

**HUN
REN**



Energiatudományi
Kutatóközpont

HUN-REN
Magyar Kutatási Hálózat

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

Szimulált valóság

A folyamatos lézeres besugárzások által kiváltott kis energiás eltolódás hatása a sugárvédelemre

¹Bodor Károly Balázs, ¹Zagyvai Péter

¹HUN-REN EK

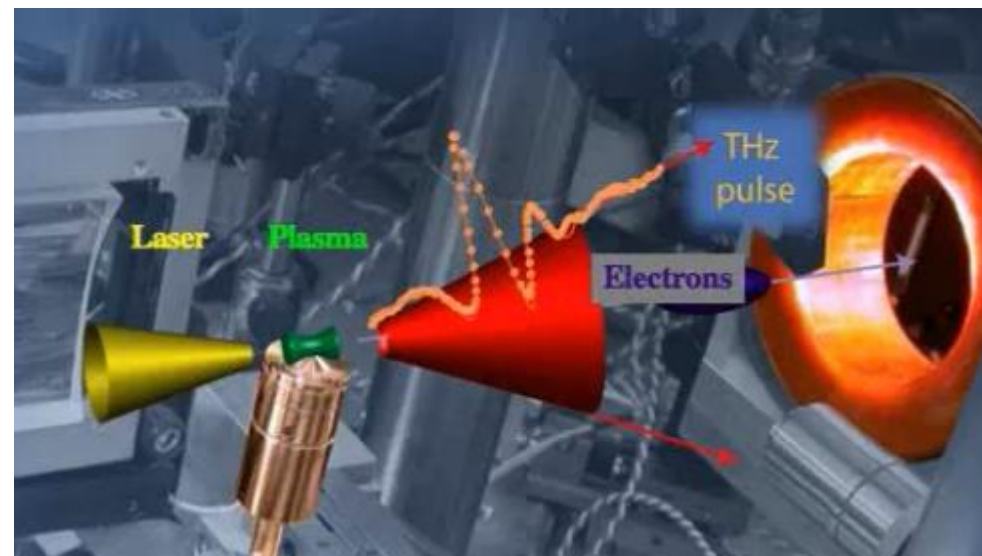
Sugárvédelmi szakértő (SVR-HA14525)

Kutatás. Innováció. Hatás.

- A lézeres részecske gyorsításhoz tartozó sugárvédelmi árnyékolás hatását Monte Carlo-típusú, pl. FLUKA, MCNPX, Geant4 stb. kódokkal lehet szimulálni.
- Csak a védelmi rendszer felépítését követően lehet tényleges mérésekkel meggyőződni, hogy a tervezett árnyékolás valóban megfelelő-e.
- A FLUKA kód korábbi tesztelések alapján konzervatív és robosztus.
- Az árnyékolás tervezésnél eleve konzervatív a hozzáállás: pl. a részecskegyorsítás kölcsönhatás hatásfokát 100%-nak vesszük, a szimulált értékeknél nagyságrendben felfelé kerekítünk. Paraméterérzékenység vizsgálattal látni lehet, mely paraméter változására a legérzékenyebb a rendszer, valamint minden energiára megvizsgáljuk, hogy az adott energiához tartozó prompt dózis limit kritériumok teljesülnek-e.
- Felmerül a kérdés: mindezek ellenére előfordulhat-e az, hogy a szimulációnál alul szimulálunk ?????!!!!

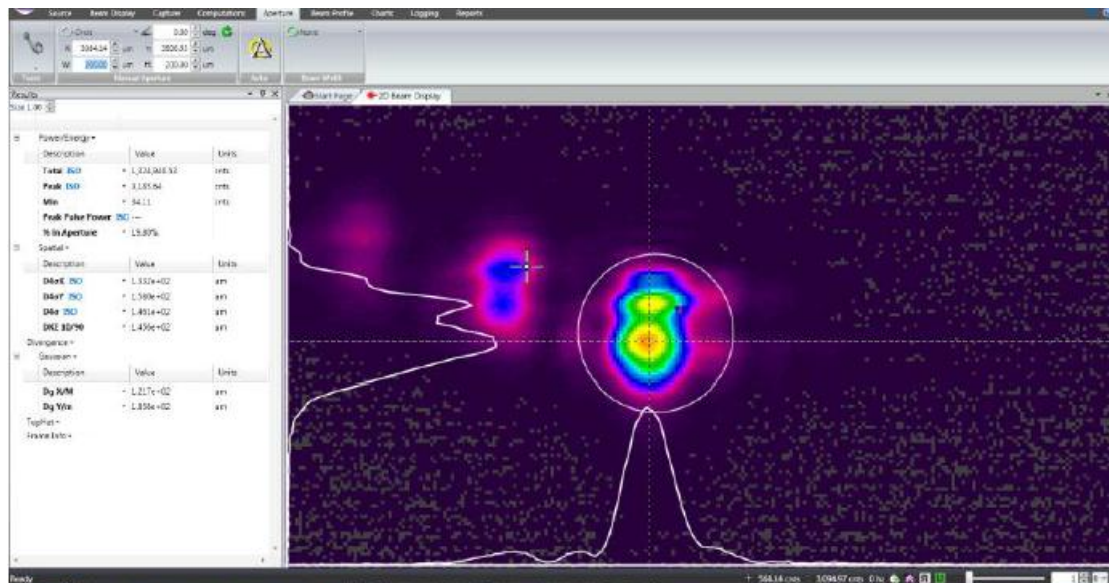
- Az optimális besugárzás esetén olyan keltett, gyorsított részecske- (elsősorban elektron-) sugárzás keletkezik, melynek jellemzői összhangban vannak a részecskegyorsítás kölcsönhatást szimuláló kód szimulált értékeivel.
- A lézer nyaláb optimális, azaz pontosan a céltárgyra fókuszálódik, valamint tulajdonságai megegyeznek az elvárt értékekkel (intenzitás, teljesítmény, impulzus hossz, stb.)
- A részecske gyorsítás során a többféle gyorsítási mechanizmus közül az fog dominálni, ami a tervekben szerepel, de ha eltolódnak a paraméterek, akkor az adott céltárgyra jellemző fő gyorsítási mechanizmus is megváltozhat.
 - Plazmahullám alapú részecskegyorsítás,
 - A ponderomotoros erő gyorsítása,
 - Lebegő hullámú gyorsítás,
 - TNSA,
 - Buborék gyorsítás
- A többszöri, hosszantartó besugárzások esetén a lézerfényt vezető optikai elemek nem degradálódnak, így a lézerfény paramétereik optimálisak maradnak.
- A besugárzások hatására a céltárgy tulajdonságai nem változnak meg, a céltárgy továbbra is egységes minőségű marad.
- A besugárzások során az ellenőrző, beállító, irányító rendszerek folyamatosan megfelelően működnek.

