

- 05

- 23438

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ АН СССР

На правах рукописи

Р. А. СЮНЯЕВ

МЕЖГАЛАКТИЧЕСКАЯ СРЕДА

Автореферат диссертации,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель,
академик Я. Б. Зельдович

Т05144 от "8" марта 1968 г. ЗАКАЗ № 477 ТИРАЖ 200

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
МОСКВА, МИУССКАЯ ПЛ., 4

Москва, 1968.

БИБЛИОТЕКА
ИНСТИТУТА КОСМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ АН СССР

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте.

Научный руководитель – академик АН СССР Я.Б.Зельдович

Официальные оппоненты: профессор С.Б.Пикельнер

и доктор физ.-мат.наук Н.С.Кардашов,

Ведущее предприятие: Физический Институт им.Лебедева
АН СССР

Автореферат разослан " " 1968 г.

Защита диссертации состоится 18 апреля 1968 г.
на заседании Совета Государственного Астрономического
Института им.П.К.Штернберга при МГУ им.Ломоносова по ад-
ресу: Москва, Университетский просп.д.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ.

Ученый секретарь Совета ГАИШ

Г.С.Хромов

Полученные А.А.Фридманом решения уравнений Эйнштейна неоднозначно предсказывают дальнейшую эволюцию Вселенной: если средняя плотность вещества во Вселенной больше критической величины

$$\rho_{\text{крит}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 2 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3 \quad (H_0 - \text{const Хэббла,}$$

G – постоянная тяготения), то мир замкнут и наблюдаемое сейчас расширение в дальнейшем сменится сжатием;

$\rho < \rho_{\text{крит}}$ – соответствует открытой модели и

расширение продолжается неограниченно. Несмотря на всеобщий интерес к вопросу о дальнейшей эволюции величина средней плотности вещества во Вселенной до сих пор неизвестна с достаточной точностью. Наблюдения характера разбегания галактик указывают на высокую среднюю плотность вещества во Вселенной: $\rho = (2 \pm 1) \rho_{\text{крит}}$. В то же время средняя плотность "видимого" вещества, сосредоточенного в галактиках, оценивается в $\rho_g \sim 5 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$.

Возможно, что избыточная плотность вещества объясняется наличием межгалактического газа – диффузной газовой среды более или менее равномерно распределенной в пространстве между галактиками. До сих пор нет ни одной экспериментальной работы, доказывающей или безоговорочно опровергающей справедливость этой гипотезы. Возможно, что в нашей окрестности при наличии старых галактик межгалактического газа нет. Однако мы должны проанализировать все доступные для наблюдения эффекты, связанные с межгалакти-

ческим газом и указать эксперименты, которые могут привести к его обнаружению или доказать его отсутствие. Как показал анализ, проведенный в диссертации, имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные данные позволяют лишь установить верхний предел его плотности, и этот предел пока очень высок,

$$\rho < 6 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3 = 3 \rho_{\text{крит}}$$

Интерпретация результатов отдельных экспериментов существенно зависит от предположений о температуре газа. В свою очередь каждый новый эксперимент приводит к уточнению физических условий, которые совместимы с той или иной плотностью межгалактического газа. В частности, доказано отсутствие значительной плотности нейтрального водорода, что совместимо с гипотезой межгалактического газа лишь в предположении высокой степени ионизации. Знание физических процессов в плазме малой плотности позволяет рассчитать возможные варианты теплового баланса газа, спектр его излучения и предложить критические эксперименты, которые выделят тот или иной вариант и позволят установить плотность газа. Таким образом задача о нахождении плотности межгалактического газа (и о последующей эволюции Вселенной) неразрывно связана с вопросом о его тепловой истории в период и после образования астрономических объектов.

Имеется также и другая сторона проблемы: современная космология располагает крайне скудными сведениями о

дозвездной стадии эволюции Вселенной.

До образования галактик был газ. Вторая тема нашей работы — это выяснение физических условий, свойств и эволюции вещества на стадии расширения до образования астрономических объектов.

С открытием 3-градусного реликтового излучения в космологии началась новая эра. Конечно, взаимодействие реликтового излучения с газом важно для баланса энергии межгалактического вещества, но более важно открытие чернотельного излучения для эволюционной космологии. Оно подтвердило горячую модель Вселенной, в которой утверждается, что была дозвездная стадия расширения, когда вещество во Вселенной представляло собой горячий, полностью ионизованный газ, находящийся в термодинамическом равновесии с излучением.

