

Санкт-Петербургский Государственный Университет
Математико-механический факультет
Кафедра астрофизики

**Фаза шампанского
в эволюции областей НШ**

Ежков Марк Юльевич

5 декабря 2013 г.

1. Классическая модель эволюции областей НП

В классической модели эволюции областей НП традиционно выделяется три фазы.

1. Звезда находится в межзвездной среде постоянной плотности n_0 атомов на см^3 . В процессе фазы формирования, пока звезда движется в направлении Главной последовательности, большое количество фотонов образует сверхзвуковой фронт ионизации.
2. Этот фронт замедляется, достигая радиуса Стремгрена ($R_S = (3F_*/4\pi\beta n_0^2)^{1/3}$, где F_* – полное количество фотонов в секунду, излученное звездой, а β – коэффициент рекомбинации), где образуется ударная волна, распространяющаяся глубже в окружающий газ, и область НП расширяется. В процессе расширения обратные фронту ионизации волны разрежения движутся в сторону центрального источника, что уменьшает число рекомбинаций в области НП. Это позволяет фронту ионизации захватывать новый материал. Тем не менее, большая часть газа, захваченная движущейся впереди ударной волной, остается в нейтральном состоянии и формирует холодную оболочку между двумя фронтами. Эта фаза заканчивается, когда давление разреженной области НП становится сравнимым с давлением нетронутого окружающего газа.
3. Завершающая стадия эволюции наступает, когда звезда уходит с Главной последовательности, а область НП рекомбинирует и охлаждается.

2. Введение фазы шампанского

Несмотря на то, что такую эволюцию областей НП можно очень качественно описать теоретически, ей не удастся объяснить многие наблюдательные данные. Тем не менее, согласие между моделью и наблюдениями можно улучшить, добавив в классическую модель новую эволюционную фазу.

Основываясь на наблюдаемых физических связях, существующих между областями НП и плотными облаками, и на том, что звездообразование с большей вероятностью происходит внутри таких облаков, Tenorio-Tagle провел серию одномерных вычислений для плоскопараллельного приближения, рассмотрев облако плотности n_c ($100, 500$ и 10^3 см^{-3}), в котором формируется звезда раннего спектрального типа. Эти вычисления позволили понять, что происходит, когда граница области НП достигает точки разрыва на границе между облаком и межоблачной средой в различные моменты своей эволюции.

Решения показали, как фронт ионизации во всех случаях становился сверхзвуковым после пересечения этого разрыва, что влекло за собой большой градиент давления между ионизованным облаком и межоблачной средой. Этот разрыв в давлении приводил к "эффекту шампанского", а именно к изотермической ударной волне (число Маха $\gtrsim 3$), движущейся вовне, в ионизованную межоблачную среду, и к соответствующей волне разрежения – в обратную сторону, к звезде. Ионизованное облако становится разреженным, его вещество со сверхзвуковыми скоростями устремляется из облака и рассеивается по очень большому расстоянию.

Этой моделью могут быть объяснены многие наблюдательные эффекты, такие как изменение плотности и скорости вещества вдоль луча зрения, а также уширение эмиссионных линий.

3. Рабочая модель

Несмотря на то, что одномерная модель позволяет получить хорошую качественную картину происходящего, а также объяснить ряд косвенных эффектов, ее оказывается недостаточно, чтобы получать данные об описываемом процессе из наблюдений непосредственно. Поэтому Bodenheimer, совместно с Tenorio-Tagle и Yorke, построил двумерную модель-срез, позволяющую строить графические представления фазы шампанского.

Если в цилиндрической системе координат (X, Z, ϕ) Z является осью симметрии модели, то координату ϕ можно опустить, и тогда уравнения гидродинамики в двумерной системе (X, Z) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) &= 0, \\ \frac{\partial I}{\partial t} + \nabla \cdot (Iv) &= -\frac{\partial P}{\partial X}, \\ \frac{\partial J}{\partial t} + \nabla \cdot (Jv) &= -\frac{\partial P}{\partial Z},\end{aligned}$$

где v – скорость газа, P – его давление, а I и J – импульсы на единичный объем вдоль осей X и Z соответственно.

