

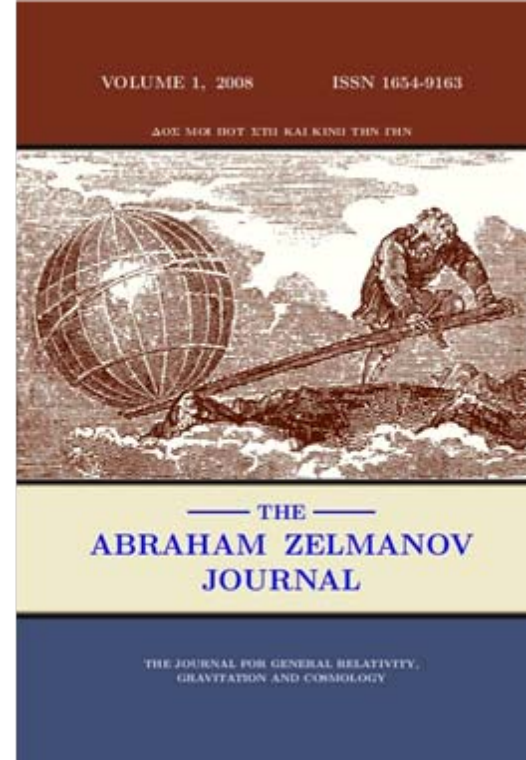
Отдел Релятивистской астрофизики

Отчет - 2015



Отдел Релятивистской астрофизики ГАИШ
МГУ им. М. В. Ломоносова был организован
академиком Я. Б. Зельдовичем в 1980 г.





Из постановления президиума РАН от 11.02.2014

Учредить золотую медаль имени академика Я. Б. Зельдовича, присуждаемую Российской академией наук за выдающиеся работы в области физики и астрофизики

Присвоить имя академика Я. Б. Зельдовича одной из улиц г. Москвы

Установить мемориальные доски в память об академике Я. Б. Зельдовиче

на здании института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН,

на здании института космических исследований РАН,

на здании института химической физики им Н. Н. Семёнова РАН



В настоящее время в отделе работают 18 штатных сотрудников, 3 аспиранта и 1 студент.

Среди них:

- ✧ 1 заведующий отделом
- ✧ 1 главный научный сотрудник
- ✧ 5 ведущих научных сотрудников
- ✧ 1 старший научный сотрудник
- ✧ 4 научных сотрудника
- ✧ 6 ведущих инженеров
- ✧ 3 ведущих инженера — аспиранты
- ✧ 1 лаборант — студент

Следующие сотрудники отдела являются членами Ученого совета ГАИШ:

- ✂ Н. И. Шакура, д.ф.-м.н.
- ✂ М. В. Сажин, д.ф.-м.н.
- ✂ С. О. Алексеев, д.ф.-м.н.
- ✂ С. Б. Попов, д.ф.-м.н.
- ✂ В. В. Журавлёв, к.ф.-м.н.
- ✂ К. А. Постнов, д.ф.-м.н.

Научная тематика отдела

- ✂ Космология
- ✂ Теория гравитации
- ✂ Астрофизика чёрных дыр и нейтронных звёзд

М. В. Сажин и О. С. Сажина

Разработан и проведен анализ радиокарт миссий WMAP и PLANCK, составлен список кандидатов в космические струны. Проведена разработка теории релятивистских эффектов в предложении к новым космическим экспериментам. Проведены измерения характеристик видимых движений внегалактических источников, измерена амплитуда дипольной гармоник в видимых движениях. Разработаны методы релятивистских редукций в применении к космическому эксперименту «РАДИОАСТРОН». Рассмотрены релятивистские эффекты и их редукции в космических миссиях GRAIL и GRACE FOLLOW ON.

Опубликовано 15 статей в высокорейтинговых журналах



М. В. Сажин является соруководителем общероссийского семинара им. Л. А. Зельманова. О. С. Сажина — секретарь этого семинара

М. В. Сажин и О. С. Сажина

М. В. Сажин читает ежегодный спецкурс «Современная космология»

О. С. Сажина читает ежегодный спецкурс «Математическая обработка наблюдательных и экспериментальных данных».

О. С. Сажиной в 2013 г. была защищена докторская диссертация на тему «Исследование темной энергии методами астрономии»

М. В. Сажин удостоен премии имени М. В. Ломоносова I степени, МГУ, 2012 г.

О. С. Сажина удостоена премии имени И.И. Шувалова II степени, МГУ, 2014 г.

М. В. Сажин и О. С. Сажина

[План работ](#) на 2015 — 2019 годы:

Поиск космических струн в наблюдательных данных космических миссий WMAP, PLANCK (статистические тесты), а также в данных оптических наблюдений (поиск цепочек характерных событий гравитационного линзирования).
Разработка теории космических струн. Оценка параметров многомерных теорий и теорий суперструн из наблюдательных ограничений на космические струны, найденных в радио- и оптическом диапазонах (оценка радиусов измерений многомерных пространств, оценка параметров инфляционных моделей из наблюдательных характеристик космических струн (типов, энергий, размеров, расстояний) или верхних пределов на их характеристики).

А. Н. Петров

В теории Эйнштейна-Гаусса-Боне для возмущений на произвольных фонах построены сохраняющиеся токи и суперпотенциалы 3-х типов: канонические, симметризованные и в теоретико-полевой формулировке. Результаты использованы для исследования важных решений для черных дыр в ЭГБ гравитации. Разработан формализм космологических возмущений, адаптированный для релятивистской небесной механики (совместно с С.М.Копейкиным).

Опубликовано 9 статей в высокорейтинговых журналах, участие в одной коллективной монографии, авторство научно-популярной книги



А. Н. Петров

План работ на 2015 — 2019 годы

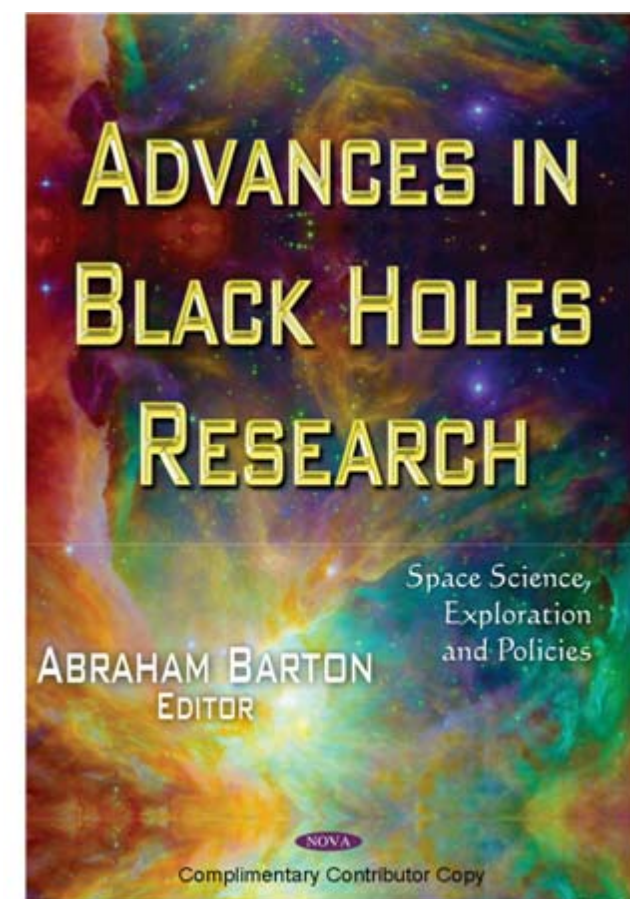
- ⌘ построить сохраняющиеся канонические и Белинфанте симметризованные токи и соответствующие суперпотенциалы в теориях с лагранжианами типа $f(R)$
- ⌘ в рамках теоретико-полевого подхода планируется получить токи и соответствующие суперпотенциалы в теориях Лавлока общего вида. Фоновые геометрии предполагаются как произвольными, так и специальными: типа пространства анти-де Ситтера
- ⌘ предполагается использовать новые законы сохранения для анализа некоторых важных решений из многочисленных решений этих теорий
- ⌘ совместно с Р.Р.Ломпеем планируется использование законов сохранения в многомерных метрических теориях с кручением для анализа некоторых важных решений в теориях типа Лавлока-Картана



Алексеев С.О., Ранну К.А., Дядина П.И.

