

Научно-образовательный курс:
**«Гидродинамические неустойчивости и турбулентное
перемешивание в плазме при высоких плотностях энергии»**

**В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические
кадры инновационной России» на 2009-2013 годы**

Шифр заявки «2012-1.5-14-000-1019-007»

**Соглашение на предоставление гранта от «14» ноября 2012 г. № 8836
(с учетом дополнительного соглашения от «18» марта 2013 г. № 1)**

Описание курса:

Гидродинамические неустойчивости и перемешивание Рэлея-Тейлора (РТ) и Рихтмайера-Мешков (РМ) играют важную роль в широком спектре плазменных явлений. Эти процессы могут быть естественными или технологическими, их характерные масштабы могут быть астрофизическими или атомистическими, а плотность энергии может быть низкой или высокой. Примеры включают инерциальный термоядерный синтез, взрыв сверхновой, горение и детонацию, взаимодействие света с веществом и преобразование материалов при ударе. Поток материи в этих системах часто характеризуется резким изменением его скалярных и векторных полей, а также относительно небольшим влиянием диссипации и диффузии. Это приводит к формированию границ (фронтов), которые разделяют неоднородности потока (фазы) на макроскопических (непрерывных) масштабах. Для решения таких задач необходимо понимание физики гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания которое возникает на границе раздела фаз.

Настоящий научно-образовательный курс посвящен гидродинамическим неустойчивостям Рэлея-Тейлора, Кельвина-Гельмгольца, Ландау-Дарье в плазме при высоких плотностях энергии и турбулентному перемешиванию, к которому они приводят.

Гидродинамические неустойчивости и турбулентное перемешивание в плазме при высоких плотностях энергии являются чрезвычайно сложными процессами. На макроскопическом уровне, они характеризуются большими

градиентами давления и плотности, тепловыделением, изменением фазы, и появлением фазовых границ. Динамика этих процессов существенно неравновесна, анизотропна, нелокальна и часто подвержена ударным волнам и сильным ускорением. Последние десятилетия существенно расширили наши возможности в исследовании гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания в эксперименте, численном моделировании и теории. Целью настоящего курса является изучение гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания с использованием как классических подходов, так и подходов, далеко выходящих за рамки канонических представлений и находящихся на пике современных исследований со стороны теории, эксперимента, численного моделирования и анализа данных. Лекции сфокусированы на физике плазмы при высоких плотностях энергии.

Курс предназначен для студентов, аспирантов, молодых сотрудников.

Материал курса представлен в формате следующих лекций:

1. ***Динамика границы, от кинетических до макроскопических масштабов***
 - Гидродинамические неустойчивости в линейном режиме.
 - Появление фазы и границы раздела на кинетических масштабах.
 - Отклонения неравновесной динамики от стандартных равновесных описаний Больцмана и Гиббса.
 - Макроскопическое описание: законы сохранения массы, импульса и энергии и законы термодинамики.
 - Условия на границе - обобщенные условия Ранкин-Гюгонио для произвольного фронта.
 - Неустойчивости Рэлея-Тейлора, Рихтмайера-Мешкова, Кельвина-Гельмгольца и Ландау-Дарье.
 - Неустойчивости абляционного фронта.
 - Гидромагнитные неустойчивости.
2. ***Нелинейная динамика неустойчивой границы***
 - Неравновесный перенос и развитие неустойчивостей Рэлея-Тейлора, Рихтмайера-Мешкова, Кельвина-Гельмгольца и Ландау-Дарье.

- Взаимосвязь сингулярного характера динамики фронта с фундаментальными свойствами уравнений Эйлера / Навье-Стокса.
- Влияние начальных условий на развитие неустойчивости и на взаимодействие масштабов.
- Теоретическо-групповое рассмотрение и эмпирические модели гидродинамических неустойчивостей.
- Переход к автомодельному режиму.
- Влияние абляции массы, диффузии, вязкости на нелинейную динамику фронта.
- Влияние размерности и геометрии физического на нелинейную динамику неустойчивой границы.

3. *Перемешивание в плазме высоких плотностей энергии*

- Пространственно-временные симметрии неравновесных турбулентных процессов.
- Масштабная инвариантность, скейлинговые и спектральные свойства потоков.
- Инвариантные меры статистически нестационарной динамики.
- Условия появления и свойства вихревых структур (таких как циркуляция и спиральность) на границе и в объеме
- Взаимосвязь топологических с пространственно-временными симметриями динамики.
- Положения канонической турбулентности Колмогорова.
- Сходства и различия между канонической турбулентности Колмогорова и перемешивания Рэлея-Тейлора.

4. *Перемешивание в плазме при высоких плотностях энергии*

- Астрофизика вселенной: Большой взрыв и эволюция ранней Вселенной.
- Астрофизика звезд: Межгалактическая среда и рождение звезд. Звездная конвекция. Вспышки сверхновых.
- Управляемый термоядерный синтез: Инерциальный синтез.
- Управляемый термоядерный синтез: Магнитный синтез.
- Сложности, возможности и перспективы управляемого термоядерного синтеза.
- Взаимодействие света с веществом и лазерная абляция.
- Фазовые границы в плазме.