Добавив необходимые дополнительные условия, в частности, на температуру, поглощение, рассеяние и ионизацию, а также соответствующие граничные условия, производятся вычисления движений газа. Для этого рассматриваемая область пространства разбивается на три подобласти: молекулярное облако, межоблачная среда и область НШ. На границах областей имеют место разрывы. Центр молекулярного облака помещается в начало координат и отделяется от межоблачной среды цилиндрической поверхностью, вдоль которой поддерживается равенство давлений с двух сторон. Звезда раннего спектрального типа помещается внутри облака на оси симметрии, а изначальные границы области НШ высчитываются из предположения, что газ неподвижен. В процессе вычислений на каждом шаге получаются новые границы вышеописанных областей.

4. Важные частные случаи

Далее мы рассмотрим важные частные модельные случаи, необходимые для понимания реального поведения областей НШ во время фазы шампанского.

1. На рис.1 представлен наиболее общий случай. Звезда находится в цилиндрическом облаке на расстоянии 1.5×10^{18} см от его границы с большим градиентом давления ($\Delta \log P = 3$). Граница области НП близка к сферической внутри облака, но в межоблачной среде она формирует узкую коническую область колоссальной длины. В то время как сферическая часть расширяется со скоростью $\sim 4 \text{ км с}^{-1}$, ионизованное вещество начинает истекать наружу с большей скоростью $\sim 10 \text{ км с}^{-1}$, после чего формируется ударная волна, и вещество выплескивается в межоблачную среду. Временной масштаб процесса – 10^4 лет.

