

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Lézerfizika, Nemlineáris Optika és Spektroszkópia
Program



Lézeraktív, hullámvezető és elektrongyorsító plazmaközeg vizsgálata saját fejlesztésű kapilláris Z-pinch specifikus MHD modell alkalmazásával

Doktori disszertáció

Sapolov Anatolij

Témavezető:

Kuhlevszkij Szergej, DSc

Pécs, 2019

1. Előzmények és célkitűzések

Z-pinch, a plazmafizika talán legrégebbi tárgya, napjainkban ismét a kutatócsoportok figyelmének középpontjába került. Z-pinchnek nevezzük a mágnesesen szabályozott (csapdázott) plazmák speciális osztályát, ahol a plazmaoszlopon átfolyó áram z -tengely irányú. Az önindukált mágneses tér és a tengelyirányú áram kölcsönhatásából egy befelé mutató sugárirányú $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ magnetomotoros erő lép fel, amely a plazmaoszlop összehúzóhatását eredményezi (pinch hatás). A Z-pinch óriási előnye, hogy nagy mennyiségű és energiasűrűségű plazmát lehet vele előállítani. A kutatócsoportok fokozott érdeklődésének hátterében többek között ez, és a kompaktság áll. Amióta felépítettük és folyamatosan fejlesztjük a kb. 20 kA amplitúdójú és 150 ns félperiódusú áramimpulzussal gerjesztett lágyröntgenlézert [1, 2]

érdekünk volt, hogy elméleti síkon megértsük milyen fizikai folyamatok zajlanak le a 3 mm belső átmérőjű Al_2O_3 -kapillárisban keltett Z-pinch plazmában.

A megértés praktikussága szempontjából, fontosak voltak a kidolgozandó modellel szemben fektetett következő elvárások:

- a rendelkezésre álló eszközök véges számítási kapacitás adta lehetőségekhez képest, az adott problémakört maximálisan merítse ki;
- az ismeretlen plazmaparaméterek a tér is idő függvényei legyenek;
- a kísérleti eredményekkel való direkt összehasonlíthatóság végett, a plazmaparaméterek makroszkopikus mennyiségek legyenek.

Ezeknek leginkább az MHD modell felelt meg, amely a plazmát töltéssel rendelkező folyadékként ír le. Bár a

szakirodalomban számos MHD alapú plazmamodell létezik (lásd pl.: [3, 4, 5, 6, 7, 8]), illetve szabad forrású online kód áll a rendelkezésre, de mivel az utóbbiak túlnyomó része fúziós, asztrofizikai és általános plazmákra lett kifejlesztve, kapilláris Z-pinch plazma speciális esetére egyik sem használható. Azonban, egy jó kiindulási alapot képez a plazmában lezajló három fundamentális transzportfolyamat, amely a Z-pinchre jellemző feltételezések mellett a kívánt konfigurációnak megfelelően átalakítható.

Megmutatom, hogy a plazmában lezajló három fundamentális transzportfolyamatból (részecske-, impulzus- és hőtranszportból) kiindulva kifejleszhető egy kapilláris Z-pinch specifikus 0D illetve 1D MHD modell. Számolt eredmények és mért pinchidő összehasonlításával ellenőrzöm a két modell dinamikai hitelességét.

A nagy áttörést Rocca *et al.* [9] munkássága jelentette, akik 4 mm belső átmérőjű kapillárisban 40 kA csúcsáramú és 60 ns felfutású kisüléssel populációinverziót ért el a neonszerű Ar^{+8} -ionok 46,9 nm-nek megfelelő $J = 0 - 1$ energiaátmeneten. Három különböző kisülési hosszal próbálkozott: 3, 6 és 12 cm, és mindegyik esetben a G erősítésre $0,6 \text{ cm}^{-1}$ kapott. Így, a leghosszabb kapilláris eredményezte a legnagyobb 7,2-es G_l értéket. Lézersugárzás pillanatában a pinch sugara 100...150 μm körüli volt, ami az alsó energiaszint kiürítését nagymértékben akadályozta, ezért ennek csökkentése érdekében hidrogén puffergáz 1:2 arányú keverékét használta. Más puffergázokkal is próbálkozott, mint pl.: Ne, de 0,7 Torr optimális nyomásra beállított tiszta Ar is jól sugárzott. Tehát, a lézeraktivitás eléréséhez forró, sűrű és axiálisan egyenletes eloszlású

(instabilitásmentes) plazmára, illetve ütközéses gerjesztés végett, megfelelően gyors áramfelfutásra volt szükség.