Какое же отношение имеет этот горячий первичный газ к ионизованной межгалактической среде, окружающей нас? Ведь расширение приводит к уменьшению температуры излучения, которая равна сейчас всего лишь 3°К.

Группа Я.Б. Зельдовича в СССР, Пибле и Веймани за границей считают, что первичный ионизованный газ остыл и рекомбинировал в смесь нейтральных водорода и гелия, спустя примерно миллион лет после начала расширения. Только значительно позднее часть этого нейтрального газа сконденсировалась в дискретные тела, которые, выделяя свою ядерную и гравитационную энергию, возможно взрываясь, разогрели и ионизовали оставшийся нейтральный газ. Предполагается

что современные галактики образовались из этого вновь во второй раз ионизованного вещества.

Диссертация посвящена перечисленным выше проблемам. Она состоит из четырех глав и введения. Перед каждой главой имеется краткое вступление, в которых обсуждаются основные работы по теме главы и перечисляются результаты, полученные в главе.

x

x

x

В первой главе диссертации обсуждаются физические процессы в расширяющейся Вселенной на стадии до образования астрономических объектов: ядерные реакции, формирующие химический состав дозвездного вещества, рекомбинация водорода в горячей модели Вселенной и обмен энергией между веществом и излучением после рекомбинации; и приведено доказательство необходимости периода нейтрального водорода в эволюции Вселенной.

Показано, что первичный химсостав сильно зависит от параметра анизотропии расширения и удельной энтропии. В изотропной модели Вселенной обилие гелия-4 слабо зависит от удельной энтропии, а концентрации гелия-3 и дейтерия чувствительны к изменению этого параметра. Эти расчеты были сделаны в 1966 году в связи с открытием реликтового излучения и уточнили результаты Смирнова. Расчеты в анизотропной модели были проведены одновременно с Торном,

но для нескольких значений удельной энтропии.

При дальнейшем расширении Вселенной температура излучения падает до 4000°K , и становится возможной рекомбинация водорода. Выделение при этом значительного количества энергичных квантов замедляет скорость рекомбинации водорода в горячей модели Вселенной и приводит к искажению спектра реликтового излучения в виновской области ($\lambda < 2 \cdot 10^{-2}$). Замедление скорости рекомбинации приводит к тому, что обмен энергией между оставшимися электронами и излучением выравнивает температуры вещества и излучения в течение длительного времени после рекомбинации вплоть до $t \sim 3 \cdot 10^{14}$ сек. А это отражается на росте возмущений плотности в расширяющейся Вселенной.

Так как неравновесно ионизованная плазма с высокой температурой быстро теряет свою энергию при обратном комптон-эффекте электронов на реликтовом излучении, то для поддержания высокой температуры в период после рекомбинации необходимо превратить в гелий более 30% водорода, что противоречит современному химсоставу. Плазма при низкой температуре (достаточной однако для ионизации) должна сильно излучать в радиодиапазоне, что также противоречит наблюдениям. Отсюда следует, что после рекомбинации водород должен оставаться нейтральным по крайней мере вплоть до момента времени, соответствующего красному смещению $Z \sim 300$.

Вторая глава посвящена атомным процессам в плазме малой плотности, в данном случае в межгалактическом газе. Рассчитана зависимость потерь энергии гелиево-водородной плазмы от её температуры; показано, что учет диэлектронной рекомбинации практически не сказывается на излучении гелия.

Получен спектр ультрафиолетового излучения в расширяющейся Вселенной, рассматривается влияние наклона этого спектра на спиновую температуру межгалактического водорода.

Интерпретации результатов ряда советских космических экспериментов посвящена третья глава: показано, что измерения ультрафиолетового фона, осуществленные В.Г. Куртом на станциях "Венера", позволяют получить существенные ограничения на параметры межгалактического газа; обсуждается происхождение изотропного фона рентгеновского излучения в свете новой информации, полученной С.Л. Мандельштамом и И.П. Тиндо при полете станции "Луна-12". В этой же главе показано, что наблюдения изотропного фона в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах ставят под сомнение возможность длительной остановки в расширении Вселенной при $Z = 1,95$, предсказываемой моделью Леметра.

