

**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI
TEHNOLOGIE POLITEHNICA BUCUREȘTI
FACULTATEA DE ȘTIINȚE APLICATE**

**REZUMAT
TEZĂ DE DOCTORAT**

**Simulări ale interacției pulsului laser ultraintens cu
ținte solide**

AUTOR :

Drd. BUDRIGĂ (MARTIȘ) MARIA

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	prof. dr. Cristina STAN, Director Școala Doctorală	De la	UNST Politehnica București, S.D.S.A.
Conducător de doctorat	Prof. dr. Gheorghe CĂTA-DANIL	De la	UNST Politehnica București
Membru	Prof. dr. Alexandru JIPA	De la	Universitatea București, Facultatea de Fizică
Membru	Prof. dr. Ionel LAZANU	De la	Universitatea București, Facultatea de Fizică
Membru	Prof. dr. Emil PETRESCU	De la	UNST Politehnica București

București

2023

CONȚINUT

INTRODUCERE	3
CAPITOLUL 1	4
Noțiuni de fizica plasmei, a laserelor și a interacției pulsului laser ultraintens cu plasma	
CAPITOLUL 2	5
Simulări Particle-in-Cell. Codul Smilei.	
CAPITOLUL 3	6
Accelerarea ionilor și protonilor cu un puls laser ultraintens folosind ținte conice cu vârful plat și nanostructurat	
3.1 Pulsul laser și descrierea țintelor	6
3.2. Simulările PIC	8
CAPITOLUL 4	14
Accelerarea ionilor și protonilor cu un puls laser ultraintens folosind ținte plane (folii) ultrasubțiri nanostructurate	
4.1 Pulsul laser și descrierea țintelor	14
4.2 Simulările PIC	15
CAPITOLUL 5	20
Descrierea matematică a profilului densității pentru interacția unui puls laser ultraintens folosind ținte conice cu vârful plat și nanostructurat	
CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE	22-23

INTRODUCERE

Accelerarea de particule este esențială în numeroase domenii de cercetare, contribuind substanțial la dezvoltarea multor aspecte ce privesc viața umană. Printre progresele remarcabile din sfera științei și tehnologiei care au fost posibile datorită acceleratoarelor de particule sunt: tratarea cancerului cu eficiență mai mare față de metodele tradiționale, fabricarea semiconductoarelor și descoperirea de noi surse de energie. De asemenea, acceleratoarele reprezintă baza cercetării științifice din cadrul unor faimoase centre precum C.E.R.N., unde în anul 2013 a fost descoperit bosonul Higgs.

Spre deosebire de acceleratoarele clasice, acceleratoarele de particule cu laseri de mare putere sunt ca dimensiuni mult reduse, iar accelerarea particulelor (electroni, ioni) se face pe o distanță de ordinul centimetrelor până la 100 m.

Pulsurile laser ultraintense, oferă posibilitatea de a accelera particulele la energii de la sute de MeV până la câțiva GeV. Acceleratoarele pot fi proiectate pentru a produce coliziuni de două tipuri: cu țintă fixă (se lovește o particulă de o țintă fixă) și cu fascicule (se ciocnesc două fascicule de particule venind din sensuri opuse).

De asemenea în ultimele decenii au fost propuse o mulțime de geometrii ale țintelor pentru a obține protoni foarte energetici. Unele lucrări au arătat că interacțiunea unui puls laser ultraintens cu o țintă micro-con pot genera protoni accelerați la energii de zeci de MeV cu unghiul de divergență mic și absorbția laserului mare. Un experiment la facilitate Vulcan demonstrează că interacția unui puls laser ultraintens cu o folie foarte subțire poate genera protoni accelerați la energii ce depășesc energii de 94 MeV.

În România, procesarea de materiale cu laser este mult înclinată către micro- și nano-procesări, în special tehnologii de depunere de filme subțiri, iar tehnologia care se utilizează pentru a crea nanoșintele pe care le voi descrie în teza mea este polimerizarea cu doi fotoni.

Probleme abordate în cadrul acestui domeniu de cercetare necesită utilizarea plasmelor. Se poate spune că, în acest tip de mediu, procesele predominante sunt de natură cinetică și colectivă, existând foarte multe fenomene neliniare. Acest lucru face dificilă utilizarea modelelor analitice, prin urmare, codurile de tip Particle-In-Cell au devenit importante în modelarea parametrilor și în optimizarea muncii experimentale.

Codurile bazate pe metoda Particle-In-Cell utilizate în modelarea numerică a interacțiunii laser - plasmă se bazează pe rezolvarea câmpurilor electromagnetice folosind ecuațiile Maxwell cuplate cu ecuațiile Vlasov.

Capitolul 1

NOȚIUNI DE FIZICA PLASMEI, A LASERELOR ȘI A INTERACȚIEI PULSULUI LASER ULTRAIINTENS CU PLASMA

În primul subcapitol prezint noțiuni de fizica plasmei. Ecuația Vlasov care împreună cu ecuațiile Maxwell ne permit calcularea densității de sarcină și de curent. Deoarece când un puls laser intens trece prin plasma apare forța ponderomotoare care acționează pentru a expulza particulele din regiunile cu cea mai mare intensitate a laserului, am descris în continuare această forță. Al doilea subcapitol conține noțiuni de fizica laserilor de putere mare.. Deoarece în simulări am folosit pulsurile gaussiene am descris în continuare parametrii acestora. Codurile PIC folosesc unități adimensionale deoarece se reduce timpul de calcul numeric și de aceea pentru calculul intensității am folosit amplitudinea adimensională a câmpului electric, a_0 . În cazul pulsurilor ultracurte, descriu principiul amplificării pulsurilor laser cu derivă de frecvență și componentele laserelor. Ultimele 2 subcapitole conțin informații despre accelerarea particulelor încărcate electric. În partea a treia voi descrie accelerarea electronilor de către câmpul de siaj generat de un câmp laser ultra-intens, iar în ultima parte accelerarea ionilor ca urmare a interacției câmpurilor laser ultra-intense cu plasma. Aici am descris mecanismele de accelerare a ionilor Target Normal Acceleration of Sheath (TNSA), Collisionless Shock Acceleration (CSA), Exploziile Coulombiene și Radiation Pressure Acceleration (RPA)

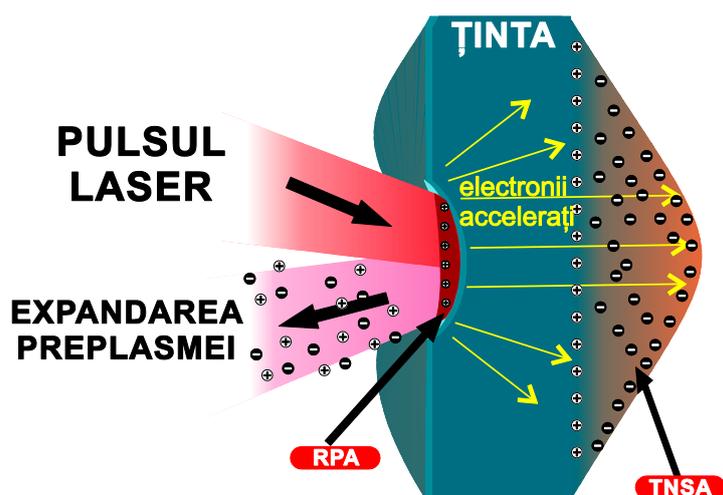


Fig.1 Mecanismele de accelerare a particulelor

Capitolul 2

SIMULĂRI PARTICLE-IN-CELL (PIC). CODUL SMILEI

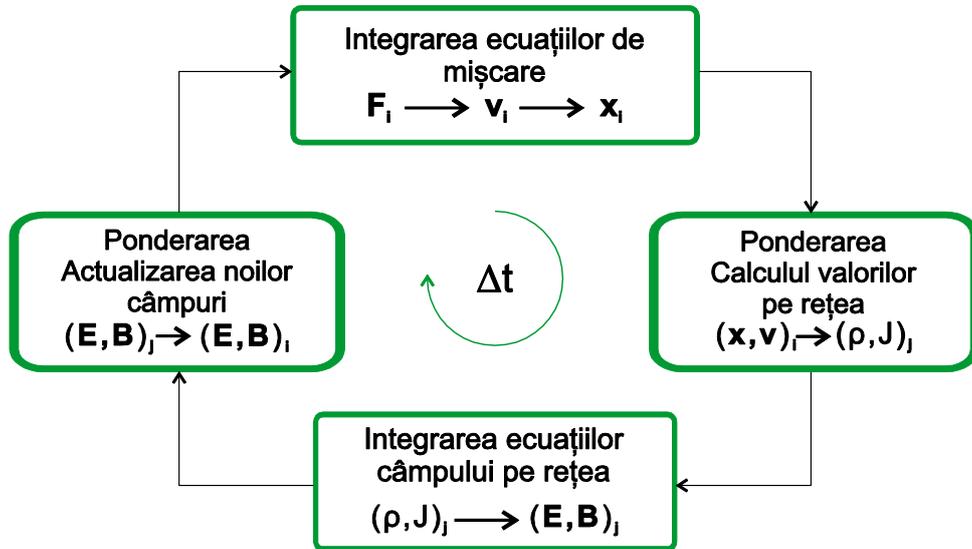


Fig. 2 Un ciclu pic la un pas de timp din algoritmul de simulare

Denumirea Codului SMILEI provine de la primele litere ale cuvintelor **S**imulating **M**atter **I**rradiated by **L**ight at **E**xtrême **I**ntensities (Simularea Materiei Iradiate de Lumină la Intensități Extreme). Smilei este un cod PIC de simulare, sursă deschisă, orientat spre obiect.. Acesta a fost dezvoltat într-un cadru de colaborare, incluzând fizicieni și experți în calcul performant (HPC).

