

Синхронизация: порядок в хаосе

Аркадий Пиковский

Физический институт, Потсдамский университет, Германия
Университет им. Лобачевского, Нижний Новгород
ВШЭ, Нижний Новгород

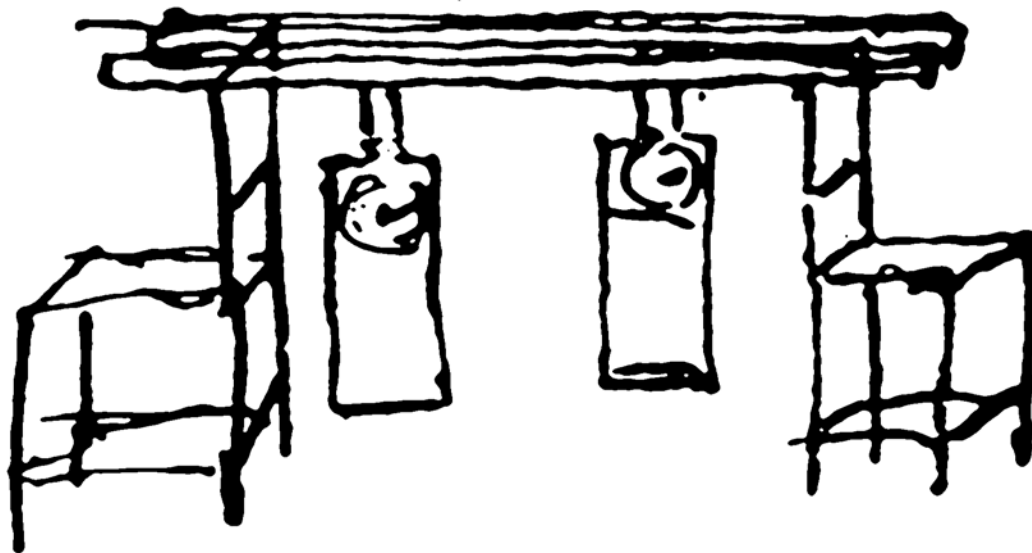
Историческое введение: Гюйгенс

Christiaan Huygens
(1629-1695) первым наблюдал
синхронизацию маятниковых
часов



Так Гюйгенс описал свой эксперимент:

“ . . . довольно интересно отметить, что когда мы подвесили двое таким образом сделанных часов на два крюка, вделанных в одну деревянную балку, движения обоих маятников, в противоположных направлениях, были так точно согласованы, что между ними не возникало ни малейшего отличия, и звуки от них совпадали. Более того, если это совпадение было нарушено внешним вмешательством, оно вскоре снова восстанавливалось. Долгое время был я удивлен этим неожиданным наблюдением, но после тщательного исследования в конце концов установил, что причиной является движение балки, хотя такое слабое, что его трудно заметить. ”



Лорд Рэлей (Lord Rayleigh), 19 век

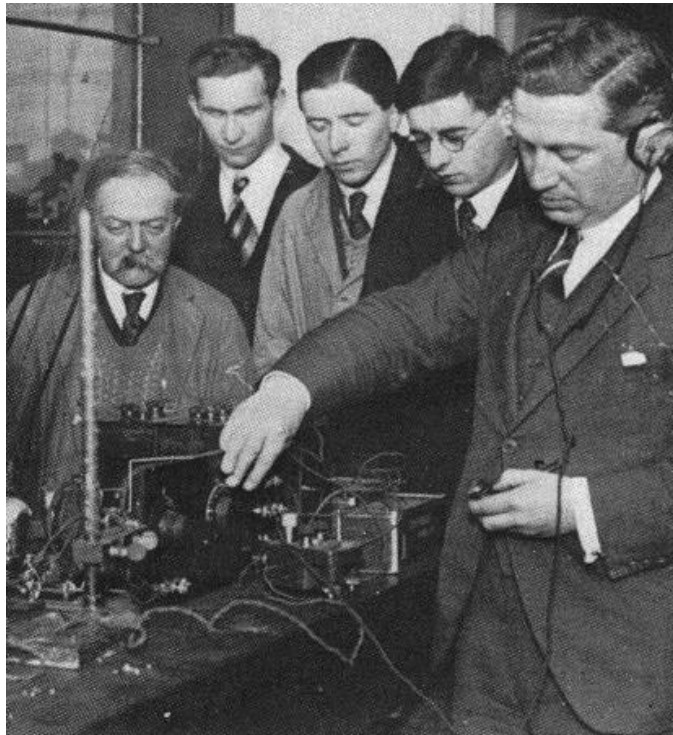
описал синхронизацию органнх труб:

“Когда две органнх трубы, имеющие один и тот же тон, располагались рядом друг с другом, возникали сложности, часто приводившие на практике к проблемам. В самом худшем варианте трубы полностью гасили друг друга. Даже более слабое взаимодействие могло приводить к тому, что трубы начинали звучать в абсолютном унисоне, несмотря на неизбежные малые различия между ними.”



Радиотехнические эксперименты: начало 20 века

Экклес и Винцент (W. H. Eccles and J. H. Vincent) запатентовали эффект синхронизации в ламповых генераторах. Эдвард Эпплтон (Edward Appleton) и Балтазар Ван дер Поль (Balthasar van der Pol) продолжили эксперименты с ламповыми генераторами и дали первое теоретическое объяснение эффекта (1922-1927)



Наблюдения в живых системах

Де Маран (Jean-Jacques Dortous de Mairan) описал в 1729 эксперименты с фасолью, в которых движение листьев происходило и без изменений освещенности - он первым обнаружил в живых организмах циркадный (близкий к 24 часам) ритм

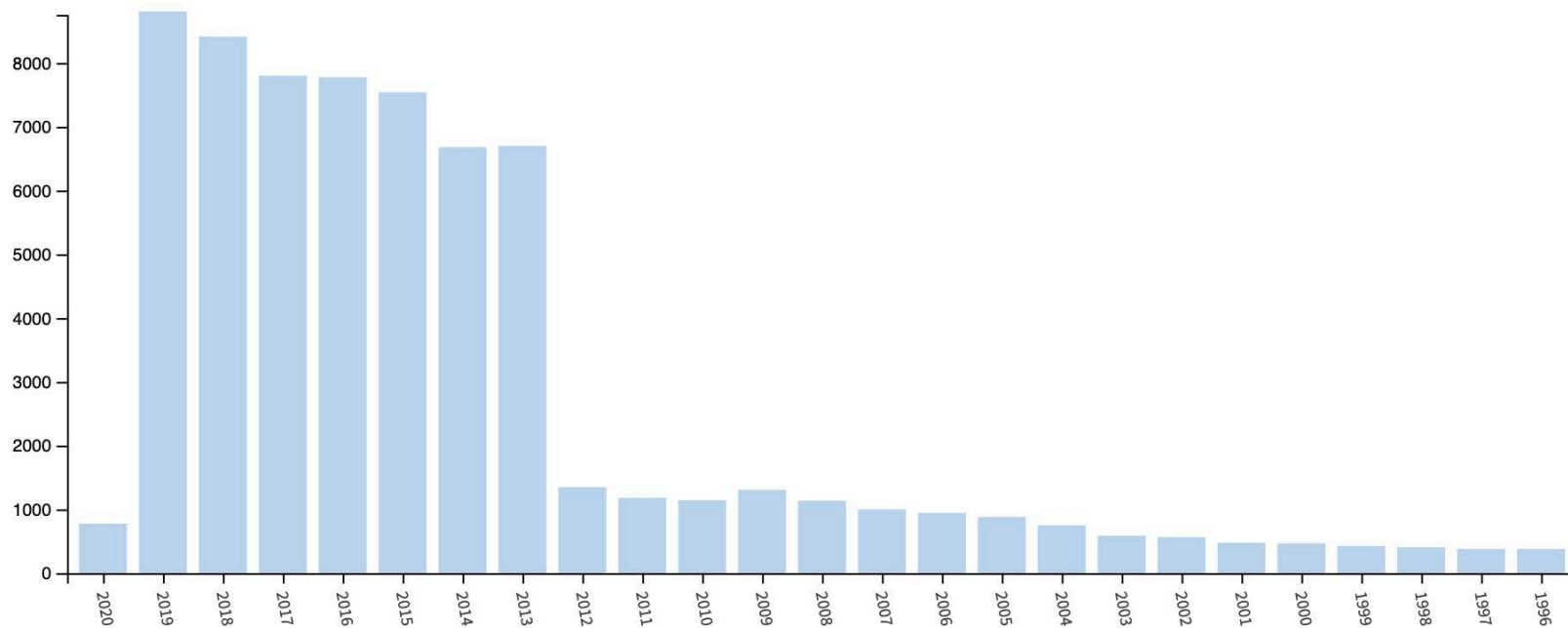
Энгелберт Кемпфер (Engelbert Kaempfer) описал после посещения Сиама в 1680:

“Светлячки . . . устраивают следующее представление: они усаживаются на деревьях, образуя светящееся облако, при этом удивительным образом рой насекомых оккупировавших одно дерево, и рассеявшийся по его веткам, гаснет весь как один, и потом снова все вместе испускают свет с максимальной регулярностью и точностью . . .”

Синхронизация как физический эффект

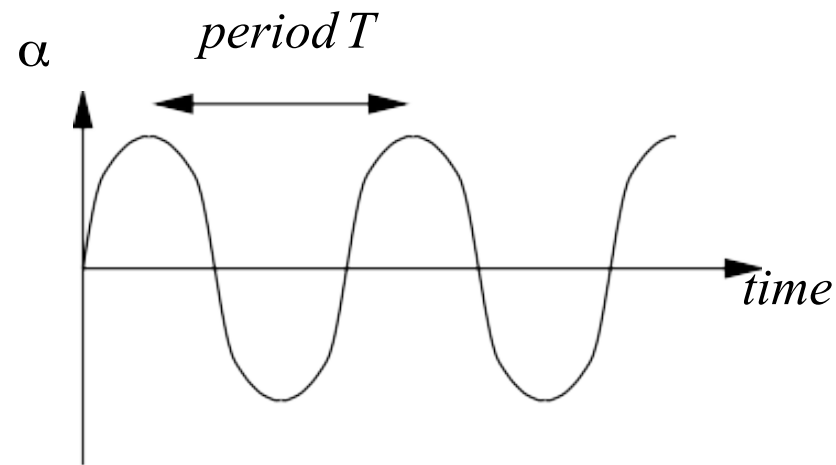
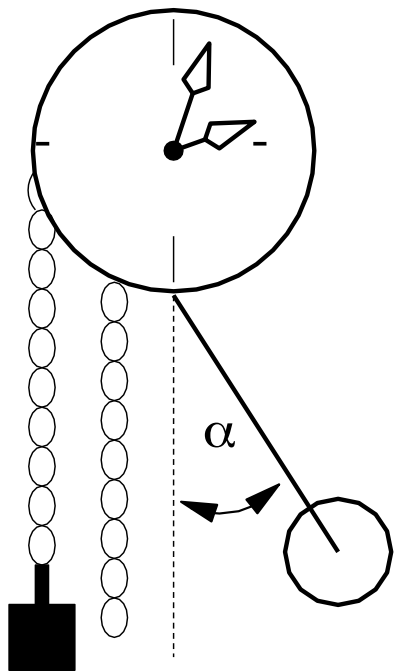
- подстройка ритмов колебательных (осциллирующих) систем в результате (слабого) взаимодействия или внешнего воздействия
- подстройка ритмов: периоды становятся одинаковыми
- колебательная система: генерирует ритм без внешнего воздействия (автоколебания)
- взаимодействие: не обязательно взаимное
- концепция синхронизации применима не только к физическим, но и к живым и социальным системам

Библиометрия:

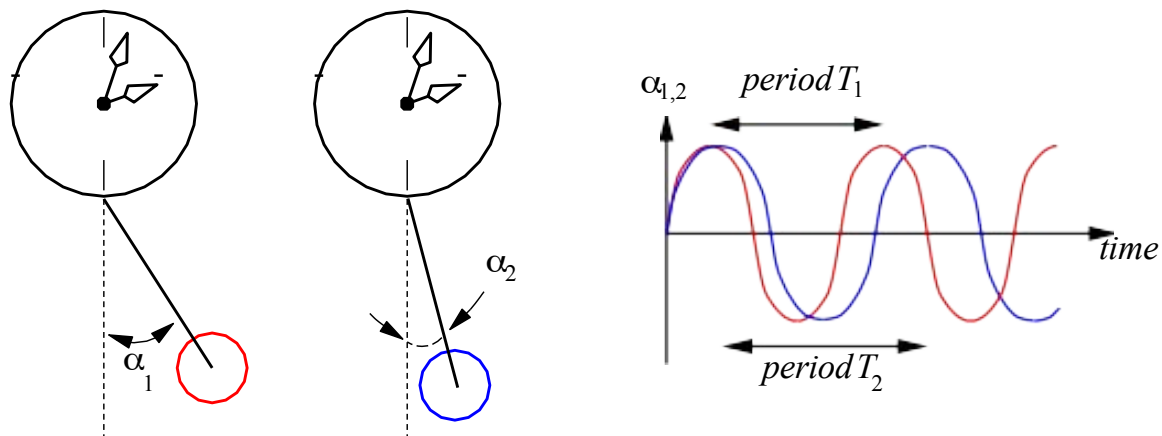


Основной эффект

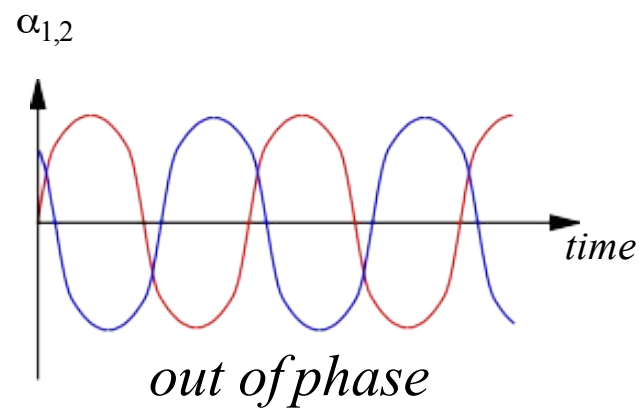
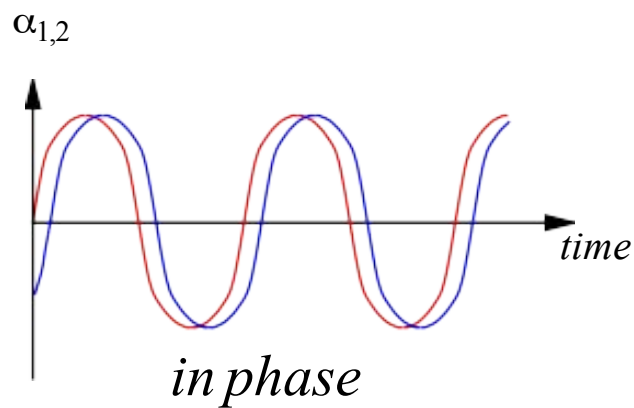
Почти периодические колебания маятника часов характеризуются периодом T и частотой $\omega = 2\pi/T$



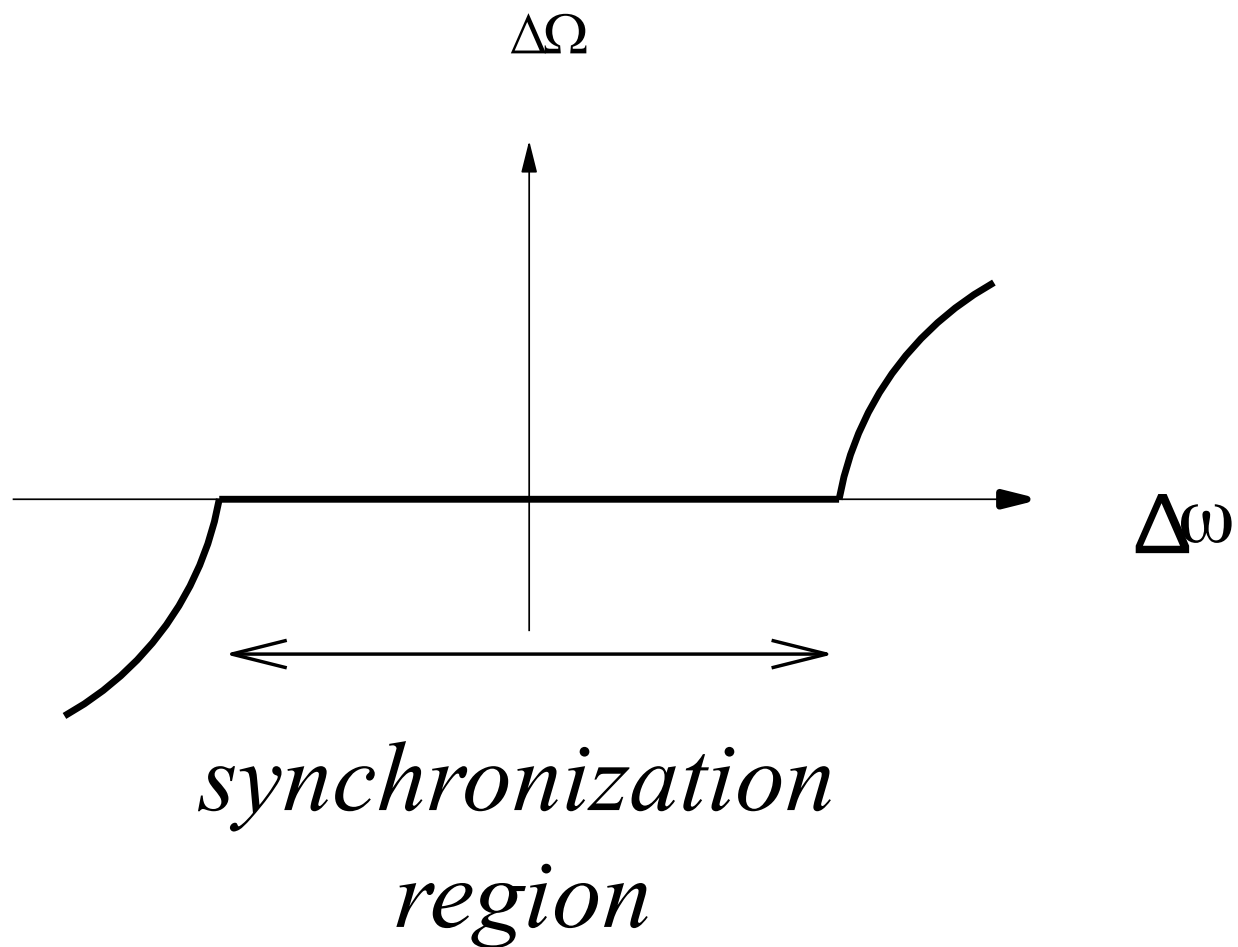
Периоды двух
разных часов
различаются



но в результате связи они согласовывают ритмы и колеблются с одной
и той же частотой Ω . Часто различают синхронизацию "в фазе" и
"в противофазе"



Синхронизация наблюдается в целой области параметров

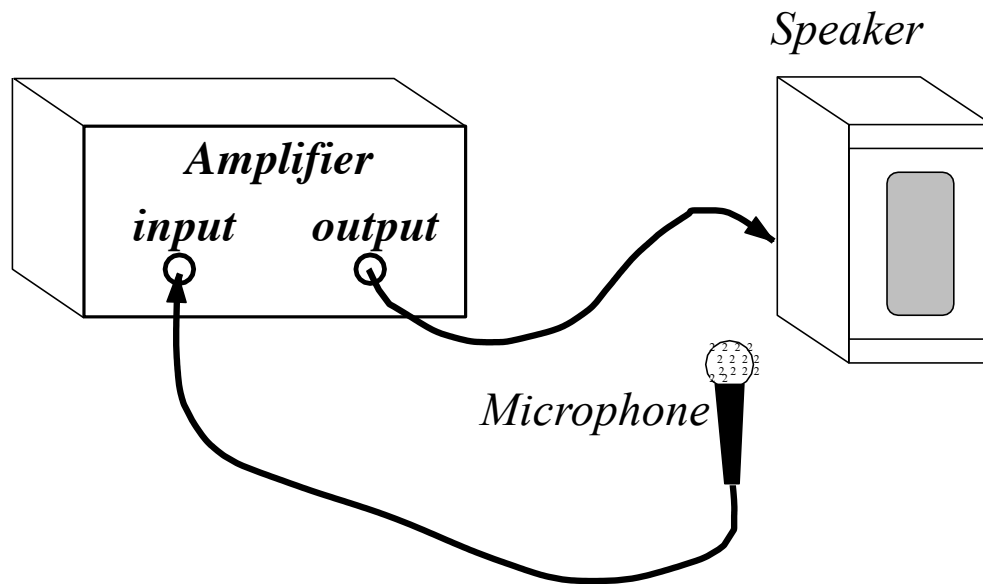


Самоподдерживающиеся колебания в автономных системах без внешней силы

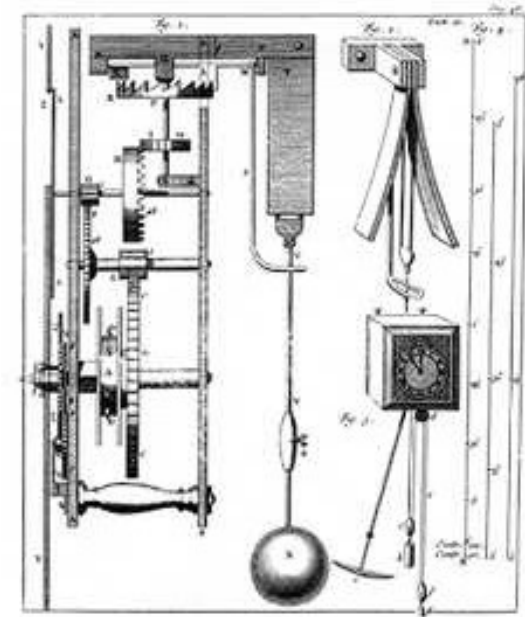
- ▲ генерируют периодический процесс
- ▲ без внешнего периодического воздействия
- ▲ системы с подкачкой и диссипацией энергии
- ▲ описываются автономной системой дифференциальных уравнений
- ▲ предельный цикл в фазовом пространстве системы

Примеры:

усилитель с положительной обратной
связью



часы маятниковые (и другие)

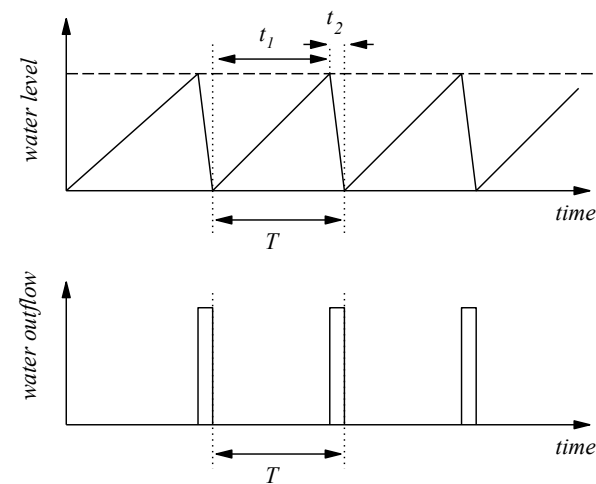
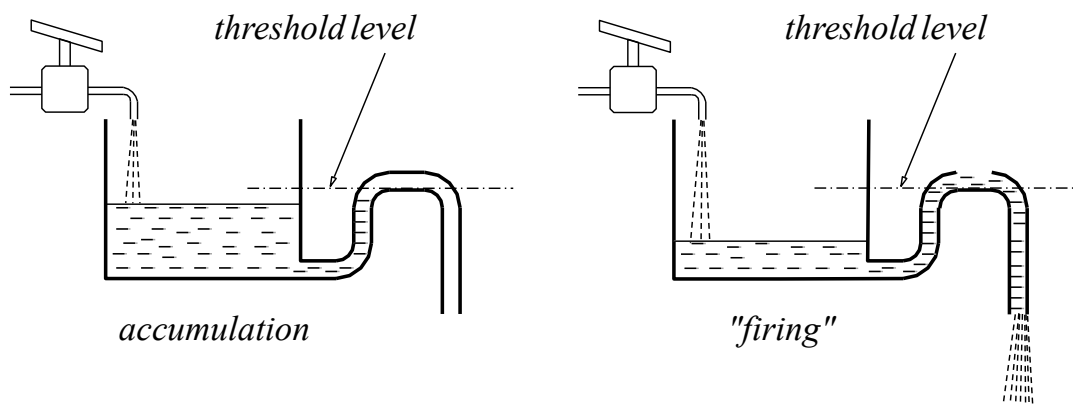




