

Abstract of PhD Thesis
Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

**Transmission of charged particles through
a single glass microcapillary**

**Töltött részecskék kölcsönhatása egyedi,
henger alakú, szigetelő mikrokapillárral**

Réka Judit Bereczky

Supervisor / Témavezető
Dr. Károly Tőkési



University of Debrecen
PhD School in Physics

Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

Debrecen, 2012

1. Introduction

The interaction of highly charged ions (HCI) with surfaces has been in the focal point of many experiments in the last few decades. In recent years focus has shifted to the transmission of HCIs through linear structures such as pores and capillaries.

The first experiment was conducted using metallic capillaries and the observations were in good agreement with the theoretical interpretations (K. Tórkési et al., Phys. Rev. A 64 (2001) 042902). Later the field of guided transmission of charged particles has been initiated by Stolterfoht et al. (N. Stolterfoht et al., Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 133201) who discovered that the slow, highly charged ions are guided through insulating (polyethylene terephthalate, Mylar) nanocapillaries. Since the first experiments with insulating capillaries a number of systems with different geometries and/or different insulating materials have been investigated, such as SiO_2 , Al_2O_3 , and various glasses.

The qualitative picture seems to be similar in all cases and that has led to the following scenario of HCI guiding. At first, during the charge-up phase, HCI hit the internal capillary wall and deposit their charge. These charges are transported either along the surface and or into the bulk of the target material. Projectiles entering later into the capillary are deflected due to the Coulomb field of the deposited charges and may eventually be transmitted through the capillary without collision with the inner surface. Guiding sets in as soon as a dynamical equilibrium between the projectiles hitting the capillary wall (charging) and transport of charges into the bulk or to the capillary exit (discharging) is established.

Charged particle guiding is a complex process involving the interplay of a large number of charged particles with a solid. Although during the past few years many research groups joined to this field of research and carried out various experiments with insulator capillaries, many details of the interactions remained unknown. At first insulating foils with randomly distributed capillaries were used, which foreshadowed many uncertainties both from experimental and theoretical points of view. For example, it is not possible to ensure a perfect parallelism of the nanocapillaries in the foil. Another significant problem is that the collective effect of all the neighbouring tubes has to be taken into account.

Therefore to avoid these difficulties in my PhD work I made systematic measurements on the guiding of charged particles through a single, cylindrical shaped glass capillary. Recently it is technically not possible to perform measurements with a single nanotube. Partly because it is difficult to produce such a sample, and partly because it is challenging to carry out the measurements with it. Therefore we use capillaries with microscopic dimensions.

2. Experimental methods applied

2.1. Ion guiding measurements

The measurements using slow highly charged ions were carried out using HCI beams produced by the 14.5 GHz Electron Cyclotron Resonance Ion Source (ECRIS) in Vienna.

The glass capillary was positioned in a differentially pumped Ultra High Vacuum (UHV) chamber, with a residual pressure better than 10^{-8} mbar. A position sensitive detector (PSD) was used to record the transmitted ions, mainly consisting of a Chevron-type Micro-Channelplate and a wedge-and-strip-anode. The capillary holder itself could be moved in x, y and z-direction with high accuracy by stepper motors.

Without capillary the reference intensity was measured by allowing ions passing through a hole of known diameter directly onto the channel plate detector. Tilting measurements were performed in a way that firstly the discharged capillary was positioned axial to the beam and from there the tilt angle was increased stepwise into one direction.

2.2. Temperature dependent ion guiding

The investigation of the temperature dependence of the guiding opens new possibilities both for understanding the rudiments of the guiding phenomenon and for applications. Guiding of highly charged ions through tilted capillaries promises a tool for focusing low-energy ion beams to sub-micrometer size.

For the measurements we developed and built a completely new heatable sample holder. The new target holder was positioned in a differentially pumped UHV chamber, with a residual pressure better than 5×10^{-9} mbar. The charge state analysis of the transmitted ions was also possible by means of a pair of electrostatic deflector plates located near the exit of the capillary. The tilting against the beam axis in the horizontal plane allows step sizes as small as 0.02° .

2.3. Electron guiding measurements

Electron guiding measurements were conducted at the tandem Van de Graaff accelerator laboratory at Western Michigan University.

The sample was mounted in a goniometer with 2° of rotational freedom for precise positioning. A commercially available filament was used for the source of electrons of the desired energy. The beam was collimated by a set of two apertures of diameters 1.5 and 2.0 mm, respectively. In this way the collimation of the beam was 2.16° . The transmitted electrons were analyzed by an electrostatic parallel-plate analyser. The spectrometer used for the energy dependent experiments had an energy resolution of $\sim 3\%$, and an angular resolution of $\sim 2.4^\circ$. The time dependent measurements were done with a new parallel-plate, high resolution spectrometer. The angular resolution was $\sim 0.3^\circ$. Electron events were counted by a channel electron multiplier (CEM) coupled to the analyzer. The background pressure in the scattering chamber was $\sim 10^{-6}$ Torr.

