

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В.
ЛОМОНОСОВА ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Первородные чёрные дыры в ранней Вселенной

Курсовая работа студента 2 курса 217 группы
Николаева Александр Владимировича

Научный руководитель:
член-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор
Горбунов Дмитрий Сергеевич

- Краткое введение
- Механизмы образования
- Первородные чёрные дыры
как тёмная материя

Первородные чёрные дыры

- Образуются во времена ранней Вселенной, в первые секунды после большого взрыва
- Не имеют ограничения на массу, в отличие от обычных чёрных дыр
- $M_{PBH} \lesssim 10^{15} g$ испарились бы к нашему времени
- Могут выступать в роли кандидата на тёмную материю
- Первородные чёрные дыры (PBH — primordial black holes)

Почему РВН важны

- $M_{РВН} \leq 10^{15} g$ — Зонд в раннюю Вселенную: фазовые переходы, неоднородности, инфляция
- $M_{РВН} \approx 10^{15} g$ — Зонд в физику высоких энергий: взрыв РВН, космические лучи
- $M_{РВН} > 10^{15} g$ — Зонд в гравитацию и «тёмную сторону»: тёмная материя, тёмная энергия

Коллапс пертурбаций плотности

Во время радиационно минированной стадии изначальные пертурбации плотности могут коллапсировать, образуя РВН, с массой порядка горизонта

- Уравнение состояния: $p = \gamma\rho$ Для РД стадии: $\gamma = \frac{1}{3}$
- Масса РВН: $M_{РВН} \approx \gamma^{3/2} M_H$

Дальнейшие работы находят связь, между массой РВН и величиной возмущений плотности

- Контраст плотности: $\delta = \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \quad \delta > \delta_c$
- Масса РВН: $M_{РВН} = kM_H(\delta - \delta_c)^\gamma$

Константы, которые вообще зависят от вида возмущений

$$\delta_c \approx 0.45 \quad \gamma \approx 0.36 \quad k \approx 3.3$$

$\delta < 1$ – Образуется РВН

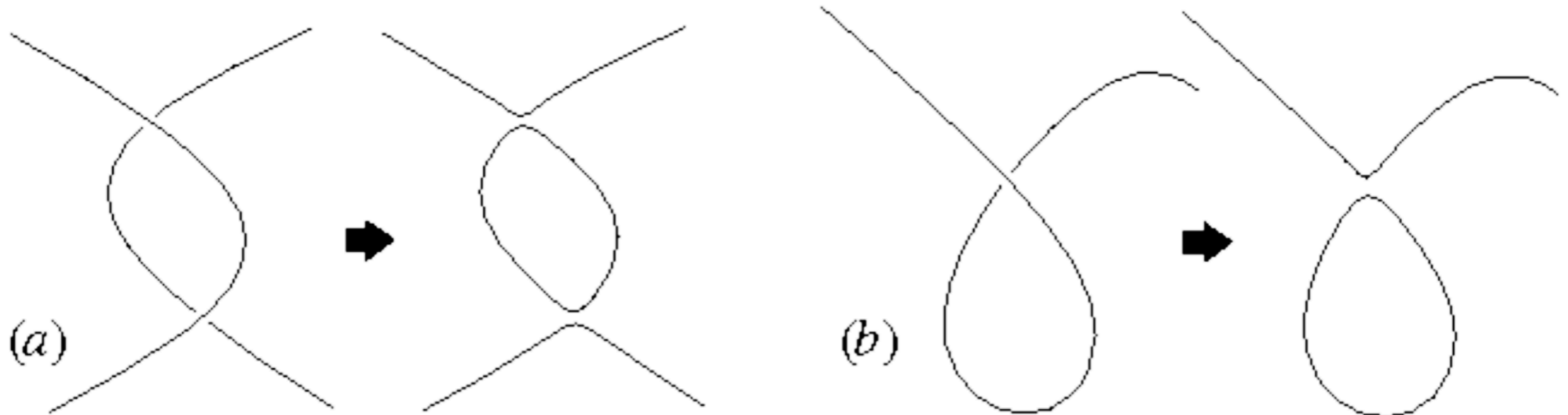
$\delta > 1$ – В результате коллапса может образоваться отдельная замкнутая Вселенная

Коллапс космических струн

Одномерные топологические дефекты

Энергия (масса) струны: $E = \mu l$

Общее поведение:



