ELECTRON AND ION SCALE MAGNETIC TURBULENCE STUDIES RELEVANT TO LABORATORY ASTROPHYSICS

INDRAJ SINGH

DEPARTMENT OF ENERGY SCIENCE AND ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI, NEW DELHI-110016, INDIA

JULY 2023

ELECTRON AND ION SCALE MAGNETIC TURBULENCE STUDIES RELEVANT TO LABORATORY ASTROPHYSICS

by

INDRAJ SINGH

Department of Energy Science and Engineering

Submitted

in partial fulfillment of the requirements of the degree of

Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI, NEW DELHI-110016, INDIA

JULY 2023

Dedicated to

my

beloved Family

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **"Electron and ion scale magnetic turbulence studies relevant to laboratory astrophysics"**, being submitted by **Mr. Indraj Singh** to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** in the Department of Energy Science and Engineering, is a record of the original bonafide research work carried out by him under my supervision and guidance.

The thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations related to the award of the degree. The results contained in this thesis have not been submitted in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma to the best of our knowledge. I approve the thesis for the award of the aforesaid degree.

Prof. R. Uma
Department of Energy Science and Engineering,
Indian Institute of Technology Delhi

Prof. R. P. Sharma
Department of Energy Science and Engineering,
Indian Institute of Technology Delhi

Acknowledgements

This Ph.D. thesis is the output of the efforts and support of several people to whom I am extremely grateful. It is a pleasure to express my gratitude to all those people who made this thesis possible.

First and foremost, I would like to express my deep and sincere gratitude to my supervisors, Prof. R. Uma and Prof. R. P. Sharma, Department of Energy Science and Engineering, Indian Institute of Technology Delhi (IIT Delhi), for their invaluable guidance, support, and encouragement during the course of this endeavor. Their dedication to high-quality research in theoretical plasma physics has been a great inspiration. It is because of their profound knowledge and expertise of the subject that this work has taken its present shape. The critical comments rendered by them during the discussions are deeply appreciated. I hope that I can be lively, enthusiastic, and energetic like them. I could not be prouder of my academic roots and hope that I can, in turn, pass on the research values and the dreams that they have given to me.

I am very grateful to the present head, Prof. Vamsi K. Komarala, and the former head, Prof. K. A. Subramanian, of the Department of Energy Science and Engineering at IIT Delhi, for providing the opportunity to work in such an innovative organization and for their overall support. The time I spent at IIT Delhi was both intellectually challenging and immensely rewarding. I am deeply grateful to the chairman of DRC, Prof. Ramesh Narayanan, the internal expert of DRC, Prof. Satyananda Kar, and the external expert of DRC, Prof. Sriram Hegde, for their valuable suggestions, advice, and approval of my thesis work. My grateful thanks go to all the faculty members of the Department of Energy Science and Engineering, IIT Delhi, who have helped me directly or indirectly in the completion of my work. Many thanks are due to all the staff members of the Department of Energy Science and Engineering at IIT Delhi for their kind help and cooperation. I would like to acknowledge the library at IIT Delhi for extending its helping hand during the coursework of my Ph.D.

I am highly grateful to all my group members, Dr. Ram Kishor Singh, Dr. Alok ji Shukla, Dr. Narender Kumar, Dr. Pradeep Kumar Gupta, Dr. Neha Pathak, Dr. Himani Dewan, Ms. Garima Patel, and Mr. Praveen Kumar, for their cooperation and support during the perusal of this study. Special thanks go to Dr. Pawan Kumar Kanaujia, Dr. Nanhe Kumar Gupta, and Mr. Mohit Kumar for their wonderful cooperation, positive criticism, and selfless help during my research work at IIT Delhi.

I would like to acknowledge the financial support of the Department of Science and Technology (DST) and the Indian Institute of Technology Delhi (IIT Delhi).

This acknowledgment would remain incomplete without expressing my sincere gratitude towards my parents, my elder brother, my younger brother, my sister, and other family members for giving me strength and support over these years and for everything they have done for me before. I owe it deeply to them for their encouragement and support, which gave me the courage and confidence to materialize this research work. Most of all, I want to thank my wife, Mrs. Neha, for all the moral support and encouragement she gave me while I was doing my research.

Above all, I solicit the blessings of the almighty for continuous progress and prosperity.

