

# Az ELI sugárvédelmének és környezetellenőrzési rendszereinek tervezési alapjai

*„The Power of Light”*

**Bodor Károly**

Magyar Tudományos Akadémia KFKI  
Atomenergia Kutatóintézet

# Tartalom

- Tervezési irányelvek
- Az ELI által generált részecskék, sugárzások
- Sugárvédelem
- Az ELI környezetre gyakorolt hatásai
- Környezetellenőrzés, monitorozás

## **Feladat: A világ legnagyobb teljesítményű lézerének sugár- és környezetvédelmének tervezése**

- A feladat a sugárvédelem egy speciális területe**
- Kevés információ áll rendelkezésre a lézerek sugárvédelmének tervezésére**
- Az ELI sajátos műszaki paraméterei végett nehéz összehasonlítani más nagyberendezésekkel, extrapoláció**
- Info gyűjtés: szakcikkek, internet, szemináriumok, konferenciák, kongresszusok (Salamanca, Prága, Budapest), jelenleg működő nagy teljesítményű lézerek sugárvédelmének tanulmányozása**



# Az ELI sugárvédelmének alapjai

- Az ELI sugárvédelmét a nagy teljesítményű gyorsítók sugárvédelméhez lehet hasonlítani ( $E_e > 1$  GeV, müon, neutron, pion, kaon, fékezési RTG minden E-án)
- A kiépített sugárvédelemnek összhangban kell lennie a nemzetközi előírásokkal: IAEA, ICRP, ICRU, EU 96/29/Euratom direktíva (1996)
- A tervezésnél az ALARA elvnek kell érvényesülni, minimum kritérium:

$$\text{NDL} \text{ normalizált } D^* \text{ hátár} = \sum_i D^*_{\text{max. normál. } i} / D^*_{\text{megengedett}} < 1$$

Table 6. Recommended dose limits in planned exposure situations<sup>a</sup>.

| Type of limit                | Occupational                                                           | Public                       |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Effective dose               | 20 mSv per year, averaged over defined periods of 5 years <sup>e</sup> | 1 mSv in a year <sup>f</sup> |
| Annual equivalent dose in:   |                                                                        |                              |
| Lens of the eye <sup>b</sup> | 150 mSv                                                                | 15 mSv                       |
| Skin <sup>c,d</sup>          | 500 mSv                                                                | 50 mSv                       |
| Hands and feet               | 500 mSv                                                                | —                            |



## Biztonsági szintek

- (1) szint: Az ALARA elv értelmében a létesítmény biztonságos ha minden esetben teljesül a normál NDL kritérium, (a normál nyaláb veszteséget beleszámolva)
- (2) szint: Tervezési baleseteknél a normál NDL nagyobb lehet 1-nél, ezért az abnormális működés eseteit is figyelembe kell venni
  - Az ELI segítségével többféle töltött részecskékből álló nyalábokat is előállítanak (kompakt gyorsító)
  - Az előállított részecskék légritkított mágnesestérben mozognak, amennyiben a mágnesestér deformálódik, megszűnik, vagy a vákuum szűnik meg, esetleg a nyaláb terelő berendezések működésében lép fel hiba, akkor a nyaláb érintkezhet levegővel, ill. a védőberendezések anyagával, ekkor a részecskék sebesség vektora megváltozik (gyorsul), ami fékezési röntgen sugárzást idéz elő.
- (3) szint: **Mérnöki rezerv:** Az épület méretezését úgy kell megválasztani, hogy legyen még kellő mennyiségű szabad tér, mivel előfordulhat, hogy a későbbiekben a kísérleti berendezés teljesítményét megnövelik, ezért a jövőben az eredetileg tervezett védőrendszer kiegészítése szükségessé válhat.
  - Az árnyékolás vastagsága változhat, ahol a részecskék kiléphetnek ott többlet árnyékolásra lehet szükség

## **A kísérletek során keletkező részecskék, sugárzások**

### **Prompt sugárzás:**

- a berendezés működése alatt keletkezik (lézer-anyag kölcs.hatás során)
- ez a legveszélyesebb, ekkor tilos a belépés
- a megfigyelő berendezéseket is védeni kell
- műonok: 1m beton/GeV
- nagy intenzitású elektromágneses tér (töltött részecskék gyorsulnak)
- ún. skyshine neutronok, fotonok (beam loss pontoknál)

### **Reziduális aktivitás:**

- felaktiválódás, sokféle izotóp keletkezhet (pl.: betonban lévő Al, Ca,  $^{24}\text{Na}$ )  
többségük radioaktív, rövid  $T_{1/2}$  elbomlik, 1-2 h esetleg 1 nap várakozási idő
- target is radioaktív lehet: alfa, beta, gamma sugárzás

### **Szivárgó, kifolyó radioaktív anyagok:**

- a levegőben lévő felaktiválódott részecskék, aeroszolok) környezetbe kikerülhetnek
- O,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{11}\text{C}$  (20 perc),  $^{41}\text{Ar}$  termikus n befogás (110 min),  $^7\text{Be}$  (53 nap)
- $^3\text{H}$  Oxigén spallációval (hűtővíz), a felaktiválódott hűtővíz és a benne keringő ugyancsak felaktiválódott korróziós termékek az áramlás során tranziens dózisteljesítmény növekedést eredményeznek, ill. az ioncserélőkben feldúsulhatnak, továbbá kiszivároghatnak a környezetbe

### **Járulékos sugárzások:**

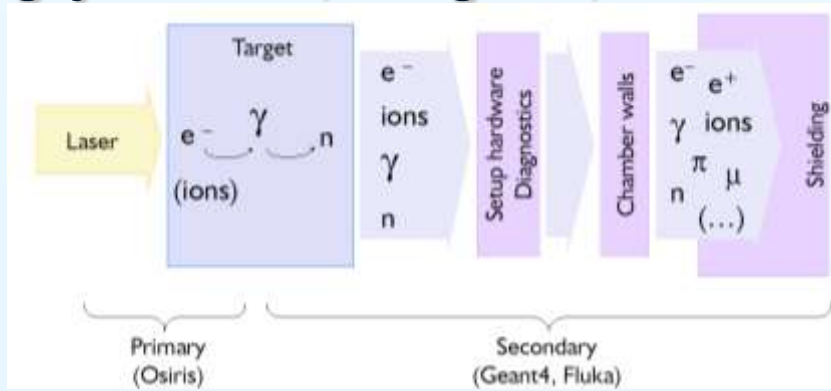
- Elektromágneses tér egyenetlenségei, fékezési RTG-t, ill. fotoneutronok
- Nitrtózus gázok, ózon keletkezése

## A tervezés lépései

- Dizájn menedzsment
- Bemeneti lézer paraméterek meghatározása ELI WP7
- Lézer-anyag kölcsönhatás szimulálása (OSIRIS), a kísérletek során keletkező részecskék meghatározása (forrástag, másodlagos sugárzás E-a, mennyiség)
- Árnyékolás tervezése FLUKA kóddal
- Ellenőrző mérések, számítások

A védelem kidolgozásához szükséges ismerni a létesítmény műszaki paramétereit: teljesítmény, szellőzés, eszköz méretek, rendelkezésre álló hely, működési időtartam, sugár karakterisztika, max energia, stb.

A target anyagi jellemzőit, vizsgálati, mérési módszereit





# Dizájn menedzsment

## -PDCA ciklus

-FEP (Features, Events, Process) (események, lehetőségek, folyamatok) lista elkészítése (minden lehetséges esemény felvázolása)

-Súlyozott FEP mátrix definiálása (elsődleges közelítések, becslések, melyek alapján a releváns eseményekre fókuszálnak a tervezés során-idő,pénz megtakarítás)→ az ellenőrzés során ez a lista az alap a kevésbé releváns eseményeket ez alapján lehet le ellenőrizni, ha mégis jelentős az esemény akkor azt újra ki kell vizsgálni

-LCA (életciklus) elemzések (árnyékoló anyagok felaktiválódása)→ költséghatékonyságot növeli

-Konkrét feladatok definiálása, határidők kitűzése, felelősök megnevezése→AGENDA

-A tervezés végén a kevésbé súlyozott FEP mátrix elemeinek részletesebb vizsgálata (igény szerint)

-Hatóságok (ÁNTSZ, OSSKI,stb.), befektetők, dolgozók, kormány, társadalom, „sötét zöldek” meggyőzése→nem jelentős a környezeti hatás, nincs veszélyhelyzet

## Forrástag meghatározása

- A lézer-anyag kölcsönhatás során plazma és indukált elektromágneses tér keletkezik
- A forrástagot szimulációval ill. a meglévő empirikus adatok extrapolálásával határozzák meg
- Az alábbi link tartalmazza az eddig összegyűjtött adatokat és számításokat a már meglévő nagy berendezésekről:  
<http://eli6.fis.usal.es/>
- A keletkező részecskék definiálása (fékezési, karakterisztikus RTG,  $e^-$ ,  $p^+$ ,  $\gamma$ )
- Standard adat forma (különböző források, esetek összehasonlíthatósága)
- A keletkező részecskéket leíró egyenlet (spektrum) termális, ill. kvázi-monokromatikus (Gauss- eloszlás) komponensekre bontható:

$$N(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x \geq E^{MAX} \\ \sum_i \frac{N_i^T}{T_i} \exp\left(-\frac{x}{T_i}\right) + \sum_j 2 \frac{N_j^G}{\Delta E_j^G} \sqrt{\frac{2 \ln 2}{\pi}} \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{x - E_j^G}{\Delta E_j^G}\right)^2\right] & \text{for } x < E^{MAX} \end{cases}$$

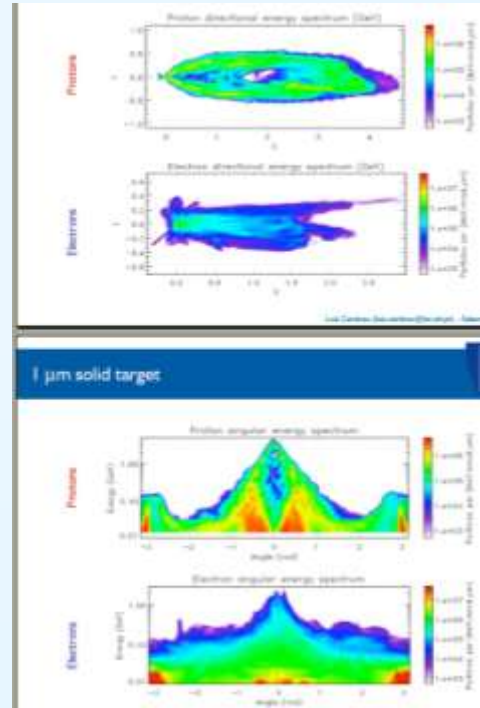
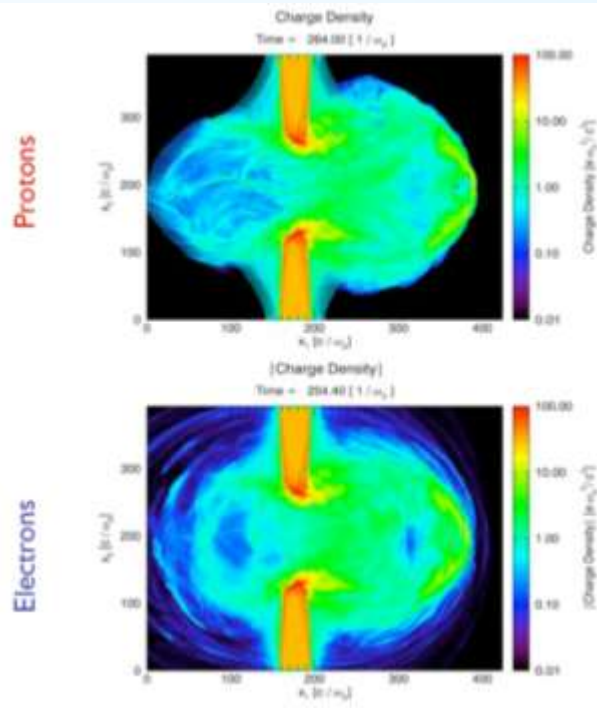
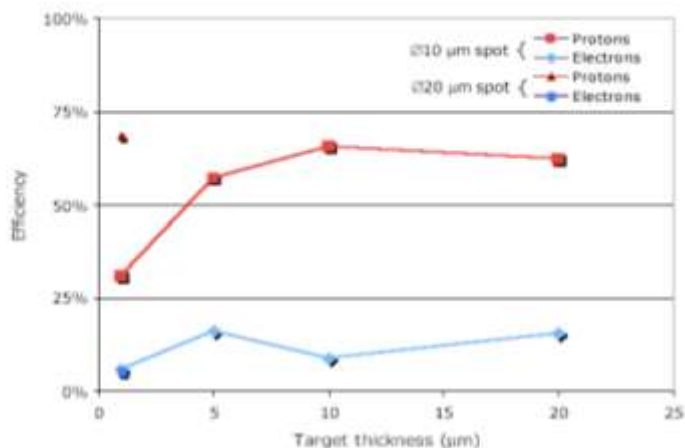
|         |                                            |         |
|---------|--------------------------------------------|---------|
| $N_i^T$ | the total number of particle per steradian | $N_j^G$ |
| $T_i$   | temperature in MeV                         |         |
| $E_j^G$ | the central energy in MeV                  |         |



