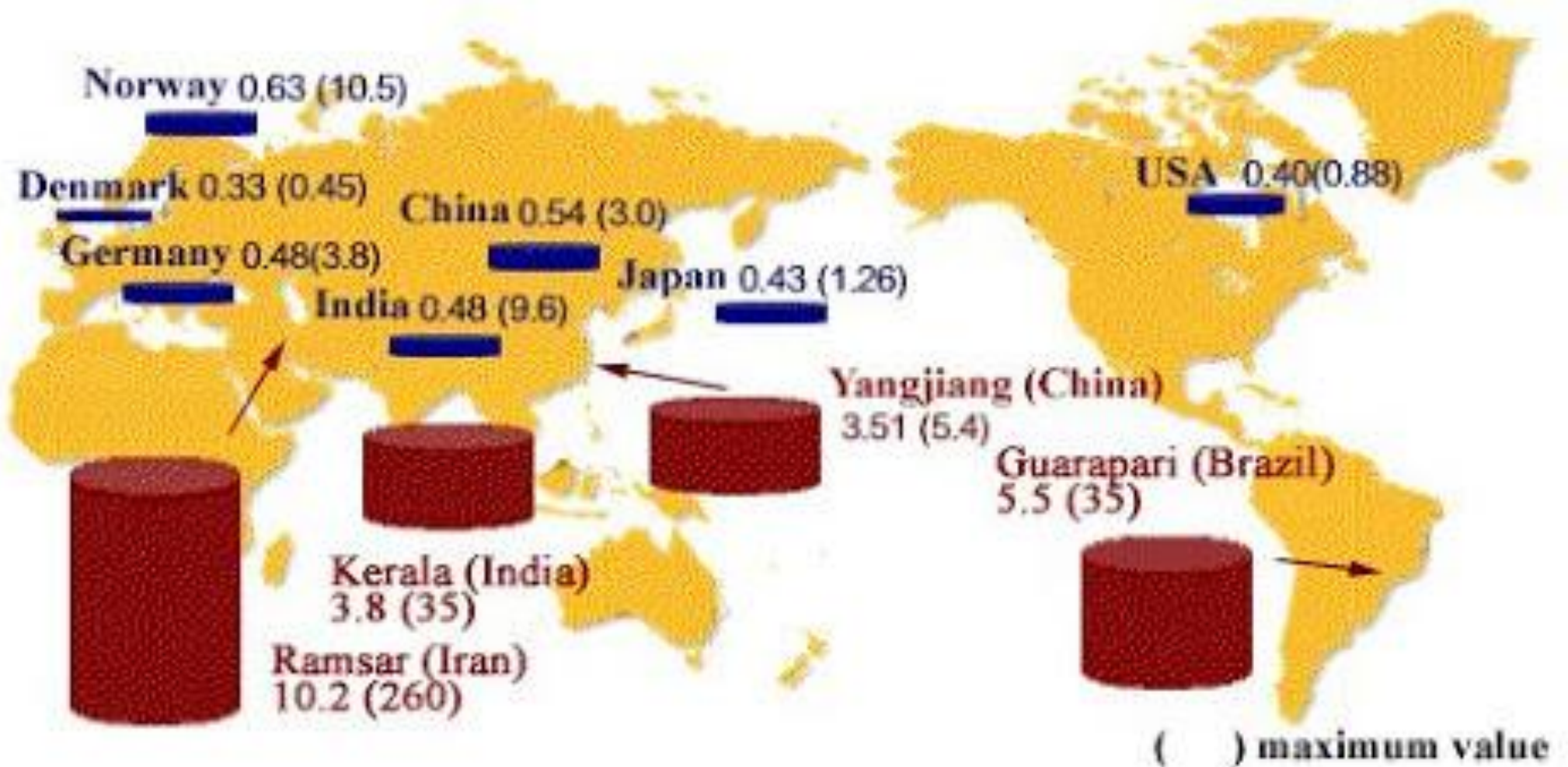
Allikas: UNSCEAR, 2008

UNSCEAR = *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*

Figure 2-22.
Contribution of different sources of radiation
to the dose forming ionising radiation.
Source: UNSCEAR, 2008.

Kiirgusdoosi looduslik varieeruvus

Väliskiiritusest põhjustatud efektiivdoos (mSv/a)



Miks looduslik kiirgusfoon nii palju varieerub?

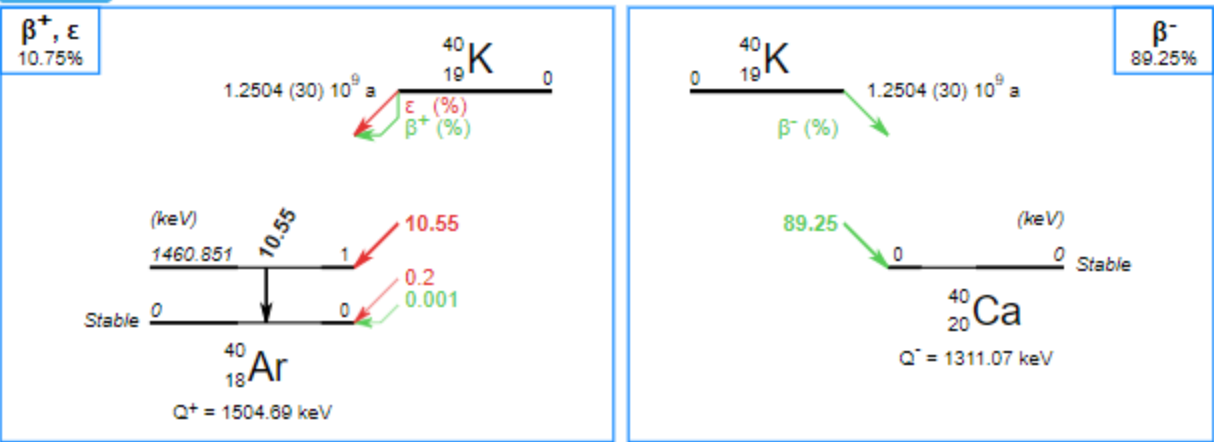
Primordiaalsed radionukliidid

Tekkinud enne Päikesesüsteemi teket

- Pikaajalised üksikradionukliidid
- Lagunemisread

Pikaealised üksikradionukliidid

⁴⁰K – kõige levinum primordiaalne radionukliid.



Joonis: <http://www.nucleide.org/Laraweb/>

Esineb stabiilses suhtes K isotoopidega:

³⁹K 93,3%

⁴¹K 6,73%

⁴⁰K 0,0117%

Kaalium – 7. kõige levinum element Maal.

