

Транзиентный рост крупномасштабных вихрей в релятивистских областях аккреционных дисков

Д.Н. Раздобурдин, В.В. Журавлёв

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

Аннотация

Одной из нерешённых проблем теории аккреционных дисков является вопрос о возможности перехода однородного сдвигового течения в турбулентное состояние в отсутствие каких-либо спектральных неустойчивостей, в том числе и магниторотационной. Такая возможность могла бы стать альтернативой общепринятой картине сверхкритической турбулентности, порождаемой, например, присутствием магнитного поля в веществе диска. Для случая субкритической турбулентности гидродинамические исследования предлагают сценарий, называемый обходным (bypass), который приводит к турбулизации сдвигового течения за счёт отбора энергии у него транзитно растущими линейными возмущениями (более того, как показывают недавние работы, даже в присутствии магниторотационной неустойчивости транзитные возмущения способны расти быстрее неустойчивых мод). Несмотря на то, что численным моделированием до сих пор не удалось обнаружить переход к турбулентности вплоть до значений числа Рейнольдса порядка $10^6 - 10^7$, вопрос не может считаться окончательно закрытым, поскольку в реальных астрофизических дисках число Рейнольдса может достигать 10^{10} и выше. В нашей работе было обнаружено, что на величину транзитного роста оказывают существенное влияние релятивистские поправки к кеплеровскому профилю угловой скорости. Причём это влияние особенно заметно для крупномасштабных вихрей, азимутальная длина волны которых превышает толщину диска. Мы полагаем, что обнаруженный нами эффект усиления транзитного роста крупномасштабных вихрей с учётом релятивистских поправок позволит смягчить требования к значению критического числа Рейнольдса во внутренних областях аккреционных дисков вокруг черных дыр. Мы также считаем, что следствием этого может являться радиальное падение коэффициента турбулентной вязкости в диске.

Природа транзитного роста

Явление транзитного роста линейных возмущений напрямую связано с дифференциальным вращением газового потока. Даже если подобный поток является спектрально устойчивым, в нём могут существовать возмущения, демонстрирующие рост амплитуды на конечных временах.

В начальный момент времени возмущение способное к транзитному усилению представляет собой лидирующую спираль. С течением времени из-за радиального градиента угловой скорости в потоке спираль раскручивается, что сопровождается ростом амплитуды. Рост амплитуды при раскрутке спирали объясняется наличием интеграла движения в пространственно локальном пределе: *потенциальной завихрённости* (аналога завихрённости для сжимаемой жидкости). Подробнее см. в обзоре «Транзитная динамика возмущений в астрофизических дисках», УФН, 185 1129–1161 (2015).

В невязком случае фактор транзитного усиления акустической энергии возмущения может быть неограниченно большим. Учёт конечной вязкости приводит к подавлению роста возмущений со временем усиления большим, чем характерное вязкое время. Как следствие, становится возможным расчёт максимально возможного фактора усиления акустической энергии возмущений G_{max} при данном числе Рейнольдса Re , азимутальном волновом числе m и характерной полутолщине диска δ . Оказалось, что наиболее эффективно усиливаются линейные возмущения с азимутальной длиной волны порядка толщины диска. При этом положение максимума $G_{max}(k_y)$ лишь слабо зависит от значения волнового числа m .

Подробнее о методе вычисления фактора усиления см. статью «A study of the transient dynamics of perturbations in Keplerian discs using a variational approach», MNRAS, 442 Issue 1 870–890 (2014).