В результате из струн образуется замкнутая петля, которая под действием собственного натяжения сжимается и, достигая определённого размера, коллапсирует

$$R_g = 2GE = 2G\mu l$$

Выражение для массы: $M_{PBH_{str}} \approx (G\mu)m_{pl} \frac{t}{t_{pl}}$

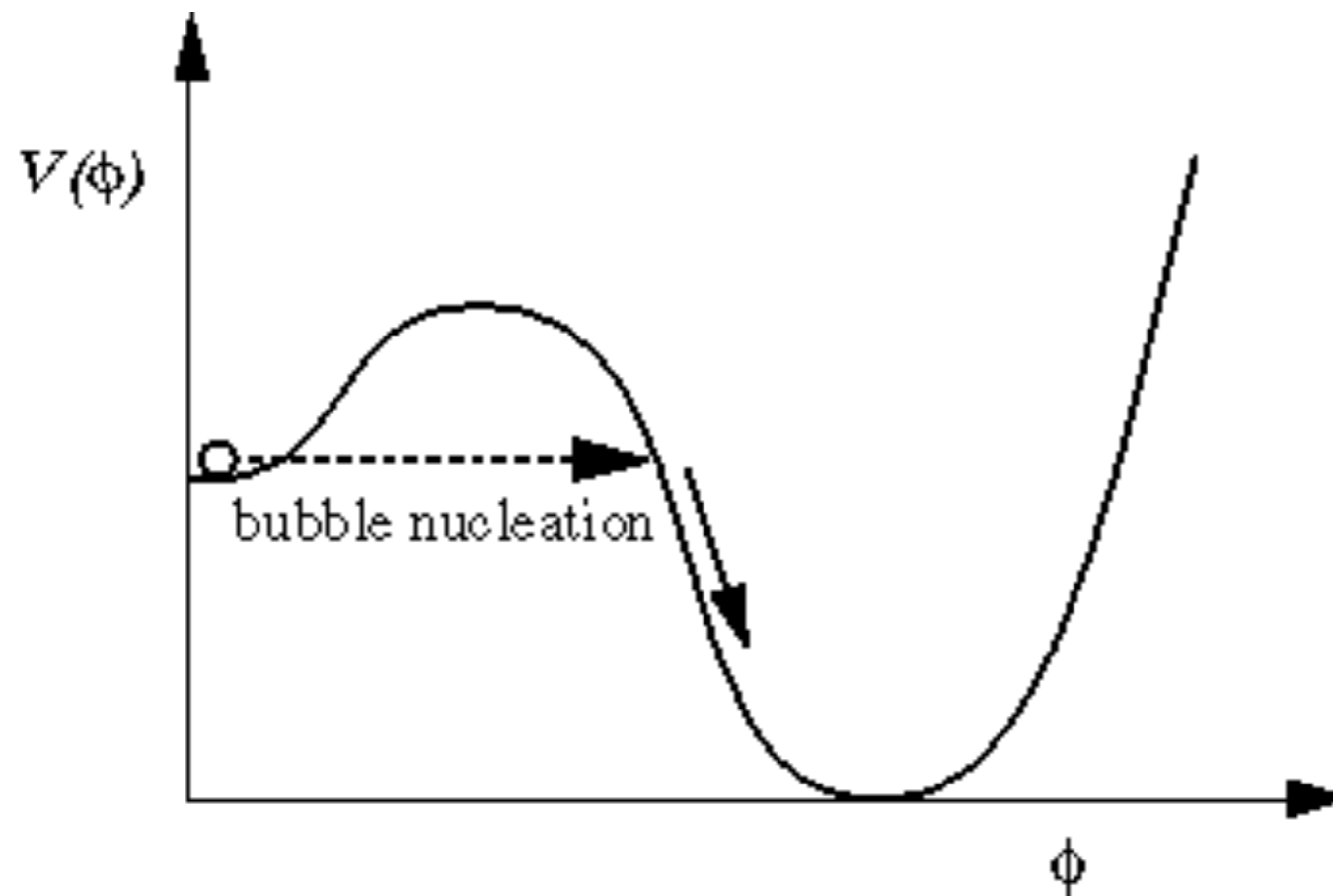
Условия для струны, чтобы образовалась PBH: $|J_{BH}| < GM^2 \Rightarrow G\mu \geq l^{-2} \int_0^l r \times \dot{r} dl$