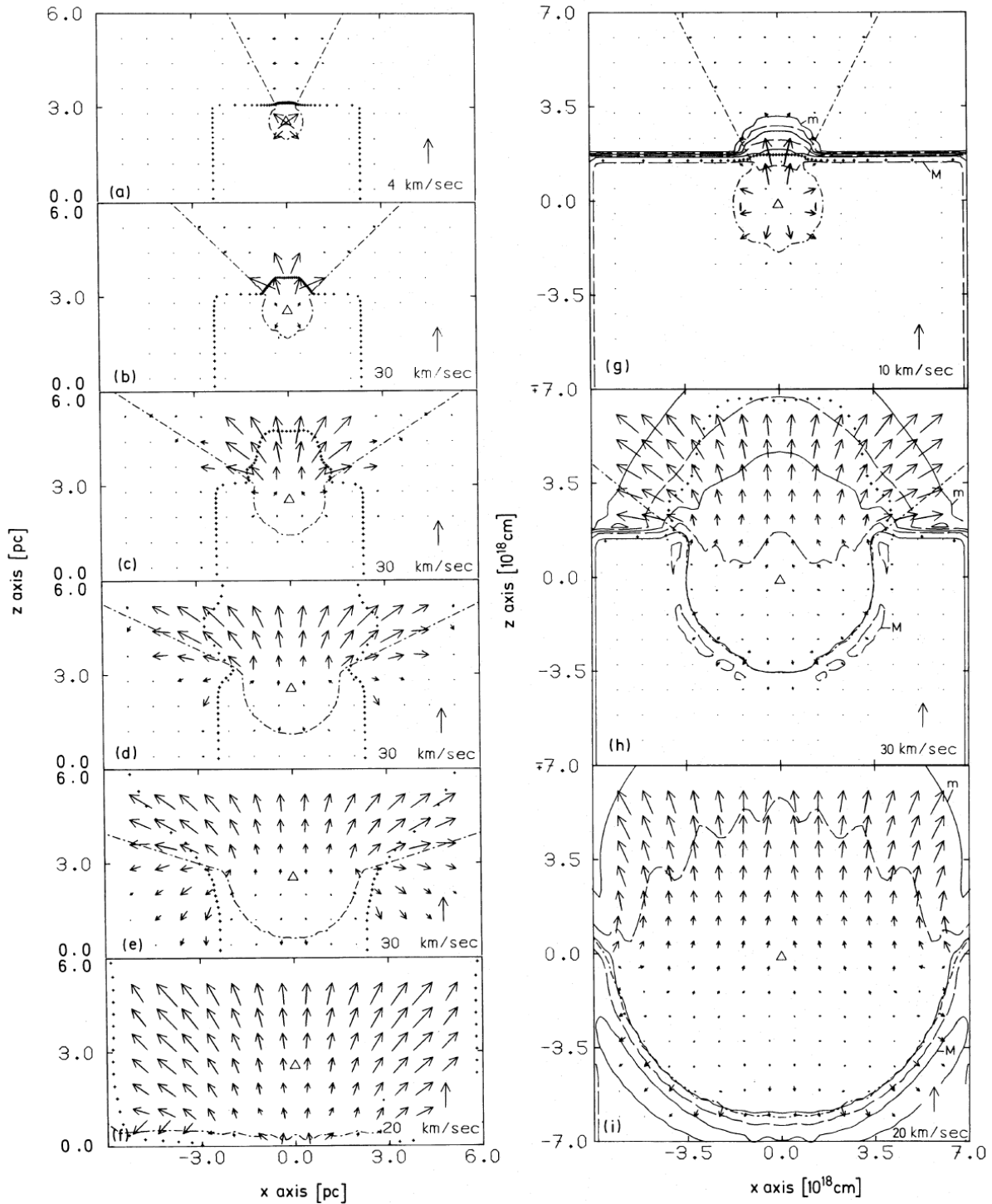


Рис.1: Слева – эволюция области НП в фазе шампанского со временем в случае 1. Справа – выделенные моменты в более крупном масштабе.

2. Случай, представленный на рис.2, демонстрирует ситуацию, при которой область НН расширялась довольно долгое время ($\sim 10^5$ лет), прежде чем достигнуть границы молекулярного облака. Для этого звезда помещается на расстояние 1.5×10^{18} см от границы облака. В этой ситуации можно совершенно четко увидеть свидетельства наличия обратной волны разрежения. Она создает оболочку из вещества более низкой плотности, которое устремляется наружу. Тогда максимум плотности в туманности будет совпадать со звездой, а локальный минимум будет находится у самой границы ионизованной области. По мере дальнейшего расширения волна разрежения подходит ближе к звезде, а в окружающем газе появляется новый максимум плотности. На рисунке 2.(с) видно, что волна разрежения отскакивает от центра симметрии сферической туманности и теперь разреженный газ начинает двигаться уже к звезде, в то время как ионизованная область целиком продолжает расширяться со скоростью порядка скорости звука ($\sim 10 \text{ км с}^{-1}$).

