

**Bogusław Pranszke**

Akademia Morska w Gdyni

## APARATURA DO ZDERZEŃ WIĄZEK JONOWYCH Z GAZOWYMI TARCZAMI

*W artykule opisano aparaturę przeznaczoną do badań zderzeniowych procesów z udziałem tzw. gorących atomów (występujących w przestrzeni kosmicznej i mogących w istotnej skali oddziaływać z materiałami powłok znajdujących się tam obiektów technicznych). Przedstawiono wybrane wyniki badań. W szczególności skupiono się na oddziaływaniu wiatru gwiazdowego z drobinami, wchodzącymi w skład atmosfer planetarnych oraz gęstych obłoków materii międzygwiazdowej.*

**Słowa kluczowe:** kosmochemia, drobiny, widma optyczne, przekroje czynne.

### WSTĘP

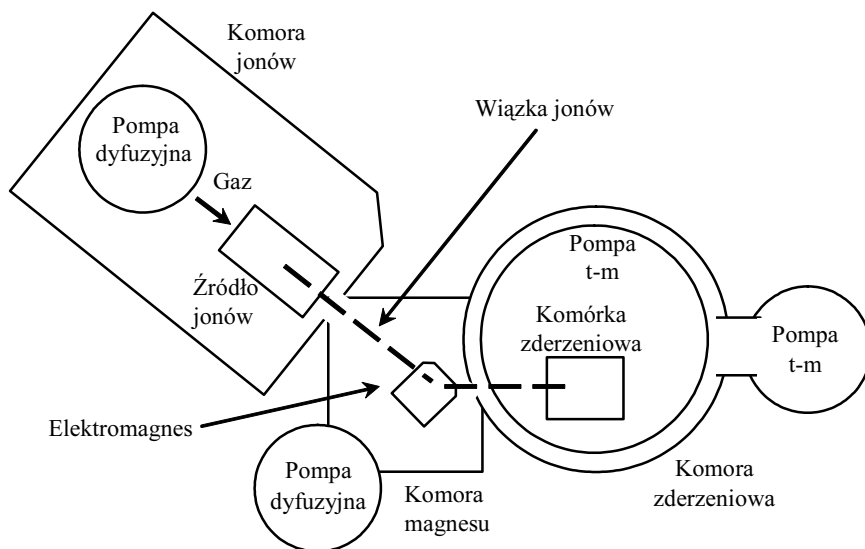
W przestrzeni atmosfery ziemskiej oddziaływanie materii gazowej z budulcem materii martwej i ożywionej traktowane jest głównie jako reakcje chemiczne, czyli przemiany w strukturze związków chemicznych w następstwie zderzeń względnie powolnych cząstek i atomów. Natomiast w atmosferze rozrzedzonej do ekstremalnie niskich ciśnień (w przestrzeni kosmicznej) istotną rolę pełnią zderzenia występujące z wielokrotnie niższą częstotliwością. Jednakże szybkości (energie) cząstek materii poza atmosferą ziemską są wielokrotnie większe, co ma istotne znaczenie w przypadku zderzeń pomiędzy nimi, jak i w przypadku oddziaływań z materiałami powłok obiektów technicznych znajdujących się w przestrzeni kosmicznej. Obecne badania „oddziaływań materii z materią” w kosmosie polegają na analizie tworzącego się w trakcie zderzeń cząstek materii promieniowania elektromagnetycznego, jakie dociera do detektorów umieszczonych na obiektach kosmicznych lub znajdujących się na powierzchni Ziemi. Rozwój tej metodyki zależy w dużej mierze od rezultatów badań podstawowych w warunkach symulujących warunki fizyczne panujące w kosmosie.

W artykule przedstawiono aparaturę oraz wybrane wyniki pomiarów widm optycznych towarzyszącym zderzeniom wiązki jonów z tarczą w postaci rozrzedzonego gazu [1, 2, 8]. Aparatura znajduje się w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Gdańskiego, w Zespole Fizyki Atomowej.

