

**Редакционная заметка к статье Жоржа Лемэтра
“Возникновение мира с точки зрения квантовой теории”**

Ж.-П. Люмине (Франция)

Перевод М.Х. Шульмана (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv:1105.6271v1 [physics.hist-ph] 31 May 2011

Editorial note to “The beginning of the world from the point of view of quantum theory”

Jean-Pierre Luminet, Laboratoire Univers et Théories
Observatoire de Paris-CNRS- Université Paris Diderot (France)

email : jean-pierre.luminet@obspm.fr

June 1, 2011

Аннотация

Это – редакционная заметка к репринтной публикации в “Золотой Серии” журнала “General Relativity and Gravitation”¹ знаменитой статьи Жоржа Лемэтра о квантовом рождении вселенной, первоначально опубликованной в “Nature” в 1931 году². Мы объясняем, почему эта короткая (457 слов) статья может считаться настоящей хартией современной теории Большого Взрыва.

1931 год без сомнения может быть назван судьбоносным для Жоржа Лемэтром. Действительно, вот основные работы бельгийского физика и священника, появившиеся в течение нескольких месяцев:

a) *A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae (Однородная Вселенная постоянной массы и возрастающего радиуса, объясняющая радиальные скорости внегалактических туманностей)* [1] 7 марта в номере the *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (M.N.R.A.S.) – английский перевод статьи, опубликованной за четыре года до этого на французском языке [2], в которой Лемэтр стал первым, кто интерпретировал астрономические данные по красным смещениям галактик с помощью модели положительно искривленного пространства, где вселенная медленно расширяется от состояния равновесия по Эйнштейну при $t = -\infty$,

b) *The expanding universe (Расширяющаяся вселенная)* [3]³, сразу следующая за предыдущей в том же номере M.N.R.A.S., где Лемэтр вычислил, что расширение пространства может быть индуцировано предшествующей стадией “стагнации”, имевшей место около 10^{10} лет назад,

¹ См. <http://www.mth.uct.ac.za/~cwh/goldies.html> .

²Переиздание будет осуществлено позже в этом году в *Gen. Rel. Grav.*

³ Не путать с *L'Univers en expansion*, воспроизведенной в Золотой Серии под названием *The expanding Universe* [4].

с) Краткая заметка *The beginning of the world from the point of view of quantum theory* (*Начало мира с точки зрения квантовой теории*), опубликованная 21 марта в номере *Nature* и воспроизводимая здесь в Золотой Серии⁴,

d) Участие в дискуссии “*Вопрос о соотношении физической вселенной с жизнью и разумом*” [5], опубликованной 24 октября в номере *Supplement to Nature*, в которой Лемэтр защищал идею скачкообразного рождения вселенной из начальной суперплотной концентрации ядерной материи, именуемой “первичным атомом (primeval atom)”,

e) *Расширение вселенной* [6], количественная оценка с) и d), опубликованная на французском языке⁵ 20 ноября в номере бельгийского научного журнала, где автор развивал свои главные космологические идеи относительно гипотезы первичного атома в рамках необычного литературного стиля,

и, поскольку Лемэтр также был восхищен брендом новой теории – квантовой механики, не стоит забывать упомянуть об этом,

f) *L'indetermination de la loi de Coulomb*⁶ [8] 8 августа в номере *Annales de la Societe Scientifique de Bruxelles*, где он применил принцип неопределенности Гейзенберга к закону Кулона, и

g) *Sur l'interpretation d'Eddington de l'equation de Dirac*⁷ [9], в том же номере, где он исследовал математическую структуру квантовой механики, используя формализм кватернионов.

Среди этих жемчужин очень малая по объему (457 слов), но ярчайшая работа с) может считаться настоящей хартией современной теории Большого Взрыва. Чтобы понять, почему это так, следует объяснить ее и выделить из большого ряда космологических статей Лемэтра и других ведущих космологов периода решающих 1930-1932 годов. В этом причина появления данной редакционной заметки столь большого размера, посвященной всего лишь одностраничной статье. Ее можно также считать посвященной празднованию 80-й годовщине великой идеи Жоржа Лемэтра о рождении и эволюции нашей вселенной.

Разбегание галактик и расширяющаяся вселенная

В противоположность Фридману (чьи космологические работы были повторно опубликованы в Золотой Серии, см. [10]), который пришел в астрономию в 1921-1922 годах, т.е. всего за три года до своей преждевременной смерти, Лемэтр был тесно связан с астрономией всю свою жизнь. Он всегда чувствовал абсолютную необходимость в сопоставлении наблюдательных фактов с общей теории относительности (дополняя это учетом квантовой механики). Так, он был осведомлен гораздо более большинства своих современников в экспериментальном статусе теории относительности, причем уже во время своей учебы [11]. Лемэтр был не менее замечательным математиком, как в области фундаментальной математики (см. его работы по кватернионам или по проблеме Штротмберга), так и в области численного анализа.

Вкратце космологическая работа Лемэтра строилась в два этапа. Вначале он независимо от Фридмана установил, что полевые уравнения Эйнштейна общей

⁴ В связи с ее публицистическим потенциалом и не-техническим характером эта заметка была полностью (*in extenso*) перепечатана 19 мая 1931 года в выпуске *New York Times*.

⁵ Английский перевод был опубликован позже в [7].

⁶ *Неопределенность закона Кулона*.

⁷ *Об интерпретации Эддингтоном уравнения Дирака*.

теории относительности допускали нестатические космологические решения. В то же самое время он учел наблюдения скоростей разбегания галактик, которым он придал физический смысл, интерпретируя их как экспериментальное доказательство расширения пространства. На следующем этапе Лемэтр осмелился на еще более неординарное допущение, которое, однако, частично было развитием его теории расширения вселенной: если вселенная сегодня расширяется, то в прошлом она была меньше и плотнее; значит, в один далекий от нас день она конденсировалась в “первичный атом (primeval atom)”, чьи последовательные фрагментации вследствие квантовых процессов сделали ее такой, какова она сейчас. Пересмотренная и усовершенствованная за последующие десятилетия, гипотеза первичного атома превратилась в стандартную модель Большого Взрыва. Рассмотрим теперь подробно эволюцию космологической концепции Лемэтра.

В своей статье 1927 года *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques* [2] Лемэтр получил точные решения уравнений Эйнштейна, предположив наличие положительной кривизны пространства (с эллиптической топологией), а также зависимость от времени плотности материи и давление и ненулевую космологическую постоянную. Он получил модель с вечно ускоряющимся расширением, где он уточнил значение космологической постоянной таким образом, что радиус гиперсферы $R(t)$ постоянно возрастал относительно радиуса Эйнштейна статической гиперсферы R_E при $t = -\infty$. Следовательно, в прошлом отсутствовала сингулярность и не было “проблемы возраста”. Великое новаторство Лемэтра состояло в том, что он первым интерпретировал космологические красные смещения в терминах расширения пространства, а не фактического движения галактик: пространство регулярно расширялось и, следовательно, увеличивались видимые расстояния между галактиками. Эта идея стала одним из наиболее значительных открытий столетия.

Используя имеющиеся астрономические данные, Лемэтр вывел явное соотношение пропорциональности между видимой скоростью разбегания и расстоянием: “Utilisant les 42 nébuleuses extra-galactiques figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg⁸, et tenant compte de la vitesse propre du Soleil, on trouve une distance moyenne de 0,95 millions de parsecs et une vitesse radiale de 600 km/s, soit 625 km/s à 106 parsecs. Nous adopterons donc $R'/R = v/rc = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1}$ (Eq. 24) (Используя 42 внегалактические туманности, фигурирующие в списках Хаббла и Штрюмберга, и учитывая собственную скорость Солнца, находим среднее расстояние равным 0,95 миллионов парсек и радиальную скорость 600 км/с, скажем, 625 км/с на 106 парсек. Мы примем $R'/R = v/rc = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1}$ (уравнение 24)”. Уравнение 24 – это в точности то, что позже будут называть законом Хаббла.