3. New scientific results

3.1. Design and construction of the capillary sample and special sample holder

3.1.1 The capillary sample

The key issue of our capillary measurements is the suitable sample. We used single microscopic-sized glass capillaries with the length, l , about 14 mm and the inner diameter, d , about 0.17 mm. The critical point of the guiding measurements with capillaries is the precise alignment of the capillary with respect to the beam axis.

Therefore I developed a method to produce samples for our investigations [1]. The procedure is as follows:

- I fixed the glass capillary into an aluminium disk holder. The capillary is perpendicular to the surface of the holder.
- I covered the sample and its holder with graphite to carry away excess charge deposited on it, and to guarantee symmetry and uniform charge transport. Graphite is also used during the temperature dependent measurement to fix the capillary in its position and to ensure good electrical as well as thermal contact between the glass and the surrounding metal parts.
- I designed a special tool to assure the perpendicularity of the capillary sample compared to the sample holder.

3.1.2 Sample holder for studying temperature dependent ion guiding

In collaboration with the Atomic and Plasma Physics group at the Institute of Applied Physics, TU Wien, I developed and built the first temperature controlled sample holder both for heating and cooling the capillary sample [5].

The target holder consists of an upper and a lower plate, which function as an oven. These parts are made of copper and surround the capillary in order to guarantee a uniform temperature along the whole tube. The temperature of the copper parts is monitored by a K-Type thermocouple. Stainless steel coaxial heaters surrounding the oven are used for heating. The heating power of up to a few watts is regulated by a proportional–integral–derivative (PID) controller. The cooling of the capillary was achieved by a copper feed-through connected to a liquid nitrogen bath outside the UHV chamber. This solution allows us to change the temperature of the sample from -30°C up to 90°C .

This special sample holder makes possible the accurate and the reproducible investigation of the temperature dependent ion guiding.

3.1.3 Construction of a sample holder to study the effect of the external electric field on the particle guiding

We plan to investigate the influence of an external electric field onto the self-organized formation process of charge patches inside a microcapillary. Therefore we designed and constructed a set of miniature holders, each containing a single, straight glass capillary. We prepared two different configurations, which can be used in a

UHV system. To implement electrodes on a capillary we used adhesive copper foil. The capillary covered with the electrode is inserted into an aluminium tube. This capillary is aligned with the aluminium tube. One of the electrodes is connected to a wire, in order to apply external high voltage. All other electrodes are grounded directly. To investigate the influence of deceleration inside the sample, the entrance as well as the exit is grounded via ring shaped electrodes [13].

3.2. Transmission of slow highly charged ions through a single glass microcapillary

We measured the transmission of 4.5 keV Ar^{9+} ions through a microscopic sized, cylindrical shaped glass capillary with large aspect ratio ($l/d \sim 80$).

- I showed first that a guiding electric field for HCI can also build-up inside a straight micro-scale single capillary, thereby slow HCI can be transmitted through the microcapillary, keeping their initial charge state in a similar manner as for the case of nanocapillaries. Our results clearly indicate the existence of the guiding effect even in the case of large tilt angles.
- We demonstrated that the self-organized formation of charged patches inside the capillary is a time dependent process, causing stable transmission after a charge-up period [1, 6].
- We showed that the angular distributions of the transmitted ions have narrower width than the incident beam, which means the straight capillary can be used as a beam focusing tool [1, 2, 4, 6].

3.3. The effect of temperature on the guiding of slow highly charged ions through a glass microcapillary

First we measured the temperature dependence of the ion-guiding. One control parameter to optimize the guiding is the residual electrical conductivity of the insulating material. Its strong (nearly exponential) temperature dependence is the key to transmission control and can be used to suppress transmission instabilities arising from large flux fluctuations of incident ions which otherwise would lead to Coulomb blocking of the capillary.

- We demonstrated the strong dependence of the transmission of Ar^{9+} ions through a single microscopic glass capillary on temperature and ion flux. We showed that by changing the glass temperature we are able to manipulate the electrical conductivity of the glass by several orders of magnitude. The effect of conductivity on the build up and removal of charge patches in the capillary can also be studied [7].
- We showed that the temperature of the glass capillary has a large influence on the transmission of ions and it can be compensated for by adjusting the incident ion flux. The conditions of the guiding can be adjusted from the "guiding" at room temperature to the "non-guiding" (simple geometrical transmission) by increasing the temperatures [7].

3.4. Energy dependence of electron transmission through a single glass microcapillary

Transmission of electrons of energy between 300 eV and 1000 eV was investigated.

