

# АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

## *Учредитель*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Кабардино-Балкарский  
государственный университет им. Х.М. Бербекова»  
36000, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173*

*Журнал зарегистрирован  
в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания  
и средств массовых коммуникаций в 2003 г.  
(свидетельство ПИ № 77-16938 от 28 ноября 2003 г.)*

### ***Редакционная коллегия:***

Главный редактор: Хапачев Ю.П. – доктор физ.-мат. наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик

Зам. главного редактора: Дышеков А.А. – доктор физ.-мат. наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик

- Аристов В.В. – чл.-корр. РАН, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, г. Москва
- Бахмин В.И. – председатель правления компании АНО «Центр инновационных общественных инициатив», г. Москва
- Григорьев М.С. – доктор химических наук, Институт физической химии РАН, г. Москва
- Ивахненко Е.Н. – доктор философских наук, профессор, ректор РГГУ, г. Москва
- Ильяшенко Ю.С. – доктор физ.-мат. наук, профессор, МИРАН, г. Москва, ректор Независимого московского университета
- Карамурзов Б.С. – доктор технических наук, профессор, президент КБГУ, г. Нальчик
- Кетенчиев Х.А. – доктор биологических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Кочесоков Р.Х. – доктор философских наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Крайзман В.Л. – доктор физ.-мат. наук, профессор, Мэрилендский университет, Национальный институт стандартов и технологий. США
- Лисичкин Г.В. – доктор химических наук, профессор, МГУ, г. Москва
- Лю Цзо И – доктор технических наук, профессор, Технологический университет, г. Гуанджоу, Китай
- Молодкин В.Б. – чл.-корр. НАН Украины, профессор, Институт металлофизики НАН Украины, г. Киев
- Оранова Т.И. – доктор химических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Ошхунов М.М. – доктор технических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Савин Г.И. – академик РАН, профессор, Отдел информатики и вычислительной техники РАН, г. Москва
- Скворцов Н.Г. – доктор социологических наук, профессор, С.-Пб. госуниверситет, г. Санкт-Петербург
- Ткачук В.А. – академик РАН, академик АМН, профессор, МГУ, г. Москва
- Тлибеков А.Х. – доктор технических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Филатов В.П. – доктор философских наук, профессор, Российский государственный гуманитарный университет, г. Москва
- Шустова Т.И. – доктор биологических наук, профессор, С.-Пб. НИИ уха, горла, носа и речи, г. Санкт-Петербург
- Шхануков М.Х. – доктор физ.-мат. наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик

**Ю.П. Хапачев – доктор физ.-мат. наук, профессор**

**А.А. Дышеков – доктор физ.-мат. наук, профессор**

**Т.И. Оранова – доктор хим. наук, профессор**

**Т.И. Шустова - доктор биол. наук, профессор**

## **СОВРЕМЕННАЯ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНАЯ КАРТИНА МИРА**

**Курс лекций**

**І–ІІ части**

## Предисловие

Нам не дано предугадать,  
Как наше слово отзовется ...

*Ф.И. Тютчев*

Достижения естественных наук за последние десятилетия настолько грандиозны, что сама попытка осознать их сегодня превратилась в трудную познавательную проблему. Возрастающая дифференциация – очевидный факт современной науки, который поставил на повестку дня проблему поиска и разработки общих фундаментальных принципов научного знания. Разрешение такой проблемы – задача отнюдь не тривиальная, а насущная. Поиски единого фундамента естествознания давно перестали быть уделом одних только философов. Сегодня к ее разрешению приобщены ученые из самых различных областей знания: физики, химии, биологии, математики и др.

Отсюда возникает стремление авторов данного курса привести студента к соответствующей сегодняшнему дню широте взглядов на проблемы естествознания. К сожалению, заданные стандарты в отечественном образовании мало способствуют выдвижению студенчества на обозначенные рубежи осмысления достижений науки.

Таким образом, проблема поиска обобщающих идей напрямую связана с подготовкой специалистов высокой квалификации. Да и вряд ли кто-нибудь сомневается в необходимости приобщения студента к обозначенному потоку научного сознания.

Как-то Майкл Фарадей, который первым организовал публичные научные чтения для мало-подготовленных слушателей, пришел к выводу, что по-настоящему поучительная лекция никогда не может быть популярной, а по-настоящему популярная лекция никогда не достигнет настоящей поучительности. Мы попробуем опровергнуть эту точку зрения великого ученого.

Отдельные идеи курса взяты нами из трудов И.Р. Пригожина, О.П. Спиридонова, В.И. Арнольда, П. Дэвиса, А.Н. Маркова, Б.М. Медникова, В.М. Волькенштейна, М. Эйгена, Л.Л. Морозова, Л.Н. Гумилева и П.А. Флоренского. Фрагменты из этих работ мы привели в книге лишь незначительно *mutatis mutandis*, не меняющие их смысла.

Помня о знаменитой теореме Геделя о неполноте аксиоматического описания и, более того, понимая, что, согласно ее утверждению, нет такой конечной системы аксиом, в рамках которой все проблемы были бы решены, тем не менее, мы сознательно, там, где это возможно, аксиоматизировали изложение материала. Именно такой подход, по мнению авторов, наиболее близок по духу означенной в заглавии курса теме. Кроме того, это позволило сказать *multa paucis*.

Авторы отдадут себе отчет в том, что такой разнообразный материал требует особого общего введения, этаким «отрывком, взгляд и нечто... – обо всем», и, что не менее важно, особого концептуального подхода.

Та или иная концепция становится понятной человеку или даже очевидной как бы а priori, если отношение характеризующих ее параметров  $K_i$  к величинам  $L_i$ , соответствующим жизненно-му опыту, становится порядка или меньше единицы ( $K_i/L_i < 1$ ). В ряде случаев это соотношение можно удовлетворить постоянным повторением, приводящим к привычке. «Непонятное становится понятным, когда оно становится привычным». Не следует, однако, при этом забывать, что хоть и «повторение – мать учения», но враг творчества, ибо, как изначально сказал Овидий: «Повторение – мать учения и прибежище ослов (утешенье дураков)».

Включение местами в курс своеобразной «художественной части» представлялось нам важным по ряду причин, одна из которых связана с понятием «закона природы». Дело в том, что мы настолько свыклись с безусловным существованием законов природы, что как-то уже и забыли о том, что сама эта идея является продуктом только европейской цивилизации. В картинах мира некоторых других цивилизаций концепция законов природы просто отсутствует, и, следовательно, само это понятие требует обоснования, которое регулярно пытается дать философия и которая присутствует, как нам представляется, в искусстве. Знать, уважать и ценить философию и искусство необходимо. Еще в XVIII веке глава прусского департамента образования барон фон Цедлиц (ему И. Кант посвятил свою «Критику чистого разума») внушал студентам: «После окончания курса наук вам придется быть врачом, судьей, адвокатом и т.д. лишь несколько часов в сутки, а быть человеком – целый день».

И последнее. Зачем нужна популяризаторская деятельность.

«Многих тревожит растущий отрыв фундаментальной науки от массового сознания. В естественных науках (ЕН), и особенно, в биологии, – самой быстроразвивающейся науке, этот отрыв особенно хорошо заметен. Это один из парадоксов современного общества. С одной стороны, за последние полвека биология достигла неслыханных успехов. С другой – чем глубже проникают ученые в тайны жизни, тем сильнее искажаются их открытия в СМИ и, как следствие, в общественном сознании. Это опасная тенденция, которая может в итоге привести к тому, что общество окончательно перестанет понимать, чем занимаются ученые и зачем они нужны.

Отсутствие у многих людей элементарной научной грамотности вовсе не так безобидно. Ведь в современном демократическом обществе право голоса имеет каждый, вне зависимости от уровня образования.

Разумеется, у людей есть потребность в понимании происходящего вокруг них, и от ученых ждут ответов на ключевые вопросы об устройстве мироздания – но ответов простых, понятных и окончательных, не требующих чрезмерных интеллектуальных усилий и к тому же соответствующих общественным ожиданиям. Беда в том, что мир (как выясняется именно благодаря достижениям науки) устроен гораздо сложнее, чем нам хотелось бы. Поэтому для того, чтобы современная научная картина мира проникла в массовое сознание, нужны целенаправленные усилия. Информационный вакуум неизбежно заполняется псевдонаучными измышлениями, мифами и верованиями. Проблема усугубляется полным отсутствием материальной заинтересованности многих СМИ в достоверности сообщаемых ими сведений. В ситуации, когда статьи или телепередачи служат лишь броскими «прокладками» между блоками рекламы, любые шарлатанские бредни оказываются гораздо более ходовым и выгодным товаром, чем серьезная наука.

Похоже, наука сама своими достижениями роет себе могилу: ведь чем успешнее деятельность ученых, тем сложнее научная картина мира и тем ниже конкурентоспособность науки на «свободном рынке информационных услуг». В конце концов, ученые могут просто вымереть, как динозавры, – и хорошо еще, если своей смертью, а не на кострах инквизиции. Что будет дальше, какая судьба ждет вооруженное ядерным оружием человечество, впавшее в мистицизм и Средневековье, – об этом читатель может сам пофантазировать на досуге.

Поэтому популяризаторская деятельность для ученых в современном мире (и в России особенно) – это никакая не благотворительность, а общественный долг и необходимое средство самосохранения.

В конце концов, благодаря научному прогрессу большая часть народонаселения в развитых странах имеет полную возможность комфортно жить, вообще ничего не зная и не понимая в науке. Но ведь есть еще и политическая сторона вопроса. В современном демократическом обществе именно от этих невежественных налогоплательщиков зависит в конечном счете государственная политика в таких наукоемких областях, как изменения климата, генетически модифицированные организмы, стволовые клетки, клонирование, вакцинация и т. д.

Очень хорошо об этом сказал недавно выдающийся филолог А.А. Зализняк на церемонии вручения ему литературной премии имени Солженицына. Он обратил внимание на то, что в наши дни, к сожалению, вышли из моды две старые, банальные идеи: 1) истина существует, и целью науки является ее поиск; 2) в любом обсуждаемом вопросе профессионал в нормальном случае более прав, чем дилетант. Им сегодня противостоят новые, гораздо более модные положения: 1) истины нет, есть множество мнений; 2) ничье мнение не весит больше, чем мнение кого-то иного. «Девочка-пятиклассница имеет мнение, что Дарвин не прав, и хороший тон состоит в том, чтобы подавать этот факт как серьезный вызов биологической науке» (А. Марков).

Данный курс видеолекций в целом следует книгам: [1] Хапачев Ю.П., Дышеков А.А., Оранова Т.И., Шустова Т.И. и Ивахненко Е.Н. Концепции современного естествознания. – 3-е изд. / под ред. Ю.П. Хапачева. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 1997. – 272 с.и [24] Хапачев Ю.П., Дышеков А.А. и Оранова Т.И. «Современная естественнонаучная картина мира»: курс лекций. – Нальчик. КБГУ, 2013.

**Благодарности.** Авторы благодарны доктору химических наук, профессору Т.И. Орановой (Нальчик) и доктору биологических наук, профессору Т.И.Шустовой (Санкт-Петербург) как за совместные работы, так и за возможность использования их результатов в данном курсе.

Мы благодарны также доктору технических наук, профессору Б.С. Карамурзову и кандидату технических наук А.С. Ташилову за стимулирование данного курса.

Журнал состоит из пяти частей, каждая из которых заполняет определенный отрезок научной картины мира. В части 1 настоящего издания освещаются проблемы естественнонаучной и гуманитарной культур, различное понимание красоты в них; в части 2 – химические системы и их свойства.

В 2018 г. планируется издание следующих частей, посвященных: 3 – живым системам, 4 – этногенезу. В части 5 будут рассматриваться законы природы как объект современной науки и эстетическая категория.

*Памяти  
Великого Ученого и Учителя  
Андрея Николаевича Колмогорова  
(25.04.1903–20.10.1987)  
посвящается этот курс*

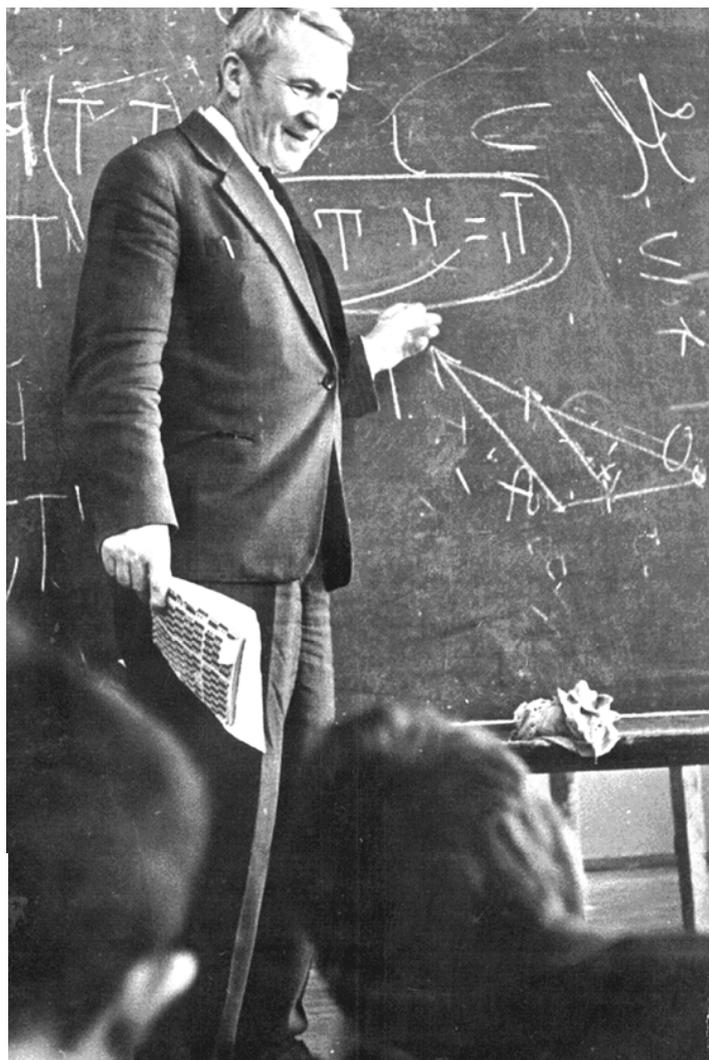
### **Введение**

О, сколько нам открытий чудных  
Готовит просвещенья дух  
И опыт, сын ошибок трудных,  
И гений, парадоксов друг,  
И случай, Бог изобретатель.

*А.С. Пушкин*

Гиганты, благодаря которым мы видим научную картину Мира «с высоты птичьего полета». «Колмогоров – Пуанкаре – Гаусс – Эйлер – Ньютон: всего пять таких жизней отделяют нас от истоков нашей науки».

*Академик В.И. Арнольд*



*Андрей Николаевич Колмогоров  
(25.04.1903–20.10.1987)*



*Жюль Анри Пуанкаре*  
(29.04.1854 – 17.07.1912)



*Карл Фридрих Гаусс*  
(30.04.1777 – 23.02.1855)



*Леонард Эйлер*  
(15.04.1707 – 7 (18).09.1783)



*Исаак Ньютон*  
(25.12.1642 – 20.03.1727)

Жизнь коротка, путь искусства = науки долог,  
удобный случай скоропреходящ, опыт обманчив,  
суждение трудно.

*Гиппократ*

### Естественнонаучная и гуманитарная культуры. Красота

Что есть культура? Ветви культуры: естественнонаучная, гуманитарная, религия.

Понятие и примеры красоты в различных областях культуры.

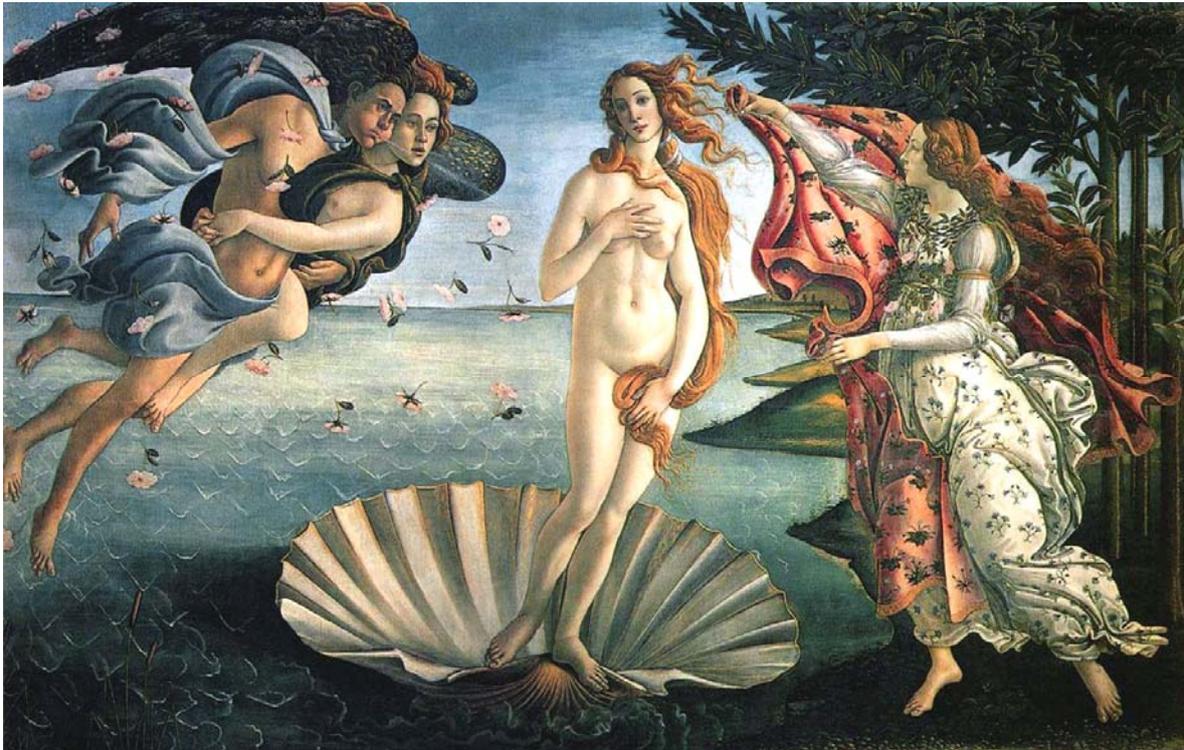
Ученые спорят, похожа ли математическая красота на художественную, и можно ли найти отдел человеческого мозга, отвечающий за ее восприятие?

### Красота в гуманитарной культуре

#### *Искусство Италии XV века. Ренессанс*

Знаменитая картина художника Сандро Боттичелли «Рождение Венеры». Размер работы 172,5 × 278,5 см, холст, темпера. Картина написана по заказу Лоренцо ди Пьерфранческо Медичи, для которого исполнялась и «Весна». Картина была предназначена для украшения все той же виллы Каstellо. По-видимому, они мыслились как парные композиции, и между ними существовала определенная связь.

**Живопись** – Боттичелли «Рождение Венеры».



*Рождение Венеры. Боттичелли Сандро. 1482–1483 гг.  
(Галерея Уффици, Флоренция)*

Картина изображает рождение небесной Венеры из пены моря, или таинство явления в мир Красоты. Под дуновением Зефира, проносающегося над морским пространством в объятиях своей возлюбленной Ауры, богиня приплывает на раковине к берегу. Ее встречает Ора, готовая накинуть на нагое тело Венеры плащ, расшитый цветами. Если «Весна» ассоцииру-

ется с праздником в царстве богини любви, то эта композиция представляет теофанию, или богоявление. Так мыслилось неоплатониками загадочное возникновение Красоты. Он дал остро личное истолкование строк древнегреческих поэтов и Полициано, которые легли в основу программы картины. Так, текст из «Стансов на турнир» Полициано: «На раковине резвые Зефиры пригнали к берегу неземную деву: она кружит, и радуется небо, – претворяется в изображение раннего утреннего часа с блеклыми красками неба и моря; под дождем из роз в этот пустынный и прекрасный мир вступает хрупкая богиня.

Боттичелли выразительно передал стихию ветров, веющих над водами. Клубящиеся одеяния, линии, которыми написаны волосы и крылья – все это исполнено динамического порыва, олицетворяющего один из основных элементов вселенной. Ветры – Зефир и Аура – зримо колышут водный простор. В отличие от ветров, чья стихия – воздух, пространство Оры – земля. В белом платье, расшитом васильками, украшенная гирляндами из миртов и роз, она, стоя на берегу, готова окутать Венеру плащом, красный цвет которого символизирует любовь. Два боковых крыла композиции – пролетающие ветры и Ора, чей объем зримо увеличивают платье, колеблемое ветром, дерево и плащ Венеры, – это нечто вроде завесы, которая, распахнувшись, представила миру таинство явления Красоты. В картине «Рождение Венеры» удивительно точно найдена каждая деталь, а композиция в целом оставляет впечатление совершенной гармонии. Натянутыми, порывистыми и мелодичными линиями, выводящими сложную арабеску, художник очерчивает фигуры и более обобщенными контурами обозначает окружающую среду. Видна лишь узкая полоска берега, а остальное место занимают светлое сияющее изнутри небо и море. Венера – едва ли ни самый пленительный образ у Боттичелли. Художник дает собственное истолкование классического идеала красоты, внося в чувственный образ черты спиритуализации.

Следуя древнеримским поэтам, Боттичелли изображает волосы, разделенные на пряди и колеблемые морским ветром. Это зрелище очаровывает. Стыдливым жестом Венера прикрывает тело, такая иконография идет от античного типа *Venera pudica* («стыдливая»). Чувственный облик прекрасной богини любви и красоты художник наделил чистотой и почти сакральной возвышенностью. Дождь роз, мерно ниспадающих в море, передан ясным языком линий и цвета. Боттичелли не ищет научно выверенной точности их очертаний и форм. Восхищение красотой цветка диктует ему простые и изящные контуры бутонов и раскрытых роз, повернутых в разных ракурсах. Их нежная окраска, хрупкость строения и ритм этого тихого дождя из цветов подчеркивает эмоциональную тональность композиции.

Симонетта Веспуччи. Симонетта Веспуччи (итал. *Simonetta Vespucci*, лат. *Vespuccia*, *Vesputia*, урожд. Каттанео, итал. *Cattaneo*, 28 января (?) 1453, Портовенере или Генуя – 26 апреля 1476, Флоренция) – возлюбленная Джулиано Медичи, младшего брата флорентийского правителя Лоренцо Медичи. Считалась первой красавицей флорентийского Ренессанса, за свою красоту получила прозвище Несравненной (Бесподобной; фр. *La Sans Pareille*) и Прекрасной Симонетты (итал. *La Bella Simonetta*). Служила моделью картины Боттичелли «Рождение Венеры», и нескольких других его работ; изображена в виде Клеопатры со змеей на шее на полотне Пьеро ди Козимо и на его же полотне «Смерть Прокриды».

Мировой шедевр, картина «Весна» была создана художником Сандро Боттичелли в конце 70-х годов. Размер картины 203 × 314 см, дерево, темпера. Картина «Весна» была написана Боттичелли для виллы Кастелло под Флоренцией, принадлежащей Лоренцо ди Пьерфранческо Медичи. Годом ее исполнения обычно считают 1478-й год – работа была выполнена вскоре после того, как виллу приобрели для пятнадцатилетнего Лоренцо. Этот родственник Великолепного получал тогда тщательное образование, дружеское участие в его воспитании принимал и глава Платоновской академии Фичино. Картина, предназначенная для личных покоев будущего ренессансного знатока, призвана была усладить зрение и одновременно воздействовать на душу ее созерцателя. Боттичелли на картине изобразил Зефира, преследующего нимфу Хлорис, из их союза возникает Флора; затем видим Венеру, танец Граций и, наконец, Меркурия, который, устремив взгляд ввысь, снимает кадуцеем плену облаков, препятствующую созерцанию. Каково же содержание картины? Исследователи

предложили несколько толкований. Тема композиции – весна с сопутствующими ей античными божествами. Центром построения является Венера – не воплощение низменной страсти, а благородная богиня цветения и всяческого благоволения на земле; это неоплатонический образ. Развертывая данный контекст, ученые утверждали, что картина отражает идею о порождении красоты светом божественной любви и о созерцании этой красоты, ведущем от земного к сверхземному. «Весну» связывали также с морализирующим гороскопом, составленным Фичино для Лоренцо ди Пьерфранческо: ему рекомендовалось избрать в качестве путеводителя в самосовершенствовании планету Venus-Humanitas (человечность), наделенную всеми нравственными достоинствами и указывающую путь к высшим сферам. Заметим, что все эти грани содержания не отрицают, а скорее дополняют друг друга. Но не будем преувеличивать значимость содержательной канвы, ибо писал картину художник, все преображавший своей одушевленной фантазией.



*Весна. Боттичелли Сандро. 1477–1478 гг.  
(Галерея Уффици, Флоренция)*

Венера, центральная фигура композиции, стоит под сенью деревьев в этом зачарованном пространстве весеннего леса. Ее платье из тончайшей ткани с золотыми нитями украшений и роскошный плащ алого цвета, символизирующего любовь, свидетельствуют о том, что перед нами богиня любви и красоты. Но в ее хрупком облике проступают и иные черты. Склоненная голова покрыта газовым покрывалом, в какие Сандро Боттичелли любил одевать своих Мадонн. Лицо Венеры с вопрошающе поднятыми бровями выражает грусть и скромность, значение ее жеста неясно – приветствие ли это, робкая защита или благодное приятие? Языческое и христианское сплетаются в одухотворенный образ. В других фигурах композиции также улавливаются ассоциации с религиозными мотивами. Так, образы Зефира и нимфы Хлорис перекликаются со средневековым изображением дьявола, не пускающего душу в Рай.

Грации, спутницы и служанки Венеры, – достоинства, порождаемые Красотой, их имена – Целомудрие, Любовь, Наслаждение. Изображение Боттичелли прекрасной триады – само воплощение танца. Стройные фигуры с удлинненными, плавно изгибающимися формами сплелись в ритмической последовательности кругового движения. Художник на редкость

изобретателен в трактовке причесок, передавая волосы одновременно как природную стихию и как декоративный материал. Волосы Граций собраны в пряди, то мелко вьющиеся, то ниспадающие волной, то рассыпающиеся по плечам, словно золотистые струи. Легкие изгибы и повороты фигур, диалог взглядов, изящное соединение рук и постановка ступней – все это передает поступательный ритм танца. Отношения его участниц отражают классическую формулу и вместе с тем неоплатоническое понимание Эроса: Любовь ведет Целомудрие к Наслаждению и скрепляет их руки. В изображении Боттичелли оживает представление о мифологическом великолепии, но образы его окрашены подлинной чистотой. Взор Меркурия мечтательно устремлен в небо. Он пытается разорвать плотность облаков, мешающих лицезрению. Боттичелли придает Меркурию характерный для вкуса Флоренции тех лет тип художавой юношеской фигуры, как в «Давиде» Верроккьо, но очертания ее приобретают мелодичность, а лицо – одухотворенность.

## Искусство Италии XVI века

### *Высокое Возрождение*

Картина Рафаэля Санти «Сикстинская Мадонна» первоначально создавалась великим живописцем как алтарный образ для церкви Сан Систо (св. Сикста) в Пьяченце. Размер картины 270 × 201 см, холст, масло. На картине художником изображены дева Мария с младенцем Христом, папа Сикст II и святая Варвара. Картина «Сикстинская Мадонна» принадлежит к числу наиболее прославленных произведений мирового искусства. В ренессансной живописи это, быть может, самое глубокое и самое прекрасное воплощение темы материнства. Для Рафаэля Санти оно явилось также своеобразным итогом и синтезом многолетних исканий в наиболее близкой ему теме. Рафаэль мудро использовал здесь возможности монументальной алтарной композиции, вид на которую открывается в далекой перспективе церковного интерьера сразу, с момента вступления посетителя в храм. Издали мотив раскрывающегося занавеса, за которым, словно видение, предстает ступающая по облакам Мадонна с младенцем на руках, должен производить впечатление захватывающей силы. Жесты святых Сикста и Варвары, направленный вверх взгляд ангелов, общая ритмика фигур – все служит тому, чтобы приковать внимание зрителя к самой Мадонне.

По сравнению с образами других ренессансных живописцев и с прежними работами Рафаэля картина «Сикстинская Мадонна» обнаруживает важное новое качество – повышенный духовный контакт со зрителем. В предшествующих его «Мадоннах» образы отличались своеобразной внутренней замкнутостью – взгляд их никогда не был обращен на что-либо, находящееся вне картины; они были либо заняты ребенком, либо погружены в себя. Лишь в картине Рафаэля «Мадонна в кресле» персонажи смотрят на зрителя, и во взгляде их есть глубокая серьезность, но в более определенной степени их переживания художником не раскрываются. Во взгляде же Сикстинской Мадонны есть нечто такое, что словно позволяет нам заглянуть ей в душу. Это словно провидение трагической участи ее сына и одновременно готовность принести его в жертву. Драматизм образа матери оттеняется в его единстве с образом младенца Христа, которого художник наделил недетской серьезностью и прозорливостью.

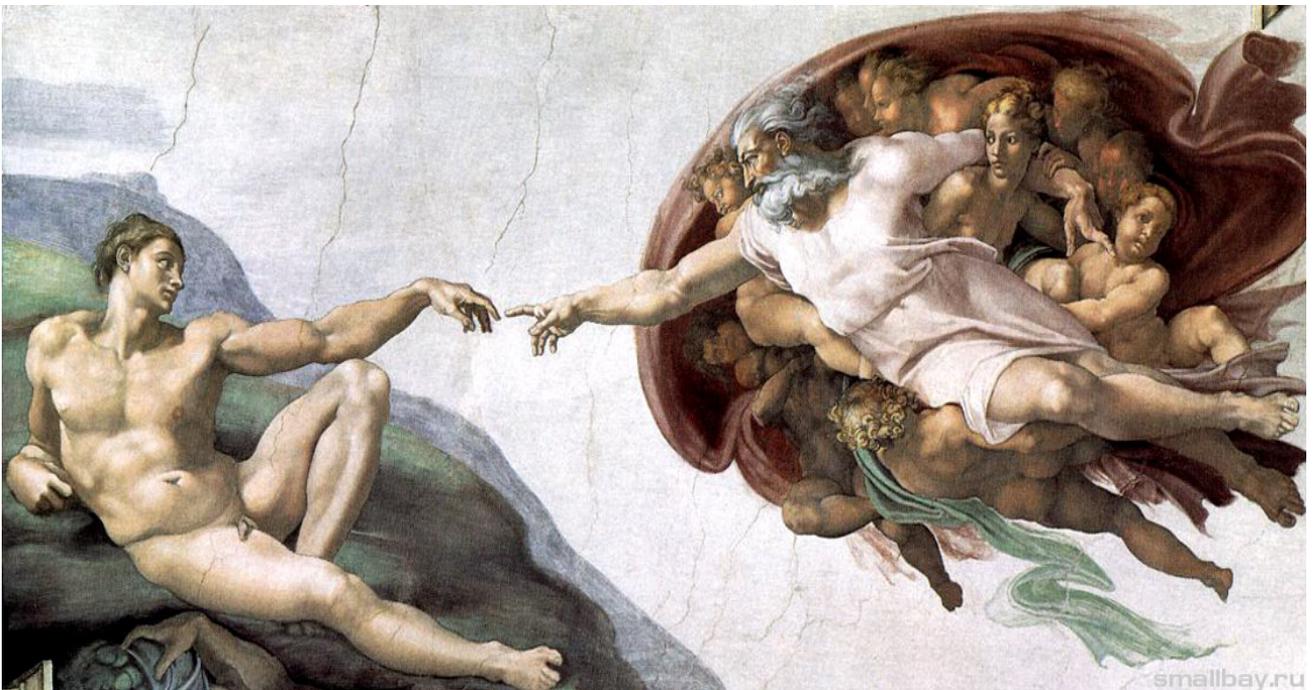
Картина «Сикстинская Мадонна» дает наглядный пример присущей рафаэлевским образам своеобразной «многозначности» самых простых движений и жестов. Так, сама Мадонна представляется нам одновременно идущей вперед и стоящей на месте; фигура ее кажется легко парящей в облаках и в то же время обладающей реальной весомостью человеческого тела. В движении ее рук, несущих младенца, угадывается инстинктивный порыв матери, прижимающей к себе ребенка, и вместе с тем – ощущение того, что сын ее не принадлежит только ей, что она несет его в жертву людям. Высокая образная содержательность подобных мотивов отличает Рафаэля от многих его современников и художников других эпох, считавших себя его последователями, у которых часто за идеальным обликом их персонажей не скрывалось ничего, кроме внешнего эффекта.



*Сикстинская Мадонна. Рафаэль Санти. 1514–1515 гг.  
(Картинная галерея, Дрезден)*

Как создавался образ Мадонны? Имелся ли для него реальный прототип? В этом отношении с дрезденской картиной связан ряд старинных легенд. Исследователи находят в чертах лица Мадонны сходство с моделью одного из женских портретов Рафаэля – так называемой «Дамы в покрывале» («La Donna Velata», 1516, галерея Питти). Но в решении этого вопроса в первую очередь следует учитывать известное высказывание самого Рафаэля из письма к его другу Бальдассаре Кастильоне о том, что в создании образа совершенной женской красоты он руководствуется определенной идеей, которая возникает на основании множества впечатлений от виденных художником в жизни красавиц. Иными словами, в основе творческого метода живописца Рафаэля Санти оказывается отбор и синтез наблюдений реальной действительности.

«Сотворение Адама», Микеланджело Буонарроти, фреска фрагмент росписи Сикстинской капеллы. Во фреске «Сотворение Адама» пробуждение человека к жизни истолковано Микеланджело как высвобождение дремлющих в нем сил в результате волевого импульса творца. Протягивая руку, Саваоф касается руки Адама, и это прикосновение вселяет в Адама жизнь, энергию, волю.



*Фрагмент фрески в Сикстинской капелле «Сотворение Адама».  
Микеланджело Буонарроти. 1508–1512 гг. (Сикстинская капелла, Ватикан)*

Скульптура Микеланджело Буонарроти «Пьета» или «Оплакивание Христа». Высота скульптуры 174 см, мрамор. Крупнейшей работой, выдвинувшей молодого скульптора в число первых мастеров Италии, была мраморная группа «Пьета». Выполненная на рубеже XV и XVI столетий «Пьета» открывает в творчестве Микеланджело период, отмеченный непоколебимой верой в торжество гуманистических идеалов Ренессанса, цельностью героических образов, классической ясностью монументального художественного языка. Для творческих исканий молодого мастера показателен уже сам выбор значительной и ответственной темы – скорби богоматери, оплакивающей умершего сына. Тема эта истолкована с глубиной, недоступной мастерам XV века. Всегда тяготевший к образам патетического характера, Микеланджело в этой группе дал пример углубленно психологического раскрытия драматической коллизии. Смело нарушив традицию, он изобразил богоматерь юной, тем самым оттенив ее особую духовную чистоту. Высокая одухотворенность образа Марии, благородная сдержанность ее чувства лишают трагическую тему оттенка безысходности, сообщая скорби молодой матери просветленный характер.



*Пьета. Микеланджело Буонарроти. 1498–1501 гг.  
(Базилика собора святого Петра, Ватикан)*

«Тайная вечеря» Леонардо да Винчи. Как можно воспринять неожиданную новость о том, что в вашем тесном кругу единомышленников находится будущий предатель? Броситься тут же обсуждать неслыханную дерзость? Попытаться оправдаться самому, уверяя Спасителя в искренности своих чувств и чистоте веры? Воспринять изречение Христа: «Один из вас предаст меня», как приговор, грозящий разрушить всё, что ты любишь и ценишь и, подталкивающий к конкретным действиям?



*Тайная вечеря. Леонардо да Винчи. 1498 г.  
(Монастырь Санта Мария делла Грацие, Милан)*

Андрей Рублев «Троица». Прямая и обратная перспективы в живописи, как различное понимание пространства.

«Троица» имеет всего две возможные даты создания. Обычно в наиболее академических изданиях обе даты и приводятся через слово «или»: 1411 год или 1425–1427 гг.



*Троица. Андрей Рублев. 1411 г. или 1425–1427 гг.  
(Государственная Третьяковская галерея)*



*Спас. Андрей Рублёв. 1410-е гг.  
Из Звенигородского полуфигурного деисусного чина  
(Государственная Третьяковская галерея)*

### *О живописи*

«Ведь живопись имеет задачу не дублировать действительность, а дать наиболее глубокое постижение ее архитектуры, ее материала, ее смысла; и постижение этого смысла, этого материала действительности, архитектуры ее – созерцающему глазу художника дается в живом соприкосновении с реальностью, вживанием и вчувствованием в реальность, чистая же живопись есть, или, по крайней мере, хочет быть, прежде всего правдою жизни, жизнь не подменяющею, но лишь символически знаменующею в ее глубочайшей реальности, а чистая живопись есть открытое настежь окно в реальность» (Павел Флоренский «Обратная перспектива»).

В 1919 г. П.А. Флоренский пишет статью «Обратная перспектива», посвящённую осмыслению феномена данного приёма организации пространства на плоскости как «творческого импульса» при рассмотрении иконописного канона в ретроспективном историческом сопоставлении с образцами мирового искусства, наделёнными свойствами таковой; в числе прочих факторов, прежде всего, указывает на закономерность периодического возврата к применению художником обратной перспективы и отказа от неё сообразно духу времени, историческим обстоятельствам и его мировоззрению и «жизнечувствию».



*Павел Флоренский и Сергей Булгаков.  
Михаил Нестеров. 1917 г.*

## *Музыка*

Аудиофрагменты **И.С. Бах** «Токката и fuga ре-минор», исполняет Г. Гродберг, **В.А. Моцарт** «40 симфония, соль-минор». Дирижер Невиль Маринер, оркестр Академии св. Мартина в Полях. **С.В. Рахманинов**. Прелюдия до-диез минор, исполняет автор.

**И.С. Козловский. Романс «Я встретил Вас». Ф.И. Тютчев.** Оригинальное название стихотворения – «К.Б.» Обращено к баронессе А.М. Крюденер (1808–1888), с которой Тютчев познакомился в 1822 году в Баварии, в Мюнхене, и которой был увлечен. Романс сохранился в памяти певца Ивана Козловского (р. 1900), который записал его на слух и исполнял в советское время, а автор мелодии долгое время считался утраченным. Однако он установлен – это В.С. Шереметев; в 1898 его мелодия обработана А.А. Спиро. Именно эту обработку услышал и запомнил Козловский.

### **Вальс «На сопках Маньчжурии»**

Первоначальное название – «Мокшанский полк на сопках Маньчжурии». Посвящается бойцам 214-го Мокшанского пехотного батальона, погибшим в феврале 1905 года в боях с японцами под г. Мукденом. Наибольшую известность приобрел стихотворный текст Степана Скитальца, автора песни «Колокольчики-бубенчики звенят...» на музыку Я. Пригожего. Скиталец (Степан Гаврилович Петров) (1869–1941).

В основе вальса реальные события: гибель солдат Мокшанского полка – в сухопутном сражении «Варяг» – первый из крейсеров дальневосточной эскадры, принявший неравный бой в Порт-Артуре с 14 японскими кораблями. С его гибели началась трагическая для русского флота война. Кровавопролитный бой на сопках Маньчжурии Мокшанского полка – всего лишь эпизод этой войны. Но именно ему суждено было стать не менее значимым, чем морское сражение. В полку числилось 6 штаб-офицеров, 43 обер-офицера, 404 унтер-офицера, 3548 рядовых, 11 конных ординарцев и 61 музыкант. Этим музыкантам и предстояло сыграть решающую роль. Одиннадцать суток полк не выходил из боя. На двенадцатые кольцо окружения сомкнулась. Но в самый критический момент, когда иссякли и силы, и боеприпасы, грянул полковой оркестр. Военные марши следовали один за другим. Японцы дрогнули. Русское «Ура!» прозвучало в финале. За этот бой семь оркестрантов были награждены солдатским Георгиевским крестом, а капельмейстер – офицерским боевым орденом Станислава 3-й степени с мечами. Вскоре имя этого капельмейстера, Ильи Алексеевича Шатрова, узнала вся Россия.

**Погудин Олег. Романс «Белеет парус одинокий».** М.Ю. Лермонтов, музыка А.Г. Варламова.

**Кавалергарда, век не долог...** – ст. **Б. Окуджавы**, муз. **И. Шварца**, исп. В. Качан из кинофильма «Звезда пленительного счастья».

## *Литература*

И.В. Гете в переводе М.Ю. Лермонтова «Горные вершины» (аудио)

Горные вершины  
Спят во тьме ночной;  
Тихие долины  
Полны свежей мглой;  
Не пылит дорога,  
Не дрожат листы...  
Подожди немного,  
Отдохнешь и ты.

### *Примечания*

Печатается по «Стихотворениям» 1840 г., стр. 119–120 (с датой – «1840»). Впервые – «Отеч. записки», 1840, т. XI, № 7, стр. 1. Автограф не найден. Это вольный перевод Гётевского «Ueber allen Gipfeln ist Ruh». А.Н. Струговщиков вспоминает: «В конце ноября 1840 г., когда он, В.А. Соллогуб, заканчивал свою «Аптекарьшу», я встретился у него с Лермонтовым и на вопрос его: не перевел ли я «Молитву путника» Гёте? я отвечал, что с первой половиной сладил, а со второй – недостает мне ее певучести и неуловимого ритма. «А я, напротив, мог только вторую половину перевести», сказал Лермонтов и тут же, по просьбе моей, набросал мне на клочке бумаги свои «Горные вершины» («Русская старина» 1874 г., № 4, стр. 712). Говоря о первой и второй половине, Струговщиков имеет в виду, очевидно, два стихотворения Гёте: «Wandrer's Nachtlid» («Der du von dem Himmel bist») и «Ein Gleiches» («Ueber allen Gipfeln»). Дата Струговщикова, очевидно, неверна: стихотворение Лермонтова было напечатано в июле 1840 г. Приводим немецкий текст:

Ueber allen Gipfeln  
Ist Ruh,  
In allen Wipfeln  
Spürest du  
Kaum einen Hauch;  
Die Vögelein schweigen im Walde.  
Warte nur, balde  
Ruhest du auch.

### *А.С. Пушкин*

«Два чувства дивно близки нам. . . .»

Два чувства дивно близки нам,  
В них обретает сердце пищу:  
Любовь к родному пепелищу,  
Любовь к отеческим гробам.  
(На них основано от века,  
По воле Бога самого,  
Самостоянье человека,  
Залог величия его.)

Животворящая святыня!  
Земля была (б) без них мертва.  
Как . . . . . пустыня  
И как алтарь без божества.

**Если жизнь тебя обманет,**

Не печалься, не сердись!  
В день уныния смирись:  
День веселья, верь, настанет.  
Сердце в будущем живёт;  
Настоящее уныло:  
Всё мгновенно, всё пройдет;  
Что пройдет, то будет мило.

**Свободы сеятель пустынный...**

Изыде сеятель сеяти семена своя

Свободы сеятель пустынный,  
Я вышел рано, до звезды;  
Рукою чистой и безвинной  
В порабощенные бразды  
Бросал живительное семя –  
Но потерял я только время,  
Благие мысли и труды...

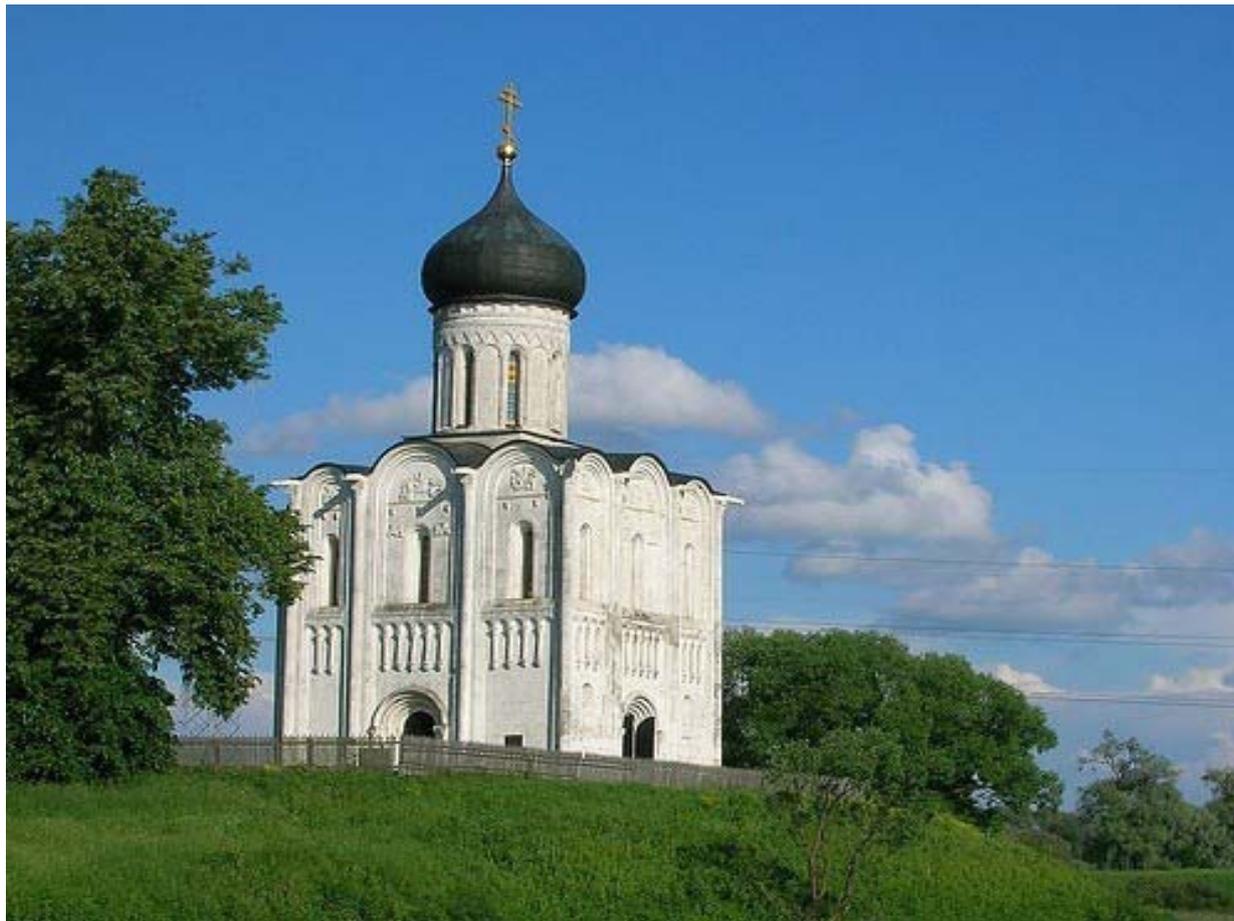
Паситесь, мирные народы!  
Вас не разбудит чести клич.  
К чему стадам дары свободы?  
Их должно резать или стричь.  
Наследство их из рода в роды  
Ярмо с гремушками да бич.

**Exegi monumentum****Я памятник себе воздвиг нерукотворный,**

К нему не зарастет народная тропа,  
Вознесся выше он главою непокорной  
Александрійского столпа.  
Нет, весь я не умру – душа в заветной лире  
Мой прах переживет и тленья убежит –  
И славен буду я, доколь в подлунном мире  
Жив будет хоть один пиит.  
Слух обо мне пройдет по всей Руси великой,  
И назовет меня всяк сущий в ней язык,  
И гордый внук славян, и финн, и ныне дикой  
Тунгус, и друг степей калмык.  
И долго буду тем любезен я народу,  
Что чувства добрые я лирой пробуждал,  
Что в мой жестокий век восславил я свободу  
И милость к падшим призывал.  
Веленью божию, о муза, будь послушна,  
Обиды не страшась, не требуя венца;  
Хвалу и клевету приемли равнодушно,  
И не оспаривай глупца.

**Архитектура**

Даты постройки церкви в различных источниках разнятся. Распространенным считается мнение, что церковь Покрова на Нерли была построена в 1165 г. князем Андреем Боголюбским в память о погибшем сыне во время похода на Булгарское царство. Расположена церковь во Владимирской области, недалеко от села Боголюбово. Говорят, что место, на котором стоит храм, было выбрано самим Андреем Боголюбским. Эта церковь считается первой на Руси, посвященной празднику Покрова Пресвятой Богородицы. Новый праздник был установлен князем Андреем и владимирским духовенством без согласия киевского митрополита и патриарха константинопольского. Сей факт был призван свидетельствовать о том, что Владимирская земля находится в особом покровительстве у Богородицы.



*Храм покрова на Нерли*

Темпьетто (Tempietto; букв. «храмик») – отдельно стоящая часовня-ротонда, возведённая Браманте по заказу испанских монархов Фердинанда и Изабеллы на римском холме Яникул в 1502 г. Это была первая работа миланского архитектора в Риме, и она произвела настоящую сенсацию. Впервые перед римлянами предстало произведение высокого Возрождения: несмотря на миниатюрные размеры, точный подбор пропорций делает Темпьетто слитным, грациозным и величественным.

Темпьетто входит в состав культового комплекса Сан-Пьетро-ин-Монторио, возведённого в Трастевере на месте, где предположительно был распят апостол Пётр. В интерьере – «Бичевание» и «Преображение» Себастьяно дель Пьомбо (которому помогал в работе сам Микеланджело), большой плафон Вазари и могила легендарной Беатриче Ченчи. Последняя крупная работа Рафаэля, «Преображение», была изъята из храма и перенесена в 1797 г. в Ватикан. Возведением капеллы Раймонди руководил в 1640 г. Бернини.



*Темпьетто. Рим. Транстевере  
(архитектор Браманте)*

Тадж-Махал является одновременно мечетью для верующих и мавзолеем-музеем для посетителей. Находится в Индии, в городе Агра на берегу реки Джамна. Кто точно возвёл Тадж-Махал достоверно неизвестно, но, вероятно, архитектором был Устад-Иса. Мечеть-мавзолей была построена по приказу императора Шах-Джахана, который был потомком Тамерлана, в честь своей жены Мумтаз-Махал. Мумтаз-Махал умерла при сложных родах. Позже здесь был похоронен и сам император. Тадж-Махал признан объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО и является лучшим архитектурным примером мастерства моголов. В одном объекте были совмещены элементы персидского, индийского и исламского стилей. Привлекающим взоры всех наблюдателей является белейший купол и многочисленные башенки.