Получено ограничение на модель $f(R)$ -гравитации из экспериментов в сильном и слабом полях, а именно: по данным пульсарного тайминга и точных измерений параметризованных пост-ньютоновских (ППН) параметров в Солнечной системе соответственно. Показано, что по результатам измерений в системе двойных пульсаров PSR J0737-3039 допустимые значения исследуемого параметра f_0'' , характеризующего вклад квадратичной поправки по кривизне в действие $f(R)$ -гравитации, лежит в диапазоне от -0.05596 до нуля, что является самыми точными ограничениями в настоящее время. Этот результат допускает реализацию как канонической версии общей теории относительности (ОТО), так и ее расширений, включающих в себя поправки, квадратичные по кривизне. Далее, нами получены ограничения на величину f_0'' по результатам измерений эддингтоновских параметров в Солнечной системе. Это ограничение является более жестким и лежит в диапазоне от -0.0055 до нуля.

По результатам работы студенткой 6-го курса кафедры астрофизики и звездной астрономии **Полиной Дядиной** защищена дипломная работа, награжденная **премией имени И. И. Шувалова** за лучшую дипломную работу отделения.



7 статей в
высокорейтинговых
журналах, участие в
3 коллективных
монографиях

С. О. Алексеев

Алексеев С.О., Петров А.Н., Латош Б.Н. (Университет Дубна):

Проведено исследование решения Дэдича-Молины (решения многомерной гравитации с топологией вида мир на бране) в рамках модели гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне. Исследованы области допустимых параметров решения, орбитальные эффекты и эффекты испарения. Полученные результаты позволяют сделать заключение, что черные дыры, описываемые решениями Дэдича-Молины и Маеды-Дэдича, не могут иметь макроскопические массы.

Алексеев С.О., Турышев А.В. (НАСА, США), Ранну К.А., Дядина П.И., Латош Б.Н.:

Уточнены результаты о возможности наблюдательного подтверждения модели Рэндал-Сандрум в приближении слабого и сильного полей. Показано, что поправки дают вклад только на уровне пост-ньютоновского формализма третьего порядка, а для наблюдателя на Земле решения Далича-Резания, Фигураса-Вайзмана и Абдолрахими-Пейджа на современном уровне точности совпадают с метрикой Шварцшильда.

Алексеев С.О., Ранну К.А., Ерин Н.С.:

Для нескольких, недавно полученных метрик вида "черная дыра в модели Рэндал-Сандрум" показано, что при сравнении с черной дырой Шварцшильда вид и характеристики аккреционных дисков для современного уровня точности наблюдений совпадают.

С. О. Алексеев

План работ на 2015—2019 годы:

- ✧ Получить дополнительные ограничения на параметры $f(R)$ гравитации из анализа других пульсаров, данные которых известны с хорошей точностью. Также, используя работающее программное обеспечение, необходимо проверить другие виды потенциалов в модели $f(R)$ и $f(R, T)$.
- ✧ Получить ограничения на параметры $f(R)$ гравитации из данных по движениям в Галактиках, данным по двойным и кратным звездным системам. Несмотря на меньшую точность имеющихся астрономических данных (работа начата с пульсарного тайминга, потому что эти данные известны с максимальной точностью), само проявление поправок по кривизне должно быть более значительным. Будет оценен вклад $f(R)$ уже в темную энергию на основе данных по взаимодействиям галактик.
- ✧ В качестве одного из направлений работы рассматривается использование современных данных физики высоких энергий для анализа ограничений на современные расширенные модели гравитации.



А. В. Топоренский

- ⌘ Найдены и исследованы новые точные решения в многомерной космологии с гравитацией Эйнштейна — Гаусса — Бонне
- ⌘ Выяснена природа суперинфляционных решений в модифицированной гравитации путем подходящего представления дополнительных степеней свободы в виде эффективного скалярного поля.
- ⌘ Получено эффективное уравнение состояния для дополнительных степеней свободы в модифицированной гравитации на поздних стадиях эволюции Вселенной.
- ⌘ Построена глобальная картина космологической динамики во фридмановской модели с неминимально связанными скалярными полями в трех вариантах связи - с кривизной (традиционная неминимальная связь), с кручением и кинетической неминимальной связью.



Опубликовано 18 работ в высокорейтинговых журналах

А. В. Топоренский

План работ на 2015—2019 годы:

- ⌘ Поиск де Ситтеровских решений в теории с неминимальной связью (в различных вариантах связи) и изучение возможности использования таких решений для объяснения ускоренного расширения Вселенной.
- ⌘ Исследование полученных точных решения в многомерной космологии на стабильность.
- ⌘ Поиск аналога осцилляций Белинского — Лифшица — Халатникова в гравитации Гаусса — Бонне.

С. Б. Попов

- ✧ Впервые построена популяционная модель молодых нейтронных звезд, позволившая в рамках единого подхода описать эволюцию радиопульсаров, магнитаров и близких остывающих нейтронных звезд
- ✧ С помощью нового метода анализа показано, что магнитные поля радиопульсаров затухают примерно вдвое на масштабе времени 300 000 лет
- ✧ Предложена модель, объясняющая быстрые радиовсплески, основанная на вспышках магнитаров на космологических расстояниях.

Опубликовано 20 статей, из них 11 — в высокорейтинговых журналах.

В 2011 г. защищена докторская диссертация

С. Б. Попов

План работ на 2015—2019 годы:

Основным направлением работы остается изучение эволюции и начальных параметров нейтронных звезд разных типов. Планируется как изучение отдельных источников (в том числе и в составе групп наблюдателей), так и популяционные исследования. В частности, внимание будет уделено эволюции магнитного поля в молодых нейтронных звездах разных типов. Кроме этого, планируется участие в космологических исследованиях (совместно с А.Топоренским) и развитие исследования экзопланет (совместно с В. Журавлевым и студентами АО).



И. Ю. Золотухин

- ✧ Была выполнена серия методологических высокоимпактных работ, связанная с развитием методов Виртуальной Обсерватории во внегалактической астрономии: калькулятор к-поправок, универсальная зависимость цвет-цвет-величина для нормальных галактик и другие.
- ✧ Была построена эмпирическая зависимость орбитального периода от светимости для маломассивных рентгеновских двойных систем (LMXB). Используя данные больших публичных обзоров неба, было отождествлено около 20 рентгеновских двойных и получены ограничения на физические параметры этих систем, опубликованы кандидаты в ультракомпактные двойные с периодом менее получаса.

Опубликовано 10 статей, из них 8 — в высокорейтинговых журналах



И. Ю. Золотухин

План работ на 2015—2019 годы:

- ⌘ Планируется выполнить проект поиска аккрецирующих черных дыр промежуточных масс (IMBH) в данных рентгеновских космических обсерваторий с применением больших публично доступных обзоров неба в различных спектральных диапазонах (УФ, оптический, ИК, радио) и целеноправленных наблюдений крупнейших наземных телескопов.
- ⌘ Кроме того, будет проведена работа по поиску рентгеновских пульсаров в созданной базе данных всех фотонов когда либо зарегистрированных обсерваторией XMM-Newton. Будет создана платформа для распространения данных каталога источников XMM-Newton, которую также планируется применить к данным проекта eRosita в случае его успешного запуска.

А. Г. Куранов, К. А. Постнов, Д.А. Колесников

- ✧ Методом популяционного синтеза произведен расчет эволюции популяции двойных систем с маломассивной звездой и компактным компонентом - нейтронной звездой (маломассивные рентгеновские двойные (ММРД) с нейтронными звездами). Для расчета эволюции ММРД был использован код BSE (Binary Star Evolution, Херлей и др. 2002), который учитывает все основные механизмы эволюции двойных систем.
- ✧ Использование модифицированного кода позволило произвести построение и анализ функции рентгеновской светимости аккрецирующих нейтронных звезд в галактиках с различными законами звездообразования. Показано, что в диапазоне светимостей $L_x > 10^{37}$ эрг/сек большая часть ММРД балджа Галактики должна иметь вторичный компонент, сошедший с главной последовательности (маломассивные гиганты) и заполняющий полость Роша.
- ✧ Также в рамках модифицированного кода BSE моделировалась эволюция симбиотических рентгеновских двойных в Галактике. Показано, что учет нестационарности режима квази-сферической дозвуковой аккреции из звездного ветра гиганта на медленно вращающиеся нейтронные звезды в этих источниках позволяет описать их наблюдаемое положение на диаграмме период вращения нейтронной звезды — рентгеновская светимость в широком диапазоне параметров звездного ветра.