Należy dodać, że rezultaty badań mają charakter pionierski i są unikatowe w skali światowej. Jedynie w kilku ośrodkach na świecie prowadzi się takie badania, jednak tylko omawiana aparatura pozwala na doświadczalne badania zderzeń w zakresie energii  $1 \text{ eV} \div 1000 \text{ eV}$ .

## 1. APARATURA DOŚWIADCZALNA

Zbudowany w roku 1985 przez prof. Ottingera układ doświadczalny pokazano na rysunku 1.



**Rys. 1.** Przekrój poziomy przez część aparatury z zaznaczoną, przerywaną linią, drogą pokonywaną przez wiązkę jonów (Pompa t-m – pompa turbomolekularna)

**Fig. 1.** Schematic apparatus with selected with dashed line ion beam

Układ składa się z trzech komór próżniowych, pompowanych różnicowo, mieszczących źródło jonów, spektrometr masowy (elektromagnes) do selekcji jonów i komórkę zderzeniową. W źródle jonów doprowadzany gaz jest jonizowany przez zderzenia z elektronami wysyłanymi przez gorącą katodę. Odległość pomiędzy katodą a anodą wynosi 5 mm, podczas gdy typowe napięcie (katoda – anoda) wynosi 100 V, przy natężeniu prądu wyładowania 0,5 A. Powstałe jony są wyciągane ze źródła i przyspieszane do energii 1000 eV. Następnie po przejściu spektrometru masowego, przed wejściem do komórki zderzeniowej, jony są spowalniane do energii przewidzianej w doświadczeniu. Długość komórki zderzeniowej wynosi około 5 cm. Okienko obserwacji światła powstałego w wyniku zderzenia, o średnicy 12 mm, jest umieszczone w odległości 2 cm od szczeliny wejściowej. Okienko jest wykonane z  $MgF_2$  i umieszczone na spodzie komórki zderzeniowej.

W wyniku zderzeń jonów z gazową tarczą można otrzymać tzw. gorące atomy, których energia kinetyczna może odpowiadać (w warunkach równowagi termodynamicznej) temperaturze do 11 milionów K. Powstałe w wyniku procesów zderzeniowych światło jest zbierane przez układ detekcji.

Układ detekcji zawiera zestaw zwierciadeł aluminiowych, monochromator siatkowy McPherson model 218 (próżnioszczelny, z możliwością pracy w VUV) oraz detektor wielokanałowy.

W oryginalnej aparaturze dokonano w Gdańsku kilku modyfikacji. Dodano m.in. zestaw nowych pomp próżniowych (rotacyjnych i dwóch turbomolekularnych) oraz nowy system zbierania danych i rejestracji prądu jonowego. Typowy prąd jonów (mierzony na tylnej ściance komórki zderzeniowej) wynosi około 100 nA dla energii 1000 eV. Wraz ze zmniejszeniem energii wiązki prąd jonów spada poniżej 1 nA dla energii 10 eV.

Zastosowany układ detekcji pozwala na rejestrowanie w 1024 kanałach widma w zakresie spektralnym od 200 nm do 600 nm. Rejestrowany prąd ciemny wynosi około dwóch zliczeń na sekundę, przy typowym sygnale rzędu kilkudziesięciu zliczeń na sekundę. Ciśnienie gazu w komórce zderzeniowej jest kontrolowane za pomocą manometru pojemnościowego i typowo wynosiło 2 Pa.

## 2. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzone badania mają znaczenie w poznaniu procesów zachodzących w górnych warstwach atmosfery ziemskiej, jak również innych planet. Z drugiej strony, oddziaływanie wiatru słonecznego (gwiazdowego) z gęstymi obłokami materii międzygwiazdowej, a także z kometami, pozwala na poszerzenie naszej wiedzy o procesach zachodzących w szerzej rozumianym świecie. W ostatnich latach daje się zanotować wzrost zainteresowania tymi zjawiskami, skutkujący powstaniem nowej gałęzi wiedzy – kosmochemii.

