



ДВЕ ТЫСЯЧИ ДЕВЯТЫЙ ГОД В ДАТАХ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ*

Д.И. Трубецков

1929 «Человек, открывший взрыв Вселенной: Жизнь и труд Эдвина Хаббла» – так называется замечательная книга А.С. Шарова и И.Д. Новикова (М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989, 208 с.), посвященная описанию жизни и деятельности великого ученого XX века Эдвина Пауэла Хаббла (1889–1953), которого считают величайшим астрономом со времени Коперника. В 2009 году – 120 лет со дня его рождения; 80 лет назад, 17 января 1929 года Э.П. Хаббл представил в Труды Национальной академии наук США статью «Связь между расстоянием и лучевой скоростью внегалактических туманностей», в которой излагалось открытие красного смещения линий в спектрах далеких галактик, что соответствовало расширению Вселенной.

К этому времени он уже открыл галактики и показал, что они характеризуют крупномасштабную структуру Вселенной.

Для нас особенно интересным будет связь расширения Вселенной Хаббла с частным решением одного из эталонных уравнений нелинейной динамики – уравнения Бюргерса [1].

Но немного о герое повествования.

Эдвин Пауэл Хаббл был третьим ребенком в большой семье Хабблов. В ней всего было одиннадцать детей. Отец Эдвина, Джон Хаббл получил юридическое образование и начинал карьеру с работы адвоката. Однако, в связи с ухудшением зрения, стал работать в агентстве по страхованию имущества от огня. Семья часто переезжала с места на место, но никогда не нуждалась. Непререкаемым авторитетом в семье был отец, который одинаково справедливо относился ко всем детям. Мать умела поддерживать добрую обстановку в семье, разрешая всякие, и простые и сложные, ситуации в спокойном духе. В 1906 году Эдвин окончил среднюю школу и поступил в Чикагский университет, где особенно интересовался астрономией и математикой, занимался спортом – баскетболом, футболом, боксом. В сентябре 1910 года Эдвин получил двухлетнюю стипендию, продленную затем еще на год, для обучения в Англии. Но... ему пришлось, по-видимому, по решению тех, кто руководил стипендиатами, заняться юриспруденцией. Хаббла определили в Оксфорд, где он изучал международное право. Летом 1913 года он возвратился в Луисвилль, где тогда жила

*Продолжение. Начало см. в ПНД № 5, 2009.

его семья. Год он занимался юридической практикой, после чего вернулся в Чикаго, в университет, чтобы в Йеркской лаборатории подготовить диссертацию на степень доктора философии. Его диссертация называлась «Фотографические исследования слабых туманностей», под которыми в то время понимали все: и газовые образования в нашей звездной системе, диффузные и планетарные, и удаленные галактики. Грянула Первая мировая война, и Хаббл ушел на фронт. Он провел во Франции и Англии почти год. С сентября 1919 года Хаббл был зачислен в Маунтвилсоновскую лабораторию в Калифорнии, где и прошла большая часть его жизни, где он сделал много важных открытий в астрономии. И главное из них – закон Хаббла. Что было известно к моменту его открытия?

Была построена теория космологического расширения. Первым здесь был Александр Александрович Фридман (1886–1925), построивший теорию расширяющейся Вселенной на основе модифицированной общей теории относительности.

В теории Фридмана Вселенная изотропна и однородна по распределению вещества в ней. Прямым следствием этого, вытекающим из фридмановской теории, является то, что расширение должно происходить по линейному закону

$$\mathbf{v} = H\mathbf{R}, \quad (1)$$

где \mathbf{v} – вектор скорости удаления объекта, находящегося на расстоянии $|R|$ от точки наблюдения, H – постоянная, которая не зависит ни от R , ни от направления на объект от точки наблюдения. Закон этот был открыт Хабблом в его наблюдениях 1927–1928 годов. Он носит имя Хаббла, а постоянная H называется постоянной Хаббла.

Справедливости ради заметим, что еще в 1917 году американский астроном Весто Слайфер фактически открыл космологическое расширение, говоря в своей статье о разбегании «космических туманностей», и не очень понимая, что он именно открыл. Правда, Фридман в одном из своих семинаров, по воспоминаниям его участников, указал на результат Слайфера как на наблюдательное свидетельство в пользу модели расширяющейся Вселенной.

На рисунке приведена оригинальная диаграмма Хаббла 1929 года, заимствованная нами из книги [2, стр. 214].

Закон Хаббла и измерения скоростей основаны на измерениях красного смещения в спектрах галактик, а переход от спектров к скоростям основан на использовании в объяснении эффекта Доплера (длина волны растет, то есть свет «краснеет», когда со временем возрастает расстояние между источником и приемником).

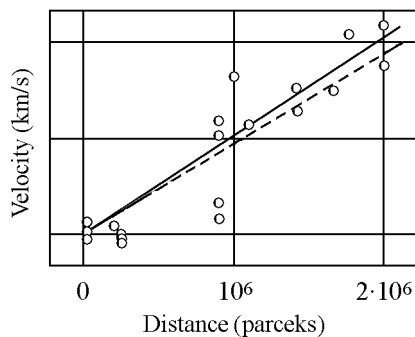


Рис. Оригинальная Хаббловская диаграмма 1929 года. Зависимость скорости удаления галактики (в км/сек) от расстояния до нее (в парсеках). Это графический образ самого грандиозного по масштабу явления природы – космологического расширения. Расстояния у Хаббла были занижены тогда почти в... 10 раз. На оригинальной диаграмме по вертикальной оси ошибочно указано (km) – должно быть (km/s). [2]

«Однажды, через много лет после своего космологического открытия, Хаббл неожиданно заявил на собрании Американского астрономического общества, что никакого космологического расширения в природе нет, а наблюдаемое красное смещение в спектрах галактик – всего лишь результат старения света на пути к нам. По словам одного из участников собрания, это выглядело так, как если бы сэр Исаак Ньютон явился бы и сказал: "Кстати о том яблоке, джентльмены. В действительности ведь оно, знаете ли, не падало"» [2, стр. 213].

Интересно, что во время Второй Мировой войны Хаббл занимался расчетом таблиц прицельного бомбометания, чем А.А. Фридман занимался в Первую Мировую войну.

В конце первой части книги А.С. Шарова и И.Д. Новикова, название которой приведено в начале нашего очерка, есть следующие слова (стр. 144).

«...Вероятно, полнее и точнее всех сказал о Хаббле Алан Сендидж, назвав его величайшим астрономом со времени Коперника... "Никто не знает, где похоронен Хаббл. Есть некая тайна в том, что произошло. Не было панихиды, не было церемонии похорон... Милтон Хьюмасон, вероятно, единственный человек, который когда-либо знал, что происходило после смерти Хаббла. Его жена не хотела какой-либо огласки по поводу случившегося" (Сендидж). Ни на Маунт Вилсон, ни на Маунт Паломар, нигде на Земле нет памятников Хабблу.

Много лет после кончины астрономы скромно отметили память Хаббла на небе. Его именем назвали один из кратеров на Луне возле Краевого моря. Между орбитами Марса и Юпитера движется астероид № 2069 "Хаббл"...

Именем Хаббла названо рукотворное светило – космический телескоп».

Вернемся к модели расширяющейся Вселенной, в которой господствует закон Хаббла (1). Кажется, что сообразно грандиозности задачи о расширяющейся Вселенной должна быть и очень сложная математика (у Фридмана – модифицированная общая теория относительности). На самом деле, есть и простые модели.

Пусть масса M всей материи заполняет с одинаковой плотностью шар радиуса R , и пусть вещество шара – газ каких-то частиц, но давление его пренебрежимо мало. Тогда единственной силой, действующей на частицы газа, будет их взаимное притяжение. Очевидно, что из-за притяжения частиц шар будет сжиматься. Допустим, однако, что он расширяется, то есть, например, всем частицам шара в какой-то начальный момент приданы скорости, направленные от центра шара наружу¹. Что произойдет с шаром дальше?

Рассмотрим некоторую частицу массы m на поверхности шара. Ее скорость, согласно формуле (1), будет равна

$$v_R = HR. \quad (2)$$

Из-за приданной ей начальной скорости частица будет удаляться от центра шара, а ее кинетическая энергия выразится формулой

$$\mathcal{E}_{\text{кин}} = \frac{mv_R^2}{2}. \quad (3)$$

Против этого движения направлена сила притяжения, создаваемая всеми остальными частицами, которая равна $F = -\gamma(Mm)/(R^2)$, где γ – гравитационная постоянная. Она стремится остановить движение частиц, обратив расширение в сжатие.

¹ Не будем задумываться о том, откуда взялись эти скорости.

Потенциальная энергия может быть выражена как FR , то есть

$$\mathcal{E}_{\text{пот}} = -\gamma \frac{Mm}{R}. \quad (4)$$

Из закона сохранения энергии

$$m \left(\frac{v_R^2}{2} - \gamma \frac{M}{R} \right) = \text{const} \quad (5)$$

следует, что

$$v_R^2 = 2\gamma \frac{M}{R} + K, \quad K = \frac{\text{const}}{m}. \quad (6)$$

Таким образом, судьба расширения определяется противоборством тяготения и начального разгона частиц.