*Тадж-Махал. Агра. Индия*

Тадж-Махал начали строить в 1632 г. и закончили только в 1653 г. В строительстве участвовали более 20 000 рабочих, строителей, ремесленников. Стены этого грандиозного здания выполнены из полированного полупрозрачного мрамора. Он имеет такую особенность, что днём он белый, на заре – розовый, а ночью в свете луны – серебристый. К тому же, стены инкрустированы бирюзой, агатом, малахитом, сердоликом и другими самоцветами.

## Красота в естественных науках

«Математик играет в игру, правила для которой он выдумывает сам, физик играет игру по правилам, которые даны природой. Но со временем становится все более очевидно, что именно те правила, которые кажутся интересными математику, и выбрала природа». Так писал один из создателей квантовой механики, Нобелевский лауреат Поль Дирак в 1939 г. Красота математики – в способности увидеть истинную суть вещей. Пожалуй, это относится к любой красоте.

В первую очередь надо отметить, что красота связана со вкусом, а о вкусах лучше не спорить, но вкус воспитывается! Во-вторых, красота бывает внешняя (формы) и внутренняя (смысла). В математике много красоты обоих типов. Второй тип красоты глубже и малодоступен не только гуманитариям, но и представителям других наук. Постараемся привести несколько больше примеров, которые, нам кажутся, доступны всем.

1. Геометры Древней Греции достигли многого, но вычислить объем шара им не удалось. Гениальный Архимед вывел формулу, применяя идею взвешивания!

2. В книге «Начала» описан способ построения правильных треугольника, квадрата, пятиугольника, пятинадцатиугольника и всех многоугольников, получаемых удваиванием числа сторон (используя лишь математические циркуль и линейку – это инструменты, рисующие идеальные прямые и окружности). Через 1000 лет было доказано, что невозможно построить правильный 7 и 9-угольник (с теми же инструментами). Нечего было думать о построении 11 и 13-угольника. Думали, что о многоугольниках с большим числом сторон нечего и мечтать. Однако 19-летний Гаусс, используя мнимые числа (!) нашел способ построения правильного 17-угольника (чуть позже – всех таких многоугольников).

3. Возьмите произвольный треугольник; проведите трисектрисы углов (т.е. лучи, делящие углы на три равные части); отметьте точки пересечения трех пар трисектрис, склоняющиеся к сторонам:

а) эти три точки образуют правильный (равносторонний) треугольник (теорема Морли);

б) доказательство не просто, но французский математик А. Кон нашел очень короткое доказательство, тоже используя мнимые числа;

в) если внимательно искать, то точки пересечения трисектрис внутренних и внешних углов произвольного треугольника образуют 27 (!) правильных треугольников. Естественно, чем дальше в «математический лес» тем больше таких примеров.

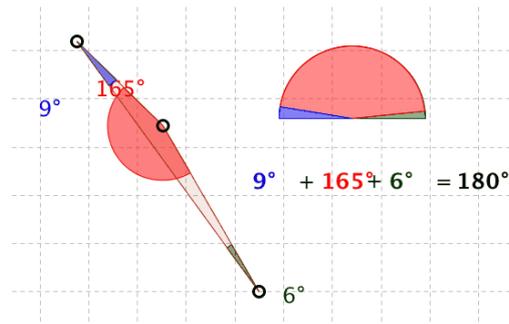
### *Сумма углов треугольника*

Однако само понятие красоты не ограничивается только визуальным аспектом. Бывают красивые стихи, красивые отношения, красивые рассуждения, красивые математические конструкции.

Красота в математике – это тонкая грань между простотой и сложностью, естественностью и необычностью, загадкой и её решением. Красиво то, что позволяет нам увидеть больше, чем мы видели мгновение назад. Красиво то, что нас удивляет.

Видимо, категория красоты впервые возникла в математике в Древней Греции, с появлением геометрии – чем ещё, кроме эстетического наслаждения, можно объяснить желание изучать совершенно абстрактные картинки, составленные из прямых, отрезков и окружностей?

Поставьте себя на место первых геометров: практическая значимость большей части ваших изысканий станет понятной лишь спустя много столетий. А сейчас вы просто чертите на песке треугольники и обнаруживаете удивительную закономерность: какой бы треугольник вы ни построили, сумма его внутренних углов всегда составляет развёрнутый угол (тот, который получается, если стороны угла лежат на одной и той же прямой, но по разные стороны от вершины).



Это и последующие изображения основаны на построении Andy Talmadge в программе GeoGebra

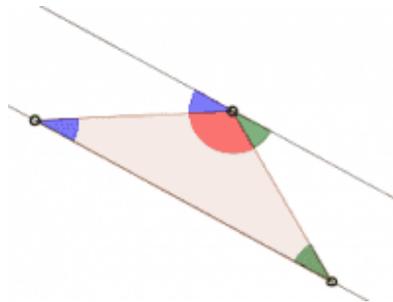
Вы чувствуете, что это не может быть случайностью. Должна быть какая-то причина, какое-то объяснение. Но на картинке его нет. Этот факт не даёт вам покоя, вы думаете о нём день и ночь. Наконец – быть может, почти случайно, **интуитивно** – вы добавляете новый штрих к чертежу с треугольником: проводите прямую, проходящую через одну из его вершин параллельно противоположной стороне.

Смотрите на рисунок, рассуждаете (**логика**) и понимаете, что три угла равны углам вашего треугольника, которые вместе образуют развернутый угол. Вот они, перед вами!

Теперь понятно, что никак иначе и быть не могло. То, что несколько минут назад еще казалось неразрешимой загадкой, стало **строго доказанным** фактом. В итоге, вашему мысленному взору благодаря **интуиции и логике** открылся удивительный и прекрасный смысл.

Вы смотрите на свой чертёж, состоящий лишь из нескольких отрезков, и понимаете, что это одна из самых красивых картин в вашей жизни.

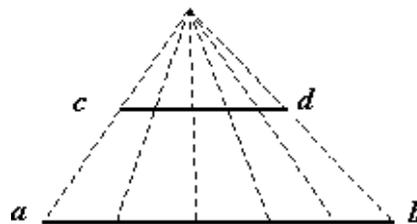
Примерно так выглядит математическая красота.



**Часть не меньше целого** – множество мощности континуум.

**На отрезках разной длины одинаковое количество точек.** Чтобы в этом убедиться, достаточно расставить точки по парам (то есть в паре одна точка от одного отрезка, а вторая – другого). Ну примерно как девочек и мальчиков на школьной линейке. Вот иллюстрация [bmstu.ru](http://bmstu.ru) как это сделать: каждый пунктирный лучик пересекает каждый отрезок, вот точки пересечения и образуют пары.

Примерно так же на отрезке столько же точек, сколько и на прямой, и даже на всей плоскости. В более общем виде получается, что **часть не всегда меньше целого. Более того, часть (в определенном смысле) равна целому!**



То, что кажется не очевидным и даже невозможным, реализуется.

**А. Блок. Россия. «Опять, как в годы золотые»**

Опять, как в годы золотые,  
Три стертых треплются шлеи,  
И вязнут спицы росписные  
В расхлябанные колеи...

Россия, нищая Россия,  
Мне избы серые твои,  
Твои мне песни ветровые, –  
Как слезы первья любви!

Тебя жалеть я не умею,  
И крест свой бережно несусь...  
Какому хочешь чародею  
Отдай разбойную красу!

Пускай заманит и обманет, –  
Не пропадешь, не сгинешь ты,  
И лишь забота затуманит  
Твои прекрасные черты...

Ну, что ж? Одной заботой боле –  
Одной слезой река шумней,  
А ты всё та же – лес, да поле,  
Да плат узорный до бровей...

**И невозможное возможно,**  
Дорога долгая легка,  
Когда блеснет в дали дорожной  
Мгновенный взор из-под платка,  
Когда звенит тоской острожной  
Глухая песня ямщика!..

(1908)

Вот вам пример как **«Невозможное возможно»**. Возьмем круглую мишень, на ней бесконечно много точек, так что вероятность попасть в любую из них равна 0. Теперь вот выпустим стрелу, она в какую-то точку да попадет. Напомню, эта точка была не лучше и не хуже всех остальных, с нулевой вероятностью попадания в нее. Вот и свершилось событие, вероятность которого была 0.

**Фракталы**

Слово «красивый» ассоциируется в первую очередь с чем-то визуально приятным, услаждающим наш взор – типа картины в музее. Такая красота в математике есть: некоторые математические объекты допускают представление в виде изображений, порой весьма приятных для глаз. В нашей лекции есть ссылки на завораживающе прекрасный и загадочный фрактал Мандельброта, но я не удержусь и покажу картинку.

(Изображение: фрагмент множества Мандельброта, © Wolfgang Beyer | CC BY-SA. Больше картинок в статье в Википедии (слайды wikipedia.org))

Пример этот, красота которого понятна гуманитариям. Как она получается математически не так просто понять даже многим технарям, это, конечно, множество Мандельброта: [tilde.club](http://tilde.club).

Там можно выделить отдельные области фрактала, приблизиться к отдельным веточкам и делать это до бесконечности. Примечательно тут именно то, что из маленькой математической формулы получается невероятно сложная и навороченная штука, подобные которой мы скорее привыкли видеть в живой природе или в искусстве.

Еще два примера. Два числа:  $\pi$  и  $e$ . Эти числа везде, можно найти и прочитать кучу разных фактов об этих числах, но осмыслить, какой из фактов является причиной, а какой – следствием и откуда все это берется, по-моему, просто невозможно. Самое удивительное – это связь этих чисел. То есть если все же удастся понять, откуда берется  $\pi$  (достаточно просто – длина единичной окружности), и  $e$  (тут посложнее), то когда видишь, например, тождество Эйлера, в котором присутствуют пять фундаментальных констант математики  $\pi$ ,  $e$ ,  $0$ ,  $1$  и  $i$  охватывает чувство восхищения, если не собственным разумом, то разумом других людей.

Вот оно:

$$\exp(i\pi) + 1 = 0,$$

где число  $e = 2,718281828\dots$ , или основание натурального логарифма (кстати, в числе  $e$  два раза повторяется год рождения Л.Н. Толстого 1828),  $i$  – мнимая единица, число  $\pi = 3,141592653\dots$  отношение длины окружности к длине её диаметра,  $1$  – единица, нейтральный элемент по операции умножения,  $0$  – ноль, нейтральный элемент по операции сложения.



*Сриниваса Рамануджан Айенгор (1887–1920) – индийский математик*

Не имея специального математического образования, получил замечательные результаты в области теории чисел.

$$1 + \frac{1}{1 \cdot 3} + \frac{1}{1 \cdot 3 \cdot 5} + \frac{1}{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7} + \frac{1}{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 9} + \dots + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{2}{1 + \frac{3}{1 + \frac{4}{1 + \frac{5}{1 + \dots}}}}} = \sqrt{\frac{e \cdot \pi}{2}}.$$

$$\sqrt{1 + 2\sqrt{1 + 3\sqrt{1 + 4\sqrt{1 + \dots}}}} - 3.$$

Воистину, «краткость – сестра таланта», если он есть, конечно, как писал Антон Павлович Чехов (Из письма от 11 апреля 1889 г. А.П. Чехова к своему брату Александру).

Послушайте ровно одну минуту Арнольда, где он цитирует слова Дирака о том, как построить новую физическую теорию, начиная с 69-й минуты: [http://www.mathnet.ru/php/presentation.phtml?option\\_lang=rus&presentid=9114](http://www.mathnet.ru/php/presentation.phtml?option_lang=rus&presentid=9114).

### **Арнольд В.И.**

«Но я всю жизнь следую рецепту Дирака, который учил, как создавать Новую Физику, следующими словами: «Прежде всего, – говорил Дирак, – нужно отбросить все так называемые «физические представления», ибо они – не что иное, как термин для обозначения устаревших предрассудков предшествующих поколений».

Начинать, по его словам, следует с красивой математической теории. «Если она действительно красива, – говорит Дирак, – то она обязательно окажется прекрасной моделью важных физических явлений. Вот и нужно искать эти явления, развивать приложения красивой математической теории и интерпретировать их как предсказания новых законов физики», – так строится, по словам Дирака, вся новая физика, и релятивистская, и квантовая».

## Часть I. МИР КАК ФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Не то, что мните вы, природа:  
Не слепок, не бездушный лик -  
В ней есть душа, в ней есть свобода,  
В ней есть любовь, в ней есть язык...

Ф.И. Тютчев

### Лекция 1. ДИСКУРСИЯ И ИНТУИЦИЯ. КРИТЕРИЙ ОЧЕВИДНОСТИ. ПРОБЛЕМА НАУЧНОЙ АКСИОМАТИКИ

Начиная курс, в первую очередь, мы должны конкретизировать предмет нашего разговора, то есть то, о чем собственно пойдет речь. Для этого следует хотя бы вкратце остановиться на «языке», на котором следовало бы с вами общаться. Это чрезвычайно существенно, ибо именно «язык» общения определяет в ряде случаев сам предмет исследования.

Напомним, что во введении мы говорили о двух культурах: **естественной и гуманитарной**. В нашем курсе далее мы будем говорить в основном только о первой. Язык этой естественной культуры – **математика и эксперимент**. Поскольку, однако, наш курс предназначен в первую очередь для гуманитариев, мы сознательно будем избегать при изложении излишней математизации, приводя лишь минимум общедоступных формул.

В **естествознании** способ мышления, в первую очередь, логический, рациональный, дискурсивный. Однако, и это очень важно уяснить с самого же начала, построение науки невозможно без своеобразного иррационального мышления – **интуиции**.

**Именно интуиция позволяет высказать в качестве гипотезы ранее неизвестное утверждение**, которое потом может быть либо подтверждено, либо опровергнуто. Что же такое интуиция? На первом этапе нам достаточно самого тривиального определения. **Интуиция есть прямое угадывание результата**. Заметим здесь же, что результат может оказаться и ложным.

Так, например, на каком-то этапе знаний человечества, интуитивно казалось очевидным, что Солнце вращается вокруг нас, расположенных на Земле. Ведь, действительно, наш далекий предок утром выходил из пещеры и видел солнце на горизонте на востоке, днем у себя над головой, а вечером на горизонте на западе. Теперь же мы знаем, что истинная картина прямо противоположная. Второй пример вам покажется менее правдоподобным, и, тем не менее, приведем его именно сейчас, отложив объяснение до соответствующей лекции. Рассмотрим «глобальную» задачу. Предположим, что мы стоим на перроне вокзала в городе Жмеринка и смотрим на крышу поезда, идущего в Париж. По крыше поезда «Жмеринка–Париж» бежит сын турецко подданного Остап Бендер.



Поезд «Жмеринка–Париж» движется со скоростью  $v_p$ , скорость тов. Бендера на поезде  $v_b$ .

Угадайте, какая скорость тов. Бендера относительно Жмеринского вокзала

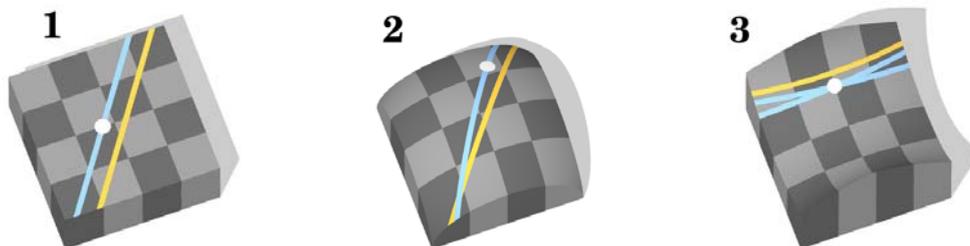
Скорость поезда  $v_{\Pi}$  известна, скорость Остапа Ибрагимовича относительно поезда  $v_{\text{Б}}$  тоже известна. С какой скоростью относительно вас движется Остап? Вы скажете, что это примитивная задача из курса школьной физики, и все зависит от того, в какую сторону бежит тов. О. Бендер. Если в сторону движения поезда, то  $V = v_{\Pi} + v_{\text{Б}}$ , если против движения, то  $V = v_{\Pi} - v_{\text{Б}}$ . Простое, но абсолютно неверно! Сейчас не станем объяснять, почему эти простые формулы «школьной» физики, несмотря на то, что они дают в нашей повседневной жизни результат, достаточно хорошо совпадающий с экспериментом, тем не менее, являются неправильными. Дело здесь, конечно, не в личности великого комбинатора, а в том, **что хорошее, даже сколь угодно хорошее совпадение с экспериментом не означает еще истинности**. Пожалуй, здесь уместно пояснить, почему та или иная концепция становится понятной человеку или даже интуитивно «очевидной» как бы *a priori*. Это происходит в том случае, если отношение характеризующего концепцию параметра  $K$  к величине  $L$ , соответствующей жизненному опыту, становится порядка или меньше единицы ( $K/L \leq 1$ ). В противном случае концепция кажется нам абсурдной или по крайней мере непонятной. Пояснить сказанное можно следующими примерами. Пока человек мыслил расстояниями «от меня до следующего столба» т.е. порядка несколько десятков метров или километров, представление о шарообразности Земли (напомним, радиус Земли примерно 6400 км) вызывало значительные затруднения. И это несмотря на то, что еще на рубеже III–II вв. до н.э. в Египте александрийский ученый Эратосфен Киренский (276–194 гг. до н.э.) достаточно точно измерил радиус Земли по разнице в отклонении тени в Александрии и Луксоре в день летнего солнцестояния. Характерно, что Х. Колумб имел существенно заниженное представление об этой величине. Именно поэтому он рассчитывал обогнуть земной шар и приплыть в Индию так быстро. Как видим, иногда и ошибка(!) приводит к открытиям.

Второй пример – неправильность выше обсуждаемой формулы сложения скоростей. Проблема заключается в том, что наш житейский параметр – скорость порядка скорости машины, самолета и даже ракеты ( $\leq 10^2$  м/с) значительно меньше скорости света ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с). Последний характерный пример связан с кажущейся парадоксальностью закономерностей микромира. Здесь проблема в том, что наш естественный темп жизни – частота пульса 60 ударов в минуту, т.е. 1 Гц, по крайней мере на 16 порядков меньше «мира» атомных частот ( $10^{16}$  Гц для оптического излучения и  $10^{19}$  Гц для рентгеновского и гамма-излучений).

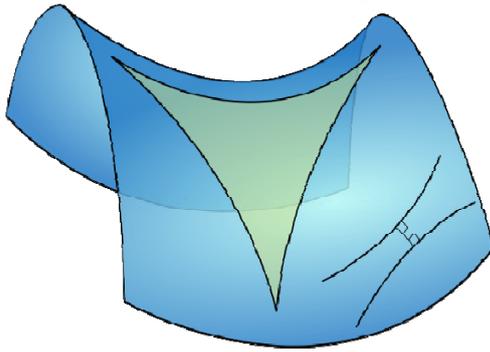
Теперь следует остановиться на аксиомах науки. То есть, на том базисе, тех критериях, которые, с одной стороны, будут характеризовать науку, и, с другой стороны, отделять ее от гуманитарной культуры и религии. Кроме того, по нашему мнению, данная научная методология может быть полезна и в повседневной жизни, ибо человек, привыкший мыслить точно и логично, видит абсурдное и тенденциозное утверждение, даже в том случае, если оно замаскировано самой изощренной демагогией.

**Аксиома 1. *Sine ira et studio*.** Что означает: **без гнева и пристрастия**. В более широком смысле – для постижения научной истины не имей предвзятого мнения и **подвергай все сомнению**.

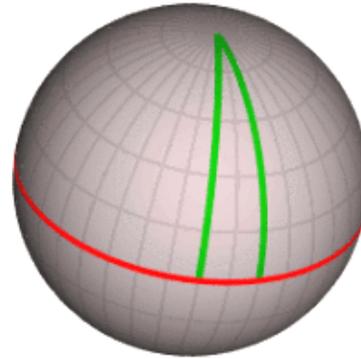
Ясно, что эта аксиома четко отделяет научное мышление от религиозного, реконструктивно-пророческого. Сомнение в том, что сумма углов треугольника всегда равна  $180^\circ$ , привело к созданию принципиально новой ветви математики – неевклидовой геометрии. Замечательно, что эти геометрии нашли прямое применение в описании мира, в частности в теории относительности, о которой мы будем еще говорить.



1 – евклидова геометрия; 2 – геометрия Римана; 3 – геометрия Лобачевского



Гиперболическая геометрия –  
сумма углов треугольника меньше  $180^\circ$



Эллиптическая геометрия –  
сумма углов треугольника больше  $180^\circ$

**Аксиома 2.** Так называемый «принцип бритвы» У. Оккама. *Не множь сущностей без необходимости*, т.е. объясняй факты простейшим способом. Фактически это означает, что при выборе между двумя теориями предпочтение должно отдаваться той, которая базируется на меньшем количестве аксиом, принципов или положений или допущений.

В дальнейшем мы продемонстрируем «работу» этой аксиомы на важных концептуальных принципах, а пока приведем лишь один пример.

В VI веке до н.э. Пифагор высказал идею о сферической Земле, находящейся в центре сферической Вселенной. Для удовлетворительного экспериментального подтверждения геоцентрической гипотезы Клавдию Птолемею во II веке н.э. потребовалось немало изобретательности. Чтобы, в частности, сохранить круговое движение, отвечающее максимальной симметрии и античному представлению о гармонии и эстетическом совершенстве, пришлось ввести так называемые *эпициклы*. В модели Птолемея все планеты, кроме Земли (а также Солнце и Луна), движутся равномерно по круговым орбитам, и центр каждой сам движется вокруг Земли равномерно и тоже по круговой орбите, называемой *дифферентом* (или же еще по одной круговой орбите, центр которой тоже движется вокруг Земли). Таким образом, Вселенная Птолемея представляла собой набор взаимопересекающихся вращающихся сфер. В итоге для удовлетворительного совпадения с экспериментом Птолемею потребовалось 77 эпициклов и дифферентов. Несмотря на то, что в античные времена были и сторонники гелиоцентрической системы, такие как Аристарх Самосский и Архимед Сиракузский, система Птолемея, освященная католической церковью, просуществовала полторы тысячи лет.

Переход к геоцентрической системе, совершенный Н. Коперником в XVI веке, также основывался не на эллиптических, а на круговых орбитах планет. Поэтому опять-таки для удовлетворительного совпадения с экспериментом Н. Копернику потребовалось, проделав гигантскую вычислительную работу, оставить эпициклы и дифференты, но всего 34! Такое уменьшение сущностей сразу показало, что гелиоцентрическая система лучше, потому что проще, и она сразу же приобрела ряд сторонников.

**Тихо Браге** (дат. *Tyge Ottesen Brahe* (инф.), лат. *Tycho Brahe*; 14 декабря 1546, Кнудstrup, Дания (ныне на территории Швеции) – 24 октября 1601, Прага) – датский астроном, астролог и алхимик эпохи Возрождения. Первым в Европе начал проводить систематические и высокоточные астрономические



Тихо Браге

наблюдения, на основании которых Кеплер вывел законы движения планет.

23 мая 1576 года специальным указом датско-норвежского короля Фредерика II Тихо Браге был пожалован в пожизненное пользование остров Вен (*Hven*), расположенный в проливе Эресунн в 20 км от Копенгагена, а также выделены значительные суммы на постройку обсерватории и её содержание. Это было первое в Европе здание, специально построенное для астрономических наблюдений (ландграф Вильгельм использовал в качестве обсерватории одну из башен своего замка). В личной беседе король выразил уверенность, что своими трудами Тихо Браге «прославит страну, короля и самого себя».



*Остров Вэн. Пролив Эресунн. Вид от Ландскруны*

В 1588 году умер покровитель Браге, король Фредерик II. Новый король, Кристиан IV, к астрономии был равнодушен, но остро нуждался в деньгах на содержание армии. В 1596 году Кристиан достиг совершеннолетия и был коронован, а в следующем году король окончательно лишил Тихо финансовой поддержки, к этому времени значительно урезанной. Сбережений у Браге почти не осталось, всё было вложено в Ураниборг. Более того, вскоре он получил письмо от короля, запрещающее ему заниматься на острове астрономией и алхимией.

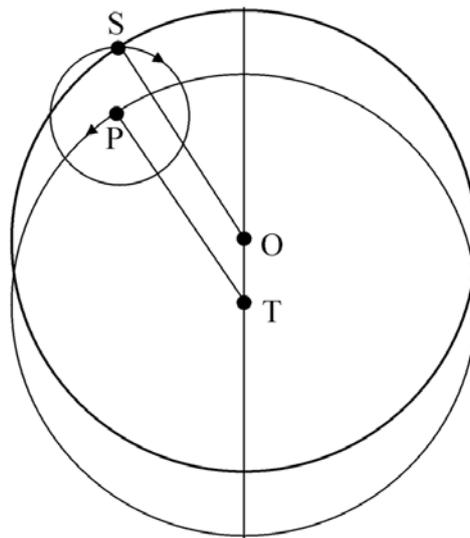
Браге перебирается в Прагу (1598), где становится придворным математиком и астрологом Рудольфа II – императора Священной Римской империи [32] (Прага была резиденцией Рудольфа большую часть его правления). Вероятно, в это напряжённое время Браге пришёл к выводу, что ему нужен молодой талантливый помощник-математик для обработки накопленных за 20 лет данных. Узнав о гонениях на Иоганна Кеплера, незаурядные математические способности которого он уже успел оценить из их переписки, Тихо пригласил его к себе. В 1601 году Тихо Браге и Кеплер начали работу над новыми, уточнёнными астрономическими таблицами, которые в честь императора получили название «Рудольфовых» (лат. *Tabula Rudolphinae*); они были закончены в 1627 году и служили астрономам и морякам вплоть до начала XIX века. Но Тихо Браге успел только дать таблицам название. В октябре он неожиданно заболел и, несмотря на участие лучших врачей императора, умер от неизвестной болезни, проболев всего 11 дней. По словам Кеплера, перед смертью он несколько раз произнёс: «Жизнь прожита не напрасно»<sup>[36]</sup>.

Во всех своих дальнейших книгах Кеплер не устал подчёркивать, сколь многим он обязан Тихо Браге, его самоотверженному труду во имя науки. Сам Кеплер тоже выполнил свою задачу: тщательно изучив данные Тихо Браге, он открыл законы движения планет.

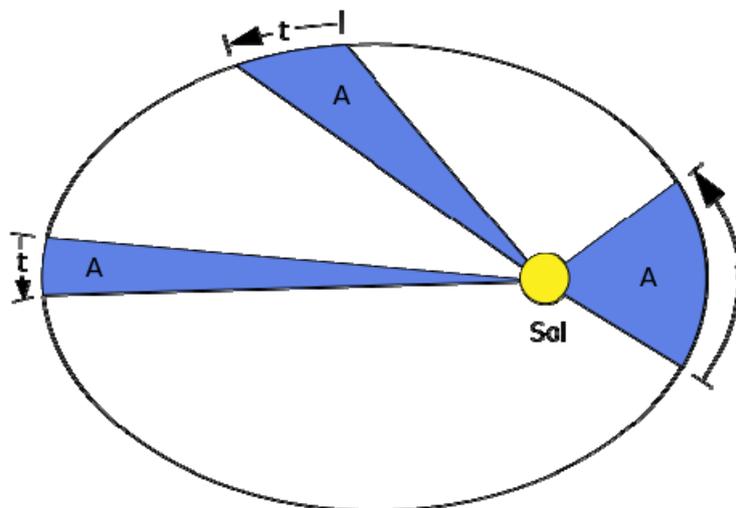
На надгробной плите ученого высечен девиз, прежде украшавший разрушенный «Звёздный замок»: «Не власти, не богатства, а только скипетры науки вечны» (лат. *Non fasces, nec opes sola artim scepra perennant*).



Сочетание движений по эпициклу и деференту, приводящее в теориях Гиппарха и Птолемея к движению Солнца по эксцентрическому кругу. Обозначения: Т – Земля (центр деферента), S – Солнце, Р – центр эпицикла, О – центр эксцентра (результатирующей орбиты Солнца). При движении Солнца отрезки SP и OT всегда параллельны.



Второй закон Кеплера.



**Аксиома 3. Сформулированная на основе интуиции-догадки гипотеза должна быть проверена экспериментально.**

В связи с этим следует заметить, что важнейшим и принципиальным для всей науки является интуитивное суждение **о достаточности опытной проверки, о доказательности опыта**, который сам по себе всегда с неизбежностью ограничен. Строго говоря, такое суждение называется **интуицией-суждением** (которое не сводится к каким-либо аксиомам, так как само оно имеет характер аксиомы), в отличие от **интуиции-догадки**, являющейся порождением гипотез. Обе эти различные интуиции не что иное, как две разновидности сверхсознания человека. Так что известное высказывание «практика – критерий истины» взято человечеством на вооружение в качестве аксиомы еще со времен Древней Греции, когда впервые в европейской цивилизации возникло представление о законе природы. Именно представление о наличии законов природы имело далеко идущие последствия в развитии науки и техники для европейской цивилизации. Следует отметить, что для ряда других цивилизаций такого представления не существовало, поэтому даже впервые эмпирически найденные данные (например, порох, компас и т.д.) не рассматривались с точки зрения закономерностей и передавались из поколения в поколение как некий клановый секрет.

**Аксиома 4. Экспериментальные факты должны быть достоверными, т.е. воспроизводимыми.**

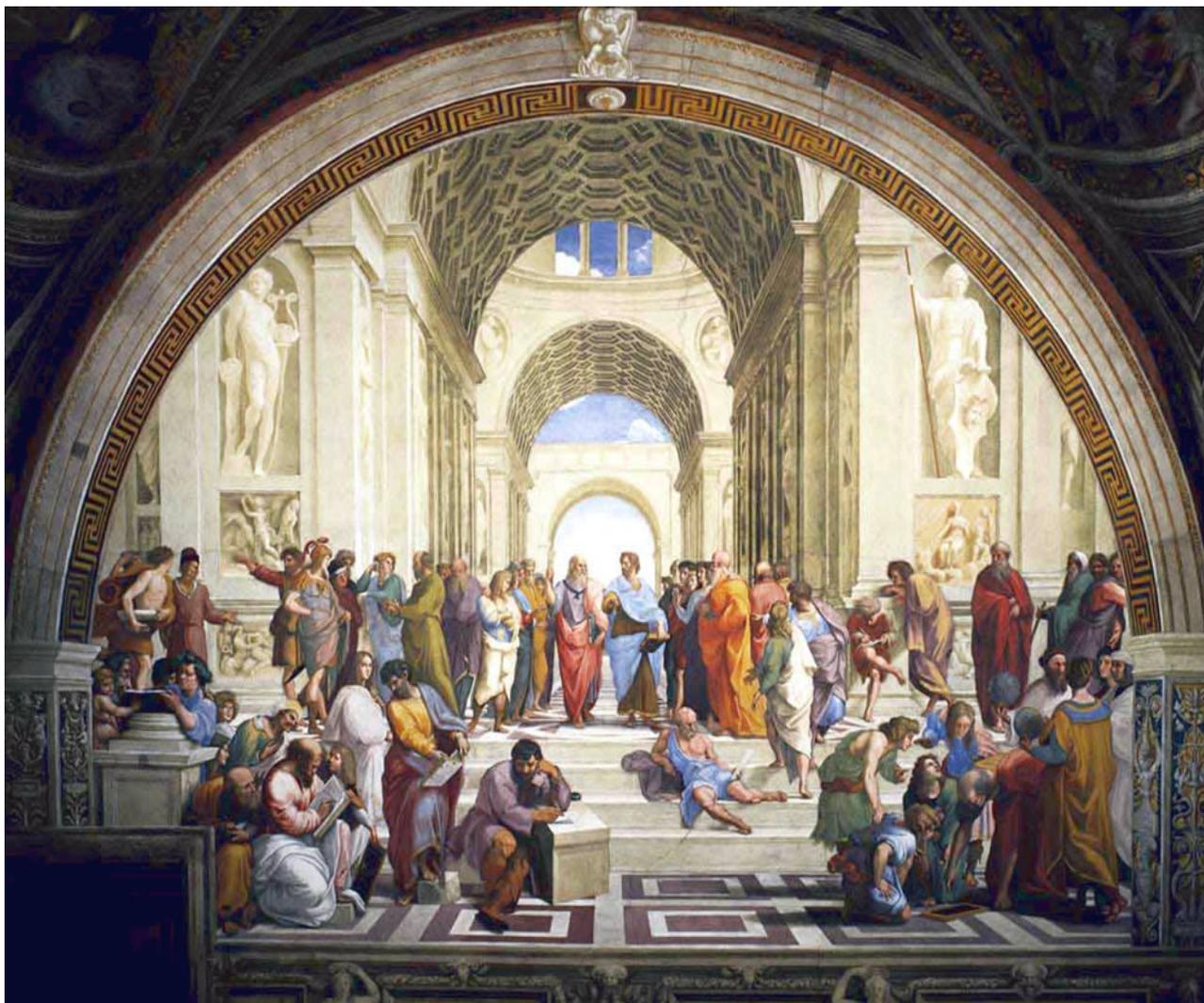
В связи с этим медицинская практика псевдоцелителей не имеет отношения к науке, так как эксперимент от случая к случаю непредсказуем, в то время как традиционная медицина гарантирует воспроизводимый результат, хотя и с долей процента риска и успеха.

**Аксиома 5. Теория должна строиться только на достоверных фактах.**

Результат построения теории, особенно в социально-политической сфере, основанный на непроверенных фактах нам хорошо известен. Огромное здание научного коммунизма рухнуло, предварительно катком пройдя по судьбам и жизням нескольких поколений людей во всем мире.

Следует отметить, что приведенная выше аксиоматика, безусловно, применима в области естественных наук. В гуманитарных науках она не столь категорична, кроме того, очевидно, что проведение прямого эксперимента не всегда возможно.

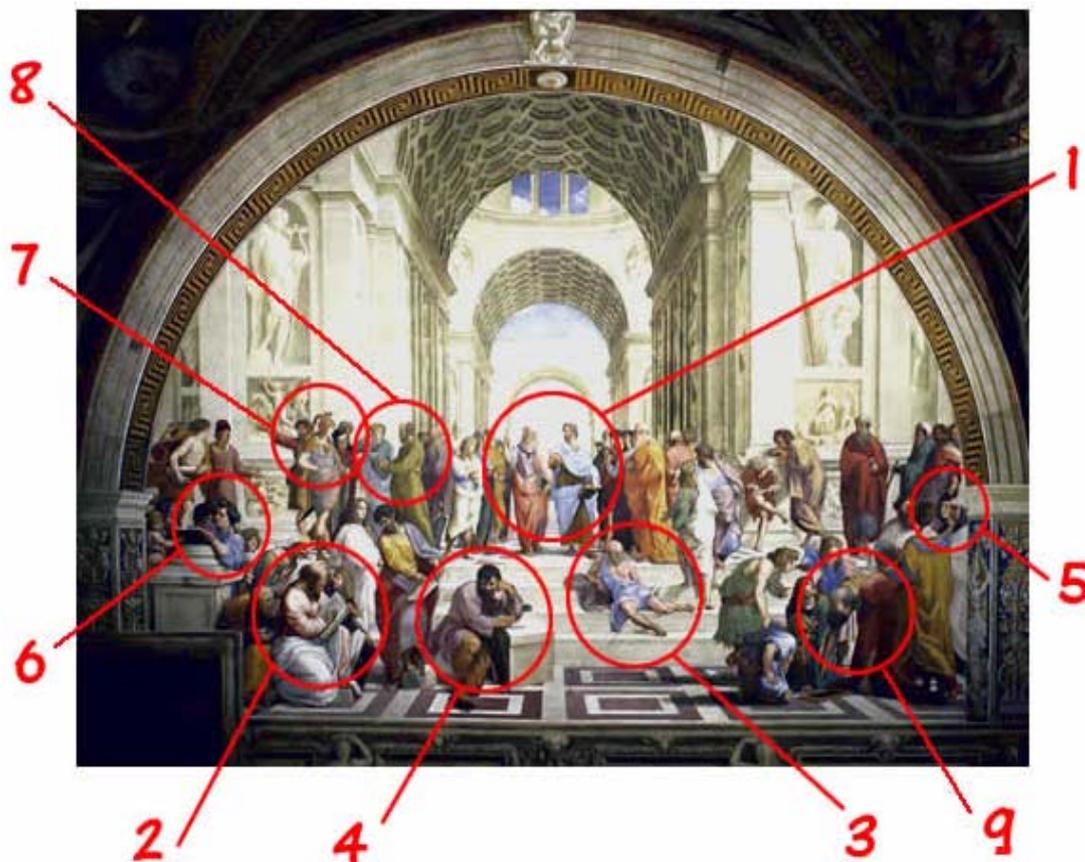
В заключение этой лекции я хочу показать вам античных ученых, представленных Рафаэлем Санти на его фреске «Афинская школа».



*Афинская школа «Философия». Рафаэль Санти. 1509–1511 гг.  
(Фреска Станца делла Сеньятура, кабинет Папы Римского)*

«Афинская школа» – великое произведение Рафаэля. Фреска прославляет мощь разума, объемлющего весь мир.

Кто есть кто на фреске «Афинская школа»?



- 1 – Леонардо да Винчи в образе Платона и Аристотель
- 2 – Пифагор
- 3 – Диоген Синопский
- 4 – Микеланджело в образе Гераклита
- 5 – автопортрет
- 6 – Эпикур
- 7 – Александр Македонский
- 8 – Сократ
- 9 – Евклид

Фреска «Афинская школа» изображает не реальную группу афинян – здесь находятся не только афиняне (к примеру, философы Парменид и его ученик Зенон не были гражданами Афин) и даже не только современники, но также мыслители, жившие в другое время и в других странах (например, персидский философ-мистик Зороастр, живший за несколько веков до Платона, или мусульманский переводчик и комментатор Аристотеля Аверроэс, живший на много веков позже). Таким образом «Афинская школа» представляет идеальное сообщество мыслителей классической эпохи, сообщество учителей и учеников. Однако изображая этих выдающихся людей прошлого, Рафаэль придает им черты своих выдающихся современников. Всего на фреске представлено свыше 50 фигур (многие из них не поддаются атрибуции, насчет некоторых нет единой точки зрения):

- с бородой, в коричневой тоге – Спевсипп, философ, племянник Платона;
- в синей тоге – Менексен, философ, ученик Сократа;
- в белой тоге – Ксенократ, философ, ученик Платона;
- в желтовато-зеленоватой – философ Сократ;

- в синеватой – предположительно Александр Македонский, ученик Аристотеля;
- в темном головном уборе, низенький – Ксенофонт, философ, ученик Сократа;
- в шлеме – Алкивиад, полководец и политик, ученик Сократа;
- с вытянутой рукой – Есхин, философ, ученик Сократа;
- в розовом – Критий, философ, оратор, писатель, дядя Платона;
- с обнаженным торсом – Диагор Мелосский, поэт по прозвищу «Безбожник»;
- рядом с Амуром – философ Зенон, ученик Парменида;
- следующий за Зеноном – Навсифан, философ, последователь Демокрита, учитель

Эпикура;

- в венке – философ Демокрит (по другой версии – Эпикур);
- мальчик за его спиной – Диоген Лаэртский, историк философии;
- в белом тюрбане – Аверроэс, арабский философ;
- лысый, в желтоватом одеянии на первом плане – Анаксимандр, философ, ученик Фалеса;
- в белом одеянии, с книгой – Пифагор, философ и математик;
- с длинными волосами – Анаксагор, философ, математик и астроном;
- стоит в белом – Гипатия, женщина-математик, астроном и философ;
- стоит и держит книгу – философ Парменид;
- сидит, опершись на куб – философ Гераклит;
- лежит на ступенях – философ Диоген;
- сидят на коленях и стоят согнувшись – ученики Евклида в 27 м.б, изображен герцог

Федерико Гонзага;

- с циркулем – Евклид, математик (по другой версии – Архимед);
- в белой одежде с небесным глобусом – Зороастр, астроном и философ-мистик;
- спиной к зрителю, с земным шаром – Птолемей, астроном и географ;
- в белом берете – Иль Содома, художник, друг Рафаэля (по другой версии – Перуджино, учитель Рафаэля);
- в темном берете – Рафаэль;
- в темной тоге – философ Аркесилай (по другой версии – Плотин);
- опершись рукой о стену – философ Пиррон;
- на одной ноге – ?
- в голубом и розовом, спускается – Аристипп, философ, друг Сократа;
- всходит по ступеням – философ Эпикур;
- спиной, в розовом – ?
- с бородой, в желтоватом плаще – Теофраст, философ и ученый, ученик Платона и

Аристотеля;

- вплотную к Теофрасту стоит – Евдем, философ, ученик Аристотеля.

В 1508 году по приглашению папы Юлия II Рафаэль отправляется в Рим. Папа поручает художнику роспись парадных залов (станц) Ватиканского дворца. **В Станца делла Сеньятура (1509–11) Рафаэль представил четыре области человеческой деятельности: богословие («Диспута»), философию («Афинская школа»), поэзию («Парнас»), юриспруденцию («Мудрость, мера, сила»), а также соответствующие главным композициям аллегорические, библейские и мифологические сцены на плафоне.**

Фреска «Афинская школа» воплощает величие философии и науки. Ее основная идея – возможность гармонического согласия между различными направлениями философии и науки – принадлежит к числу важнейших идей гуманистов. Под сводами величественного здания расположились группами древнегреческие философы и ученые.

В центре композиции находятся Платон и Аристотель, олицетворяющие античную мудрость и представляющие две школы философии. Платон указывает пальцем на небо, Аристотель простирает руку над землей. Воин в шлеме – Александр Македонский, он внима-

тельно слушает Сократа, который, что-то доказывая, загибает пальцы. Слева, у подножия лестницы, Пифагор, в окружении учеников, занят разработкой математических проблем. Человек в венке из виноградных листьев – Эпикур. Человек, сидящий в задумчивой позе, опершись на куб, – Микеланджело в образе Гераклита. На ступеньках лестницы расположился Диоген. Справа Евклид, склоняясь над доской, измеряет циркулем геометрический чертеж. Ступени лестницы символизируют этапы овладения истиной. Рядом с Евклидом стоят Птолемей (держит в руках земной шар) и, вероятно, пророк Зороастр (держит небесный глобус). Чуть правее стоит сам художник (смотрит прямо на зрителя). Хотя на фреске представлено свыше 50 фигур, свойственное Рафаэлю чувство пропорций и ритма создает впечатление удивительной легкости и простора.

Художник поставил перед собой задачу невероятной сложности. И гений его проявился уже в самом подходе к ее решению. Он разделил философов на несколько обособленных групп. Одни осматривают два глобуса – Земли и неба – последний, по-видимому, находится в руках Птолемея. Рядом другие увлечены решением геометрической задачи. Напротив – уединенный мечтатель. Возле него почтенный мыслитель вносит исправления в солидный фолиант под восхищенными взглядами одних и напряженным подглядыванием плагиатора, старающегося схватить чужую мысль налету. От этих людей отходит юноша, еще не избравший себе учителя, готовый к поискам истины. Сзади – Сократ, на пальцах объясняющий слушателям ход своих рассуждений.

Совершенно замечательна фигура юноши в левом дальнем углу фрески. Он стремительно входит в это скопление мудрецов, держа в руке свиток и книгу; развеваются складки его плаща и кудри на голове. Стоящий рядом указывает ему дорогу, а некто из кружка Сократа приветствует его. Возможно, так олицетворена новая смелая мысль, которая вызовет новые споры, подвигнет на новые искания.

Словно нищий, на ступенях храма – одинокий Диоген, отстраненный от мирской суеты и дискуссий. Кто-то, проходя мимо, указывает на него, словно спрашивая спутника: не таков ли удел подлинного философа? Но тот обращает его внимание (и наше) на две фигуры, которые находятся в центре композиции. Это убеленный сединами Платон и молодой Аристотель. Они ведут диалог – спокойный спор, в котором освобождается от оков догм и предрассудков истина. Платон указывает на небо, где царят гармония, величие и высший разум. Аристотель простирает руку к земле, окружающему людей миру. В этом споре не может быть победителя, ибо для человека одинаково необходимы и безмерный космос, и родная Земля, познание которых будет длиться вечно.

Несмотря на обособление групп философов, картина тяготеет к двум центральным фигурам, отчетливо выдающимся на фоне неба. Их единство подчеркивает система арочных сводов, последний из которых образует подобие рамы, в которой находятся Платон и Аристотель.

Единство философий – в разнообразии отдельных школ и личных мнений. Так складывается великая симфония человеческого познания. Этому не мешает разобщенность мыслителей в пространстве и времени. Напротив, познание объединяет всех, кто искренне к нему стремится. И не случайно, конечно, в картине присутствуют люди всех возрастов, включая младенцев, а на их лицах не только сосредоточенность и задумчивость, но и светлые улыбки.

В своих четырех великих композициях Рафаэль показал **четыре основания, на которых должно покоиться человеческое общество: разум (философия, наука), доброта и любовь (религия), красота (искусство), справедливость (правосудие).**

Современному человеку может показаться невероятным, что Рафаэль, не достигший тридцатилетия, мог создавать такие грандиозные фрески. Поражает одно уже величие замысла и способность выразить глубокие идеи (а прежде – осознать их) в форме живописных композиций. А сколько для этого требовалось сделать набросков, эскизов! Трудно усомниться, что над фресками работали группы художников. Но общий замысел, структура картин, конкретные фигуры и обработка многих деталей – дело рук и мысли великого мастера.

Философы полагают, что факты рожают идеи,  
и в некотором смысле это верно.  
Но я нахожу в истории естествознания  
следующее: для того, чтобы понимать факты,  
необходимо иметь в голове определенные идеи,  
и что глазами можно не увидеть того, что увидит разум.

*Ю. фон Либих*

## **Лекция 2. КОНЦЕПЦИЯ ДИСКРЕТНОСТИ И КONTИНУАЛЬНОСТИ В ОПИСАНИИ ПРИРОДЫ. СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ МАТЕРИИ. РОЛЬ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ МИРОВЫХ КОНСТАНТ**

Еще в античные времена были сформулированы две «взаимно исключаютелые» (на самом деле природа устроена сложнее, чем мы привыкли считать. Об этом мы скажем в конце лекции) друг друга гипотезы о внутреннем строении тел. Согласно первой, вещество непрерывно состоит из одного или нескольких «первичных» элементов. Вторая гипотеза утверждала, что все вещества состоят из неделимых далее частиц – атомов.

Это расхождение имело принципиальное значение и для теории познания, и для науки в целом. Если материя непрерывна, то задачи исследования существенно сужаются (делить что-либо на элементарные части не нужно, все равно получим то же вещество с теми же свойствами). Если же верна вторая гипотеза, то задачей исследователей является изучение свойств этих атомов и ответ на вопрос: как они скрепляются при образовании различных веществ? Попутно возникает еще одна проблема. Если мы начнем делить вещество на части, то до какого момента оно сохраняет свои свойства? Если обратить эту задачу, то фактически это означает решение проблемы: сколько надо взять атомов (или молекул) вещества, чтобы оно проявляло известные нам свойства. Эта проблема в каком-то смысле аналогична древней философской проблеме «кучи» (зерно и зерно – два зерна, еще одно зерно – три зерна..., а когда куча?).

Продлившись более 2500 лет, спор между гипотезами окончательно разрешился только в начале XX века признанием атомистической концепции, подтвержденной после открытия в 1896 г. В. Рентгеном его лучей. С их помощью уже в нашем веке М. Лауэ, а также отцом и сыном У.Л. Брэггом и У.Г. Брэггами была открыта дифракция на атомно-кристаллической структуре.

Сейчас, когда мы со школьной скамьи знаем и про атомы, и молекулы, и много чего другого про них, сама проблема атомизма может показаться очень уж тривиальной. На самом деле она глубже, чем обычно о ней говорят на популярном уровне, и сводится не только, и даже не столько к атомизму, сколько к проблеме дискретного описания материи, а значит, ее свойств. Да и вряд ли плеяда высоких умов, начиная с античности, занималась столь тривиальной проблемой? Приведем краткую историческую справку. Атомистами были Анаксагор, Левкипп, Демокрит, Эпикур. Им противостояли Сократ, Платон, Аристотель. В средние века под влиянием фактически канонизированного учения Аристотеля термин «атом» исчезает из употребления. В новое время впервые корпускулярную теорию строения материи развил Р. Бойль, введя понятие «химического элемента как простого тела, не состоящего из других». Далее свой вклад внесли А. Лавуазье, Д. Дальтон, А. Авогадро. На великой гипотезе А. Авогадро мы сейчас и остановимся. Дело в том, что в 1808 г. Ж. Гей-Люссак нашел закон простых объемных отношений. Например, два литра водорода и один литр кислорода дают два литра водяных паров. Этот факт ( $2 + 1 = 2$ ?) не находил объяснения в атомистической теории, предложенной в 1803 г. Д. Дальтоном. Для спасения атомистической теории А. Аво-

гадро в 1811 г. выдвинул гипотезу, разрешившую это противоречие. Для этого ему потребовалось ввести новое понятие – молекулы как соединения атомов (обратите внимание, все это было высказано в то время, когда гипотезой являлось еще само существование атомов!). Далее он предположил, что число этих новых «сущностей» – молекул всегда одно и то же в одинаковых объемах любых газов и всегда пропорционально объему. Отсюда он сделал вывод (закон Авогадро): при одинаковых давлении и температуре равные объемы любых газов содержат одно и то же число структурных элементов (это либо атомы, если газ одноатомный, либо молекулы, если газ многоатомный), и это число Авогадро  $N_A = 6,0227 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> (в дальнейшем нам существенен именно порядок этой величины, а не ее размерность – моль<sup>-1</sup>).

Гипотеза А. Авогадро закрепила в науке представление о дискретном строении вещества, хотя официальное признание самой гипотезы пришло только на I Международном конгрессе химиков в 1860 г. спустя четыре года после смерти автора, а само  $N_A$  было вычислено впервые Й. Лошмидтом в 1865 г. Важно также, что еще в XIX в. возникает новое понятие – количество вещества, и уже в XX веке становится ясным, что число Авогадро является, по существу, достаточным условием макросостояния. Необходимого условия в общем случае не существует. Для каких-то объектов это может быть миллион структурных элементов, а для других может и всего 1000, но мы определенно знаем, чего бы мы не взяли в количестве  $N_A$ , это всегда макрообъект (т.е. «куча»).

Подводя итог, имеет смысл привести высказывание Нобелевского лауреата Р. Фейнмана, считавшего, что атомистическая гипотеза – это именно то, что следует взять с собой, если в будущем человечеству предстоит забыть все остальные знания.

