



Редколлегия журнала поздравляет всех наших авторов и читателей с Новым 2009 годом! Под Новый год, оглядываясь на прошлое, хотелось бы заглянуть в будущее. В издательствах АСТ и АСТ Москва вышла книга «Будущее науки в XXI веке. Следующие пятьдесят лет», которая несомненно будет интересна для авторов и читателей ПНД. Мы публикуем содержание книги и статью Стивена Строгаца «"Маленькое открытие" Ферми и будущее теории хаоса и сложности», хорошо иллюстрирующую тематику нашего журнала.

Изв. вузов «ПНД», т. 16, № 6, 2008

УДК 001

## **БУДУЩЕЕ НАУКИ В XXI ВЕКЕ** **Следующие пятьдесят лет**

*Под ред. Джона Брокмана*

©John Brockman, 2002

©Перевод Ю.В. Букановой, 2008

©ООО Издательство «АСТ МОСКВА», 2008

М.: АСТ: АСТ МОСКВА, 2008. 255, [1] с.

ISBN 978-5-17-049137-7 (ООО «Издательство АСТ»)

ISBN 978-5-9713-8252-2 (ООО Издательство «АСТ МОСКВА»)

За последние пятьдесят лет наука совершила настоящий прорыв. Освоение космоса и клонирование, Интернет, нанотехнологии и открытие планет за пределами Солнечной системы уже стали для нас реальностью. Но мир меняется все стремительнее. Какие же научные прорывы ожидают нас в ближайшее время? На этот вопрос в простой и необыкновенно увлекательной форме отвечают знаменитые физики и генетики, математики и кибернетики, биологи и психологи, а также специалисты по проблемам искусственного интеллекта.

### **Содержание**

#### **От составителя**

#### **Часть I. Будущее в теории.**

*Ли Смолин.* Будущее Вселенной. *Мартин Рис.* Загадки космологии: одиноки ли мы во Вселенной? *Ян Стюарт.* Математика 2050 года. *Брайан Гудвин.* В тени культуры. *Марк Д. Хаузер.* Пересаженный разум. *Элисон Гонник.* Чему дети научат ученых. *Пауль Блум.* К теории морального развития. *Джеффри Миллер.* Наука о тонкостях. *Михай Чиксентмихайи.* Будущее счастья. *Роберт Сапольски.* Будем ли мы через

пятьдесят лет так же печальны? *Стивен Строгац*. «Маленькое открытие» Ферми и будущее теории хаоса и сложности. *Стюарт Кауфман*. Что такое жизнь?

## **Часть II. Будущее на практике**

*Ричард Докинз*. Сын закона Мура. *Пол Дэвис*. Был ли второй генезис? *Джон Х. Холланд*. Что произойдет и как это предсказать. *Родни Брукс*. Объединение плоти и машин. *Питер Эткинс*. Будущее материи. *Роджер К. Шенк*. Станем ли мы умнее? *Джерон Ланье*. Потолок сложности. *Дэвид Гелернтер*. Стучась в «поток». *Джозеф Ледукс*. Разум, мозг и личность. *Джудит Рич Харрис*. Что делает нас такими, какие мы есть: взгляд из 2050 года. *Сэмюэл Барондес*. Лекарства, ДНК и кушетка психоаналитика. *Нэнси Эткофф*. Сканирование мозга, мобильные устройства и короткие встречи. *Пол У. Эвальд*. Побеждая болезни.

### **«Маленькое открытие» Ферми и будущее теории хаоса и сложности**

*Стивен Строгац* \*

2 декабря 1942 года, проводя секретные эксперименты на площадке Чикагского университета, Энрико Ферми впервые в мире осуществил цепную ядерную реакцию, что стало решающим шагом на пути к созданию атомной бомбы. Благодаря этому имя физика стало известно широкой публике. Но в узком кругу, среди ученых, он славился другим, а именно удивительной эрудицией. Ферми был выдающимся теоретиком и экспериментатором. Вот как его описывал Якоб Броновски: «Это самый умный человек из всех, кого я когда-либо видел – ну, может, за одним исключением. Он был невысокого роста. Сосредоточенный, авторитетный, проницательный, очень спортивный. Он всегда имел четко поставленную цель, которую представлял себе очень конкретно».

