СМЕНА РЕЛЯТИВИСТСКОГО КОЛЛАПСА АНТИКОЛЛАПСОМ И КИНЕМАТИКА ЗАРЯЖЕННОГО ШАРА

И.Д.Новиков

Релятивистский гравитационный коллапс сферической звезды заканчивается, как известно [1], асимптотическим (при $t \to \infty$) застыванием для внешнего наблюдателя процесса сжатия на гравитационном радиусе $r \longrightarrow r_g = 2Gm/c^2$. Отклонения от точной сферической симметрии не меняют этого вывода [2].

В собственном времени звезда за конечное время достигает R_g и продолжает сжиматься дальше. Вследствие неустойчивости сферического сжатия возмущения неограниченно нарастают. Какова дальнейшая судьба вещества звезды, может ли общее сжатие перейти в расширение, проходит ли вещество при этом через бесконечную (формально) плотность? Пенроуз [3] показал, что под сферой Шварцшильда неизбежно возникновение истинных особенностей пространства времени, но достигает ли все вещество $\rho = \infty$, не было выяснено. В работах [2,5] показано, что звезда не может вновь расшириться (хотя бы даже несимметричным образом) так, чтобы выйти из-под сферы Шварцшильда ($r = r_g$) в область, доступную наблюдению того же внешнего наблюдателя [1], который видит ее коллапс в течение бесконечного своего времени.

Целью настоящей заметки - показать, что расширение звезды после сжатия все же происходит и звезда выходит из-под сферы Шварцшильда, но в другую внешнюю область (эвклидову на бесконечности), одинаковую по своим свойствам с первой внешней областью и лежащую по отношению к ней в абсолютно будущем [2].

Для того чтобы показать это, рассмотрим коллапс шара из заряженной пыли. Такой прием позволит нам изучить, как происходит смена сжатия расширением внутри сферы Шварцшильда в строго сферической задаче, без прохождения вещества через бесконечную плотность (кроме частицы в центре).

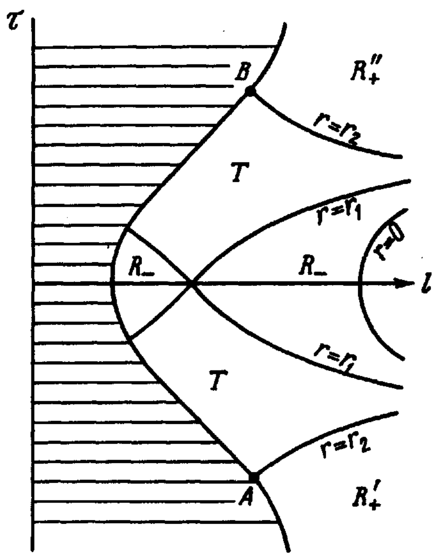
Будем считать, что вещество шара первоначально разрежено. Шар имеет однородное распределение заряда и заряд не перераспределяется по веществу в ходе коллапса.

Исследуем сначала движение точки поверхности шара. Движение этой точки может рассматриваться как движение заряженной пробной частицы во внешних гравитационном и электрическом полях заряженного шара, определяемых известной метрикой Нордстрема

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r} + \frac{G\varepsilon^2}{c^4 r^2}\right)dt^2 - \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r} + \frac{G\varepsilon^2}{c^4 r^2}\right)dr^2 -$$

$$- r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\right),$$

где m - масса шара, ε - его заряд, $m > \varepsilon / G^{1/2}$. Компонента g_{00} обращается в ноль при двух значениях $r = r_1, r_2$; $(r_1 < r_2)$; r_2 - соответствует гравитационному радиусу решения Шварцшильда. Область $r > r_2$ - это обычное пространство вне шварцшильдовой сферы ($r = r_2$), на бесконечности переходящее в галилеево. Будем называть ее R_+ - областью. Область $r_1 < r < r_2$ - так называемая T - область [5] ; область - $r < r_1$ назовем внутренней R_- - областью. Истинная особенность пространства - времени r = 0 имеет пространственный характер и лежит в R_- - области.



Сжатие и расширение заряженного шара: τ - временная координата, l - пространственная радиальная координата

Полная структура пространства-времени Нордстрема дана в [7] . Существенно, что это пространство-время должно состоять из бесконечного счетного множества R_+ - областей, чередующихся с T - и R_- - областями (часть полного пространства Нордстрема изображена на рисунке, подробнее см. [7]). Метрика носит "осциллирующий" характер. Это означает, что пробная частица (в частности заряженная), падая к меньшим r , уходит под гравитационный радиус r_2 , но не достигает r = 0, поворачивает в R_- - области и движется к большим r (см. рисунок). Обратим внимание, что поверхность шара после пересечения $r = r_2$ в точке А на рисунке никогда не появляется снова в той же области R'_+, а выходит из-под $r = r_2$ в точке B уже в другой области R''_+, лежащей по отношению к R'_+ в абсолютно будущем.

Область внутри шара решением Нордстрема не описывается и на рисунке заштрихована. Движение любой частицы шара происходит только под действием m и $\mathcal{E}$, заключенных внутри сферы, проведенной через частицу. Качественно движение такое же, как и поверхности, частицы не достигают $r = 0$. Из уравнений Эйнштейна следует, что при равномерно распределенном заряде[3] бесконечная плотность не достигается (кроме частицы $r = 0$), смена сжатия расширением неодновременна, начинается на краю шара и движется к центру. Максимальное сжатие каждого слоя: $\rho \approx c^6 \frac{m^4}{\mathcal{E}^6}$. Вне заряженного шара в вакууме есть истинная особенность $r = 0$ (см. рисунок).

Если колебания шара продолжаются неограниченное число раз, то необходимо рассматривать бесконечное число R_+ - областей.

Как уже отмечалось, введение заряда является искусственным приемом, указывающим на характер решения. Можно предполагать, что в общем случае нейтрального вещества рост возмущений при сжатии (или процессы при $\rho > 10^{93}$ г/см^3) переводят сжатие вещества в расширение, но в расширение в другое (в известном смысле) внешнее пространство.

Отделение прикладной математики
Математического института
им. В.А.Стеклова
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
24 января 1966 г.

Литература

[1] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля, Физматгиз, 1962.

[2] А.Г.Дорошкевич, Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков. ЖЭТФ, 49, 170, 1965.

[3] R.Penrose, Phys. Rev. Lett., 14, 57, 1965.

[4] Д.Уилер. Гравитация, нейтрино и Вселенная, М., Изд.иностр.лит., 1962.

[5] И.Д.Новиков. Сообщения ГАИШ, № 132, 3, 1964.

[6] И.Д.Новиков. Астрон.ж., 41, 1075, 1964.

[7] J.C.Graves, D.R.Brill. Phys. Rev., 120, 1507, 1960.

---

1) Предполагается, что наблюдатель всегда находится вдали от звезды, где поле слабо. Во фридмановской космологической модели это не так; вопрос о смене сжатия звезды расширением в этом случае рассмотрен в [6].

2) Подчеркнем, что эти внешние пространства в принципе отличаются от пространств, сшиваемых через топологические "ручки" Уилера [4]. Последние можно соединить одним пространственноподобным сечением.

3) В случае заряда, сосредоточенного в центре, уравнения полностью интегрируются [8]. При этом неизбежны пересечения пылинок.