

Сверхпроводящее кольцо моделирует ранние этапы развития Вселенной 14.12.09 | [Физика](#), [Астрономия](#), [Юрий Ерин](#)

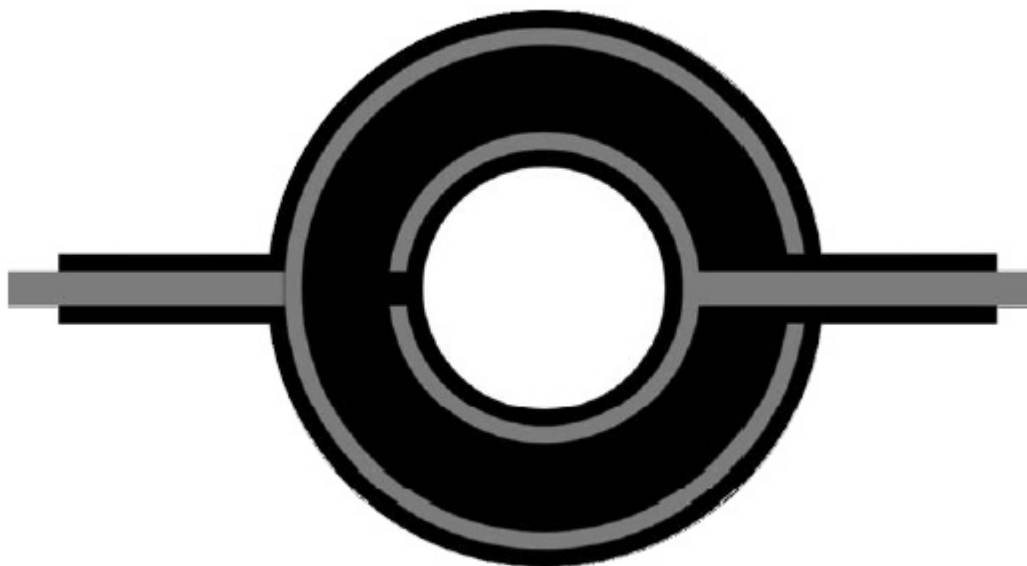


Рис. 1. Схематический рисунок сверхпроводящего кольца с напылённым на него 200-нанометровым слоем ниобия. Критическая температура перехода ниобия из нормального состояния в сверхпроводящее приблизительно равна 9 К. Серым цветом показаны ниобиевые края кольца, играющие роль электродов. В них сделана прорезь, заполненная изолирующим слоем оксида алюминия. Конструкции такого типа (сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник) называются джозефсоновскими контактами. Электрические свойства контактов меняются при появлении единичного флюксоида. Геометрия системы выбрана так, чтобы не мешать протеканию сверхпроводящего тока, но в то же время регистрировать кванты магнитного потока. Внутренний радиус кольца равен 30 мкм, внешний — 50 мкм, ширина электродов (ширина серых линий) 5 мкм. Изображение из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev.*

Некоторые ученые полагают, что последовавшее за Большим взрывом быстрое расширение и, как следствие, стремительное охлаждение Вселенной должно было привести к формированию в ней долгоживущих топологических дефектов (под топологическими дефектами в первую очередь подразумеваются струны — протяженные тонкие нити, опутывающие, как паутина, всю Вселенную). Проверить это предположение крайне трудно, так как для этого нужно иметь элементарные частицы с энергией, в сотни миллиардов раз превышающей энергию столкновений протонов в Большом адронном коллайдере. Однако поскольку математические основы теории, описывающей появление струн, по сути не отличаются от теории перехода «нормальный металл — сверхпроводник», то смоделировать формирование топологических дефектов во Вселенной можно в сверхпроводящем кольце. Согласно так называемому сценарию Киббла—Зурека, аналогом космических струн здесь выступают квантовые объекты — вихри. Они являются причиной рождения квантов магнитного потока — флюксоидов. До настоящего времени не было ни одного достаточно чистого эксперимента по обнаружению флюксоидов. Группа ученых из Италии, Дании, Великобритании и России впервые корректным образом провела исследование, в котором наблюдала формирование флюксоидов. Результаты эксперимента подтверждают сценарий Киббла—Зурека, что косвенно доказывает существование струн во Вселенной.