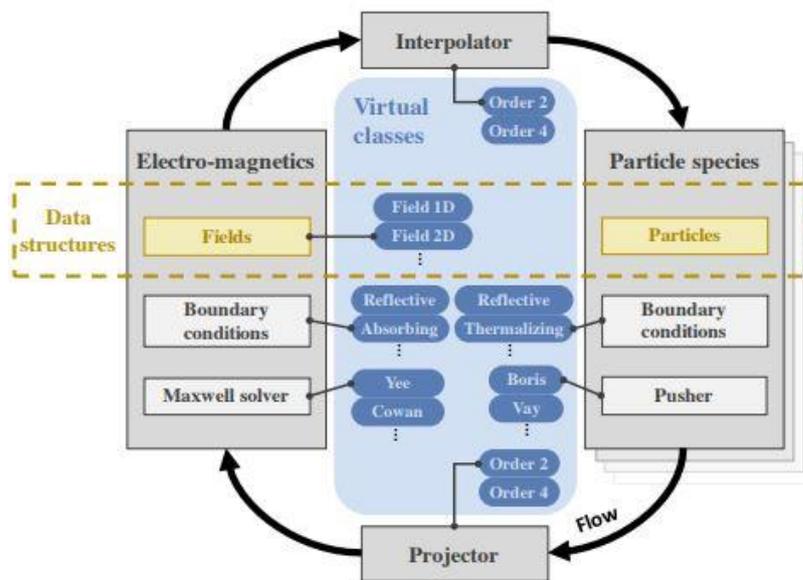


Fig. 3 Fluxul C ++, clasele și structura datelor în Smilei

Capitolul 3

ACCELERAREA IONILOR ȘI PROTONILOR CU UN PULS LASER ULTRAITENS FOLOSIND ȚINTE CONICE CU VÂRFUL PLAT ȘI NANOSTRUCTURAT

Studiul interacțiunii unui puls laser ultraintens cu două noi tipuri de microșinte, folosind simulări PIC și simulări bazate pe metoda FDTD.

Prima țintă este un microcon din plastic ce are în vârf o folie plată nanostructurată, cu grosimea de zeci de nanometri. Aceasta am folosit-o în teză sub denumirea de “con cu vârful plat nanostructurat”.

A doua țintă este un microcon din plastic, cu o folie în vârf compusă din două nanostraturi. Primul nanostrat este o folie nano-strat cu o grosime de zeci de nanometri pe care este dispus un al doilea nanostrat format din nanosfere din plastic, identice ca dimensiuni, cu același diametru de zeci de nanometri, tangente una cu cealaltă și tangente la vârful conului. Această a doua țintă am denumit-o „con cu nanosfere”.

Fasciculul laser vine întotdeauna din stânga. Grosimea pereților conului este de $4 \mu m$, iar înălțimea este de $20 \mu m$ pentru ambele ținte.

Deoarece mi-am propus să găsesc care este diametrul optim al nanosferelor pentru a obține protoni și ioni de carbon foarte energetici, am extras din literatura de specialitate intervalul valorilor optime în care se situează aceasta și am efectuat simularea pentru interacția unui puls laser ultraintens cu o folie plană din plastic ultra-subțire. Astfel, am obținut că energia maximă a protonilor se obține pentru grosimea foliei de 80 nm .

Pentru ținta „con cu nanosfere” am păstrat constantă grosimea primului strat, care este o folie, de 40 nm , iar diametrul nanosferelor l-am variat începând de la 20 nm până la 80 nm , cu pași de 20 nm .

Pentru ținta con cu vârful plat nanostructurat am considerat grosimea foliei din vârf ca suma dintre diametrul nanosferelor din țintele “conuri cu nanosfere” și 40 nm . Astfel, grosimea foliei din vârful conului cu vârful plat nanostructurat variază în intervalul de la 60 nm la 120 nm , cu pași de 20 nm . Pe pereții conului este considerate o preplasmă de $0,5 \mu m$.

Cele 2 ținte au fost introduse într-o cutie de simulare bidimensională, de dimensiuni $60 \mu m \times 75 \mu m$. Această cutie de simulare este raportată la un reper cartezian cu axele O_x și O_y .

O celulă din simularea PIC are dimensiunea de $10\text{ nm} \times 10\text{ nm}$. Deoarece plasma simulată și preplasma sunt total ionizate, am introdus într-o celulă 21 de electroni, 3 protoni și 3 ioni de carbon C^{6+} . Timpul total de simulare este de 230 fs și pasul de timp de 0,033 fs.

În toate simulările făcute am folosit pulsurile ultraintense liniar polarizate și circular polarizate. Parametrii pulsurilor ultraintense din simulări și valorile intensităților fasciculului laser au valori ca cele ale laserelor de la ELI-NP. Pulsul laser liniar polarizat are intensitatea de $2,16 \times 10^{22}\text{ W cm}^{-2}$ și pulsul laser circular polarizat are intensitatea de de 2 ori mai mare decât cea a pulsului laser liniar polarizat, adică de $4,32 \times 10^{22}\text{ W cm}^{-2}$.

