



О численных и физических неустойчивостях,
возникающих в гидродинамических расчётах
радиативно охлаждающихся ударных волн

Д.А. Бадьин,¹ С.И. Глазырин,^{1,2,3} К.В. Мануковский,²
С.И. Блинников^{1,2,4}

¹ ФГУП ВНИИА, ² ИТЭФ, ³ НИЯУ МИФИ, ⁴ Kavli IPMU

Предмет исследования

Остаток сверхновой на момент перехода от адиабатического охлаждения в режим объёмных лучистых потерь $t_{\text{rad}} \ll t_{\text{ad}}$.

$$\partial_t(\rho e) + \partial_i(\rho v_i e) + p \partial_i v_i = \boxed{-\Lambda(T) n_e n_H} \quad (1)$$

$\Lambda(T)$ – нелинейная функция радиативного охлаждения.

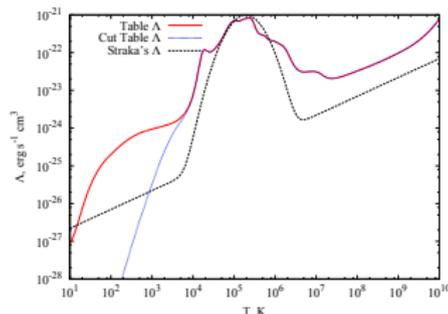
Тепловая неустойчивость: $\dot{e}_{\text{loss}} \sim \Lambda(T) \rho^2$

$T \downarrow, \Lambda(T) \uparrow \Rightarrow$

$\dot{e}_{\text{loss}} \uparrow, \gamma_{\text{eff}} \downarrow, \rho \uparrow \Rightarrow \dot{e}_{\text{loss}}, \rho \uparrow \uparrow \dots$

Схлопывание в холодный плотный слой,

T – из условия $t_{\text{rad}} \gtrsim t_{\text{ad}}, \sim \text{изотерм.}$



Предмет исследования

Одномерие: сжатие до 10^4 , интенсивное высвечивание кин. энергии
?? Устойчивость в многомерии? Ограничение на сжатие и диссипацию.

Методы:

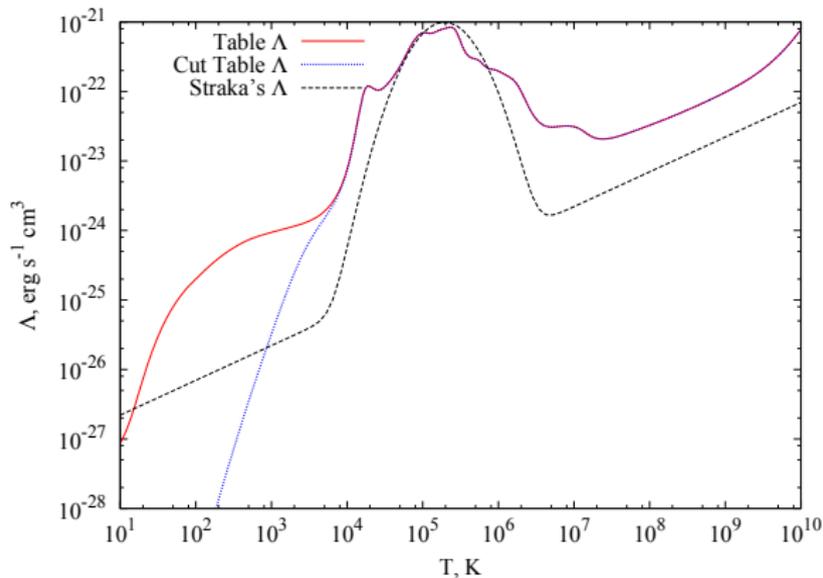
- ▶ 3 методики:
FRONT3D (MUSCLE+HLLC), FLASH (PPM + TwoShock/HLLC+ AMR),
PLUTO (TS/HLL + RK3)
- ▶ чистая гидродинамика (без магнитных полей)
- ▶ Одно- и многомерные задачи на различных масштабах (5-50 пк)
- ▶ Изгибы и фрагментация за счёт физических и численных неустойчивостей, что м.б. важно для многомерной Рад.ГД или течений с реакциями

Статья: D.A. Badjin, S.I. Glazyrin, K.V. Manukovskiy, S.I. Blinnikov,
MNRAS, 2016, **459**, 2188-2211