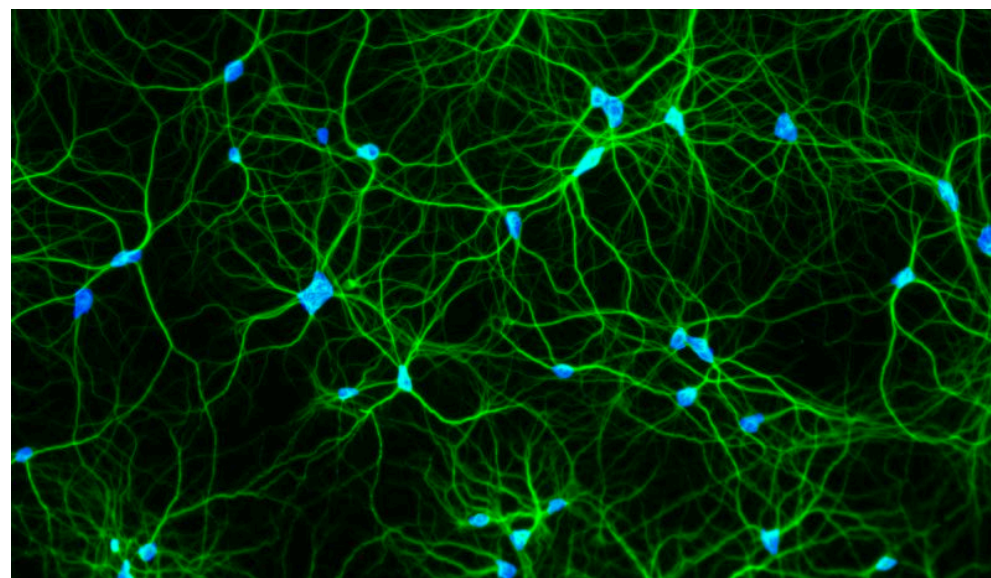
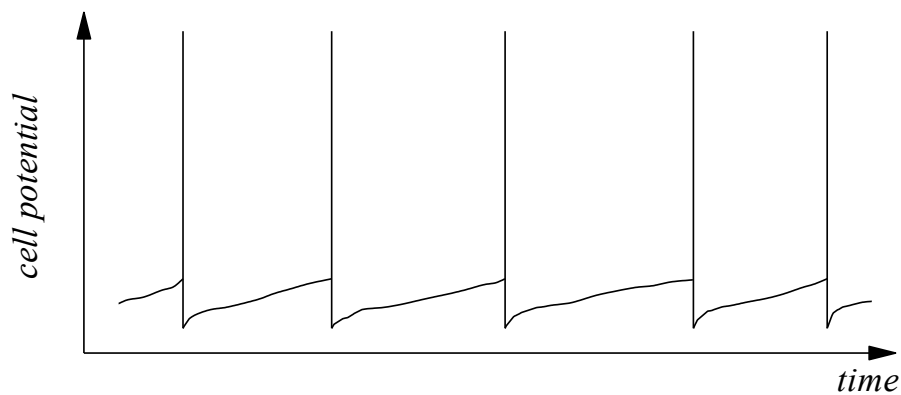
а также метроном
лазеры, электронные генераторы, органные
трубы, свисток, периодические химические
реакции, экосистема
хищник-жертва, ...
Концепцию можно распространить и на
нефизические системы!



релаксационный осциллятор (накопление и сброс)

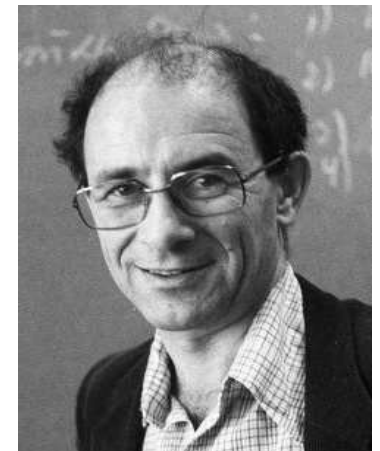


например, активный нейрон



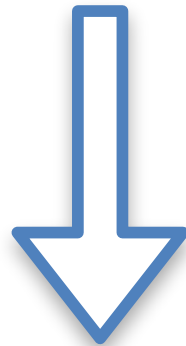
Вклады в теорию синхронизации

- анализ на основе метода усреднения (Эпплтон, Ван дер Поль, Андронов, Витт) - с 1920х
- Динамика фазы: уравнение Адлера (Robert Adler, 1946)
- Языки Арнольда (1960)
- Синхронизация многих систем - Winfree, Kuramoto (1970-)
- Синхронизация хаоса (с 1980-х)



Синхронизация периодическим воздействием

Внешняя сила



Автоколебательная
система

Пример: часы, управляемые по радио

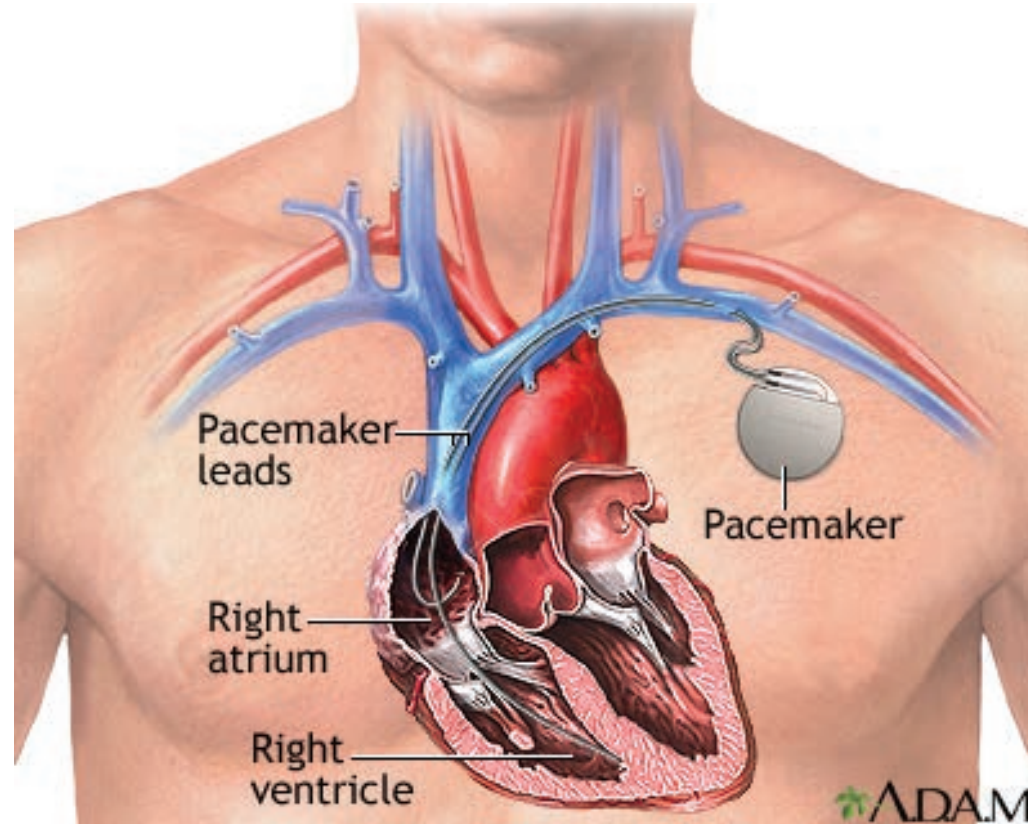
Атомные часы в часовом зале физико-технического федерального ведомства в Брауншвейге



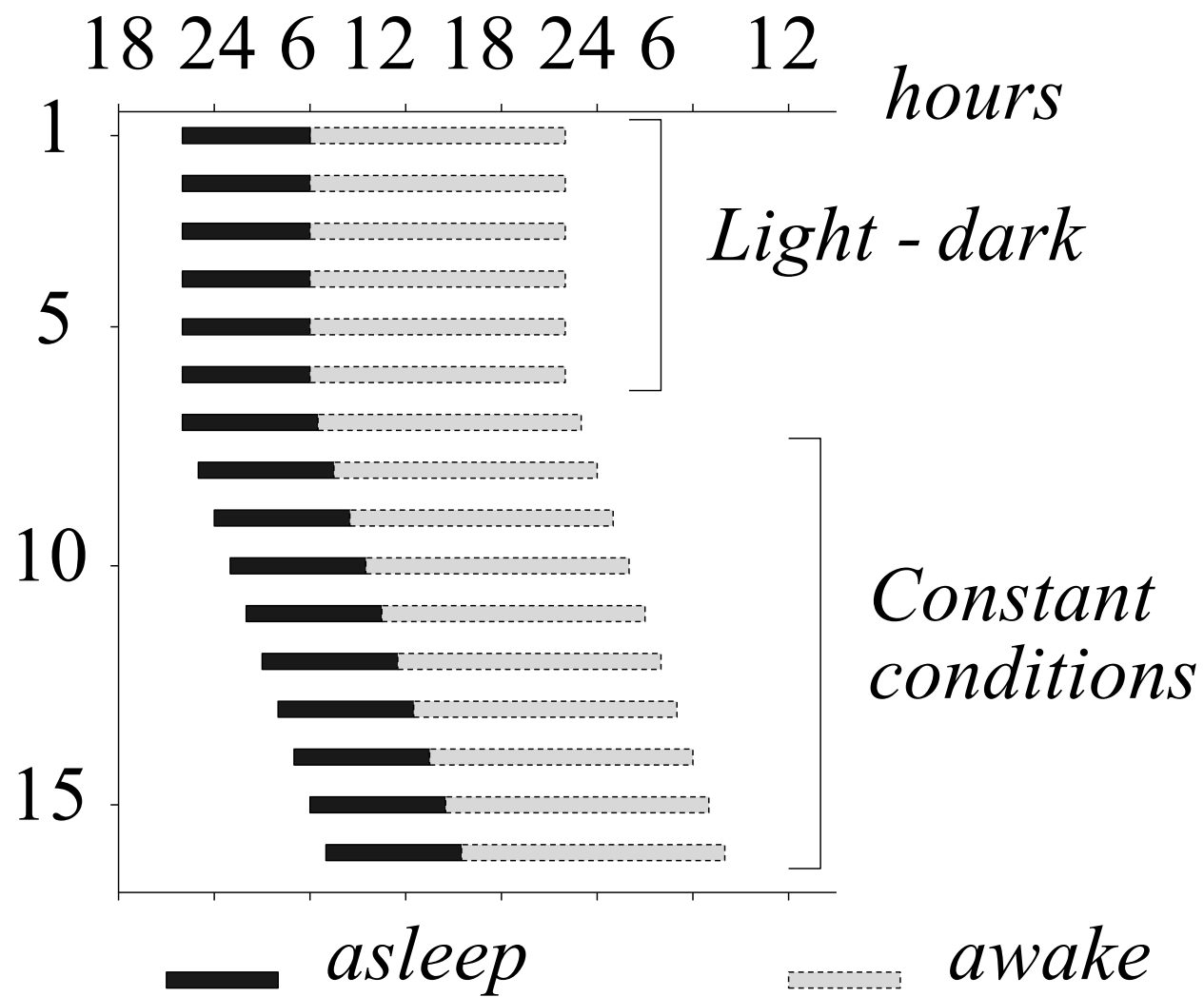
Часы, управляемые по радио



Пример: электрокардиостимулятор



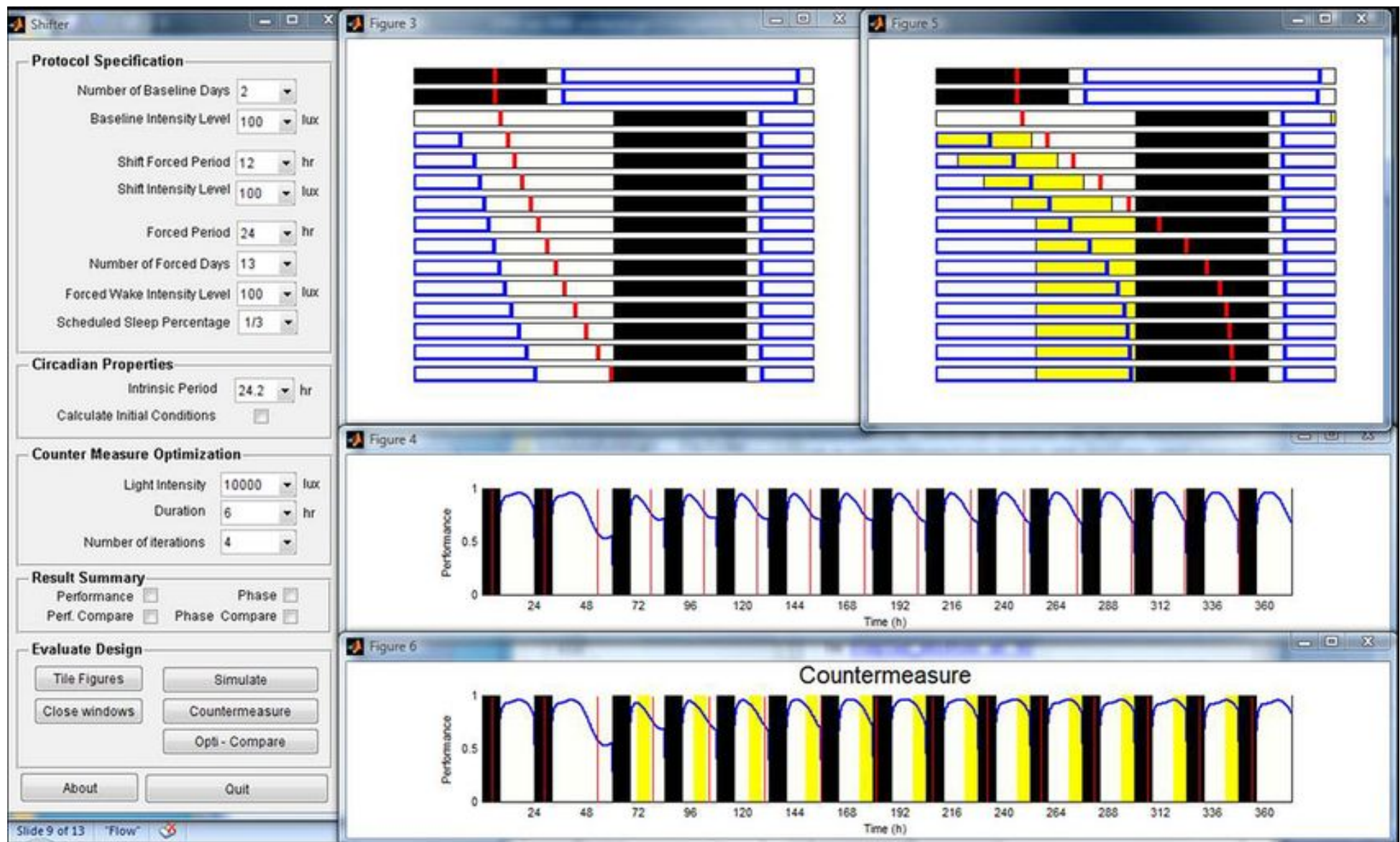
Пример: циркадный ритм



Проблемы при быстрой смене часового пояса или при сменной работе
- результат внезапного сдвига фазы: требуется новая синхронизация