- A kutatás célja és a fizikai kölcsönhatások határozzák meg a keltett sugárzás jellemzőit, melyek a degradáció során változhatnak:
 - Az ionizáló sugárzás keltésének (lézerfény - anyag kölcsönhatás) hatásfoka (η),
 - Az egy lézerimpulzus által keltett, adott energiájú részecskék száma és iránya,
 - Az egyes részecske- és energiacsoporthoz rendelt “fajlagos dózis limit” (D_{fajlagos}),
- A lézerberendezés paramétereit a kísérletek során:
- Az üzemeltető állítja be ezen értékeket:
 - A lézer ismétlési frekvenciája (F), [Hz]
 - A lézerberendezés napi használati ideje (T), [s/nap],
 - A lézerberendezés éves használati ideje (G), [nap/év],
 - Az egyes nyalábvonalakra származtatott dózismegszorítás az éves foglalkozási vagy lakossági dózismegszorítás értékéből (DC).

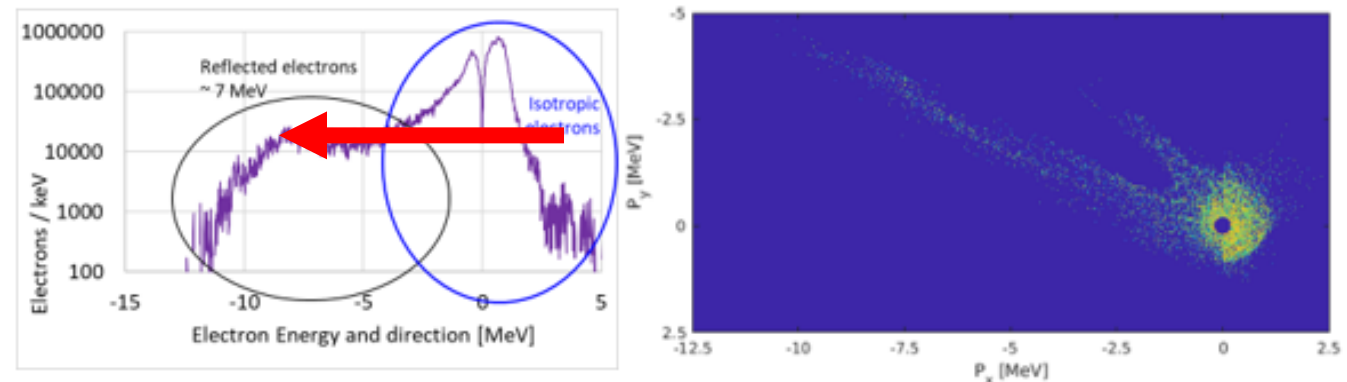


- Az ismétlődő besugárzások hatására:
 - A fókuszált lézernyalábot előállító lencsék degradálódnak, részlegesen megolvadnak, emiatt a lézernyaláb tulajdonságai megváltozhatnak
 - A folyamatos besugárzás hatására létrejön az ún. plazmatükör effektus, ezen fog szóródni a beérkező lézernyaláb
- Azaz a besugárzás sem lesz idővel „tökéletes”
- Emellett a céltárgy is degradálódni fog, ami szintén megváltoztathatja a kialakult ionizáló sugárzási teret

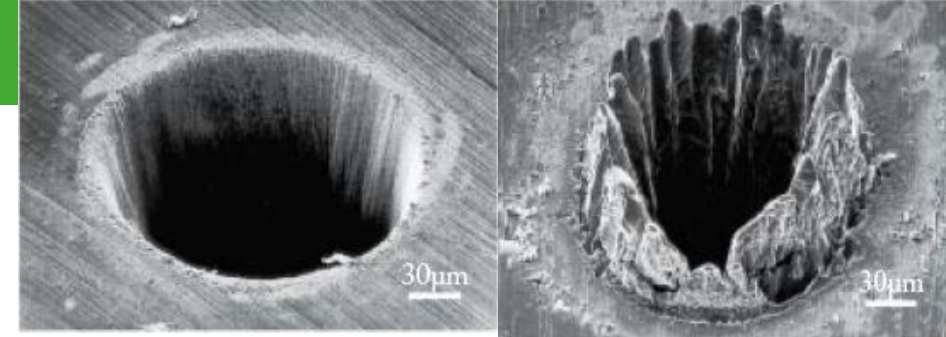
Lézernyaláb stabilitás ellenőrzése



Kis energiás eltolódás

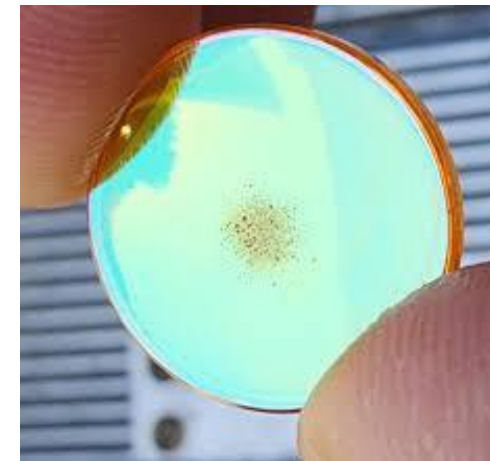
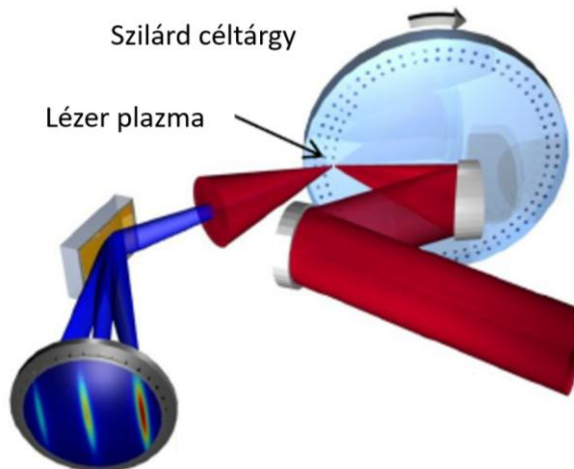
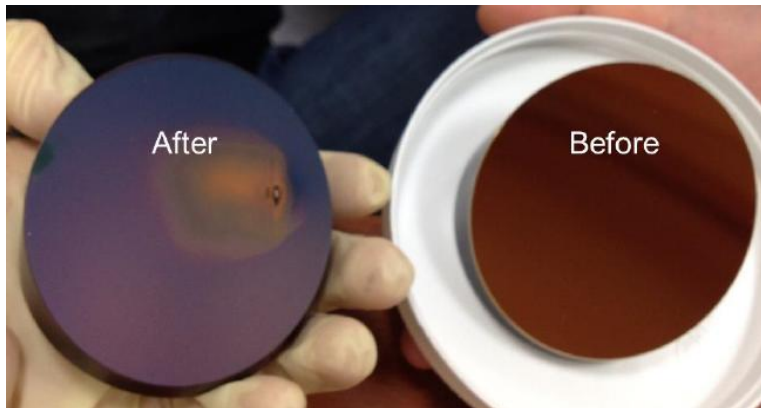


1. ábra: A keltett elektronok energiaspektruma (balra) és impulzuseloszlása (jobbra). „Negatív energia” a lézeraldalon található elektronokhoz tartozik.



