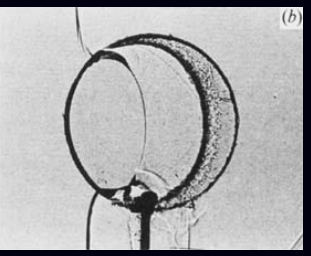
Инициирование детонации при взаимодействии ударной волны с горючим газовым пузырем

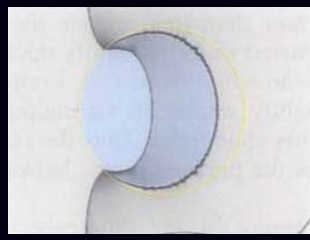
О.Г. Сутырин, П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин

НИИ механики
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Взаимодействие ударных волн с тяжелыми газовыми пузырями

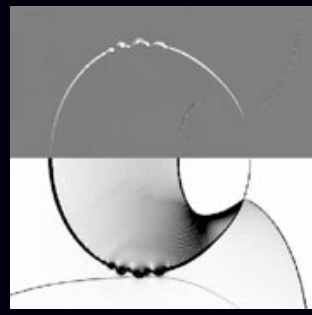


J.-F. Haas, B. Sturtevant *Interaction of shock waves with … gas inhomogeneities*, J. Fluid Mech. (1987)

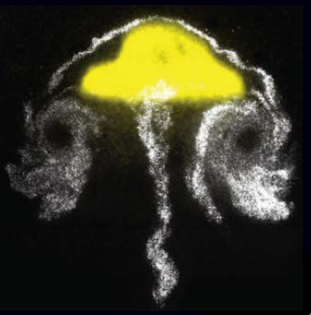


J. Quirk, S. Karni *On the dynamics of a shock-bubble interaction*, J. Fluid Mech. (1996)

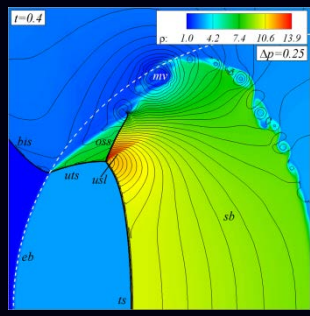
N. Zabusky, S. Zeng … *shock-spherical fast/slow bubble interactions*, J. Fluid Mech. (1987)



J. Niederhaus et al. … *study for the three-dimensional shock–bubble interaction*, J. Fluid Mech. (2008)



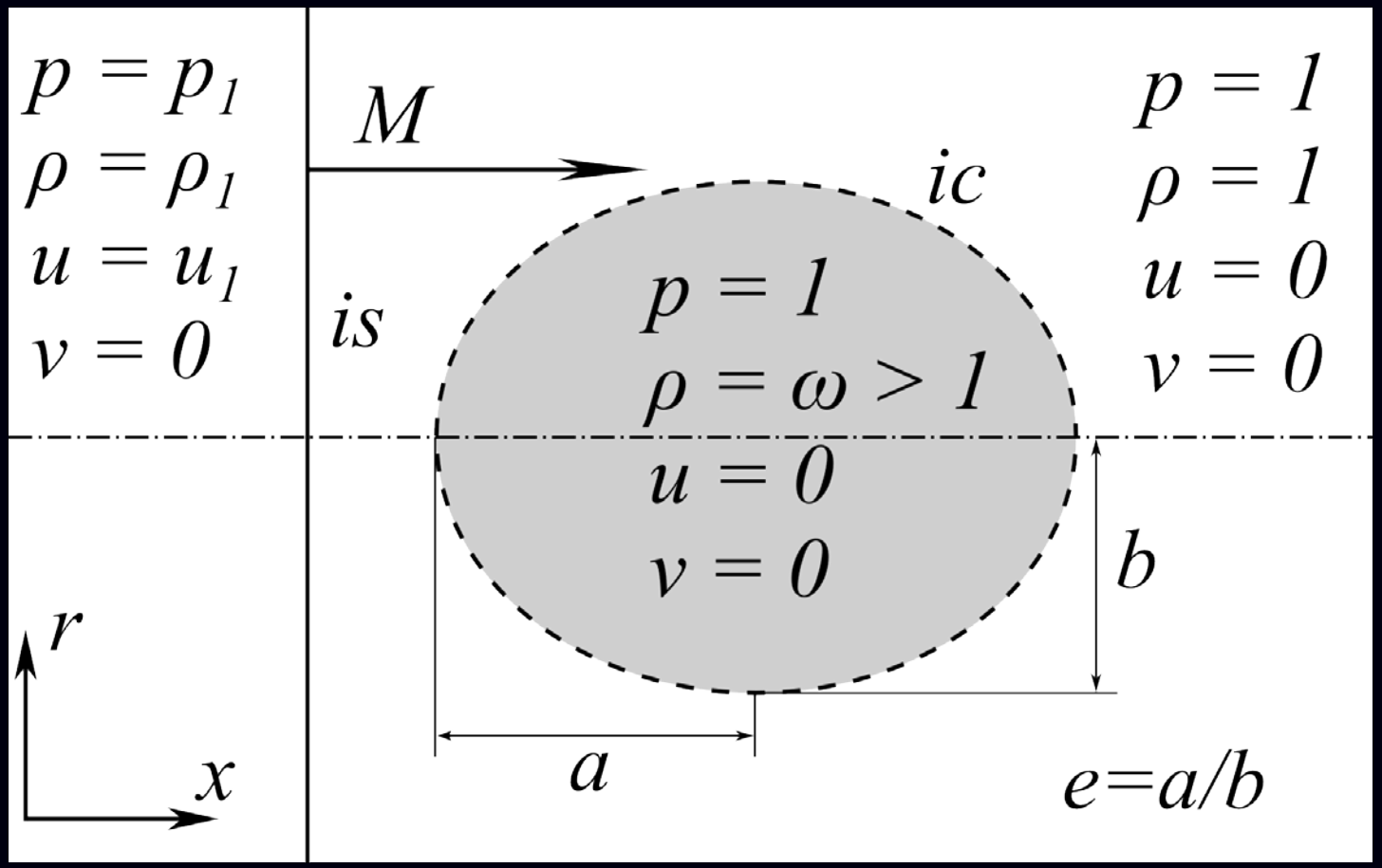
N. Haehn et al. *Reacting shock bubble interaction*, Combustion and Flame (2012)



P. Georgievskiy et al. *Interaction of a shock with elliptical gas bubbles*, Shock Waves (2015)

F. Diegelmann et al. … *two-dimensional reactive shock-bubble interaction*, Combustion and Flame (2016)

Постановка задачи (инертный пузырь)



Двумерное плоское или осесимметричное течение. Совершенный газ ($\gamma = 1.4$) содержит эллиптическую область ***ic*** газа повышенной плотности. Плоская ударная волна с числом Маха M распространяется слева направо. Геометрия пузыря задается отношением полуосей $e = a/b$.