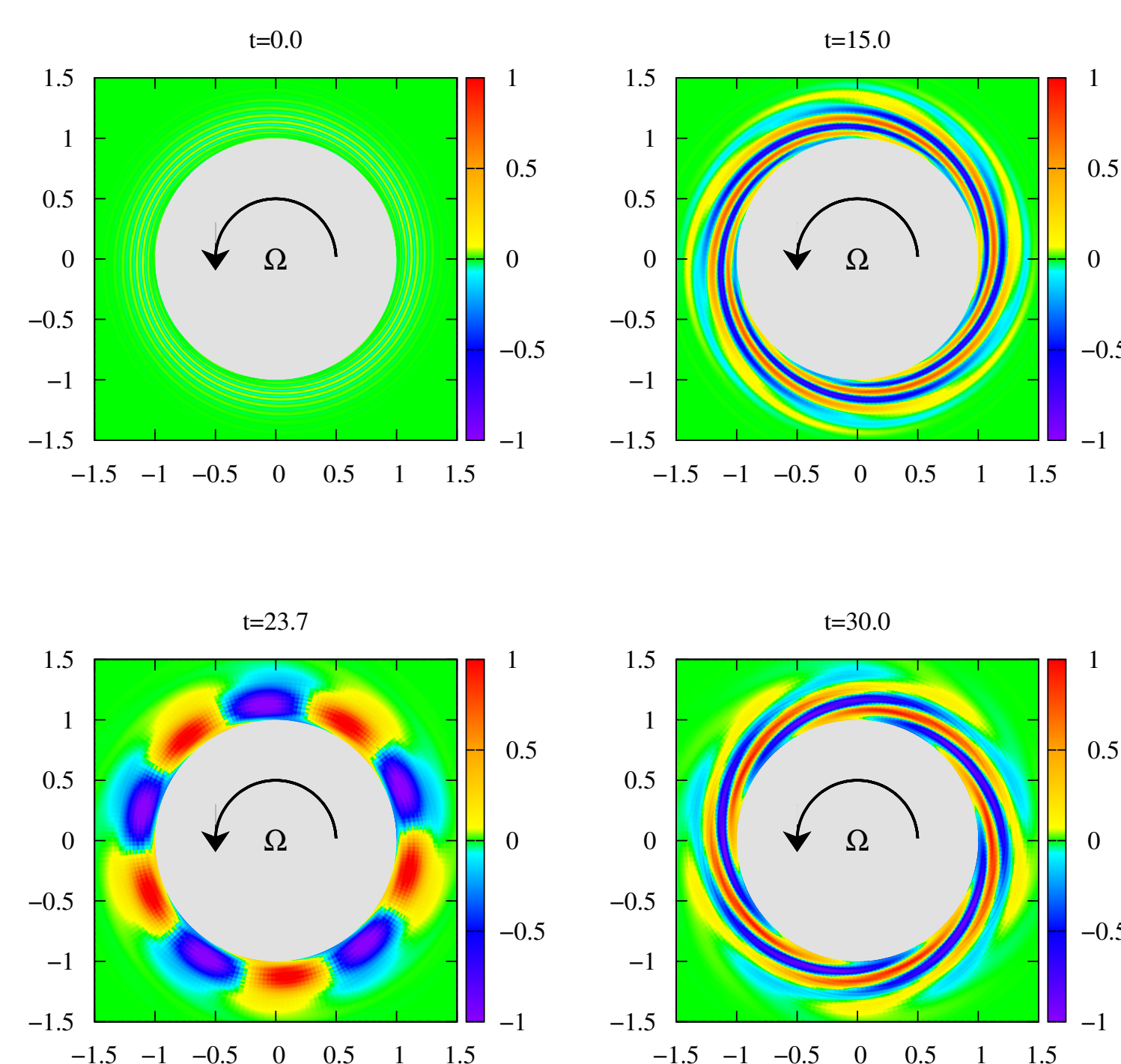


Fig. 1: Раскрутка лидирующей спирали дифференциальным вращением потока.