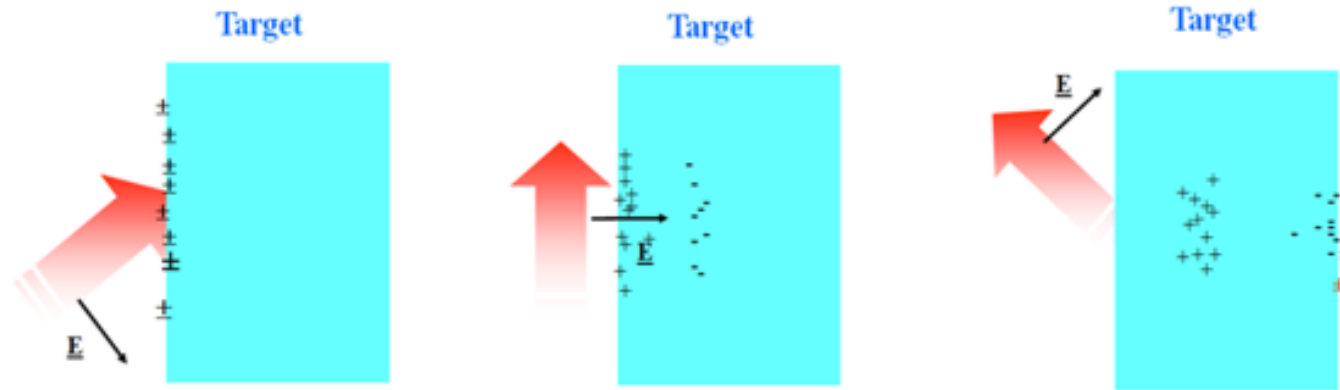
- Elektron termalizáció:
- A lézeres besugárzást követően az impulzus által gerjesztett elektronok részben kilépnek a céltárgy felületéből, részben pedig a céltárgy belseje felé is elmozdulnak, és átadják energiájukat a rácsnak. Az energiaátadás az elektronoktól az ionokig a Coulomb ütközéseken keresztül történik és ideje (\sim ps) jelentősen hosszabb, mint a lézerimpulzus (\sim fs) ideje.
- A ns-os impulzusoknál megszokott termikus egyensúly a rács és az elektronok között nem teljesül a fs-os kölcsönhatási idő alatt. A fs-os lézerimpulzus időtartama alatt a megvilágított céltárgy elektronjait az impulzus magas hőmérsékletre gerjeszti, így a bejövő lézerimpulzus elektromos tere egy olyan rendszert érzékel, amely egy forró elektronhalmazból és egy hideg rács rendszerből tevődik össze. Az elektronok hőátadása révén megkezdődik a termalizáció a két rendszer között. A lézeres megvilágítást követően tipikusan 10-100 ps között következik be az az állapot, amikor a két rendszer hőmérséklete megegyezik.
- A hőmérséklet emelkedés hatására fázisátalakulások játszódhatnak le, amely a szilárd céltárgy megolvadásához, illetve elpárolgásához vezethet. Az ablációs folyamat időtartama sokkal hosszabb, mint a termalizációhoz szükséges idő, és akár több 100 ps időtartamra is kiterjedhet.

- Első közelítésben elhanyagolható az energiaátadás a rácsba, illetve a hővezetés a rácson belül a lézertimpulzus időtartama alatt. Ebben az esetben az ablációs sebesség csak az optikai behatolási mélységtől függ. Az ablációs folyamat idejét az az időtartam határozza meg, amely ahhoz szükséges, hogy az elektronok átadják energiájukat a rácsnak.
- Az elnyelt lézerenergiát követően az elektron alrendszerben hőmérsékleti egyensúly alakul ki (termalizáció) és energiaátadás történik a rács felé, továbbá az elektronok hőátadása révén a céltárgy belsejébe energia transzport valósul meg.
- Az abláció mértéke és jellege attól függ, hogy a rendszer termodinamikai relaxációja milyen útvonalon játszódik le.

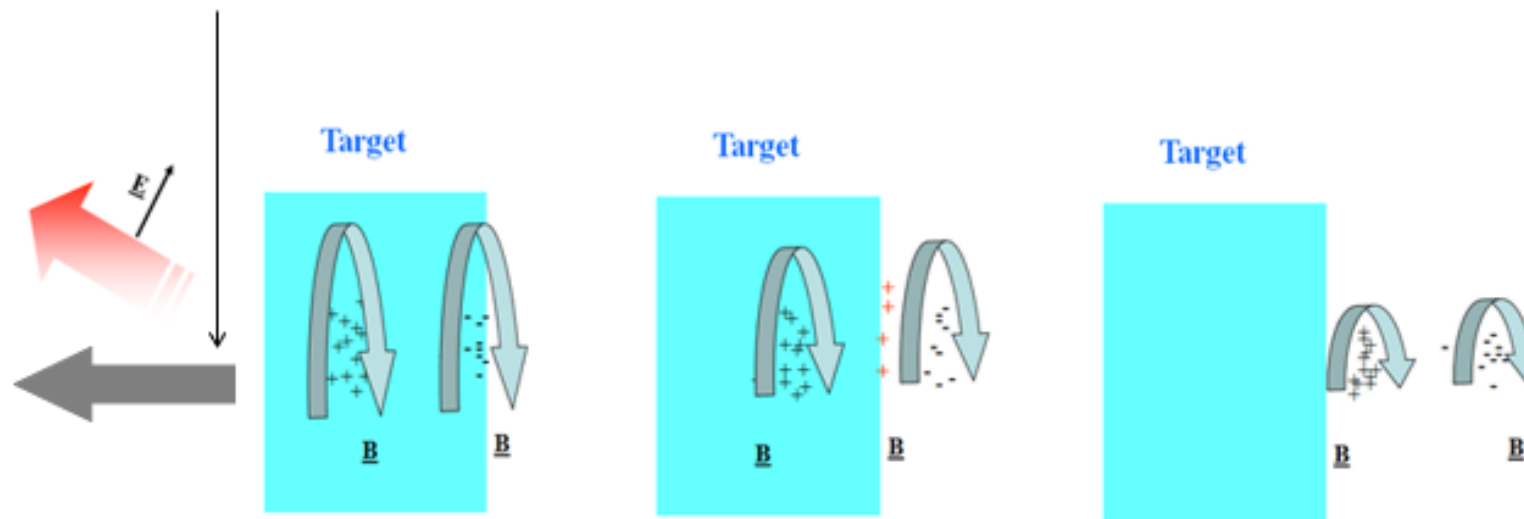


- Alapvetően négy eltérő ablációs mechanizmust lehet megkülönböztetni: a **felhasadás**, a **homogén göcképződés**, a **fragmentáció** és a **párolgás** folyamatát. Az egyes folyamatok egyidejűleg is jelen lehetnek a céltárgy ablációjakor, ugyanakkor különböző sebességgel játszódnak le.
- A felhasadás belső hibák eredménye, amely az anyag relaxációjával megjelenő húzófeszültség által generált hibahelyek végett alakul ki. A felhasadás alacsony lézer energiasűrűségek esetén jelenik meg, és annak növekedésével megszűnik az anyag lágyulása miatt.
- Nagyobb energia abszorbeálódása esetén az anyag relaxációja nem a szilárd tartományban halad tovább, hanem a hármaspont felett (az anyag megolvad, polimereknél nem). Gázbuborékok alakulnak ki.

