

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei  
Abstract of PhD Thesis

**Plazmadiagnosztikai vizsgálatok, ionnyaláb- és műszaki fejlesztések az  
ATOMKI elektron-ciklotronrezonanciás (ECR) ionforrásán**

**Plasma diagnostic research, technical and ion beam developments at the  
ATOMKI Electron Cyclotron Resonance (ECR) Ion Source**

Rácz Richárd Péter

Témavezető/Supervisor:  
Dr. Biri Sándor



Debreceni Egyetem  
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

University of Debrecen  
PhD School in Physics

Debrecen, 2013

**Készült**

A Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának „Atom- és  
molekula fizika” programja keretében a  
Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézetben (ATOMKI)

**Prepared at**

the University of Debrecen  
PhD School in Physics  
and  
the Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences  
(ATOMKI)

## Bevezetés

Az elektron-ciklotronrezonanciás (ECR) ionforrások (ECRIS) kiemelkedő és sok esetben egyedülálló tulajdonságaiknak köszönhetően a világ számos pontján állítanak elő és szolgáltatnak nagytöltésű, nehézionnyalábú nagyenergiájú részecskegyorsítók (ciklotronok, szinkrotronok, tárológyűrűk) számára. A nagyteljesítményű 2-20 GHz-es frekvenciájú mikrohullámú sugárzással plazmát gerjesztő berendezések fejlesztésének világszerte elsődleges célja a lehető legnagyobb töltésállapotú és intenzitású ionnyaláb előállítás, gyorsítóba való juttatása, kis hatáskeresztmetszetű atom-, mag- és részecskefizikai folyamatok vizsgálatához.

Az ilyen típusú ionforrások azonban néhány esetben alacsony energiás részecskegyorsítóként működnek, lefedve olyan energiatarományokat, melyek atomfizikai kísérletekhez eddig elérhetetlenek voltak. Az Atommagkutató Intézet (ATOMKI) ECR ionforrása, melyen kutató munkámat végeztem, egy modularitásának és (nagyenergiájú részecskegyorsítótól való) függetlenségének köszönhetően rendkívül változatos alkalmazási lehetőségekkel bíró ion- és plazmaforrás. Kiváló lehetőséget biztosít plazmafizikai, anyagtudományi és alacsony energiás atomfizikai kutatások elvégzésére. Így tehát ez a berendezés nem csak kutatásaink eszköze, hanem tárgya is.

A disszertációm alapjául szolgáló kutatómunkám két jól elkülöníthető és mégis szorosan összefüggő csoportba sorolható. Az egyik rész a standard üzemmódoktól merőben eltérő, a forrás technikai módosítását igénylő nyaláb- és műszaki fejlesztés. A másik pedig az ionforrás plazmájának mélyebb megértését célzó plazmafizikai kutatások.

Az atomfizikai és anyagtudományi kísérletek által szorgalmazott nyalábfelvezetési munkáim során az ionválaszték bővítésének szükségességén túl mindvégig fontosnak tartottam egy másik szempontot is. Az eredményeket elemző hozzáállással (a technikai fejlesztéseken túlmenően, a folyamatok hátterét megértve) és a berendezés jelentős módosítása nélkül kívántam elérni.

Disszertációm gerincét az ionforrás plazmájának többféle módszerrel történő vizsgálata alkotja. A plazmában lejátszódó folyamatok pontosabb megértését célzó kísérleteket, plazmadiagnosztikai vizsgálatokat végeztem. A mindenkori ATOMKI ECR csoport kutatási témáinak színes palettáján előkelő helyet foglalnak el ezek a típusú kísérletek. Az ECR plazmák diagnosztikai vizsgálatának két nagy csoportját különböztetjük meg: lokális és globális plazmadiagnosztika.

