

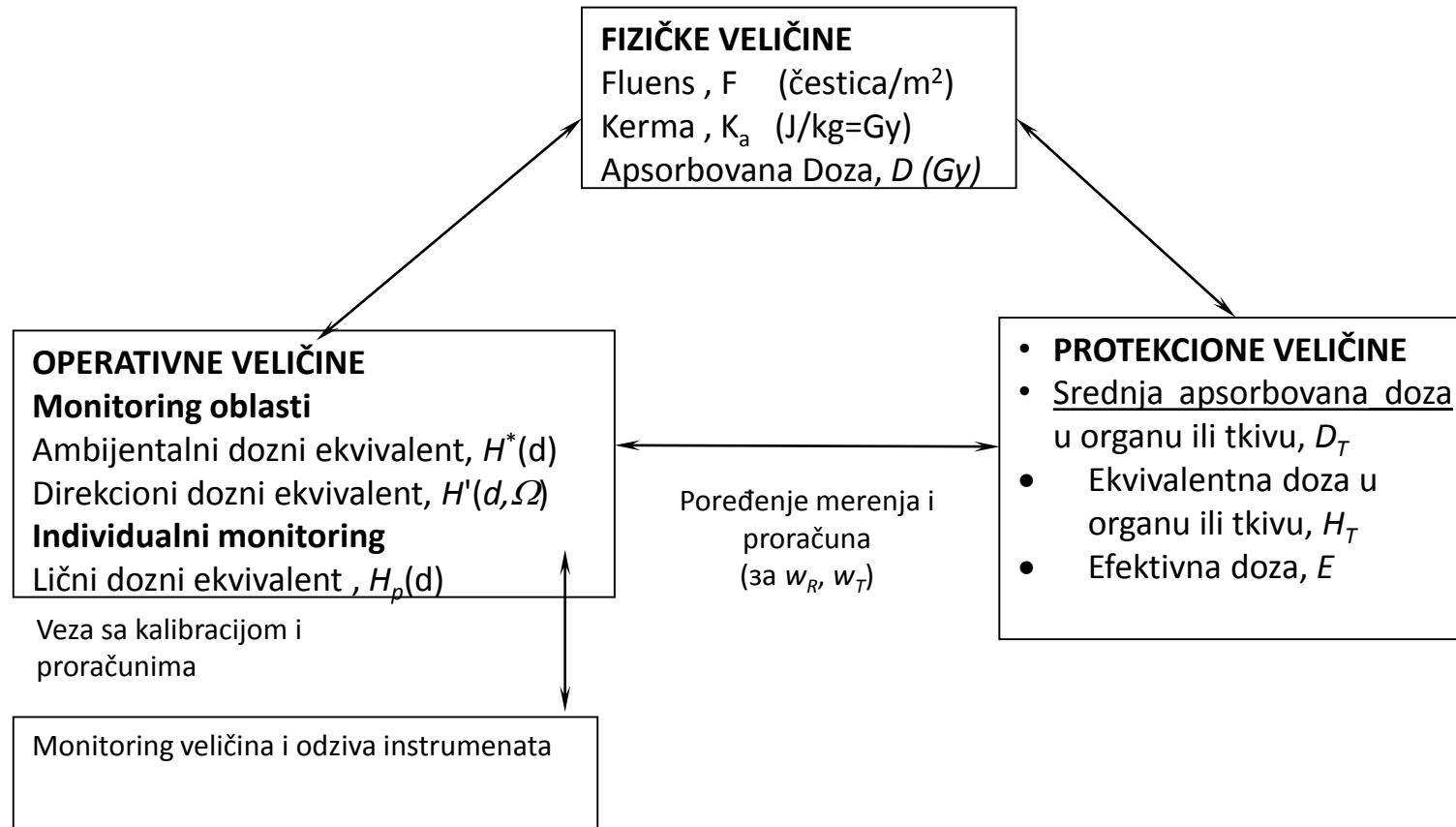
PREDLOG NOVOG SISTEMA VELIČINA U ZAŠTITI OD ZRAČENJA PREMA ICRU95

Dragoslav Nikezić (prof u penziji)

Prirodno-matematički fakultet

UNIVERZITET U KRAGUJEVCU

POSTOJEĆI SISTEM VELIČINA I JEDINICA



Definicije veličina-Zaštitne (protekcione)

