Письма в ЖЭТФ, том 41, вып. 10, стр. 446 – 449 *25 мая 1985 г.*

ХАОТИЧЕСКАЯ ИНФЛЯЦИЯ И ГЛОБАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

В.А.Березин, В.А.Кузьмин, И.И.Ткачев

Мы показали, что раздувающаяся флуктуация в ранней Вселенной является или кротовой норой (что возможно как в замкнутой, так и в открытой Вселенной); или флуктуация занимает больше половины замкнутой Вселенной. Другие возможности крайне экзотичны.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию пузырей, возникающих в космологических фазовых переходах [1 – 9]. Это могут быть пузыри новой фазы в недрах старой [1 – 3, 5 – 9], или остатки старой фазы в окружении новой [4, 5, 9]. Ясно, что при исследовании таких объектов необходим учет эффектов общей теории относительности [3 – 6, 9]. Теории раздувающейся Вселенной, по существу, также являются теориями эволюции пузырей [10 – 12], даже если вся видимая часть Вселенной находится внутри одного пузыря [11 – 12]. К исследованию пузырей можно применить метод тонких оболочек [13], развитый в [5] применительно к пузырям, возникающим при космологических фазовых переходах.

Материя в раздувающейся области описывается вакуумным уравнением состояния. В сценарии хаотической Вселенной [12] раздувается область, занятая флуктуацией скалярного поля (давление в этой области меньше нуля, $p < 0$), которая окружена фазой с большим давлением, $p_{out} > p_{in}$ в частности, $p_{out} > 0$. Такая же ситуация могла бы возникнуть и в сценарии [11], если протекание но новой фазе в соответствующем фазовом переходе наступает раньше, чем достигаются условия для раздувания [14]. Ясно, что если эффекты гравитации не велики, такой пузырь схлопнется. То, что масштабный фактор во внутренней области экспоненциально растет со временем $a \sim \exp(H.t)$ не имеет, по существу, никакого значения – это координатный эффект. Важно знать, как увеличивается физический объем пузыря $V_{\text{физ}} = V_{\text{коорд}}(t) \exp(3Ht)$. Поскольку $V_{\text{коорд}}(t)$ может стремиться к нулю, $V_{\text{физ}}$ также может стремиться к нулю, несмотря на "раздувающую" экспоненту. Именно это и происходит при коллапсе остатков старой фазы с образованием черных дыр [5]. С другой стороны, ясно, что если область, занятая флуктуацией, больше, чем внутренний хаббловский радиус $1/H$, то оболочка, двигаясь со скоростью, меньшей скорости света, не может сжаться, пока справедливо вакуумное уравнение состояния во внутренней области (т. е. по крайней мере до значения времени раздувания $\tau \sim 60/H$). Однако, в этом случае физический размер области, занятой флуктуацией, также велик, и не может вместиться в произвольную приготовленную для нее Вселенную. В такой ситуации эффекты гравитации в переходном слое крайне существенны и требуют детального анализа.

Для исследования пространственно-временной структуры возникающей конфигурации удобно записать метрику в нормальных гауссовых координатах:

$$ds^2 = - dn^2 + e^{\nu} d\tau^2 - r^2(\tau, n)\, d\Omega^2 \qquad (1)$$

связанных с оболочкой пузыря таким образом, что уравнение оболочки имеет вид $n = 0$ и $\nu(\tau, n = 0) = 0$, так что при $n = 0$ координата τ совпадает с собственным временем на этой оболочке.

В искривленном пространстве-времени вектор нормали к поверхности $r = \text{const}$ может быть как пространственноподобным, так и времениподобным. В первом случае

$$\Delta \equiv g^{\alpha\beta} r_{,\alpha} r_{,\beta} < 0 \qquad (2)$$

и соответствующая область пространства-времени называется R-областью (в плоском пространстве-времени R-область охватывает все многообразие). Во втором случае

$$\Delta > 0. \qquad (3)$$

Такая область называется T-областью.