- Az ablációs felhő keletkezése során elsőként az elektronok hagyják el a céltárgy felületét, majd pedig a pozitív töltésű ionok. A visszamaradt, felfűtött céltárgyból lassabb, gerjesztett állapotú atomok is kilépnek, illetve – a lézernyaláb energiájától függően - nagyobb fragmentumok, klaszterek, esetleg cseppek is keletkeznek.
- Az ultrarövid lézerimpulzussal megvilágított céltárgyból kilépő elektronok egy vékony réteget alkotnak a felületen, amelynek sűrűsége megközelíti a szilárd testre jellemző sűrűség értéket. Ez az elektronsűrűség drasztikusan lecsökken a felülettől távolodva, egy, a lézernyaláb hullámhosszánál sokkal rövidebb távolságon. Ha a felületre egy második lézerimpulzus érkezik rövid időközönként, akkor a sűrű plazmán átmenetileg megnövekszik a reflexiója a céltárgyon való visszaverődéshez képest. A plazma reflexiója változik a sűrűségének és relaxációjának a módosulásával. Ezt a jelenséget **plazmatükörnek** nevezi a szakirodalom.
- A reflektált nyaláb hullámhosszában kismértékű kék-eltolódás van, ugyanakkor a nyaláb spektruma kissé kiszélesedett. Mindkét jelenség a kritikus elektronsűrűség felület nagy sebességű elmozdulásával előidézett Doppler-eltolódással magyarázható.

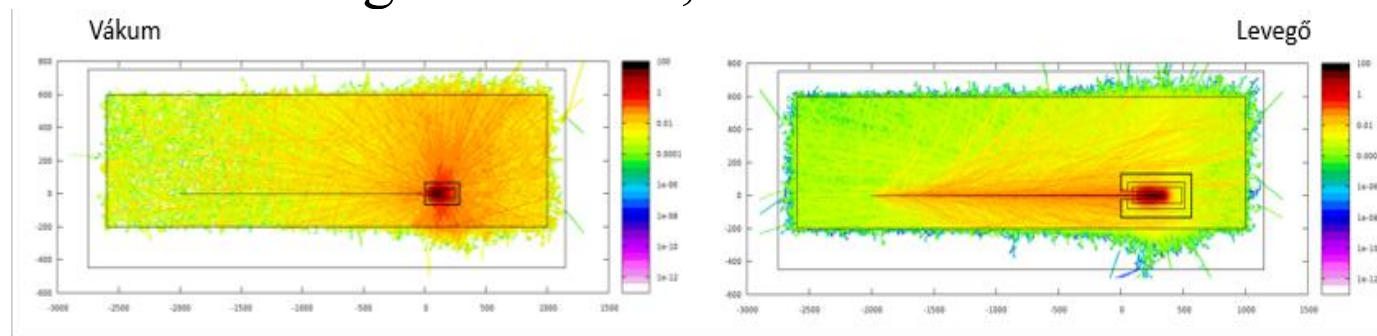


A 2. visszavert fény impulzus Doppler-eltolódása, a plazmatükör-effektus révén



A lézervény-anyag kölcsönhatás folyamata

- A besugárzási feltételek, paraméterek csak a kezdetekkor mondhatóak optimálisnak.
- A lézerfény paramétereit is változnak, mivel a lencsék degradálódnak, valamint kialakul a plazmatükör effektus.
- Nem megfelelően van beállítva az anyagi minőség pl. vákuum-levegő (szivárgás)
- Emiatt a gyorsítási mechanizmusok aránya is megváltozhat.
- A fenti okok végett a kezdeti szekunder nyalábok spektruma is megváltozik, eltolódik a kis energiák irányába.
- Emiatt a FLUKA kód kezdetben használt input paramétereit (keltett szekunder sugárzás paramétereit) megváltoznak a kísérletek során.
- A céltárgy több folyamat révén degradálódik.
- Azaz a szimulált értékek eltérhetnek a valóságtól.



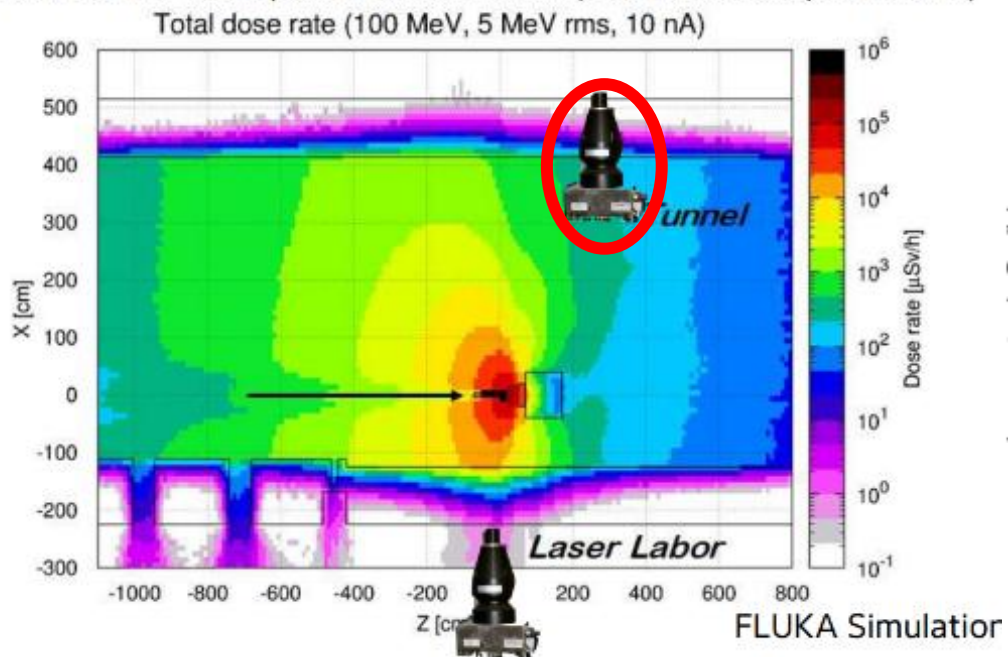
- A kis energiás komponensek kilépési irányának szóródása eleve nagyobb, így nem minden csapódik bele az árnyékolásba.
- A kis energiás komponensek dózis járuléka önmagában nem nagy, de ha sok keletkezik belőle, akkor ez megnövelheti a valós dózis tér értékét a szimulálthoz képest.
- A valós vs. Szimulált értékek közötti különbség csökkenthető:
 - A szimulációknál a kis energiás küszöböt (ami alatt a FLUKA nem veszi figyelembe az adott részecskét) le kell csökkenteni, bár ez növeli a futtatási időt.
 - Érdeemes kiterjedt árnyékolást használni, hogy a plafon irányába menjen a szórt sugárzás nagy része.
 - Tapasztalatok alapján meg kéne tudni határozni a spektrum változásának várható értékeit a későbbi pontosabb szimulációk elvégzéséhez.
 - Folyamatosan össze kell vetni a mért és a szimulált értékeket.
 - Ahol levegő van azt a térrészt levegővel is kell szimulálni, mivel az is szórja a nyalábot.
 - Minden energia tartományra meg kell nézni, hogy az adott árnyékolással tartható-e a prompt dózis limit, főként kis energiák esetén, illetve rezervet betervezni.