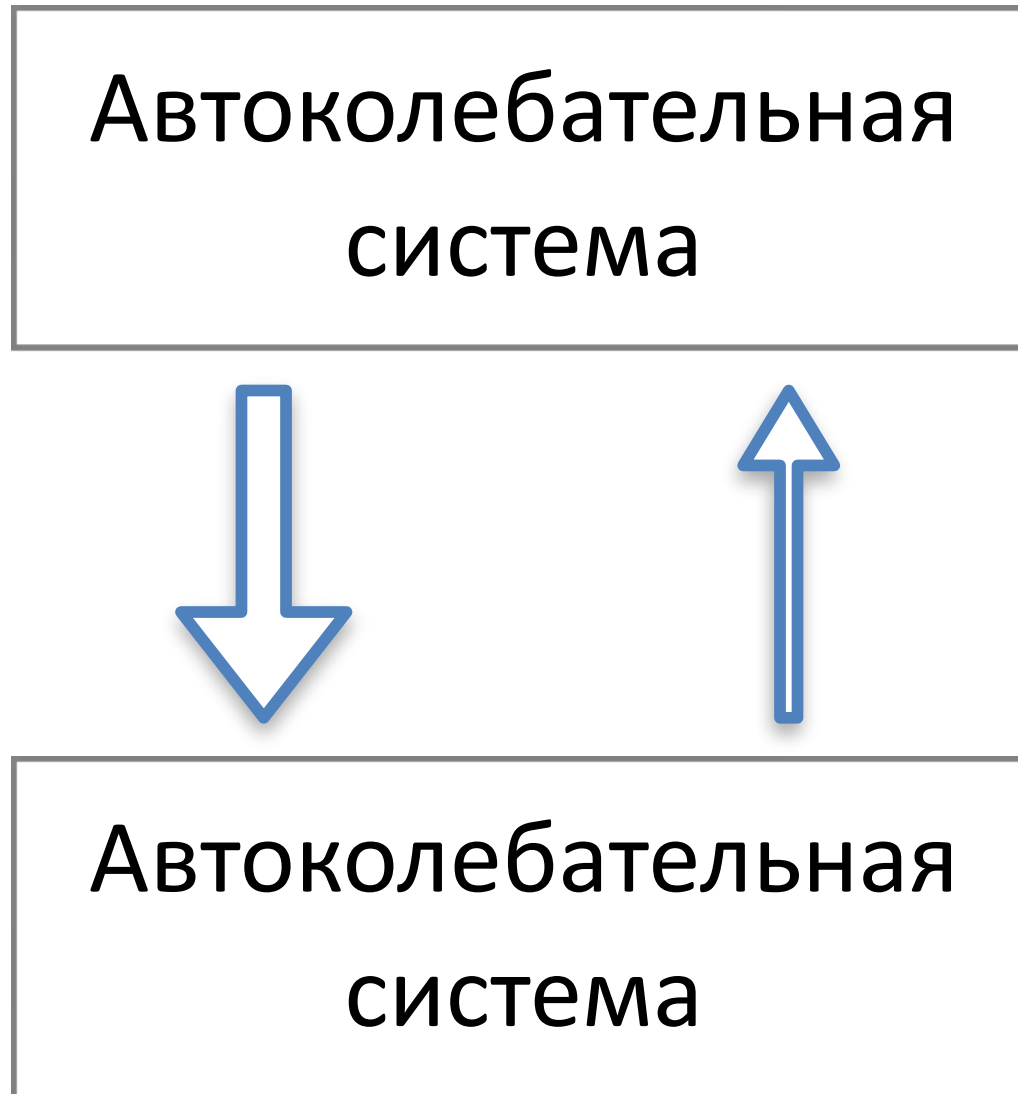


Для ре-синхронизации помогает яркий свет, способствующий
выделению мелатонина



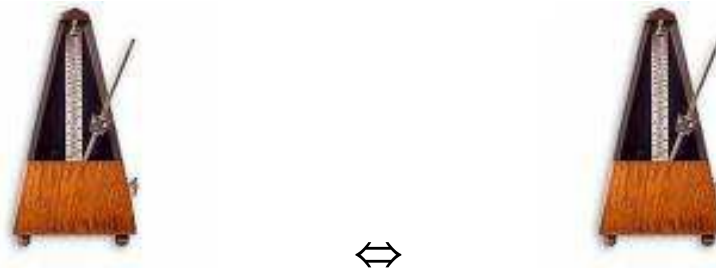
[E. Klerman, Brigham and Women's Hospital, Boston]

Синхронизация при взаимодействии двух систем

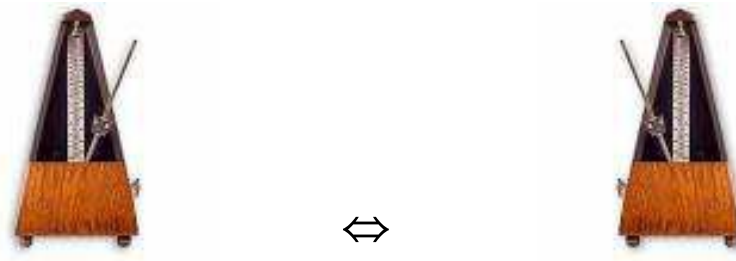


Пример: Метрономы

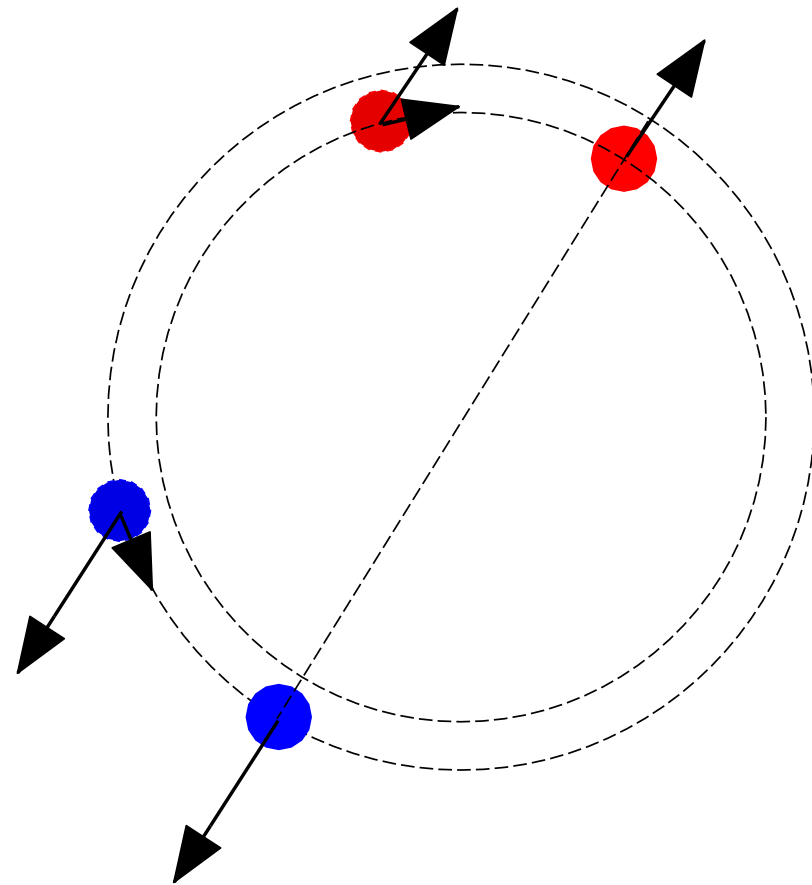
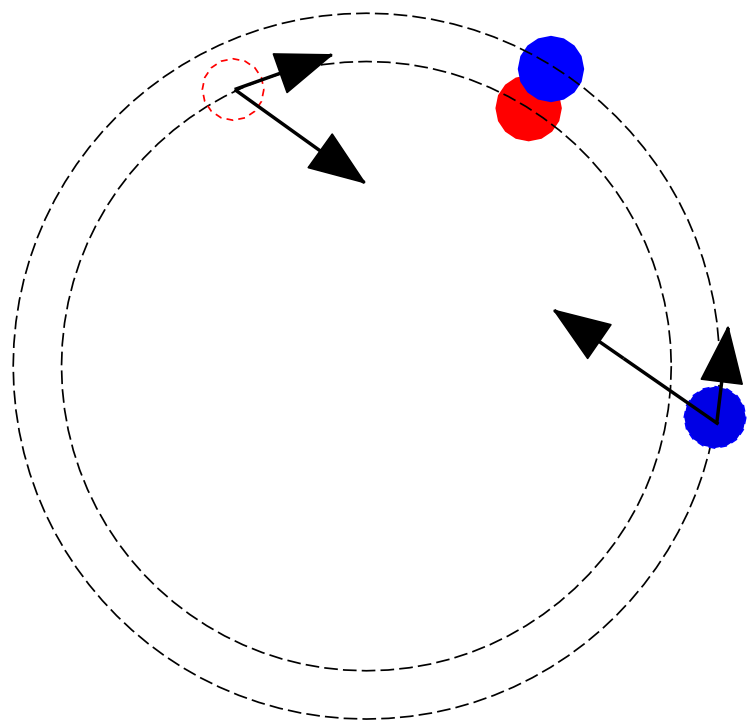
Притягивающее взаимодействие – синхронизация в фазе