Podkreślić należy, że prowadzone badania wychodzą poza popularny schemat badań reakcji jonowych z wykorzystaniem spektroskopii masowej, tym samym stanowiąc ważne uzupełnienie istniejącego stanu wiedzy.

### 2.1. Oddziaływanie wiatru słonecznego z CO<sub>2</sub>

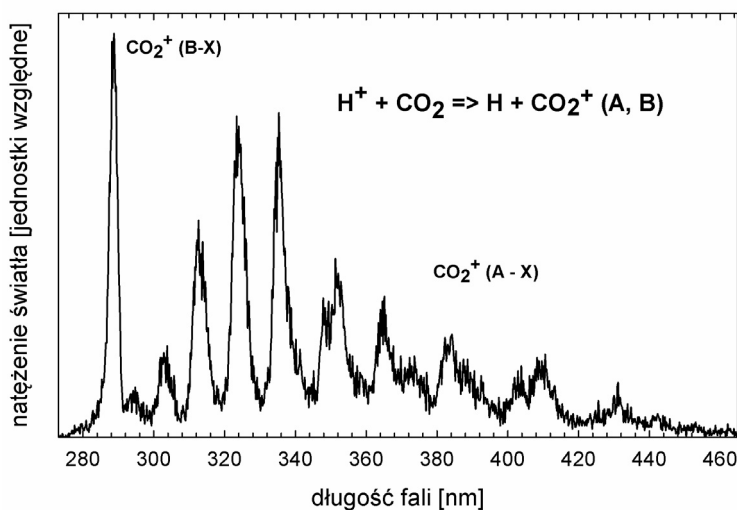
Wiatr słoneczny, czyli strumień naładowanych cząstek, składa się przede wszystkim z elektronów i protonów. W mniejszym stopniu wiatr słoneczny zawiera jony atomów i cząsteczek, wchodzących w skład atmosfery słonecznej. Obecność takich zderzeń została wielokrotnie stwierdzona w atmosferze ziemskiej, chociażby w postaci zorzy polarnej, również obserwowanej na innych planetach Układu Słonecznego (Jowisz, Saturn, Uran, Neptun). Przedmiotem doświadczenia było badanie emisji optycznej powstałej w wyniku zderzeń jonów wodoru H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>3</sub><sup>+</sup> oraz jonu helu He<sup>+</sup> z cząsteczką dwutlenku węgla zawartego w atmosferze ziemskiej. Wyniki badań zostały opublikowane w pracach [3–6].

Przy energiach zderzenia, znacznie przewyższających typowe wartości energii wiązań chemicznych (> 10 eV), reakcje wymiany atomów są bardzo rzadkie.

W większości przypadków zachodzi defragmentacja produktów zderzenia, której często towarzyszy luminescencja tych produktów. W wielu przypadkach obserwuje się przeskok elektronu z drobin gazowej tarczy. W zderzeniach jonów wodorowych i jonów helu z  $\text{CO}_2$  dominującym procesem okazała się wymiana ładunku indukowana zderzeniem. Reakcja tego typu prowadzi do powstania oscylacyjnego wzbudzenia drobin tarczy  $\text{CO}_2^+$ . Zarejestrowane widma optyczne pozwoliły wyznaczyć tzw. funkcje wzbudzenia w zakresie energii od 10 eV do 1000 eV.

