



X-Ray Diagnostics of Highly Charged Ion Plasmas

*- High Energy Electronic X-Ray Spectrometer (HENEX) for
high density laser produced plasmas -*

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

Szabó Csilla Ibolya

Témavezető: Dr. Takács Endre

Debreceni Egyetem
Természettudományi Kar
Debrecen, 2004

Thesis Summary and description of my own work

Introduction

The basic aim of this work was to find and produce methods suited for the x-ray diagnostics of Highly-Charged Ion (HCI) plasmas. Such diagnosis of the fourth state of matter can bring us information about plasma properties and it is an invaluable tool for exploring the atomic physics of highly-charged ions. After mentioning the various sources of plasmas known to us I give a summary of the x-ray spectroscopic techniques for characterizing them. The main part of this thesis is the construction, calibration and the first deployment of the HENEX (High Energy Electronic X-ray) spectrometer, a five-channel x-ray crystal spectrometer, for the analysis of laser-produced HCI plasmas. This instrument was commissioned by the National Ignition Facility (NIF), which upon completion in 2008 will be the world's largest laser induced fusion research facility. The experimental chapter summarizes the first measurements with this unique instrument at the currently largest laser facility in the world, the OMEGA laser at the University of Rochester. Following this I report about a new technique of spectroscopic imaging of plasma at the ATOMKI-ECRIS, the only Electron Cyclotron Resonance Ion Source in Hungary.

The details of the specific projects that were the main components of my own work are summarized as follows.

Description of my own work and results

1. Optical design and plate functions of HENEX

The plate function of the different channels of the HENEX instrument can be derived from geometrical properties of the system and the laws of diffraction. The plate function gives the location on a detector where x-rays of a given wavelength are registered, after being dispersed by a crystal. The calculated plate functions based on the optical design [Hud03] helped to determine the best calibration lines for each channel.

In the case of the reflection channels, the plate function is analytically not invertible. I established an iterative conversion procedure that can provide easy identification of line energies measured with the calibrated spectrometer.

Modeling of line of sight, source position and source size was necessary to determine the final setup of the spectrometer assembly. The sensor positions in the five channels of HENEX had to be determined theoretically and verified in practice.

Before finally dealing with the sensors I made a test to verify the linearity with respect to x-ray intensity. The custom-deposited phosphor layers on the surfaces of the CMOS sensors were tested. This custom phosphor layer [Hol03] is one of the keys for the unusually good resolving power of the instrument.

2. Calibration facility

To perform calibrations at NIST (National Institute of Standards and Technology) a new and unique calibration facility had to be built that could include a custom x-ray source and a vacuum enclosure for the HENEX instrument. The latter had to be large enough to allow alignment of the instrument with variable standoff distance from the source. Water cooling of the electronics and data transfer through fiber optic cable had to be solved. Calibration in the range of 1 keV to 20 keV x-ray energies requires a system in vacuum because of the high absorption of low energy (1 keV to 4 keV) x-rays.

The vacuum system for the calibration source and the experiment chamber had to be designed and constructed in order to facilitate calibration.

I performed model calculations for x-ray propagation and absorption in absorbing materials involved from Be windows through low pressure air (vacuum) to the target materials that are irradiated with a focused electron beam for productions of x-rays.

To determine target

thickness in the calibration source, I investigated the propagation of electrons (charged particles) in different target materials. The carefully chosen targets, mostly metal foils, had to be attached to the anode of the calibration system (a cooled anode and the electron source) allowing both heat and electric conductance.

After the construction of the calibration source I have performed actual electron source tests. To find optimal performance three e-guns were tested in several modes of

operation. In order to determine the exact focused spot size of the electron sources, I also used the pinhole-imaging technique that gave us an x-ray image of the focused spot of electrons on the target. For general visualization of electrons on the target we used phosphor paint on it. This method also helps to steer the electron beam, changing the x and y distractions. As a result of these studies a high electron current in a tiny spot (≤ 1 mm) could be focused on the center of the target.

3. Construction of the spectrometer

When all design and fabrication tasks were finished, the complete spectrometer had to be assembled. The physical assembly of the mechanical part of the spectrometer had to be done considering vacuum compatibility constraints. The final assembled HENEX spectrometer builds a Faraday cage around all electronics in it to protect against Electromagnetic Pulses (EMP) during laser experiments. After construction a light-bulb test was performed to validate the alignment of optical parts and windows.

4. Filtration studies

For laser induced plasma spectroscopy, HENEX had to be supplied with filter packs that contained metal and other filters for producing absorption edges (energy fiducials) in the spectra and protection for the crystals and detectors.

