

К теории компактных релятивистских объектов. 2. Коллапс с переходом в глоузар и релятивистский взрыв.

*Захид Закир*¹

Аннотация

При гравитационном коллапсе локальные температуры во внутренних слоях растут быстрее температуры поверхности звезды, а последняя растёт по мировому времени экспоненциально быстро. По этой причине более вероятно не образование фрозара, а оптимистический сценарий коллапса, когда вещество звезды быстро переходит в радиационно-доминированное состояние со стабилизацией или переходом в расширение (антиколлапс). В результате квази-стабилизации звезда достаточно долго по мировому времени пребывает в горячей (по локальной температуре) фазе. Полузастывшие релятивистские объекты в этой фазе испускают сильно покрасневшее (квазиреликтовое) излучение и предлагается называть этот новый класс объектов глоузарами (glowsar от glow star – накалённая или покрасневшая звезда). Основная часть вещества глоузара сосредоточится вблизи поверхности в радиационно-доминированной фазе. При размораживании глоузара расширение на конечной стадии происходит экспоненциально-быстро (релятивистский взрыв) и объект наблюдается как релятивистская сверхновая или гиперновая. Наблюдаемыми примерами релятивистского взрыва, или антиколлапса, видимо являются сам Большой Взрыв и некоторые взрывы в астрофизике с большим энерговыделением, не объясняемым известными процессами. Идеализированные модели и численное моделирование свидетельствуют о том, что при сжатии достаточно массивных объектов рост давления и температуры во внутренних слоях уравнивает гравитацию и взрывное расширение возможно. Обсуждаются наблюдательные следствия предсказаний ОТО о свойствах компактных объектов в состояниях глоузара и релятивистского взрыва.

PACS: 04.20.Dg; 04.70.-s; 97.60.-s, 98.54.-h

Ключевые слова: релятивистские звёзды, квазары, активные ядра галактик, коллапс, чёрные дыры

Содержание

Введение.....	16
1. Большой Взрыв как релятивистский взрыв Вселенной	17
2. Квазистабильность и релятивистский взрыв сверхмассивных звёзд.....	18
3. Квазистабильность и релятивистский взрыв сверхплотных звёзд.....	19
4. Глоузары и релятивистские сверх(гипер)новые в астрофизике.....	20
Заключение.....	21
Литература.....	22

¹ *Центр теоретической физики и астрофизики, Ташкент, Узбекистан, zahidzakir@theor-phys.org*

Введение

В первой части статьи [1] структура коллапсирующих объектов изучалась в стандартных моделях ОТО в *пессимистическом* сценарии, когда доминирует гравитационное сжатие. Было показано, что в ОТО вначале застывает центр звезды (в астрономическом мировом времени), затем средние слои и последней застывает поверхность, оставаясь вне гравитационного радиуса $r_g = 2GM$. Таким образом в ОТО звёзды при коллапсе переходят в состояние *фрозара* - звёзды с застывшей внутренней структурой, мировые линии частиц которой времениподобны во всём объёме и почти параллельны оси t и между собой [1-2].

Так как внутренняя метрика сферической невращающейся (и нейтральной) звезды на её поверхности гладко сшивается со Швацшильдовской метрикой, то и при учёте влияния температуры и давления, поверхность звезды приближается к r_g асимптотически, никогда не достигая его. Однако, нелинейность уравнений ОТО для метрики в сильном поле может привести к такому сочетанию температур и давлений слоёв звезды, что сжатие может перейти в пульсации или расширение.

Поэтому в данной части статьи начато предварительное изучение такого *оптимистического* сценария, когда до стадии полного застывания звезды давление около центра успеет возрасти настолько, что силы противодействия сжатию могут уравновесить или превзойти гравитационные силы. Тогда звезда не застывает, а переходит либо в квазистабильную фазу с замедленным темпом протекания всех процессов, либо может начать расширяться.

При этом на данной стадии важны не сами уравнения состояния, что есть вопрос феноменологии, а те общие свойства таких объектов, которые следуют из ОТО при стабилизации или обращении коллапса компактных объектов. В статье рассмотрены два предельных случая – свехмассивный объект малой плотности и сверхплотный объект звёздной массы. На этих примерах показывается, что свойства противоположного поведения временной и радиальной компонент метрики на поверхности и в центре физически проявляются как неоднородный рост локальных температур и давлений. Это затем ведёт к быстрому экспоненциальному росту давления в центре и далее к пульсациям или релятивистскому взрыву.