В первые моменты своей жизни Вселенная была настолько горячей, что все известные сейчас четыре вида фундаментальных взаимодействий (слабое, сильное, электромагнитное и гравитационное) были объединены в некое единое. Считается, что эти виды взаимодействий были

равноправными, а Вселенная была симметричной. Быстрое расширение и, как следствие, охлаждение привели к исчезновению прежней симметрии: единое взаимодействие с уменьшением температуры последовательно стало разделяться на виды. Дальнейшее увеличение объема Вселенной усугубляло различие между ними. Один из хорошо изученных примеров такого нарушения симметрии во Вселенной — тот факт, что переносчики электромагнитного взаимодействия — фотоны — безмассовы, в то время как распространители слабого взаимодействия — W^\pm - и Z^0 -бозоны — имеют значительную массу. Это отсутствие равновесия между слабым и электромагнитным взаимодействием известно в физике как спонтанное нарушение симметрии.

В 1976 году Томас Киббл ([Tom W. B. Kibble](#)) в статье [Topology of cosmic domains and strings](#) предположил, что стремительный процесс охлаждения не мог пройти для Вселенной бесследно. Каждое нарушение симметрии в ней должно оставлять долгоживущие «следы» — топологические дефекты. По мнению Киббла, такими дефектами являются струны (а также монополи и доменные стенки) — очень тонкие протяженные и разделенные значительным расстоянием нити, которые, как паутина, опутали весь космос.

Образование топологических дефектов и их большая удаленность друг от друга обусловлены [принципом причинности](#). Говоря развернуто, в процессе чрезвычайно быстрого расширения разные области Вселенной не успевали передавать информацию о своем физическом состоянии. Так как передача информации происходит с конечной скоростью (скоростью света), то для этого требуется и конечное время. Но за это время данные области Вселенной уже успели сильно удалиться друг от друга. Так возникли «несинхронизированные» по свойствам с остальной Вселенной участки — топологические дефекты.

Проверить теорию Киббла даже в отдаленной перспективе вряд ли возможно. Например, чтобы в лабораторных условиях симитировать распад слабого, сильного и электромагнитного взаимодействия, необходимо достичь энергий элементарных частиц, в сотни миллиардов раз превышающих энергию столкновения протонов на [Большом адронном коллайдере](#). Тем не менее ученые придумали механизм проверки космологической модели Киббла.

Чтобы понять, что это за механизм, надо познакомиться с основами теории фазовых переходов второго рода. Физикам известно, что часто (но не всегда) нарушение симметрии в каком-либо веществе при изменении его температуры является признаком фазового перехода. Известный пример фазового перехода *первого рода* — смена агрегатного состояния вещества. Она сопровождается скачком поглощения/выделения тепла и структурной перестройкой, а потому легко заметна невооруженным глазом.

Но есть фазовые переходы, которые визуально не наблюдаются, и обнаружить их можно только с помощью специальных измерений. Например, превращение материала из нормального, резистивного (имеющего электрическое сопротивление) состояния в сверхпроводящее выделением или поглощением теплоты не сопровождается. Аналогичная картина наблюдается и при трансформации гелия в сверхтекучую жидкость. Это примеры фазовых переходов *второго рода*. Для них разработана специальная математическая теория — теория Ландау. Она опирается на величину, которая называется *параметром порядка* и которая, как комплексная величина, характеризуется вещественными числами — модулем и фазой. Параметр порядка не абстрактная величина, а имеет определенный физический смысл. В фазовом переходе «нормальный металл — сверхпроводник» квадрат модуля параметра порядка обозначает концентрацию сверхпроводящих электронов. Очевидно, что в нормальном металле параметр порядка зануляется (сверхпроводящих электронов нет). В случае сверхтекучего гелия квадрат модуля параметра порядка — это плотность сверхтекучей компоненты гелия. В обычном жидком гелии параметр порядка равен нулю.

Как в грубом приближении теория Ландау выглядит для ранней Вселенной? Нарушение симметрии между фундаментальными взаимодействиями считается фазовым переходом второго рода. Температура, при которой единое взаимодействие стало распадаться, — это критическая температура (точка фазового перехода второго рода). Выше критической температуры параметр порядка равен нулю. Дальнейшее охлаждение дает отличный от нуля и постепенно увеличивающийся модуль параметра порядка, фаза которого должна быть одинакова для всей Вселенной. Но ее температура падала настолько быстро, что в разных точках фаза параметра порядка не успевала принять общее значение. Участки с таким нестандартным значением фазы — это топологические дефекты.