Функции охлаждения: $\dot{E} = -n_{\text{H}}^2 \Lambda$

- ▶ Аналитическая, чистый H (Straka, 1974)
 $\Lambda_S = A\sqrt{T} + B \cdot 10^{-2}(\log(T/T_0))^2$,
- ▶ Табличная (атомный код CLOUDY) Λ_T .
- ▶ Λ_{CT} , т.е. Λ_T , подавленная в области $T < 3000$ К для имитации рекомбинации: $n_{\text{H}}^2 \Lambda_{CT} \equiv n_e n_{\text{H}} \Lambda_T$

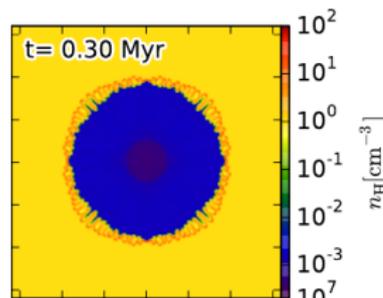


Прочие параметры ...

Mod. name	Grid ^a	R_{\max}^b pc	R_0^c pc	E_0^d foe or foe pc ⁻¹	ρ_0^e m_p cm ⁻³	γ	Λ	Code
E1S-S400	1D spherical 400	50	2	1.28	1	5/3	Straka	FRONT3D
E1T-S1600	1D spherical 1600	100	2	1.28	1	5/3	Table	FRONT3D
E1S-RZ1600	RZ 1600 ²	50	2	1.28	1	5/3	Straka	FRONT3D
E1T-RZ9	RZ 512 ²	50	2	1.28	1	5/3	Table	FRONT3D
E2T-XY9	XY 512 ²	80	2	0.48L	1	5/3	Table	FRONT3D
E3T-C18	1D cylindrical 2 ¹⁸	50	2	0.087L	1	5/3	Table	FRONT3D
E3TC-C18	1D cylindrical 2 ¹⁸	50	2	0.087L	1	5/3	Cut Table	FRONT3D
E3T-C19A	1D cylindrical A2 ¹⁹	50	2	0.087L	1	5/3	Table	FLASH4.2
E3TC-C19A	1D cylindrical A2 ¹⁹	50	2	0.087L	1	5/3	Table	FLASH4.2
E3TC-C19AP ^f	1D cylindrical A2 ¹⁹	50	0.002	0.087L	1	5/3	Table	FLASH4.2
E3S-XY9	XY 512 ²	80	2	0.087L	1	5/3	Straka	FRONT3D
E3T-XY9	XY 512 ²	80	2	0.087L	1	5/3	Table	FRONT3D
E3TC-XY11	XY 2048 ²	50	2	0.087L	1	5/3	Cut Table	FRONT3D
E3T-Rph8	$R\varphi$ 256 _R × 128 _φ	80	2	0.087L	1	5/3	Table	FRONT3D
E4S-XY8	XY 256 ²	10	0.0137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Straka	PLUTO4.1
E4F-XY8	XY 256 ²	10	0.0137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Free-free	PLUTO4.1
E4T-XY10	XY 1024 ²	5	0.0137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Table	FRONT3D
E4S-XY9A	XY A512 ²	5	0.137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Straka	FLASH4.2
E4T-XY9A	XY A512 ²	5	0.137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Table	FLASH4.2
E4T-XY12A	XY A4096 ²	3	0.137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Table	FLASH4.2
E4T-C12	1D cylindrical 2 ¹²	5	0.0137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Table	FRONT3D
E4S-Rph8A	$R\varphi$ A256 _R × 256 _φ	5	0.137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Straka	FLASH4.2
E4T-Rph8A	$R\varphi$ A256 _R × 256 _φ	5	0.137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Table	FLASH4.2
E4T-Rph12AD ^g	$R\varphi$ A2 ¹² _R × 2 ¹² _φ	3	0.137	3 × 10 ⁻⁵ L	1	5/3	Table	FLASH4.2
E5T-XY9A	XY A512 ²	3	0.137	5 × 10 ⁻⁵ L	10	1.4	Table	FLASH4.2
E5T-Rph8A	$R\varphi$ A256 _R × 256 _φ	3	0.137	5 × 10 ⁻⁵ L	10	1.4	Table	FLASH4.2
E6F-XY9	XY 512 ²	50	0.684	1.3 × 10 ⁻³ L	1	5/3	Free-free	PLUTO4.1

Иллюстрация ...