Эти объекты в относительно долгом квазистабильном состоянии, когда собственные времена сильно замедлены, переходят в горячую фазу в терминах локальных температур и испускают потоки излучения с очень большим красным смещением. Объекты в такой фазе уместно объединить в новый класс и их можно назвать *глоузарами* (glowsar - от «glow star», «накалённая или покрасневшая звезда»).

В ходе же медленного размораживания вещества звезды и последующего экспоненциально быстрого восстановления темпа собственных времён расширение происходит в две стадии. Сначала материя центральных частей сосредоточится у поверхности, формируя «толстую оболочку» с переходом в радиационно-доминированную фазу. Затем, на второй стадии начнёт расширяться и поверхность, после чего и происходит взрывное высвобождение энергии в виде излучения и выброса плазмы с необычайно мощным всплеском (барст). Излучение с сильным гравитационным красным смещением станет более жёстким из-за кинематического

фиолетового смещения. Объект в состоянии релятивистского взрыва может проявляться как *релятивистская сверхновая* или *гиперновая*.

Обсуждаются также наблюдательные следствия теории компактных объектов в ОТО в состояниях глоузара и релятивистского взрыва.

1. Большой Взрыв как релятивистский взрыв Вселенной

Для такого принципиально важного следствия ОТО, как переход в горячую фазу с последующим релятивистским взрывом, даже до детального рассмотрения существует, хотя и эвристический, но достаточно веский наблюдательный аргумент. Рассмотренная в предыдущей статье [2] упрощённая модель звезды как вырезанной из сжимающейся фридмановской модели Вселенной можно довести до логического завершения и тогда очевидно, что горячая фаза сжатия будет характерна и для судьбы звезды. Из модели горячей в прошлом расширяющейся Вселенной следует модель горячей в будущем коллапсирующей однородной звезды.

При этом, если считать, что следствием горячей фазы Вселенной был Большой Взрыв (БВ) как антиколлапс, то это означает, что то же самое надо полагать и для релятивистской звезды - коллапс может привести к последующему антиколлапсу. Из горячей фазы звезда может выйти, испытав *релятивистский взрыв*, который можно назвать *локальным Большим Взрывом*.

О реальности оптимистического сценария релятивистского коллапса говорят следующие аргументы и наблюдательные факты:

1) альтернативой к активной фазе коллапса ОТО оставляет только состояние фрозара, практически полностью теряющей активность почти навсегда;

2) наблюдения подтверждают активность компактных объектов и возможность релятивистского взрыва или антиколлапса – кроме Большого Взрыва известны и другие классы мощных локальных взрывов в астрофизике с быстрым и необычайно большим энерговыделением, не объясняемые обычными или хотя бы известными механизмами;

3) существование активной фазы коллапса допускается уравнениями ОТО, а из стандартных моделей и некоторых численных анализов следует, что при сжатии достаточно массивного объекта давление около центра растёт быстрее, чем в верхних слоях, что может привести к квазистабильности или расширению сначала центральных областей, а затем и более высоких слоёв.

Всё это свидетельствует о том, что в ОТО начиная с какой-то предельной массы релятивистский взрыв должен быть неизбежным, иначе не было бы и БВ. Поэтому вопрос не в том, есть ли в ОТО взрыв после горячей фазы - в принципе он допускается и уже наблюдается как БВ - а в том, какое из фундаментальных свойств релятивистской гравитации ответственно за то, что начиная с какого-то нижнего предела массы звезда при коллапсе обречена на разогрев с ростом давления в центре и расширение.

В следующих двух разделах на примере двух предельных случаев – сверхмассивного объекта малой плотности и сверхплотного объекта звёздной массы – рассмотрено сугубо общерелятивистское свойство - противоположность поведения временной и радиальной компонент метрики на поверхности и в центре. Физически это свойство проявляется в форме неоднородного роста локальных температур и давлений, что далее ведёт либо к пульсациям, либо к экспоненциальному росту давления в центре и взрыву.