А. Г. Куранов, К. А. Постнов, Д.А. Колесников

План работ на 2015—2019 годы:

- Дальнейшее развитие комплекса программ, позволяющих более детально моделировать эволюцию двойных систем. Включение элементов кода MESA для расчета индивидуальных треков звездной эволюции в программу популяционного синтеза.
- Применение теории квази-сферической аккреции к анализу быстрых транзиентных рентгеновских источников в паре со сверхгигантами. Изучение эволюции ФРС со временем для разных звездных населений в галактиках.



В. В. Журавлёв

- ✂ Разработана теория релятивистских изгибных аккреционных дисков вокруг вращающихся черных дыр. Получены общие динамические уравнения для эволюции формы изгибного диска в приближении геометрически тонкого диска, находящегося в окрестности медленно вращающейся черной дыры.
- ✂ Впервые проведены релятивистские магнитогидродинамические симуляции наклоненного к экваториальной плоскости черной дыры геометрически тонкого диска в режиме, когда безразмерный коэффициент турбулентной вязкости имеет величину порядка угла раскрытия диска. Показано, что при этом внутренние части диска действительно не укладываются в экваториальную плоскость черной дыры, как это происходит в вязкими дисками.
- ✂ **В. В. Журавлев и Д. Н. Раздобурдин** исследовали транзистный рост адиабатических неосесимметричных возмущений в астрофизических дисках. Обнаружили, что крупномасштабные вихри с характерной длиной волны много больше толщины диска для типичных параметров диска проявляют существенный транзистный рост в десятки раз за несколько кеплеровских периодов на внутренней границе потока. Кроме того, транзистный рост этих вихрей резко возрастает в сдвиговом потоке со сверх-кеплеровым вращением, например, во внутренних областях релятивистских дисков.

Опубликовано 5 статей, из них 4 — в высокорейтинговых журналах

В. В. Журавлёв

План работ на 2015—2019 годы:

- ✧ Планируется получить спектр захваченных квазинормальных изгибных мод релятивистского диска в окрестности вращающейся черной дыры и сделать вывод об их возможных наблюдательных проявлениях.
- ✧ Рассчитать форму стационарного релятивистского изгибного аккреционного диска в окрестности быстро вращающейся черной дыры.
- ✧ Планируется получить коэффициент усиления темпа переноса углового момента, происходящего за счет феномена транзиентного роста крупномасштабных вихрей в аккреционных дисках. Задача будет решаться как в локальной, так и в глобальной постановке.
- ✧ Планируется провести поиск оптимальных транзиентных трехмерных адиабатических возмущений в астрофизических дисках.
- ✧ Планируется исследовать динамику изгибных мод аккреционного диска в окрестности замагниченной нейтронной звезды.



Н. И. Шакура, Г. В. Липунова, П. К. Аболмасов

☞ Г. В. Липунова:

Найдено аналитическое решение для уравнения вязкой диффузии по одной координате с постоянным во времени коэффициентом вязкости в задаче на конечном интервале от нуля до постоянного радиуса. Решение дано в терминах функции Грина и может использоваться для описания вязкой эволюции диска с любым начальным распределением плотности. В частности, решение описывает эволюцию темпа аккреции в некоторых типах переменных источников, например, во время вспышек короткопериодических рентгеновских новых в ограниченные интервалы времени (порядка нескольких вязких времен). Анализ кривых блеска таких источников с учетом данного решения позволяет получить оценку на произведение параметра турбулентности и квадрата полутолщины диска на внешнем радиусе.

Опубликовано 4 статьи, из них 1 — в высокорейтинговом журнале.

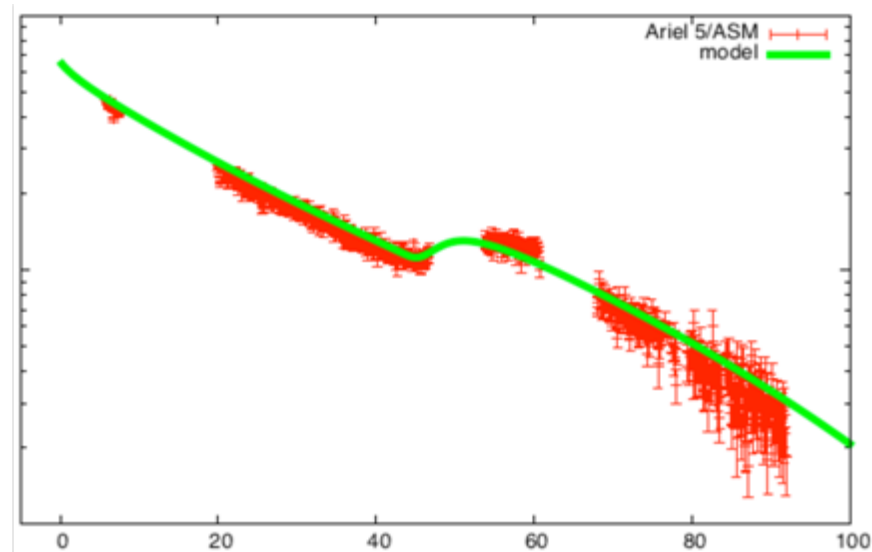
☞ Н. И. Шакура, П.К. Аболмасов:

С использованием данных по микролинзированию квазаров и АЯГ были рассчитаны параметры сверхэддингтоновской дисковой аккреции на сверхмассивные черные дыры. Было показано качественное согласие новых моделей сверхкритической дисковой аккреции с моделью Шакуры—Сюняева, рассчитанной ещё в начале 70-х годов.

Опубликовано 4 совместных статьи, из них 3 — в высокорейтинговых журналах

Н. И. Шакура, К. Л. Маланчев

- Построена численная модель нестационарной дисковой аккреции в рентгеновских Новых с учетом облучения внешних частей аккреционного диска и возникновения зон с неполной ионизацией водорода. Качественно объяснены рентгеновские и оптические кривые блеска типа FRED со вторичным пиком.



Н. И. Шакура, Г. В. Липунова, К. Л. Маланчев

План работы на 2015—2019 годы:

✧ **Г. В. Липунова:**

Аналитическое исследование решений нестационарной дисковой аккреции с граничными условиями на внутренней границе диска, соответствующими ситуации центральной звезды с сильным магнитным полем.

✧ **Г. В. Липунова, С. Б. Попов:**

Анализ физических условий в диске, образующемся вокруг одиночной нейтронной звезды, вблизи которой произошло приливное разрушение малого (планетного) тела.

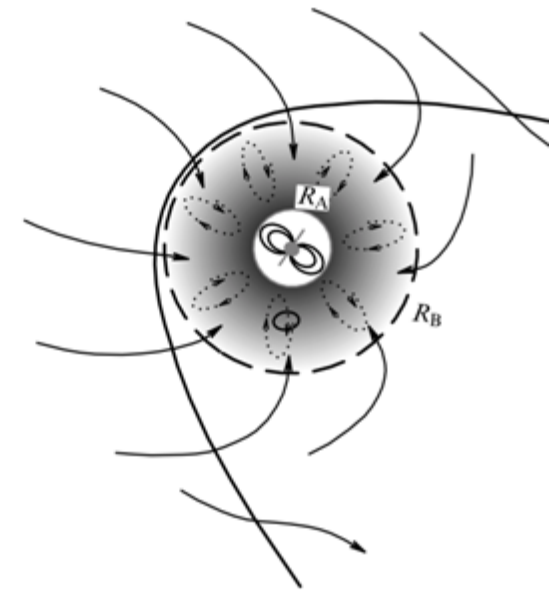
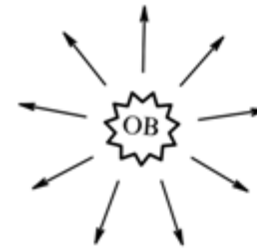
✧ **Н. И. Шакура, К. Л. Маланчев:**

Развитие численного моделирования нестационарной аккреции на компактные объекты в тесных двойных системах.



