

A Központi Fizikai Kutató Intézetben (KFKI) az alapítás óta folytak optikai és spektroszkópiai kutatások. A kutatások során szerzett ismeretek és a kiépített infrastruktúra teremtették meg annak alapját, hogy az Intézet az országban elsőként tudott bekapcsolódni a gázlézerek kutatásába, és ezen a területen később számos nemzetközileg is elismert eredményt mutatott fel. A következőkben áttekintjük a KFKI Fizikai Optikai Laboratóriumában, majd az SZFKI Lézerfizikai Osztályán folyó, gázlézerekkel, illetve gázkisülésekkel kapcsolatos kutatásokat, hangsúlyt helyezve ezek történelmi vonatkozásaira és fizikai alapjaira is.

A lézerek működése a fénysugárzás *indukált emisszióval* történő erősítésén alapul (a LASER angol mozaikszó, a *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* rövidítése). Az *indukált emisszió* során egy foton egy gerjesztett állapotú atommal (vagy molekulával) kölcsönhatva azt sugárzásra bírja. E folyamat lehetőségét *Einstein* vetette fel 1917-ben. Ahhoz, hogy az indukált emisszió az atomok *spontán emissziója* mellett lényegesen válhassék, el kell érni, hogy valamely magasabban fekvő energiájú állapotban több atom tartózkodjon, mint az alacsonyabban fekvő állapotokban. Ezt a feltételt – mivel termikus egyensúlytól eltérő állapotnak felel meg – nehéz teljesíteni, ugyanis a különböző energiájú állapotok betöltésére vonatkozó Boltzmann-eloszlás szerint egyensúlyi rendszerben egy magasabban fekvő E_2 energiájú állapotban egy alacsonyabb E_1 energiájú állapothoz képest

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

számú atom tartózkodik, ahol $\Delta E = E_2 - E_1$ a két nívó energiájának különbsége, k a Boltzmann-állandó és T a hőmérséklet.

Gázkeverékekben létrehozott elektromos kisülések fénykibocsátásának vizsgálata során már az 1930-as években felfigyeltek egyes spektrumvonalak intenzitásának anomális megerősödésére. A megfigyelt jelenséget azzal lehetett magyarázni, hogy az egyik gáz gerjesztett állapotú atomjai szelektíven populálják a másik gáz atomjainak egyes energianívóit. Ez a szelektív gerjesztés tehát lehetővé teszi a lézerműködéshez elengedhetetlenül szükséges *populációinverzió* létrehozását. Ezek a megfigyelések kevéssé jutottak be a tudományos köztudatba, így még az 1950-es években megjelent *Encyclopedia of Physics* egyik összefoglaló cikke is azt állítja, hogy gázkisülésekben az indukált emisszió folyamata elhanyagolható.

A sugárzás indukált emisszióval való erősítést először a mikrohullámú tartományban oldották meg, ennek ered-

ményeképpen született meg 1954-ben a MASER (*Micro-wave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Még hat évnek kellett eltelnie addig, amíg az optikai tartományban is megvalósult egy hasonló elven (és a MASER-rel ellentétben nyitott rezonátorban) működő eszköz, az első rubinlézer. Egy évvel később épült meg az első gázlézer (1961), amely hélium- és neongázok keverékében működött, 1,15 μm infravörös hullámhosszon [1]. A KFKI-ban ezt hamar követte az első magyarországi gázlézer megépítése [2, 3], amely 1963. december 6-án kezdett el működni. A lézer fényképe az 1. ábrán látható.

Az első, vörös fényt sugárzó (632,8 nm hullámhosszon működő) He–Ne lézer 1965-ben épült meg a KFKI-ban. Később kidolgozták különböző teljesítményű (5–50 mW) típusok gyártási technológiáját, illetve az évek során 40–50 darabot gyártottak ezekből. Azokban az években, amikor külföldről lényegében lehetetlen volt ilyen eszközöket beszerezni, a KFKI-ban gyártott lézerek számos hazai kutatóintézetben és egyetemen segítettek a kutatómunkát, emellett megkezdődött a lézerek orvosi felhasználása is. E lézerek nagy részét még ma is használják.

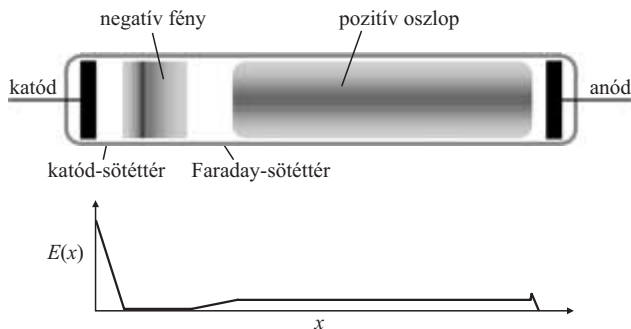
A lézerműködés közege: alacsony hőmérsékletű gázkisülési plazmák

A He–Ne lézer (és a többi később tárgyalt gázlézer) gerjesztési mechanizmusa alacsony nyomású gázokban elektromos árammal keltett *plazmában* lejátszódó ütközési folyamatokon alapul. Az alkalmazott kisülések az úgynevezett *kődfénykisülés* tartományában működnek. A lézercső megfelelő geometriai kialakításával elérhető, hogy a gázkisülési plazma azon része, amelyben a sugárzás erősíthető, az optikai tengely mentén helyezkedjen el. Mielőtt a lézer gerjesztési mechanizmusával foglalkoz-

1. ábra. Az első magyar hélium–neon gázlézer fényképe. A fényerősítés az optikai padon rögzített kvarcüveg-csőben a külső elektródás nagyfrekvenciás térerrel keltett kisülési plazmában jött létre. A lézerműködéshez szükséges visszacsatolást a cső két oldalán egymással pontosan szembeállított nagy reflexiójú ezüsttükörök biztosították. Háttérben a vákuum- és gáztöltő rendszer látható.