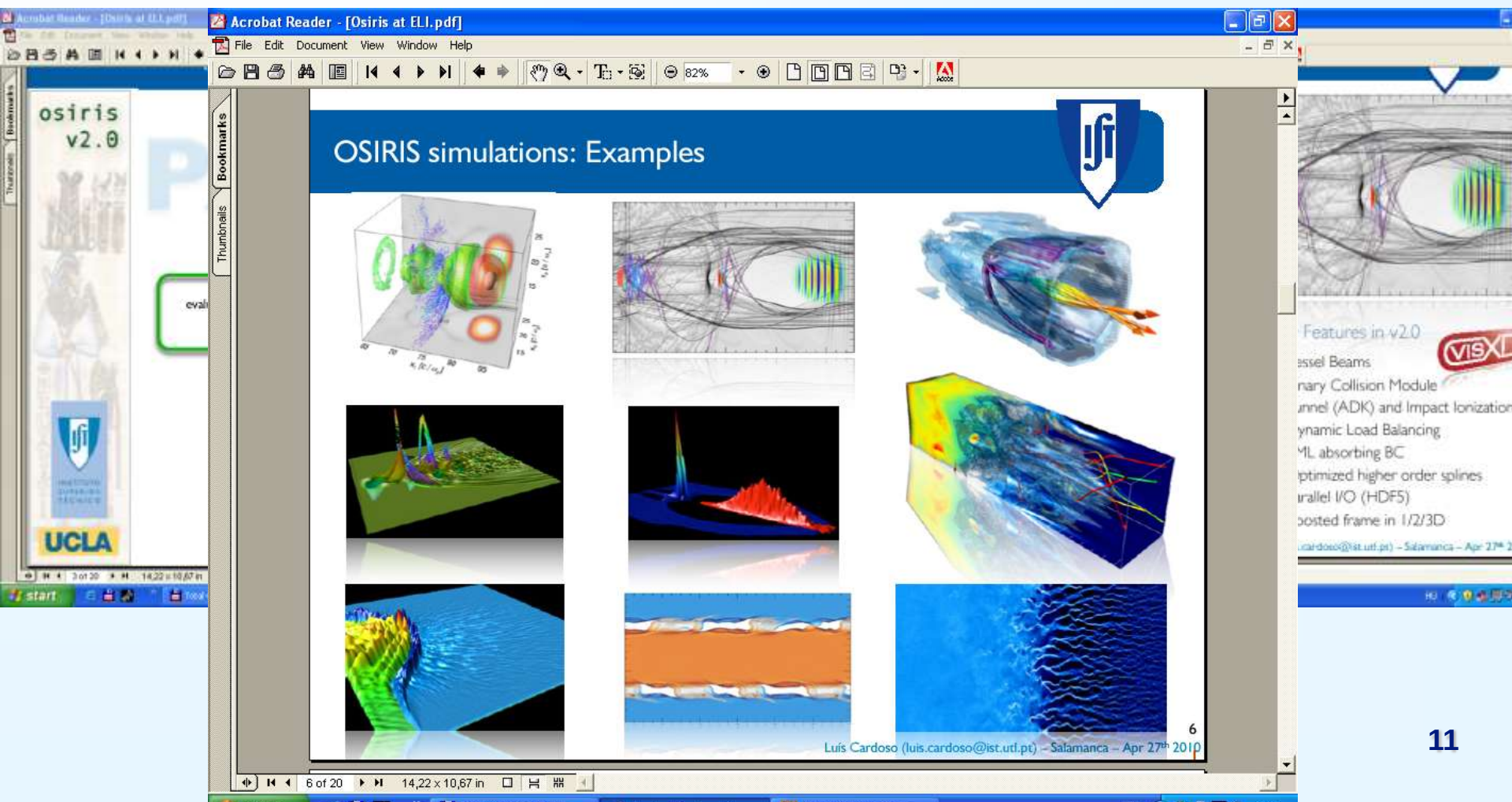
## Forrástag meghatározása

- Függ a lézer paramétereitől, sugárzástól és target tulajdonságaitól
- Az OSIRIS programmal szimulálják a lézer-anyag kölcsönhatás során keletkező részecskéket
- A program a Maxwell-Lorentz egyenleteket (parc. diff. egyenlet-rendszer) felhasználva a szukcesszív approximáció elve alapján lépésről-lépésre újra és újra számolja a részecskék állapotjellemzőit egy „véges dobozban”
- A keletkező részecskék nagy része nyaláb irányúak, energiájuk a GeV-ot is elérheti a lokálisan indukált nagy elektromágneses tér által

Laser-target energy transfer efficiency



## Osiris 2.0



Acrobat Reader - [Osiris at ELI.pdf]

File Edit Document View Window Help

osiris v2.0

UCLA

### OSIRIS simulations: Examples

Features in v2.0

- essel Beams
- nary Collision Module
- nnel (ADK) and Impact Ionization
- ynamic Load Balancing
- YL absorbing BC
- ptimized higher order splines
- parallel I/O (HDF5)
- posted frame in 1/2/3D

Luis Cardoso (luis.cardoso@ist.utl.pt) - Salamanca - Apr 27<sup>th</sup> 2010

6

11

## Indukált (mesterséges) radioaktivitás

-Szilárd  
(kísérleti)  
származékok  
A feladat

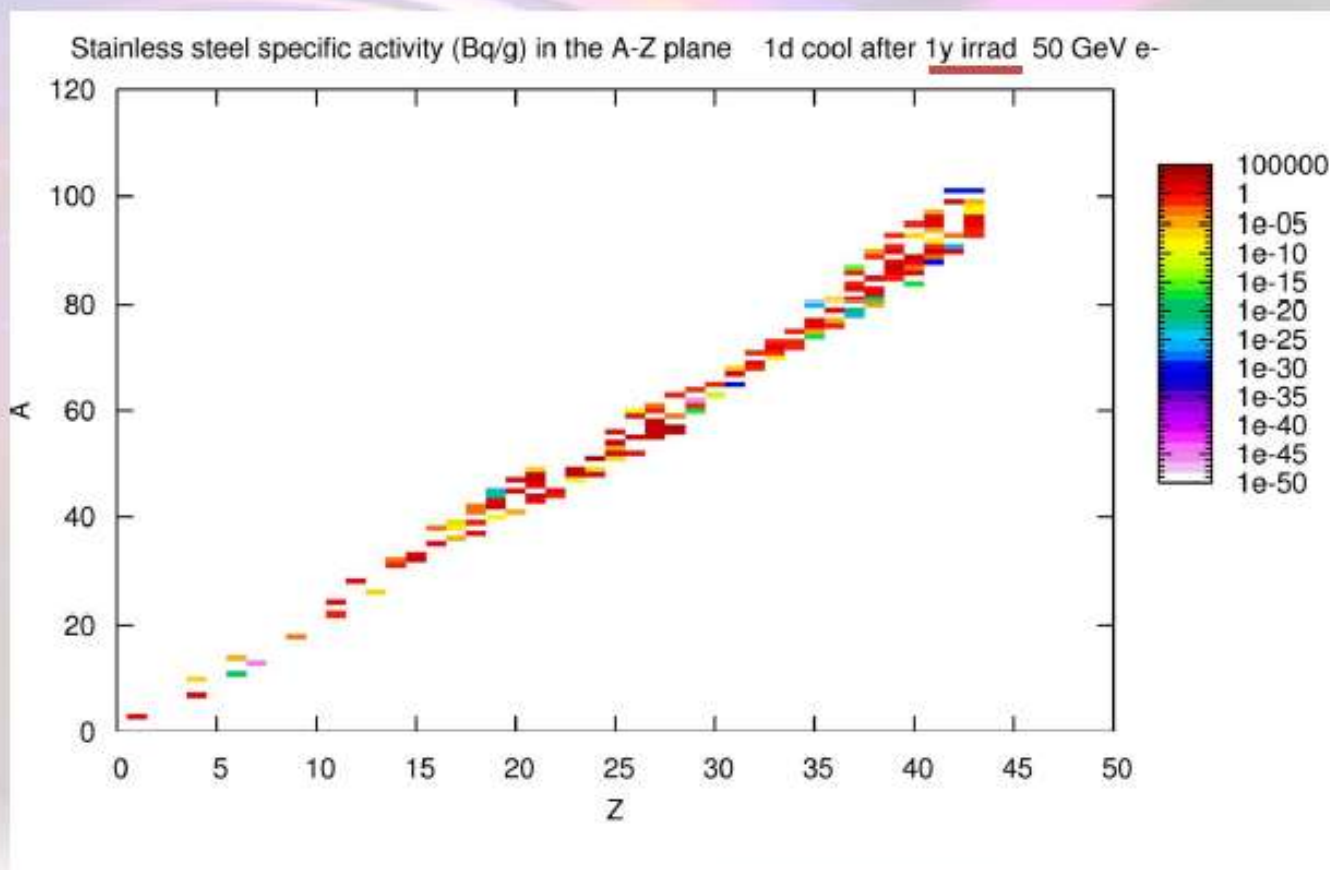
idők  
ebből

ahol: t

Aktív  
Kicsi:  
Közep  
Nagy:

Árnyék  
minim

szet

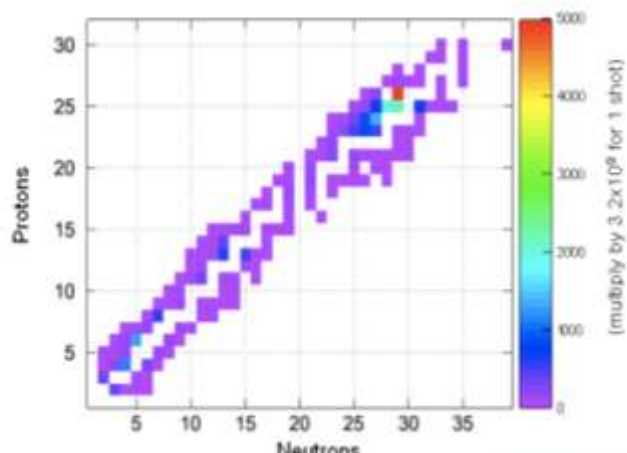


$A = 364 \text{ Bq/g}$  after 1 y irradiation + 1 d cooling

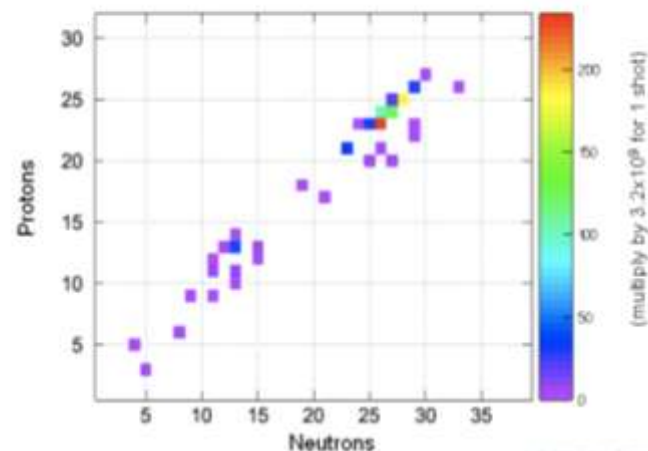


## Aktivációs szimulációk

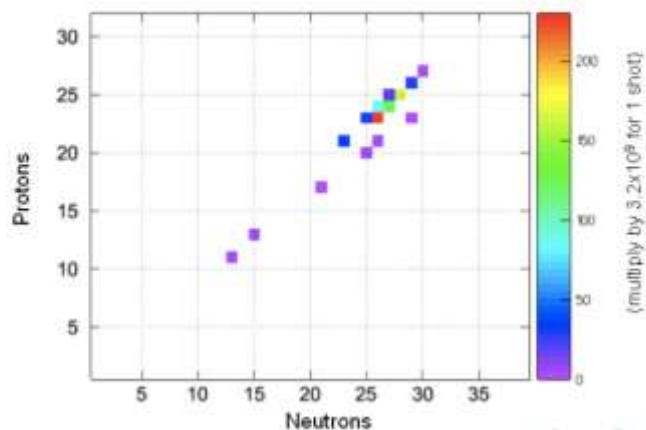
Total isotope count generated by 10 000 protons



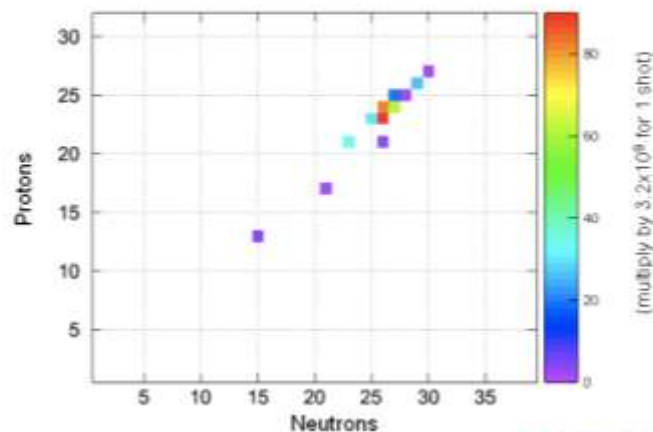
Isotope count generated by 10 000 protons, after 1 ms



Isotope count generated by 10 000 protons, after 1 min



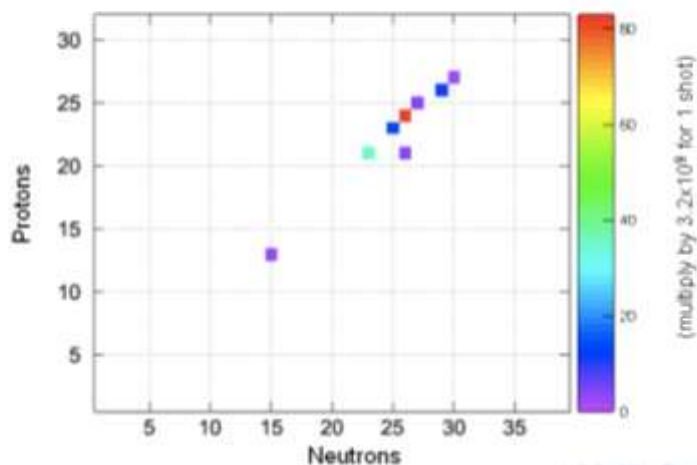
Isotope count generated by 10 000 protons, after 1 hour



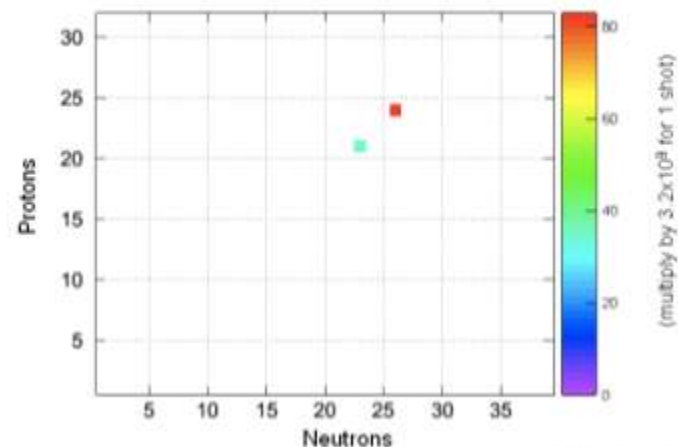


## Aktivációs szimulációk

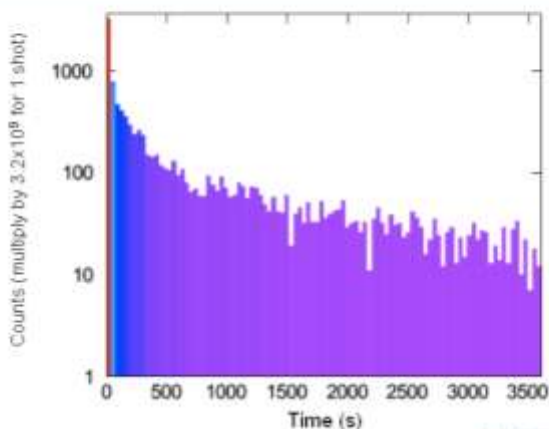
Isotope count generated by 10 000 protons, after 1 day