Литература:

Динамика плазмы при высоких плотностях энергии - активно развивающаяся область, находящаяся на пике современных теоретических, численных и экспериментальных исследований. Материал курса может послужить основой для учебного пособия в рамках высшего и профессионального образования для студентов, аспирантов и научных работников.

В настоящее время качестве учебных материалов этого курса используются как отдельные обзорные статьи, так и сборники обзорных статей, собранные и отредактированные руководителем проекта, и напечатанные в старейшем научном журнале с более чем 350-летней историей публикации научных трудов.

Philosophical Transactions of Royal Society A 2013, 371

Turbulent mixing and beyond: non-equilibrium processes from atomistic to astrophysical scales,

Volume 2, <http://rsta.royalsocietypublishing.org/site/2013/2003.xhtml>

Turbulent mixing and beyond: Non-equilibrium processes from atomistic to astrophysical scales.

Volume 1, <http://rsta.royalsocietypublishing.org/site/2013/1982.xhtml>

Philosophical Transactions of Royal Society A 201, 368

Turbulent mixing and beyond, <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/368/1916.toc>

Abarzhi S. I., Gauthier S., and Sreenivasan K. R. 2013. Introduction: Turbulent mixing and beyond: non-equilibrium processes from atomistic to astrophysical scales II. PTRS A. 371, 2012, 20120267.

Abarzhi S. I., Gauthier S., and Sreenivasan K. R. 2013 Preface: Turbulent mixing and beyond: non-equilibrium processes from atomistic to astrophysical scales Phil. Trans. R. Soc. A. 2013 371, 20120435

Abarzhi SI and Sreenivasan KR 2010 Introduction – Turbulent Mixing and Beyond, Phil. Trans. Royal Society A London 368, Issue 1916, 1539-1546

Abarzhi SI 2010 Review of theoretical modeling approaches of Rayleigh-Taylor instabilities and turbulent mixing. Philosophical Transactions of the Royal Society A 368, 1809.

Abarzhi SI, Rosner R 2010 Comparative study of approaches for modeling Rayleigh-Taylor turbulent mixing, Physica Scripta T142, 014012, pp. 1-12

Abarzhi SI 2008 Review on nonlinear coherent dynamics of unstable fluid interface: conservation laws and group theory Physica Scripta T132 297681 1-18.

- Anisimov SI, Gauthier S, Drake P, Meshkov EE, Abarzhi SI 2013, What is certain and what is uncertain in our knowledge of Rayleigh-Taylor mixing, *Phil Trans Roy Soc Q* 371, 20130266
- Batchelor G K, 1953, *The Theory of Homogeneous Turbulence*, Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Besnard D 2007 The megajoule laser program—ignition at hand *Eur. Phys. J. D* 44 207–13
- Bodner S E, Colombat D G, Gardner J H, Lehmborg R H, McCrory R L, Seka W, Verdon C P, Knauer J P, Afeyan B B and Powell H T 1998 Direct-drive laser fusion: status and prospects *Phys. Plasmas* 5 1901
- Chandrasekhar S 1981 *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, 3d ed. Dover, New York.
- Drake RP 2009, Perspectives of high energy density physics. *Phys. Plasmas* 16, 055501
- Gauthier S & Creurer B 2010 Compressibility effects in Rayleigh-Taylor instability induced flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368
- Kadau K, Barber J L, Germann T C, Holian B L, Alder B J 2010 Atomistic methods in fluid simulation. *Phil. Trans. Royal Society* 368, 1547.
- E.E. Meshkov (2013). About certain peculiarities of hydrodynamic instability development. *PTRS A*. 371.
- Nishihara K et al, 2010, Richtmyer-Meshkov instability: theory of linear and nonlinear evolution, *Phil Trans Roy Society A* 368, 1769
- Orlov S S, Abarzhi S I, Oh S-B, Barbastathis G, Sreenivasan K R 2010 High-performance digital holography for fluid dynamic experiments, *Proceedings of the Philosophical Transactions Royal Society A* 368, 1705- 1737
- Pudritz R. E. & Kevlahan N.K.-R. 2013. Shock interactions, turbulence and the origin of the stellar mass spectrum. *PTRS A*. 371
- Ryutov DD, Derzon MS, Matzen MK 2000 The physics of fast Z pinches. *Rev. Mod. Phys.* 72, 167.
- Remington B A, Drake R P, Ryutov D D, 2006, “Experimental astrophysics with high power lasers and Z-pinches,” *Rev. Mod. Phys.* 78, 755
- Sharp D H 1984 An overview of Rayleigh–Taylor instability. *Physica D* 12 3
- Stanic M, Stellingwerf R F, Cassibry J T, Abarzhi S I 2012, Scale coupling in Richtmyer-Meshkov flows induced by strong shocks, *Physics of Plasmas* 19, 082706.
- Sreenivasan KR 1999 Fluid turbulence *Rev. Mod. Phys.* 71, S383-S395.
- Zeldovich YB & Raizer YP 2002 *Physics of Shock Waves and High-temperature Hydrodynamic Phenomena* 2nd Engl. Ed. New York: Dover