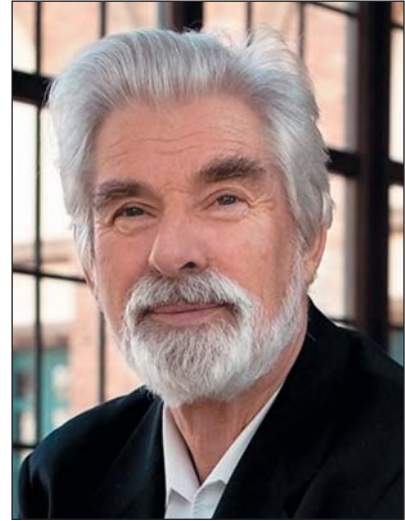


По физике — Сюкуро Манабэ, Клаус Хассельман, Джорджо Паризи

В 2021 году Нобелевская премия по физике присуждена «за фундаментальный вклад в наше понимание сложных физических систем». Такой формулировкой Нобелевский комитет попытался объединить две части премии: одну половину (по 1/4 премии) получили климатологи-ровесники (им обоим по 90 лет) Сюкуро Манабэ и Клаус Хассельман «за физическое моделирование климата Земли, количественный анализ вариаций и надежный прогноз глобального потепления», другая половина досталась физику-теоретику Джорджо Паризи за работы, посвященные неупорядоченным системам.



Сюкуро Манабэ.



Клаус Хассельман.

Нобелевский комитет не в первый раз отмечает проблему глобального потепления: например, в 2007 г. премии мира удостоились бывший вице-президент США Альберт Гор и Межправительственная группа экспертов по изменению климата «за усилия по накоплению и распространению знаний об антропогенных изменениях климата...». Однако впервые награждены непосредственно ученые, заложившие основы современной климатологии.

Сюкуро Манабэ (Syukuro Manabe) родился 21 сентября 1931 г. в префектуре Эхиме на о.Сикоку в Японии. Его отец и дед были врачами в сельской клинике, и семья ожидала, что он пойдет по их стопам. Однако он окончил Токийский университет, где специализировался в области метеорологии. После получения в 1958 г. докторской степени эмигрировал в США (с 1975 г. имеет гражданство этой страны), где начал работать в Национальной метеорологической службе. В 1963 г. стал старшим метеорологом Лаборатории геофизической гидродинамики Национального управления океанических и атмосферных исследований, с 1968 г. совмещал эту должность с преподаванием в Принстонском университете. В 1997–2001 гг. работал в Японии, возглавлял исследовательскую программу по глобальному потеплению. В 2002 г. вернулся в Принстонский университет, где и сейчас занимает должность старшего метеоролога. В 2007–2014 гг. он также был приглашенным профессором Нагойского университета.

Клаус Хассельман (Klaus Hasselmann) родился 25 октября 1931 г. в Гамбурге. Его отец был активным членом Социал-демократической партии Германии, и в 1934 г. семья вынуждена была эмигрировать в Англию. Детство Клауса прошло в г.Уэлин-Гарден-Сити; по его собственному признанию, английский для него — родной язык. В 1949 г. семья вернулась в Гамбург. Хассельман окончил физико-математический факультет Гамбургского университета, докторскую степень получил в 1957 г. в Гёттингенском университете, специализировался в области гидроаэродинамики. В 1957–1961 гг. он работал ассистентом профессора в Гамбургском университете, в 1961–1964 гг. — в Институте океанографии Скриппса при Калифорнийском университете в Сан-Диего (США). В 1966 г. стал профессором геофизики в Гамбургском университете, в 1967–1968 гг. был приглашенным профессором Кембриджского университета, в 1970–1972 гг. работал в Вудсхолском океанографическом институте (США). В 1975 г. он стал основателем и директором Института метеорологии имени Макса Планка в Гамбурге (с 1999 г. — эмерит). В 1988–1999 гг. он также был научным руководителем Германского центра климатических вычислений в Гамбурге.