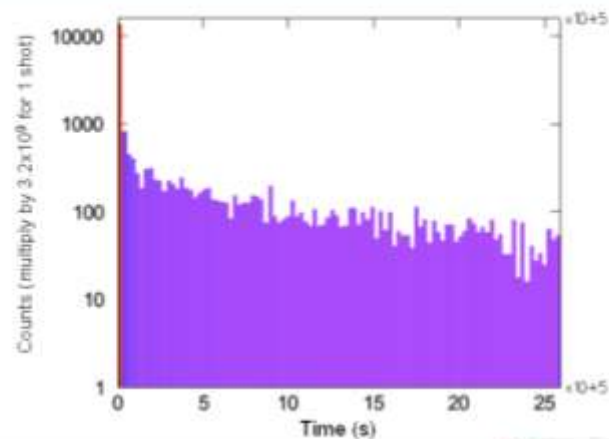
Isotope count generated by 10 000 protons, after 1 month



Decay emission for 10 000 protons (over 1 hour)



Decay emission for 10 000 protons (over 1 month)



# A FLUKA kód

- A megfelelő árnyékolást a FLUKA kóddal szimulálják
- A FLUKA kód egy Monte Carlo típusú, Linux alapú szimulációs program (<http://www.fluka.org/fluka.php>)
- 1962-1978 között Johannes Ranft (CERN) írta az első nagy energiás Monte Carlo kódot, ezt követte a FLUKA kód 2 generációja (1978-1989, 1989-2010)
- A kódnak számos felhasználási területe van: gyorsítók árnyékolása, detektor tervezés, kozmikus, neutrínó sugárzás, dozimetriai vizsgálatok, orvosi biológiai alkalmazások
- Extrapolációk is végezhetőek vele, ahol kísérleti adatok nem állnak rendelkezésre
- A FLUKA kód képes szimulálni közel 60 részecske kölcsönhatását az anyaggal keV-től egészen TeV-ig
- Beépített könyvtárakkal, alkalmazásokkal, algoritmusokkal rendelkezik, melyek a szükséges adatokat, geometriát tartalmazzák

**Az ELI sugárvédelmi árnyékolását a FLUKA kóddal határozzák meg**

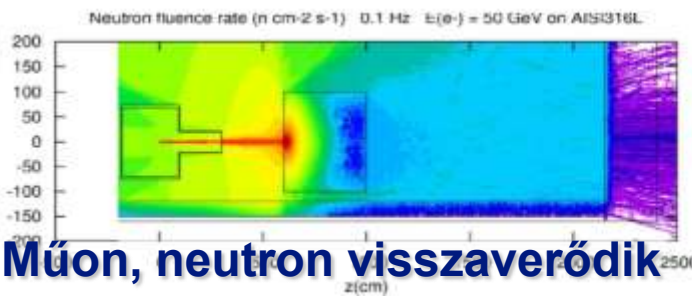
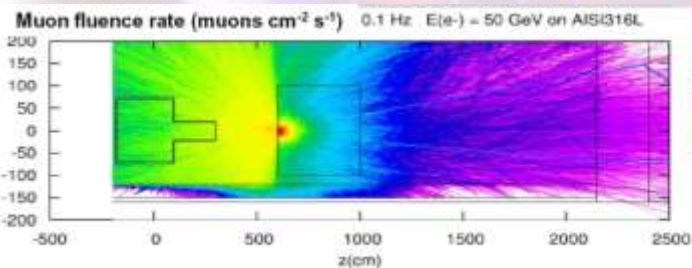
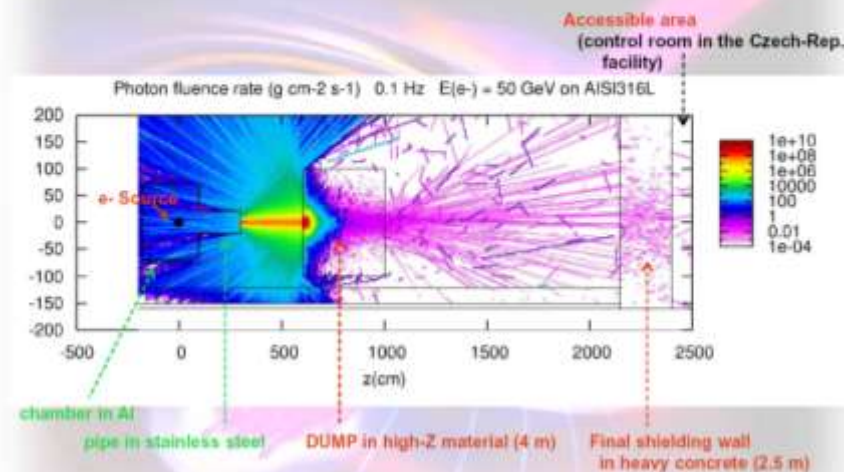
# Fluka szimulációk

0.1 Hz, 300 J beam-line

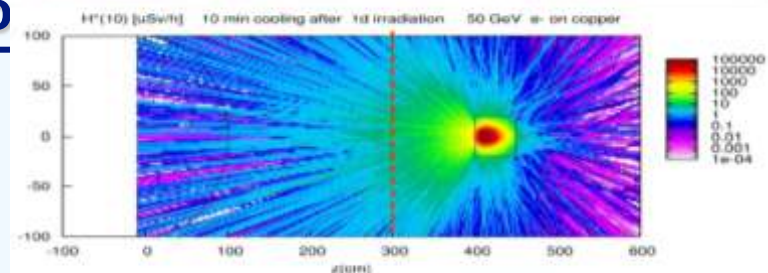
Hatékony védelem, de nagy  
a visszaszóródás mértéke

(a) Stainless steel

$E(e^-) = 50 \text{ GeV}$

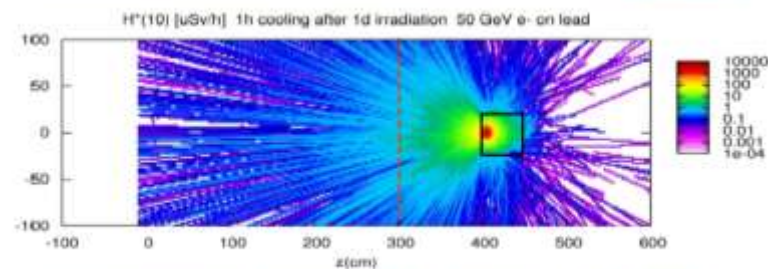


(a) copper



$A = 2830 \text{ Bq/g}$  after 1 d irradiation + 10 min cooling

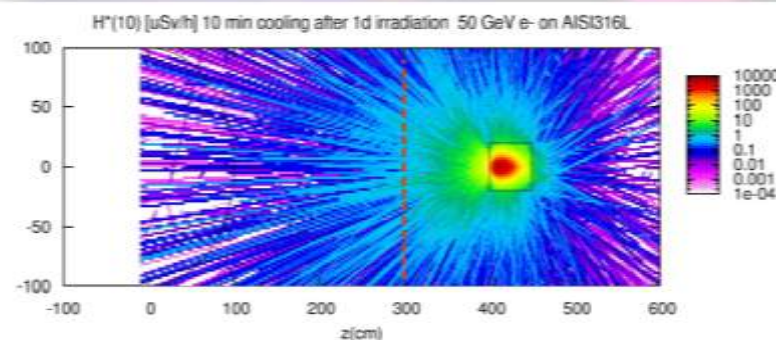
(b) lead



$A = 116 \text{ Bq/g}$  after 1 d irradiation + 1h cooling

(c) stainless steel

Kb. 10-szer nagyobb az acélnál



$A = 134 \text{ Bq/g}$  after 1 d irradiation + 10 min cooling

## Felaktiválódás



The choice of the stainless steel for the dump structure seems to be optimal

Műon, neutron visszaverődik



## Duplex védelem: rozsdamentes acél + grafit

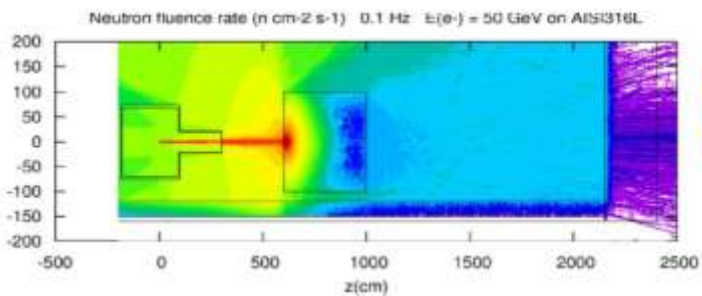
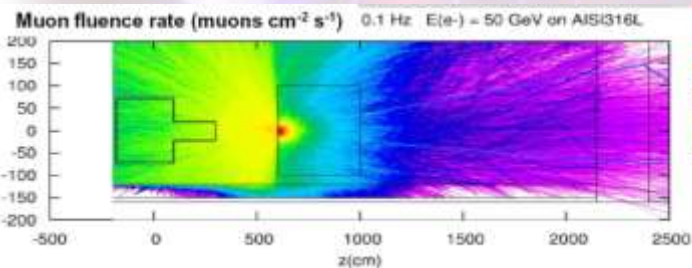
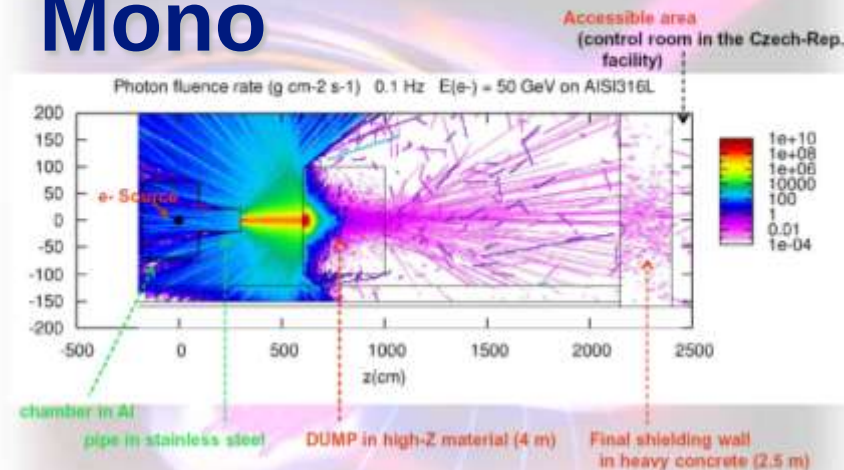
# Duplex

0.1 Hz, 300 J beam-line

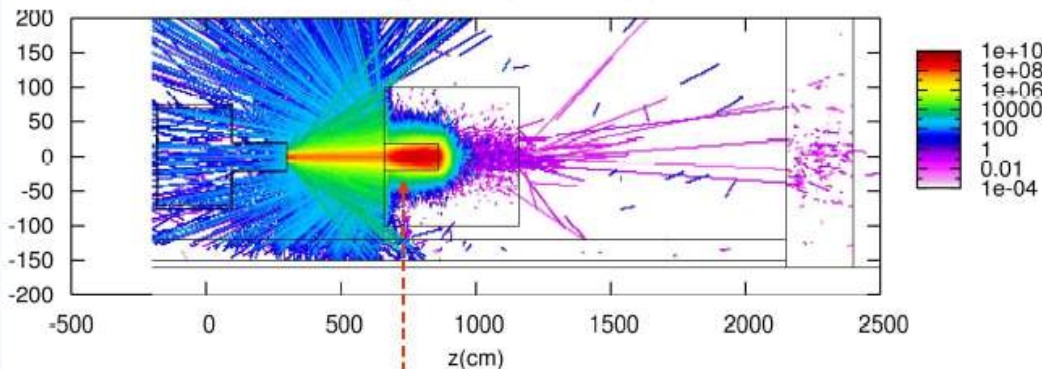
(a) Stainless steel

$E(e^-) = 50 \text{ GeV}$

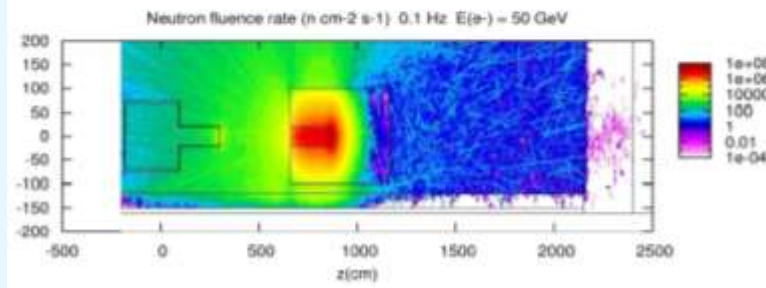
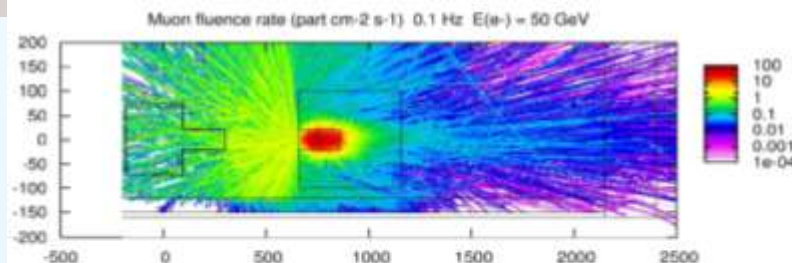
### Mono



Photon fluence rate ( $\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) 0.1 Hz  $E(e^-) = 50 \text{ GeV}$