Поскольку космологическая теория Киббла и фазовые переходы второго рода описываются фактически одной и той же математической теорией (теорией Ландау), ученые решили воспользоваться этой аналогией, чтобы проследить формирование областей, подобных топологическим дефектам Вселенной, в системе, испытывающей фазовый переход второго рода в условиях, не требующих колоссальных энергий и относительно легко воспроизводимых в лаборатории. В 1985 году в своей статье [Cosmological experiments in superfluid helium?](#) Войцех Зурек (W. H. Zurek) предположил, что резкое охлаждение жидкого гелия, находящегося вблизи критической температуры, приведет к формированию в нём в сверхтекучей фазе «своих» топологических дефектов — вихрей (квантовых объектов) или небольших областей-доменов с различными фазами параметров порядка в них.

Появление вихрей в гелии обусловлено всё тем же принципом причинности: из-за быстрого уменьшения температуры фаза параметра порядка не успевает принять одинаковое значение во всех областях сверхтекучей жидкости. Более того, выяснилось, что образование квантовых вихрей в сверхтекучем гелии будет носить вероятностный характер: дефекты могут и вообще не возникнуть. Зурек показал, что чем быстрее гелиевая жидкость проходит через точку фазового перехода (чем быстрее происходит охлаждение), тем выше шансы обнаружения в нём топологических дефектов. Количественно вероятность рождения одного квантового вихря пропорциональна $\tau_Q^{-\sigma}$, где τ_Q — время охлаждения вещества до некой заданной температуры (скорость уменьшения температуры), σ — некое число, которое для гелия равно 1/3. Такая модифицированная гипотеза стала называться **сценарий Киббла—Зурека**.

Заметим, что физики часто прибегают к аналогиям в моделировании космологических процессов в земных лабораторных условиях (см., например, новость [В бозе-эйнштейновском конденсате создали звуковую черную дыру](#), «Элементы», 30.07.2009), если они описываются одной и той же математикой. Такая аналогия имеет полное право на жизнь, потому что математические подходы в описании нарушения симметрии охлаждающейся Вселенной и появления сверхтекучести у гелия одинаковые (теория Ландау). Трансформация гелия в сверхтекучее состояние соответствует при такой аналогии нарушению симметрии ранней Вселенной, а топологические дефекты (струны) — квантовым вихрям в сверхтекучем гелии.

Первый эксперимент по проверке сценария Киббла—Зурека при переходе жидкого гелия в сверхтекучее состояние был [проведен](#) лишь спустя 13 лет после публикации Зурека и не увенчался успехом. Никаких вихрей в сверхтекучем гелии обнаружено не было. Однако чуть позже их формирование [наблюдалось](#) в жидком гелии-3 (изотоп обычного гелия-4), который становится сверхтекучей жидкостью при очень глубоком охлаждении — 0,0026 К.

Видимо, обескураженный результатами первых экспериментов, Войцех Зурек в обзоре [Cosmological experiments in condensed matter systems](#), опубликованном в журнале *Physics Reports*, предложил теперь использовать для проверки сценария Киббла—Зурека другую физическую систему с фазовым переходом второго рода — сверхпроводящее металлическое кольцо (кстати, в том же обзоре было предложение использовать и жидкие кристаллы). В роли топологических дефектов должны выступать уже джозефсоновские вихри (названные в честь [Брайана Джозефсона](#), который в 1962 году теоретически открыл [эффекты Джозефсона](#) — протекание сверхпроводящего тока через контакт двух сверхпроводников, разделенных тонким слоем нормального металла или диэлектрика) — участки сверхпроводника, в которых параметры порядка имеют различные значения фаз. Возникновение джозефсоновских вихрей вызвано, как и в сверхтекучем гелии, принципом причинности: фаза параметра порядка для разных областей сверхпроводника вследствие быстрого охлаждения не успевает синхронизироваться и принять единое значение по всему кольцу.

Схема проведения эксперимента принципиально не отличается от подобного опыта в жидком гелии. Температура металлического кольца должна быть очень близка к критической температуре, но пока что всё-таки чуть выше ее. Резкое охлаждение может привести к появлению джозефсоновских вихрей. Ненулевая разность фаз параметра порядка между «дефектными» доменами, как предсказывает квантовая механика, вызовет протекание сверхпроводящих токов в

кольце. Из-за того что параметры порядков вихрей приобрели в процессе быстрого уменьшения температуры случайные фазы, направление протекания токов также будет случайным.