- Más intézményeknél (KALDERA) összehasonlítás, mért 1250 $\mu\text{Sv/h}$ vs. szimulált 60 $\mu\text{Sv/h}$.
- Ez az eltérés nem feltétlen jelentős, hiszen ha a tervezésnél eleve nagyságrendi felfelé kerekítéssel élünk és 100%-nak vesszük a hatásfokot akkor ez a növekedés még benne van a rezerv tartományban.
- A bunkerben belül nagy az eltérés, kívül elhanyagolható.

KALDERA commissioning

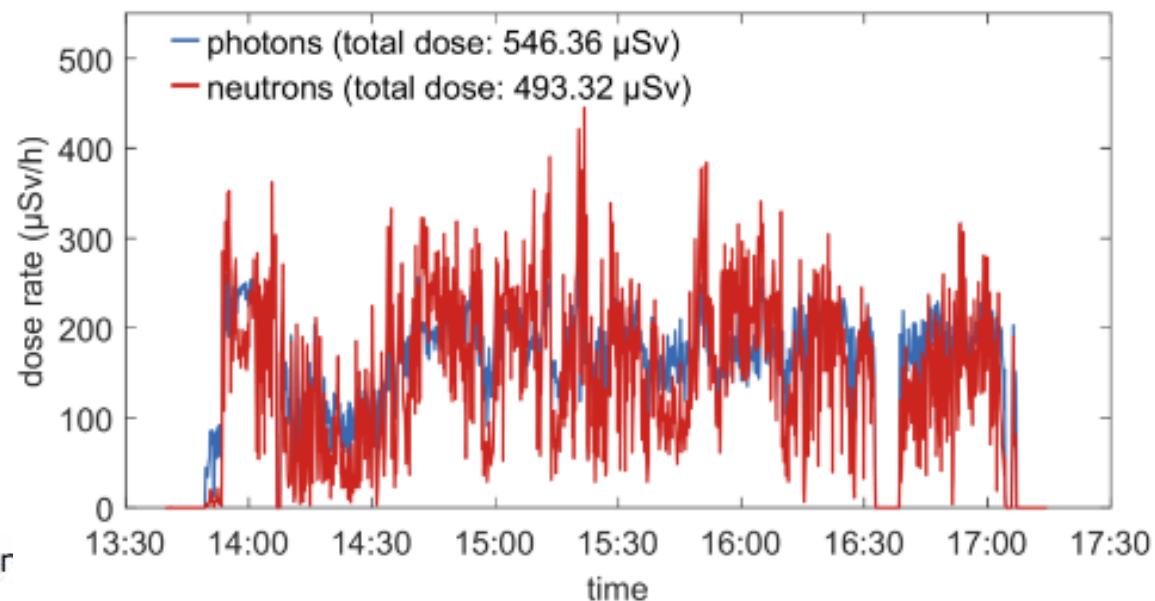
FLUKA simulations to estimate dose in operation and active monitoring system

Simulation for 1W beampower at KALDERA (100 MeV, 100 pC, 100 Hz)

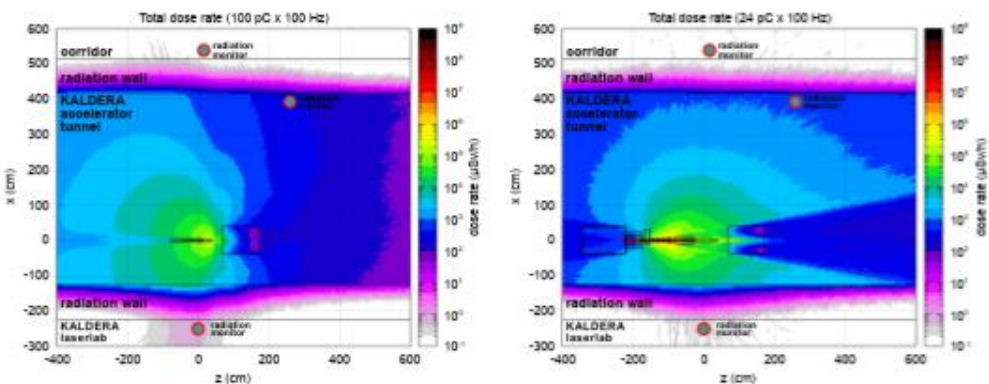
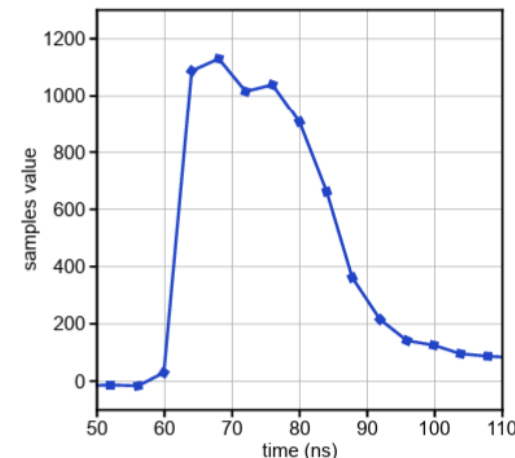


Assumed beampower in simulations: 1W
Beam power during operation roughly 0.3 W

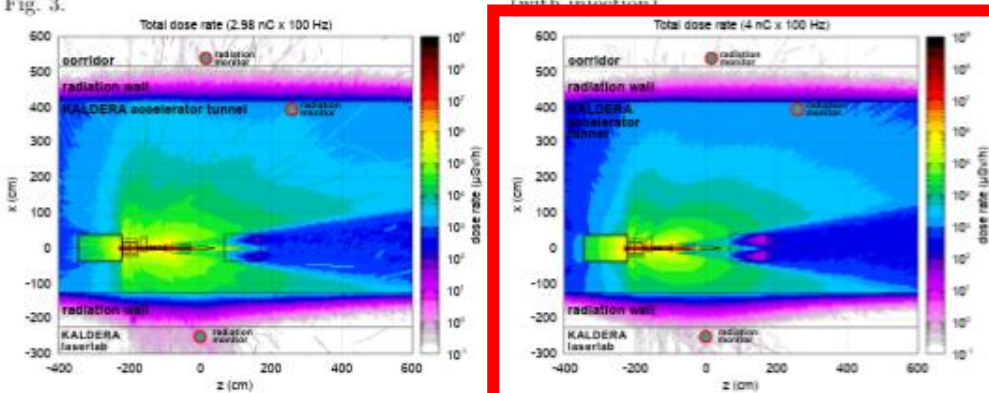
KL 4: (FLUKA: 300-400 $\mu\text{Sv/h}$)



- A mérések alapján 2 csúcs van, pedig csak 1 forrás lett beállítva, a 2. forrás az a besugárzás hatására keletkezik.
- Ezt figyelembe lehet venni a lézer-anyag kölcsönhatás szimuláció kiterjesztésével és ez alapján extra forrás tagot lehet beadni a FLUKA-ba, így elérhető olyan szimuláció ami már a valósághoz nagyon közel lesz.