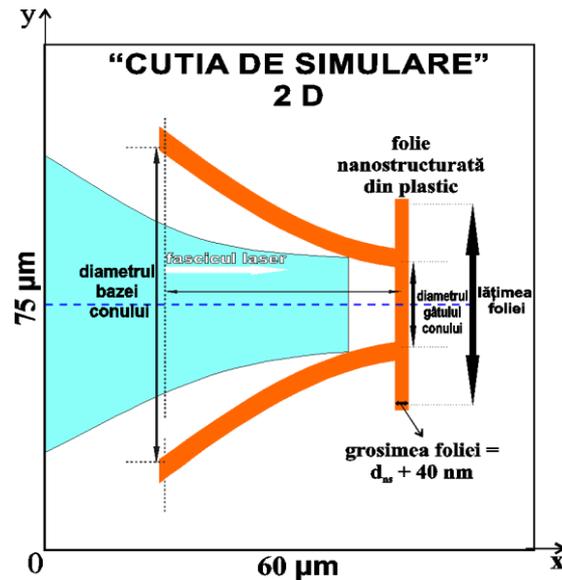


Fig. 4 Con cu vârful plat nanostructurat

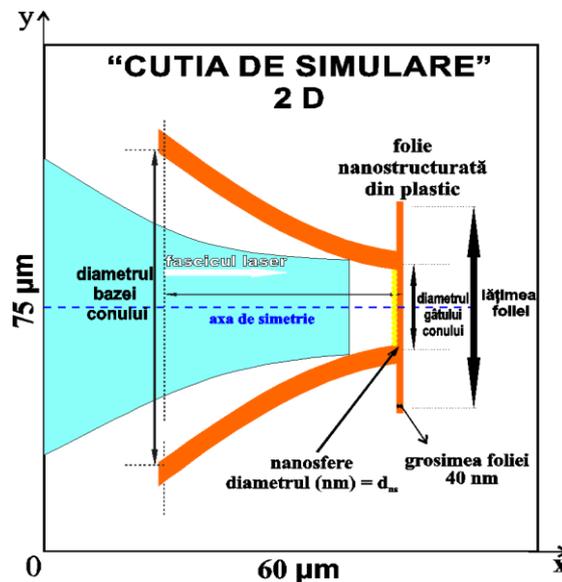


Fig. 5 Con cu nanosfere

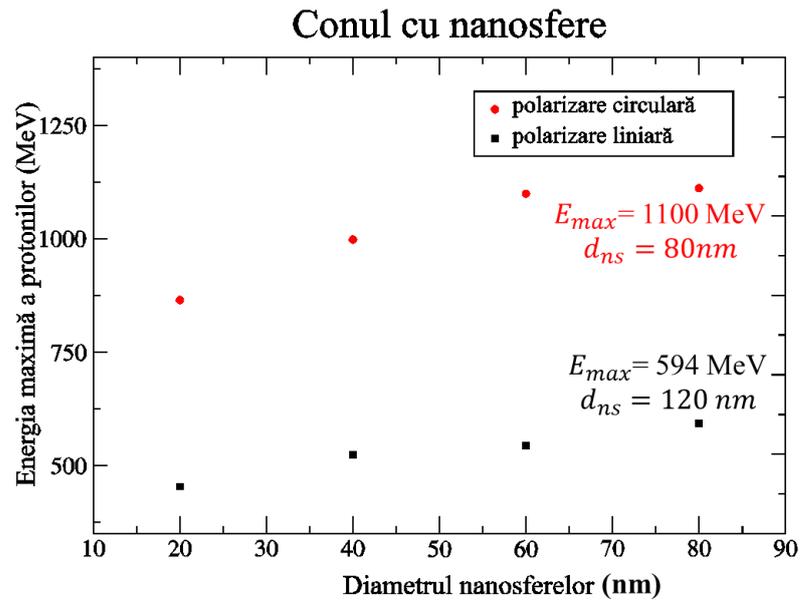


Fig. 6 Dependența energiei maxime a protonilor de diametrul nanosferelor

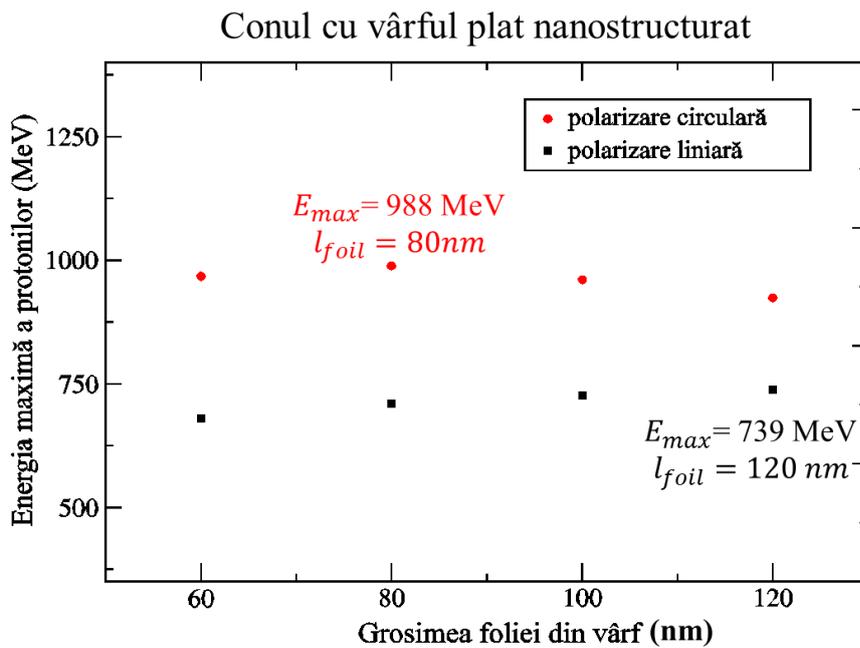


Fig. 7 Dependența energiei maxime a protonilor de grosimea foliei din vârful

Am obținut că ținta optimă pentru obținerea de protoni foarte energetici :

- *Puls circular polarizat* este CONUL CU NANSOFERE cu diametrul nanosferei de 80 nm, energia maximă $E_{max} = 1,1$ GeV
- *Puls liniar polarizat* este CONUL CU VÂRFUL PLAT NANOSTRUCTURAT cu grosimea foliei de 120 nm, $E_{max} = 988$ MeV

În continuare am studiat comportamentul componentei longitudinale a câmpului electric E_x pentru ambele polarizări ale pulsului laser la timpul de simulare 168 fs, pentru pasul de timp $63 \tau_0$, pentru diametrele nanosferelor de 20 nm, 40 nm, 60 nm și 80 nm.

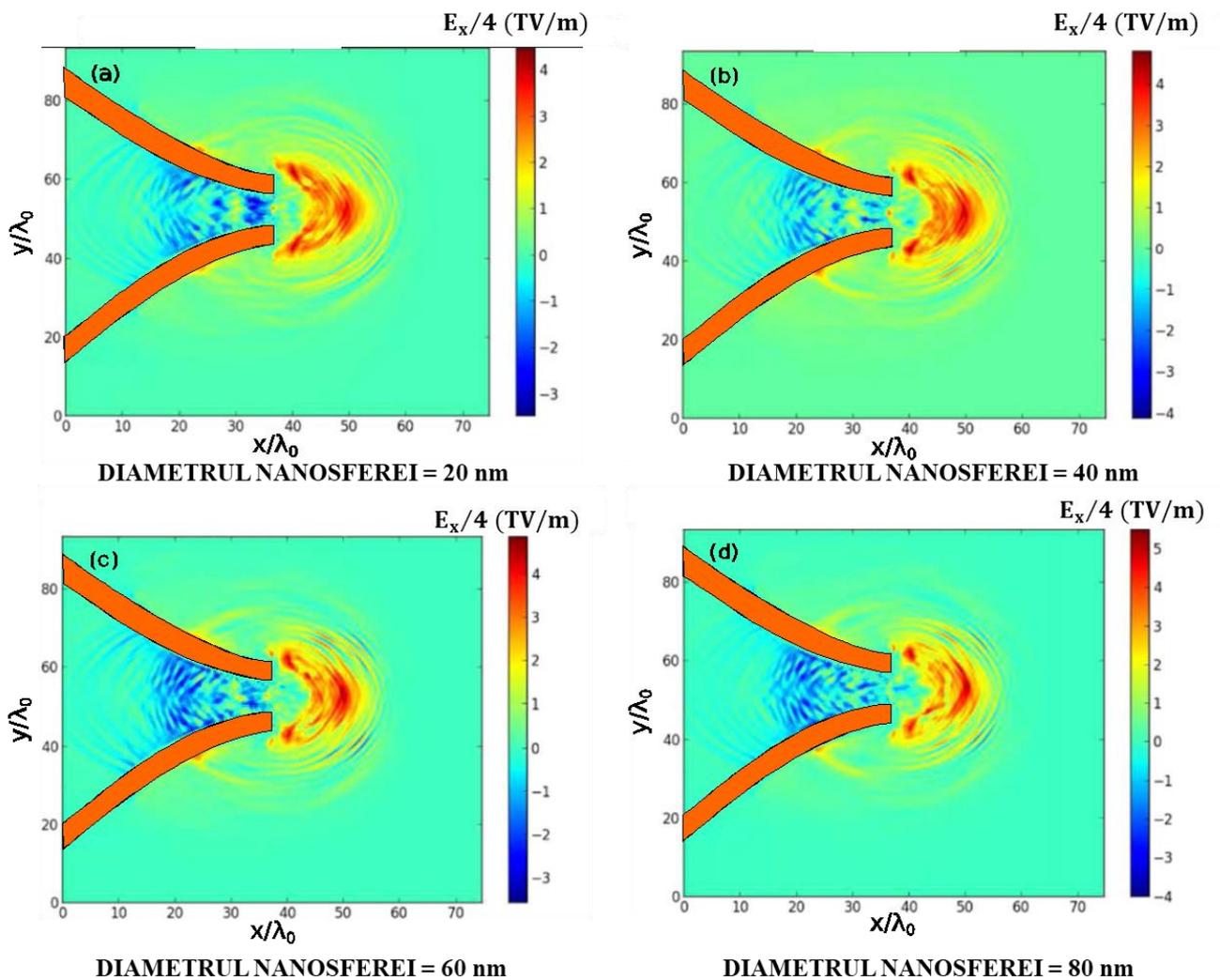


Fig. 8 Distribuția componentei longitudinale a câmpului electric E_x , la pasul de timp $63 \tau_0$, pentru diferite diametre ale nanosferelor

Am obținut că valoarea maximă a lui E_x crește direct proporțional cu diametrul nanosferii.

Spectrele de energie ale protonilor pentru un ținte con la interacția unui puls laser ultraintens liniar și circular polarizat la timpul de simulare $t = 240 fs$ pentru $x \geq 30 \mu m$ au fost studiate în continuare.