2. Квазистабильность и релятивистский взрыв сверхмассивных звёзд

Метрика любой сферической невращающейся (и нейтральной) звезды на её поверхности гладко сшивается со Швацшильдовской метрикой и поэтому даже при учёте температуры и давления поверхность звезды асимптотически приближается к r_g , никогда не достигая его. В дополнении к этому общему свойству из простых моделей коллапса в ОТО следует, что при сильном сжатии возникают ещё два общих релятивистских свойства, не зависящие от уравнений состояния [1,2]:

1) коэффициент замедления собственных времён на поверхности намного меньше, чем в центре:

$$e^{v(r_b)/2} \ll e^{v(0)/2}, \quad (1)$$

2) коэффициент радиальных сокращений на поверхности намного больше, чем в центре (где нет сокращений):

$$e^{\lambda(r_b)/2} \gg e^{\lambda(0)/2} = 1. \quad (2)$$

Чтобы определить, как эти общие свойства изменят уравнения состояния, а значит и динамику звезды, сначала рассмотрим случай сверхмассивной звезды, у которой при приближении поверхности к r_g средняя плотность всё ещё остаётся малой и локально справедливо уравнение состояния идеального газа:

$$p(r) = b \frac{T(r)}{\Delta V(r)}, \quad (3)$$

где $b = const$, а p, T - давление и температура в слое толщиной от r до $r - \Delta r$ с локальным объёмом ΔV .

По мере приближения поверхности к r_g локальная температура вблизи поверхности в мировом времени t растёт экспоненциально:

$$\frac{T[r_b(t)]}{T[r_b(0)]} = \frac{e^{v_b(0)/2}}{e^{v_b(t)/2}} \sim e^{t/2r_g}. \quad (4)$$

Энергия слоя около поверхности при падении от $r_b(0)$ к $r_b(t)$ в локальной статической системе подвергнется гравитационному фиолетовому смещению. Если в случае пыли гравитационная энергия приводила только к росту кинетической энергии падающего слоя в локальной статической системе, то в газе часть этой кинетической энергии трансформируется в тепло и возрастёт температура слоя.

Но зато, из-за радиальных сокращений теперь в слое от r' до $r' - \Delta r$ расположатся в $e^{\lambda(r)/2} / e^{\lambda(r')/2}$ раз больше локальных стандартных радиальных масштабов и локальный (физический) элемент объёма $\Delta V'$ возрастёт настолько же:

$$\frac{\Delta V(r')}{\Delta V(r)} = \frac{e^{\lambda(r)/2}}{e^{\lambda(r')/2}} \cdot \frac{r'^2}{r^2}, \quad (5)$$

В результате, частицы газа с более высокой средней локальной энергией распределятся в большем физическом объёме и поэтому из (3)- (5) следует, что *локальное давление около поверхности почти не зависит от релятивистского фактора*:

$$p_b(r') = b \frac{T_b(r')}{\Delta V_b(r')} \simeq \frac{r^2}{r'^2} p_b(r), \quad (6)$$

Рассмотрим теперь что происходит около центра такой звезды. По мере приближения поверхности к r_g локальная температура около центра растёт в любом случае быстрее, чем на поверхности. Но теперь радиальных сокращений уже практически нет и в слое от Δr около центра локальный элемент объёма почти не содержит релятивистского фактора роста и не зависит от z :

$$\frac{\Delta V_c(r')}{\Delta V_c(r)} \simeq \frac{r'^2}{r^2}. \quad (7)$$

В результате, частицы газа с более высокой средней локальной энергией распределяются в том же локальном объёме и поэтому при сжатии звезды согласно (3), (4) и (7) локальное давление вблизи центра содержит релятивистский фактор роста такой же, как и у температуры:

$$p_c(r') = b \frac{T_c(r')}{\Delta V_c(r')} \simeq (1+z') \frac{r^2}{r'^2} p_c(r), \quad (8)$$

Таким образом, по мере сжатия сверхмассивной звезды малой плотности происходит экспоненциально быстрый (в мировом времени) рост локальных температур внутри звезды не меньший, чем на поверхности $T(r) \geq T_b \sim z \sim e^{t/r_g}$, что ведёт к неоднородному росту локальных давлений. Локальные давления вблизи поверхности меняются несущественно, тогда как локальные давления в окрестности центра растут экспоненциально быстро (в мировом времени) $p_c \sim z \sim e^{t/r_g}$, что на какой-то стадии ведёт к остановке и обратному расширению внутренних слоёв звезды близко к поверхности, а далее и к расширению поверхности.