(a) Case 1: Initial idealized source term. Same as Fig. 3. (b) Case 2: Central (± 25 mrad) PIC distribution (with injection).



(c) Case 3: Full PIC distribution (with injection). (d) Case 4: Full PIC distribution (without injection).

Case	Configuration	Beam Power	Charge	EM Dose
Case 1	Idealized	1.0 W	100 pC	$60 \mu\text{Sv h}^{-1}$
Case 2	PIC (± 25 mrad)	0.26 W	24 pC	$690 \mu\text{Sv h}^{-1}$
Case 3	PIC (full, inj.)	0.63 W	3 nC	$1680 \mu\text{Sv h}^{-1}$
Case 4	PIC (full, no inj.)	0.60 W	4 nC	$1210 \mu\text{Sv h}^{-1}$
—	Experiment	0.18 W^\dagger	15 pC^\dagger	$1250 \mu\text{Sv h}^{-1}$

A kiterjesztett szimulációk alapján a teljes sugárzási teret nagyrészt a teljes elektronemisszió határozza meg, nem pedig egy különálló nagy energiájú nyaláb jelenléte.

- A bunkerén kívül az eltérés minimális, belül jelentősebb.
- Nyitott kísérlet esetén az operációs paraméterek alacsonyak, ezért az eltérés nem jelentős.
- Zárt kísérlet esetén az eltérés jelentősebb, mivel itt már magasabbak az operációs paraméterek.
- Mivel a bunkerén kívül nincs jelentős eltérés, azt lehetne gondolni akkor ennek valóban nincs jelentősége.
- A kísérleteket bonyolult érzékeny elektronika és érzékelők, valamint mágnesek vezérlik.
- A nagyobb dózisterhelés előbb teszi tönkre, illetve előbb lép fel valamilyen funkcionálitási, vezérelhetőségi hiba ezen eszközöknél, mint az várható lenne a szimulációs eredményekből.
- A mágneseket gyakran anyalábok eltérítésére használják, ha ezek demagnetizálódnak, illetve mágneses erejük megváltozik, akkor az eltérített nyaláb nem feltétlen mindig abba az irányba megy ahogy tervezve lett, ami más tárgyak nem tervezett besugárzásával jár, ami tovább növelheti a dózisteret.
- Azaz szélsőséges esetben a szóródó nem elhanyagolható sugárzás a várhatónál nagyobb hatással lehet a kísérletek elektronikai komponenseire és a kísérlet kontrollálhatóságára is.
- Ezen tényezőket is figyelembe kell venni a kísérletek tervezésénél.

- A Prágai ELI BEAMLINES-nál nagyobb eltérést, akár nagyságrendi eltérést is tapasztaltak.
- Itt azért nem csak a kis energiás eltolódás miatt volt nagyobb az eltérés...
- A nyaláb a vártnál jobban kiszélesedett és a nyaláb egy része elkerülte az árnyékolást és kiszóródott.
- **Folyamatos on-line, real time monitoring és shut down automatika szükséges!!!**

The slide features the ELI logo at the top left. Below it is a photograph of a laboratory setting with a large, multi-layered shield structure. To the right of the photo is a radiation dose rate simulation. The simulation shows a central beam of radiation (red and yellow) spreading out as it passes through a shield (blue and green). A color scale on the right indicates dose rates in $\mu\text{Sv} / \text{hour}$, ranging from 0.001 to 10^6 . The simulation shows high dose rates (red) near the source and lower rates (blue) further away.

RP case study

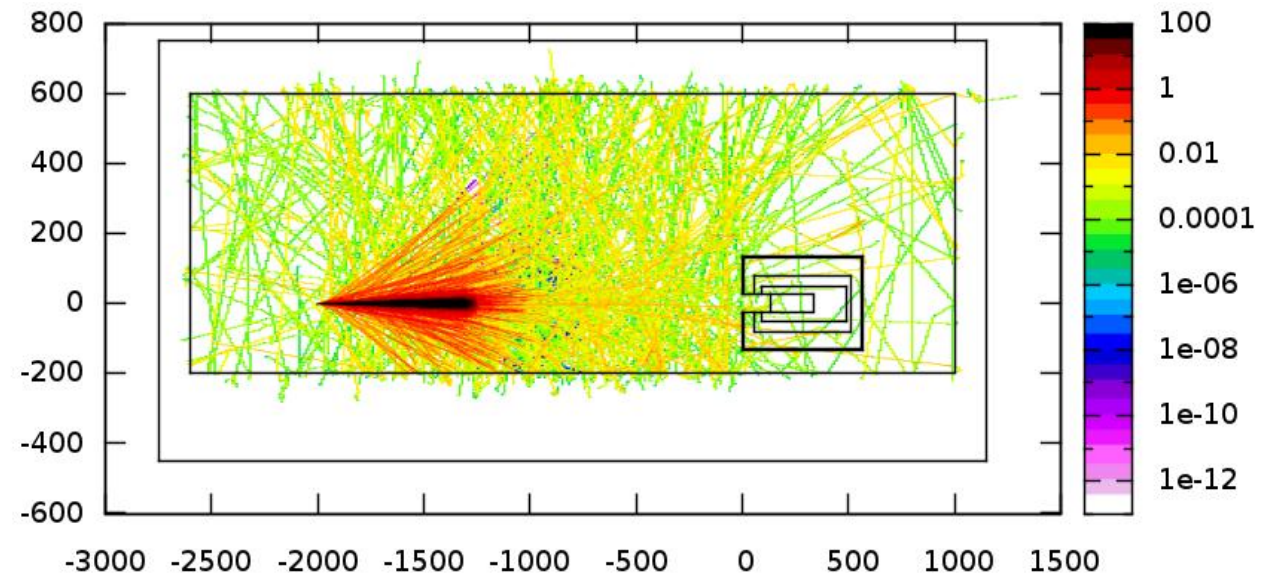
Irradiation at ALFA

- Designed downstream lead/granite shield.
- Assuming electrons 0.01 to 0.1 pC per shot, broadband 0-50 MeV, divergence < 10 mrad.
- Aiming $< 1 \mu\text{Sv}/\text{hour}$ in corridor and CR.
- **During shooting**, measured peaks dose rates:
 - Control room: up to $5 \mu\text{Sv}/\text{hour}$
 - West corridor: up to $\sim 100 \mu\text{Sv}/\text{hour}$
- Action taken: closed corridor to personnel.
- **Conclusions:**
 - MC simulation only as good as input.
 - Many unknown parameters.
 - Shot-by-shot variations.
 - Must be vigilant for changes in exp. conditions.