Если в соотношении (6) $K > 0$, то расширение будет продолжаться вечно. Если же тяготение велико и $K < 0$, то расширение остановится и сменится сжатием.

Равенство

$$v_R^2 - 2\gamma \frac{M}{R} = 0 \quad (7)$$

определяет граничную ситуацию.

Подставляя соотношение (2) в уравнение (7) и учитывая, что $M = (4/3)\pi R^3 \rho$, где ρ – плотность вещества, получаем

$$R^2 \left(H^2 - \frac{8\pi}{3} \gamma \rho \right) = 0.$$

Отсюда критическая плотность вещества во Вселенной

$$\rho^* = \frac{3H^2}{8\pi\gamma}, \quad (8)$$

что совпадает с оценкой, которую получил А.А. Фридман на основе теории относительности.

Оценки средней плотности вещества во Вселенной близки к критическому значению (8), поэтому приблизительно имеет место соотношение (7), то есть

$$v_R = \frac{dR}{dt} = 3\gamma \frac{M}{R}. \quad (9)$$

Разделяя в (9) переменные и интегрируя от 0 до R и от 0 до t , находим

$$\frac{2}{3} R^{3/2} = \sqrt{2\gamma M} t \quad (10)$$

или

$$t = \frac{2}{3} R^{3/2} \frac{1}{\sqrt{2\gamma M}} = \frac{2}{3} \frac{R}{\sqrt{\frac{2\gamma M}{R}}}, \quad (11)$$

но из формулы (9) $2\gamma(M/R) = v_R = HR$, и

$$t = \frac{2}{3H} \approx 10^{10} \text{ лет}, \quad (12)$$

если $H = 55-75 \text{ км} \cdot (\text{с} \cdot \text{Мпк})^{-1}$; мегапарсек (Мпк)= 10^6 парсек; парсек – расстояние, с которого диаметр земной орбиты виден под углом в одну секунду.

Как указано в книге [2, с. 206], по современным космологическим данным (2003) возраст мира заключен в пределах от 13 до 15 миллиардов лет, что по порядку величины хорошо совпадает с нашей оценкой.

В книге [2] эта оценка получена на основе любимого нами анализа размерностей.

В случае плоского трехмерного пространства из величин γ , ρ и t можно составить только одну безразмерную комбинацию

$$\gamma \rho t^2 = \text{const}, \quad (13)$$

поскольку, скажем, в системе LMT $[\gamma] = L^3 M^{-1} T^{-2}$, $[\rho] = ML^{-3}$, $[t] = T$. Тогда, так как $\rho \sim 1/R^3$, из (13) имеем

$$\gamma \frac{1}{R^3} t^2 \sim \text{const} \quad \text{и} \quad R \sim t^{2/3}$$

(сравни с формулой (11)). Если гравитации вообще нет, то при постоянных скоростях расстояния возрастают пропорционально времени, то есть $R \sim t$. Следовательно, расширение происходит медленнее, чем по инерции, когда тяготение существенно, то есть расширение замедляется со временем.

Постоянная Хаббла по теории Фридмана может меняться при космологическом расширении; она не зависит от направлений и расстояний в пространстве, и в этом смысле ее называют постоянной. Из формулы (12) видно, что $H \sim 1/t$; следовательно, в начальной космологической сингулярности она обращается в бесконечность. Поскольку из формулы (13) следует, что $\gamma \rho \sim H^2$, в бесконечность в исходной «точке» обращается и плотность ρ .

Остановимся теперь на том, как расширение Хаббла связано с частным решением уравнения Бюргера

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}, \quad (14)$$

где $v = v(x, t)$ будем далее трактовать как поле скоростей, $\mu = \text{const}$. В изложении следуем книге [1].

Начнем с выяснения вопроса, будет ли решением уравнения (14) линейная функция от x

$$v(x, t) = \beta(t)x, \quad \beta(t=0) = \alpha.$$

Подставив ее в уравнение (14), находим, что она является решением уравнения Бюргера, если коэффициент $\beta(t)$ удовлетворяет уравнению

$$\frac{d\beta}{dt} + \beta^2 = 0, \quad \beta(t=0) = \alpha.$$

Решив это уравнение, находим $\beta(t) = \alpha/(1 + \alpha t)$, и частное решение уравнения Бюргера (14) имеет вид:

$$v(x, t) = \frac{\alpha}{1 + \alpha t} x. \quad (15)$$

Заметим, что формула (15) вытекает из анализа движения равномерно разлетающихся частиц, скорости которых в начальный момент $v_0(y) = \alpha y$, где y – начальная лагранжева координата частицы. Движение таких частиц задается соотношениями

$$v = \alpha y, \quad x = y + \alpha y t.$$

Исключая из них y , приходим к формуле (15). Тогда можно говорить, что решение (15) есть расширение Хаббла для модели одномерной расширяющейся Вселенной при $\alpha > 0$. Особенность этого решения состоит в том, что со временем поле $v(x, t)$ теряет информацию о коэффициенте α , то есть о начальном профиле, поскольку при $t \rightarrow \infty$

$$v(x, t) \sim \frac{x}{t}. \quad (16)$$

Заметим, что при $\alpha < 0$ решение (15) соответствует сжатию: за конечное время поле всюду обращается в бесконечность, то есть наступает градиентная катастрофа. В реальности во Вселенной есть движения вещества, отклоняющиеся от расширения Хаббла. Для того чтобы понять, как влияет расширение Хаббла на поведение подобных возмущений, решим уравнение Бюргера с начальным условием

$$v(x, t = 0) = \alpha x + \hat{v}_0(x),$$

где первое слагаемое учитывает расширение Хаббла, а второе – возмущения поля скорости. Это условие получается при $t = 0$ из предполагаемого вида решения

$$v(x, t) = \frac{\alpha}{1 + \alpha t} x + \hat{v}(x, t), \quad (17)$$

которое есть сумма однородного расширения Хаббла и поля $\hat{v}(x, t)$, называемого в астрофизике пекулярной скоростью. Последняя отражает развитие возмущений относительно расширяющегося фона. Перейдем к расширяющейся с фоном системе координат, в которой новая координата связана со старой равенством

$$z = \frac{x}{1 + \alpha t}.$$

В новой системе координат искомое поле примет вид:

$$v(x, t) = \alpha z + u(z, t), \quad (18)$$

где

$$u(z, t) = \hat{v}[z(1 + \alpha t), t].$$

Подставив соотношение (18) в уравнение (14), получим

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{1 + \alpha t} u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\alpha u}{1 + \alpha t} + \frac{\mu}{(1 + \alpha t)^2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (19)$$

Из сравнения последнего уравнения с уравнением (14) видно, что расширяющийся фон уменьшает действие нелинейности и ослабляет диссипацию, а также при $\alpha > 0$ ослабляет и само поле. Последнее ослабление объясняется тем, что «частицы» с большой скоростью опережают расширение Хаббла, поэтому разница в скорости между пекулярным возмущением и фоном Хаббла уменьшается.

Явно учесть ослабление пекулярной скорости можно, подставив $u(z, t) = w(z, t)/(1 + \alpha t)$ в уравнение (19). Тогда получим

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{(1 + \alpha t)^2} w \frac{\partial w}{\partial z} = \mu \frac{1}{(1 + \alpha t)^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}. \quad (20)$$

Любопытно, что, если перейти в уравнении (20) к новому времени $\tau = t/(1 + \alpha t)$, то возвращаемся к исходному уравнению Бюргера

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}, \quad w(z, \tau = 0) = \hat{v}_0(z). \quad (21)$$

Заметим, что переход к новому времени τ учитывает упомянутое выше ослабление нелинейности и вязкости на расширяющемся фоне.

Объединив все предыдущие преобразования, окончательно для пекулярной скорости получим

$$\hat{v}(x, t) = \frac{1}{1 + \alpha t} w \left(\frac{x}{1 + \alpha t}, \frac{t}{1 + \alpha t} \right). \quad (22)$$

Из формулы (22) видно, что взаимодействие возмущения $\hat{v}(x, t)$ с расширяющимся при $\alpha > 0$ фоном приводит к уменьшению амплитуды поля и росту пространственного масштаба. Именно за счет этого расширение Хаббла замедляет развитие пекулярного поля, равного в отсутствие расширения $w(x, t)$. Поэтому за бесконечное время $t \in (0, \infty)$ реализуется лишь часть эволюции поля $w(x, t)$, соответствующая интервалу $(0, t^*)$, где $t^* = 1/\alpha$.

Когда $\alpha < 0$, происходит лавинный рост амплитуды пекулярного поля и сжатие масштабов начального возмущения – имеет место глобальная катастрофа. За конечное время $t \in (0, t^*)$, где $t^* = 1/\alpha$, возмущение $w(x, t)$ проходит все стадии возмущения на бесконечном интервале времени.

Такова неожиданная связь явления космического масштаба с частным решением одного из эталонных уравнений нелинейной динамики.