Отталкивающее взаимодействие – синхронизация в противофазе



Отталкивающее и притягивающее взаимодействие

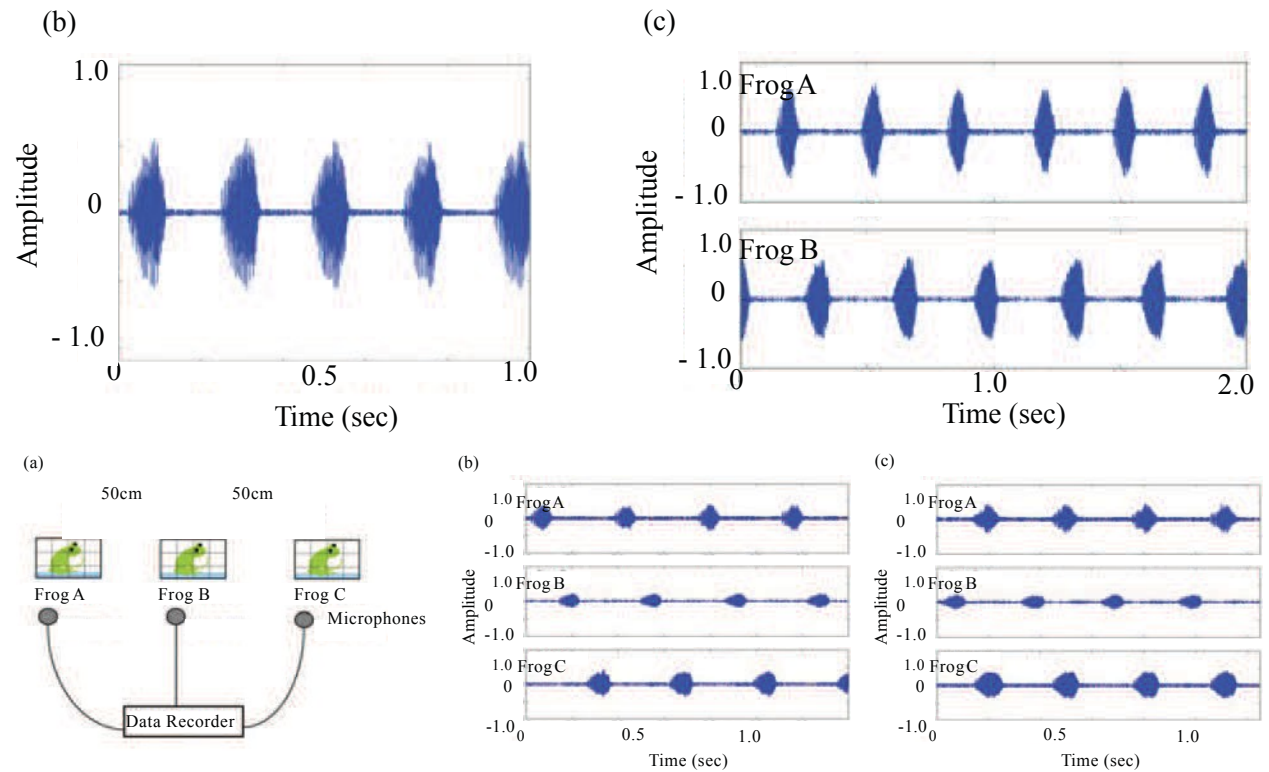


Несколько осцилляторов: более сложные режимы

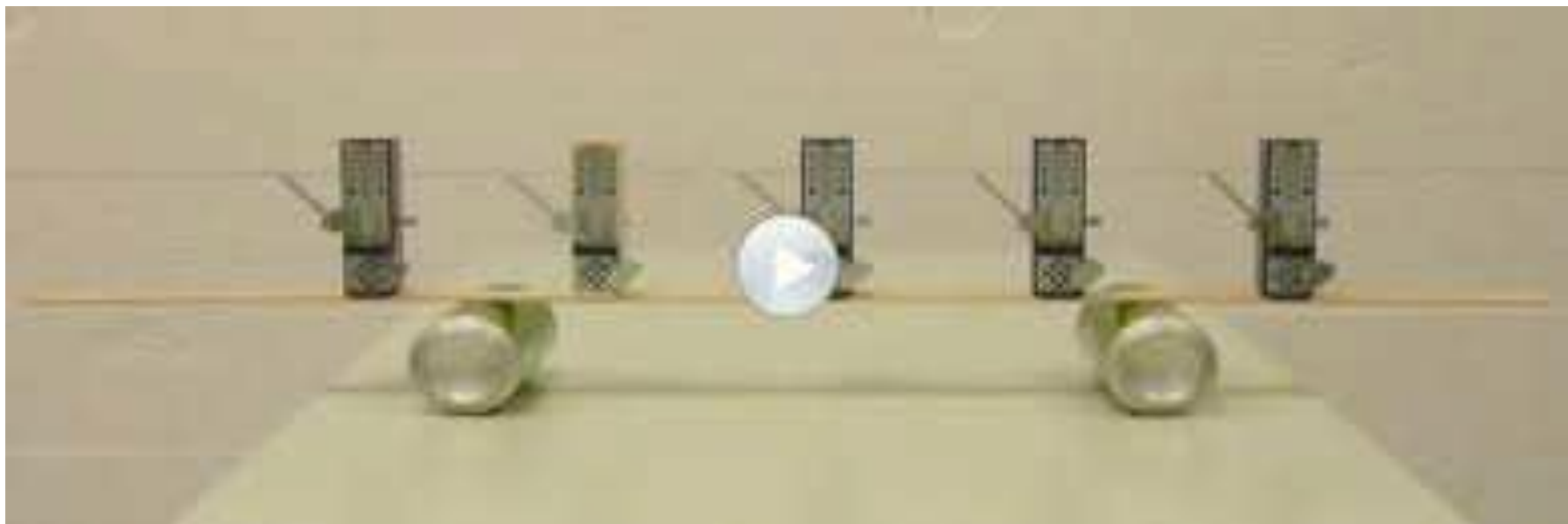
Пример: синхронизация кваканья японских лягушек



FIG. 1. (Color online) Japanese tree frog *Hyla japonica*.

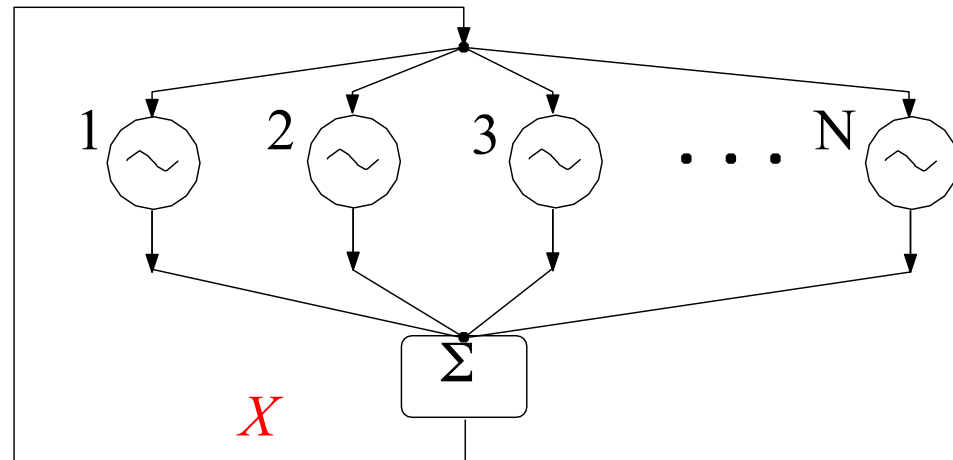
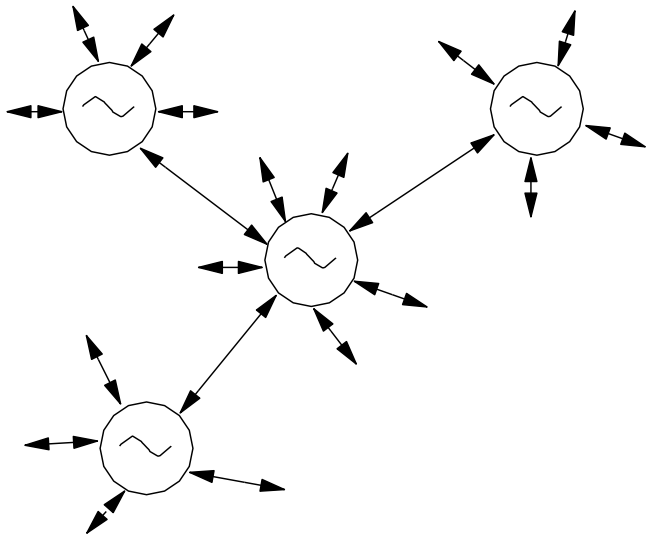


Несколько метрономов



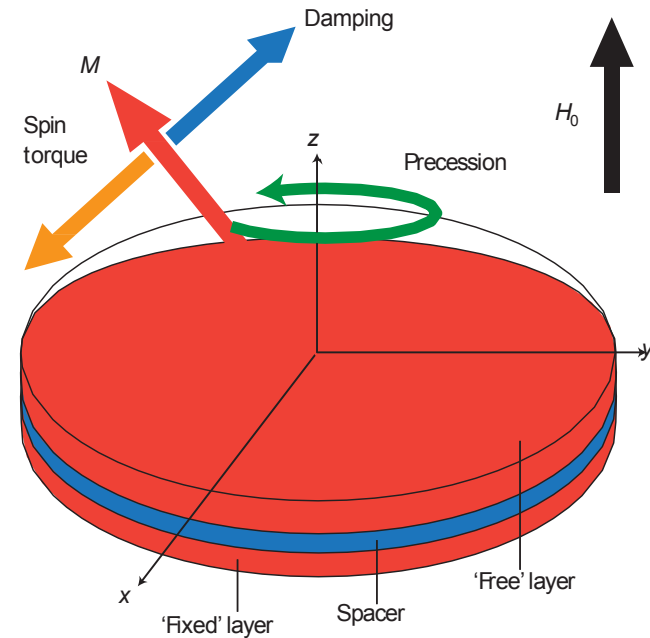
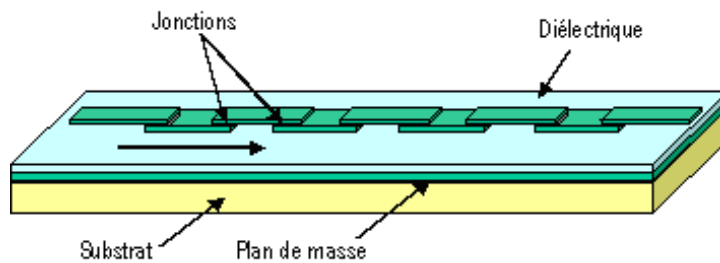
Глобальная связь большого количества осцилляторов

каждый с каждым  связь через среднее поле

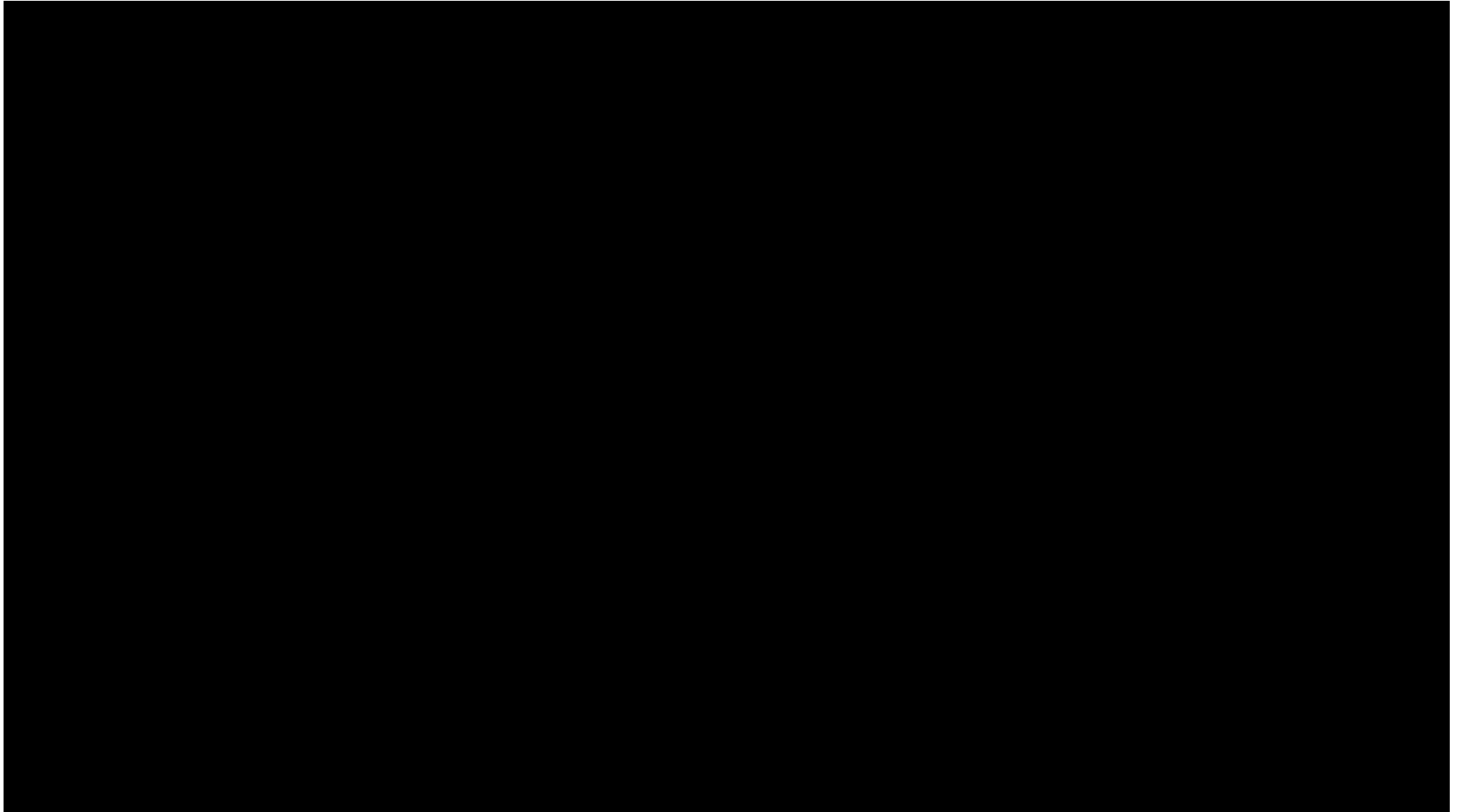


Физические системы с глобальной связью

- ▲ Цепочки переходов Джозефсона
- ▲ Генераторы, работающие на общую нагрузку (например, генераторы на базе спинового момента в наноспинтронике)



Пример: много метрономов на общей платформе



Пример: светлячки

Реклама с интернет-страницы www.fireflypark.com:

Firefly Park Resort Bukit Belimbing in Kuala Selangor, Malaysia. Is the only place in this region where you can witness the sight of millions of fireflies flashing in synchrony, often referred to as the “Eighth Wonder of the World”. It is one of the must visit place of interest (POI) in Malaysia. You will be taken on a boat ride along the Selangor River where the fireflies inhabit around the branches of the “Berembang” trees along the riverbank. Here, up to thousands of fireflies may group together on a tree, beginning their display about one hour after sunset. A really bright display lasts for about two to three hours, continuing at lower levels until dawn.