- We showed that electrons can be transmitted through a single glass microcapillary even if the capillary is tilted with $\sim 5^\circ$ against the beam axis. Due to the inelastic electron scattering with the inner surface the electrons lose energy but they can still pass through the capillary. We found that the intensity of the transmitted particles decreases with increasing tilt angles [3, 8, 10, 11].
- We identified two significant regions, the so called direct and indirect region, in the transmitted electron intensities. Direct transmission region means, where electrons do not interact with the inner capillary wall before being transmitted through the capillary. The indirect transmission region is, where they can interact at least once with the inner wall of the capillary before being traversed. The transmitted electrons suffer significant energy losses with increasing sample tilt angle in the indirect region. We found that the electrons with higher incident energies suffered larger energy losses with increasing tilt angle [9].
- The guiding ability of the capillary for electrons was analyzed by calculating the characteristic guiding angle Ψ_c (the tilt angle for which the transmitted intensity falls to $1/e$) at different electron beam energies. We found that the guiding angle of the capillary increased with increasing energy above 500 eV in the indirect region. This is completely different from what was observed for slow positive ions and fast electrons on nanocapillary foils and also deviates from the theoretical predictions. This can be caused by the presence of two different processes during the transmission of the electrons through the sample. Rutherford scattering may be dominant at lower energies, whereas Coulombic repulsion due to charge deposition overtakes it at higher energies [8].

3.5. Time evolution of electron transmission

We studied the charge dependence, i.e., the time evolution of the electron transmission for incident electron energy at 500 eV and 800 eV at different tilt angles.

- We demonstrated that the electron transmission through a single glass microcapillary has time- (charge-) dependent behaviour. When the transmitted intensity goes to equilibrium, the centroid energies and corresponding full width at half maximum (FWHM) of the transmitted electron distributions are found to vary in phase and out of phase with the transmitted intensity, respectively.

- Transmission comes to equilibrium when charging and discharging mechanisms get balanced. We found however, that due to repeated sudden partial discharge of the charge patch from time to time, the stable equilibrium was never fully reached even for large integrated charge. Such non-equilibrium has not been previously observed for electron or ion transmission in capillaries [9, 12].

4. Application of the results

The data presented in the PhD thesis strongly support that the guiding effect known from nanocapillaries is also valid up to microscopic dimensions of the order of a millimetre. Due to the guiding effect, one can position the beam and adjust its direction mechanically, without the necessity of electric or magnetic deflection. This opens the possibility of producing cheap electron-optical tools with reasonable brilliance. Eventually, the use of such microcapillaries could be an interesting alternative ion-optical tool for various applications, especially where the size, the costs or the accessibility are critical factors. Concerning the quality of the beam, we have strong evidence that the charge-state of the ions is kept during the guiding through the glass capillary, which is also an important feature for possible applications.

Nanobeams can be used to manipulate molecules and atoms on surfaces, so demand is growing for the use of nanobeams in the fabrication of semiconductor materials. It seems that nano-sized protrusions can be produced on insulating surfaces with the use of slow highly charged ion beams of well-defined size without inducing defects in deeper lying crystal layers. One intriguing challenge is the production of ordered patterns of nanohillocks by HCI impacts on insulator surfaces.

Capillary guiding can also be used in biological and medical applications. With the use of single glass capillaries one can irradiate a single organelle, or even a part of it. The advantage of glass is that it is transparent and thus enables researchers to observe the irradiation point directly using an optical microscope.

5. Outlook - plans for the near future

From the thesis it is clear that there are still many open questions in the complex understanding of the mechanism of particle guiding. Thus we have well defined plans for future investigations. Here I would like to specify just a few of them:

- Investigation of the influence of different external fields on the guiding effect of special samples. This could lead to a possible enhancement of transmission or a better beam emittance at the exit of the capillary.
- Investigation of single charged projectile transmission through a single glass microcapillary.
- Investigation of proton microbeam transmission through different metallic and insulating samples.
- Performing high energy-resolution measurements to investigate electron guiding through different insulating samples.

1. Bevezetés

Doktori értekezésemben töltött részecskék kölcsönhatását vizsgálom egyedi, mikroszkopikus méretű üvegkapillárisokkal.

Az elmúlt évtizedekben számos kutatócsoport foglalkozott nagytöltésű ionok és kapillárisok belső felülete közötti ütközések tanulmányozásával. A fő cél a kölcsönhatások komplex megismerése volt.

Az első kísérletek fémek kapillárisok és ionok kölcsönhatásának vizsgálatára irányultak. Ezen típusú minta esetén a kísérleti eredmények jó egyezésben vannak az elméleti munkákban jóslatokkal (K. Tökési és társai, Phys. Rev. A 64, 2001, 042902). Az első, szigetelő mintával, polimerekbe (polyethylene terephthalate, Mylar) maratott nanométeres, hengeres kapillárisokkal történt kísérletek (N. Stolterfoht és társai, Phys. Rev. Lett. 88, 2002, 133201) azt a nem várt eredményt hozták, hogy a fémek kapillárisokkal végzett vizsgálatok tapasztalataitól teljesen eltérő módon a szigetelő kapillárisok képesek átvezetni töltésállapot változás nélkül a nagytöltésű ionokat, még akkor is, ha a geometriai feltételek ezt nem tennék lehetővé. A szigetelő kapillárisok ionterelő képességének felfedezése óta a jelenség számos tulajdonságát tanulmányozták különféle geometriával rendelkező, különböző anyagú, pl. SiO_2 , Al_2O_3 , üveg mintákon.

