



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
Dimitry Mikitchuk

מאת
דימיטרי מיקיטצ'וק

חקר דחיסה של פלסמה ממוגנטת ושל שטף שדה מגנטי

Investigation of the compression of magnetized
plasma and magnetic flux

Advisor:
Prof. Yitzhak Maron

מנחה:
פרופ' יצחק מרון

November 2016

חשוון התשע"ז

Acknowledgment

I would like to thank people from the Plasma Laboratory of the Weizmann Institute of Science that helped and supported me during the course of my PhD research:

My supervisor Prof. Yitzhak Maron for being a critical and inspiring scientific mentor, for teaching me the art of clear physical thinking, and for setting an example of an uncompromising work.

Dr. Ramy Doron, for his invaluable guidance, patience, expertise, sharp eye and mind, which have all contributed immensely to the success of this work.

Dr. Eyal Kroupp, for constructive advises during this work, for introducing me to the pulse-power world, and for being an example of what an experimental physicist should be.

Pesach Meiri for the unexcelled technical support, for his bright solutions for apparently hopeless technical problems, and for the everyday help in any possible experimental complication.

All the technicians in the physics department workshop, and especially to the highly skillful hands of Yehuda Asher.

Dr. Evgeny Stambulchik, Dr. Alexander Starobinets, Dr. Vladimir Bernshtam, Dr. Yuri Kuzminikh, Dr. Subir Biswas, and Dr. Yuri Zarnizki for the collisional-radiative modeling, data analysis, and for productive scientific discussions.

Prof. Amnon Fruchtman and Dr. Henry Strauss for many fruitful discussions on the theoretical side of this research.

Prof. Amnon Fisher for sharing his endless knowledge and experience in any field of the experimental physics.

Dr. Marko Cvejic for being a great laboratory partner with his cheerful and motivating spirit, his hard work, and his interest in our common research.

Last but not least, I would like to thank my family, especially my wife, colleague Christine Stollberg for her moral support, for the possibility to discuss physical problems at the dinner table, and for her help in the MATLAB and LaTeX programming. Furthermore, I want to thank our recently born daughter Yael Stollberg, who gave me the opportunity to work on scientific problems also during numerous sleepless nights.

Abstract

In this research I investigated fundamental phenomena occurring as magnetic-field flux and magnetized-plasma are compressed by applied azimuthal magnetic fields. This subject is relevant to numerous studies in laboratory and space plasmas. Recently, it has gained particular interest due to the advances in producing plasmas of high temperature and density in experiments based on the approach of magnetized plasma compression [1]. Many in the plasma physics community consider this approach to be the most promising for achieving controlled nuclear fusion. To advance this approach, it is essential to study experimentally the governing physical mechanisms that take place during the compression. Performing the required systematic experiments is impractical in large scale facilities designed for fusion demonstration.

In our experiment, we employ a cylindrical (Z-pinch) configuration, in which a current (300 kA, rise time 1.6 μ s) driven through a cylindrical plasma causes implosion of the plasma under the self-generated azimuthal magnetic fields (B_θ). However, our cylindrical plasma is initially embedded in an axial magnetic field B_z . The field is quasi-statically applied prior to the high-current discharge, with a value of 0.4 T.

Here, for the first time in these research, Zeeman-splitting observations are used to measure the evolution and spatial distribution of B_z and B_θ during the implosion and stagnation stages. The two fields are measured simultaneously, which is rather important due to the irreproducibility that characterizes such experiments of high-current pulses. The difficulties in these measurements are due to: 1) the high electron densities in the plasma giving rise to large Stark broadening that smears out the Zeeman pattern, 2) the difficulty in distinguishing between B_z and B_θ , and 3) the absence of light emission from the center of the plasma column. Indeed, in previous studies, under similar conditions, the B -fields were only indirectly estimated from the plasma radius. These challenges were achieved by employing a novel spectroscopic technique based on the polarization properties of Zeeman split emission, combined with a laser generated doping technique that provided mm-scale spatial resolution.

