

НАБЛЮДЕНИЕ РЕЗОНАНСА СПИРАЛЬНЫХ ВОЛН В ВОЗБУДИМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СРЕДЕ

К.И.Агладзе, В.А.Давыдов, А.С.Михайлов

Сообщается о первом экспериментальном наблюдении эффекта резонанса спиральных волн при периодической модуляции возбудимости активной среды с частотой, близкой к собственной частоте вращения спиральной волны.

В последнее время большой интерес вызывает изучение явлений, происходящих в распределенных активных средах. Распределенная активная среда состоит из локально связанных между собой автоколебательных, триггерных или возбудимых элементов. К каждому из элементов непрерывно подводится энергия, благодаря чему осуществляется компенсация диссипативных потерь. Имеется много примеров распределенных активных сред самой разной природы^{1, 2}. В частности, такими системами являются магнитный сверхпроводник с током³, неравновесная плазма и полупроводниковые среды^{4, 5}. Для экспериментального наблюдения наиболее удобна среда с химической реакцией Белоусова – Жаботинского⁶.

Возбудимая активная среда характеризуется тем, что в ней имеется единственное однородное состояние покоя, устойчивое относительно малых возмущений. Наряду с этим, в такой среде без затухания распространяются уединенные автоволны, после прохождения которых среда возвращается к исходному состоянию покоя.

Поскольку состояния среды до и после прохождения уединенной волны одинаковы, возможны ситуации, когда фронт волны обрывается. Если задать в качестве начального условия плоскую полуволну с обрывом, то в достаточно "возбудимой" среде (см.⁷) с течением времени такой оборванный фронт эволюционирует и превращается в спиральную волну.

Спиральная волна – чрезвычайно устойчивое образование (ее устойчивость связана с сохранением топологического заряда⁸). В этом установившемся режиме точка обрыва вращается по окружности (границе ядра спиральной волны) с постоянной угловой скоростью. Частота вращения и форма фронта спиральной волны – это фундаментальные характеристики данной возбудимой среды. Можно сказать, что спиральная волна является одним из основных типов элементарных структур возбуждения в таких сильно нелинейных средах.

Частота вращения (и радиус ядра) спиральной волны однозначно определяются параметрами активной среды – ее эффективной возбудимостью. Чем больше возбудимость среды, тем меньше радиус ядра и выше частота вращения. Расчет этих характеристик был проведен в работах^{9, 10} в рамках предложенного авторами кинематического подхода.

Варируя параметры активной среды, можно менять ее возбудимость. Пусть эта величина периодически меняется со временем по закону

$$g = g_0 + g_1 \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

причем $g_1 \ll g_0$, а частота модуляции ω близка к собственной частоте ω_0 спиральной волны. Тогда, как было впервые показано нами в ¹¹, должен наблюдаться резонансный эффект, заключающийся в следующем. Оказывается, что при наличии модуляции g центр вращения спиральной волны уже не покоится, а начинает двигаться с течением времени по окружности. Радиус этой окружности R тем больше, чем ближе ω к собственной частоте ω_0 : $R \sim 1/|\omega - \omega_0|$, а скорость смещения центра пропорциональна амплитуде модуляции g_1 . При точном совпадении частот (т. е. при полном резонансе, когда $\omega = \omega_0$) центр спиральной волны должен смещаться с постоянной скоростью вдоль прямой. Направление смещения данной спиральной волны определяется начальной фазой модуляции φ и направлением вращения волны (по или против часовой стрелки).