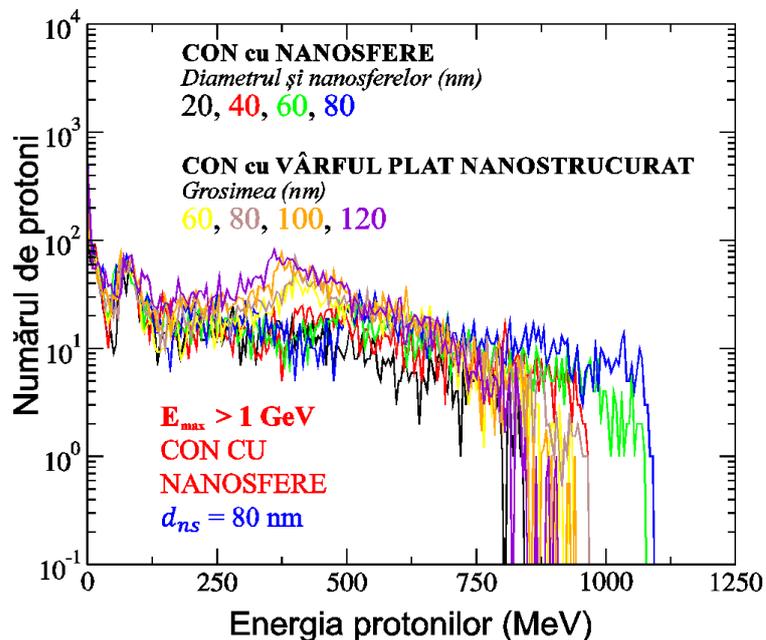


Fig. 9 Distribuția energetică a protonilor. Puls laser circular polarizat

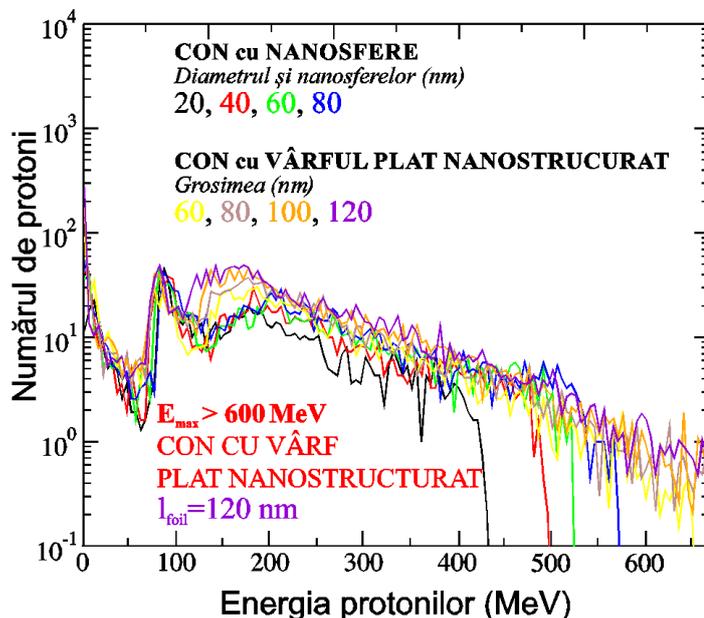


Fig. 10 Distribuția energetică a protonilor. Puls laser liniar polarizat

Am obținut că numărul maxim de protoni energetici pentru pulsul circular polarizat este Conul cu nanosfere cu diametrul nanosferei de 80 nm cu $E_{max} > 1 GeV$, iar pentru pulsul liniar polarizat este Conul cu vârful plat nanostructurat cu grosimea foliei de 120 nm cu $E_{max} > 600 MeV$.

De asemenea am studiat distribuția unghiulară a protonilor pentru conul cu nanosfere și conul cu vârful plat nanostructurat. Pulsul laser ultraintens este circular polarizat și liniar polarizat. Timpul de simulare este de $t = 240 \text{ fs}$ pentru protonii cu $35,2 \mu\text{m} \leq y \leq 40 \mu\text{m}$, $52 \mu\text{m} \leq x \leq 60 \mu\text{m}$ (pulsul laser CP) și $48 \mu\text{m} \leq x \leq 56 \mu\text{m}$ (pulsul laser LP). Am considerat protonii cu energii mai mari de mai mari de 600 MeV pentru pulsul laser CP și mai mari de 300 MeV pentru pulsul laser LP.

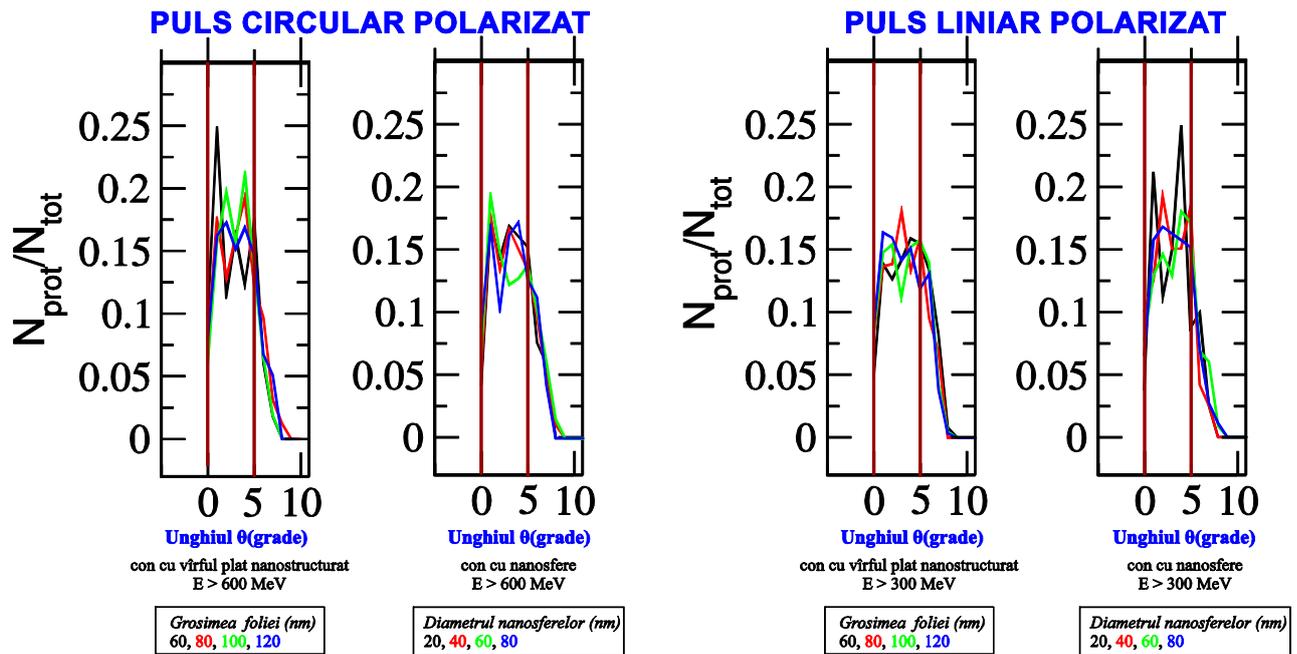


Fig. 11 Distribuția unghiulară a protonilor pentru conul cu nanosfere și conul cu vârful plat nanostructurat.

Am obținut că divergența unghiulară scăzută ($\theta \in (0^\circ, 5^\circ)$) implică eficiență crescută a procesului de interacție

Deoarece la interacția unui puls laser ultraintens cu țintele care sunt din plastic se obțin ioni de carbon, în partea a doua a capitoului 3 am studiat accelerarea ionilor de carbon C^{6+} . De asemenea am studiat dependența energiei maxime a ionilor de carbon de grosimea foliei din vârf pentru conul cu vârful plat nanostructurat și de de diametrul nanosferelor pentru conul cu nanosfere în cazul pulsului liniar și circular polarizat.