Radionuclide	Half-life (a)	Major radiations	Typical crustal concentration (Bq/kg)
⁴⁰ K	1.26*10 ⁹	β , γ	630
⁵⁰ V	6*10 ¹⁵	γ	2*10 ⁻⁵
⁸⁷ Rb	4.8*10 ¹⁰	β	70
¹¹³ Cd	8.04*10 ¹⁵	β	<2*10 ⁻⁶
¹¹⁵ In	6*10 ¹⁴	β	2*10 ⁻⁵
¹²³ Te	1.2*10 ¹³	X rays	2*10 ⁻⁷
¹³⁸ La	1.12*10 ¹¹	β , γ	2*10 ⁻²
¹⁴² Ce	> 5*10 ¹⁶	Not reported	<1*10 ⁻⁵
¹⁴⁴ Nd	2.4*10 ¹⁵	α	3*10 ⁻⁴
¹⁴⁷ Sm	1.05*10 ¹¹	α	0.7
¹⁵² Gd	1.1*10 ¹⁴	α	7*10 ⁻⁶
¹⁷⁴ Hf	2.0*10 ¹⁵	α	2*10 ⁻⁷
¹⁷⁶ Lu	2.2*10 ¹⁰	e ⁻ , γ	0.04
¹⁸⁷ Re	4.3*10 ¹⁰	β	1*10 ⁻³
¹⁹⁰ Pt	6.9*10 ¹¹	α	7*10 ⁻⁸
¹⁹² Pt	1*10 ¹⁵	α	3*10 ⁻⁶
²⁰⁹ Bi	2*10 ¹⁹	α	<4*10 ⁻⁹
¹²⁸ Te	7.7*10 ²⁴	double β	-

Tabel: Cinelli *et al.*, 2019 „European Atlas of Natural Radiation“

Looduslikud lagunemisread

Uraanirida

Emanukliid U-238

Tooriumirida

Emanukliid Th-232

Aktiiniumirida

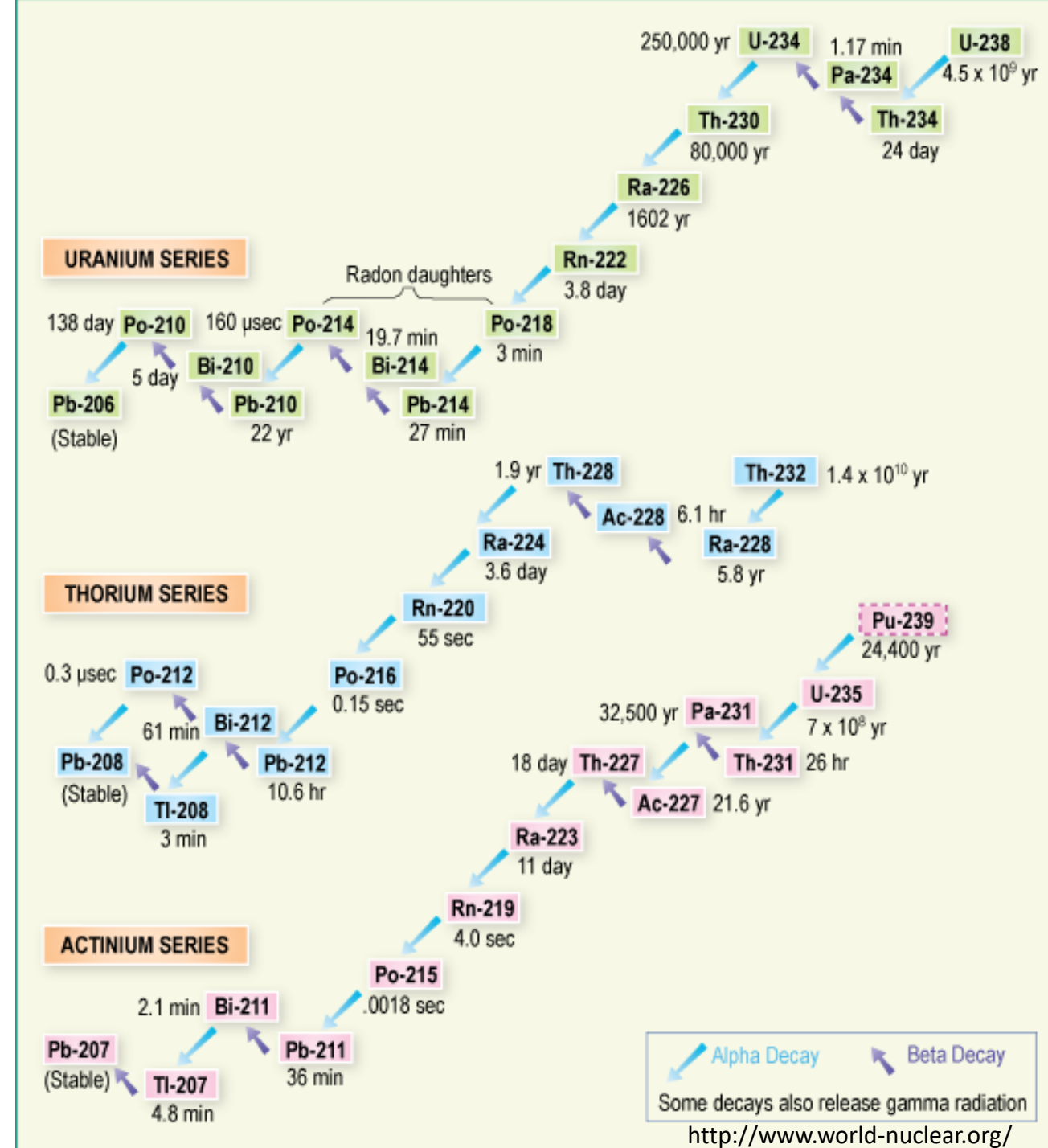
Emanukliid Pu-239

($t_{1/2} = 24\,000$ a) juba ära lagunenu!

Algab nukliidiga U-235

Pane tähele:

- kõik read sisaldavad ühte Rn isotoopi
- kõik read lõpevad stabiilse Pb isotoobiga.