- Apsorbovana doza $D=dE/dm$
- Ekvivalentna doza $H = \sum_R w_R D_R$ (Sivert)
- Radijacioni težinski faktori w_R :1 za X i gama zračenje, 5-15 za neutronska zračenje zavisno od energije, i 20 za alfa zračenje.
- Efektivna doza (Sivert) **NEMERLJIVOST**

$$E = \sum_i w_T \left(\frac{H_{T,male} + H_{T,female}}{2} \right)$$

- Tkivni težinski faktori

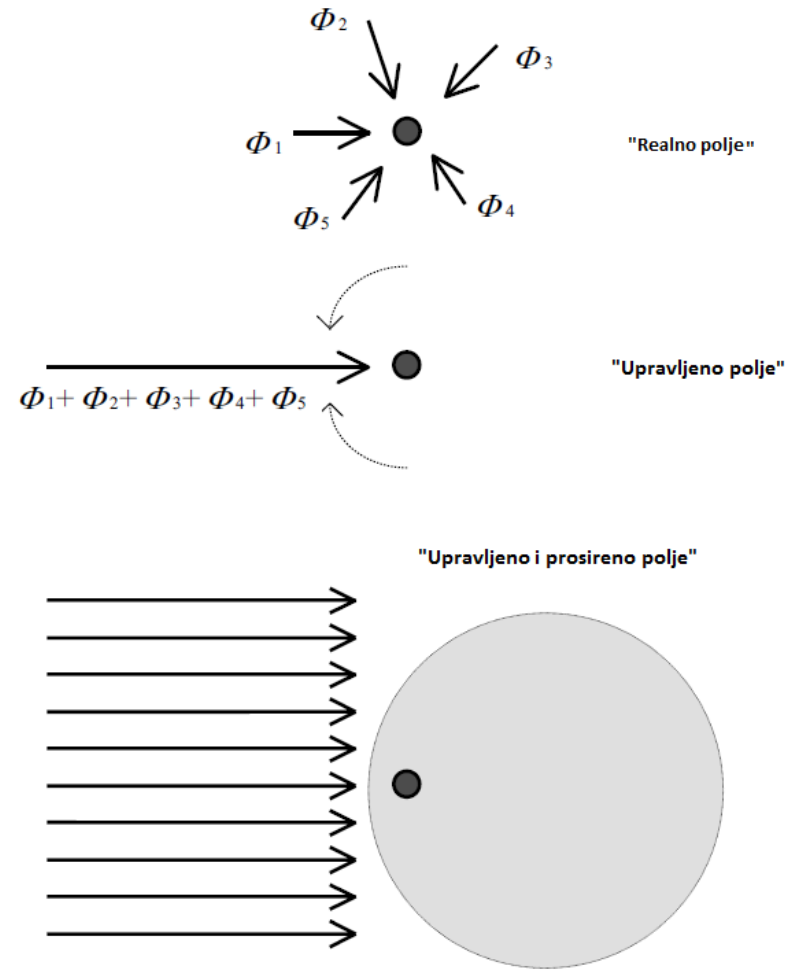
Evolucija tkivnih težinskih faktora

Glavni organi ili tkiva	Tkivni težinski faktori, w_T		
	ICRP26 (1977)	ICRP60 (1991)	ICRP103 (2007)
Gonade	0.25	0.20	0.08
Crvena koštana srž	0.12	0.12	0.12
Debelo crevo	-	0.12	0.12
Pluća	0.12	0.12	0.12
Želudac	-	0.12	0.04
Bešika	-	0.05	0.12
Grudi	0.15	0.05	0.12
Jednjak	-	0.05	0.04
Jetra	-	0.05	0.04
Tiroida	0.03	0.05	0.04
Mozak	-	-	0.01
Pljuvačne žlezde	-	-	0.01
Koža	-	0.01	0.01
Endosteum	0.03	0.01	0.01
Organi ostatka	0.30	0.05	0.12

Definicije veličina-Operativne

- Definicija ICRU **sфере** i ICRU **ploče**
- *ICRU sfera* je gruba prezentacija čovečjeg tela. Ona ima prečnik 30 cm, zapremina 14 litara, gustina je 1 g/cm^3 . Ispunjena je *tkivu ekvivalentnim materijalom* i sastoji se od kiseonika, ugljenika, vodonika i azota sa masenim udelima
- ICRU ploča ima dimenzije 30 cm x 30 cm x 15 cm, zapremina je 14 litara. Ispunjena je tkivu ekvivalentnom smešom sa istim sastavom i gustinom kao i ICRU sfera.
- *Kiseonik 76,2 %; Vodonik 10,1% Ugljenik 11.1%; Azot 2,6%*

Koncept upravljenog i proširenog polja



Dozni ekvivalent (razlikovati od ekvivalentne doze) zasnovan na faktoru kvaliteta Q