Indraj Singh

Abstract

Various space and astrophysical phenomena provide a unique laboratory to study magnetic field amplification, magnetic turbulence, energy cascading, and acceleration of the charged particles inside the plasma medium. The invention of the high-intensity laser-matter interaction has opened up a new field of study, where many astrophysical situations may be investigated through controlled laboratory experiments and simulations. A self-generated magnetic field is created when a solid object is irradiated with femtosecond laser pulses. Such a self-generated magnetic field is produced as a result of the interaction of the intense laser with the plasma and does not require a starting field. The emergence and development of magnetic turbulence is a pervasive and ubiquitous nonlinear process found in several laboratories and astrophysical events. In such systems, turbulence plays a crucial role in the transport of energy from large to small scales. The evolution of many astrophysical phenomena is profoundly affected by this turbulence-induced energy cascade.

Several plasma modes are supported by magnetized plasma. Depending on the plasma circumstances, the dispersive characteristics of these plasma modes are quite different from one another. In this thesis, models based on the nonlinear interaction of several plasma modes have been used to study the formation of filamentary structures, the strengthening of the magnetic field, the creation of turbulence, and the acceleration of charged particles. In this perspective, the theoretical models (Zakharov system of equations and modified nonlinear Schrödinger equation) are developed, which are solved by laboratory simulations as well as by semi-analytical models. The main goal of the proposed model, which is based on the nonlinear interaction of plasma modes, is to study the magnetic turbulence at the electron and ion scales in the magnetized plasma, as seen in laboratory and space plasmas.

The *second chapter* deals with the nonlinear interaction of the elliptically polarized electromagnetic extraordinary mode with the electrostatic upper hybrid oscillations. The laboratory simulations are employed to solve the developed coupled dynamical equations. The filamentary structures come from the results of computer simulations. Later on, the structures become chaotic, which indicates the generation of turbulence. The process by which energy is transported from one length scale to another is shown by electron-scale magnetic turbulence. A simplified model in the paraxial

approximation provides a mechanism to understand the nonlinear progression of the extraordinary mode laser beam inside the plasma medium.

The group velocity dispersion effects on the formation of the filamentary structure and electron-scale magnetic turbulence generation are described in the *third chapter* by taking the adiabatic approximation. This chapter shows how nonlinear effects like nonlinearity, diffraction, and group velocity dispersion affect the nonlinear interaction between extraordinary mode lasers and upper hybrid oscillations. The developed coupled dynamical equations were solved by numerical simulation and semi-analytical techniques. Simulation results show that there are localized structures of the solitary wave type in the space-time domain, and magnetic turbulence at the scale of the electron shows how energy is exchanged at different length scales. Semi-analytical results show the simultaneous self-compression and self-focusing of the pump x-mode laser beam inside the plasma medium.

A nonlinear wave-wave interaction among the extraordinary mode and the Trivelpiece-Gould mode propagating obliquely to the magnetic field direction is presented in the *fourth chapter*. The coupled model equations were evolved by mathematical formulation and solved by numerical simulation. The findings from the simulation show the effect of the propagation angle (θ) of the Trivelpiece-Gould mode on the filamentary structures, density harmonics, amplification of the magnetic field, and scaling of the magnetic turbulence at the electron scale. A simplified model in the paraxial approximation is also studied to see the effect of the propagation angle of the Trivelpiece-Gould mode on the localized structure formation.

The *chapter fifth* presents the nonlinear interaction of plasma waves to study the electron acceleration associated with the localized structure formation and turbulence generation. By taking the thermal effects into account, the dynamical equations of the upper hybrid wave and the extraordinary mode are developed, and computational simulations are employed to solve the formulated coupled dynamical equations. Numerical simulation results show the formation of filamentary structures, magnetic field amplification, and electron-scale turbulent spectra. The fractional diffusion technique and the Fermi acceleration model are employed to study the electron acceleration associated with the spectral index of the electron-scale turbulent spectra. A simplified model in the paraxial limit included in this study provides better insight into the nonlinear development of the x-mode laser beam inside the plasma medium.

The nonlinear coupling of the magnetosonic wave and the kinetic Alfvén wave in the finite plasma beta region is presented in the *sixth chapter*. The semi-analytical model and laboratory simulations are used to solve the coupled model equations after they have evolved through mathematical formulation, including ponderomotive nonlinearity. The filamentary structure formation and magnetic field amplification were observed from the simulation results. The fact that the filamentary structures become chaotic at later times hints at the generation of turbulence. The time-averaged turbulent power spectra describe the transport of energy among the different length scales. The scale size of the kinetic Alfv*én* wave is in the range of ion gyro-radius (ρ_i), which is anticipated to contribute towards the power-law scaling of magnetic turbulence at the ion scales. The observed turbulent spectra in different wavenumber regions resemble the various astrophysical scenarios. In the paraxial limit, a semi-analytical model is used to study how the density harmonics change the nonlinear progression of the pump wave.