Radooni (Rn-222) kontsentratsioonid erinevates keskkondades

1 pCi/l = 37 Bq/m³

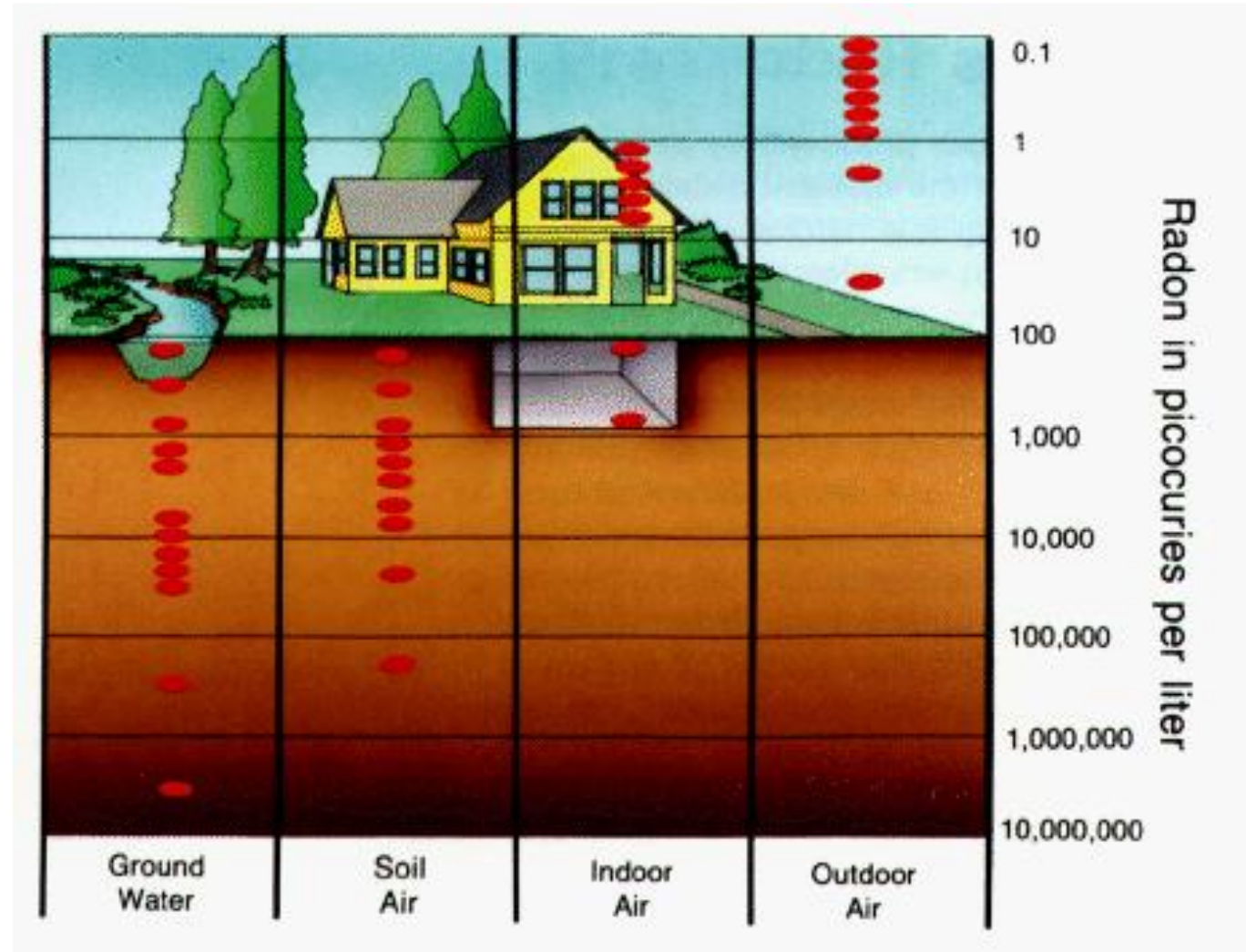
Pinnaseõhk 1–10 000 kBq/m³

Põhjavesi 3–80 000 kBq/m³

Viitetase Euroopa Liidus
100 kBq/m³ (100 Bq/l)

Välisõhk keskmiselt 2–20 Bq/m³,
max 100 Bq/m³

Siseõhk 20–110 000 Bq/m³,
Ülemaailmne populatsiooni
kaalutud keskmine 40 Bq/m³
Viitetase Euroopa Liidus
300 Bq/m³



Kosmilist päritolu ioniseeriv kiirgus

■ Galaktiline komponent

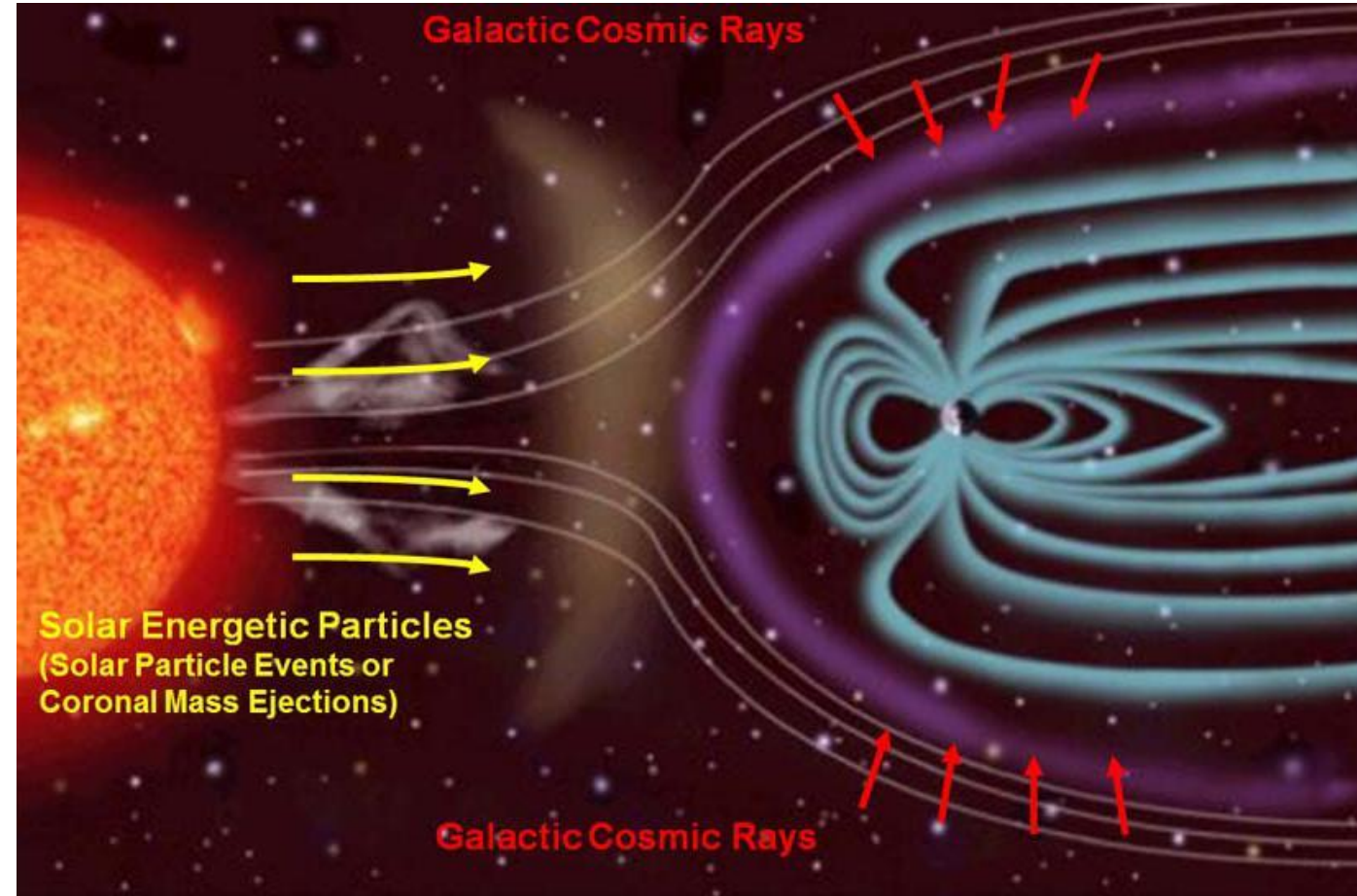
Päritolult nii Galaktika-sisene
(osakesed energiaga 10^8 – 10^{16} eV)
kui ka Galaktika-väline ($> 10^{15}$ eV)