Об исследованиях, за которые Сюкуро Манабэ и Клаус Хассельман удостоены Нобелевской премии, будет подробно рассказано в следующем номере журнала «Природа».

Джорджо Паризи: за исследование неупорядоченных систем

кандидат физико-математических наук С.В.Панюков

Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН (Москва, Россия)

e-mail: panyukovsv@lebedev.ru

Нобелевская премия 2021 г. по физике (ее 1/2 часть) присуждена итальянцу Джорджо Паризи «за открытие взаимодействия хаоса и флуктуаций в физических системах от атомарных до планетарных масштабов». За этой формулировкой стоит важное достижение в теоретической физике — первый значительный шаг в создании теории спиновых стекол и других неэргодических систем.

Ключевые слова: Нобелевская премия, неупорядоченные системы, спиновые стекла.

Половина Нобелевской премии по физике досталась итальянцу Джорджо Паризи «за открытие взаимодействия хаоса и флуктуаций в физических системах от атомарных до планетарных масштабов». В феврале этого года он получил премию Вольфа по физике (она имеет репутацию предвестника Нобелевской: из 64 обладателей этой премии с 1978 по 2020 г. 20 стали Нобелевскими лауреатами по физике и один по химии) — «за новаторские исследования в области неупорядоченных систем, физики элементарных частиц и статистической физики». Он стал шестым итальянцем, получившим Нобелевскую премию по физике.

Джорджо Паризи (Giorgio Parisi) родился в Риме 4 августа 1948 г. В 1970 г. он окончил римский университет «Сапиенца» (La Sapienza) и под руководством Никола Кабиббо (Nicola Cabibbo) защитил диссертацию, посвященную бозону Хиггса. Следующие 10 лет он работал в итальянском Национальном институте ядерной физики, а также за границей: в Колумбийском университете (США) у нобелевского лауреата Ли Чжэндао и во Франции — в Институте высших научных исследований и в парижской Высшей нормальной школе. В 1981 г. он начал преподавать теоретическую физику в римском университете «Тор Вергата» (Tor Vergata), а в 1992 г. перешел



Джорджо Паризи в университете «Сапиенца». 5 октября 2021 г.

Фото: Stefania Sepulcri

в свою alma mater — университет «Сапиенца», профессором которого остается по сей день.

С 1988 г. Паризи — член Национальной академии деи Линчеи — старейшей в Италии академии наук. В 2018 г. он был избран президентом академии и занимал эту должность до июля 2021 г. У себя на родине он известен своей публичной критикой недостаточного финансирования итальянской науки. Он также член Академии сорока (еще одной итальянской академии наук), Национальной академии наук США, Французской академии наук.

За свою научную карьеру Паризи внес весомый вклад в различные области физики: статистическую механику, физику элементарных частиц, гидродинамику, физику конденсированного состояния. Его достижения отмечены национальными и международными наградами: медалями Больцмана, Дирака, Макса Планка, премиями Фельтринелли (одна из самых престижных наград Италии), Энрико Ферми, Дэнни Хайнемана в области математической физики, Ларса Онзагера, И.Я.Померанчука (присуждается ежегодно Институтом теоретической и экспериментальной физики имени А.И.Алиханова) и рядом других.

Нобелевским комитетом отмечены работы Паризи, опубликованные преимущественно в 1980-х годах [1–7]. Они посвящены принципиально новому математическому описанию неупорядоченных систем.

Физика изучает порядок, устанавливающийся в неупорядоченных системах. Например, в магнетиках, атомы которых имеют спины, которые можно представлять себе как маленькие магнитики. При высоких температурах спины «разбалтываются» тепловыми флуктуациями, так что система имеет нулевой суммарный магнитный момент (парамагнетик). При понижении температуры спины начинают взаимодействовать со своими соседями. Если энергия взаимодействия двух спинов минимальна при их одинаковых направлениях, то все спины системы смотрят в одном направлении, и она становится ферромагнетиком (рис.1,а). Переход парамагнетик–ферромагнетик при температуре Кюри T_c — это типичный пример *фазового перехода*, который происходит в «обычных» физических системах.