Наши современные знания дают следующее представление об иерархической структуре материи. В микромире из кварков «состоят» протоны и нейтроны, которые в свою очередь формируют ядра атомов. Атомы (состоят из ядра и электронов) могут комбинироваться в молекулы. Из этих материалов состоят привычные нам макроскопические тела. Если двигаться вверх по шкале масштабов, то мы должны выделить мегамир: планеты и их системы, звездные скопления, затем галактики, которые в свою очередь объединяются в скопления и сверхгалактики. Микро-, макро- и мегаразмеры объектов относятся друг к другу примерно так:

**макро/микро  $\approx$  мега/макро.**

В рамках нашего курса мы должны охарактеризовать не только каждый из этих иерархических уровней, но и также посредством чего осуществляется такая иерархия. Что является своеобразным «клеем», делающим возможным существование этих уровней? Оказывается, что важнейшими характеристиками такого «клеящего вещества» выступают определенные константы, часто их называют фундаментальными мировыми константами. Как мы увидим, этих фундаментальных констант в физике, химии и биологии не так уж и много. В настоящее время нам понятно, что сравнительно небольшое их изменение должно привести к формированию качественно иного мира, в котором, в частности, стало бы невозможным образование ныне существующих микро-, макро- и мегаструктур, а следовательно, и высокоорганизованных форм живой материи. Проблема фундаментальных констант приобретает, таким образом, в концептуальном плане глобальное мировоззренческое значение.

Лоренцо Романо Амедео Карло Авогадро Граф Куаренья и Черетто (Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro di Quaregna e Cerreto) родился 9 августа 1776 года в Турине, столице Сардинского королевства.

8 мая 1794 (19 флореаля II года республики) Антуан Лоран Лавуазье был гильотинирован по решению революционного трибунала. Историк науки В. Штрубе отмечает, что в обвинении ученому чувствуется надуманность и демагогичность. Жена Лавуазье жаловалась, что учёные, которые должны были бы выступить в защиту Лавуазье, ничего не сделали для его спасения. Лагранж, Жозеф Луи: Всего мгновение потребовалось им, чтобы срубить эту голову, но может и за сто лет Франция не сможет произвести ещё так.



*Амедео Авогадро*  
(9 августа 1776, Турин – 9 июля 1856, Турин) –  
итальянский учёный, физик и химик



*Антуан Лоран Лавуазье*  
(26 августа 1743, Париж – 8 мая 1794, Париж) –  
французский естествоиспытатель,  
основатель современной химии

Имя А. Лавуазье внесено в список величайших учёных Франции, помещённый на первом этаже Эйфелевой башни.



**Н.В. Уточнение для физиков.** «Квантованное волновое поле – фундаментальная физическая концепция, в рамках которой формулируется динамика частиц и их взаимодействия. Она позволяет описывать различные состояния системы многих частиц единым физическим объектом в обычном пространстве-времени – квантованным полем. Квантованное поле возникает путем квантования классического поля, в результате которого полевая функция приобретает операторный характер и выражается через операторы рождения и уничтожения частиц. Тем самым, появляется возможность описывать важнейшие свойства мира элементарных частиц – процессы их взаимного превращения» (Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. Квантовые поля. – М.: Наука, 1980. – С. 13).



**Никола́й Никола́евич Боголю́бов**

(8 (21) августа 1909 г., Нижний Новгород – 13 февраля 1992 г., Москва) – советский математик и физик-теоретик, академик Российской академии наук (1991; академик Академии наук СССР с 1953 г.) и АН УССР (1948), основатель научных школ по нелинейной механике и теоретической физике. Дважды Герой Социалистического Труда.



**Дми́трий Васи́льевич Ширко́в**

(3 марта 1928 г., Москва – 23 января 2016 г., Дубна [2]) – российский физик-теоретик, специалист в области квантовой теории поля, физики высоких энергий, теории сверхпроводимости и дисперсионных соотношений, теории переноса и замедления нейтронов, академик РАН.

Невозмутимый строй во всем,  
Созвучье полное в природе,  
Лишь в нашей призрачной свободе,  
Разлад мы с нею сознаем.

Ф.И. Тютчев

### Лекция 3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ КАК СЛЕДСТВИЕ СИММЕТРИЙНЫХ СВОЙСТВ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

В этой и двух последующих лекциях мы продемонстрируем «работу» второй аксиомы на ряде очень важных концептуальных примеров.

Остановимся вначале на двух понятиях: однородность и изотропность. Определим их по отношению к пространству.

1. Пространство называется *однородным*, если свойства его не меняются *при любом параллельном переносе*.

2. Пространство называется *изотропным*, если свойства его не меняются *при любом повороте* вокруг заданной оси.

Таким образом, отличие двух определений заключается в существенно разном наблюдении над пространством. В первом случае надо двигаться трансляционным путем, во втором необходимо поворачивать траекторию наблюдения. Заметим здесь же, что однородное и изотропное пространство обладает максимально возможной симметрией.

Представим теперь, что мы запускаем в пустыню двух агентов, муравья и верблюда. Пустыня для определенности вся состоит из песка, т.е. это что-то типа Сахары, на худой конец подойдет и Иудейская, хотя в ней и мало песка. Какую же информацию об однородности и изотропности дадут нам два наших агента?

Муравей, проползав параллельными курсами и ощущая своими маленькими ножками разные размеры песчинок, доложит, что пустыня неоднородная, но поскольку видит он на небольшое расстояние, сравнимое с его размерами, он повсюду видит одинаковую плотность песка, поэтому утверждает что она изотропная.

Верблюд своими большими ногами не чувствует размера песчинок, поэтому считает что пустыня однородна, но он видит достаточно далеко, на расстояние, значительно большее его размеров, поэтому, повертев головой с одной стороны видит бархан, с другой – его нет, и поэтому докладывает нам, что пустыня не изотропна. Таким образом, два наших агента (каждый из которых по условиям задачи абсолютно правдив) представили нам совершенно противоположную информацию.

Приведем физический пример. Если осветить кристалл (аналог пустыни) видимым светом (аналог верблюда), то он не «почувствует» структуру кристалла, и среда по отношению к нему будет однородной. Однако свет, распространяясь по разным направлениям, «почувствует» неизотропность кристалла. Если же осветить тот же самый кристалл рентгеновским излучением, длина волны которого сопоставима с размером атомов (аналог муравья), то оно «почувствует» неоднородность среды. Но на больших расстояниях кристалл для рентгеновского излучения изотропен.

Эти примеры приводят нас к достаточно общему положению.

*Любую информацию мы получаем «с точностью до агента».*

На самом деле даже не столь уж важно, «правдив» агент или нет; принцип остается в силе. Агентами могут быть любые источники информации, начиная от людей и рукописей, до приборов, участвующих в эксперименте. Возникает вопрос, а есть ли объективные агенты? Если есть, то кто или что это? Поскольку дело касается научных данных, то на постав-

ленный вопрос можно ответить утвердительно. Такие «агенты» существуют, и это **законы природы**. Именно они **являются объективными агентами**.

Данное утверждение проще всего выяснить следующим образом.

Давайте вспомним, сколько исходных положений (примем их за аксиомы), т.е. физических законов, нам нужно знать, чтобы решать школьные задачи по механике. Во-первых, это три закона Ньютона, во-вторых, три закона сохранения: закон сохранения механической энергии, закон сохранения импульса и закон сохранения момента импульса.

Закон сохранения энергии – суммарная величина потенциальной и кинетической энергии есть константа, т.е. сохраняется  $E = mgh + mv^2/2$ . Закон сохранения импульса – сохраняется величина  $\mathbf{P} = m\mathbf{v} = \text{const}$ . Закон сохранения момента импульса – сохраняется величина  $\mathbf{L} = [\mathbf{rP}] = \text{const}$ . ( $\mathbf{L}$  – это векторное произведение двух векторов  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{P}$ ).

Таким образом, при таком подходе в ньютоновском формализме всего шесть исходных положений – аксиом.

Существуют другие формализмы механики, например, формализм Ж. Лагранжа. В нем исходными являются всего две аксиомы.

Здесь мы специально не останавливаемся на их формулировке, так же как не приводим уравнений Лагранжа и вывода из них законов Ньютона и законов сохранения, поскольку это потребовало бы от нас чрезмерно математизировать изложение.

Приняв за основу всего лишь две аксиомы Лагранжа (вместо шести в ньютоновском формализме), мы, согласно аксиоме 2, должны получить либо принципиально более правильное представление, либо нечто совершенно новое в награду за использование меньшего количества «сущностей». Действительно, в формализме Лагранжа путем соответствующих математических преобразований можно получить не только законы Ньютона, но (и именно это и важно для нас) все три закона сохранения. Причем каждый из законов сохранения теперь является не аксиомой (как в формализме Ньютона), а **следствием** тех или иных свойств **времени или пространства**, а если точнее, то **следствием той или иной симметрии времени и пространства**. Конкретно: **закон сохранения энергии есть следствие однородности времени, закон сохранения импульса – следствие однородности пространства, закон сохранения момента импульса – следствие изотропности пространства**. Указанные три закона сохранения как раз и являются теми объективными «агентами», которые отвечают на вопросы об однородности или неоднородности времени и пространства и об изотропности последнего. То есть там, где закон сохранения механической энергии выполняется время течет однородно. Аналогично и относительно однородности пространства. Сохранение импульса – гарантия однородности, а момента импульса – изотропности пространства.

Таким образом, на примере перехода от формализма механики Ньютона к формализму Лагранжа, мы убедились, что использование меньшего количества сущностей привело нас к новым знаниям. Кроме того, даже на таком простейшем примере мы убедились, что свойства **симметрии** чрезвычайно важны для «осуществления» законов природы и, в частности, для сохранения тех или иных физических величин. В дальнейшем мы каждый раз специально будем останавливаться на том, что происходит с симметрией при осуществлении того или иного закона, ибо **симметрия – это тоже своеобразный язык природы**.

Следует пояснить хотя бы качественно понятие симметрии. **В том случае, когда состояние системы (это может быть материальный объект, процесс или уравнение) не меняется в результате какого-либо преобразования, которому она может быть подвергнута, говорят, что система обладает симметрией относительно данного преобразования**. В нашем кратком курсе мы не можем более подробно характеризовать различные виды симметрии, приведем лишь несколько примеров, важных для дальнейшего изложения.

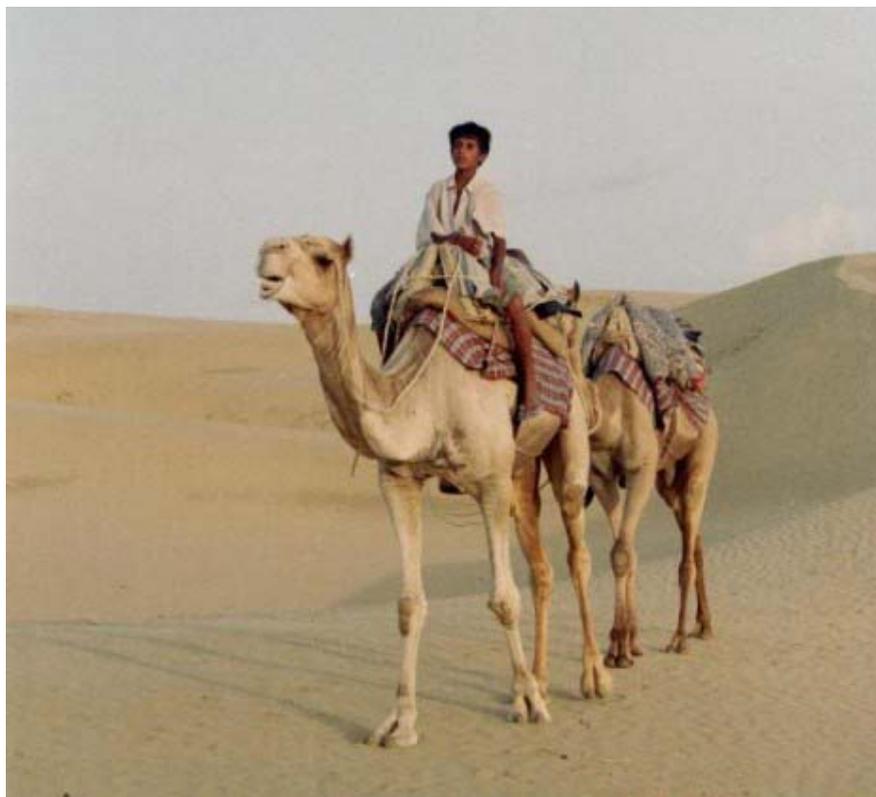
**Первый пример.** Мы интуитивно понимаем, что неоднородное пространство обладает более низкой симметрией по сравнению с однородным. Аналогично переход от изотропного пространства к неизотропному также сопровождается понижением симметрии.

**Второй пример.** Мы должны договориться, что хаотическое состояние, обладающее минимальным порядком, обладает более высокой симметрией, нежели упорядоченное. Действительно, представьте себе сосуд, разделенный подвижной перегородкой. В одной части сосуда какой-то газ. Резко вытаскиваем перегородку. В первый момент времени наша система упорядочена. В одной части газ, в другой – его нет. По прошествии времени газ распространяется на весь сосуд. Это второе состояние полностью неупорядоченное, максимально хаотическое и обладает более высокой симметрией по сравнению с первоначальным.

**Третий пример.** Есть две системы, в одной поровну винты с левой и правой резьбой, во второй системе, например, только с левой. Какая из систем обладает более высокой симметрией? Ответить легко, если представить мысленно, что у нас есть еще и третья система, в которой только правосторонние винтики. Тогда ясно, что первая система, в которой и тех, и других поровну, более высокосимметрична, чем каждая из двух других. Представленные примеры в дальнейшем будут нам очень нужны для объяснения чрезвычайно важных закономерностей.



Для муравья пространство пустыни неоднородно, но изотропно.



Для верблюда пространство пустыни однородно, но не изотропно.

Движенья нет, сказал мудрец брадатый.  
 Другой смолчал и стал пред ним ходить.  
 Сильнее бы не мог он возразить;  
 Хвалили все ответ замысловатый.  
 Но, господа, забавный случай сей  
 Другой на память мне приводит:  
 Ведь каждый день пред нами солнце ходит,  
 Однако ж прав упрямый Галилей.

*А.С. Пушкин*

#### Лекция 4. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КОНТИНУУМ КАК СЛЕДСТВИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ КОНСТАНТЫ – СКОРОСТИ СВЕТА

Перейдем теперь к не столь очевидным фактам. Вначале маленькая историческая справка. В 50-х годах XIX в. Д. Максвелл на основе неправильной модели получил четыре знаменитых уравнения, названных его именем. Уравнения Д. Максвелла прекрасно описывают все законы электромагнетизма и оптики, полученные ранее на основе многочисленных экспериментальных данных. То есть все законы электромагнетизма, известные ранее и рассматриваемые как аксиомы, могут быть получены путем соответствующих математических преобразований всего лишь из четырех уравнений (если рассматривается некоторая среда, то к ним добавляется еще одно, т.н. материальное уравнение). К чему же в данном случае приводит уменьшение «сущностей»? Чтобы ответить на этот вопрос, продолжим нашу историческую справку. Очень скоро физики заметили, что уравнения Максвелла не остаются неизменными при так называемых преобразованиях Галилея:

$$x = x' + v_0 t, \quad t = t', \quad (1)$$

здесь  $x$  – координата тела в неподвижной системе координат (например, координата Остапа Бендера, бегущего по движущемуся поезду относительно неподвижного наблюдателя, стоящего на перроне Жмеринского вокзала),  $x'$  – координата тела в движущейся системе координат (т.е. координата Остапа, «привязанная» к поезду, иными словами, номер вагона и положение на самом вагоне),  $v_0$  – скорость движущейся системы отсчета (в нашей задаче это скорость поезда в направлении оси  $x$ ). Соответственно, время  $t$  в неподвижной системе совпадает со временем  $t'$  в движущейся. Из приведенных формул легко получить ту неправильную формулу, которой мы пользовались при решении задачи о скорости тов. Бендера, бегущего на поезде «Жмеринка–Париж». Действительно, разделив первое уравнение на  $t$ , получим:

$$V = v' + v_0, \quad (2)$$

Для нашей задачи  $v'$  равна скорости Бендера  $v_B$ , а  $v_0$  – скорости поезда  $v_P$ .

Если уравнения Максвелла изменяются при «интуитивно очевидных» преобразованиях Галилея (ведь формула (2) считалась нами очевидной), то возникает вопрос. Каковы должны быть другие, «неочевидные», преобразования, чтобы уравнения Максвелла оставались неизменными. Соответственно, какая «неочевидная» формула для сложения скоростей получается из этих негалилеевых преобразований?

Пуанкаре получил эти преобразования (и назвал их в честь Лоренца преобразованиями Лоренца):

$$x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - v_0^2 / c^2}}, \quad t = \frac{t' + v_0 x' / c^2}{\sqrt{1 - v_0^2 / c^2}}. \quad (3)$$

В этих новых преобразованиях величина  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с – это скорость света в вакууме. Из преобразований Лоренца следует «неочевидная» формула для сложения скоростей:

$$V = \frac{v' + v_0}{1 + v'v_0 / c^2}. \quad (4)$$

Совершенно ясно, что если  $v_0 \ll c$ , то преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея, а «неочевидная» формула (4) – в «очевидную» формулу (2). Так что же все-таки истинно, «очевидное» (1) и (2) или «неочевидное» (3) и (4)? Оказалось, что преобразования Лоренца оставляют уравнения Максвелла неизменными, то есть именно они (а не преобразования Галилея) правильные с точки зрения электродинамики и оптики.

На первый взгляд, кажется, что преобразования Лоренца и следующий из них закон сложения скоростей абсурдны. В самом деле, ведь если нас интересует координата бегущего Остапа  $x$ , то непонятно, причем здесь оказывается скорость света в первой формуле (3)? Со временем еще хуже, согласно второй формуле (3), время не только зависит от того, движется наблюдатель или покоится, но оказывается, что еще и от его местоположения  $x$  и опять-таки от скорости света, что совсем уже непонятно. Непонятна и формула (4). Почему при решении такой простой кинематической задачи, как О. Бендер, бегущий по крыше поезда, следует учитывать скорость света?

На самом деле перечень «непонятностей» этим еще не исчерпывается. Из преобразований (3) Лоренц непосредственно получил еще два, на первый взгляд, совершенно «абсурдных» результата. Оказывается, что линейные размеры тела вдоль направления движения сокращаются по сравнению с теми, какие они для неподвижного тела, а время в движущейся системе замедляется:

$$\Delta x' < \Delta x, \quad \Delta t' < \Delta t. \quad (5)$$

Эти лоренцевские результаты (сокращение расстояния и замедление времени) являлись вопиющим противоречием представлениям о свойствах пространства и времени, сложившимся в науке к началу XX века. Однако никаких дальнейших концептуальных выводов сразу же сделано не было. Слишком сильно было *пристрастие* к парадигме Г. Галилея и И. Ньютона – *пространство и время являются абсолютными категориями, существуют сами по себе и не зависят от внешних обстоятельств*.

Теперь полезно упомянуть об одном анекдотичном факте. В конце XIX века тогда еще молодой человек М. Планк, будучи студентом, пришел к одному из своих профессоров за советом, чем ему заняться. Маститый профессор не советовал М. Планку заниматься теоретической физикой, так как считал, что в ней практически все фундаментальные проблемы решены. «Есть правда два маленьких облачка на чистом небосклоне теории. Одно из них, не совсем понятно, *что творится с измерением скорости света*, другое – не совсем ясно *задача с излучением абсолютно черного тела*».

Прошло совсем незначительное время, и два маленьких облачка породили ураганы. Один из них – специальная и общая теории относительности, второй, в создании которого основополагающую роль сыграл сам М. Планк, – квантовая теория. Ну да начнем по порядку.

«Непонятность» с измерением скорости света заключалась в следующем. Со времени экспериментов О. Френеля и Т. Юнга, когда впервые для света были установлены такие волновые явления, как интерференция и дифракция, было ясно, что свет обладает волновой природой. По представлениям XIX века, любой волновой процесс должен распространяться в какой-либо среде. Для световых волн такой средой считали некий мифический (как теперь мы знаем) эфир. Но вот что непонятно, в отличие от других сред, свойства которых понятны и относительно постоянны, эфир вел себя очень странно.

Для выяснения свойств эфира сначала А. Майкельсоном, а затем А. Майкельсоном совместно с Э. Морли в 1881–1887 гг. были проведены серия высокоточных экспериментов на специально сконструированном приборе – интерферометре Майкельсона. Схематически и в очень упрощенном виде (для нашей цели такое упрощение вполне допустимо) этот прибор изображен на рис. 1. Он состоит из четырех зеркал, два из которых попарно параллельны друг

другу. Суть эксперимента заключалась в том, что два параллельных зеркала устанавливались строго по земному меридиану, а два других – по параллели. Между обоими парами зеркал для измерения скорости света запускался световой зайчик. Вращение Земли никак не сказывается при движении света по меридиану, поэтому его скорость равна  $c$ . При движении по параллели должно вроде бы сказываться вращение Земли. При движении света с запада на восток направление скорости света  $c$  совпадает со скоростью вращения Земли  $v_3$ , поэтому измерение вроде бы должно давать величину  $c + v_3$ . Для скорости в обратном направлении, следуя этой логике, мы должны получить величину  $c - v_3$ , в полном соответствии с задачей движения Остапа на крыше поезда. Но, и именно это являлось «непонятностью», и в том, и в другом направлении, как и по меридиану, эксперимент давал одну и ту же величину итоговой скорости, равную  $c$ .

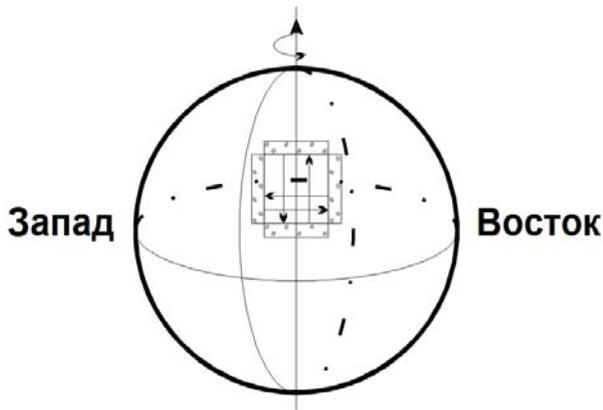


Рис. 1. Интерферометр Майкельсона схематически изображен на поверхности Земли. На свете, распространяющемся по меридиану, вращение Земли никак не сказывается. При распространении света по параллели вращение Земли опять-таки на нем никак не сказывается, несмотря на очевидный результат задачи о поезде «Жмеринка–Париж»

Чтобы не покушаться на «священную корову» – преобразования Галилея, а значит, и формулу (2), физики придумали для эфира целый ряд уникальных свойств («сущностей»), чтобы объяснить экспериментально наблюдаемую скорость. Вот вам и характерный пример игнорирования **аксиомы 1**. Пристрастие к преобразованиям Галилея было столь сильно, что никто не хотел всерьез обращать внимания, а значит, и анализировать с других позиций тот факт, что «неправильная формула» (4) при  $v' = c$ , или при  $v_0 = c$  всегда дает для величины результирующей скорости равенство  $V = c$ . Указанное несоответствие было впервые разрешено А. Пуанкаре в 1898 г. в работе «Измерение времени», а затем А. Эйнштейном в 1905 г. в работе «К электродинамике движущихся сред». Характерно, что в этой работе А. Эйнштейн не отрицал в явном виде существования эфира, он просто построил новую концептуальную теорию, а эфир со всеми его «сущностями» просто не упоминал. То есть просто выбросил «по умолчанию» идею эфира. В новой теории потребовалось всего лишь две новые аксиомы (опять переход от многих «сущностей» к меньшему их числу). Во-первых, так называемый принцип относительности, сформулированный впервые А. Пуанкаре в 1889 г. – *все физические явления при одинаковых начальных условиях протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета*. Во-вторых, аксиома о скорости распространения взаимодействия – *скорость света конечна и одинакова во всех инерциальных системах отсчета, не зависит от скорости движения источника и является предельной скоростью распространения любого сигнала (взаимодействия)*. Вторая аксиома фактически отражает соблюдение фундаментального физического принципа – принципа причинности. Обе аксиомы были положены А. Эйнштейном в основу специальной (в оригинале частной) теории относительности (СТО), приведшей к глубокому переосмыслению понятий пространства и времени.

Как уже было отмечено, до А. Эйнштейна ряд результатов СТО были получены А. Пуанкаре и Х. Лоренцем. А. Пуанкаре даже опубликовал свои результаты раньше Эйнштейна. Но работы Пуанкаре были опубликованы либо в философском журнале, либо в математических журналах. Наверное, поэтому на них не обратили внимания и впоследствии почти не ссылались. А. Эйнштейн же послал свою работу в известный немецкий журнал, и она сразу стала достоянием широкой научной общественности.

После выхода в свет основополагающей работы А. Эйнштейна (и с учетом результатов работ А. Пуанкаре и Х. Лоренца по исследованию симметрии уравнений Д. Максвелла), одним из его учителей, Г. Минковским в 1908 г. была предложена принципиально новая геометрическая интерпретация его результатов. В СТО был введен четырехмерный пространственно-временной интервал (идея, также впервые предложенная А. Пуанкаре):

$$R^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2. \quad (6)$$

Выражение (6) – аналог теоремы Пифагора в 4-мерном пространстве. Принципиально важно, что «временное слагаемое»  $c^2 t^2$  имеет другой знак, нежели пространственные координаты. Физически это означает, что скорость света есть максимально возможная скорость движения. Действительно, если превысить скорость света, то величина  $R^2$  станет отрицательной, т.е. «расстояние»  $R$  в этом пространстве окажется мнимым. Заметим здесь же, что эта геометрическая интерпретация первоначально очень не понравилась А. Эйнштейну и была им отвергнута, но спустя несколько лет он с радостью воспринял ее для достижения других, еще более интересных результатов.

Далее СТО строится исходя из требования, чтобы интервал (6) в согласии со второй аксиомой, при любых преобразованиях координат и времени оставался постоянным. Такие преобразования могут быть описаны как повороты четырехмерной системы координат. Это и есть *симметрия Лоренца–Пуанкаре*. В итоге, как мы знаем, получаются преобразования Х. Лоренца, где наглядно видно (см. второе соотношение формулы (3)), что время  $t$  и пространство  $x$ , не являются независимыми. Если бы скорость света была бесконечной, пространство и время существовали бы независимо друг от друга. Потребовался математический гений А. Пуанкаре и физическое осмысление его идей А. Эйнштейном, чтобы полностью осознать эту связь и понять, что ***пространство и время не существуют независимо друг от друга, они неразрывно связаны между собой посредством определенной симметрии***. Эта симметрия Лоренца–Пуанкаре – не просто абстрактная математика, она происходит в ***реальном*** мире, осуществляясь через ***движение***. Теперь ясно, что существование четырехмерного пространственно-временного континуума является следствием конечности скорости любого взаимодействия, которое ограничено сверху скоростью света.

Теперь понятно, что формула (2) принципиально неверна, поскольку она не учитывает пространственно-временную взаимосвязь. Кроме того, из нее не могут быть получены замечательные эффекты СТО, на первый взгляд, противоречащие здравому смыслу, такие как, например, сокращение расстояния и замедление времени. Одним из фундаментальных достижений СТО явилась знаменитая формула, связывающая массу и энергию:

$$E = mc^2. \quad (7)$$

Удивительно, но эту формулу независимо от А. Пуанкаре и за 15 лет до А. Эйнштейна получил О. Хевисайд. Впрочем, это далеко не единственный результат О. Хевисайда, намного опередивший свое время, который был получен им из неизвестных нам соображений.

Специально обратим внимание на то, что урок, преподнесенный Х. Лоренцем и А. Пуанкаре, состоит в том, что математическое исследование, в данном случае на основе анализа симметрии, может стать источником выдающихся достижений в науке. ***Даже если математическую симметрию невозможно представить наглядно, она может указать путь к выявлению новых фундаментальных принципов природы***. Ниже при изложении материала мы каждый раз специально будем останавливаться на значении той или иной симметрии, определяющей фундаментальные закономерности в неживой и живой природе.

**Н.В. для физиков и математиков**

Данный вид преобразований, по предложению А. Пуанкаре, назван в честь голландского физика Х.А. Лоренца, который в серии работ (1892, 1895, 1899 годы) опубликовал их приближённый вариант (с точностью до членов порядка  $v^2/c^2$ ). Позднее историки физики обнаружили, что эти преобразования были опубликованы независимо другими физиками:

1. 1887 год: В. Фогт, при исследовании эффекта Доплера [1], [2].

2. 1897 год: Дж. Лармор, его целью было обнаружить преобразования, относительно которых уравнения Максвелла инвариантны [3].

1. Miller (1981), 114–115.

2. Pais (1982), Кар. 6b.

3. Larmor J. On a Dynamical theory of the electric and luminiferous medium. Part 3. Relations with material media

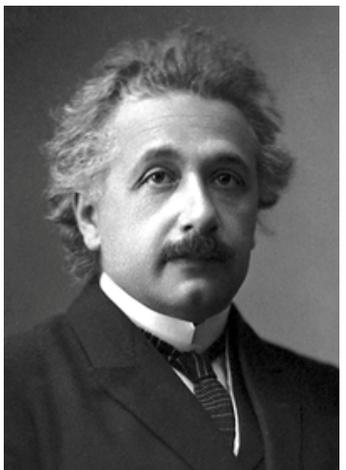
4. Пуанкаре А. О динамике электрона // Принцип относительности: сборник работ классиков релятивизма. – М.: Атомиздат, 1973. – С. 90–93, 118–160.



**Хендрик** (часто пишется Гендрик) **Антон Лоренц** (нидерл. Hendrik Antoon Lorentz; 18 июля 1853, Арнем, Нидерланды – 4 февраля 1928, Харлем, Нидерланды) – нидерландский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике (1902, совместно с Питером Зеemanом) и других наград, член Нидерландской королевской академии наук (1881), ряда иностранных академий наук и научных обществ.



**Герман Минковский** (нем. Hermann Minkowski; 22 июня 1864, Алексоты, Ковенская губерния, Российская империя – 12 января 1909, Гёттинген, Германская империя) – немецкий математик, разработавший геометрическую теорию чисел и геометрическую четырёхмерную модель теории относительности.



**Альберт Эйнштейн** (нем. Albert Einstein; 14 марта 1879, Ульм, Вюртемберг, Германия – 18 апреля 1955, Принстон, Нью-Джерси, США) – физик-теоретик, один из основателей современной теоретической физики, лауреат Нобелевской премии по физике 1921 года, общественный деятель – гуманист. Жил в Германии (1879–1893, 1914–1933), Швейцарии (1893–1914) и США (1933–1955). Почётный доктор около 20 ведущих университетов мира, член многих академий наук.

Блажен, кто посетил сей мир  
 В его минуты роковые!  
 Его призвали всеблагие  
 Как собеседника на пир.  
 Он их высоких зрелищ зритель,  
 Он в их совет допущен был –  
 И заживо, как небожитель,  
 Из чаши их бессмертье пил!

Ф.И. Тютчев

### Лекция 5. ГЕОМЕТРИЯ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ. ГРАВИТАЦИЯ КАК СЛЕДСТВИЕ ГЕОМЕТРИИ В ПАРАДИГМЕ ЭЙНШТЕЙНА

Важнейшим следствием СТО является замена абсолютных пространства и времени на новую физическую сущность – единое пространство-время Г. Минковского ( $r, t$ ). Однако и это пространство является, по существу, экстраполяцией классического трехмерного пространства на четыре измерения и имеет поэтому пассивный характер, т.е. не оказывает обратного воздействия на физические процессы, протекающие в нем.

Характерно, что пространство Г. Минковского евклидово, плоское (имеет нулевую кривизну). И это понятно, т.к. в СТО рассматриваются только инерциальные системы отсчета (движущиеся прямолинейно и равномерно друг относительно друга), на которые не действуют гравитационные силы. Именно поэтому пространство Г. Минковского – определенная физическая абстракция, т.к. от силы гравитации нельзя защититься никаким экраном.

Теперь мы переходим к менее известной истории – созданию А. Эйнштейном общей теории относительности (ОТО). Самым поразительным фактом, с точки зрения теории познания, здесь является, пожалуй, то, что *искал* А. Эйнштейн *одно*, а *нашел* совершенно *другое*. И если в создании СТО практически одновременно участвовал целый ряд исследователей, то в создании новой теории гравитации приняли участие, в основном двое – Д. Гильберт и А. Эйнштейн.

Для многих исследователей творчества А. Эйнштейна долгое время оставалось загадкой, каким образом он перешел от СТО к ОТО в промежутке между 1905 и 1916 гг. Эта загадка была прояснена А. Кастлером на конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А. Эйнштейна (Иерусалим, 1979 г.). Была, оказывается, промежуточная стадия, связанная *со счастливым случаем*. Малоизвестная и труднодоступная до сих пор работа была опубликована на немецком языке в «Ежеквартальном журнале судебной медицины и здравоохранения». Статья отражает поисковую фазу исследования и была посвящена юбилею друга А. Эйнштейна, врача по специальности.

В этой «судебно-медицинской» статье А. Эйнштейн анализирует поведение света в гравитационном поле. Использует при этом он все еще (что естественно в 1909 г.) ньютоновскую теорию гравитации. Поскольку ранее, в СТО, он обнаружил, что масса представляет собой новую компоненту энергии (формула (7)), то он полагал, что именно эта энергия связана с гравитацией, т.е. служит как бы гравитационным зарядом. Далее А. Эйнштейн приходит к выводу, что хотя луч света, несущий только импульс и угловой момент, не имеет массы, он тем не менее несет кинетическую энергию. Поэтому он должен падать в гравитационном поле, то есть притя-

гиваться и отклоняться (рис. 2). (Это только часть результата, который он получит в новой теории гравитации в 1916 г.) Отклонение, – рассуждал он дальше, – предполагает изменение скорости света, которая должна приобрести боковую компоненту, – поэтому свет должен ускоряться в своем движении к источнику гравитации и замедляться после того, как его минует. И вот здесь перед нами явный **случай необычного везения**.

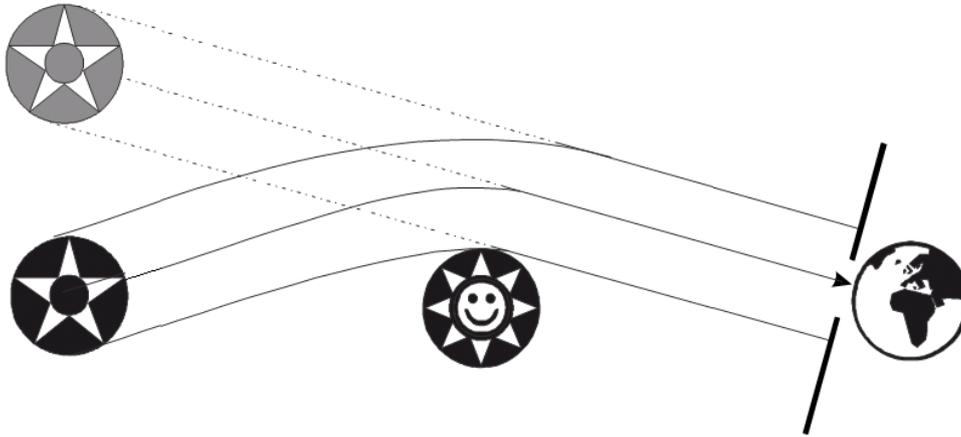


Рис. 2. Проходя вблизи Солнца, луч света от звезды заметно отклоняется из-за вызванного Солнцем искривления пространства. В итоге наблюдаемое в Жмеринке положение звезды на небе смещено относительно своего реального положения

Да, но как быть со «священной коровой» – постоянством скорости света? Дальше хуже, если свет все-таки отклоняется, то тогда возникает парадокс, связанный с пониманием энергии и массы. И вот именно теперь А. Эйнштейн с радостью воспринимает геометрическую интерпретацию Г. Минковского, которая единственная может быть решением проблемы гравитации и при этом сохранить предыдущую парадигму о предельной скорости любого взаимодействия. Не будучи очень сведущим в геометрии, А. Эйнштейн обращается к своему бывшему однокашнику по университету М. Гроссману для выяснения, существуют ли кроме Евклидовой другие, причем четырехмерные, геометрии в которых теорема Пифагора содержала бы непостоянные коэффициенты. Поскольку он понимает, что именно с непостоянными коэффициентами пространственно-временной континуум Г. Минковского будет описывать искривленное пространство-время, а именно это и требуется для изгибания луча света. М. Гроссман ответил утвердительно, указав на геометрии К. Гаусса и Г. Римана, представляющие геометрии искривленных пространств. С этого момента А. Эйнштейн сосредоточил свои усилия на создании новой геометрической теории гравитации – то есть совсем не на той цели, которую он поставил перед собой первоначально. Вот собственно и вся малоизвестная история о промежуточной работе между СТО и ОТО.

Поскольку для описания гравитационных сил надо отказаться от представления о плоском пространстве Евклида и перейти к какой-то геометрии искривленного пространства, надо чтобы она чем-то определялась. Следовательно, надо **отказаться от независимости свойств пространства и времени от распределения масс**.

Обобщая эти два соображения, А. Эйнштейн декларирует **новую парадигму – гравитационное поле является изменением геометрических свойств пространства-времени, которое, в свою очередь, определяются распределением масс**. Причем основные законы природы имеют для двух наблюдателей, движущихся произвольным образом и использующих произвольные непрерывно преобразуемые одна в другую системы координат, одинаковый вид. Или проще, **законы природы имеют одно и то же выражение, пригодное для любого наблюдателя**. Сформулированный таким образом общий принцип теории относительности содержит в себе в определенном смысле абсолютное знание. Кроме того, необхо-

димо потребовать, чтобы в отсутствие гравитации новая теория переходила в СТО. Это утверждение является частным случаем общего принципа развития науки – **принципа соответствия**, когда более общая теория включает в себя частную теорию как некоторый предельный случай.

Из приведенных выше трех аксиом-постулатов следует, что геометрия пространства-времени при наличии гравитации должна быть неевклидовой. Тогда из двух вариантов неевклидовой геометрии - гиперболической или эллиптической нужно выбрать один. Для первой геометрии сумма углов треугольника  $< 180^\circ$ , для второй  $> 180^\circ$  (см. слайды лекции 1). Для первой отношение длины окружности к диаметру  $> \pi$ , для второй  $< \pi$ . Поясним это на простейшем примере эллиптической геометрии Г. Римана.

Рассмотрим поверхность сферы (аналог плоскости в геометрии Евклида) см. рис. 3. «Прямыми линиями», т.е. кратчайшим расстоянием между двумя точками здесь являются дуги. Линии  $A$  и  $B$  (они перпендикулярны экватору) пересекаются в полюсе  $N$ ; таким образом, сумма углов сферического треугольника  $ABN$  будет  $> 180^\circ$ . В плоскости экватора отношение длины окружности к диаметру  $L/D = \pi$ . На сфере, для этой же окружности диаметром (наикратчайшее расстояние между противоположными точками) будет дуга  $CND$ , которая, естественно, больше, чем диаметр экваториального круга  $CD$ . Таким образом, для сферической геометрии отношение длины окружности к диаметру  $L/D < \pi$ .

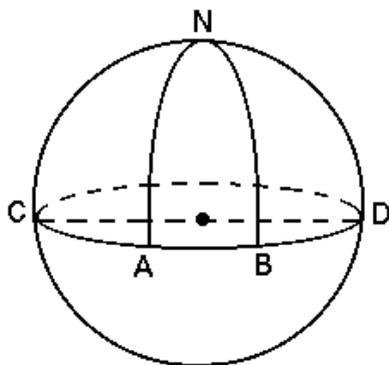


Рис. 3. Иллюстрация метрических соотношений геометрии Римана (сфера) и Евклида (плоскость)

Рассмотрим теперь нарушение евклидовой метрики в неинерциальной системе отсчета. Пусть окружность равномерно вращается относительно своего центра. При вращении все элементарные элементы длины окружности испытывают лоренцевское сокращение, диаметр при этом не меняется, таким образом, полная длина вращающейся окружности меньше, чем неподвижной. Следовательно, для вращающейся окружности (это неинерциальная система отсчета) отношение длины окружности к диаметру  $l/d < \pi$ , и значит, геометрия такого пространства эллиптическая. Аналогично и со временем. В ОТО указанные эффекты обусловлены распределением масс в пространстве, которые и определяют его геометрию. Оба эффекта нашли свое экспериментальное подтверждение. Первый – при искривлении траектории луча света, идущего от звезды и проходящего вблизи Солнца. В новой парадигме луч движется по своей естественной траектории – геодезической линии, являющейся в данном пространстве наикратчайшим расстоянием. Второй – луч света при распространении в пространстве будет вблизи массы менять частоту, т.е. число колебаний в секунду. Так, при удалении от массивного тела частота будет уменьшаться, а при приближении к нему – увеличиваться. Следовательно, **вблизи гравитирующей массы пространство искривляется, а время замедляется.**

**Вернемся** опять к рис. 3 и представим, что от звезды идет «трубка» света. Поскольку оба луча света в этой трубке (внешний и внутренний) приходят на Землю одновременно, а путь для внешнего луча длиннее, чем для внутреннего, то становится ясно, что скорость света для внешнего луча больше, чем для внутреннего. Таким образом, А. Эйнштейн пришел к выводу (только, на первый взгляд, противоречащему постулату о «постоянстве» скорости света), что **вблизи гравитирующих масс, скорость света меньше, чем вдали от них.** Другими словами, там, где пространство искривлено сильнее, там и скорость света меньше. Максимальная же скорость света соответствует, конечно, плоскому пространству с евклидовой геометрией.

Движение масс в пространстве также меняет его геометрию. Можно привести наглядный иллюстративный пример (рис. 4). Представьте себе, что на столе вы натянули, жестко закрепив на краях, резиновую скатерть и начертили на ней серию взаимно перпендикулярных линий (евклидово пространство). Теперь взяли кошку и засунули ее под скатерть. Там, где кошка, скатерть растянута, и вместо прямых вы видите взаимно пересекающиеся дуги. Если под скатертью окажется еще и мышка, то вы заметите, что растяжение, а значит, и искривление первоначальных прямых в том месте, где кошка – больше (это большая гравитирующая масса), нежели там, где мышка (меньшая масса). Дальнейшее изменение геометрических свойств пространства скатерти в процессе передвижения кошки и мышки представить несложно.

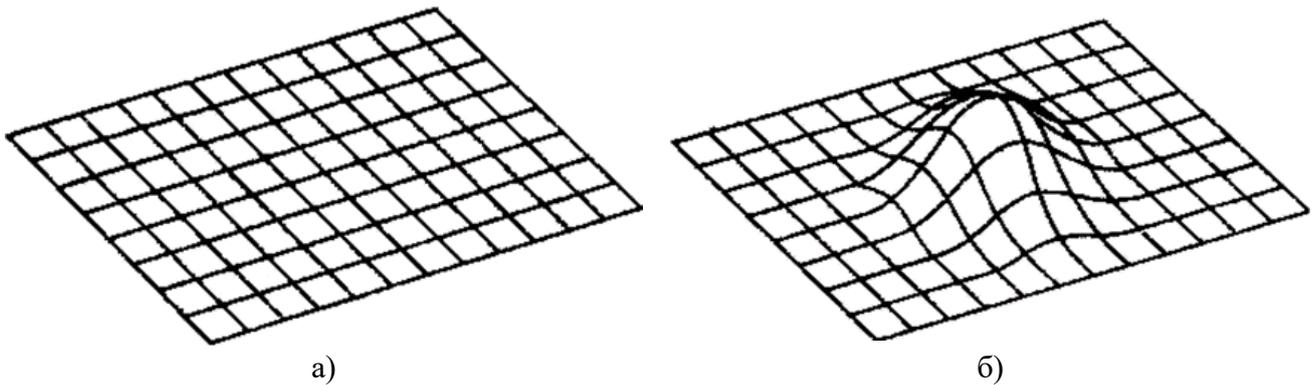


Рис. 4. Плоская и криволинейная поверхности: а) ни кошки, ни мышки – евклидова геометрия; б) мышка убежала, осталась только кошка (одна гравитирующая масса) – геометрия неевклидова

К сожалению, не все результаты ОТО можно представить так наглядно. Перечислим наиболее интересные и важные из них.

Мы только что говорили об уменьшении скорости света при искривлении пространства вблизи гравитирующей массы. Представьте теперь, что масса становится столь большой и искривление столь сильным, что скорость света в этой области пространства становится равной нулю (свет, который по определению всегда движется, вдруг перестает двигаться!). Если это возможно, то свет, залетевший в эту область пространства, из нее выйти не может, т.е. эта область пространства ничего не излучает, становится для наблюдателя черной. При этом образуются своеобразные объекты, получившие название черных дыр (black holes). Посмотрим на это с математической точки зрения.

Согласно ОТО, закон тяготения Ньютона должен быть изменен следующим образом:

$$F_{\text{Эйнст}} = \frac{F_{\text{Ньют}}}{\sqrt{1 - 2GM/Rc^2}}, \quad F_{\text{Ньют}} = \frac{GMm}{R^2}, \quad (8)$$

где  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ сек}^{-2} \text{ кг}^{-1}$  – константа гравитационного взаимодействия, впервые введенная И. Ньютоном в «Математических началах натуральной философии» в 1687 г.

Формула (8), строго говоря, справедлива лишь для так называемой метрики Шварцшильда. Отметим различие в двух законах тяготения. При стремлении  $R$  к нулю  $F_{\text{Ньют}}$  возрастает, но является константой при любом малом  $R$ . В отличие от этого  $F_{\text{Эйнст}}$  становится бесконечно большой при так называемом радиусе Шварцшильда:

$$R_{\text{Шв}} = \frac{2GM}{c^2}. \quad (9)$$

При таком радиусе образуется черная дыра. В области черной дыры пространственно-временной континуум столь искривлен, что не только сигнал или объект, попавший в нее, не может выйти наружу, а время как бы остановлено. Для Земли радиус Шварцшильда 0,4 см, для Солнца 3 км, в то время как их обычные радиусы  $6,4 \cdot 10^3$  км и  $7,7 \cdot 10^6$  км соответственно.

В 1929 г. Э. Хаббл экспериментально обнаружил существующее в настоящий момент расширение Вселенной. Скорость разлета галактик друг от друга (по Хаббл) пропорциональна расстоянию между ними:

$$v = HR, \quad (10)$$

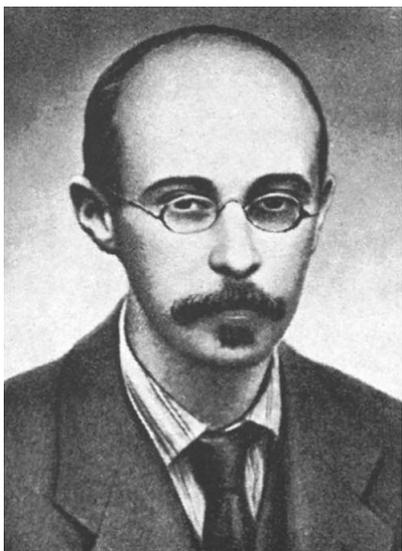
где  $H \approx (3 \div 5) 10^{-18} \text{ сек}^{-1}$  – постоянная Хаббла.

Это хаббловское расширение весьма примечательно. Несмотря на то, что Вселенная расширяется, центра расширения нет! Понять это можно на двухмерной модели. Представьте, что вы немного надули обычный воздушный шарик. Затем произвольно фломастером нанесли на его поверхности точки, после чего продолжим шарик надувать. Что мы видим? Поверхность шарика растягивается (аналог расширения пространства), и каждая из помеченных фломастером точек удаляется друг от друга. Таким образом, любую точку вы можете условно принять за центр расширения, от которой разбегаются все другие. Такое бесконечное число центров расширения, говорит о том, что на *поверхности сферы центра расширения нет*. Кроме того видно, что и сами точки при расширении поверхности «расползаются». Таким образом, при хаббловском расширении Вселенной расширяется, растягивается само пространство.

Замечательно, что семью годами раньше Э. Хаббла, в 1922 г., наш соотечественник А.А. Фридман, решая уравнения ОТО Эйнштейна и исходя из условия однородности Вселенной, пришел к выводу о возможности изменения границ Вселенной. Они могут как расширяться, так и сужаться, в зависимости от соотношения между средней плотностью Вселенной  $\rho_{cp}$  и неким критическим значением плотности  $\rho_{кр} = 3H^2/8\pi G$ . Если  $\rho_{кр} > \rho_{cp}$ , то Вселенная открытая и будет все время расширяться. Если же  $\rho_{кр} < \rho_{cp}$ , то Вселенная закрытая, и в какой-то момент расширение сменится сжатием. К настоящему времени мы не можем дать однозначного ответа, какое из неравенств между плотностями  $\rho_{кр}$  и  $\rho_{cp}$  осуществляется, так как часть вещества Вселенной находится, по-видимому, в «не излучаемом» состоянии (черные дыры, нейтронные звезды, странная материя). Поэтому на сегодняшний день оценка величин:  $\rho_{кр} \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3$  и  $\rho_{cp} \approx 10^{-30} \text{ г/см}^3$  – не дает однозначного выбора модели, а значит, и сценария развития Вселенной. Отметим, что этот сценарий определяется через универсальные константы  $G$  и  $H$ , поскольку именно от них зависит критическая плотность  $\rho_{кр}$ .



**Давид Гильберт** (нем. David Hilbert; 23 января 1862 – 14 февраля 1943) – немецкий математик-универсал, внёс значительный вклад в развитие многих областей математики. В 1910–1920-е годы (после смерти Анри Пуанкаре) был признанным мировым лидером математиков. Гильберт разработал широкий спектр фундаментальных идей во многих областях математики, в том числе теорию инвариантов и аксиоматику евклидовой геометрии. Он сформулировал теорию гильбертовых пространств, одну из основ современного функционального анализа.



**Алекса́ндр Алекса́ндрович Фри́дман** (4 (16) июня 1888, Санкт-Петербург – 16 сентября 1925, Ленинград) – выдающийся российский и советский математик, физик и геофизик, создатель теории нестационарной Вселенной.