Be filters were installed for protection against possible debris exposure during OMEGA laser shots. For the design of Be filter thickness, I had to consider also the applicable x-ray energy ranges for the different channels with Be x-ray absorption. The low energy channels with a higher risk to debris damage require a thin (13 μm) Be window on both the entrance slit and the detector cover while at the higher energy channels considerably thicker (25 μm and 110 μm) Be foils can be used.

5. Calibration

After the construction of the spectrometer and the calibration facility was completed I could start the meticulous procedure of calibration. For the design of the calibration procedure, first I had to consider x-ray fluorescence yields of materials. In general electron-induced x-ray fluorescence is decreasing with decreasing atomic number. We have to consider that lower-energy x-rays $E \leq 3$ keV are difficult to use for calibration

because of the twofold problem of the low fluorescence rates of those low-Z elements producing their K lines in the 1 keV to 3 keV energy region, and the easy absorption of these low energy x-rays. To overcome these difficulties I had to investigate all available materials for best performance. For the simplest case, for metal foils like Mg and Al I had to find optimal exposure times because of the poor heat conductivity. For example, Mg results in complete evaporation of the foil when exposed to the high-energy focused electron beam for a reasonable amount of time. An optimal exposure time had to be found with the proper electron gun power settings. It was a new investigation to find out a way to produce Cl x-rays using thin cleaved KCl targets.

When all calibration methods were found the first calibration of HENEX has been a ‘one by one’ procedure changing targets for each new calibration line. After all available calibration lines were registered, I fitted the plate functions (numerical in the reflection channel case and analytical for the transmission channel) to the peak positions on the detectors (calibration points). In the case of the reflection channels the produced calibration curve was further fitted with a polynomial for easier use during measurements. In the case of the transmission channel, an invertible expression was available that made the procedure less complicated.

Residuals of calibration data from the fitted curve ranges from 15 to 20 eV in the case of the transmission channel and 3 eV on channel one to 15 eV on channel four (continuously increasing with energy) for the reflection channels.

6. Measurements at OMEGA laser

The first measurements with HENEX were performed at the OMEGA laser facility, the largest laser of the world. During one week of various experiments (shots) at OMEGA, ‘Team HENEX’ was taking data to verify the performance of the instrument. HENEX proved its powerful ability of production of a fast overview of the results of the experiments due to its electronic registration of the x-ray spectra.

In the course of these measurements HENEX was inserted into one of OMEGA’s TIMs (Ten Inch Manipulators). TIMs are diagnostic ports close to the equator of the 3 m diameter vacuum chamber and HENEX can fit into any TIM compatible diagnostic system. HENEX was integrated into the accurate timing system of the laser facility to be

able to accumulate high intensity x-ray spectra in the full x-ray energy range of the instrument in less than a second.

During the one week visit at the OMEGA facility, HENEX registered data from numerous gasbag, foil, disc and hohlraum shots. My task during these measurements was the analysis and organization of the measurement data. The most interesting spectra were Helium-like Copper spectra, highly charged Krypton K x-ray spectra, L lines of highly charged gold and Helium and Hydrogen like Aluminum spectra. The registered highly charged (He-, Li-, Be-, Al-, O-, N-like) Krypton K lines including transitions from levels 2 to 1, 3 to 1 and 4 to 1 are unique in the way that no earlier measurement has been able to show the resolved $K\beta$ and $K\gamma$ lines of these high-charge states of Krypton. These data seem to be in good agreement with model calculations with FLYCHK [Che03] from the Lawrence Livermore National Laboratory and can be used as a new diagnostic of these plasma sources. [See05]

7. Limitations of HENEX and the solutions

The deployment of HENEX at the OMEGA laser facility was also very important from the testing point of view. These measurements brought some areas where the instrument needed modification or upgrading. Crystal fluorescence, due to the very high intensity x-ray radiation was observed on the reflection channels and, in one incidence of debris damage, indicated that thicker Be shielding is possibly needed also for the lowest energy channel. I helped with x-ray absorption studies to choose the right thickness for the Be filter.

To cut down fluorescence and to eliminate ‘paraxial rays’ (x-ray lines from different crystal planes in the crystals not parallel to the lines of the desired plane) collimators have been constructed and will be used. The design and construction of these collimators were done at our group at NIST.