A Magyar Tudományos Akadémián 2004. szeptember 29-én *Kroó Norbert* akadémikus tiszteletére rendezett tudományos ülésen elhangzott előadás szerkesztett változata.

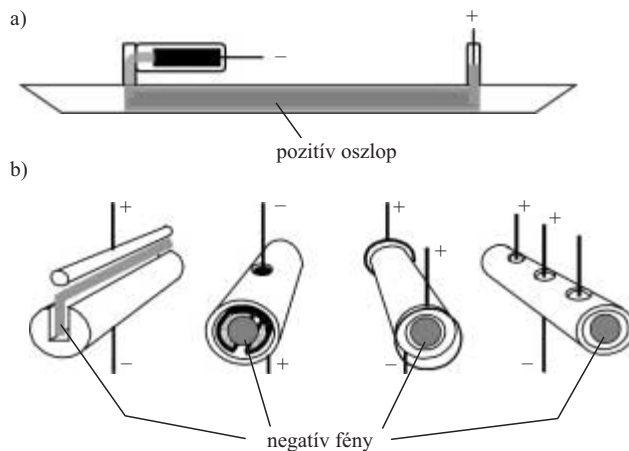
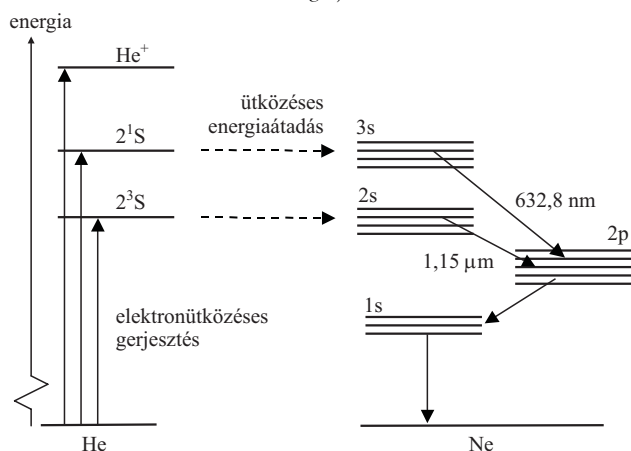


2. ábra. Az ábra felső részén az alacsony nyomású nemesgázban létrehozott ködfénykisülés jellegzetes térbeli szerkezetét láthatjuk. Az ábra első része az elektromos térerősség helyfüggését mutatja.

nánk, először röviden tekintsük át az alacsony nyomású gázkisülések fő jellemzőit és működésüknek alapjait. A 2. ábrán vázolt gázkisülési csőben alacsony (néhány mbar) nyomású gáz van. A kisülési cső elektrodáira megfelelően nagy (~300–1000 V) feszültséget kapcsolva önfenntartó ködfénykisülést hozhatunk létre, amely jellegzetes térbeli tagozódást mutat. A kisülésnek több világító és sötét térrésze jöhet létre, amelyeknek a fizikai paramétereit igen eltérők [4, 5]. Lézerek céljára kézenfekvően a világító térrészek jöhetnek szóba, ugyanis ezekben számíthatunk a fénysugárzás erősítésére.

A katód közvetlen közelében megjelenik a *katód-sötétter*; amely nagy és közel lineárisan csökkenő elektromos térrel jellemezhető. Itt a pozitív ionok jelentős tértöltést hoznak létre. A katódból (nagyrészt a pozitív ionok becsapódásának hatására) kilépő elektronok a nagy elektromos térben felgyorsulnak, energiamérlegük pozitív, azaz az elektromos tértől több energiát nyernek, mint amennyit az ütközések során elveszítenek. A katódtól távolodva következő térrészben, a *negatív fényben* az elektromos térerősség igen kicsi. Itt az ionizációért és a hatékony gerjesztésért a katód-sötétterből belépő gyors elektronok felelősek. Az anód felé tovább haladva kialakul a *Faraday-sötétter*; majd pedig a *pozitív oszlop* tartománya. Ez utóbbi tetszőleges hosszúságú lehet, gyakorlatilag semleges plazma alkotja, benne a kis (tengelyirányú) elektromos térerősség olyan mértékű ionizációt biztosít, amennyi a töltések radiális irányú veszteségeinek fedezéséhez szükséges [4]. A számunkra érdekes

4. ábra. A He–Ne lézer gerjesztési mechanizmusa.



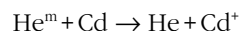
3. ábra. Lézerek céljára alkalmas a) pozitív oszlopú és b) üreges katódú kisülési elrendezések (-: katód-, +: anódelektrodák).

kisülésekben az áramot elektronok és (egyszeres) pozitív töltésű ionok hordozzák. A lézerek gerjesztésében – mint később látni fogjuk – különböző töltött és semleges részecskék ütközési játszanak központi szerepet.