Незадолго перед смертью, в 1954 году, Ферми забавлялся тем, что физики называют искусственной задачей. Прекрасный в своей простоте вопрос не представлял никакой практической ценности. Для Ферми решение было лишь способом изучить некую фундаментальную проблему. И вот представился шанс. Будучи в Лос-Аламосе, Ферми увидел новый суперкомпьютер «МАНИАК». Он не мог устоять перед соблазном и попросил Джона Паста и Станислава Улама симитировать на машине вибрацию гибкой цепи из тридцати двух частиц. Вся система должна была представлять собой идеализированную одномерную атомную решетку, удерживаемую химическими связями. При слабых вибрациях химические связи двигаются линейно: если их растянуть, они возвращаются обратно. На этом допущении строилась вся традиционная физика твердых тел. Но Ферми знал, что реальные связи не будут

---

\* Стивен Строгац – профессор Центра прикладной математики при Корнельском университете. Занимается исследованиями сна и циркадных ритмов, спиральных волн, спаренных генераторов, синхронного мерцания светлячков, перехода Джозефсона и сетей «маленького мира». Сотрудничает с такими средствами массовой информации, как «Нейчер», «Сайнс», «Сайентифик американ», «Нью-Йорк таймс», «Нью-Йоркер», Би-би-си и «Си-би-эс ньюс». Автор популярного учебника «Нелинейная динамика и хаос: применительно к физике, биологии, химии и инженерии». Скоро выйдет его книга «Синхронизация», ориентированная на широкий круг читателей.

двигаться линейно при достаточно сильной вибрации. Его интересовало, что тогда произойдет. Математические модели того времени не позволяли ответить на этот вопрос, никто не мог решить уравнения для нелинейных систем из такого количества частиц.

Конечно, это было то, что нужно. Ферми взялся за эту проблему, потому что ее невозможно было решить традиционными методами. Теперь, с помощью нового компьютера, он с коллегами мог пролить свет на нелинейные системы – самый темный вопрос классической физики. Результаты оказались шокирующими. Ученые полагали, что при возмущении системы нелинейные движения приведут к тому, что все частицы начнут двигаться случайным образом одинаково во всех направлениях. Такое равномерное распределение энергии предсказывается термодинамикой. Но компьютер показал совсем другое. По прошествии очень длительного времени частицы вернулись почти точно в исходное состояние. Стало очевидно, что нелинейные системы могут приводить к порядку. Нелинейность рождает хаос, но затем сама его и устраняет.

Ферми пришел в восторг от неожиданного феномена, «маленького открытия», как он с нежностью говорил. К сожалению, великий физик не успел опубликовать полученные результаты. Паста и Улам, чтобы не присваивать себе честь «маленького открытия», потихоньку включили данные в отчет и лишь спустя десять лет поместили их в сборнике работ Ферми.

В начале 1950-х годов проблема Ферми–Паста–Улама должна была выглядеть особенно странной. Тогда физика в основном занималась проблемами квантовой электродинамики. Никто и не думал о такой устаревшей вещи, как классическая механика. Разве ее не полностью изучили за три сотни лет? Только Ферми понял, что все как раз наоборот, что классическая механика едва изучена, а нелинейные системы вообще не затронуты. Оглядываясь назад, можно сказать, что Ферми попал в точку и с выбором проблемы и с использованием компьютера.

В первой половине двадцатого века были созданы удивительные приборы, позволяющие изучать нелинейные системы: вакуумная труба, благодаря которой появились радиоприемники и телевизоры, система фазовой синхронизации, позволившая создать радар, и коммуникатор, лазер, очень пригодившийся для точной оптики и хирургии глаза. Изобретения основывались на самоподдерживающихся нелинейных колебаниях, а именно на тенденции синхронизироваться друг с другом или с входящим сигналом. В новых технологиях использовались от силы два генератора, так как математика того времени не могла предсказать коллективное поведение большого количества таких единиц.