8. X-ray spectroscopic imaging at the ECR Ion Source of ATOMKI

In the second half of the experimental chapter I report about spectroscopic imaging at the ECR Ion Source of ATOMKI. As opposed to earlier plasma diagnostics experiments at the ECR ion source [Sza01] this technique required the design of an experimental system that included an x-ray pinhole and an x-ray CCD camera placed in adequate

distances from the analyzed ECR plasma chamber of the ion source [Bir04]. In this team work with members from NIST and from Debrecen I contributed mainly in the design of the experiment with my expertise with the CCD camera that was borrowed from NIST. The CCD camera was used in the so called photon counting mode when with well chosen exposure time (about 100 ms per exposure) one photon per one pixel count rate can be achieved in the CCD camera pixels. With a large amount of such exposures (about 1000 exposures) registered, it is possible to produce an image that includes also spectroscopic information about the diagnosed plasma. It is possible to construct maps of any x-ray energy windows giving a detailed map of the position where the majority of x-ray radiation of ions and the bremsstrahlung radiation of the electron component comes from in the imaged plasma.

Indication for evaporative cooling in ECR plasmas was possible to find with this technique [Tak05]. But also the information about the location of different plasma species can help further optimization of ECR ion sources. The same spectroscopic imaging technique can be a very useful tool in x-ray astrophysics and also at other x-ray diagnostic measurements in plasma physics laboratories.

9. HENEX in the future and outlook

A time integrating x-ray spectrometer, like HENEX for laser induced plasma physics experiments can be really useful if it can give information about the absolute x-ray intensity detected. This way laser conversion experiments are possible and the conversion factor can be calculated from the measurements. The next stage of HENEX's development is its absolute intensity calibration. This work requires careful planning and will be done at facilities with the best available x-ray intensity standards. The low energy calibration 1 keV to 20 keV is planed to be done at the synchrotron facility, BESSY at PTB (Physikalish- Technische Bundesanstalt), Berlin, while the higher energy regions (10 keV and up) can be calibrated with air-KERMA measurements at NIST. The intensity calibration will happen in two basic steps. First a reference detector will be calibrated at the calibration facilities. Then the cross calibration of HENEX with the reference detector will be my task at our calibration facility at NIST.

When fully operational, NIF will provide a diagnostic port for HENEX and by then it can participate at numerous measurements at the OMEGA laser facility. There is still a lot to explore in high energy density physics of irradiated OMEGA- and NIF-targets that provide plasma states naturally existing only in stars and distant astrophysical objects.

A téma összefoglalása

Bevezetés

Dolgozatom alapját nagy töltésű ion (HCI) plazmák vizsgálatához röntgenspektroszkópiai módszerek kidolgozása és használata képezte. Dolgozatom arra hivatott, hogy bemutassa a negyedik halmazállapotot és érzékeltesse a röntgenspektroszkópiai módszerek fontosságát az atom- és plazmafizikában. Nagy töltésű ion plazmák spektroszkópiai vizsgálatának segítségével információt kaphatunk a plazma alkotóelemeinek, vagyis az elektronok és az ionok tulajdonságairól, meghatározhatók plazma paraméterek és értékes információt nyerhetünk a plazmában jelen levő nagy töltésű ionok atomfizikai jellemzőiről.

Az anyag negyedik halmazállapotjának ismertetése után rövid áttekintést nyújt a dolgozat a látható univerzumban észlelt asztrofizikai, valamint a Földön előállítható laboratóriumi plazmákról. A rendelkezésre álló nagy töltésű ion plazmák létrehozására alkalmas laboratóriumi berendezések rövid ismertetése után bemutatom az ezek jellemzésére használható röntgen-spektroszkópiai technikákat.

Dolgozatom fő része a nagyenergiájú elektronikus röntgen (High Energy Electronic X-ray = HENEX) spektrométer építésével, kalibrálásával és üzembeállításával foglalkozik. Ez az eszköz egy ötcsatornás röntgen kristály-spektrométer, amely lézerrel előállított nagy töltésű ion-plazmák vizsgálatára készült. Építését a nagyszabású NIF (National Ignition Facility) projekt támogatja, mely 2008-ra, teljes elkészültekor a világ legnagyobb lézere lesz, mely egyben a világ legnagyobb tehetetlenségi összetartásos fúzió (ICF – Inertial Confinement Fusion) vizsgálatára alkalmas berendezése is lesz.

A kísérleteket leíró fejezetben a New York államban levő, Rochesteri Egyetem (University of Rochester) által üzemeltetett 'OMEGA lézer' berendezésen a HENEX spektrométerrel végrehajtott első mérések eredményeiről számolok be. Az 'OMEGA laser' jelenleg a világ legnagyobb lézere, mely lézeres plazma előállítására hivatott fúziós kutatások segítésére. Az OMEGA lézernél végrehajtott mérések után bemutatom az ATOMKI Elektron Ciklotron Rezonancia (ECR) ionforrás laboratóriumában végzett

legújabb kísérletünket, mely lehetővé teszi az ionforrás plazmájának spektroszkópiai leképezését a röntgen (3-11 keV) energia tartományban.