- Kõrge energiaga **prootonid** (84%)
- **α -osakesed** (12%),
- Rasked aatomituumad (1%)
- **Elektronid** (3%)

■ Solaarne komponent

(osakeste energia 10^6 – 10^{10} eV)

- **Prootonid** (98%)
- **α -osakesed** (2%)



Joonis: NASA/JPL-Caltech/SwRI

<http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA16938.jpg>

Doosid ja doosikiirused erinevates olukordades

Meid ümbritsev tüüpiline foon 100 nSv/h

Foon Himaalajas (6,7 km merepinnast) 1 μ Sv/h

Hambaröntgen 1–8 μ Sv

Üleookeanilend (Helsingi-New York) 50 μ Sv

Vt prantslaste lennureiside doosikalkulaatorit <https://www.sievert-system.org/?locale=en#Calcul>

Rindkere kompuutertomograafia 7 mSv

*Erinevate meditsiiniprotseduuride doosihinnanguid leiad siit
<https://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?pg=safety-xray>*

Kiirgustöötaja efektiivdoosi piirmäär 20 mSv/a

Letaalne doos LD50/30 4-5 Sv

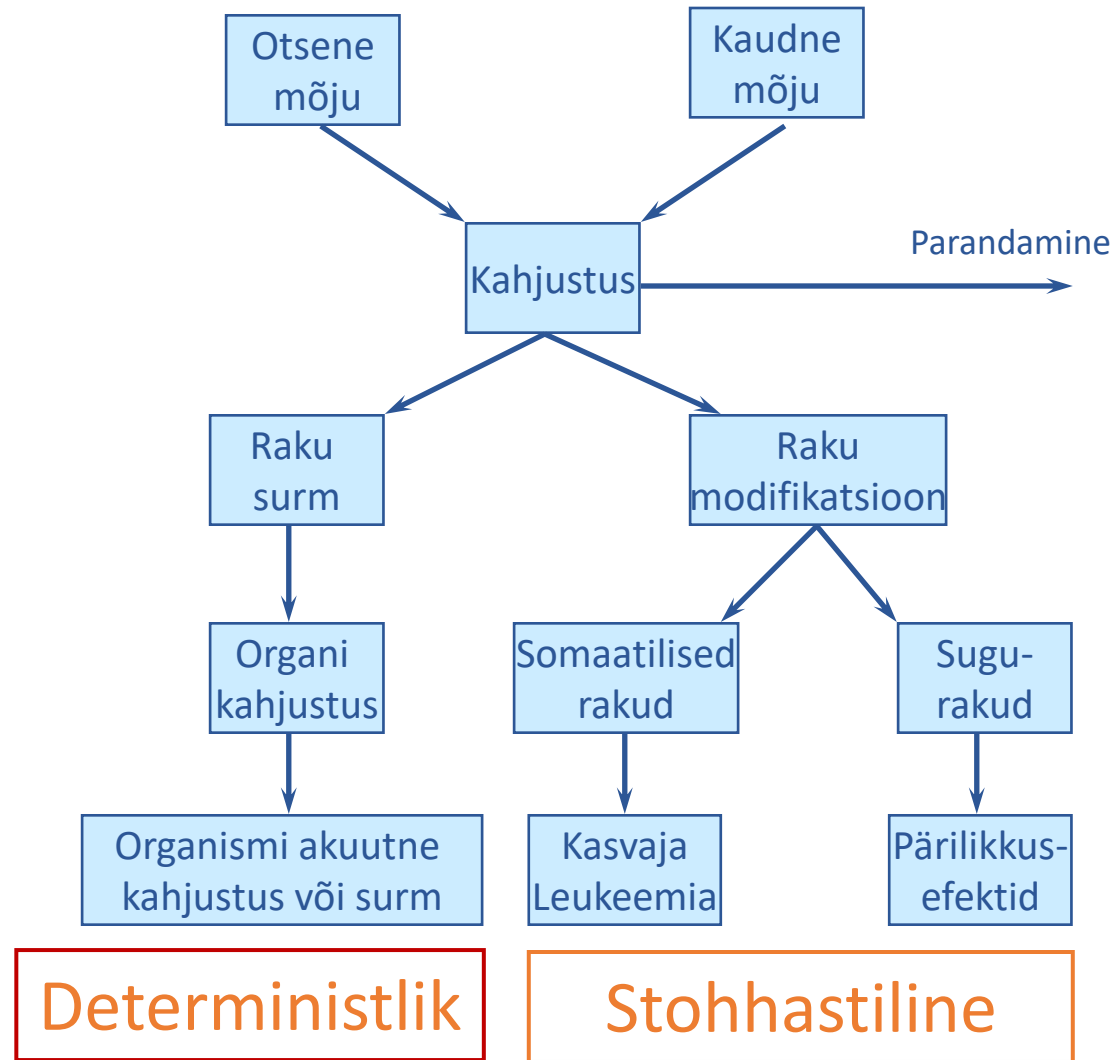
Suurim teadaolev doos, mis pole tapnud 64 Sv 20 a jooksul

Pu-238 ja Pu-239 süstimine Albert Stevens'ile (14. mai 1945) https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Stevens

Ioniseeriva kiirguse mõju organismile

Akuutsed efektid

- Akuutne kiiritustõbi
 - ❑ iiveldus ja oksendamine
 - ❑ nõrkus ja väsimus
 - ❑ kehatemperatuuri tõus
 - ❑ muutused veres (leukotsüüdid, trombotsüüdid jm)
- Naha punetus, pigmentatsioon, põletus, nekroos
- Ajutine või alaline steriilsus
- Silmade kahjustused (konjunktiviit jm)
- Kõhulahtisus
- Epilatsioon
- Verejooks