Значение работы Лемэтра осталось недооцененным. Эддингтон, его первый PhD-руководитель, которому Лемэтр послал копию своей статьи, не отреагировал на нее. Когда Лемэтр впервые встретился с Эйнштейном в 1927 году на Сольвеевском конгрессе, знаменитый физик дал благоприятные технические замечания, но завершил разговор тем, что заявил: “с физической точки зрения это

⁸ Лемэтр комбинировал красные смещения, опубликованные Штрюмбергом – который сам опирался на красные смещения, опубликованные ранее Слайфером – и данные Хаббла, связывающие расстояния и магнитуды; в своей книге *Математическая теория относительности (The Mathematical Theory of Relativity)* Эддингтон также опубликовал таблицу красных смещений, цитируя данные Слайфера, приготовившего для него эту таблицу; см. все ссылки в [12].

кажется ему совершенно неприемлемым” [13]. В 1929 году Хаббл [14] опубликовал новые экспериментальные данные по спектральным красным смещениям внегалактических туманностей, предположив линейное соотношение скорость-расстояние $v = Hr$ с $H = 600$ км/с/Мпк. Этот закон был строго идентичен уравнению Лемэтра, но Хаббл не дал ссылки на линейно расширяющиеся модели вселенной. Фактически Хаббл никогда не читал работы Лемэтра; он интерпретировал галактические красные смещения как чистый Доплер-эффект (обусловленный собственными радиальными скоростями галактик), а не как эффект расширения пространства.

Новая возможность для признания модели Лемэтра появилась в начале 1930 года. В январе в Лондоне на заседании Королевского астрономического общества состоялась дискуссия между Эддингтоном и де Ситтером. Они не знали, как интерпретировать данные по скоростям разбегания галактик, и призвали к новым исследованиям для объяснения скоростей разбегания в терминах моделей динамического пространства. Прочитав отчет о заседании в Лондоне [15], Лемэтр понял, что Эддингтон и де Ситтер поставили задачу, которую он уже решил три года назад. В этой связи он написал Эддингтону, указав ему на свое сообщение 1927 года, и попросил его передать копию де Ситтеру. Тогда Эддингтон, который не прочел статью вовремя, попросил извинения и отреагировал. Он послал заметку де Ситтеру, ответившему Лемэтру весьма доброжелательным письмом от 25 марта 1930 года⁹.

Со своей стороны, Эддингтон переработал свое сообщение для следующего заседания Королевского астрономического общества в мае, чтобы ознакомить мировую общественность с идеями Лемэтра о динамической вселенной [17]. Затем он опубликовал важную статью [18], в которой заново исследовал статическую модель Эйнштейна и открыл, что, подобно балансирующему карандашу, она была нестабильной: любое легкое возмущение равновесия могло привести к росту радиуса гиперсферы; таким образом, он адаптировал модель Лемэтра расширяющейся вселенной – которая с этих пор зовется моделью Эддингтона-Лемэтра – и вычислил начальный радиус вселенной Эйнштейна, равный примерно 1200 миллионов световых лет, т.е. того же порядка величины, что и оценка Лемэтра. Достаточно интересно, что Эддингтон также рассматривал возможность начальной вселенной с массой M , большей или меньшей массы M_E в модели Эйнштейна, но отбросил оба эти решения, аргументируя тем, что при $M > M_E$ “похоже, требуется внезапное и специфическое начало вещей”, тогда как при $M < M_E$ “дата начала вселенной оказывается недопустимо близкой”.

Далее Эддингтон способствовал передаче английского перевода статьи Лемэтра 1927 года для публикации в *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* [1]. Здесь произошел любопытный эпизод: по необъяснимой причине Эддингтон заменил важный абзац, цитированный выше (где Лемэтр дал соотношение пропорциональности между скоростью разбегания и расстоянием) единственной фразой: “На основании обсуждения известных данных мы примем мы примем $R'/R = v/rc = 0,68 \times 10^{-27}$ см⁻¹ (уравнение 24)”. Таким образом, вследствие (намеренной?) ошибки Эддингтона Лемэтр никогда не был признан соавтором Эдвина Хаббла в открытии расширения вселенной. (Прим. МХШ – в 2012 году было установлено, что Эддингтон здесь не виноват – перевод на английский сделал сам Лемэтр).

Точно следуя переводу его статьи в M.N.R.A.S., Лемэтр опубликовал техническую статью, озаглавленную *The expanding universe (Расширяющаяся вселенная)* [3], также представленную Эддингтоном, в которой он изучал

⁹ Воспроизведено в [16], с. 104-105.

механизм начального расширения (см. детальный анализ в [19]). Разделяя вселенную Эйнштейна на ячейки, в центрах которых материя конденсировалась, Лемэтр рассчитал, что уменьшение давления на краю ячеек должно индуцировать глобальное расширение пространства. Он интерпретировал такое уменьшение давления как уменьшение обмена кинетической энергией между удаленными частями вселенной; другими словами, кинетическая энергия должна оставаться неизменной (“стагнирующей”) вблизи центров ячеек. Таким образом, он определил феномен “стагнации” как причину расширения вселенной: “Если в равновесной вселенной давление начинает изменяться, радиус вселенной меняется в противоположном направлении. Следовательно, процессы стагнации индуцируют расширение”. Другая оригинальная идея этой статьи заключалась в обобщении теоремы Биркгофа общей теории относительности для описания феномена стагнации в контексте однородно расширяющейся вселенной. Лемэтр обрисовал начальную вселенную Эйнштейна как что-то похожее на разреженный первичный газ, появляющийся в небулярной гипотезе Канта-Лапласа. В конце этой статьи он рассмотрел эффект внезапного процесса стагнации, при котором давление мгновенно падает до нуля, и установил, что эпоха нарушения равновесия должна была иметь место спустя 10^{10} - 10^{11} лет назад, в зависимости от соотношения между давлением и плотностью.

Квантовое рождение вселенной

Таким образом, в начале 1931 года расширение пространства стало единственным адекватным объяснением для результатов астрономических наблюдений. Но в том же году, когда его видение динамики вселенной было принято научной общественностью, включая Эддингтона, де Ситтера и Эйнштейна, Лемэтр попытался сделать намного более эпатажное допущение: если вселенная расширяется в настоящее время, не должна ли она быть гораздо меньше и плотнее когда-то в прошлом? Вместо рассмотрения статичного мира Эйнштейна в качестве начального этапа, с которого стартовала динамическая модель, не является ли более логичным мыслить вселенную, начавшую свое расширение, управляемое квантовыми процессами, из очень малого и конденсированного состояния?

Одной из причин появления этой важной идеи было то, что подобно многим другим физикам, Лемэтр был впечатлен новой теорией – квантовой механикой. Другой причиной было желание дать полный ответ на сообщение, сделанное Артуром Эддингтоном на заседании Британского математического общества (British Mathematical Association) 5 января 1931 года и опубликованное в номере *Nature* от 9 марта [20]. Британский астрофизик вначале отдал дань Лемэтру, заявив: “Мы недавно узнали, в основном благодаря работе профессора Лемэтра, что сферическое пространство более или менее быстро расширяется”. Обсуждая роль энтропии в формировании стрелы времени, он указал, что по мере удаления назад во времени мы должны видеть все больше и больше упорядоченности в мире, вплоть до состояния с минимумом энтропии.

Но по философским причинам Эддингтон отказывался следовать назад во времени вплоть до понятия сингулярности, иначе “мы должны прийти к внезапному концу пространства-времени – правда, мы вообще-то называем это ‘началом’”. Для него, как и для многих других, этот вопрос лежал вне науки, и он добавлял, что “с философской точки зрения понятие начала существующего порядка вещей в Природе неприемлемо для меня”.