1929 И. Ленгмюр и Л. Тонкс ввели понятия плазмы и плазменной частоты (см. очерк «Ирвинг Ленгмюр – 125 лет со дня рождения» в книге [3, стр. 58–61]).

1934 Павел Алексеевич Черенков, исследуя люминесценцию урановых солей под действием гамма-лучей, открыл новое явление, получившее название эффекта Вавилова–Черенкова [4]. Уже результаты первых опытов привели С.И. Вавилова к выводу, что обнаруженное явление не есть люминесценция. Он же высказал предположение, что источником излучения служат быстрые электроны, создаваемые гамма-лучами. Сегодня под эффектом Вавилова–Черенкова понимают излучение, возникающее при движении в веществе заряженных частиц, когда их скорость превышает фазовую скорость волн в этой среде. Отличительным свойством излучения является его направленность. Излучение возникает только в направлениях, составляющих вполне определенный острый угол θ с траекторией частицы, то есть вдоль образующих конуса, ось которого совпадает с направлением скорости частицы v . При этом имеет место соотношение

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n},$$

фото

φωτο

где $\beta = v/c$, c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды; $v > u = c/n$ или $\beta n > 1$. Заметим, что такой же конус получается при равномерном движении тела в газе со сверхзвуковой скоростью. Он называется в этом случае конусом Маха. Если лодка равномерно движется по поверхности воды со скоростью, превышающей скорость волн на воде, то образуется аналогичная ударная волна, расходящаяся от носа лодки.

В том же 1934 году американский физик П.У. Бриджмен разработал методы и приборы, позволившие увеличить максимальную величину давления от 1200 МПа до 10000 МПа. Подвергая действию высокого давления различные вещества, он впервые открыл изменение их кристаллической структуры.

В 1946 году П.У. Бриджмен удостоен Нобелевской премии «За исследования и открытия в физике высоких давлений».

Читатель наверняка заметил, что любимый аппарат автора при изложении теории во всех статьях о датах нелинейной динамики – анализ размерностей. При этом автор неоднократно пользовался как учебником книгой П.У. Бриджмена «Анализ размерностей» [5], которая впервые была издана на русском языке в том же 1934 году. В предисловии к русскому изданию С.И. Вавилов писал: «Книга Бриджмена, насколько нам известно, является первой удачной попыткой в этом направлении. Достоинства книги – в ее простоте, конкретности и увлекательности. Помимо оригинального, критического изложения теоретических основ метода, читателю предлагается большое число очень искусно подобранных несложных примеров, разобранных в подробностях; в конце книги, кроме того, приложено 32 задачи на анализ размерностей... П. Бриджмен настойчиво полемизирует со старыми и новыми физиками, пытавшимися усмотреть в формулах размерности откровения о "предельной сущности" физических величин. Анализ размерностей может дать очень много, кроме, однако, того, что в нем заведомо не может содержаться».

Заметим, что в [5] напечатана также Нобелевская лекция П.У. Бриджмена «Общий обзор некоторых результатов в области физики высоких давлений».

1939 Получен патент СССР на радар.

Опубликована статья [6], в которой описывались генераторы и усилители сверхвысоких частот, названные клистронами. История их создания весьма интересна и описана в статье [7]², а также в разделе «100\$ идея братьев Вариан и Хансена» книги [8] и в §5 главы 3 книги [9].

Заметим, что во многих книгах о нелинейных волнах рассматривается простая модель – возмущенный поток невзаимодействующих частиц (см., например, §1 главы 2 книги [10]). В одномерном приближении скорость частиц удовлетворяет уравнению

$$\frac{dv(x,t)}{dt} = \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + v \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0. \quad (23)$$

В электронике уравнение (23) описывает в рамках так называемой кинематической теории поведение электронного потока в трубе дрейфа (в ней отсутствуют какие-либо поля) приборов клистронного типа (простейший двухрезонаторный клистрон

²Название статьи определяется тем, что Станфордский университет выделил на исследования братьев Вариан и Хансена 100 долларов.

обсуждается в [8] и [9]). За счет предварительного возмущения на входе в трубу дрейфа электроны имеют разные скорости, что приводит в трубе дрейфа к образованию электронных уплотнений – группированию электронного потока. Внешне уравнение (23) совпадает с уравнением нелинейной волны, хотя, конечно, поток невзаимодействующих частиц не является нелинейной средой. Решения уравнения (23) известны, и их называют простыми волнами или волнами Римана. В электронике идеальному группированию электронов (в некоторой точке плотность объемного заряда пучка обращается в бесконечность) в волновой модели соответствует такое укручение, скажем, первоначально синусоидальной волны, при котором на ее переднем фронте производная $\partial u/\partial x$ обращается в бесконечность. Далее происходит опрокидывание волны, то есть образуются встречные пучки (детали см., например, в [10]).

Прошли годы... И появилась еще одна почти 100\$ идея, экспериментальная реализация которой принадлежит профессорам Ю.Д. Жаркову, Б.С. Дмитриеву и инженеру В.Н. Скороходову (все из Саратовского государственного университета). Думаю, что в масштабах наших дней финансовая поддержка этой группы была порядка тех же 100\$ 1937 года.

Эти авторы исследовали автогенераторы с запаздывающей обратной связью на основе многорезонаторных клистронов, обладающих высоким уровнем мощности и КПД [11–13]³. Особое внимание уделялось режимам динамического хаоса в таких автогенераторах. Подобные источники представляют интерес для ряда практических приложений, таких как ускорение заряженных частиц, сверхвысокочастотный нагрев плазмы, создание технологических установок и современных систем передачи и обработки информации с использованием динамического хаоса.

Экспериментально исследованы также различные виды синхронизации для двух связанных клистронных автогенераторов. В частности, показано, что в односторонне связанных клистронных автогенераторах (ведомом и ведущем) в результате реализации механизма подавления собственной хаотической динамики в ведомом клистронном автогенераторе имеет место обобщенная синхронизация, которая заключается в установлении функциональной зависимости между состояниями связанных клистронных автогенераторов.

Таким образом, семидесятилетний клистрон обрел новую жизнь.

1944 Американский математик Г.Х. Эйкен сконструировал в Гарвардском университете автоматическую вычислительную машину «MARK–1» (проект 1937 года).

1949 Созданы первые машины-переводчики (для перевода с русского на английский).

В Кембриджском университете введена в строй первая программируемая ЭВМ, сконструированная английским математиком М.В. Уилксом.

Не состоялось Всесоюзное совещание физиков, намеченное также на 1949 год, аналогичное печально известной сессии ВАСХНИЛ, что спасло советскую физику от уничтожения. Этому периоду в жизни физиков посвящена книга А.С. Сонина «Физический идеализм: История одной идеологической кампании» (М.: Физматлит, 1994, 224 с.). Предисловие к книге написал членкор РАН Сергей Михайлович Рытов. Вот несколько моментов из этого предисловия.

³Заметим, что первой теоретической работой в этом направлении была статья [14].

«Книга А.С. Сонины возвращает читателя к тем периодам нашей истории, когда догматизированный и вульгаризированный ”диамат” вел активное наступление на науку. Официальная идеология вознамерилась подчинить себе самое антидогматическое из всего, что создал человеческий разум, – науку. Подчинить не удалось. Потому что наука – это всепобеждающий процесс познания реального мира, поднимающий человеческий разум ко все более высокому совершенству. Однако удалось нанести тяжкие удары по свободе научной мысли, надолго задержать в нашей стране развитие новых научных идей и создать отставание даже в тех направлениях, в которых мы были на переднем крае научного фронта. Последствия этих ”побед” мы ощущаем до сих пор.

Книга актуальна и современна. Она подробно и конкретно рассказывает о фактах истории физики в нашей стране и выразительно рисует возникавшие в определенные периоды попытки превратить физику в ”служанку идеологии”, подобно тому, как в давние времена и в других странах религиозная догматика стремилась сделать науку ”служанкой богословия”⁴... Книга не призвана доставить читателю удовольствие или развлечь его, но прочитать ее и знать об имеющихся документальных первоисточниках полезно и необходимо не только ученым разных специальностей, в том числе физикам и историкам, но и широкому кругу читателей. Это сделает ретроспективный взгляд на пройденный путь более правильным и точным. Пройдут годы, и то, что еще не так давно было общеизвестным, может потускнеть в результате вольных или невольных умолчаний. В том, чтобы так не случилось, я вижу ценность и интерес исторических поисков автора и его книги».

1954 Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и независимо от них Ч.Х. Таунс разработали проекты квантовых генераторов (усилителей) электромагнитного излучения. В 1954–1955 годах Ч.Х. Таунс сконструировал простой молекулярный генератор (мазер) на аммиаке.

1959 50 лет назад была опубликована статья Бориса Павловича Белоусова «Периодически действующая реакция и ее механизм» в «Сборнике рефератов по радиационной медицине за 1958 г.» (М.: Медгиз, 1959, с. 145). В ней был приведен пример колебательной реакции – реакции, которую лауреат Нобелевской премии Илья Романович Пригожин определил как один из важнейших экспериментов ушедшего XX века. О реакции сейчас написано много. Гораздо меньше известно о судьбе ее автора. Есть только две крупные работы [16] и [17], материалами из которых мы далее воспользуемся. Начнем с большой цитаты из книги [17].