Н. И. Шакура, К. А. Постнов

- Н.И. Шакура, К.А. Постнов, А.Ю. Кочеткова, Л. Ялмарсдоттер:
Построена модель
квасисферической дозвуковой
аккреции на рентгеновские
пульсары в режиме медленного
оседания.
MNRAS, vol. 420, Issue 1, pp.
216—236, [65 ссылок с 2012 года](#)
УФН, том 183, №4, стр. 337—364,
2013



$$\dot{M}_S \simeq \dot{M}_B \left(\frac{t_{ff}}{t_{cool}} \right)^{1/3}$$

Н. И. Шакура опубликовал 25 работ,
из них 14 — в высокорейтинговых журналах
К. А. Постнов опубликовал 33 работы,
из них 20 — в высокорейтинговых журналах

*A new mechanism of turbulence
generation in accretion discs*

HEA-2014

Nikolai Shakura, Konstantin Postnov
Sternberg Astronomical Institute



α

Shakura-Sunyaev
alpha-discs
1972



- A long-standing problem: angular momentum transfer in Keplerian flows
- Angular momentum transfer \rightarrow gas heating \rightarrow huge energy release during accretion onto neutron stars and black holes

Viscous time:

$$t_{\text{visc}} \sim \frac{R^2}{\nu}, \quad \nu \sim ul$$

Laminar:

$$l \sim \frac{1}{n\sigma}, \quad u \sim u_{\text{thermal}}$$

Turbulent:

$$\nu_{\text{turb}} \sim l_{\text{turb}} u_{\text{turb}}$$

$$\nu_{\text{turb}} = \alpha c_s z_0$$

Hydrostatics:

$$c_s \sim \Omega z_0$$

Viscous stresses:

$$W_{r\phi}^t = \nu_t \rho r \frac{d\Omega}{dr} = \alpha c_s z_0 \rho r \frac{d\Omega}{dr} \Rightarrow W_{r\phi}^t = \alpha' \rho c_s^2$$

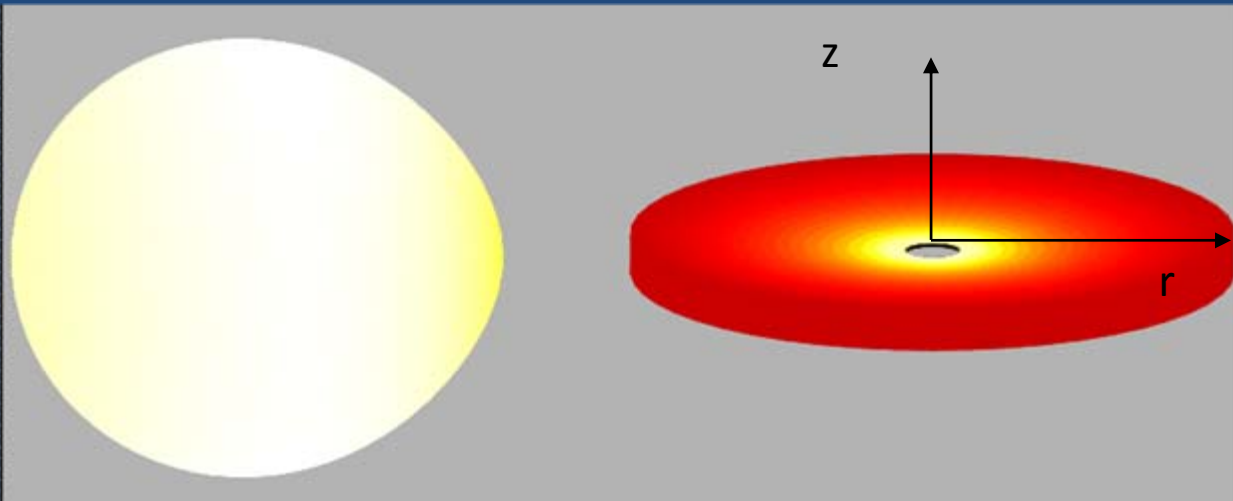
Viscosity problem

$$M = \frac{3}{2} \int \eta dz$$

$$\eta_{at} = \rho c_s l$$

$$\eta_t = \alpha \rho c_s z_0$$

- Accretion rate is determined by viscosity
- Atomic gas viscosity is tiny
- Viscosity strongly increases if turbulence is present



Turbulence is discs

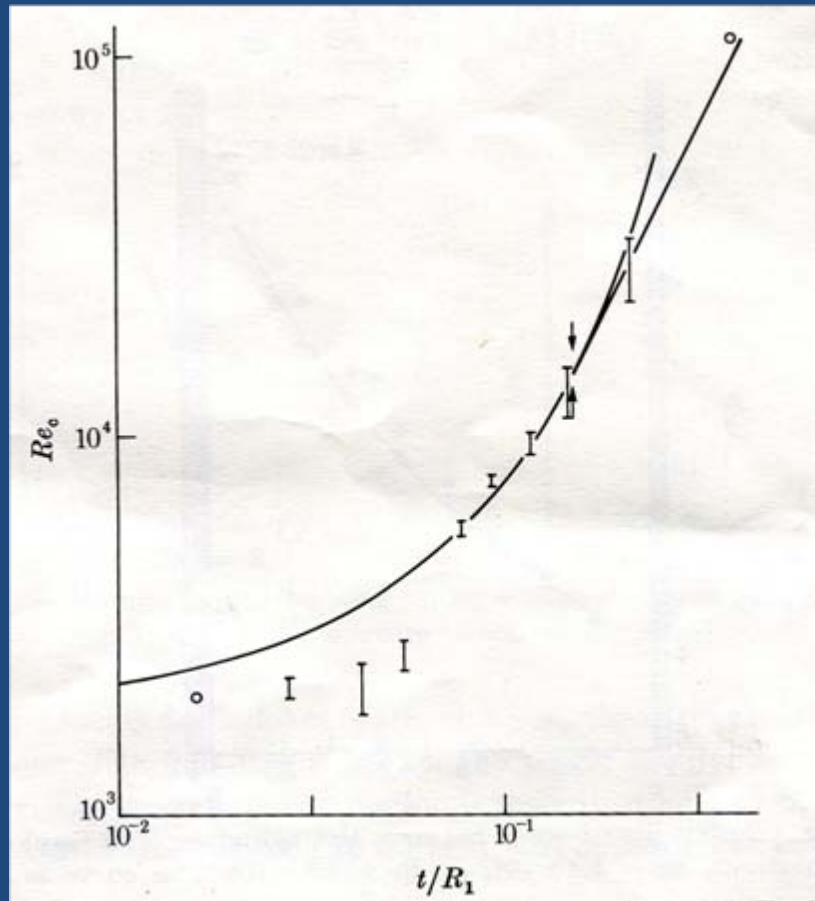
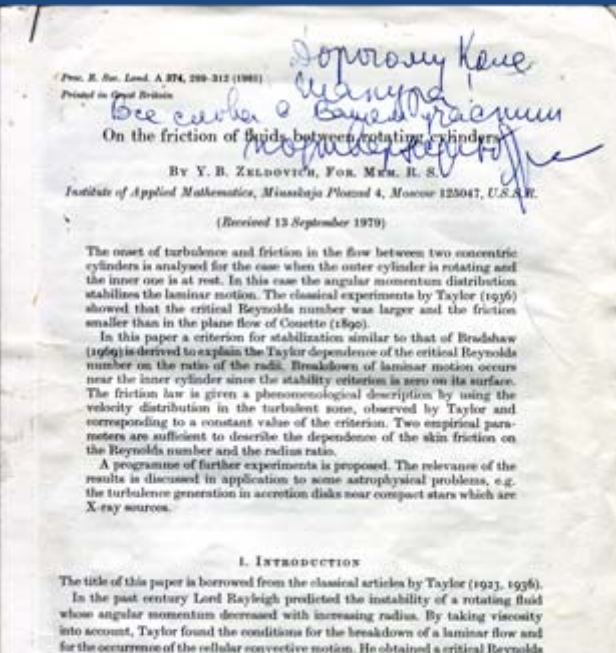
- A non-trivial problem, has not been solved as yet
- Keplerian motion is stable: angular momentum increase with radius; small perturbations are stabilized (Rayleigh criterion, 1916)

$$j_K = \Omega_K(r) \times r = \sqrt{GM/r}$$



Lord Rayleigh (John Strutt)
(1842-1919)

Laboratory experiments on turbulence generation in axisymmetric flows.
 Classical experiment: Taylor, G. I., 1936, Proc. R. Soc. Lond. A 157, p. 546



$$Ty = \frac{E_s}{E_t} = \frac{4d(\omega r^2)^2 / dr}{r^5 (d\omega / dr)^2}$$

$$E_s = \frac{m}{r^3} \frac{d(\omega r^2)^2}{dr} (\Delta r)^2$$

$$E_t = \frac{1}{4} m r^2 \left(\frac{d\omega}{dr} \right)^2 (\Delta r)^2$$

$$Ri = - \frac{gd \rho / dz}{\rho (du / dz)^2}$$

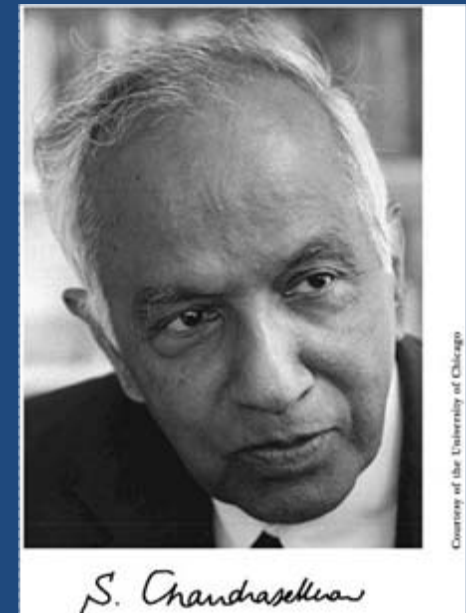
$$Ty_K = 16 / 9$$

In Keplerian discs:



MRI

- Balbus, Howley (1991) invoked magneto-rotational instability (MRI) to excite turbulence in accretion discs. Original mechanism was proposed by E. Velikhov (1959) and S. Chandrasekhar (1960)
- MRI takes place also in the case where angular momentum increases with radius, but angular velocity should decrease with radius. These conditions are satisfied in Keplerian discs
- MRI has its own restrictions (magnetic field cannot be very large, etc.)