Далее происходит следующее. Сверхпроводящие токи рожают магнитные поля. По причине квантовой природы джозефсоновских вихрей происходит генерация единичных квантов магнитного потока через кольцо — флюксоидов, равных $h/2e = 2,07 \cdot 10^{-15}$ Тл·м² (где h — постоянная Планка, а e — заряд электрона). Вероятностный процесс рождения квантов потока получил название **спонтанное формирование флюксоидов** — по аналогии со [спонтанным нарушением симметрии](#) во Вселенной. Численно вероятность рождения одного флюксоида пропорциональна $\tau_Q^{-\sigma}$. Только теперь для сверхпроводящего кольца показатель степени равен j — в отличие от $1/3$ для сверхтекучего гелия. В целом, вследствие случайных направлений сверхпроводящих токов, магнитное поле кольца, как и суммарный магнитный поток флюксоидов, будет близко к нулю.

Последовавшие через несколько лет после обзора Зурека экспериментальные работы (см., например, Carmi et al., 1999. [Observation of Spontaneous Flux Generation in a Multi-Josephson-Junction Loop](#) // *Phys. Rev. Lett.* 84, 4966–4969) подтвердили сценарий Киббла—Зурека для сверхпроводника: быстрое охлаждение металлического кольца действительно генерирует

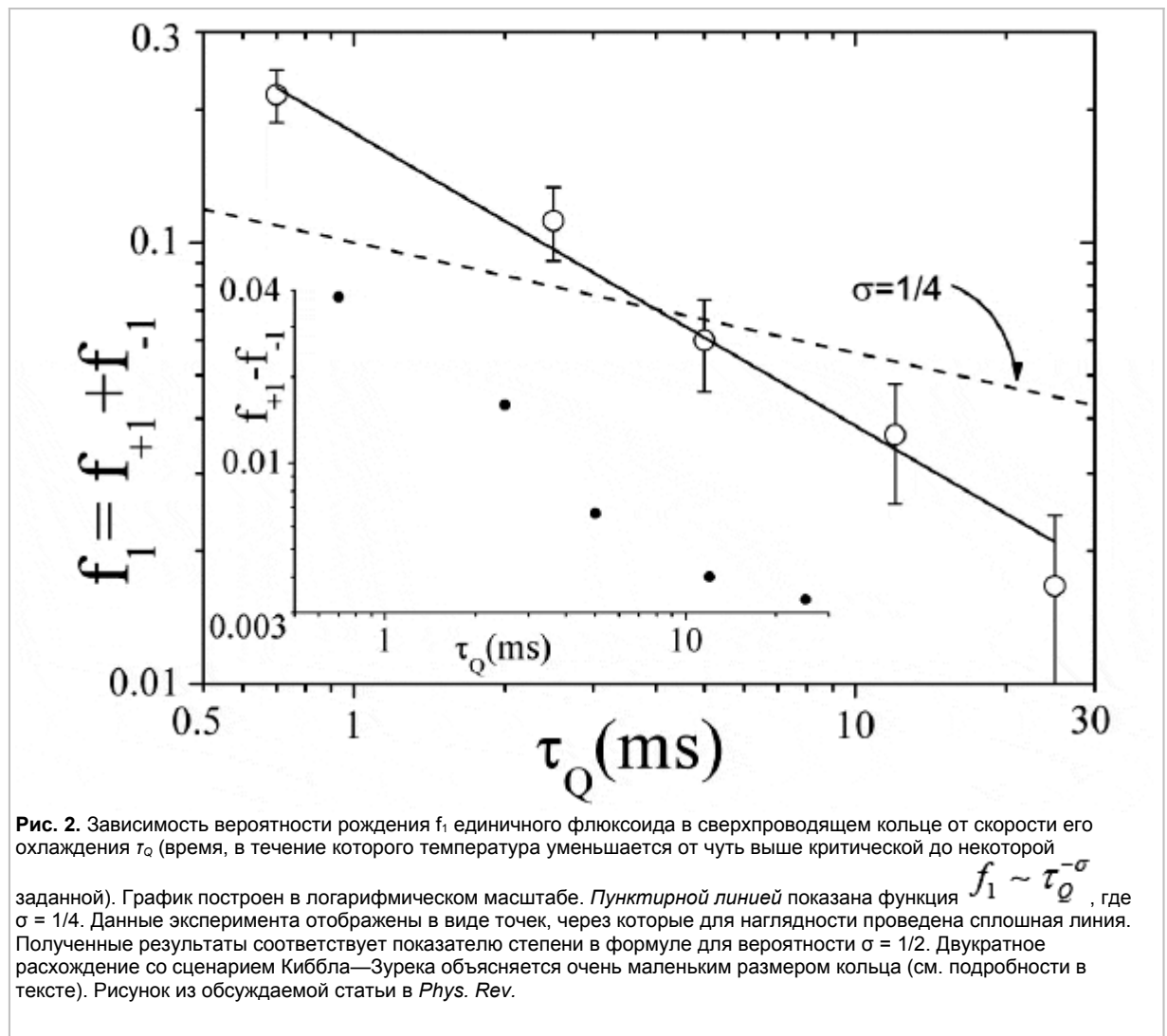
флюксоиды, и вероятность их рождения пропорциональна $\tau_Q^{-1/4}$ ($\sigma = 1/4$). Однако проведенные эксперименты не обладали нужной корректностью. Дело в том, что «увидеть» в кольце отдельно взятый флюксоид можно лишь с помощью впаянных в него специальных очень тонких (толщиной от нанометра до микрометра) изолирующих прослоек, известных также как джозефсоновские контакты. Такая геометрия портит чистоту эксперимента (кольцо неоднородно); и хотя сценарий Киббла—Зурека подтверждался не один раз, желательно было бы провести опыт, в котором кольцо было бы без джозефсоновских контактов.