Munkám során a második módszert alkalmaztam. A globális plazmadiagnosztika a plazmában lejátszódó folyamatok (elektron-atom,

elektron-ion, ion-atom, ion-ion ütközések) következtében igen széles energiasávban (infravörös, láthatófény, ultraibolya és röntgen) kibocsátott elektromágneses sugárzások vizsgálatán alapul. Ezen sugárzások detektálásával és elemzésével, a folyamatokba történő direkt beavatkozás nélkül nyerhetünk két-, esetleg háromdimenziós információt a plazmát alkotó komponensek térbeli eloszlásáról. A diagnosztikai eredmények értelmezése az ECR plazmát jellemző különböző paraméterekkel rendelkező és egymással komplex csatornákon együtthető részecskék nagy száma miatt számítógépes modellezéssel történik. A plazmadiagnosztika területén elért eredményeim helyes interpretálását az ECR csoport által korábban kifejlesztett, a plazma elektronkomponensének háromdimenziós energia- és térbeli eloszlását szimuláló, önmagában is diagnosztikai feladatokat ellátó TrapCAD program segítette.

## Új tudományos eredmények

A doktori értekezésemben ismertetett kutatómunkámat a Magyar Tudományos Akadémia (MTA) Atommagkutató Intézetben üzemelő ECR ionforrás laboratóriumban, az ECR kutatócsoport tagjaként végeztem 2008 és 2012 között. Kutatási eredményeim a következő tézispontokban foglalhatók össze.

1. Az ATOMKI ECR ionforrás által biztosított ionválaszték lehetőségeket negatív- illetve molekula ionnyalábokkal bővítettem ki, mely a következő új tudományos eredmények elérését tette lehetővé:
  - a. Megmutattam, hogy egy nagy töltésű ionok előállítására tervezett ECR ionforrás segítségével jelentős nyalábintenzitással lehetséges (néhány esetben mA tartományba eső) egyszerűen töltött  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $OH^+$ ,  $H_2O^+$ ,  $H_3O^+$ ,  $O_2^+$  molekula ionnyaláb,  $\mu A$  tartományba eső  $H^-$ ,  $O^-$ ,  $OH^-$ ,  $O_2^-$ , és nA nagyságrendű  $C^-$ , és  $C_{60}^-$  negatív ionnyaláb létrehozása. A nyalábok előállítását egy szokatlan hibrid un. multicusp és ECR, kétfrekvenciás üzemiállapot alkalmazásával értem el [1, 2].
  - b. A negatív ionnyalábok ECR ionforrásban való képződésének plazmafizikai vizsgálatát végeztem úgynevezett kettős üzemiállapotban. A negatív ionképződésre optimalizált plazmák beállítási paraméterei mellett a plazma negatív és pozitív ionkomponensét egyaránt megmértem. Meghatároztam százalékos összetételüket. Szoros, lineáris korrelációt mutattam ki az adott negatív ionkomponensből elért maximális nyalábáram és a plazmáját jellemző százalékos összetétel között [1].

2. Az ECR ionforrások láthatófény tartományú globális plazmadiagnosztikai módszertanát kiterjesztettem a plazmáról digitális fényképezőgéppel készült láthatófény felvételek kvantitatív, spektrális, illetve háromdimenziós kiértékelésének és leképezésének lehetőségével:
  - a. Digitális fényképezőgépet, mint detektort alkalmaztam a plazma szisztematikus, kvantitatív vizsgálatára. A módszertani eredmény lehetővé tette, hogy a plazma elektromágneses spektrum láthatófény tartományában adott válaszát (az olyan alapvetőnek számító beállítási paraméterek hatására, mint a gáznyomás, gázösszetétel, axiális mágneses tér erőssége, mikrohullám teljesítménye és frekvenciája) a képekhez tartozó intenzitás értékek alapján tanulmányozzam, majd beilleszem a korábban más módszerekkel végzett kísérleti eredmények rendszertanába [3, 4, 12].
  - b. Megmutattam a homogén gerjesztésekhez tartozó, normalizált és alapszínekre szétválasztott elméleti spektrumvonalak egyezőségét az emberi szem, illetve a fényképezőgép által érzékelt spektrális információkkal [9, 13].
  - c. Kidolgoztam egy eljárást, mely alkalmas visszaadni a plazma háromdimenziós szerkezetét jól meghatározott optikai feltételek mellett készült kétdimenziós fényképsorozat segítségével. Az eljárást sikeresen alkalmaztam az ATOMKI ECR ionforrás mellett üzemelő kisméretű, asztali ECR plazmaforrás plazmájának háromdimenziós leképezésére [8].
3. Az ATOMKI ECRIS plazmájának elektronkomponensét szimuláltam a TrapCAD program segítségével. A megmaradó elektronkomponenst energia szerint négy csoportra osztottam. Az egyes komponensek szerint szűrt elektronok térbeli eloszlásának vizsgálatával megállapítottam, hogy az elektronok a rezonáns zóna által meghatározott nagy sűrűségű plazmára és az ezt körülvevő, főleg kis energiájú elektronok által dominált ritka burokra válnak szét [6, 10].
4. Összehasonlító elemzést végeztem a plazma szimulált elektronkomponense, a láthatófény tartományban készült felvételek valamint a 2002/2003-ban az ionforrás plazmájáról röntgentartományban üzemelő lyukkamerával készített felvételek [5] között. Jó általános egyezést mutattam ki a hideg-elektronok térbeli eloszlása és a láthatófény felvételek, valamint a meleg-elektronok és az ionfelhő térbeli eloszlása között. A képeket, modellezéseket, az azok közti hasonlóságokat és különbözőségeket kvalitatív módon értelmeztem [7].