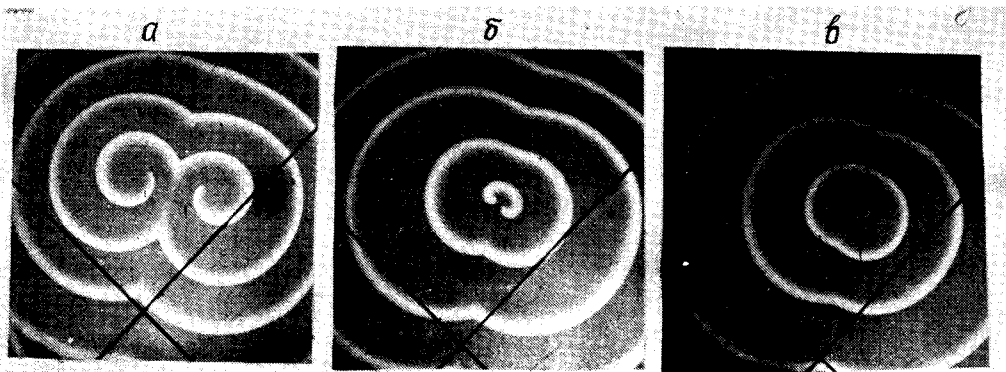


Рис. 1

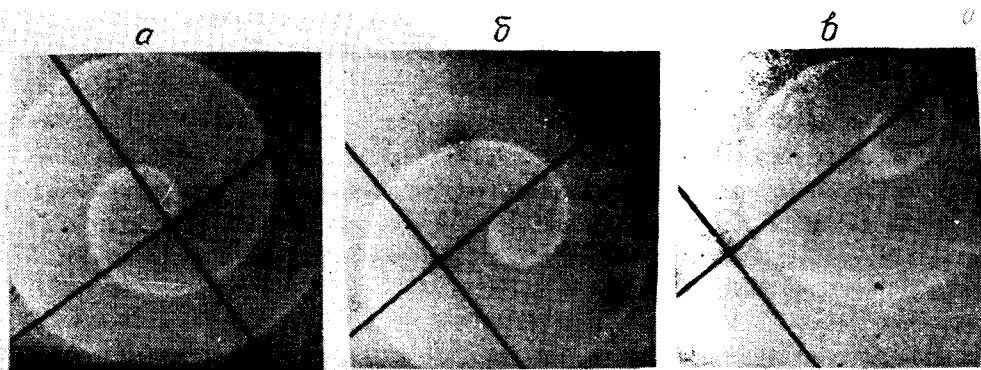


Рис. 2

Как уже отмечалось выше, одним из наиболее удобных объектов для экспериментального изучения автоволновых структур является химическая возбудимая среда, представляющая собой тонкий неперемешиваемый слой раствора, в котором протекает реакция Белоусова – Жаботинского. Преимущества этой системы состоят в том, что автоволновые структуры в ней имеют макроскопические размеры (порядка нескольких миллиметров), а процессы эволюции структур являются достаточно медленными (с характерными временами порядка минуты). Это существенно упрощает регистрацию автоволновых эффектов.

Для экспериментального наблюдения резонанса нами использовалась реакция, катализатором которой является соединение рутения $Ru(dipy)_3$. В отличие от традиционной реакции Белоусова – Жаботинского (где катализатором является ферроин) реакция с рутением оказывается светочувствительной (традиционная реакция Белоусова – Жаботинского чувст-

вительна только к достаточно мощному ультрафиолетовому облучению): изменяя освещенность, можно управлять возбудимостью среды¹².

Эксперимент осуществлялся следующим образом. На дно чашки Петри диаметром 9 см было вылито 4,5 мл раствора с модифицированной реакцией Белоусова – Жаботинского¹¹). Используя стандартную методику (см. ¹³) в среде создавалась спиральная волна или пара таких волн. Затем, после измерения периода установившегося вращения спиральной волны, раствор начинали периодически однородно освещать с помощью интенсивного источника (ЛЭТИ-60М). Через равные интервалы времени производилось фотографирование волновой картины на фоне неподвижных реперных линий.

На рис. 1 показаны последовательные фотографии спиральной волны с интервалом времени 10 мин в условиях полного резонанса (период модуляции выбран равным собственному периоду вращения волны). Видно, что центр вращения смещается с постоянной скоростью с течением времени вдоль одной из реперных линий; суммарное смещение составляет 2 см.

Если в среде имеются две спиральные волны с противоположными направлениями вращения, то, подбирая начальную фазу модуляции, можно добиться движения центров двух волн навстречу друг другу и их аннигиляции. Этот эффект виден на серии последовательных фотографий на рис. 2.

В экспериментах нами наблюдалось также смещение центра волны вдоль окружности при неполном совпадении частот ω и ω_0 .

Таким образом, эксперимент полностью подтверждает предсказания теории. Подчеркнем, что эффект резонанса основывается на весьма общих свойствах возбудимых сред и поэтому должен иметь место в возбудимых средах самой различной природы, в том числе твердотельных. В последнее время неоднократно высказывались предположения, что автоволновые и диссипативные структуры в распределенных активных средах могут быть использованы для обработки информации. С этой точки зрения, эффект резонанса представляет особый интерес, так как он дает возможность целенаправленного управления автоволновыми структурами.

Литература

1. Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. УФН, 1979, 128, 625.
2. Полак Л.С., Михайлов А.С. Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах. М.: Наука, 1983.
3. Буздин А.И., Михайлов А.С. ЖЭТФ, 1986, 90, 294.
4. Кернер Б.С., Осипов В.В. ЖЭТФ, 1978, 74, 1675.
5. Кернер Б.С., Осипов В.В. ЖЭТФ, 1982, 83, 2201.
6. Жаботинский А.М. Концентрационные автоколебания. М.: Наука, 1974.
7. Krinsky V.I. In "Self-Organization: Autowaves and Structures Far From Equilibrium". Heidelberg, Springer, 1984, p. 9.
8. Зельдович Я.Б., Маломед Б.А. ДАН СССР, 1980, 254, 92.
9. Зыков В.С. Моделирование волновых процессов в возбудимых средах. М.: Наука, 1984.
10. Давыдов В.А., Михайлов А.С. Сб. "Нелинейные волны". М.: Наука, 1987, с. 261.
11. Давыдов В.А., Михайлов А.С., Бражник П.К. Сб. "Кинетика и горение". Черноголовка, ИХФ, 1986, с. 39.
12. Kuhnert L. Nature, 1986, 319, 393.
13. Krinsky V.I., Agladze K.I. Physica, 1983, 8D, 50.

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
13 мая 1987 г.

¹) Реакция протекала при температуре $T = 293$ К. Состав раствора: $\text{NaBrO}_3 - 0,28$ М; $\text{H}_2\text{SO}_4 - 0,42$ М; $\text{CH}_2(\text{COOH})_2 - 0,1$ М; $\text{CHBr}(\text{COOH})_2 - 0,24$ М; $\text{Ru}(\text{dipy})_3 - 1,5 \cdot 10^{-3}$ М.