В публикации, приведенной здесь в рамках Золотой Серии, Лемэтр утверждал, что мир начал существовать конечное время тому назад в результате

взрывоподобного события, которое он сравнивал с гигантским радиоактивным облаком пепла. Как и Эддингтон, он предполагал, что направление (стрела) связано с ростом энтропии. В направлении роста времени вселенная эволюционирует к состоянию с бесконечной энтропией, т.е. полной неупорядоченностью. Если же двигаться назад во времени, то вселенная должна начинаться в состоянии с нулевой энтропией. Эддингтону казалось удивительным, что момент с нулевой энтропией соответствовал началу мира, это представление лично ему представлялось неверным. Лемэтр возражал и указывал, что измерение энтропии связывается с собственным временем, а не с координатным временем; следовательно, Эддингтон был неправ, думая, что момент с минимальной энтропией, отделяющий время “до создания” от времени “после создания” на оси универсального времени. Напротив, это следует рассматривать аналогично существенной сингулярности, где понятия пространства и времени даже утрачивают свой смысл. Чтобы пространство-время могло существовать в контексте общей теории относительности, необходим тензор материи-энергии вследствие отождествления геометрии и материи. Состояние материи с нулевой энтропией соответствует сингулярности тензора материи-энергии в правой части полевых уравнений, что соответствует сингулярности в тензоре кривизны в левой части уравнений. До состояния конденсации при нулевой энтропии не было ни времени, ни пространства. Пространство-время было порождено начальной сингулярностью. Таким образом, множественность и разнообразие физического мира произошло, по-видимому, из “чего-то” физического, соответствующего сингулярности при $R = 0$ в релятивистских космологических моделях. Атом-вселенная исчез, возникла множественность. Энтропия стала ненулевой, и возникло время и стрела времени.

Радикальное новшество, введенное Лемэтром, состояло, таким образом, в увязывании структуры вселенной на больших масштабах с внутренней природой атомов, иными словами, в увязывании ранней вселенной с квантовой механикой¹⁰. Лемэтр использовал термин “одионый квант” и не забывал подчеркнуть, что на этом этапе известные нам законы физики не имели никакого смысла, т.к. понятия пространства и времени не были определены. То, что описывал Лемэтр, находится на границе науки, и современная квантовая космология ничего нового не говорит о возможности выйти за границу физического знания, называемой эрой Планка.

Проанализируем более детально аргументацию Лемэтра. Он начинает с утверждения, что число различных квантов все время растет с течением времени. Он объяснит лучше эту мысль в полу-популярной статье, опубликованной позже в том же году [6] (см. также ниже). Пусть два объема V_1 and V_2 содержат горячее излучение при температурах T_1 и T_2 , и пусть T – равновесная температура полного объема $V_1 + V_2$. Из закона сохранения энергии следует, что $V_1 T_1^4 + V_2 T_2^4 = (V_1 + V_2) T^4$, и число фотонов будет расти пропорционально $(V_1 + V_2) T^3 - V_1 T_1^3 - V_2 T_2^3$, причем эта величина всегда положительна. Эта ситуация справедлива только для газа фотонов, но не для материальных частиц, однако Лемэтр обобщает это, предполагая на интуитивном уровне, что число частиц, обладающих данным количеством энергии, постоянно возрастает.

Далее, Лемэтр продолжает свой короткий текст, близко следуя аргументу Нильса Бора, опубликованному за несколько месяцев до этого [22], согласно

¹⁰ Он не был первым, кто предположил связь между космологией и квантовой теорией. Уже в 1925 году Корнелиус Ланцош ввел квантовую механику в космологическую модель, заключив, что “Решения квантовых секретов спрятаны в пространственной и временной замкнутости мира” [21].

которому понятия пространства и времени в квантовой механике имеют лишь статистическое значение. Как следствие, когда число квантов уменьшается до одного, как предполагается в случае начала мира, понятия пространства и времени оказываются неприменимыми. Они приобретают смысл только тогда, когда исходный квант начал распадаться. Следовательно, начало мира (т.е. именно одиночный квант) имело место "чуть раньше" начала пространства и времени. Это утверждение не вполне ясно, поскольку "чуть раньше" должно иметь временной смысл, что противоречит идее о несуществовании времени на этом этапе. Лемэтр хотел сказать, что пространство и время логически возникли из исходного кванта.

Итак, из чего, по мнению Лемэтра, состоял исходный квант? Лемэтр предположил, что могло бы быть гигантское атомное ядро с чрезвычайно большим атомным номером, соответствующим полной массе вселенной и действующим подобно квантовому числу. В 1931 году атомная физика пребывала еще в детском возрасте, и нейтрон еще не был открыт; но Лемэтр знал про радиоактивные процессы и предположил, что гигантский атом должен был быть неустойчивым и взрывообразно распался на большое число квантов. Как он объяснял позже, слово "атом" должно было пониматься в "греческом" смысле, как чему-то полностью неразделимому и лишенному физических свойств.

В конечном абзаце Лемэтр обратился к принципу неопределенности Гейзенберга, чтобы выразить идею, согласно которой течение космической эволюции в целом не было предопределено первым квантом.

the universe in the form of a unique atom whose atomic weight is the total mass of the universe. This highly unstable atom ~~is~~ would divide in smaller and smaller atoms by a kind of super-radioactive process. Some rest of this process would, according to Sir Jeans idea, foster the heat of the stars until our low atomic number atoms may allow life to be possible.

Clearly the initial quantum could not conceal in itself the whole course of evolution; but, according to the indetermina-tion principle, that is not necessary. Our world is now a world where something happens; the whole story of the world does not need to be written down in the first quantum as a song on the ~~a~~ disc of a phonograp. The whole matter of the world must be pre-sent at the beginning, but the story it has to tell may be writ-ten step by step.

I think that every one who believes in a supreme being supporting every being and every acting, believes also that God ~~is~~ essentially hidden and may be glad to see how present physics provides a veil hiding the creation.

Рисунок 1: Копия оригинальной рукописи Лемэтра, последний абзац зачеркнут им самим.

Как подчеркивалось в [19], заметка Лемэтра не являлась обычным научным сообщением, но была скорее “плодом воображения – космической мечтой, которая была призвана в большей степени открыть глаза читателям, нежели убедить их”.

Он хотел сделать свои представления о начале мира публично признанным и понятным каждому, поэтому он не использовал уравнений. Кроме того, он поставил свою подпись и адрес под этой публикацией как частное лицо, а именно: “Ж. Лемэтр, ул. Намюр, 40, Лувен (G. Lemaitre, 40 rue Namur, Louvain”, а не как известный физик и космолог, профессор университета в Лувене.

Время вспомнить, что Лемэтр был также католическим священником, и поскольку создание вселенной конечное время назад было догмой христианской мысли, можно отсюда прийти к заключению, что идея взрывообразно возникшей вселенной мотивирована целью увязать релятивистскую космологию с религиозной верой. Интересно указать, что (машинописная) версия рукописи Лемэтра, сохраненная в Архиве Лемэтра в университете Лувена, заканчивалась фразой, зачеркнутой самим Лемэтром и, следовательно, никогда не публиковавшейся. Лемэтр вначале намеревался заключить свое письмо в *Nature* фрагментом: “Я думаю, что каждый, кто верит в высшее существо, поддерживающее каждое живое существо и каждое действие, верит также, что Бог существенно скрыт от нас и может быть доволен, видя, как современная физика приоткрывает вуаль с сотворения мира”. Это его глубоко прочувствованное теологическое мировоззрение о скрытом от нас Боге не распространялось на роль Бога в рождении вселенной. Но перед тем, как послать свою статью в *Nature*, Лемэтр, вероятно, решил, что такая отсылка к Богу могла бы смутить читателей и вселить в них мысль, что эта гипотеза предназначена укрепить христианскую концепцию Бога.