Во многих магнетиках (например, AgMn) взаимодействие спинов случайно изменяет знак в зависимости от их взаимного положения. Поэтому при низких температурах спины застывают в случайных направлениях. Трудность изучения такого «стеклоподобного» (случайного) упорядочения спинов связана с наличием «фрустраций», когда имеется не одно состояние с минимальной энергией, а большое число различных состояний спинов с одинаковой энергией (рис.1,б), которые получили название *долин*. Чтобы перейти из одной долины в другую, необходимо перевернуть большое

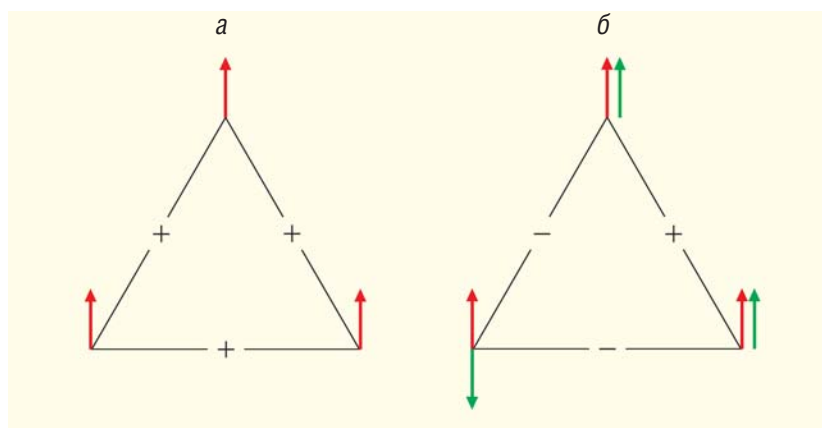


Рис.1. Система трех взаимодействующих спинов (показаны стрелками с направлением вверх или вниз): а — ферромагнитное упорядочение, б — фрустрация с двумя состояниями с одинаковой энергией (красной и зеленой долинами). Энергия взаимодействия двух спинов минимальна при их одинаковых (+) и противоположных направлениях (–).

число спинов. Поэтому долины разделены (как горами) высокими энергетическими барьерами, бесконечными для систем макроскопических размеров. Различные долины не локализованы в пространстве, а состоят из того же набора спинов (по аналогии с голографией, информация о состоянии системы записывается во всем ее объеме).

Паризи впервые удалось описать установление порядка в таких спиновых стеклах. В отличие от «обычных» систем, в стеклах фазовый переход происходит не только при определенной температуре T_c , но и при любой температуре ниже T_c . Сразу ниже критической температуры T_c появляется множество долин, разделенных высокими энергетическими барьерами. При дальнейшем понижении температуры происходят новые фазовые переходы, так что каждая долина распадается на множество новых (рис.2). По мере понижения температуры до абсо-

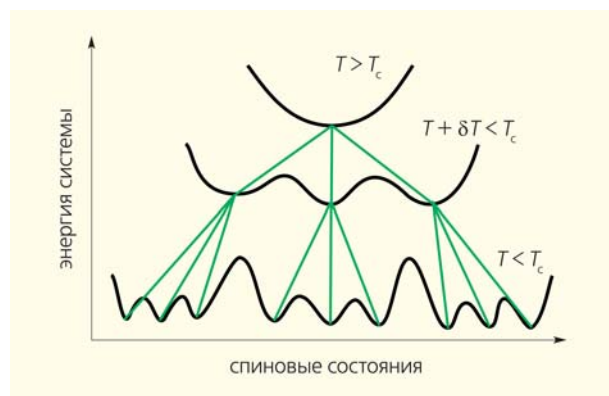


Рис.2. Иерархическая структура энергий состояний спинового стекла при различных температурах T .

лютного нуля (-273°C) этот процесс разбиения состояний системы на все меньшие и меньшие долины продолжается непрерывно. В результате все состояния спинового стекла оказываются организованными в виде иерархической структуры. А система в целом, при любой температуре ниже T_c , находится в *критическом состоянии* непрерывной последовательности фазовых переходов.