- $H = QD$
- D apsorbirana doza, Q faktor kvaliteta zračenja

$$Q(LET) = \begin{cases} 1 & \text{za } L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 0.32L - 2.2 & \text{za } 10 < L < 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 300/\sqrt{L} & \text{za } L > 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \end{cases}$$

Ambijentalni dozni ekvivalent $H^*(d)$

- Služi za monitoring oblasti (okoline) –odnosno radnog mesta.
- U tački od interesa realnog polja zračenja je dozni ekvivalent u odgovarajućem upravljenom i proširenom polju ICRU sfere na dubini d na radijusu suprotnom polju zračenja.
- Za prodorna zračenja $d=10$ mm i oznaka je $H^*(10)$.

Direkcionni dozni ekvivalent

- Direkcionni dozni ekvivalent $H'(d, \Omega)$ u tački od interesa u realnom polju zračenja je dozni ekvivalent stvoren odgovarajući proširenim radijacionim poljem u ICRU sferi na dubini d na radijusu u specificiranom pravcu vektorom Ω .
- Za slabo prodorno zračenje $d=0,07 \text{ mm}$ i piše $H'(0,07, \Omega)$.
- Za dozimetriju oka koristi se $d=3 \text{ mm}$, oznaka je $H'(3, \Omega)$.

Operativne veličine za personalni monitoring

- Personalni dozni ekvivalent $H_p(d)$ je dozni ekvivalentu ICRU tkivu na dubini d u ljudskom telu ispod pozicije na kojoj se nosi individualni dozimetar.
- Za jako prodorno zračenje $d=10$ mm, $H_p(10)$.
- Za slabo prodorno zračenje $d=0,07$ mm, $H_p(0.07)$.

Granice doza

- Zaštita od **stohastičkih događaja** (kancer, genetski efekti)
- Za profesionalna lica **efektivna doza** 20 mSv/god, usrednjeno na 5 godina.
- Za stanovništvo **efektivna doza** 1 mSv/god, usrednjeno na 5 godina.
- Za zaštitu od **nestohastičkih događaja**, granice se nameću na ekvivalentnu dozu i za pojedine organe.
- za očno sočivo 20 mSv godišnje; ova granica je smanjena nedavno na 20 mSv, pre toga je iznosila 150 mSv.
- - za kožu 500 mSv godišnje (odnosi se na ekvivalentnu dozu usrednjenu po površini kože od 1 cm², nezavisno od veličine izložene površine);
- - za delove ekstremiteta (šake, podlaktice, stopala i gležnjeve) 500 mSv godišnje.