Pozitív oszlopú és üreges katódú lézerek

A He–Ne lézerben a kisülés pozitív oszlopú részét használjuk fényerősítő közegként. A lézercső kialakítását a 3. ábra, míg a lézer gerjesztési sémáját a 4. ábra szemlélteti. Az 1,15 μm -es hullámhosszúságú sugárzás esetében a populációinverziót az elektronok és az alapállapotú He-atomok ütközéseiben keletkező 2^3S metastabil He-atomok és alapállapotú Ne-atomok energiakicserélő ütközései hozzák létre, amelyek a Ne 2s állapotát szelektíven populálják. Megjegyzendő, hogy ez utóbbi ütközéstípus hatékonysága (hatáskeresztmetszete) erősen függ a megfelelő szintek energiarezonanciájától, így ily módon csak egyes meghatározott Ne-nívók gerjesztődhetnek. A vörös He–Ne lézerben He 2^1S atomok populálják a lézerátmenet felső nívóját, a Ne 3s szintet.

Az 1970-es években fontos szerepet kapott a fűtött fémionlézerek kutatása. Ilyen típusú lézerekre példaként a kék ($\lambda = 441,6 \text{ nm}$) fényt sugárzó He–Cd⁺ lézer említhető, amely ugyancsak a gázkisülés pozitív oszlop térrészében működik. Lézerműködést a Cd⁺-ion több spektrumvonalán hoztak létre [6], a szelektív gerjesztés mechanizmusa a



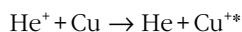
Penning-ionizációs folyamat (He^m metastabil állapotú héliumatomokat jelöl). A szükséges Cd fémgőz-koncentrációt egy, az anód környékén elhelyezkedő Cd-fém tartalmú kályha biztosította. A kisülésbe jutva a Cd-atomok az alacsony ionizációs potenciál miatt könnyen ionizálódtak, és a pozitív oszlopú plazmában (azaz a lézer aktív közegében) a katód felé haladva a kisülésben egyetlen fémgőzsűrűség alakult ki.

A 70-es és 80-as évek központi témaköre az *üreges katódú lézerek* kutatása volt (3. b és 5. ábra). A lézerek ezen típusában a kisülés negatív fénye használható fel aktív térrészként, *üreges katódú* kisülési elrendezések

ben. Az üreges katódokban egymással szembenálló katódfelületek találhatók (pl. egy hengeres alakú katód belsejében), és olyan járulékos folyamatok léphetnek fel, amelyek jelentősen módosíthatják a kisülés tulajdonságait [7]. A legfontosabb folyamat a gyors elektronok oszcilláló mozgása a szemben elhelyezkedő katódfelületek között kialakuló potenciálvölgyben [8, 9], ami az ionizáció nagymértékű növekedéséhez vezethet, jelentősen növelve a kisülés áramát. Míg a kisülések pozitív oszlopában a gerjesztésben résztvevő elektronok energiaeloszlása közelítőleg Maxwell-típusú (tipikusan néhány eV energiával), addig a negatív fényben sokkal nagyobb energiájú elektronok is jelen vannak, amelyek energiáját csak a katódosésnek megfelelő feszültség (tipikusan 300–1000 V) korlátozza. Ezek a nagyenergiájú elektronok jó lehetőséget adnak magasan fekvő atomi és ion-energiaszintek gerjesztésére.

Az üreges katódú lézerek három nagy csoportját a következő típusok jelentik: i) nemesgáz-keverék lézerek, ii) fűtött fémionlézerek, valamint iii) katódporlasztásos fémionlézerek. Nemesgáz-keverék lézerekre példaként a He–Ar⁺, He–Kr⁺, valamint a He–Ne–Xe⁺ típusok említhetők [10–12]. A fűtött fémionlézerek közül az üreges katódú He–Cd⁺ és He–Zn⁺ lézerek voltak jelentősek. Intézetünkben mutatták ki, hogy a kisülés égési feszültségét, a többi elektromos paramétertől függetlenül, a kisülés geometriájával változtatni, optimalizálni lehet. Ezen elv alkalmazásával számos új lézertípusot fedeztek fel. A 3. b ábra néhány gyakran használt üreges katódú elektróda-konstrukciót mutat.

A 70-es évektől kutatott lézerek közül külön ki kell emelni a katódporlasztás révén működő fémionlézereket – az első ilyen elven működő lézert a KFKI-ban fedezték fel [13]. A lézer felfedezése lényegében véletlennek köszönhető: rézből készült üreges katódú kisülésben He–Ne lézert vizsgáltak, amikor a kilépő sugárzás teljesítményét mérő műszer jelentős értéket jelzett anélkül, hogy látható sugárzást figyelhetek volna meg. A sugárzás hullámhosszát megmérve az 780,8 nm-es „váratlan” értéknek adódott, amely egy Cu-II ionátmenet. Az átmenet felső nívója energiarezonanciában áll a He⁺-ion alapállapotával, így a lézer szelektíven gerjesztődhetett a



(közel) rezonáns töltéscserélő folyamattal (lásd 6. ábra). A gerjesztéshez szükséges rézatomokat a plazmából a katódot bombázó nemesgázionok porlasztó hatása juttatja a kisülésbe. Ily módon a szükséges fémgőzkoncentráció nehezen elpárologtatható fémek esetében is szobahőmérsékleten előállítható. Az eredmények publikálását (1974) követően számos külföldi (NSZK, USA-beli) kutatócsoport kezdett el foglalkozni katódporlasztásos fémionlézerekkel. Ezek a laboratóriumok hamarosan ultraibolya tartományba eső fémionátmeneteken is létrehoztak lézereket, ezeken az átmeneteken az SZFKI-ban csak évekkel később sikerült elérni lézerműködést. Az Intézetünkben kidolgozott, *szegmentált üreges katódú kisülésben* [14–16] azonban a lézer hatásfoka jelenleg a legnagyobb, az irodalmi adatokkal összehasonlítva.