Наличие огромного числа долин в спиновых стеклах проявляется в эффекте их «старения» на широком спектре времен — от секунд до месяцев, на котором наблюдается релаксация магнитных моментов. Подтверждение наличия предсказанного Паризи иерархического дерева спин-стекольных состояний было получено в экспериментах с циклическим изменением температуры. После охлаждения в спин-стекольную фазу слабый короткий подогрев на δT убирает старшие поколения иерархического дерева (нижние ветви на рис.2), «стирая» все накопленное ранее старение.

Значение теоретического открытия Паризи не ограничивается спиновыми стеклами. Пожалуй, главным открытием последних лет следует считать сети искусственного интеллекта (ИИ), которые уже сейчас меняют всю нашу жизнь. Ключевым элементом ИИ является ассоциативная память. В спиновой модели ассоциативной памяти обучение ИИ (запоминание образов) сводится к формированию специфических взаимодействий спинов системы,

по аналогии с нейронными сетями. При этом в каждой из формирующихся долин в пространстве спиновых конфигураций «закодирована» информация о соответствующем запоминаемом образе.

Многие «естественные» процессы в природе также имеют иерархическую структуру, включая функционирование нейронных сетей мозга, изменения погоды, колебания цен (например, акций компаний) на рынке и т.д. Во всех этих системах различные «игроки» функционируют на огромном интервале масштабов времен от секунд до нескольких десятилетий. На самых коротких интервалах времени ритмы мозга контролируют распознавание образов первичных потребностей, а финансовые автоматы успешно зарабатывают для своих хозяев с помощью распознавания образов шаблонов предыдущих ситуаций. Финансовые кризисы, как и цунами при изменении погоды, случаются не так часто, но они «стирают» все накопленные ранее изменения также, как это делает короткий подогрев спиновых стекол. Аналогично спиновым стеклам, наш мозг, как и рынок, работает только в критическом состоянии (А.Тьюринг), обрабатывая поступающую информацию.

Поэтому открытие Паризи действительно является «маленьким шагом для одного человека, но огромным скачком для всего человечества». И присуждение ему Нобелевской премии только подтверждает значимость этого открытия. ■

Литература / References

1. Parisi G. Toward a mean field theory for spin glasses. *Physics Letters A*. 1979; 73(3): 203–205. DOI:10.1016/0375-9601(79)90708-4.
2. Parisi G. Infinite number of order parameters for spin-glasses. *Physical Review Letters*. 1979; 43(23): 1754–1756. DOI:10.1103/PhysRevLett.43.1754.
3. Parisi G. Magnetic properties of spin glasses in a new mean field theory. *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 1980; 13(5): 1887–1895. DOI:10.1088/0305-4470/13/5/047.
4. Parisi G. Order parameter for spin-glasses. *Physical Review Letters*. 1983; 50(24): 1946–1948. DOI:10.1103/PhysRevLett.50.1946.
5. Mézard M., Parisi G., Sourlas N., Toulouse G., Virasoro M. Nature of the spin-glass phase. *Physical Review Letters*. 1984; 52(13): 1156–1159. DOI:10.1103/PhysRevLett.52.1156.
6. Mézard M., Parisi G., Virasoro M. *Spin Glass Theory and Beyond: An Introduction to the Replica Method and Its Applications*. World Scientific Lecture Notes in Physics: Vol.9. Singapore, 1987. DOI:10.1142/0271.
7. Parisi G. *Statistical Field Theory*. Redwood City, California, 1988.

Giorgio Parisi: for the Research of Disordered Systems

S.V.Panyukov
Lebedev Physical Institute, RAS (Moscow)

The 2021 Nobel Prize in Physics (its 1/2 part) was awarded to the Italian physicist Giorgio Parisi “for the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales”. This formulation discloses an important achievement in theoretical physics, the first significant step in the creation of the theory of spin glasses and other non-ergodic systems.

Keywords: Nobel Prize, disordered systems, spin glasses.