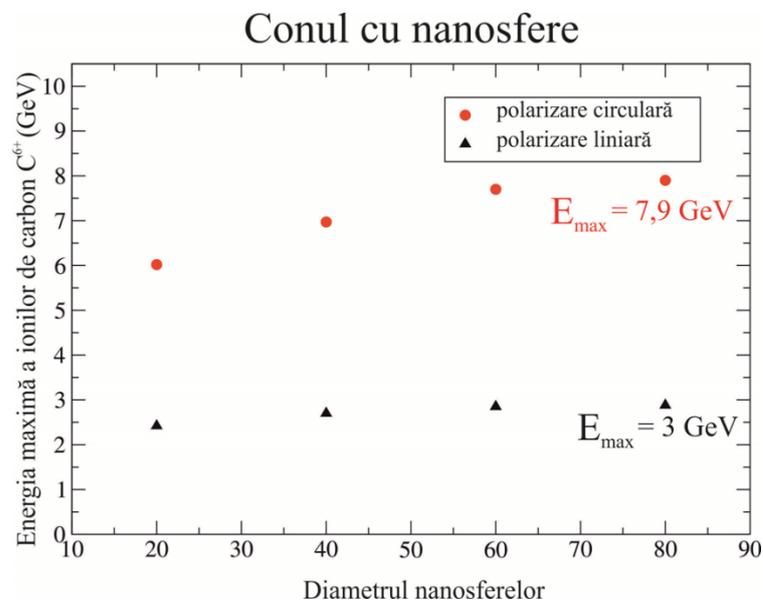


Fig.12 Dependența energiei maxime a ionilor de carbon de diametrul nanosferelor

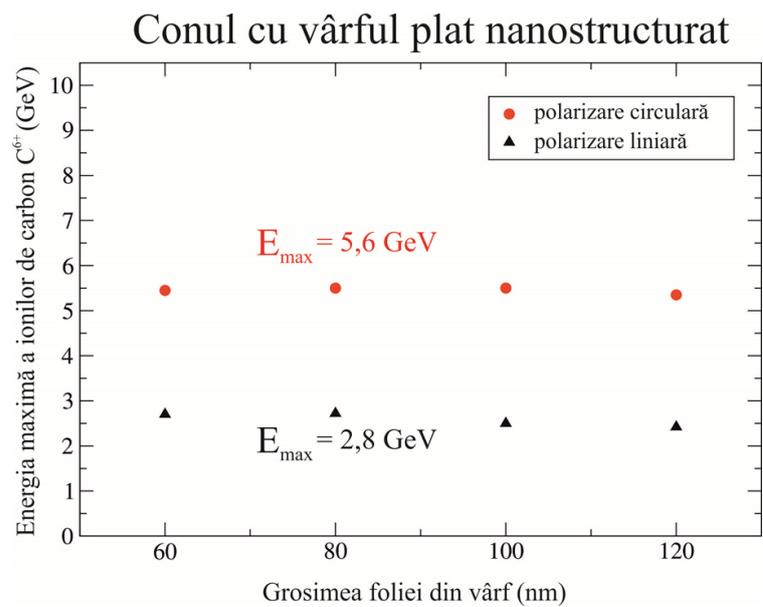


Fig.13 Dependența energiei maxime a ionilor de carbon de grosimea foliei din vârf

Am obținut că pentru conul cu vârful plat nanostructurat, E_{\max} este invers proporțională cu grosimea foliei din vârf și pentru conul cu nanosfere, E_{\max} este direct proporțională cu diametrul nanosferei.

În continuare prezint spectrele de energie ale ionilor de carbon pentru un con cu vârful plat nanostructurat la interacția unui puls laser ultraintens liniar și circular polarizat la timpul de simulare $t = 240 \text{ fs}$, pentru $x \geq 30 \text{ }\mu\text{m}$.

Subcapitolul al treilea se intitulează “*TNSA combinat cu RPA*”, deoarece de la introducerea regimului RPA a accelerării ionilor cu puls laser ultraintens la interacția cu o țintă din folie o mulțime de lucrări au fost dedicate studiului acestui regim de accelerare ion-laser. Un regim hibrid care include TNSA și RPA a fost introdus și utilizat pentru a explica accelerarea ionilor în fasciculele cvasimonoenergetice de către un puls laser ultraintens LP care interacționează cu o țintă folie.

În acest subcapitol am arătat că protonii sunt accelerați printr-un mecanism de accelerare hibridă, incluzând TNSA și RPA pentru un puls laser de ultraintens LP și CP, care interacționează cu un con cu nanosfere. Am prezentat doar rezultatele pentru un con cu nanosfere cu diametrul de 80 nm și folia din vârful plat cu grosimea de 40 nm și pulsul laser circular polarizat. Am studiat evoluția distribuției protonilor și ionilor de carbon pentru 2 pași de timp: $67\tau_0$ și $78\tau_0$. La pasul de timp $67\tau_0$ prezint graficele la timpul de simulare $t = 178 \text{ fs}$ și respectiv la pasul de timp $78\tau_0$ la timpul de simulare $t = 208 \text{ fs}$ pentru protoni și ioni de carbon. În continuare am reprezentat spațiul fazei protonilor la timpii de simulare de 138 fs, 160 fs și 178 fs pentru ambele polarizări ale pulsului laser.

Am simulat variația maximă energiei protonilor în funcție de timpul de simulare care începe de la $t = 100 \text{ fs}$ și se încheie la $t = 250 \text{ fs}$, pentru polarizările liniare și circulare ale pulsului laser.

Am comparat rezultatele pentru component longitudinală a câmpului electric E_x obținute prin metoda FDTD și prin metoda PIC . Același rezultate calitative au fost obținut prin *simulări PIC* unde cea mai mare energie de protoni este obținută pentru diametrul nanosferei egal cu 80 nm atât pentru pulsul laser liniar polarizat cât și pentru cel circular polarizat.

Capitolul 4

“ACCELERAREA IONILOR ȘI PROTONILOR CU UN PULS LASER ULTRAIINTENS FOLOSIND ȚINTE PLANE (FOLII) ULTRA-SUBȚIRI NANOSTRUCTURATE”

Aceste ținte plane de dimensiuni de ordinul zecilor de nanometri, care se deosebesc de țintele care au fost studiate de alți autori de ordinul sutelor de nanometri. Cercetarea pe care am făcut-o diferă de studiile anterioare prin utilizarea unui puls laser ultraintens și ambele polarizări liniar și circular. Deoarece ținta este o folie plană nanostructurată formată din 2 straturi: primul strat este format din nanosfere din plastic, tangente una cu cealaltă și tangente la cel de-al doilea strat care este o folie plată din plastic, nanosferele vor avea diametrul de zeci de nanometri, avem un avantaj al acestei abordări care vine de la costul redus al producției de nanosfere.

În acest capitol parametrii pulsurilor ultraintense din simulări și valorile intensităților fasciculului laser au valori ca cele folosite la ELI-NP. Timpul total de simulare este de 190 fs pentru pulsul liniar polarizat și de 180 fs pentru pulsul circular polarizat. Pasul de timp este de 0,022 fs.

Ținta a fost introdusă într-o cutie de simulare bidimensională, de dimensiuni $40 \mu m \times 40 \mu m$. Această cutie de simulare este raportată la un reper cartezian cu axele O_x și O_y .

O celulă din simularea PIC are dimensiunea de $6,7 \text{ nm} \times 6,7 \text{ nm}$. Deoarece plasma simulată și preplasma sunt total ionizate, am introdus într-o celulă 21 de electroni, 3 protoni și 3 ioni de carbon C^{6+} . Timpul total de simulare este de 230 fs și pasul de timp de 0,033 fs. Pe pereții conului este considerate o preplasmă de $0,5 \mu m$. Fasciculul laser vine din stânga și talia fasciculului laser este de $9,52 \mu m$.

Mai mulți autori au obținut grosimea optimă a foliei plane nanostructurate în intervalul 70 – 100 nm și după cum am subliniat mai sus, în capitolul 3, am efectuat simularea pentru interacția unui puls laser ultraintens cu o folie plană din plastic ultra-subțire. unde am obținut că energia maximă a protonilor se obține pentru grosimea foliei de 80 nm. Astfel am păstrat constantă grosimea totală a foliei nanostructurate la 80 nm, aceasta fiind suma dintre diametrul nanosferei și grosimea foliei plate. Am variat diametrul nanosferelor de la 0 nm la 80 nm, cu pași de 10 nm, iar folia plată de la 80 nm la 0 nm, cu pași de 10 nm.