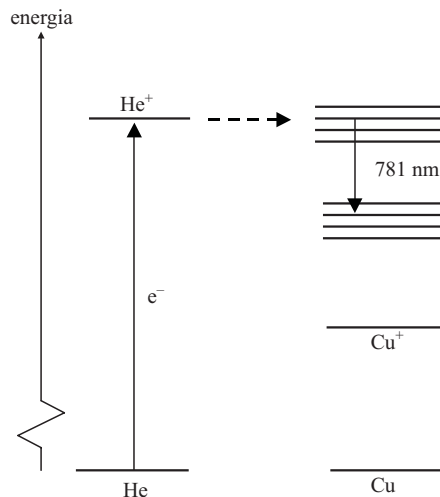
5. ábra. A gázlézer laboratórium az 1980-as években. A képen János Mibály dolgozik az üreges katódú He–Kr⁺ lézerrel.

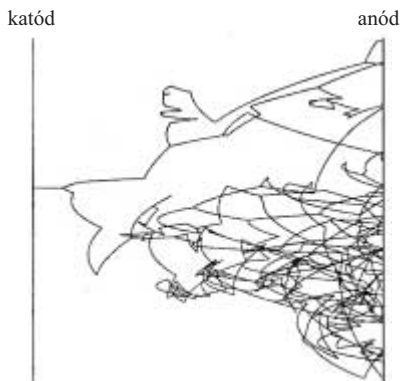
A szilárdtest- és félvezetőlézerek előretörése miatt a gázlézer kutatásának az utóbbi évtizedben a távoli ultraibolya hullámhosszknál volt jelentősége. Jelenleg a 224 nm-es hullámhosszon működő ezüstionlézert tanulmányozzuk. Ez a lézer viszonylag olcsó fényforrás lehet a Raman-spektroszkópia céljaira; a rövid hullámhossz nagy hatásfokú gerjesztést és jó hatásfokú detektálást tesz lehetővé, továbbá kiküszöbölhetővé teszi a zavaró fluoreszcenciajelet, ami egyes szerves anyagok (pl. gyógyszerek) vizsgálatánál alapvető fontosságú. A lézerrel 45 mW impulzusüzemű teljesítményt értünk el [17].

Alacsony hőmérsékletű plazmák kutatása

Mint láttuk, a gázlézer működéséhez szükséges gerjesztési folyamatok plazmaállapotú közegben játszódnak le. Az itt használt ködfénykisülésekben létrejövő alacsony ionizáltsági fokú plazmát gázlézer gerjesztésére szolgáló közeg mellett napjainkban széleskörűen alkalmazzák számos más területen is, például a fényforrás-technológiában (fénycsövekben és kisülési lámpákban), spektroszkópiai fényforrásokban, valamint az integrált áramkörök gyártásának technológiai lépéseiben, különböző

6. ábra. A He–Cu⁺ lézer gerjesztési mechanizmusa.





7. ábra. Egy szimulált elektronlavina képe. A trajektóriákon a „törések” az egyes ütközéseknek felelnek meg, az „elágazások” az ionizációs folyamatokat (új elektronok keletkezését) mutatják. (A szimuláció paramétere: $U = 500$ V, $L = 1$ cm, azaz $E = 500$ V/cm és $p = 2,5$ mbar He.)

anyagok felületi tulajdonságainak módosításánál (szuperkemény, vagy biokompatibilis felületek létrehozása). Az elmúlt évtized során az alacsony hőmérsékletű plazmák kutatása az Osztyálon önálló kutatási területté vált.

A ködfénykisülések egyes térrészeinek leírására számos próbálkozás történt analitikus módszerekkel. A XX. század első fele és közepe időszakából legsikeresebbként a pozitív oszlop Schottky-féle elmélete, illetve *Little* és *von Engel* katód térrészre kidolgozott elmélete említhető (lásd pl. [4]). Az elmúlt 1–2 évtizedben a széles körben hozzáférhetővé vált számítástechnikai lehetőségek ezen a területen is számos nyitott kérdés megválaszolásához adtak segítséget: lehetővé vált a töltött részecskék mozgásának kinetikus elmélet szerinti leírása, elsősorban direkt szimulációs módszerekkel. Numerikus módszerek alkalmazásával számos olyan jelenség kvantitatív kezelése vált lehetővé, amelyeket előzőleg csak kvalitatív módon sikerült megérteni. Példaként említhető a gázkisülés-fizika egyik legelemibb jelenségének, a gázkisülések begyújtásának a vizsgálata, amely korrekten csak numerikus módon írható le [18]. Az eredmények lehetővé tették a korábbi „klasszikus” modellek pontosítását, kiterjesztését, valamint a lézerek esetében a kísérleti megfigyelések kvantitatív értelmezését.