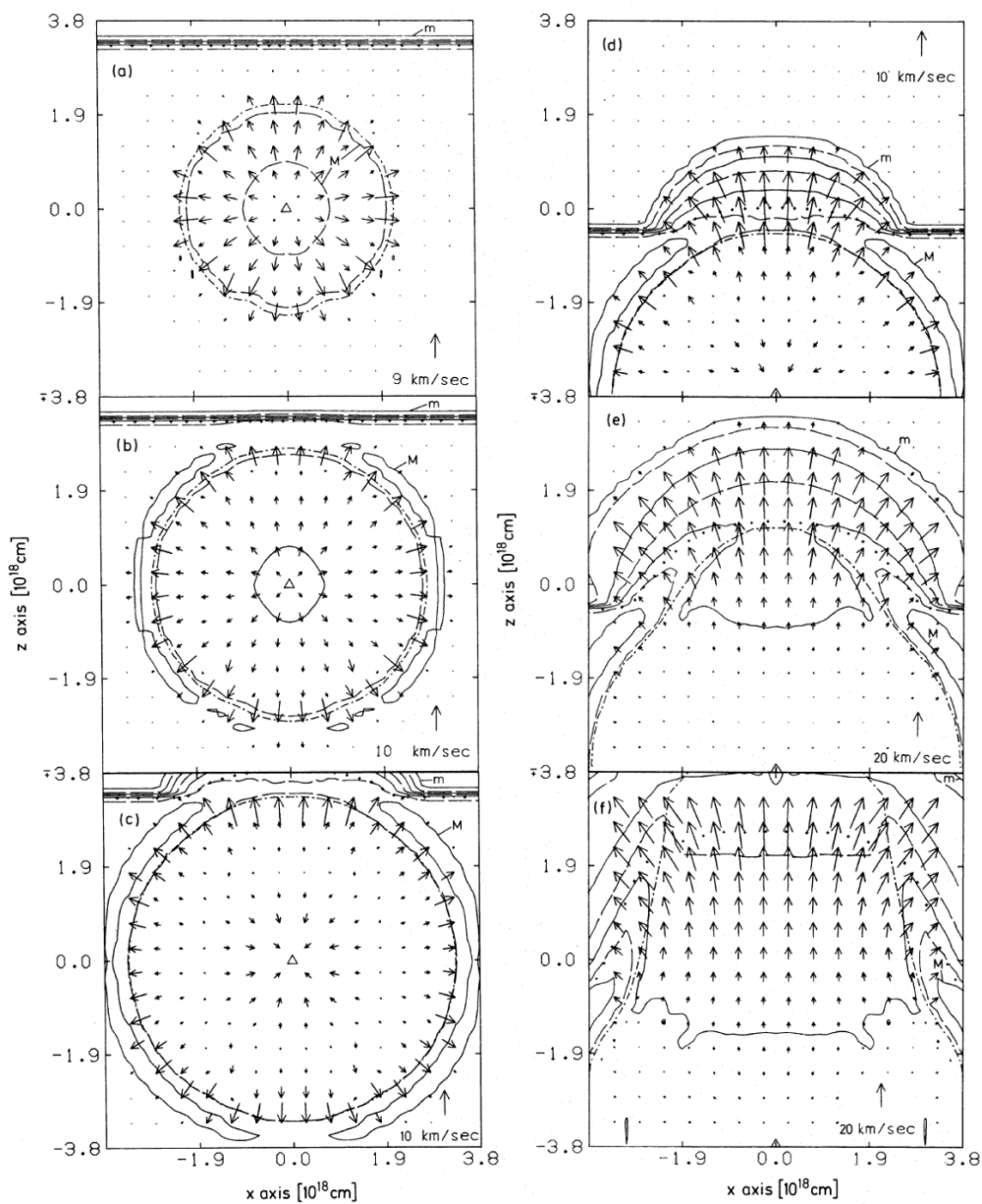


Рис.2^[1]: Слева – эволюция области НН в фазе шампанского со временем в случае 2. Справа – выделенные моменты в более крупном масштабе.

3. Рис.3: случай звезды в тонкой молекулярной области с одинаковой близостью сразу к двум границам. Толщина молекулярного диска 1.3 пк. Разумеется, в такой ситуации соответствующий участок облака будет полностью разрушен.