A dolgozatom alapjául szolgáló tevékenységeket és azzal általam végzett önálló munkákat az alábbi pontokban foglalom össze.

Az önálló munka leírása és eredmények

1. A HENEX spektrométer optikai tervezése és detektorfüggvénye

A HENEX spektrométer csatornáinak detektorfüggvényei (plate function) a rendszer geometriai jellemzőiből és a diffrakciós törvényekből származtathatók. Ez a függvény megadja a konvex kristályon szóródott különböző hullámhosszúságú röntgensugarak pozícióját a detektor felületén (pozíció a röntgen energia függvényében). Az optikai terv segítségével kiszámított detektorfüggvény megadja az adott kristály illetve spektrométer csatorna rendelkezésre álló röntgen energia tartományát és ezzel segíti a megfelelő kalibrációs vonalak kiválasztását a későbbi kalibrációhoz.

A reflexiós csatornák esetében a detektorfüggvény analitikusan nem invertálható. Munkám során kifejlesztettem egy iteratív konverziós eljárást, mely numerikusan hajtja végre a konverziót, és így a detektoron, adott vonalpozícióhoz egyértelműen meg tudja adni a vonalenergiát.

A spektrométer végső felépítésének meghatározásához szükség volt a forrás pozíciójának, és méretének, valamint a „field of view”, vagyis a spektrométer látóterének modellezésére. A HENEX spektrométer öt csatornájának detektor-pozícióit meg kellett határozni elméleti úton, majd igazolni a beállítások helyességét a gyakorlatban.

A HENEX spektrométer esetében a detektor szerepét 5 cm hosszú és 2.5 cm széles CMOS érzékelők látják el. Mielőtt alkalmazásba vettük a szenzorokat igazolnom kellett a röntgen film technikával szemben megállapított egyik lényeges tulajdonságukat, a linearitást, vagyis a lineárisan növelt röntgenintenzitásra adott lineáris választ. Ezek után még a CMOS szenzorok felületére felvitt foszfor rétegeket is tesztelni kellett. Ez a különleges technikával felvitt vékony foszfor bevonat a kulcsa a berendezés szokatlanul jó felbontóképességének.

2. A kalibrációs állomás

A NIST-ben (National Institute of Standards and Technology) végzett kalibrációhoz egy új és egyedi kalibrációs állomás felépítésére volt szükség, amely egy röntgenforrást és egy nagyméretű vákuumkamrát foglalt magába. A vákuumkamrának elegendően nagyoknak kellett lennie ahhoz, hogy a spektrométer megfelelően jusztírozható és távolsága a forrástól egy sín pár segítségével változtatható legyen. Meg kellett oldani a vákuumban elhelyezett elektronika vízűtését. Az adattovábbítás a spektrométer elektronikájától a vákuum kamrán kívül elhelyezett számítógéphez optikai kábelon keresztül történik. Az alacsony energiájú (1-től 4 keV -ig) röntgensugarak nagy mértékű elnyelődése miatt a kalibrációt vákuumban kell végezni. Meg kellett tervezni a kalibrációs forrás vákuum-rendszerét, illetve a kísérleti kamrát a spektrométer számára.

Modellszámítások segítettek a röntgensugarak áthatolóképességének meghatározásában. Ezeket a számításokat a Be ablakok, az alacsony nyomású levegő (vákuum) és a fókuszált elektronnyalábbal besugárzott target fóliák viszonylatában végeztem, az optimális rendszer felépítésének érdekében.

A target fóliák vastagságának meghatározásához behatóan vizsgáltam az elektronok (töltött részecskék) anyagba való behatolását. A kalibrációs forrás nem más mint egy hűtött anód és egy elektronágyú rendszere. Az elektronnyalábot az elektronágyú elektródái pontszerűvé fókuszálják a target fólián, ami az anódra van erősítve minél jobb hő és elektromos vezetés biztosítása mellett.

A kalibrációs forrás hatékonnyá tételéhez több elektron forrást teszteltem. A fókuszált elektronnyaláb foltméretének pontos meghatározásához alkalmaztuk az u. n. „pinhole” leképező technikát, ami egy röntgen pinhole segítségével képezi le a tárgyat (ez esetben a fókuszált elektronnyaláb által a targeten keletkezett röntgenfoltot) a távolabb elhelyezett röntgenfilmre. Ezen kívül az elektronnyaláb megjelenítésére foszfor festéket alkalmaztunk a target fólián, ami láthatóvá tette az elektronokat. Ez a módszer az elektronnyaláb irányítását is megkönnyíti az elektronágyú optimális fókuszbeállításával. A fenti vizsgálatok eredménye képpen sikerült a target közepén kis foltméret mellett (≤ 1 mm) nagy elektron áramokat (≤ 900 μ A) elérni.