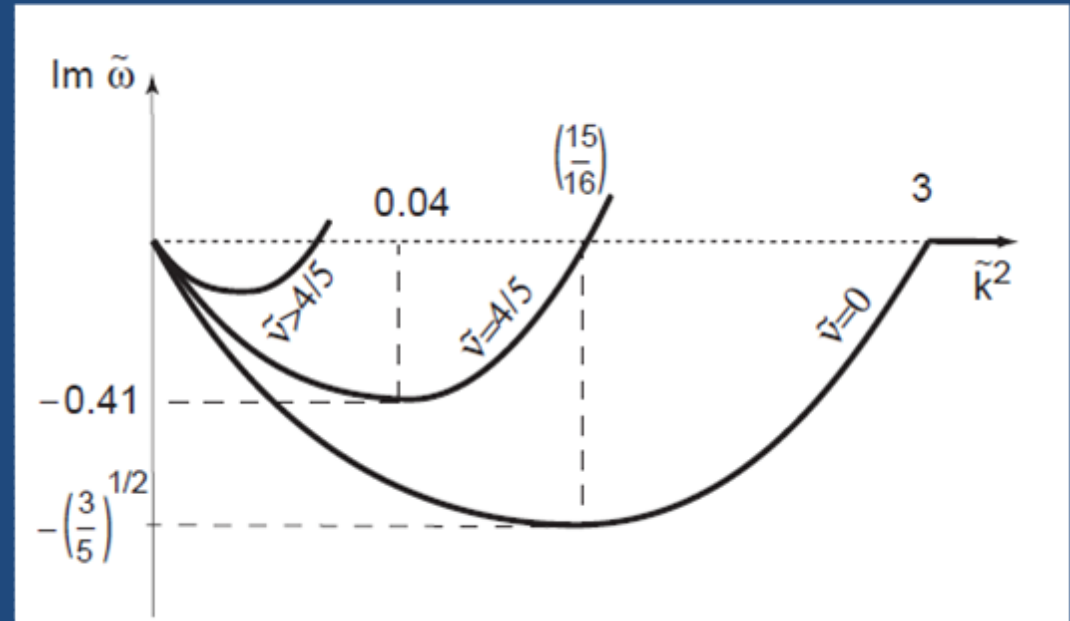
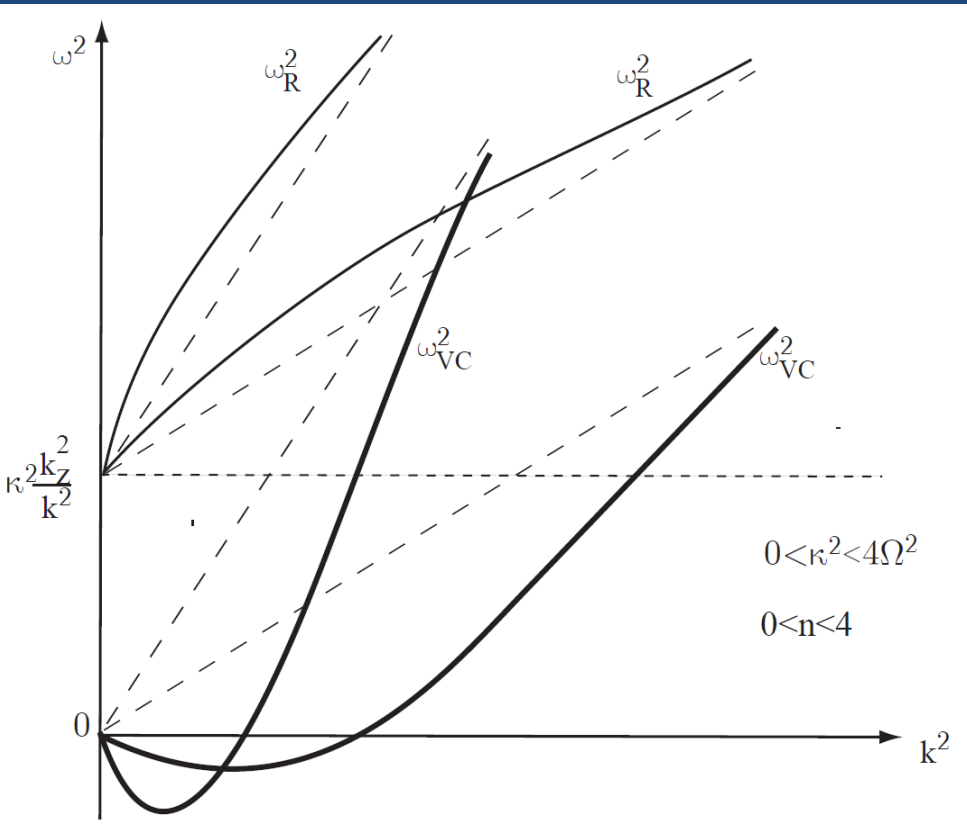
$$\Omega_K \sim 1/r^{3/2}$$

Viscosity decreases MRI efficiency

Linear perturbations

$$e^{i(\omega t - k_r r - k_z z)}$$

$$\tilde{v} \equiv v \frac{\Omega}{c_A^2}, \quad \tilde{k} \equiv \frac{c_A k}{\Omega}, \quad \tilde{\omega} \equiv \frac{\omega}{\Omega}$$



Case of ideal fluid for different magnetic fields

Viscous fluid for different viscosities

Shakura, Postnov, MNRAS 2014
In press (arXiv:1412.1223)

Can turbulence be excited without magnetic field?

- Yes.
- To see this, perform linear stability analysis of shearing hydrodynamic flow with arbitrary rotation law
- **Take into account viscous heating and heat conductivity in the energy equation**

$$\Omega^2 \sim r^{-n}$$

Basic equations

(i) mass conservation equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

(ii) Navier-Stokes equation including gravity force

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \cdot \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \phi_g + \nu \Delta \mathbf{u} \quad (2)$$

(here $\phi_g = -GM/r$ is the Newtonian gravitational potential of the central body with mass M),

(iii) energy equation

$$\frac{\rho \mathcal{R} T}{\mu} \left[\frac{\partial s}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \cdot s \right] = Q_{\text{visc}} - \nabla \cdot \mathbf{F}. \quad (3)$$

Equation of state

$$p = K e^{s/cv} \rho^\gamma$$

$$p = \rho \mathcal{R} T / \mu$$

Viscous heating:

$$Q_{\text{visc}} = \rho \nu \Phi$$

[erg/cm³/s]

Viscous dissipation function:

$$\begin{aligned} \Phi = & 2 \left[\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right) + \frac{u_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] \\ & + \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\phi}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} \right]^2 + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \phi} \right]^2 \\ & + \left[\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right]^2 - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 . \end{aligned}$$

Linearized equations

$$e^{i(\omega t - k_r r - k_z z)}$$

Bussinesq approximation:

$$k_r u_r + k_z u_z = 0$$

$$i\omega u_r - 2\Omega u_\phi = ik_r \frac{p_1}{\rho_0} - \frac{\rho_1}{\rho_0^2} \frac{\partial p_0}{\partial r} - \nu k^2 u_r ,$$

$$i\omega u_\phi + \frac{\kappa^2}{2\Omega} u_r = -\nu k^2 u_\phi ,$$

$$i\omega u_z = ik_z \frac{p_1}{\rho_0} - \frac{\rho_1}{\rho_0^2} \frac{\partial p_0}{\partial z} - \nu k^2 u_z$$