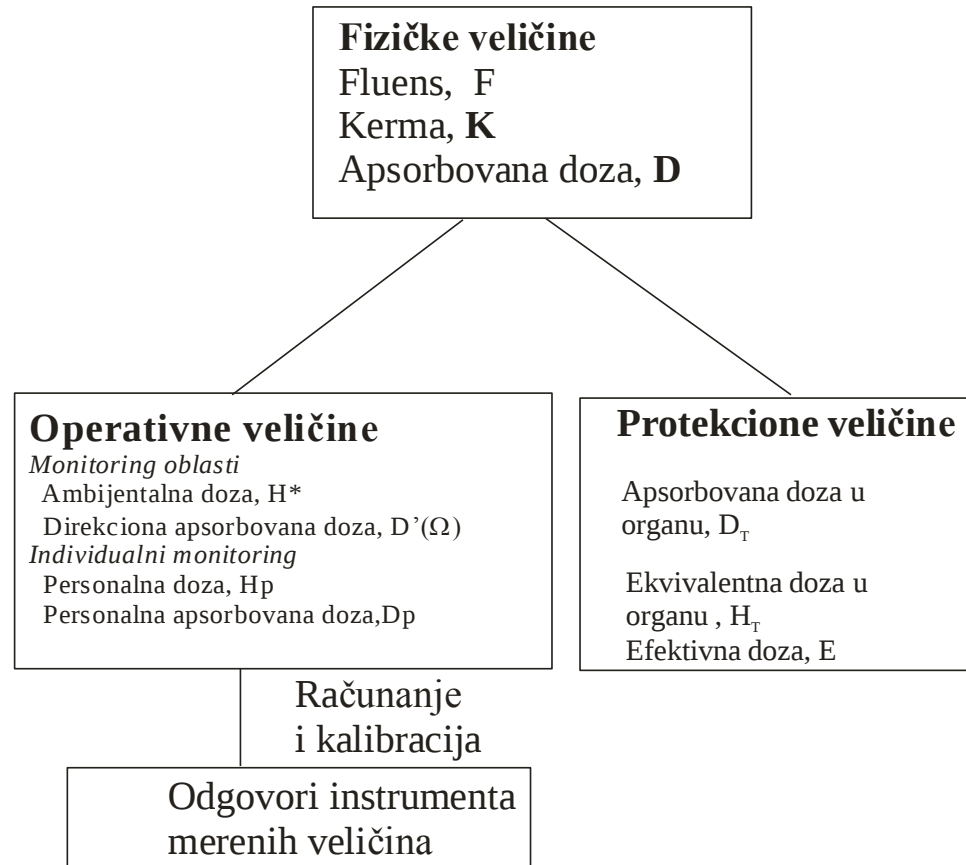
Novo predloženi sistem prema ICRU95

Zašto novi sistem, šta nije u redu sa starim

- Faktor kvaliteta $Q(L)$ i radijacioni težinski faktori w_R zasnovani na **različitim konceptima**.
- $H^*(10)$ definisan na dubini 10 mm u ICRU sferi- **nema surogata u referentnom antropološkom fantomu**, koji se koristi za definiciju protekcionne veličine efektivne doze E .
- $H_p(d)$ se definiše na dubini d u ljudskom telu, ali su konverzioni koeficijenti izračunati u **jednostavnim geometrijskim** telima, sferi, ploči, cilindru i štapu.
- Ne odslikava kompleksnost ljudskog tela na različitim lokacijama.
- Rezultat: **precenjivanje efektivne doze** za niskoenergetske fotone;
- **potcenjivanje ef.doze** za elektrone energije ispod 1 MeV.

- ICRP je obavio ponovnu procenu protekcionih veličina i predložio *da se granice za očno sočivo i kožu postave na apsorbovanu dozu, a ne na ekvivalentnu dozu*, jer se radijacioni težinski faktori u ekvivalentnoj dozi odnose na stohastičke, a ne na determinističke efekte.
- Odgovarajuće *operativne veličine* takođe treba da budu definisane preko *apsorbovane doze*. U skladu sa tim, relativna biološka efikasnost RBE bi trebalo da se koristi pri utežnjavanju apsorbovane doze za obe grupe veličina.

Sistem predložen u ICRU95



Operativne veličine za spoljašnje ozračivanje prema ICRU95

Šema definisanja je sledeća:

Operativna veličina H_R je proizvod fluensa Φ_R (ili Kerme) i konverzionog koeficijenta h_R .

$$H_R = h_R(E_R)\Phi_R.$$

Ako zračenje nije monoenergetsko i dolazi iz više pravaca integrali se po energiji

$$H_R(\vec{\Omega}) = \int h_R(E_P, \vec{\Omega}) \Phi_R(E_P, \vec{\Omega}) dE_P$$

Konverzioni koeficijeni h_R se računaju za specifične pravce upada zračenja kao količnik doze, procenjene u celom telu ICRP/ICRU referentnog fantoma (i u drugim zadatim fantomima) podeljeno sa fluensom čestica u odsustvu fantoma

$$h_R(E_P, \vec{\Omega}) = \frac{H_R(E_P, \vec{\Omega})}{\Phi_R(E_P, \vec{\Omega})}$$