Математическая модель и численный метод

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial r}=H \qquad e=\frac{p}{\gamma-1}+\rho\frac{u^2+v^2}{2}$$

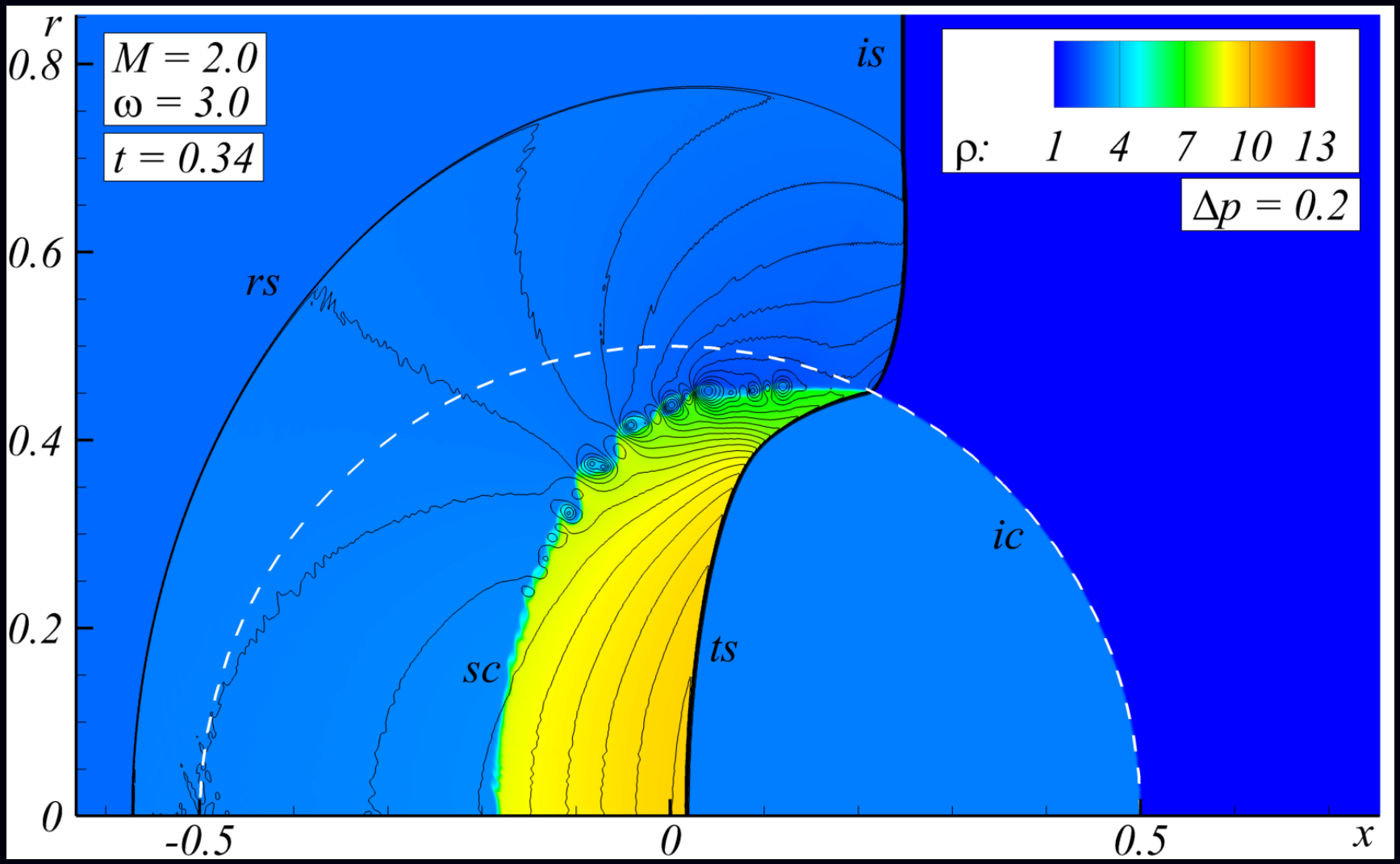
$$U=\begin{pmatrix}\rho r^\alpha\\ \rho u r^\alpha\\ \rho v r^\alpha\\ e r^\alpha\end{pmatrix},\ F=\begin{pmatrix}\rho u r^\alpha\\ \left(p+\rho u^2\right)r^\alpha\\ \rho u v r^\alpha\\ (e+p)u r^\alpha\end{pmatrix},\ G=\begin{pmatrix}\rho v r^\alpha\\ \rho u v r^\alpha\\ \left(p+\rho v^2\right)r^\alpha\\ (e+p)v r^\alpha\end{pmatrix},\ H=\begin{pmatrix}0\\0\\ \alpha p\\ 0\end{pmatrix}$$

2D уравнения Эйлера для плоских ($\alpha = 0$) и осесимметричных ($\alpha = 1$) течений.

Конечно-разностная **WENO5-Z** схема, метод Рунге-Кутты 3-го порядка. Реконструкция **характеристических** переменных, **Roe-осреднение** матриц Якоби, расщепление потоков **Roe-LLF**, **H-коррекция** карбункулов.

Однородная квадратная сетка, 1000 узлов на меньший диаметр пузыря, распараллеливание MPI, расчеты на кластере «Ломоносов».