Neonszerű Ar^{+8} -ionok 46,9 nm-es spektrumvonalának $G(r)$ radiális erősítéseloszlása függ a plazma hőmérsékletétől és sűrűségétől, ezért az időátlagolt transzmisszió-eloszlás és a lágryöntgenlézer-sugárzás transzverzális intenzitáseloszlásának összehasonlításával ellenőrzöm az 1D MHD modell térbeli hitelességét is.

A kapilláris Z-pinch egy másik, talán még fontosabb tulajdonságát, olyan plazmacsatorna formázásához használják, amely axiálisan egyenletes eloszlású és a tengelynél lokális sűrűségminimummal rendelkezik. Az ilyen csatorna nagy intenzitású rövid impulzusok hullámvezetésére alkalmas. Több kutatócsoport kísérletileg is bizonyította, hogy lézeres

elektrongyorsítás 200 MeV nagyságrendig már néhány mm-es hélium gázjetben is lehetséges [10, 11, 12]. Ezt megelőzően, Pukhov és Meyer ter Vehn [13] szimulációkkal mutatták meg, hogyan lehet monoenergetikus elektronnyalábokat gyorsítani Tajima és Dawson [14] által javasolt wakefield sémával, ahol a töltésszeparáció okozta elektromos térerősség akár 10...100 GV/m nagyságrendű is lehet. Kapilláris Z-pinch hullámvezető alkalmazásával lényegesen megnő a gyorsítási úthossz, ugyanis csatorna nélkül az interakciós hossz felső korlátja a Rayleigh-hossz nagyságrendjébe esne, ami a fókuszolt méretével arányos. Leemans *et al.* [15] 1 GeV nagyságrendű monoenergetikus elektronnyaláb demonstrálásáról számolt be, amit 3,3 cm hosszú hidrogénnel töltött kapilláris kisülésben valósított meg, 40 TW csúcsteljesítményű, 1 μm központi

hullámhosszúságú és 38 ps félértékszélességű lézerimpulzus alkalmazásával.

Megmutatom, hogy a zsugorodó Z-pinch plazmaoszlopban tranziens módon mindig kialakul egy hullámvezetésre alkalmas csatorna, amely, lézeres wakefield elektrongyorsítás szempontjából fontos, egymódusú átvitelre is alkalmas. Ez a tulajdonság erősen függ a belépő lézernyaláb foltméretétől, ezért célom egy optimális foltméret meghatározása, amelynél az egymódusú átvitel maximálisan kihasználható. Megmutatom, továbbá, hogy a hullámvezető csatorna fennállása végén a lézernyaláb intenzitáseloszlásban mindig megfigyelhető egy ismétlődő fókuszálási-defókuszálási mintázat. Ez a hullámvezetési üzemmód a belépő TEM_{00} módusú lézerimpulzus intenzitásmodulációjához vezet. Végül, megvizsgálom,

hogy ez az intenzitásmoduláció milyen hatással van a plazmaoszillációra és következésképpen az elektronokat gyorsító longitudinális elektromos térerősségre (wakefieldre).

2. Módszerek

A modellépítési koncepcióm az volt, hogy a plazmákban lezajló fundamentális transzportfolyamatokból (részecske-, impulzus és hőtranszport) [3, 4, 5] kiindulva egyenletek összevonásával, szimmetriákból adódó dimenziócsökkentéssel és inszignifikáns tagok elhanyagolásával a lehető legegyszerűbb modellt alkossam meg összhangban a kísérleti tapasztalatokkal. Ez azért volt fontos, mert véges számítási kapacitás tekintetében a plazmaparaméterek közötti összefüggések megismerése a legegyszerűbb modellel a leghatékonyabb.

Az alapösszefüggések elsajátítását követően a következő lépés a paraméterek térbeli eloszlásának a megismerése volt. Ehhez növelnem kellett a modell szabadsági fokát radiális változó bevonásával.