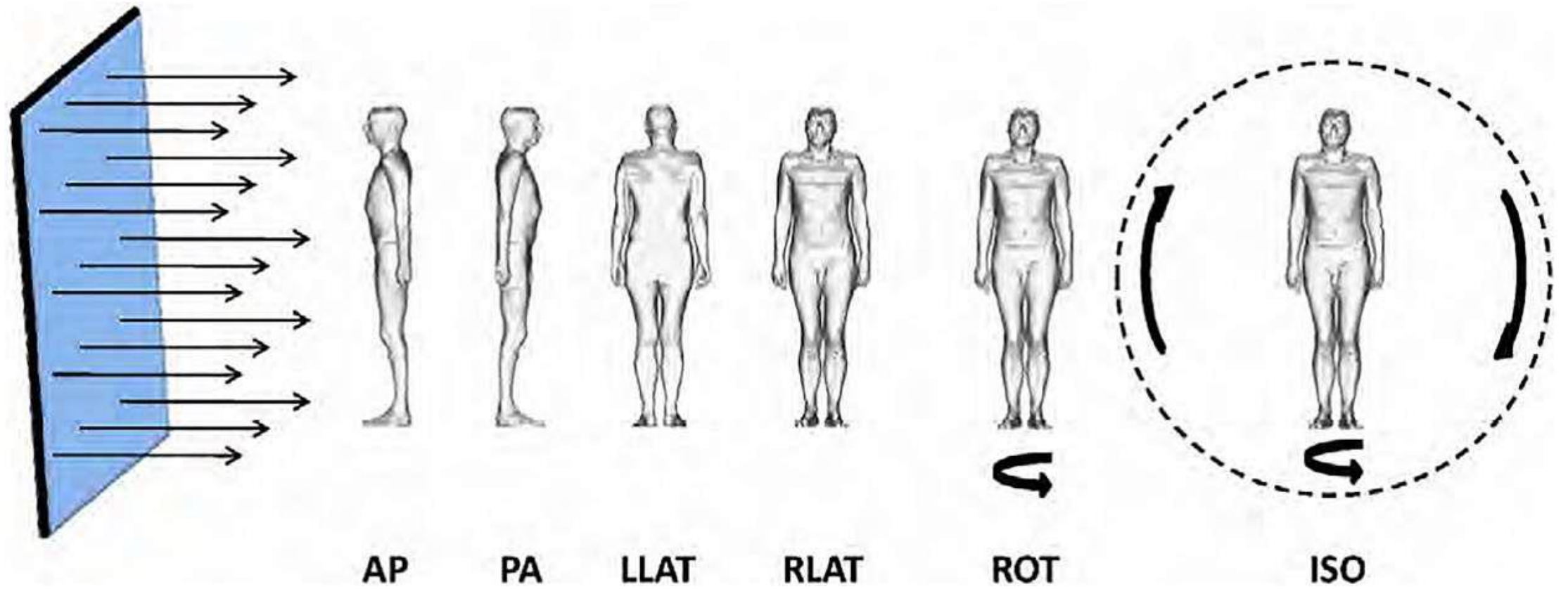
- Na ovaj način postignuto je sledeće:
- Konverzioni koeficijenti za operativne veličine se računaju sa istim fantomima kao i protekcione veličine sa izuzetkom kože.
- Operativne veličine su po definiciji bliže protekcionim. Za izvesne kombinacije energije čestica i ugla upada zračenja numeričke vrednosti operativnih i protekcioničkih veličina su jednake.

Ambijentalna doza H^* i jačina ambijentalne doze

- Ambijentalna doza H^* u tački polja zračenja je proizvod fluensa čestica u toj tački Φ i konverzionog koeficijenta h^* koji povezuje maksimalnu vrednost efektivne doze E_{max} za različite uslove ozračivanja.
- Konverzioni koeficijent se računa za izlaganje **celog tela ICRP/ICRU referentog fantoma** (ICRP2009) širokim uniformnim paralelnim snopom zračenja u geometrijama AP, PA, LLAT, RLAT, ROT, SS-ISO, IS-ISO, za fotone i neutrone, a AP, PA, ISO, SS-ISO i IS-ISO za polja elektrona, pozitrona, miona i piona; i AP, PA i ISO za H_2^{2+} .

$$H_j^* = \int h_j^*(E_p) \frac{d\Phi_i(E_p)}{dE_p} dE_p \quad H^* = \sum H_j^*$$

Geometrije ozračivanja



Direkciona apsorbovana doza u očnom sočivu

$$D_{lens}^*(\vec{\Omega})$$

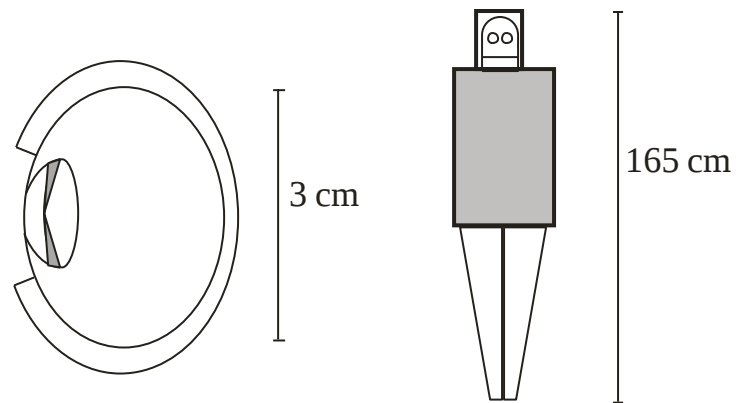
u tački polja zračenja sa odredjenim pravcem $\vec{\Omega}$ prostiranja je proizvod fluensa $\Phi(\vec{\Omega})$ u toj tački i konverzionog koeficijenta $d'_{lens}(E_p, \vec{\Omega})$. Koef., se računa po modelu oka Behren i Dietze (2011, ICRP2010) za širok, paralelan i uniforman snop zračenja sa pravcem $\vec{\Omega}$. Uzima se onaj ugao $\vec{\Omega}$ za koji je veća doza (levo ili desno oko).