**Э́двин Па́уэлл Хаббл** (англ. Edwin Powell Hubble; 20 ноября 1889, Маршфилд, штат Миссури – 28 сентября 1953, Сан-Марино, штат Калифорния) – один из наиболее влиятельных астрономов и космологов в XX веке, внесший решающий вклад в понимание структуры космоса. В 1914–1917 гг. работал в Йеркской обсерватории, с 1919 года – в обсерватории Маунт-Вилсон. Член Национальной академии наук в Вашингтоне с 1927 года.

### **Н.В. для физиков и математиков**

Наиболее известным вкладом Гильберта в физику является вывод основных уравнений общей теории относительности, проведённый им в ноябре 1915 г. практически одновременно с Эйнштейном. Фактически Гильберт первым получил правильные уравнения поля общей теории относительности, хотя опубликовал их позже. Кроме того, неоспоримо существенное влияние Гильберта на Эйнштейна в период их параллельной работы над выводом этих уравнений (оба находились в этот период в интенсивной переписке).

Независимо от вопроса о приоритете, Гильберт первым использовал при выводе этих уравнений вариационный метод, ставший впоследствии одним из основных в теоретической физике. Очевидно, это был первый в истории физики случай, когда неизвестные до этого уравнения фундаментальной теории были получены таким путём (по крайней мере, если говорить о подтвердившихся теориях).

Представляет интерес также следующий случай: в 1926 г. после создания матричного варианта квантовой механики Макс Борн и Вернер Гейзенберг решили проконсультироваться у Гильберта, существует ли область математики, в которой применялся бы подобный формализм. Гильберт ответил им, что с похожими матрицами он встречался, когда разбирал вопросы существования решений дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. Физикам показалось, что математик их не понял, и они решили не изучать далее этот вопрос. Менее чем через полгода Эрвин Шрёдингер создал волновую квантовую механику, основное уравнение которой – уравнение Шрёдингера, является уравнением второго порядка в частных производных, и доказал эквивалентность обоих подходов: старого матричного и нового волнового.

Жизнь как роспись стенная, тобой создана,  
Но картина нелепостей странных полна...

*Омар Хайям*

**Лекция 6. ВХОДИМ В МИКРОМИР.  
КОНСТАНТА ПЛАНКА И ВОЛНА ДЕ-БРОЙЛЯ.  
ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА. СПИН**

Все началось с доклада Макса Планка 14 февраля 1900 г. «Об излучательной способности черного тела», где им впервые была введена константа, определяющая величину минимального действия  $h = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж с. В чем же смысл этой фундаментальной величины? Дело в том, что в классической физике такие величины, как, например, импульс –  $p$ , энергия –  $E$ , действие (есть и такая величина, ее размерность энергия  $\times$  время), могут принимать любые, сколь угодно малые значения. Однако, как только мы «заходим в микромир», т.е. интересуемся объектами, размеры которых  $\sim 10^{-7}$  см, ситуация в корне меняется. Так, например, действие уже не может быть сколь угодно малым. Равным нулю – пожалуйста, но первое, его самое малое значение оказывается равным именно этой постоянной Планка. Следующее по величине значение действия будет  $2h$ , затем  $3h$  и т.д. В аналогичном положении оказываются и другие физические величины, например, энергия. Таким образом, оказывается, что дискретной является не только материя, но и ряд физических характеристик, описывающих ее.

Так как формула Планка сразу получила экспериментальное подтверждение, то идея дискретности энергии стала приобретать характер закона, что противоречило сложившемуся к началу XX века представлению, и поэтому требовало детального анализа. Анри Пуанкаре в 1911 г., проведя математическое исследование этого вопроса, показал, что гипотеза квантов (т.е. точная дискретность энергии резонаторов  $E = nh\nu$ ) – это единственная принципиальная гипотеза, которая приводит к закону Планка. Если же дискретность чуть-чуть нарушена, т.е.  $n$  не равно натуральному числу, то не будет и формулы Планка, и вообще целый класс задач по теории излучения просто нельзя решить.

Следующий революционный шаг был сделан французским физиком Луи де Бройлем в 1924 г. Этим потомком знатного французского рода де Броли было высказано фундаментальное для всей теории микромира соображение. Суть его в том, что любой свободной частице, обладающей импульсом  $p$ , можно сопоставить определенную длину волны (де Бройля):

$$\lambda = h/p. \quad (11)$$

Таким образом, движущиеся частицы (электроны, нейтроны, протоны и даже целые атомы) обладают волновой сущностью и могут давать такие чисто волновые эффекты как дифракция и интерференция. Опираясь на эту плодотворную идею де Бройля, Э. Шредингер написал волновое уравнение, являющееся фундаментом всей квантовой механики.

Характерно, что в результате решения уравнения Э. Шредингера – волновая  $\psi$ -функция – интерпретируется как плотность вероятности и не наблюдается явно. Но это теперь никого не смущает, поскольку на эксперименте наблюдается величина  $\psi\psi^*$  (квадрат модуля величины  $\psi$ ). Важно при этом следующее: величина  $\psi\psi^*$  дает распределение вероятности нахождения частицы в той или иной области пространства. Таким образом, в микромире принципиальной становится не всегда детерминистическая картина описания объектов, а вероятностная. Непосредственным следствием этого становится то, что при описании явлений в микромире у частиц не существует понятия траектории в обычном макроскопическом смысле. Это и есть фактически сформулированный в 1927 г. принцип неопределенности В. Гейзенберга. Согласно этому принципу, изменение импульса  $\Delta p_x$  (вдоль оси  $x$ ) и изменение координаты в этом же направлении  $\Delta x$  не определены с точностью до величины минимального действия – постоянной М. Планка, т.е.

$$\Delta p_x \Delta x > h. \quad (12)$$

Это означает, что ни координату, ни импульс точно измерить одновременно нельзя, а только с точностью до величины  $h$ . Действие этого принципа распространяется и на другие физические величины, которые не могут быть измерены одновременно. Таким образом, говоря, например, об орбитах электронов в атоме, мы должны понимать, что это всего лишь дань истории – планетарной модели атома. На самом же деле электроны, конечно же, не вращаются ни на каких орбитах. Они просто существуют в определенных квантовых состояниях. Да, одни из них чуть ближе локализованы к ядру, другие чуть дальше, но никаких орбит, т.е. фиксированных траекторий, просто нет.

Естественно, может возникнуть вопрос, как же все это объяснить, почему в микромире такая «нелепая» картина, может быть, мы что-то не до конца здесь понимаем? Нет, именно здесь мы все понимаем, и объяснять собственно ничего и не нужно, картина именно такая и не может быть другой в принципе. Почему? Самый простой ответ – «такова природа вещей», как говорил Лукреций Кар, и этой концепцией надо довольствоваться.

Поскольку в квантовом мире положение частицы в пространстве не может быть определено точно, не должно вызывать удивления, что подобная участь постигает и ее ориентацию по отношению к какому-либо направлению. Чем же тогда определяется ориентация в пространстве микромира?

Оказывается, что в квантовой физике каждой частице следует приписывать особый собственный («внутренний») механический момент, не связанный ни с ее перемещением в пространстве, ни с вращением – этот собственный момент называется спином. Так вот именно спин и определяет ориентацию частицы в пространстве. Здесь мы не имеем возможности рассказать, как это делается экспериментально, остановимся поэтому лишь на одном, но весьма показательном факте, определяемом спином такой известной всем частицы, как электрон. Этот факт связан с простым, на первый взгляд, даже тривиальным, понятием вращения.

В нашей повседневной (макроскопической) жизни при повороте вокруг оси на  $360^\circ$  все будет выглядеть в точности таким же, каким было до начала вращения, т.е. мы оказываемся в том же состоянии. Ну а как же с поворотом электрона на  $360^\circ$ ? Основываясь на здравом смысле, основанном на макроскопическом опыте, естественно ожидать, что и электрон вернется в исходное состояние. Однако это совершенно не так! Оказывается, из-за спина, чтобы вернуться в исходное состояние электрон надо повернуть еще раз на  $360^\circ$ . Таким образом, только при повороте электрона на два полных оборота, т.е. на  $720^\circ$ , он «воспринимает» мир тем же самым, как и до поворота. Следовательно, мы (макроскопические существа) в определенном смысле лишь наполовину воспринимаем мир, доступный электрону, имеющему спин. Рис. 5 дает простую иллюстрацию к сказанному. На нем изображена двойная проволочная петля с нанизанной на ней бусинкой. Издали мы не можем различить два витка, и нам кажется, что проволока просто свернута в окружность. Поэтому поворот бусинки на один оборот нами воспринимается как то же самое состояние, но на самом деле бусинка «знает», что это вовсе не так. И ей нужно сделать еще один оборот по петле, и только тогда она попадает в то же самое состояние, что и до начала вращения.

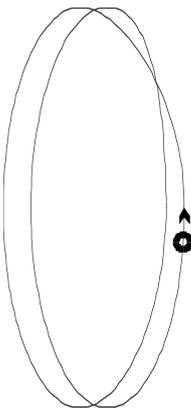


Рис. 5. Двойная петля с бусинкой на ней дает схематическое представление о свойствах спина электрона. При перемещении на один оборот бусинка не возвращается в исходное состояние и требуется еще один поворот, чтобы она оказалась в исходном состоянии

Это странное, на первый взгляд, «двойственное» представление о мире, присущее электрону и другим элементарным частицам (частицам микромира), является фундаментальным свойством природы. Такова опять-таки природа вещей.

Наличие у электрона полуполого спина, равного  $\hbar/2$ , приводит к тому, что для электрона возможны лишь две взаимно противоположные ориентации спина. Отсюда следуют чрезвычайно важные последствия. Приведем только два примера. Так, например, создаваемое спином электрона магнитное поле вдвое больше магнитного поля, создаваемого просто вращающимся заряженным шариком. Второй пример. В одном и том же квантовом состоянии (например, для атома водорода это состояние определяется тремя характерными квантовыми числами: энергетическим, орбитальным и магнитным, принимающими дискретные значения в долях константы  $\hbar$ ) может находиться только один электрон. Это утверждение называется принципом запрета В. Паули. Второй электрон в том же состоянии обязан поменять ориентацию спина на противоположную, т.е. быть равным  $-\hbar/2$ .

Именно этот принцип запрета приводит к специфическим закономерностям в заполнении электронами квантовых состояний в атоме, и именно этим обуславливается природа периодичности изменения свойств элементов в таблице Д.И. Менделеева. Отметим, что если бы спин электрона был бы полуполом, но имеющим другое значение, например,  $3/2\hbar$  или  $5/2\hbar$ , то таблица Д.И. Менделеева выглядела бы совершенно иначе, а значит, химия была бы абсолютно другой. В этом случае не очевидно, могла ли возникнуть и существовать жизнь.

С другой стороны, если бы спин электрона был бы кратен целому числу  $\hbar$ , то любое количество электронов находилось бы в одном состоянии, т.е. был бы лишь один тип атомов. Эти атомы не могли бы образовывать молекулы, а значит, не было бы химии, и, как следствие, никакой жизни.

1. Брoльи́, де Брoльи́ (Broglie или Broglio) – старинная французская аристократическая семья пьемонтского происхождения. Прослеживается до Умбeрто Брoглиа (XIII век) Потомок Умберто в 10-м колeне – генерал Франсуа́-Марй (1611, Турин – 1656), граф де Брoльи – переселился во Францию в 1643 году. Принимал участие в Тридцатилетней войне, погиб при осаде Валанса, посмертно произведён в маршалы Франции. Его сын Виктор-Морис (1646, Турин – 1727) принимал видное участие в войнах Людовика XIV, маршал Франции с 1724 года. Франсуа́-Марй (1671, Париж – 1745), сын Виктора-Мориса, с 1689 года принимал доблестное участие во всех походах в Нидерланды, Германию и Италию и получил в 1734 году звание маршала Франции, а в 1742 году – титул 1-го герцога де Брoльи. С 1724 года в течение ряда лет служил послом Франции в Лондоне. Был женат на Терезе де Гранвиль (Therese de Granville) из богатой семьи судовладельцев. Наш Луи де Брoльи́-Луи Виктор Пьер Раймон, был уже 7-й герцог Брoльи. Кстати, лицейский друг Пушкина Сильверий Францевич Брoглио дальний родственник французских герцогов де Брoльи. Поступил в Лицей в 1811 году. Был одним «из последних по успехам учеников и первый по шалостям». Носил (хотя и неохотно) мальтийский крест, право на который имели мужчины из рода Брoльи. В 1817 году окончил Лицей. После лицея уехал на родину в Италию. С 4 сентября 1817 года он стал служить в чине поручика в полку Монферата пьемонтской армии, где уже находился его старший брат Фредерик Доминик. Оба брата примкнули к освободительному движению, направленному против королевской власти. Восстание 1821 года было подавлено. По постановлению королевского суда Сильверий был лишён чинов, орденов, имущества и изгнан за пределы Пьемонта навечно. Погиб в 1824 году в Греции, где шла освободительная война против турецкого ига.

## 2. 19 ОКТЯБРЯ

Роняет лес багряный свой убор,  
Сребрит мороз увянувшее поле,  
Проглянет день как будто поневоле  
И скроется за край окружных гор.  
Пылай, камин, в моей пустынной келье;  
А ты, вино, осенней стужи друг,

Пролей мне в грудь отрадное похмелье,  
Минутное забвенье горьких мук.  
Печален я: со мною друга нет,  
С кем долгую запил бы я разлуку,  
Кому бы мог пожать от сердца руку  
И пожелать веселых много лет.  
Я пью один; вотще воображенье  
Вокруг меня товарищей зовет;  
Знакомое не слышно приближенье,  
И милого душа моя не ждет.

Я пью один, и на берегах Невы  
Меня друзья сегодня именуют...  
Но многие ль и там из вас пируют?  
Еще кого не досчитались вы?  
Кто изменил пленительной привычке?  
Кого от вас увлек холодный свет?  
Чей глас умолк на братской перекличке?  
Кто не пришел? Кого меж вами нет?

Он не пришел, кудрявый наш певец,  
С огнем в очах, с гитарой сладкогласной:  
Под миртами Италии прекрасной  
Он тихо спит, и дружеский резец  
Не начертал над русскою могилой  
Слов несколько на языке родном,  
Чтоб некогда нашел привет унылый  
Сын севера, бродя в краю чужом.  
Сидишь ли ты в кругу своих друзей,  
Чужих небес любовник беспокойный?  
Иль снова ты проходишь тропик знойный  
И вечный лед полунощных морей?  
Счастливым путь!.. С лицейского порога  
Ты на корабль перешагнул шутя,  
И с той поры в морях твоя дорога,  
О волн и бурь любимое дитя!

Ты сохранил в блуждающей судьбе  
Прекрасных лет первоначальны нравы:  
Лицейский шум, лицейские забавы  
Средь бурных волн мечталися тебе;  
Ты простирал из-за моря нам руку,  
Ты нас одних в молодой душе носил  
И повторял: «На долгую разлуку  
Нас тайный рок, быть может, осудил!»

Друзья мои, прекрасен наш союз!  
Он, как душа, неразделим и вечен –  
Неколебим, свободен и беспечен,  
Срастался он под сенью дружных муз.  
Куда бы нас ни бросила судьбина  
И счастье куда б ни повело,  
Всё те же мы: нам целый мир чужбина;  
Отечество нам Царское Село.

Из края в край преследуем грозой,  
Запутанный в сетях судьбы суровой,  
Я с трепетом на лоно дружбы новой,  
Устав, приник ласкающей главой...  
С мольбой моей печальной и мятежной,  
С доверчивой надеждой первых лет,  
Друзьям иным душой предался нежной;  
Но горек был небратский их привет.

И ныне здесь, в забытой сей глуши,  
В обители пустынных вьюг и хлада,  
Мне сладкая готовилась отрада:  
Троих из вас, друзей моей души,  
Здесь обнял я. Поэта дом опальный,  
О Пущин мой, ты первый посетил;  
Ты усладил изгнанья день печальный,  
Ты в день его Лицея превратил.  
Ты, Горчаков, счастливец с первых дней,  
Хвала тебе – фортуны блеск холодный  
Не изменил души твоей свободной:  
Всё тот же ты для чести и друзей.  
Нам разный путь судьбой назначен строгой;  
Ступая в жизнь, мы быстро разошлись:  
Но невзначай проселочной дорогой  
Мы встретились и братски обнялись.

Когда постиг меня судьбины гнев,  
Для всех чужой, как сирота бездомный,  
Под бурею главой поник я томной  
И ждал тебя, вещун пермесских дев,  
И ты пришел, сын лени вдохновенный,  
О Дельвиг мой: твой голос пробудил  
Сердечный жар, так долго усыпленный,  
И бодро я судьбу благословил.

С младенчества дух песен в нас горел,  
И дивное волненье мы познали;  
С младенчества две музы к нам летали,  
И сладок был их лаской наш удел:  
Но я любил уже рукоплесканья,  
Ты, гордый, пел для муз и для души;  
Свой дар, как жизнь, я тратил без вниманья,  
Ты гений свой воспитывал в тиши.

**Служенье муз не терпит суеты;  
Прекрасное должно быть величаво:**  
Но юность нам советует лукаво,  
И шумные нас радуют мечты...  
Опомнимся – но поздно! и уныло  
Глядим назад, следов не видя там.  
Скажи, Вильгельм, не то ль и с нами было,  
Мой брат родной по музе, по судьбам?  
Пора, пора! душевных наших мук  
Не стоит мир; оставим заблужденья!

Сокроем жизнь под сень уединенья!  
Я жду тебя, мой запоздалый друг –  
Приди; огнем волшебного рассказа  
Сердечные преданья оживи;  
Поговорим о бурных днях Кавказа,  
О Шиллере, о славе, о любви.  
Пора и мне... пируйте, о друзья!  
Предчувствую отрадное свиданье;  
Запомните ж поэта предсказанье:  
Промчится год, и с вами снова я,  
Исполнится завет моих мечтаний;  
Промчится год, и я явлюся к вам!  
О, сколько слез и сколько восклицаний,  
И сколько чаш, подъятых к небесам!

И первую полней, друзья, полней!  
И всю до дна в честь нашего союза!  
Благослови, ликующая муза,  
Благослови: да здравствует Лицей!  
Наставникам, хранившим юность нашу,  
Всем честию, и мертвым и живым,  
К устам подъяв признательную чашу,  
Не помня зла, за благо воздадим.

Полней, полней! и, сердцем возгоря,  
Опять до дна, до капли выпивайте!  
Но за кого? о други, угадайте...  
Ура, наш царь! так! выпьем за царя.  
Он человек! им властвует мгновенье.  
Он раб молвы, сомнений и страстей;  
Простим ему неправое гоненье:  
Он взял Париж, он основал Лицей.

Пируйте же, пока еще мы тут!  
Увы, наш круг час от часу редееет;  
Кто в гробе спит, кто дальний сиротеет;  
Судьба глядит, мы вянем; дни бегут;  
Невидимо склоняясь и хладея,  
Мы близимся к началу своему...  
Кому ж из нас под старость день Лицея  
Торжествовать придется одному?

Несчастный друг! среди новых поколений  
Докучный гость и лишний, и чужой,  
Он вспомнит нас и дни соединений,  
Закрыв глаза дрожащею рукой...  
Пускай же он с отрадой хоть печальной  
Тогда сей день за чашей проведет,  
Как ныне я, затворник ваш опальный,  
Его провел без горя и забот.

**Примечания**

1. 19 ОКТЯБРЯ. Напечатано в «Северных цветах» на 1827 год с заменой всех имен звездочками (см. письмо Бенкендорфу от 22 марта 1827 г.). Кроме того, по цензурным условиям пропущено восемь стихов, начиная с «Полней, полней! и, сердцем возгоря».

В рукописи имеется несколько строф, отброшенных или замененных Пушкиным (см. «Из ранних редакций»).

2. 19 октября (1811 года) – день открытия Лицея. Эту годовщину лицеисты ежегодно справляли.

3. «Он не пришел, кудрявый наш певец». – Н.А. Корсаков. Он умер в Италии в 1820 г.

4. «Чужих небес любовник беспокойный». – Ф.Ф. Матюшкин (1799–1872), моряк. С 1817 по 1819 гг. плывал к берегам Камчатки; с 1820 по 1824 г. принимал участие в экспедиции для описания берегов Ледовитого океана; в августе 1825 г. отправился в кругосветное плавание.

5. «На долгую разлуку...» – Цитата из прощальной песни Дельвига, сочиненной по случаю окончания Лицея:

Судьба на вечную разлуку,  
Быть может, съединила нас.

6. «О Пущин мой, ты первый посетил». – Пущин был в Михайловском у Пушкина 11 января 1825 г.

7. «Ты, Горчаков...» – А.М. Горчаков виделся с Пушкиным в сентябре 1825 г., когда проездом он останавливался у своего родственника в селе Лямонове, недалеко от Михайловского.

8. «О Дельвиг мой...» – А. Дельвиг гостил у Пушкина в Михайловском в апреле 1825 г.

9. «Скажи, Вильгельм...» – В. Кюхельбекер. В 1821–1822 гг. он служил на Кавказе.

Из ранних редакций

Пропущенные и замененные строфы рукописной редакции:

Эпиграф: Nunc est bibendum. Horatius. (Теперь надо пить. Гораций. (Латин.))

1

После стиха «Минутное забвенье горьких мук»:

Товарищи! сегодня праздник наш.  
Заветный срок! сегодня там, далече,  
На пир любви, на сладостное вече  
Стеклися вы при звоне мирных чаш.  
Вы собрались, мгновенно молодея,  
Усталый дух в минувшем обновить,  
Поговорить на языке Лицея

И с жизнью вновь свободно пошалить {Вся эта строфа зачеркнута в рукописи}.

2

На пир любви душой стремлюся я...  
Вот вижу вас, вот милых обнимаю.  
Я праздника порядок учреждаю...  
Я вдохновен, о, слушайте, друзья:  
Чтоб тридцать мест нас ожидали снова!  
Садитесь, как вы садились там,  
Когда места в сени святого крова  
Отличие предписывало нам.

3

Спартанскою душой пленяя нас,  
Воспитанный суровою Минервой,  
Пускай опять Вольховский сядет первый,  
**Последним я, иль Брольо, иль Данзас.**  
Но многие не явятся меж нами...  
Пускай, друзья, пустеет место их...  
Они придут; конечно, над водами  
Иль на холме под сенью лип густых

4

Они твердят томительный урок,  
Или роман украдкой пожирают,  
Или стихи влюбленные слагают,  
И позабыт полуденный звонок.  
Они придут! – за праздные приборы  
Усядутся; напоят свой стакан,  
В нестройный хор сольются разговоры,  
И загремит веселый наш пеан.

13

После стиха «Ты в день его Лицея превратил»:  
Что ж я тебя не встретил тут же с ним,  
Ты, наш казак, и пылкий и незлобный,  
Зачем и ты моей сени надгробной  
Не озарил присутствием своим?  
Мы вспомнили б, как Вакху приносили  
Безмолвную мы жертву в первый раз,  
Как мы впервой все трое полюбили,  
Наперсники, товарищи проказ...  
Первая редакция этой строфы:  
Мы вспомнили, как Вакху в первый раз  
Безмолвную мы жертву приносили,  
Мы вспомнили, как мы впервой любили,  
Наперсники, товарищи проказ...  
И всё прошло, проказы, заблужденья,..  
Ты, освятив тобой избранный сан,  
Ему в очах общественного мненья  
Завоевал почтение граждан.  
В строфе «И первую полней, друзья, полней» – четыре последних стиха:  
Златые дни, уроки и забавы,  
И черный стол, и бунты вечеров,  
И наш словарь, и плески мирной славы,  
И критики лицейских мудрецов!  
После стиха «Он взял Париж, он основал Лицей»:  
Куницыну дань сердца и вина!  
Он создал нас, он воспитал наш пламень,  
Поставлен им краеугольный камень,  
Им чистая лампада возжена...  
Наставникам, хранившим юность нашу,  
Всем честию – и мертвым и живым,  
К устам подъяв признательную чашу,  
Не помня зла, за благо воздадим.

«Чтоб тридцать мест нас ожидали снова!» – На первый курс Лицея было принято 30 учеников. Один вскоре был исключен, и Лицей окончили 29.

Брольо и Данзас были постоянно в числе последних учеников. Пушкин окончил лицей 19-м.

Веселый наш пеан – стихи Илличевского «Лето знойно, дочь природы». Этот «пеан» исполнялся на каждой годовщине.

Наш казак - Малиновский, сын первого директора Лицея.

«Мы вспомнили б, как Вакху приносили...» – История с «гогель-могелем». См. «Мы недавно от печали».

«Как мы впервой все трое полюбили». – Пущин, Пушкин и Малиновский в Лицее влюбились в сестру их товарища Бакунину.

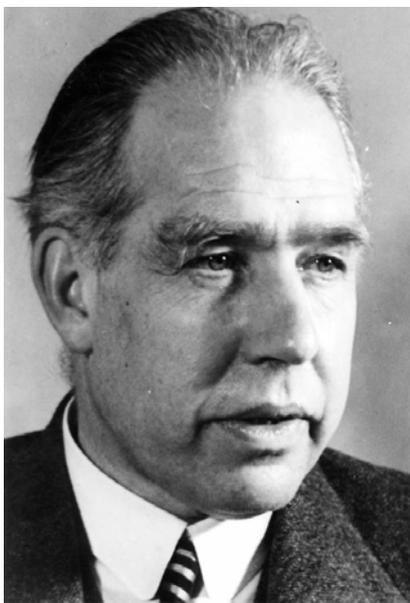
«Ты, осятив тобой избранный сан». – И. Пущин по окончании Лицея поступил в гвардию, но затем оставил военную службу и занял место судьи в Уголовном департаменте Московского надворного суда.

«И наш словарь...» – словарь политических и философских понятий в цитатах из разных писателей, составившийся в Лицее В. Кюхельбекером.

«И критики лицейских мудрецов». – «Лицейский мудрец» – рукописный журнал лицеистов первого выпуска.

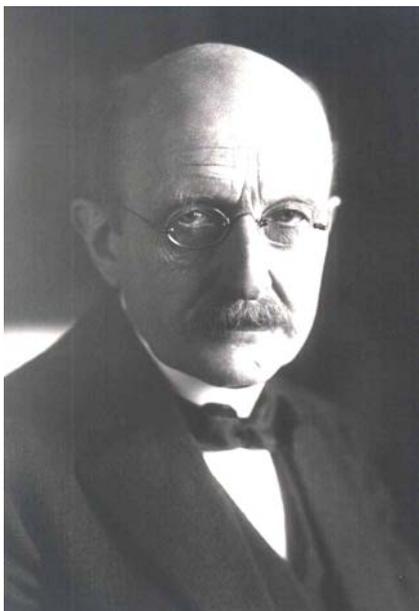
Куницын – любимый профессор Лицея; читал курс естественного права. В 1821 г. этот курс как вредный был запрещен правительством.

Источник: <http://pushkin.niv.ru/pushkin/stihi/stih-443.htm>.



**Нильс Хенрик Давид Бор** (дат. Niels Henrik David Bohr; 7 октября 1885, Копенгаген – 18 ноября 1962, Копенгаген) – датский физик-теоретик и общественный деятель, один из создателей современной физики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1922). Член Датского королевского общества (1917) и его президент с 1939 года. Был членом более чем 20 академий наук мира, в том числе иностранным почётным членом Академии наук СССР (1929; членом-корреспондентом – с 1924).

Бор известен как создатель первой квантовой теории атома и активный участник разработки основ квантовой механики. Он также внёс значительный вклад в развитие теории атомного ядра и ядерных реакций, процессов взаимодействия элементарных частиц со средой.



**Макс Карл Эрнст Людвиг Планк** (нем. Max Karl Ernst Ludwig Planck; 23 апреля 1858, Киль – 4 октября 1947, Гёттинген) – немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1918) и других наград, член Прусской академии наук (1894), ряда иностранных научных обществ и академий наук. На протяжении многих лет один из руководителей немецкой науки.

Научные труды Планка посвящены термодинамике, теории теплового излучения, квантовой теории, специальной теории относительности, оптике. Планк получил закон распределения энергии в спектре абсолютно чёрного тела (формула Планка) и обосновал этот закон, введя представление о квантах энергии и кванте действия. Это достижение положило начало развитию квантовой физики.



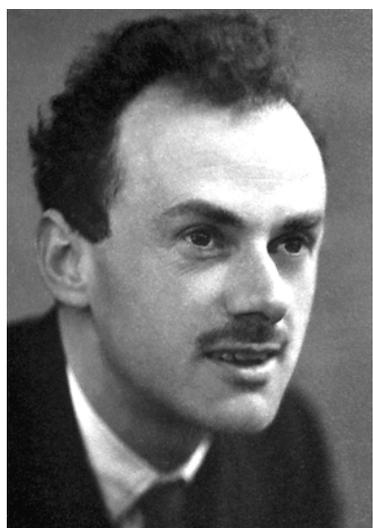
**Вернер Карл Гейзенберг** (нем. Werner Karl Heisenberg; 5 декабря 1901, Вюрцбург – 1 февраля 1976, Мюнхен) – немецкий физик-теоретик, один из создателей квантовой механики, лауреат Нобелевской премии по физике (1932), член ряда академий и научных обществ мира.

Гейзенберг является автором ряда фундаментальных результатов в квантовой теории: он заложил основы матричной механики, сформулировал соотношение неопределённостей. В дальнейшем активно участвовал в развитии квантовой электродинамики (теория Гейзенберга–Паули) и квантовой теории поля (теория S-матрицы), в последние десятилетия жизни предпринимал попытки создания единой теории поля.



**Эрвин Рудольф Йозеф Александр Шрёдингер** (нем. Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger; 12 августа 1887, Вена – 4 января 1961, там же) – австрийский физик-теоретик, один из создателей квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1933). Член ряда академий наук мира, в том числе иностранный член Академии наук СССР (1934).

Шрёдингеру принадлежит ряд фундаментальных результатов в области квантовой теории, которые легли в основу волновой механики: он сформулировал волновые уравнения (стационарное и зависящее от времени уравнения Шрёдингера), показал тождественность развитого им формализма и матричной механики, разработал волномеханическую теорию возмущений, получил решения ряда конкретных задач. Шрёдингер предложил оригинальную трактовку физического смысла волновой функции; в последующие годы неоднократно подвергал критике общепринятую копенгагенскую интерпретацию квантовой механики (парадокс «кота Шрёдингера» и прочее). В книге «Что такое жизнь?» Шрёдингер обратился к проблемам генетики, взглянув на феномен жизни с точки зрения физики. Он уделял большое внимание философским аспектам науки, античным и восточным философским концепциям, вопросам этики и религии.



**Поль Адриен Морис Дирак** (фр. Paul Adrien Maurice Dirac; 8 августа 1902, Бристоль – 20 октября 1984, Таллахасси) – английский физик-теоретик, один из создателей квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике 1933 года (совместно с Эрвином Шрёдингером). Член Лондонского королевского общества (1930), а также ряда академий наук мира, в том числе иностранный член Академии наук СССР (1931), Национальной академии наук США (1949) и Папской академии наук (1961).

Работы Дирака посвящены квантовой физике, теории элементарных частиц, общей теории относительности. Он является автором основополагающих трудов по квантовой механике (общая теория преобразований), квантовой электродинамике (метод вторичного квантования и многовременной формализм) и квантовой теории поля (квантование систем со связями). Предложенное им релятивистское уравнение электрона позволило естественным образом объяснить спин и ввести представление об античастицах.

Природа – Сфинкс. И тем она верней  
Своим искусом губит человека,  
Что может статься, никакой от века  
Загадки нет и не было у ней.

Ф.И. Тютчев

## Лекция 7. ЧЕТЫРЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ГРАВИТАЦИОННОЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ, СЛАБОЕ И СИЛЬНОЕ

Путешествуя по микромиру, мы сталкиваемся с совершенно новыми понятиями, отсутствующими в макромире. Так, например, одного лишь понятия «электрический заряд» уже недостаточно.

Все элементарные частицы вещества делятся на лептоны («легкие») и адроны, которые, в свою очередь, делятся на мезоны («средние») и барионы («тяжелые»). Лептонов всего шесть, это электрон, мюон, тау-лептон и соответствующие им нейтрино. Лептоны не имеют внутренней структуры, они самые «элементарные» частицы.

Напротив, адронов намного больше, несколько сотен. Кроме того, у них особые свойства, отсутствующие у лептонов. Его называют «барионный заряд». Существует закон сохранения барионного заряда, благодаря чему электрон никогда «не соприкасается» с протоном так, чтобы «проскочила искра», и их заряды уничтожились, что обычно бывает в макромире при контакте двух противоположно заряженных шариков. Появляются и другие понятия, связанные с особым устройством и появлением элементарных частиц: «странность», «изотопический спин», а для кварков – «аромат» и «цвет». Естественно, что к реальному цвету этот признак не имеет никакого отношения, также как «аромат» к запаху. Просто надо было как-то назвать эти новые свойства, их так вот и назвали, впрочем, как и сами *кварки*. Появлением этого понятия мы обязаны М. Гелл–Манну, который в 1963 г. решил провести систематизацию существующих к тому времени элементарных частиц (независимо это же сделал Д. Цвейг в 1964 г.). Так вот, для этой систематизации и сведения огромного числа элементарных частиц к более элементарным, но меньшим числам, М. Гелл–Манн придумал три гипотетические частицы с дробной величиной заряда электрона ( $2/3$  и  $1/3$ ). Название он позаимствовал из романа Д. Джойса «Поминки по Финнегану», где одному из персонажей снится фантастический сон, в котором летают чайки и кричат: «Three quarks for Muster Mark!» (обычно переводится как «Три кварка для Мастера/Мюстера Марка!»). Позднее пришлось ввести еще три кварка, так что теперь в так называемой «стандартной модели» их всего шесть. Вернее, у кварков есть шесть различных квантовых чисел – ароматов со своими названиями: «верхний», «нижний», «странный», «очарованный», «красивый» и «истинный» (все это кальки от английских слов: up, down, strange, charm, beauty, truth); у каждого «аромата» есть еще три цвета: красный, зеленый и синий. Естественно, у каждого кварка (как и у всякой другой элементарной частицы) есть еще антикварк, т.е. тождественная частица, но с противоположным по знаку электрическим зарядом. При встрече частицы и античастицы они взаимно уничтожаются (так называемая *аннигиляция*), а их пропавшая суммарная масса выделяется в виде энергии излучения, согласно формуле (7).

Теперь вы можете посчитать, сколь элементарной оказалась первоначальная гипотеза М. Гелл-Мана и Д. Цвейга. Но дело собственно даже не в этом, а в том, что ни в одном эксперименте *сами кварки с их дробным зарядом непосредственно не регистрируются*. Экспериментально подтверждаются лишь выводы из теории кварков, т.е. если они есть, то в такой-то ядерной реакции должно быть *то-то и то-то*. И вот это *то-то и то-то* на эксперименте и наблюдают. Таким образом, пока *существование кварков подтверждается не непосредственно, а лишь опосредованно*, и мы должны учесть это при применении аксиомы 3, дабы наука была жива и развивалась.



**Мэрри Гелл-Мэн** (Гельман; англ. Murray Gell-Mann; род. 15 сентября 1929, Нью-Йорк, США) – американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике за 1969 год «за открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий».

Представьте, что вы встретились с представителями внеземной цивилизации и вам надо в кратчайший срок показать им, что вы не только мыслящие существа, но и что наша земная цивилизация достигла определенных успехов в постижении природы. Ясно, что вы должны дать такую информацию и таким способом, чтобы она была понятна любым мыслящим существам, находящимся примерно на нашем уровне развития. Обучать их нашему языку бесперспективно, слишком долго. Можно, конечно, нарисовать «пифагоровы штаны», но ведь этот результат знали уже две с половиной тысячи лет назад. Это хороший, но очень невысокий уровень. Можно познакомить их с нашей десятиричной системой счисления, после чего написать какие-либо фундаментальные константы, показывающие уровень достижения земной цивилизации. Это перспективный путь, но какие константы написать? Скорость света, гравитационная постоянная, постоянная Планка и многие другие, как например, масса протона (наиболее стабильной частицы во Вселенной) имеют размерность, а у нас нет возможности объяснять инопланетянам, что такое наши килограммы, метры и т.д. Можно, конечно, написать число Авогадро. Эта константа значительно моложе нашей Вселенной, и ее порядок фактически отражает ее смысл; она должна быть понятна любой другой цивилизации, но результат XIX века. Нет, она хороша лишь как заправка для общения, так же как и теорема Пифагора. Ну а как же быть с передним краем развития науки, или почти передним? Вот к этому рубежу мы и должны подойти вначале сами.

#### **Четыре фундаментальных взаимодействия.**

**Первое** фундаментальное взаимодействие – **гравитационное**, нам уже хорошо знакомо со времен И. Ньютона. Первое его лабораторное наблюдение и измерение гравитационной константы  $G$ , было проведено в 1774 г. Г. Кавендишем, который поставил знаменитый эксперимент, измерил чрезвычайно слабую силу притяжения между двумя металлическими шарами, прикрепленными на концах горизонтально подвешенного деревянного стержня. Впоследствии в той или иной модификации эксперимент для измерения константы  $G$  проводился неоднократно вплоть до нашего времени. Характерно, что гравитация имеет бесконечный радиус взаимодействия, ему подвержены все тела и от него нельзя защититься никаким экраном. Благодаря этому взаимодействию существует наша Солнечная система и другие системы и галактики. Короче говоря, тот наблюдаемый нами мегамир, одной из составляющих которого являемся мы сами.

#### **Интересные факты**

Генри Кавендиш (англ. Henry Cavendish; 10 октября 1731 – 24 февраля 1810) – британский физик и химик, член Лондонского королевского общества (с 1760 года).

Генри Кавендиш родился 10 октября 1731 года в Ницце в семье лорда Чарльза Кавендиша, сына второго герцога Девоншира Вильяма Кавендиша, и леди Анны Грей, дочери первого герцога Кента Генри Грея.

Кавендиш вел тихий и уединенный образ жизни. Со своими служанками он общался исключительно записками и не заводил личных отношений вне семьи. Согласно одному из источников, для того, чтобы попасть домой, Кавендиш часто пользовался чёрным ходом, чтобы избежать встреч со своей экономкой. Некоторые современные врачи (например, Оливер Сакс) пред-

полагают, что Кавендиш страдал синдромом Аспергера, хотя он, возможно, просто был очень застенчивым. Круг его общения ограничивался лишь клубом Королевского общества, члены которого обедали вместе до еженедельных совещаний. Кавендиш редко пропускал эти встречи и был глубоко уважаем своими современниками.

Он также увлекался коллекционированием мебели тонкой работы, документально подтверждена покупка им «десяти стульев и дивана красного дерева с атласной обивкой».

Излюбленным способом тратить деньги была для Кавендиша благотворительная деятельность. Как-то раз, узнав, что студент, помогавший ему упорядочивать библиотеку, оказался в трудной финансовой ситуации, Кавендиш немедленно выписал ему чек на 10 тысяч фунтов – сумму по тем временам громадную. Подобным образом он поступал всю жизнь – и, тем не менее, всегда располагал миллионами фунтов стерлингов, будто обладал сказочным «неразменным рублем».

Кавендиш был совершенно безразличен к окружающему его миру и никогда не интересовался происходящими в этом мире событиями – даже столь значительными, как Французская революция или наполеоновские войны, прокатившиеся по Европе.

Большинство научных работ Кавендиша не публиковалось вплоть до второй половины XIX века, когда Джеймс Максвелл занялся разбором архивов Кавендиша. И даже сейчас несколько ящиков, заполненных рукописями и приборами, назначение которых не поддается определению, остаются неразобранными.

Одним из следствий его гравитационных измерений было довольно точное определение плотности. Однако этот результат не был известен почти 100 лет, так как Кавендиш не заботился ни о публикации своих работ, ни о каком-либо признании учёным миром.

В 1775 году он пригласил семерых выдающихся учёных, чтобы продемонстрировать сконструированного им искусственного электрического ската, и дал каждому ощутить электрический разряд, абсолютно идентичный тому, каким настоящий скат парализует свои жертвы. А по завершении показа он, опередивший своих современников Гальвани и Вольты, торжественно объявил приглашенным, что именно эта продемонстрированная им новая сила когда-нибудь революционизирует весь мир.

Хотя распространено мнение, что всемирно известная Кавендишская лаборатория названа в честь Генри Кавендиша, это не соответствует действительности. Она названа в честь родственника Генри, Уильяма Кавендиша, 7-го герцога Девоншира. Он был канцлером Кембриджского университета и пожертвовал крупную сумму на открытие первой в мире учебно-научной лаборатории при университете.

Примерно за 11 лет до Кулона закон взаимодействия зарядов был открыт Г. Кавендишем, однако результат не был опубликован и долгое время оставался неизвестным.

Он умер неженатым 24 февраля 1810 года, оставив состояние в 700 000 фунтов и ещё 6000 годового дохода от имения. К сожалению, ни один фунт из этого богатства не был пожертвован на нужды науки. Завещание же ученого содержало категорическое требование, чтобы склеп с его гробом сразу после похорон был наглухо замурован, а снаружи не было никаких надписей, указывающих, кто в этом склепе похоронен. Так и было сделано. Кавендиша похоронили в соборе в Дерби. Ни осмотра тела, ни вскрытия трупа не производили. И ни одного достоверного портрета Кавендиша тоже не сохранилось.

**Второе** фундаментальное взаимодействие – **электромагнитное**, которое мы также знаем со школьной скамьи. Судя по всему, впервые существование электричества установил Фалес Милетский, когда потерял кусок янтаря (по-гречески *электрон*) о шелк или мех. Магнетизм экспериментально обнаружили также древние греки. Уже за 600 лет до н.э. им были известны свойства магнитного железняка. Спустя примерно 500 лет китайцы открыли способность этого материала ориентироваться в пространстве и создали фактически примитивный компас. Однако из-за отсутствия в древнем Китае понятия «закон природы» его использование ограничивалось различными мистическими действиями, и только спустя несколько столетий компас стал навигационным прибором. В XVIII–XIX вв. природа электричества и магнетизма постепенно прояснилась. Как вы уже знаете, апофеозом явилось написание Д. Максвеллом его четырех уравнений, объединивших электричество и магнетизм в единую теорию. Благодаря электромагнитному взаимодействию электрон не улетает от ядра, что делает возможным само существование атома, ибо отрицательно заряженный электрон притягивается к положительно заряженному ядру, состоящему из протонов и ней-

тронов. Таким образом, это взаимодействие, как и гравитационное, также имеет бесконечный радиус и формирует наш атомно-молекулярный мир (в том числе и нас самих).

**Третье** фундаментальное взаимодействие – **сильное**. Представление о его существовании складывалось по мере того, как прояснялась структура атомного ядра. Действительно, согласно закону Кулона, протоны как одноименно заряженные частицы должны были бы разлететься из ядра, поскольку сил гравитации недостаточно (они чрезвычайно малы по сравнению с электрическими) чтобы удерживать протоны в области пространства  $10^{-13}$  см (размеры ядра). Что-то должно удерживать протоны в ядре, поскольку существуют стабильные ядра атомов. Вот это *что-то* и является сильным взаимодействием, оно существенно только на расстояниях порядка  $10^{-13}$  см, т.е. является короткодействующим. Ясно, что оно также определяет существующий мир, поскольку отвечает за стабильность ядер, а значит, в итоге и самих атомов. Кроме того, в недрах Солнца и звезд непрерывно протекает термоядерная реакция, вызванная сильным взаимодействием и дающая нам ту форму жизни, которая осуществилась на Земле.

**Четвертое** фундаментальное взаимодействие – **слабое**. Судя по всему, так и не осознав этого события, человечество познакомилось с ним в 1054 г., когда китайские астрономы увидели появление яркой голубой звезды в той области неба, где ранее ничего не наблюдали. Эта новая звезда светила несколько недель, а затем стала медленно гаснуть. Эта вспышка 1054 г. считается взрывом сверхновой, т.е. гигантским по силе взрывом старой звезды, вызванным внезапным коллапсом ее ядра, который сопровождается кратковременным испусканием огромного количества особых частиц – **нейтрино**. Участвующие только в слабом взаимодействии, нейтрино разбросали наружные слои звезды в космическом пространстве, создав клочья облаков расширяющегося газа. Сейчас сверхновая 1054 г. наблюдается в виде туманного светлого пятнышка в созвездии Тельца. Слабое взаимодействие ощутимо еще на меньших расстояниях, нежели сильное. Оно прекращает свое действие на расстояниях  $10^{-16}$  см от источника. Тем не менее без него также не было бы ныне существующего мира, поскольку оно вызывает превращение одних частиц в другие, часто приводя продукты реакции в движение с высокими скоростями. Кроме того, слабое взаимодействие отвечает за относительно медленное и ровное горение нашего Солнца, что в определенной степени также обеспечивает тот вид жизни, который осуществился на Земле.

Каждое взаимодействие характеризуется своей константой, имеющей соответствующую размерность. Анализ размерностей этих констант приводит к следующему, весьма специфическому пониманию следующей проблемы. Размерные константы играют определяющую роль в построении физических теорий. Однако, если речь идет о возможности **единого теоретического описания всех физических процессов** – формулировке унифицированной научной картины мира от микро- до мегауровня включительно, на первый план должны выйти **безразмерные константы**. Если такие существуют, то именно их и следует называть **истинно «мировыми» константами**. Они собственно и являются «мировым» языком общения для «всех времен и народов». Процедура написания безразмерных констант для четырех фундаментальных взаимодействий хорошо известна в физике и делается путем использования помимо  $G$  и заряда электрона  $e$  других фундаментальных констант:  $\hbar$ ,  $c$ , массы протона  $m_p$ , цветового заряда  $q_s$  и энергии Ферми  $g_F$ . В результате получают следующие безразмерные величины, которые вы и должны написать инопланетянам:

**константа гравитационного взаимодействия** –  $\alpha_G \approx 10^{-39}$ ;

**константа слабого взаимодействия** –  $\alpha_W \approx 10^{-5}$ ;

**константа электромагнитного взаимодействия** –  $\alpha_e \approx 1/137 \approx 10^{-2}$ ;

**константа сильного взаимодействия** –  $\alpha_S \approx 1$ .

Характерно, что числовые значения этих констант (несмотря на принципиальную возможность их изменения) нельзя менять, не разрушив при этом устойчивости одного или нескольких основных структурных элементов Вселенной. Можно считать, что эти константы стабильны, начиная со времени  $10^{-35}$  сек с момента рождения Вселенной. Такая точная и стабильная «подгонка» числовых значений мировых констант, необходимых для существования ядер, атомов, звезд и галактик абсолютно неясна. Но именно такая «подгонка» обуславливает существование не только сложных неорганических, органических и живых структур, но в конечном счете и самого вида *homo sapiens*.

Что такое Вселенная?  
 Из чего она возникает?  
 Во что она переходит?  
 В свободе она возникает.  
 В свободе существует,  
 и в свободе растворяется.

Упанишады

## Лекция 8. СЦЕНАРИЙ «СОТВОРЕНИЯ МИРА»

Примерно 13–14 миллиардов лет назад произошло событие, не только установившее взаимосвязь между физикой элементарных частиц и космологией, но и определяющее нынешнее стремление к единству науки физики. Это событие называют Большим Взрывом (Big Bang). Чтобы понять, как с того момента развивалась наша Вселенная, нам надо совершить краткий экскурс в так называемые единые теории поля.

В 1967 г. С. Вайнберг, Ш. Глэшоу и А. Салам показали, что слабое и электромагнитное взаимодействия становятся одним единым *электрослабым* взаимодействием при энергиях свыше 100 Гэв. (1 Гэв =  $10^9$  эВ, а 1 электронвольт – это энергия, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов в 1 вольт). Ниже этой энергии симметрия между ними спонтанно нарушается, и в повседневной жизни мы наблюдаем их как разные взаимодействия. Теория электрослабого взаимодействия была подтверждена экспериментально на ускорителе частиц, диаметр кольца которого несколько километров, создающем энергию свыше 100 Гэв.

В 1979 г. Ш. Глэшоу и Г. Джорджи опубликовали свои представления о том, что при энергиях свыше  $10^{14}$  Гэв электрослабое взаимодействие объединяется с сильным, при этом также восстанавливается некая симметрия. Но о симметрии чуть позже. Теории, рассматривающие объединение этих трех взаимодействий, называются ТВО (*теории Великого объединения*). Проверить выводы ТВО обычным способом на ускорителе вряд ли возможно, так как диаметр такого ускорителя (в традиционном эксперименте) должен быть много больше чем размеры Земли. Сколько-нибудь охарактеризовать абстрактную симметрию ТВО мы не сможем, это потребовало бы от нас достаточно сложной математики. **Единственное, что, пожалуй, необходимо сказать, что симметрии ТВО – это геометрические симметрии, связанные с дополнительными 7-ю измерениями пространства, свернутыми (или как говорят компактифицированными) в 7-мерную сферу. Если результаты ТВО на самом деле верны, то мы живем в 11-мерном пространстве, в котором 3+1 – это 4-мерный пространственно-временной континуум, а 7 пространственных измерений свернуты в компакт. Таким образом, появляется еще одна фундаментальная величина – *размерность Вселенной*:  $N_B = 1 + 3 + 7 = 11$ .**

Продолжая двигаться дальше вверх по шкале энергий, мы приходим к *теории супергравитации* или *суперсимметрии*. Результаты этой теории могут проявляться при энергиях свыше  $10^{19}$  Гэв. При этом объединяются внутренняя, связанная с квантовыми числами элементарных частиц симметрия ТВО, и пространственная симметрия ОТО. Таким образом, полная схема, которую мы можем предъявить инопланетянам, дабы доказать нашу осведомленность в науке, представлена на рис. 6. Вас не должно смущать, что характерные энергии объединения представлены в размерных единицах (Гэв); соотношение между порядками величин настолько характерно, что мыслящие инопланетяне поймут, о чем идет речь, если они находятся на нашем уровне развития.