Впервые чистое исследование по спонтанному формированию флюксоидов в сверхпроводящем кольце удалось провести группе ученых из Италии, Дании, Великобритании и России. Об этом они сообщили в статье [Spontaneous fluxoid formation in superconducting loops](#) в журнале *Physical Review B* (полный текст — [PDF, 186 Кб](#)). Полем их деятельности стало кольцо с напылённым на него 200-нанометровым слоем ниобия (см. рис. 1). Внутренний и внешний радиус кольца был равен 30 и 50 мкм соответственно.

Экстремально маленькая толщина ниобия была выбрана специально — чтобы исключить влияние тепловых флуктуаций, которые неизбежно возникнут при охлаждении, на величину вероятности появления флюксоидов.

Внутренние и внешние края кольца играли в экспериментальной установке роль электродов (на рис. 1 они показаны серым цветом, их ширина 5 мкм). В обоих электродах сделаны джозефсоновские контакты — щели, заполненные изолирующим слоем оксида алюминия. Электрические свойства джозефсоновских контактов очень чувствительны к появлению даже одного кванта магнитного потока. Следовательно, такая конструкция позволяла зафиксировать рождение единичного флюксоида во время резкого охлаждения системы и, кроме того, не нарушала чистоту эксперимента: кольцо оставалось цельным, никаких препятствий для протекания сверхпроводящих токов не было.

Ученые обнаружили, что вероятность появления f_1 одного флюксоида в сверхпроводящем кольце отклоняется от предсказаний Зурека для такой геометрии. Показатель степени σ в формуле для вероятности равен не $1/4$, а $0,62 \pm 0,12$, то есть приблизительно $1/2$ (рис. 2).



Однако ничего удивительного в таком результате нет. Всё дело в том, что сценарий Киббля—Зурека подразумевает образование квантов магнитного потока в сверхпроводящем кольце, диаметр которого намного больше так называемой длины когерентности сверхпроводника — характерного размера куперовской пары электронов, микроскопических «носителей» сверхпроводимости. Авторы же статьи использовали кольцо, размер которого по порядку величины равен длине когерентности ниобия. Если сделать поправку в теории на такую геометрию, то σ будет равняться именно $1/2$.

Таким образом, впервые корректным образом проведенный эксперимент подтверждает справедливость сценария Киббля—Зурека и косвенно доказывает существование во Вселенной топологических дефектов — струн.

Источник: R. Monaco, J. Mygind, R. J. Rivers, V. P. Koshelets. [Spontaneous fluxoid formation in superconducting loops](#) // *Phys. Rev. B* **80**, 180501(R) (2009).

См. также:

- 1) John R. Kirtley, Francesco Tafuri. [Can superconducting rings provide clues to the early development of the universe?](#) // *Physics* **2**, 92 (2009).
- 2) Tom Kibble. [Phase-Transition Dynamics in the Lab and the Universe](#) // *Physics Today*. September 2007 (статья доступна также [здесь](#), PDF, 1 Мб).

Юрий Ерин