## **Az eredmények alkalmazási lehetőségei**

Disszertációm új tudományos eredményei legközvetlenebb módon a nagyenergiájú részecskegyorsítók ionnyalábjait legtöbb esetben szolgáltató ECR ionforrások fejlődését és a hozzá kapcsolódó elméletek pontosítását szolgálják. Az alkalmazás lehetőségeinek két nagy iránya van: ionnyaláb és felület kölcsönhatásának vizsgálata (i) illetve az általános plazmadiagnosztikai eredmények alkalmazása (ii).

(i) Az atomfizikai és anyagtudományi kísérletek által megkövetelt kis energiájú különleges ionnyalábok biztosítása kihívást jelentő feladat. A molekula- és negatív ionnyalábok, a magas olvadáspontú szilárd halmazállapotú anyagokból történő plazma és nyaláb előállítások a legtöbb esetben speciális ionforrást vagy legalábbis különleges eszköztárat igényelnek. A disszertációmban megmutattam, hogy speciális porlasztósos technikával, számottevő átalakítások nélkül,  $\mu\text{A}$  tartományba eső nagytöltésű arany és kalcium nyalábok elérhetők [11]. Ezzel lehetőség nyílik a napjainkban folyamatosan növekvő jelentőségű bio-kompatibilis ionnyalábokkal módosított, funkcionalizált felületek (egészségügyi és technikai alkalmazásokkal kecsegtető) előállítására és alapkutatására az ATOMKI-ban. A negatív ionnyalábok alkalmazásával egyes atomfizikai kutatások új irányokba történő vizsgálata válik lehetségese. Ilyen például a laboratóriumunkban nagy hagyományokkal rendelkező szigetelő nanokapillárisok ionterelésének tanulmányozása negatív ionok esetén.

(ii) A plazmadiagnosztikai vizsgálataim általános eredményeit felhasználva két kutatási irány válik megalapozottá. Kihhasználva, hogy a szimulált meleg-elektronok térbeli eloszlása szoros összefüggésben van az ionfelhő térbeli eloszlásával, a TrapCAD elektronszimulációs program bemeneti sűrűségparaméterekkel szolgálhat a napjainkban már ezzel számolni képes, ionok kivonását szimuláló programok számára. Másrészt, a hideg-elektronok és láthatófény felvételek között kimutatott korreláció (a gyorskamerák egyre fejlettebb kivitelezésének köszönhetően) a plazmák hideg-elektronkomponensének tér- és időbeli fejlődésének vizsgálatához teremt alapot láthatófény tartományban. Az ECR plazmafizikában napjainkban intenzíven kutatott begyűjtési tranziens (preglow) eleddig még nem tanulmányozott aspektusának vizsgálatát teszi lehetővé. Itt jegyezném meg, hogy az infrastrukturális fejlesztések keretein belül megépített asztali ECR plazmaforrás plazmafizikai kísérletek előkészítésén túl oktatási és demonstrációs feladatok ellátására is kiválóan alkalmas.