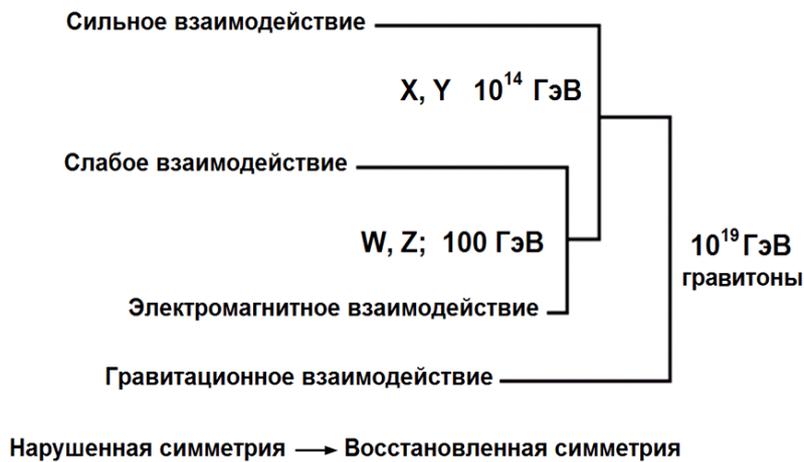


Рис. 6. Энергии объединения различных взаимодействий

Чтобы теперь перейти к сценарию «сотворения» нашего мира, нам осталось осветить еще одну показательную историю о том, как делаются порой открытия. Суть дела вкратце такова. В 1938 г. наш бывший соотечественник (в то время уже американский физик) Г.А. Гамов, исходя из теоретических соображений, предсказал существование фонового (т.е. исходящего не от звезд туманностей и т.п., а из «пустого» пространства) электромагнитного излучения Вселенной. В 1946 г. он выдвинул модель эволюции Вселенной, объяснявшую происхождение этого *реликтового излучения*. Такая модель «горячей» Вселенной предполагала, что когда-то, очень давно (поэтому оно и реликтовое), температура Вселенной была значительно большей, нежели сейчас. В 1964 г. в лаборатории фирмы «Белл телефон» была создана новая рупорная антенна, предназначавшаяся для работы со спутниками связи, и уже через год работавшие на ней Р. Вилсон и А. Пензиас обнаружили фоновый электромагнитный шум Вселенной. Они, ничего не зная о работах Г.А. Гамова, просто случайно натолкнулись на это реликтовое излучение. А в это время знавший теорию Г.А. Гамова астрофизик Р. Дикке специально строил антенну для обнаружения реликтового излучения, но опоздал всего лишь на полгода. В итоге Нобелевскую премию в 1978 г. получили Р. Вилсон и А. Пензиас. С этого момента идея «горячей» Вселенной, рожденной в результате Большого Взрыва, становится основной гипотезой сценария «сотворения Мира». Вкратце он таков.

**Большой взрыв.** Время  $10^{-44}$  сек, температура  $10^{32}$  К (градусов по Кельвину). Это так называемое планковское время, при нем размер Вселенной составлял  $10^{-35}$  см. До этого момента пространство, время, излучение и вещество были нераздельны, а начиная с планковского времени их роль начинает быть разной. В момент  $10^{-43}$  сек Вселенная оказалась в состоянии с относительным минимумом потенциальной энергии (так называемый ложный вакуум); это состояние было абсолютно неустойчивым, и Вселенная стала раздуваться со скоростью, большей скорости света. При этом информативно связаны между собой были только те участки, расстояние между которыми не превышало *ct*. Такое раздувание продолжалось до времени  $10^{-35}$  сек.

**Инфляционная модель Вселенной** – гипотеза о физическом состоянии и законе расширения Вселенной на ранней стадии Большого взрыва (при температуре выше  $10^{28}$  К), предполагающая период ускоренного по сравнению со стандартной моделью горячей Вселенной расширения.

Первый вариант теории был предложен в 1981 году Аланом Гутом, однако ключевой вклад в её создание внесли советские и экс-советские астрофизики Алексей Старобинский, Андрей Линде, Вячеслав Муханов и ряд других.

**Отделение гравитации.** Начиная с  $10^{-35}$  сек при температуре  $10^{28}$  К одно универсальное взаимодействие (суперсимметрия) разделилось на гравитацию и Великое объединение.

**Отделение сильного взаимодействия.** Начиная со времени  $10^{-34}$  сек, температура  $10^{27}$  К, симметрия Великого объединения нарушается, и из него выделяется сильное взаимодействие.

**Начало барионной асимметрии.** При температуре  $10^{16}$  К, время  $10^{-12}$  с, рождаются и уничтожаются кварки и антикварки, при этом число частиц на одну миллиардную часть превышает число античастиц. Позже это приведет к «вымиранию» антиматерии.

**Отделение слабого взаимодействия.** При температуре  $10^{15}$  К начинает нарушаться симметрия между слабым и электромагнитным взаимодействиями и, начиная с времени  $10^{-4}$  сек и температуры  $10^{12}$  К, все четыре взаимодействия существуют уже независимо. Кварки, ранее свободные, объединяются в нуклоны – протоны и нейтроны, прекращаются реакции, в которых поглощалось нейтрино, и эти частицы распространяются по Вселенной.

**Фиксация числа нуклонов.** При температуре  $10^{10}$  К и времени 1 с прекращаются превращения протонов в нейтроны и наоборот. Их количество фиксируется в соотношении 6 к 1.

**Парное взаимоуничтожение лептонов.** При  $10^8$  К и времени 100 с электроны и позитроны, как это уже было с протонами и нейтронами, взаимно уничтожаются, и остается небольшой избыток электронов.

**Синтез первых элементов.** При температуре  $10^7$  К и времени  $10^4$  с протоны и нейтроны сливаются в ядра тяжелого водорода – дейтерия и в ядра гелия.

Наиболее драматические события во Вселенной произошли за первые секунды с момента Большого Взрыва. Температура вещества и его плотность упали более чем на 20 порядков, и теперь счет времени идет уже на тысячелетия.

**Конец синтеза элементов.** Ко времени  $10^4$  лет нейтроны в основном израсходованы на образование ядер гелия. Оставшиеся протоны – это ядра водорода.

**Конец эры излучения.** Вселенная остыла уже до 30000 градусов Кельвина, интенсивность излучения падает, и основная доля энергии приходится уже на материю.

**Эпоха плазмы.** Преобладает электромагнетизм, фотоны обладают еще столь высокой энергией, что не позволяют электронам примыкать к атомным ядрам и образовывать атомы. Вселенная пока еще космический газ, представляющий собой непрозрачную плазму.

**«Просветление» Вселенной.** Начиная со времени  $10^5$  лет, энергия фотонов настолько уменьшилась, что электроны теперь локализуются вокруг атомных ядер – возникают атомы. Фотоны же распространяются по Вселенной почти свободно, создавая *реликтовое излучение*. Вселенная становится прозрачной и далее продолжает постепенно остывать.

**Время  $10^{10}$  лет и далее.** Космический газ образует скопления, возникают небесные тела – *квезары и галактики*. В галактиках образуются газовые облака меньших размеров, они сгущаются и в итоге возникают первые *звезды*. Внутри звезд синтезируются более тяжелые элементы. После смерти звезд они попадают в космическое пространство и при соответствующих условиях могут конденсироваться. Возникают первые *планеты*, подобно нашей. *Жизнь* на Земле появилась свыше трех миллиардов лет назад, а примерно шестьдесят тысяч лет назад появился уже *homo sapiens* – человек разумный.

Что же определило настолько точную подгонку мировых констант, что стало возможным не только существование сложной структуры нашей Вселенной, включая и жизнь?

Одним из возможных ответов на этот вопрос считается *антропный принцип*, согласно которому наша Вселенная обладает наблюдаемыми свойствами именно потому, что эти свойства допускают возможность существования наблюдателя. Обычно считают, что антропный принцип впервые высказал английский физик Б. Картер в 1974 г. в двух формулировках – сильной и слабой. Сильная – «Вселенная должна быть таковой, чтобы в ней на некоторой стадии эволюции мог существовать наблюдатель». Слабая – «То, что мы наблюдаем, должно удовлетворять усло-

виям, необходимым для присутствия человека как наблюдателя». Однако, как оказалось, много ранее, еще в 1957 г., к этому же выводу пришел наш соотечественник Г.М. Идлис.

С нашей точки зрения, антропный принцип имеет скорее философское, нежели естественно-научное значение. Логика развития космологии – науки о происхождении и развитии Вселенной – должна привести к его исключению как лишней сущности (см. аксиому 2).

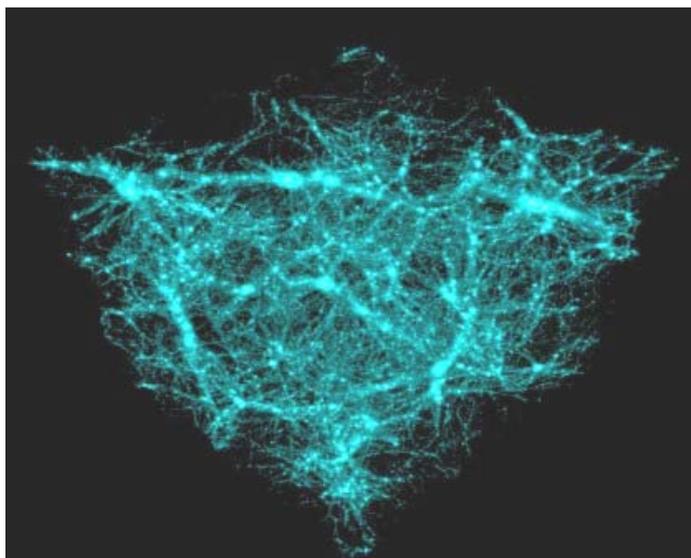
### **Темная материя и темная энергия**

Открытия в космологии обычно проходят в два этапа. На первом исследуется сама суть вопроса: существует ли это нечто? На втором ставится вопрос: что это такое? В случае с темной материей большинство ученых уверено, что первый этап пройден. Если же говорить о темной энергии, то так далеко они пока не продвинулись.

### **СКРЫТАЯ МАССА**

Первым, кто указал на возможность существования темной материи, был швейцарский астроном Фриц Цвикки. В 1932 г. он изучал скопление Волосы Вероники. Исследуя движение галактик, вращавшихся вокруг его центра, Цвикки вычислил, сколько материй требуется, чтобы поддерживать их гравитационную связь. Проанализировав их излучение и рассчитав общее количество имевшихся звезд, он обнаружил, что большей части массы не хватало.

Открытие Цвикки должно было бы вызвать громадный интерес, но из-за его раздражительного характера коллеги-ученые его не любили, поэтому это открытие, как и многие другие, сделанные им, были проигнорированы.



### **СПИРАЛЬНАЯ ЗАГАДКА**

Пройдет еще 40 лет, когда другой ученый снова займется изучением скрытой массы. Этим ученым окажется Вера Рубин, работавшая на кафедре геомагнетизма Института Карнеги в Вашингтоне. С помощью высокочувствительного спектрографа, сконструированного ее коллегой физиком Кентом Фордом, Рубин изучала движения звезд в спиральных галактиках, лежащих на ребре. При расчете скорости этих звезд она отметила аномалию. На удалении от центра галактики звезды не замедлялись, как считалось ранее. Ученые полагали, что звезды в центре, где скоплена большая часть массы, вращаются гораздо быстрее, чем во внешних областях (как планеты в планетарных системах).

### **ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ**

Рубин поняла, что во внешнем гало спиральных галактик должна концентрироваться та же масса, что и в ярко сверкающем центральном диске. Однако увидеть ее невозможно, поскольку речь идет о темной материи. Поначалу эти рассуждения были встречены скептически, но даль-

нейшие исследования подтвердили выводы Рубин и Форда. Анализ газа в скоплениях галактик с помощью рентгеновской обсерватории «Чандра» показал, что темной материи в 10 раз больше, чем вещества, имеющего излучение. Оказалось, что Цвикки был прав.

Для более точного подсчета темной материи было разработано гравитационное линзирование. Этот метод впервые предложил также Цвикки. Все указывало на то, что темной материи было гораздо больше, чем видимого вещества. Правда, если вопрос о самом существовании темной материи больше не стоял, наука пока не могла объяснить, что же это такое.

### СТРАННЫЕ ЧАСТИЦЫ

Считалось, что некоторая часть темной материи может включать нейтрино, черные дыры и плотные образования, названные «массивными объектами гало галактик» (MACHO), такие как коричневые карлики. Профессор астрономии из Принстонского университета в Нью-Джерси Джерри Острикер считает, что «мы не знаем, что такое темная материя, зато мы знаем о том, что к ней точно не относится». У темной материи есть масса, – говорит он, – но она не участвует в электромагнитном взаимодействии с другой материей, поэтому не излучает и не поглощает свет.

Во-вторых, она не содержит обычных элементарных частиц, о которых мы знаем, поэтому, возможно, она состоит из каких-то странных частиц, которые пока не открыты. Ученые называют такие частицы «слабовзаимодействующими массивными частицами» (WIMP). Предпринимаются попытки обнаружить их, но на сегодня результаты пока нулевые.

### ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Впереди ученых ожидали два новых удара.

Удар № 1: по картам космического фонового излучения вывели форму Вселенной, что дало основание считать, что масса Вселенной намного больше, чем предполагалось ранее.

Удар № 2: изучая красное смещение сверхновых типа I<sub>i</sub> в попытках определить скорость расширения Вселенной, астрофизик Сол Перлмуттер, возглавлявший Космологический проект по изучению сверхновых звезд в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли, сделал открытие. Он обнаружил, что эти сверхновые были на самом деле на 17-25 % более тусклыми, чем предполагалось по теории Большого взрыва. Они находились от нас дальше, чем показывали прежние прогнозы, стало быть, скорость расширения Вселенной растет. Должна существовать отрицательная гравитация. Ее нарекли темной энергией, и все ученые мира принялись за формулировку теории.

### КОСМОС УСКОРЯЕТСЯ

Одно из объяснений, что такое темная энергия, может заключаться в том, что после Большого взрыва она была доминирующей силой, но с расширением Вселенной ее гравитация ослабла. По мере того как плотность пространства уменьшилась примерно 6 млрд лет назад, темная энергия взяла верх, и расширение Вселенной стало ускоряться. Другая гипотеза требует повторного введения космологической постоянной Эйнштейна, указывающей на то, что пространство само противодействует гравитации.

Еще одна теория описывает темную энергию как форму отрицательного давления или такой тип силового поля (как электромагнетизм), называемый квинтэссенцией, который отталкивает материю.

Поскольку энергия и масса взаимозаменяемы (по знаменитой формуле Эйнштейна  $E = mc^2$ ), темная энергия может составлять большую часть массы во Вселенной – чуть ли не до 73 %. А вот темная материя охватывает меньше 27 %, тогда как звезды, газ и пыль вместе дают оставшуюся часть (0,5 %). Какое из решений правильное, ученым пока еще только предстоит решить.



Заканчивая раздел о симметрии, мега- и микромире, обращаем внимание тех, кого более подробно интересует геометризация физики и роль в ней абстрактных симметрий. Им следует прочитать раздел «Интермедия» нашей книги «Концепции современного естествознания» [1], написанный профессором А.А. Дышековым.



**Геóргий Анто́нович Га́мов** (также известен как Джордж Гамов, англ. George Gamow; 20 февраля (4 марта) 1904, Одесса – 19 августа 1968, Боулдер) – советский и американский физик-теоретик, астрофизик и популяризатор науки.

В 1933 г покинул СССР, став «невозвращенцем». В 1940 г. получил гражданство США. Член-корреспондент АН СССР (с 1932 по 1938 гг., восстановлен посмертно в 1990 г.). Член Национальной академии наук США (1953 г.).

Гамов известен своими работами по квантовой механике, атомной и ядерной физике, астрофизике, космологии, биологии. Он является автором первой количественной теории альфа-распада, одним из основоположников теории «горячей Вселенной» и одним из пионеров применения ядерной физики к вопросам эволюции звёзд. Он впервые чётко сформулировал проблему генетического кода. Широкую известность Гамову принесли его научно-популярные произведения, в которых живым и доступным языком рассказывается о современных научных представлениях.



**Арно Аллан Пензиас** (на фото справа) и **Роберт Вудро Уилсон** (на фото слева) – американские физики, открывшие реликтовое электромагнитное излучение

**Арно Аллан Пензиас** (англ. Arno Allan Penzias; родился 26 апреля 1933, Мюнхен) – американский астрофизик, профессор, лауреат Нобелевской премии по физике (1978) за открытие космического микроволнового фонового излучения.

**Роберт Вудро Уилсон** (англ. Robert Woodrow Wilson; род. 10 января 1936, Хьюстон, США) – американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1978 году «за открытие микроволнового реликтового излучения» (совместно с Арно Алланом Пензиасом).

**Шелдон Ли Глэшоу** (англ. Sheldon Lee Glashow; род. 5 декабря 1932, Нью-Йорк) – американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике за 1979 г. (совместно с Абдусом Саламом и Стивеном Вайнбергом). Родился в Нью-Йорке, в семье уроженцев Бобруйска Льюиса Глуховского (1889–1961) и Беллы Рубиной (1893–1970).

**Абдаль Гани АсСалами** (англ. Abdal Ghani AsSalami); 29 января 1926, Джанг, Британская Индия (в настоящее время Пакистан) – 21 ноября 1996, Оксфорд, Великобритания – пакистанский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике за 1979 г. (совместно с Шелдоном Глэшоу и Стивеном Вайнбергом). Именем учёного назван Международный центр теоретической физики в Триесте.

**Стивен Вайнберг** (англ. Steven Weinberg; род. 3 мая 1933, Нью-Йорк) – американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1979 году (совместно с Шелдоном Ли Глэшоу и Абдусом Саламом) «за вклад в объединённую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий между элементарными частицами, в том числе предсказание слабых нейтральных токов». Стивен Вайнберг родился 3 мая 1933 года в Бронксе (Нью-Йорк) в еврейской семье. Его отец, Фредерик Вайнберг (1901–1984), происходил из семьи иммигрантов из Румынии; мать, Ева Израэл (1909–?), эмигрировала в США из Германии.



Ш. Глэшоу, А. Салам, С. Вайнберг на вручении Нобелевской премии (1979 г.)



**Алексей Александрович Старобинский** (род. 19 апреля 1948, Москва) – российский физик-теоретик, автор работ по гравитации и космологии. Один из создателей современной теории рождения Вселенной – теории инфляции. Закончил физический факультет МГУ в 1972 г. Академик РАН (2011). Главный научный сотрудник Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН. Член Немецкой национальной академии наук.

Совместно с Я.Б. Зельдовичем рассчитал количество частиц и среднее значение тензора энергии импульса квантовых полей в однородной анизотропной космологической модели. Вместе с ним же продемонстрировал Стивену Хокингу, что в соответствии с принципом неопределённости квантовой механики вращающиеся чёрные дыры должны порождать и излучать частицы. Совместно с Ю.Н. Парийским и др. обнаружил флуктуации температуры реликтового излучения.

Вместе с А. Гуттом и А.Д. Линде является основоположником теории ранней Вселенной с деситтеровской (инфляционной) стадией. Наиболее важные результаты в этой области: первый расчет спектра гравитационных волн, генерируемых на инфляционной стадии, первая последовательная модель инфляционного сценария, первый (одновременно, но независимо от С. Хокинга и А. Гута) количественно правильный расчет спектра возмущений плотности, теория стохас-

тической инфляции, теория разогрева материи во Вселенной после конца инфляционной стадии, теория перехода от квантового описания первичных неоднородностей к классическому.

Премии и награды:

Премия имени А.А. Фридмана РАН (1996).

Премия Томалла (Швейцария) (2009).

Медаль Оскара Клейна Шведской Королевской Академии наук и Стокгольмского университета (2010) (с предложением прочитать Мемориальную лекцию О. Клейна).

Медаль Амальди[de] Итальянского гравитационного общества (совместно с В.Ф. Мухановым) (2012).

Премия Грубера в области космологии (совместно с В.Ф. Мухановым) (2013) в размере 500 тыс. долларов США.

Премия Кавли в области астрофизики (2014).

Золотая медаль имени А.Д. Сахарова РАН (2016).



**Андрей Дмитриевич Линде** (род. 2 марта 1948, Москва) – советский и американский физик. Профессор физики в Стэнфордском университете.

В 1972 г. А.Д. Линде окончил физический факультет МГУ.

В 1975 г. защитил диссертацию в Физическом институте им. Лебедева под научным руководством Д.А. Киржница.

Вместе с А. Гуттом А.Д. Линде является основоположником теории ранней Вселенной с деситтеровской (инфляционной) стадией. Наиболее важные результаты в этой области: первый расчет спектра гравитационных волн, генерируемых на инфляционной стадии, первая последовательная модель инфляционного сценария, первый (одновременно, но независимо от С. Хокинга и А. Гута) количественно правильный расчет спектра возмущений плотности, теория стохастической инфляции, теория разогрева материи во Вселенной после конца инфляционной стадии, теория перехода от квантового описания первичных неоднородностей к классическому.

С 1989 г. работал в теоретическом отделе Европейской организации по ядерным исследованиям ЦЕРН (CERN) в Швейцарии.

В 1990 г. Линде эмигрировал в США, став профессором физики Стэнфордского университета.

Награды:

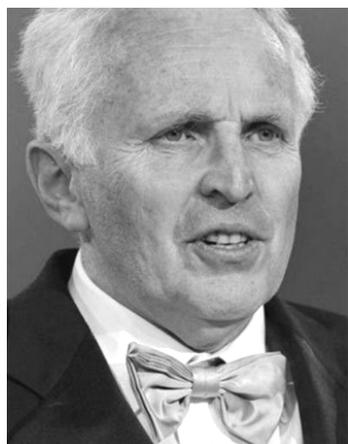
Награжден многочисленными наградами, среди которых Медаль Оскара Клейна (2001).

Медаль Дирака (2002).

Премия Грубера (2004).

Премия по фундаментальной физике (2012).

Премия Кавли (2014).



**Александр Маркович Поляков** (род. 27 сентября 1945 г., Москва) – советский и американский физик-теоретик, первоначально работавший в Институте теоретической физики им. Ландау в Черноголовке, а с 1989 г. – в Принстонском университете. Член-корреспондент РАН (1984).

Известен рядом основополагающих вкладов в квантовую теорию поля, в том числе работой над монополями 'т Хоофта – Полякова в теории Янга – Миллса. Независимо от Герарда 'т Хоофта Поляков осознал применимость топологических идей в теории поля посредством открытия монопольных и инстантонных решений в теории Янга – Миллса. Одним из первых он выявил значение масштабной инвариантности в квантовой теории поля, особенно в связи с теорией критических явлений.

Его переформулировка теории струн в терминах ковариантного интеграла по траектории, классификация двумерных конформных теорий поля в статье «Бесконечная конформная симметрия в двумерной квантовой теории поля» совместно с А.А. Белавиным и А.Б. Замолотчиковым, опубликованной в 1984 г., стали классикой теоретической физики. В 2011 г. они получили совместную премию Ларса Онзагера.

Награды:

Медаль Дирака (1986).

Премия Дэнни Хайнемана в области математической физики (1986).

Медаль Лоренца (1994).

Медаль Оскара Клейна (1996).

Премия Харви (2010).

Премия Ларса Онзагера (2011).

В 2013 г. награждён Премией по фундаментальной физике (Fundamental Physics Prize, «Премия Мильнера») за работы в области квантовой теории поля и за труды, ставшие одним из оснований теории струн.



**Вячеслав Фёдорович Муханов** (род. 2 октября 1956 г., Каша, Чувашская АССР, РСФСР) – российско-германский физик, космолог, один из авторов доказательства инфляционной теории развития Вселенной, профессор университета Людвиг-Максимилиана в Мюнхене.

Выпускник (1973 г.) ФМШ № 18 при МГУ им. акад. Колмогорова. Закончил МФТИ (1973–1979). Работал в ФИАН. Научный руководитель В.Л. Гинзбург. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию в ФИАН. С 1989 по 1992 гг. – старший научный сотрудник Института ядерных исследований в Москве. С 1992 по 1997 гг. – доцент Высшей технической школы Цюриха (Швейцария). С 1997 г. руководит кафедрой физики астрочастиц и космологии физического факультета университета имени Людвиг-Максимилиана в Мюнхене.

В 1981 г. Муханов в сотрудничестве с Геннадием Чибисовым разработал гипотезу возникновения крупномасштабной структуры Вселенной (галактик) из квантовых флуктуаций.

С 1982 по 1989 гг. разработал квантовую теорию космологических возмущений, которая может быть применена для вычисления неоднородностей в различных инфляционных моделях Вселенной. Первое подтверждение этой теории было получено в 1992 г. в эксперименте COBE на космическом зонде WMAP.

Область научных интересов: флуктуации реликтового излучения, инфляционные модели, космология в теории струн, проблема космологической постоянной, проблема сингулярности, самовоспроизведение Вселенной, темная энергия, квантовые и классические черные дыры, квантовая космология.

Награды и премии:

1988 – Золотая медаль Академии наук СССР для молодых ученых.

2004 – Заслуженный лектор Стэнфордского университета, США.

2004 – Почетный член Института Физики, Англия.

2006 – Медаль Оскара Клейна Стокгольмского университета, Швеция.

2008 – Почетное звание заслуженного профессора Нью-Йоркского университета, США.

2009 – Премия Томалла, Швейцария.

2010 – Премия Блез Паскаль Высшей нормальной школы, г. Париж, Франция.

2012 – Медаль Амальди Итальянского гравитационного общества (совместно с А.А. Старобинским).

2013 – Премия фонда Грубера в области космологии.

2014 – Премия Фридриха фон Шеллинга.

2015 – Медаль им. Макса Планка.

2015 – BVVA Foundation Frontiers of Knowledge Awards (совместно со Стивеном Хокингом).

Где начало того конца,  
которым оканчивается начало?

Козьма Прутков  
«Мысли и афоризмы», № 78

## Лекция 9. ЗАКОНОМЕРНОСТИ МАКРОМИРА. НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ. КОНСТАНТА БОЛЬЦМАНА

«Вначале не было ничего; из тьмы первозданного хаоса, покоящегося без движения, словно в глубоком сне, прежде иных творений возникли воды. Воды породили огонь. Великой силой тепла в них рождено было Золотое Яйцо. Тогда не было еще года, ибо некому было отмерять время. Из Золотого Зародыша возник Прародитель Брахма, и он положил начало времени и всему сущему. Так была сотворена Вселенная. Шесть сыновей родилось у Брахмы, но всех превзошел младший, Вишну, хранитель мироздания. Шива вышел из чела Брахмы, подобный пламени гнева, и в нем воплотились все разрушительные силы и самые грозные и устрашающие свойства богов».

Так повествуют Веды сотворение Мира. В индуизме, как и позднее, в христианстве, сложилась концепция Тримурти (своеобразный индусский аналог христианской Троицы), верховного божества, единого в трех лицах: Брахмы – создателя Вселенной, Вишну – ее хранителя, и Шивы – разрушителя.

Таким образом, еще древние, с их высокой наблюдательностью и иррациональным мышлением, пришли к выводу, что для стабильности всего сущего необходимы, говоря современным языком, три закона. Закон *рождения нового*, закон *сохранения* и закон *деструкции*, т.е. *смерти*. Посмотрим, как соответствует современная наука этому представлению.

По современным представлениям, связанным в большей степени с концепцией Нобелевского лауреата И.Р. Пригожина, есть два взаимодополняющих подхода к описанию природы: динамический и термодинамический. Первый наиболее целесообразен для описания отдельных объектов (тел, атомов, молекул, элементарных частиц) и их взаимодействия с некоторым числом тех же самых или других объектов.

Второму свойственен системный подход, то есть он рассматривает существенно большие совокупности объектов (например, макросостояние с числом частиц порядка числа Авогадро  $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$  1/моль). Этот подход оперирует обобщенными параметрами, такими как *энергия*, *теплота* и *энтропия*. Такие системы мы будем называть термодинамическими, полагая, что выражения, получаемые или используемые в теории, подвергаются формальной предельной процедуре. То есть, если число частиц в системе  $N$  и ее объем  $V$  стремятся к бесконечности (чего на самом деле быть не может), то их отношение  $V/N = \text{const}$ .

Для термодинамических (ТД) систем существуют четыре аксиомы, или как чаще говорят – начала термодинамики.

**Нулевое начало термодинамики.** Для каждой термодинамической системы существует состояние термодинамического равновесия, которого она при фиксированных внешних условиях с течением времени самопроизвольно достигает. Это свойство специфично для ТД систем и является для них обязательным без исключений. Понятие ТД равновесия – это такое состояние, когда макроскопические параметры системы не изменяются с течением времени и когда отсутствуют потоки любого типа. В макроскопической теории нулевое начало – это обобщение повседневного опыта и наблюдений за ТД системами. Однако, с микроскопической точки зрения, это утверждение далеко не самоочевидно. Анри Пуанкаре в 1890 г было доказано, что механическое состояние, например, изолированной системы вовсе не переходит с течением времени в некое «устойчивое» состояние, принимаемое за равновесное, а воспроизводится с заранее обусловленной точностью

через конечный промежуток времени. Правда, этот промежуток времени для системы из моля вещества, по самым грубым оценкам, составляет  $10^N$ , так что возраст Вселенной, по сравнению с этой величиной, только миг. Кроме того, фиксируемые посредством макроскопических приборов состояния уже не представляют собой чисто механических состояний. Тем не менее, эта проблема, связанная с теоремой возврата, имеет несомненный теоретический и принципиальный интерес.

**I начало термодинамики – закон сохранения и превращения энергии** в самом общем его виде, т.е. учитывающий любые другие формы движения материи. Этот закон утвердился в науке, став основой ее формирования, почти полтора столетия назад. Его признание началось с довольно частной проблемы определения механического эквивалента теплоты. Решение же проблемы в целом связано, в первую очередь, с работами Ю. Майера (1842 г.), Д. Джоуля (1843 г.), Г. Гельмгольца (1847 г.). Термин «энергия», вместо использовавшегося тогда «движущая сила», был введен в обиход физики В. Ренкиным с 1853 г., хотя само слово встречалось еще в III веке до н.э у Аристотеля.

Запишем простейшее соотношение, характеризующее первое начало термодинамики в естественной форме баланса энергии:

$$dE = \delta Q - \delta W, \quad (13)$$

т.е. бесконечно малое изменение энергии  $dE$  происходит за счет того, что система поглощает количество тепла  $\delta Q$  и совершает работу  $\delta W$ .

**II начало термодинамики – закон возрастания энтропии.** Другими словами, II начало устанавливает:

1) существование для любой равновесной (точнее, квазиравновесной, т.е. участвующей в квазистатическом процессе) термодинамической системы однозначной функции термодинамического состояния, называемой *энтропией*, такой, что ее полный дифференциал:

$$dS = (1/T) \delta Q. \quad (14)$$

То есть, в отличие от теплоты  $Q$ , энтропия является потенциальной функцией и описывает эволюцию термодинамической системы.

С математической точки зрения, изменение тепла  $\delta Q$  (которое не является полным дифференциалом) всегда имеет интегрирующий множитель, равный величине обратной температуре  $-(1/T)$ . С формальной точки зрения, дифференциальная форма  $\delta Q$  представляет собой так называемую пфаффову форму:

$$\delta Q = \mathbf{P}(x,y,z,\dots)dx + \mathbf{K}(x,y,z,\dots)dy + \mathbf{R}(x,y,z,\dots)dz + \dots \quad (15)$$

Известно, что если она определяется только двумя переменными, например,  $x$  и  $y$ , то интегрирующий множитель у нее существует всегда, и тогда в данном выше определении второго начала термодинамики нет аксиоматического утверждения. Однако для трех (и уж тем более при большем числе) переменных математическая ситуация меняется кардинально. Оказывается, что существование интегрирующего множителя возможно не при любых функциях  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{K}$  и  $\mathbf{R}$ , а лишь при выполнении определенных достаточно жестких накладываемых на них условий. Таким образом, приведенная формулировка второго начала постулирует существование интегрирующего множителя при любой структуре пфаффовой формы  $\delta Q$ . То есть это аксиоматическое положение в принципе; и тривиальные случаи одного или двух переменных ни в коей мере не являются оправданием (тем более доказательством) этого общего утверждения.

**III начало термодинамики.** В радикальной формулировке М. Планка (1910 г.) оно имеет вид начального граничного или предельного) условия:

$$\lim S = 0 \text{ При } T \rightarrow 0. \quad (16)$$

**Остановимся теперь на втором начале термодинамики для неравновесных процессов и в изолированных термодинамических системах.**

Термодинамика условно делится на равновесную и неравновесную (например, диффузия происходит в неравновесной системе). Неравновесная термодинамика, в свою очередь, делится

на линейную и нелинейную. Но об этом мы будем говорить позже. Рассмотрим вначале равновесную термодинамику, которая рассматривает квазистатические процессы, которые протекают бесконечно медленно и состоят из бесконечной последовательности равновесных состояний, предельно мало отличающихся друг от друга (ясно, что это идеализация, а не реальный процесс). Основное преимущество такой идеализации – обратимость процессов, ибо, согласно определению, каждое промежуточное состояние, являясь равновесным, совершенно безразлично к направлению течения процесса. Таким образом, время  $t$  как динамический параметр выпадает из теории и процесс становится как бы безинерционным.

Ко второму началу термодинамики относят также и утверждение, что для всякого неквазистатического процесса, происходящего в ТД системе:

$$dS > (1/T) \delta Q', \quad (17)$$

где  $\delta Q'$  – количество поглощенного системой тепла при неквазистатическом процессе перехода из одного состояния в близлежащее другое, такое, что  $dS = S_2 - S_1$ . Это утверждение, сформулированное Клаузиусом в 1865 г., является по существу следствием эмпирических соображений – принципа максимальной работы и максимального поглощения тепла, обсуждение которых мы здесь опускаем. Эти вопросы рассматриваются в начале курса термодинамики (ТД) (И.А. Квасников. Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем. МГУ. 1991).

Второе начало ТД определяет не только направление течения реального процесса, но и позволяет исследовать целый ряд свойств равновесных состояний как экстремальных. Так появляется **невозможность самопроизвольного уменьшения энтропии в изолированной системе** (изолированная система не обменивается с окружающим пространством ни частицами, ни энергией, ни информацией). Действительно, в изолированной системе  $\delta Q = \delta W = 0$ , и неравновесные процессы проходят так, что:

$$dS > 0. \quad (18)$$

Это фактически и определяет направление неравновесного процесса, а равновесное состояние будет соответствовать максимальному значению энтропии.

Согласно этому закону, система сама стремится к состоянию с максимумом энтропии – состоянию глобального термодинамического равновесия. Это состояние, называемое **аттрактором**, характеризуется максимумом хаотичности (хаос – состояние материи, которое характеризуется максимальным беспорядком), а значит (если вспомнить наш разговор о симметрии в лекции 3, второй пример), максимальной симметрией, и является наиболее вероятным состоянием системы.

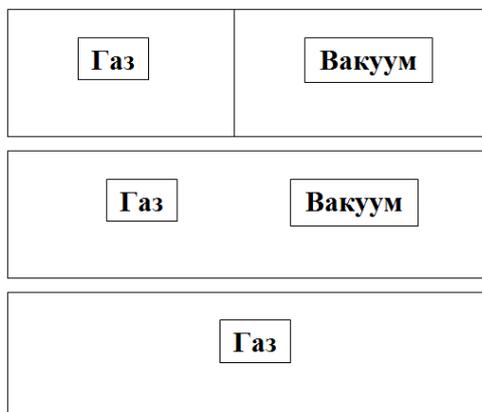


Рис. 7. Газ после убирания перегородки распространяется по всему объему

Это поясняется на рисунке, где газ после убирания перегородки распространяется по всему объему, и симметрия системы увеличивается.

Попытаемся посредством механической модели дать интерпретацию аттрактора. Представьте себе сосуд в виде конуса. Приведем его во вращение, и совершенно произвольно будем опускать на его внутреннюю поверхность шарики. Скатываясь по поверхности конуса, каждый

раз по различным траекториям, они в итоге оказываются на его дне (в глобальном устойчивом состоянии). Если теперь посмотреть сверху на возможные траектории, то они представляют собой систему спиралей, сходящихся в одной точке (дно конуса), это и есть модель аттрактора. На рис. 8 схематически представлена эволюция некоторой переменной величины, имеющей асимптотическую устойчивость, и фазовые траектории, сходящиеся в аттрактор. Таким образом, каковы бы ни были начальные условия, эволюция системы такова, что все пути ведут в аттрактор. Наверняка вы уже вспомнили античное изречение про аттрактор: «Все пути ведут в Рим». Да, именно Рим был своеобразным аттрактором античного мира.

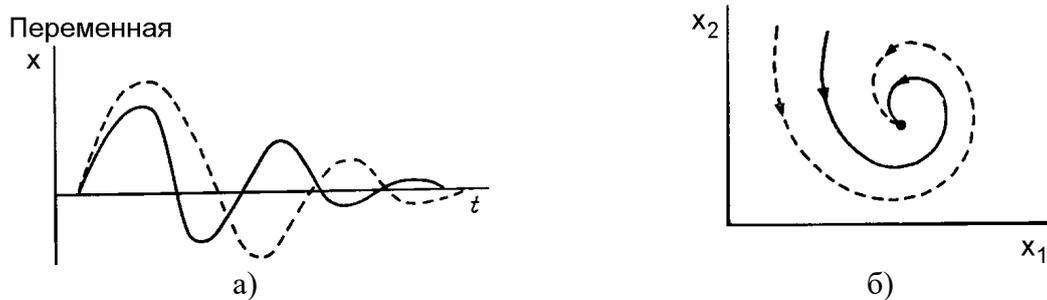


Рис. 8. Два представления об асимптотической устойчивости:

а) временная эволюция состояния; б) фазовые траектории, сходящиеся в аттрактор

Второе начало, в отличие от первого, не является всеобщим законом природы. Тем не менее, второе начало по своему положению занимает уникальное место среди других фундаментальных законов. Дело в том, что II начало говорит о необратимости, однонаправленности процессов в изолированной системе и тем самым обуславливает отличие будущих процессов от прошедших, выделяет направление времени (*стрела времени*); мерой необратимости является энтропия. Вероятностную интерпретацию энтропии впервые дал в 1877 г. Л. Больцман, используя идею определения наиболее вероятного, с термодинамической точки зрения, состояния системы материальных точек. В статистической физике равновесных систем существует формула, определяющая энтропию  $S$  (характеристика макросостояния) через статистический вес  $\Gamma$  (характеристика микросостояния):

$$S = k \ln \Gamma, \quad (19)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – **константа Больцмана**.

Статистический вес  $\Gamma$  определяет полное число микроскопических реализаций данного макроскопического состояния. С точки зрения макроскопического подхода, равновесное состояние является как следствие нулевого начала единственным вне зависимости от того, каким из микроскопических способов из числа  $\Gamma$  оно реализуется. Поэтому все они представляются в этом отношении равноценными.

Таким образом, переход системы из неравновесного состояния в равновесное сопровождается ее переходом в наиболее вероятное состояние, соответствующее максимуму энтропии. Несмотря на то, что константа  $k$  не определяет элементарных физических процессов и не входит в основные принципы динамики, важным является следующее обстоятельство: **константа Больцмана устанавливает связь между микроскопическими динамическими явлениями и макроскопическими характеристиками состояния большого коллектива частиц**. Собственно говоря, эту константу впервые ввел М. Планк, как и формулу (16). Тем не менее, константа  $k$  носит имя Больцмана «по вполне понятной причине» (слова самого М. Планка). И причина эта в том, что Больцман впервые установил не только пропорциональность между  $S$  и  $\ln \Gamma$ , но и показал, что в итоговом состоянии с максимумом энтропии, т.е. в аттракторе, распределение вероятности частиц по скоростям для идеального классического газа имеет вид:

$$W(v) \sim \exp(-mv^2/2kT), \quad (20)$$

где  $m$  – масса частиц,  $T$  – температура. Формула (17) с математической точки зрения описывает так называемый нормальный закон распределения случайных величин – закон К. Гаусса  $W(x) \sim \exp(-\alpha x^2)$ , ее график приведен на рис. 9. Свойствами нормального распределения мы еще воспользуемся, когда будем обсуждать вопрос, связанный с дисперсией аддитивных и неаддитивных величин.

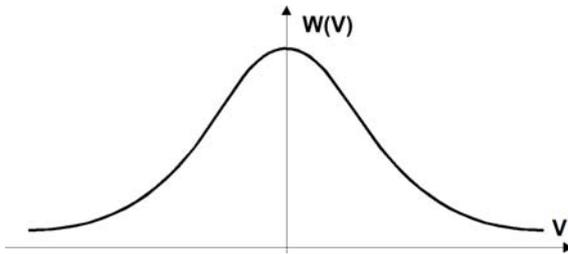


Рис. 9. График функции  $W(v) \sim \exp(-mv^2/2kT)$

Из графика на рис. видно, что в состоянии аттрактора – глобального равновесия, в котором система оказалась в конце концов, вероятность встретить частицу с нулевой скоростью максимальна и равна единице, но (и это очень важно!) есть отличная от нуля вероятность встретить частицы и со скоростями, не равными нулю. В дальнейшем мы будем использовать это обстоятельство при обосновании одной из аксиом биологии. Таким образом, состояние максимума энтропии – не застывшее, а некоторым образом подвижное состояние хаоса.

Подведем итог. Состояние с максимумом энтропии наделено следующими свойствами: оно наиболее

- 1) вероятно;
- 2) симметрично;
- 3) устойчиво;
- 4) хаотично.

Интересно отметить, что как в древней китайской философии, так и в буддизме хаосу уделялось особое внимание.

**Китайская философия.** Хаос – Хунь-Тунь или Чи-ю переходит в Порядок – Хуан-Ди. Были и разрушители Порядка (космического или социального), например, некие злые духи Гун-Гун.

**Буддизм.** Существенной является периодичность развития миров. Время развития и существования каждого мира (а их больше, чем песчинок в Ганге) ограничено и распадается на несколько этапов. Эти этапы разделяются Хаосом. На каждом из этапов появляется Будда, восстанавливающий Порядок, и тогда может осуществиться (с его помощью) гармония людей с природой и друг с другом. Затем мир опять погружается в Хаос, до появления нового Будды.

Формулировка II начала принадлежит (в различных вариантах) ряду авторов: В. Томпсону (лорд Кельвину) – 1851 г., В. Оствальду – 1851 г., Р. Клаузиусу – 1850 и 1865 гг., К. Каратеодори – 1909 г. Однако значительно раньше ко многим интересным выводам пришел С. Карно. Для постижения «как делается наука» целесообразно узнать о феномене С. Карно. Этот материал можно прочитать в, пожалуй, самом интеллигентном вузовском учебнике «Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем», написанном И.А. Квасниковым, влияние которого на одного из авторов (Ю.П. Хапачев), учившего, будучи студентом, одноименный курс по его конспектам лекций, поистине огромно и неопределимо.

В науке, в отличие от искусства, все, что должно быть найдено, будет найдено. Научные результаты, как правило, дублируются в той или иной мере несколькими учеными. В этом смысле познание остановить нельзя. Другое дело гуманитарная культура: литература, живопись, музыка и т.д. Здесь каждый результат неповторим в принципе. «Барышню-крестьянку» мог написать только А.С. Пушкин, вальсы Ф. Шопена – только Ф. Шопен, «Войну и мир» – только Л.Н. Толстой. Страшно себе даже представить, что было бы, погибни А.С. Пушкин на одной из своих ранних дуэлей (а их, с его характером, было достаточно много), пролети ядро на четвертом бастионе чуть левее или правее, и не было бы поручика Л.Н. Толстого. Случись подобные трагедии преждевременно и с другими представителями искусства, у нас не было бы целого мира, на котором выросли и жили и живут многие поколения.

От малых причин бывают  
великие последствия...

Козьма Прутков

**Лекция 10. НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ.  
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР.  
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КРИТЕРИЙ ЭВОЛЮЦИИ  
ГЛЕНСДОРФА–ПРИГОЖИНА**

До середины XX века спор между представителем науки, атеистом и представителем религии о «происхождении нового» был бы формально в пользу последнего. Ведь действительно, представитель религии мог констатировать, что в науке есть закон сохранения (Вишну), есть закон возрастания энтропии, т.е. закон смерти (Шива), но нет никакого закона, объясняющего, как может появиться что-то принципиально новое. Честный представитель науки должен был бы с этим согласиться. Но этого мало, вплоть до 70-х годов XX века можно было услышать достаточно «логичную» критику учения Ч. Дарвина. Подсчитывали, что если эволюция видов идет случайно, то на появление человека из простейших организмов просто не хватит времени, так как это больше, чем возраст нашей Земли. Вывод был однозначен – необходимо присутствие Творца, как при этом его называть, не столь уж важно. И, тем не менее, теологи в этом споре были не правы. Во второй половине XX века оформилось учение о возможности появления принципиально нового упорядоченного состояния из хаоса. И это новое спонтанное возникновение когерентных, *диссипативных* структур из исходного хаотического состояния названо *самоорганизацией*. Оказалось, что для этого должны выполняться **четыре основных необходимых условия: система должна быть открытой, нелинейной и находиться вдали от состояния равновесия, в системе должны быть обратные связи**. Чтобы разобраться в этом непростом вопросе, приведем вначале краткую историческую справку о некоторых основных «виновниках» этого глобального для нашего века учения.

**Экскурс в историю открытых систем**

XIX век. Теория временной эволюции газа в замкнутой системе (Л. Больцман). Теория устойчивости динамических систем (А. Пуанкаре и А.М. Ляпунов). Первый шаг в теории эволюции открытых биологических систем (Ч. Дарвин). Весьма характерно, что, несмотря на достижения в области термодинамики и электромагнетизма, Больцман считал XIX век веком Ч. Дарвина, настолько высоко он оценил принцип биологической эволюции. На чем же был основан такой вывод Л. Больцмана? Дело, видимо, в том, что Л. Больцман был одним из немногих в то время физиков, кто первым понял важность открытия Ч. Дарвина с позиций теории эволюции открытых неравновесных систем. Таким образом, уже на рубеже XX века стало ясно, что развитие теории неравновесных процессов в физических и биологических системах является одной из важнейших задач естествознания.

XX век. Первый шаг в теории неравновесных процессов был сделан А. Эйнштейном, М. Смолуховским и П. Ланжевеном – они создали теорию брауновского движения (английский ботаник Р. Браун впервые в 1827 г. наблюдал это явление). Причина брауновского движения – толчки со стороны молекул жидкости, т.е. это открытая система. (В отечественной литературе это движение часто неправильно называют броуновским).

Согласно кинетическому уравнению Л. Больцмана, средняя энергия частиц газа в процессе эволюции сохраняется. Это условие необходимо, чтобы в процессе эволюции к равновесному состоянию энтропия, а с ней и степень хаотичности, возрастали. Отсюда следует утверждение, известное как *H*-теорема Л. Больцмана, согласно которой энтропия в необратимых процессах не может убывать. Средняя же энергия брауновских частиц в процессе эволюции не сохраняется,

и *H*-теорема Л. Больцмана уже не справедлива. Заметим, что по уравнению Л. Больцмана сохраняется не точное значение энергии, а лишь ее среднее значение. Таким образом, возможны флуктуации энергии, т.е. система Л. Больцмана в принципе тоже открытая.

В XX веке колоссальный вклад в науку об открытых системах внесли также и математики, вначале упомянутые А.М. Ляпунов, А. Пуанкаре, а позднее А.А. Андронов, А.Н. Колмогоров и Н.С. Крылов. В 1957 г. появилась работа А.Н. Колмогорова об энтропии динамических систем, которую можно считать предтечей науки о самоорганизации. В последние годы работами ряда авторов Брюссельской школы и прежде всего нобелевского лауреата И.Р. Пригожина была развита термодинамика сильно неравновесных систем. Цель и задачи нашего курса не позволяют подробно комментировать ни результаты работ основоположников учения, ни перечислять всех ученых, сыгравших роль в его становлении.

Еще раз напомним, что открытые системы обмениваются с окружающими телами энергией, частицами и (или) информацией. В открытых системах возможно образование **диссипативных структур**. Сложность открытых систем предопределяет существование в них кооперативных (когерентных) движений большого числа частиц, отсюда термин – **синергетика**, введенный Г. Хакеном. Чтобы понять некоторые достаточно общие закономерности возникновения диссипативных структур в процессе самоорганизации, рассмотрим наиболее наглядный пример.

**Ячейки Бенара.** Представим себе слой жидкости между двумя горизонтальными параллельными плоскостями, линейные размеры которых значительно превосходят толщину слоя жидкости. Если жидкость изолирована, то на нее не действуют никакие внешние силы (кроме сил гравитации) и не происходит обмена частиц, то она произвольно долго пребывает в состоянии равновесия. Это состояние характеризуется полной макроскопической тождественностью различных частей жидкости вне зависимости от их расположения и расстояния между ними. Поэтому, если не принимать во внимание границы, то жидкость внутри нашего «аквариума» однородна и изотропна, а значит, состояние обладает максимумом симметрии. Если создать в такой системе разность температур между верхней ( $T_1$ ) нижней ( $T_2$ ) поверхностями путем непрерывного подвода тепла, то тем самым мы выведем систему из состояния равновесия. Пока разность температур  $\Delta T = T_1 - T_2$  мала, в системе вследствие теплопроводности установится стационарное состояние, характеризуемое практически линейным изменением температуры, а с ней и плотности, и давления. Однако, как только разность температур превысит некоторое критическое значение  $\Delta T > \Delta T_{кр}$ , мы увидим, как скачком устанавливается принципиально новое состояние. В жидкости образовались ячейки, называемые ячейками Бенара (рис. 10). В каждой ячейке происходит конвекционное вращение жидкости, причем, если смотреть вдоль горизонтальной оси, то направление вращения жидкости в двух соседних ячейках последовательно чередуется: то по, то против часовой стрелки (рис. 10).

