



מכון ויצמן למדע

WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE

Thesis for the degree  
Doctor of Philosophy

עבודת גמר (תזה) לתואר  
דוקטור לפילוסופיה

Submitted to the Scientific Council of the  
Weizmann Institute of Science  
Rehovot, Israel

מוגשת למועצה המדעית של  
מכון ויצמן למדע  
רחובות, ישראל

By  
Dror Alumot

מאת  
דרור אלומות

**חקירת תהליך התרמליזציה בפלסמה במהלך קריסה תחת שדה מגנטי**  
**Investigation of the thermalization process in an imploding plasma**

Advisor:  
Prof. Yitzhak Maron

מנחה:  
פרופ' יצחק מרון

July 2014

תמוז התשע"ד



## Acknowledgments

I am sincerely grateful to my advisor, **Prof. Yitzhak Maron**, for being an inspiring and supporting scientific mentor, and for showing me the incredible power of clear, imaginative, scientific thinking.

A deep gratitude is owed to **Prof. Amnon Fisher**, for his enormous knowledge and experience, and his endless genuine desire to share it.

I am exceptionally indebted to **Dr. Eyal Kroupp**, for drawing me willingly into the fields of plasma physics and pulsed power, and for teaching me the art of x-ray spectroscopy.

Countless thanks are sent to **Dr. Evgeny Stambulchik**, for providing the theoretical structure of the Stark method, for performing the detailed modeling of the line shapes, and for many fruitful discussions on the experimental results.

Special thanks are reserved to **Dr. Alexander Starobinets** and **Dr. Vladimir Bernshtam**, for performing the CR modeling crucial for this work and for guiding me through the theoretical aspects.

I am thankful to **Dr. Ingo Uschmann** from Jena University, for fabricating the spherical crystals and testing them, and for his endless help in the x-ray spectroscopy.

Special thanks are due to **Dr. Franz Schaefer** from the BESSY-II synchrotron, for his assistance with the rocking-curve measurements during sleepless beam-time nights.

I would like to express special gratitude to **Guy Rosenzweig** for his friendship, and for his help and support in every step of the way.

This work would not have been possible without the skillful help of our technician, **Pesach Meiri**, who came up with creative solutions to any technical difficulty imaginable, and to a few unimaginable ones as well.

Last but not least, I would like to thank my family, and especially my parents, for their support and belief in me.

## Abstract

The time- and space-resolved ion temperature and hydrodynamic motion in imploding plasma were studied using a novel spectroscopic method, suggested in our lab and employed here for the first time. The work is of general importance to the study of high-energy-density plasma physics, since the problem of distinguishing between the ion thermal and hydro motions is rather central in this field.

In this research, a high-current pulse is used to implode a cylindrical neon plasma radially inward, in the z-pinch configuration. The 500-ns compression culminates as stagnation is reached on axis, producing a hot and dense plasma for a period of  $\sim 10$  ns.

Developed were two spectroscopic systems, that simultaneously record two groups of optically thin radiative transitions: satellites of  $\text{Ly}_\alpha$  and high- $n$  lines, using a separate spectroscopic system for each group. All spectra are recorded as a function of position along the  $z$  axis of the stagnating plasma, with ultra-high resolutions in space ( $50 \mu\text{m}$ ), time ( $\lesssim 1$  ns), and spectrum (resolving power  $\gtrsim 5000$ ).

The total ion kinetic energy (thermal and hydro motion) and the electron density of the plasma are determined from the  $\text{Ly}_\alpha$  satellite spectrum using collisional-radiative modeling. These values are then used to analyze the shapes of the Stark-broadened high- $n$  lines, namely  $\text{Ly}_\delta$  and  $\text{Ly}_\epsilon$ . A novel method, denoted the Stark method, is used to determine the ion temperature from the Stark broadening of the high- $n$  lines. The implementation of this method and the achievement of reasonable accuracy has been a formidable experimental undertaking, performed for the first time in this work.

The Stark method enables the simultaneous determination of the total ion kinetic and thermal energies at the same plasma volume and at a specific point in time, and shows that during stagnation the bulk of the energy of the ions is not thermal, but is rather stored in the hydrodynamic motion of the ions. This effect is most prominent at the earliest stages of stagnation, when an order of magnitude difference is observed between the total energy and the thermal one. Towards the end of stagnation, the thermal energy accounts for most of the total energy, and both are seen to drop down to a value close to the electron temperature.