## Introduction

The ECR (Electron Cyclotron Resonance) ion sources (ECRIS) all over the world provide highly charged heavy ion beams for high energy particle accelerators (cyclotrons, synchrotrons, storage rings) because of their favorable and unique features. The plasma is heated up by the externally coupled high-power microwave in the 2-20 GHz region. The main aim of the developments of the ECRISs is to produce as high intensity and as highly charged ion beams as possible for investigation of the processes of atomic, nuclear and particle physics with low cross sections.

However, in some cases they operate as independent devices to deliver low energy ion beams for atomic physics research. The ECR ion source of the Institute for Nuclear Research (ATOMKI) is a multipurpose stand-alone device opening the possibility to produce various plasmas and ion beams for many applications e.g. plasma physics research, material science and atomic physics research. According to this point of view the ATOMKI ECRIS is highly suitable to be investigated and to use it for research projects at the same time.

My thesis work can be divided into two different but strongly related parts. The first one is the technical and beam development of the ATOMKI ECRIS, requiring the technical modification of the source. The second part corresponds to my research activities in the field of ECR plasma diagnostic research.

In the frame of the technical and beam developments research I concentrated to extend the choice of the ion beams for atomic physics research and for material research. However, during my work I kept always in mind that our aim is to produce such kind of ions with analytic attitude (not only concentrate to the technical part, but try to give explanation of the background) and without any major modification on the source.

The most significant part of my thesis concentrates to the investigation of the plasma of the ion source by different methods. In order to understand better the properties of the plasmas diagnostic research was performed. It always had great importance in our laboratory. The experimental investigation of the ECR plasma can be divided into two main groups: local and global diagnostic methods. In my thesis work I used the last one. It is based on the fact that the plasmas emit radiation in the infrared (IR), visible light (VL), ultraviolet (UV), and X-ray (XR) regions of the electromagnetic spectrum. Measurement and analysis of photos and spectra taken in any of these regions give an important and new insight into the plasma structure and into the density distribution of the different components of the plasma. Because of the high number of the plasma particles and of the

many kinds of interaction that take place between them, the theoretical interpretation of the experimental results is usually given by using simulation codes. The interpretation of my results was given by using the TrapCAD code. The TrapCAD is simulation program which can calculate and visualize the energy and density distribution of the electron component of the ECR plasma in three dimensions.

## **New scientific results**

I have prepared my thesis as a member of the ECR laboratory of ATOMKI from 2008 to 2012. The results of my research can be summarized in the following thesis points:

1. I have extended the choice of the ion beams provided by the ATOMKI ECR ion source to molecular and negative ion beams, which allowed to achieve the following new scientific results.
  - a. It was proved that negative ions of  $\text{H}^-$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{O}_2^-$  in  $\mu\text{A}$  range, and  $\text{C}^-$ ,  $\text{C}_{60}^-$  in nA range and molecular ion beams of  $\text{H}_2^+$ ,  $\text{H}_3^+$ ,  $\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{O}_2^+$  (sometimes in the mA range) can be produced by an ECR ion source designed for highly charged ion (HCI) beam production. The results were obtained using a combined ECR + multicusp double frequency operation mode [1, 2].
  - b. The plasma physics background of the negative ion production in an ECR plasma was investigated in a so called dual operation mode. The positive ion component of the plasma optimized for negative ion production was detected. The composition of the positive and negative ions in the plasmas was described. A strong linear correlation was found between the percentages of the cumulative negative component of the plasma and the measured Faraday cup current [1].
2. I have extended the global ECR plasma diagnostic methodology in visible light range to the possibility of quantitative, spectral and 3D investigations of the photographs taken of the plasma by a digital camera.
  - a. The new method allowed to study the effect of the essential setting parameters like gas pressure, gas composition, magnetic field, microwave power and microwave frequency to the shape and structure of the plasma. Numerical information on the photographs was obtained using the pixel intensity values of the plasma photos [3, 4, 12]. The results of the new method were successfully inserted to the taxonomy of the experimental knowledge.