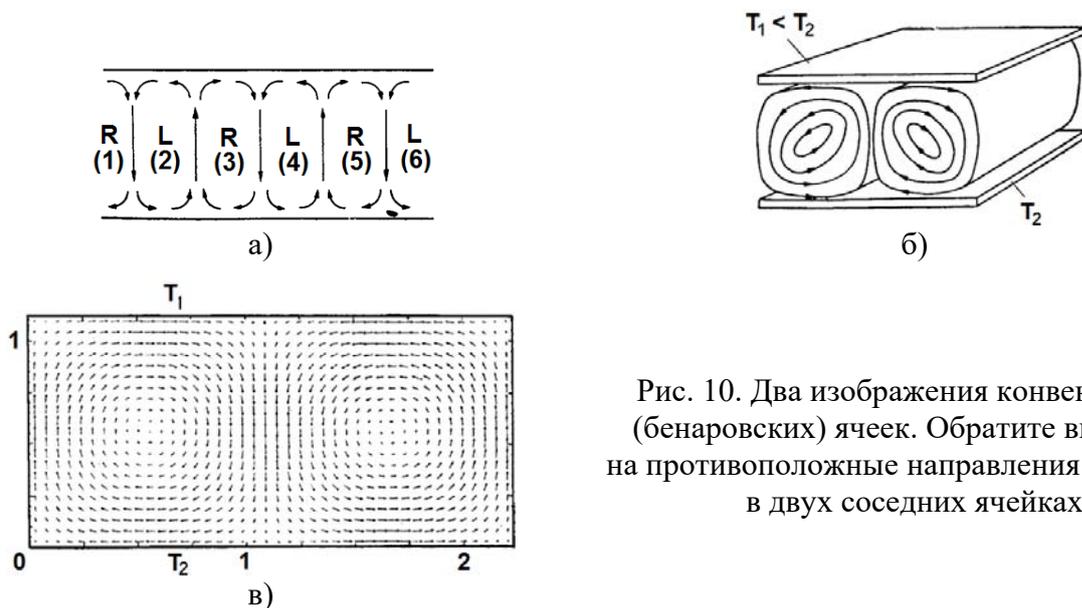


Рис. 10. Два изображения конвективных (бенаровских) ячеек. Обратите внимание на противоположные направления вращения в двух соседних ячейках

Таким образом, происходит качественный переход от бесструктурной однородной и изотропной системы к структурированной, т.е. упорядоченной, сопровождающийся нарушением (уменьшением) симметрии пространства (вспомните наш разговор о симметрии в лекции 3, пример 1). Важно, что этот переход не плавный, а осуществляется скачком, причем, при повторении подобного эксперимента принципиально невозможно предсказать направление вращения жидкости в ячейке. Подобная ситуация является существенной особенностью образования диссипативных структур. Иными словами, в процессе самоорганизации система может реагировать на внешнее ограничение различными способами. С точки зрения развитой математикой теории динамических систем, это означает, что при одних и тех же значениях управляющих системой параметров возможно несколько различных решений, их называют **бифуркационными**. Для иллюстрации рассмотрим простейшую механическую аналогию бифуркации.

На рис. 11 шарик катится по наклонному желобу с раздваивающимся профилем (ущелье, разделенное на два горой). Направление движения шарика после критической точки  $\lambda_c$  (место раздвоения желоба) предсказать заранее принципиально невозможно. После резкого перехода критического состояния (скачок из  $a$  в  $b_1$  или в  $b_2$ ) система менее симметрична. Таким образом, **общим свойством** всех **диссипативных структур является: понижение симметрии, бóльшая упорядоченность и резкое их (скачком) возникновение**. Эти свойства проявляются в явлениях самоорганизации и в других областях: химии, биологии, а также на социальном уровне.

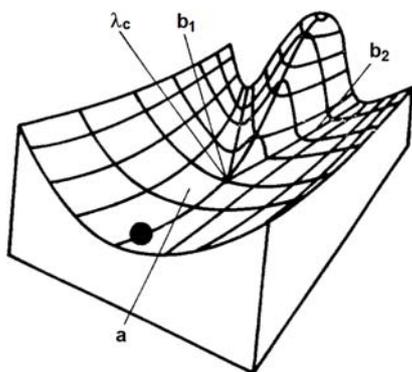


Рис. 11. Механическая иллюстрация бифуркации

Существуют три вида диссипативных структур: **пространственные** (ячейки Бенара, кольца Сатурна и т.д.), **временные** (автокаталитическая реакция Белоусова – Жаботинского) и **пространственно-временные**, возникающие в нелинейных химических реакциях, идущих в тонком слое, при наличии локальных флуктуаций концентрации и диффузии реагентов.

Природа самоорганизации определяется тем, что вдали от состояния равновесия из-за нелинейности система является неустойчивой (в смысле Ляпунова) и поэтому даже малые флуктуации могут привести к новому состоянию, для которого характерным является совокупное движение большого числа частиц. Общая теория процессов самоорганизации строится на основе **универсального принципа эволюции Гленсдорфа-Пригожина**, детальное обсуждение которого выходит за рамки нашего курса. Здесь же только отметим наиболее существенное. Несмотря на то, что величина скорости производства энтропии  $P$  не имеет какого-либо общего свойства, в нелинейных системах часть ее  $P_X$ , связанная с изменением термодинамических сил  $X$ , удовлетворяет неравенству общего характера:

$$\delta_X P / \delta t \leq 0. \quad (21)$$

Это неравенство ввиду большой его общности (не зависит ни от каких предположений о характере связи между силами и потоками в условиях локального равновесия) и называется универсальным принципом эволюции Гленсдорфа-Пригожина. Согласно этому принципу, в любой неравновесной нелинейной системе с фиксированными граничными условиями процессы развиваются в том направлении, при котором скорость изменения производства энтропии, обусловленная изменением термодинамических сил, уменьшается. Знак равенства относится к стационарному процессу.

Согласно Н.Н. Моисееву, можно дать его упрощенную формулировку (для «домохозяек»). **При прочих равных условиях в системе реализуются такие формы организации или поведения объектов, ее составляющих, при которых данная система поглощает извне минимальное количество энергии (для неживой природы) или использует энергию максимально экономно (для живой природы).** Заметим, что в ряде случаев принцип Моисеева дает неверные результаты, не совпадающие с принципом Глендсдорфа–Пригожина.

**Детерминизм, неопределенность и самоорганизация динамических систем.** В процессе борьбы Л. Больцмана с оппонентами он вынужден был прийти к заключению, что необратимость, следующая из второго начала термодинамики, несовместима с обратимыми законами динамики. Таким образом, «скрепя сердце», Л. Больцман сохранил верность динамике и заключил: «Эволюция системы, запрещаемая термодинамикой не невозможна, а всего лишь невероятна». А. Бергсон фактически «закрепил» неудачу Л. Больцмана, считая, что физика обречена на отрицание времени (точнее, стрелы времени), и лишь повторение одного и того же приводит к становлению.

Если для Л. Больцмана подобный результат являлся драмой, то для А. Бергсона он стал отправной точкой его философии для обновления метафизики. Несмотря на различные мотивы оба они сошлись в одном и том же. Как Л. Больцман, так и А. Бергсон были убеждены, что «приговор», вынесенный классической механикой, окончателен. С этого момента (а на самом деле гораздо ранее – со времен И. Ньютона) и фактически до середины XX века все вроде бы подтверждало правоту физика и философа. Ведь на самом деле и теория относительности, и квантовая теория также отрицали «стрелу времени». Все было бы так, но вмешалась математика, а вернее та ее часть, которая называется механикой динамических систем, или просто динамикой. Этому драматическому событию мы обязаны трудами многих ученых первой величины, и в первую очередь работам А.Н. Колмогорова, В.И. Арнольда, Ю. Мозера, Я.Г. Синая и др.

Свидетельством революционного изменения представлений о детерминизме механических систем является заявление президента Международного союза теоретической и прикладной механики сэра Д. Лайтхилла, сделанное с опозданием, только в 1986 г. Приведенный ниже отрывок взят из [5]: **«Здесь я должен остановиться и снова выступить от имени широкого всемирного братства тех, кто занимается математикой. Мы все глубоко сознаем сегодня, что энтузиазм наших предшественников по поводу великолепных достижений ньютоновской механики побудил их к обобщениям в этой области предсказуемости, в которые до 1960 г. мы все охотно верили, но которые, как мы теперь понимаем, были ложными. Нас не покидает коллективное желание признать свою вину за то, что мы вводили в заблуждение широкие круги образованных людей, распространяя идеи о детерминизме систем, удовлетворяющих законам движения Ньютона, – идеи, которые, как выяснилось после 1960 г., оказались неправильными».**

Сделанное признание вызвано экспоненциальным разбеганием траекторий сильно неустойчивых хаотических систем, описываемом положительными показателями Ляпунова. Однако, это еще не все, чем вызвано столь необычное признание. На одном из аспектов данной проблемы, связанных с самоорганизацией, мы сейчас и остановимся.

Основной проблемой в динамике является проблема интегрирования. Поскольку мы предполагаем уравнениями движения Ньютона или Гамильтона, то естественно, хотелось бы иметь явные аналитические выражения для переменных, т.е. координат или скоростей, как функций времени. В конце XIX века А. Пуанкаре показал, что не все динамические системы похожи друг на друга, как до него считалось. Оказывается, существуют системы двух типов: интегрируемые и неинтегрируемые. Для первых мы можем исключить взаимодействие и свести задачу к задаче о свободном движении. Для вторых – неинтегрируемых необходимо отказаться от описания в терминах траекторий (т.е. фактически детерминизма) и перейти к вероятностному описанию.

Посмотрим, как это получается в рамках гамильтоновой динамики, где центральной, основополагающей величиной является функция Гамильтона  $H = E + U$ , или гамильтониан, равный сумме кинетической  $E$  и потенциальной  $U$  энергий. Для консервативных систем, где гамильтониан  $H$  явно от времени не зависит [7], он выражается через обобщенные  $p_i$  импульсы и координаты  $r_i$  следующим образом:

$$H = E(p_1, \dots, p_N) + U(r_1, \dots, r_N). \quad (22)$$

Эта запись гамильтониана в так называемых канонических переменных, где кинетическая энергия зависит только от импульсов, а потенциальная только от координат частиц. Каноническое представление уравнений движения считается по праву апофеозом классической динамики, поскольку в этом представлении они выражаются через единственную величину – гамильтониан.

Чтобы понять, что такое интегрируемая система, мы используем самый простой пример, приводимый в каждом учебнике по теоретической механике. Это одномерный гармонический осциллятор. Для него гамильтониан имеет вид:

$$P = p^2/2m + kr^2/2, \quad (23)$$

где  $k$  – некая упругая постоянная,  $m$  – масса.

Для данной системы существует, оказывается, так называемое каноническое преобразование, при котором гамильтониан принимает вид:

$$H = \omega \cdot J, \quad (24)$$

где  $J$  – переменная действия, а  $\omega$  определяется через угловую переменную  $\alpha$  следующим образом:  $\alpha = \omega t + \text{const}$ . Таким образом, движение выражается теперь в терминах *циклических переменных*  $J$  и  $\alpha$ .

Этот результат очень характерен. В новых переменных действие-угол, гамильтониан зависит только от нового импульса – переменной действия. В результате  $dJ/dt = -\partial H/\partial \alpha = 0$ . То есть переменная действия  $J$  является инвариантом движения. Аналогичный результат получается для свободной частицы, когда  $dp/dt = -\partial H/\partial r = 0$ . Как видим, в данном случае уравнения У. Гамильтона легко интегрируются, поскольку отсутствует потенциальная энергия.

Возможность исключить потенциальную энергию с помощью канонического преобразования к новым *циклическим переменным* – это и есть основная характеристика интегрируемых динамических систем в смысле А. Пуанкаре. Значит, для интегрируемых систем после преобразования гамильтониана в соответствующий вид отсутствует член с потенциальной энергией, т.е. фактически исключается взаимодействие между частицами.

До 1889 г. предполагалось (правда, молчаливо), что все динамические системы интегрируемые, а проблемы, связанные с задачей трех и более тел – чисто технические, вычислительные. Однако А. Пуанкаре в 1889 г. показал, что в общем случае невозможно получить каноническое преобразование, сохраняющее вид гамильтоновых уравнений, которое приводило бы к *циклическим переменным* причем, большинство систем как раз неинтегрируемые.

В чем же смысл столь сильного математического утверждения? Что было бы если бы А. Пуанкаре доказал интегрируемость всех динамических систем?

Это означало бы, что все без исключения динамические системы с любым числом частиц по-существу изоморфны движению свободных, не взаимодействующих никак друг с другом частиц. Это означало бы, что эти частицы никогда не могут выступать как коллектив, то есть когерентно! А это значит, что **не может быть самоорганизации в принципе! Не может, значит, в интегрируемом мире возникнуть и жизнь!**

Однако этого мало. А. Пуанкаре не только доказал неинтегрируемость, но и указал причину неинтегрируемости систем. Это существование резонансов между степенями свободы и возникновение проблемы так называемых «малых знаменателей».

Надо сказать, что эта проблема была известна в астрономии и до А. Пуанкаре. Но именно его теорема показала, что основная трудность, связанная с расходимостью (малые знаменатели стремятся к нулю, а обратная им величина стремиться к бесконечности) в решении задач динамики не может быть устранена и делает невозможным введение циклических переменных для большинства динамических систем, начиная с системы трех тел.

Вот как эту проблему в свое время оценивал М. Борн: «Было бы весьма странно, если бы Природа укрылась от дальнейшего прогресса познания за аналитическими трудностями проблемы многих тел».

С появлением работ А.Н. Колмогорова, продолженных В.И. Арнольдом и Ю. Мозером и появлением КАМ теории (Колмогорова – Арнольда – Мозера), проблема неинтегрируемости и малых знаменателей стала рассматриваться как отправная точка нового развития динамики, и в том числе динамики как когерентных движений, так и хаотических.

КАМ теория рассматривает влияние резонансов на траектории. В разных точках фазового пространства динамической системы существуют резонансы, в других их нет. Резонансы соответствуют рациональным соотношениям между частотами. Поскольку (это классический результат теории чисел) мера рациональных чисел по сравнению с мерой иррациональных чисел равна нулю, то резонансы встречаются крайне редко, большинство точек в фазовом пространстве нерезонансные. Резонансы приводят к периодическим движениям, отсутствие резонансов – к квазипериодическому движению. Следовательно, периодические движения, как правило, исключение из общего случая движений более сложного вида.

Основной результат КАМ теории состоит в том, что существует два принципиально различных типа траекторий. Первые – слегка изменившиеся квазипериодические траектории. Вторые – стохастические траектории, возникающие при разрушении резонансов. КАМ теория не приводит к динамической теории хаоса, но она показывает, что при малых значениях некоторого параметра получается промежуточный режим, в котором сосуществуют траектории двух типов – регулярные и стохастические.

Если теперь обратиться к И.Р. Пригожину, то, как уже было отмечено ранее, из хаотического состояния возможно появление регулярной структуры, то есть возникает самоорганизация.

Остановимся еще на одной важной проблеме. Хорошо известно, что в области естественных наук наиболее фундаментальные открытия совершаются неожиданно. В начале нашего курса мы уже обсуждали, что в ряде случаев происходит научный поиск некоего «А», а в результате находят совершенно неожиданное – «В». Чем неожиданней это «В», тем более значим новый результат. В области математических открытий все обстоит аналогичным образом. В качестве примера приведем с некоторыми купюрами отрывок из статьи В.И. Арнольда, посвященной А.Н. Колмогорову.

«Андрей Николаевич заметил, что в «интегрируемых» задачах надлежащим образом определение фазы на торе меняется со временем равномерно. Он же поставил себе вопрос: так ли это, если система на торе не интегрируема, а лишь имеет интегральный инвариант? Этот вопрос он решил в работе 1953 г. о системах на торе – первой, где появляются малые знаменатели. Вывод А.Н. таков: почти всегда можно ввести равномерно меняющиеся со временем фазы, но иногда возможно перемешивание.

Замечание о перемешивании, относящееся к патологическому случаю, не кажется особенно важным. Но именно оно-то («благодаря») и стало источником знаменитой работы А.Н. Колмогорова о малых знаменателях, опубликованной в 1954 г., где доказано сохранение инвариантных торов при малом изменении функции Гамильтона.

Рассуждения А.Н. Колмогорова, упомянутые им в докладе на Международном математическом конгрессе в Амстердаме в 1954 г., состояли в следующем. В интегрируемых системах движение по инвариантным торам всегда условно-периодично. Следовательно, перемешивание в интегрируемых системах не встречается (*а значит, не может быть никакой самоорганизации*). Чтобы узнать, имеет ли открытое им явление механические приложения, А.Н. Колмогоров решил отыскать движение по торам в неинтегрируемых системах, где в принципе перемешивание могло бы наблюдаться. Естественно начать с теории возмущений, рассмотрев систему, близкую к интегрируемой. Различные варианты теории возмущений многократно обсуждались в небесной механике, а потом в ранней квантовой механике. Но все эти теории возмущений приводят к расходящимся рядам. А.Н. Колмогоров понял, что расходимость можно преодолеть, если вместо разложений по степеням малого параметра использовать метод Ньютона в функциональном пространстве. Таким образом, «метод ускоренной сходимости» А.Н. Колмогорова был придуман вовсе не ради (*но «вопреки»*) тех замечательных приложений в классических проблемах механики, к которым он приводит, а ради исследования возможности реализации специальной теоретико-множественной патологии в системах на двумерном торе.

Поставленную им себе задачу о реализации перемешивания на слабо возмущенных инвариантных торах А.Н. Колмогоров при этом не решил («А» не найдено), так как на найденных им торах его метод автоматически строит равномерно меняющиеся при движении фазовой точки угловые координаты. Вопрос о перемешивании, из которого выросла вся работа ученого, остается нерешенным и сегодня. Значение этого технического вопроса (поиск «А») по сравнению с полученными результатами (найденно неизвестное «В») ничтожно. Сейчас о нем уже никто и не вспоминает, но новая математика возникла при уточнении мелких технических деталей предшествующих работ. Уже из этого ясно, что планирование фундаментальных исследований – бюрократическая бессмыслица, а зачастую – просто обман».

### Н.В. Устойчивость перевёрнутого маятника, швейная машинка Капицы и бритва «Нева» Арнольда.

Приведённая задача возникла в теории ускорителей. Один из проектов основывался на устойчивости перевёрнутого маятника с вертикально колеблющейся точкой подвеса (вопрос об устойчивости кругового движения ускоряемых частиц сводился к такому же уравнению).

П.Л. Капица предложил прежде чем тратить миллионы на строительство ускорителя, экспериментально проверить вывод о маятнике. Он переделал электрическую швейную машинку так, что её вращение доставляло вертикальные колебания точки подвеса маятника. Маятник устойчиво стоял вверх ногами, а при небольшом отклонении в сторону начинал качаться вокруг этого вертикального положения, как качается обычный маятник около своего нижнего положения равновесия.

Когда П.Л. Капица был председателем оргкомитета физической олимпиады школьников, а В.И. Арнольд – математической, причём оба оргкомитета заседали (в Институте физпроблем) совместно, П.Л. показал членам этих оргкомитетов свою швейную машинку с маятником, сохранившуюся в соседнем кабинете как реликвия.

Не имея электрической швейной машинки, В.И. Арнольд приспособил для создания вертикальных колебаний точки подвеса маятника электробритву «Нева» (вибрационного типа). Верхнее положение равновесия оказалось неустойчивым, так как длина маятника  $l = 20$  см была слишком велика. Пришлось проделать (линеаризованные) вычисления. После уменьшения длины маятника до 10 см его колебания (около верхнего положения равновесия) стали устойчивыми, и тогда В.И. Арнольд доказал эту устойчивость при помощи теории КАМ (уже с 1961 г располагавшей нужной общей теоремой об устойчивости эллиптических неподвижных точек, обосновывающей возможность судить об устойчивости нелинейной системы по её линеаризации).

Видеозапись работы той самой электробритвы есть на сайте «Математические этюды» (<http://etudes.ru>). Ускорители были к тому времени уже построены, так как физиков удовлетворила экспериментальная проверка устойчивости в опытах Капицы со швейной машинкой (несмотря на то, что они не располагали ещё математической теорией КАМ, строго доказывающей эту нетривиальную нелинейную устойчивость).

Видео – Маятник Арнольда на бритве «Нева»

Вставка. Язык сложного.

*Пусть точка подвеса маятника совершает колебания в вертикальном направлении,  $z = a \cos(\Omega t)$ . Если частота  $\Omega$  этих колебаний достаточно велика, то перевёрнутый вверх ногами маятник (на рисунке  $\varphi = 0$ ) будет устойчиво стоять вверх ногами.*



### 1. Флуктуации. Аддитивные и неаддитивные величины

Состояние реальных систем никогда не остается постоянным, так как они контактируют со сложным и даже непредсказуемым окружением. Это окружение непрерывно или порциями передает системе небольшие количества вещества, импульса или энергии, что и делает невозможным контроль, по крайней мере, ряда параметров состояния со сколь угодно высокой степенью точности. Отсюда в экспериментальных исследованиях появились выражения «экспериментальная погрешность», или «доверительный интервал».

Это вмешательство внешней среды во внутреннюю динамику системы выражается в несовпадении мгновенного состояния системы  $X(t)$  со стационарным  $X$ , т.е.:

$$X(t) = X + x(t),$$

где величина  $x(t)$  называется возмущением.

Рассмотрим иную точку зрения на проблему возмущений. Термодинамика рассматривает макроскопические системы, состоящие из огромного числа взаимодействующих между собой микробъектов. Это означает, что микроскопическое описание таких систем возможно только в статистическом смысле. Отсюда следует, что переменные (параметры), с которыми мы имеем дело в термодинамике, представляют собой либо средние значения по мгновенным состояниям на достаточно большом промежутке времени (средние по времени), либо наиболее вероятные значения, которые могут приниматься этими переменными (средние по ансамблю). Поэтому, если бы мы могли мгновенно измерить параметры состояния системы, то полученные значения, вообще говоря, отличались бы от средних. Эти отклонения являются неотъемлемой сущностью макроскопической системы, генерируются ею постоянно и называются флуктуациями. Написанная выше формула справедлива и в данном случае, однако при этом нужно понимать, что возмущение  $x(t)$  теперь обусловлено внутренней динамикой системы.

Таким образом, мы понимаем под флуктуациями случайные, нерегулярные, самопроизвольные отклонения значений макроскопических характеристик системы от их средних значений. Сами же флуктуации обязаны микроскопическому движению частиц статистической системы.

Для характеристики отклонения величины  $f$  от ее среднего значения  $\langle f \rangle$  используются два параметра:

1. Дисперсия (среднеквадратичное отклонение  $f$  от равновесного среднего  $\langle f \rangle$ ):

$$\langle (\Delta f)^2 \rangle = \langle (f - \langle f \rangle)^2 \rangle = \langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2 = 1/\lambda. \quad (24)$$

2. Относительная (безразмерная) флуктуация:

$$\delta_f = (\langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2)^{1/2} / \langle f \rangle. \quad (25)$$

Статистическая система, находящаяся в равновесии, описывается некоторым законом распределения случайных величин. Наиболее часто в физических системах (но и не только в них) реализуется так называемый нормальный закон распределения (закон Гаусса). Причина этого состоит в следующем. Оказывается, что если значения, которые принимает случайная величина, зависят от большого числа различных факторов  $M$ , каждый из которых в отдельности мало влияет на эту величину, а ее существенное изменение возможно, когда одновременно меняется большое число параметров  $K \leq M$ , то рассматриваемая величина подчиняется нормальному закону распределения. Это утверждение представляет собой частный случай центральной предельной теоремы А.М. Ляпунова, доказываемой в теории вероятностей.

Итак, если вероятность обнаружить систему в интервале  $(\xi, \xi + d\xi)$  задается распределением Гаусса:

$$W(\xi)d\xi = (\lambda/2\pi)^{1/2} \exp(-\lambda\xi^2/2)d\xi, \quad (26)$$

то дисперсия вероятности  $\xi$ :

$$\langle (\Delta \xi)^2 \rangle = (\lambda/2\pi)^{1/2} \int \exp(-\lambda\xi^2/2)d\xi. \quad (27)$$

Таким образом, вероятность  $W(\xi)$  можно записать через дисперсию в виде:

$$W(\xi) \sim \exp(-\xi^2/2\langle (\Delta \xi)^2 \rangle). \quad (28)$$

Внутренние параметры ТД системы разделяют на аддитивные (экстенсивные) и неаддитивные (интенсивные). Параметры, зависящие от числа частиц в системе  $N$  (энергия, энтропия, объем...), естественно, аддитивные. Параметры, не зависящие от числа частиц в системе (давление, температура...), естественно, неаддитивные. Можно показать, что для гауссового распределения для **аддитивной** величины  $\xi$  дисперсия:

$$\langle (\Delta\xi)^2 \rangle \sim N, \text{ а относительная флуктуация } \delta_\xi \sim 1/\sqrt{N}. \quad (29)$$

Для **неаддитивной**

$$\langle (\Delta\xi)^2 \rangle \sim 1/N, \text{ а относительная флуктуация } \Delta\xi \sim 1/\sqrt{N}. \quad (30)$$

Система может отклоняться от своего стандартного состояния  $X$  четырьмя различными способами.

1. Отклонение от стандартного состояния остается ограниченным на любом промежутке времени. В математике этот случай соответствует устойчивости по Ляпунову и, если ввести понятие **фазового пространства (пространства состояний)** системы, то устойчивое состояние по Ляпунову будет соответствовать орбитальной устойчивости в фазовом пространстве.

2. Состояние системы стремится к стандартному состоянию по мере стремления времени к бесконечности. Это асимптотическая устойчивость. В терминах фазового пространства этому случаю соответствует асимптотическая орбитальная устойчивость. Такое состояние обязательно подразумевает необратимость, т.е. оно не применимо к консервативным системам. Диссипативные системы устойчивы к возмущениям, действующим на них, что обеспечивает воспроизводимость режима, называемого аттрактором, о котором мы говорили выше.

3. Состояние системы не остается в окрестности стандартного состояния. Про это состояние говорят, что оно неустойчиво. В фазовом пространстве такому состоянию соответствует случай орбитальной неустойчивости. Неустойчивые состояния могут быть как в консервативных, так и в диссипативных системах.

4. Состояние системы остается в некоторой окрестности стандартного состояния, если возмущение не превышает некоторой величины. Это состояние называется локально устойчивым. Однако глобальной устойчивости системы, соответствующей глобальному аттрактору в фазовом пространстве, в этом случае нет.

## 2. Фракталы, или странные аттракторы

Помимо упомянутых выше способов реагирования системы на внешние возмущения существует еще одна возможность, приводящая к принципиально иному характеру поведения системы – переходу к хаосу. Обычный аттрактор (неподвижные точки или предельные циклы), представляющий собой некоторое множество точек в фазовом пространстве, отражает стремление системы к упорядоченному, предсказуемому движению. Существенно, что при этом размерность аттрактора обязательно меньше размерности фазового пространства, поскольку это множество остается неизменным в процессе движения. Обычные аттракторы в 3-мерном фазовом пространстве имеют размерность ноль (неподвижная точка, единица (линия), двойку (поверхность)). В математике известны, однако, объекты с размерностями, промежуточными между точкой и линией, между линией и поверхностью, между поверхностью и объемом. Такие множества названы множествами **Мандельброта, или фракталами**.

Приведем наиболее простой из таких примеров фрактала – так называемое множество **Кантора**. Рассмотрим отрезок  $[0, 1]$  на числовой оси. Разобьем этот отрезок на три равные части и выбросим среднюю. После этого оставшиеся отрезки вновь разделим на три равные части и выбросим среднюю. Неограниченно продолжим эту процедуру. Длина всех выброшенных частей составляет бесконечную геометрическую прогрессию со знаменателем  $2/3$ , а начальный элемент имеет длину  $1/3$ . В итоге длина всех выброшенных частей равна 1. Однако в исходном отрезке сохранилось бесконечно много точек, например,  $0, 1, 1/4$  и т.д. Но это множество точек не имеет собственной длины, но имеет топологическую размерность 0, и является нигде не плотным совершенным множеством, но оно континуально. Однако размерность такого множества не равна нулю.

Для того, чтобы найти размерность этого множества, обратимся к соотношению, определяющему размерность  $d$  всех известных «топологических» многообразий:

$$d = \lim (\ln N_\varepsilon) / \ln(1/\varepsilon) \text{ при } \varepsilon \rightarrow 0, \quad (31)$$

где  $\varepsilon$  – длина отрезка, составляющая минимальный «объем» множества, а  $N_\varepsilon$  – минимальное число элементарных объемов, необходимое для полного покрытия данного множества.

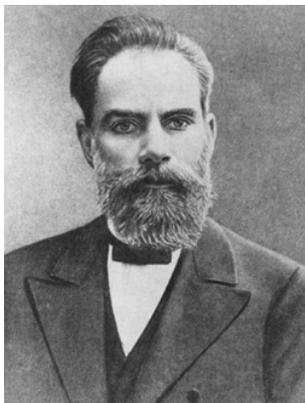
Поясним работу этой формулы примером. Для того чтобы закрыть квадрат со стороной 1, нужно  $(1/\varepsilon)^2$  квадратов со стороной  $\varepsilon$ . Таким образом, имеем  $d = [\ln(1/\varepsilon)^2 / \ln(1/\varepsilon)] = 2$ , что собственно заранее и предполагалось.

В случае множества Кантора имеем:

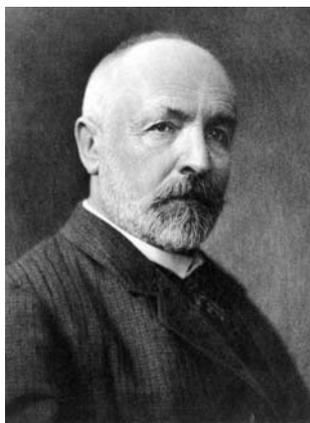
$$d = \ln 2^n / \ln 3^n = \ln 2 / \ln 3 \approx 0,63, \quad (32)$$

то есть множество Кантора имеет промежуточную размерность между точкой ( $d = 0$ ) и линией ( $d = 1$ ).

Подобного рода множества – фракталы, или **странные аттракторы**, реализуют хаотическое поведение системы, когда в ее поведении отсутствует всякого рода детерминизм и упорядоченность, и можно говорить о вероятностном описании.



**Алекса́ндр Миха́йлович Ляпуно́в** (25 мая (6 июня) 1857, Ярославль – 3 ноября 1918, Одесса) – русский математик и механик, академик Петербургской Академии наук с 1901 года, член-корреспондент Парижской академии наук, член Национальной академии деи Линчеи (Италия) и ряда других академий наук и научных обществ.



**Геор́г Ка́нтор** (нем. Georg Ferdinand Ludwig Philipp Cantor, 3 марта 1845, Санкт-Петербург – 6 января 1918, Галле (Заале)) – немецкий математик. Он наиболее известен как создатель теории множеств, ставшей краеугольным камнем в математике. Кантор ввёл понятие взаимно-однозначного соответствия между элементами множеств, дал определения бесконечного и вполне упорядоченного множеств и доказал, что действительных чисел «больше», чем натуральных. Теорема Кантора фактически утверждает существование «бесконечности бесконечностей». Он определил понятия кардинальных и порядковых чисел и их арифметику. Его работа представляет большой философский интерес, о чём и сам Кантор прекрасно знал.



**Бену́а Мандельбро́т** (фр. Benoît B. Mandelbrot; 20 ноября 1924, Варшава – 14 октября 2010, Кембридж) – французский и американский математик, создатель фрактальной геометрии. Лауреат премии Вольфа по физике (1993). В 1975 году Мандельброт опубликовал свою работу «Какова длина побережья Великобритании?» – первое исследование фракталов. Понятие «фрактал» придумал сам Бенуа Мандельброт (от лат. fractus, означающего «сломаный, разбитый»). Используя находящиеся в его распоряжении компьютеры ИВМ, Мандельброт создал графические изображения, сформированные на основе множества Мандельброта. По словам математика, он не чувствовал себя изобретателем, несмотря на то, что никто до него не создавал ничего подобного.

«Удивительная способность организма концентрировать на себе «поток порядка», избегая таким образом перехода к атомному хаосу, – способность «пить упорядоченность» из подходящей среды, по-видимому, связана с присутствием «апериодических твердых тел» – хромосомных молекул. Последние, без сомнения, представляют наивысшую степень упорядоченности среди известных нам ассоциаций атомов (более высокую, чем у обычных периодических кристаллов)».

Э. Шредингер

«Что такое жизнь с точки зрения физики?»

### Лекция 11. КРИТЕРИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ ЖИВЫХ СИСТЕМ. ЭВОЛЮЦИЯ И ДЕГРАДАЦИЯ. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕСТРОЕК

Поскольку мы выяснили основные закономерности самоорганизации в открытых системах, представляет интерес сразу же рассмотреть их особенности для живых организмов, имея в виду их эволюцию. Дадим вначале предельно общее определение этого понятия. Под эволюцией будем понимать процесс изменения, развития в природе и обществе. В физических замкнутых (изолированных) системах, как мы уже обсуждали, эволюция приводит к равновесному состоянию с максимумом энтропии и максимальной степенью хаотичности («смерть»). В открытых системах можно выделить два класса эволюционных процессов.

1. Временная эволюция к неравновесному стационарному состоянию.

2. Процесс эволюции через последовательность неравновесных стационарных состояний, что происходит благодаря изменению *управляющих параметров*.

В принципе мы должны понимать, что *самоорганизация* и *деградация* – *два возможных варианта эволюции*, и чтобы их различать, необходимо ввести новый термин – *«норма хаотичности»*. Отклонение от нее («нормы») в ту или иную сторону, пользуясь медицинским языком, можно трактовать как «болезнь», т.е. деградацию, а значит, восстановление к исходному состоянию – это «лечение», т.е. самоорганизация.

Функционирование организма возможно лишь при некоторой норме хаотичности, которая отвечает существенно неравновесному состоянию, но точки отсчета от равновесного состояния (как, например, в простой физической системе) здесь не существует. Поэтому в биологии, экономике и социологии объективная информация об изменении степени хаотичности еще недостаточна, чтобы делать вывод о наличии процесса самоорганизации или деградации. Здесь и уместно пользоваться терминами «норма хаотичности» и «лечение».

Интересно отметить, что первые сведения об обсуждении эволюционных процессов можно найти еще у Платона. С тех пор, в той или иной мере эта проблема поднималась различными учеными. По нашим современным представлениям, для ее понимания требуется знать еще ряд терминов.

*«Динамический хаос»* – это состояние, которое означает, что в системе отсутствуют источники флуктуаций, источники беспорядка. В этом его отличие от *«физического хаоса»*.

Существуют два класса нелинейных систем – *динамические* и *стохастические* (статистические). В основе классификации лежит свойство *воспроизводимости* движения по заданным начальным условиям. В динамических системах реализуются воспроизводимые движения, а в стохастических – невозпроизводимые (диссипативные). Тем не менее, даже если нет случайных источников, и процесс формально воспроизводим, т.е. движение динамическое, оно может быть столь сложным, что результат оказывается фактически *непредска-*

**зумы.** Особенностью динамического хаоса является динамическая неустойчивость движения, которая выражается в сильной (экспоненциальной) расходимости близких в начальный момент траекторий. Даже в сравнительно простых динамических системах существуют чрезвычайно сложные движения, которые воспринимаются как хаотические (из-за невозможности предсказания результата). Математическое описание подобного сложного состояния приводит к понятию «**странный аттрактор**».

Динамическая неустойчивость может играть в открытых системах важную **конструктивную роль**. Приведем примеры, взятые нами с небольшими изменениями из статьи Ю.Л. Климонтовича.

Начнем с иллюстративного примера из социологии. Пусть некая международная конференция подошла к концу. Это начальное состояние для ее участников. Рассмотрим два возможных варианта их движения.

1. Участники и после ее окончания перемещаются вместе, не удаляясь друг от друга на значительное расстояние. Например, общий поезд из Кембриджа, где проходила конференция, в Лондон.

2. Участники разъезжаются порознь, кто куда – «экспоненциально разбегаясь». Иными словами, движение становится «динамически неустойчивым».

Возникает вопрос. Какой из этих двух вариантов движения способствует в большей мере использованию полученной на конференции новой информации? Первый вариант полезен в определенной мере, так как позволяет продолжить дальнейшее обсуждение вопросов конференции. Но, ясно, что именно второй вариант, когда имеет место «перемешивание траекторий» в большей мере способствует прогрессу науки. В этом случае участники быстрее передают информацию в различные места и разным слушателям. Этот пример демонстрирует, что динамическая неустойчивость и перемешивание могут и не привести к хаосу, а играть позитивную конструктивную роль.

Примеры из медицины приведем лишь в виде констатации результатов. Рассмотрим отклик живого организма на стресс. У **женских** (в основном) особей степень хаотичности **увеличилась** (степень порядка уменьшилась), у **мужских** (в основном) особей степень хаотичности **уменьшилась** (т.е. произошла некоторая упорядоченность). Возврат в исходное состояние, к «норме хаотичности», подразумевает «лечение». Для женщин это лечение сопровождается уменьшением хаотичности (т.е. имеет место процесс самоорганизации), а у мужчин – возрастанием хаотичности (т.е. фактически происходит деградация). Таким образом, оказывается, что для живого организма смысл понятий самоорганизация и деградация не имеет однозначной связи, соответственно, с увеличением (при самоорганизации) или, напротив, уменьшением (при деградации) степени упорядоченности.

Оказывается, что всего существует три типа «больных». Первый тип (мужской) – уменьшение степени хаотичности (избыточная упорядоченность), второй тип (женский) – не слишком большое увеличение степени хаотичности. Третий тип (суперженский) – значительное увеличение степени хаотичности. Вспомните, многие женщины от стресса впадают в истерику, для мужчин это крайне редко.

#### **«Мягкие» и «жесткие» математические модели**

Этот раздел является упрощенной и краткой «выжимкой» из брошюры, изданной к Всероссийской конференции «Математики и общество. Математическое образование на рубеже веков» (Дубна, 18–22 сентября 2000 г.), представляет собой текст доклада, прочитанного академиком В.И. Арнольдом в 1997 г. на семинаре при Президентском совете РФ. В докладе рассказано о применениях теории дифференциальных уравнений в таких науках, как экология, экономика и социология.

Примером жесткой модели является таблица умножения. Простейший пример мягкой модели – принцип «чем дальше в лес, тем больше дров». Возможность полезной математической теории мягких моделей открыта относительно недавно. Далее на простейших примерах будет показано, как эта теория может применяться в экономических, экологических и социологических моделях.

## 1. Математические модели перестройки

Перейдем теперь к еще одному очень важному разделу, формирующему в определенном смысле «нелинейное» мышление, так необходимое исследователям (да и не только им) в наше время. Примерно с 1970 г. в печати появились сведения о создании новой области математики, сопоставимой (как считали сами авторы) лишь изобретениям Ньютона, дифференциального и интегрального исчисления. Подобные прогнозы, конечно, оказались слишком преувеличены. Эта новая математика, названная теорией катастроф, возникла как симбиоз двух различных разделов математики: теории гладких отображений Х. Уитни и теории бифуркаций динамических систем А. Пуанкаре и А.А. Андронова. Под термином «катастрофы» понимают скачкообразные изменения, возникающие в виде внезапного отклика системы на плавное изменение внешних условий. В теории катастроф численно решаются различные задачи: от эмбриологии до экономики, и от геометрической и физической оптики до геологии. Существенно, что поскольку решения всегда численные, то нельзя сформулировать какие-либо общие закономерности катастроф. Однако частным случаем теории катастроф является теория перестроек, которая была создана задолго до нашей перестройки 1985 г. Вот в этой-то науке оказывается возможным сделать ряд важнейших качественных выводов, одинаковых для любой нелинейной системы.

Считается, что система находится в устойчивом состоянии, условно признанном «плохим», так как в пределах «видимости» существует более предпочтительное, «лучшее» состояние. Рассмотрим вначале ситуацию перестройки с точки зрения «домохозяйки». Как вы увидите, это не такой уж и плохой уровень.

Предположим, что наша домохозяйка решила сделать уборку квартиры. Ей кажется, что состояние квартиры плохое (ясно, что это достаточно условное понятие, другой бы еще и месяц не убирал). Итак, уборка начинается, все двигается, что-то переворачивается, короче, по сравнению с первоначальным плохим состоянием, оно вначале еще сильнее ухудшается, но постепенно пыль вытерта, полы вымыты, все расставлено на свои места, и состояние стало лучше, чем было до уборки. Через некоторое время наша домохозяйка решила переклеить в комнате обои. Ну не нравятся ей старые и все тут. Что происходит при этом? Старые отрываются, везде пыль, беспорядок, т.е. состояние ухудшилось гораздо сильнее, чем при обычной уборке. Но, в конце концов, обои переклеены и, естественно, состояние гораздо лучше, чем было после обычной уборки. Что же общего в этих примерах? Любая домохозяйка понимает эти два очевидных результата. Во-первых, если хочешь путем «перестройки» улучшить состояние, то с неизбежностью сначала должен попасть в худшее состояние. Во-вторых, степень ожидаемого улучшения состояния сопоставима с предварительным ухудшением. Ну вот, пожалуй, и все, что может предсказать разумная домохозяйка о закономерностях перестроек. Чтобы узнать эти закономерности подробнее, надо уже обратиться к науке.

Рассмотрим ситуацию, когда под «плохим» состоянием мы понимаем либо «административную систему», либо «болезнь человека», а под «хорошим» состоянием – соответственно «рыночную экономику» и «состояние здоровья в норме».

И государство, и человек – типичные нелинейные системы с обратными связями. Это существенно, ибо *управление без обратных связей всегда приводит систему к катастрофе*. Под обратными связями в общем случае понимается следующее. Пусть есть какая-либо система, имеющая вход и выход. На выходе системы есть сигнал (совершенно неважно как он возник). Если есть устройство, которое сигнал с выхода системы передает на вход, то это устройство и есть обратная связь. Если сигнал обратной связью передается в том же виде, каким он был на выходе, то это положительная обратная связь; если обратная связь переворачивает сигнал – это отрицательная обратная связь. В ряде случаев достаточно уничтожить лишь одну обратную связь, и система устремляется к катастрофе. Человек, как государство – это достаточно сложные системы с переменными обратными связями.

Вернемся к нашей ситуации. На рис. 12 по оси  $Y$  отложены – для государства «благополучие граждан», для человека «состояние здоровья», а по оси  $X$ , соответственно, «предприимчивость граждан» и «самоподдерживающиеся колебания СФРЕ». Здесь мы не имеем возможности конкретизировать, что такое структурно-функциональные рабочие единицы (СФРЕ). Можно посмотреть их определение в части IV нашей книги «Концепции современного естествознания». На графике пунктиром изображена линия катастрофы (смерти для человека).

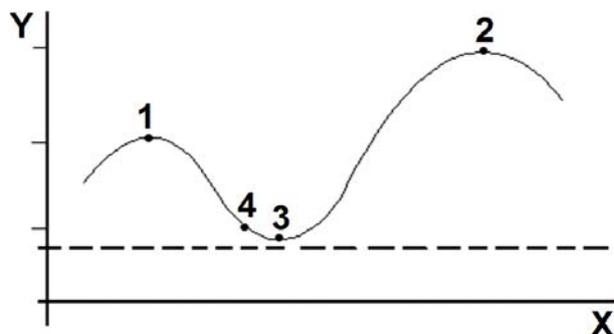


Рис. 12. Перестройка системы.  
Точки: 1 – начальное плохое состояние;  
2 – хорошее состояние; 3 – самое плохое состояние; 4 – максимум сопротивления

Итак, закономерности следующие. Цитируем по книге В.И. Арнольда «Теория катастроф».

1. Постепенное движение в сторону лучшего состояния сначала приводит к ухудшению. Скорость ухудшения при равномерном движении к лучшему состоянию увеличивается.

2. По мере движения от худшего состояния к лучшему сопротивление системы изменению ее состояния возрастает.

3. Максимум сопротивления обязательно предшествует самому плохому состоянию, через которое нужно пройти для достижения лучшего состояния. После прохождения максимума сопротивления состояние продолжает ухудшаться.

4. По мере приближения к самому плохому состоянию сопротивление, начиная с некоторого момента, начинает уменьшаться, и как только самое плохое состояние пройдено, полностью исчезает, и система сама втягивается в лучшее состояние.

5. Величина ухудшения, необходимая для перехода в лучшее состояние, сравнима с итоговым улучшением и увеличивается по мере совершенствования системы. Слабо развитая система может перейти в лучшее состояние почти без предварительного ухудшения, в то время как сильно развитая система в силу своей устойчивости на постепенное непрерывное улучшение не способна.

6. Если систему удастся сразу, скачком, перебросить из плохого состояния достаточно близко к хорошему, то дальше она сама будет эволюционировать в нужном направлении.

С этими объективными закономерностями функционирования нелинейной системы нельзя не считаться. Так, например, выбор «лечения» должен быть таким, чтобы максимальное ухудшение не пересекало линию «смерти», при пересечении которой перестройка прерывается, и система устремляется к катастрофе. При кардинальных изменениях в экономике страны, заговоры, путчи и прочие неприятности для правителя возможны раньше самого плохого состояния, в максимуме сопротивления. В самом же плохом состоянии опасности уже нет, всем настолько плохо, что не только не бунтуют, но даже и не плачут, а смеются (согласно историческому анекдоту о Чингисхане).

Выше сформулированы лишь простейшие качественные выводы, но они представляются не только более важными, но и более надежными (чем любые количественные для конкретной модели), ибо мало зависят от деталей функционирования системы.

В следующих пунктах мы сохраним оригинальный текст Владимира Игоревича Арнольда.

## 2. Оптимизация как путь к катастрофе

Простейшая модель роста  $x' = kx$  предложена Мальтусом (для роста населения Земли). Она ведет, как хорошо известно, к экспоненциальному (т.е. очень быстрому) росту населения  $x$  с течением времени. Эта жесткая модель применима (разумеется, с оговорками), например, к раз-

витию науки в 1700–1950 гг. (измеряемому, скажем, числом научных статей) (рис. 13). Продолжение экспоненциального роста науки в следующий век быстро привело бы к исчерпанию бумаги и чернил, причем число ученых должно было бы достичь половины населения земного шара.

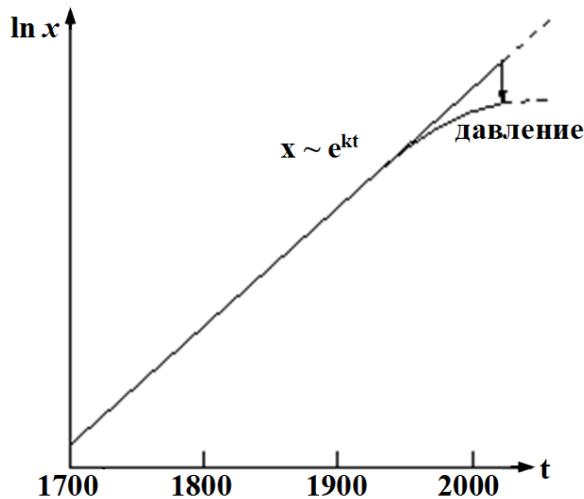


Рис. 13. Рост науки

Ясно, что общество (во всех странах) не может этого допустить, и, следовательно, развитие науки должно быть подавлено (что мы и наблюдаем во многих странах; в России реформирование академической науки происходит как раз сейчас).

Аналогичные явления насыщения происходят в любой популяции (и, вероятно, вскоре произойдут с человечеством в целом): когда население становится слишком большим, мальтузовская жесткая модель с постоянным коэффициентом роста  $k$  перестает быть применимой. Естественно, при слишком больших  $x$  конкуренция за ресурсы (пищу, гранты и т.д.) приводит к уменьшению  $k$ , и жесткая модель Мальтуса должна быть заменена мягкой моделью:

$$x' = k(x)x$$

с зависящим от населения коэффициентом размножения. Простейшим примером является выбор  $k(x) = a - bx$ , что приводит к так называемой **логистической модели** (рис. 14).

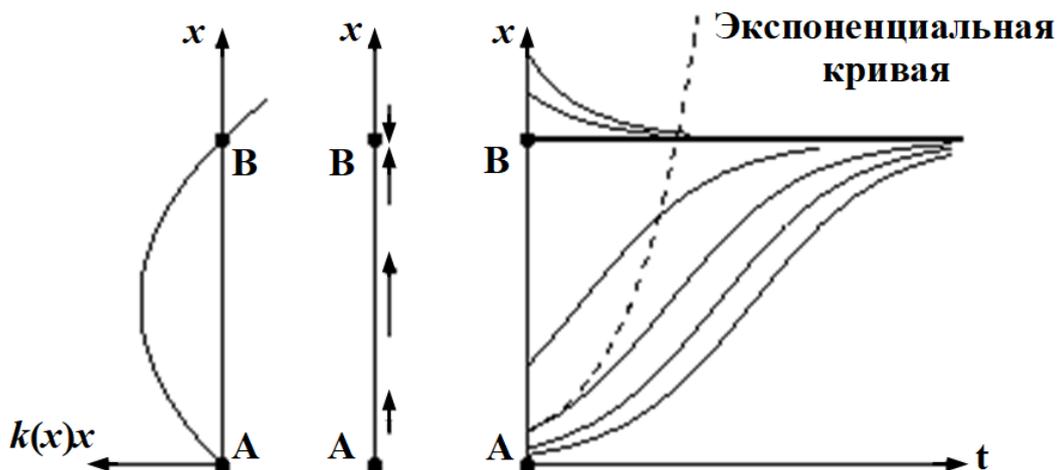


Рис. 14. Логистическая модель  $x' = ax - bx^2$ , например,  $x' = x - x^2$

Выбором системы единиц  $x$  и  $t$  можно превратить коэффициенты  $a$  и  $b$  в 1. Подчеркну, однако, что выводы, которые будут сделаны ниже, остаются (с точностью до числовых значений констант) справедливыми и при любых значениях коэффициентов  $a$  и  $b$  и даже для широкого класса моделей с различными (убывающими с  $x$ ) функциями  $k(x)$ . Иными словами, дальнейшие выводы относятся ко всей мягкой модели, а не к специальной жесткой логистической модели.

На рис. 14 слева изображен график функции  $k(x)x$ , положительной между точками  $A$  и  $B$ . В центре изображено векторное поле  $\dot{x}$  на изображающей всевозможные состояния системы оси  $x$ . Оно указывает скорость эволюции состояния. В точках  $A$  и  $B$  скорость равна нулю: это стационарные состояния. Между  $A$  и  $B$  скорость положительна (население растет), а за точкой  $B$  – отрицательна (население убывает). Справа изображена результирующая зависимость населения от времени при разных начальных условиях.

Модель предсказывает, что с течением времени устанавливается стационарный режим  $B$ , который устойчив: большее население уменьшается, меньшее – увеличивается.

Логистическая модель удовлетворительно описывает многочисленные явления насыщения. Вблизи  $A$ , когда население мало, она очень близка к мальтузианской модели. Но при достаточно больших  $x$  (порядка  $1/2$  при нашем выборе коэффициентов) наблюдается резкое отличие от мальтузианского роста (обозначенного на рис. 14 пунктиром): вместо ухода  $x$  на бесконечность население приближается к стационарному значению  $B$ . Население Земли сейчас превышает 7 миллиардов. Стационарное значение (по разным оценкам) 16–20 миллиардов человек.