Energy equation

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{s_1}{c_V} + \gamma \frac{\rho_1}{\rho_0}$$

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{\rho_1}{\rho_0} + \frac{T_1}{T_0}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} \left(i\omega + \frac{\kappa k^2}{c_p \rho_0 \mathcal{R} / \mu} \right) = \frac{2ik_r v r (d\Omega / dr)}{c_p \mathcal{R} T_0 / \mu} u_\phi$$

Dispersion equation

$$(i\omega + \nu k^2)^2 + \left(\frac{k_z}{k}\right)^2 \kappa^2 \left[1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{ik_r}{(i\omega + \nu k^2 / \text{Pr}_e)} \left(A - \frac{k_r}{k_z} B \right) \right] = 0$$

Viscosity:

$$\nu = l c_s$$

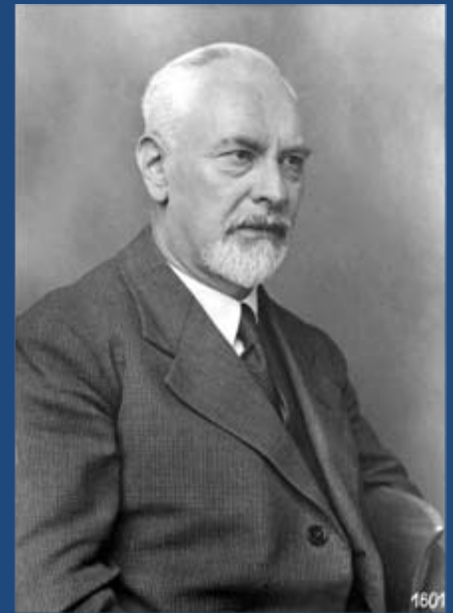
$$A \equiv \nu \frac{d \ln \Omega}{d \ln r} \frac{1}{p_0} \frac{\partial p_0}{\partial r}$$

$$B \equiv \nu \frac{d \ln \Omega}{d \ln r} \frac{1}{p_0} \frac{\partial p_0}{\partial z}$$



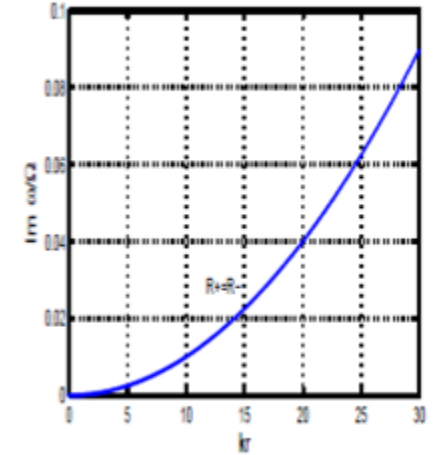
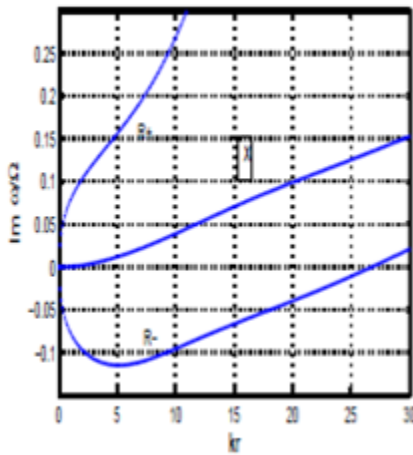
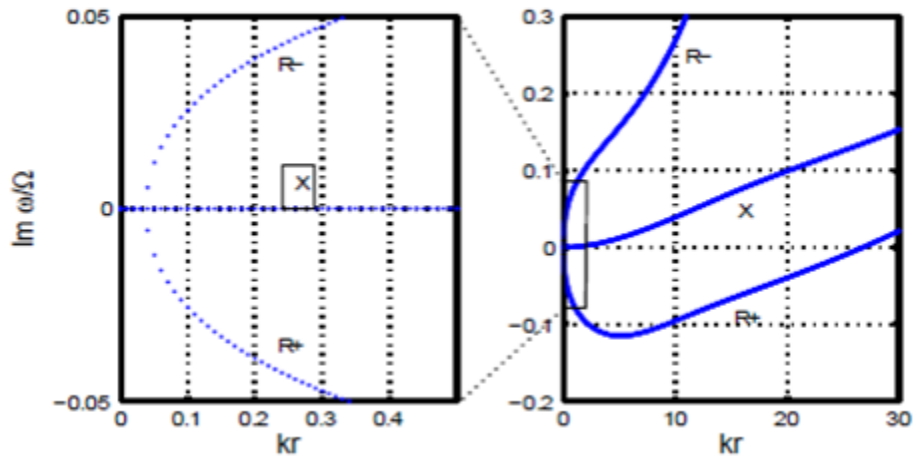
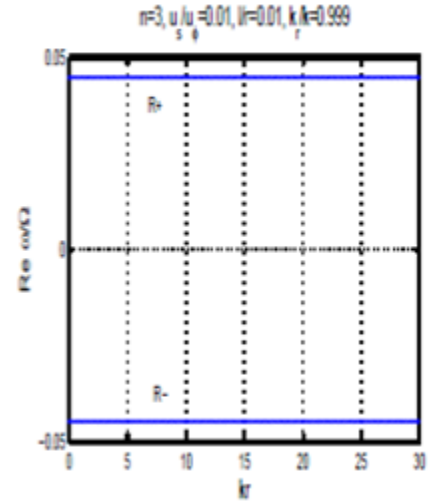
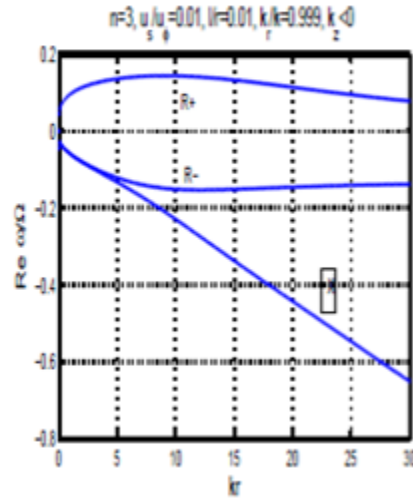
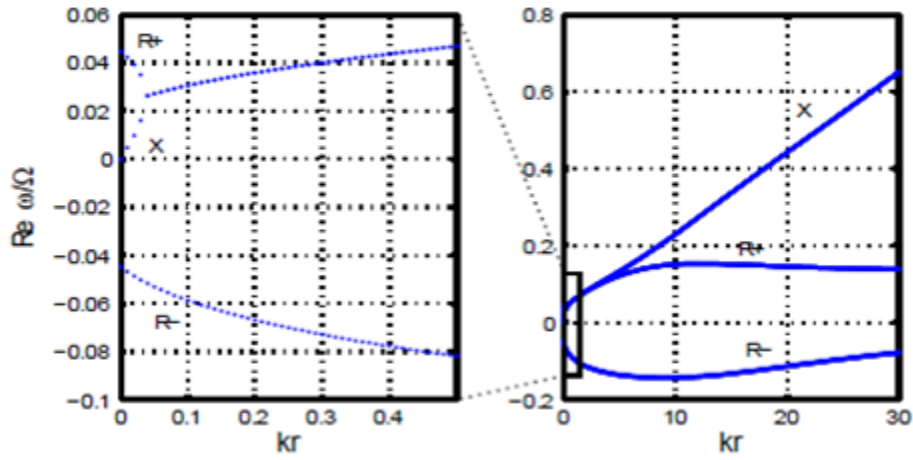
$$\text{Pr}_e \equiv \frac{\nu \rho_0 C_p}{\kappa} = \frac{\nu \rho_0 (\mathcal{R}/\mu) c_p}{\kappa} = \frac{\nu \rho_0 (\mathcal{R}/\mu)}{\kappa} \frac{\gamma}{\gamma - 1}$$

$$\text{Pr}_e = 0.049 \quad (\text{Spitzer, 1961})$$



Solutions of dispersion equation

$n=3, Pr_e=0.052, u_s/u_\phi=0.01, l/r=0.01, k_r/k=0.999$



Cf. $A=B=0$, R+ and R- modes are stable when $\kappa^2 > 0$ (Rayleigh criterion)