Единственной дисциплиной, которая была способна работать с огромной массой взаимодействующих частиц, являлась статистическая физика – раздел физики, в задачу которого изначально входило описание поведения газов, состоящих из миллиардов молекул. Ферми хорошо разбирался в статистической физике и знал, что она прекрасно описывает системы в состоянии термодинамического равновесия. К сожалению, при нарушении равновесия требовались совершенно другие подходы. И это очень напоминало результаты эксперимента Ферми–Паста–Улама: система не возвращалась в состояние равновесия ожидаемым образом. Обычная статистическая физика здесь была неприменима.

Спустя пятьдесят лет после эксперимента Ферми пути нелинейной динамики и статистической физики пересеклись. Физик Митчелл Фейгенбаум, используя ренормализационную группу (метод статистической физики, получивший Нобелевскую премию), показал, что переход от порядка к хаосу подчиняется определенным универсальным законам. Его исследования были подтверждены в таких разных системах, как клетки сердечной мышцы, химические реакции и полупроводники. Биолог-теоретик Артур Уинфри доказал, что синхронизация огромной сети биологических генераторов очень напоминает фазовые переходы, вроде быстрого замерзания воды при температуре ниже критической. Другие плодотворные модели сложных систем – модель генетических сетей Стюарта Кауфмана, самоорганизующиеся кучи песка Пера Бака, искусственные нейронные сети Джона Хопфилда – тоже обязаны своим появлением слиянию статистической физики и нелинейной динамики.

Нелинейная динамика развивалась, подчиняясь нескольким организующим принципам. Самый важный из них звучит так: небольшие системы всегда проще, чем большие. Сначала ученые разобрались с нелинейной системой, включающей две переменные. Примером подобной системы служит качающийся маятник, состояние которого полностью описывается его положением и скоростью в данный момент. При наличии этих двух параметров легко определить расположение маятника в любой момент времени. С тремя переменными оказалось справиться сложнее. Дело в том, что такие системы могут быть хаотичны. Хаос означает, что система подчиняется определенным правилам и тем не менее ведет себя непредсказуемым образом. Пример – колебания популяций в экосистемах или капанье воды из крана. Благодаря работам Эдварда Лоренца и других теоретиков хаоса, выполненных с 1960 по 1985 год, поведение «странных» систем было охарактеризовано и объяснено. Вскоре принцип хаоса начал использоваться в практических целях, в частности, для шифрования информации и создания музыкальных композиций.

Сегодня нелинейная динамика распространилась на сети из огромного количества взаимодействующих единиц. При этом сохраняет актуальность проблема Ферми–Паста–Улама с большим количеством спаренных генераторов. Среди таких спаренных систем существуют принципы организации, которые позволяют сформулировать более разрешимые задачи. Одни принципы касаются состояния отдельных компонентов системы (коллективное поведение колеблющихся частиц проще предсказать, чем поведение хаотически движущихся, идентичные частицы анализировать проще, чем разные), другие – способа связи частиц (сети с регулярной или случайной структурой проще, чем сети с более сложными связями). Совокупность этих эвристических правил подталкивает к изучению больших систем идентичных колеблющихся частиц, образующих определенную решетку или иную простую структуру. Среди самых «горячих» тем – синхронизация многочисленных спаренных квантовых усилителей, нейронов или сверхпроводящих устройств, известных как «переход Джозефсона». Некоторые исследователи вместо изучения отдельных решеток рассматривают формирование структур, или паттернов, в непрерывных средах, таких как жидкости, химические реакции, а также нервная и сердечная ткани. Кардиовопрос, пожалуй, самый кардинальный. Есть предположение, что динамика спиральных волн влияет на работу желудочков. Близким подобием больших нелинейных систем являются «сложные адаптивные системы», как их называют исследователи в

Институте Санта-Фе. Это воображаемые миры миллионов конкурирующих организмов (например, химических веществ, компаний или торговцев), каждый из которых приспособляется к окружающим условиям и, соответственно, изменяет условия для всех остальных. Компьютерные модели разных ситуаций имеют, конечно, спекулятивный характер, но они позволяют оценить значение естественного отбора и объяснить, например, гибкость экосистем, химические основы жизни, борьбу фирм на рынке товаров и услуг, а также взлеты и обвалы фондовой биржи.