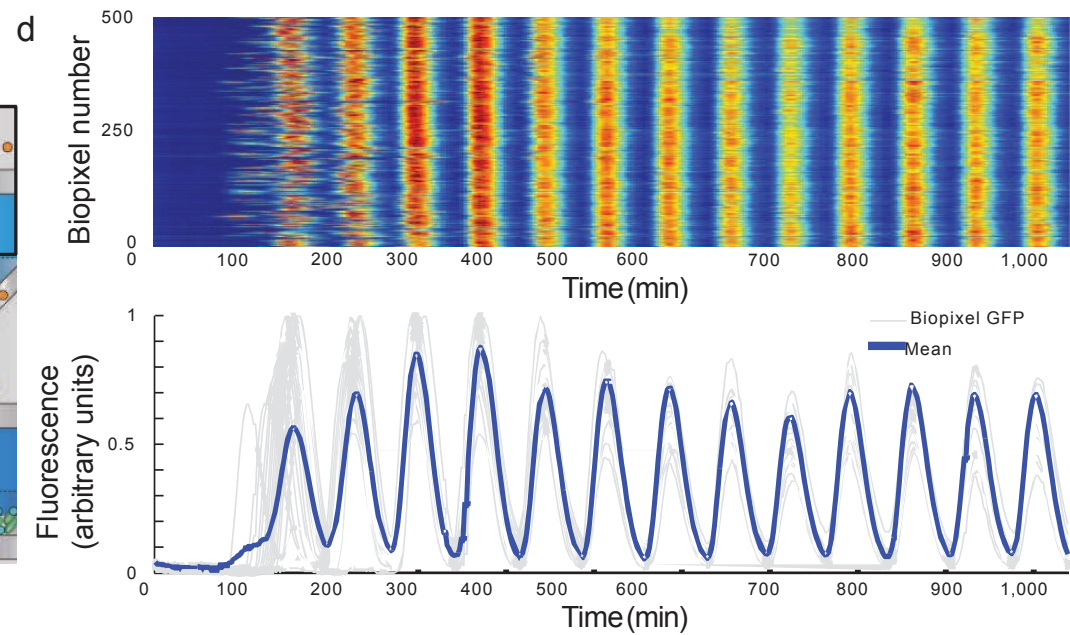
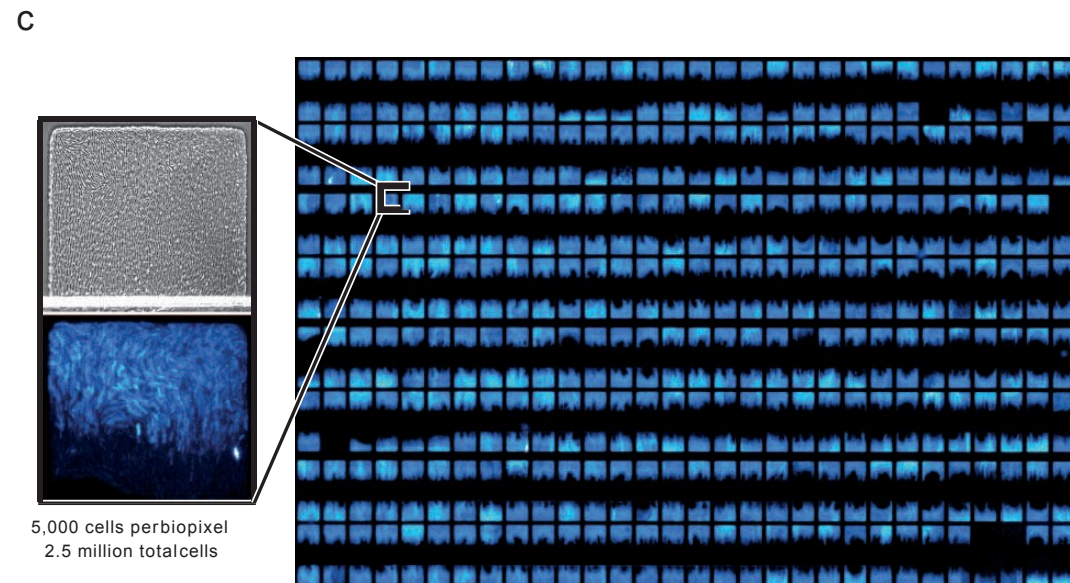
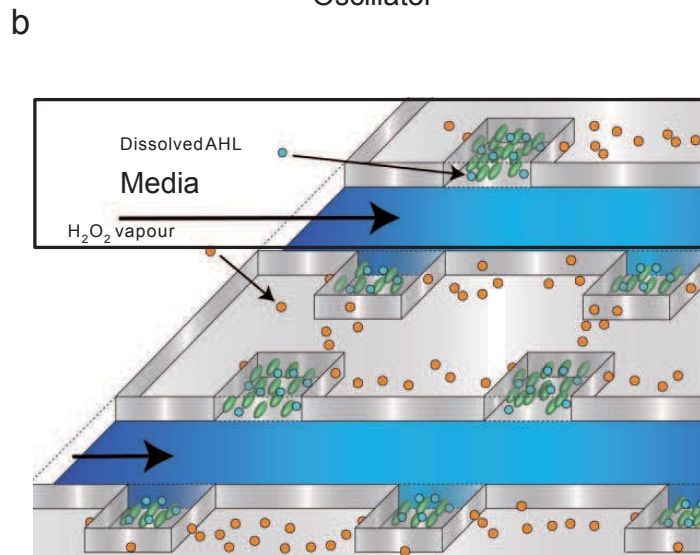
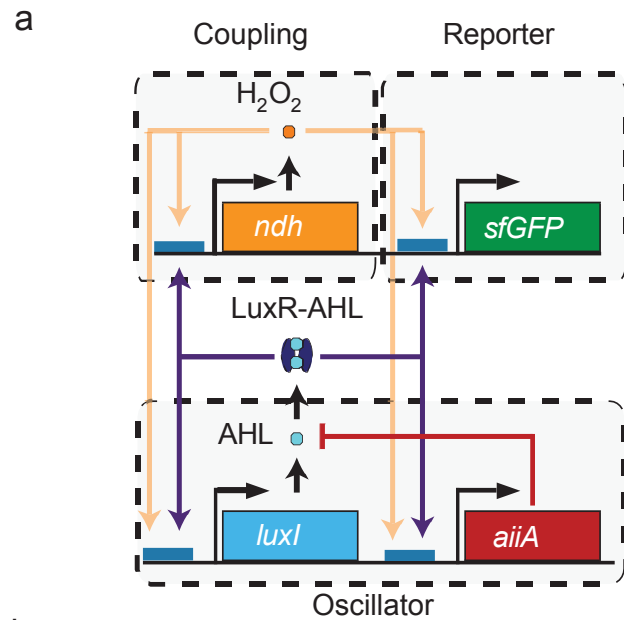