Systematic measurements were performed for different initial conditions of B_z and gas loads. The measurements showed that estimates of the B -fields based

on the plasma radius are subjected to large errors and thus unreliable. Indeed, the simultaneously measured B_z and B_θ , together with the plasma radius and the discharge current, showed that the application of an initial B_z has a dramatic effect on the current distribution in the plasma. While without B_z the entire current is found, as expected, to flow through the imploding plasma, when an initial B_z is applied the measured B_θ (through $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$) showed that only a small part of the current flows in the imploding plasma. Specifically, when $B_{z,t=0} = 0.4$ T, the value of B_θ in the imploding plasma shell remains nearly constant (between 1.5 and 2 T) during the implosion, even though the current rises and the plasma radius drops. A theoretical model is suggested to explain this unexpected phenomenon. To rigorously test this model self-consistent 3D MHD simulations are required.

In addition to these results, the measurements provide much information useful for the understanding of the B_z -embedded plasma implosion. We measure at stagnation a $\sim 15\times$ compression of the initial axial B -field. This compression factor, together with the observed plasma radius allows for obtaining the B_z confinement efficiency, which is found to be $\sim 50\%$. This information is useful for testing MHD codes. Another phenomenon observed is an axial gradient of B_z in which its magnitude increases by a factor of 2 from the anode (low B_z) to the middle of the plasma column ($z \sim 5$ mm, high B_z). This measurement demonstrates the existence of a transition region from the uncompressed $B_z = B_z(t = 0)$ inside the electrodes to the compressed B_z farther away from the electrode surface.

The spectroscopic measurements were complemented by 2D images of the plasma self-emission and by interferometric images. These measurements were important both for obtaining the B -field evolution and for the study of the dependence of instabilities on the different initial conditions. The measurements clearly showed the mitigation effect of B_z on the magneto-Rayleigh-Taylor instabilities.

The 2D images have also shown the existence of axially directed, filament-like regions that have significantly higher emission than the surrounding plasma. These filaments were found to be plasma regions with higher electron density (by 10–20%), and slightly lower electron temperature (by a few percent) than of the surrounding plasma.

תקציר

במחקר זה חקרתי תופעות בסיסיות המתרחשות בדחיסה של שטף מגנטי ופלסמה ממוגנטת על ידי שדה מגנטי אדימוטלי הנוצר על ידי הזרם הנישא בפלסמה. הנושא הזה רלוונטי עבור מספר רב של מחקרים מעבדתיים ופלסמות ביקום (באסטרופיזיקה). לאחרונה, המחקר של התופעה זוכה לעניין רב בגלל ההישגים ביצירת פלסמה חמה וצפופה בניסויים המבוססים על גישה דחיסה פלסמה ממוגנטת. רבים בקהילה המדעית של פיסיקת הפלסמה סבורים כי הגישה הזאת הינה המבטיחה ביותר להשגת היתוך גרעיני מבוקר. על מנת לקדם את ההבנה של התופעות, חשוב לחקור באופן ניסוי את התהליכים הפיזיקאליים העיקריים בזמן דחיסת השדה והפלסמה. ביצוע של המדידות השיטתיות הדרושות למחקר, הינו בלתי אפשרי לעריכה במתקנים גדולים המיועדים להדגמת היתוך, עקב מחזוריות נמוכה של יצירת הפלסמה (למשל, במכונה של סנדיה ניתן ליצור פלסמה רק אחת ליום ואילו ובמכונה שלנו ניתן ליצור פלסמה כמה עשרות פעמים ביום). בניסוי שלנו משתמשים בגאומטריה גלילית, שבה זרם פולסי (300 kA, זמן עלייה $1.6 \mu\text{s}$) העובר דרך פלסמה גלילית גורם לקריסה של הפלסמה תחת ההשפעה של השדה המגנטי העצמי האדימוטלי (B_θ). בנוסף, הפלסמה הגלילית נמצאת בתוך שדה מגנטי חיצוני המכוון לאורך ציר z (B_z). השדה המגנטי הצירי הינו כמעט קבוע, בעל ערך של עד 0.4 T ונוצר לפני ההתפרקות החשמלית.