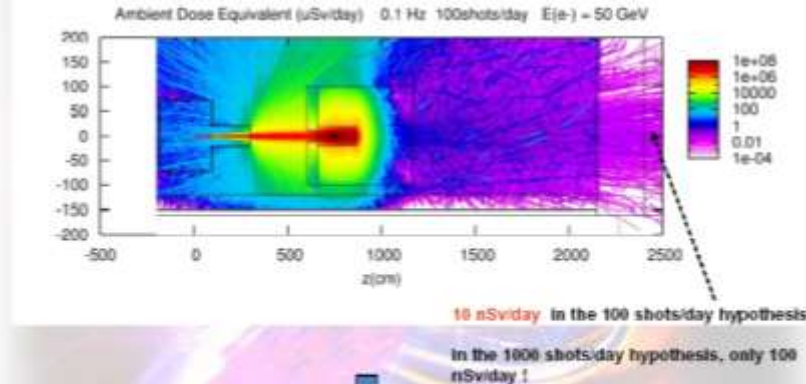
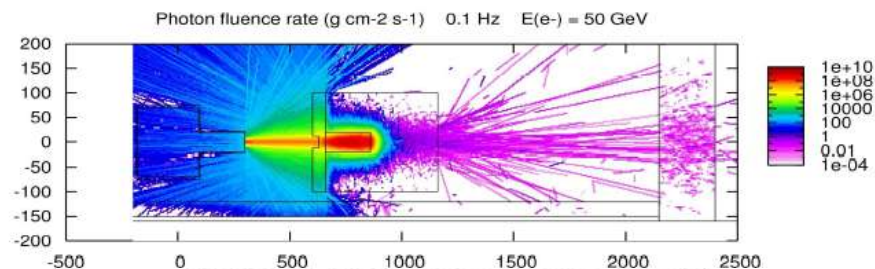
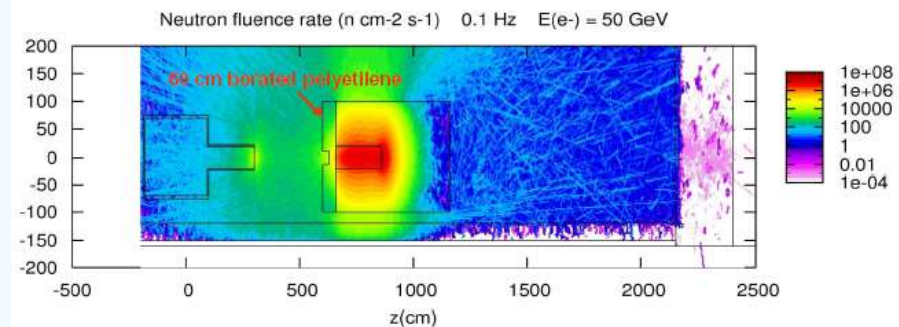
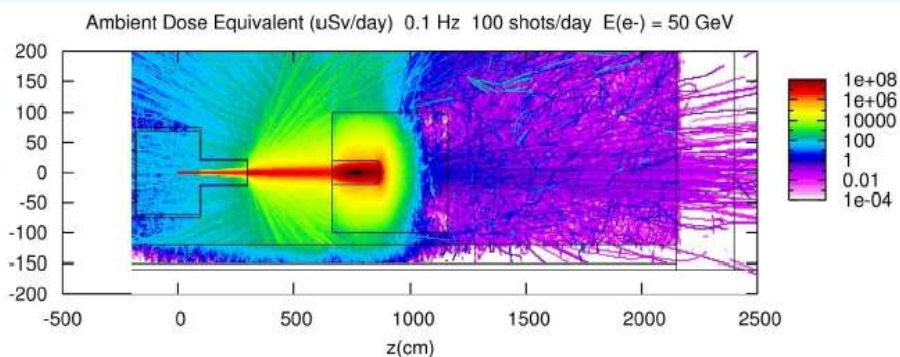
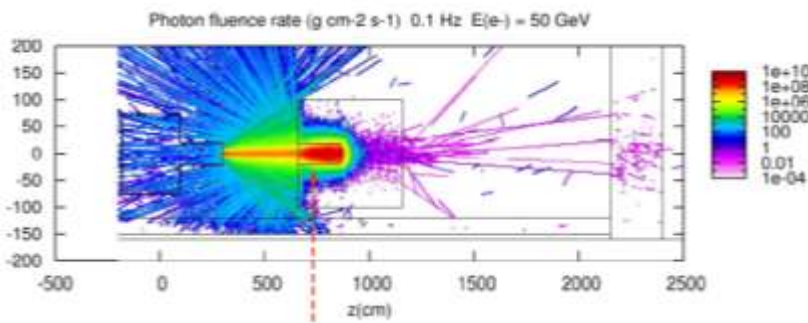
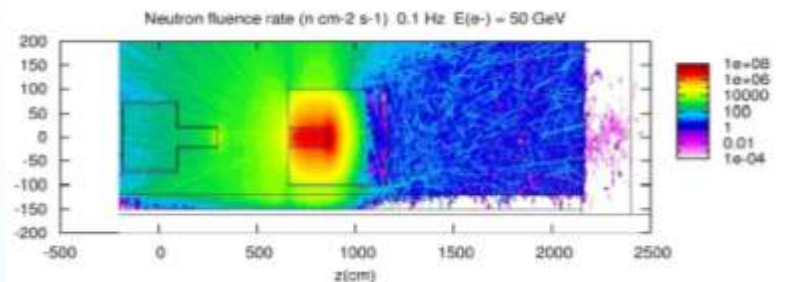


Graphite cylinder 100 cm long, diameter= 20 cm





# Tripla védelem: rozsdamentes acél + grafit + bórozott polietilén Duplex



The choice of a 3-mat structure (borated polyethylene + a core in carbon fiber surrounded by a cylinder in stainless steel) is optimal for the dump design

10 nSv/day -> if 1 y = 300 days (10 months), we have only **3 $\mu$ Sv/y** !

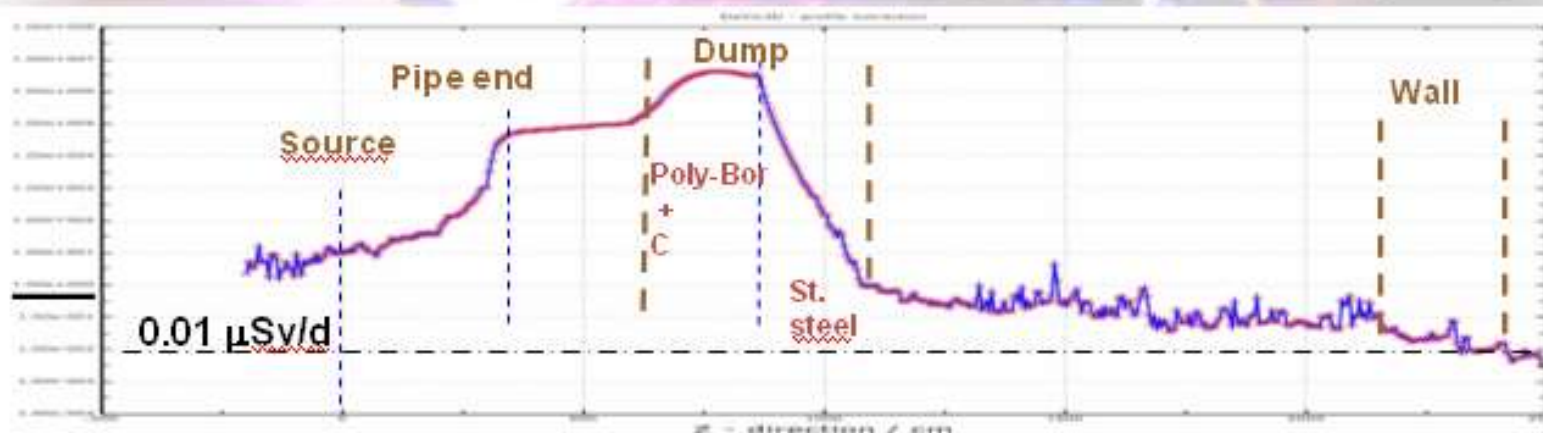
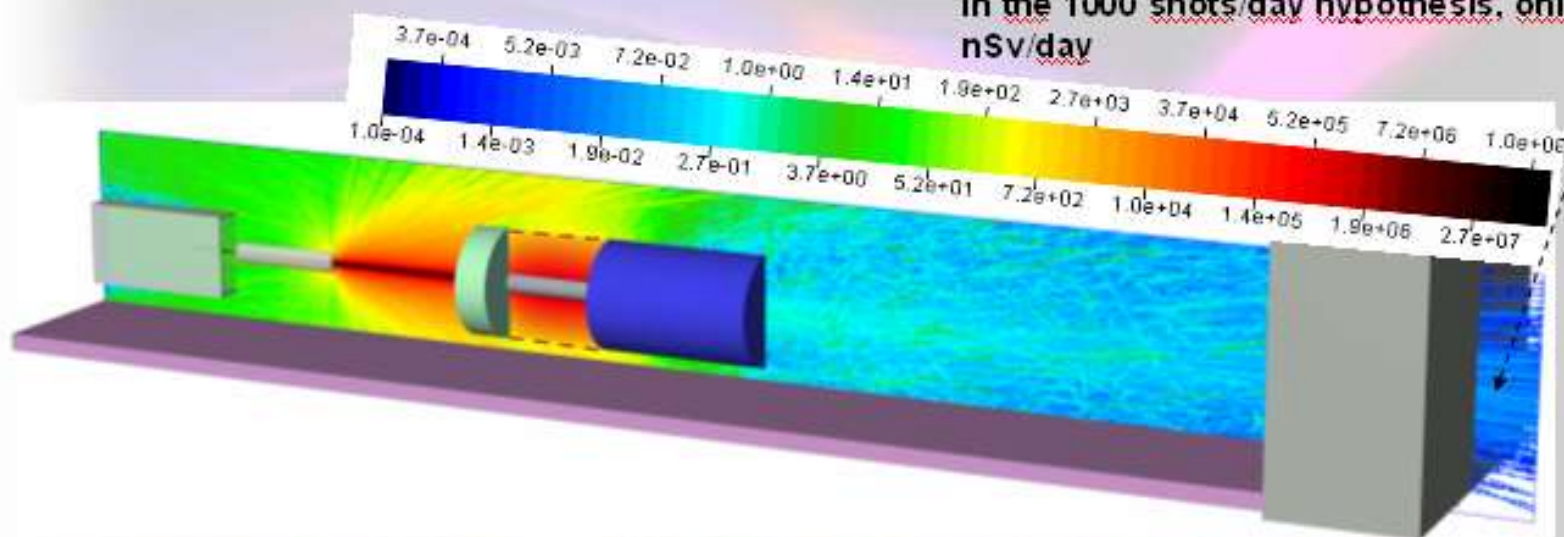
If we consider 1000 shots/day instead of 100 shots/day we are still much below the limit: only **0.03 mSv/y!!!**

## The $H^*(10)$ longitudinal profile



**10 nSv/day** in the 100 shots/day hypothesis

in the 1000 shots/day hypothesis, only 100 nSv/day

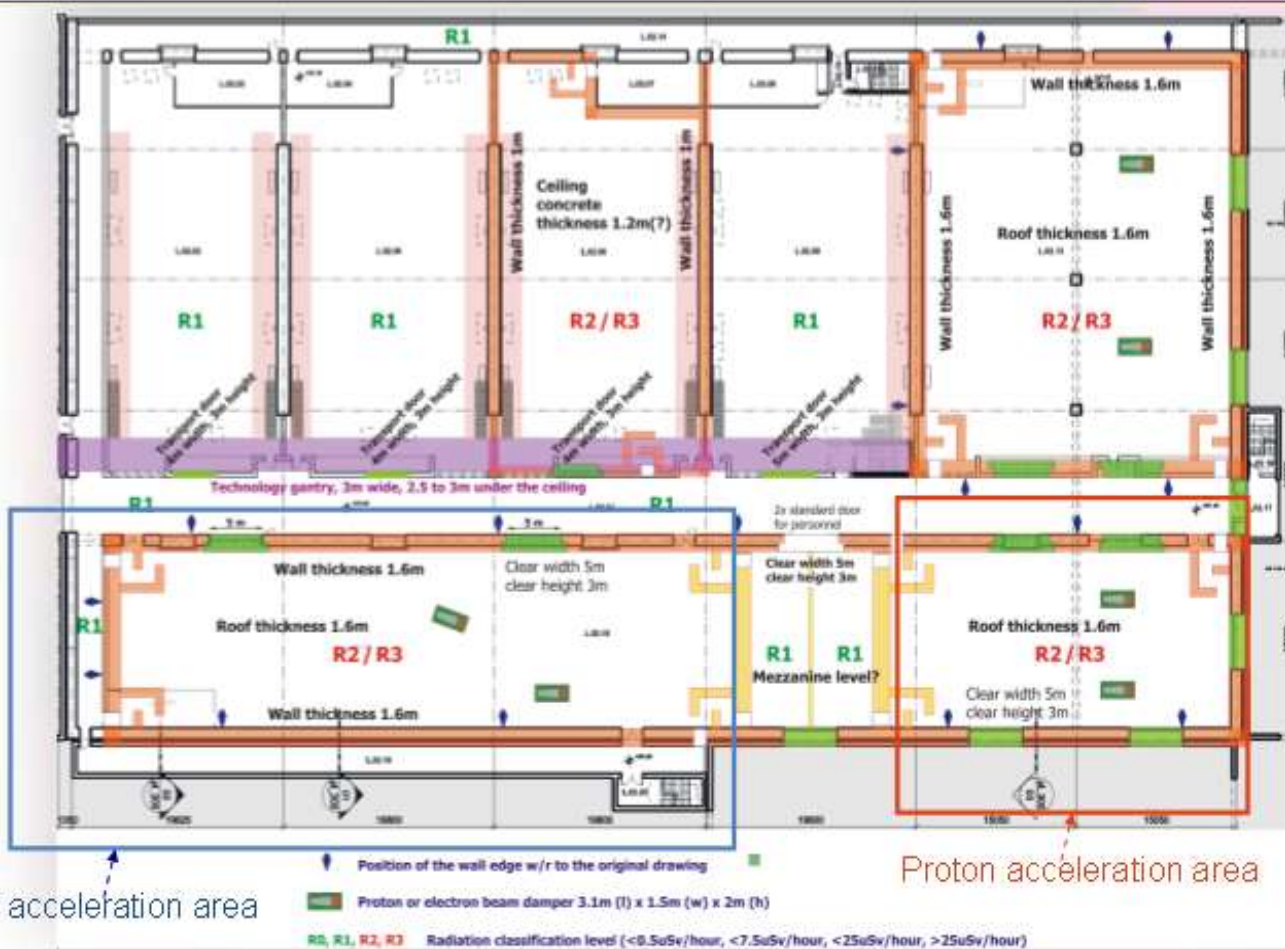




## A helyiségek kialakítása

- Bear...
- súly...
- Füg...
- légc...
- mére...
- Füg...
- kerül...
- Ajtó...
- sugá...
- Dete...
- elhely...