- b. I showed that the normalized theoretical spectral lines decomposed to the primary colors agree with the spectral information sensed by the human eye and detected by the camera [9, 13].
  - c. I worked out a method which can reconstruct the three dimensional structure of the plasma by two dimensional photo series taken at well-defined setting parameters. I have successfully applied this method to map in 3D the plasma of the ECR table-top plasma generator operating beside the ATOMKI ECRIS [8].
3. I simulated the electron component of the ATOMKI ECRIS plasma by the TrapCAD code. The electron component of the plasma was grouped into four sub-populations. By the investigation of the spatial and energy density distribution of the non-lost electrons I conclude that the electrons separate into a high density inner plasma (developed by the resonant zone) surrounded by a lower density halo mainly dominated by cold electron [6,10].
4. I have presented a comparative study of the density distribution of images obtained by different diagnostic methods: the visible light images, the X-ray images (taken of the plasma by pinhole X-ray camera in 2002/2003 [5]) and the simulation of the electron component of the plasma. I have manifested good agreement between the spatial distribution of the cold electron component and VL photographs and also between the warm electron component and the spatial distribution of the ion cloud. Qualitative interpretation of the similarities and differences between the photos and simulations was provided [7].

### **Applications of the scientific results**

The obtained new scientific results have significant importance mainly in the field of ECR ion sources and accelerators. There are two directions of the possible applications of the results: investigation of the interaction of the ion beam with surfaces (i) and application of the overall plasma diagnostic results (ii).

(i) Production of the low energy non-standard ion beams required by different experiments in the field of atomic and material physics is a challenging task. In most cases molecular, negative, and metal ion beams are usually produced by special ion sources or by using special tools. In my thesis I showed that using special sputtering technique calcium and gold ion beams in the  $\mu\text{A}$  range can be achieved without any major modification on the source [11]. This result opens the possibility in the ATOMKI to

investigate the biologically and technically important modification and functionalization of surfaces produced by highly charged ion beam from biocompatible metals. Using the negative ion beam new aspect of some atomic physics research can be investigated. For example investigation of the phenomenon of the ion guiding in insulating nano capillaries can be extended to the negative ions.

(ii) Using the overall results of plasma diagnostic studies two long-term research projects can be suggested. One of them comes from the statement that the spatial distribution of the ion cloud corresponds to the spatial distribution of the warm electrons. Nowadays the extraction simulation codes can use the initial position of the plasma ions to be extracted. The density distribution of the energy filtered warm electrons simulated by TrapCAD can be used as input parameter for the ions extraction simulations. On the other hand our study showed that the cold electron component well corresponds to the visible light photographs. Therefore the time evolution of the cold electron component of the ECR plasma could be investigated in the visible light range by fast digital cameras. The recently intensively studied preglow transient could be analyzed from a new point of view by this method. I note that the ECR table-top plasma generator built in the framework of the infrastructure developments is highly suitable to prepare and to test plasma diagnostic measurements, and to be work place for students.

**Az értekezés alapjául szolgáló publikációk**  
**Scientific publications relating to the dissertation**

**Impakt faktossal rendelkező közlemények**  
**Scientific papers with impact factor**

1. **R. Rácz**, S. Biri, Z. Juhász, B. Sulik and J. Pálincás, *Molecular and negative ion production by a standard electron cyclotron resonance ion source*, Review of Scientific Instruments 83 (2012) 02A313 (3pp).

A folyóirat impakt faktora **1.367**.

2. S. Biri, **R. Rácz** and J. Pálincás, *Status and special features of the Atomki ECR ion source*, Review of Scientific Instruments 83 (2012) 02A341 (3pp).

A folyóirat impakt faktora **1.367**.

3. **R. Rácz**, S. Biri and J. Pálincás, *Electron cyclotron resonance plasma photos*, Review of Scientific Instruments 81 (2010) 02B708 (3pp).

A folyóirat impakt faktora **1.598**.

4. **R. Rácz**, S. Biri and J. Pálincás, *Visible light emission of Electron Cyclotron Resonance plasmas*, IEEE Transactions on Plasma Science 39/11 (2011) 2462-2463.

A folyóirat impakt faktora **1.174**.

5. S. Biri, E. Takács, **R. Rácz**, L. T. Hudson and J. Pálincás, *Pinhole X-Ray camera photographs of an ECR Ion Source plasma*, IEEE Transactions on Plasma Science 39/11 (2011) 2494-2495.