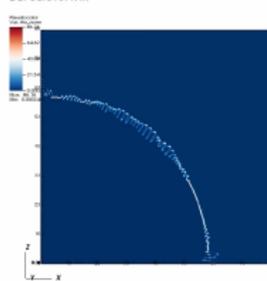
- Kim & Ostriker (2015)
3D, грубые XYZ сетки (256^3)



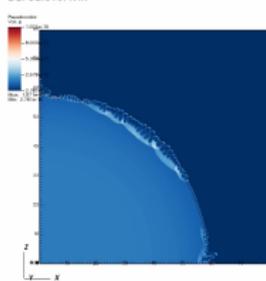
Наши расчёты:

- RZ -осевая симметрия, 1.28 foe^1 , 50 пк, $1 m_p \text{ см}^{-3}$, табличная Λ
- XY -плоская симметрия, $3 \times 10^{-5} \text{ foe/пк}$, 5 пк, $1 m_p \text{ см}^{-3}$,
аналитическая Λ (Страка, 1974)

DB: out0187.vtk



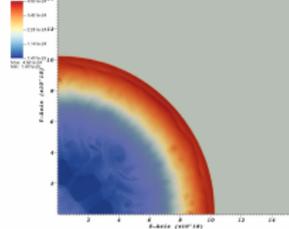
DB: out0187.vtk



DB: sedevCooling_hdf5_chk_0002

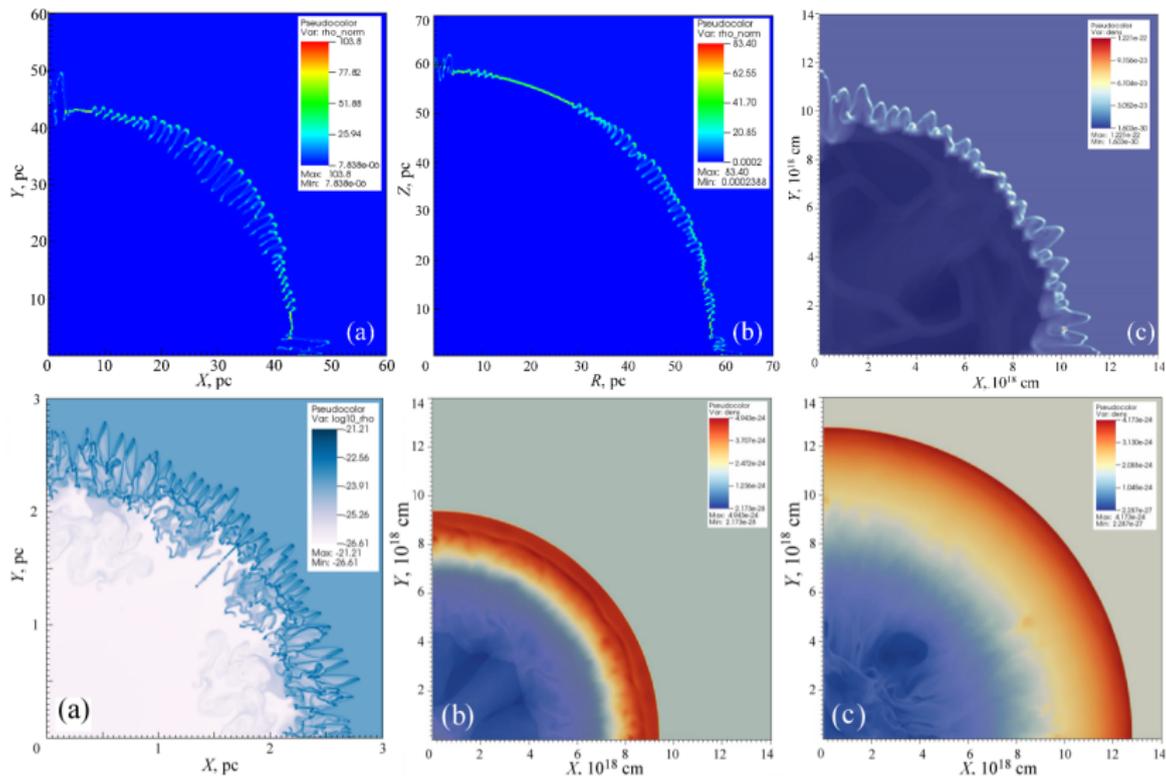
Cycle: 907

Time: 1.983056e+12



¹ 1 foe = 10^{51} эрг

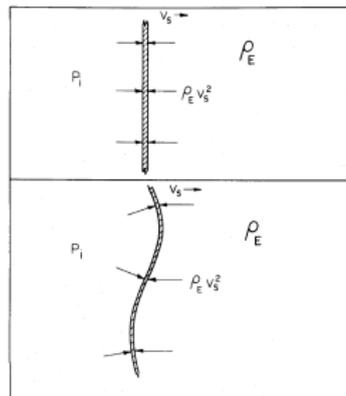
Распад в двумерии



Известные эффекты: неустойчивости Вишняка?

