



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
Guy Rosenzweig

מאת
גיא רוזנצוויג

**חקירת התפלגות השדה המגנטי והתכונות היסודיות
של פלסמה בתהליך קריסה, בקרבת ובמהלך הסטגנציה**
**Investigation of the magnetic field distribution and the fundamental
properties of an imploding plasma, near and during stagnation**

Advisor:
Prof. Yitzhak Maron

מנחה:
פרופ' יצחק מרון

February 2015

שבט התשע"ה

Acknowledgments

I am forever grateful to my advisor, **Professor Yitzhak Maron**, for being a paragon theoretical and experimental scientist, for his patience and for always supporting me and pushing me forward.

I would like to thank **Dr. Eyal Kroupp** for setting an example of uncompromising work, for helping me tread the path through the field of plasma physics and for allowing me to tinker with his toys.

Much appreciation is owed to **Professor Amnon Fisher**, for being an island of calm amidst the mad sea of plasma physics, for his numerous ideas, and for his unrivaled ability to explain the most complicated issues in the simplest terms.

A deep gratitude is due to **Dr. Alexander Starobinets** and **Dr. Vladimir Bernshtam** for performing numerous collisional-radiative calculations and for helping me decipher their meanings.

Countless thanks are sent to **Dr. John L. Giuliani** and his colleagues at the Naval Research Laboratory in Washington, DC, for performing advanced and complicated simulations in an attempt to understand the underlying physics of my results.

I am indebted to **Professor Amnon Fruchtman** and **Professor Henry S. Strauss** for many fruitful discussions on the theoretical side of this research.

My very basic questions in the fields of physics and statistics would have remained unanswered if not for **Dr. Ramy Doron** and **Dimitry Mikitchuk**. I am most appreciative for their patience in answering my questions, even when having to do so over and over again.

The foundations of any experimental work lie in the expertise of the technicians behind the scenes. I am thankful to all the technicians in the physics department workshop, and especially to the highly skillful hands of **Yehuda Asher**.

The technical skills and creative solutions of **Pesach Meiri** are second to none. I am beholden to his proficiency in tackling both the smallest and the most inconceivable technical difficulties, and to his infinite tolerance when I managed to break or lose the occasional tool.

Heartfelt thanks are extended to **Dror Alumot** for our joint path, for his encompassing knowledge on unexpected issues, for always lending an ear to my petty complaints and for helping me keep things in perspective.

My most profound gratitude is reserved for my family. For my two children, born during the course of this study: **Eliya** with her ingenious comments, heartfelt praises, endless curiosity and incredibly beautiful drawings brightening up my world, and **Geva**, a true man's man, who is by now walking up a storm and is always smiling with a mouth full of nine teeth. My amazing wife **Gilli** is owed the deepest gratitude and the highest appreciation. I am humbled by her willingness to allow me to roam around the world of physics, and by her capacity to see clearly into the future. Her never-ending support and undying belief in me are what keeps me going.

Abstract

The experiment used for the present research is a z-pinch configuration, where a cylindrical plasma load is accelerated and imploded by intense magnetic fields, until it stagnates on axis and forms a hot and dense core. Experimental determination of the magnetic field distribution in the imploding and stagnating plasma is of paramount importance, since this distribution is a key parameter in the magnetohydrodynamics processes in the plasma. Nevertheless, the magnetic field at the final stages of the implosion and at stagnation has not been measured prior to this work.

Plasma conditions that are typical of high-energy-density systems often render the common Zeeman-splitting magnetic field diagnostic impossible. The high densities and high ion velocities result in broad spectral line-shapes that smear out the Zeeman-split patterns. Indeed, the field distribution has been measured in our laboratory in the past, but only up to 90 ns before stagnation and at more than 7 mm away from the pinch axis.

In this work, a novel diagnostic technique, based on polarization spectroscopy, was developed and implemented to measure for the first time the magnetic field distribution, at the final stages of the implosion and at stagnation. The limitations set by the Stark and Doppler broadenings have been overcome by recording the individual shapes of the left- and right-circularly polarized components of Zeeman-split emission lines. The radial distribution of the magnetic field was determined unambiguously, at stagnation and near the pinch axis, by measuring selected lines from various charge states that reside only at certain radii due to a radial temperature gradient. The multi-fiber systems built, enabled measuring the field distribution in a single discharge.

To this end, several spectroscopic systems were built with high spectral, temporal and spatial resolutions, designed to measure the spectral lines of various ion charge states in the plasma in the visible and ultraviolet regions. Using multiple systems provided the ability to measure not only the magnetic field distribution, but also the fundamental properties of the plasma, such as the electron and ion densities and temperatures. Furthermore, the variations of the plasma and field parameters in the z dimension were measured as well.