Во многих смыслах исследования ученых из Санта-Фе являются внуками исследований Ферми–Паста–Улама. Обратите внимание, насколько сходно отношение к компьютеру: он не калькулятор, а инструмент познания. И результат одинаковый: удивление. А как вам характер моделей? Одномерная цепь частиц Ферми была сильным упрощением реальных кристаллических решеток – и сегодняшние компьютерные модели сложных адаптивных систем лишь отдаленно напоминают реальные экосистемы и реальный рынок. В наши дни такая стратегия оправдывается, но в следующие несколько десятилетий ее придется менять. Главная задача – найти способы делать более реальные модели без потери информативности.

Сначала нужно будет описать связи сложных сетей. Вместо построения идеальной случайной или регулярной топологии, как это делается в существующих моделях, нужно понять структуру реальных сетей. Иначе не понять работу головного мозга или причину злокачественного перерождения клеток. В последние три года мы приступили к подробному изучению разных сетей: пищевых цепей, нервной системы, электрических схем, Интернета и т.д. Оказалось, что между ними есть кое-что общее.

Все они демонстрируют феномен «маленького мира». Другими словами, почти все пары узлов связаны довольно короткими цепями. Более того, количество связей на каждый узел распределяется по экспоненте, образуя больший «хвост» кривой, чем у графика нормального распределения. Это значит, что существует как уйма узлов, слабо связанных, так и значительное количество гигантских ядер («Гугл» в Интернет или АТФ в цепях биохимических реакций). По идее, топологические черты должны оказывать влияние на коллективную динамику – устойчивость к случайным ошибкам или умышленным атакам, способность к распространению инфекции или поддержанию глобальных вычислений. Однако сегодня мы не имеем понятия, как соотносить топологию сети с ее общей динамикой.

На самом деле вне физики у нас очень мало хороших моделей динамики. Хотя в биологии, социологии и экономике сети очень распространены, мы мало что знаем о правилах управления взаимодействиями между генами, людьми или компаниями. И это еще один вопрос, который нужно выяснить в ближайшие пятьдесят лет. Наши модели сложных систем никогда не пойдут дальше карикатур, если мы не найдем способ определять динамику на основании имеющейся информации.

Классическая иллюстрация этого – реконструкция нейронной динамики на основании электрофизиологических измерений, проведенных на аксоне кальмара, сделанная в 1952 году. Алан Ходжкин и Эндрю Хаксли изменили разность потенциалов на мембране нервной клетки и фиксировали ее на нужном уровне. Измеряя просачивание ионов натрия, калия и других химических элементов через мембрану и изучая зависимость этого процесса от напряжения, ученые точно описали нелинейную динамику отдельного нейрона.

Проблема в том, что метод Ходжкина и Хаксли не подходит для всех случаев. Порой невозможно зафиксировать какую-то переменную на желаемом уровне. Для примера рассмотрим генетические сети, контролирующие работу клетки. С появлением ДНК-чипов мы получили возможность одновременно измерять активность тысяч разных генов во времени, но мы все еще не знаем, какие гены с какими взаимодействуют и как они влияют на активность друг друга в количественном выражении. Вся эта информация как-то отражается в данных ДНК-чипа, но мы не в состоянии расшифровать код. Если удастся разработать способ определять динамику на основании множественных измерений, то произойдет переворот не только в биологии, но и в социологии и в экономике.

Проблема описания связей гораздо проще проблемы определения динамики. Но даже если мы разделаемся с обеими, перед нами встанет новая. Это неизбежно, если мы примемся изучать нелинейные системы с миллионами взаимодействующих переменных. Грядущая проблема зародилась еще в работах Ферми–Паста–Улама. Пока мы ее игнорируем, но однажды столкнемся с ней лицом к лицу.