«...Вы смотрите на стакан с красно-лиловой жидкостью, а он вдруг становится ярко-синим. А потом снова красно-лиловым. И снова синим. И вы невольно начинаете дышать в такт колебаниям. А когда жидкость налита тонким слоем, в ней распространяются волны изменения окраски. Образуются сложные узоры, круги, спирали, вихри или все обретает совершенно хаотический вид».

Эта реакция известна уже более 50 лет. В 1951 году открыл ее Б.П. Белоусов, а Анатолию Марковичу Жаботинскому принадлежит ее детальное изучение и то, что она стала общедоступным достоянием [18].

⁴К сожалению, Русская православная церковь после краха СССР, получив свободу, занялась реставрацией своего былого могущества в царской России. В частности, делаются противозаконные попытки внедрения в образование идеи креационизма в противовес эволюционной теории (см. заявление Inter Academy Panel о преподавании эволюции: Изв. вузов. ПНД, 2009, т. 17, № 5, с. 112–113) и введения в государственную среднюю школу «Закона Божьего» под видом предмета «Основы православной культуры». В этом плане для читателей интересна книга академика В.Л. Гинзбурга [15].

«Реакция именуется особо почетным образом – двумя инициалами: BZ-reaction. Открытие Белоусова практически завершило почти 150-летний поиск колебательных режимов в химических процессах. Периодические процессы вообще, по-видимому, одна из основ для построения теорий в самых различных отраслях. Периодичность – регулярное повторение чего-либо во времени и (или) в пространстве – убеждает нас в познаваемости мира, в причинной обусловленности явлений. В сущности, периодичность – основа мировоззрения детерминизма. Понимание ее природы позволяет предсказывать события, скажем, затмения или появление комет. А такие предсказания – главное доказательство силы науки.

История BZ-reaction – яркая иллюстрация старой загадки: что было раньше – курица или яйцо? Что первично – феномен, требующий теоретического объяснения, или теория, предсказывающая появление известного феномена? На самом деле, это – ”порочный круг”... Инерция ”здорового смысла” – причина множества трагических судеб, печальной традиции ”посмертной славы”, когда замечательные открытия оказываются преждевременными, непризнанными при жизни авторов. Открытие Белоусова в этом ряду».

Но начнем издалека, с конца девятнадцатого века [16, 17]. В семье банковского служащего Павла Николаевича Белоусова было шесть детей – все сыновья. Детями занималась мать, Наталья Дмитриевна, сумевшая воспитать людей глубокой порядочности и глубокой внутренней дисциплины.

Старший сын Александр в 17 лет – уже революционер с планами взрывать, стрелять, скрываться во имя идей мировой справедливости. Конечно, он увлекает этими идеями и младших братьев, включая Бориса, которому 12 лет. Чтобы делать бомбы, нужна химическая лаборатория, которую братья и соорудили на чердаке московского дома на Малой Полянке.

«Братья были увлечены по-настоящему. Делать бомбы в 12 лет – это же наслаждение! Да еще испытывать их! И чтобы не знала мама! Детство Белоусова – это мечта (для Тома Сойера и Гекльберри Финна)» [17, с. 280].

После подавления революции 1905 года Александру, возглавлявшему группу боевиков, удалось скрыться; его арестовали через год, но он бежал из сибирской ссылки. Арестованный Сергей назвал себя именем какого-то члена партии большевиков, который был ценнее для подполья, чем он, и погиб в Сибири. Арестовали и четырнадцатилетнего Владимира и двенадцатилетнего Бориса, который в те годы еще спал в обнимку с плюшевым медведем (жандармы принесли его юному революционеру в тюрьму).

«Матери вскоре предложили: либо всех сошлем в Сибирь, либо отправляйтесь в эмиграцию. Естественно, она предпочла Швейцарию. Выехали в большевистскую колонию, ведь брат был большевиком. Борис оказался в окружении большевиков там, где ”в тяжелых условиях эмиграции” они готовили то, что потом устроили.

Веселое воспоминание Бориса Павловича, как он играл в шахматы с Лениным. Ленин, чтобы победить, всячески поносил своего противника, пытаясь его деморализовать. Это очень обижало Бориса: что же он так ругается... Таким было его единственное соприкосновение с вождями.

Больше он никогда не занимался революционно-политической деятельностью. И в партию никогда не вступал. Как ему удалось при этом достичь больших военных чинов в Советском Союзе? Но может быть поэтому он остался жив в 37-м – большевики тогда чаще убивали своих» [17, с. 281].

Старший брат стал экономистом. Он умер в Ленинграде во время блокады.

К началу войны он окончил писать книгу по экономике, но в блокаду погибла и его книга.

Борис в Цюрихе блестяще окончил гимназию и поступил в Политехникум, где нужно было платить за обучение, причем самый большой денежный взнос полагалось делать при получении диплома. Борис Павлович закончил обучение без диплома, что в дальнейшем стало причиной многих неприятностей.

Братья вернулись в Россию во время Первой Мировой войны. Борис пытался добровольцем уйти на фронт, но его не взяли «по малости веса», настолько худым он был. Он стал работать на металлургическом заводе Гужона (в советское время завод «Серп и молот») в химической лаборатории, которой идейно руководил великий химик Ипатьев⁵ – создатель теоретических основ промышленной химии. Лаборатория Ипатьева занималась военной химией, где Борис Павлович разрабатывал особые составы для противогазов, способы борьбы с отравляющими веществами. После гражданской войны он стал военным, преподавал химию в ряде военных учебных заведений, дослужился до высокого военного звания комбрига, равного генерал-майору инженеру.

Но главным делом его жизни остаются научные исследования. «Он автор множества научных трудов. Но в силу их специфики ни одной строчки трудов Белоусова, даже их краткого изложения, никогда и нигде не было опубликовано. Все шло в виде закрытых инструкций, приказов с грифом “совершенно секретно.” ...Есть копия некогда секретного отзыва академика Александра Николаевича Теренина, где он называет Бориса Павловича выдающимся химиком. Отзыв был написан в связи с возможностью присуждения ему степени доктора химических наук без защиты диссертации... Но Б.П. ничего не хотел, никаких дипломов – “от этого не становятся умнее”» [16, с. 283–284].

В 1935 году Белоусов ушел из армии в долгосрочный отпуск, а потом, после 1938 года – в отставку. Может быть, это спасло его от массовых репрессий 1937–1938 годов, когда погибли многие сослуживцы и друзья Белоусова.

К военному периоду жизни Белоусова относится легенда, которая в повести В. Полищука «На общих основаниях» [16] изложена в главе «Фольклор». Вот ее суть. «Возник однажды в случайной компании спор: с какого момента в нашей стране появилась бриллиантовая зелень, в просторечии зеленка, которой смазывали все – от тяжелых солдатских ран до аллергических прыщиков на детских физиономиях? Казалось, зеленка существовала испокон веку. Но один из спорщиков, незнакомый мне человек старшего поколения, твердил: нет, она появилась не так давно. Только перед войной, мол, засияли ярко-зеленые пятна вокруг мальчишеских порезов, болячек. И предъявил сей незнакомец невесть откуда взявшийся у него документ.

”Руководство Наркомздрава выражает благодарность тов. Белоусову за успешную разработку и внедрение в массовое производство фармакопейно чистого препарата “Бриллиантовый зеленый”... Благодаря оригинальной разработке тов. Белоусова отпала необходимость импорта препарата, а обеспеченность бойцов Красной Армии и гражданского населения антисептическими средствами достигла необходимой нормы.

... марта 1938 года”.

По строгому счету, заключать это в кавычки нельзя: документ приведен не дословно, по памяти. Потому, кстати, и дата не вполне точная. Инициалы человека, одарившего нашу страну знаменитым антисептиком, были невняты – то ли Б.Н., то ли В.Н. Тускло печатали старые машинки. Фамилия, однако, запомнилась».

Что ж, если и легенда, то красивая.

⁵С.Э. Шноль пишет [17, с. 282]: «Сейчас говорят, в России было три великих химика: Ломоносов, Менделеев и Ипатьев. Ипатьев... в 30-м году, предвидя арест, сумел уехать за границу и поселился в США. В Америке ему посвящены труды, симпозиумы и т.п. В России же его почти не знают».

Борис Павлович стал работать заведующим лабораторией в секретном медицинском институте, где главным образом занимались токсикологией. Однако вскоре вспомнили, что у него нет университетского диплома, и перевели на должность старшего лаборанта с сохранением обязанностей заведующего лабораторией.

И еще одна замечательная цитата.