Основным уравнением при исследовании движения стенки пузыря является следующее уравнение [5]:

$$\sigma_{in}\sqrt{\dot{\rho}^2 + 1 - \rho^2/a_{in}^2} - \sigma_{out}\sqrt{\dot{\rho}^2 - \Delta} = 4\pi\kappa\rho S_0^0 , \tag{4}$$

где $\rho \equiv r(\tau, n = 0)$, $a_{in}^{-2} = 8\pi\kappa\epsilon_{in} r^2/3$, ϵ_{in} – плотность энергии внутри пузыря, $\sigma \equiv \equiv \operatorname{sign}(\partial r/\partial n)$, κ –гравитационная постоянная, а S_0^0 есть поверхностная плотность энергии на оболочке. В R-областях также $\sigma = \operatorname{sign}\frac{\partial r}{\partial q}$ для любой пространственной координаты q, значение которой возрастает при удалении от центра пузыря.

Докажем следующее.

Утверждение. Оболочка может раздуваться только в T-области бесконечного расширения или в R_--области внешней метрики.

Действительно, оболочка не может раздуваться в T_--области, поскольку в этом случае физический объем области, занятой флуктуацией, убывает. Далее, размер раздувающейся флуктуации в некоторый момент времени превышает внутренний хаббловский радиус

$$-\Delta_{in} = 1 - \frac{\rho^2}{a_{in}^2} < 0 \tag{5}$$

откуда следует, что оболочка пересекает T-область внутренней метрики. Тогда из уравнения (4) и условий $S_0^0 > 0$, $\sigma_{out} > 0$ получаем $\Delta_{out} > 0$. Это означает, что оболочка не может одновременно находиться в R_+-области внешней метрики и в T-области внутренней метрики.

Если граница флуктуации движется во внешней R_--области, то конфигурация в целом эквивалентна или кротовой норе (что возможно как в замкнутой, так и в открытой внешней Вселенной), или же флуктуация занимает больше половины замкнутой Вселенной (см. рис. 1, рис. 3).

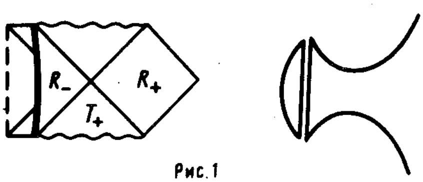

Рис. 1

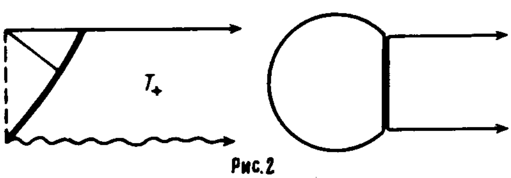

Рис. 2

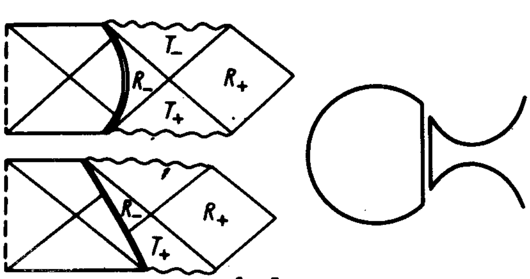

Рис. 3

Рис. 1 – 3. Глобальная геометрия пространства-времени, содержащего раздувающуюся область. Справа каждой из диаграмм Пенроуза схематически показано соответствующее пространственное сечение в некоторый момент времени. Ради простоты мы ограничились изображением только ближайшей R_+-области, лежащей справа от оболочки (оболочка всюду обозначена двойной линией)

Если наружная область вблизи оболочки представляет собой T-область безграничного расширения, то при движении по ней (например, световых лучей) в сторону возрастания радиальной координаты может встретиться либо R_--область, либо R-областей в этой метрике вообще не существует. Этот факт (доказательство которого мы здесь опускаем) связан, видимо, с известными теоремами о положительности энергии, потому что в противном случае наблюдатель, находящийся в R_+ -области, видел бы возникновение энергии из ничего.

Существо дела можно пояснить также следующим простым рассуждением. Пусть мы имеем флуктуацию размером r с плотностью энергии ϵ. Флуктуация не должна находиться под своим гравитационным радиусом (исключая случай, изображенный на рис. 2), т. е. $r > r_g = 2\kappa m$. Для массы же этой флуктуации, отбрасывая кинетическую энергию, имеем $m > \frac{4\pi}{3} \epsilon r^3 > 32\pi\kappa\epsilon m^3/3$. Следовательно, необходимым условием раздувания является неравенство $m^2 < 3M_{pl}^6/32\pi\epsilon$. С другой стороны, размер раздувающейся флуктуации больше обратного хаббловского радиуса $a = \sqrt{\frac{3}{8\pi\epsilon}} M_{pl}$ внутренней метрики де Ситтера, поэтому при не слишком большом гравитационном дефекте массы имеем: $m > \frac{4\pi}{3} \epsilon a^3$. Отсюда получаем $m^2 > \frac{3}{32\pi\epsilon} M_{pl}^6$. Возникшее противоречие и означает, что флуктуация образует кротовую нору (полузамкнутый мир, где существенен гравитационный дефект массы).