Az 1D MHD modellel végzett gyors Z-pinch kisülési szimulációk szerint, tranziens módon mindig létrejön egy hullámvezetésre alkalmas plazmacsatorna. A csatorna tulajdonságait egy 3 mm belső átmérőjű és 50 mm hosszú kapillárisban gerjesztett Ar-plazma esetén vizsgáltam meg $1,3 \times 10^{15}$ W/cm² bemeneti csúcsintenzitással rendelkező CO₂-lézerimpulzus 10,6 μm-es központi hullámhosszán. A hullámvezető csatorna a kapilláris falától távol jön létre, ami a falak befolyásától mentes, tiszta plazmavezetést tesz lehetővé. A csatorna fennállása végén az intenzitáseloszlásban egy ismétlődő fókuszálási-defókuszálási mintázatot

(intenzitásmodulációt) figyelhető meg a fókuszpontokban jelentős intenzitásnövekedéssel.

Hidrogén plazmacsatornában végzett sűrűségperturbációs modellezés szerint, a wakefield keltésre alkalmas nagy intenzitású (10^{17} W/cm²) lézerimpulzus intenzitásmodulációja lebegés formájában a plazmahullámszámításban is megjelenik. A plazmahullám amplitúdója, töltésszeparáción keresztül, kapcsolatban áll a longitudinális gyorsítótérrel, ezért a lebegés hatása megjelenik a gyorsítandó részecskék energiájában is. Ennek kimutatása céljából 10^5 db elektronra elvégeztem egy öninjektált buborékgyorsítási mechanizmus PIC szimulációját, amihez 0,5 ps hosszúságú és 10^{18} W/cm² bemeneti intenzitásmaximummal rendelkező CO₂-lézerimpulzust alkalmaztam.

3. Új tudományos eredmények

1. A plazmában lezajló három fundamentális transzportfolyamatból (részecske-, impulzus- és hőtranszportból) kiindulva kifejlesztettem egy „egyfolyadékos” két hőmérsékletű kapilláris Z-pinch specifikus 0D és 1D MHD modellt összhangban a szakirodalommal és a kísérleti tapasztalatokkal. Különböző paraméterbeállítás számolt és mért pinchidejének összehasonlításával ellenőriztem a modellek dinamikai hitelességét [S1].
2. Megmutattam, hogy a plazmaoszlop neonszerű Ar^{+8} -ionjainak 46,9 nm-es spektrumvonalára számolt időátlagolt transzmisszióeloszlás összhangban van a különböző gáznyomáson megfigyelt lágyröntgenlézer-sugárzás transzverzális

intenzitáseloszlásával [2]. Ezzel, ellenőriztem az 1D MHD modell térbeli hitelességét is [P4, P7].

3. Az 1D MHD modellel szimulált gyors Z-pinch kísérletek eredményei szerint, a használt gáztól függetlenül [P2], tranziens módon (5...10 ns-ig) mindig kialakul egy hullámvezetésre alkalmas plazmacsatorna. Megmutattam, hogy korrelációs tényező bevezetésével meghatározható egy optimális fojtóméret, amelynél a csatorna, lézeres wakefield gyorsítás szempontjából fontos, egymódusú átviteli képessége maximalizálható [S2, E1].
4. Elvégezve egy vizsgálat sorozatot, arra a következtetésre jutottam, hogy a Z-pinch hullámvezetés fennállása végén, amikor az optimális fojtóméret meghaladja az elméleti illesztett

foltméretet, az alkalmazott lézerektől és gázoktól függetlenül, mindig létrejön egy ismétlődő fókuszálási-defókuszálási (intenzitásmodulált) hullámvezetési mód. Ilyenkor, a fókuszpontok maximális intenzitása a bemenetinek akár a többszörösét is elérheti [S2, E1, P2, P5].

5. Plazmaoszcilláció spektrumával igazoltam, hogy a hullámvezető csatorna okozta intenzitásmoduláció lebegés formájában megjelenik a plazmahullámok amplitúdóján. Mivel az utóbbi, töltésszeparáción keresztül, kapcsolatban áll a longitudinális gyorsítótérrel, a lebegés hatása megjelenik a gyorsítandó részecskék energiájában is [S3, E1].
6. Öninjektált buborékgyorsítási mechanizmus PIC szimulációjával megmutattam, hogy a gyorsítás során az elektronok energianyeresége kaszkádos, és

ez a folyamat kvázi-szinkronban van a lézérimpulzus intenzitásmodulációjával [S3, E1].