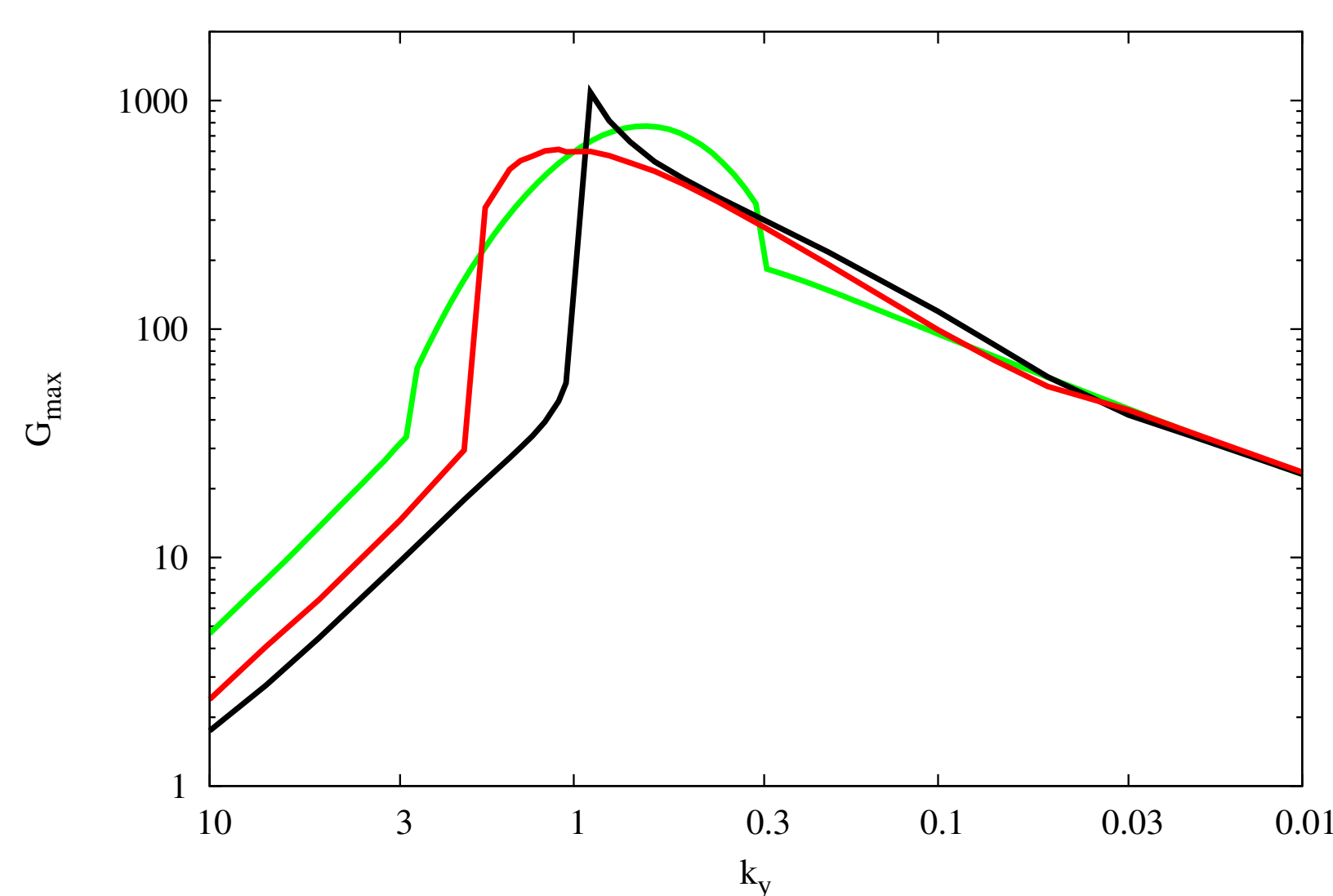


Fig. 2: Максимальный фактор роста энергии линейного возмущения в кеплеровском потоке при $Re = 2000$ в зависимости от азимутального волнового числа, выраженного в единицах толщины диска $k_y \sim m\delta$. Чёрная кривая соответствует $m = 1$, красная – $m = 2$, зелёная – локальному пределу (формально $m = \infty$).

Релятивистские поправки

Аналитические вычисления, проведённые в локальном приближении, показали, что максимальный фактор транзитного усиления линейных возмущений обратно пропорционален четвёртой степени эпициклической частоты $G \sim \kappa^{-4}$. Таким образом транзитный рост возмущений может играть важную роль во внутренних областях аккреционных дисков вблизи компактных объектов, где из-за эффектов ОТО $\kappa \rightarrow 0$. В нашей работе для учёта релятивистских поправок использовалось квазиклассическое приближение Пачинского-Витта. Как показано на рисунке ниже, в релятивистских областях величина транзитного роста возрастает более чем на порядок.