Анализируются существующие экспериментальные ограничения на параметры межгалактической среды. Показано, что плотность газа, превышающая $\rho = 6 \cdot 10^{-29}$ г/см³, противоречит наблюдениям.

Проведенный анализ показывает, что перспективы экспериментального исследования межгалактической среды весьма обнадеживающие. Совокупность ультрафиолетовых, рентгеновских и радиоастрономических измерений позволит получить основные параметры межгалактической среды, а следовательно, дать оценку средней плотности вещества во Вселенной.

В четвертой главе рассмотрен тепловой баланс газа межгалактической среды с учетом излучения гелия и потерь энергии при обратном комптон-эффекте электронов межгалактической плазмы на реликтовом излучении. Доказана несовместимость оценок плотности межгалактического нейтрального водорода по измерениям поглощения в линиях

L_{α} в спектрах квазаров с $Z \sim 2$ (Гани, Петерсон) и $\lambda 21$ см в спектрах внегалактического радиоисточника Fornax-A (Колер). Обсуждается влияние эволюции источников нагрева на температуру межгалактического газа. Перечислим основные выводы четвертой главы:

а) из-за больших потерь энергии при обратном комптон-эффекте маловероятно существование горячей межгалактической плазмы при $Z > 10$;

б) при $Z < 5$ в широкой области температур $5 \cdot 10^4 < T < 3 \cdot 10^5$ °К потери энергии на излучение определяются эмиссией квантов $\lambda 304 \text{ \AA He II}$ (при $T \sim 10^4$ °К) велико излучение в линии L_{α} . Именно поэтому эти области температур маловероятны.

В этих областях температура плазмы при отсутствии мощных источников нагрева падает столь быстро, что не успевает устанавливаться стационарная степень ионизации гелия и водорода, при этом резко уменьшаются потери энергии на излучение;

в) существующих источников нагрева (радиогалактик, галактик, Q_{FF} и Q_{Fg} , космических лучей и диссипации турбулентной энергии), видимо, недостаточно для поддержания высокой температуры газа. Однако учет эволюции радиогалактик и квазаров по Лонгейру показывает, что при $Z \sim 3+5$ мощное выделение энергии, возможно связанное с образованием астрономических объектов, могло разогреть газ, который в дальнейшем должен был остывать;

г) если плотность газа существенно меньше критической ($\rho/\rho_{крит} < 0,3$), то при малых Z в отсутствие заметного подогрева код остывания газа близок к адиабате $5/3$;

д) существуют три энергетически выгодные области температур для газа скоплений галактик: $T < 10^{40} \text{К}$, $2,5 \cdot 10^4 < T < 5 \cdot 10^{40} \text{К}$, $T < 3 \cdot 10^{50} \text{К}$ (при этих температурах потери энергии на излучение минимальны).

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на ряде семинаров и конференций и на XIII Ассамблее МАС (1967).

Эти результаты опубликованы в следующих статьях:

1. Р.А.Сюняев, АЖ, 43, 1237, 1966.
2. Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков, Р.А.Сюняев, АЦ, № 371, 1966.
3. В.Г.Курт, Р.А.Сюняев, Письма ЖЭТФ, У, 299, 1967.
4. В.Г.Курт, Р.А.Сюняев, Космические исследования, У, 573, 1967.
5. Р.А.Сюняев, ДАН, 179, № 1, 1968, препринт, ИПМ, 1967.
6. Я.Б.Зельдович, В.Г.Курт, Р.А.Сюняев, ЖЭТФ, 54, № 5, 1968, препринт, ИПМ, 1968.
7. В.Г.Курт, Р.А.Сюняев, АЖ, 44, 1157, 1968.
8. Р.А.Сюняев, Доклад на XIII Ассамблее МАС, препринт ИПМ, 1968.
9. Л.А.Вайнштейн, В.Г.Курт, С.Л.Мандельштам, Л.П.Пресняков, С.И.Сыроватский, Р.А.Сюняев, И.П.Тиндо, Космические исследования, У1, № 2, 1968, препринт ФИАН, 1967.
10. Д.А.Варшалович, Р.А.Сюняев, Астрофизика, 1968 (в печати), препринт, ИПМ, 1967.
- 11 И.Л.Бейгман, Л.А.Вайнштейн, Р.С.Сюняев, УФН, 1968, (в печати)
- 12 А.Г.Дорошкевич, Р.А.Сюняев, АЖ, 1968 (в печати), препринт ИПМ, 1968.