Отметим новый и нетривиальный релятивистский эффект, который состоит в том, что на первой стадии происходит всё большее сосредоточение основной массы-энергии звезды вблизи её поверхности с образованием полупустой центральной и средней областей и очень массивной оболочки звезды.

Результаты более детального аналитического и численного моделирования эволюции внутренних слоёв и поверхности с ограничениями на параметры звезды для остановки сжатия и начала расширения будут приведены в дальнейшем.

3. Квазистабильность и релятивистский взрыв сверхплотных звёзд

Для сверхплотных звёзд горячая фаза возникает по тем же причинам, что и в модели однородного шара в фридмановском приближении. Как и в космологической модели, в модели однородной сжимающейся звезды в горячей фазе основной вклад в энергию дадут ультрарелятивистские частицы.

Это позволяет принять уравнение состояния для ультрарелятивистского вещества $p = \rho/3$ как вполне реалистичное для горячей стадии коллапса объектов звёздных масс почти во всём объёме, за исключением небольшой сердцевинки радиуса δr_c и тонкой коры толщины ε на поверхности. Тогда временная компонента метрики в этой промежуточной области, как известно, приобретает очень простой вид:

$$g_{00}(r) = \frac{r}{r_b} \left(1 - \frac{2GM(r_b)}{r_b} \right) = \frac{4}{7} \frac{r}{r_b}, \quad \delta r_c < r < r_b - \varepsilon, \quad (9)$$

так что вблизи поверхности коэффициент замедления времени $g_{00}^{-1/2}(r_b)$ конечен, а вблизи ядра очень большой $g_{00}^{-1/2}(\delta r_c) \sim g_{00}^{-1/2}(r_b) / \delta r_c^{1/2}$.

Если сжатие в первом приближении считать адиабатическим с установлением теплового равновесия, то локальная температура $T(t)$ меняется как:

$$T(t) = g_{00}^{-1/2}(t) T_0 = b \frac{T_0}{r^{1/2}}. \quad (10)$$

На самой поверхности должно быть Швацшильдовское значение метрики, что даёт для красного смещения рост $z \sim e^{t/r_g}$ и это значение будет наименьшим из всех слоёв звезды. Рост локальной температуры во внутренних слоях более сильный и поэтому также будет пропорциональным z на поверхности:

$$T(t) = \frac{T_0}{\sqrt{g_{00}(t)}} \sim e^{t/r_g} T_{0b} \sim z T_{0b}. \quad (11)$$

При таком экспоненциально быстром росте z на поверхности с таким же ростом локальных температур, вещество звезды переходит в горячую радиационно-доминирующую фазу и локальные значения давления также растут экспоненциально:

$$p(t) \sim T^4(t) \sim e^{4t/r_g} p_0. \quad (12)$$

Рост локальной температуры открывает каналы реакций *превращений частиц*, а также ведёт к *фазовым переходам*. Выделение энергии при этих реакциях и фазовых переходах может привести к стабилизации звезды на каком-то равновесном значении параметров или же к обратному расширению.

При переходе сначала центральных, а затем и верхних слоёв в кварковую фазу с выделением энергии, позволяющей остановить сжатие или привести к большим выбросам и взрыву звезды, участок звёзды с кварковой материей из *u, d* кварков имеют примерно на 1/3 большую энергию, чем нейтронная материя. Эта энергетическая щель позволяет рассматривать модель лёгких кварковых звёзд как возможное объяснение для части компактных объектов тяжелее нейтронных звёзд.

В литературе есть немало свидетельств, что при численном моделировании с использованием как данного, так и других уравнений состояния, такой шар может переходить к состоянию расширения. Более подробное рассмотрение результатов численного анализа будет приведено в последующих публикациях.