בעבודה הנוכחית, בפעם ראשונה במחקר על דחיסת שדה מגנטי, נעשה שימוש בפיצול זימן של מעברים אטומיים למדידה ישירה של ההתפתחות וההתפלגות של B_θ -ו B_z בזמן קריסת הפלסמה והסטגנציה. חשיבות רבה יוחסה למדידה סימולטנית של שני השדות בגלל הדירות נמוכה שמאפיינת ניסויים של זרם גבוה פולסי. הקשיים העיקריים במדידות של השדות המגנטיים בפלסמה שלנו הם: (1) צפיפות אלקטרונים גבוהה הגורמת להרחבת Stark גדולה ובכך מטשטשת את פיצול זימן, (2) קושי בלהפריד בין התרומות של B_θ -ו B_z לספקטרום, (3) היעדרות פליטת אור ממרכז עמוד הפלסמה החלול בזמן הקריסה. אכן, בעבודות הקודמות, שנעשו בתנאים דומים, השדות המגנטיים הוערכו רק בצורה עקיפה מתוך רדיוס הפלסמה. המדידות האתגריות האלה הושגו על ידי שימוש בשיטה ספקטרוסקופית חדשנית המבוססת על תכונות קיטוב של פיצול זימן, ביחד עם שימוש באילוח שיצרנו על ידי לייזר ושסיפק רזולוציה מרחבית בסקלה של מילימטר. מדידות שיטתיות בוצעו עבור תנאי התחלה שונים של B_z ומסת הגז. המדידות הראו כי הערכה של שדות מגנטיים המבוססת על הפלסמה נתונה לשגיאות גדולות ובלתי אמינה. אכן, המדידות הסימולטניות של B_θ -ו B_z , ביחד עם רדיוס הפלסמה והזרם, הראו כי לנוכחות של B_z התחלתי ישנה השפעה דרמטית על התפלגות הזרם בפלסמה. בעוד שללא B_z כל הזרם זורם, כצפוי, בתוך

הפלסמה הקורסת, כאשר הקריסה מתרחשת תחת השפעת B_z התחלתי, המדידות של B_θ הראו שחלק קטן בלבד מכל הזרם זורם בתוך הפלסמה הקורסת. באופן ספציפי, כאשר $B_{z,t=0} = 0.4 \text{ T}$, הגודל של B_θ בתוך הפלסמה הקורסת נשאר כמעט קבוע (בין 1.5 T ל- 2 T) בזמן הקריסה, למרות שהזרם עולה ורדיוס הפלסמה קטן. מודל תאורטי הוצע להסביר את התופעה הבלתי צפויה. על מנת לבחון את המודל בפירוט נחוצות סימולציות מגנטו-הידרודינמיות תלת מימדיות. בנוסף לתוצאות הנ"ל, המדידות סיפקו מידע רב העוזר להבין את תהליך קריסת הפלסמה בנוכחות B_z . בסטגנציה מדדנו דחיסה של B_z בפקטור של ~ 15 יחסית לערכו ההתחלתי. מקדם דחיסה זה, יחד עם מדידה של רדיוס הפלסמה, מאפשרים חישוב של יעילות הכליאה של B_z על ידי הפלסמה, והתוצאה היא בערך 50% . המידע הזה הינו חשוב לבדיקות של סימולציות מגנטו-הידרודינמיות. תופעה נוספת שנצפתה הינה גרדיאנט צירי של B_z , כך שהגודל שלו גדל פי שתיים מהאנודה (B_z נמוך) עד אמצע עמוד הפלסמה ($z \approx 5 \text{ mm}$, שם B_z גבוה). המדידות האלה ממחישות את קיום של אזור מעבר בו $B_z = B_z(t=0)$ בלתי דחוס בתוך האלקטרודות, ל- B_z דחוס כשמתרחקים מקצה האלקטרודה.

בנוסף למדידות הספקטרוסקופיות צולמו תמונות דו-מימדיות של פליטה עצמית של הפלסמה וגם תמונות אינטרפרומטריות. המדידות האלה היו חשובות לקביעת התפתחות השדה המגנטי ולחקר התלות של אי-יציבויות בתנאים ההתחלתיים של הניסוי. המדידות הראו בברור כי הפעלה של B_z גורמת לריסון של אי-יציבות מסוג מגנטו-ריילי-טיילור (magneto-Rayleigh-Taylor). תמונות דו-מימדיות הראו קיום של אזורים בפלסמה בעלי פליטה הרבה יותר גדולה מהפלסמה מסביב, שנראים כנימות חמות (filaments) המכוונות לאורך ציר הסימטריה. האזורים האלה התגלו כאזורים בעלי צפיפות אלקטרונים יותר גבוהה (בערך ב- 10% - 20%) וטמפרטורת אלקטרונים יותר נמוכה (בערך בכמה אחוז) מאשר בפלסמה מסביב.