3. A spektrométer összeállítása

A tervezési fázis után össze kellett állítani a teljes műszert. A spektrométer mechanikus részeinek összeszerelésénél figyelembe kellett venni a vákuumkompatibilitásból eredő korlátokat. A véglegesen elkészített spektrométer Faraday kalitkát képez a benne levő összes elektronikus alkatrész köré, hogy megakadályozza a nem kívánt elektromágneses impulzusok hatását a lézeres kísérletek közben.

A spektrométer teljes összeállítása után látható fény segítségével „árnyék tesztet” végeztünk az optikai részek és ablakok helyes működésére.

4. Filterek

A lézerrel keltett plazmák röntgen-spektroszkópiai vizsgálatához a HENEX spektrométert filter készlettel láttuk el, mely fém és egyéb fóliákból áll. Ezek egyrészt a kristályok és detektorok védelméül szolgálnak, másrészt viszont abszorpciós éleket hoznak létre a spektrumokban, segítve ezzel a kalibrácót és a spektrumok kiértékelhetőségét.

Az OMEGA lézerrel történő besugárzáskor létrejövő esetleges törmelék képződése ellen Be fóliákat alkalmaztunk. A Be fóliák vastagságát úgy határoztam meg, hogy figyelembe vettem az egyes csatornák által elérhető röntgen energia tartományokat, valamint a Be röntgen-abszorpcióját. A vékonyabb (13 μm) fóliával ellátott csatorna jobban ki van téve az esetleges target szilánkok által okozott sérülésnek a lézeres kísérletek során. Ezzel szemben a nagyobb energiájú csatornák esetében jelentősen vastagabb (25 μm és 110 μm) Be fóliákat használhatunk.

5. Kalibráció

A kalibrációs folyamat tervezéséhez elsőként az anyagok röntgen fluoreszcencia hozamát kellett figyelembe vennem. Alapvetően az atomok röntgen fluoreszcenciája a csökkenő atomszámmal együtt csökken. Emellett az alacsonyabb energiájú röntgensugarak ($E \leq 3 \text{ keV}$) könnyen elnyelődnek, így a 3 keV röntgenenergia alatti vonalak ellőállítás és dektektálása kétszeresen bonyolult feladat. Mindezen felül, ha az adott elem még rossz hővezető is, mint például a magnézium, akkor az expozíciós időt még a target idő előtti „elpárologtatása” is befolyásolja, ugyanis a túlzottan nagy intenzitású elektronnyaláb annyira felhevítheti a targetet a fókuszpontban, hogy az megolvad, illetve a vákuumban elpárolog. Optimális expozíciós időt és elektronágyú

teljesítményt kellett találnom ezekhez a problémás elemekhez. További kalibrációs targetek esetén is külön vizsgálatokra volt szükség, mint például a Cl vonalak előállításánál, melyet végül vékonyra hasított KCl kristály target segítségével sikerült létrehoznom.

Miután az összes kalibrációs módszert sikerült feltárnom, következhetett a spektrométer első kalibrációja, mely során egyesével vizsgáltam minden targetet. Mikor minden rendelkezésre álló vonalat regisztráltunk, a detektor függvényeket (melyek numerikusak a reflexiós csatornák esetében és analitikus a transzmissziós csatornánál) a detektoron regisztrált csúcspozícióihoz (kalibrációs pontokhoz) illesztettem. A reflexiós csatornák esetén az így kapott görbére nagy pontosságú polinómot illesztettem, lehetővé téve az egyszerű csatornaszám - energia konverziót. A transzmissziós csatorna esetében az invertálható detektor függvény ezt a folyamatot egyszerűbbé tette. A kalibráció hibája 15-20 eV a transzmissziós csatorna esetében, míg a reflexiós csatornákon 3 eV-től 15 eV-ig változik (monoton nő) az első csatornától a negyedikig haladva.

6. Mérések az OMEGA lézernél

A HENEX spektrométer első alkalmazására a világ jelenleg legnagyobb lézernél, az OMEGA lézernél (LLE – Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester) került sor. Az egy hetes méréssorozat alatt a spektrométer különböző kísérletek (lézeres „lövések” = „shots”) közben vehetett fel adatokat bizonyítva ezzel működését. Az elektronikus adatrögzítésből fakadó gyors adatmegjelenítés egyértelmű előnyt jelent több más, még röntgenfilmmel dolgozó berendezéssel szemben.