1. Сверхустойчивость (линейная) тонкого слоя, движимого давлением
(*Pressure Driven Thin Shell Overstability* – Vishniac (1983), Vishniac & Ryu (1989))

- ▶ ‘Движимый давлением’? – **Не всегда:**
М.б. и инерционный разлёт
- ▶ ‘Сверхустойчивость’? – **Нет:**
Постоянный рост до насыщения
- ▶ ‘Линейность’? – **Нет:**
Толщина слоя и масштаб шумовых возмущений одного порядка



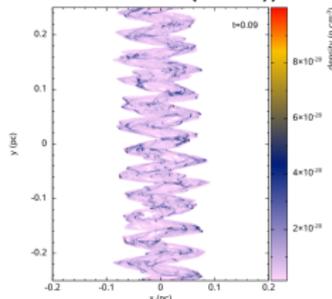
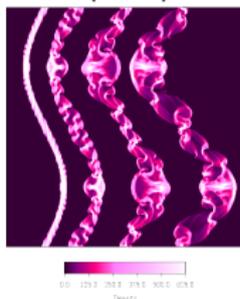
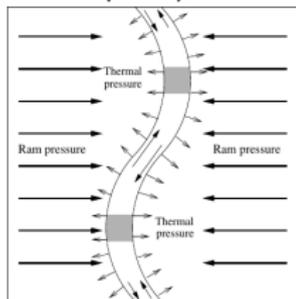
Известные эффекты: неустойчивости Вишняка?

2. Нелинейные неустойчивости тонкого слоя (ННТС)

между двумя УВ при столкновениях потоков

(*Non-linear Thin Shell Instability, Non-linear Deceleration Instability* –

Vishniac (1994), Blondin & Marks (1996), McLeod & Whitworth (2013))



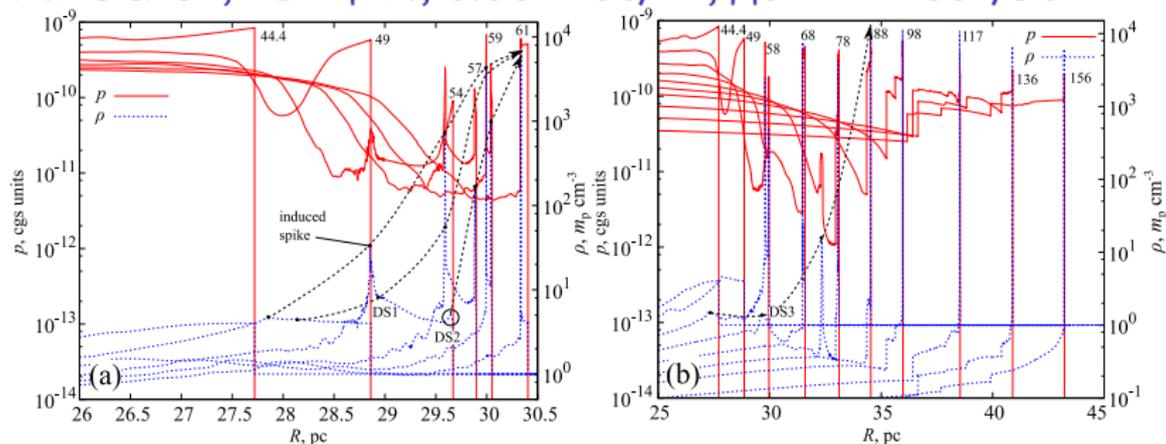
Особенности нашей задачи:

Асимметрия потоков; Не всегда разрешается обратная УВ; Изгибы поверхностей нескоррелированы; Рэлей-тейлоровские 'грибы' ...

Очевидно также **Нет**.