Логистическая модель является обычной в экологии. Можно себе представить, например, что  $x$  – это количество рыб в озере или в мировом океане. Посмотрим теперь, как скажется на судьбе этих рыб рыболовство с интенсивностью  $c$ :

$$\dot{x} = x - x^2 - c.$$

Вычисления показывают, что ответ резко меняется при некотором критическом значении квоты вылова  $c$ . Для нашей жесткой модели это критическое значение есть  $c = 1/4$ , но аналогичные явления имеют место и для мягкой модели:

$$\dot{x} = x - k(x)x - c$$

(критическое значение  $c$  в этом случае максимум функции  $k(x)x$ ).

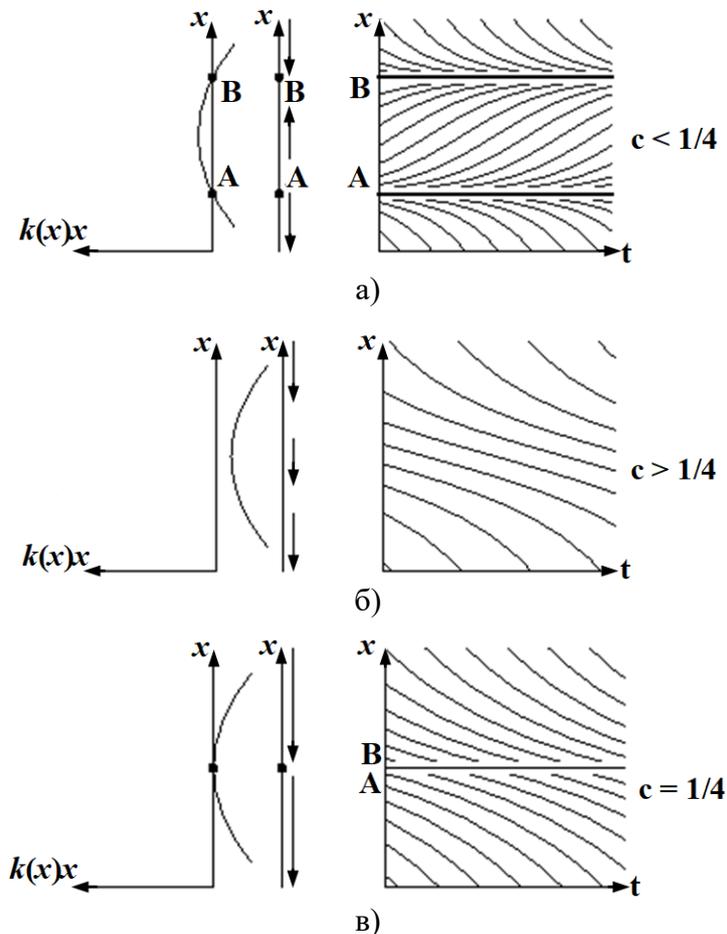


Рис. 15. Недолов (а), перелов (б) и оптимизация (в) рыболовства

Ход эволюции числа рыб  $x$  с течением времени  $t$  изображен на рис. 16. Если квота  $c$  мала, то изменения (по сравнению со свободной популяцией, для которой  $c = 0$ ) состоят в следующем.

Система имеет два равновесных состояния,  $A$  и  $B$ . Состояние  $B$  устойчиво: популяция в этом случае несколько меньше, чем необлавливаемая, но она восстанавливается при малых отклонениях  $x$  от равновесного значения  $B$ .

Состояние  $A$  неустойчиво: если вследствие каких-либо причин (скажем, браконьерства или мора) размер популяции упадет хоть немного ниже уровня  $A$ , то в дальнейшем популяция (хотя и медленно, если отличие от  $A$  невелико) будет уничтожена полностью за конечное время.

По моему мнению, состояние науки в России в настоящее время описывается примерно точкой  $A$ : оно еще стационарно, но, как говорят физики, квазистационарно в том смысле, что небольшое встряхивание может легко привести к необратимому уничтожению.

При больших критических квотах вылова  $c$  популяция  $x$  уничтожается за конечное время, как бы велика она ни была в начальный момент.

Это – судьба мамонтов, бизонов, многих китов: экологи подсчитали, сколько видов погибает *ежедневно* под влиянием деятельности человека, и эти цифры ужасают. Модели этого рода описывают также банкротство фирм, концернов и государств. Опасность уничтожения в нашей модели появляется тогда, когда неустойчивое состояние  $A$  приближается к устойчивому состоянию  $B$ , т.е. когда величина  $x$  опускается примерно до половины исходной стационарной величины необлавливаемой популяции.

Население России, мне кажется, еще не понизилось до этого смертельно опасного уровня, но, по-видимому, движется к нему. Наука же в России находится в настоящее время именно в таких условиях «перелома». Например, заработная плата главного научного сотрудника в Математическом институте им. Стеклова РАН (каковым я являюсь) составляет менее 100 долларов в месяц. Это раз в сто меньше зарплаты моих коллег в США (и раз в 50 меньше, чем во Франции). Понятно, что в таких условиях величина  $c$  (скорость убыли числа ученых в России) ограничивается в основном дискриминационными мерами, принимаемыми Западом (например, США) для охраны своих рабочих мест от наплыва лучше подготовленных иностранных аспирантов и докторантов (в основном из Китая и из России).

Из сказанного видно, что выбор значения параметра  $c$  является чрезвычайно важным моментом управления эксплуатацией популяции  $x$ . Стремясь к увеличению квоты эксплуатации  $c$ , разумная планирующая организация не должна превосходить критический уровень (в нашем случае  $c \leq 1/4$ ). Оптимизация приводит к выбору именно критического значения  $c = 1/4$ , при котором эксплуатируемая популяция еще не уничтожается, но доход от эксплуатации за единицу времени достигает максимально возможного значения  $c = 1/4$  (большой доход в нашей популяции *в течение длительного времени* невозможен, так как максимальная скорость прироста даже и неэксплуатируемой популяции есть  $1/4$ ).

Из нижней части рис. 6 мы видим, что произойдет при таком «оптимальном» выборе,  $c = 1/4$ . Какова бы ни была начальная популяция  $x > 1/2$ , с течением времени она выйдет на стационарный режим  $A = B = 1/2$ . Эта стационарная популяция, однако, неустойчива. Небольшое случайное уменьшение  $x$  приводит к полному уничтожению популяции за конечное время.

Следовательно, *оптимизация параметров плана может приводить* (и приводит во многих случаях, из которых наша модель – лишь простейший пример) *к полному уничтожению планируемой системы вследствие возникающей из-за оптимизации неустойчивости*.

Наша мягкая модель, при всей своей очевидной примитивности, позволяет, однако, предьявить способ борьбы с указанным злом. Оказывается, устойчивость восстанавливается, если заменить жесткое планирование **обратной связью**. Иными словами, решение о величине эксплуатации (квоты вылова, налогового пресса и т.д.) следует принимать не директивно ( $c = const$ ), а в зависимости от достигнутого состояния системы:

$$c = kx,$$

где параметр  $k$  («дифференциальная квота») подлежит выбору.

В этом случае модель принимает вид (рис. 16):

$$x' = x - x^2 - kx.$$

При  $k < 1$  с течением времени устанавливается стационарное состояние  $B$ , которое устойчиво. Средний многолетний "доход"  $c = kx$  в этом состоянии оптимален, когда прямая  $y = kx$  проходит через вершину параболы  $y = x - x^2$ , т.е. при  $k = 1/2$ . При этом выборе дифференциальной квоты  $k$  средний "доход"  $c = 1/4$  достигает максимального возможного в нашей системе значения. Но, в отличие от жестко планируемой системы, система с обратной связью устойчива и при оптимальном значении коэффициента  $k$  (небольшое случайное уменьшение по отношению к стационарному уровню  $x = B$  приводит к автоматическому восстановлению стационарного уровня силами самой системы).

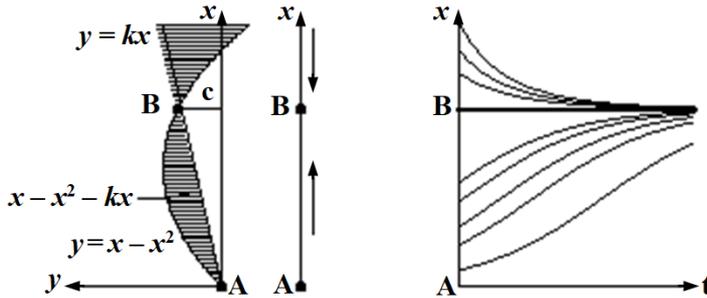


Рис. 16. Устойчивая система с обратной связью

Более того, небольшое отклонение коэффициента от оптимального значения  $k = 1/2$  приводит не к самоуничтожению системы (как это было при небольшом отклонении от оптимального жесткого плана  $c$ ), а лишь к небольшому уменьшению "дохода".

Итак, введение обратной связи (т.е. зависимости принимаемых решений от реального состояния дел, а не только от планов) стабилизирует систему, которая без обратной связи разрушилась бы при оптимизации параметров.

Все сказанное выше останется справедливым и для мягкой модели (с соответствующим пересчетом коэффициентов). Следует подчеркнуть, что именно эта независимость от деталей жесткой модели (которые, как правило, не слишком хорошо известны) делает выводы мягкого моделирования полезными.

Попытки заменить мягкое моделирование жестким обычно приводят к иерархии все более сложных и громоздких математических построений, исследование которых доставляет прекрасный материал для большого количества диссертаций, но реальная ценность которых зачастую не превосходит в сущности простых (хотя без математики и не очевидных) выводов, основанных на анализе именно простейших моделей, подобных описанной выше.

### 3. Опасность многоступенчатого управления

Явление, описываемое в этом разделе, хорошо известно в теории управления техническими системами. Оно наблюдается в чрезвычайно общей ситуации, но здесь я опишу его в самой простой модели, заменяя лишь технические термины человеческими.

Пусть производство какого-либо продукта  $x$  управляется некоторым руководителем, принимающим решение о скорости производства:

$$x' = y.$$

В свою очередь, поведение руководителя  $y$  управляется руководителем второго ранга, принимающим решение о том, как нужно менять скорость производства:

$$y' = z.$$

В свою очередь, поведение руководителя второго ранга  $z$  управляется руководителем третьего ранга и т.д. вплоть до генерального руководителя (ранга  $n$ ).

Генеральный руководитель в нашей модели реализует обратную связь: его решение основывается не на желании выполнить приказ начальства (как у руководителей предыдущих рангов), а на интересах дела. Например, он может желать достичь уровня  $X$  величины  $x$

и будет влиять на руководителя предыдущего ранга в положительную сторону, если уровень  $x$  не достигнут, и в отрицательную – если он превзойден.

Например, для  $n = 3$  простейшая модель этого рода имеет вид

$$\begin{aligned}x' &= y, \\y' &= z \\z' &= -k(x - X).\end{aligned}$$

Эту систему можно переписать в виде линейного дифференциального уравнения порядка  $n$ :

$$x^{(n)} = -k(x - X).$$

Уравнения этой (жесткой) модели легко решаются в явном виде. Устойчивость желаемого стационарного состояния ( $x = X, y = z = \dots = 0$ ) определяется тем, отрицательны ли вещественные части корней  $\lambda$  характеристического уравнения:

$$\lambda^n = -k.$$

Эти корни – комплексные числа, изображенные на рис. 17. Эти корни образуют на плоскости комплексного переменного  $\lambda$  вершины правильного  $n$ -угольника. Если  $n > 3$ , некоторые вершины обязательно лежат в (неустойчивой) правой полуплоскости ( $Re(\lambda) > 0$ ). При  $n = 1$  корень  $\lambda = -k$  лежит в устойчивой полуплоскости, а при  $n = 2$  корни  $\lambda_{1,2} = \pm i\sqrt{k}$  лежат на границе устойчивости.

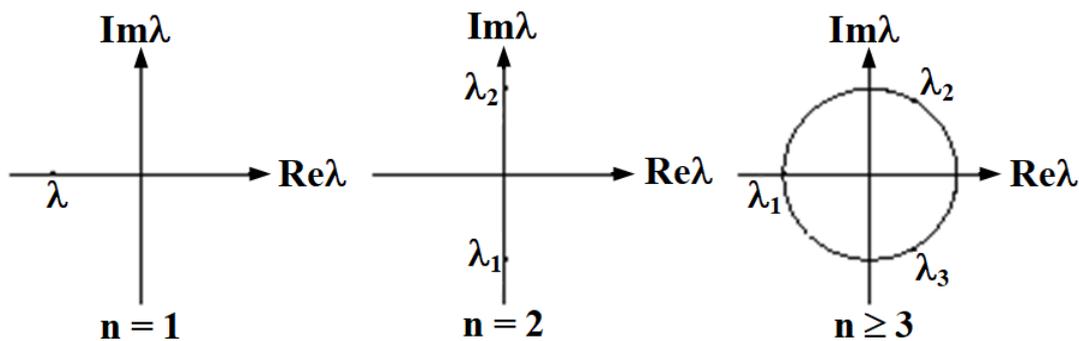


Рис. 17. Неустойчивость многоступенчатого управления

**Вывод.** Многоступенчатое управление, описываемое нашей моделью при  $n > 3$ , неустойчиво. Двухступенчатое управление приводит к периодическим колебаниям, но не вызывает катастрофического нарастания колебаний, происходящего при трех- и более ступенчатом управлении.

Настоящую устойчивость обеспечивает только одноступенчатое управление, при котором управляющее лицо более заинтересовано в интересах дела, чем в поощрении со стороны начальства.

Эти выводы, сделанные выше на основании анализа простейшей жесткой модели, на самом деле выдерживают проверку на структурную устойчивость, исключая лишь случай  $n = 2$ : двухступенчатое управление может оказаться как устойчивым, так и неустойчивым, в зависимости от деталей организации дела, которыми мы выше пренебрегли при составлении нашей самой простой модели.

Длительное и, по-видимому, устойчивое функционирование системы многоступенчатого управления в СССР объяснялось, вероятно, неисполнением директивных указаний и существованием «теневой» системы заинтересовывания управляющих различных рангов в интересах дела. Без такой реальной заинтересованности (которая в современных условиях уже не обязательно обеспечивается коррупцией) многоступенчатое управление всегда ведет к разрухе.

К счастью, необходимость в независимости Центробанка уже хорошо понята, но многоступенчатое («административное») управление сохраняется во многих других случаях.



**Владимир Игоревич Арнольд** (12 июня 1937, Одесса – 3 июня 2010, Париж) – советский и российский математик, автор работ в области топологии, теории дифференциальных уравнений, теории особенностей гладких отображений и теоретической механики. Один из крупнейших математиков XX века. Академик РАН.

**Научная деятельность:** соавтор теоремы Колмогорова – Арнольда – Мозера о стабильности интегрируемых гамильтоновых систем. Развивал математику (теория динамических систем, теория катастроф, топологию, алгебраическую геометрию), классическую механику и теорию сингулярностей.

В.И. Арнольд опубликовал более 400 статей и большое количество учебников и монографий. Более тридцати его книг были многократно переизданы и переведены на многие языки мира.

В.И. Арнольд – основатель большой научной школы, среди его учеников: И.А. Богаевский, Р.И. Богданов, А.Н. Варченко, В.А. Васильев, А.Б. Гивенталь, В.В. Горюнов, С.М. Гусейн-Заде, А.А. Давыдов, В. М. Закалюкин, М.Э. Казарян, А.Г. Кушниренко, С.К. Ландо, А.И. Нейштадт, Н.Н. Нехорошев, А.С. Пятли, В.Д. Седых, А.Г. Хованский, А.Н. Шошитайшвили, А. Варченко и многие другие.

**Награды:**

1957 – премия Московского математического общества.

1965 – Ленинская премия (вместе с академиком А.Н. Колмогоровым) за цикл работ по проблеме устойчивости гамильтоновых систем.

1982 – премия Краффорда от Шведской королевской академии наук (совместно с Луисом Ниренбергом).

1992 – премия имени Н.И. Лобачевского РАН.

1994 – премия Харви (Harvey Prize), Технион (Хайфа).

1999 – орден «За заслуги перед Отечеством» IV степени за большой вклад в развитие отечественной науки, подготовку высококвалифицированных кадров и в связи с 275-летием Российской академии наук.

2001 – премия Вольфа (Wolf Prize) по математике.

2001 – премия Дэни Хайнемана в области математической физики.

2007 – Государственная премия России за выдающийся вклад в развитие математики.

2007 – Чернский приглашённый профессор.

2008 – премия Шао за обширный и важный вклад в математическую физику (совместно с Л.Д. Фаддеевым).

В 1992 году сделал пленарный доклад на Европейском математическом конгрессе.

**Звания:**

Академик Российской академии наук.

Профессор Московского государственного университета.

Иностраный член Национальной академии наук США, Французской академии наук, Лондонского королевского общества, Национальной академии деи Линчеи, почётный член Лондонского математического общества, иностранный член Американского философского общества, а также Американской академии искусств и наук.

Почётный доктор университетов Пьера и Марии Кюри (Париж, 1979), Уорика (Ковентри), Утрехта, Болоньи, Торонто, Комплутенсе (Мадрид).

Президент Московского математического общества (с 1996 года).

Член редколлегии журнала «Успехи математических наук».

В 1995–1998 гг. занимал должность вице-президента Международного математического союза, в 1999–2002 являлся членом его исполнительного комитета.

Председатель попечительского совета Независимого Московского университета.

Главный научный сотрудник Математического института им. В.А. Стеклова РАН.

Профессор Университета Париж–Дофин.

## Часть II. ХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Широко простирает химия  
руки свои в дела человеческие...

*М.В. Ломоносов*

### Лекция 12. НЕКОТОРЫЕ АКСИОМЫ ХИМИИ. ВРЕМЯ ЖИЗНИ АКТИВИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ХИМИЧЕСКАЯ КОНСТАНТА

#### 1. Химические реакции и их энергетика

Превращение одного или нескольких исходных веществ в отличающиеся от них по химическому составу или строению вещества называется химической реакцией.

Химические реакции, в отличие от ядерных, не изменяют ни общего числа атомов в системе, ни изотопного состава элементов. Химические реакции происходят при физическом контакте реагентов как самопроизвольно, так и при воздействии: температуры (нагревание), катализаторов, излучений, в том числе и ионизирующих, электрического тока, механических напряжений, а также в низкотемпературной плазме.

Характеристиками химических реакций являются: равновесная степень превращения (которая определяется из законов термодинамики), скорость реакции, глубина протекания (определяемая либо степенью превращения – отношение количества вещества, вступившего в реакцию, к исходному, либо выходом реакции – отношение количества результирующего продукта к исходному).

Реакции, сопровождающиеся выделением теплоты, называются экзотермическими, поглощением теплоты – эндотермическими.

Катализ – это ускорение или возбуждение химической реакции веществами катализаторами, которые участвуют в реакции, но не входят в состав конечных продуктов. Катализатор не сдвигает химического равновесия в реагирующей системе, он в равной мере ускоряет как прямую, так и обратную реакции. Вещества, замедляющие реакцию, называются ингибиторами.

Реакции, проходящие под воздействием излучения оптического диапазона длин волн, называются фотохимическими. Причина их прохождения – изменение электронного строения молекул при возбуждении, которое сопровождается также и изменением их химических свойств. Особое положение занимают радиационно-химические реакции, происходящие из-за поглощения веществом энергии ионизирующего излучения. Реагируя с молекулами среды и друг с другом, радиационно-химические реакции приводят к образованию относительно долгоживущих свободных радикалов, ионов-радикалов, а также различных стабильных продуктов.

Реакции, характеризующиеся переносом зарядов через границу между электродом и электролитом (электродные процессы), всегда идут в двух направлениях: катодном и анодном. Химическое превращение в катодном процессе называется электровосстановлением, в анодном – электроокислением.

Химические превращения, инициированные или ускоренные механическим воздействием (напряжениями), называются механо-химическими. Эти реакции возможны как в жидкостях (кавитация, действие сдвиговых напряжений на растворы и расплавы полимеров), так и в твердых телах (например, при измельчении – диспергировании, действии ударных волн или высокого давления в сочетании с деформацией сдвига).

## 2. Теория активированного комплекса

Теория АК – простейший и исторически первый вариант статистической теории химических реакций, – была разработана в 30-х годах XX века Э. Вигнером, М. Поляни, Г. Эйрингом и М. Эвансом. Эта теория основана на трех предположениях, или трех аксиомах.

1. Переход химической системы из начального состояния в конечное связан с образованием *активированного комплекса* или *переходного состояния*. Двойное название указывает на его вещественно-энергетическую сущность. Для простейшей химической реакции:



это означает, что АК это уже не  $A + B$ , но еще не  $C + D$ .

2. Существует термодинамическое равновесие между реагентами химической реакции и АК.

3. Скорость химической реакции отождествляется со скоростью распада (временем жизни) АК –  $\tau$ .

Все три предположения строго обосновать нельзя, и их следует в определенном смысле считать *аксиомами химии*.

С учетом наших знаний о фундаментальных физических константах мы можем уже определить время жизни АК. Действительно, мы знаем, что поскольку элементарный акт химической реакции идет на микроуровне, то обязательно должна присутствовать константа М. Планка  $\hbar$ , размерность которой *энергия×время*. Далее, поскольку результат химической реакции фиксируется нами на макроуровне, то обязательно должна быть связь между «микро» и «макро», а значит, должна присутствовать константа Л. Больцмана  $k$ , размерность которой *энергия/температура*. Далее, любая домохозяйка (опять обращаемся к ее здравому смыслу) знает, что соль быстрее растворяется в горячем супе, нежели в холодном, аналогично и сахар в чае, т.е. время жизни АК тем меньше, чем выше температура. Следовательно, температура  $T$  должна стоять в знаменателе формулы, определяющей времени жизни АК –  $\tau$ . Сопоставив размерность констант  $\hbar$ ,  $k$  и температуры  $T$ , получим единственно возможное соотношение:

$$\tau = \hbar/kT. \quad (33)$$

При обычных для химических реакций температурах  $\tau \approx 10^{-13}$  сек, поэтому пока еще не удалось никому наблюдать активированный комплекс. Если же это станет возможным, то необходимость в аксиоме № 1 отпадет, и ее утверждение станет доказанным фактом.

Как видно из (33), время жизни АК не зависит от участвующих в реакции реагентов и конечных продуктов реакции. Поэтому (и это очень важный результат!) величину  $\tau$  следует рассматривать как своеобразную *фундаментальную химическую «константу»* ». ([2] Хапачев Ю.П. Фундаментальные константы химии и биологии // Российский химический журнал. Вып. 3. (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). – 2000. – Т. 44. – С. 3–6).

Согласно первой аксиоме, равновесие между реагентами и АК характеризуется константой  $K$ , через которую выражается константа скорости реакции  $\chi$ :

$$\chi = K (kT/h) = K/t,$$

$$K = \frac{F_{\text{АК}}}{F_{\text{р}}} \exp\left(-\frac{U}{kT}\right),$$

где  $F_{\text{АК}}$  и  $F_{\text{р}}$  – отнесенные к единице объема (удельные) статистические суммы АК и реагентов, соответственно;  $U$  – изменение потенциальной энергии системы при переходе от реагентов к АК.

Величину  $U$  можно интерпретировать как энергию активации, если пренебречь слабой (по сравнению с экспоненциальной) температурной зависимостью статистической суммы и множителя  $kT/h$ . Тогда

$$\chi = \frac{kT}{h} \exp \frac{\Delta S}{k} \exp \frac{-\Delta H}{kT},$$

где  $\Delta S$  и  $\Delta H$  – изменение энтропии и энтальпии активации при переходе от реагентов к АК.

Возвращаясь теперь к объяснению реакционной способности веществ, можно сказать, что характеристикой реакционной способности служит энергия активации, которая практически соответствует высоте потенциального барьера на поверхности потенциальной энергии ППЭ.

Для теоретической оценки относительных изменений высоты потенциального барьера в реакционных сериях разработаны относительно простые методы. Такой подход к оценке относительных скоростей применяют для любого физико-химического процесса, если высота потенциального барьера, разделяющего исходное и конечное состояния, достаточно высока по сравнению с величиной  $kT$ .

Поставим теперь следующий вопрос. Как вы думаете, у кого биохимические реакции идут быстрее, у гения или у обычного человека, если они находятся в одном помещении? Отталкиваясь от формулы (33), вы должны сделать вывод, что скорость прохождения реакций у обоих испытываемых одинакова, поскольку для обеих одинакова температура. Но если эксперимент говорит об обратном, скажем, у гения они идут быстрее, то что это значит? Ответ достаточно тривиален. Из курса школьной химии вы знаете, что увеличение скорости химических реакций возможно в присутствии катализаторов. Следовательно, у гения **возможно** существуют какие-то дополнительные (или их некоторый избыток) **функциональные носители**, называемые **ферментами**, которые и убыстряют реакцию. А наличие этих дополнительных функциональных носителей или их избыток определяется уже другими, **информационными носителями**. Но об этих характеристиках мы поговорим несколько позже.

Самоорганизация – процесс упорядочения элементов одного уровня в системе за счёт внутренних факторов, без внешнего специфического воздействия (изменение внешних условий может также быть стимулирующим либо подавляющим...

*Самоорганизация – Википедия*

### Лекция 13. САМООРГАНИЗАЦИЯ НА ХИМИЧЕСКОМ УРОВНЕ. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ХИМИИ

#### 1. Реакция Белоусова – Жаботинского

Явления самоорганизации, приводящие к образованию пространственных и пространственно-временных диссипативных структур, могут возникать при протекании некоторых нелинейных химических реакций, в которых продукты реакции являются ее катализаторами и ускоряют протекание самой реакции. Это приводит к тому, что скорость образования продукта реакции нелинейно зависит от концентраций реагирующих компонентов.

Некоторая типичная химическая реакция протекает по следующей символической схеме:



где  $A$  и  $B$  – реагирующие между собой компоненты,  $C$  и  $D$  – продукты реакции,  $k$  – константа скорости, зависящая в общем случае от температуры и давления. Опыт показывает, что даже после длительного ожидания реагенты  $A$  и  $B$  не исчезают полностью. Это значит, что для реакции (а) существует величина, называемая константой равновесия и характеризующаяся определенным значением отношения

$$c_C c_D / (c_A c_B),$$

устанавливаемым по истечении большого промежутка времени ( $c$  с соответствующим индексом означает концентрацию данного компонента). Химическая система пребывает в состоянии детального равновесия, то есть наряду с реакцией (а) протекает соответствующая обратная реакция:



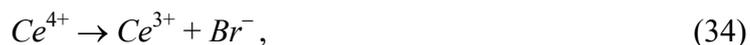
В равновесии в соответствии с принципом детального равновесия обе реакции протекают с одинаковыми скоростями.

Однако мы можем поддерживать постоянные концентрации продуктов  $C$  и  $D$  путем постоянного удаления их из реакционного объема, реализуя тем самым открытую систему в неравновесном состоянии. В такой системе устанавливаются постоянные концентрации компонент  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ , причем их отношение уже не определяется константой равновесия. Такое состояние химической системы называется стационарным неравновесным состоянием, при котором детальное равновесие уже не имеет места.

Если в такой системе существует некоторый химический механизм, усиливающий случайные изменения скоростей прямой или обратной реакций, то возникает потенциально неустойчивое состояние. Одним из наиболее характерных упомянутых механизмов является автокатализ, когда продукт реакции увеличивает скорость ее протекания.

Рассмотрим теперь на примере конкретной реакции влияние неравновесных условий на режимы ее поведения.

Говоря о концептуальных проблемах химии, нельзя не остановиться на **самоорганизации на химическом уровне**, которую можно наблюдать, например, в так называемой реакции Белоусова–Жаботинского. Прежде всего, следует рассказать об экспериментальном открытии знаменитой реакции, открывшей новую эпоху в химических автокаталитических реакциях. Эта реакция была открыта Б.П. Белоусовым в 1951 г. в ходе простого эксперимента – окисления лимонной кислоты броматом калия в присутствии сульфата церия и серной кислоты. Церий, металл переменной валентности, играет в ней роль маятника: он появляется то в восстановительной



то в окисленной форме



Эти реакции автокаталитические. Свободный ион брома действует как сильный ингибитор (замедлитель) реакции (34). Поэтому вначале протекает только реакция (34), пока все ионы  $Ce^{4+}$  не восстановятся до  $Ce^{3+}$ . Затем протекает реакция (35), и процесс повторяется сначала. Вследствие этого раствор периодически меняет окраску, становясь то голубым (избыток ионов церия  $Ce^{4+}$ ), то красным (избыток ионов  $Ce^{3+}$ ). Получаются, таким образом, химические часы на основе своеобразного (окислительно-восстановительного) химического маятника.

Б.П. Белоусов послал статью о своем открытии в научный журнал и получил отказ с формулировкой рецензента «Такого в химических процессах не бывает...». Вторая посылка статьи в 1957 г. – опять отказ. Первая публикация была осуществлена автором только в 1959 г. в малоизвестном «Сборнике рефератов по радиационной медицине». Признание пришло лишь через несколько лет, когда аспирант Института биологической физики А.М. Жаботинский по рекомендации своего руководителя профессора С.Э. Шноля исследовал ряд аналогичных колебательных химических реакций. Работа А.М. Жаботинского и А.Н. Заикина была напечатана в 1970 г. в журнале «Nature» и вызвала сенсацию. Полный же текст статьи Б.П. Белоусова был напечатан только после его смерти в 1981 г. Такова судьба открытий...

**На видео** «из первых рук» вы посмотрите фрагмент лекции профессора МГУ С.Э. Шноля, с демонстрацией реакции Белоусова – Жаботинского.



**Борис Пáвлович Белоúсов (19 февраля 1893, Москва – 12 июня 1970, там же) – советский химик и биофизик. Лауреат Ленинской премии (1980).**

Родился в 1893 году. Вместе с братьями был вовлечен в революционную деятельность и в возрасте 12 лет арестован. Был вынужден эмигрировать с семьей в Швейцарию. В Цюрихе увлёкся химией. Прослушал полный университетский курс химии, но не смог выкупить диплом из-за отсутствия средств.

В 1914 г. возвратился в Россию, однако в действующую армию не попал из-за недостатка веса.

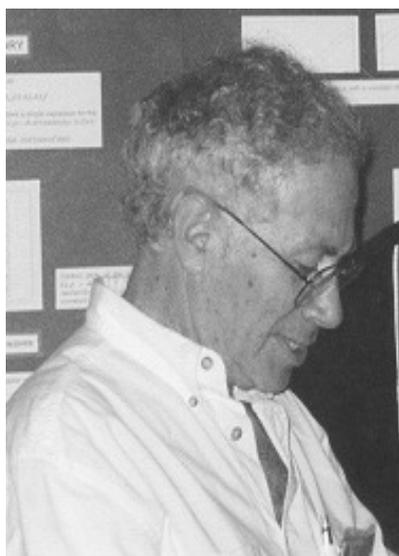
Поступил на работу в химическую лабораторию завода Гужона (завод «Серп и молот»). Занимался работами в области военной химии. С 1923 г. по рекомендации академика П.П. Лазарева преподавал химию в Высшей военно-химической школе РККА.

Как военный химик Б.П. Белоусов занимался с 1933 г. работал старшим преподавателем Академии химической защиты им. С.К. Тимошенко. В 1938 г. вышел в отставку в звании комбрига. В последующие годы работал в закрытом медицинском институте разработкой способов борьбы с отравляющими веществами, составов для противогазов, газовых анализаторов, препаратов, снижающих воздействие радиации на организм.

В 1951 г. при исследовании окисления лимонной кислоты броматом в присутствии катализатора (сульфат церия), обнаружил концентрационные колебания ионов церия. Так была открыта колебательная реакция, которая является одной из первых работ в области нелинейной химической динамики. Исследование механизма реакции Белоусова с 1961 г. проводил А.М. Жаботинский, поэтому класс колебательных реакций называют реакцией Белоусова – Жаботинского. Впоследствии эта работа была признана как научное открытие и занесена в Государственный реестр открытий СССР под № 174.

Скончался в Москве 12 июня 1970 года.

В 1980 году Борису Павловичу Белоусову посмертно была присуждена Ленинская премия: «за обнаружение нового класса автоволновых процессов и исследование их в нарушении устойчивости возбудимых распределённых систем». Премию также получили А.М. Жаботинский, А.Н. Заикин, Г.Р. Иваницкий и В.И. Кричевский.



**Анатóлий Мáркович Жаботи́нский** (17 января 1938, Москва – 16 сентября 2008, Бостон) – советский и американский биофизик, физико-химик. Лауреат Ленинской премии (1980).

Родился 17 января 1938 г. в Москве. Сын физика, доктора технических наук Марка Ефремовича Жаботинского (1917–2003) и историка физики, популяризатора науки Анны Михайловны Ливановой, автора книг «Физики о физиках» (1968), «Три судьбы. Постигание мира» (1969), «Ландау» (1978, 1983).

В 1955 г. поступил в МГУ, а после окончания – в аспирантуру к проф. С.Э. Шнолю. Вначале Жаботинский собирался изучать ритмическое поведение в метаболизме глюкозы, однако Шноль сообщил ему, что требуемые исходные материалы были в дефиците, и предложил заняться формулой Белоусова, с которой два предыдущих аспиранта не достигли большого успеха.

В 1961 г. А.М. Жаботинский исследовал механизм реакции Белоусова – Жаботинского, открытой Б.П. Белоусовым в 1951 г.

Попытки Жаботинского установить личный контакт с Белоусовым оказались безуспешными. Даже после публикации результатов работы Жаботинского и получения превосходных отзывов о ней со стороны Белоусова они так никогда не встретились лицом к лицу, несмотря на то, что работали лишь в нескольких километрах друг от друга. Жаботинский всегда подозревал, что Белоусов, который работал в секретном военном институте и в годы сталинских «чисток» потерял много друзей, опасался всяческих неформальных отношений.

Из-за своего еврейского происхождения, а также из-за того, что он позволял себе свободные критические высказывания на политические темы, Жаботинский был в СССР «невъездным» – ему был запрещен выезд за пределы Советского Союза. Лишь на закате «Перестройки» ему удалось приехать в США с 10-дневным лекционным курсом. В июле 1991 г. профессор университета Брендайса Ирвинг Эпстайн по просьбе Жаботинского продлил его пребывание в США еще на год. После этого Жаботинский в СССР–Россию никогда уже не вернулся.

В 1991–2008 гг. Жаботинский работал адъюнкт-профессором университета Брандейса, штат Массачусетс.

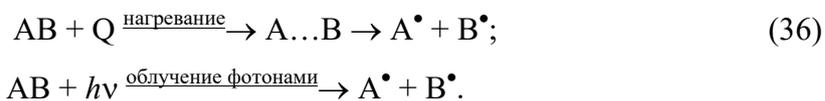
*Для тех, кто хочет более подробно ознакомиться с основными принципами химического взаимодействия и в частности с катализом, его критериями и сущностью, а также с химической эволюцией и биогенезом, рекомендуем прочесть II часть нашей книги «Концепции современного естествознания» [1], где соответствующие разделы написаны доктором химических наук, профессором Т.И. Орановой.*

## 2. Катализ, его критерии и сущность

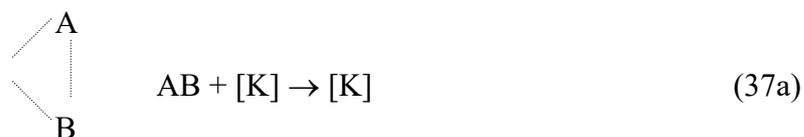
Каталитические реакции крайне разнообразны и многочисленны. Это основная часть реакций и, по существу, главный предмет исследования современной химии.

Тип механизма реакций, очевидно, не может служить критерием отношения процесса к катализу. Каталитические реакции происходят и по свободно-радикальному механизму (стеночный катализ или гетерогенно-гомогенные реакции; катализ с развитием цепи на поверхности проводников и полупроводников; гомогенный катализ в растворах), и по ионному механизму (гомогенный кислотно-основной катализ в растворах, гетерогенный катализ с гетеролизом связей), и посредством циклического переноса валентных электронов в переходном комплексе типа мультиплетного.

Главным критерием катализа является способ активации. По способу активации молекул реагента все химические реакции между валентно-насыщенными молекулами можно разделить на две большие группы. Поскольку физическая сущность активации состоит в полном разрыве ( $AB \rightarrow A^\bullet + B^\bullet$ ) или значительном расслаблении ( $AB \rightarrow A \dots B$ ) исходных химических связей, активация может быть осуществлена следующим образом. Во-первых, путем подачи в реакционную систему энергии извне:



Во-вторых, путем предварительного химического взаимодействия молекул с квантово-механической системой бертоллидного типа:



(согласно мультиплетной теории)



(согласно цепной теории, где L – символ кристаллической решетки).

Некаталитическая реакция происходит в результате подачи энергии извне (36). В каталитической химии активация молекул и инициирование реакций вызываются слабыми химическими взаимодействиями, уменьшающими энергию исходных связей (37).

Несмотря на то, что два способа активации реагентов – энергетический и химический (каталитический) принципиально различны, они представляют собой лишь крайности. В чистом виде каталитическая активация практически не встречается: при низких температурах реакции почти не изучены, а те лучшие процессы катализа, которые осуществляет природа в живых организмах, представляют собой совмещение каталитической и энергетической активации, но с явным преобладанием первой.

Различие каталитической и некаталитической реакций заключается и в присутствии в каталитической реакции стадии, которой нет в стехиометрической – стадии регенерации каталитического центра. То есть, каждая стадия любого каталитического процесса является «обычной» стехиометрической реакцией.

Таким образом, каталитические реакции являются более общими, базовыми реакциями по отношению ко всем другим химическим реакциям.

### ***Сущность катализа***

1. Катализ представляет собой наиболее общий и распространенный способ осуществления термодинамически возможных реакций. Он заключается в понижении активационного барьера посредством непрерывного уменьшения электронных зарядов и, следовательно, энергии исходных связей при неполновалентном химическом взаимодействии реагентов с катализаторами.

2. В качестве катализаторов преимущественно выступают соединения бертоллидного типа. В соответствии с этим, основным содержанием катализа является взаимодействие дальтонида<sup>1</sup> (молекулы реагента) и бертоллидной<sup>2</sup> (катализатора) форм химической организации вещества.

Каталитически активна не вся поверхность катализатора, а только небольшая ее часть – активные центры, которыми могут быть отдельные рентгеноаморфные осколки кристаллов, небольшие участки макромолекул, например, высокополимерных аминокислот в белках. Согласно мультиплетной теории А.А. Баландина, минимальное число атомов в активном центре равно двум. По теории активных ансамблей Н.И. Кобозева – оно может быть равно и единице.

3. Следствием неполновалентного взаимодействия молекул реагента с любым катализатором являются четыре эффекта, характеризующие всю картину катализа.

3.1. Первый эффект – инициирование реакции, то есть появление возможности перераспределения исходных связей или генерирование свободных радикалов.

3.2. Второй эффект – химическая ориентация реакции, то есть выбор того или иного направления реакции, которое зависит от химической природы как реагента, так и катализатора.

3.3. Третий эффект – матричный эффект. Он заключается:

а) в предоставлении катализатором своей поверхности – матрицы для реакции (поверхность твердого катализатора, стенка сосуда или структурная единица раствора, например, сольватный комплекс), а это увеличивает число встреч молекул реагента и вероятность благоприятной конфигурации активного комплекса;

б) в том влиянии, которое оказывает геометрический фактор на инициирование и ориентацию реакции.

3.4. Четвертый эффект, являющийся результатом взаимодействия реагента с катализатором, состоит в рекуперации энергии химической реакции. Эта энергия не сразу отдается внешней среде, а захватывается той частью катализатора, которая лишь несет активный центр, представляя утяжелитель или агграватор. Последний выполняет роль энергетической ловушки, энергия которой идет на возбуждение активного центра. При этом активность центра по мере усложнения агграватора возрастает по экспоненциальному закону.

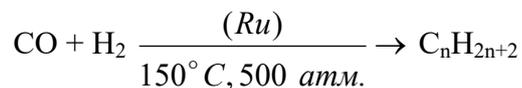
<sup>1</sup> Дальтонида – соединения постоянного состава, подчиняющиеся стехиометрическим законам.

<sup>2</sup> Бертоллиды – соединения переменного состава.

4. Все четыре эффекта появляются одновременно и обязательно во взаимной обусловленности. Они как бы усиливают друг друга. В различных случаях катализа они играют разную роль, выступая то один, то другой на первый план.

5. Неверно определять катализ лишь как ускорение реакции в присутствии веществ, остающихся после реакции химически неизменными.

Потенциальные барьеры сдерживают многие реакции, и до вмешательства катализатора они ни практически, ни идеально самопроизвольно не идут. Например, реакция



при  $n \approx 1500$  не происходит в отсутствие катализатора. Каталитическое вмешательство эту реакцию вызывает (первый эффект), направляет по пути окислительно-восстановительных реакций (второй эффект) и заставляет идти в направлении образования длинных углеродных цепей (третий эффект).

О скорости реакции как критерии оценки эффективности катализатора можно вести речь лишь в аспекте зависимости константы скорости от энергии активации и предэкспоненциального члена по уравнению Аррениуса:

$$K = A e^{E/kT}$$

или в аспекте основного уравнения константы скорости теории абсолютных скоростей реакции.

Кроме того, накоплен фактический материал и о необратимых химических изменениях (например, самоприспособление) функционирующих катализаторов (об этом подробнее в следующем разделе об эволюционном катализе).

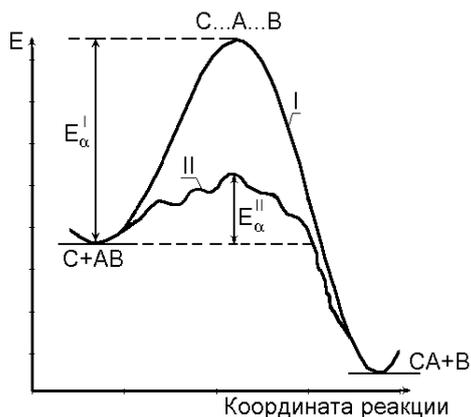
6. Неверно говорить об «отрицательном катализе», как это иногда допускается. Использование добавок, замедляющих протекание реакции, или ингибирование, имеет совершенно иную природу по отношению к катализу.

Катализ и ингибирование можно и должно рассматривать рядом как методы управления процессами. Но по механизму действия катализаторы и ингибиторы совсем различны. Нет таких ингибиторов, которые повышали бы потенциальный барьер реакций, увеличивая при взаимодействии с реагентами энергию исходных связей, подобно тому, как катализаторы снижают этот барьер, уменьшая энергию связей.

7. Деление катализа на три типа: гомогенный, гетерогенный и ферментативный, соответствует происхождению и месту расположения каталитически активного центра. В первых двух случаях речь идет об искусственных системах, содержащих катализатор в гомогенном растворе или газе (гомогенный катализ) и на поверхности раздела фаз (гетерогенный катализ).

В третьем случае имеется в виду катализ белковыми молекулами ферментов, функционирующих в живом организме или выделяемых из него. С точки зрения фазового состава фермента в растворе, учитывая большие размеры белковых молекул, можно говорить о микрогетерогенности ферментативного процесса.

Особенность биохимических превращений заключается в том, что одностадийный процесс заменяется множественным превращением через несколько переходных состояний и метастабильных промежуточных продуктов с минимальной энергией активации. Следующая схема иллюстрирует различие сечения поверхности потенциальной энергии «неживых» и «живых» превращений.



Различие сечения поверхности потенциальной энергии «неживых» и «живых» превращений:

- I – одностадийный химический процесс с энергией активации  $E_{\alpha}$ ;
- II – многостадийный биохимический процесс с энергией активации  $E_{\alpha}$

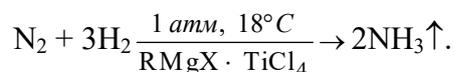
Кроме того, в ферментативном катализе превращаемая молекула не только подвергается воздействию нескольких активных групп фермента, но и сама участвует в изменении их ориентации, замыкает цепь перераспределения связей, то есть система самоорганизуется.

Подобные явления самоорганизации наблюдались и с неорганическими катализаторами (ряд сплавов на основе палладия).

8. Развитие металлокомплексных катализаторов подтвердило, что все три типа катализа представляют собой единую категорию явлений. Практически все известные гетерогенно-каталитические реакции могут происходить и под влиянием гомогенных комплексных катализаторов и наоборот. Активный центр фермента также в большом числе случаев представляет собой комплекс металла, и причины особой селективности искусственных комплексов металлов и ферментов оказались аналогичными: это пространственное строение и расположение окружающих атом или ион металла лигандов.

(В биохимии лиганд – это химическое соединение (часто, но не всегда, малая молекула), которое образует комплекс с той или иной биомолекулой (чаще всего белком, но иногда, например, с ДНК) и производит те или иные биохимические эффекты. В случае связывания лиганда с белком лиганд обычно является малой сигнальной молекулой, связывающейся со специфическим участком связывания на белке-мишени (например, на рецепторе). В случае связывания лиганда с ДНК лиганд обычно также является малой молекулой или ионом, или белком, который связывается с двойной спиралью ДНК).

Например, используя комплексные металлоорганические катализаторы, удалось (Вольпин М.Е. и др.) связать атмосферный азот до аммиака в нормальных условиях, то есть воспроизвести биохимический процесс:



9. Обычно главными функциональными макромолекулами считаются белки, ведь именно их природа выбрала в качестве внутриклеточных катализаторов. Однако, как было обнаружено американцами Т. Чеком и С. Альтманом в работе, удостоенной Нобелевской премии, РНК также может играть роль катализатора. Вполне резонно предположить, что и ДНК каталитически активны.

10. Существуют реакции, в которых катализатором превращения исходных веществ служит один из продуктов – *автокаталитические реакции*. Например, кислота, образующаяся при гидролизе эфиров, катализирует этот гидролиз. Скорость автокаталитических реакций в течение некоторого времени (период индукции) весьма мала, однако по мере накопления продукта-катализатора растет, достигает максимума и снова уменьшается вследствие израсходования исходного вещества.

Автокаталитический характер имеют самосопряженные и некоторые колебательные реакции, играющие большую роль в биохимии.

На наш взгляд, эти процессы требуют более пристального внимания и излагаются ниже.

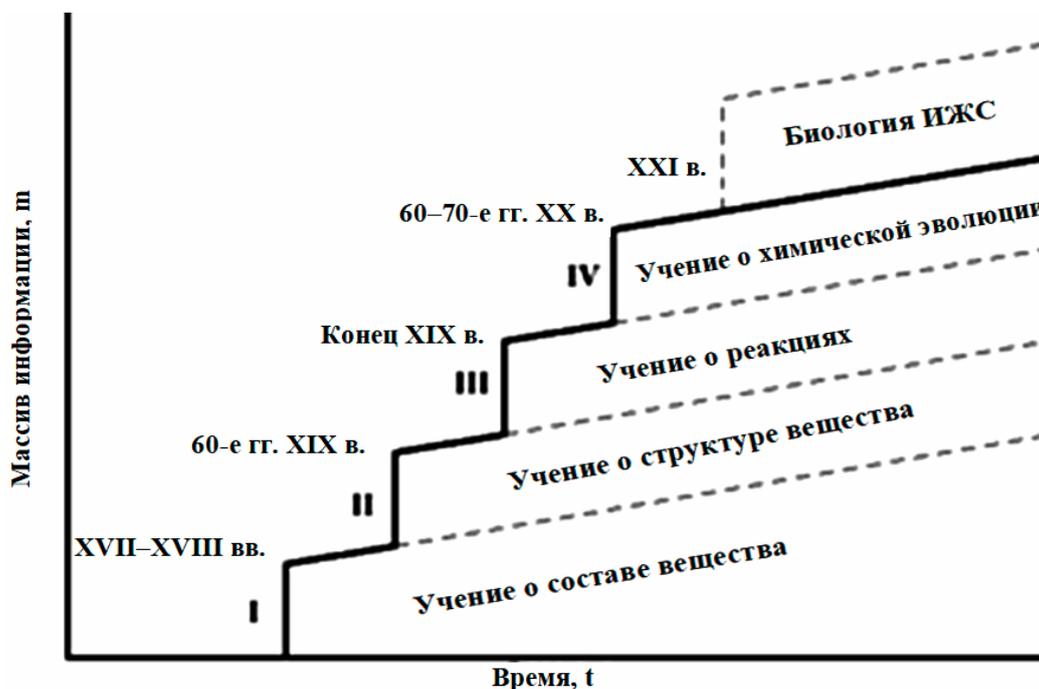
Всякий необходимо причиняет пользу,  
употребленный на своем месте. Напротив того:  
упражнения лучшего танцмейстера в химии неуместны;  
советы опытного астронома в танцах глупы.

*Козьма Прутков*

## Лекция 14. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ХИМИИ. ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И БИОГЕНЕЗ

### 1. Концептуальные системы химии

На основе историко-методологического анализа развития научной химии В.И. Кузнецов установил, что существуют определенные закономерности этого развития. Согласно В.И. Кузнецову, вся история химии укладывается в рамки развития и появления новых концептуальных систем, представляющих собой совокупность законов, теорий, взглядов, характеризующих уровень знания химического явления.



Развитие концептуальных систем по В.И. Кузнецову.  
ИЖС – искусственные живые системы

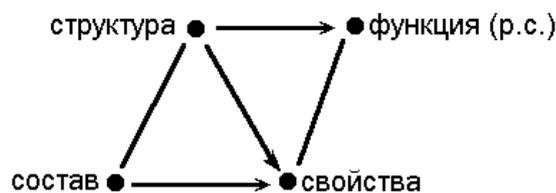
От времени возникновения атомно-молекулярного учения, когда, собственно, и возникла научная химия, до настоящего времени в химической науке четко выделяются четыре концептуальные системы: учение о составе веществ, учение о структуре, учение о реакциях, учение о химической эволюции. В качестве основного критерия концептуальных систем выбран способ решения основной проблемы химии – проблемы генезиса свойств и реакционной способности, который и определяет переход от одной концептуальной системы к другой.

Длительное время центральной проблемой химизма было соотношение состава и свойства, стремление объяснить все многообразные свойства химических соединений их элементарным составом:

состав • → • свойства.

В последующий период центральным понятием химии стало строение (структура), именно на его основе нашли свое объяснение разнохарактерные свойства многочисленных химических соединений, был открыт путь к синтезу новых веществ.