Сложность в том, что наш мозг способен визуализировать только три измерения. Таким он стал в процессе эволюции. Не исключено, что с помощью компьютера и тренировок мы расширим наши возможности, но весьма сомнительно, что когда-нибудь они станут беспредельными.

С тех пор как Анри Пуанкаре обнаружил хаос в гравитационных взаимодействиях трех тел, геометрия была нашим лучшим помощником в нелинейной динамике. Пуанкаре показал, что без алгебраических формул можно обойтись. Если все правильно изобразить, мы сумеем узнать много важных свойств нелинейных систем. Метод Пуанкаре подразумевает задание оси для каждой переменной состояния. Если переменных две или три, то визуализировать динамику легко. Но с сегодняшней потребностью учитывать миллионы переменных мы упираемся в стену. Геометрический подход сохраняет свою ценность, он позволяет использовать абстрактные рассуждения, но без прямой визуализации понять динамику нельзя.

Теоретикам никак не удастся объяснить турбулентность. Хотя уравнение известно уже более века, ученые не могут понять, как его решения работают в пространстве состояний Пуанкаре. Ускользают аттракторы – сущность длительной динамики, и все потому, что пространство состояний имеет бесконечно много измерений.

Кое-кто возразит мне, что с этой проблемой давно справились, дескать, согласно статистической физике газов или магнитов пространство состояний имеет количество измерений, равное числу Авогадро (двадцатитрехзначное число), тем не менее специалист хорошо понимает эти системы. Согласен, понимает, но только в том случае, когда они находятся в состоянии термодинамического равновесия. Тогда предсказать характер их поведения в течение долгого времени не составляет труда. Я же говорю о статистическом поведении в течение длительного времени сложных систем, они далеки от равновесия. А так как теоретики пока не могут определить аттракторы, положение становится просто удручающим.

Еще сорок лет назад Ричард Фейнман сказал: «Будущая эра пробуждения человеческого интеллекта вполне может привести к пониманию качественного содержания уравнений. Сегодня мы этого не можем. Сегодня мы не видим, что уравнение течения воды включает такие вещи, как структуры турбулентности. Сегодня мы не знаем, содержит ли уравнение Шрёдингера лягушек, композиторов или мораль. Мы

не можем сказать, есть ли необходимость в чем-то большем, а именно в Боге. И мы все можем иметь на этот счет собственное мнение».

Если мы хотим достигнуть эры пробуждения разума, нам необходимо бежать от демона размерности. Надеюсь, в этом помогут компьютеры. Когда-нибудь они сумеют визуализировать любое количество измерений. Они уже делают за нас грязную работу, создавая модели. Придет день, и они выведут закон самоорганизации сложных систем.

Такое предположение вызывает большой вопрос. Будем ли мы заниматься теоретическими разработками, если компьютеры начнут справляться с этим лучше нас? Если они будут формулировать свои заключения в терминах, доступных нам, то станут чем-то вроде протезов – продолжением наших собственных чувств и мыслей, представляя не большую угрозу, чем электронный микроскоп. Но если заключения окажутся непостижимыми, то компьютеры станут для нас чем-то вроде оракулов. В математике такое уже случается. Некоторые теоремы доказаны компьютерами, однако доказательства включают столь многочисленные или сложные частные случаи, что ни один человек не в состоянии их проверить. Другой пример – ходы «Дип блю» во время шахматной игры с Гарри Каспаровым.

Не такое ли будущее уготовано изучению сложных систем? Не окажемся ли мы в роли пассивных наблюдателей, неспособных угнаться за созданными нами машинами?

Возможно, первым это почувствовал Энрико Ферми. Его компьютерный эксперимент был абсолютно новым способом научного исследования. И вполне логично, что этот эксперимент стал возможным благодаря работам его современника Джона фон Неймана, который создал первый высокоскоростной компьютер и о котором Якоб Броневски сказал, что он «самый умный человек из всех, кого я когда-либо видел, без всяких исключений».