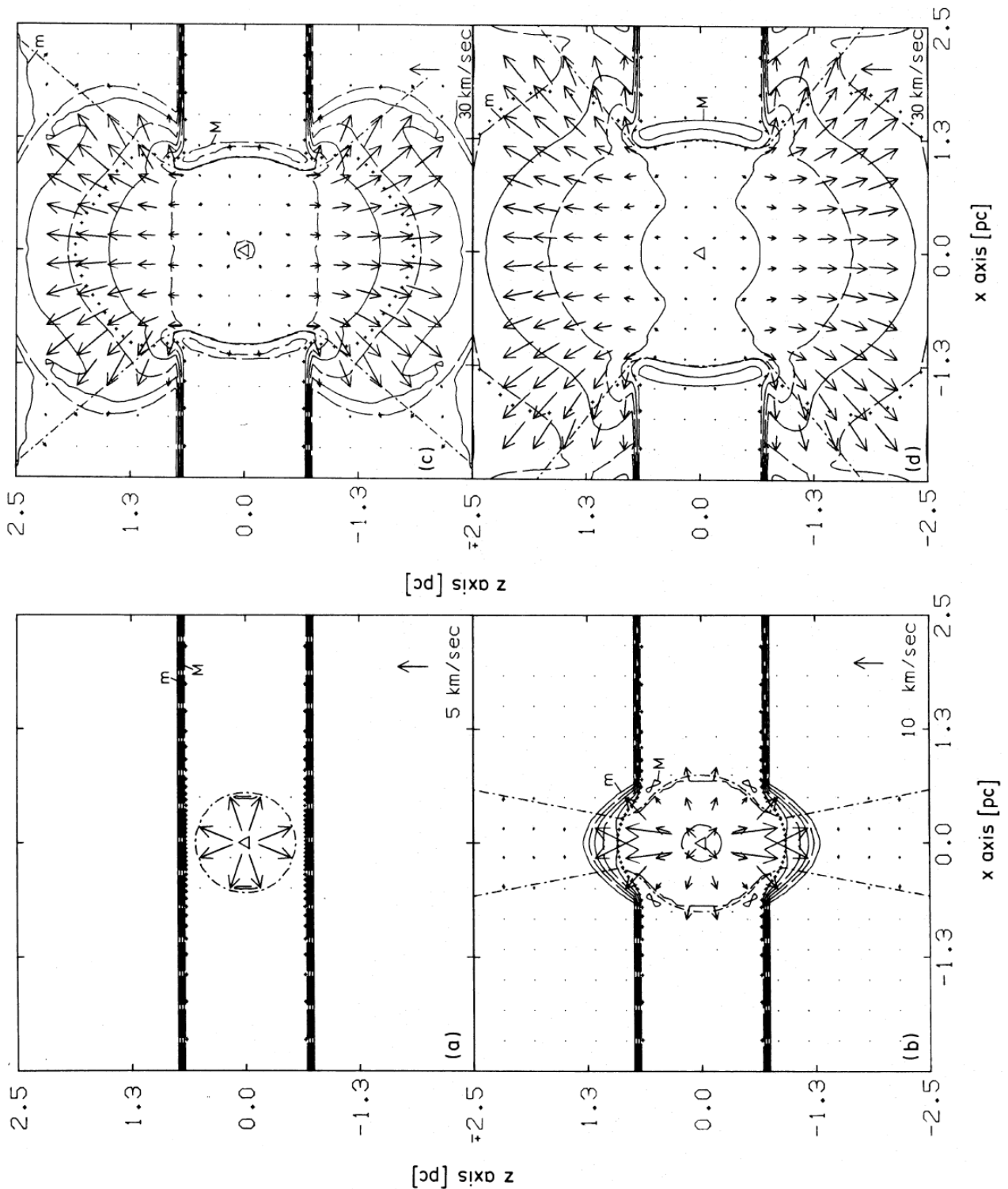


Рис.3^[1]: Снизу – эволюция области НШ в фазе шампанского со временем в случае 3. Сверху – выделенные моменты в более крупном масштабе.

4. Наиболее специфический случай представлен на рис.4. Звезда помещена на расстоянии 0.7 пк от границы облака. Также присутствует небольшая сферическая глобула с радиусом 0.46 пк, находящаяся на расстоянии 0.66 пк по другую сторону от границы облака, а ее параметры, такие как температура и плотность, совпадают с параметрами рассматриваемого молекулярного облака. Видно, как под действием ударной волны ближайшая к облаку граница глобулы спрямляется, а поток ионизованного вещества, обтекая ее, раздваивается, что в трехмерном случае будет соответствовать подобию чаши с толстыми стенками.