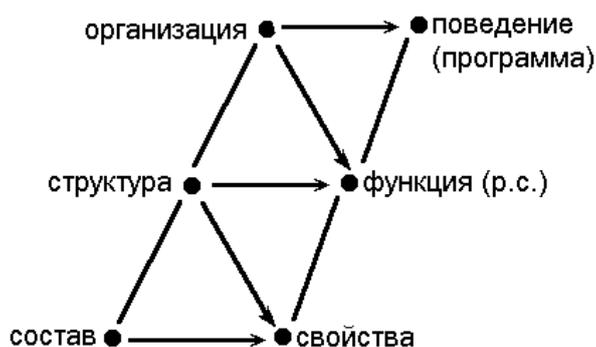
Появление представлений о структуре привело к дифференциации понятия свойства с выделением нового понятия – реакционной способности (р.с.), или более общей функции как производного, и от понятия структуры, и от понятия свойств:



Реакционная способность, в свою очередь, потребовала учета еще и кинетических факторов, от которых она зависит, по меньшей мере, в такой же степени, как и от структурных факторов. Категориальная схема при переходе к кинетическим теориям дополняется понятием организации, которое, аналогично понятию структуры, является атрибутом химической системы (но уже более сложной, чем молекула кинетической системы):



Дальнейший переход к изучению и теоретическому описанию систем высшего уровня организации, например, открытых самоорганизующихся каталитических систем, можно предусмотреть на основе логического завершения этой схемы:



Теперь появилось новое понятие поведения, которое выражает нечто иное по сравнению с понятиями свойств и реакционной способности. Именно с этим связаны проблемы химии, лежащие в основе четвертой концептуальной системы. Она исследует вопрос о поведении сложных предбиологических систем, об уровнях их организации. Узловым вопросом здесь в настоящее время является детерминация поведения систем в зависимости от их организации.

Каждая концептуальная система подготавливается всем предыдущим развитием химии и основывается на всех предыдущих системах.

Относительно новое учение о химической эволюции (IV концептуальная система) возникло на базе современных представлений химической кинетики, термодинамики и катализа (относятся к III системе), а именно: теорий активированного комплекса или переходного состояния, термодинамики необратимых процессов и эволюционного катализа.

Истоки этой новой концептуальной системы находятся все же непосредственно в каталитической химии. Работы Гуотми, Каннигема, Борескова и многих других заложили эмпирические основания идей самоприспособления или самодвижения состава и структуры катализаторов в сторону повышения уровня организации. Теоретическую интерпретацию этих идей дал А.П. Руденко в разработанной им теории саморазвития открытых каталитических систем.

Из схемы видно, что эта концептуальная система, являясь предпосылкой фундаментального объяснения механизма биогенеза, представляет собой своего рода верхнюю границу химии (границы справа нет), при которой она себя исчерпывает в отношении дальнейшего развития собственных концептуальных систем. Она создает научно-теоретическую и экспериментальную базу для обоснования биологических закономерностей, построения теоретической биологии.

## 2. Химическая эволюция и биогенез

Главная проблема современного естествознания – вопрос о происхождении жизни непосредственно связана с химической эволюцией. Эволюция химических неравновесных систем представляет собой путь, ведущий к пространственной, временной и пространственно-временной упорядоченности. В данном параграфе мы попытаемся рассмотреть принципы возникновения, развития и самоорганизации химических систем и выделить те признаки, которые усиливаются и начинают доминировать по мере приближения химических систем к биологическим.

В основе химической и биологической эволюции лежит морфогенез, т.е. направленное развитие структур. Под химической эволюцией обычно понимают происхождение и прогрессивное развитие химической организации вещества в целом, во всех ее проявлениях.

Химическая организация вещества по Кузнецову может выступать:

- 1) в форме дальтонидных соединений;
- 2) в форме бертоллидных соединений;
- 3) в форме переходного состояния или активированного комплекса.

Ю.А. Жданов определяет химические вещества как дискретные точки в континууме переходных состояний.

Исходя из этого, различают два аспекта химической эволюции:

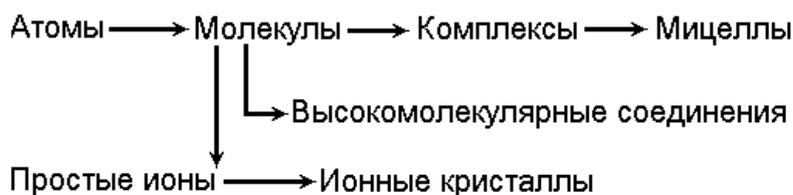
- 1) молекулярно-структурный;
- 2) функциональный (кинетический).

*Молекулярно-структурная эволюция*

В этом случае в результате обобщения различных подходов к химической эволюции (геохимического, космохимического, биогеохимического и биохимического) разрабатывают схемы эволюционной иерархии, которые указывают на различные направления развития вещества, например:

Молекулы типа  $A_2, A_3, \dots, A_n \rightarrow$  Атомные кристаллы

или в более общем виде:



Таким образом, согласно общим представлениям о ступенях организации вещества, наиболее высокоорганизованным признается вещество – носитель жизни, а затем и сознания. В земных условиях такой высшей ступенью организации являются сложные органические соединения – белки, ферменты, нуклеиновые кислоты и т.д.

Химическая эволюция в направлении живого в молекулярно-структурном аспекте представляется в виде стадий:

I – простейшие неорганические и органические вещества ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $HCN$ ,  $CH_2O$ ,  $H_3PO_4$ ,  $H_2S$  и др.);

II – малые биомолекулы или мономеры (аминокислоты, пурины, пиримидины, карбоновые кислоты, спирты, моносахариды и др.);

III – сложные органические вещества и биополимеры (белки, нуклеотиды, полисахариды, липиды и др.);

IV – надмолекулярные комплексы биополимеров;

V – живая клетка (или внеклеточные организмы – вирусы).

В опытах по биогенезу было показано, что почти все молекулярные составляющие живого вещества могут быть синтезированы абиогенно из простейших веществ с привлечением реальных для условий первичной Земли источников нехимической энергии (ультрафиолетовых лучей, электрических разрядов, радиоактивных излучений, тепла вулканических извержений, ударных волн и пр.).

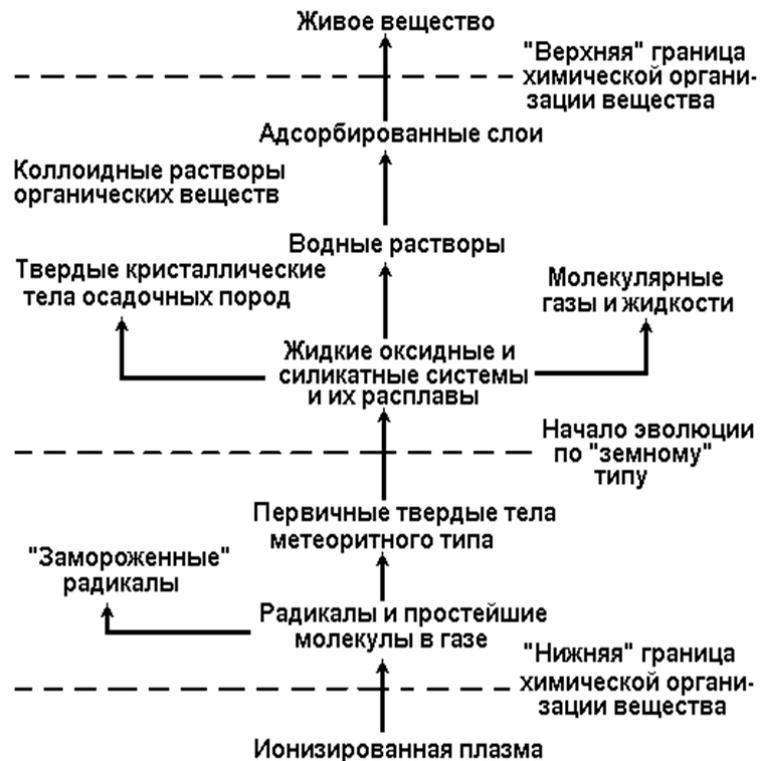
То есть период химической подготовки – период интенсивных и разнообразных превращений, о которых можно лишь строить осторожные гипотезы, сменился периодом биологической эволюции.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. В пределах общего направления химической эволюции выделяется главное, или магистральное, ведущее от уровня химических элементов к живой материи. Все остальные направления можно отнести к побочным или тупиковым направлениям.

2. Направленность химической эволюции отчасти заключена в самом химическом – отборе элементов и структур, которые обладают наибольшей сложностью, т.е. имеют наибольшие эволюционный потенциал, информационную емкость и интегративную способность (см. далее), и отчасти обусловлена средой.

3. В ходе эволюции отбирались те структуры, которые обеспечивали наиболее совершенные виды связей<sup>3</sup> (в том числе и обратной связи) и регулирования.



<sup>3</sup> Здесь имеется в виду не только химическая связь, но и всякая иная, обеспечивающая взаимоотношения между системами, подсистемами и элементами систем.

### Последовательность форм эволюции вещества

Первой и наиболее простой из этих структур можно назвать различные фазовые границы. Они служили основой химической и физической адсорбции, которая:

- а) вносила элементарное упорядочение во взаимное расположение частиц;
- б) увеличивала концентрацию последних;
- в) служила фактором появления каталитического эффекта.

Вторым структурным фрагментом называют группировки, обеспечивающие процессы переноса электронов и протонов. Сюда относят полупроводниковые цепи и структуры, ответственные за так называемое трансгидрирование, или перенос водорода. Этот тип структурных фрагментов связан с необходимостью привлечения углерода, а также других органо-генов<sup>4</sup>, способных образовывать двойные связи и служить донорами и акцепторами электронов. Эти группировки также служат началом окислительно-восстановительного или кислотно-основного катализа.

Третий структурный фрагмент, необходимый для эволюционирующих систем, – это группировки, ответственные за энергетическое обеспечение. Сюда входят окси-оксо-группы, фосфорсодержащие и другие фрагменты с макроэргическими связями. Высказывалось предположение, что эти структурные единицы тоже выполняют роль катализатора по отношению к ряду реакций, но, скорее всего, их назначение состоит в снятии термодинамических запретов путем сопряжения реакций диспропорционирования и разрушения макроэргических связей с ферментативными реакциями.

Следующим фрагментом эволюционирующих систем является уже развитая полимерная структура типа РНК или ДНК, выполняющая ряд функций, свойственных перечисленным структурам, и главное – роль шаблона или каталитической матрицы, на которой осуществляется воспроизведение себе подобных структур.

Одним из очень важных структурных фрагментов биохимических систем служит структура порфина, или точнее порфириновые структуры, уже содержащие металло-азот-углеродные связи. Известно, что порфириновые соединения, содержащие железо, магний, медь, цинк, кобальт, играют выдающуюся роль в качестве жизненно важных фрагментов.

---

<sup>4</sup> К элементам-органогенам относят С, Н, О, N, Р, S, общая массовая доля которых в организмах составляет 97,4 %. За ними следуют 12 элементов, которые принимают участие в построении многих физиологически важных компонентов биосистем: Na, К, Са, Mg, Fe, Si, Al, Cl, Cu, Zn, Со. Их массовая доля в организмах равна примерно 1,6 %. Вместе с тем полагают, что в живых организмах могут присутствовать почти все химические элементы. Так, в сыворотке крови человека в концентрациях от 10<sup>-4</sup> мг/мл и выше было обнаружено 76 элементов (анализ на инертные газы и большинство актиноидов не проводился).

Какой я химик, я политэконом.  
Что там «Основы химии»,  
вот «Толковый тариф» – это другое дело.  
Д.И. Менделеев

## Лекция 15. ТЕОРИЯ САМОРАЗВИТИЯ ОТКРЫТЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 1. Критерии сложности в химии

*Эволюционный потенциал* – показатель возможности дальнейшего развития, связанного с тем или иным химическим элементом (соединением), иначе – реакционная способность (способность вступать в разнообразные типы реакций). Характеризуется следующими признаками:

- 1) количество атомов, составляющих молекулу;
- 2) многообразие элементов, входящих в нее. Для органических соединений производным признаком является многообразие функциональных групп;
- 3) сложность основного элемента (или элементов), на базе которого построено химическое соединение;
- 4) длина цепи;
- 5) каталитическая активность.

*Интегративность* – способность вмещать и удерживать в себе противоположные качества служит основой самосохранения структурной целостности соединения.

Критерии сложности химических соединений могут быть дополнены формальными критериями, в особенности информационными.

Существует определенное соответствие между многообразием и характером его интеграции. Указанные стороны сложности лежат в основе двух разновидностей информационного подхода к описанию сложности – через разнообразие (Эшби) и через упорядоченность (Шеннон).

Ю.А. Жданов установил связь между информационной стороной природных процессов и отражением. Сущность отражения, по Жданову, сводится к ассимиляции внешних условий в ходе химической эволюции. Одной из наиболее существенных форм отражения на химическом уровне является способность органической молекулы образовывать переходное состояние во всех его проявлениях, чтобы использовать именно этот момент наибольшей активности для формирования самого себя по объекту отражения и одновременно преобразовывать этот объект. То есть критериями оценки повышения уровня организации химических систем служат повышение их свойств отражения, динамичности, появления свойств кодирования и передачи информации, дистанционного воздействия и обратной связи. Количественной мерой всего этого может служить удельная *информационная емкость* химических систем.

Всеми перечисленными критериями сложности в высшей степени обладают на элементарном уровне углерод, а среди химических соединений – белки. Рассмотрим это более подробно.

Число известных соединений углерода почти в десять раз превышает число соединений всех остальных элементов, причем он способен интегрировать наибольшее как количественное, так и качественное многообразие элементов.

Атомы углерода в одном и том же соединении способны выполнять роль и акцептора, и донора электронов. Они образуют почти все типы связей, какие знает химия:

- а) менее, чем одноэлектронная и одноэлектронные (например, при хемосорбции углеводородов на графите);
- б) двухэлектронные (например, в этане);

- в) трехэлектронные (в бензоле);
- г) четырехэлектронные ( $>C=C<$ );
- д) шестиэлектронные ( $-C\equiv C-$  связи)

со всевозможными промежуточными значениями зарядов связей. Сюда относятся и кумулированные связи  $C=C=C=C=C=C=C$ , и сопряженные связи  $C-C=C-C=C-C$ , имитирующие полупроводящие свойства или  $C\equiv C-C\equiv C-C\equiv C$ , обладающие еще более высокой  $\pi$ -электронной проводимостью. Среди углерод-углеродных связей можно встретить чисто ковалентные, почти чисто ионные и ионоидные с самыми различными значениями зарядов атомов:  $C^{\delta+}$ ,  $C^{\delta-}$ .

Атомы углерода в одной и той же молекуле могут иметь самые разные степени окисления:



Углерод является единственным элементом, у которого валентность и координационное число равны. Углерод обладает уникальной способностью к образованию прочных цепей, циклов и других структурных скелетов, составленных из углеродных атомов.

Следует отметить различие физического и химического характера усложнения химических элементов. Речь идет о том, что с увеличением порядкового номера атомы как физические образования неуклонно усложняются, в то время как химически они могут упрощаться. Например, сложность химических элементов (учитывая приведенные критерии) возрастает с увеличением порядкового номера до углерода, а затем убывает, а в некоторых случаях не изменяется (все лантаноиды и актиноиды химически являются очень сходными).

Феномен углерода с этих позиций состоит в том, что это такой элемент, физическая природа которого еще не переусложнена, в силу чего он оказывается максимально способным к разнообразным химическим превращениям. В то же время углерод и его соединения достаточно стабильны при обычных температурах.

Физическая сложность химических элементов с определенного момента становится даже препятствием к их устойчивому существованию. Сложные (радиоактивные) атомы оказываются внутренне нестабильными образованиями, способными к непрерывному самопроизвольному распаду.

В этом отношении вызывает интерес попытка С.А. Щукарева использовать критерий биогенности (биохимическую характеристику элементов) для более глубокого понимания специфических свойств элементов.

Проведенный им сравнительный анализ достаточно полного набора биогенных элементов показал, что их особенности зависят от электронной корреляции и кайносимметрии (симметрии, появляющейся при вхождении в атом добавочного внешнего электрона). Кайносимметричные электроны придают атомам первого и второго периода известную жесткость (малую поляризуемость) электронной оболочке, большие потенциалы возбуждения валентных состояний и ионизации и целый ряд других свойств, ведущих к химическому замораживанию реакций при обычных температурах; этому же способствуют малые массы атомов, а также низкие заряды их ядер.

Все эти свойства важны для сохранения устойчивости (при невысоких температурах) сложных скелетов органических соединений. Постепенное вырождение кайносимметрии, где развиваются вторично-периодические свойства, придало новое направление отбору: более тяжелые атомы (в частности, атомы и катионы металлов) оказались биогенно необходимыми катализаторами, побуждающими органические молекулы к реакции в живых клетках.

Белковые тела имеют массу сходств с другими веществами. Но есть признак, которым кроме них не обладает, по-видимому, ни одно другое вещество. Это совместимость основных химических функций, принадлежащих в условиях *in vitro* разным веществам. Белковые тела в процессе жизнедеятельности, *in vivo*, совмещают в себе функции и реагентов, и катализаторов, и растворителей, и реакционных аппаратов (сосудов). Они совмещают в себе и такие противоположные функции, как кислотность и основность, способность быть донором

и акцептором электронов. Белки обладают тончайшей химической индивидуальностью. Это типичные дальтониды, ибо они изменяют свою специфичность при малейшем изменении состава. И вместе с тем для них характерна лабильность химических связей.

Полифункциональность белковых тел обусловлена рядом факторов: их элементарным составом, строением отдельных звеньев и способом связи последних в единую систему. Белковые тела обладают самыми различными функциональными группами, какие только знает органическая химия. Здесь имеются активные карбонильные и карбоксильные группы, аминогруппы, легко омыляемые эфирные связи, подвижные водородные атомы, а часто и металлоорганические группировки со всевозможными типами, в том числе и многоцентровыми связями между металлом и органическим остовом. Особая форма химической организации белковых тел придает последним исключительную подвижность межатомных связей вплоть до свободного перемещения  $\pi$ -электронов вдоль полипептидной цепи.

Все это вместе взятое создает предпосылки для протекания в живых организмах таких реакций, которые характеризуются минимальными значениями энергии активации, исключительной селективностью и легкостью вовлечения в процесс жизнедеятельности веществ, находящихся в окружающей среде.

Совмещение функций реагентов с функциями катализаторов в одном процессе является важным показателем развития вещества. Считается доказанным, что формирование веществ – носителей жизни на Земле – происходило именно путем накопления определенных органических катализаторов в процессе химической и биологической эволюции и отбора тех из них, которые обладали известной стабильностью и проявляли автокаталитические функции. Так, ион железа, катализирующий распад перекиси водорода, активируется в миллионы раз, попадая в состав порфиринового ядра. Получившийся таким образом комплекс – гем начинает катализировать реакции, ведущие к образованию самого порфирина.

По самым последним сообщениям, биохимики осуществили дарвиновскую эволюцию на молекулярном уровне. В результате таких экспериментов удается получать макромолекулы с желаемыми свойствами проводя циклы селекций (отбора), амплификации<sup>5</sup> и мутации на молекулах РНК вируса  $Q_{\beta}$ , содержащего всего четыре гена.

## 2. Теория саморазвития открытых каталитических систем (эволюционный катализ)

Автором этой теории является А.П. Руденко.

Рассмотрение молекулярной химической эволюции как ряда последовательных изменений и усложнений молекул определенных веществ (при актуалистическом подходе) оставляет без внимания самое главное в содержании эволюции: динамику направленных изменений объектов эволюции, движущие силы изменений и естественного отбора, взаимосвязь объектов с окружающей средой. Поэтому А.П. Руденко полагает, что в химической эволюции следует выделять прежде всего процессы, в которых осуществляется эволюция, а затем уже рассматривать результаты этих процессов, т.е. эволюционные изменения в веществе объекта эволюции, к которым они приводят.

С таких позиций химическая эволюция – самоусложняющийся сложный химический процесс, в котором происходят направленные и взаимосвязанные изменения механизма реакций и веществ.

Такая связь между процессами и веществами с ведущей ролью процессов существует лишь в химических системах, представляющих собой промежуточный реакционный комплекс в ходе его образования и распада на продукты. Ввиду этого, объекту химической эволюции должны быть присущи черты активного комплекса некоторой реакции, являющейся

<sup>5</sup> Амплификация – процесс производства потомства, размножение или, более точно, копирования унаследованных генов.

главным (базисным) процессом в эволюции, объединяющим все другие внутренние процессы и их изменения и обеспечивающим:

- а) цельность объектов эволюции;
- б) преемственность последовательных эволюционных изменений;
- в) неразрывность ее самой во времени.

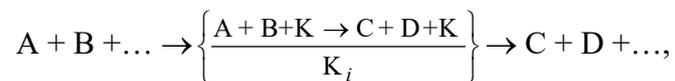
Это возможно, если существует обязательная зависимость всех процессов и изменений, совершающихся в объектах эволюции, от энергии базисной реакции, что реализуется в результате образования единого кинетического континуума веществ и реакций, составляющих элементарный (неделимый) объект эволюции.

Из этого следует, что химическая эволюция возможна только в элементарных открытых химических системах, существующих за счет обмена веществ и энергии базисной реакции, и должна представлять собой последовательные изменения этих систем. Могут изменяться как конституционная сфера систем (состав, строение, надмолекулярная структура), так и кинетическая сфера (характер, скорость, механизм взаимодействия и превращения веществ, входящих в систему, и его сложность).

Для того, чтобы базисная реакция выполняла свою организующую функцию, она должна быть одной и той же в ходе всей химической эволюции, то есть происходящие при эволюции изменения в конституционной и кинетической сферах должны быть связаны только с изменениями внестехиометрических компонентов этой реакции, ее катализатора. То есть катализ и только он служит основой химической эволюции. Отсюда видно, что единственным видом химических систем, способным к химической эволюции, являются элементарные открытые каталитические системы (ЭОКС).

Эволюционирующие системы заведомо многомолекулярны, так как включают в себя и компоненты базисной реакции, и катализаторы, и вспомогательные структурирующие вещества, и другие вещества, вступающие в реакцию с катализаторами во внутренних сопряженных системах.

Динамическое существование ЭОКС описывает модель со стационарным катализатором (проявление классического катализа):



где A, B, C, D – компоненты и продукты базисной каталитической реакции,  $K_i$  – катализатор и другие внестехиометрические компоненты системы { }.

Устойчивость неравновесного порядка взаимодействия компонентов химических систем определяется интенсивностью обмена веществ и энергии  $I$ :

$$I = af = \frac{\kappa}{\alpha} \frac{kT}{h} \frac{[\Delta G]}{N_A} \rightarrow \max,$$

где

$$a = \frac{n}{t} = \frac{1}{t^*} = \kappa \frac{kT}{h}$$

– абсолютная каталитическая активность, измеряемая числом каталитических актов в единицу времени,  $f = \Delta G / \alpha N_A$  – элементарное сродство базисной реакции,  $\Delta G$  – потенциал Гиббса,  $N_A$  – число Авогадро,  $\alpha$  – стехиометрический коэффициент,  $k$  – константа Больцмана,  $h$  – постоянная Планка,  $T$  – температура,  $0 \leq \kappa \leq 1$  – безразмерная переменная, пропорциональная абсолютной каталитической активности.

Саморазвитие ЭОКС возможно лишь при соблюдении трех условий:

- 1) при постоянно протекающей базисной реакции, поддерживающей своей энергией существование каталитической системы,
- 2) при наличии комплекса таких постоянных условий, как температура, объем или давление, приток реагентов, удаление продуктов реакции и избытка тепла,

3) при наличии комплекса переменных условий, приводящих к нарушениям стационарности открытой системы, но не к прекращению ее функций, то есть не к полной дезактивации катализатора. В этот комплекс входят факторы внешней среды и прежде всего случайные примеси к реагентам. При этом оптимальными оказываются условия осуществления каталитических реакций в жидкой фазе в водной среде, обеспечивающие максимальное разнообразие возможных эволюционных изменений ЭОКС<sup>6</sup>.

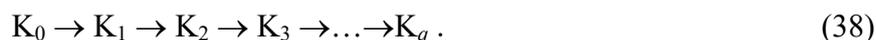
Механизм саморазвития рассматривается при этом как изменение природы (состава и структуры) центра катализа под влиянием этих последних факторов. Если вероятность этого изменения  $p = 0$ , то очевидно можно считать, что катализ протекает идеально, то есть без изменения катализатора. Если же  $p = 1$ , то катализатор становится реагентом и вносится в реакцию в стехиометрических количествах. Реальный же катализ имеет место только при неравенстве  $0 < p < 1$ . Следовательно, и саморазвитие каталитических систем возможно при наличии этого неравенства. Это означает, что одной из основ саморазвития ЭОКС должен быть статистический фактор.

Саморазвитие каталитических систем возможно, кроме того, лишь в тех случаях, когда изменения природы центров катализа ведут к изменению абсолютной каталитической активности этих центров по отношению к базисной реакции, то есть когда вступает в действие кинетический фактор.

Как отмечает В.И. Кузнецов, в высшей степени интересным представляется анализ взаимосвязи этих двух факторов, осуществленный А.П. Руденко. Рассматривая абсолютную каталитическую активность одного центра катализа  $a$  как число каталитических актов, происходящих за единицу времени, Руденко показывает, что  $a$  в принципе остается неизменной при  $p = 0$ , но при  $0 < p < 1$  за одну стадию изменения центра катализа  $a$  может измениться как в сторону увеличения ( $a_1 < a_2$ ), так и в сторону уменьшения ( $a_1 > a_2$ ). При этом оба события будут равновероятны и о направленном развитии системы не может быть речи. Но навстречу статистическому идет кинетический фактор, вносящий направленность в изменение системы. Дело в том, что в случае  $a_1 < a_2$  сразу же возрастает интенсивность базовой реакции, увеличивается частота каталитических актов и при равной вероятности единичных событий  $a_1 < a_2$  и  $a_1 > a_2$  вероятность цепи прогрессивных изменений центра катализа  $\Pi_{\text{пр.}}$  оказывается больше вероятности цепи регрессивных изменений  $\Pi_{\text{регр.}}$  за один и тот же промежуток времени и при одной и той же элементарной вероятности изменений центра катализа.  $\Pi_{\text{пр.}}/\Pi_{\text{регр.}}$  всегда оказывается больше единицы.

При взаимодействии с факторами внешней среды ЭОКС реагируют как единое целое. Проявляя свой гомеостазис, ЭОКС как бы приспосабливаются к действию внешней среды и несколько изменяют свой устойчивый порядок функционирования. При этом возможны обратимые и необратимые изменения ЭОКС и механизма осуществления базисного обменного процесса, зависящего от природы катализатора и типа реакции. При обратимых изменениях затрагивается кинетическая сфера ЭОКС, и после прекращения действия возмущающего фактора система возвращается к прежнему порядку функционирования. При необратимых изменениях природы ЭОКС затрагивается конституционная сфера (катализатор), и система приобретает новый устойчивый порядок функционирования. Так как возможность дальнейшего существования ЭОКС определяется интенсивностью процесса, отличной от нуля ( $af > 0$ ), то при создании условий многократных последовательных изменений ЭОКС базисный процесс будет продолжаться, а ЭОКС существовать лишь при таких изменениях, при которых  $a > 0$ . Такие изменения являются эволюционными, а изменения, когда  $a = 0$  – неэволюционными. В последнем случае ЭОКС перестают существовать и распадаются. Следовательно, сам базисный процесс, на котором существуют ЭОКС, автоматически отбирает эволюционные изменения от неэволюционных и выявляет цепи генеалогически связанных форм ЭОКС:

<sup>6</sup> Эти выводы получили подтверждение в работе О.В. Эстерле, показавшего методами классической теоретической физики существование максимума вероятности химических, фазовых и других превращений элементов при 310 К.



При таком первичном естественном отборе эволюционных изменений ЭОКС от неэволюционных и происходит выявление процессов химической эволюции среди всех других неорганизованных процессов химии.

Необратимые изменения наследуются, так как они сопряжены с изменением наследственного порядка функционирования ЭОКС. Реакция ЭОКС как единого целого на воздействия факторов внешней среды, вызывающая их приспособление к изменениям внешних условий, есть не что иное, как примитивная форма отражения системой «внешнего мира» на физико-химическом уровне, сопровождаемая определенным ее поведением.

Учитывая это, цепи эволюционных изменений ЭОКС (38) должны быть связаны с такими последовательными изменениями механизма, в которых адекватно изменяется наследственный порядок функционирования при сохранении целостности системы и основных черт механизма, и при росте объема эволюционной информации. А так как основой поведения ЭОКС являются присущие ей свойства, а факторы внешней среды лишь вызывают ту или иную ее реакцию, то реализация цепей (38) действительно является саморазвитием ЭОКС, а не случайными ее изменениями, вызываемыми внешними силами.

Возможность реализации длинных цепей саморазвития ЭОКС (38), то есть возможность химической эволюции, определяется соблюдением четырех феноменологических принципов развития, выводимых из сути своего явления.

1. Вероятностный (статистический) принцип связывает возможность эволюции с существованием потенциальных путей дальнейших изменений природы ЭОКС после каждого предыдущего эволюционного изменения, которые зависят от природы самих ЭОКС и внешних условий.

2. Кинетический принцип связывает возможность эволюции с продолжением динамического существования ЭОКС после каждого изменения их природы и абсолютной каталитической активности (активность катализатора может уменьшаться или увеличиваться, но не должна становиться равной нулю).

3. Термодинамический (энергетический) принцип связывает возможность длительной эволюции с эндергоническим характером эволюционных изменений ЭОКС и способностью базисной реакции производить в системе полезную работу, направленную против равновесия, а также с тенденцией роста КПД базисного процесса и устойчивого неравновесия ЭОКС при длительной эволюции.

4. Информационный (генетический) принцип связывает возможность длительной эволюции с существованием однозначной связи между изменениями природы ЭОКС и абсолютной активности их катализаторов, обеспечивающей запоминание эволюционной информации в физико-химических системах, и ее выражение в изменении наследственного порядка функционирования ЭОКС. Объем информации при эволюции должен обязательно увеличиваться, то есть каждое эволюционное изменение должно быть качественно неповторимым и отличаться новизной.

Можно вывести ряд следствий из этих принципов, уточняющих условия химической эволюции и их ограничения. В частности, если не выполняется вероятностный принцип, развитие ЭОКС прекращается, но сама система не гибнет, а продолжает существовать на достигнутом уровне. Если не выполняется кинетический принцип, то не только прекращается развитие ЭОКС, но и ее существование. Если же не выполняются термодинамический и информационный принципы, то существование и развитие ЭОКС может некоторое время продолжаться, затем система деградирует.

Направленность химической эволюции, ее причины, механизм действия естественного отбора по величине абсолютной каталитической активности и эволюционных характеристик, включающих ее значение, определяет основной закон эволюции ЭОКС. Он проявляется как принцип саморазвития, самоорганизации и самоусложнения ЭОКС. Согласно основному закону, с наибольшей скоростью и вероятностью осуществляются те пути эволюционных изменений, на которых происходит максимальное увеличение абсолютной каталитической активности или же других эволюционных свойств, зависящих от кинетического параметра  $a$ .

### 3. Общая теория химической эволюции и биогенез

Так как ЭОКС – единственно возможные объекты химической эволюции, все выводы теории эволюционного катализа об эволюции ЭОКС целиком относятся к химической эволюции вообще.

Принцип последовательного формирования все более и более сложных новых свойств и функций ЭОКС на разных этапах химической эволюции, преобладание этих признаков и эволюционных закономерностей на всех этапах эволюции и неразрывность химической и биологической эволюции дает возможность фундаментального обоснования всех свойств и функций живых организмов, биохимических механизмов и специфических закономерностей биологической эволюции на основе общей теории химической эволюции и биогенеза.

Согласно этой теории, очередность формирования новых обобщенных свойств и функций ЭОКС при преодолении вероятностных и кинетических пределов и их характер строго детерминированы и не зависят от природы базисной реакции и исходной природы катализатора ЭОКС, т.е. на какой бы базе ни проходила прогрессивная химическая эволюция, приводящая к жизни, она должна пройти все естественные этапы при формировании всей совокупности обобщенных свойств и функций. Последние, в отличие от фундаментальных, определяющих саму возможность существования и эволюции систем, приобретаются ими в ходе эволюции. При формировании каждого из таких обобщенных свойств завершается один этап эволюции и начинается другой.

Наиболее важное значение для перехода из неживого в живое имеет формирование новых функций ЭОКС при преодолении кинетических пределов развития. Существуют два кинетических предела (КП) – температурный и концентрационный. При преодолении первого КП происходит формирование свойства умножения каталитических функций (свойство однородного роста); при преодолении второго КП формируются свойства точной пространственной редупликации ЭОКС в целом (свойство размножения). Формирование свойства самовоспроизведения ЭОКС в целом, приобретаемое при преодолении II КП, является рубежом перехода неживого в живое. Все же другие свойства, характерные для живых организмов, но также присущие и саморазвивающимся ЭОКС, постепенно развиваются и формируются на стадии химической эволюции и переходят в готовом виде к живым системам как их первичные (фундаментальные) свойства. Это: особенности вещественного состава, структурной и функциональной организации систем, способ существования и тип основного метаболизма, цельность систем, динамический тип устойчивости, реакции на воздействия внешней среды и механизм приспособления к ним, наследственный порядок функционирования всей системы в целом, механизм запоминания, хранения и наследования эволюционной генетической информации, способность совершать полезную работу внутри системы, направленную против равновесия, и устойчивое неравновесие системы, свойства однородного роста и т.д. Другими словами, при достижении II КП ЭОКС ни по вещественному составу и структуре, ни по поведению и функциям не отличаются от простейших живых систем, кроме отсутствия функции самовоспроизведения.

Преодоление II КП является рубежом и других существенных изменений в ходе эволюции. В результате этого перехода резко возрастают темп и характер эволюции и тип естественного отбора.

Кинетические пределы объективно делят ход химической эволюции на два этапа: этап первичной химической эволюции (от нулевого пункта до первого КП) и этап добиологической (предбиологической) химической эволюции (от первого до второго КП); после второго КП начинается биологическая эволюция.

При преодолении общего предела химической эволюции химическая форма движения выходит за свои рамки; хотя она исчерпывает себя в химии, но продолжает служить основой более высокой формы биологического движения.

Согласно сказанному, физико-химическим критерием перехода от неживых ЭОКС к живым служит преодоление второго КП, связанное с формированием функции размножения систем. Это

свойство является единственным специфическим свойством живых систем, возникающим при преодолении второго КП, в отличие от всех остальных фундаментальных и обобщенных свойств, переходящих к живым системам от ЭОКС. Развитие и усовершенствование этого свойства лежит в основе последующей биологической эволюции<sup>7</sup>.

(Источник: [http://www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=6696292&lfrom=202213444](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=6696292&lfrom=202213444). **Рождение сложности. Эволюционная биология сегодня. Неожиданные открытия и новые вопросы / Александр Марков. Астрель, Corpus. – М., 2015**)

#### 4. Самая главная химическая реакция

Жизнь на Земле основана на способности автотрофных организмов производить органику из углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). Поэтому тот химический процесс, в ходе которого  $\text{CO}_2$  включается в состав органических соединений, «фиксация  $\text{CO}_2$ », по праву считается одним из важнейших (если не самым важным) в живой природе.

Большинство организмов использует для фиксации  $\text{CO}_2$  циклическую последовательность химических реакций, известную под названием «цикл Кальвина». Ключевой фермент цикла Кальвина называется «рубиско» (это сокращенный вариант труднопроизносимого полного названия «рибулозобисфосфат карбоксилаза/оксигеназа»). Рубиско – самый распространенный в мире фермент. Он присоединяет молекулу  $\text{CO}_2$  к органическому веществу, которое называется рибулозобисфосфат (сокращенно – RuBP). Таким образом, молекула углекислого газа оказывается включенной в состав органических соединений.

Недавно выяснилось, что у архей способ фиксации  $\text{CO}_2$  отличается от классического цикла Кальвина. Главное отличие состоит в том, что у архей в этом процессе непосредственное участие принимают рибонуклеотиды. Это хорошо согласуется с теорией РНК-мира. Фиксация  $\text{CO}_2$  – один из древнейших биохимических процессов, который должен был появиться еще в то время, когда все функции в живых организмах выполнялись молекулами РНК, рибонуклеотидами и их производными. Поэтому следовало ожидать, что и фиксация  $\text{CO}_2$  изначально должна была идти под контролем и при активном участии этих молекул.

В цикле Кальвина участвует специальный фермент, ответственный за синтез RuBP. Этот фермент есть у растений и автотрофных бактерий, однако у архей он отсутствует. Поэтому до самого последнего времени было неясно, откуда архей берут RuBP, вещество, абсолютно необходимое для фиксации  $\text{CO}_2$ .

Эту загадку удалось разгадать японским биохимикам в 2007 году. Оказалось, что RuBP образуется у архей не из других фосфорилированных сахаров, как в цикле Кальвина, а из молекулы, являющейся составным блоком РНК и выполняющей «по совместительству» множество других функций в живой клетке, – аденозинмонофосфата (АМФ). АМФ – это рибонуклеотид, состоящий, как и все рибонуклеотиды, из азотистого основания (в данном случае аденина), сахара (рибозы) и одного остатка фосфорной кислоты.

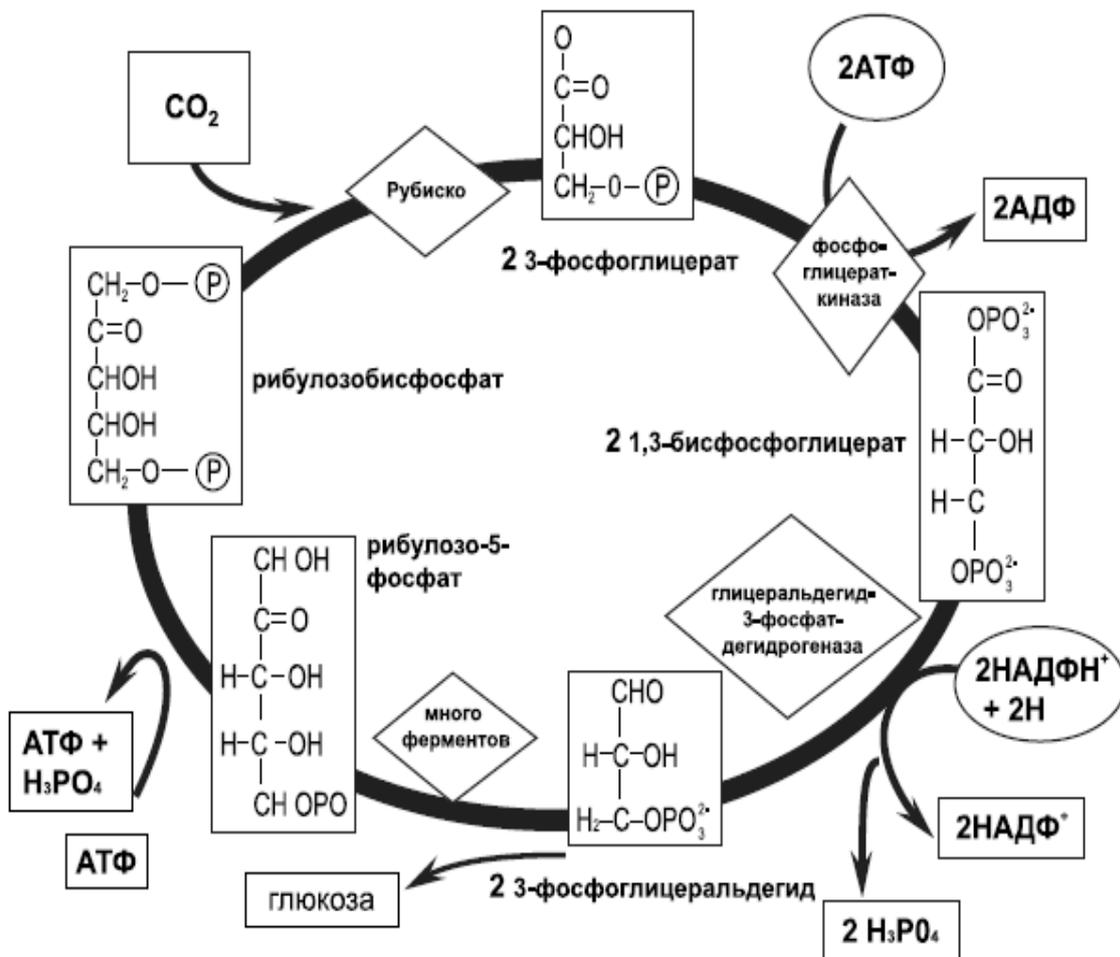
Есть все основания полагать, что этот способ фиксации  $\text{CO}_2$  эволюционно древнее, чем цикл Кальвина. Неслучайно он обнаружен именно у архей – организмов, которых многие специалисты считают самыми архаичными формами жизни.

(Источник: **Takaaki Sato, Haruyuki Atomi, Tadayuki Imanaka. Archaeal Type III RuBisCOs Function in a Pathway for AMP Metabolism // Science. – 2007. – V. 315. – P. 1003–1006**)

<sup>7</sup> В отличие от А.П. Руденко Д.С. Чернавский главным отличительным свойством живых систем от неживых называет наличие и наследование биологической информации у первых, а способность к авторепродукции может реализовываться и в неживой природе в существенно неравновесных условиях. Теоретически рассматривая проблему происхождения жизни, он пришел к выводу о возможности пути непрерывной эволюции и постепенного накопления биологической информации, причем синтез белка в первичных условиях основан, по его мнению, не на принципах генетической информации, а следует законам гетерогенного катализа.

В течение первого миллиарда лет существования прокариотной биосферы (примерно от 4,1 до 3,2 млрд лет назад) одни за другими появлялись новые формы микробов и новые способы получения энергии. В числе первых, по-видимому, появился бескислородный (аноксигенный) фотосинтез (? – 3,2–3,7 млрд лет назад). Его освоили бактерии – предки нынешних зеленых, пурпурных и цианобактерий.

Аноксигенные фотосинтезирующие бактерии научились использовать энергию солнечного света при помощи особых светочувствительных молекул – бактериохлорофиллов и связанных с ними белковых комплексов. Молекулярная «машина», необходимая для осуществления эффективного аноксигенного фотосинтеза, устроена довольно сложно (хотя и намного проще, чем та, что используется оксигенными фотосинтетиками, появившимися позже). По-видимому, эффективный фотосинтез возник не сразу. Начиналось все с того, что некоторые микробы научились немного «подкармливаться» солнечным светом при недостатке других источников энергии. Для такой «подкормки» не нужны сложные молекулярные комплексы – достаточно одного-единственного светочувствительного белка. Недавно выяснилось, что подобные архаичные, простые и малоэффективные способы утилизации солнечного света до сих пор очень широко распространены в мире прокариот. Стало ясно, что способность к росту за счет энергии солнечного света (фототрофность) распространена в живой природе гораздо шире, чем считалось до сих пор.



Цикл Кальвина – важнейший биохимический процесс в живой природе, в ходе которого неорганический углерод вводится в состав органических молекул



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
Введение .....	7
Часть I. Сценарий курса лекций .....	28
Лекция 1. Дискурсия и интуиция. Критерий очевидности. Проблема научной аксиоматики .....	28
Лекция 2. Концепция дискретности и континуальности в описания природы. Структурные уровни организации материи. Роль фундаментальных мировых констант .....	38
Лекция 3. Законы сохранения как следствие симметричных свойств пространства и времени .....	42
Лекция 4. Пространственно-временной континуум как следствие фундаментальной константы – скорости света .....	45
Лекция 5. Геометрия пространства–времени. Гравитация как следствие геометрии в парадигме Эйнштейна .....	50
Лекция 6. Входим в микромир. Константа планка и волна Де-Бройля. Принцип неопределенности Гейзенберга. Спин .....	56
Лекция 7. Четыре фундаментальных взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное .....	66
Лекция 8. Сценарий «Сотворения Мира» .....	70
Лекция 9. Закономерности макромира. Начала термодинамики. Константа Больцмана .....	79
Лекция 10. Необходимые условия самоорганизации. Закономерности возникновения диссипативных структур. Универсальный критерий эволюции Гленсдорфа–Пригожина .....	84
Лекция 11. Критерий относительной упорядоченности живых систем. Эволюция и деградация. Основные закономерности перестроек .....	94
Часть II. Химические системы .....	104
Лекция 12. Некоторые аксиомы химии. Время жизни активированного комплекса как фундаментальная химическая константа .....	104
1. Химические реакции и их энергетика .....	104
2. Теория активированного комплекса .....	105
Лекция 13. Самоорганизация на химическом уровне. Концептуальные системы химии .....	107
1. Реакция Белоусова-Жаботинского .....	107
2. Катализ, его критерии и сущность .....	110
Лекция 14. Концептуальные системы химии. Химическая эволюция и биогенез .....	114
1. Концептуальные системы химии .....	114
2. Химическая эволюция и биогенез .....	116
Лекция 15. Теория саморазвития открытых каталитических систем .....	119
1. Критерии сложности в химии .....	119
2. Теория саморазвития открытых каталитических систем (эволюционный катализ) .....	121
3. Общая теория химической эволюции и биогенез .....	125
4. Самая главная химическая реакция .....	126

# ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция просит авторов руководствоваться изложенными ниже правилами

1. Статья, предоставленная для публикации, должна иметь направление экспертное заключение от учреждения, в котором выполнена работа.

2. Рукопись должна быть отпечатана на компьютере или машинке (размер шрифта – 12 кегль) через два машинописных интервала (полуторный межстрочный интервал в редакторе Word), на белой бумаге формата А4 (297x210 мм) с одной стороны листа, левое поле – 25 мм. Все листы в статье должны быть пронумерованы.

3. Статья должна быть подписана авторами и представлена в двух экземплярах.

4. Рисунки, таблицы и фотографии в текст рукописи не размещаются, а прилагаются на отдельных листах в конце статьи.

5. Начало статьи оформляется по образцу: индекс статьи по универсальной десятичной классификации (УДК), название, авторы, полное название учреждений, в которых выполнялось исследование, краткая аннотация (объем – не более половины страницы), текст статьи. Далее на отдельных листах:

- список литературы,
- таблицы,
- рисунки,
- подписи к рисункам,
- на английском языке: название, авторы, полное название учреждений, в которых выполнялось исследование, краткая аннотация,
- адреса для переписки, телефоны, fax, e-mail.

6. В статье должны использоваться единицы и обозначения в международной системе единиц СИ и относительные атомные массы элементов по шкале  $^{12}\text{C}$ . В расчетных работах необходимо указывать авторов используемых программ. При названии различных соединений необходимо использовать терминологию ИЮПАК.

7. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

8. При упоминании в тексте иностранных фамилий в скобках необходимо давать их оригинальное написание, за исключением общеизвестных, а также в случае, если на эти фамилии даются ссылки в списке литературы.

9. При упоминании иностранных учебных заведений, фирм, фирменных продуктов и т.д. в скобках должны быть даны их названия в оригинальном написании.

10. Оформление формул должно соответствовать следующим требованиям.

- a. Все формулы и буквенные обозначения должны быть напечатаны на компьютере, или впечатаны на машинке с латинским шрифтом, или вписаны от руки черными чернилами, с четкой разметкой всех особенностей текста (индексов, полужирного и курсивного начертаний и т.д.).
- b. При разметке формул необходимо прописные и строчные буквы всех алфавитов, имеющих одинаковое начертание (P, S) подчеркивать простым карандашом: большие – двумя чертами снизу, маленькие – двумя чертами сверху.
- c. Показатели степени и индексы выделять простым карандашом дугой: верхние – снизу, нижние – сверху.
- d. Для полужирных символов (векторов) использовать подчеркивание синим карандашом.

11. Таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать название таблицы. Все графы в таблицах и сами таблицы должны иметь заголовки.

12. Рисунки предоставляются размером не менее 5х6 см и не более 17х24 см, с указанием низа и верха. Рисунки должны быть выполнены на белой бумаге черной тушью или распечатаны на лазерном или струйном принтере качеством не менее 300 dpi. Использовать другие цвета кроме черного не допускается.

13. Фотографии предоставляются на не тисненной глянцевой бумаге размером не более 9х12 см.

14. На обратной стороне рисунков и фотографий указывают фамилию первого автора, порядковый номер, верх, низ.

15. В тексте необходимо дать ссылки на все приводимые рисунки и таблицы, на полях рукописи слева должно быть отмечено, где приводимый рисунок или таблица встречаются впервые.

### ***Требования к рукописям, предоставляемым в электронном виде***

1. В целях сокращения сроков подготовки материалов к публикации желательно предоставление материалов в электронном виде. Электронная версия материалов сдается в дополнение к бумажной и должна быть максимально ей идентична.

2. Электронная версия предоставляется электронной почтой (avse@kbsu.ru), или на 3,5» дискетах, форматированных для IBM PC, либо на CD- или DVD-дисках. На диске должны быть обозначены имена файлов, название статьи и фамилия и инициалы автора(ов).

3. Основной текст статьи и таблицы предоставляются в формате MS Word for Windows (версии 6.0 и старше). Шрифт – Times New Roman, 12 кегль. Строки в пределах абзаца не должны разделяться тем же символом, что и абзацы.

4. Формулы, если это необходимо, должны быть набраны в формате MS Equation. Как в тексте, так и в MS Equation следует соблюдать следующие стили и размеры:

- a. Стил: текст, функция, числа – Times New Roman Обычный, переменная – Times New Roman Наклонный (Курсив), матрица-вектор Times New Roman Полужирный, греческие и символы – Symbol Обычный.
- b. Размер: обычный, мелкий символ – 12 пт, крупный индекс – 8 пт, мелкий индекс – 6 пт, крупный символ – 18 пт.
- c. Формат-интервал: высота/глубина индексов – 30 %, все остальное – по умолчанию.
- d. В числах следует использовать десятичную запятую, а не точку.

5. Штриховые и полутоновые иллюстрации должны быть представлены в форматах TIFF, JPEG, GIF с разрешением не менее 300 dpi. Цветовая палитра: grayscale. Каждый графический файл должен содержать один рисунок.

Допускается сжатие графических файлов архиваторами WinRAR или WinZIP. Каждый файл должен быть помещен в отдельный архив.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ  
СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

Редактор-корректор *Л.З. Кулова*

Компьютерная верстка *В.Н. Мидовой*

Подписано в печать 22.12.2017. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Печать цифровая. Бумага офсетная. 15.34 усл.п.л. 15.0 уч.-изд.л  
Тираж 1001 экз. Заказ № 99.

Оперативная полиграфия «Binding2016».  
360004, г. Нальчик, ул. Тургенева, 68.