Az ionok szigetelő kapillárisokon történő átvezetése a kapillárisokban kialakuló elektromos mezővel hozható összefüggésbe. Ehhez a kapillárisok belső falának töltést kell felhalmozni, egyrészt ahhoz, hogy az elektromos taszítás megakadályozhassa az ionok közeli ütközéseit a felülettel, ezáltal meggátolva az elektronbefogást a felületről, másrészt ahhoz, hogy az ionokat a kijáratú nyílás felé terelje. A feltöltődési fázisban a beeső ionok egy önszervező folyamatban pozitív töltésfoltot helyeznek el a kapilláris belső felszínén, amely ezután felületi és tömbi diffúzióval vándorol a felületen és a tömbben. A később beérkező ionok visszaverődhetnek a töltésfolt Coulomb taszítása következtében, végül a kapilláris belső falával való ütközés nélkül jutnak át azon. Átvezetés akkor figyelhető meg, amikor a falba való ütközés (feltöltődés) és a tömbi vagy felületi transzport (kisülés) között egyensúlyi állapot alakul ki. A jelenlegi elméleti eredmények azt mutatják, hogy a lerakódó töltések jelentős része a kapilláris bemeneténél helyezkedik el. Már ez az egy töltésfelhalmozódás által keltett elektromos tér elegendő a beérkező ionok kapillárison történő átvezetéséhez. A kapilláris nyálábtengelyhez képesti dőlésszögétől, a kapilláris hosszától és a beérkező töltés mennyiségétől függően további kisebb feltöltődött foltok alakulhatnak ki a kapilláris belső felületén.

Annak ellenére, hogy az elmúlt néhány évben nagyszámú kutatócsoport csatlakozott ehhez a területhez, és sokféle kísérletet végzett el szigetelő kapillárisokkal, a kölcsönhatások számos részlete még ismeretlen. Az első mérésekhez multi-kapillárisokat használtak mintaként, amellyel számos hibaforrást vihettek be a kísérletekbe. A fóliába maratott vagy bombázással kialakított csövecskék tökéletes párhuzamosságát nem lehet biztosítani. Hasonló nehézséget jelent a megfigyelések elméleti leírása is. Az egymás közelében lévő töltött kapillárisok kölcsönhatnak egymással, így a pontos ionpályák meghatározásához a kapilláris kötegek kollektív hatását is figyelembe kell venni, ami igen bonyolultá teszi az elméleti leírást.

Ezért, a kísérleti körülményeket egyszerűsítendő, könnyen reprodukálható méréseket végeztem. Kutatómunkám során egyedi mikroszkopikus méretű kapillárisokkal vizsgáltam a töltött részecske terelés jelenségét, mert a jelenlegi technikai feltételek mellett egyedi nanoméretű csövel nem lehet megvalósítani a

kísérleteket. Részben, mert bonyolult ilyen típusú mintát előállítani, másrészt pedig maga a kísérlet kivitelezése is nehézségekbe ütközik.

2. Alkalmazott kísérleti módszerek

2.1. Ionátvezetési kísérletek

A kísérleteket 4.5 keV energiájú, Ar^{9+} ionokkal végeztük el. A nyalábot a Bécsi Műszaki Egyetem 14.5 GHz-es ECR (Electron Cyclotron Resonance) ionforrása segítségével állítottuk elő. A mérések mindig 10^{-8} mbar vákuumszint alatt történtek. A mintán áthaladt részecskék detektálása helyzet érzékeny detektorral történt. A kapilláris mintatartót egy goniométeren rögzítettük, így a kapilláris nagy pontossággal mozgatható x, y és z irányokba is.

A mintatartót függőleges irányban elmozgatva referencia intenzitás mérhető egy meghatározott átmérőjű rés segítségével. Az ionterelés szögfüggésének méréséhez a feltöltetlen kapillárisat a bemenő nyaláb tengelyével párhuzamosan állítottuk be, majd lépésenként növeltük a kapilláris dőlésszögét a nyalábtengelyhez képest.

2.2. Az ionterelés hőmérsékletfüggésének tanulmányozása

A hőmérsékletfüggés tanulmányozása új lehetőségeket nyit a terelési jelenség mechanizmusának, a kapilláris belső felületén történő töltéscsoport felépülésének és megszűnésének még alaposabb megértéséhez. Emellett a hőmérséklet változtatásával lehetőség nyílik az ionterelés optimalizálására, aminek a gyakorlati alkalmazásban lehet nagy szerepe.