Za čestice sa spektrom integrali se po energijama.

$$D'_{lens,i} = \int d'_{lens,i}(E_p, \vec{\Omega}) \frac{d\Phi_i(E_p, \vec{\Omega})}{dE_p} dE_p$$

Apsorbovane doze od raznih vrsta zračenja se sabiraju.

Model oka i položaj na fantomu



- Levo, model oka, osetljivo tkivo je šrafirano. Desno, položaj oba oka. Širok snop napada trup i glavu (podebljano).

Direkciona apsorbovana doza lokalno u koži

- $D'_{local,s}(\vec{\Omega})$ u tački polja zračenja sa pravcem $\vec{\Omega}$ je proizvod fluensa Φ u toj tački i konverzionog koeficijenta $d'_{local,s}(\vec{\Omega})$.
- Konverzioni koeficijent se računa za izlaganje širokom uniformnom snopu pod incidentnim uglom $\vec{\Omega}$ za fantom ICRU-4 tkivna elementa (H,C,N,O) ploča 300 mm x 300 mm x148 mm, gustine 1 g/cm³ koji je pokriven slojem kože gustine 1,09 g/cm³.
- Apсорbovana doza se usrednjava preko zapremine kružnog cilindra poprečnog preseka 1 cm², čija je osa normalna na površinu kože a između 0,05 mm i 0,1mm.
- Za spektar zračenja integrali se po energiji.
- Doze od više vrsta zračenja se sabiraju.
- Jedinica Grej (Gy)

Personalna doza H_p

- U tački tela je proizvod fluensa čestica u toj tački i konverzionog koeficijenta h_p , koji se računa za široki uniformni paralelni snop zračenja za rotacionu i izotropno ozračivanje fantoma čoveka.
- $h_{p,i} = H_{p,i}(E_p, \vec{\Omega}) / \Phi_i(E_p, \vec{\Omega})$
- Za spektar čestica integrali se po energijama.
- Doze od raznih čestica se sabiraju.
- Jedinica Sivert.

Personalna apsorbovana doza u očnom sočivu $D_{p,lens}$

- U tački je proizvod fluensa u toj tački i konverzionog koeficijenta $d_{p,lens}$ koji se računa za široki uniformni paralelni snop koji pada na model oka. Za dati ugao napada, uzima se onaj konf. Koef. Koji je veći za desno ili levo oko.
- $d_{p,lens} = D_{p,lens,i}(E_p, \vec{\Omega}) / \Phi_i(E_p, \vec{\Omega})$
- Za spektar čestica, integrali se po energiji.
- Doprinosi raznih vrsta čestica se sabiraju
- Jedinica je Grej, (Gy).

Personalna apsorbovana doza u koži, $D_{p,local\ skin,i}$

- je proizvod fluensa koji pada na telo (ili ekstremitet) i konverzionog koeficijenta $d_{local\ skin}$ koji se računa za izlaganje *specijalnog fantoma* širokim uniformnim i paralelnom snopu zračenja
- $d_{p,local\ skin,i}(E_p, \vec{\Omega}) = D_{p,local\ skin,i}(E_p, \vec{\Omega}) / \Phi_i(E_p, \vec{\Omega})$
- Za razne delove tela primenjuju se različiti fantomi, ali je svaki pokriven sa 2 mm kože gustine 1,09 g/cm³ ICRP tkiva.
- Ako postoji spektar zračenja, integrali se po energiji.
- Doprinosi raznih vrsta čestica se sabiranju
- Jedinica je Grej, (Gy).

Fantomi za personalnu apsorbovanu dozu u koži

- Trup tela: ploča 300 mm x 300 mm x 148 mm ICRU tkiva
- Ekstremiteti: cilindrična površina dimenzija 300 mm x 69 mm
- Za prste: cilindrična površina dimenzija 15 cm.
- Doza se usrednjuje na površini 1 cm² po dubini različitoj kod raznih fantoma.

Konverzioni koeficijenti

- Po starom sistemu k.k su izračunati u ICRP116.
- Povezuju protekcione i operative veličine sa parametrima polja zračenja.
- Za čestična zračenja, koristi se Fluens.
- Za fotonska zračenja koristi se KERMA u vazduhu (air Kerma free in air).
- Računanje k.k. se obavlja Monte Karlo programima (MCNP, GEANT4 ..).
- Za računanja potrebno je definisati koordinatni sistem i pravac incidencije zračenja $\vec{\Omega}$.