Ezek alatt a mérések alatt a spektrométer egy úgy nevezett TIM (Ten Inch Manipulator) kapszulában került elhelyezésre, mely a spektrométert kb. fél méter távolságba állította be a targettől.

Az egy hetes kísérletsorozat alatt a spektrométer számos 'gasbag', diszk, fólia és 'hohlraum' target adatait regisztrálta. A legérdekesebb spektrumok között említhetjük, a héliumszerű réz spektrumot, a nagy töltésű Kr K röntgen vonalait, a nagy töltésű arany ionoktól származó L vonal spektrumokat és a hélium- és hidrogénszerű regisztrált alumínium vonalakat. A megfigyelt nagy töltésű (He-, Li-, Be-, Al-, O- és N-szerű) kripton K vonalak, melyek között megtalálhatók a 2-1, 3-1 és a 4-1 szintek közötti

átmenetek is, egyedül állóak, mivel hasonló megfigyelés, hasonló felbontással korábbi mérésekből nem hozzáférhető. Ezek az adatok egészen jó egyezést mutatnak modell számításokkal is és lehetőséget nyújthatnak forró fúziós plazmák diagnosztizálására a későbbiekben. [See05]

7. A HENEX spektrométer hiányosságai, és azok kiküszöbölései

A OMEGA lézernél folytatott első kísérletek fontosak voltak a spektrométer esetleges hiányosságainak feltárása szempontjából is. Ezek a hiányosságok, mint például az észlelt kristály-fluoreszcencia és az úgy nevezett 'paraxiális' sugarak, (vagyis a kívánt kristálysíktól eltérő kristálysíkoktól eredő röntgen spektrum észlelése a detektorokon) a későbbiekben orvoslásra szorulnak. A fent említett fluoreszcencia és 'paraxiális' sugarak csökkentésére illetve eliminálására speciális kollimátort alkalmazunk. Az egyetlen target szilánk okozta Be ablak és kristály sérülés kivédésére pedig vastagabb Be filtert fogunk alkalmazni.

8. Röntgen spektroszkópiai leképezés az ATOMKI-ECR ion forrásnál

A kísérleti fejezet második felében az ATOMKI ECR ionforrás laboratóriumában végzett spektrális leképezési kísérleteinkről szólok, melyek lényegesen különböznek korábbi plazmadiagnosztikai méréseinktől [Sza01]. A spektrális leképezés során az ionforrás plazmáját egy röntgen 'pinhole' és egy röntgen CCD kamera segítségével képeztük le [Bir04]. Ezt a rendszert speciálisan üzemeltetve, az expozíciós idő lecsökkentésével (kb. 100 ms) el tudtuk érni, hogy egy CCD pixelbe maximum csak egy röntgen foton érkezzon felvételenként. Körülbelül 1000 ilyen felvétel kiértékelésével olyan 'térképek' konstruálhatók az ionforrás plazmájáról, melyek információt adnak a plazma különböző komponenseinek elhelyezkedéséről. [Tak05]

Ezzel a módszerrel az ECR plazmában jelen levő 'párologtatási hűtésre' találtunk bizonyítékot. Ugyanígy a különböző plazmakomponensek feltérképezésével az ionforrás további optimalizálása is lehetővé válhat. Hasonló spektroszkópiai leképező módszer nagyon hasznos lehet asztrofizikai plazmák vizsgálata esetén.

9. A HENEX spektrométer jövője és kitekintés

Egy HENEX spektrométerhez hasonló 'folyamatos' üzemmódú spektrométer akkor lehet igazán hasznos a lézeres kísérletekben, ha rendelkezik abszolút intenzitás-kalibrációval. A következő lépés a spektrométer továbbfejlesztésében egy ilyen kalibráció lesz. Az intenzitás-kalibrált spektrométer segítségével lehetőség nyílik a lézeres berendezések 'konverziós faktorának' pontos vizsgálatára, mely nagyon fontos információ lehet, különösen az indirekt fúziót célzó lézeres targetek esetében. A spektrométer intenzitás-kalibrálása az energia-tartománynak megfelelően több lépcsőben történik majd. Az alacsony energiák (1-15 keV) kalibrálása a berlini BESSY szinkrotronnál (PTB - Physikalisch Technische Bundesanstalt) lehetséges, míg a magasabb energiák (10 keV fölött) intenzitás-kalibrálása a NIST precíziós 'air KERMA' berendezésén is megoldható. A 'referencia detektor' fent említett nagy berendezéseken való kalibrálása után a HENEX spektrométer keresztkalibrálása az én feladatomban lesz a NIST-ben összeállított kalibrációs állomáson.