A hőmérsékletfüggés vizsgálatához egy teljesen új, hűthető-fűthető mintatartót terveztünk és építettünk meg. Az új mintatartó tervezése mellett a mérési körülményeket is javítottuk. A mérőkamrában a nyomást 5×10^{-9} mbar alá csökkentettük. Elektrosztatikus eltérítő lemezpárok segítségével a kapillárison átjutott ionok töltésállapot analízise is megvalósíthatóvá vált. A kapilláris dőlésszögének változtathatóságát 0.02° -ra finomítottuk.

2.3. Elektronterelési kísérletek

Az elektronok egyedi kapillárisal történő átvezetésének vizsgálata a kalamazooi Western Michigan University Van de Graaff gyorsító laboratóriumában történt.

A minta egy 2° -os forgási szabadságú goniométeren volt rögzítve, így a kapilláris függőleges és vízszintes irányú helyzetét is pontosan meg tudtuk határozni.

A kívánt energiájú elektronokat elektronágyúval állítottuk elő. A nyaláb párhuzamosítása két, egyenként 1.5 és 2.0 mm-es átmérőjű réssel történt, ezáltal a nyaláb szögterülete 2.16° volt. A kapillárison átjutott elektronokat egy elektrosztatikus parallel-plate analízátorral detektáltuk, amely néhány centiméterrel a minta mögött helyezkedett el. Az energiafüggés méréséhez használt spektrométer energiefeloldása $\sim 3\%$, míg szögfeloldása $\sim 2.4^\circ$ volt.

Az elektronátvitel időfüggésének mérését egy új, nagyobb feloldású spektrométerrel végeztük el, amelynek szögfeloldása $\sim 0.3^\circ$ volt. A detektorba ütköző elektronok

számlálása egy mikro csatornás elektronsokszorozóval történt. A mérőkamrában a nyomás a kísérletek során $\sim 10^{-6}$ Torr volt.

3. Új tudományos eredmények

3.1 A kapilláris minta és a speciális mintatartó megtervezése és megépítése

3.1.1 A kapilláris minta

A kapillárisal végzett kísérleteink kulcsfontosságú eleme a megfelelő minta előállítása. Méréseink során egyedi, mikroszkopikus méretű hengeres üvegapilláris használtunk, melyeknek hosszúsága, $l \sim 14$ mm, belső átmérője, $d \sim 0.17$ mm volt. A töltött részecske tereléses kísérletek kritikus pontja, hogy mennyire tudjuk biztosítani, majd reprodukálni a nyaláb és a kapilláris tengelyének párhuzamosságát. A szisztematikus vizsgálatokhoz szükséges minták előállítására egy eljárást fejlesztettem ki az MTA Atommagkutató Intézetében [1].

Az eljárás a következő:

- A kapilláris egy alumínium korongban rögzítettem.
- A minta külső felszínét és a mintatartót grafitral vontam be a töltéskisülés megakadályozására. Ezt a grafitozást a hőmérsékletfüggés vizsgálata során is alkalmaztam a kapilláris rögzítéséhez, valamint a jó elektromos és hőmérsékleti kontaktus biztosításához a kapilláris és az azt körülvevő fémtömbök között.
- A töltött részecske átvezetési kísérletek kritikus pontja a nyaláb és a kapilláris tengelyének pontos egybehangelése. Ezért terveztem egy speciális eszközt, amivel a minta és a mintatartó egymásra való merőlegessége biztosítható.

3.1.2 Mintatartó az ionterelés hőmérsékletfüggésének tanulmányozásához

Ahhoz, hogy a kapillárisal történő ionterelés jelenségének hőmérsékletfüggését vizsgálni tudjunk, a Bécsi Műszaki Egyetem Atom és Plazmafizikai Csoportjával együttműködésben kifejlesztettem és megépítettem az első hűthető-fűthető mintatartót [5].

A mintatartó két fő részből áll, az alsó és felső réztömbből, amelyek úgy működnek, mint egy kemence. A két tömb teljesen körbeveszi a kapillárisot, ezáltal egyenletes hőmérsékletet biztosítva annak teljes felülete mentén. A réztömbök hőmérsékletét K-típusú hőelemmel mértük. Az egyes réztömbök melegítését koaxiális rozsdamentes acél fűtőelemekkel biztosítottuk. A fűtés teljesítménye PID (proportional, integral, derivate) szabályozóval történt. A minta hűtését egy réz összeköttetéssel valósítottuk meg, amely a mérőkamrán kívül egy cseppfolyós nitrogén tartályhoz csatlakozott. Az ily módon kialakított rendszerrel -30°C és 90°C közötti tartományban tudtuk változtatni a kapilláris hőmérsékletét.

Ez a speciális mintatartó lehetővé teszi a terelési jelenség pontos és reprodukálható vizsgálatát.