Как хорошо показано в [23], всю свою жизнь Лемэтр сохранял веру в существование верховного и недоступного Бога, позволившего ему описать естественное происхождение мира в точных границах физики, не смешивая его со сверхъестественным сотворением. Как священник, строго следующий принципам теологии, Лемэтр был очень осмотрителен в отношении потенциального конфликта – или, наоборот, соответствия, – между христианской догмой о сотворении мира Богом и научной теорией вселенной, сформировавшейся примерно миллиард лет тому назад. Однако Лемэтр никогда не смешивал науку и религию. В противоположность некоторым другим христианским космологам, он не пытался использовать один из этих двух “путей познания” для легитимизации другого. Например, он с большой осторожностью проводил различие между “началом” и “созданием” мира и никогда не говорил о начальном состоянии вселенной в терминах “создания” (в противоположность Фридману, истовому православному христианину, который, в конечном счете, кажется в большей степени сторонником согласия между церковным и научным мировоззрениями, чем бельгийский священник). Лемэтр был убежден, что наука и теология – это два отдельных мира.

Первичный атом

Лемэтр должен был сам убедиться, что его модель взрывающейся вселенной конечного возраста была физически реалистична. Тогда он подготовил качественную статью для публикации в конце 1931 года. Между тем он принял приглашение Британской ассоциации по науке, чтобы принять участие в их заседании (которое происходит каждые 100 лет), состоявшееся 29 сентября в Лондоне, включая заседание по космологии, посвященное “Вопросу о

соотношении физической вселенной, жизни и разума”. Джинс, Эддингтон, Милн, де Ситтер и Милликен также сделали научные сообщения [24]. Среди других вопросов они должны были обсудить проблему возраста вселенной, который, будучи выведенным из постоянной Хаббла, дает значение порядка 1.8 миллиарда лет, что существенно меньше времени, требуемого для звездной эволюции, как подчеркивали Джинс и другие.

Лемэтр [5] указывал (без явных вычислений), что проблема могла бы быть решена, используя процесс стагнации, который он предварительно ввел в рамках модели Эддингтона-Лемэтра [3]. Но он пошел гораздо дальше, продвигая свое предположение о скачкообразном возникновении вселенной. Как он говорил, “необходим полный пересмотр нашей космологической гипотезы, причем главным условием является тест на скорость. Мы хотим 'осветить' теорию эволюции [...] Вполне возможно иметь изменение радиуса вселенной при расширении от нуля до сегодняшнего значения.”

Гипотетическое сингулярное создание вселенной было кратко описано Фридманом, но полностью игнорировалось научным сообществом. Лемэтр уточнил аргументацию и первым (насколько нам известно) ввел выражение *первичный атом*: “Я хочу нарисовать следующую картину эволюции: вначале все массы вселенной должны были существовать в виде единственного атома; радиус вселенной, хотя и не равный точно нулю, был относительно мал. Вселенная в целом должна была рождена вследствие разделения этого первичного атома. Можно показать, что радиус пространства должен возрасти. [...] Является ли это буйной фантазией или физической гипотезой, сейчас сказать нельзя, но мы можем надеяться, что не придется ждать решения слишком долго.”

Лемэтр также предположил, что космическое излучение, которое было недавно открыто, является реликтом начального взрыва, т.е. “пеплом и дымом от яркой, но очень быстрой вспышки [...] Мы приходим к заключению, что звезды были рождены несколько десятков миллионов лет назад, без атмосферы, и что космические лучи являются понятными свойствами образования звезды”. Происхождение космического излучения можно считать важным подтверждением космологии первичного атома, но не найдено следов того, что эта идея была выдвинута в работах Лемэтра раньше конца 1931 года.

В конце концов, модель первичного атома была количественно развита в статье *Расширение пространства (L'expansion de l'espace)*, опубликованной на французском языке в ноябре 1931 году [6]. Лемэтр предположил наличие положительно искривленного пространства (с эллиптической топологией), изменяющимся со временем плотностью материи и давлением, и космологической постоянной, такой, что начинаясь с сингулярности, вселенная сперва расширялась, затем прошла через фазу “стагнации”, во время которой ее радиус был близок к радиусу статического решения Эйнштейна, после чего снова начала ускоренное расширение.

Стиль Лемэтра решительно контрастирует со стилем Фридмана [10], как в отношении научной аргументации, так и по форме. В своей аргументации подход Фридмана был настолько же аксиоматичен, насколько подход Лемэтра – также замечательного математика – был физическим. Что касается формы, очень литературной (адаптированной к публичным конференциям, которые Лемэтр часто посещал), она представляла собой определенное сочетание строгости и популярности, доступное любому читателю, что свидетельствует о многолетних занятиях Лемэтра в области греко-латинских человеческих ценностей. Ниже мы приводим прямые выдержки из этого необычного текста, следуя его английскому переводу [7], но опустив технические подробности.

Следуя космогонии Лапласа и Канта, мы будем исходить из наличия крайне разреженной туманности в качестве отправной точки для эволюции; туманности, занимающей все пространство и становящейся все более и более конденсированной при разделении на частичные туманности и, в конце концов, звезды.

Эта очень старая идея была адаптирована к последним достижениям астрономии. Она недавно была развита в замечательной книге [The Universe Around Us – Вселенная вокруг нас], которую сэр Джеймс Джинс посвятил изучению вселенной. Мы теперь можем прикинуть плотность первичной туманности, оценив массы и расстояния для наименее концентрированных звезд, именуемых внегалактическими туманностями, которые включают все, что мы знаем во вселенной. Если фактические массы звезд, как мы предполагаем, распределены равномерно по всему пространству, которое они занимают, надо признать, что первичная туманность должна быть более разреженной, чем наибольший вакуум, которого наша физика может надеяться достичь в лаборатории. Плотность вселенной понижается до 10^{-30} граммов на кубический сантиметр – наиболее надежная оценка за последние 100 лет.

Идея первичной туманности должна была встретиться с серьезной трудностью, которую можно устранить только с помощью теории относительности и неевклидовой геометрии: различные части туманности стягиваются вместе благодаря гравитации и, кажется, должны коллапсировать в центр их тяжести. Первый элемент решения дается возможностью, согласно которой пространство является неевклидовым и должно подчиняться законам римановой эллиптической геометрии. Тогда больше нет центра тяжести.

[...]

Все точки туманности остаются равномерно распределенными в пространстве; расстояние между любыми двумя из них всегда составляет одну и ту же долю по отношению к полной длине кратчайшей замкнутой линии, вдоль которой оно измеряется; но эта длина, равная πR , изменяется вместе с R ; каждое расстояние изменяется в том же самом отношении, что и радиус пространства.

Чтобы подробно изучить изменение пространственного радиуса, необходимо обратиться к уравнениям общей теории относительности. Возможно, однако, иллюстрировать результат релятивистских вычислений с помощью элементарного анализа, основанного на законах классической механики. Это возможно, поскольку законы относительности в пределе сводятся к законам Ньютона, когда они применяются к бесконечно малому объему.

[...]

Эти уравнения учитывают динамику вселенной; они приводят нас к представлению о радиусе вселенной как о физической величине, способной изменяться. Способ, с помощью которого эти уравнения были получены, не должен рассматриваться в качестве строгого доказательства. Доказательство, защищенное от критики, может быть выведено только из общих уравнений теории относительности. Тем не менее элементарный анализ, развитый до сих пор, в некоторой степени может позволить нам подметить физическое значение результатов, которые могут быть получены более абстрактными методами. Теперь мы должны объяснить, какие изменения должны быть внесены в эти уравнения, чтобы учесть равновесие туманности Лапласа, и показать, как эти изменения могут быть уточнены.