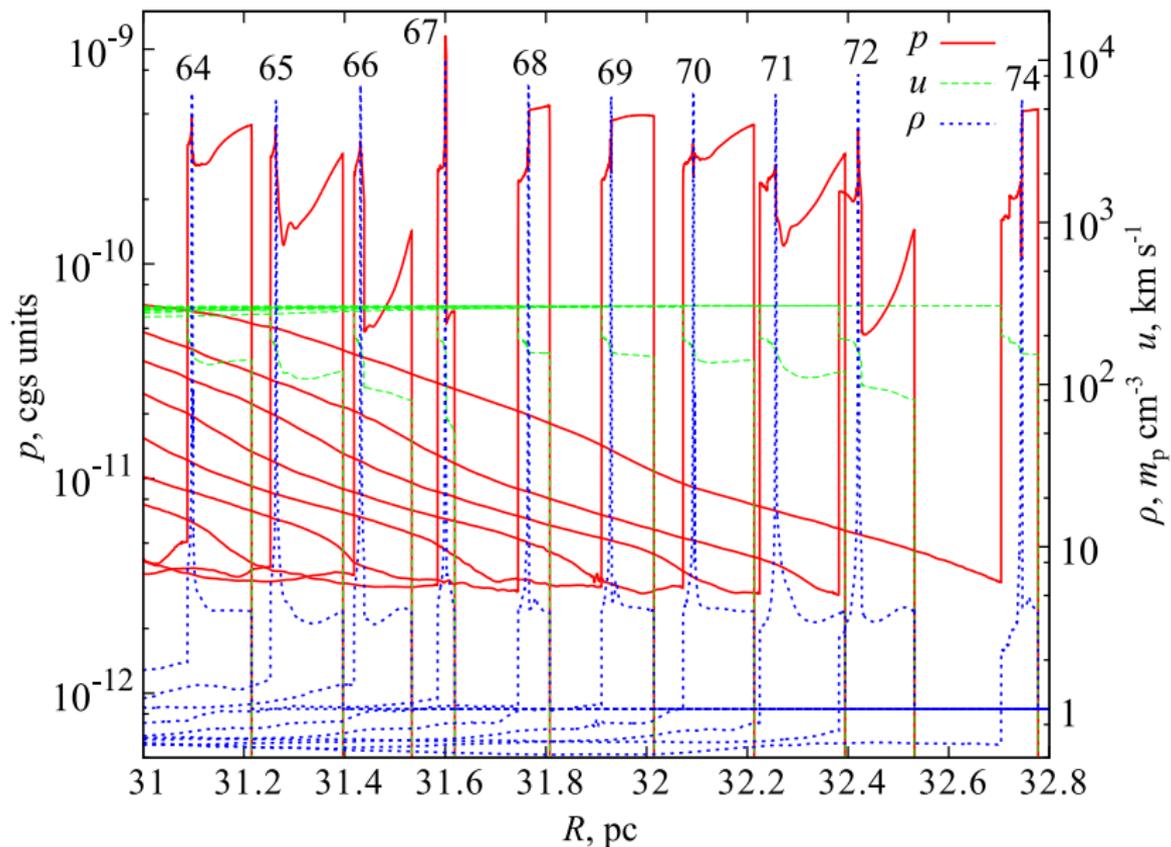
Вопрос: физичен ли эффект или это численный артефакт наподобие неустойчивостей 'карбункул', 'odd-even' и т.п.?

Коллапс слоя, 1D-Цил., 0.087 фое/пк, до 2^{19} ячеек/50 пак



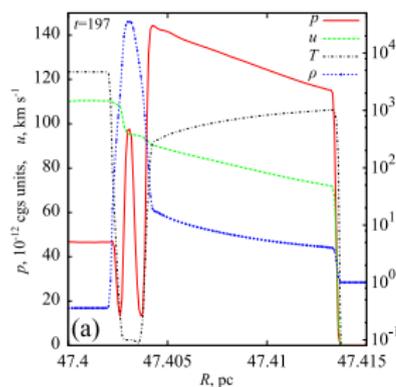
- ▶ Резкий провал в давлении – распад течения на фракции
- ▶ Фракции сталкиваются – транзитное ускорение
- ▶ Восстановление динамического баланса
- ▶ Физическая неустойчивость: катастрофическое охлаждение
- ▶ ! численный эффект: распад на несколько ‘под-оболочек’ вызванный шумами адаптации, ‘эхо’-артефакты начального состояния ▶