Konverzioni koeficijent za ambijentalnu dozu h^*

- Celo telo se ozračuje širokim paralelnim snopom i za rotaciona i izotropna polja.
- Fantom – referentni ICRP/ICRU fantom (ICRP, 2009. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39 (2).) tzv. Voxel fantom.

Konverzioni koeficijenti za personalnu dozu $h_p(\varphi)$

- Računa se: ozračivanje celog tela ICRP referentnog fantoma.
- Širok, uniformni snop zračenja pod incidentnim uglovima od 0° do 90° sa korakom od 15° kao i za ostale geometrije - rotacionu, izotropnu, gornju i donju semiizotropnu polusfernu. Nula stepeni je AP ozračivanje.
- Uzima se usrednjena vrednost za ozračivanje sleva i sdesna.

Konverzioni koeficijent za direkcionu apsorbovanu dozu u očnom sočivu

- Numeričke vrednosti konverzionih koeficijenta od *fluensa čestica do direkcione apsorbovane doze u očnom sočivu* d'_{lens} i od

fluensa do personalne apsorbovane doze u očnom sočivu $d_{p,lens}$

su identične za istu vrstu čestica i energija i ugla incidence, tako da se koristi simbol d_{lens} .

U oba slučaja koristi se model oka Bahren-Dietze

Konverzioni koeficijent za apsorbovanu dozu lokalno u koži

- Konverzioni koeficijenti od fluensa čestica do direkcione apsorbovane doze u koži $d'_{local\ skin}$ i za fluens čestica do personalne apsorbovane doze u koži $d'_{p,local\ skin}$ su numerički jednaki za isti tip čestica, energije i uglove ozračivanja. Zbog toga se koristi samo simbol $d_{local\ skin}$.
- Veći broj fantoma, zavisno od toga na kom delu tela se nalazi koža

Fantomi za kožu: grudni koš

- ploča dimenzija 300 mm x 300 mm x 148 mm ICRU 4 tkiva ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) koji je pokrivena sa 2 mm kože ($\rho = 1,09 \text{ g/cm}^3$) (ICRP2009)) elementalne kompozicije prema ICRP 89 (2002). Apsorbovana doza je usrednjena preko zapremine pravog kružnog cilindra na dubinama između 50 μm i 100 μm i površine poprečnog preseka 1 cm^2 i za uglove od 0° do 75° sa korakom od 15°.