Космологическая постоянная

Одним из наиболее важных достижений теории относительности является идея отождествления массы и энергии. Энергия – это величина, которая определена с точностью до аддитивной константы; масса, напротив, в той мере, как

это обусловлено законом всемирного тяготения, не связана с какой-либо произвольной константой.

Отождествление массы и энергии, следовательно, допускает выбор постоянной для энергии, или, наоборот, введения произвольной константы для выражения гравитационных масс. Теория относительности учит нас способу, с помощью которого эта произвольная константа должна быть введена. Уравнения гравитации получены интегрированием уравнений, выражающих законы сохранения и импульса. Это интегрирование естественным образом вводит постоянную интегрирования. Но эта постоянная интегрирования добавляется не к энергии или к полной массе; она добавляется к плотности. Иными словами, необходимая поправка между энергией и гравитационной массой вносится не в полную массу, а в плотность. Эта произвольная постоянная, вносимая в уравнения, была названа "космологической постоянной", поскольку она имела значение лишь для проблем, связанных со вселенной в целом.

[...]

Интерпретация космологического члена ясна. Это значит, что некоторая упругая сила, стремящаяся увеличить радиус, накладывается на ньютонову силу, которая стремится уменьшить его. Существует значение этого радиуса, называемое равновесным, при котором эти две силы уравниваются одна другой. Туманность Лапласа будет последней, для которой значение этого радиуса будет подходящим образом согласовано с величиной ее полной массы.

Таким образом, мы приходим к тому, что для туманности Лапласа поддерживается равновесие. Не будем слишком рано этому радоваться, так как мы обнаружим, что это равновесие является весьма шатким.

[...]

Мы можем, следовательно, заключить, что образование локальной конденсации в туманности Лапласа в состоянии равновесия должно приводить к разрушению равновесия и инициировать появление вселенной.

Расширение вселенной

Гипотеза Лапласа имеет, следовательно, своим следствием расширение пространства. Происходит ли такое расширение, и с какой скоростью?

В пространстве с возрастающим радиусом материальные точки, огромные внегалактические туманности, например, остаются равномерно распределенными в пространстве. Тем не менее, их взаимные расстояния увеличиваются, причем все в одном и том же отношении. Таким образом, если мы наблюдаем внегалактическую туманность, мы можем утверждать, что расстояния до них растут, оставаясь взаимно пропорциональными, и, следовательно, что внегалактические туманности имеют скорости разбегания, пропорциональные этим расстояниям. Скорости звезд или туманностей наблюдаются благодаря смещениям их спектральных линий, известными под именем эффекта Доплера-Физо. Спектр удаленных туманностей смещается в красную область соответствующую скоростям разбегания до 10 000 км/с; и, насколько возможно в настоящее время оценить их расстояния, эти скорости действительно пропорциональны их расстояниям. К настоящему времени мы располагаем примерно пятьюдесятью измерениями¹¹, и, как следствие всех этих измерений, мы можем оценить, что туманность, расположенная на расстоянии ста миллионов световых лет (расстояние, при котором еще можно фотографировать туманность), имеет скорость разбегания, равную одной двадцатой скорости света, т.е. около 15 000 км/с.

¹¹ Редакторская сноска: В своей статье 1929 года Хаббл представил данные для 46 радиальных скоростей; четыре из них были отрицательными (для галактики Андромеда М31, двух ее спутников М32 и NGC 205, а также для галактики Треугольник М33), тогда как все остальные были положительными, из чего он вывел соотношение пропорциональности расстояние – скорость.

Этот результат позволяет нам оценить размер, который первоначально имела туманность Лапласа, и который определяет начальный равновесный радиус пространства значением порядка примерно один миллиард световых лет. Текущее значение радиуса зависит от оценки плотности материи. При использовании значения, указанного в начале этого раздела, мы находим, что он в дюжину раз превосходит начальный радиус.

Текущее состояние расширения позволяет нам выдвинуть определенную идею не только о первичной туманности, но также относительно эпохи, когда образовались локальные конденсации при начале расширения пространства.

[...]

Можно установить, что если мир начинался как равновесная туманность Лапласа, то первая общая конденсация любой степени, которая в ней происходила, и которая, следовательно, инициировала расширение пространства, не могла произойти в эпоху, отдаленную более чем на сто миллиардов лет.

Масштаб времени

Чтобы оценить важность результата, не надо забывать, что космогония Лапласа-Джинса является медленной космогонией. Первичные газообразные массы сконденсированы в результате небольших неоднородностей в их начальном распределении и образуют первые конденсации: внегалактические туманности. Как мы уже видели, это событие датируется эпохой, отстоящей от нас в прошлом всего на сто миллиардов лет максимум. Эти туманности были еще газообразными в это время. Тогда возникли слабые конденсации, притом случайным образом, как показал Джинс; они должны были стремиться к росту и достигли достаточного размера, сравнимого с взаимными расстояниями между звездами. Но какое время необходимо для этих больших конденсаций, чтобы они имели возможность сформироваться и сконденсироваться в сферы с диаметром в сто тысяч раз меньше, чем их начальный диаметр?

Джинс говорит о ста тысячах миллиардов лет на эту эволюцию, и я не уверен, что он доказал достаточность этого времени; мы можем дать ему только одну тысячную этого времени.

Сто миллиардов лет – это максимум в пятьдесят раз больше возраста, приписываемого Земле. Это в сто раз больше, чем необходимо лунным приливам для того, чтобы остановить вращение нашего спутника и заставить его постоянно быть обращенным к Земле одной и той же стороной. Это только в тысячу раз больше времени, которое нужно свету, чтобы дойти до нас от туманности, которую могут сфотографировать наши телескопы. Действительно ли эволюция происходила согласно теории Лапласа, начав с исключительно разреженного состояния и достигая текущего состояния материи: звездные образования, распределенные в виртуальном вакууме? Свету не требуется и минуты, чтобы пересечь Солнце, и нужно четыре года, чтобы достичь ближайшей звезды. Мир звезд, подобно миру атомов, кажется практически пустым.

Действительно полная космогония должна объяснить это для звезд в качестве атомов, но, конечно, подлинные атомы не могли иметь начальное диффузное состояние.

Радиоактивность

В атомном поле мы знаем о спонтанных превращениях, которые дают нам некоторые представления о направлении естественной эволюции; это – превращения радиоактивных тел. Пренебрегая распадом фотонов и электронов, масса которых равна нулю или очень мала, атом урана в конечном счете превращается в восемь атомов гелия. Это превращение из состояния с наибольшей конденсацией в состояние в одно из состояний с меньшей конденсацией. В среднем

уран может оставаться сохранившимся только в течение четырех или пяти миллиардов лет перед его превращением. Аналогично ведет себя торий.

Если мы появились на Земле через сто миллиардов лет после этого, не должно было остаться разумных количеств радиоактивных веществ, и нам нужно, чтобы все обязательно завершилось таблицей элементов, содержащей висмут и т.п. Заканчивается ли на самом деле таблица элементов ураном¹²? Не узнаем ли мы затем о более тяжелых элементах, которые успели полностью распасться до нашего рождения? Не являются ли радиоактивные превращения а всего лишь слабыми остатками начальной эволюции мира, и не происходили ли они, по звездным масштабам, несколько миллиардов лет назад?

[...]

Наша вселенная несет отпечатки освоей юности¹³, и мы можем надеяться реконструировать ее историю. Документы, имеющиеся в нашем распоряжении – это не скрижали, высеченные на столпах Вавилона; наша библиотека не рискует быть разрушенной огнем; она расположена в пространстве, замечательно пустом, где световые волны сохраняются лучше, чем звуковые – на дисках для фонографа. Телескоп – инструмент, заглядывающий далеко в космос, но он прежде всего является инструментом, который заглядывает далеко в прошлое. Свет туманностей рассказывает нам историю, происходившую сто миллионов лет назад, и все события в эволюции мира, записанные с помощью быстрых волн в межзвездном эфире, находятся в нашем распоряжении.