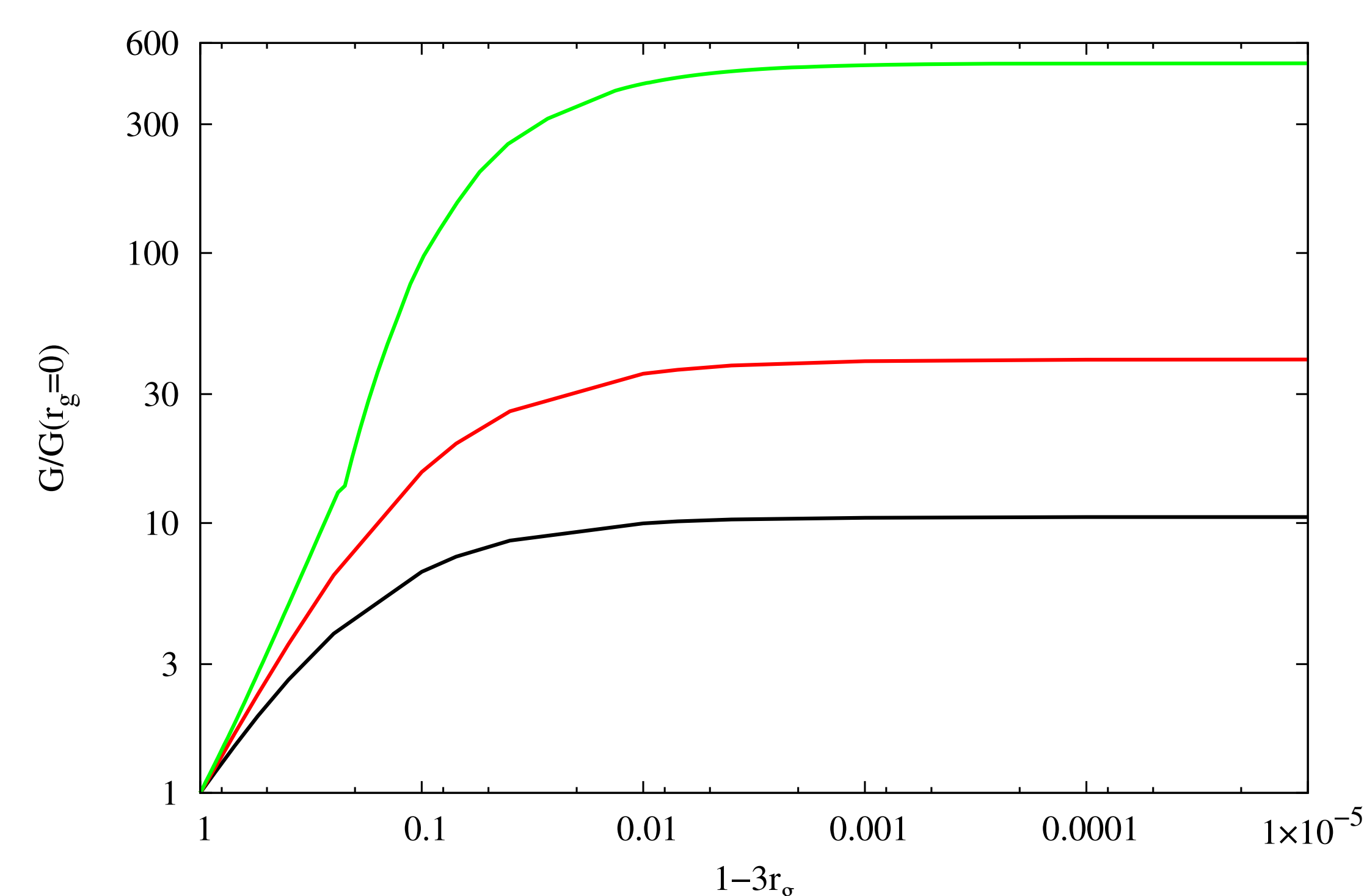


Fig. 3: Увеличение фактора усиления линейных возмущений для $Re = 2000$, $k_y = 0.1$ к моменту времени $T = 5T_{kep}$ при учёте релятивистских поправок в зависимости от гравитационного радиуса тяготеющего центра $r_g = \frac{2GM}{c^2}$, выраженного в единицах внутреннего радиуса диска.

Поскольку в реальном релятивистском диске эпициклическая частота возрастает на периферии, величина транзитного роста, напротив, падает с удалением от внутреннего радиуса, что может приводить к уменьшению коэффициента эффективной вязкости к периферии диска.

Влияние на турбулизацию потока

Многие исследованные в лаборатории потоки переходят в турбулентное состояние именно благодаря существованию в них линейных возмущений, способных к значительному транзитному росту (т.н. обходной сценарий перехода к турбулентности). Несмотря на это, работу данного сценария в астрофизических дисках обнаружить в симуляциях пока не удалось. Отрицательный результат может быть связан как с недостаточным численным разрешением, и, как следствие, малым эффективным числом Рейнольдса, так и с некоторыми особенностями проведения симуляций.

На рисунке справа показаны область параметров, в которой обходной сценарий можно исключить на основании данных по турбулизации циклонических потоков (красная заливка) и область к настоящему времени, охваченная симуляциями (зелёная заливка). Также показаны величины транзитного роста, полученного в локальном пределе для $Re = 2000$ (отметим, что в существующих симуляциях достигнуто значительно большее значение эффективного числа Рейнольдса) и разных значений параметра $q = 1/2 + r/(r - r_g)$. Значение $q = 1.5$ соответствует кеплеровскому потоку: $r_g = 0$, а $q = 2$ – изомоментному на внутреннем краю диска потоку $r_g = 1/3$, $r = 1$. Из рисунка видно, что область, в которой транзитный рост линейных возмущений наиболее эффективен, пока не охвачена численным моделированием, а значит, исключать возможность турбулизации потока благодаря обходному сценарию нельзя.