A folyóirat impakt faktora **1.174**.

6. S. Biri, **R. Rácz**, J. Imrek, A. Derzsi, Zs. Lécz, *Imaging of ECR plasma by computer simulation*, IEEE Transactions on Plasma Science 39/11 (2011) 2474-2475.

A folyóirat impakt faktora **1.174**.

7. **R. Rácz**, S. Biri and J. Pálincás, *ECR plasma photographs as a plasma diagnostic*, Plasma Sources Science and Technology 20 (2011) 025002 (7pp).

A folyóirat impakt faktora **2.521**.

**Konferencia kiadványok**  
**Conference proceedings**

8. **R. Rácz**, S. Biri, J. Pálincás, *An ECR table plasma generator*, Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Workshop on ECR Ion Source, ECRIS 10. Grenoble, France, 23-26 Aug., 2010. (www.jacow.org) 0 (2011) 124-126.

9. S. Biri, **R. Rácz**, and J. Pálincás, *Studies of the ECR plasma in the visible light range*, Proceedings of the 19th International Workshop on ECR Ion Source. ECRIS'10. Grenoble, France, 23-26 Aug., 2010. (www.jacow.org) 0 (2011) 168-170.

10. S. Biri, **R. Rácz**, Z. Perduk, I. Vajda and J. Pálincás, *Recent developments and electron density simulations at the ATOMKI 14.5 GHz ECRIS*, Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Workshop on ECR Ion Source. ECRIS'12, Sydney, Australia 25-28 Sept. 2012. Online publikálása a [www.jacow.org](http://www.jacow.org) honlapon folyamatosan.

### Egyéb közlemények Other publications

11. **R. Rácz**, S. Biri, I. Csarnovich, S. Kökényesi, *Gold and calcium ion beams for materials research by the Atomki ECR Ion Source*. *Acta Physica Debrecina* 46 (2012) 133-141

12. **R. Rácz**, *Frequency dependence of the ECR plasma* *Acta Physica Debrecina* 44 (2010) 108-117.

13. **R. Rácz**, *Color of the ECR plasma*. *Acta Physica Debrecina* 45 (2011) 250-257.

### Egyéb referált közlemények Other peer reviewed papers

14. Z. Juhász, B. Sulik, **R. Rácz**, S. Biri, R. J. Berezky, K. Tőkési, Á. Kövér, J. Pálincás and 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 (7pp).

A folyóirat impakt faktora **2.861**

15. T. Asaji, T. Uchida, H. Minezaki, K. Oshima, **R. Rácz**, M. Muramatsu, S. Biri, A. Kitagawa, Y. Kato and Y. Yoshida, *Effect of pulse-modulated microwaves on fullerene ion production with electron cyclotron resonance ion source*, *Review of Scientific Instruments* 83 (2012) 02A303 (3pp).

A folyóirat impakt faktora **1.367**.

16. T. Uchida, H. Minezaki, K. Oshima, **R. Rácz**, M. Muramatsu, T. Asaji, A. Kitagawa, Y. Kato, S. Biri and Y. Yoshida, *Study on the beam transport from the Bio-Nano ECRIS*, *Review of Scientific Instruments* 83 (2012) 02A713 (3pp).

A folyóirat impakt faktora **1.367**.

17. Z. Juhász, S. T. S. Kovács, P. Herczku, **R. Rácz**, S. Biri, I. Rajta, G. A. B. Gál, S. Z. Szilasi, J. Pálincás and B. Sulik, *Ion-guiding and blocking of ion transmission in dense polycarbonate nanocapillary arrays at 3 keV Ar<sup>7+</sup> impact*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* 279 (2012) 177-181.

A folyóirat impakt faktora **1.211**

18. H. Minezaki, K. Oshima, T. Uchida, T. Mizuki, **R. Rácz**, M. Muramatsu, T. Asaji, A. Kitagawa, Y. Kato, S. Biri, Y. Yoshida, *Synthesis of Fe-C60 complex by ion irradiation*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* 310 (2013) 18-22.

A folyóirat impakt faktora **1.266**