4. A disszertációhoz kapcsolódó publikációk

- [S1] **A.A. Shapolov**, M. Kiss and S.V. Kukhlevsky, *A Simplified MHD Model of Capillary Z-Pinch Compared with Experiments*, *Contrib. Plasma Phys.* **56**, 10, 959-967 (2016).
- [S2] **A.A. Shapolov**, M. Kiss and S.V. Kukhlevsky, *Theoretical Investigation of Z-Pinch Ar-Plasma Waveguide in a Millimeter-Scale Cross Section Capillary*, *IEEE Transactions on Plasma Science* **46**, 11, 3886-3890 (2018).
- [S3] **A.A. Shapolov**, B. Fekete, M. Kiss, S. Szatmari and S.V. Kukhlevsky, *Theoretical Study of Wakefield Acceleration of Electrons in Capillary Z-Pinch Plasma Waveguide*, *Proceedings of 3rd International Conference on Engineering Physics and Optoelectronic Engineering* (2019), pp. 1-10. (publikálásra befogadva 2018. december 7.)
- [E1] **A.A. Shapolov**, B. Fekete, M. Kiss, S. Szatmári and S.V. Kukhlevsky, *Waveguiding of the high intensity laser pulse in a hydrogen Z-pinch plasma and its influence on the LWFA in the bubble regime*, 4th Global Summit & Expo on Laser Optics & Photonics, 15-16 April 2019, Dubai, UAE.

- [P2] **A.A. Shapolov**, B. Fekete, M. Kiss, S. Szatmari and S.V. Kukhlevsky, *Optimization of the Excitation Current Pulse of Capillary Z-pinch Plasma Waveguide by Using Different Gases*, 28th Symposium on Plasma Physics and Technology (SPPT 2018), 18-21 June 2018, Prague, Czech Republic.
- [P4] **A.A. Shapolov**, B. Fekete, M. Kiss, S. Szatmari and S.V. Kukhlevsky, *Two MHD models of capillary Z-pinch argon plasma versus experiments regarding the lasing in 46,9 nm line of Ar⁺⁸ ions*, 19th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2018), 4-8 June 2018, Vancouver, Canada.
- [P5] **A. Shapolov**, B. Fekete, M. Kiss, S. Szatmari and S.V. Kukhlevsky, *Waveguide properties of the capillary Z-pinch plasma*, 45th IOP Plasma Physics Conference, 9-12 April 2018, Belfast, UK.
- [P7] **Anatoliy A. Shapolov**, M. Kiss and Sergei V. Kukhlevsky, *Study of the X-ray radiation gain in context of MHD modeling of capillary discharge plasma*, 3rd International Workshop on Frontiers of X&XUV Optics and its Applications, 4-6 October 2017, Prague, Czech Republic.

5. Hivatkozások

- [1] J. Szasz, M. Kiss, I. Santa, S. Szatmari and S.V. Kikhlevsky, *Contrib. Plasma Phys.* **52**, 770 (2012).
- [2] J. Szasz, M. Kiss, I. Santa, S. Szatmari and S.V. Kikhlevsky, *Phys. Rev. Lett.* **{\bf 110}**, 183902 (2013).
- [3] S.I. Braginskii, *Transport Processes in a Plasma*, (Consultants Bureau, New York, 1965), pp. 205-253.
- [4] N.A. Krall and A.V. Trivelpiece, *Principles Of Plasma Physics*, (McGraw-Hill, Inc., Tokyo 1973).
- [5] V.N. Shlyaptsev *et al.*, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* **2012**, Ultrashort Wavelength Lasers II (1994), pp. 99-110.
- [6] J.D. Huba, *NRL Plasma Formulary*, (Naval Research Laboratory, Washington DC, 1994), pp. 36-39.
- [7] J.D. Callen, *Fundamentals of Plasma Physics*, (University of Wisconsin, Madison, 2003).
- [8] P.V. Sasorov, N.A. Bobrova and O.G. Olkhovskaya, *The two-temperature equations of*

magnetic hydrodynamics of the plasma, (Keldysh Institute preprints, 2015), pp. 1-21.

- [9] J.J. Rocca *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 2192 (1994).
- [10] S.P.D. Mangles *et al.*, Nature **431**, 535 (2004).
- [11] C.G.R. Geddes *et al.*, Nature **431**, 538 (2004).
- [12] J. Faure *et al.*, Nature **431**, 541 (2004).
- [13] A. Pukhov and J. Meyer ter Vehn, Appl. Phys. B **74**, 355 (2002).
- [14] T. Tajima and J.M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979).
- [15] W.P. Leemans *et al.*, Nature Phys. **2**, 696 (2006).