A kinetikus elméletnek megfelelő transzportleírás alapjául a Boltzmann-egyenlet, vagy a részecskeszimulációs megközelítés szolgálhat. A Boltzmann-egyenlet általános alakjában egy, a 6-dimenziós fázistérben felírt folytonossági egyenlet, és megoldása általános esetben (3-dimenziós, időfüggő probléma) igen nehéz (valós kisülésfizikai esetekben általában még ma is megoldhatatlan) feladat. Stacionárius megoldást keresve, illetve a térbeli dimenziószámot csökkentve (pl. 1-dimenziós, vagy hengerszimmetrikus rendszert feltételezve) az egyenlet egyszerűbb alakra hozható. Megoldására azonban ezekben az esetekben is bonyolult numerikus módszereket használnak, a problémák analitikusan nem kezelhetők. Az alternatívát jelentő szimulációs módszerek, például a Monte Carlo szimuláció, egyes részecskék követésén alapulnak, és a sokaságra jellemző paramétereket az egyes részecskék jellemzőinek átlagolásával adják meg. Ily módon a szimuláció alkalmazásával valós képet kaphatunk a lejátszódó folyamatokról, egyszerűen vizsgálható az események statisztikája.

Részecskeszimulációs módszerek segítségével számos gázkisülési plazmát modelleztünk, például nemesgázkeverék-kisülésekben [19], üreges katódú és nagyfeszültségű kisülésekben [20], valamint lézerek céljára szolgáló plazmaforrásokban [21]. Vizsgáltuk a gázban történő ionizációk során kialakuló elektronlavinák jellemzőit, megmutattuk, hogy az elektronlavinák fraktálszerkezettel rendelkeznek [22]. A lavinák statisztikáját vizsgálva arra a következtetésre jutottunk, hogy a gázok átütése (szigetelő fázisból vezető fázisba történő átmenete) a statisztikus fizikai értelmezés szerint kritikus jelenséggént írható le [23].

A Monte Carlo szimuláció során a részecskék

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = q \mathbf{E}$$

mozgásegyenletének integrálásával határozzuk meg a részecskék trajektóriáit (m és q a részecske tömege, illetve töltése, \mathbf{E} az elektromos térerősség). A részecskék mozgása során bekövetkező ütközések pozícióit az alábbi egyenlet adja meg, amelyet a fenti mozgásegyenlettel egyidejűleg integrálunk a pálya mentén:

$$\int_{s_0}^{s_1} n \sigma[\varepsilon(s)] ds = -\ln(1 - R_{01}),$$

ahol s_0 és s_1 az előző és a következő ütközés pozíciója a részecske pályája mentén, n a gáz sűrűsége, $\sigma = \sum \sigma_j$ az ütközési folyamatok hatáskeresztmetszeteinek összege, ε a részecske kinetikus energiája és R_{01} a $[0,1)$ intervallumon egyenletes eloszlású véletlen számot jelöl [24]. A szabad úthossz befutása után a részecske különböző ütközési folyamatokban vehet részt, az egyes folyamatok bekövetkezésének valószínűsége arányos az ütközési energiánál vett megfelelő hatáskeresztmetszet-értékekkel.

Ez a módszer azokban az esetekben használható, amikor (az alacsony ionizációs foknak köszönhetően) elhanyagolható a töltött részecskék közötti direkt kölcsönhatás (pl. elektron–elektron ütközések), és így csak a töltött részecskék (elektronok vagy ionok) transzportját kell leírni a semleges háttérgázban. A szimuláció természetesen lehetőséget ad arra, hogy az ionizációs folyamatokban keletkező újabb elektronokat is kövessük, így megfigyelhetjük a katódból induló elektronok által keltett elektronlavinákat. A 7. ábra erre mutat egy példát – az ábrán 2,5 mbar nyomású héliumgázban, $L = 1$ cm elektródátávolság és $U = 500$ V feszültség esetén láthatjuk egy elektronlavina Monte Carlo szimulációval kapott képét.

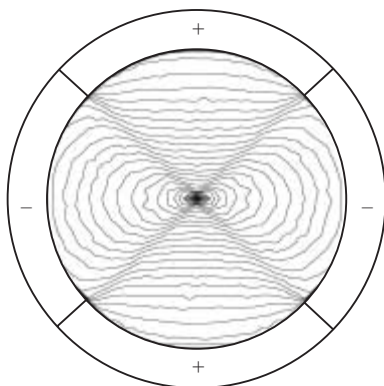
A szimulációkkal vizsgálható a kisülések időbeli felépülése, illetve a töltött részecskék kinetikája bonyolultabb elektródakonfigurációk esetében is. A 8. ábra egy lézercélú szegmentált üreges katódú kisülés [15] keresztmetszetében szemlélteti az ionizáció térbeli eloszlását. A kisülés négy elektróda között jön létre, a két katód és a két anód aktív felülete egy közös hengerpaláston helyezkedik el. A görbült katódfelületek a kisülés tengelye irányába fókuszálják a katódból kilépő, majd annak környezetében felgyorsult elektronokat, ahol az ionizációs for-

rás éles csúcsot mutat. Az erős fókuszálás a geometriai viszonyok mellett a szegmentált üreges katódú kísérletek nagy égési feszültségével (400–1000 V) magyarázható. Az ennek megfelelő energiákra felgyorsult elektronok szabad úthossza igen nagy (összemérhető a katódüreg átmérőjével), ugyanis az ütközési hatáskeresztmetszetek ebben az energiatartományban már lényegesen kisebbek a maximális értékeknél. A szimulációkkal megmutattuk, hogy a szabályozott feszültségű üreges katódú kísérletben a nagyobb feszültséget a töltéshordozók veszteségének növekedése eredményezi, ilyenkor növekszik az ionizáció a gyors elektronok hatására, továbbá közvetlen bizonyítékát tudtuk adni a kísérletben az oszcilláló elektronok jelenlétének [21].