The *chapter seventh* presents a nonlinear coupling of plasma waves to explore how the additional density fluctuation profiles affect localized structure formation, enhancement of the magnetic field, and the scaling of turbulent spectra. The coupled dynamical equations are formulated by considering nonlinear ponderomotive force and additional density fluctuation profiles (caused by counter propagation of the ion acoustic wave). To solve the coupled model equations that evolved through mathematical formulation, the laboratory simulation and the semi-analytical approach are employed. The impact of the additional density profiles on the filamentary structure formation and amplification factor observed from simulation and semi-analytical findings. The energy cascade between distinct length scales is also affected by the additional density fluctuation profiles, which are shown by the turbulent spectra seen in simulation results. The relevance of the present studies, such as localized structure formation, enhancement of the magnetic field, and turbulent scaling at the electron and ion scales, has been shown with the various experimental observations of laser-plasma interaction replicating several astrophysical scenarios.

सार

विभिन्न अंतरिक्ष और खगोलीय घटनाएं चुंबकीय क्षेत्र प्रवर्धन, टर्बुलेन्स उत्पादन तथा चुंबकीय प्लाज्मा के अंदर ऊर्जा के प्रवाह का अध्ययन करने के लिए एक अद्वितीय प्रयोगशाला प्रदान करती हैं। उच्च तीव्रता वाले लेजर–पदार्थ इंटरैक्शन के आविष्कार ने अध्ययन का एक नया क्षेत्र खोल दिया है, जहां नियंत्रित प्रयोगशाला प्रयोगों और सिमुलेशन के माध्यम से कई खगोलभौतिकीय स्थितियों की जांच की जा सकती है। एक स्व–निर्मित चुंबकीय क्षेत्र तब बनता है जब किसी ठोस वस्तु को फेमटोसेकंड लेजर पल्स से विकिरणित किया जाता है। ऐसा स्व–निर्मित चुंबकीय क्षेत्र प्लाज्मा के साथ तीव्र लेजर की बातचीत के परिणामस्वरूप उत्पन्न होता है और इसके लिए प्रारंभिक क्षेत्र की आवश्यकता नहीं होती है। चुंबकीय टर्बुलेन्स का उद्भव और विकास एक व्यापक तथा सर्वव्यापी गैर–रैखिक प्रक्रिया है जो कई प्रयोगशालाओं और खगोलभौतिकी घटनाओं में पाई जाती है। ऐसी प्रणालियों में, बड़े पैमाने से छोटे पैमाने तक ऊर्जा के परिवहन में टर्बुलेन्स महत्वपूर्ण भूमिका निभाती है। कई खगोलीय घटनाओं का विकास इस टर्बुलेन्स–प्रेरित ऊर्जा कैसकेड से गहराई से प्रभावित होता है।

कई प्लाज्मा मोड चुंबकीय प्लाज्मा द्वारा समर्थित हैं। प्लाज़्मा परिस्थितियों के आधार पर, इन प्लाज़्मा मोड की फैलाव विशेषताएँ एक दूसरे से काफी भिन्न होती हैं। इस थीसिस में, फिलामेंटरी संरचनाओं के निर्माण, चुंबकीय क्षेत्र को मजबूत करने, टर्बुलेन्स के निर्माण और आवेशित कणों के त्वरण का अध्ययन करने के लिए कई प्लाज्मा मोड के नॉनलाइनियर इंटरैक्शन पर आधारित मॉडल का उपयोग किया गया है। इस परिप्रेक्ष्य में, सैद्धांतिक मॉडल (ज़खारोव समीकरण प्रणाली और संशोधित नॉनलाइनियर श्रोडिंगर समीकरण) विकसित किए गए हैं, जिन्हें प्रयोगशाला सिमुलेशन के साथ–साथ अर्ध–विश्लेषणात्मक मॉडल द्वारा हल किया गया है। प्रस्तावित मॉडल का मुख्य लक्ष्य, जो प्लाज्मा मोड के नॉनलाइनियर इंटरेक्शन पर आधारित है, चुंबकीय प्लाज्मा में इलेक्ट्रॉन और आयन स्केल पर चुंबकीय टर्बुलेन्स का अध्ययन करना है, जैसा कि प्रयोगशाला और अंतरिक्ष प्लाज्मा में देखा जाता है।