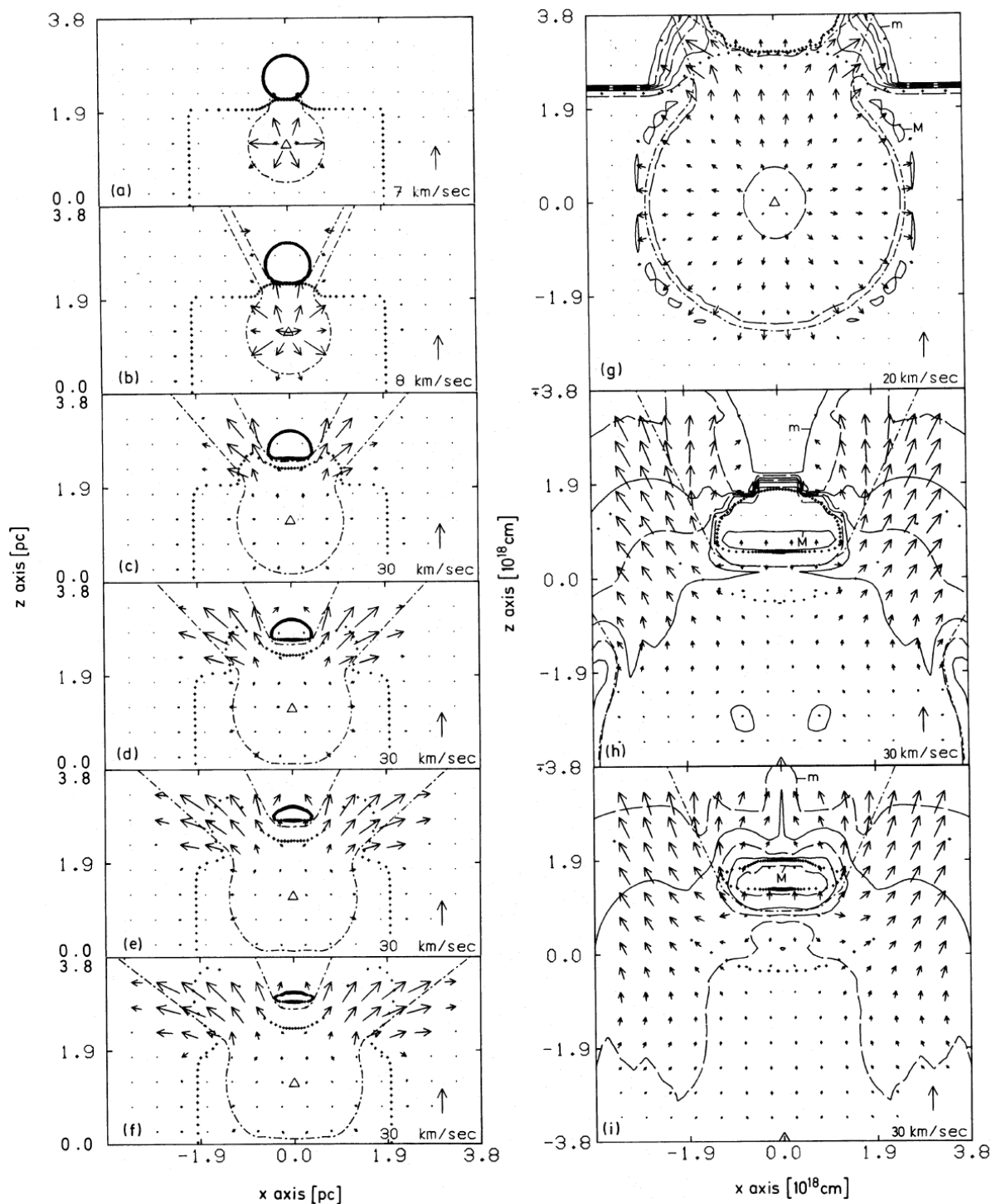


Рис.4^[1]: Слева – эволюция области ИП в фазе шампанского со временем в случае 4. Справа – выделенные моменты в более крупном масштабе.

5. Модельные изображения

Имея на руках качественную численную модель движения вещества, его температуры и плотности в разные моменты времени и в разных участках рассматриваемых областей, можно попытаться построить модельные изображения фазы шампанского.

На изображении, представляющем собой проекцию описанной выше цилиндрической модели под каким-то углом, строятся изофоты. Примеры таких модельных снимков приведены на рис.5.