[...]

Первичный атом

Мир был создан из конденсированного состояния за счет диффузии. Рост энтропии, который характеризует направление эволюции, представляет собой прогрессивную фрагментацию энергии, существовавшей вначале в виде единого целого. Мир-атом разделился на фрагменты, каждый из которых делился на еще более мелкие части. Чтобы упростить картину, предположим, что эта фрагментацию происходила на равные части, двести шестьдесят поколений должны были смениться, чтобы прийти к текущему распределению материи в виде наших скромных маленьких атомов, по большей части слишком маленьких, чтобы делиться дальше.

Эволюция мира может быть сравнена с картиной угасающего пожара, который только что закончился: некоторые небольшие красные вспышки, зола и дымы and smoke. Оставив после себя остывшие головешки, он демонстрирует медленно затухающие искры, а мы пытаемся вызвать в памяти исчезнувший блеск родившихся миров.

Щепки солнц-атомов во фрагментах удерживаются вместе универсальным притяжением, щепки от которых, в свою очередь, разлетаются в виде вакуумных частиц, достаточно быстрых, чтобы вырваться из пут этого, искр, освобождающихся из огненного горнила, в котором атом становится звездой. Лучи путешествуют по прямой линии во все еще растущей пустыне пространства, пока не встретят затерянный оазис, нашу галактику, холодное зернышко, нашу Землю, и разрядят электромметр, доказывая образование солнц.

Первичная туманность или первичный атом? Медленная космогония или быстрая космогония? Газовая космогония или радиоактивная космогония? Как далеко простирается справедливость представлений старой космогонии? Была ли

¹² Редакторская сноска: Как мы знаем, ответ положителен, поскольку речь идет о естественных элементах. Первый трансурановый элемент – нептуний (атомный вес 93) – был синтезирован в 1940 г.

¹³ Редакторская сноска: Первая ссылка на “юную” вселенную найдена в знаменитой поэме Лукреция *О природе вещей* (1-й век от Рождества Христова) – образце классической латыни, который Лемэтр читал.

Земля извергнута в атомное состояние солнцем-атомом, или она выделилась из газообразной фазы? Каковы свойства гигантских атомов, и каковы законы, управляющие их распадом? Было бы преждевременным пытаться ответить на эти вопросы.

В заключение мы должны указать способ, которым теория расширения вселенной адаптируется к идее первичного атома. Мы можем постичь начало пространства через идею первичного атома, причем начало пространство маркируется начальным моментом времени. Радиус пространство начался с нуля; первые этапы расширения были быстрыми, определяемые массой начального атома, практически равного массе сегодняшней вселенной. Если эта масса достаточной, а оценки, которые мы можем сделать, указывают, что в действительности так оно есть, то начальное расширение было способно позволить радиусу превысить равновесное значение. Таким образом, расширение проходило в три фазы: первый период быстрого расширения, когда атом-вселенная разделился на атомы-звезды, период замедления, за которым последовал третий период ускоренного расширения¹⁴. Несомненно, сегодня мы наблюдаем третий период, и ускоренное расширение пространства, которое следует за периодом медленного расширения, должно соответствовать разделению звезд на внегалактические туманности.

Нельзя считать полностью доказанным, что мы не живем в эпоху первого периода расширения, и, в этом случае, что текущее расширение может быть не способным вывести нас из состояния с равновесным радиусом, который, следовательно, должен быть достаточно большим. После продолжения процесса расширения в течение миллиардов лет туманности должны остановиться, а затем начать движение в обратном направлении, постепенно падая одна на другую и, в конечном счете, сталкиваясь между собой и завершая тем самым историю мира, с финальной вспышкой, после которой радиус мира опять падает до нуля.

Такая гипотеза была предложена Фридманом в 1922 году, а затем недавно возрождена Эйнштейном. Против этого говорят имеющиеся оценки плотности, но это не окончательный результат. Более того, мы можем успокоить себя тем, что пространство все еще расширяется и что, следовательно, даже если мир ожидает подобный финал, мы живем во времена, более близкие к началу мира, чем к его концу.

Но вполне возможно, что расширение уже миновало эпоху равновесного радиуса, и сжатие не наступит. В таком случае не следует ждать чего-то сенсационного; солнца будут становиться холоднее, туманности будут разбегаться, зола и дым от исходного пожара будут охлаждаться и рассеиваться.

Как можно видеть, и стиль, и научное содержание необычайно богаты. Лемэтр построил свою модель на основании экспериментальных данных: наблюдение красных смещений удаленных туманностей свидетельствуют о расширении пространства, но существование даже этих туманностей указывает, что в своем прошлом вселенная подверглась локальным процессам конденсации, которые породили рождение этих туманностей. Для Лемэтра расширение пространства и конденсация материи были демонстрациями разбалансировки между двумя противоположными космическими силами: сила гравитационного притяжения и сила отталкивания, обусловленная космологической постоянной. Кроме того, наблюдательные результаты ограничивают эволюцию мира до короткого периода и требуют быстрой космогонии. Действительно, согласно измерениям Хаббла темп расширения составил до 540 км/с/Мпк. При столь быстром темпе расширения и в отсутствие космологической постоянной теперешняя вселенная должна характеризоваться где-то 2 миллиардами лет

¹⁴ Редакторская сноска: Это очень близко к продолжительности эволюции в так называемой "стандартной модели" Большого Взрыва 2011 года!

существования. Однако благодаря изучению радиоактивных элементов уже известно, что возраст Земли составляет как минимум четыре миллиарда лет. Разумеется, Земля не может быть старше вселенной. Таким образом, Лемэтр настаивал на существовании космологической постоянной как для того, чтобы получить возраст вселенной, совместимый с возрастом Земли, так и для того, чтобы галактические конденсации успели образоваться.

Модель Лемэтра (см. рисунок ниже) разделила эволюцию вселенной на три различные фазы: две фазы быстрого расширения, разделенные периодом замедленного расширения. Первая фаза имела взрывообразный характер, обусловленный радиоактивным распадом атома-вселенной. Начальное расширение определялось массой первичного атома, “в основном равного по массе существующей вселенной”. Термин “в основном” обусловлен его ранним представлением о первичном атоме как о гигантской конденсации ядер. Из ядерной физики было известно, что атомное ядро легче суммы составляющих его частиц на величину так называемого дефекта массы. Аналогичным образом, первичный атом должен был быть несколько легче, чем галактики, возникающие при его взрыве. На этой фазе Лемэтр использовал образ “пожара”, который служил усилению образного восприятия, но являлся спорным с педагогической точки зрения: он служил источником постоянного непонимания (повторяемого популярными комментариями), представляя начало вселенной в виде взрыва материи, находящейся вне пространства.

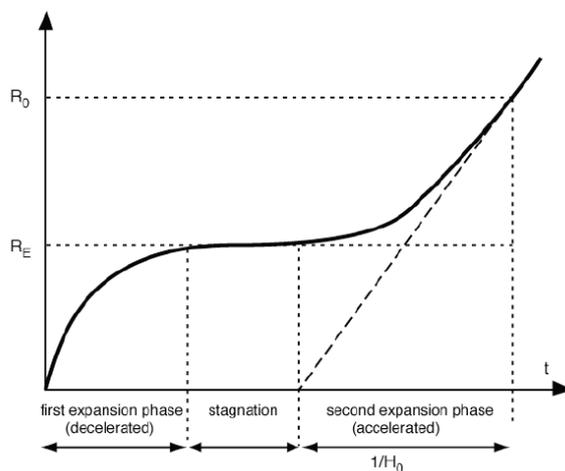


Рисунок 2: “Ступенчатая селенная” Лемэтра. На первой фазе взрывообразное ускорение замедляется, на второй фазе имеет место стагнация (R_E – радиус статической вселенной Эйнштейна), которая на третьей фазе переходит в ускоренное расширение (R_0 – текущее значение радиуса вселенной). Наклонная пунктирная линия дает оценку темпа расширения вселенной именно на третьей фазе, тангенс угла наклона этой линии связан со временем Хаббла ($1/H_0$), хотя из рисунка видно, что эта оценка возраста вселенной никак не учитывает длительность первой и второй фаз.