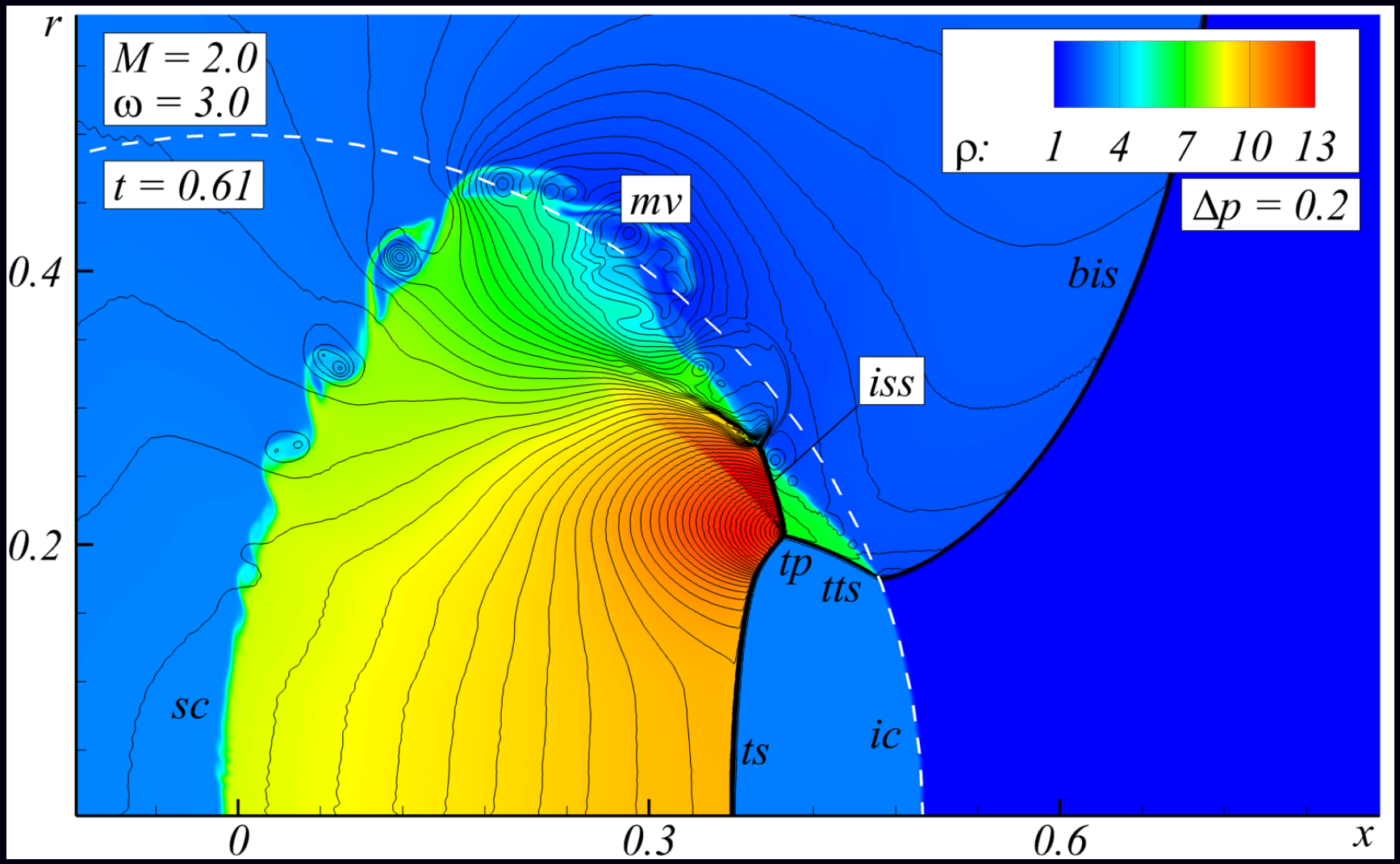
Ранняя стадия течения



Осесимметричное течение, нижняя граница – ось симметрии. Изолинии давления, цветное поле плотности при M = 2, ω = 3, e = 1.

is, ***rs*** – падающий и отраженный скачки, ***ic***, ***sc*** – исходная и деформированная границы пузыря, ***ts*** – скачок внутри пузыря.

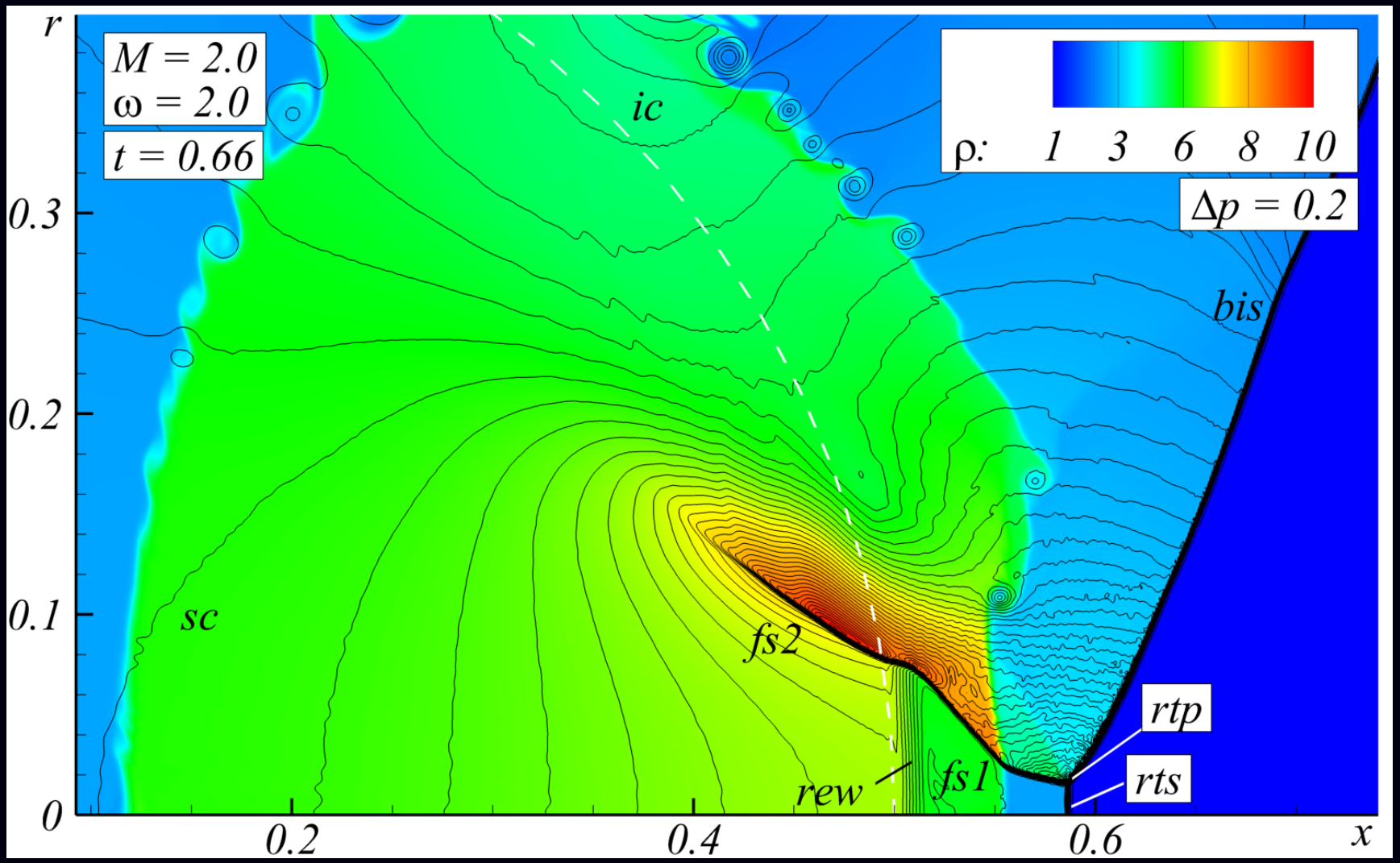
Средняя стадия течения



Со временем, формируются тройная точка ***tp*** и поперечный скачок ***tts***
bis – искривленный участок падающей волны, ***mv*** – основной вихрь,
iss – вторичный скачок, движущийся наружу.