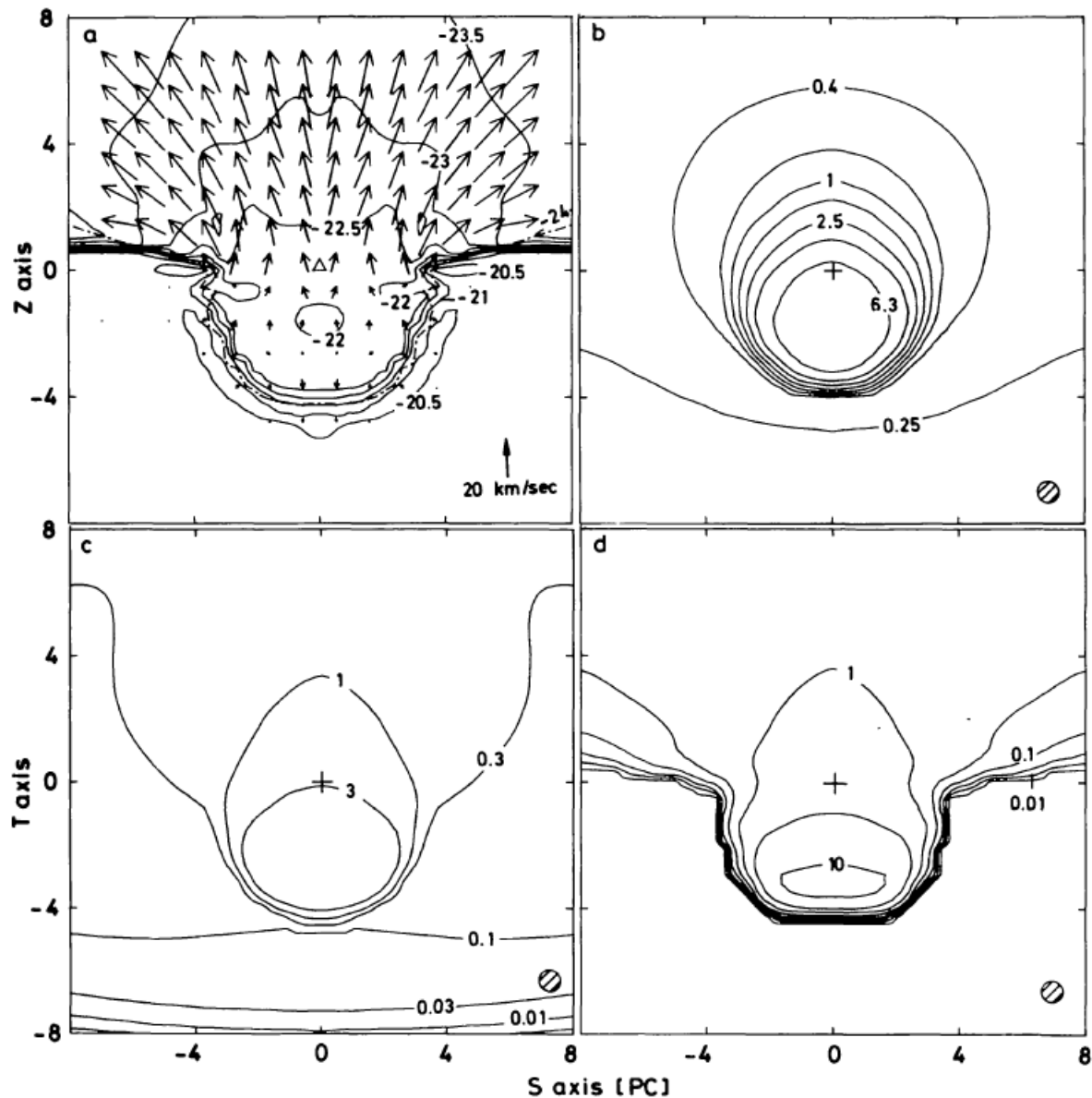


Рис.5^[2]:

- $t = 1.14 \cdot 10^6$ лет – время, прошедшее с момента образования области НШ;
 (a) – линии равной плотности и направляющие скоростей;
 (b) – изофоты проекции под углом 30° ; (c) – 60° ; (d) – 90° ;
 единицы измерения: 10^{-19} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{Гц}^{-1}$.

6. Прямые наблюдательные проявления

Yorke, Tenorio-Tagle и Bodenheimer предсказывают следующие особенности при наблюдении потоков ионизованного вещества в фазе шампанского:

1. Это явление должно встречаться с должной частотой в областях вселенной, где одновременно имеются в наличии горячие звезды классов O и B и молекулярные облака.
2. Область НП должна быть четко связана с соответствующим молекулярным облаком.
3. В общем случае, максимум излучения в радиодиапазоне не должен совпадать со звездой. Исключения из этого правила возможны при проекциях с большим углом наклона, а также в случае двойного потока в тонких облаках.
4. Должна присутствовать яркая компактная компонента и значительно более тусклая протяженная, где ионизованный газ, при гораздо более высокой скорости ($> 10 \text{ км с}^{-1}$), будет менее плотным, чем газ в непосредственной близости от звезды. Для того, чтобы обнаружить эту протяженную компоненту, необходимы радиоизображения, способные охватить диапазон минимум в 3 порядка яркостей.

Библиография

[1] Bodenheimer P., Tenorio-Tagle G., Yorke H. W.

"The gas dynamics of H II regions. II - Two-dimensional axisymmetric calculations"

Astrophysical Journal, Part 1, vol. 233, Oct. 1, 1979, p. 85-96.

<http://adsabs.harvard.edu/abs/1979ApJ...233...85B>

[2] Yorke H. W., Tenorio-Tagle G., Bodenheimer P.

"Theoretical radio continuum maps of H II regions in the champagne phase"

Astronomy and Astrophysics, vol. 127, no. 2, Nov. 1983, p. 313-319.

<http://adsabs.harvard.edu/abs/1983A%26A...127..313Y>