

Rezumat Faza II 2015

În cadrul fazei a doua a proiectului: **Experimente asupra producerii jeturilor de ablație laser pentru HHG și simulări ale transportului radiației în zonele E1/E6 și E4/E5**, a fost efectuată pentru început o analiză experimentală a generării armonicii de ordin trei (THG – Third Order Harmonic Generation) în neon cu pulsuri laser de mare intensitate. De asemenea, au fost efectuate experimente pe imagistica plasmelor de ablație pentru a stabili condițiile optime pentru generarea armoniilor de ordin superior în plasmă produse pe ținte solide.

Pulsurile armonice de ordinul trei sunt produse prin focalizarea pulsurilor laser pe diferite materiale: gaze, lichide, solide, plasmă generate cu laser, nanoparticule ablate etc. În medii (de ex. gaz) izotrope (centro-simetrice) din motive de simetrie doar armonicile impare sunt produse, cu eficiență de până la 50%. Cu toate acestea, ionizarea conduce la defocalizarea auto-indusă a fascicului laser fundamental, având un efect negativ asupra procesului HHG.

Astfel, am efectuat o analiză experimentală a generării armoniilor de ordinul trei în neon, determinând mai mulți parametri ai laserului și gazului pentru o eficiență de conversie mare, ca de exemplu: lungimea de focalizare, puterea laserului, presiunea gazului.

Dispozitivul experimental constă din trei părți principale: laserul cu Nd^{3+} :YAG care funcționează în regim Q-switched la lungimea de undă $\lambda_p = 1060 \text{ nm}$, celula cu gaz care conține neon în care este generată armonica a treia și sistemul de detecție (Fig. 1). De asemenea, am utilizat două filtre pentru a selecta radiația de pompaj (filter 1, RG 8) și pentru a detecta radiația armonicii de ordinul trei cu lungimea de undă $\lambda_3 = 353.3 \text{ nm}$ (filter 2, BG 18). Pentru a focaliza fascicului într-un tub cilindric de oțel (în vid) cu lungimea de 50 cm, diametru de 3 cm și ferestre de cuarț la capetele cărora este conectat la pompa de vid și vasul ce conține gazul de neon, am utilizat o lentilă cu distanța focală de 10 cm. Presiunea în sistemul de vid a fost de 10^{-3} torr, în timp ce presiunea gazului a fost de circa 4.5 torr pentru a obține o eficiență de conversie maximă a THG. Gazul (neon) a fost eliberat în incintă cu ajutorul unei duze cu diametrul de 5 mm și lungimea reglabilă.

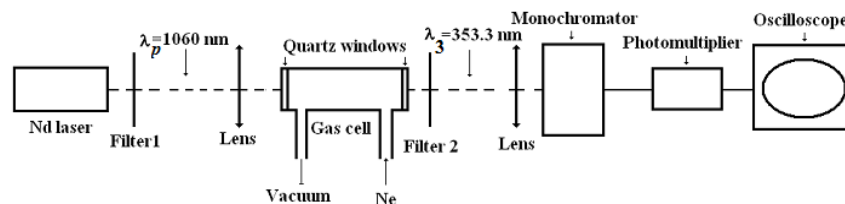


Fig. 1. Dispozitivul experimental pentru generarea armoniilor de ordinul trei (THG).

Pentru a detecta emisia armonicii de ordinul trei (Fig. 2) am utilizat un monocromator având intrarea în fantă de 0.03 mm, un fotomultipliator și un osciloscop (Tectronix 7613).

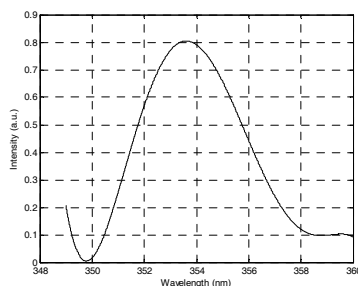


Fig. 2. Spectrul armonicii de ordinul trei.

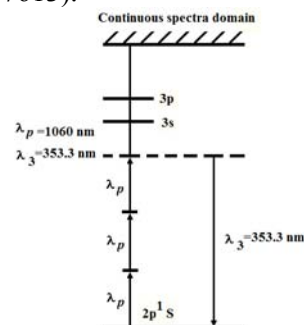


Fig. 3. Schema THG.