3.1.3 Külső elektromos terek hatása töltött részecskék kapillárison történő átvezetésére

Tervezzük külső elektromos terek kapillárisban végbemenő önszerveződő folyamatra gyakorolt hatásának vizsgálatát. Ezért miniatűr mintatartókat terveztünk és építettünk meg, amelyek egyenként egy-egy $\sim 200 \mu\text{m}$ belső átmérőjű egyenes, elektródákkal ellátott üvekapilláris mintát tartalmaznak.

Két különböző, ultra nagy vákuumban is használható mintát terveztünk. Az elektródák rögzítéséhez öntapadó rézfóliát használtunk. Az elektródákkal ellátott kapillárisot egy alumínium csőben rögzítettük. Az elektródák egyikére nagyfeszültség kapcsolható. Az összes többi fémes kapcsolat földelt. Mivel a kapillárisban a külső elektromos térnek a töltésfolt felépülésére gyakorolt hatását szeretnénk megfigyelni, ezért a minta bemeneti és kimeneti rését gyűrű alakú elektródák segítségével földeltük [13].

3.2 Egyedi, mikroszkopikus méretű üveg kapilláris ionterelő képességének vizsgálata

4.5 keV energiájú Ar^{9+} ionok terelődési jelenségét vizsgáltuk nagy hossz-átmérő arányú ($l/d \sim 80$) üvekapillárisal.

- Elsőként megmutattam, hogy a nanokapillárisoknál tapasztalt töltött részecske átvezetés mikroszkopikus méretű kapillárisok esetében is megfigyelhető. Jelentős átvitel tapasztalható még a nyalábtengelyhez képest nagy szögben döntött kapillárisok esetében is.
- Eredményeink egyértelműen bizonyítják, hogy az átviteli tér felépülése időfüggő folyamat, melynek kialakulása után stabil az átvitel [1, 6].
- Kimutattuk, hogy az átjutott ionok szögeloszlása keskenyebb a primer nyalábénál, azaz a kapillárisnak fókuszáló, nyalábformáló tulajdonsága van [1, 2, 4, 6].

3.3 Az ionterelés hőmérsékletfüggésének vizsgálata

Elsőként vizsgáltuk az ionterelés hőmérsékletfüggését. A terelési folyamat optimalizálásának egyik módja a szigetelő anyag elektromos vezetőképességének megváltoztatása. Az üveg elektromos vezetőképességének erős hőmérsékletfüggése, ami közel exponenciális-függés, lehet a kulcsa a terelési mechanizmus szabályozásának.

- Megmutattuk, hogy a kapilláris hőmérsékletének megváltoztatásával több nagyságrenddel tudjuk változtatni a boroszilikát üveg elektromos vezetőképességét. Ezáltal tanulmányozható a kapilláris belsejében a töltésfolt felépülése és a kisülés folyamata [7].
- Bebizonyítottuk, hogy az üveg hőmérséklete nagymértékben befolyásolja a kapillárison át történő ionáramlást, aminek hatása kompenzálható a bemenő ionárammal. Az ionterelés állapota az alacsony hőmérsékleten bekövetkező ionterelés blokkolásától, a szobahőmérsékleten létrejövő maximális

hatékonyaságú átvezetésen át, az ütközésmentes geometriai átvitelig szabályozható [7].

3.4 Az elektronterelés energiatartomány vizsgálatának vizsgálata

300 - 1000 eV energiatartományban vizsgáltuk elektronok üvegkapillárison történő átvitelét.

- Méréseinkkel megmutattuk, hogy a mikroszkopikus méretű szigetelő cső is képes átvezetni az elektronokat, még a kapillárisnak a bemenő nyaláb tengelyéhez képesti nagy dőlésszöge ($\Psi \sim 5^\circ$) esetén is. Az elektronok a kapillárison való áthaladásuk során, szemben az ionos kísérletekben tapasztaltakkal, jelentős energiavesztést szenvednek az üveg falával történő rugalmatlan ütközés következtében [3, 8, 10, 11].
- A vizsgált elektron energiák esetén azt tapasztaltuk, hogy mind az iontereléstől, mind a lassú elektronok transzportjától eltérő módon, a kapilláris dőlésszögétől függően két, egy direkt és egy indirekt régiót különböztethetünk meg az átmenő elektronok intenzitásának függvényében. A direkt régióban az elektronok nem ütköznek a kapilláris belső falával áthaladásuk során, míg az indirekt régió esetén az adott geometria mellett az elektronok legalább egyszer ütközhetnek a minta belső falával. A direkt régióban az átmenő elektron intenzitásának csökkenése független a bemenő elektron energiájától. Ezzel szemben az indirekt régióban energiatartomány függés figyelhető meg, a nagyobb energiájú bemenő elektronnyaláb energiavesztése nagyobb, és az energiavesztés növekszik a növekvő kapilláris dőlésszöggel [9].
- Az elektronterelés hatékonyságát a karakterisztikus terelési szög ψ_c (az a kapilláris dőlésszög, amelynél az átjutott részecskék intenzitása $1/e$ értékre csökken) kiszámolásával határoztuk meg. Azt az eredményt kaptuk, hogy a kapilláris terelési szöge az indirekt régióban, 500eV energia fölött növekvő energiával nő. Ez az eredmény eltér a lassú pozitív ionok és gyors elektronok esetén nanokapilláris mintákkal végzett mérések esetén tapasztaltakkal, és a jelenlegi elméleti jóslatokkal is ellentmondásban van. Ennek oka, hogy a terelés folyamán alacsonyabb energiáknál a Rutherford szórás, magasabb energiáknál a Coulomb taszítás játszhatja a domináns szerepet [8].