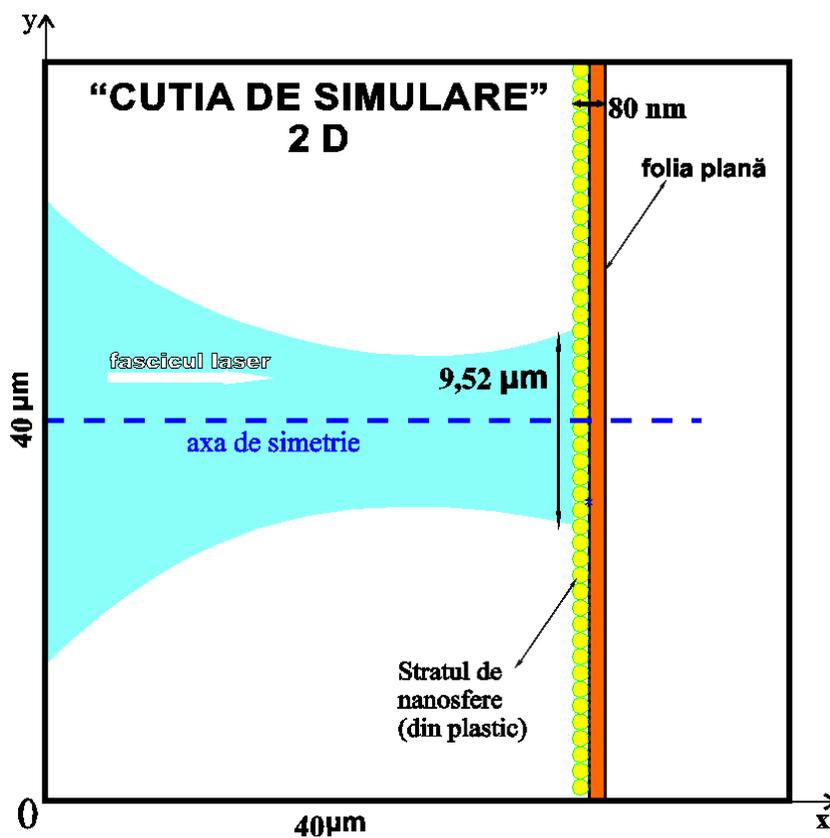


Fig. 14 Geometria foliei plane nanostructurată

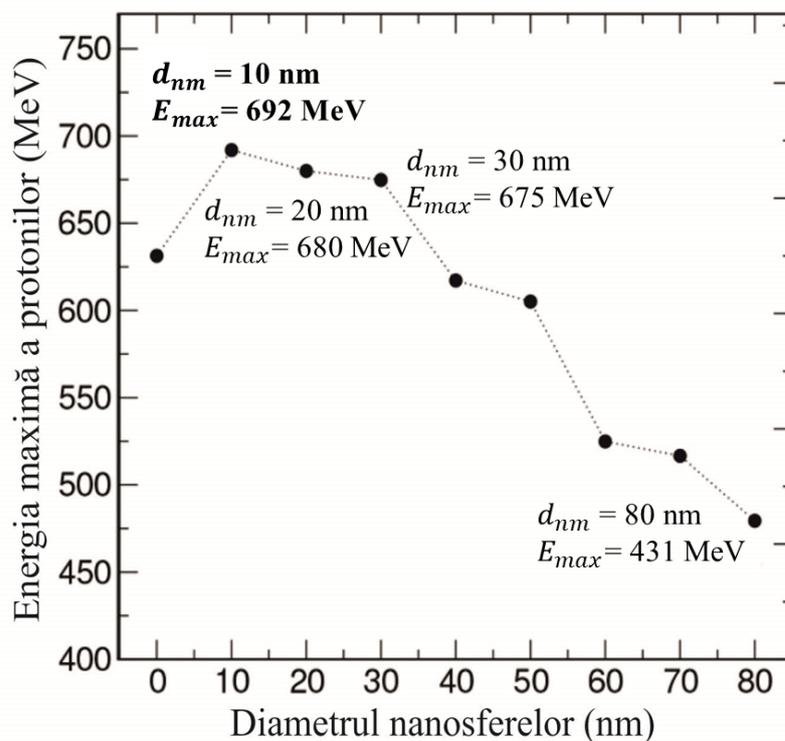


Fig. 15 Dependența neliniară a energiei maxime a protonilor de diametrul nanosferelor, pulsului laser ultraintens liniar polarizat

În cazul pulsului laser circular polarizat obținem că energia maximă $E_{max} = 1.21$ GeV, este obținută pentru diametrul nanosferei de 40 nm.

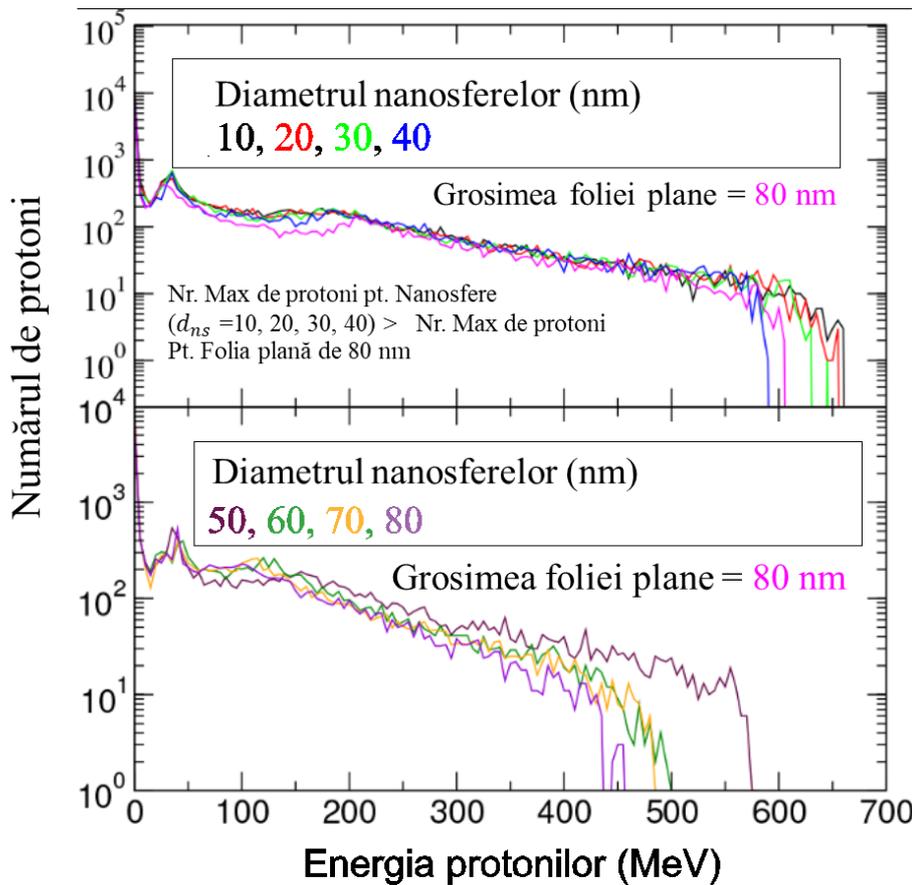


Fig. 16 Distribuția energetică a protonilor, fascicul laser circular polarizat

În continuare am studiat comportamentul componente longitudinale a câmpului electric E_x în funcție de timp, de la 0 fs la 150 fs cu $17,6 \mu m \leq y \leq 24,8 \mu m$.

Spectrul de energie și distribuția unghiulară a protonilor la timpul de simulare $t = 173$ fs pentru protonii cu energii mai mari de 300 MeV este descrisă în continuare.

Am obținut că pentru divergența unghiulară scăzută la valoarea lui $\theta = 2^\circ$ avem eficiență crescută a procesului de interacție ($E > 300$ MeV) pentru folia plană cu grosimea de 80nm,

Observăm că diametrul optim al nanosferei pentru cel mai mare număr de protoni accelerați cu divergență unghiulară scăzută este 30 nm.

Pentru pulsul laser ultraintens circular polarizat am studiat dependența energiei maxime a protonilor și absorbția laserului de diametrul nanosferelor. În continuare am studiat comportamentul componentelor longitudinale E_x și transversale E_y a câmpului electric în

funcție de timp, de la 0 fs la 150 fs. În cazul pulsului laser circular polarizat avem că E_y maxim $> E_x$ maxim, pentru fiecare diametru al nanosferelor.

Aici am mai studiat și amplitudinea maximă a câmpului electric $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ în funcție de timp.

De asemenea am studiat distribuția unghiulară a protonilor la timpul de simulare $t = 173 \text{ fs}$ pentru protonii cu $17,6 \mu\text{m} \leq y \leq 24,8 \mu\text{m}$. Am considerat protonii cu energii mai mari de 600 MeV.

Prezint în continuare “Regimul de accelerare a protonilor: RPA și TNSA” unde am considerat pulsurile laser liniar și circular polarizate.

În cazul pulsului laser liniar polarizat și pentru o țintă compusă dintr-un strat de nanosfere cu un diametru de 30 nm pe o folie plată cu o grosime de 50 nm, am simulat distribuția protonilor cu energii mai mari de 300 MeV la 2 timpi de simulare 112 fs și 173 fs și spațiul fazei protonilor $(x, (\beta\gamma)_x)$, la timpii 45 fs, 67 fs și 80 fs după interacțiunea pulsului laser cu folia nanostructurată. De asemenea am studiat distribuția energiei maxime a protonilor în funcție de timp.