«Директор института тем не менее понимал, с кем имеет дело. Сейчас этого не постичь, но тогда главные и не очень главные бумаги имели подпись Сталина. На это же имя было написано письмо о том, что в секретном нашем учреждении работает заслуженный человек, зарплата у него низкая, как у старшего лаборанта, поскольку не имеет диплома о высшем образовании, а на самом деле он заведует лабораторией. На этом письме Сталин начертил: "Платить как заведующему лабораторией, доктору наук, пока занимает должность". Толстым синим карандашом. Недруги приумолкли: сам Сталин велел платить. Длилось это, правда, недолго – Сталин вскоре умер» [16, с. 284–285].

Мы уже упоминали, что главное дело жизни Белоусова – периодическая химическая реакция – была открыта в 1951 году. К этому времени был открыт цикл Кребса – периодические биохимические реакции, когда одно вещество превращается во второе, второе – в третье, третье – в четвертое и т.д., а потом опять образуется первое. Возможно, Белоусов подумал: «А почему бы не создать химическую аналогию биологических циклов?» Шноль считает, что Борис Павлович вспомнил «химию детства», когда в 1905 году он брал бертолетову соль для изготовления бомб, а аналогом соли является $KBrO_3$ (там хлор, а здесь бром). Тогда можно создать реакцию, в которой лимонная кислота – исходный компонент цикла Кребса – будет окисляться этим аналогом бертолетовой соли. Когда бром выделится в ходе реакции, то он будет виден, поскольку окрашен.

«Это была удача. Чтобы ускорить реакцию, Борис Павлович добавил в раствор каталитические количества соли церия. Церий – элемент переменной валентности, он катализирует окисление, переходя из четырех- в трехвалентное состояние. В растворе, в довольно концентрированной серной кислоте, сначала действительно появилась желтая окраска, но потом почему-то исчезла и вдруг возникла снова, а потом опять исчезла... Так была открыта колебательная химическая реакция в растворе (а желтый цвет, как позднее показал Жаботинский, не от брома, а от церия)» [16, с. 285–286].

Далее события развивались так. Коллега и друг Белоусова Софронов предложил ему добавить в уже идущую реакцию железо-фенантролин. Вот как этот эпизод и дальнейшее описывается в повести [20, с. 198–199].

«Долго ли, коротко ли – натывается Белоусов на сочетание концентраций, при котором раствор в колбе желтеет раз, другой и, подмигнув дружески, гаснет... И вот наконец Борис Павлович нападает на золотую жилу: колба включается всерьез и надолго. Мерцает, родимая, и по двадцать раз и по сорок, а интервалы между тактами – хоть по секундомеру проверяй. Только к концу, когда исходных веществ в растворе становится мало, мерцания реже. "Стареет реакция", – определяет для себя Белоусов и звонит Пигалеву (друг и сотрудник Белоусова. – *Д.И.Т.*). По телефону, однако, никаких сенсаций не преподносит, а говорит слова обыденные: "Старик, иди пить чай". Иван Александрович слегка удивляется: до привычного времени чаепития еще добрых полчаса, – однако идет. В белоусовской комнате он застаёт Софронова. Тот вместе с хозяином созерцает колбочку, в которой бурлит пена, возносящая лохмотья какого-то осадка, а раствор в колбе время от времени желтеет... А молчун Софронов срывается с места, выходит и

отсутствует минут пять. Возвращается с крошечным бумажным кулечком, содержащим несколько кристаллов. "Подсыпь-ка этого", – только и говорит. Борис Павлович подсыпает – и бледно-желтая окраска внезапно сменяется ярчайшей синью. Синь резко, будто щелкнул выключатель, переходит в красноту. Потом снова, будто щелкнуло, синь. И так много раз. "Железо-фенантролин", – односложно отвечает Софронов на невысказанный вопрос... Показывается и совсем иной фокус. Запустив на полный ход сине-красное чередование, Белоусов осторожно подливает поверх раствора чистую воду. Она понемногу разбавляет слои, лежащие ниже, время пульсации в каждом становится свое, и окраски начинают не просто чередоваться, а пробегать снизу вверх волнами, полосами. "Колба-зебра" – шепчет счастливчик новое, тут же придуманное слово...»

Однако статьи Белоусова, посланные в 1951 и 1955 годах, были отвергнуты на том основании, что описанная автором реакция принципиально невозможна. А журналы были очень солидные – «Журнал общей химии» и «Кинетика и анализ».

Но был ли Белоусов первым? Многим популярность VZ-reaction кажется несправедливой, а значимость Белоусова – преувеличенной [19]. При этом ссылаются на более ранние работы (в частности, на удивительно полную обзорную монографию [20]). Знал ли Белоусов о предшественниках? Не мог не знать, особенно книгу [20]. Пожалуй, в плане работ-предшественников представляет интерес лишь работа [21], на которую есть ссылка в [20]. Сюжет ее обнародования носит детективный налет.

Итак, Дрезден, 22 мая 1906 года, 9 часов утра. На заседании в главной аудитории химической лаборатории Политехнического института Роберт Лютер (Лейпциг) читает лекцию, в которой впервые демонстрируется существование движущихся волн в однородной жидкофазной химической системе. Основная цель лекции – дать на основе аналогии с волнами в химической системе возможную интерпретацию распространения нервного импульса.

Не менее важным было лишь упоминание Р. Лютером того, что скорость распространения химических волн выражается простой формулой $v = \alpha\sqrt{kD}$ где D – коэффициент диффузии, k – абсолютная скорость автокаталитической реакции, α – константа пропорциональности. Именно этот результат вызвал дискуссию, отрывок из которой мы приводим.

«Вальтер Нернст⁶ (Берлин): "...Мне бы хотелось напомнить Вам, что распространение нервного импульса происходит со скоростью порядка 30 м·с⁻¹ (выкрики из зала: 50!). Это от 100 до 130 км·ч⁻¹, что быстрее, чем самый быстрый поезд. Однако, наблюдая Ваш красивый эксперимент, мы убедились, что скорость распространения – величина совершенно другого порядка. С Вашего позволения, это одна сотысячная или одна миллионная от скорости, необходимой в нерве. Мне бы хотелось спросить Вас сейчас, и думаю, это ключевой момент, возможно ли получить такие большие скорости Вашим способом?"

Роберт Лютер (Лейпциг): "...Для автокаталитической реакции применима формула второго порядка, которую я уже выписывал. Скорость v равна $\alpha\sqrt{KCD}$, где α – численная безразмерная константа между 2 и 10. Константа D не может быть возрастающей по смыслу. Концентрация C не может быть возрастающей по смыслу. Однако, константа скорости K автокаталитической реакции может, в принципе, принимать любое большое

⁶Из комментариев переводчика к статье [21]: «Вальтер Нернст, открывший третий закон термодинамики, был в это время профессором химической физики в Берлине. В 1904 году он был назначен Geheimrat, то есть личным советником. Нернст был ассистентом Оствальда в Лейпциге с 1887 по 1890 год. Лютер стал ассистентом Оствальда в 1896 году и продолжал им быть в 1906 году, заведующим лабораторией в Лейпциге.

значение (в формуле, приведенной выше, $k = KC$. – Д.И.Т.)⁷. Поэтому возможность, что у нас будут чрезвычайно быстрые автокаталитические реакции и что нервы используют подобные реакции в своих целях, не может быть не принята в расчет.”

Вальтер Нернст (Берлин): ”Кто вывел эту формулу?”

Роберт Лютер (Лейпциг): ”Я”.

Вальтер Нернст (Берлин): ”Но вывод ее еще не был опубликован?”

Роберт Лютер (Лейпциг): ”Нет, но это лишь простое следствие из соответствующего дифференциального уравнения”.

Вальтер Нернст (Берлин): ”Откровенно говоря, я не могу понять, как достичь таких больших скоростей, но мы будем ждать с большим интересом полной публикации”.

Роберт Лютер (Лейпциг): ”Я хочу добавить, что экспериментально мы безусловно не способны достичь высоких скоростей. Так как мы всегда замечаем, что чем больше K , тем неустойчивей, ненадежней эксперимент, и смесь легче реагирует. Мы вынуждены ограничиться относительно медленными реакциями и малыми скоростями распространения”».

В статье [22], которая посвящена открытию и анализу химических волн Роберта Лютера, приведен следующий комментарий этой дискуссии. «Замечание Р. Лютера, что данная формула является ”простым следствием из соответствующего дифференциального уравнения”, могло быть колкостью в сторону Нернста, так как подробное решение едва ли тривиально. Возможно, Р. Лютер имел в виду метод размерностей. Если, как удобно предположить, скорость распространения $v [LT^{-1}]$ химических волн зависит только от коэффициента диффузии $D [L^{-2}T^{-1}]$ и $k [T^{-1}]$ – абсолютной скорости автокаталитической реакции, тогда $v = \alpha\sqrt{kD}$, где α – безразмерная константа (использована система единиц LT). Но метод размерностей едва ли гарантирует, что α – это число между 2 и 10, как отмечал Р. Лютер».