Восстановление баланса – пульсации

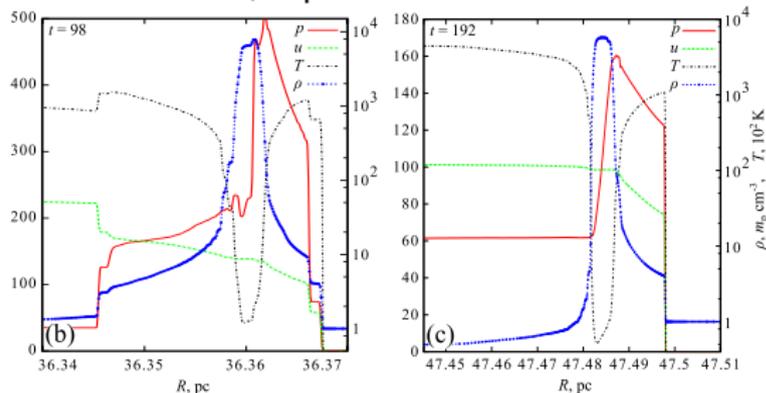


Квазистационарная структура

неограниченная Λ_T
схемная вязкость



подавленная Λ_{ST}
стабилизация реальным nkT

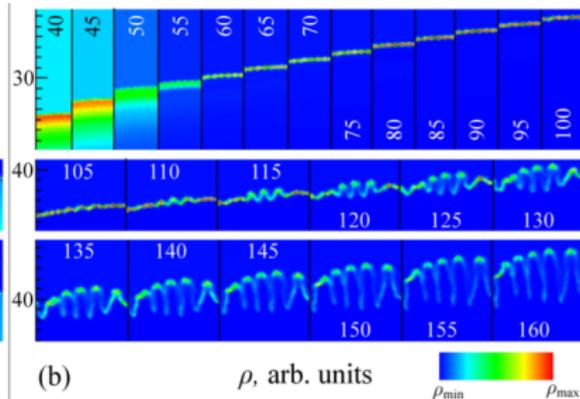
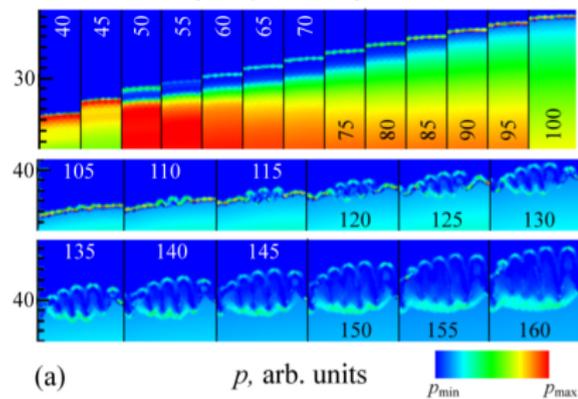


- ! Зависимость от низкотемпературной Λ (ожидаемо)
- ! Тонкая структура: 1 плотный слой + 2 переходных зоны охлаждения
- ! Потенциально неустойчивая конфигурация

Выяснение сущности 2D-эффекта

2D-XY, Широкая область, грубая сетка:
структура не разрешена

НУРТС² – ‘удар снизу’.

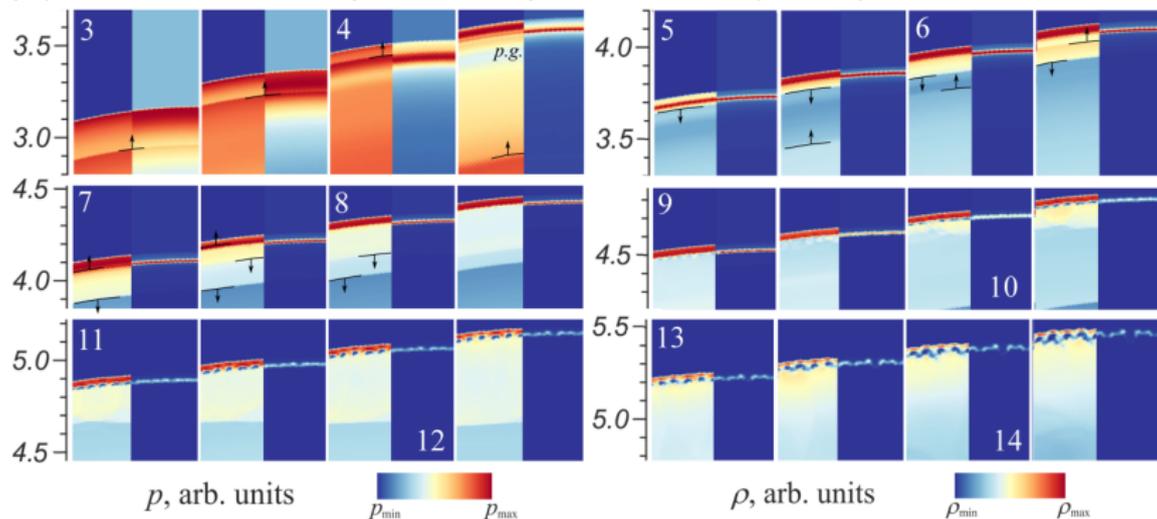


Выяснение сущности эффекта

2D-XY, Малый масштаб, мелкая сетка: структура видна

РТПП³ – разрушение головной поверхности ТС.