दूसरा अध्याय इलेक्ट्रोस्टैटिक ऊपरी संकर दोलनों (UHO) के साथ दीर्घवृत्त ध्रुवीकृत विद्युत चुम्बकीय असाधारण मोड (x–mode) की गैर–रेखीय बातचीत से संबंधित है। विकसित युग्मित गतिशील समीकरणों को हल करने के लिए प्रयोगशाला सिमुलेशन का उपयोग किया जाता है। फिलामेंटरी संरचनाएं कंप्यूटर सिमुलेशन के परिणामों से आती हैं। बाद में, संरचनाएं अव्यवस्थित हो जाती हैं, जो टर्बुलेन्स उत्पन्न होने का संकेत देती हैं। वह प्रक्रिया जिसके द्वारा ऊर्जा को एक लंबाई पैमाने से दूसरे पैमाने पर ले जाया जाता है, इलेक्ट्रॉन–स्केल चुंबकीय टर्बुलेन्स द्वारा दिखाई जाती है। पैराएक्सियल सन्निकटन में एक सरलीकृत मॉडल प्लाज्मा माध्यम के अंदर असाधारण मोड लेजर बीम की गैर–रेखीय प्रगति को समझने के लिए एक तंत्र प्रदान करता है।

फिलामेंटरी संरचना के निर्माण और इलेक्ट्रॉन–स्केल चुंबकीय टर्बुलेन्स पीढ़ी पर समूह वेग फैलाव प्रभाव (GVD) को एडियाबेटिक सन्निकटन लेकर तीसरे अध्याय में वर्णित किया गया है। यह अध्याय दिखाता है कि गैर–रैखिकता, विवर्तन और समूह वेग फैलाव जैसे गैर–रेखीय प्रभाव असाधारण मोड

लेज़रों और ऊपरी संकर दोलनों के बीच गैर–रेखीय संपर्क को कैसे प्रभावित करते हैं। विकसित युग्मित गतिशील समीकरणों को संख्यात्मक सिमुलेशन और अर्ध–विश्लेषणात्मक तकनीकों द्वारा हल किया गया है। सिमुलेशन परिणाम दिखाते हैं कि अंतरिक्ष–समय डोमेन में एकान्त तरंग प्रकार की स्थानीयकृत संरचनाएं हैं, और इलेक्ट्रॉन के पैमाने पर चुंबकीय टर्बुलेन्स से पता चलता है कि विभिन्न लंबाई के पैमाने पर ऊर्जा का आदान–प्रदान कैसे होता है। अर्ध–विश्लेषणात्मक परिणाम प्लाज्मा माध्यम के अंदर पंप x–मोड लेजर बीम के एक साथ आत्म–संपीड़न और आत्म–फ़ोकसिंग को दर्शाते हैं।

असाधारण मोड (x–मोड) और चुंबकीय क्षेत्र की दिशा में तिरछे प्रसार करने वाले ट्राइवेलपीस–गोल्ड मोड (TG mode) के बीच एक नॉनलाइनियर वेव–वेव इंटरेक्शन चौथे अध्याय में प्रस्तुत किया गया है। युग्मित मॉडल समीकरण गणितीय सूत्रीकरण द्वारा विकसित किए गए और संख्यात्मक सिमुलेशन द्वारा हल किए गए। सिमुलेशन के निष्कर्ष फिलामेंटरी संरचनाओं, घनत्व हार्मोनिक्स, चुंबकीय क्षेत्र के प्रवर्धन और इलेक्ट्रॉन पैमाने पर चुंबकीय टर्बुलेन्स के स्केलिंग पर ट्राइवेलपीस–गोल्ड मोड के प्रसार कोण (θ) के प्रभाव को दर्शाते हैं। स्थानीयकृत संरचना निर्माण पर ट्राइवेलपीस–गोल्ड मोड के प्रसार कोण के प्रभाव को देखने के लिए पैराएक्सियल सन्निकटन में एक सरलीकृत मॉडल का भी अध्ययन किया गया है।

अध्याय पांचवां स्थानीय संरचना निर्माण और अशांति पीढ़ी से जुड़े इलेक्ट्रॉन त्वरण का अध्ययन करने के लिए प्लाज्मा तरंगों की गैर–रैखिक बातचीत प्रस्तुत करता है। थर्मल प्रभावों को ध्यान में रखते हुए, ऊपरी संकर तरंग (UHW) और असाधारण मोड (x–मोड) के गतिशील समीकरण विकसित किए जाते हैं, और तैयार किए गए युग्मित गतिशील समीकरणों को हल करने के लिए कम्प्यूटेशनल सिमुलेशन को नियोजित किया गया है। संख्यात्मक सिमुलेशन परिणाम फिलामेंटरी संरचनाओं, चुंबकीय क्षेत्र प्रवर्धन और इलेक्ट्रॉन–स्केल टर्बुलेन्स स्पेक्ट्रा के गठन को दर्शाते हैं। इलेक्ट्रॉन–स्केल टर्बुलेंट स्पेक्ट्रा के वर्णक्रमीय सूचकांक से जुड़े इलेक्ट्रॉन त्वरण का अध्ययन करने के लिए भिन्नात्मक प्रसार तकनीक और फर्मी त्वरण मॉडल को नियोजित किया गया है। इस अध्ययन में शामिल पैराक्सियल सीमा में एक सरलीकृत मॉडल प्लाज्मा माध्यम के अंदर x–मोड लेजर बीम के गैर–रेखीय विकास में बेहतर अंतर्दृष्टि प्रदान करता है।