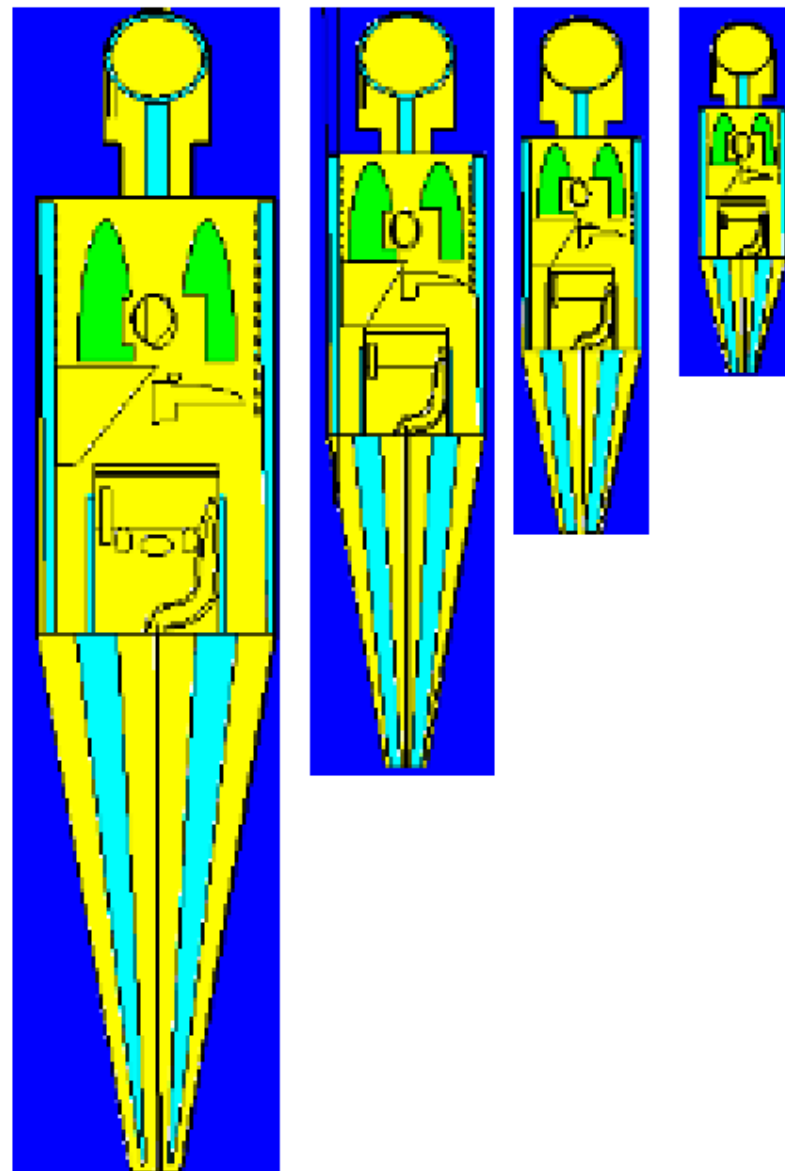
Fantomi za kožu: ekstremiteti

- Cilindrična površ, dijametra 69 mm i dužine 300, ICRU-4 tkiva gustine $\rho=1,11 \text{ gcm}^{-3}$, pokrivena sa 2 mm kože.
- Apsorbovana doza je usrednjena preko zapremine između poluprečnika 36,4 mm i 36,45 mm u krugu površine 1 cm^2 , sa uglovima između 0° i 180° sa korakom od 15° i sa rotacionom geometrijom.

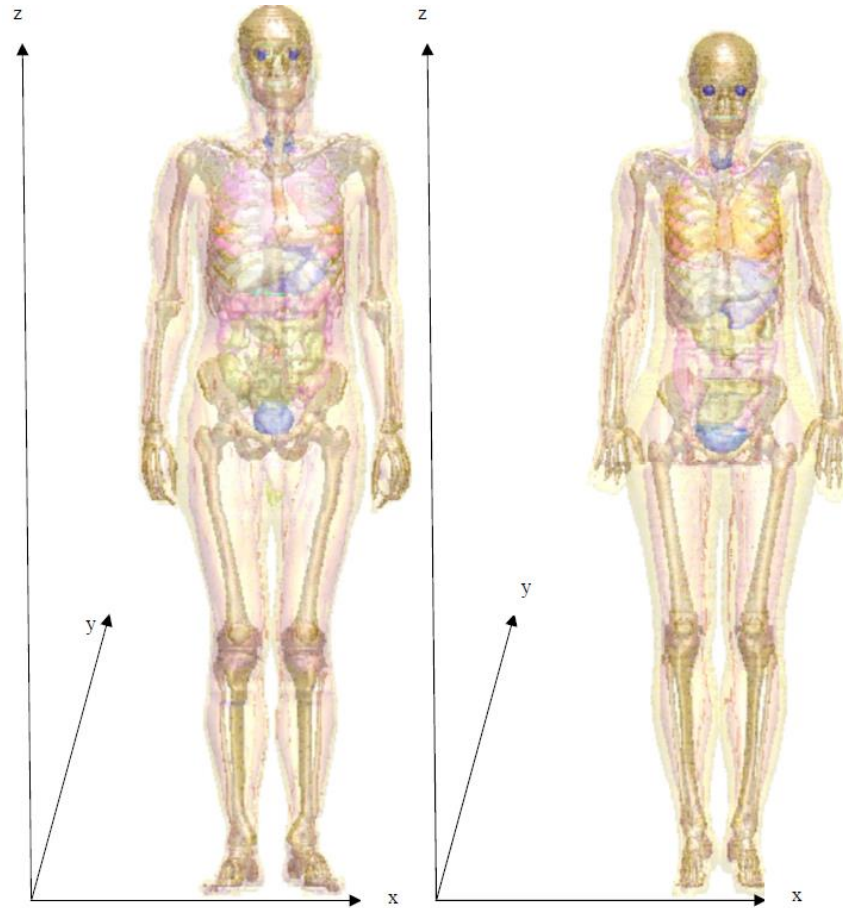
Fantomi za kožu: prsti

- cilindar dijametra 15 mm, dužine 300 mm ICRU-4 tkiva gustine $\rho=1,11 \text{ gcm}^{-3}$, koji je prekriven kožom debljine 2 mm. Apsorbovana doza je usrednjena preko zapremine između 9,4 mm i 9,45 mm kruga površine 1 cm^2 , za uglove φ od 0° do 180° sa korakom od 15° i rotacionom geometrijom

*Fantomi ljudskog
tela- ORNL
za razne starosne
grupe*



ICRP voxel fantomi ICRP 110 (2009)



Mesh fantomi (mrežasti fantomi) ICRP 45 (2020)

- Unapredjenje voxel fantoma.