(В разгоняющейся РУВ неустойчивой будет задняя поверхность)

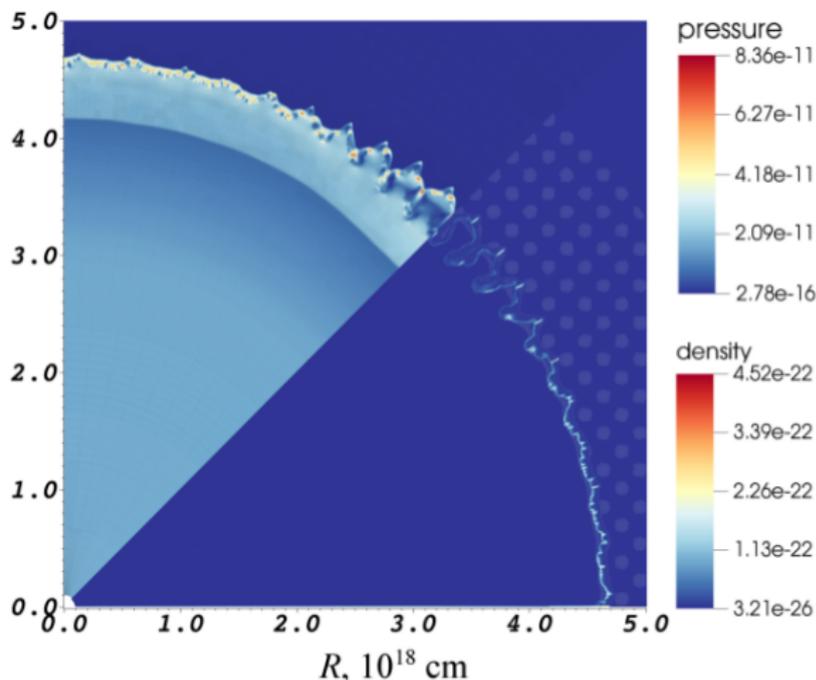


Сильная чувствительность к шумам на декартовых сетках,
на полярных – нет.

³Рэлей-Тейлоровская неустойчивость передней поверхности

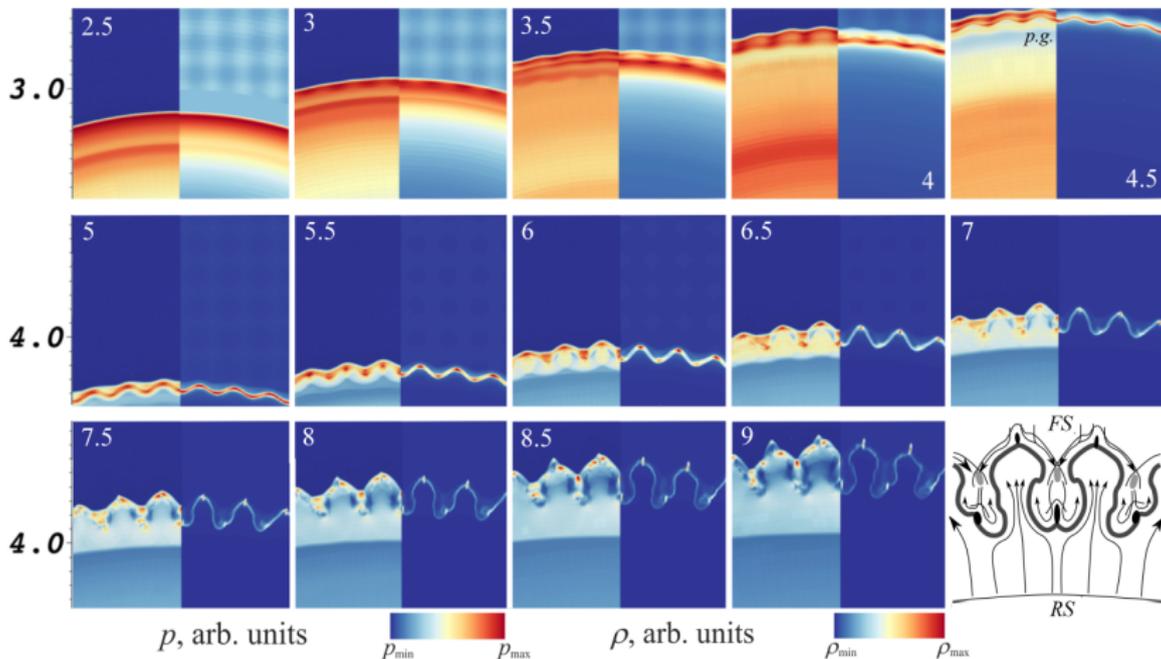
2D полярная подробная сетка + физические флуктуации

РТПП+ННТС, но вероятнее –
только РТПП.