Komplex kísérletek önkonzisztens leírását teszik lehetővé a részecskeszimulációs (Monte Carlo szimulációt) és hidrodinamikai leírást egyesítő 1- és 2-dimenziós önkonzisztens, úgynevezett *hibrid modellek*. (Önkonzisztens leírás alatt itt azt értjük, hogy a töltött részecskék olyan elektromos térben mozognak, amelyet a saját töltéssűrűségük is befolyásol.) Hibrid modellek alkalmazásával sikeresen vizsgáltuk gázkísülések különböző jelenségeit: öngerjesztett oszcillációkat, az elektródakonfiguráció hatását a kísérlet jellemzőire, az üreges katódú kísérletek létrejöttét, a katódporlás jelenségét, a kísérleti plazmák fénykibocsátásának térbeli eloszlását [25], a gázkísülések tranzienseit [26], illetve a He–Au⁺ lézer gerjesztési viszonyait [27].

Egy további kutatási területként megemlítendő a folyadékfelületen létrehozott atmoszférikus nyomású plazma felhasználása környezetvédelmi analitikai célokra [28, 29]: az elektrolitkatódos atmoszférikus nyomású ködfénykísülés (*Electrolyte Cathode Atmospheric Glow Discharge*, ELCAD) a vizek nehézfém tartalmának közvetlen meghatározására használható. Az utóbbi években részletesen foglalkoztunk ezen speciális kísérlet működési mechanizmusával. Értelmeztük az összetétel hatását a katódporlásra, vizsgáltuk a gáz- és elektronhőmérséklet-eloszlásokat, valamint a kísérlet gerjesztési viszonyait. E kutatások gyakorlati alkalmazásaként szubnanogramm érzékenységű többelemes fémdetektort építettünk kapilláris elrendezésű ELCAD-ban.

8. ábra. Az ionizáció tipikus térbeli eloszlása (forrásfüggvénye) ultraibolya lézerek céljára használt üreges katódú kísérlet keresztmetszetében [21]. (A kísérlet paraméterei: $U = 625$ V, $p = 15$ mbar He. A kísérlet közepén a sűrűsödő szintvonalak az igen intenzív ionizációt jelzik, –: katód-, +: anódelektrodák.)



Erősen csatolt plazmák kutatása

Az eddig tárgyalt plazmatípusokban a részecskék kölcsönhatásából származó potenciális energia elhanyagolható az $E_{kin} \sim kT$ kinetikus energiához képest, a két energiát arányát megadó *csatolási paraméter*, $\Gamma \ll 1$. Egyes nemklasszikus plazmákban viszont a kölcsönhatási (potenciális) energia (lényegesen) nagyobb lehet a kinetikus energiánál, és ekkor *erősen csatolt plazmákról* beszélünk, amelyekre $\Gamma > 1$. Erősen csatolt plazmákra példa a neutroncsillagok köpenyében, fehér törpecsillagokban, óriásbolygók belsejében található anyagállapot, ahol a teljesen ionizált atomok iontörzsei erősen csatolt rendszert alkotnak, miközben a degenerált állapotú elektronok egy semlegesítő háttérrel képeznek. Mesterségesen létrehozott erősen csatolt plazmákra példaként említhetők a csapdában tárolt ionok, amelyek esetében a hőmérséklet igen alacsony lehet, és így a rendszerek kristályos állapotba kerülhetnek [30].

A plazmák speciális (és egyre inkább az érdeklődés középpontjába kerülő) fajtáját képviselik a komplex plazmák, amelyekben az elektronok, ionok és semleges gázatomok (molekulák) mellett nanométer–mikrométer méretű részecskék is jelen vannak. Ilyen rendszerekre asztrofizikai példaként a csillagközi por, az üstökösök csóvája, a Szaturnusz és az Uránusz gyűrűi említhetők. A porrészecskék az ultraibolya sugárzás miatti elektronemisszió, vagy nagyenergiájú részecskékkel való ütközések hatására elektromosan töltötté válnak, így a plazma többi összetevőjével kölcsönhatásba kerülnek, és azokhoz hasonlóan reagálnak a külső elektromos és mágneses térre. Mivel a plazma egyéb összetevőihez képest az igen nagy méretű porrészecskék nagy töltést vehetnek fel, a porrészecskék gyakran erősen csatolt rendszert alkotnak, plazmakristályok keletkezhetnek, amint azt laboratóriumi kísérletekben is megmutatták.