Авторы [22] строго выводят соотношение Р. Лютера для скорости и указывают также, что «попытки воспроизвести некоторые из экспериментов Лютера имели ограниченный успех». Заметим, что, хотя предположения Лютера о том, что нервные импульсы представляют собой распространяющиеся химические волны, не подтвердилось, подобие химических волн и нервных импульсов не случайно: оно прослеживается в подобии математического описания. Интересно, что Р. Лютер указывает и на аналогию распространения химических волн и волн горения. Кстати, вывод своей формулы Лютер так и не опубликовал.

Вернемся к вопросу о приоритете. Б.П. Белоусов мог знать о работе Р. Лютера, поскольку, как уже указывалось, была книга [20] – энциклопедия того времени по физико-химическим периодическим процессам, а в ней была ссылка на работу Р. Лютера [21, на немецком языке]. Наверняка знали книгу [20] и другие работы по периодическим реакциям и высокообразованные рецензенты работ Б.П. Белоусова.

Почему же статьи были отвергнуты? С.Э. Шноль видит причину в следующем.

«Дело, видимо, в ”инерции предыдущего знания”. Все, наблюдавшиеся до этого случаи колебаний в химических реакциях можно объяснить пространственными эффектами, например, перепадом температур на стенках колбы или диффузионными ограничениями скоростей реакции...

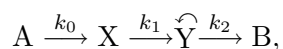
⁷Из комментариев переводчика к статье [25]: «Константа скорости второго порядка не превышает $10^{11} \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$, что является скоростью соударения с ограниченной диффузией. Для обычной константы диффузии $D = 10^{-6} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ и $C = 1 \text{ M}$. Формула Лютера предполагает максимальные скорости $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Не известны химические волны, распространяющиеся так быстро, обычные скорости составляют $10^{-4} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ($6 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$)».

Но главным препятствием было... знание равновесной термодинамики. Не мог образованный человек представить себе в беспорядочном тепловом движении огромного числа молекул макроскопическую упорядоченность – все молекулы то в одном, то в другом состоянии! Будто признать существование вечного двигателя. И в самом деле не может этого быть. Не может быть вблизи состояния равновесия, а только его и рассматривала термодинамика тех лет. Однако никаких ограничений на сложные, в том числе колебательные, режимы нет для неравновесных химических систем, когда реакции еще не завершились и концентрации реагентов не достигли равновесного уровня. Но это обстоятельство ускользнуло от внимания химиков. Всем ясно, термодинамика – не просто раздел физики. Триумф равновесной термодинамики, созданной гигантами – Карно, Майером, Гельмгольцем, Больцманом, Планком, Гиббсом, Нернстом, определил мировоззрение нескольких поколений исследователей.

Потребовалось чрезвычайное интеллектуальное напряжение, чтобы вырваться из "железных оков полного знания" и исследовать поведение систем вдали от равновесия, чтобы создать термодинамику неравновесных процессов. В этом жизненный подвиг Онзагера и Пригожина» [17, с. 287–288].

Заметим, что к описываемому времени уже существовало общее доказательство возможности колебаний в однородной гомогенной системе. Гомогенность системы чрезвычайно важна. Напомним, что гомогенной называется система, внутри которой отсутствуют поверхности раздела, отделяющие друг от друга части системы, отличающиеся по составу и свойствам. Причем указанные части должны быть достаточно велики, чтобы были применимы понятия температуры, концентрации и т.п.

В 1910 году Альфред Лотка [23] предложил гипотетическую химическую реакцию, состоящую в следующем. Предположим, что в избыточном состоянии имеется некоторое вещество А, которое с определенной скоростью переходит в вещество Х. В «избыточном состоянии» – означает, что количество вещества А практически не изменяется. Вещество Х со скоростью k_1 превращается в вещество Y. Чем больше вещества Y, тем эффективнее превращается в него Х. Наконец, вещество Y со скоростью k_2 превращается в вещество В. Символическая запись реакции Лотки выглядит так:



k_0, k_1, k_2 – абсолютные скорости реакций; стрелочка над Y соответствует тому, что вещество тем эффективнее превращается в Y, чем больше вещества (мы уже упоминали об этом).

Обозначим концентрации взаимодействующих веществ через X, Y, A, B . Тогда символической записи реакции соответствует система уравнений

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = k_0 - k_1XY, \\ \frac{dY}{dt} = k_1XY - k_2Y, \\ \frac{dB}{dt} = k_2Y. \end{cases}$$

Для того чтобы скорость образования вещества В была постоянной ($dB/dt = 0$), необходимо, чтобы концентрации веществ X и Y не зависели от времени ($dX/dt =$

$= dY/dt = 0$). Тогда из первых двух уравнений, выписанных выше, находим, что

$$\begin{cases} k_0 - k_1XY = 0, \\ k_1XY - k_2Y = 0. \end{cases}$$

Решая данную систему уравнений, определяем так называемые равновесные значения концентраций

$$\bar{X} = \frac{k_2}{k_1}, \quad \bar{Y} = \frac{k_0}{k_2}.$$

Решение $\bar{Y} = 0$, следующее из последнего уравнения исходной системы, интереса не представляет.

Зададим малые отклонения $x(t)$ и $y(t)$ от равновесных значений, полагая

$$X(t) = \bar{X} + x(t), \quad Y(t) = \bar{Y} + y(t).$$

Предположим, что $x(t) \ll \bar{X}$, $y(t) \ll \bar{Y}$, и всеми величинами, содержащими произведения x и y , вторые и более высокие степени x и y , можно пренебречь. Подставляя выражения $X(t)$ и $Y(t)$ в исходную систему уравнений и пренебрегая слагаемыми с xy , получим линеаризованную систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -k_2y - \frac{k_1k_0}{k_2}x, \\ \frac{dy}{dt} = \frac{k_1k_0}{k_2}x. \end{cases}$$

Продифференцируем по времени первое уравнение из последней системы и подставим в получившееся второе из этой системы. Окончательно получим уравнение маятника с затуханием

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0,$$

где $(k_1k_0)/k_2 = 2\gamma$, $k_1k_0 = \omega_0^2$.

В 1920 году А. Лотка, а позднее, независимо, в 1931 году и В. Вольтерра, предложили систему с двумя последовательными актокаталитическими реакциями, в которой колебания могли быть уже незатухающими [24].

«Сложилась характерная для жизни нового знания ситуация: есть старая теория Лотки–Вольтерры – колебания в гомогенных химических системах возможны, и есть общее мнение – они невозможны, так как противоречат основам науки. Вот почему экспериментальное, бесспорное доказательство существования колебательных режимов в гомогенных растворах, в системах перемешивания приобрело такое большое значение» [17, с. 289].

Как справедливо замечает С.Э. Шноль, позиции химиков и физиков при этом кардинально различаются. Именно в это время школой академика Л.И. Манделштама создается теория колебаний. Один из ярких результатов получен А.А. Андроновым. Он состоит в установлении связи между теорией автоколебаний и предельными циклами Пуанкаре. Замечательные результаты о периодических процессах в кинетике окислительных реакций (см., например, [25]) получены Д.А. Франк-Каменецким.

К этому же времени относятся работы И.Е. Сальникова, выполненные под руководством Д.А. Франк-Каменецкого, в частности, его кандидатская диссертация «К теории периодического протекания гомогенных химических реакций», которая была отвергнута в Институте химической физики и успешно защищена в Горьком, в институте А.А. Андропова.

Завершая этот краткий экскурс в историю, заключим его словами С.Э. Шноля. «В 1951 году генерал Белоусов послал статью об открытой им колебательной реакции в "Журнал общей химии". И получил обидную отрицательную рецензию: "Такого быть не может"» [21, с. 290].

В этом же 1951 году в истории периодической химической реакции Б.П. Белоусова появляется новый герой – Симон Эльевич Шноль, который как раз закончил университет и получил диплом с отличием. Его участие в белоусовской истории он описал сам [17, с. 290–303], поэтому мы не будем подробно писать об этом, осветив лишь самые важные моменты.

Симон Эльевич – действительно герой российской науки, поскольку именно благодаря ему Б.П. Белоусов опубликовал заметку 1959 года (см., например, Приложение к книге [26]) и именно благодаря ему (под его руководством) А.М. Жаботинским были проведены исследования, которые привели к тому, что BZ-reaction стала всемирно известной, именно благодаря ему в 1980 году Борису Павловичу присудили Ленинскую премию (посмертно).

«К 1963 году основной качественный этап изучения реакции Белоусова был завершен. Борис Павлович об этом знал, Толя ему звонил. Аспиранту Жаботинскому нужно было написать статью. И он написал весьма ценную первую статью [27]... Статья произвела такой неожиданный эффект, что восхищенное человечество назвало реакцию именами Белоусова и Жаботинского» [17, с. 299].

В 1967 году была предложена первая модель колебательной реакции белоусовского типа с тремя динамическими переменными [28] (см. также [18, с. 107–113]):

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = k_1 x_1 (C - x_2) - k_0 x_1 x_3, \\ \frac{dx_2}{dt} = k_1 x_1 (C - x_2) - k_2 x_2, \\ \frac{dx_3}{dt} = k_2 x_2 - k_3 x_3, \end{cases}$$

где $x_2 = [\text{Ce(IV)}], [\text{Ce(III)} + [\text{Ce(IV)}]] = C$, x_1 – концентрация автокатализатора, $x_3 = [\text{Br}^-]$. Предполагалось, что после реакции $x_1 + x_3$ ионы Br^- полностью регенерируются. Были обнаружены автоколебания.