### Target areas



ere,

ne



# A szuperlézerrel dolgozók védelmének alapjai

## Aktív védelmi rendszerek

**Komplex sugárzási tér:**

- a sugárzási tér inhomogén
- rövid idejű impulzus szerű lecsengés
- sok részecske fajta melyek E-ja tág határok között változhat

**A sugárzási tér mérésére alkalmas eszközök:**

**-aktív rendszerek:**

- GM cső, ionizációs kamra, proporcionális számláló, szcintillációs detektor,

**-passzív rendszerek:**

- aktivációs detektorok, TLD,

**Az eszközök pontos működését tesztelni kell!!!**



**A felaktivált részecskék okozzák a legnagyobb veszélyt a dolgozók számára (levegő, hűtővíz, szilárd berendezések!)**

### A szuperlézerrel dolgozók védelmének alapjai

#### Aktív védelmi rendszerek

-Access Control System: Beléptető rendszer: aktív védelmi rendszer, mely ajtókból, zárankból, figyelmeztető berendezésekből áll, megakadályozza a személyzet belépését az aktív zónába (target, nyaláb környéke), továbbá a **prompt sugárzás** okozta károsodás elkerülhető vele

- Logikai áramkörök, ha valahol hiba van csak újra indítással lehet beindítani, hiba mentes működés

- Két egymástól független rendszer kell, dupla mikrokapcsolóval

-Sugárzás jelző rendszer: külső-belső térben elhelyezett detektorok, melyek szintemelkedéskor riasztanak és letiltják a belépést

-Napi jegyzőkönyv készítés, minden szintemelkedést regisztrálni kell, minden be és kilépést regisztrálni kell

-Vészvillogókat, kapcsolókat jól látható helyen kell elhelyezni, melyek világítanak, ill. hangot adnak

-A figyelmeztető jelzéseknek audiovizuálisnak kell lenniük

-Belépés előtt meg kell győződni, hogy nincs sugárveszély

-Belső videokamerás megfigyelő hálózat kiépítése indokolt

Minősített épület részek:

- Céltárgy és környezete: lézer működése során, ill. a prompt sugárzás lecsengéséig elzárt terület

- Irányító szoba: Szabad belépés, nincs megszorítás

A dolgozók valószínűleg nem tartoznak bele a sugárveszélyes munkakörbe

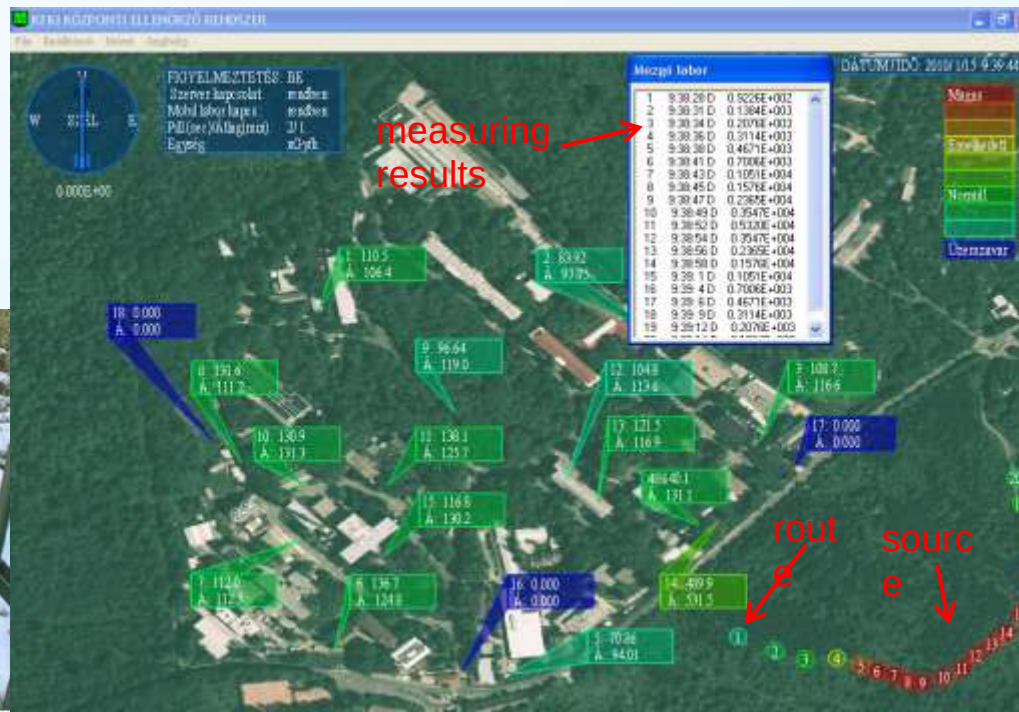
## **Az ELI környezeti hatásai**

- A prompt és a reziduális radioaktivitás megjelenhet a környezetben is (légcserélő berendezéseken keresztül), az ún. égbolt sugárzás hatására, melynek fő összetevője a szórt neutron sugárzás**
- Levegőben keletkező radionuklidok:  $3\text{H}$ ,  $7\text{Be}$ ,  $11\text{C}$ ,  $13\text{N}$ ,  $15\text{O}$ ,  $41\text{Ar}$ ,  $38\text{Cl}$**
- Porban keletkező radionuklidok :  $7\text{Be}$ ,  $24\text{Na}$ ,  $32\text{P}$**
- Talajvízben, talajban megjelenő radionuklidok szivárgás útján:  $3\text{H}$ ,  $7\text{Be}$ ,  $22\text{Na}$ ,  $32\text{P}$ ,  $45\text{Ca}$ ,  $47\text{Ca}$ ,  $47\text{Sc}$ ,  $51\text{Cr}$ ,  $54\text{Mn}$ ,  $55\text{Fe}$ ,  $59\text{Fe}$ ,  $58\text{Co}$ ,  $60\text{Co}$ ,  $152\text{Eu}$**
- Továbbá nitrózus gázok keletkezhetnek a kísérleti teremben ( $\text{NO}_x$  és  $\text{O}_3$ ), melyek a tüdőbe jutva roncsolják a szöveteket+elektromágneses tér is keletkezik**
- Egyéb hatások:vegyyszerek környezetbe kerülése, egyéb elhasznált anyagok megfelelő kezelése, gyűjtése, toxikus optikai eszközök**



## Az ELI környezetellenőrző rendszerei

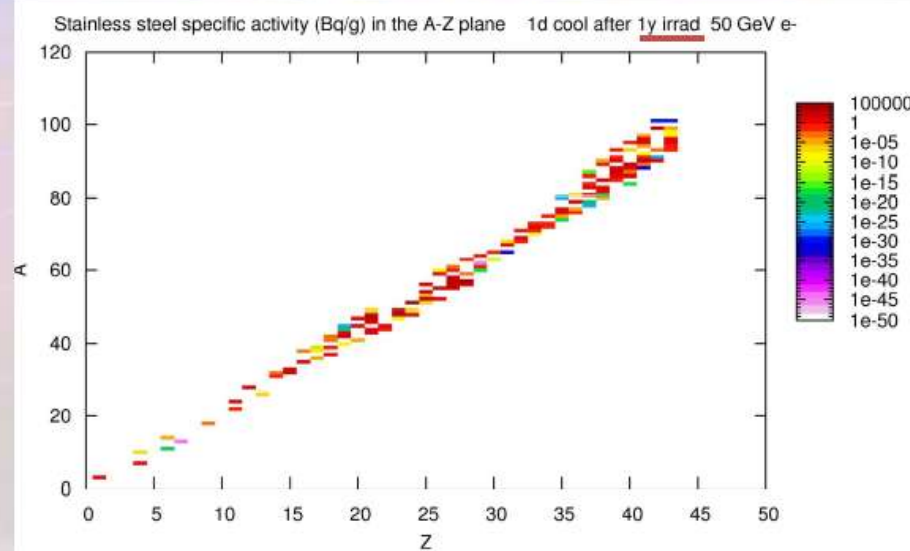
- A központi légcsatornában aeroszol szűrők → gammaspektrometriai mérések, fall-out mérések, GM szondák
- Talaj, növény, víz mintavételezés, monitorozás évi több alkalommal a berendezés környékén
- Központi kijelző rendszer telepítése



## Radioaktív hulladékok

- A kísérletek során indukált radioaktivitás keletkezik a targetban, a vizsgáló műszerekben, a berendezést körülvevő anyagokban és az árnyékoló elemekben
- Amennyiben az árnyékoló anyagok radioaktivitáskoncentrációja értéket, akkor radioaktív
- Az árnyékoló anyagok radioaktív hulladékkezelés hasznosítható anyagok hulladéktárolóban kell

Produced radionuclides



$A = 364 \text{ Bq/g}$  after 1 y irradiation + 1 d cooling

## Egyéb veszélyforrások

### -Lézer által generált veszélyforrások:

- NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> → tüdőszövet károsítása (salétromsav)
- Erős elektromágneses tér
- Fotokémiai, termo-mechanikai, termoakusztikus-tranziens hatások
- Retina, bőr károsodás, szórt sugárzásból  
(Max. megengedhető expozíció (MPE))

### -Nem lézer által generált veszélyforrások:

- kémiai veszélyforrások (inhaláció, lenyelés, folyékony N<sub>2</sub>, savak, lúgok, → az anyagok megfelelő feliratozása szükséges)
- biológiai veszélyforrások (ágensek, baktériumok használata)
- elektromos veszélyforrások
- egyéb veszélyforrások (vákuum, nagy nyomású berendezések, meleg-hideg felületek)



## Ellenőrzések

**A kialakított sugárvédelmi berendezések megfelelnek-e:**

- A sugárvédelmi tervekkel**
- A hazai ill. nemzetközi előírásoknak, ajánlásoknak, jogszabályoknak**
- Sugárvédelmi mérések és szimulációk összevetése**
- Esetleges baleset ill. üzemzavar próbák (szemantikai hibák felderítése, kiküszöbölése)**
- Súlyozott FEP lista kevésbé jelentős eseményeinek részletesebb vizsgálata, meggyőződés, hogy valóban kicsi a jelentősége pl. elfogadtatás zöld szervezetekkel**