3.5 Az elektron-átvezetés időfüggésének vizsgálata

Az energiatartomány mellett vizsgáltuk az elektronok szigetelő kapillárison való átvezetésének időfüggését is 500 eV és 800 eV energiájú részecskékkel.

- Megmutattuk, hogy az elektronok egyedi üveg mikrokapillárison történő terelése időfüggő folyamat. Amikor a kapillárison átjutott elektronok intenzitása egyensúlyi állapot közelébe kerül, akkor ezen részecskék átlagos energiája és az ahhoz tartozó energiaeloszlás félértékessége fázisban, illetve ellentétes fázisban van az intenzitással.

- A töltésfolt folyamatos növekedése, majd kiszülése következtében, ellentétben a korábbi elektronos és ionos megfigyelésekkel, stabil egyensúlyi állapot nem következik be, még nagy bemenő nyalábintenzitás esetén sem [9, 12].

4. Az eredmények alkalmazása

A doktori értekezésemben tárgyalt eredmények egyértelműen mutatják, hogy a nanokapilláris mintánál felfedezett töltött részecske terelő jelenség mikroszkopikus méretű, egyedi kapillárisoknál is megfigyelhető. Egy új lehetőség a töltött részecskék irányítására a töltött részecskék egyedi üvegkapillárison történő töltésállapot változás nélküli önszerveződő átvezetése lehet.

A szigetelő kapillárisokról szerzett eddigi ismereteink lehetőséget nyújtanak új ionvezetési technika kidolgozására. Sokkal egyszerűbben és kevesebb anyagi befektetéssel lehetne ion-optikai elemeket előállítani. Az ionnyaláb előállítása nem igényel vezérelhető tápegységet, és maguk az ionok építik fel egy önfenntartó folyamat során a fókuszáló teret. Nanoméretű kiemelkedések szigetelő felületeken történő kialakítása jól meghatározott méretű nagytöltésű ionnyalábbal magában hordozza annak a lehetőségét, hogy a mélyebben fekvő kristályrétegek deformálása nélkül, szabályos struktúrákat tudjunk kialakítani a felületeken. Érdekes kihívás lehet nagytöltésű ionokkal rendezett mintázatú nanodombok kialakítása szigetelő felületeken.

A kapilláris ionterelő képessége a biológia és az orvoslás területén is felhasználható lehet. Egy egyedi üvegkapilláris segítségével nemcsak egy sejt, hanem annak egy meghatározott része is besugározható. Az üvegből készült minta előnye, hogy átlátszó, ezáltal a besugárzási pont közvetlenül megfigyelhető egy optikai mikroszkóp segítségével. A tumor nehéz-ionokkal történő besugárzásának kritikus kérdése, hogy mennyire tudjuk pontosan a megfelelő helyre eljuttatni a részecskéket, ebben lehet szintén jelentős szerepe az egyedi üvegkapillárisoknak.

5. Kitekintés - a közeljövő tervei

A doktori értekezésemben leírtak alapján egyértelmű, hogy még számos megválaszolatlan kérdés maradt a részecsketerelés mechanizmusával kapcsolatban. Így jól meghatározott terveink vannak a téma jövőbeni kutatásának folytatására:

- Vizsgálni fogjuk különféle külső elektromos térnek az ionterelés folyamatára gyakorolt hatását az általunk megtervezett, speciális mintákkal. Ezáltal várhatóan növelni tudjuk az ionterelés hatékonyságát.
- Tervezzük egyszerűen töltött részecskék átvezetésének vizsgálatát egyedi, szigetelő mikrokapillárisokkal.
- Vizsgálni fogjuk proton mikronyaláb terelődesi mechanizmusát különféle egyedi, szigetelő mintákon keresztül.
- Nagy energia-feloldású mérések kivitelezését tervezzük az elektrontranszport folyamatának további tanulmányozásához. Ehhez különféle szigetelő mintákat fogunk tervezni és készíteni.