Az erősen csatolt plazmák területén végzett munkánk Coulomb- és Yukawa-kölcsönhatási potenciállal jellemezhető sokrészecske-rendszerekben lejátszódó jelenségek nyomon követésére, különleges körülmények között található anyagok tulajdonságainak leírására irányul. A statikus termodinamikai jellemzők mellett a szimulációkkal vizsgáltuk az erősen csatolt rendszereket alkotó részecskék lokalizációját [31], valamint a rendszerek kollektív (dinamikus) jelenségeit [32, 33]. Nemegyensúlyi molekuladinamikai szimulációs módszerekkel meghatároztuk a rendszerek egyes transzportjellemzőit (nyíró viszkozitást és hővezetési együtthatót) [34, 35].

Összefoglalás, jelenlegi kutatási irányok

A gázlézerek területén jelenleg a He–Ag⁺ ($\lambda = 224$ nm) lézer kutatása és praktikus lézer fejlesztése a legfontosabb feladat, elsősorban Raman-spektroszkópiai vizsgálatokhoz. Az elektrolitkatódos atmoszférikus nyomású kísérlet esetén az egyre nagyobb érzékenység (kisebb kimutatható szennyezőkoncentráció) elérésén dolgozunk.

Az alacsony nyomású gázkísülések (kis ionizáltsági fokú plazmáinak) területén legfontosabb az önkonzisz-

tens, első elvekből kiinduló modellezési eljárások fejlesztése. Elsődlegesen a PIC (Particle-In-Cell) szimulációs módszerek [36] továbbfejlesztésére koncentrálnak. A PIC-módszer a töltött részecskék mozgását a klasszikus mozgásegyenlettel írja le, a részecskékre ható erő az elektromos térerősségből adódik, ezt pedig a töltött részecskék jelenléte és az elektródákra kapcsolt potenciál határozza meg. A mozgásegyenlet és a Poisson-egyenlet együttes megoldása biztosítja az eredmények önkonzisztens voltát. Egy évtizeddel ezelőtt csak az akkori szuperszámítógépek adtak lehetőséget ilyen modelleken alapuló számításokra, a módszer szélesebb körű elterjedése a számítástechnikai háttér igen gyors fejlődésének köszönhető.

Az erősen csatolt plazmák vizsgálata egy új, dinamikus fejlődő terület. Itt elsősorban a Coulomb- és Yukawa-kölcsönhatási potenciállal jellemezhető sokrészecske-rendszereket kutatjuk. Az eredményeknek a laboratóriumban létrehozott állapotok vizsgálata mellett asztrofizikai jelentőségük is van.

A jövőben tervezett kutatási témáink elsősorban alap-kutatás-motiváltak, de az itt szerezhető ismeretek az alkalmazások szempontjából is hasznosak lehetnek.



Az itt bemutatott, több évtizedet átfogó kutatásoknak a *Kroó Norbert*, majd *Kollár János* által vezetett MTA SZFKI adott, illetve ad otthont. A korábbi, illetve jelenlegi kutatásokat támogató szervezetek (OMFB, OTKA, NATO, MTA, NSF) mellett őket illeti köszönet a kutatómunka segítéséért és feltételeinek biztosításáért. Végezetül álljon itt azon kollégák neve, akik részt vettek az ismertetett munkában: *Apai Pál, Ádám Ferenc, Bakos József, Bánó Gergely, Bergou János, Császár György, Csillag László, Csonka Lajos, Ferencz Kárpát, Hartmann Péter, Horváth Péter, Jánossy Mihály, Kántor Károly, Kaspari Jánosné, Kutasi Kinga, Lutter András, Majorosi Antal, Mezei Pál, M. Császár Lili, Rózsa Károly, Rubin György, Salamon Tamás, Sárközi Elek, Szalai László, Szántó Sándor, Szigeti János, Thomanné Forgács Judit, Tóth József, Varga Péter.*