2D-полярная подробная сетка + физические флуктуации

ННТС – только самые ранние стадии (до отрыва обратной УВ), требует специфической расстановки возмущений⁴.



⁴что и было в Blondin и др.. (1998)!

Основной итог

Физические эффекты:

- ▶ **РТПП** наиболее общий и вероятный сценарий
- ▶ ННТС – мало возможностей для эффективного возбуждения

Численные эффекты:

- ▶ 'Карбункул' вблизи осей с чистым HLLC
- ▶ Возбуждение неустойчивостей численными шумами на декартовых сетках

Полу-численные полу-физические:

- ▶ НУРТС (только на грубом разрешении, однако наиболее вероятно в многомерных крупномасштабных расчётах)



Можно ли что-то добавить?

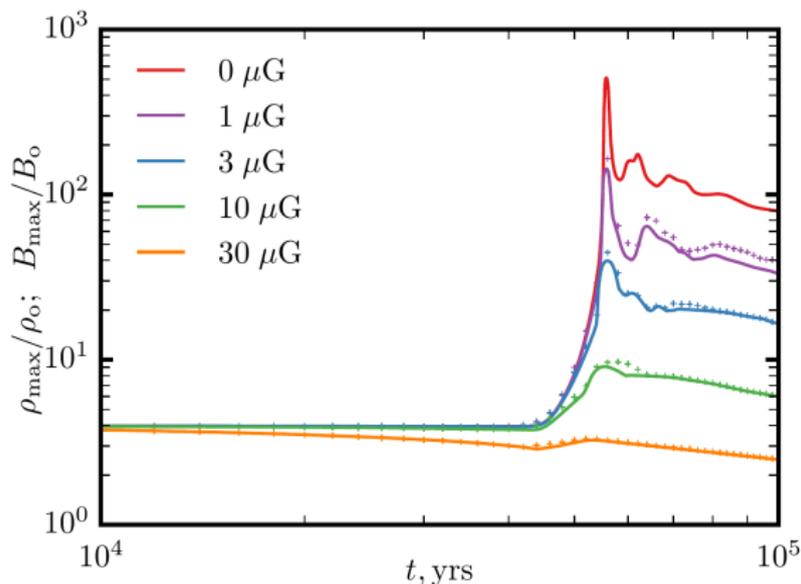
Да. Обойти ограничения:

- ▶ Учесть магнитное давление (сильный стабилизирующий эффект)
- ▶ Самосогласованная низкотемпературная кинетика ионизации и охлаждения
- ▶ и согласовать с (неидеальной) МГД ...



Эффект магнитных полей

Статья: Petruk O., Kuzyo T., Beshley V., 2016, *MNRAS*, **456**, 2343

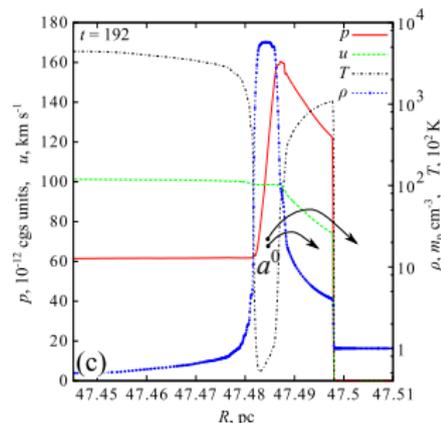


Поля препятствуют сжатию \Rightarrow снижается темп потерь (выше γ_{eff})
(однако, авторы пренебрегали Λ уже при $T < 10^4$ К)
Но поля тоже флуктуируют \Rightarrow какие-то изгибы сохраняются.

Эффекты кинетики

Пусть поле слабое, сжатие – сильно \Rightarrow
'стенка' нейтралов внутри разреженной плазмы.

- ▶ Нейтралы не чувствуют полей – только прямые столкновения.
- ▶ Темп столкновений \sim темп охлаждения (родственные процессы). Пробег $\sim \Delta u \cdot t_{cool}$.
- ▶ Проникновение в зону охлаждения или внешнюю среду, обмен импульсом – новые неустойчивости?



? Корректный выбор моделей. Работа продолжается

Спасибо за внимание!

Вопросы и обсуждение приветствуются