În cazul pulsului laser circular polarizat și pentru o țintă compusă dintr-un strat de nanosfere cu un diametru de 60 nm pe o folie plată cu o grosime de 20 nm, am studiat evoluția distribuției protonilor și ionilor de carbon pentru 2 pași de timp: $55\tau_0$ și $60\tau_0$. La pasul de timp $55\tau_0$ prezint graficele la timpul de simulare $t = 146 \text{ fs}$, și respectiv la pasul de timp $60\tau_0$ prezint graficele la timpul de simulare $t = 160 \text{ fs}$, pentru protoni și ioni de carbon. În continuare am reprezentat spațiul fazei protonilor la timpii de simulare de 48 fs, 56 fs și 61 fs.

Am cercetat și variația maximă energiei protonilor în funcție de timpul de simulare care începe de la $t = 40 \text{ fs}$ și se încheie la $t = 180 \text{ fs}$, pentru polarizările liniare și circulare ale pulsului laser.

În a doua parte a capitolului 4 am studiat “Accelerarea ionilor de carbon C^{6+} ” folosind simulări PIC. Datorită intensității ultra-înalte a pulsului laser care interacționează cu o folie nanostructurată din plastic (CH), plasma formată conține ioni de carbon C^{6+} . Am reprezentat dependența energiei maxime a ionilor de carbon C^{6+} per nucleon în funcție de diametrul nanosferelor pentru un puls laser ultraintens liniar și circular polarizat

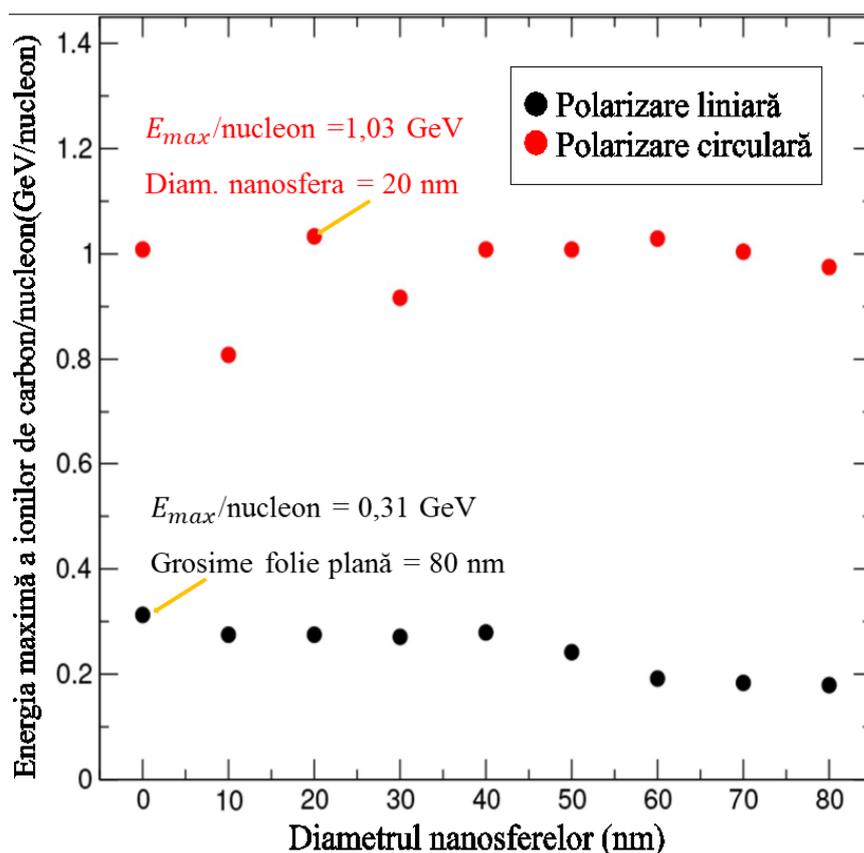


Fig. 17 Energia maximă a ionilor de carbon în funcție de diametrul nanosferelor

Am obținut că $E_{max}/nucleon$ pentru

- pulsul laser LP este 0,31 GeV / nucleon pentru o folie plană de 80 nm
- puls laser CP, este 1,03 GeV / nucleon pentru o folie nanostructurată cu diametrul nanosferelor de 20 nm.

Apoi descriu spectrul de energie a ionilor la timpul de simulare $t = 173 fs$ în funcție de diametrul nanosferelor pentru pulsurile liniar și circular polarizate.

Am obținut că numărul maxim de ioni energetici se obține pentru pulsul laser liniar polarizat în cazul țintei plane de 80 nm.

Spațiul fazei ionilor de carbon C^{6+} , $(x, (\beta\gamma)_x)$, este simulat după interacțiunea pulsului laser liniar polarizat cu folia nanostructurată cu diametrul nanosferelor de 30 nm și grosimea foliei de 50 nm, la timpii 45 fs, 67 fs și 80 fs și pentru pulsul laser circular la timpii 48 fs, 56 fs și 61 fs.

Cel de-al treilea subcapitol “Evoluția câmpului electromagnetic prin metoda FDTD” reprezintă un studiu complementar al interacțiunii unui puls laser ultraintens cu o țintă folie nanostructurată a fost realizat cu scopul de a izola parametrii geometrice care influențează

interacțiunea laser-plasmă. Studiul numeric FDTD folosește aceleași geometrii și parametri de interacțiune ca cei care au fost aleși în simulările PIC și implică o sursă laser gaussiană care se propagă inițial de-a lungul axei x , până la punctul de interacțiune a pulsului laser ultraintens cu ținta folie plană din plastic nanostructurată. Sursa laser are un diametru de $5,6 \mu m$ și este poziționată la o distanță de $10 \mu m$ de punctul de interacțiune, de-a lungul axei de propagare x . Grosimea stratului format din folie și nanosfere este menținută la 80 nm. Grosimea foliei este în intervalul 0 și 70 nm cu pași de 10 nm în mod complementar cu variația diametrului nanosferelor între 10 și 80 nm. Intensitatea câmpului electromagnetic este cercetată atât pentru polarizarea pulsului laser liniar cât și circular, la un moment dat, când se atinge câmpul maxim.

Rezultatele evoluției componente longitudinale a câmpului electric E_x obținute prin simulările FDTD le-am comparat cu cele obținute din simulările PIC.

Din graficele obținute aici pentru ambele pulsuri polarizate și diametre ale nanosferelor cuprinse între 0 nm și 80 nm se observă o scădere bruscă a lui E_x de la folia nanostructurată cu diametrul nanosferei de 30 nm la folia nanostructurată cu diametrul nanosferei de 40 nm.

Concluzia este că E_x are același comportament în cazul ambelor metode când diametrele nanosferelor variază de la 30 la 40 nm.

Capitolul 5

“DESCRIEREA MATEMATICĂ A PROFILULUI DENSITĂȚII PENTRU INTERACȚIA UNUI PULS LASER ULTRAIINTENS FOLOSIND ȚINTE CONICE CU VÂRFUL PLAT ȘI NANOSTRUCTURAT”

Am propus o nouă țintă con care are pereții și vârful conului acoperite cu nanosfere tangente una cu cealaltă și tangente pereților conului.

Voi descrie matematic profilul de densitate al plasmei inițiale create de un puls laser ultraintens care interacționează acest con. Acest profil de densitate este proiectat pentru a fi utilizat în coduri bidimensionale de PIC pentru accelerarea laser – ion.