$$(i\omega + \nu k^2)^2 = \left(\frac{k_z}{k}\right)^2 \kappa^2$$

$$\kappa^2 = \frac{1}{r^3} \frac{d\Omega^2 r^4}{dr}$$

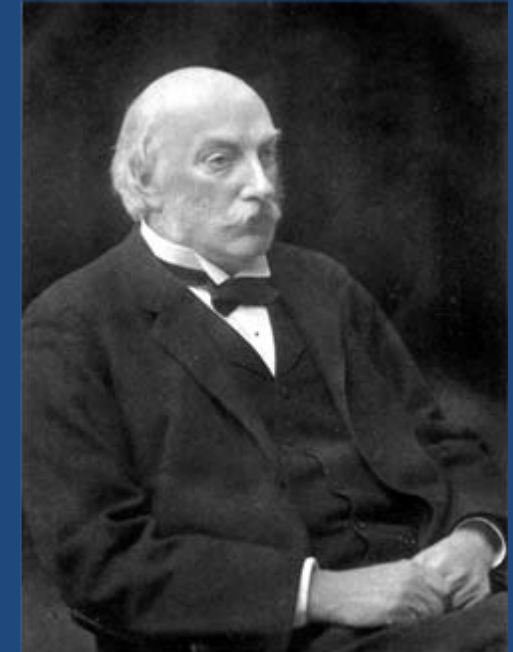
- epicyclic frequency

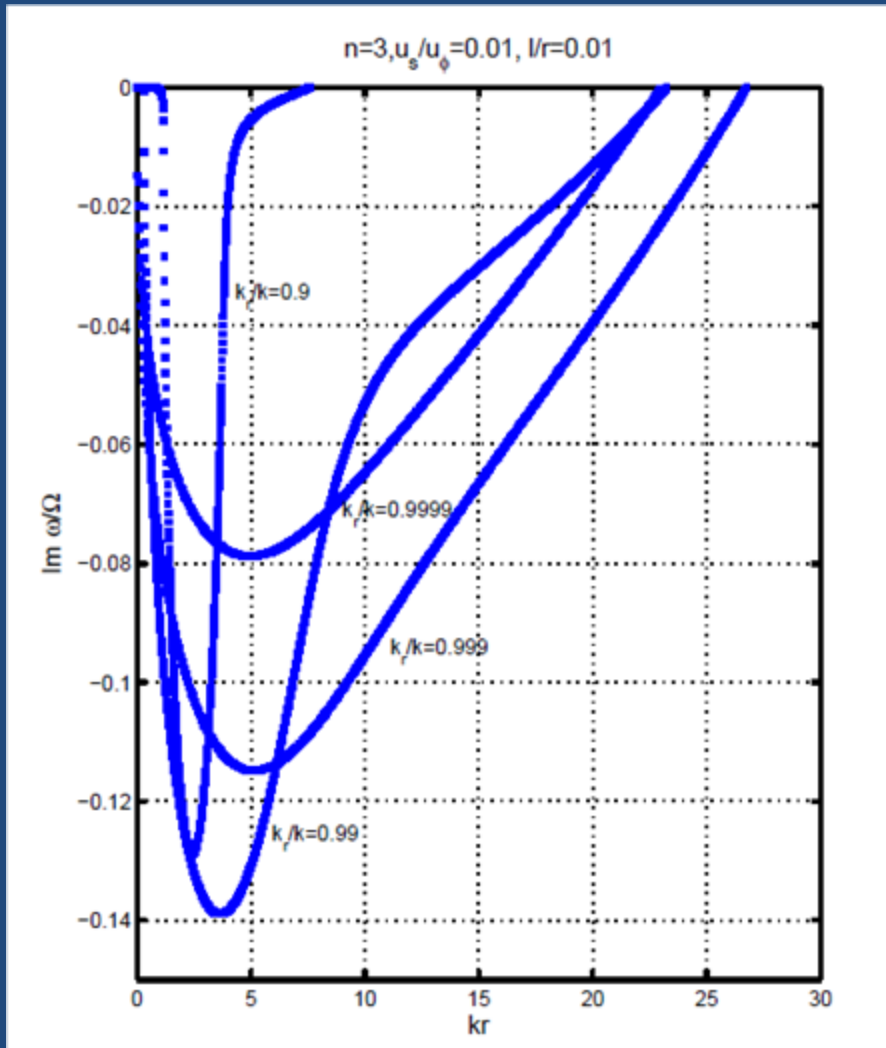
$$\omega = i\nu k^2 \pm \frac{k_z}{k} |\kappa|, \quad \kappa^2 > 0$$

Exponentially decaying oscillations

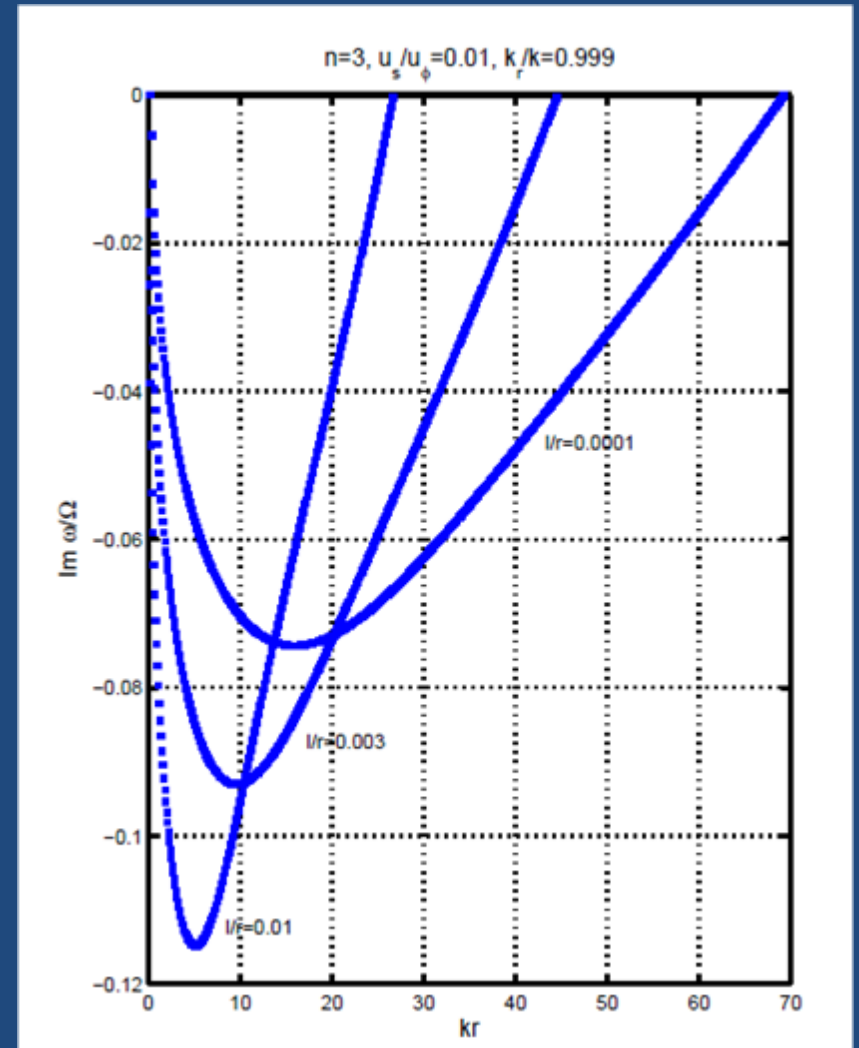
$$\omega = i\nu k^2 \pm i \frac{k_z}{k} |\kappa|, \quad \kappa^2 < 0$$

Exponentially growing mode





Different k_r/k



Different l/r (viscosity)

Account for radiation heat conductivity

$$\frac{1}{\text{Pr}} \equiv \frac{1}{\text{Pr}_\gamma} + \frac{1}{\text{Pr}_e} = \frac{1}{\text{Pr}_e} \left(1 + \frac{\text{Pr}_e}{\text{Pr}_\gamma} \right) = \frac{1}{\text{Pr}_e} \left(1 + \frac{q_\gamma}{q_e} \right)$$