Benoit LEFEBVRE | RAD2024 Conference | 17-21 June 2024

D. Horváth

- A céltárgy degradációja miatt a céltárgy felülete megváltozik, emiatt a szekunder sugárzás kollimáltsága romlik, a nyaláb kiszélesedik és elkerülheti az árnyékolást, ha az nem kellően kiterjedt.
- Nyaláb eltérítés esetén amennyiben az elektromágnesek nem megfelelően működnek, a nyaláb eltérülés meg fog változni, ami szintén okozhat nem megfelelő árnyékoltságot.

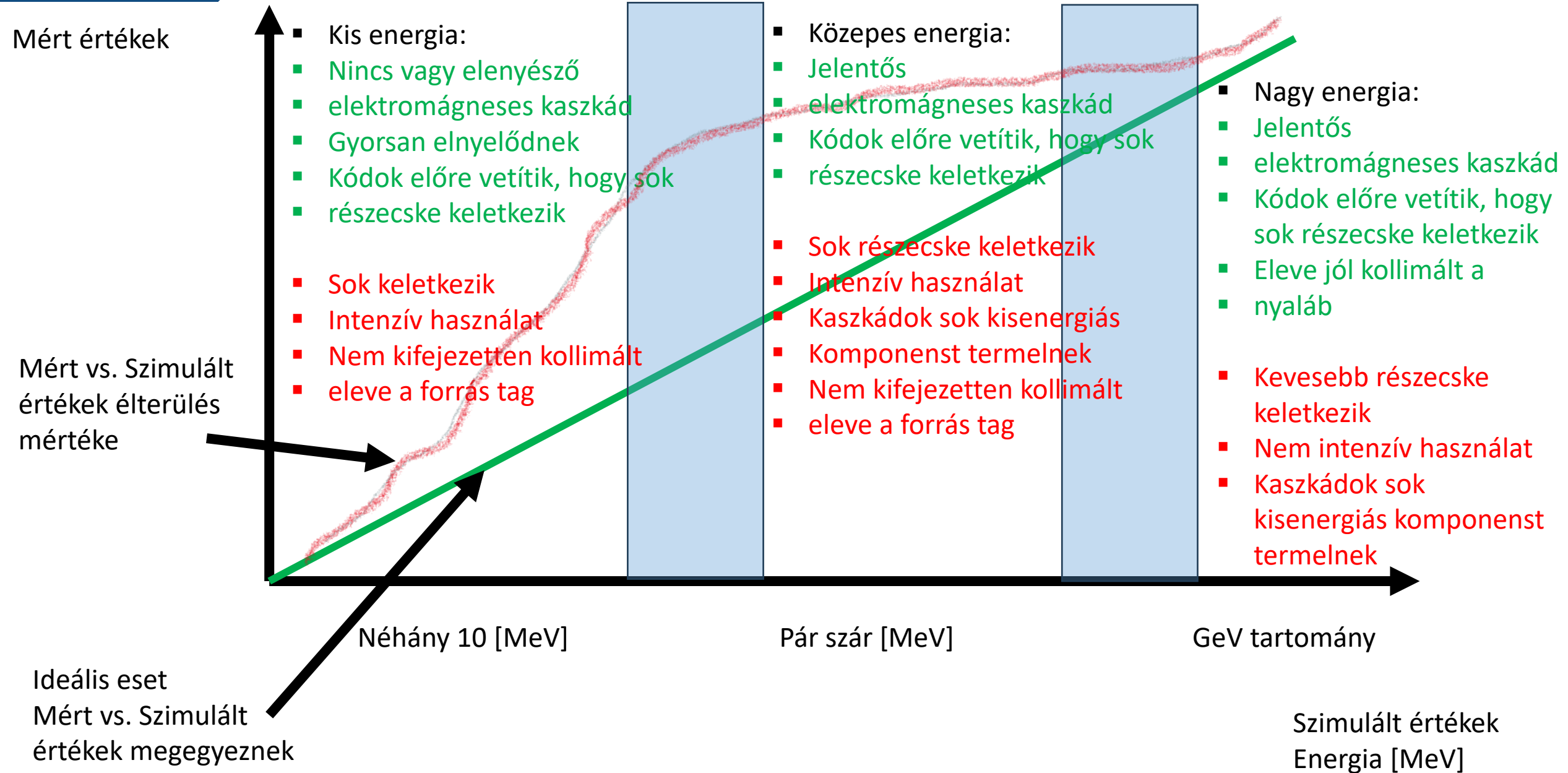


Nyaláb kiszélesedése

- A számításokat (szimulációkat) a FLUKA MC kóddal végezzük.
- A dózist „fajlagos dózis”-ként, a bemenetként megadott elrendezésben 1 db, adott energiájú másodlagos részecskére vonatkoztatva számítjuk.
- A szimulációval kapott ábrák értelmezéséhez szükség van a „fajlagos dózis limit” értékek származtatására, az alábbi egyenlet segítségével:

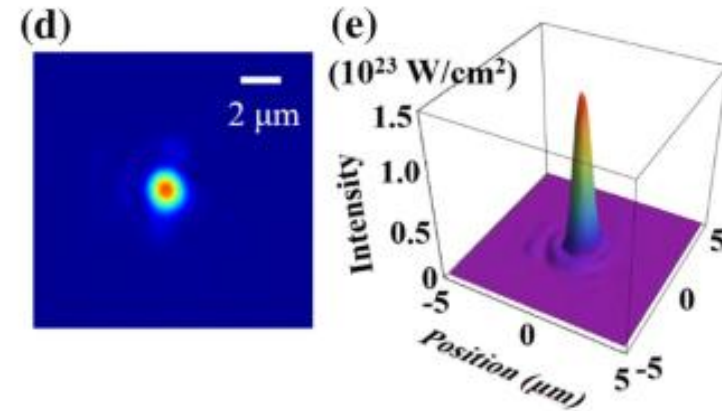
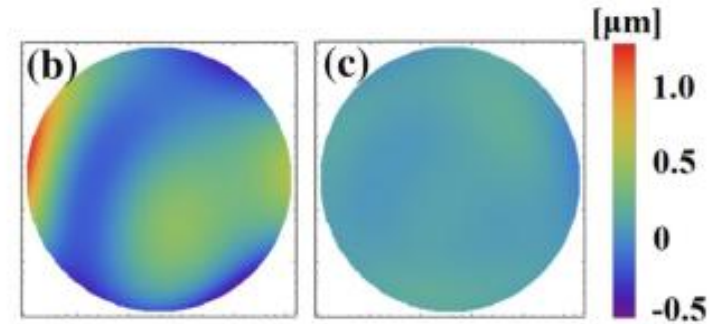
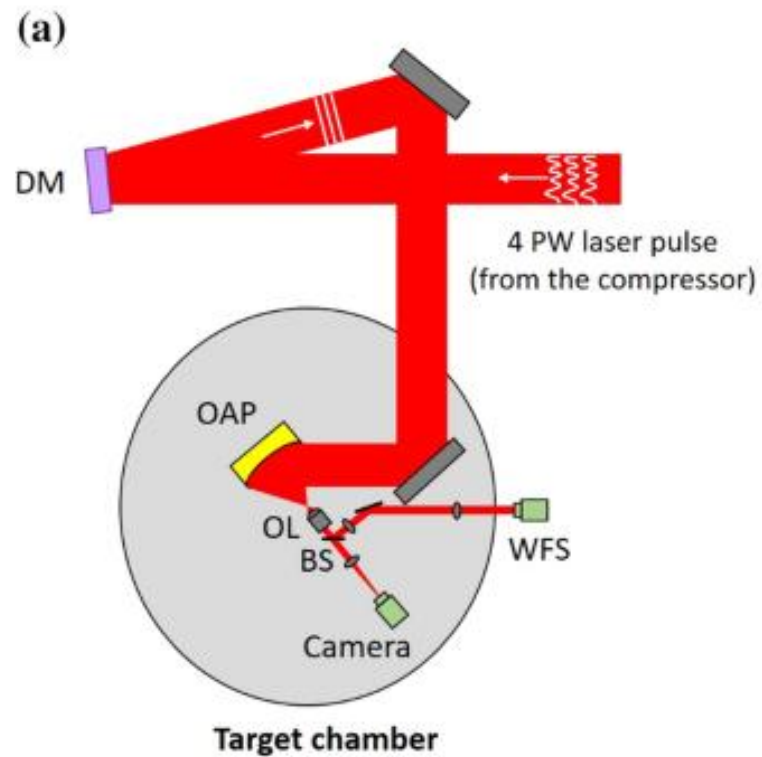
$$\Sigma_r \left(D_{fajlagos\ limit} \cdot N \cdot \eta \right)_{prompt\ dózis} \cdot F \cdot T \cdot G \cdot \Psi < DC$$

- $D_{fajlagos\ limit}$: Az egyes részecske- és energiacsoporthoz rendelt “fajlagos dózis limit”,
(foglalkozási vagy lakossági származtatott dózismegszorítás) [mSv/keltett részecske],
- N : Az egy lézerimpulzus által keltett, adott energiájú szekunder részecskék száma [db részecske /lövés],
- F : A lézer ismétlési frekvenciája [Hz; lövés/s],
- T : A napi üzemelési idő [s/nap],
- G : Éves üzemidő [nap/év],
- η : Az ionizáló sugárzás keltésének hatásfoka [%], értéke megadja, hogy 1 db lézerlövés hatására az elméleti számítással kapott várt (maximális) számhoz képest annak hányad része keletkezik.
- DC : Az éves foglalkozási vagy lakossági dózismegszorítás értékének [mSv/év] az adott munkahelyre eső része,
- r : a dózisteret alkotó részecske- és energiacsoporthok.
- Ψ : **Szimulált vs. valós, mért érték becsült aránya**



- A lézerfény-anyag kölcsönhatás feltételei időben megváltoznak.
- A lencsék, céltárgy degradálódnak.
- A kezdeti input szimulációs értékek szintén változnak a besugárzás előre haladtával.
- Ezt szimulációval figyelembe venni (OSIRIS).
- Folyamatosan össze kell vetni a szimulált - mért eredményeket.
- **Az eltérést csökkenteni kell: kisenergiás küszöb csökkentése, kiterjedt árnyékolás, minden energia tartományra, főként kis energiára megfeleljen a prompt dózis limit, kis energiáknál mérnöki rezervet berakni, eleve nagyságrendben felfelé kerekíteni, a keltési hatásfok maradjon 100%.**
- A folyamatos on-line, real time monitoring rendszer összekötése az interlock rendszerrel, ha a dózistér szignifikánsan és tartósan megnövekszik akkor a rendszer automatikusan leállítja a besugárzást.
- A szimulációknál nem elsősorban a teljes kiépítés a cél (minden apró részlet is benne legyen), hanem az hogy a valóban fontos részek benne legyenek.
- A paraméterérzékenységi vizsgálatokkal látható lesz, mely részletekre kell különösen odafigyelni (pl. nyaláb kiszélesedés hatása).
- **Az eredmények azt mutatják, hogy a kizárólag jól kollimált, nagy energiájú nyalábon alapuló egyszerűsített feltételezések nem elegendőek a plazmagyorsítók valóságos sugárbiztonsági értékeléséhez. Ezért a teljes elektronemisszió részletes jellemzése, beleértve a nagy szögben kibocsátott alacsony energiájú elektronokat is, elengedhetetlen a sugárzási környezet megbízható és kísérletileg konzisztens leírásához.**

- A plazmagyorsítók sugárbiztonsága számos alapvető jellemzővel rendelkezik, amelyek megegyeznek a hagyományos lineáris gyorsítókéval, de bonyolítják a jellegzetes elektronnyaláb-paraméterek és az elosztott nyalábvesztések, különösen a plazmából nagy szögben kibocsátott elektronok esetében.
- A fékezési sugárzás és a másodlagos neutrontermelés továbbra is a domináns sugárforrások, ahol a dózismaximumok a plazmagyorsító-kísérletek működési tartományán belüli elektronenergiákon jelentkeznek.
- Ennek eredményeként jelentős sugárzási terek már viszonylag alacsony elektronenergiákon is kialakulhatnak, különösen nagy ismétlési sebességű működés esetén.
- A KALDERA-nál a célzott sugárzásmérések, a részecske-a-cellában és a Monte Carlo-szimulációk kombinációja átfogó képet ad a lézer-plazma gyorsítás során keletkező sugárzási terekről.
- Ez az integrált megközelítés lehetővé teszi a plazmacélpontból a névleges nyalábtengelyhez képest nagy szögben kibocsátott elektronok sugárzási hozzájárulásainak azonosítását.
- A részecske-a-cellában szimulációk jelentős számú, nagy szögben elosztott, alacsony energiájú elektronpopulációt mutatnak, míg a Monte Carlo-szimulációk azt mutatják, hogy a közeli szerkezetekkel való kölcsönhatásaik jelentősen hozzájárulnak a mért sugárzási szintekhez.
- Ezek az eredmények együttesen konzisztens értelmezést adnak mind a megfigyelt dózisteljesítmények nagyságrendjére, mind időbeli szerkezetére, és azt mutatják, hogy a cellán belüli részecske alapú forráskifejezések, a Monte Carlo sugárzástranszporttal párosulva, hatékony keretet alkotnak a plazmagyorsítók sugárzási vizsgálatához.



Köszönjük a figyelmet!