Вторая фаза в модели Лемэтра соответствовала квази-равновесию между плотности материи и космологической постоянной, что дает практически неизменный радиус в течение периода стагнации; Эффекты гравитационного притяжения доминируют на малых масштабах, на этой фазе формируются флуктуации плотности, которые позже конденсируются и приводят к росту широкомасштабных структур вселенной, давая начало группировке в галактике и галактик – в скопления. Формирование локальных конденсаций возмущало равновесные условия, в результате чего возникало доминирование

космологической постоянной и происходил переход к новому процессу расширения. Согласно Лемэтру, сейчас вселенная находится в третьей фазе.

Технически это решение было получено исходя из релятивистских уравнений в предположении, что наше пространство обладает положительной кривизной и космологической постоянной, немного превышающей эйнштейново значение $\lambda_E = 1/R_E^2 = 2GM/\pi c^2 R_E^3$, где R_E – равновесный радиус из модели вселенной Эйнштейна 1917 года. Что касается возраста вселенной, Лемэтр упомянул в качестве возможной его величины десять миллиардов лет, но оно могло быть и значительно больше, поскольку зависело от значения космологической постоянной. Продолжительность фазы стагнации существенно зависела от $\lambda = \lambda_E(1 + \varepsilon)$, будучи произвольно большой, когда ε стремилось к нулю. По этой причине модель Лемэтра иногда называли “ступенчатой вселенной (hesitating universe)”.

Обоснование Лемэтра основывалось на стремлении использовать новые сведения из атомной физики и связать туманности и атомы, как он писал. В сравнении с его моделью 1927 года с медленной эволюцией Лемэтр предложил теперь быструю космологию с взрывообразной начальной фазой, которая, исходя из простейшего, породила более сложное.

Бельгийский физик заканчивал свою статью коротким обсуждением эсхатологических аспектов своей модели мира, утверждая, что в далеком будущем вселенная неотвратно придет к состоянию тепловой смерти. Разумеется, всякая жизнь при этом необратимым образом исчезнет...

Заключение

Вследствие того, что Лемэтр опубликовал свою модель первичного атома на французском языке и в полу-популярном журнале, не известном большинству физиков и астрономов, прошло некоторое время, прежде чем эта статья была замечена. Когда же она получила известность, большинством она была принята холодно. Тот факт, что Лемэтр был математиком в большей мере, нежели астрономом и к тому же обладал религиозными убеждениями, что, без сомнения, вызывало неприятие к его революционным космологическим идеям¹⁵. Эддингтон никогда не принимал гипотезу первичного атома или другие идеи о вселенной, связанные с взрывообразным началом несколько миллиардов лет. Подобно большинству других физиков, он недоверчиво относился к созданной вселенной, и с ним в 1930-х году было согласно большинство физиков и астрономов. Как мы упоминали выше, это было предвзятым отношением, поскольку для Лемэтра, как он заявлял несколько раз, физическое начало мира было отлично от метафизической концепции сотворения мира, и для физика-священника наука и религия отвечали разным уровням понимания.

Далее, хотя гипотеза Лемэтра упоминалась в это время в космологических обзорах Толмена, де Ситтера, Робертсона и некоторых других, она не соответствовала физической реальности. Были, однако, и исключения. Например, гарвардский астроном Дональд Мензел написал весьма энтузиастскую статью в научно-популярном журнале, которая начиналась так: “Один взорвавшийся атом породил все звезды и планеты нашей вселенной! Эта сенсационная теория была выдвинута знаменитым аббатом Лемэтром, бельгийским математиком. Интерес к

¹⁵ Можно также сомневаться, не нанес ли выбранный литературный стиль ущерба убедительности научного содержания этой работы, адресованной сообществу, мало адаптированному к столь цветистому способу научного изложения. Еще и сегодня многие ученые быстро и пренебрежительно называют “популярным” текст, в котором качество формы близко к по уровню к содержанию.

ней астрономов возник во всем мире потому, что, исходя из этой гипотезы, можно объяснить много наблюдений и загадочных фактов” [25]. Кроме того, квантовый физик Паскуаль Йордан поддержал модель Лемэтра в книге 1936 года [26]. Отношение Эйнштейна было менее определенным. Уже в 1931 году и, вероятно, еще до гипотезы Лемэтра, он вывел из уравнений Лемэтра циклическую космологическую модель, в которой вселенная начала расширение с $R = 0$ сжалась в ходе “большого хруста (big crunch)” [27], но он рассматривал появление сингулярности $R = 0$ как не имеющее физического смысла. Позже, когда он узнал о гипотезе первичного атома, он рассматривал ее как вдохновенную христианской догмой о сотворении мира и совсем неоправданную с физической точки зрения. У Эйнштейна также было сильное предубеждение против космологической постоянной, которую он же первоначально ввел в свою статическую модель в 1917 году и которую он считал “самой большой ошибкой (greatest blunder)” в своей жизни. Вероятно, по этой причине в новой релятивистской модели, которую он предложил в 1932 году вместе с де Ситтером [28] – пространство с нулевой кривизной и равномерной плотностью, которое расширяется наружу, – этот член исчезает. Их модель также принадлежала к классу вселенных с сингулярным началом, где $R = 0$ при $t = 0$, но авторы не упоминали об этом ее свойстве и даже не ссылались на Фридмана или Лемэтра. После этого Эйнштейн оставил исследования в космологии.

К сожалению, благодаря авторитету Эйнштейна это сверх-упрощенное решение стало “стандартной моделью” космологии на следующие 60 лет. Однако Лемэтр сохранил свои оригинальные взгляды. В 1933 году он опубликовал другую фундаментальную статью о космологии, образование галактик, гравитационном коллапсе и сингулярностях в *Annales de la Societe Scientifique de Bruxelles*, переведенную на английский язык и перепечатанную в Золотой Серии больше чем десять лет назад [4]. В этой статье 1933 года Лемэтр нашел новое решение уравнений Эйнштейна, известное как модель “Лемэтра – Толмена” или “Лемэтра – Толмена – Бонди”, которая сегодня все чаще и чаще используется для анализа структуры образования и эволюции в реальной вселенной в точной (т.е. непertурбативной) теории Эйнштейна. В менее известной работе *Эволюция расширяющейся вселенной (Evolution of the expanding universe)*, опубликованной в 1934 году [29], он выразил первое интуитивное представление о температуре космического фонового излучения при нескольких кельвинах: “Если бы все атомы звезд были равномерно распределены в пространстве, их плотность составила бы один атом на кубический ярд, т.е. полная энергия была бы такой же, как при равновесной температуре излучения при температуре жидкого водорода”. Он также первым интерпретировал космологическую постоянную в качестве энергии вакуума: “Теория относительности предполагает, что при тождестве гравитационной массы и энергии мы должны ввести постоянную. Все происходит так, как будто энергия вакуума должна отличаться от нуля. Чтобы движение относительно вакуума не могло быть детектировано, мы должны ассоциировать давление $p = -\rho c^2$ с плотностью энергии вакуума ρc^2 . Это дает значение космологической постоянной, соответствующей отрицательной плоскости $\rho_0 = \lambda c^2 / 4\pi G \sim 10^{-27}$ г/см³”. Такой результат был переоткрыт только в 1967 году Сахаровым (его статья была перепечатана в Золотой Серии, см. [30]) и Зельдовичем [31] на основе квантовой теории поля; он теперь рассматривается как одно из основных решений “проблемы темной энергии”.