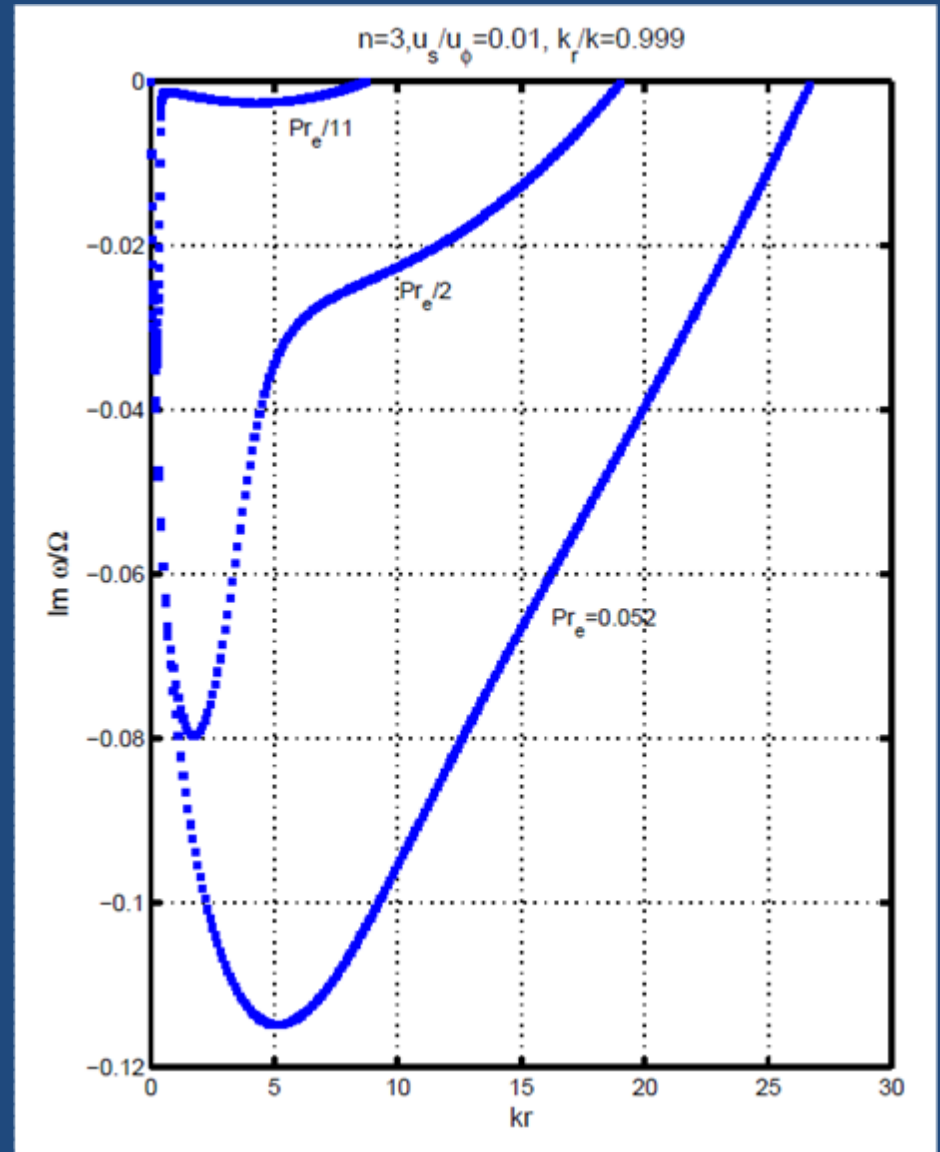
$$q_e = -\frac{1}{3} u_s l_e n_e \nabla(k_B T)$$

$$q_\gamma = -\frac{1}{3} c l_\gamma \nabla(a_r T^4)$$

$$\frac{q_\gamma}{q_e} \simeq \beta \frac{c}{u_s} \frac{z_0}{\tau} \sigma_{ei} n_e$$

$$\beta = P_{\text{rad}} / P_{\text{gas}}$$

τ -- optical depth

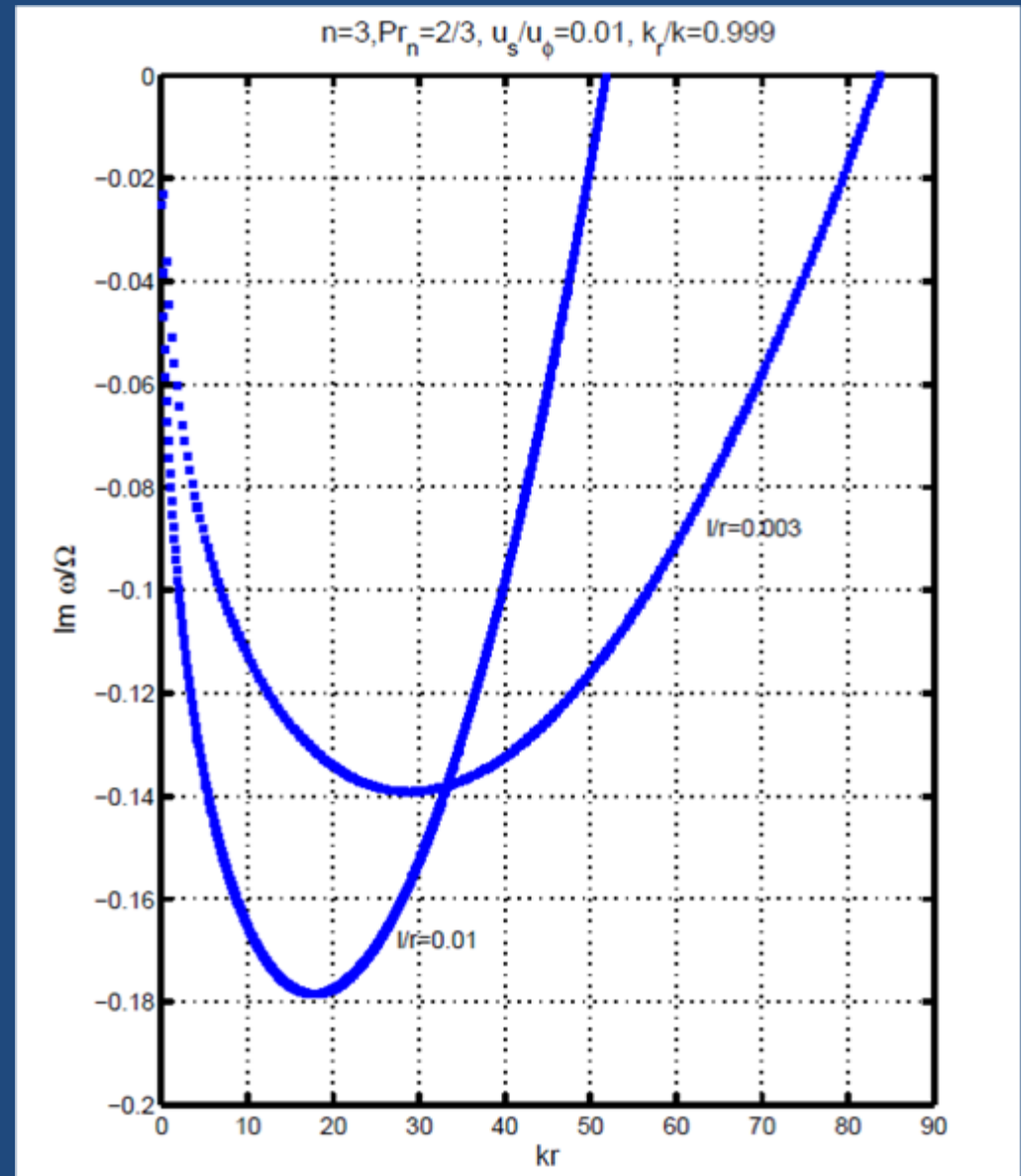


Neutral gas

- No MRI

$$\text{Pr}_n \approx 2/3$$

Hirschfelder, Curtiss, Bird
Molecular Theory of Gases and
Liquids, J.Wiley & sons, 1954



Conclusions

- A new viscous instability in shearing axisymmetric hydrodynamic laminar flows is studied
- Thin Keplerian disc with radially increasing angular momentum becomes unstable
- Instability increment varies from ~ 0.1 to ~ 0.15 Keplerian frequencies
- The instability increment increases with viscosity
- The instability can excite turbulence in accretion discs without magnetic fields

Гранты, полученные сотрудниками отдела (2010—2015)

РФФИ:

- 5 грантов, рук. Н. И. Шакура
- 2 гранта, рук. К. А. Постнов
- 2 гранта, рук. М. В. Сажин

РНФ:

- 1 грант, рук. Шакура

Гранты фонда «Династия»:

- 1 грант, рук. С. Б. Попов
- 1 грант, рук. С. О. Алексеев

Президентский грант для молодых ученых:

- 1 грант, рук. В. В. Журавлев

ФНЦП:

- 3 гранта, рук. – Н. И. Шакура, М. В. Сажин, М. Е. Прохоров