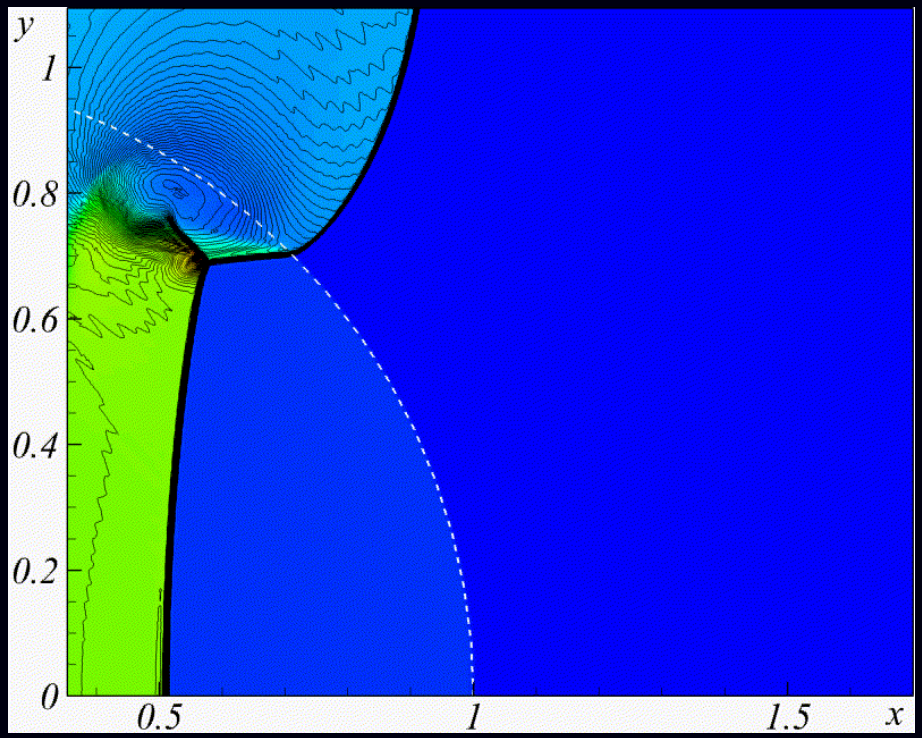
Два возможных режима течения:

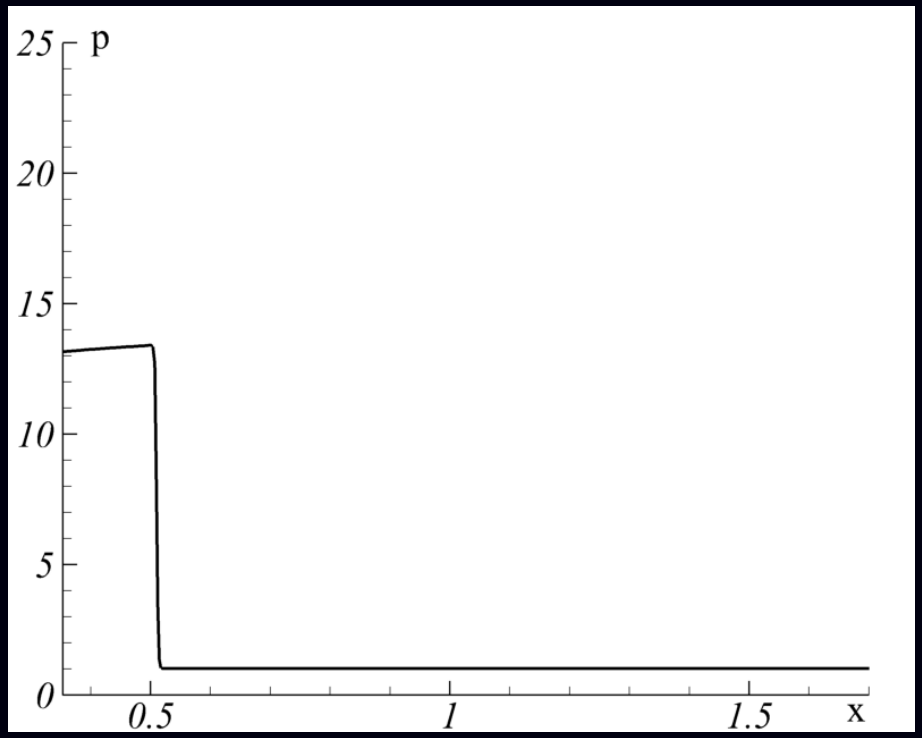
Внешний режим фокусировки



Тройная точка ***rtp*** и поперечный скачок ***rts*** выходят в окружающий газ **до** того, как достигают оси симметрии. Имеет место при небольших плотностях в пузыре и/или при $e < 1$. Здесь $\omega = 2.0$, $e = 1$. ***rew*** – отраженная волна разрежения, ***fs1***, ***fs2*** – участки фокусирующегося скачка.

Динамика внешней фокусировки (плоский случай)