Wyniki doświadczalne wskazują, że obserwowany rozkład natężeń przejść oscylacyjnych w dużym stopniu zależy od szybkości zderzenia, natomiast w niewielkim stopniu uzależniony jest od rodzaju zderzanych ciał. Przy szybkościach zderzenia poniżej  $10^6$  m/s obserwowany rozkład obsadzeń poziomów  $\text{CO}_2^+$  nie może już być opisywany przez model Francka-Condon. Początkowo wyjaśniano to jako wpływ pola elektrycznego nadlatującego jonu-pocisku na chmurę elektronową cząsteczki-tarczy. Kolejne eksperymenty pokazały jednak, że wpływ pola elektrycznego jonu nie wyjaśnia w pełni obserwowanych widm, w szczególności zaś nie wyjaśnia zderzeń w układzie „neutralny pocisk – jonowa tarcza”, w których wzbudzenie produktu jest indukowane zderzeniem.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe widmo optyczne  $\text{H}^+ + \text{CO}_2$ . Rezultatem procesu zderzeniowego jest przeskok ładunku oraz wzbudzenie oscylacyjne jonu  $\text{CO}_2$ .



**Rys. 2.** Przykładowe widmo – produkt zderzenia protonów z drobiną  $\text{CO}_2$ .  
Energia zderzenia 800 eV

**Fig. 2.** Sample spectrum – resulting collision protons with  $\text{CO}_2$  molecule.  
Collision energy 800 eV

## 2.2. Zderzenia wiatru słonecznego z drobinami $N_2$ , $O_2$ i CO

Szybkości jonów wchodzących w skład wiatru słonecznego są stosunkowo duże w porównaniu do tych uzyskiwanych za pomocą omawianej aparatury. Okazuje się, że w przypadku niektórych typów gwiazd obserwowane szybkości wiatru gwiazdowego są zdecydowanie niższe. W związku z tym analizę powstałego promieniowania rozszerzono na interakcje pomiędzy wiatrem gwiazdowym a materią w postaci gęstych obłoków gazowych w przestrzeni kosmicznej. Dla systemów zderzeniowych  $H_n^+ + O_2$  zarejestrowano widma luminescencji w zakresie energii zderzenia  $5 \div 1000$  eV w układzie laboratoryjnym [7].

W obu przypadkach zarejestrowano reakcje wymiany ładunku prowadzące do powstania jonu drobinę tlenu w oscylacyjnych stanach wzbudzonych. Ponadto zaobserwowano linie wodoru z serii Balmera. Dominujący wkład do zarejestrowanych widm dla wszystkich trzech systemów pochodził z reakcji wymiany ładunku. Na podstawie symulacji komputerowych przeprowadzono analizę widm, ustalając procentowe wkłady poszczególnych produktów obserwowanych reakcji, oraz określono wartości temperatury oscylacyjnej i rotacyjnej analizowanych przejść.

Oddziaływanie wiatru gwiazdowego z cząsteczką  $N_2$  jest tematem publikacji [10]. Zarejestrowane widma pozwoliły wyznaczyć bezwzględne przekroje czynne dla badanych układów. Z kolei syntetyczne widma, symulowane komputerowo, umożliwiły określenie temperatur rotacyjnych i oscylacyjnych produktów reakcji. Szczególnie dla układów  $H_2^+ + N_2$  oraz  $H_3^+ + N_2$  da się zauważyć wyraźną zmianę temperatury oscylacyjnej w funkcji energii zderzenia. Zaobserwowana zmiana temperatur oscylacyjnych wskazuje na zmianę odległości pomiędzy jądrami cząsteczki  $N_2$ , spowodowaną nadlatującym jonem wodoru, przez co nie można w tym przypadku stosować modelu Francka-Condon.

W publikacji [9] omówiono procesy zderzeniowe, prowadzące do wzbudzenia elektronowego jonów wodorowych z drobiną tlenu węgla. Procesy tego typu zaobserwowano w atmosferach komet, m.in. na komecie Hale-Boppa oraz komecie Holmes (17P/Holmes).

## PODSUMOWANIE

W chwili obecnej kontynuowane są badania związane z oddziaływaniem wiatru gwiazdowego z gazami, wchodzącymi w skład gęstych obłoków materii międzygwiazdowej (ang. ISM – *Interstellar Medium*). Badania te, wraz z wynikami już opublikowanymi, przyczynią się do lepszego zrozumienia fundamentalnych procesów zachodzących w atmosferach planetarnych oraz w przestrzeni kosmicznej. Uzyskane widma optyczne umożliwią głębszą analizę danych zebranych przez teleskopy Hubble'a, FUSE (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*) oraz spektroskop optyczny wysokiej rozdzielczości UVES.