Наиболее полная сводка результатов о колебаниях и волнах в химических системах имеется в [26, 29]⁸.

В книге [17, с. 302] есть замечательный эпизод о демонстрации реакции Белоусова Президенту АН СССР Мстиславу Всеволодовичу Келдышу 16 декабря 1964 года.

«Жаботинский кратко изложил суть: Келдыш свирепел, если говорили долго. В стакане пошли колебания, мы думали, что Келдышу этого достаточно, но он зло посмотрел на стакан и сказал: "Вы от меня скрываете самое главное?" А самым главным были

⁸Современное изложение анализа простейших нелинейных кинетических моделей дано в монографии [30].

цветные волны, которые начинались у дна и шли вверх. Келдыш был специалистом по пространственным эффектам колебаний. Жаботинский пространственные волны, конечно, заметил, но еще в этом не разобрался и решил не рассказывать о них Келдышу. Не тут-то было! Президент ужасно рассердился, решив, что ему просто не хотят рассказывать... Реплика была чрезвычайной важности. А потом мы узнали, что это видел и Белоусов. Даже назвал колбу "зеброй". И полагал это наиважнейшим» (мы упоминали об этом). От «зебры» пошла новая часть науки – распространение волн в активных средах.

И вновь – слово С.Э. Шнолю.

«Итак, преувеличено ли значение открытой Белоусовым реакции? Нисколько. Справедлива ли его посмертная слава? Без сомнения. И она нисколько не умаляет заслуг множества исследователей, на протяжении почти трех столетий изучавших эти проблемы.

Осталось сказать, что, пока человечество узнавало про Бориса Павловича Белоусова, его выгнали из института... "поскольку он стар и часто болеет". Он в самом деле был стар, но его творческая активность оставалась очень высокой. Он не вынес жизни без лаборатории и умер 12 июня 1970 года» [17, с. 303].

1959 50 назад Ричард Фейнман прочитал в Калифорнийском Технологическом институте рождественскую лекцию под названием «Внизу полным-полно места: приглашение войти в новый мир физики – мир миниатюризации», в которой обозначил перспективы будущей микроминиатюризации электроники. Фейнман высказал идею о том, что для перехода за определенный предел миниатюрности следует отказаться от известных технологий, рассчитанных на макротехнику. И вот в настоящее время мы становимся свидетелями построения нанотехнологической цивилизации.

Не удержимся от изложения одного забавного факта, приведенного в книге [31].

«Любопытно, что впервые термин «нано» был введен в науку довольно давно, например, для описания объектов, размер которых в миллиарды раз превышает 1 нм – в терминологии динозавров. Так, длина нанотиранозавра (*nanotyrannus*) и нанозавра (*nanosaurus*)..., составляет, соответственно, 5 и 1.3 м. Не раз перед началом своих лекций я спрашивал студентов (и на конференциях – более "остепененных" слушателей), всегда ли "нано" означает 10^{-9} ? Правильного ответа я пока не получил».

1964 Академик Р. Сагдеев открыл бесстолкновительные ударные волны в плазме. В случае достаточно малых амплитуд волн ему удалось построить ламинарную теорию в предположении, что обычная диссипация из-за парных столкновений частиц отсутствует, а роль бесстолкновительной диссипации играет эффект отражения ионов от переднего фронта волны (теория бесстолкновительных ударных волн изложена, например, в книге [32, с. 130–133; §2.20]).

В том же году Н.Г. Басову и А.М. Прохорову, а также Ч.Х. Таунсу присуждена Нобелевская премия «За фундаментальные исследования в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов нового типа – мазеров и лазеров».

1989 8 сентября 1989 года, 20 лет назад, скончался член-корреспондент Академии Наук СССР (теперь РАН) Лев Альбертович Вайнштейн. Основные его работы собраны в книге [33]. Болезнь и преждевременная смерть не позволили ему реализовать многие интересные идеи. Вот одно из его последних писем автору этих строк.

17.1.1989

Дорогой Дмитрий Иванович!

Вчера приступил к работе после отпуска и прочел (вместе с женой) Ваше письмо. Спасибо за пожелания. Со своей стороны желаю Вам успехов в 1989 году, в том числе по подготовке школы-90. Надеюсь Вас видеть у себя дома, будете в Москве, обязательно заходите. И письма лучше адресуйте на домашний адрес.

К сожалению, мое физическое состояние ухудшается с каждым месяцем. По состоянию здоровья я был вынужден отказаться от поездки на Чистопольскую школу по дифракции в августе, хотя я был председателем оргкомитета, много занимался чужими лекциями и должен был прочесть с С.М. Журавом свою. Жена собиралась ехать и меня опекать. Все отменилось – школа прошла без меня. Мне представляется несомненным, что через год в январе я поехать в Саратов не смогу.

Сейчас я работаю вместе с А.И. Клеевым. Это – молодой (30 л.) кандидат, мы с ним занимаемся сейчас кооперативным (коллективным спонтанным) изучением электронов-осцилляторов и кроме того он начал применять связь между спонтанным и индуцированным излучением для расчета более сложных моделей ЛСЭ (лазеров на свободных электронах. – *Д.И.Т.*).

Таким образом, можно было бы подготовить два небольших курса, которые он и прочтет на школе-90.

Первый – это дополнения и комментарии к моей статье, о которой Вы столь тепло отзываетесь. Здесь можно, кроме повторения основных положений, рассмотреть а) более подробно приборы типа О, включая пространственный заряд и режим малого усиления; б) новые примеры, относящиеся к ЛСЭ; в) классический вывод двух последних примеров, рассмотренных в разд. 4 статьи без доказательства и противоречащих основной формуле.

Второй посвящен кооперативному излучению. Летом я начал писать (в основном для себя) полуобзорную работу "Кооперативное излучение из малых объемов в квантовой и классической (вакуумной) электронике". Это совершенно новая вещь и даже резко полемическая. Она не закончена: Клеев получил численные результаты, но они не систематизированы. Новые результаты, относящиеся к вакуумной электронике, мы предполагаем подготовить для печати в "Доклады АН СССР", более подробное изложение поместить в конце второго курса. Это – сейчас первоочередная задача, которую во что бы ни стало надо решить.

На горизонте также задача о конкуренции между кооперативным и индуцированным излучением, но это – следующий этап.

Вы видите, что я много работал последние годы, работал, в частности, во время пребывания в клинике Онкологического центра, и сейчас надо это все успеть оформить и послать в печать, в том числе к Вам.

В письме много не напишешь. Приезжайте, у меня еще много интересного.

Сообщите, в какой мере это будет интересно для школы-90. Я надеюсь дожить до следующего января, но если нет – можете школу посвятить моей памяти.

Ваш Л. Вайнштейн»

Увы, Лев Альбертович не дожил до школы. Ниже приведена страница из книги «Лекции по электронике СВЧ и радиофизике» (8-я зимняя школа-семинар инженеров, книга 1, изд-во Саратовского университета, 206 с.). Школа была посвящена учителям.

Памяти учителей

Уже десять лет минуло с тех пор, как ушел из жизни Владимир Николаевич Шевчик. Два с небольшим года назад не стало Виктора Тимофеевича Овчарова. А в сентябре 1989 года после тяжелой мучительной болезни умер Лев Альбертович Вайнштейн.

У поэта Бориса Слуцкого есть пронзительные строки:

Умирают мои старики –
Мои боги, мои педагоги,
Пролагатели торной дороги,
Где шаги мои были легки.

Да, Боги, Педагоги, Учителя, но, увы, не старики...

Вы, прикрывшие грудью наш возраст
От ошибок, угроз и прикрас,
Неужели дешевая хворость
Одолела, осилила Вас?

Для пишущих эти строки Учителя были близки. И не раз прикрывали они нас от непредполагаемых нами бед и открывали путь в настоящую науку. Все они были причастны к рождению школ: без Владимира Николаевича школ могло и не быть, а без Виктора Тимофеевича и Льва Альбертовича они не были бы такими, какими были. Все основные курсы школы были блистательно прочитаны Львом Альбертовичем. Во всех жарких дискуссиях в центре событий были все трое. Учителя дружили. Они всегда с теплотой и любовью говорили друг о друге, хотя часто спорили по научным вопросам.

Угасают большие огни
И гореть за себя поручают.
Орден не дождалась она –
Сразу памятники получают.

Пусть эта школа и будет памятником Учителям.

Оргкомитет

1994 Крупный оборонный подрядчик, компания «Е-Системс» покупает «АРКО Пауэр Технолоджиз Инк.» – правообладателя патентов Иствуда⁹ – и заключает контракт на постройку самого большого в мире ионосферного нагревного стенда «Арфа».

В том же году Конгресс США замораживает финансирование проекта «Арфа», концентрируя внимание разработчиков на создании установки для томографии земной коры. Данная область применения предназначена для решения задач по контролю за нераспространением ядерного оружия. Под решение этих задач Конгресс выделяет 10 млн. долларов.