It was found that the current flowing through the stagnating plasma is a rather small fraction of the total current. Furthermore, while at early times the penetration of the magnetic field into the plasma follows a diffusion pattern, in the final stages of the implosion a more complex mechanism is present. Understanding the magnetic field distribution and the detailed plasma structure found here is presently being pursued with magnetohydrodynamics modeling and numerical simulations in the U.S.

While this study was conducted on a medium-current z-pinch generator ($I_{\max} \sim 500$ kA), the results are relevant to a wide range of experiments. The innovative spectroscopic technique developed here provides new insights into the dynamics of the imploding and stagnating plasma, and can serve as a highly valuable diagnostic tool for various high-energy-density plasma systems.

תקציר

הניסוי אשר שימש למחקר זה הינו קונפיגורציית z-pinch, בה פלזמה בתצורה גלילית מואצת ונדחסת על-ידי שדות מגנטיים חזקים, עד לסטגנציה, שלב בו נוצרת ליבה חמה וצפופה על ציר ה-z. לקביעה ניסיונית של התפלגות השדה המגנטי בפלזמה בשלבי הקריסה והסטגנציה ישנה חשיבות מכרעת, שכן התפלגות זו הינה גורם עיקרי בתהליכים המגנטוהידרודינמיים בפלזמה. על-אף זאת, השדה המגנטי בשלבי הקריסה הסופיים ובזמן הסטגנציה לא נמדד קודם לעבודה זו.

תכונות הפלסמה האופייניות למערכות בעלות צפיפות אנרגיה גבוהה, הופכות לרוב את שיטות מדידת השדה המגנטי המבוססות על פיצול זימן לבלתי אפשריות. הצפיפויות הגבוהות ומהירויות היונים הגבוהות יוצרות קווי פליטה ספקטראליים רחבים המטשטשים את הפיצול. אמנם, התפלגות השדה נמדדה בעבר במעבדתנו, אך רק עד ל-90 ננו-שניות לפני שלב הסטגנציה ובמרחקים הגדולים מ-7 מ"מ מהציר.

בעבודה זו פותחה ויושמה שיטה חדשנית המבוססת על מדידות ספקטראליות של אור מקוטב, באמצעותה נמדדה לראשונה התפלגות השדה המגנטי בשלבי הקריסה הסופיים ובשלב הסטגנציה. התגברות על המגבלות הנובעות מהרחבות סטארק ודופלר הושגה על-ידי מדידה בו זמנית של רכיבי אפקט זימן המקוטבים באופן שונה. התפלגות השדה הרדיאלית נקבעה חד-משמעית, בזמן הסטגנציה וקרוב לציר, על-ידי מדידת קווי פליטה נבחרים מיונים בעלי רמות יינון שונות, הממוקמים ברדיוסים שונים בשל הפרשי טמפרטורה. בניית מערכת מדידה בעלת מערך רב סיבים אפשרה את מדידת התפלגות השדה בניסוי אחד.

לצורך כך נבנו מספר מערכות ספקטרוסקופיות, בעלות יכולות הפרדה גבוהות במיקום, בזמן ובספקטרום, אשר נועדו למדוד את קווי הפליטה של מספר מצבי יינון בפלזמה בתחומי האור הנראה והאולטרה-סגול. השימוש במספר מערכות סיפק את היכולת למדוד לא רק את התפלגות השדה המגנטי, אלא גם את תכונות הפלזמה היסודיות, כגון צפיפויות וטמפרטורות היונים והאלקטרונים. יתר-על-כן, השינויים בערכי השדה ובתכונות הפלזמה לאורך ציר ה-z נמדדו אף הם.

מהמדידות עלה שהזרם הזורם באיזור הסטגנציה מהווה חלק קטן בלבד מהזרם הכולל בפלזמה. יתרה מזאת, בעוד שבשלים מוקדמים חדירת השדה המגנטי לתוך הפלזמה תואמת תבנית דיפוזיה, המכניזם בשלבי הקריסה הסופיים מורכב יותר. מאמצים להבנת התפלגות השדה ומבנה הפלזמה שנמדדו במחקר זה, תוך שימוש במודלים מגנטוהידרודינמיים ובסימולציות נומריות, נעשים כעת בארצות-הברית.

מחקר זה נערך על מחולל z-pinch בעל זרם ממוצע ($I_{\max} \sim 500 \text{ kA}$), אך התוצאות נוגעות למגוון רחב של ניסויים. שיטת המדידה הייחודית שפותחה כאן מספקת תובנות חדשות באשר לדינמיקה של הפלזמה בשלבי הקריסה והסטגנציה, ועשויה להוות כלי מחקרי ראשון במעלה למערכות שונות של פלזמה בצפיפות אנרגיה גבוהה.