## Hasznos webcímek, elérhetőségek

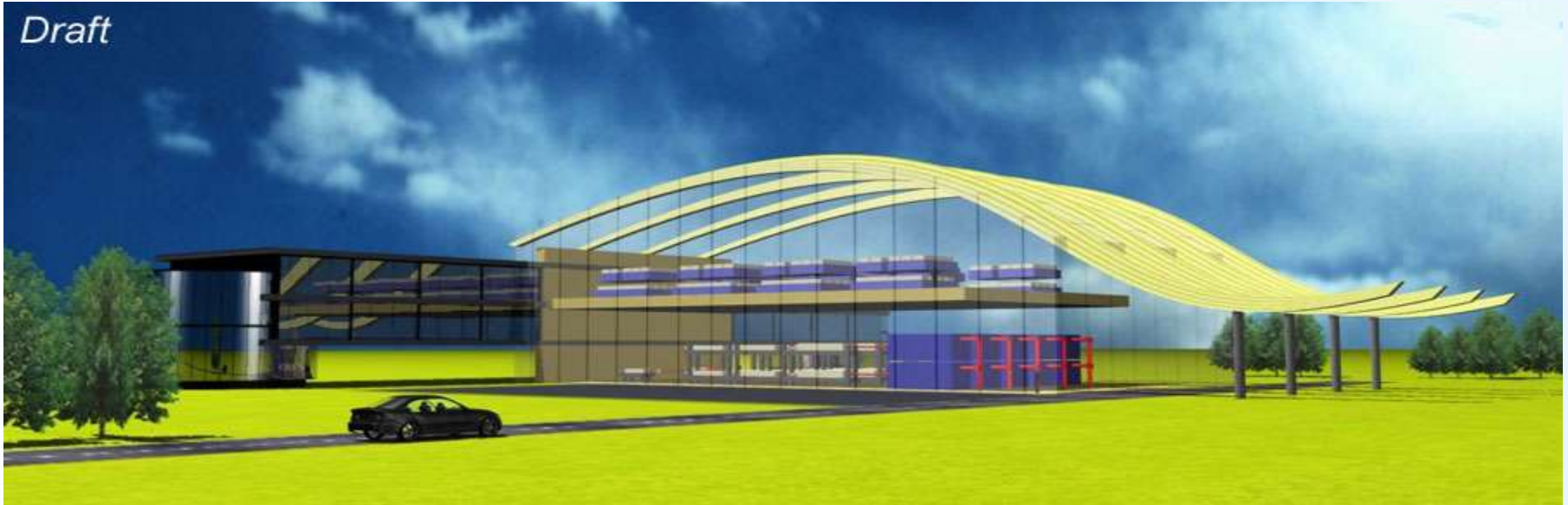
**ELI honlapja:**

**<http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>**

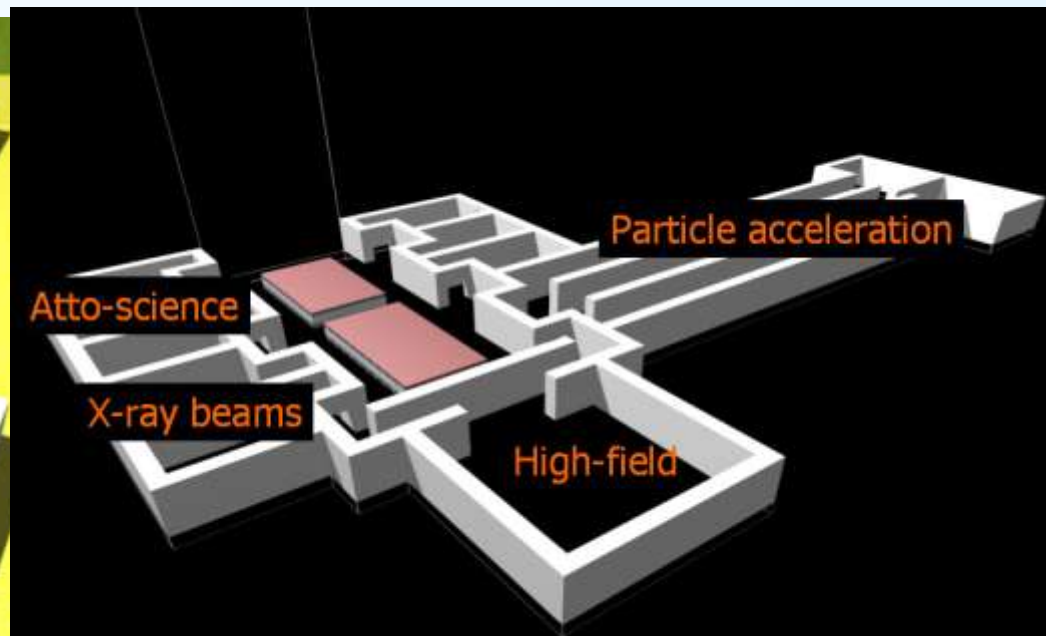
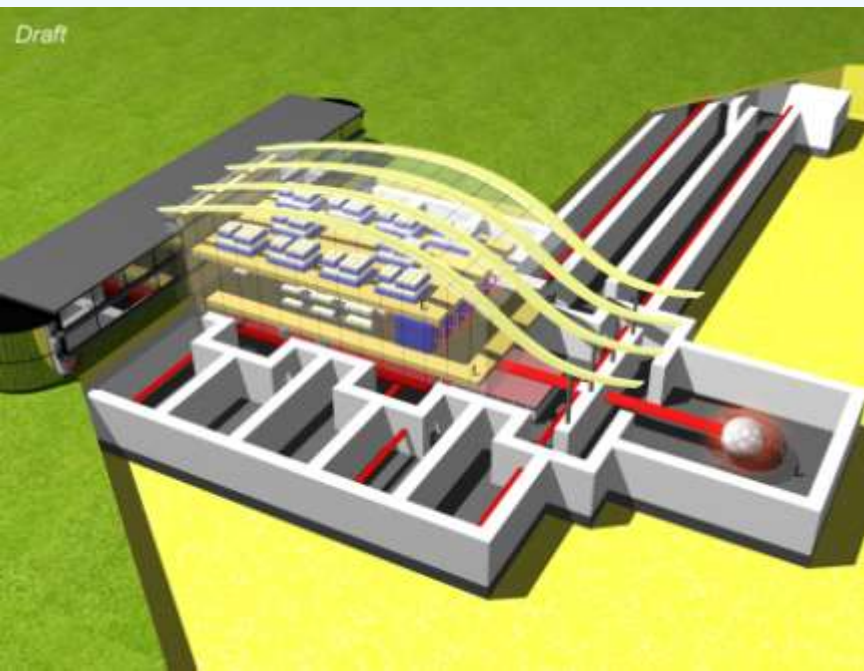
**Tudományos-technológiai háttér:**

**<http://www.extreme-light-infrastructure.eu/pictures/ELI-scientific-case-id17.pdf>**

Draft



# Köszönöm a figyelmet!

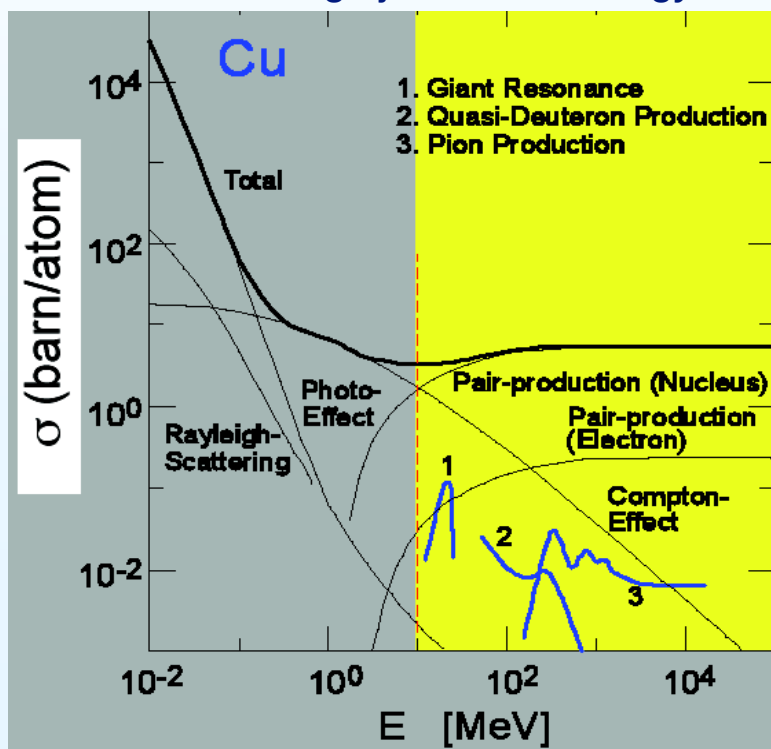




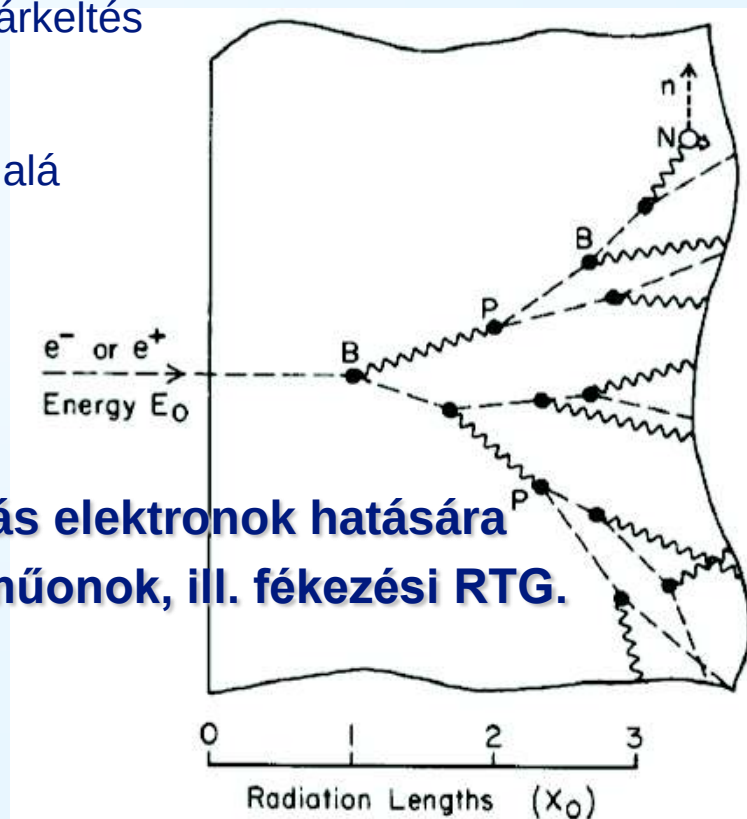
# A kísérletek során keletkező részecskék, elektronok

A keletkező elektronok energiája GeV-os tartományba esnek. A GeV energiájú elektronok és az anyag kölcsönhatása során fékezési sugárzás keletkezik, ami párkeltéshez vezet. A párkeltés hatására újabb elektronok és fotonok keletkeznek.

A kaszkád folyamat egészen addig tart, amíg a keletkező részecskék energiája lecsökken egy kritikus energia szint alá



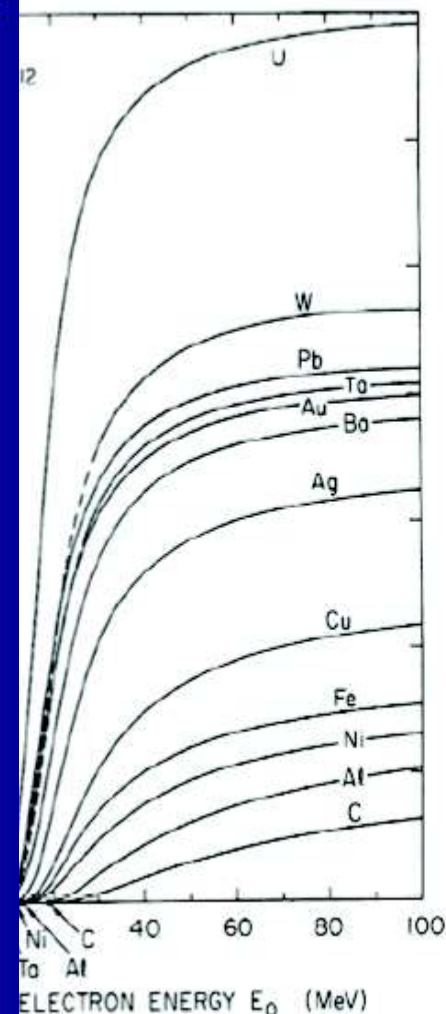
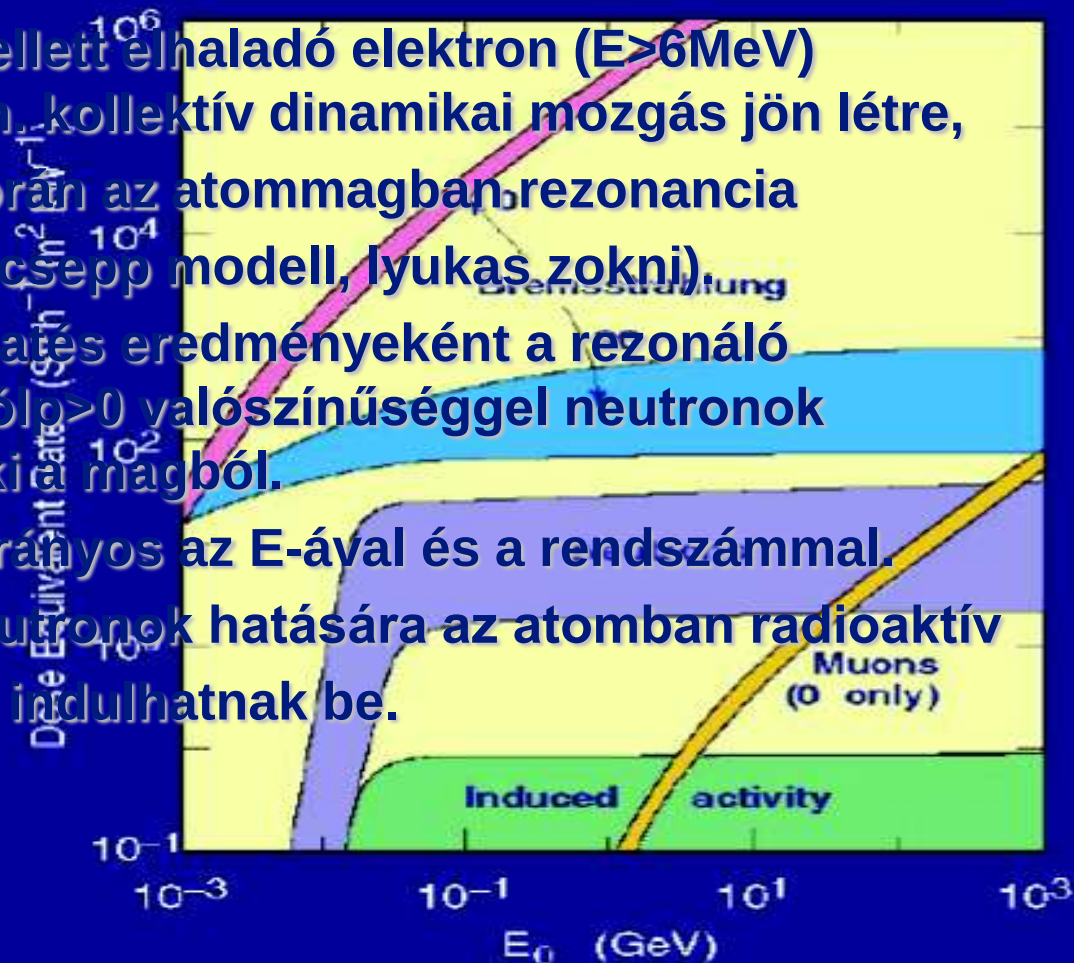
Nagy energiás elektronok hatására  
neutronok, müonok, ill. fékezési RTG.  
keletkezik



$X_0$  :relaxációs távolság <sup>30</sup>

## Neutron keltés elektronok által

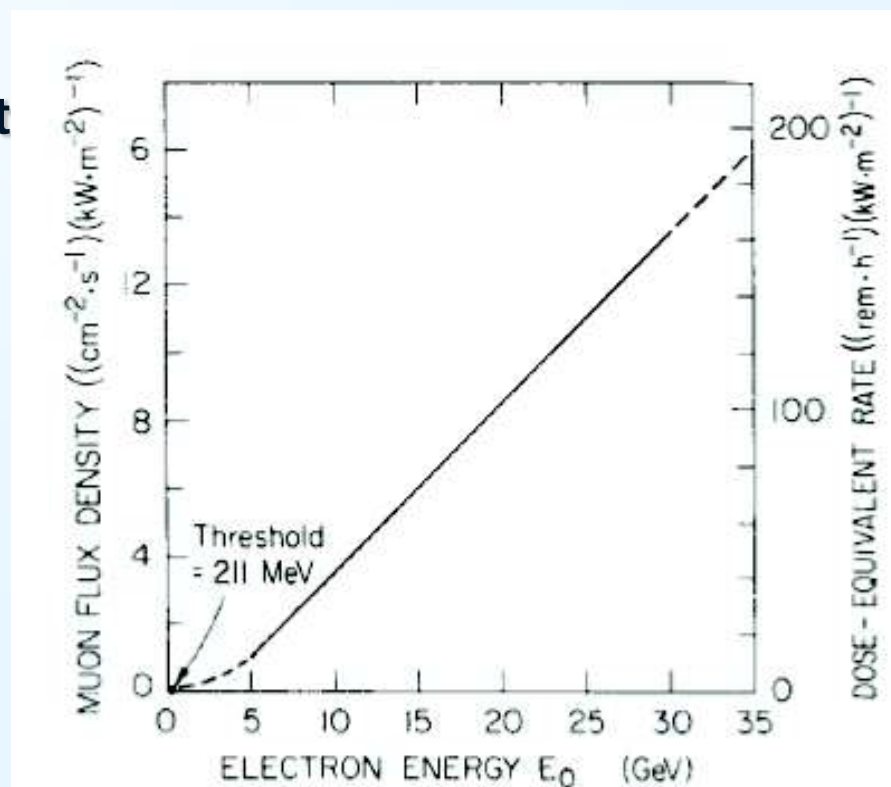
Source term for thick target per unit power



$Z^{0.66} ns^{-1} kW^{-1}$   
n hozam függés

## Müon keltés

- A Müom keltés az elektron-pozitron keltéssel analóg folyamat
- A targetben lévő fotonok keltik a Müonokat
- A Müon hozam arányos az elektron  $E$ -ával
- Müonok keletkezhetnek pion,kaon bomlásból is (elhanyagolható)
- A Müonok árnyékolása nehéz feladat
- A Müonok árnyékolására alkalmas lehet a talaj, ill. nagy rendszámú anyagok Pl. vas
- A Müonok nyaláb irányúak→ Beam dump mögött megjelenik ionizációval veszítik el az energiát