Таким образом, исследование глобальной геометрии Вселенной показывает, что "флуктуация" в хаотически раздувающейся Вселенной может раздуваться, только если она занимает больше половины замкнутой Вселенной или глобальная геометрия Вселенной соответствует одному из случаев, изображенных на рисунках 1 – 3. На рис. 1 и рис. 3 флуктуация образует кротовую нору, которая представляет черную дыру как для внешней Вселенной (закрытой или открытой), так и для внутренней Вселенной. Такая черная дыра испаряется, отщепляя внутреннюю Вселенную от внешней, и, следовательно, делая внутреннюю Вселенную замкнутым миром.

Кротовые норы, изображенные на рис. 1 и рис. 3 и геометрия, представленная на рис. 2, требуют задания специальных граничных условий уже в сингулярности. Это не кажется привлекательным, напротив, вполне разумно задать вопрос, может ли кротовая нора образовываться в процессе эволюции Вселенной.

Нам представляется наиболее привлекательным следующий сценарий. Раздувающаяся Вселенная замкнута и с самого начала заполнена классическим скалярным полем. Такие начальные условия, возможно, возникают при квантовом рождении Вселенной (о квантовом рождении см. [15]). В работе [16] приведены аргументы в пользу того, что вследствие баланса между (отрицательной) гравитационной энергией и (положительной) энергией возбуждений материи туннельный переход приводит к возникновению относительно горячей Вселенной. Мы можем предположить, что возникновение Вселенной в возбужденном состоянии является довольно общим свойством туннельных переходов в квантовой гравитации, и поэтому Вселенная действительно рождается *полностью* заполненной гладким скалярным полем.

Авторы благодарны В.А.Матвееву, В.А.Рубакову, А.Н.Тавхелидзе и М.Е.Шапошникову за интерес к работе и обсуждения.

Литература

1. *Волошин М.Б., Кобзарев И.Ю., Окунь Л.Б.* 1974, **ЯФ**, **20**, 1229.
2. *Coleman S.* Phys. Rev., 1977 , **D15**, 2922.
3. *Coleman S., DeLuccia F.* Phys. Rev., 1980, **D21**, 3305.
4. *Sato K., Sasaki M., Kodama M., Maeda K.* Prog. Theor. Phys., 1981, **65**, 3.
5. *Berezin V.A., Kuzmin V.A., Tkachev I.I.* Phys. Lett., 1983, **120B**, 91.
6. *Berezin V.A., Kuzmin V.A., Tkachev I.I.* Phys. Lett., 1983, **130B**, 23.
7. *Berezin V.A., Kuzmin V.A., Tkachev I.I.* Phys. Lett., 1983, **124B**, 479. *Березин В.А., Кузьмин В.А., Ткачев И.И.* ЖЭТФ, 1984, **86**, 785.
8. *De Grand T., Kajantie K.* Phys. Lett., 1984, **147B**, 273.
9. *Aurilia A., Denardo G., Legovine F., Spallucci E.* Phys. Lett., 1984, **147B**, 258.
10. *Guth A.H.* Phys. Rev., 1981, **D23**, 347.

11. *Linde A.D.* Phys. Lett., 1982, **108B**, 382; *Albrecht A., Steinhardt P.J.* Phys. Rev. Lett., 1982, **48**, 1220.
12. *Линде А.Д.* Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, 176.
13. *Israel W.* Nuovo Cim., 1966, **44B**, 1; 1967, **48**, 463.
14. *Mazenko G.F., Unruh W.G., Wald R.M.* Phys. Rev., 1985, D31, 273.
15. *Зельдович Я.Б.* Письма в ЖЭТФ, 1981, 7, 579; *Зельдович Я.Б., Старобинский А.А.* Письма в АЖ, 1984, 10, 323; *Марков М.А.,* Доклад на III международном семинаре "Квантовая теория гравитации". М. 1984.
16. *Рубаков В.А.* Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 89.

Институт ядерных исследований
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 апреля 1985 г