## PODZIĘKOWANIE

Za życzliwą pomoc, wieloletnią owocną współpracę oraz możliwość korzystania z aparatury badawczej składam serdeczne podziękowanie kierownikowi Zakładu Fizyki Atomowej na Wydziale Matematyki Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego panu prof. dr. hab. Andrzejowi Kowalskiemu.

## LITERATURA

1. Ehbrecht A., Kowalski A., Ottinger Ch., *Hot-atom chemiluminescence: a beam study of the reactions  $C(^3P)+H_2\rightarrow CH(A^2\Delta, B^2\Sigma^-, C^2\Sigma^+)+H$* , Chemical Physics Letters, 1998, 284.
2. Kowalski A., Pranszke B., Ottinger Ch., *Hot-atom chemiluminescence: a beam study of the  $N^*(^2D) + CH_4$  system*, Chemical Physics Letters, 2004, 383, s. 156–160.
3. Pranszke B., *Charge transfer excitation in  $N^+ + CO_2$  collisions under beam conditions*, Chemical Physics Letters, 2009, 484, s. 24–27.
4. Pranszke B., *Charge transfer excitation in  $H_2^+ + CO_2$  collisions under beam conditions*, Chemical Physics Letters, 2010, 499, s. 199–202.
5. Pranszke B., *Charge-transfer excitation in collisions of slow  $H^+$  and  $H_3^+$  ions with  $CO_2$  molecules under beam conditions*, Chemical Physics Letters, 2011, 508, s. 197–201.
6. Pranszke B., *Charge transfer excitation in  $He^+ + CO_2$  collisions under beam conditions*, Chemical Physics Letters, 2012, 536, s. 26–29.
7. Pranszke B., Werbowy S., Ławicki A., *Luminescence in collisions of slow  $H^+$ ,  $H_2^+$ , and  $H_3^+$  ions with  $O_2$  molecule*, Physical Review A, 2011, 83(3), 032707.
8. Wasowicz J.T., Pranszke B., *Fragmentation of Tetrahydrofuran Molecules by  $H^+$ ,  $C^+$ , and  $O^+$  Collisions at the Incident Energy Range of 25–1000 eV*, The Journal of Physical Chemistry A, 2015, Vol. 119, No. 4, s. 581–589.
9. Werbowy S., Pranszke B., *Electronic excitation and charge transfer processes in collisions of  $H^+$ ,  $H_2^+$ , and  $H_3^+$  ions with carbon monoxide at typical solar wind velocities*, The Astrophysical Journal, 2014, Vol. 780, No. 157, s. 1–10.
10. Werbowy S., Pranszke B., *Laboratory spectroscopic studies of collisions between slow stellar wind components ( $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  ions) and molecular nitrogen*, Astronomy & Astrophysics, 2011, Vol. 535, No. A51, s. 1–8.

## APPARATUS FOR ION BEAM COLLISIONS WITH TARGET GAS

### Summary

*At present, they continued research related to the stellar wind interaction with gases belonging to the ISM (interstellar medium). These studies, together with the already published results contribute to a better understanding of the fundamental processes in planetary atmospheres and space. The obtained optical spectra will enable a deeper analysis of the data collected by the telescopes Hubble, FUSE, UVES.*

*This paper describes an apparatus designed for study of collisional processes involving the so-called hot atoms (occurring in space and could have a significant role in interactions with coatings materials found there technical objects). Selected results are presented. In particular, it focuses on the interaction of the stellar wind with particles forming the planetary atmospheres and interstellar medium.*

**Keywords:** *astrochemistry, molecules, optical spectra, cross sections.*