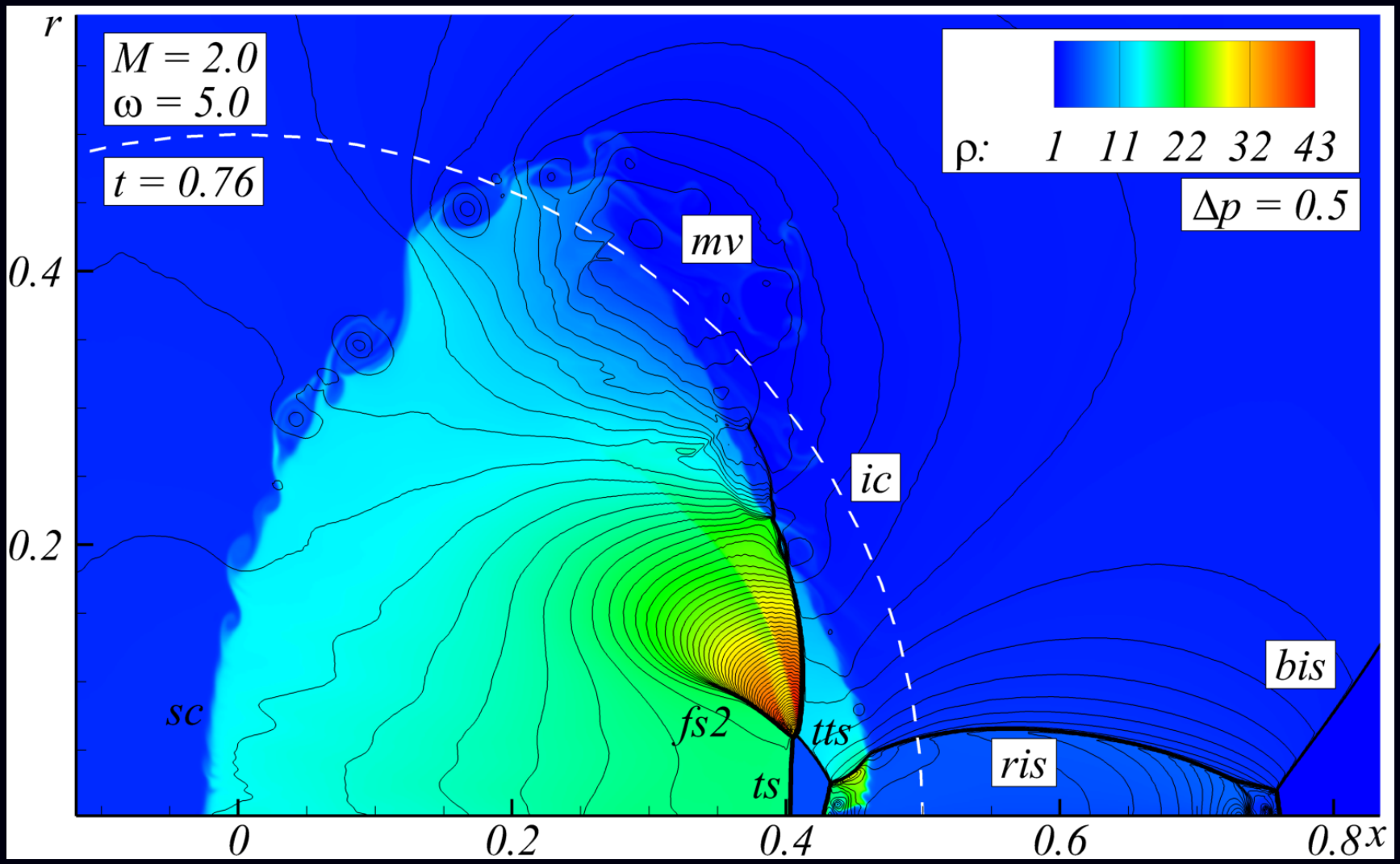




Давление вдоль плоскости симметрии

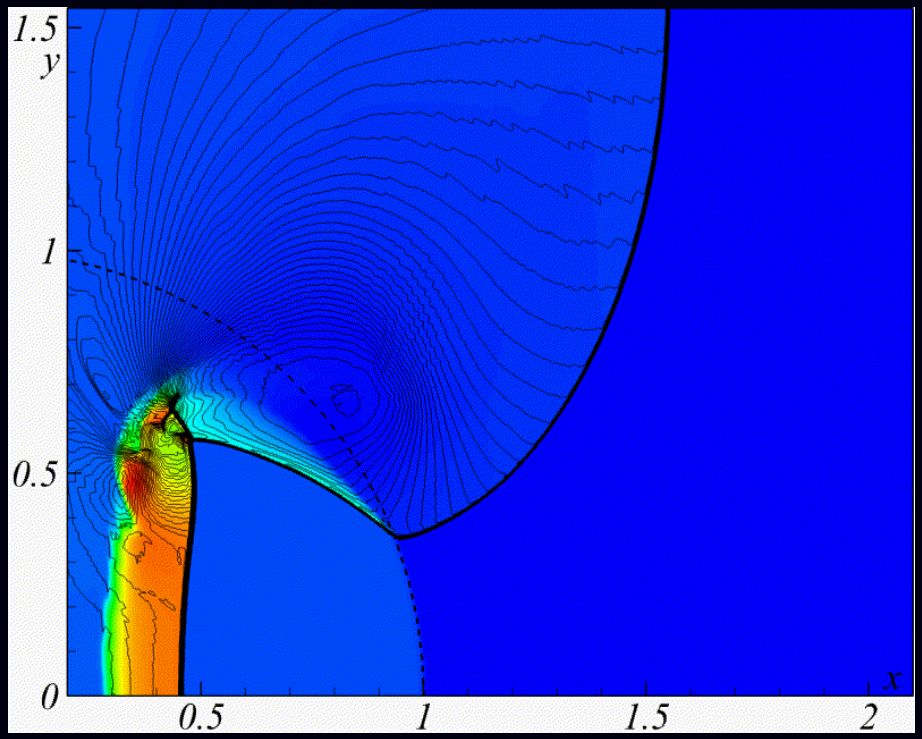
Тройная точка и поперечный скачок проходят сквозь границу пузыря.
Резкое повышение давления при отражении скачков от плоскости симметрии.
Наибольшее давление достигается в момент отражения тройной точки.

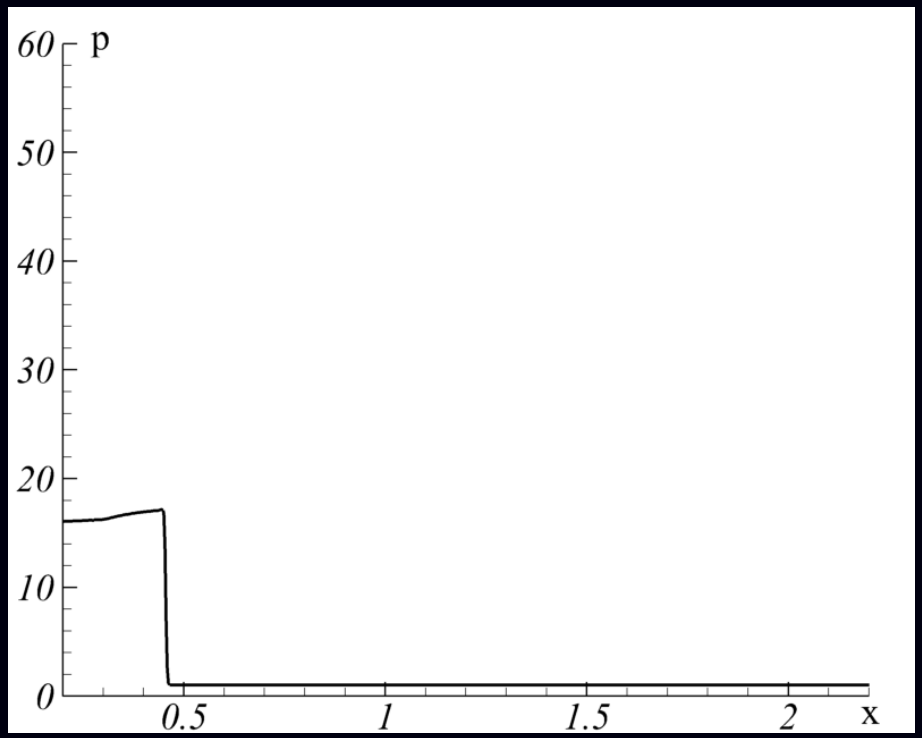
Внутренний режим течения



Скачки ***ts*** и ***tts*** схлопываются друг с другом **внутри** пузыря.
Этот режим имеет место для больших плотностей и/или вытянутых пузырей. Здесь ω = 5.0, *e* = 1.