A NIF elkészültekor a HENEX spektrométer egy diagnosztikai portot fog elfoglalni a 192 lézerből álló hatalmas berendezés 10 méter átmérőjű gömb alakú target kamrájában. Spektrométerünk egyike lesz azon diagnosztikai eszközök sokaságának, melyek a nagy energiasűrűségű anyag még feltáratlan tulajdonságait vizsgálják.

References in the summary

A tézisekben idézett irodalom

- [Bir04] S. Biri, L. T. Hudson, J. Imrek, B. Juhász, J. Pálinkás, B. Radics, T. Suta, Cs. Szabó, E. Takács, A. Valek, *Rev. Sci. Instrum.* **75** (2004) pp. 1420-1422
- [Chu03] H. K. Chung, W. L. Morgan, and R. W. Lee, FLYCHK: an extension to the K-shell spectroscopy kinetics model FLY. *JQSRT* 2003;81:107-115.
- [Hol03] Glenn Holland (NRL) private communication
- [Hud03] Larry Hudson (NIST) private communications
- [See05] J. F. Seely, C. A. Back, C. Constantin, R. W. Lee, H.-K. Chung, L. T. Hudson, C. I. Szabo, A. Henins, G. E. Holland, R. Atkin, and L. Marlin *Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* to be published
- [Sza01] Cs. Szabó, S. Biri, L. Kenéz, A. Valek, *Vacuum* **61** (2001) pp. 391-396
- [Tak05] E. Takács, B. Radics, C. I. Szabó, S. Biri, L.T. Hudson, J. Imrek, B. Juhász, T. Suta, A. Valek, J. Pálinkás, Poster presentation at the Highly Charged Ion Conference (HCI2004), Vilnius, Lithuania, Sept 6-12, 2004; To be published in *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*

List of Publications

A dolgozathoz kapcsolódó publikációk listája

1. **Cs. Szabó**, S. Biri, L. Kenéz, T. Suta, A. Valek: *Diagnostic reserach of highly ionized plasma generated by an ECR ion source.*
Vacuum, Vol **61/2-4**, pp. 391-396, May 2001
2. S. Biri, A. Jánossy, L. Kenéz, A. Kitagawa, **Cs. Szabó**, A. Valek: *Status and new developments at the 14.5 GHz ATOMKI-ECRIS.*
Proceeding of the Workshop on Production of Intense Beams of Highly Charged Ions (PIBHI2000), pp 73-77, Catania, Italy, 2000
3. S. Biri, A. Valek, T. Suta, E. Takács, **Cs. Szabó**, L.T. Hudson, B. Radics, J. Imrek, B. Juhász, J. Pálinkás: *Imaging of ECR Plasmas with a pinhole x-ray camera*
Review of Scientific Instruments, Volume **75(5)**, May 2004. pp. 1420-1422
4. E. Takács, B. Radics, **C. I. Szabó**, S. Biri, L.T. Hudson, J. Imrek, B. Juhász, T. Suta, A. Valek, J. Pálinkás: *Spatially resolved x-ray spectroscopy of an ECR plasma – indication for evaporative cooling*
Submitted to Nuclear Instruments and Methodes B (2004)
5. J. F. Seely, C. A. Back, C. Constantin, R. W. Lee, H.-K. Chung, L. T. Hudson, **C. I. Szabó**, A. Henins, G. E. Holland, R. Atkin, and L. Marlin: *Krypton K-Shell X-Ray Spectra Recorded by the HENEX Spectrometer*
Submitted to Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer (2005)

Talks, poster presentations

Előadások, poszterek:

6. T. Suta, E. Veibel, **Cs. Szabó**, Zs. Jánosfalvi, Z. Berényi, E. Takács, A. Valek, S. Biri, L. Kenéz: *Systematic measurements of electron temperatures inside an ECR plasma.*
20th International Conference on X-ray and Inner-shell Processes. Chicago, USA, Aug. 22-27, 1999
7. **Cs. Szabó**, T. Suta, Zs. Jánosfalvi, Z. Berényi, E. Takács, A. Valek, S. Biri, L. Kenéz: *Analysis of characteristic X-ray radiation emitted by an ECR heavy ion source.*
20th International Conference on X-ray and Inner-shell Processes. Chicago, USA, Aug. 22-27, 1999
8. **Cs. Szabó**, L. Kenéz, T. Suta, S. Biri, A. Valek, J. Pálinkás: *Elektron ciklotron rezonancia (ECR) ionforrás: Univerzális eszköz az atom- és plazmafizikában.*

"Tavaszi szél 2000" Fiatalkutatók és Doktoranduszok 4. Világtalálkozója.
Gödöllő, Szent István Egyetem, 2000, április 14-16.