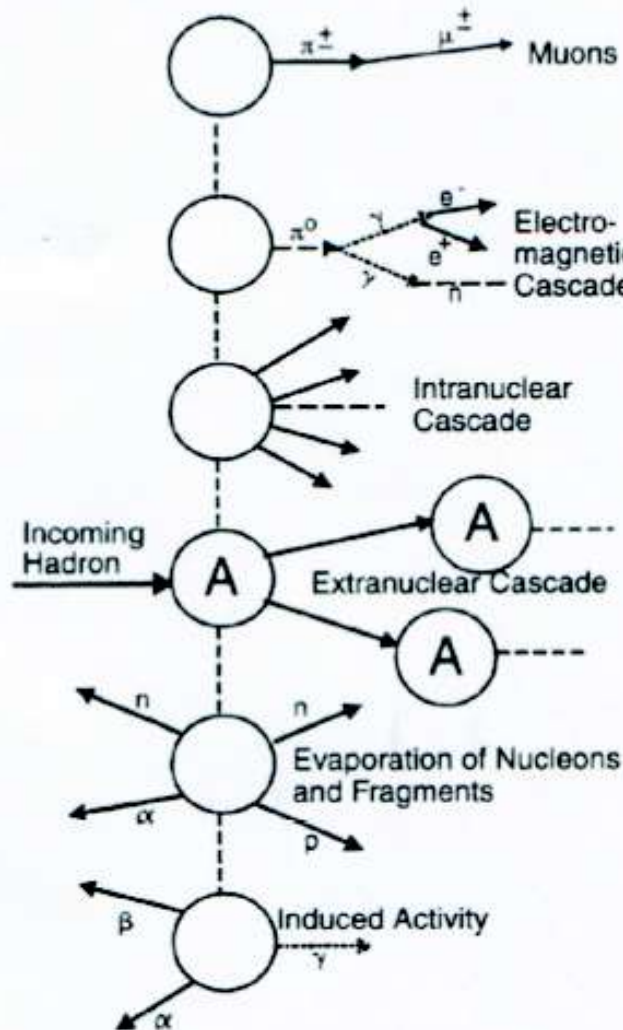
## Protonok

-Hadron kaszkádot hoz létre a nagy E-ájú (>150 MeV) nukleonok kölcsönhatása az atommaggal

-E=20-150 MeV esetén töltött részecskék keletkeznek, melyek az ionizáció hatására gyorsan leállnak, továbbá jelentős neutron hozammal kell számolni ez képezi a prompt sugárzás nagy részét

-Töltött  $\pi$  mezonok (kaonok) müonokká, neutrínókká bomlanak

-Semleges  $\pi$  mezon nagy energiájú fotont, elektront termel, melyek beindíthatják az elektron kaszkádot, ami hadron kaszkádot idéz elő  $\rightarrow e$  kaszkád  $\rightarrow$  hadron



| Most Numerous Participants    | Time Scale (s)   | Typical Energy per Particle (MeV) | Percent of Energy Deposition |
|-------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| $\pi, K \rightarrow \mu$      | $10^{-8}$        | any                               | 10                           |
| $\pi^0 \rightarrow e, \gamma$ | $10^{-16}$       | any                               | 20                           |
| $p, n, \pi, K$                | $10^{-22}$       | <200                              | 30                           |
| $p, n, \pi, K$                | $10^{-23}$       | >200                              | 30                           |
| $p, n, d, \alpha$             | $10^{-19}$       | <30                               | 10                           |
| $\alpha, \beta, \gamma$       | seconds to years | <10                               | <1                           |

## Hadron kaszkád folyamat

## Neutron keltés protonok által

A spalláció során a nagy energiára felgyorsított részecskék (proton, deuteron, hélium stb.) nehéz atomokkal (Pb, W, Bi, Hg stb.) összeütközve nagyszámú neutront hozhatnak létre. Az első ütközés következtében a céltárgy atommagja erősen gerjesztődik és általában gyorsneutronok kibocsátásával adja le energiáját. A kezdeti szakaszban kibocsátott részecskék egy része még rendelkezhet elegendő energiával újabb spallációs reakciók létrejöttéhez, amelyek ismét neutronok kibocsátásával is járhatnak és tovább sokszorozhatják a keletkező neutronok számát. (kaskád-effektus)

Így a GeV nagyságrendű energiatartományba felgyorsított protonokkal, spallációs magreakció révén, eseményenként pl. egy volfrám targetban akár 30-40 neutron is keletkezhet, szemben a hasadási magreakcióval, amelyben a hasadásonkénti neutronok száma átlagban 2,5-2,9 közötti.

# **A szuperlézerrel dolgozók védelmének alapjai**

## **Passzív védelmi rendszerek**

- A védelem alapja a távolság és a kettős idő védelem
- Kettős idővédelem:
  - (1) a kutatók a kísérlet után csak egy bizonyos idő elteltével mehetnek a kísérlet helyszínére (miután a prompt sugárzás minimálisra csökkent, ill. a gázok nagy részét a ventilációs berendezés már kifújta, legalább 10-szeres légcseré)
  - (2) a kutatók minimális ideig tartózkodjanak a target, ill. a kísérleti berendezés közelében
- A távolság védelem alapja a Transzmittancia optimalizált (ALARA) csökkentése
- A védelem alapját megfelelő vastagságú- anyagú, moduláris, portábilis árnyékoló falak képezhetik az elektromágneses sugárzás, ill. a részecske sugárzás ellen
- Szimulációk alapján becsülhető lesz a kilépő részecske nyaláb
- A bemenő adatok alapján a FLUKA kóddal tervezhető az árnyékoló rendszer
- A végleges megfelelő falvastagságot a tesztműködés során elvégzett kísérletek adatai alapján lehetne meghatározni
- TLD, GM-csövek használata a nagyberendezés teszt működtetése során ajánlott, az eredmények alapján, akár a későbbiekben is
- A szuperlézerrel dolgozók, mentők, tűzoltók, katasztrófavédelmi dolgozók sugárvédelmi alapoktatása ajánlott+gyakorlatok





## A szuperlézerrel dolgozók védelmének alapjai

### Passzív védelmi rendszerek, árnyékolás

-Árnyékoló anyagként számos anyag jöhet számításba, a választásnál figyelembe kell venni a szükséges árnyékoló anyag tömegét, méretét, homogenitását, stabilitását, az anyag árát, **felaktiválását LCA**

-Hagyományos beton 2,35 g/cm<sup>3</sup>, acél 7,8 g/cm<sup>3</sup>, föld 1,7-2,35 g/cm<sup>3</sup>

-További árnyékoló anyagok: ólom, ólom ötvözetek, szegényített urán, wolfram  
H gazdag anyagok (neutron): fa, víz, polietilén, paraffin

-A megfelelő árnyékolás vastagságának meghatározása:

-A dózisteljesítmény a távolság négyzetével fordítottan arányos:

$$D^*_0 = DCF \cdot A / r^2$$

Továbbá számításba kell venni az árnyékolás okozta gyengülést is:

$$D^*_{\text{max.normal}} = D^*_0 \cdot \exp(-\mu_m \cdot d \cdot \rho) \quad (\mu_m: \text{tömegabszorpció együttható m}^2/\text{kg})$$

Megfelelő a vastagság, ha az alábbi kritérium teljesül:

$$\text{NDL}_{\text{normalizált } D^* \text{ hátár}} = \sum_i D^*_{\text{max.normal},i} / D^*_{\text{megengedett}} < 1$$

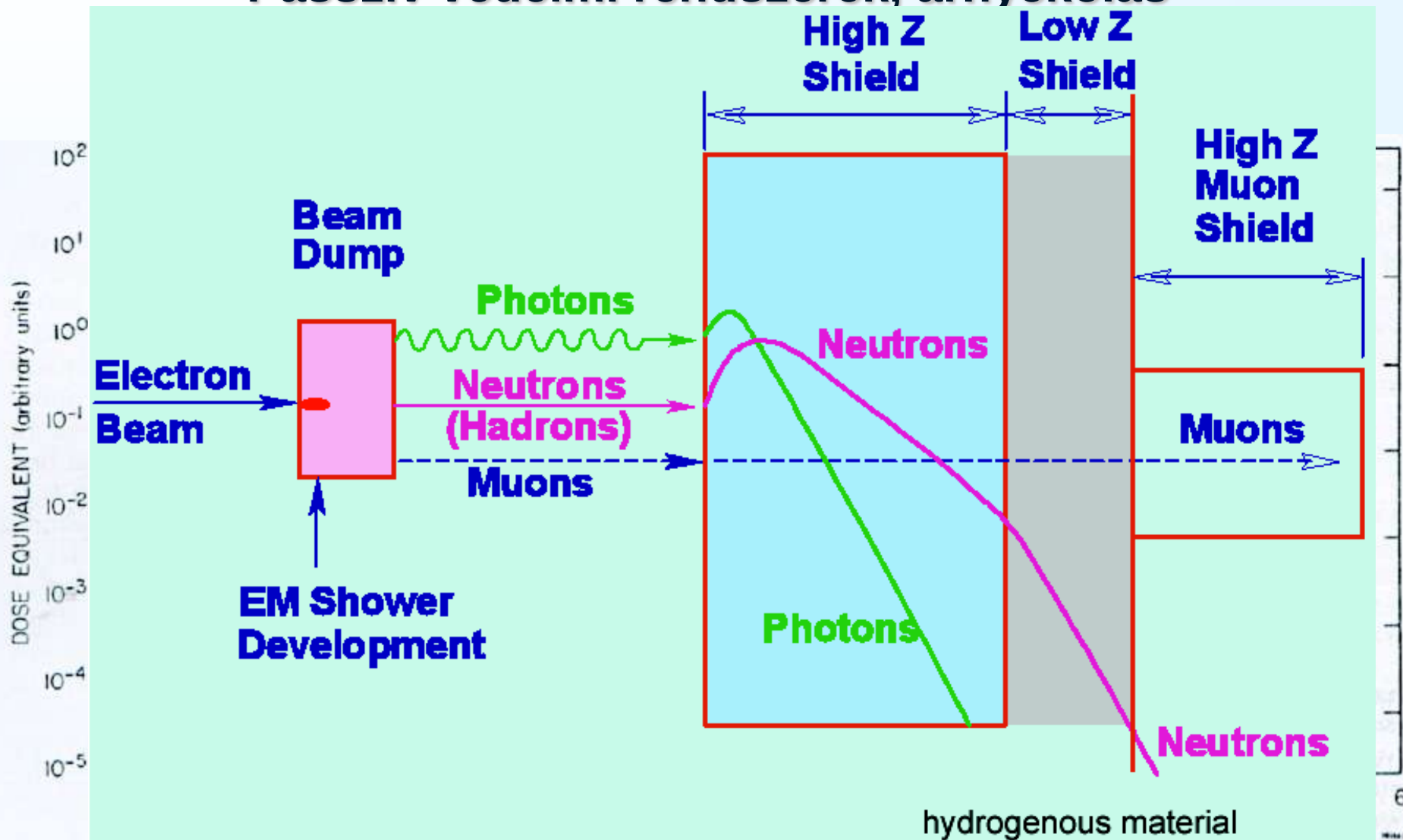
$$\sum D^* = \sum_i (S_i / r^2) \exp(-\mu_m \cdot d \cdot \rho) \cdot f_i$$

(r: távolság, d árnyékolás vastagsága, S: forrás tag~(A), f [ $\mu\text{Sv/h}/\text{ncm}^2\text{s}^{-1}$ ]~DCF

$$d = \ln(D^*_0 / D^*_{\text{megengedett}}) / \mu_m \cdot \rho$$

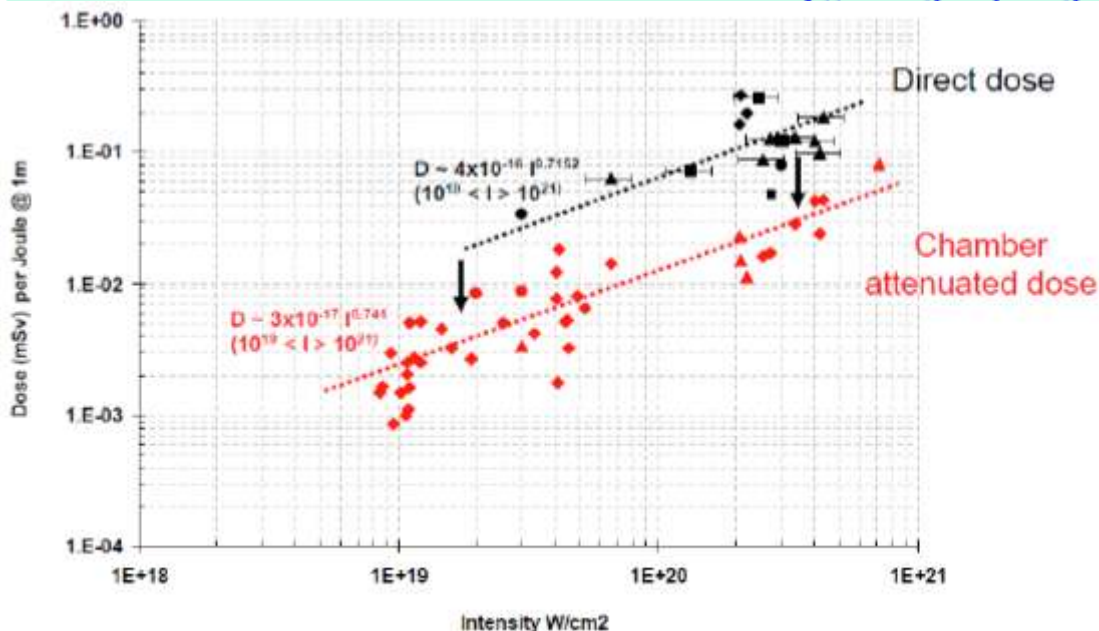
## A szuperlézerrel dolgozók védelmének alapjai