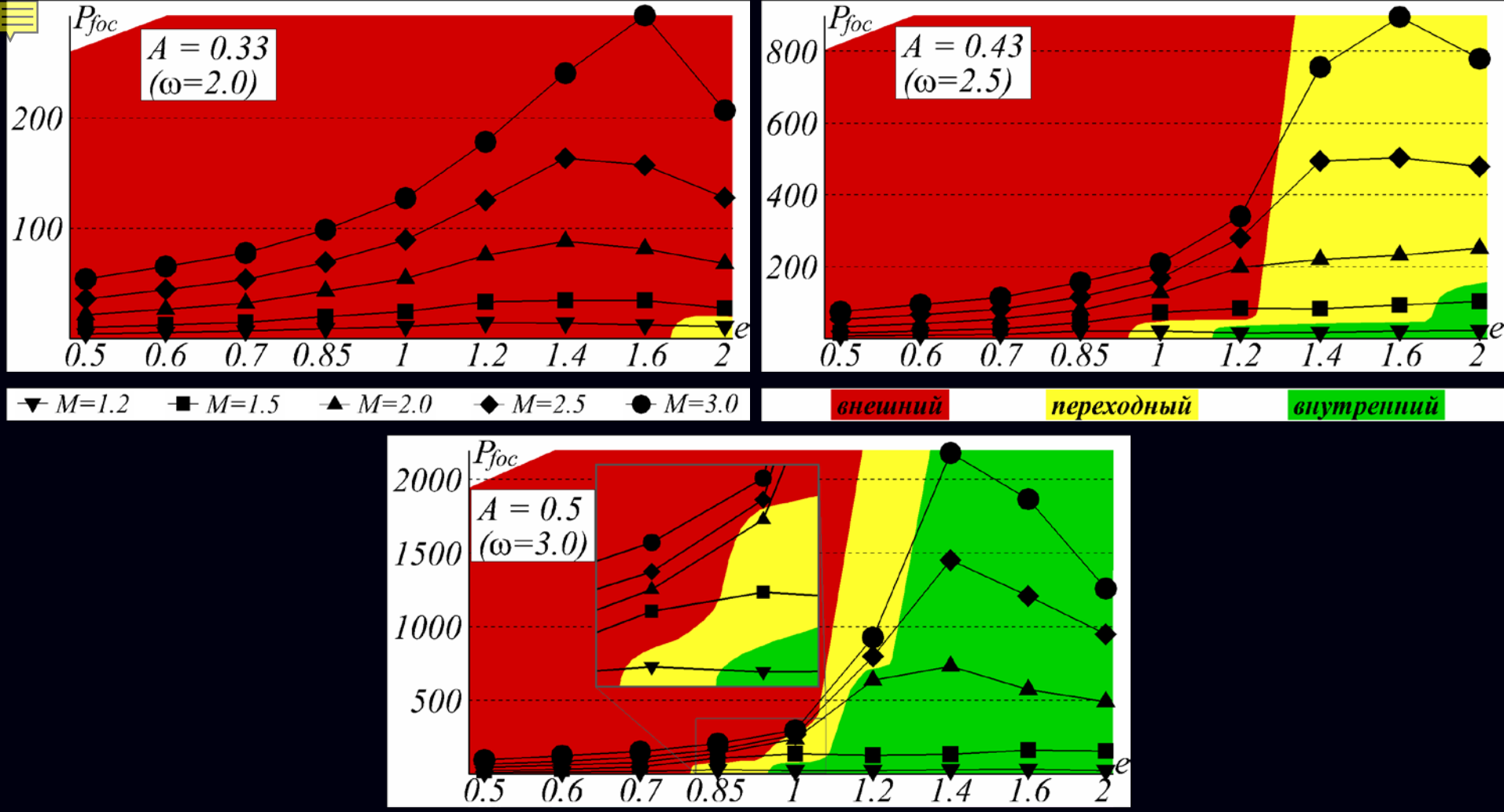
Динамика внутренней фокусировки (плоский случай)





Давление вдоль плоскости симметрии

Скачки схлопываются друг с другом внутри пузыря.
Пиковой давление при отражении тройной точки от плоскости симметрии, как правило, выше, чем в режиме внешней фокусировки.



Режим фокусировки (цветом) и пиковое давление зависимости от числа Маха M и удлинения пузыря *e* для ω = 2.0, 2.5, 3.0.

Режим слабо зависит от числа Маха и очень чувствителен к плотности газа в пузыре и к его форме. Наибольшее давление достигается при внутренних режимах фокусировки.

P. Georgievskiy et al. *Interaction of a shock with elliptical gas bubbles*, Shock Waves (2015).

Математическая модель (реагирующий пузырь)

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial r}=H \qquad H=\sum_i c_{pi}T+h_{0i} \qquad p=\sum_i \rho_i RT$$

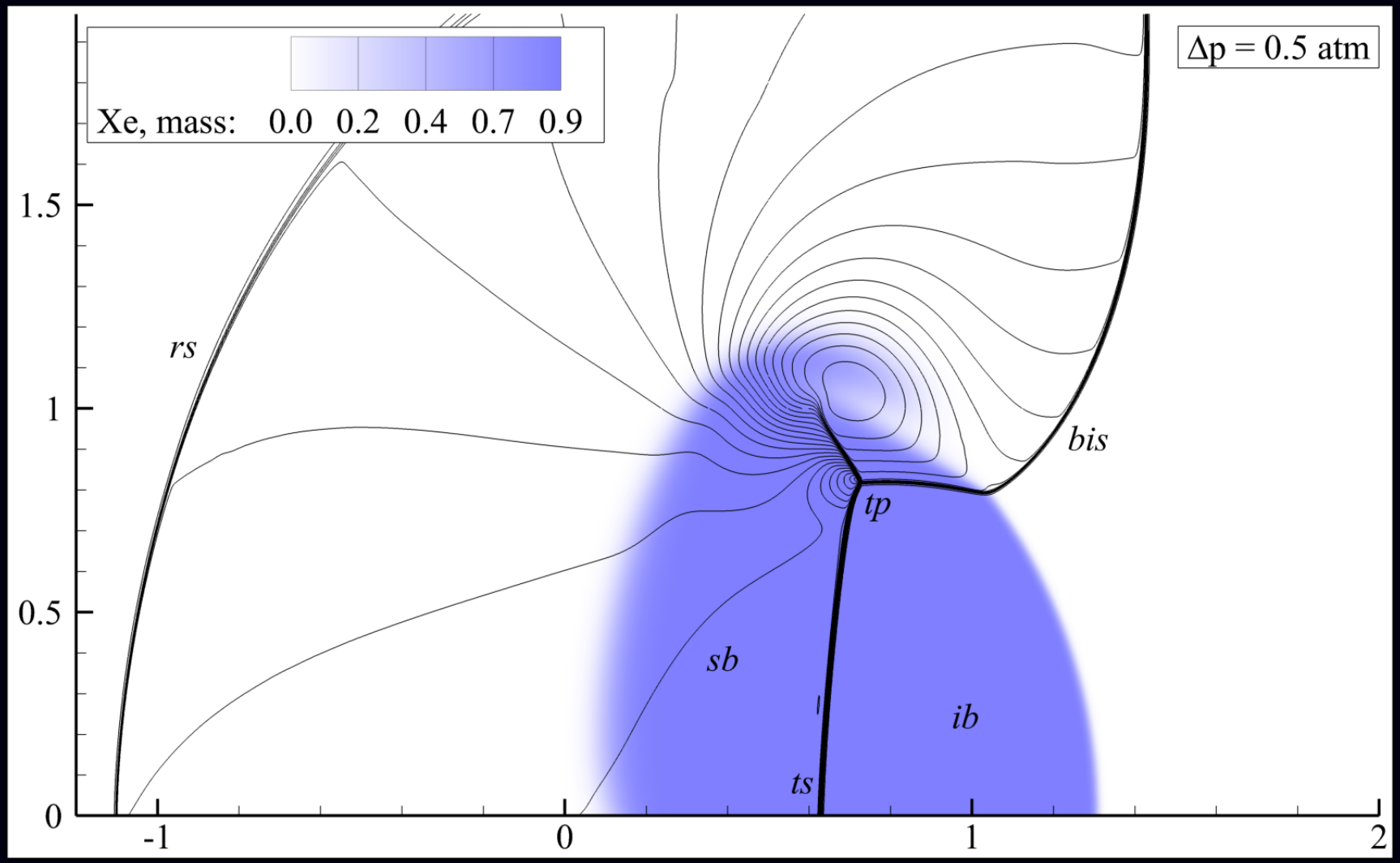
$$U=\begin{pmatrix}\rho_i r^\alpha\\ \rho u r^\alpha\\ \rho v r^\alpha\\ (H-p)r^\alpha\end{pmatrix},\ F=\begin{pmatrix}\rho_i u r^\alpha\\ \left(p+\rho u^2\right)r^\alpha\\ \rho u v r^\alpha\\ H u r^\alpha\end{pmatrix},\ G=\begin{pmatrix}\rho_i v r^\alpha\\ \rho u v r^\alpha\\ \left(p+\rho v^2\right)r^\alpha\\ H v r^\alpha\end{pmatrix},\ H=\begin{pmatrix}0\\0\\ \alpha p\\ 0\end{pmatrix}$$

2D уравнения Эйлера для равновесной односкоростной и однотемпературной смеси совершенных газов.
Ударная волна в воздухе (1/5 частей кислород/азот), горючая смесь в пузыре (1/5/5/15 частей пропан/кислород/азот/ксенон, ω = 3.1).