9. T. Suta, E. Takács, S. Biri, **Cs. Szabó**, L. Kenéz, A. Valek: *Preparation for surface physics investigations with highly charged heavy ion produced by ECR ion source*. 8th Joint Vacuum Conference. Pula, Croatia, 4-9 June, 2000
10. **Cs. Szabó**, S. Biri, L. Kenéz, T. Suta, A. Valek: *Diagnostic research of highly ionized plasma generated by an ECR ion source*. 8th Joint Vacuum Conference of Croatia, Austria, Slovenia and Hungary (JVC8). Pula, Croatia, June 4-9, 2000;
11. S. Biri, A. Jánossy, L. Kenéz, A. Kitagawa, **Cs. Szabó**, A. Valek: *Status and new developments on the 14.5 GHz ATOMKI-ECRIS*. (Book of abstr. pp. 73-74). Workshop on Production of Intense Beam of Highly Charged Ions. (PIBHI 2000). Laboratori Nationali del Sud, Catania, Sept. 24-27, 2000
12. **Cs. Szabó**: *Dupla krisályos kristálvspektrometer fejlesztése a NIST EBIT laborban* előadás, ATOMKI Atomfizikai Főosztály, főosztályszeminárium, Debrecen – 2001. október 26
13. **Cs. Szabó**, S. Biri: *A Debreceni Elektron Ciklotron Rezonancia Ionforrás*. előadás az ELFT Vákuumfizikai szakcsoportjának klubdélutánján, Budapest – 2001. október 30.
14. J. Pálinkás, E. Takács, S. Biri, A. Valek, **Cs. Szabó**, L.T. Hudson, J. Imrek, B. Radics, B. Juhász, T. Suta: *Energy Selective X-ray Imaging of Highly Charged Ion ECR Plasmas*
Poster presentation on XXIII International Conference on Photonic Electronic and Atomic Collisions, Stockholm, Sweden 23-29 July, 2003
15. **Cs. Szabó**: *Röntgen kristálvspektrométer nagy sűrűségű lézer indukált plazmák vizsgálatához* előadás, ATOMKI, Atomi Ütközések Osztálya, osztályszeminárium, Debrecen – 2003. November 4.
16. E. Takács, B. Radics, **C. I. Szabó**, S. Biri, L.T. Hudson, J. Imrek, B. Juhász, T. Suta, A. Valek, J. Pálinkás: *Spatially resolved x-ray spectroscopy of an ECR plasma – indication for evaporative cooling*
Poster presentation on 12th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, Vilnius, Lithuania September 6-11, 2004;
17. J. F. Seely, C. A. Back, C. Constantin, R. W. Lee, H.-K. Chung, L. T. Hudson, **C. I. Szabó**, A. Henins, G. E. Holland, R. Atkin, and L. Marlin: *Krypton K-Shell X-Ray Spectra Recorded by the HENEX Spectrometer*
Talk by J. F. Seely at the 11th International Workshop on Radiative Properties of Hot Dense Matter, Santa Barbara, California November 1-5, 2004

Annual Reports

Évkönyv

18. S. Biri, A. Valek, F. Ditrói, L. Kenéz, **Cs. Szabó**: *Research and application of the ECR ion source.*
Atomki Annual Report 1999
19. **Cs. Szabó**, Z. Berényi, S. Biri, T. Suta, E. Takács, A. Valek: *Examination of the charge state distribution of ions in the ECR ion source.*
Atomki Annual Report 1999
20. **Cs. Szabó**, E. Takács, Z. Berényi, J. D. Gillaspy, L. Hudson: *Modeling and calibration of a double-crystal spectrometer for absolute x-ray wavelength measurements.*
Atomki Annual Report 2001
21. E. Takács, S. Biri, A. Valek, J. Pálinkás, **Cs. Szabó**, L.T. Hudson^{a)}, B. Juhász, T. Suta, J. Imrek, B. Radics: *X-ray imaging of ECRIS plasmas.*
Atomki Annual Report 2002
22. L. Lugosi, K. Tőkési, E. Takács, V. Kharchenko, H. Tawara, L.P. Ratliff, J.D. Gillaspy, **Cs. Szabó**, T. Suta: *State selective single electron capture from noble gas by highly charged ions*
Atomki Annual Report 2003
23. E. Takács, H. Tawara, V. Kharchenko, L. Lugosi, K. Tőkési, L.P. Ratliff, J.D. Gillaspy, **Cs. Szabó**, T. Suta: *Experiments and modeling of state selective electron capture in slow HCl collisions*
Atomki Annual Report 2003