Irodalom

1. A. JAVAN, W.R. BENNETT, JR., D.R. HERRIOTT: *Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture* – Phys. Rev. Lett. 6 (1961) 106
2. *Magyar laser a Központi Fizikai Kutató Intézetben* – Magyar Nemzet 1963. dec. 15.
3. J. BAKOS, L. CSILLAG, K. KÁNTOR, P. VARGA: *Ezüsttűkrös nagyfrekvenciás gerjesztésű He-Ne laser* – KFKI Közlemények 13 (1965) 195
4. G. FRANCIS: *The glow discharge at low pressure* in Encyclopedia of Physics, XXII (1956) 53, Springer, Berlin
5. A. VON ENGEL: *Ionized Gases* – Clarendon Press, Oxford, 1965.
6. L. CSILLAG, M. JÁNOSSY, K. KÁNTOR, K. RÓZSA, T. SALAMON: *Investigations on a continuous wave 4416 Cd ion laser* – J. Phys. D: Appl. Phys. 3 (1970) 64
7. P.F. LITTLE, A. VON ENGEL: *The hollow-cathode effect and the theory of glow discharges* – Proc. Roy. Soc. (London) A224 (1954) 209
8. H. HELM: *Experimenteller Nachweis des Pendel-Effektes in einer zylindrischen Niederdruck-Hohlkatoden-Entladung in Argon* – Z. Naturforschung 27a (1972) 1812
9. Z. DONKÓ: *A study of the motion of high-energy electrons in a helium hollow cathode discharge* – Z. Naturforschung 48a (1993) 457
10. M. JÁNOSSY, L. CSILLAG, K. RÓZSA: *CW laser oscillation in a He-Ar hollow cathode discharge* – Phys. Lett. 63A (1977) 231
11. M. JÁNOSSY, K. RÓZSA, P. APAI, L. CSILLAG: *He-Kr ion laser in a D. C. hollow cathode discharge* – Optics Commun. 49 (1984) 278
12. M. JÁNOSSY, P. MEZEI, P. HORVÁTH: *On the excitation of Xe-II lines in a He-Ne-Xe hollow cathode laser* – Optics Commun. 65 (1988) 287
13. L. CSILLAG, M. JÁNOSSY, K. RÓZSA, T. SALAMON: *Near infrared cw laser oscillation in Cu-II* – Phys. Lett. 50A (1974) 13
14. K.A. PEARD, R.C. TOBIN, K. RÓZSA, Z. DONKÓ: *A high-voltage hollow-cathode Au-II 282 nm laser* – IEEE J. Quantum Electronics 30 (1994) 1181
15. R.C. TOBIN, K.A. PEARD, G. BODE, K. RÓZSA, Z. DONKÓ, L. SZALAI: *High-gain hollow-cathode metal ion lasers for the UV and VUV* – IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 1 (1995) 830
16. Z. DONKÓ, L. SZALAI, K. RÓZSA, M. ULBEL, M. PÖCKL: *High gain ultraviolet Cu-II laser in a segmented hollow cathode discharge* – IEEE J. Quantum Electronics 34 (1998) 47
17. G. BÁNÓ, P. HORVÁTH, L. CSILLAG, J. GLOSIK, T.M. ADAMOWICZ, K. RÓZSA: *224 nm segmented hollow cathode silver ion laser* – Appl. Phys. B 80 (2005) 215
18. P. HARTMANN, Z. DONKÓ, G. BÁNÓ, L. SZALAI, K. RÓZSA: *Effect of different elementary processes on the breakdown in low-pressure helium gas* – Plasma Sources Sci. Technol. 9 (2000) 183
19. Z. DONKÓ, M. JÁNOSSY: *Model of the cathode dark space in noble gas mixture discharges* – J. Phys. D: Appl. Phys. 25 (1992) 1323
20. Z. DONKÓ, K. RÓZSA, R.C. TOBIN, K.A. PEARD: *Modeling and measurements on an obstructed glow discharge in helium* – Phys. Rev. E 49 (1994) 3283
21. Z. DONKÓ, K. RÓZSA, R.C. TOBIN: *Monte Carlo analysis of the electrons' motion in a segmented hollow cathode discharge* – J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (1996) 105–114
22. Z. DONKÓ, I. PÓCSIK: *On the fractal structure of electron avalanches* – Fractals 1 (1993) 939
23. Z. DONKÓ: *Avalanches and bursts in low pressure helium gas below the breakdown voltage* – Phys. Rev. E 51 (1995) 3934
24. J.P. BOEUF, E. MARODE: *A Monte Carlo analysis of an electron swarm in a non-uniform field: the cathode region of a glow discharge in helium* – J. Phys. D: Appl. Phys. 15 (1982) 2169
25. D. MARIC, K. KUTASI, G. MALOVIC, Z. DONKÓ, Z.I.J. PETROVIC: *Axial emission profiles and apparent secondary electron yield in abnormal glow discharges in argon* – Eur. Phys. J. D 21 (2002) 73
26. Z. DONKÓ: *Heavy-particle hybrid modeling of transients in a direct-current argon discharge* – J. Appl. Phys. 88 (2000) 2226
27. G. BÁNÓ, L. SZALAI, P. HORVÁTH, K. KUTASI, Z. DONKÓ, K. RÓZSA, T.M. ADAMOWICZ: *Au-II 282 nm segmented hollow cathode laser: parametric studies and modeling* – J. Appl. Phys. 92 (2002) 6372
28. P. MEZEI, T. CSERFALVI, H.J. KIM, M.A. MOTTALEB: *The influence of chlorine on the intensity of metal atomic lines emitted by an electrolyte cathode atmospheric glow discharge* – The Analyst 126 (2001) 712
29. T. CSERFALVI, P. MEZEI: *Subnanogram sensitive multimetal detector with atmospheric electrolyte cathode glow discharge* – Journ. Anal. At. Spectr. 18 (2003) 596
30. H. THOMAS, G.E. MORFILL, V.G. DEMMEL: *Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma* – Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 652
31. Z. DONKÓ, G.J. KALMAN, K.I. GOLDEN: *Caging of particles in one-component plasmas* – Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 225001
32. Z. DONKÓ, G.J. KALMAN, P. HARTMANN, K.I. GOLDEN, K. KUTASI: *Dynamical structure functions, collective modes and energy gap in charged particle bilayers* – Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 226804
33. G.J. KALMAN, P. HARTMANN, Z. DONKÓ, M. ROSENBERG: *Two-dimensional Yukawa liquids: Correlation and dynamics* – Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 065001
34. Z. DONKÓ, B. NYÍRI, L. SZALAI, S. HOLLÓ: *Thermal conductivity of the classical electron one-component plasma* – Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1622
35. Z. DONKÓ, B. NYÍRI: *Molecular dynamics calculation of the thermal conductivity and shear viscosity of the classical one-component plasma* – Physics of Plasmas 7 (2000) 45
36. C.K. BIRDSALL: *Particle-in-cell charged-particle simulations plus Monte Carlo collisions with neutral atoms, PIC-MCC* – IEEE Trans. Plasma Sci. PS-19 (1991) 65