Одностадийная кинетика горения пропана Westbrook-Dryer. Тепловыделение обеспечивается за счет теплоты образования компонент h_{0i}.

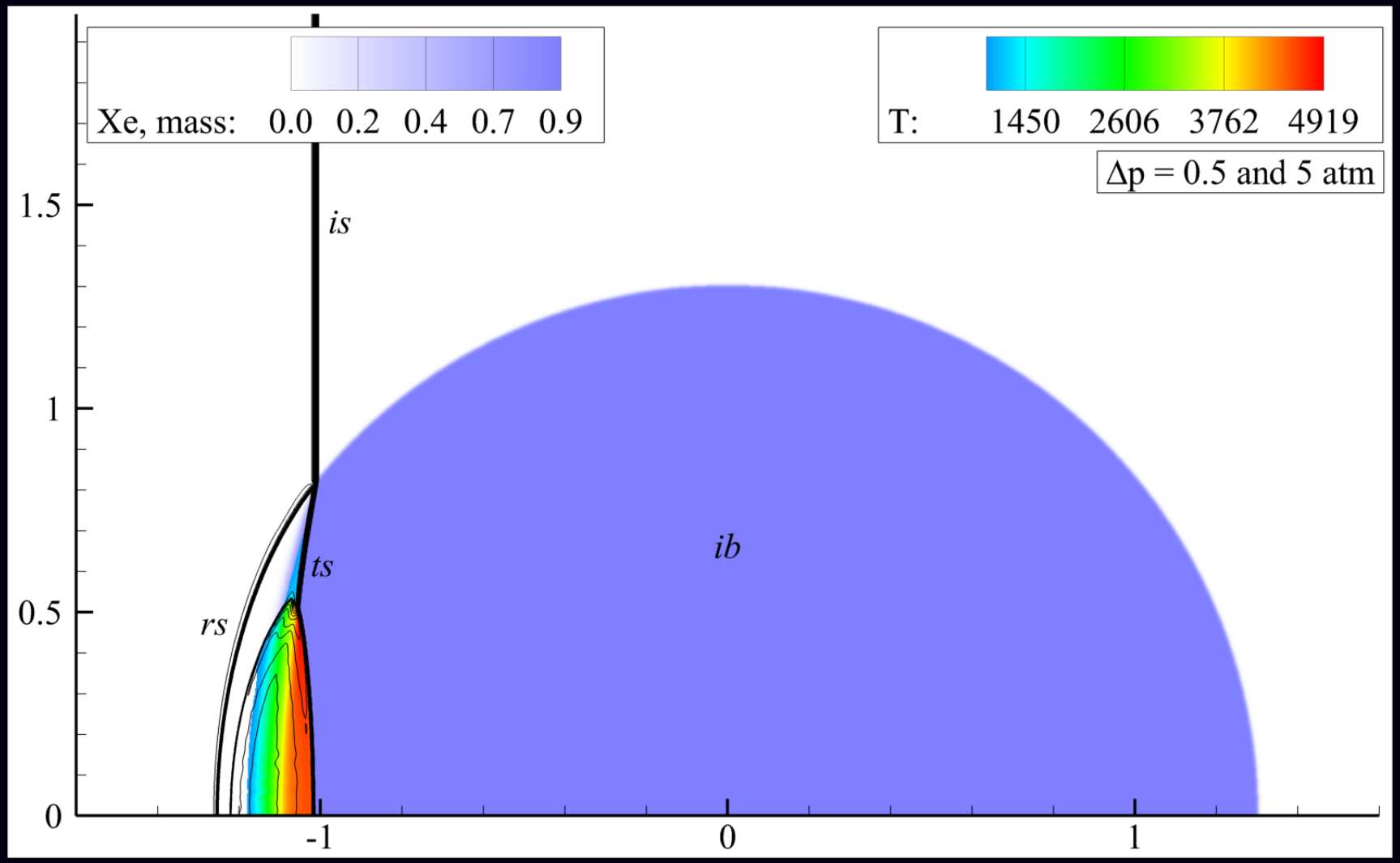
Метод Годунова, однородная квадратная сетка, 1000 узлов на меньший диаметр пузыря, распараллеливание MPI, расчеты на кластере «Ломоносов».

Общий вид течения (плоский случай)



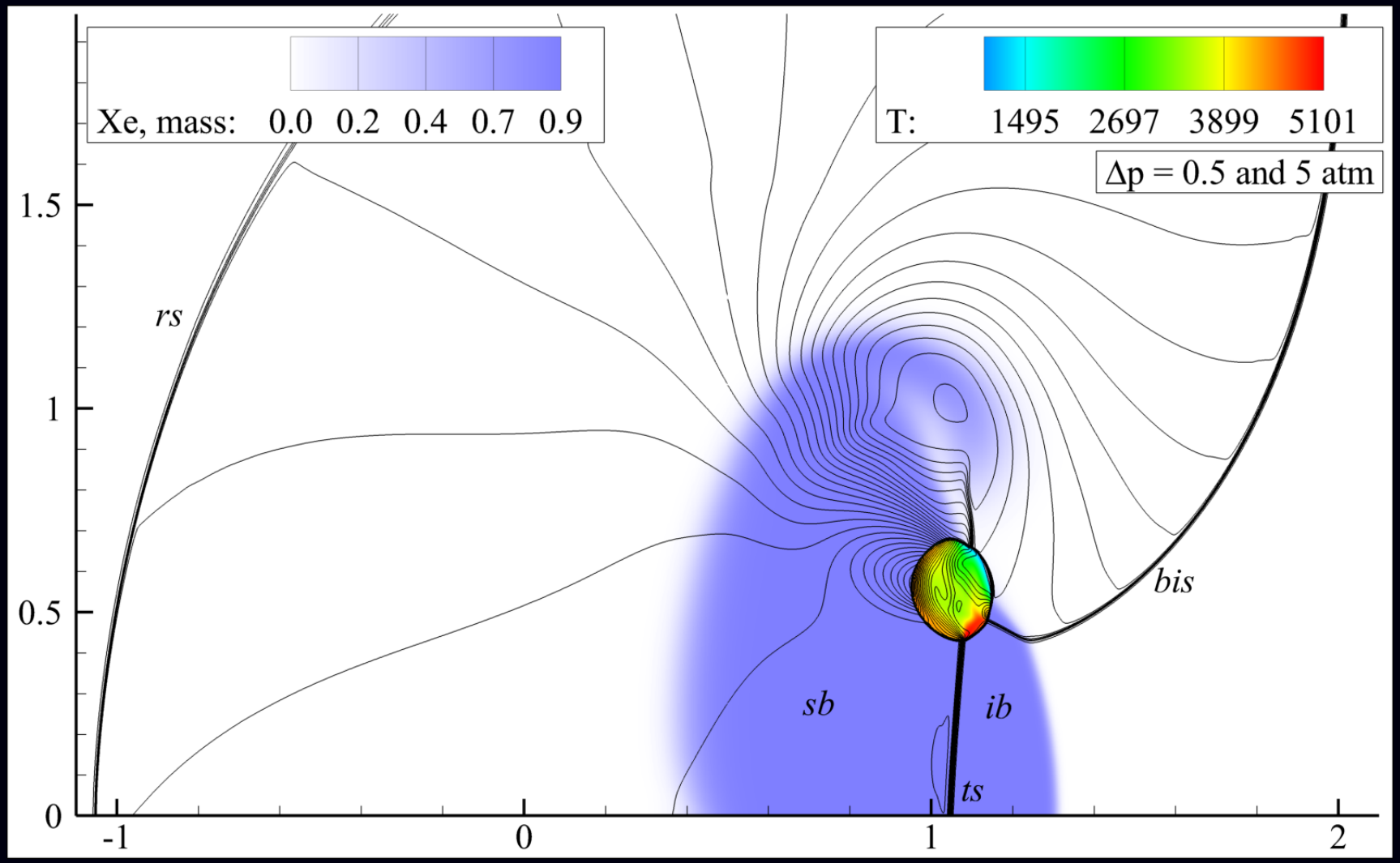
Изолинии давления, массовая доля ксенона. ***ib, sb*** – невозмущенная и ударно-сжатая части пузыря, ***ts*** – скачок внутри пузыря, ***tp*** – тройная точка.