Atomii de neon aflați în stare excitată pe nivelul fundamental $2p^1s$, prin absorbția a trei fotoni cu lungimea de undă $\lambda_p = 1060 \text{ nm}$ trec pe un nivel energetic virtual, proces în urma căruia este emisă armonica de ordinul trei cu lungimea de undă $\lambda_3 = 353.3 \text{ nm}$ (Fig. 3).

În cazul unei puteri de pompaj (de intrare) de 150 kW a laserului cu Nd^{3+} :YAG am obținut o eficiență de conversie de circa 10^{-6} a radiației fundamentale în radiația armonică de ordinul trei care este în concordanță cu alte rezultate experimentale publicate în literatura de specialitate.

În experimentele tipice de generare de armonice (HG) în jeturi de gaze cu fascicule laser focalizate, radiația bogată în armonice este produsă în apropierea focarului. Condiția de acord de fază între fasciculul fundamental de pompaj și armonica de un anumit ordin n este îndeplinită dacă suma a n vectori de undă fundamentali egalează vectorul de undă al armonice de ordinul n . În plus, în cazul fasciculelor laser Gaussiene, trebuie luat în considerare un vector de undă suplimentar care rezultă din termenul de fază Gouy. Ionizarea gazului conduce la dificultăți suplimentare în realizarea acordului de fază datorită dispersiei diferite a radiațiilor cu diverse lungimi de undă în mediul ionizat. Datele experimentale și teoretice asupra HG în jeturi de gaze cu pulsuri laser de nanosecunde și picosecunde au evidențiat faptul că condiția de acord de fază este îndeplinită dacă densitatea gazului este de ordinul 10^{18} - 10^{19} cm^{-3} iar gradul de ionizare este mai mic de 5%. Astfel, caracteristicile locale ale jetului de gaz (compoziție, presiune, temperatură, grad de ionizare) precum și poziția focarului în jet sunt foarte importante pentru a realiza generarea eficientă a armonicelor joase sau înalte.

Pentru aceasta fază a proiectului am analizat experimental dinamica unui jet de ablație laser, considerat mediu optic neliniar pentru conversia de frecvență, produs prin focalizarea unui puls laser de nanosecunde pe ținte metalice de Al. Dispozitivul experimental conține un laser YAG-Nd funcționând în regim Q-switched ce generează pulsuri laser cu durata de 4.5 ns la lungimea de undă de 1064 nm. Pulsurile laser sunt focalizate pe suprafața unei ținte de Al astfel încât diametrul spotului focal este de ordinul 100 micrometri, iar intensitatea în focar este de ordinul 100 GW/cm^2 . O cameră digitală „Thorlabs” de tip CCD prevăzută cu un obiectiv pentru câmp apropiat și un filtru interferențial în IR (970 nm) a fost folosită în modul declanșat pentru a înregistra imaginea plasmă de ablație prin intermediul radiației emise.

Fig. 4 prezintă imagini ale plasmă de ablație corespunzătoare primelor trei pulsuri consecutive incidente pe aceeași suprafață a țintei, în două regimuri diferite: ținta este cu 1 mm în spatele focarului (imaginile a-c) și ținta este în focar (imaginile d-f). Fig. 4 (a) și (d) demonstrează faptul că lungimea norului de plasmă în direcție axială este de aproximativ 3 mm, în timp ce dimensiunea transversală a plasmă în apropierea țintei este de aproximativ 2 mm. Fig. 4 (b) și (c) arată faptul că o parte a energiei laser este consumată în producerea breakdown-ului (străpungerii) aerului atunci când focarul este în fața țintei. În plus, în acest caz plasma de ablație are o formă neregulată, spre deosebire de cazul în care focarul se găsește pe suprafața țintei (Fig. 4 (e) și (f)).

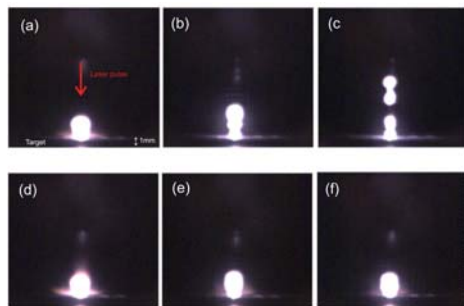


Fig. 4 Imagini ale plasmă de ablație corespunzătoare primelor trei pulsuri consecutive atunci când focarul este în fața țintei (a-c) și în focar (d-f).