### Passzív védelmi rendszerek, árnyékolás



## Relaxációs távolságok különböző részecskék, árnyékoló anyagok esetén

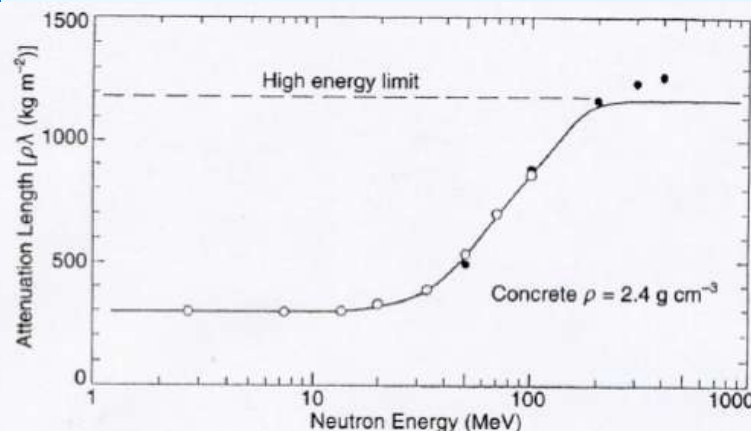
High energy neutrons ( $E > 25 \text{ MeV}$ )



Bremsstrahlung

$e^-$

| Material                  | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Angle (gradi) | Attenuation length $\lambda$ (cm) |
|---------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| Concrete                  | 2.3                          | 0°            | 20.4                              |
| Concrete                  | 2.3                          | 90°           | 18.7                              |
| Heavy concrete            | 3.4                          | 0°            | 13.8                              |
| Heavy concrete            | 3.4                          | 90°           | 12.6                              |
| High Density Polyethylene | 1.01                         |               | 69.3                              |
| Lead                      | 11.35                        |               | 2.2                               |
| Iron                      |                              |               | 4.76                              |
| Earth                     |                              |               | 43.8                              |

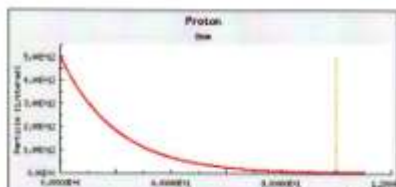
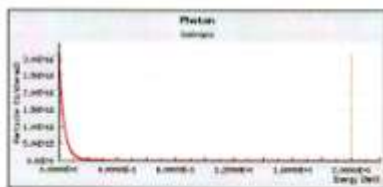




## Forrástag meghatározása

ELI extrapolálás

szögeltérítők a VULCAN Facility  
a 1, 10,



$$N(x) = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{N_i^2}{x_i^2} \exp\left(-\frac{x}{x_i}\right) + \sum_{j=1}^M \frac{N_j^2}{x_j^2} \exp\left(-\frac{x}{x_j}\right) \right] \exp\left(-4 \ln 2 \left(\frac{x - E_0}{\Delta E}\right)^2\right)$$

for  $x \geq E_0$   
for  $x < E_0$

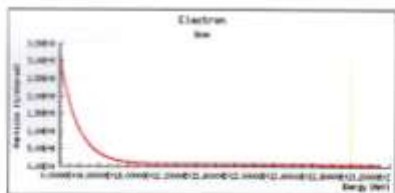
$$N(x) = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{N_i^2}{x_i^2} \exp\left(-\frac{x}{x_i}\right) + \sum_{j=1}^M \frac{N_j^2}{x_j^2} \exp\left(-\frac{x}{x_j}\right) \right] \exp\left(-4 \ln 2 \left(\frac{x - E_0}{\Delta E}\right)^2\right)$$

for  $x \geq E_0$   
for  $x < E_0$

| Experiment                          | Experiment: Vulcan-001                                           |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Target                              | Al-Foil: 4.0E+23 g/cm <sup>2</sup>                               |
| Pulse                               | 1.0E+21 W/cm <sup>2</sup> , 10 fs, 10 J, 100 nm, Polarization: p |
| Particle, Instrument                | Proton, Scintillation counter                                    |
| Cut-off (MeV)                       | 2 MeV                                                            |
| Angular distribution                | Beam [α = 0°, β = 0°, γ = 0°]                                    |
| Thermal Components                  |                                                                  |
| Temperature (T <sub>0</sub> ) [MeV] | Particle number (N <sub>i</sub> ) [Values]                       |
| 0.05                                | 1.0E+15                                                          |
| 0.10                                | 1.0E+14                                                          |
| 0.5                                 | 1.0E+10                                                          |

| Experiment                          | Experiment: Vulcan-002                                           |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Target                              | Al-Foil: 4.0E+23 g/cm <sup>2</sup>                               |
| Pulse                               | 1.0E+21 W/cm <sup>2</sup> , 10 fs, 10 J, 100 nm, Polarization: p |
| Particle, Instrument                | Proton, Scintillation counter                                    |
| Cut-off (MeV)                       | 2 MeV                                                            |
| Angular distribution                | Beam [α = 0°, β = 0°, γ = 0°]                                    |
| Thermal Components                  |                                                                  |
| Temperature (T <sub>0</sub> ) [MeV] | Particle number (N <sub>i</sub> ) [Values]                       |
| 0.05                                | 1.0E+15                                                          |
| 0.10                                | 1.0E+14                                                          |
| 0.5                                 | 1.0E+10                                                          |

Fig. 8.2.1.1 Photon (left) and proton (right) energy spectra from Vulcan measurements in experiments with an Aluminum target foil are displayed. The maximum intensity is  $I = 10^{21} \text{ W/cm}^2$ .

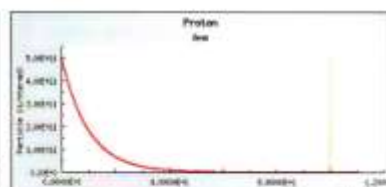
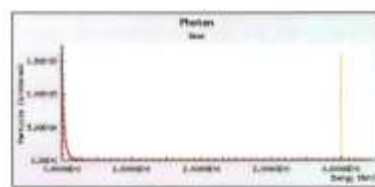


$$N(x) = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{N_i^2}{x_i^2} \exp\left(-\frac{x}{x_i}\right) + \sum_{j=1}^M \frac{N_j^2}{x_j^2} \exp\left(-\frac{x}{x_j}\right) \right] \exp\left(-4 \ln 2 \left(\frac{x - E_0}{\Delta E}\right)^2\right)$$

for  $x \geq E_0$   
for  $x < E_0$

| Experiment                          | Experiment: Vulcan-003                                           |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Target                              | He Gas jet: 1.0E+23 g/cm <sup>2</sup>                            |
| Pulse                               | 1.0E+21 W/cm <sup>2</sup> , 10 fs, 10 J, 100 nm, Polarization: p |
| Particle, Instrument                | Electron, Scintillation counter                                  |
| Cut-off (MeV)                       | 20 MeV                                                           |
| Angular distribution                | Beam [α = 0°, β = 0°, γ = 0°]                                    |
| Thermal Components                  |                                                                  |
| Temperature (T <sub>0</sub> ) [MeV] | Particle number (N <sub>i</sub> ) [Values]                       |
| 11.6                                | 1.0E+15                                                          |
| 100                                 | 1.0E+10                                                          |

Fig. 8.2.1.2 Electron spectrum measured in Vulcan in a Helium gas jet. The maximum intensity is  $I = 10^{21} \text{ W/cm}^2$ .



$$N(x) = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{N_i^2}{x_i^2} \exp\left(-\frac{x}{x_i}\right) + \sum_{j=1}^M \frac{N_j^2}{x_j^2} \exp\left(-\frac{x}{x_j}\right) \right] \exp\left(-4 \ln 2 \left(\frac{x - E_0}{\Delta E}\right)^2\right)$$

for  $x \geq E_0$   
for  $x < E_0$

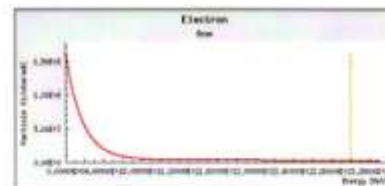
$$N(x) = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{N_i^2}{x_i^2} \exp\left(-\frac{x}{x_i}\right) + \sum_{j=1}^M \frac{N_j^2}{x_j^2} \exp\left(-\frac{x}{x_j}\right) \right] \exp\left(-4 \ln 2 \left(\frac{x - E_0}{\Delta E}\right)^2\right)$$

for  $x \geq E_0$   
for  $x < E_0$

| Experiment                          | Experiment: ELI Estimate 1PW                                     |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Target                              | Al-Foil: 4.0E+23 g/cm <sup>2</sup>                               |
| Pulse                               | 1.0E+21 W/cm <sup>2</sup> , 10 fs, 10 J, 100 nm, Polarization: p |
| Particle, Instrument                | Proton, Scintillation counter                                    |
| Cut-off (MeV)                       | 2 MeV                                                            |
| Angular distribution                | Beam [α = 0°, β = 0°, γ = 0°]                                    |
| Thermal Components                  |                                                                  |
| Temperature (T <sub>0</sub> ) [MeV] | Particle number (N <sub>i</sub> ) [Values]                       |
| 0.05                                | 1.0E+15                                                          |
| 0.10                                | 1.0E+14                                                          |
| 0.5                                 | 1.0E+10                                                          |

| Experiment                          | Experiment: ELI Estimate 1PW                                     |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Target                              | Al-Foil: 4.0E+23 g/cm <sup>2</sup>                               |
| Pulse                               | 1.0E+21 W/cm <sup>2</sup> , 10 fs, 10 J, 100 nm, Polarization: p |
| Particle, Instrument                | Proton, Scintillation counter                                    |
| Cut-off (MeV)                       | 2 MeV                                                            |
| Angular distribution                | Beam [α = 0°, β = 0°, γ = 0°]                                    |
| Thermal Components                  |                                                                  |
| Temperature (T <sub>0</sub> ) [MeV] | Particle number (N <sub>i</sub> ) [Values]                       |
| 0.05                                | 1.0E+15                                                          |
| 0.10                                | 1.0E+14                                                          |
| 0.5                                 | 1.0E+10                                                          |

Fig. 8.2.1.3 Estimations of ELI source terms for 1PW, using 15J and 15fs pulses. Photon (left) and proton (right) energy spectra with an Aluminum target foil are displayed. The maximum intensity is  $I = 10^{21} \text{ W/cm}^2$ .



$$N(x) = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{N_i^2}{x_i^2} \exp\left(-\frac{x}{x_i}\right) + \sum_{j=1}^M \frac{N_j^2}{x_j^2} \exp\left(-\frac{x}{x_j}\right) \right] \exp\left(-4 \ln 2 \left(\frac{x - E_0}{\Delta E}\right)^2\right)$$

for  $x \geq E_0$   
for  $x < E_0$

| Experiment                          | Experiment: ELI Estimate 1PW                                     |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Target                              | Al-Foil: 4.0E+23 g/cm <sup>2</sup>                               |
| Pulse                               | 1.0E+21 W/cm <sup>2</sup> , 10 fs, 10 J, 100 nm, Polarization: p |
| Particle, Instrument                | Electron, Scintillation counter                                  |
| Cut-off (MeV)                       | 20 MeV                                                           |
| Angular distribution                | Beam [α = 0°, β = 0°, γ = 0°]                                    |
| Thermal Components                  |                                                                  |
| Temperature (T <sub>0</sub> ) [MeV] | Particle number (N <sub>i</sub> ) [Values]                       |
| 11.6                                | 1.0E+15                                                          |
| 100                                 | 1.0E+10                                                          |

Fig. 8.2.1.4 Estimations of ELI source terms for 1PW, using 15J and 15fs pulses. Electron spectrum from a Helium gas jet is represented. The maximum intensity is  $I = 10^{21} \text{ W/cm}^2$ .

- A sugárvédelmi mérőeszközöknek hatóságilag hitelesítettnek kell lenni
- Széles méréstartomány, megfelelő karakterisztika, minden részecskére kellően érzékeny legyen, magas időfelbontással
- Több mérőeszköz, párhuzamos mérések
- Radioaktív anyagok: műbizonylat, fényképez izotóp leltár, Rádium program
- Leírások, utasítások tűz, kémiai, biológiai radiológiai vészhelyzetek esetére
- Kimenekítési terv jól látható helyeken

[illegible]

## Alapszint felmérés

- A berendezés működése előtt érdemes méréseket végezni, az eredmények az alap szennyezettséget fogják demonstrálni
- Talaj, víz, talajvíz, növényzet, levegő minták gyűjtése pl. mozgólaboaratóriummal
- Földrengés, talajvíz (aqviferek), árvíz vizsgálatok is szükségesek lehetnek



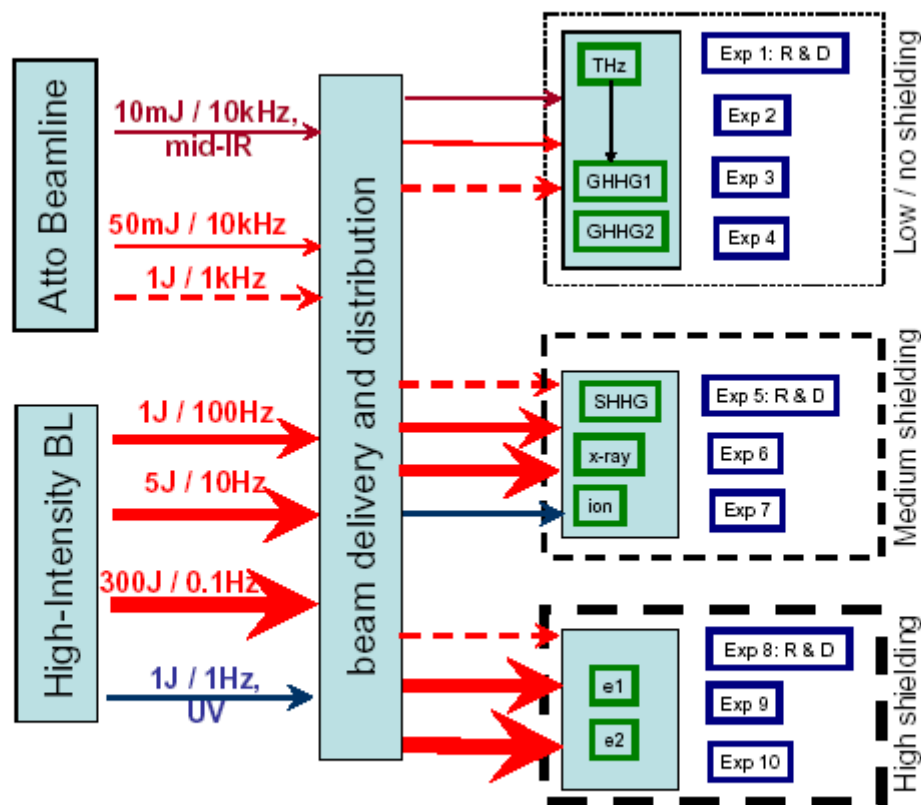


Figure 6. Layout of the target areas.  
The indicated laser parameters are compatible with the laser scheme in Figure 1..