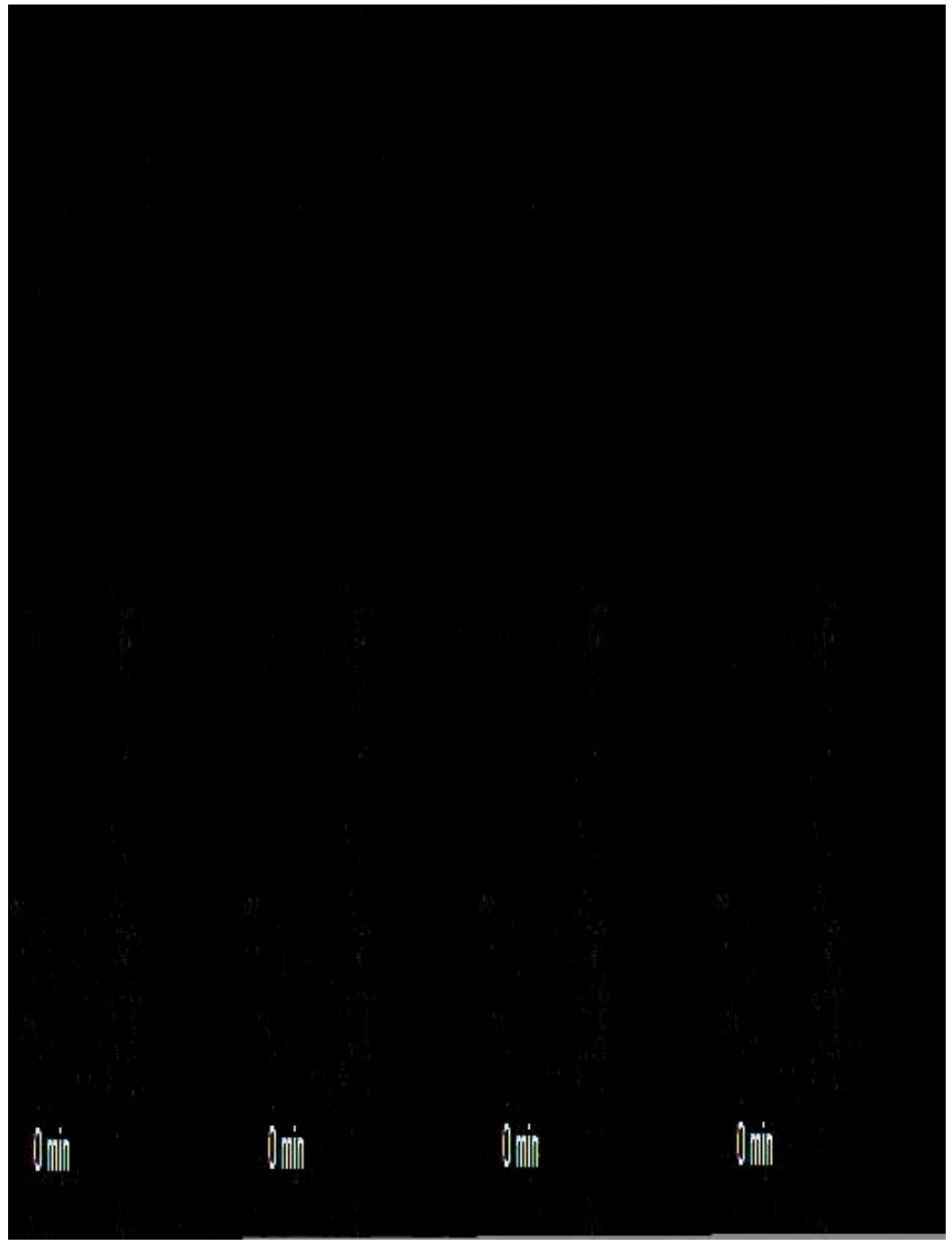


Электронные светлячки



Генно-модифицированные искусственные светлячки





0 min

0 min

0 min

0 min

Пример: аплодисменты, переходящие в овацию

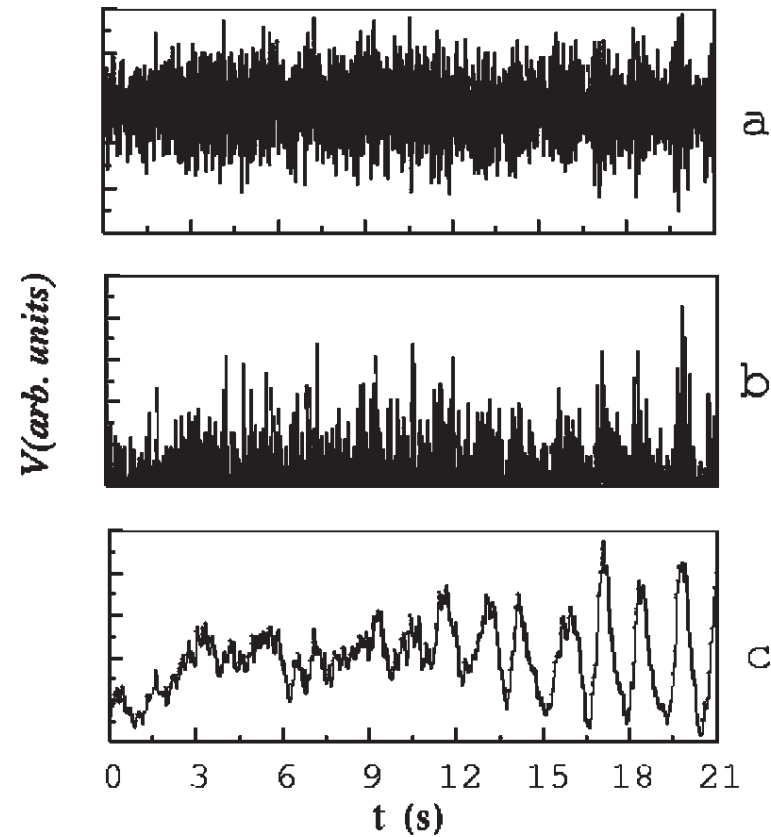
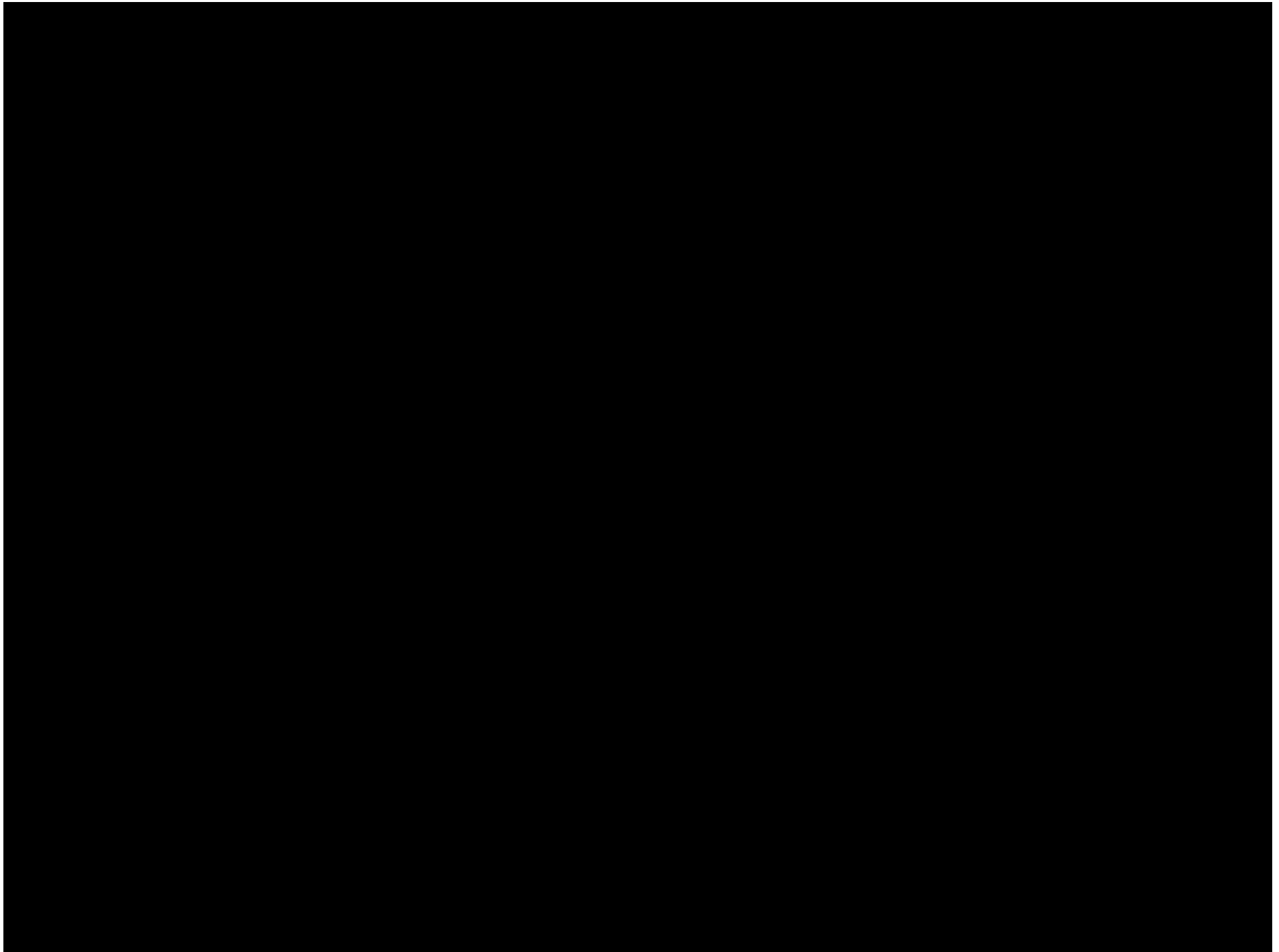
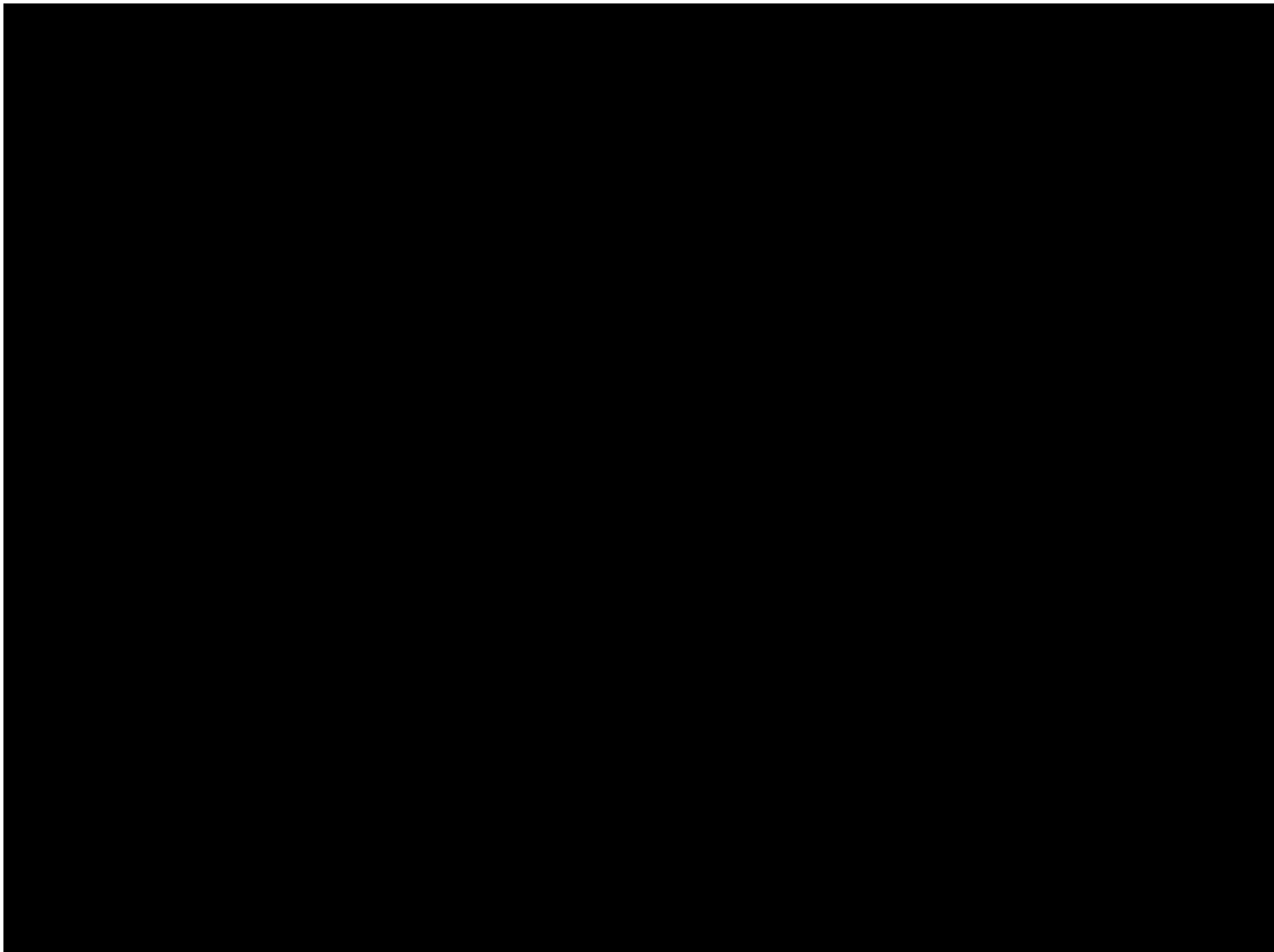


FIG. 1. Digitized global signal, voltage as a function of time (a). The processed signals: (b) and (c). In (b) we have the square of the signal from (a), relative to the calculated average voltage level. In (c) we present the short-time moving average (window size: 0.2 s) of the signal from (b).

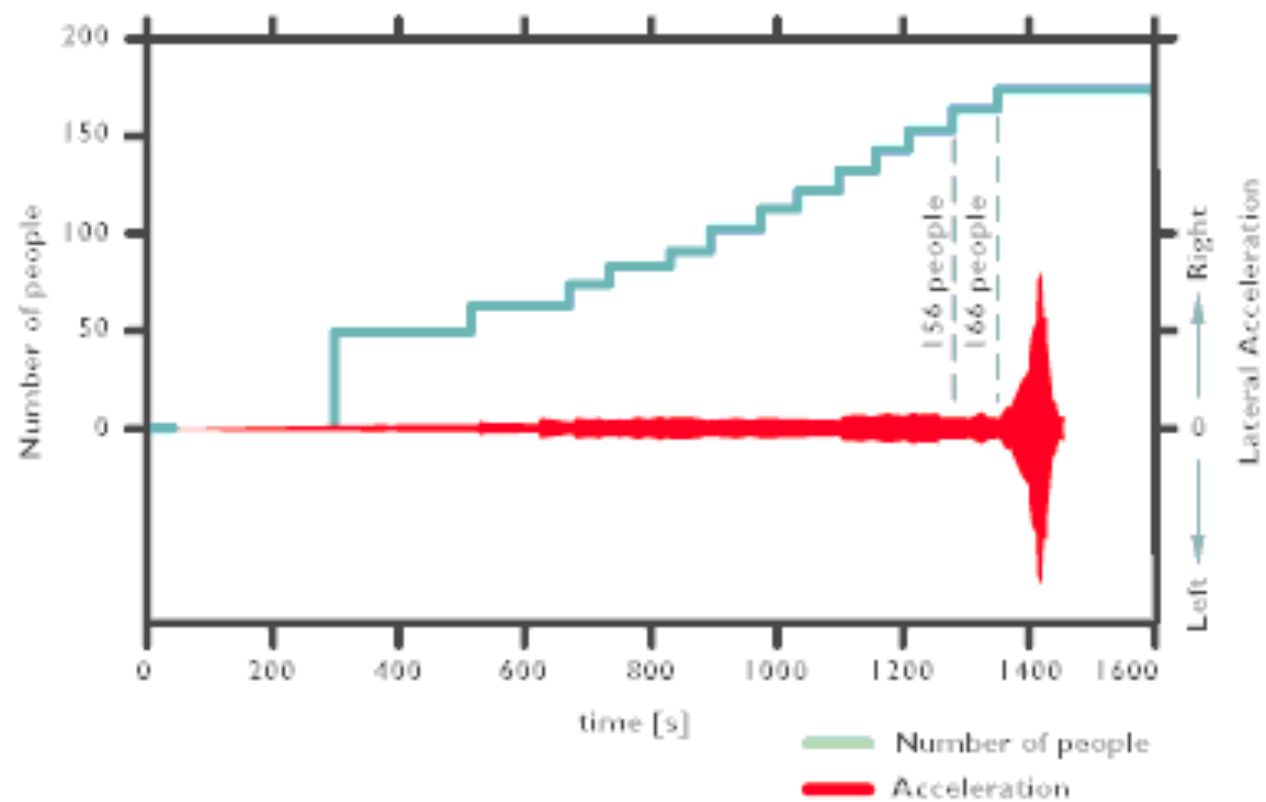
Пример: мост тысячелетия в Лондоне



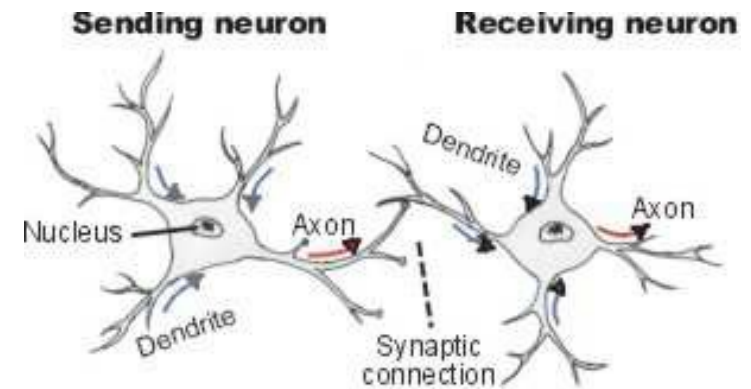
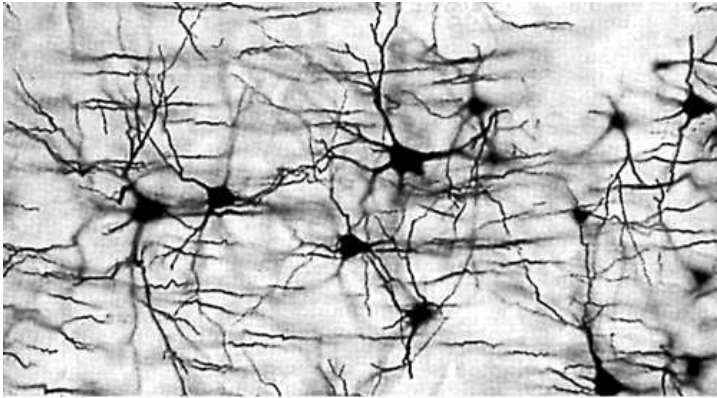