De asemenea, s-a realizat o modelare realistă a geometriei zonelor experimentale E1/E6, E4/E5, introducând dimensiunile specificate în fișierele AutoCAD ale proiectului ELI-NP disponibil. Astfel, s-au obținut în FLUKA fișiere *.inp* ale geometriei. Aceste fișiere au fost folosite ca puncte de start pentru realizarea unei descrieri *.gdml* a geometriei în GEANT4. În Fig. 5 sunt prezentate o parte dintre rezultatele acestor modelări.

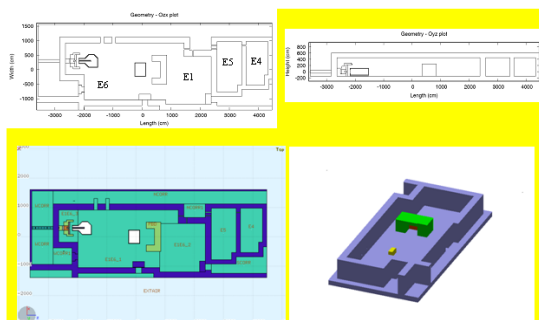


Fig. 5. Ariile experimentale E1/E6, E4/E5 modelate în FLUKA și GEANT4. Sus: Proiecțiile orizontală (la înălțimea fasciculului, $y = 0$) și verticală (într-un plan care conține direcția fasciculului) realizate cu FLUKA. Jos (dreapta): reprezentare 3D a geometriei cu GEANT4.

Geometria GEANT4 a fost obținută din geometria FLUKA printr-o procedură complexă. Aceasta presupune parcurgerea următoarelor etape: exportul fișierului *.inp* în OpenSCAD, transformarea într-un fișier tip *.stl* (folosind FreeCAD) și conversia într-un fișier *.gdml*, folosind programul InStep. Fișierul *.gdml*

conține volumele ca solide texturate (tessellated) alcătuite din suprafețe triunghiulare. Pentru obținerea unor solide separate, procedura se realizează independent pentru fiecare solid, introducerea acestora într-un singur fișier *.gdml* realizându-se manual, din asamblarea componentelor *.gdml* obținute inițial prin procedura de mai sus. De asemenea, materialele pentru fiecare solid sunt adăugate manual în fișierul *.gdml* final. În simularea GEANT4 această parte a geometriei (folosind fișierul *.gdml*) apare ca o "in-memory geometry", la care se pot adăuga alte elemente (de exemplu, CI). Obținerea fișierului tip *.stl* se poate realiza folosind programul SimpleGeo. În FLUKA au fost simulate două versiuni ale camerei de interacție heptagonală. Una dintre acestea, destinată experimentelor cu electroni relativști este prevăzută cu o extensie de 2 m necesară pentru spectrometrul de electroni ce folosește un magnet permanent cu lungimea de 4 m. Cealaltă versiune, fără extensie, este destinată experimentelor de accelerare de protoni. Pentru fiecare versiune s-a calculat debitul echivalentului de doză ambientală corespunzătoare termenilor sursă selectați.

În fig. 6 este reprezentat debitul echivalentului de doză ambientală pentru termenul sursă de electroni cu distribuție gaussiană de energie, centrată pe energia de 38 GeV. S-a considerat un număr de particule per puls de $8,61 \times 10^{10} e^-$ /puls, la o frecvență a pulsurilor de $1,7 \times 10^{-2}$ puls/sec. La stânga este proiecția orizontală, iar la dreapta - proiecția verticală.