परिमित प्लाज्मा बीटा (β) क्षेत्र में मैग्नेटोसोनिक तरंग (MSW) और गतिज अल्फवेन तरंग (KAW) के अरेखीय युग्मन को छठे अध्याय में प्रस्तुत किया गया है। अर्ध–विश्लेषणात्मक मॉडल और प्रयोगशाला सिमुलेशन का उपयोग गणितीय फॉर्मूलेशन के माध्यम से विकसित होने के बाद युग्मित मॉडल समीकरणों को हल करने के लिए किया गया है, जिसमें पोंडेरोमोटिव नॉनलाइनरिटी भी शामिल है। सिमुलेशन परिणामों से फिलामेंटरी संरचना निर्माण और चुंबकीय क्षेत्र प्रवर्धन देखा गया। तथ्य यह है कि बाद के समय में फिलामेंटरी संरचनाएं अव्यवस्थित हो जाती हैं, जो टर्बुलेन्स उत्पन्न होने का संकेत देती है। समय–औसत टर्बुलेंट शक्ति स्पेक्ट्रा विभिन्न लंबाई के पैमानों के बीच ऊर्जा के परिवहन का वर्णन करता है। गतिज अल्फवेन तरंग का स्केल आकार आयन जाइरो–रेडियस (ρ_i) की सीमा में है, जो आयन स्केल पर चुंबकीय अशांति के पावर–लॉ स्केलिंग में योगदान करने का अनुमान है। विभिन्न वेवनंबर क्षेत्रों में देखे गए टर्बुलेंट स्पेक्ट्रा विभिन्न खगोलभौतिकीय परिदृश्यों से मिलते जुलते हैं। पैराक्सियल सीमा में, एक अर्ध–विश्लेषणात्मक मॉडल का उपयोग यह अध्ययन करने के लिए किया गया है कि घनत्व हार्मोनिक्स पंप तरंग की गैर–रेखीय प्रगति को कैसे बदलता है।

अध्याय सातवां यह पता लगाने के लिए प्लाज्मा तरंगों का एक गैर–रेखीय युग्मन प्रस्तुत करता है कि अतिरिक्त घनत्व उतार–चढ़ाव प्रोफाइल स्थानीय संरचना निर्माण, चुंबकीय क्षेत्र की वृद्धि और टर्बुलेंट स्पेक्ट्रा की स्केलिंग को कैसे प्रभावित करते हैं। युग्मित गतिशील समीकरण नॉनलाइनियर पॉन्डेरोमोटिव बल और अतिरिक्त घनत्व उतार–चढ़ाव प्रोफाइल (आयन ध्वनिक तरंग (IAW) के काउंटर प्रसार के कारण) पर विचार करके तैयार किए गए हैं। गणितीय सूत्रीकरण के माध्यम से विकसित युग्मित मॉडल समीकरणों को हल करने के लिए प्रयोगशाला सिमुलेशन और अर्ध–विश्लेषणात्मक दृष्टिकोण को नियोजित किया गया है। सिमुलेशन और अर्ध–विश्लेषणात्मक निष्कर्षों से फिलामेंटरी संरचना निर्माण और प्रवर्धन कारक पर अतिरिक्त घनत्व प्रोफाइल का प्रभाव देखा गया। अलग–अलग लंबाई के पैमानों के बीच ऊर्जा कैसकेड अतिरिक्त घनत्व उतार–चढ़ाव प्रोफाइल से भी प्रभावित होता है, जो सिमुलेशन परिणामों में देखे गए अशांत स्पेक्ट्रा द्वारा दिखाया गया है। वर्तमान अध्ययनों की प्रासंगिकता, जैसे कि स्थानीय संरचना निर्माण, चुंबकीय क्षेत्र में वृद्धि, और इलेक्ट्रॉन और आयन स्केल पर टर्बुलेंट स्केलिंग, कई खगोलभौतिकीय परिदृश्यों की नकल करते हुए लेजर–प्लाज्मा इंटरैक्शन के विभिन्न प्रयोगात्मक अवलोकनों के साथ दिखाई गई है।

Contents

ListofFigures