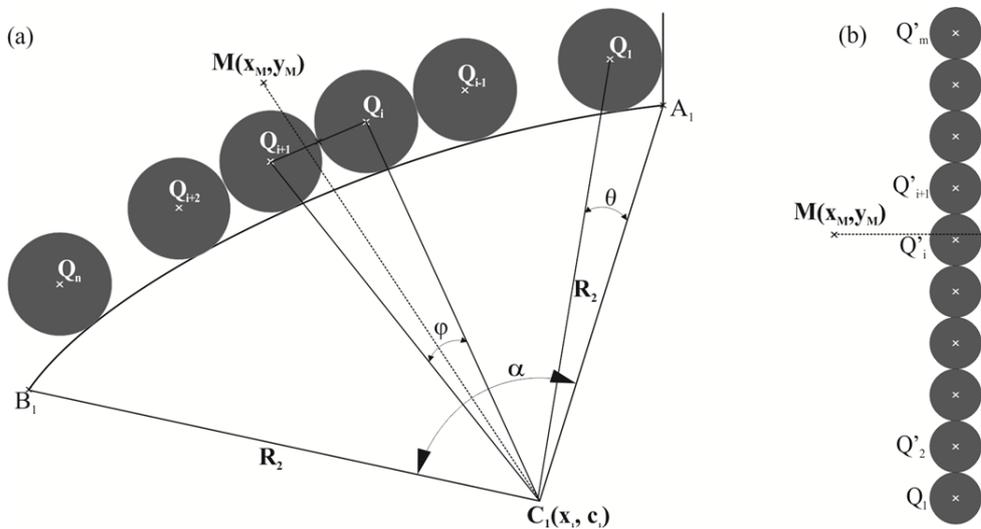
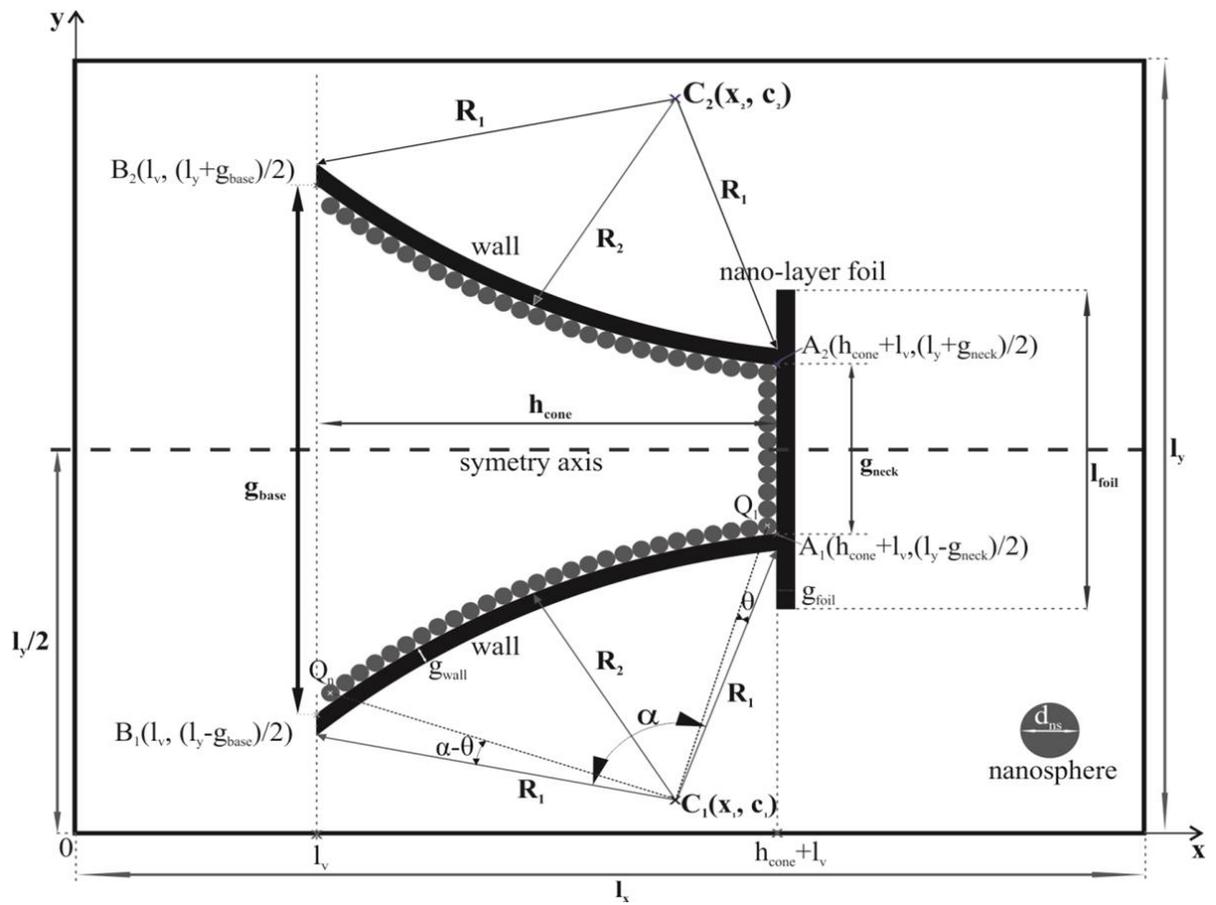
În primul subcapitol descriu conul plat nanostructurat în interiorul unei cutii de simulare. Parametrii conului plat nanostructurat sunt relativ la un sistem de coordonate cartezian a cărui origine O este colțul din stânga jos al casetei de simulare. Axele Ox și Oy sunt cele două laturi perpendiculare ale casetei de simulare care se intersectează în punctul O . Ținta are o formă conică cu pereți curbați. Ambii pereți au o grosime dată, g_{wall} .

Pereții sunt arcuri circulare ale cercurilor cu razele R_1 și $R_2 = R_1 + g_{wall}$, cu centrele $C_1(x_1, c_1)$ și respective $C_2(x_2, c_2 = l_y - c_1)$. În partea de sus există o folie cu grosimea g_{foil} și lungimea l_{foil} . Alți parametrii ai conului nanostructurat sunt: înălțimea h_{cone} , baza mare a conului g_{base} și baza mică a conului g_{neck} . Toate nanosferele au aceleași diametru d_{ns} . Conul nanostructurat este introdus într-o cutie de simulare cu lățimea l_x și înălțimea l_y . În simulările PIC trebuie să se ia în considerare că avem vid înainte de țintă. Notăm lățimea vidului cu l_v .

Am notat $M(x_M, y_M)$ un punct matematic asociat cu o particulă încărcată (electron, proton sau ion) și am notat următoarele unghiuri cunoscute: θ , α , φ pe care le-am folosit în formulele descrie în acest capitol.

În al doilea subcapitol am obținut formula numărului nanosferelor din vârful conului și de pe pereții conului în funcție de g_{neck} și d_{ns} , respectiv în funcție θ , α , φ și am obținut formulele

$$m = \left[\frac{g_{neck}}{d_{ns}} \right], n = \left[\frac{\alpha - \theta}{\varphi} \right]$$



În al treilea subcapitol am aflat condițiile pe care trebuie să le îndeplinească o particulă încărcată din plasma inițială pentru a se situa în interiorul unei nanosfere. Am reușit să determin coordonatele centrelor nanosferelor în funcție de parametrii cunoscuți și astfel să descriu algoritmul pentru aflarea poziției unei particule din plasmă în funcție de centrele nanosferelor din interiorul țintei conice și de parametrii definiți la început.

CONCLUZII

CONCLUZII GENERALE

În teza mea de doctorat am abordat o tematică de actualitate privind accelerarea de particule la interacția unui puls laser ultraintens cu noi ținte solide, microconuri și folii plane ultrasubțiri din plastic nanostructurat, cu grosimi de ordinul zecilor de nanometri. Pentru aceste ținte am folosit parametrii asemănători cu cei ai laserelor de la ELI-NP, în cazul accelerării protonilor și ionilor de carbon,

Din rezultatele obținute pentru interacția pulsului laser ultraintens cu ținta plană nanostructurată putem concluziona că în cazul accelerării protonilor avem rezultate mai bune pentru foliile care au depuse pe ele un strat de nanosfere, excepție de la aceasta fiind în cazul accelerării ionilor de carbon, unde am obținut că dependența de diametrul nanosferelor a energiei maxime a ionilor de carbon este foarte slabă pentru ambele polarizări ale pulsului laser.

CONTRIBUȚII ORIGINALE

- În urma cercetărilor mele făcute și prezentate în teza de doctorat, am ajuns la concluzia că se obțin energii mari și un număr mare ioni de carbon C^{6+} și protoni foarte energetici în cazul țintelor conuri cu nanosfere.
- Am obținut că ținta optimă pentru care avem numărul maxim de particule foarte energetice cu divergență unghiulară scăzută pentru:
 - 1) ionii de carbon, este conul cu nanosfere cu diametrul nanosferei de 80 nm și grosimea foliei nanostructurate de 40 nm;
 - 2) protoni, este conul cu nanosfere, pentru polarizările liniară și circulară.
- Am comparat distribuția câmpului electromagnetic obținută prin metoda FDTD cu cea obținută cu metoda PIC și avem aceeași scădere bruscă a valorilor lui E_x de la folia nanostructurată cu diametrul nanosferelor de 30 nm la o folie nanostructurată cu diametrul nanosferelor de 40 nm
- Am determinat formule analitice ce descriu matematic profilul densității în cazul unei ținte conice cu nanosfere, care mai apoi sunt transpuse într-un algoritm matematic simplu.

PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

Această teză de doctorat creează importante perspective de dezvoltare și continuare a cercetării în domeniul accelerării de particule în urma interacției unui puls laser ultraintens cu țintele con și foliile plane:

- Prin folosirea simulărilor PIC tridimensionale, în urma cărora se pot obține rezultate mai adecvate și concludente ale energiilor protonilor și ionilor de carbon accelerați.
- Prin transpunerea într-un cod de calcul a algoritmului obținut pentru descrierea profilului densității în cazul conurilor cu nanosfere.
- Prin utilizarea rezultatelor obținute care se intenționează a fi folosite în viitoarele experimente de la ELI-NP.