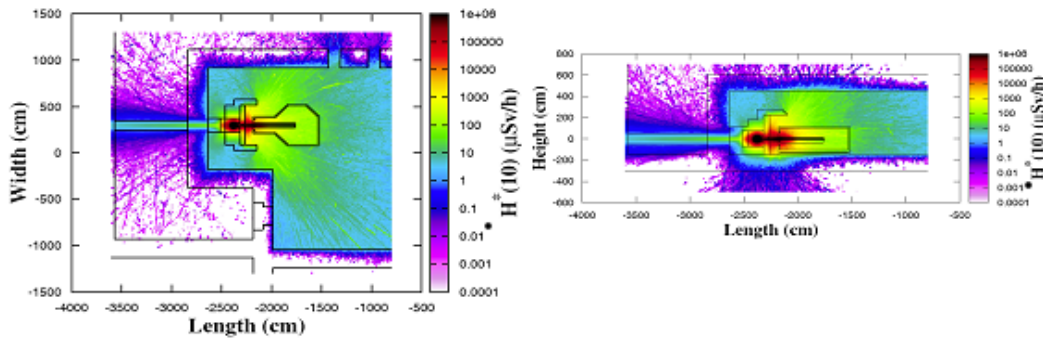


Fig. 6. Debitul $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$) - reprezentare hartă izodoze 2D. Se poate observa CI heptagonală cu pereții groși de 15 cm, la care este adăugată o extensie cu lungimea de 2 m pentru spectrometrul de electroni. În spatele peretelui din vest se poate vedea ecranul de protecție pentru muoni.

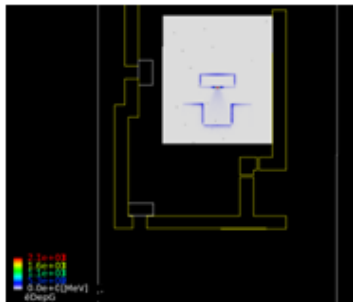


Fig. 7. Energia absorbită per celulă mesh (MeV) pentru fotonii secundari, în cazul SP1.

Fig. 7 prezintă distribuția energiei absorbite (MeV) per celula mesh datorată fotonilor secundari, pentru termenul sursă de protoni (distribuția treaptă până la 100 MeV, SP1) în E1. Calculele au fost realizate cu GEANT4, pentru un număr de 5×10^6 protoni primari. Sursa este plasată în centrul camerei de interacție. Se observă contururile datorate absorbției fotonilor în pereții camerei de interacție, și pereții frontali ai BD (geometria propriu-zisă nu este reprezentată în volumul de scoring (fond alb).

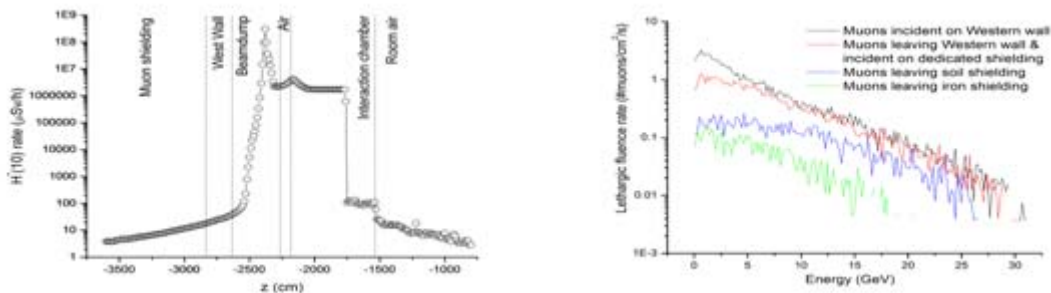


Fig. 8. Stânga: Debitul $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$) proiecția 1D în lungul direcției fasciculului. Calculele s-au făcut într-o coloană cu secțiunea de 10×10 cm în planul xy în lungul direcției fasciculului, la înălțimea sursei (150 cm deasupra podelei). Dreapta: Spectrele energetice ale miunilor pentru diferite ecrane de protecție.

În Fig. 8 (stânga) este prezentată proiecția 1D a valorii debitului echivalentului dozei ambientale într-un volum de eșantionare cu secțiunea de 10 cm x 10 cm a cărei lungime acoperă zona în care s-au făcut calculele, pe direcția fascicului. Fig. 8 (dreapta) prezintă rezultatele studiului de material pentru protecția contra muonilor. Au fost analizate următoarele materiale: pământ, beton ușor, beton greu și fier. Se observă ca rezultatul cel mai bun se obține în cazul unui ecran de fier (mai ales pentru miuonii de energii înalte).