Прямое инициирование детонации



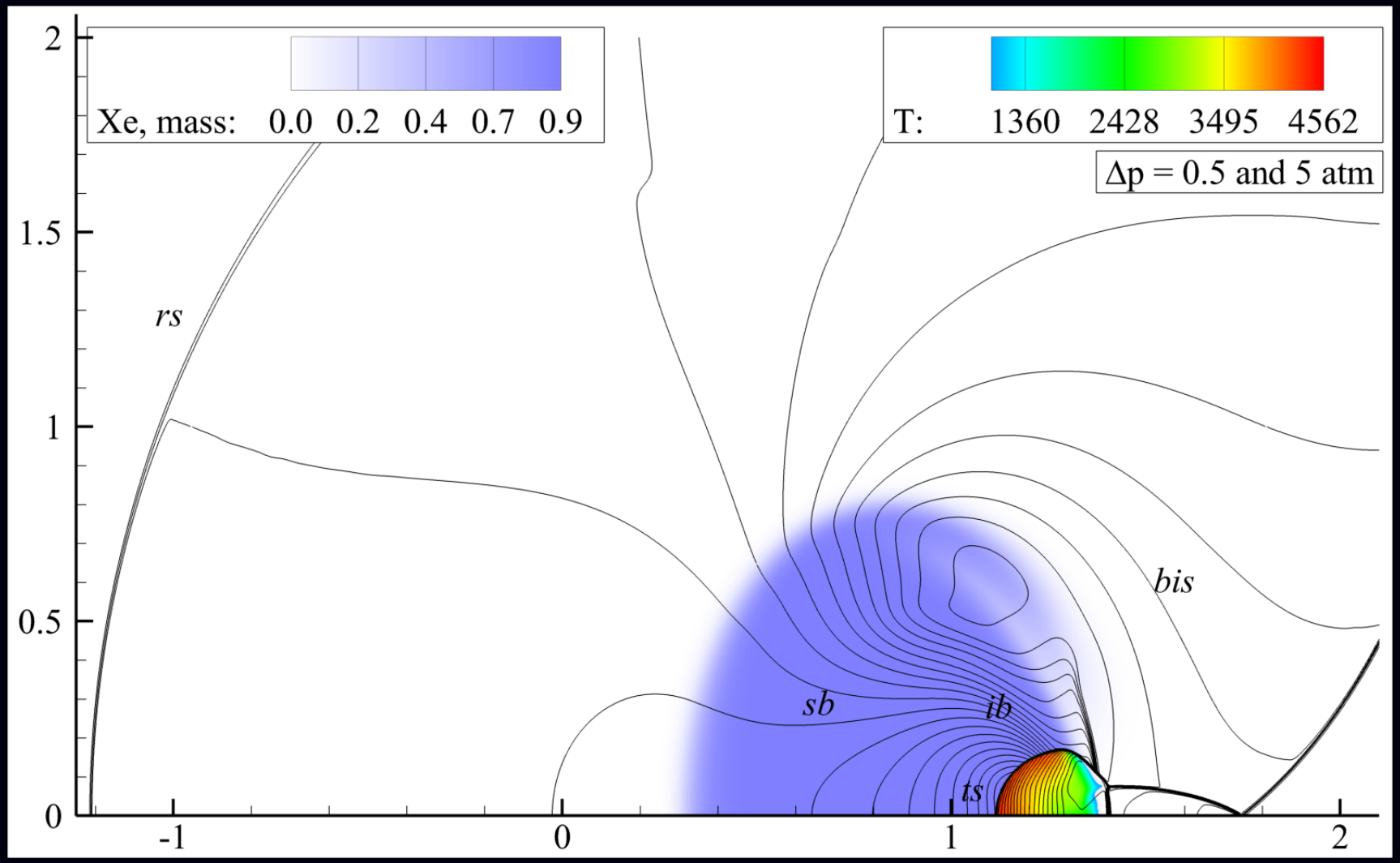
Изолинии давления, массовая доля ксенона, цветное поле температуры (только T > 1000 K). Сильная волна (M = 3.2): воспламенение происходит сразу после проникновения волны в горючую смесь.

Воспламенение вблизи тройной точки



Изолинии давления, массовая доля ксенона, цветное поле температуры (только T > 1000 K). Более слабая волна (M = 2.5), круглый пузырь (e = 1): воспламенение происходит вблизи тройной точки внутри пузыря.

Воспламенение при фокусировке



Еще более слабая волна (M = 2.2), вытянутый пузырь (e = 1.4): воспламенение происходит вблизи точки фокусировки поперечных скачков на плоскости симметрии. В сферическом пузыре воспламенения нет.

Заключение

Существует два качественно различных режима взаимодействия ударной волны с тяжелым газовым пузырем – внешний и внутренний. В обоих случаях формируются множественные поперечные скачки и тройные точки, фокусирующиеся на оси или плоскости симметрии, что приводит к резкому повышению давления и температуры газа.

Можно ожидать, что взаимодействие ударной волны с горючим газовым пузырем может приводить к инициированию детонации как минимум в трех различных режимах: (1) прямое инициирование, (2) при преломлении волны и (3) при фокусировке волны.

Помимо интенсивности волны и состава смеси, важную роль играет форма пузыря, в некоторых случаях обеспечивая инициирование детонации или наоборот, исключая воспламенение при прочих равных.

Спасибо за внимание!