6. Publications related to the thesis / A doktori értekezés témájához kapcsolódó tudományos közlemények

1. **R.J. Berezky**, G. Kowarik, F. Aumayr and K. Tőkési, *Transmission of 4.5 keV Ar⁹⁺ ions through a single glass macrocapillary*, Nucl. Instr. and Meth. B **267** (2009) 317.
2. **R.J. Berezky**, G. Kowarik, C. Lemaignan, F. Aumayr, K. Tőkési, *Transmission of 4.5 keV Ar⁹⁺ ions through a single glass macrocapillary*. Journal of Physics 194 (2009) 132019.
3. **R.J. Berezky**, B.S. Dassanayake, S. Das, K. Tőkési, J.A. Tanis, *Guiding of electrons through a single glass macrocapillary*. Journal of Physics 194 (2009) 132014.
4. **R.J. Berezky**, G. Kowarik, C. Lemaignan, A. Macé, F. Ladinig, R. Raab, F. Aumayr, and K. Tőkési, *Guiding Of Slow Highly Charged Ions Through A Single Mesoscopic Glass Capillary*, CAARI 2010. AIP (2011) 119.
5. **R.J. Berezky**, G. Kowarik, K. Tőkési and F. Aumayr, *Sample holder for studying temperature dependent particle guiding*, Nucl. Instr. and Meth. B. 279 (2012) 182.
6. G. Kowarik, **R.J. Berezky**, F. Aumayr and K. Tőkési, *Production of a microbeam of slow highly charged ions with a single microscopic glass-capillary*, Nucl. Instr. and Meth. B **267** (2009) 2277.
7. G. Kowarik, **R.J. Berezky**, F. Ladinig, D. Schrempf, C. Lemell, J. Burgdörfer, K. Tőkési and F. Aumayr, *The Way to Optimum Ion Guiding through Insulating Capillaries*, arXiv: 1109.3953v1.
8. B.S. Dassanayake, S. Das, **R.J. Berezky**, K. Tőkési, J.A. Tanis, *Energy dependence of electron transmission through a single glass macrocapillary*. Physical Review A **81** (2010) 020701(R).
9. B.S. Dassanayake, **R.J. Berezky**, S. Das, A. Ayyad, K. Tőkési and J.A. Tanis, *Time evolution of electron transmission through a single glass macrocapillary: charge build-up, sudden discharge, and recovery*, Physical Review A **83** (2011) 012707.
10. B.S. Dassanayake, S. Das, A. Ayyad, **R.J. Berezky**, K. Tőkési and J.A. Tanis, *Charge evolution and energy loss associated with electron transmission through a macroscopic single glass capillary*, Nucl. Instr. and Meth. B **269** (2011) 1243.

11. B.S. Dassanayake, S. Das, **R.J. Berezky**, K. Tőkési, J.A. Tanis, *Energy dependence of electron transmission through a single glass capillary*. Journal of Physics **194** (2009) 132016.
12. B.S. Dassanayake, S. Das, **R.J. Berezky**, K. Tőkési, J.A. Tanis, *Time evolution of electron transmission through a single glass capillary*. Journal of Physics **194** (2009) 132011.
13. Accepted ITS LEIF proposal, No: P09076A: *The influence of external electric fields onto capillary guiding* (2009).

7. Other scientific publications related to the topic of the thesis / Egyéb, a doktori munkához kapcsolódó tudományos közlemények

14. Z. Juhász, B. Sulik, R. Rácz, S. Biri, **R.J. Berezky**, K. Tőkési, Á. Kövér, J. Pálincás, N. Stolterfoht, *Ion guiding accompanied by formation of neutrals in polyethylene terephthalate polymer nanocapillaries: Further insight into a self-organizing process*, Physical Review A **82** (2010) 062903.
15. K. Tőkési, I. Rajta, **R.J. Berezky**, K. Vad, *Investigation of MeV proton microbeam transmission between two flat plates – the cases of homogeneous metallic and insulator plates*, Nucl. Instr. and Meth. B. **279** (2012) 173.

8. Invited talks / Meghívott előadások

- O1. **R.J. Berezky**: *Guiding of slow highly charged ions through a single mesoscopic glass capillary*, CAARI 2010 21st International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, Denton, Texas, USA, 8-13 August, 2010.
- O2. **R.J. Berezky**: *The effect of temperature on guiding of slow highly charged ions through mesoscopic glass capillaries*, CEPAS 2011, 5th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems, Belgrade, Serbia, June 21 - 25, 2011.
- O3. **R.J. Berezky**: *Controlling the guiding properties of mesoscopic glass capillaries for slow highly charged ions*, ICPEAC, XXVII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, Belfast, Northern Ireland, UK, 27 July - 2 August, 2011.

9. Educational publications / Ismeretterjesztő közlemények

E1. **R. J. Bereczky**, G. Kowarik, F. Aumayr and K. Tőkési Guiding of HCl through a single macroscopic glass-capillary, ITSLEIF Newsletters 11 (2008).

E2. K. Tőkési, **R.J. Bereczky**, Töltésüket megőrző parányok önterelődése makropillárisokban, Természet világa (2012), accepted.

10. Other, not referred publications / Egyéb, nem referált publikációk

26 posters and 9 talks

15 ATOMKI Annual reports