The results from this work provide confidence for a previous determination of the ion temperature, obtained from the drop-rate of the total ion kinetic energy, and extensive energy-balance argumentation.

The innovative Stark method developed here is shown to provide new insights into the dynamics of the stagnating plasma, and proves to be an extremely valuable experimental diagnostic tool for various high-energy-density plasma systems.

## תקציר תוצאות ומסקנות

טמפרטורת היונים והתנועה ההידרודינמית של פלזמה בתהליך קריסה נחקרו במהלך שלב הסטגנציה כתלות בזמן ובמקום, על-ידי שימוש בשיטה ספקטרוסקופית חדשנית שפותחה במעבדתנו ובסימולציה מדוייקת של צורות הקווים הספקטראליים. למחקר זה חשיבות לתחום פיזיקת הפלסמה בצפיפות אנרגיה גבוהה, משום שהבעיות באבחנה בין התנועה התרמית וההידרודינמית של היונים מהווה מכשול לטווח רחב של מערכות.

במחקר זה, פולס זרם גבוה משמש לדחיסה רדיאלית של פלזמת ניאון בתצורה גלילית, בקונפיגורציית  $Z$ -pinch. בשיאו של תהליך הקריסה האורך 500 ננו-שניות מתקבלת סטגנציה על הציר, ופלזמה חמה וצפופה מתקבלת למשך כ-10 ננו-שניות.

במהלך המחקר פותחו שתי מערכות ספקטרוסקופיות, המאפשרות צילום סימולטני של שתי קבוצות של קווים ספקטראליים אשר אינם מושפעים מבליעה עצמית: קווי לווין של  $Ly_\alpha$  וקווים בעלי ערכי  $n$  גבוהים ( $Ly_\delta$  ו- $Ly_\epsilon$ ), על-ידי שימוש במערכת ספקטרוסקופית נפרדת לכל קבוצה. הספקטרום מצולם כתלות במיקום לאורך ציר ה- $z$  של הפלזמה הכלואה, בהפרדה גבוהה מאוד במיקום (50 מיקרון), בזמן (1 ננו-שנייה) ובספקטרום (פקטור הגדלה ספקטראלית מעל 5000).

ספקטרום הקווים הלוויניים ל- $Ly_\alpha$  מאפשר קביעה של האנרגיה הקינטית הכוללת (תרמית והידרודינמית) של היונים ושל צפיפות האלקטרונים, על-ידי שימוש בסימולציה התנגשותית-קרינתית. ערכים אלו משמשים לחקירת הצורה והרוחב של קווי ה- $Ly_\delta$  וה- $Ly_\epsilon$  המושפעים מהרחבת סטארק. שיטה חדשנית, המכונה "שיטת סטארק", מאפשרת קביעה של טמפרטורת היונים מהרחבת הסטארק של הקווים. יישום שיטה זו והשגת דיוק סביר הם משימה נסיונית מאתגרת מאוד, אשר בוצעה לראשונה במחקר זה.

שיטת סטארק מאפשרת קביעה סימולטנית של האנרגיה הקינטית והתרמית של היונים בפלזמה, ומראה שבמהלך הסטגנציה מירב האנרגיה של היונים אינה תרמית, אלא אגורה בתנועה ההידרודינמית של היונים. אפקט זה הינו דומיננטי במיוחד בשלבים הראשוניים של הסטגנציה, במהלכם נצפה הבדל של סדר-גודל בין האנרגיה הקינטית וסך-כל האנרגיה של היונים. לקראת סוף הסטגנציה, האנרגיה הכוללת יורדת ומתקרבת לאנרגיית האלקטרונים, והאנרגיה התרמית מהווה את מרבית האנרגיה של היונים.

תוצאות אלו מהוות חיזוק ואישוש לתוצאות מקביעה קודמת של טמפרטורת היונים, שהתקבלו מחקירת קצב הירידה של האנרגיה הקינטית של היונים ומשיקולי שווי-משקל אנרגטי בפלזמה.

המחקר מראה כי שיטת סטארק החדשנית מספקת תובנות חדשות לדינמיקת היונים בפלזמה במהלך הסטגנציה, ומוכיח כי שיטה זו היא כלי ניסיוני שימושי מאוד למערכות רבות של פלזמה בצפיפות אנרגיה גבוהה.