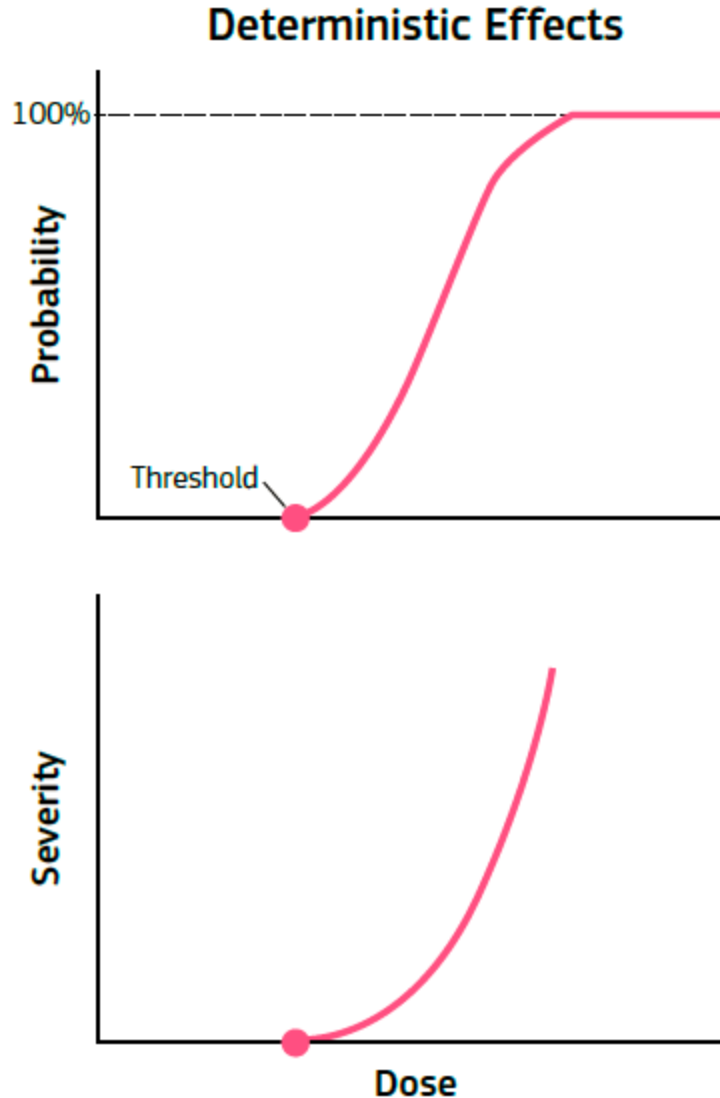
Viivisefektid

- Vähhkasvajate teke
 - Leukeemia
 - Muud vähhkasvajad
- Geneetilised defektid

Deterministlikud ja stohhastilised efektid

Deterministlikud efektid

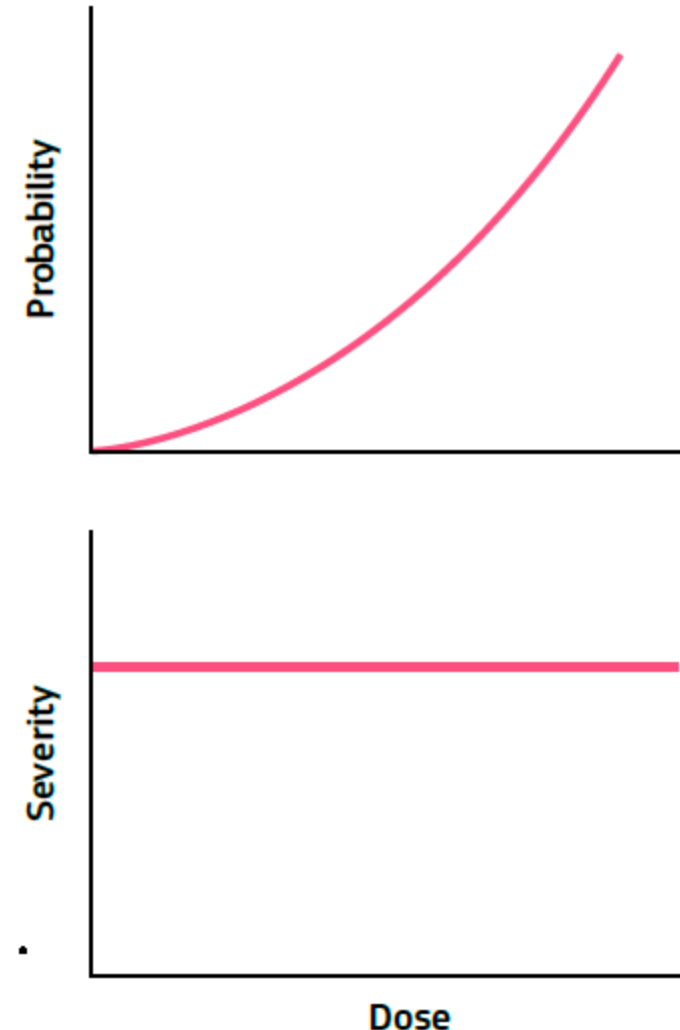
- Läviväärtusega
- Kahjustuse määr sõltub doosi suurusest



Stochastic Effects

Stohhastilised efektid

- Eeldatakse, et läviväärtust ei ole
- Kahjustuse esinemise tõenäosus sõltub doosi suurusest
- Kahjustuse määr ei sõltu



Infoallikad ioniseeriva kiirguse mõju uurimiseks

Sources of information on radiation effects



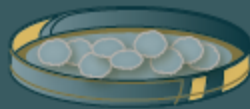
Population studies



Animal experiments



Clinical investigations



Cell experiments

Joonis: UNEP, 2016 „Radiation Effects and Sources“

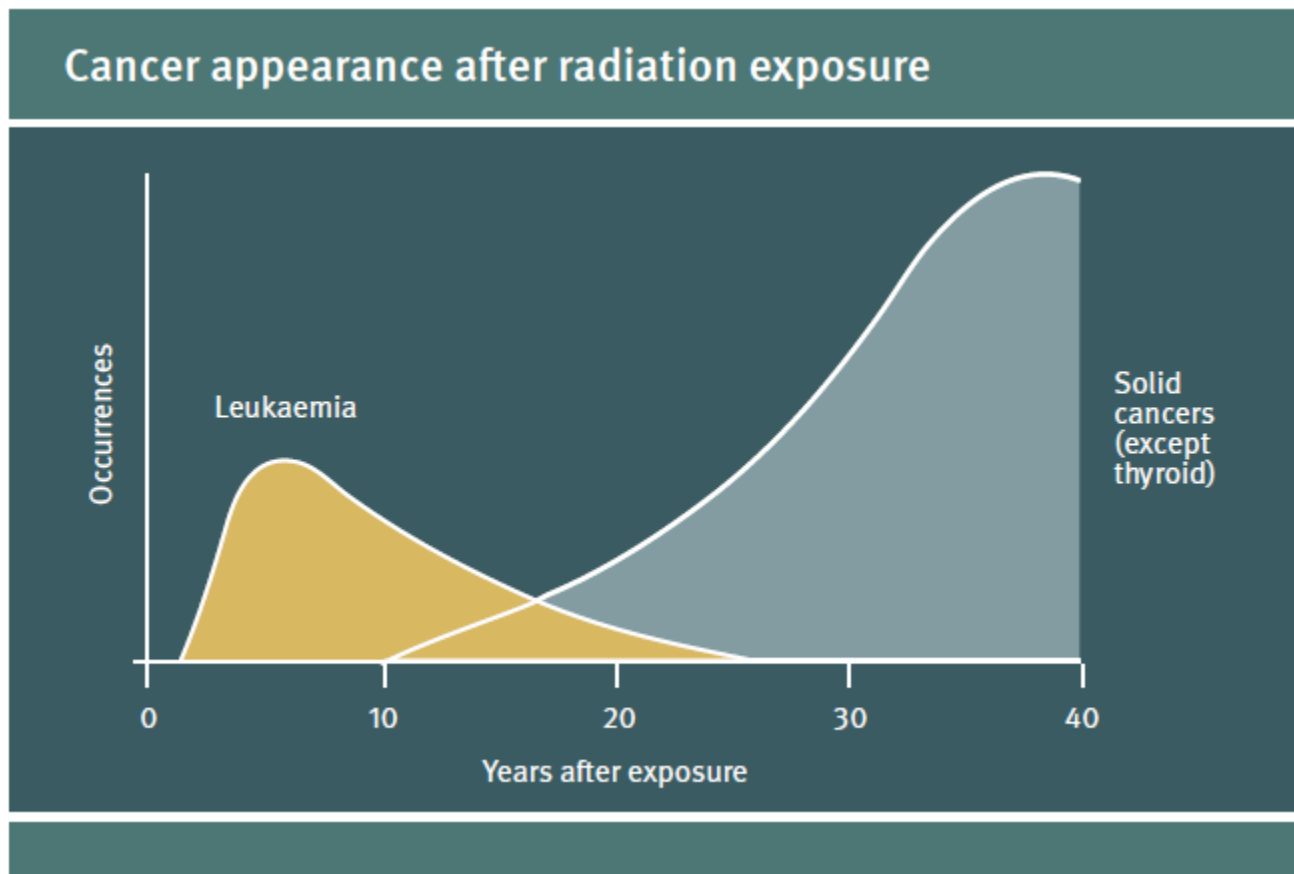
Inimipopulatsioonide uuringud:

- *Life Span Study* – Hiroshima ja Nagasaki tuumapommide ohvrite uuring, 120 000 inimest
https://www.rerf.or.jp/en/programs/research_activities_e/outline_e/proglss-en/
- Nn raadiumi tüdrukud –
https://en.wikipedia.org/wiki/Radium_Girls
- Uraanikaevanduste kaevurid
- Tuumaõnnetused

Röntgenkiirguse väärkasutus meditsiinis:

1930-1940-ndad suurenenud harknäärme kiiritamine lastel
1930-1940-ndad lülisamba luustumise ravi
1940-1950-ndad kassihaiguse ravi lastel

Vähkkasvajate avaldumine



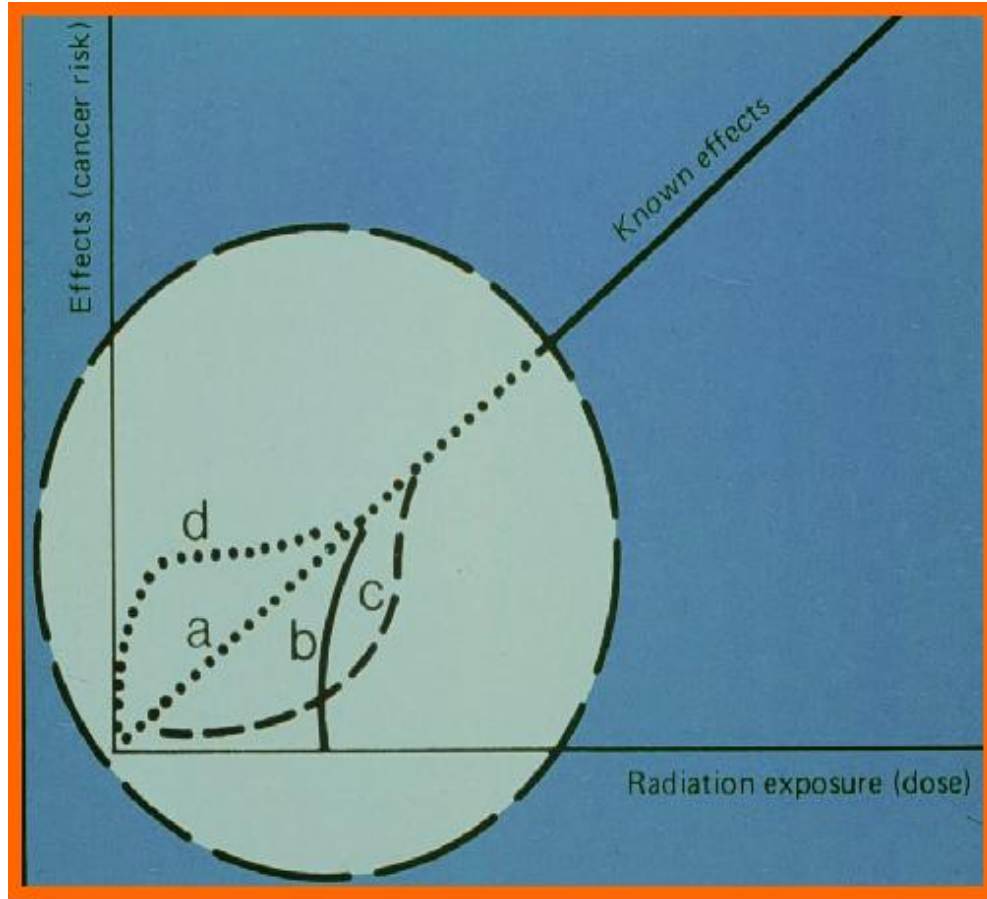
Joonis: UNEP, 2016 „Radiation Effects and Sources“

- Kiirgus **ei tekita** unikaalseid mutatsioone, vaid **suurendab spontaanselt esinevate mutatsioonide sagedust.**
- Mutatsioonide esinemise sagedus inimestel sõltub nii **doosist kui doosikiirusest.**

Suurte dooside viivisefektina tuvastatud vähkkasvajad

- leukeemia (*andmed saadud tuumapommide mõju uuringutest*)
- kilpnäärme vähk (*Tšernobõli tagajärjed*)
- luu- ja muud vähid (*tuumapommi mõju*)

Mis juhtub väikeste dooside korral?



Võimalikud hüpoteesid

- a) Lineaarne
- b) Läviväärtus
- c) Väiksem doos = väiksem risk doosiühiku kohta
- d) Väiksem doos = suurem risk doosiühiku kohta