В заключение приведем следующий список космологических вопросов¹⁶, обсуждавшихся Лемэтром в период 1927 – 1934 годов:

¹⁶ Не все они обсуждались здесь, см. полный обзор в [16].

- Расширение пространства, начавшееся из исходной сингулярности
- Доминирующая роль космологической постоянной в космической динамике
- Важность давления излучения в ранней вселенной
- Роль квантовой теории в происхождении вселенной
- Проблема возраста вселенной, решаемая с помощью космологической постоянной
- Интерпретация космологической постоянной как энергии квантового вакуума
- Возможность возрождающихся вселенных
- Существование реликтов ранней вселенной (космическая остаточная температура, космические лучи сверхвысокой энергии)
- Образование галактик вследствие случайных флуктуаций плотности
- Топология вселенной.

Во всех этих вопросах Жорж Лемэтр продемонстрировал поразительную проницательность. Поэтому астроном Уильям МакКри, хотя и приверженец ньютоновской космологии Милна, смог заявить в статье, логично названной *Некоторые уроки на будущее (Some lessons for the future)* [32]: “Лемэтр был ученым, совершенно независимым от общепринятого мнения. Все из нас, кто знал его, всегда должны были уделять внимание его идеям. [...] Эйнштейн, Эддингтон и Милн, возможно, были более великими учеными, чем Лемэтр, и более известными в то время. Но в отношении космологии и ее важности для астрономии роль Лемэтра была выше. Его слова казались более проникновенными.”

Ссылки

- [1] G. Lemaître, *A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae*, *M.N.R.A.S.*, 41, 483–490 (1931).
- [2] G. Lemaître, *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série A, 47, 49–59 (1927).
- [3] G. Lemaître, *The expanding universe*, *M.N.R.A.S.*, 41, 491–501 (1931).
- [4] G. Lemaître, *L'univers en expansion*, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* A53, 51 (1933), reproduced as a Golden Oldie as *The expanding Universe* (translated by M. A. H. MacCallum), *Gen. Rel. Grav.* 29, n°5, 641 (1997). Editorial note by A. Krasinski, p. 637.
- [5] G. Lemaître, Untitled contribution to a discussion on “The question of the relation of the physical universe to life and mind”, *Supplement to Nature*, 127, October 24, 704–706 (1931).
- [6] G. Lemaître, *L'expansion de l'espace*, *Revue des Questions Scientifiques*, 20, pp. 391–410 (1931).
- [7] G. Lemaître, *The primeval atom: An essay on cosmogony* (English translation by B.H. and S.A. Korff), Van Nostrand Company, 1950.
- [8] G. Lemaître, *L'indétermination de la loi de Coulomb*, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série B, 51, 1^{ère} partie, pp. 12–16 (1931).
- [9] G. Lemaître, *Sur l'interprétation d'Eddington de l'équation de Dirac*, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, série B, 51, 1^{ère} partie, pp. 89–99 (1931).
- [10] A. Friedmann, *On the curvature of space* (translated by G. F. R. Ellis and H. van Elst), *Gen. Rel. Grav.* 31, n° 12, 1991 (1999); (b) *On the possibility of a world with constant negative curvature of space* (translated by G. F. R. Ellis and H. van Elst), *Gen. Rel. Grav.* 31, n°12, 2001 (1999); Editorial note by A. Krasinski and G. F. R. Ellis, p. 1985; biography by A. Krasinski, p. 1989; see also Addendum in *Gen. Rel. Grav.* 32, 1937 (2000).
- [11] G. Lemaître, *La théorie de la relativité et l'expérience*, *Revue des Questions Scientifiques*, 4^e série, vol. 9, p. 346–374 (1926).
- [12] G. Strömberg, *Analysis of Radial Velocities of Globular Clusters and Non-Galactic Nebulae*, *Astrophysical Journal* 61, 353 (1925); V.M. Slipher, *Nebulae*, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 56, 403 (1917); E. Hubble, *Extra-Galactic Nebulae*, *Astrophysical Journal* 64, 321 (1926); A. Eddington, *The Mathematical Theory of Relativity*, Cambridge University Press (1923), p.162 (reprinted 1960).

- [13] G. Lemaître, *Rencontres avec Einstein*, *Revue des Questions Scientifiques* t. 79 5e série, vol. 19, p. 129–132 (1958).
- [14] E. Hubble, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 15, March 15, Number 3 (1929).
- [15] A.S. Eddington, Remarks at the Meeting of the Royal Astronomical Society, *The Observatory*, vol. 53, 39–40 (1930).
- [16] J.-P. Luminet, *L'invention du big bang*, *Le Seuil*, Paris, 2004.
- [17] A.S. Eddington, *The Observatory*, vol. 53, 162–164 (1930).
- [18] A.S. Eddington, *On the Instability of Einstein's Spherical World*, *M.N.R.A.S.* 90, 668–678 (1930).
- [19] H.S. Kragh, D. Lambert, *The Context of Discovery: Lemaître and the Origin of the Primeval-Atom Universe*, *Annals of Science* 64, 445–470 (2007).
- [20] A. Eddington, *The End of the World from the Standpoint of Mathematical Physics*, *Nature* 127, 447–453 (1931).
- [21] C. Lanczos, *Über eine zeitlich periodische Welt und eine neue Behandlung des Problems der Aetherstrahlung*, *Zeitschrift für Physik* 32, 56–80 (1925).
- [22] N. Bohr, *The Use of the Concepts of Space and Time in Atomic Theory*, *Nature* 127, 43 (1931).
- [23] D. Lambert, *Monseigneur Georges Lemaître et le débat entre la cosmologie et la foi*, *Revue théologique de Louvain*, 28, 28–53 (1997); D. Lambert, *L'itinéraire spirituel de Georges Lemaître suivi de "Univers et Atome" (inédit de G. Lemaître)*, Bruxelles, Lessius, (2008).
- [24] *The Question of the Relation of the Physical Universe to Life and Mind*, *Supplement to Nature* 128, 700–722 (1931).
- [25] D. H. Menzel, *Blast of Giant Atom Created Our Universe*, *Popular Science Monthly*, 28–30 (Dec. 1932).
- [26] P. Jordan, *Die Physik des 20. Jahrhunderts*, Braunschweig, 1936; English translation: *Physics of the 20th Century*, New York, 1944.
- [27] A. Einstein, *Zum kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie*, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 235–237 (1931).
- [28] A. Einstein and W. de Sitter, *On the Relation Between the Expansion and the Mean Density of the Universe*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 18, 213–214 (1932).
- [29] G. Lemaître, *Evolution of the expanding universe*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 20, 12 (1934).
- [30] A. D. Sakharov, *Doklady Akademii Nauk SSSR* 177, 70 (1967). Golden oldie: *Vacuum quantum fluctuations in curved space and the theory of gravitation* (translated by Consultants Bureau), *Gen. Rel. Grav.* 32 n°2, 365 (2000). Editorial note by H. J. Schmidt, p. 361.
- [31] Y. B. Zel'dovich, *Cosmological constant and elementary particles*, *Soviet Physics JETP Letters* 6, 316–317 (1967); see also Y.B. Zeldovich, *The Cosmological Constant and the Theory of Elementary Particles*, *Soviet Physics Uspekhi* 11, 381–393 (1968), republished as a Golden Oldie in *Gen. Rel. Grav.* 40 n°7, 1562 (2008).
- [32] W. McCrea, *Personal recollections: some lessons for the future*, in "Modern Cosmology in Retrospect", Eds. B. Bertotti et al., Cambridge University Press, p. 197–220 (1990).