4. Глоузары и релятивистские сверх(гипер)новые в астрофизике

Экспоненциальный рост локального давления характерен для взрывных процессов и свидетельствует о том, что когда существенная часть энергии сжатия трансформируется в тепло, а затем в излучение, то остановка с образованием глоузара и обратное расширение со вспышкой жёсткого излучения (барст) не только становятся вполне вероятными, но и видимо даже неизбежными.

Перечислим далее некоторые общие свойства глоузаров, которые следуют из их определения как квазистабильного состояния при очень сильном замедлении времени и росте локальной температуры:

1. Глоузары имеют более высокие локальные давления и температуры, чем нейтронные звёзды и поэтому будут источниками «квазиреликтовых» фотонов и нейтрино;

2. В квазарах и активных ядрах галактик гравитационно-застывшее вещество будет сверхплотным только в компактных центральных частях, а в целом сверхмассивные фрозары и глоузары будут иметь сложную внутреннюю структуру с веществом в различных фазовых состояниях, включая и гравитационно-застывшие слои.

3. Появляется новый механизм синтеза тяжёлых элементов, который может происходить не только при кратковременных вспышках сверхновых без гравитационного замедления времени, но также и в глоузарах за существенно более длительное время с последующим выбросом при релятивистском взрыве.

Если же уравнение состояния ведёт к обращению сжатия с переходом в разжатие, то на конечной стадии, когда переход темпа собственного времени к темпу мирового времени происходит экспоненциально быстро, глоузар переходит в состояние релятивистского взрыва, став релятивистским сверхновым или гиперновым. Размораживание темпа собственного времени в объекте с радиационно-доминированным веществом приводит к мощнейшему всплеску излучения с поверхности, расширяющейся с релятивистской скоростью.

Перечислим далее некоторые свойства глоузаров и релятивистского взрыва, которые следуют из их основных отличительных черт:

1. Потери энергии из-за различных эффектов, вспышки и взрывы при внутренних фазовых переходах (также продлённых во времени) могут привести к их медленному «испарению» или (на конечной стадии) быстрому «размораживанию» в виде релятивистских сверхновых с сильным фиолетовым смещением из-за большой скорости расширения.

2. В квазарах и ядрах галактик гравитационно-застывшее вещество будет сверхплотным только в компактных центральных частях, в целом сверхмассивные фрозары и глоузары будут иметь сложную внутреннюю структуру с веществом в различных фазовых состояниях, включая и гравитационно-застывшие слои.

3. ОТО даёт новый механизм взрыва сверхновых и гиперновых звёзд с синтезом тяжёлых элементов при релятивистском взрыве.

4. Кратковременные *гамма всплески* большой мощности в некоторых случаях могут быть связаны именно с релятивистским взрывом. Отличительной чертой таких объектов является тот факт, что выделение энергии при этом будет сопоставим с энергией покоя вещества и существенно превосходит энерговыделение обычных кварк-адронных взаимодействий (ядерный синтез или кварковая материя).

5. Поток излучения от расширяющейся с релятивистскими скоростями плазмы (протоны, ядра) станет более жёстким из-за сильного фиолетового смещения. Сильное гравитационное красное смещение фотонов при этом уменьшит оценку мощности всплеска и увеличит оценку удалённости источника.

Заключение

Итак, с одной стороны, компактные релятивистские объекты с *жёстким* уравнением состояния, препятствующим гравитационному *сжатию*, из-за замедления всех процессов, переходят в состояние, у которого может иметь место стабилизация с остановкой сжатия (глоузар) или обратное расширение с размораживанием собственных времён (релятивистский взрыв).

Наблюдаемые четыре типа релятивистских астрофизических объектов (от звёздных масс до квазаров) в целом могут быть интерпретированы в рамках ОТО

22 Закир З. (2012) *Теоретическая физика, астрофизика и космология* **7**, 16; ТФАК: 4100-025

как фрозары и глоузары с различной внутренней структурой и достаточно нетривиальным окружением.

Литература

1. Закир З. (2006) *Теор. физ., астрофиз. и космол.*, **1**, 3, с. 51; (2007) **2**, 1, с. 1; [arXiv:0507.2585](https://arxiv.org/abs/0507.2585).
2. Закир З. (2012) *Теор. физ., астрофиз. и космол.*, **7**, 1, с. 1.