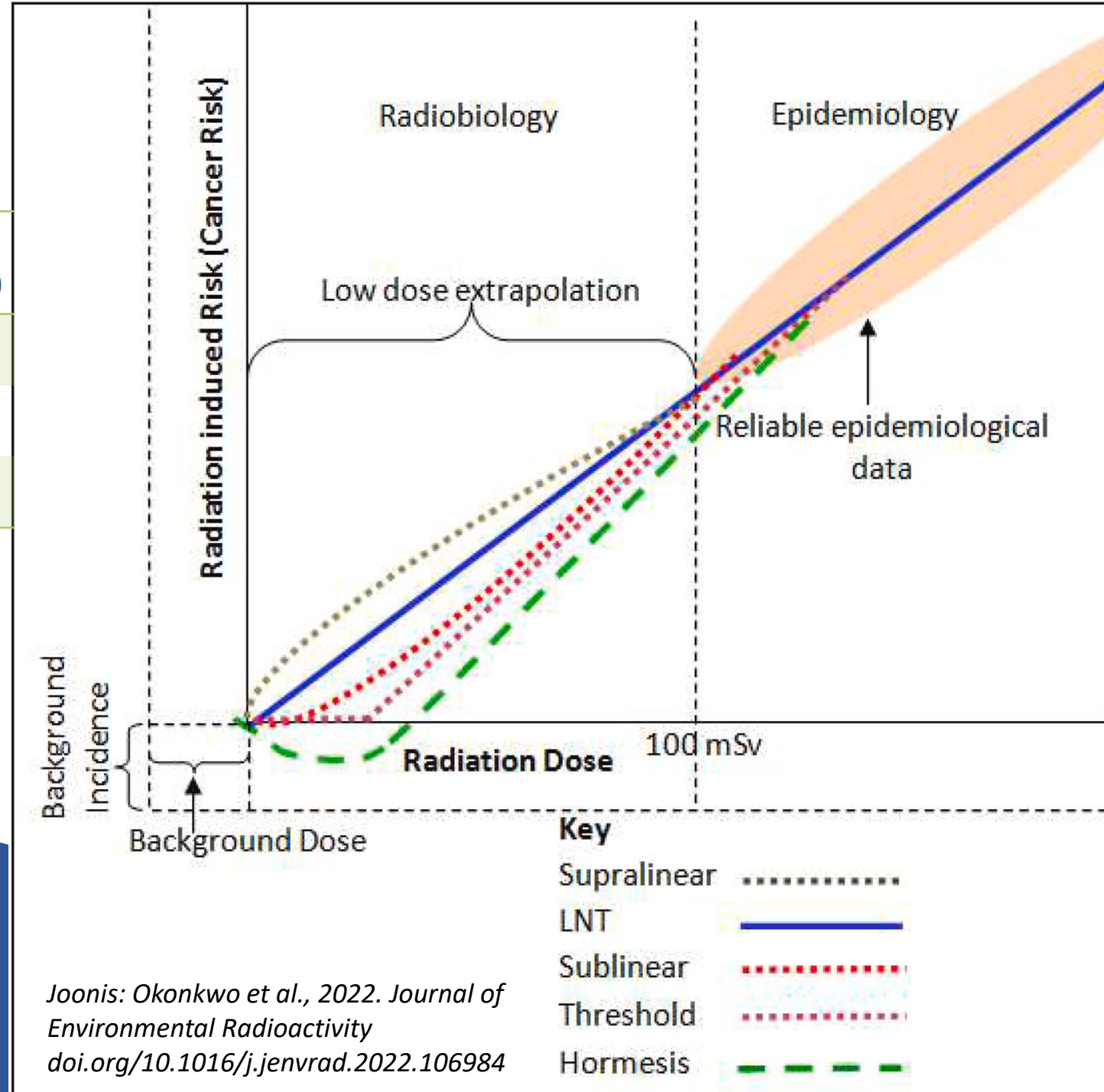
Tänapäeval eeldatakse **lineaarset läviväärtuseta** seost doosi ja stohhastiliste efektide esinemise riski vahel – ***linear no-threshold (LNT) model***.

Ioniseeriva kiirguse mõju arvudes:
stohhastiliste efektide tekkimise
tõenäosus efektiivdoosi **1 Sv** kohta.

	Hinnang aastast 2007	Hinnang aastast 1990
Vähkkasvaja teke	5,5%	6,0%
Pärilike efektide teke	0,2%	1,3%
Stohhastilised efektid kokku	5,7%	7,3%

Allikas: ICRP, International
Commission on Radiological
Protection, pub. 60 (1990) &
pub. 103 (2007)

Lineaarne
läviväärtuseta
doosi-koste mudel



Madalate dooside mõju

Ekstrapoleerime teavet kõrgete dooside mõju kohta.

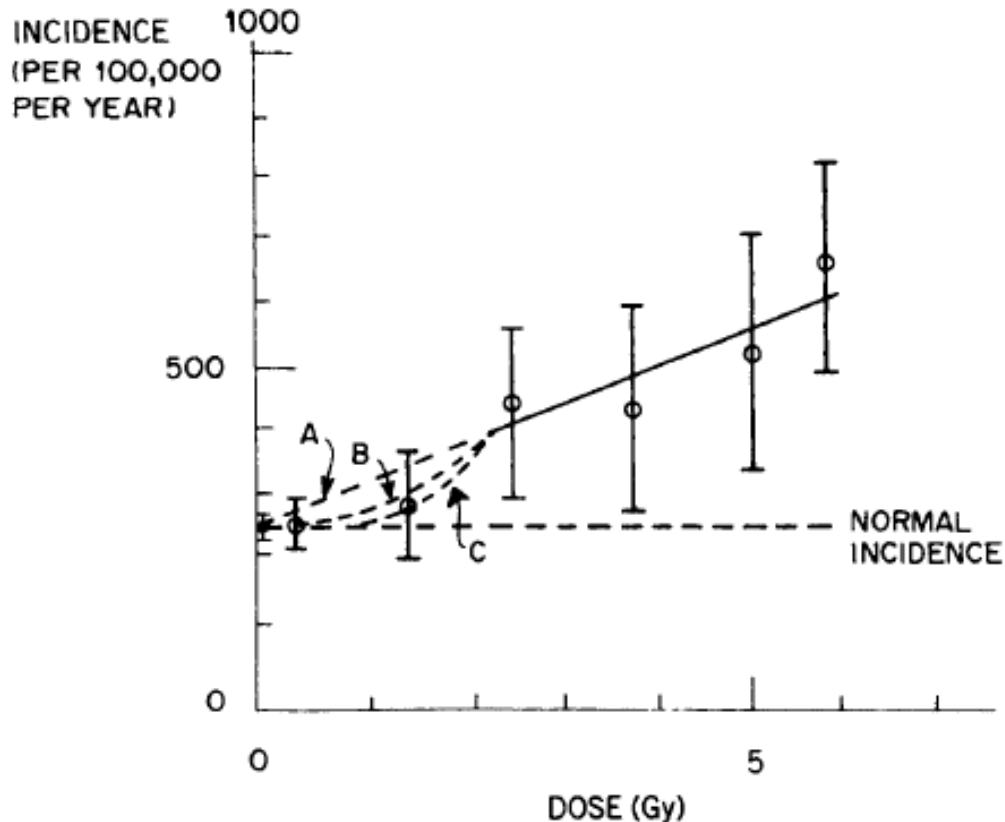


Fig. 13.11 Example of a dose-response curve, showing the incidence of an effect (e.g., certain cancers per 100,000 population per year) as a function of dose. Circles show measured values with associated error bars. Solid line at high doses is drawn to extrapolate linearly (dashed curve A) to the level of normal incidence at zero dose. Dashed curve B shows a nonlinear extrapolation to zero dose. Dashed curve C corresponds to having a threshold of about 0.75 Gy.

