

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ИЗОТРОПНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

А. Д. Чернин

Ряд наблюдательных и теоретических аргументов определенно свидетельствует в пользу гипотезы [1, 2] о существовании развитой турбулентности метагалактической среды в эпоху образования галактик при средней плотности $\rho = \rho_G \approx 10^{-23} - 10^{-25} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ и возрасте мира $t = t_G \approx 10^{15} - 10^{16} \text{ сек}$. Прямая экстраполяция в прошлое ($t < t_G$) представлений о метагалактической турбулентности приводит к заключению об анизотропном, нефридмановском характере ранней фазы космологического расширения [3, 4], что эквивалентно "изначальному" существованию сильных турбулентных вихревых движений, определявших метрические свойства пространства – времени. Однако анализ гидродинамики "горячей" Вселенной в условиях, когда плотность излучения ρ_r превосходит плотность вещества ρ , дает основание для принципиально иного решения проблемы ранней фазы расширения. Мы покажем, что состояние развитой метагалактической турбулентности не обязательно существовало "изначально"; оно могло возникнуть в период рекомбинации космической плазмы благодаря малым (в указанном ниже смысле) движениям потенциального, или акустического, типа. Эти движения – в противоположность вихревым – совместимы с изотропией метрики на всех фазах расширения.

Эволюция потенциальных движений, наложенных на регулярное космологическое расширение, состоит из следующих трех стадий: 1) гравитационная неустойчивость: увеличивающаяся скорость движений $v \propto t^{3/2}$ при неизменных во времени возмущениях метрики, когда характерный масштаб движений ℓ превосходит критическую джинсову длину $\ell_j \approx v(G\rho)^{-1/2}$ (здесь v – скорость звука, $v = v_0 = c/\sqrt{3}$ при $\rho_r > \rho$); 2) превращение движений в звуковые волны постоянной амплитуды, которым отвечают убывающие со временем возмущения метрики и длина волны ℓ , меньшая ℓ_j ; 3) гидродинамическая неустойчивость.

Переход от стадии 1) к стадии 2) определяется тем, что отношение $\ell/\ell_j \propto t^{-1/2}$ убывает в ходе расширения. При этом, согласно общей теории [5], рассматриваемые движения создают лишь малое возмущение в изотропном мире (т. е. относительная величина отклонения метрики от фридмановской всегда меньше единицы), если на фазе 2) амплитуда скорости не слишком близка к скорости звука v_0 :

$$v < (1/10)v_0 \approx 2 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}. \quad (1)$$

Фаза 3) обязана физическим явлениям в "горячем" мире, не учитываемым теорией [5] и ее космогоническими приложениями [6–8]. Гидродинамическая неустойчивость возникает в период резкого падения скорости звука в веществе из-за прекращения при рекомбинации ($t = t_r \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ сек}$) его взаимодействия с реликтовым излучением [3], если скорость движений оказывается больше новой скорости звука v_1 , а характерное время гидродинамических процессов $t_g \approx e/v$ не превосходит возраст мира:

$$v > v_1, \quad e/v \lesssim t_r. \quad (2)$$

Здесь $u_1 \approx (k T_r / m)^{1/2} \approx 5 \cdot 10^5 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$, $T_r \approx 3 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{К}$ — температура рекомбинации, m — масса атома водорода.

При выполнении условий 2) звуковые волны становятся неустойчивыми и движения переходят в новый режим, при котором они порождают в ударных волнах значительные неоднородности плотности, а также и вихревые движения, что отвечает картине развитой "сжимаемой" турбулентности.

Условия (1) и (2) совместны, если

$$l < l_0 = (1/10) u_0 t_r \quad (3)$$

Верхнему пределу l_0 гидродинамически неустойчивых масштабов (3) отвечает масса

$$M_0 = 4 \pi / 3 \rho(t_r) l_0^3 \approx 3 \cdot 10^{14} M_\odot ,$$

близкая к массе больших скоплений галактик. Обратим внимание на то, что величина M_0 заметно превосходит границу действия диссипативных процессов [9, 10].

Соотношения (1) — (3) показывают, таким образом, что рассматриваемые здесь "затравочные" движения совместимы с изотропией мира в ранние эпохи ($t \rightarrow 0$) и в то же время способны обеспечить состояние развитой сжимаемой турбулентности при $t \gtrsim t_r$.

Гидродинамическая неустойчивость дает начало активной фазе космогонического процесса в "горячей" Вселенной. Но подавляющая часть создаваемых ею сгущений вещества далеко не сразу превращается в гравитационно-связанные системы. Этому препятствуют как интенсивное перемешивание, обязанное гидродинамическим движением [3], так и диссипация кинетической энергии этих движений, способная создать при $t \gtrsim t_r$ столь сильный разогрев вещества, что степень ионизации вновь поднимается до значения, при котором восстанавливается взаимодействие с излучением, и в пределах джинсовой длины оказывается заключенная масса, превосходящая M_0 . Второй из этих факторов действует, однако, не дольше, чем до того момента, когда время свободного пробега кванта — даже при полной ионизации — становится больше возраста мира. В этот момент, как легко видеть, средняя плотность и космологический возраст находятся как раз вблизи указанных выше значений ρ_G , t_G . При таких условиях становится возможным формирование звездного населения космических систем; что же касается плотных объектов (ядер галактик, квазаров), на которые приходится лишь небольшая доля полной массы, то они, в принципе, могли возникнуть и ранее в тех областях среды, где турбулентные флуктуации создали благоприятные — отличные от средних — условия для гравитационной конденсации.

Автор благодарен Л.Э.Гуревичу за обсуждение.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 ноября 1969 г.
После переработки
18 февраля 1970 г.

Литература

- [1] C.F.von Weizsäcker. *Astrophys. J.*, 114, 165, 1951.
- [2] G.Gamow. *Phys. Rev.*, 86, 251, 1952.
- [3] Л.М.Озерной, А.Д.Чернин. Письма в ЖЭТФ, 7, 436, 1968; *Астрон.ж.*, 45, 1137, 1968.
- [4] А.Д.Чернин. *Астрофизика*, 5, 656, 1969.
- [5] Е.М.Лифшиц. *ЖЭТФ*, 16, 587, 1946.
- [6] А.Г.Дорошкевич, Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков. *Астрон.ж.*, 44, 295, 1967.
- [7] P.J.E.Peebles, R.H.Oicke. *Astrophys. J.*, 154, 891, 1968.
- [8] E.R.Harrison. *Rev. Mod. Phys.*, 39, 862, 1967.
- [9] Л.М.Озерной, А.Д.Чернин. *Астрон.ж.*, 44, 1131, 1967.
- [10] J.Silk. *Astrophys. J.*, 151, 459, 1968.