В 1994–1996 годах продолжается первый этап испытаний установки «Арфа», несмотря на то, что финансирование заморожено. Предполагаемый срок запуска установки – 2001–2017 год. На ранней стадии разработок – полностью работоспособный прототип «Арфы». Что же такое «Арфа»?

⁹Уникальная особенность разработки Иствуда – фокусировка пучка излучения на ограниченном участке ионосферы, в отличие от других нагревных стендов, которые испускают расширяющийся пучок излучения.

«Арфа» – авроральная резонансная фазированная решетка – совместный проект Военно-воздушных сил и Военно-морского флота США, базирующихся на Аляске. Это исследовательская программа по изучению ионосферы с целью создания новых видов вооружений.

Воздействие на ионосферу (слой атмосферы в 50 км над земной поверхностью) осуществляется с помощью установленного на Земле передатчика, представляющего антенну с фазированной решеткой – обширное поле, уставленное синхронно работающими антеннами. Эффективная мощность излучения установки на первой стадии проекта составит около 1 миллиарда ватт. Установка будет применяться для зондирования геологических формаций на предмет обнаружения подземных комплексов или залежей полезных ископаемых, радиосвязи с подводными лодками, воздействия на каналы связи вероятного противника, создания искусственных участков плазмы (плазмодов) в ионосфере, управления погодой и передачи электроэнергии в разные регионы планеты. Ее можно использовать в качестве загоризонтного радара и даже как противоспутниковое оружие.

Детали об установке «Арфа» и специальной американской программе HAARP (High frequency Active Auroral Research Program), которую считают глобальной опасностью для всего мира, можно найти в книге [34]. В аннотации к книге сформулированы все угрозы человечеству со стороны HAARP.

«...При ее применении:

- полностью нарушается морская и воздушная навигация;
- прекращается радиосвязь и радиолокация;
- выходит из строя бортовая электронная аппаратура космических аппаратов, ракет, самолетов и наземных боевых систем;
- возникают масштабные аварии в электросетях, нефте- и газопроводах;
- перестает нормально функционировать психика людей и животных;
- происходят техногенные катастрофы; тайфуны, бури, смерчи, наводнения;
- возникают непреодолимые препятствия для летательных аппаратов – самолет или ракета попадает буквально в эпицентр смерча и разрушается.

Фантастика? Реальность! На все работы в рамках HAARP с 1997 года наложен самый строгий гриф секретности».

Библиографический список

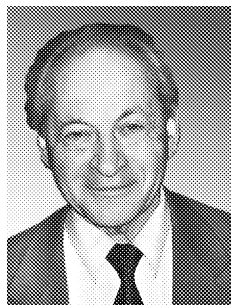
1. *Гурбатов С.Н., Саичев А.И.* Введение в теорию нелинейных волн гидродинамического типа. Нижний Новгород: Издательство Нижегородского университета, 2003. С. 105.
2. *Черепашук А.М., Чернин А.Д.* Вселенная, жизнь, черные дыры. Серия «Наука для всех». Фрязино: «Век-2», 2003. 320 с.
3. *Трубецков Д.И.* Две тысячи шестой год в датах нелинейной динамики // В кн. Даниил Семенович Данин и его кентавристика. Серия «След вдохновений и трудов упорных...» Лекции. Вып. 3 Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2007. 108 с.
4. *Черенков П.А.* Видимое свечение чистых жидкостей под действием γ -радиации // ДАН СССР. 1934. Т. 2, № 8. С. 451.
5. *Бриджмен П.* Анализ размерностей. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 148 с.

6. *Varian R., Varian S.* High frequency oscillator and amplifier // *Journal of Appl. Phys.* Vol. 10. P. 321.
7. *Ginston E.* The \$100 idea // *IEEE Spectrum.* 1975. Vol. 12. P. 30.
8. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2-х томах. Т.1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 496 с.
9. *Трубецков Д.И.* Введение в синергетику. Колебания и волны. Серия «Синергетика: от прошлого к будущему» / Предисловие Ю.А. Данилова, Г.Г. Малинецкого. Послесл. Г.Г. Малинецкого. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Едиториал УРСС, 2003. 224 с.
10. *Трубецков Д.И.* Введение в синергетику. Хаос и структуры. Серия «Синергетика: от прошлого к будущему» / Предисл. Г.Г. Малинецкого. Изд.2-е испр. и доп. М.: Едиториал УРСС, 2004. 240 с.
11. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Рыскин Н.М., Шигаев А.М.* Теоретическое и экспериментальное Исследование хаотических колебаний клистронного автогенератора с запаздыванием // *Радиотехника и электроника.* 2001. Т. 46, № 5. С. 604.
12. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Кижяева К.К., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М., Шигаев А.М.* Сложная динамика многорезонаторных клистронных автогенераторов с запаздывающей обратной связью // *Изв. ПНД.* 2002. Т. 10, № 5. С. 37.
13. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М.* Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном автогенераторе с запаздывающей обратной связью // *ЖТФ.* 2003. Т. 73, вып. 7. С. 105.
14. *Афанасьева В.В., Лазерсон А.Г.* Динамический хаос в двухрезонаторных клистронных автогенераторах с запаздывающей обратной связью // *Изв. вузов. ПНД.* 1995. Т. 3, № 4. С. 88.
15. *Гинзбург В.Л.* Об атеизме, религии и светском гуманизме. М.: Российское гуманистическое общество. ЗАО «Московские учебники–СиДипресс», 2008. 158 с.
16. *Полищук В.* На общих основаниях // *Новый мир,* 1984, № 4. С. 83.
17. *Шноль С.Э.* Борис Павлович Белоусов (1893–1970) и его колебательная реакция // В кн. «Герои, злодеи, конформисты российской науки: 2-е изд. М.: КРОН-ПРЕСС, 2001. С. 278.
18. *Жаботинский А.М.* Концентрационные автоколебания. М.: Наука, 1974. 178 с.
19. *Вольтер Б.В.* Легенда и быль о химических колебаниях // *Знание – сила.* 1988, № 4. С. 33.
20. *Шемякин Ф.М., Михалев П.Ф.* Физико-химические периодические процессы. М.;Л.: 1938.
21. *Luter R.* Raumliche Fortpflanzung chemischer Reaktionen // *Z. Elektrochem* (32), 12, (1906). P. 596. English translation in *J.Chem. Ed.* 1987. 64. P. 740.
22. *Showalter K. and Tyson J.J.* Luter's discovery and analysis of chemical waves // *J. Chem. Ed.* 1987. 64. P. 742.
23. *Lotka A.J.* Contribution to the theory of periodic reactions // *J. Phys. Chem.* 1910. Vol. 14. P. 271.
24. *Lotka A.J.* Undamped oscillations derived from the law of mass action // *J.Amer. Chem. Soc.* 1920. Vol. 42. P. 1595.

25. *Франк-Каменецкий Д.А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 502 с.
26. Колебания и бегущие волны в химических системах / Пер. с англ. / Под ред. Р. Филда, М. Бургер. М.: Мир, 1988. 720 с.
27. *Жаботинский А.М.* Периодический ход окисления малоновой кислоты в растворе (исследование кинетики реакции Белоусова) // Биофизика. 1964. Т. 9. С. 306.
28. *Жаботинский А.М., Корзухин М.Д.* Математическое моделирование кинетики гомогенных химических систем. Колеб. проц. в биол. и хим. сист. / Под ред. Г.М. Франка. М.: Наука, 1967. С. 223.
29. *Гарел Д., Гарел О.* Колебательные химические реакции / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 148 с.
30. *Темкин О.Н.* Гомогенный металлокомплексный катализ. Кинетические аспекты. М.: ИКЦ «Академкнига», 2008. 918 с. (глава 6).
31. *Кац Е.А.* Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: Родословная форм и идей. Серия «Науку всем! Шедевры научно-популярной литературы». М.: Издательство ЛКИ, 2008. 296 с.
32. *Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З.* Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979. 320 с.
33. *Вайнштейн Л.А.* Теория дифракции. Электроника СВЧ. М.: Радио и связь, 1995. 600 с.
34. *Бегич Н., Мэннинг Д.* Программа «НААРР». Оружие Армагеддона. Серия «Битва за космос» / Пер с англ. К.Козырева. М.: Яуза, ЭКСМО, 2007. 384 с.

Саратовский государственный университет

Поступила в редакцию 27.11.2009



Трубетсков Дмитрий Иванович – родился в Саратове (1938). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1960). Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата (1965) и доктора физико-математических наук в СГУ (1978) в области радиофизики. Заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Президента РФ в области образования. Научный руководитель Лицея прикладных наук и факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов: вакуумная электроника и микроэлектроника сверхвысоких частот, теория колебаний и волн, нелинейная динамика, история науки. Автор более двадцати учебных пособий и монографий, а также более двухсот статей в периодической печати.

E-mail: TrubetskovDI@nonlin.sgu.ru

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
410012, Саратов, ул. Астраханская, 83