Lähtume kiirguse ja aine vahelisest interaktsioonist

Võtmetegur: kiirgusest põhjustatud materjalikahjustuse tihedus aines

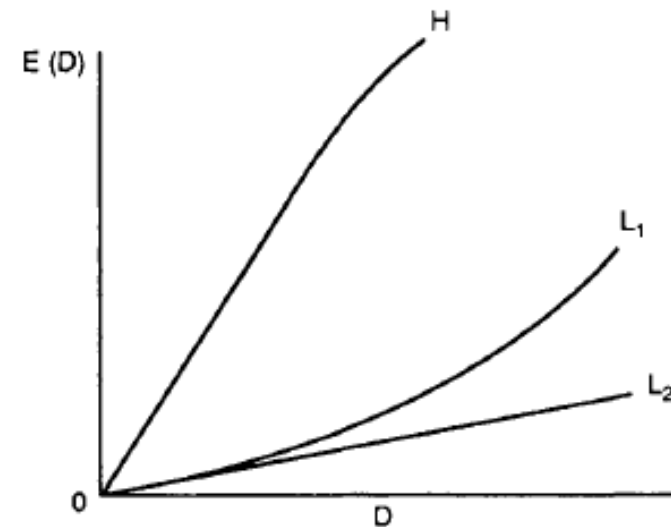


Fig. 13.12 Schematic representation of dose-response function $E(D)$ at low doses D for high-LET (curve H) and low-LET (curve L_1) radiations. L_2 is the extension of the linear beginning of L_1 .

Kiirguskaitse eesmärk

Inimeste ja keskkonna kaitsmine
ioniseeriva kiirguse ohtlike efektide eest.

- **Deterministlikud efektid:** ära hoida!
- **Stohhastilised efektid:** vähendada vastuvõetava tasemeni!
Nii praegu kui tulevastes põlvkondades

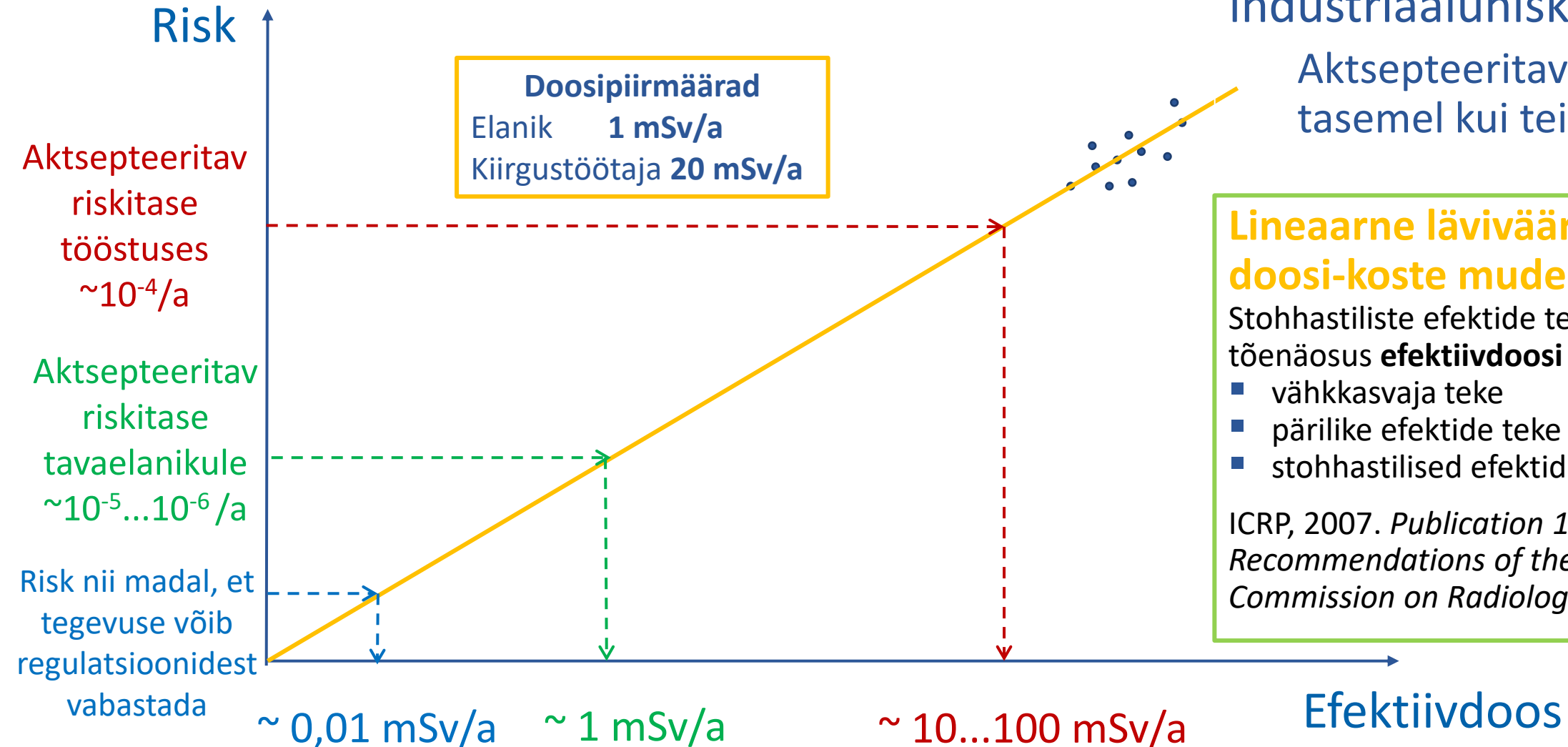
Vastuvõetavus kiirgustegevuse puhul:

- määratleda potentsiaalse kiirgusriski ja hüvede tasakaalust;
- kiirgusriskide ja muude industriaalühiskonna riskide võrdlusest;
- arvestada ka sotsiaalse ja majandusliku vastuvõetavusega!

Kiirguskaitse alus

Ioniseeriva kiirguse põhjustatud risk on üks paljudest riskiteguritest industriaalühiskonnas.

Aktsepteeritav samal tasemel kui teised riskid.



Näiteid tuumajaama kiirgusohutusnõuetest

Tavatingimused

Efektiivdoosi piirmäär elanikule kõigist kavandatud kiirgustegevustest	1 mSv/a	Võrdluseks: Inimese aastadoos, ülemaailmne keskmine (<i>UNSCEAR 2008</i>)	3 mSv/a
Efektiivdoosi piirang elanikule ühest kiirgusrajatisest	0,1 mSv/a	Võrdluseks: ▪ Üleookeanilend Helsingi-New York-Helsingi ▪ Efektiivdoos Olkiloto lähiümbruse elanikele aastal 2022 (<i>STUK, stuk.fi/en/nuclear-safety</i>)	0,06 mSv <0,0003 mSv/a
Efektiivdoosi piirmäär kiirgustöötajale	20 mSv/a	Võrdluseks: Tuumajaamade töötajate keskmine efektiivdoos (<i>UNSCEAR 2020/2021</i>)	0,5 mSv/a



Loengu märksõnad

- ☐ Looduslik ioniseeriv kiirgus saadab meid igal sammul!
- ☐ Stohhastilised efektid
- ☐ Deterministlikud efektid