$$G\mu < 10^{-6}$$

Столкновение пузырей

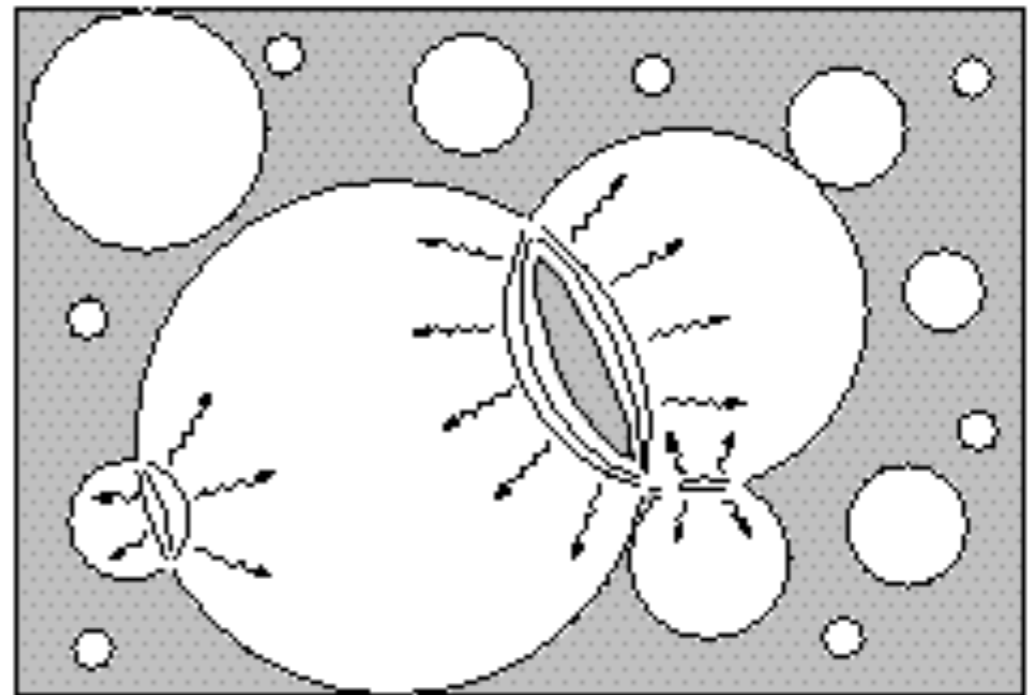
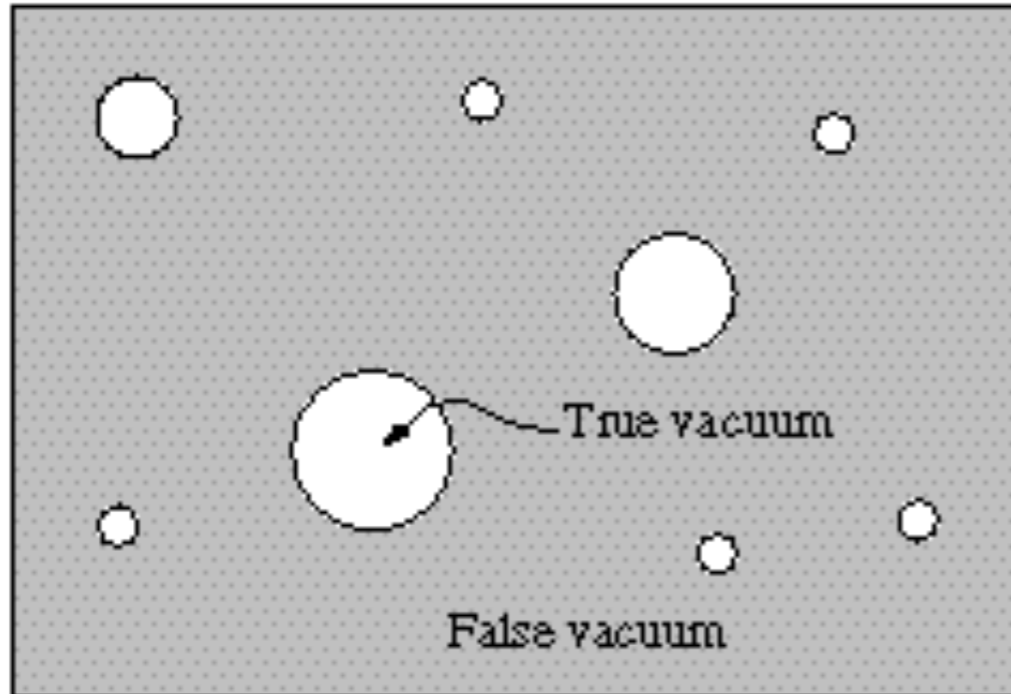
РВН, образовавшиеся в результате этого механизма имеют монохроматическую массовую функцию, поэтому опишем его только качественно

- В результате квантовых флуктуаций рождаются пузыри с новой фазой



1. Коллапс происходящий из-за столкновения сразу нескольких пузырей, которые замыкают между собой область ложного вакуума

2. Коллапс в результате столкновения только двух пузырьков



Первородные чёрные дыры как тёмная материя

- Так как радиация доминирует, то:

$$\frac{\rho_{PBH}}{\rho_{CMB}} \approx \frac{\Omega_{PBH}}{10^{-4}} \left[\frac{R}{R_0} \right] \approx \frac{\Omega_{PBH}}{10^{-4}} \left(\frac{1}{1+z} \right) \quad , \text{где } \Omega_{PBH} = \frac{\rho_{PBH}}{\rho_{crit}}$$

- Используя связь красного смещения со временем и массой PBH, можно получить более удобную зависимость

$$\frac{\Omega_{PBH}}{10^{-4}} \left(\frac{1}{1+z} \right) \approx 10^{-6} \Omega_{PBH} \left[\frac{t}{1s} \right]^{1/2} \approx 10^{-18} \Omega_{PBH} \left[\frac{M_{PBH}}{10^{15}g} \right]$$

- Тогда для отношения β в момент формации PBH получаем

$$\beta < \Omega_{PBH} \left[\frac{t}{1s} \right]^{1/2} \approx 10^{-18} \Omega_{PBH} \left[\frac{M_{PBH}}{10^{15}g} \right]^{1/2}$$

- Аналогичным образом можем найти долю, которую PBH составляют в тёмную материю.

$$f \equiv \frac{\Omega_{PBH}}{\Omega_{CDM}} \approx 4.8 \Omega_{PBH}$$

Спасибо за внимание