Эксперимент по синхронизации пешеходов на мосту



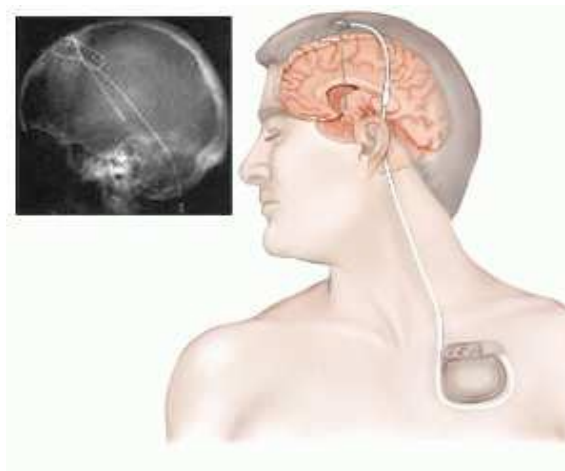
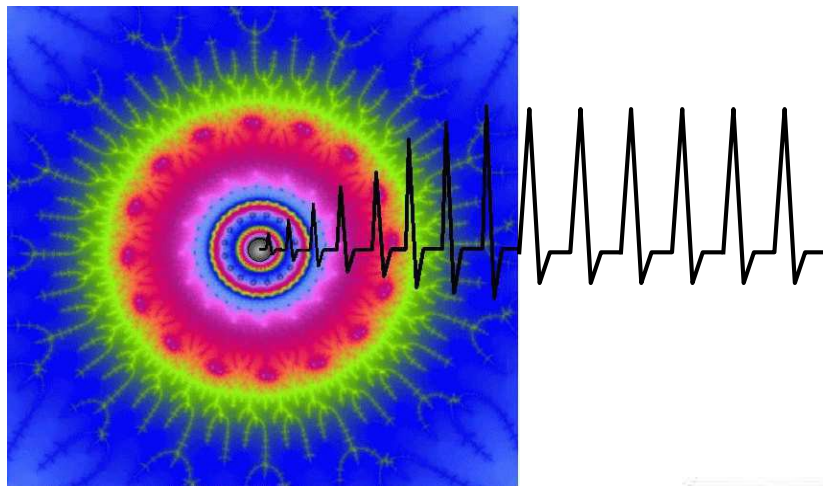
Синхронизация нейронов



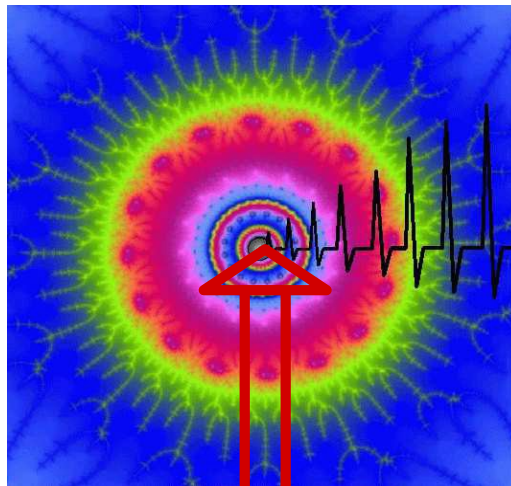
Синхронизация нейронных сетей, возможно, приводит к таким болезням как паркинсонизм и эпилепсия

Управление синхронизацией с помощью обратной связи – возможность подавить проявления этих патологий?

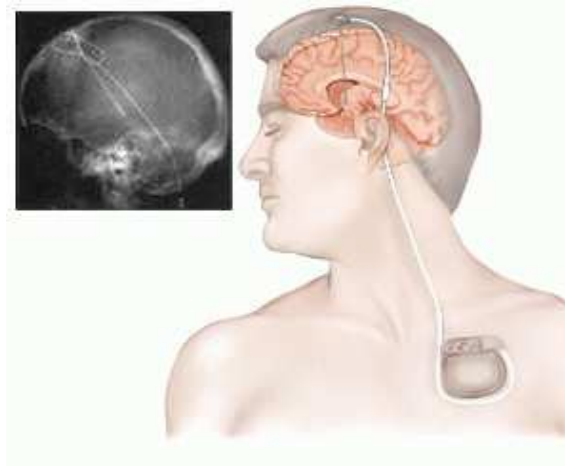
Подавление коллективного ритма “глубинной стимуляцией мозга”



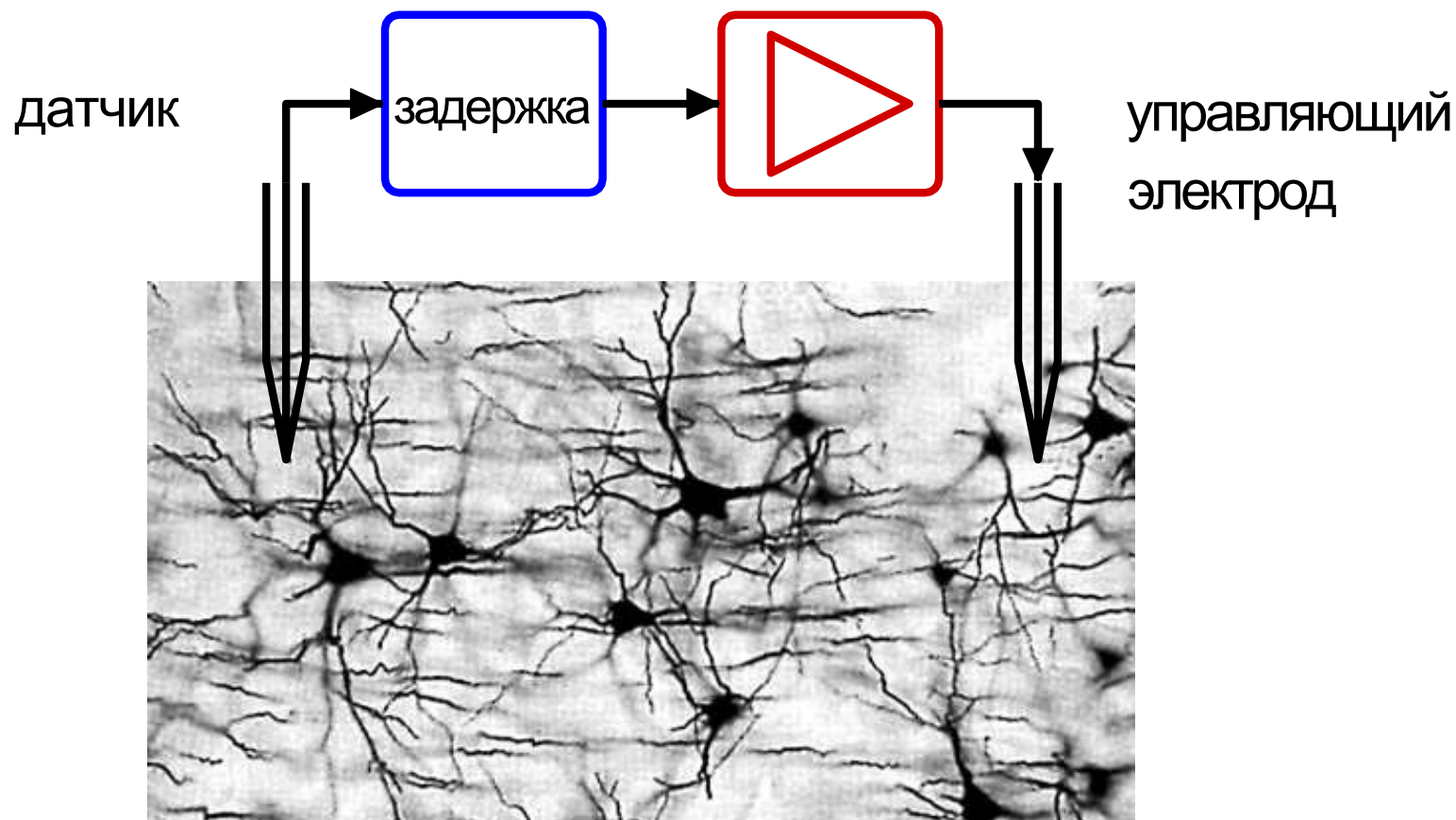
Подавление коллективного ритма “глубинной стимуляцией мозга”



DBS



Новый подход: подавление с помощью обратной связи



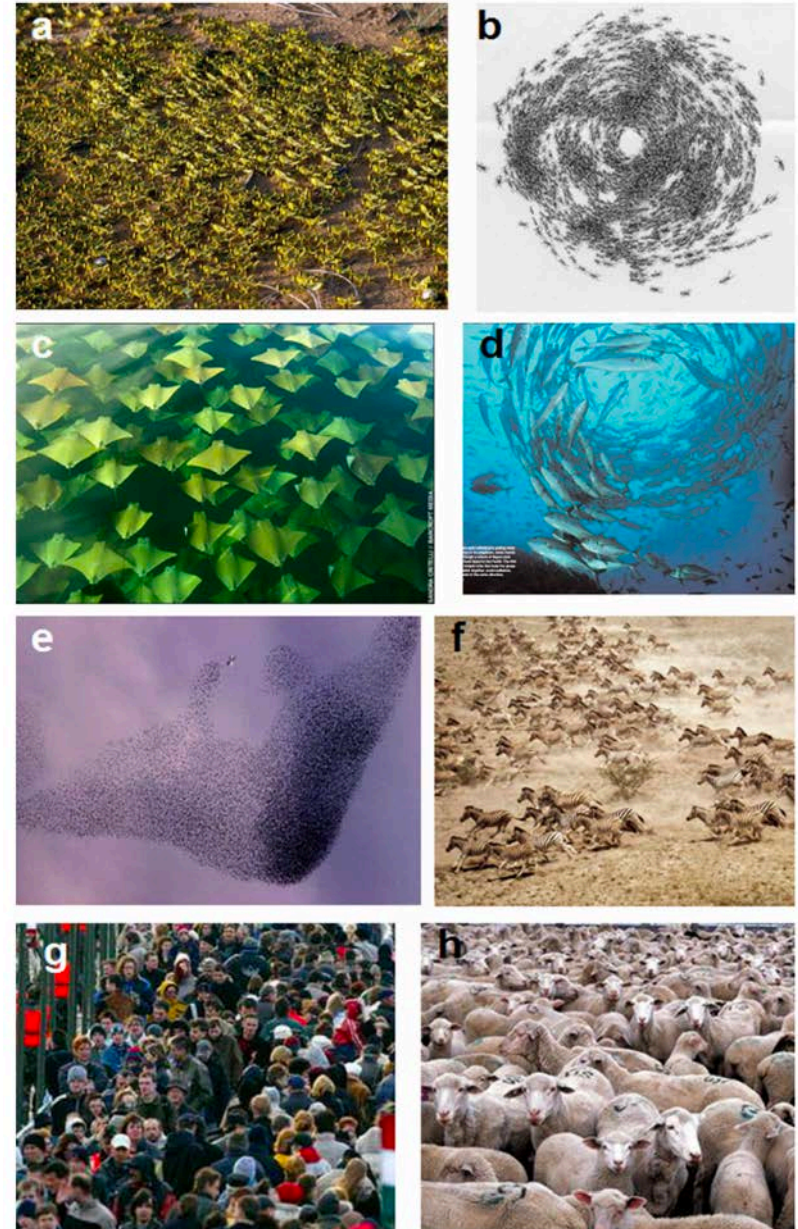
Другие темы в области исследования синхронизации

- ▲ синхронизация хаоса
- ▲ синхронизация шумом
- ▲ эффекты при нелинейной связи
- ▲ обратная задача - определить синхронизацию и связь по наблюдениям

Другие примеры коллективного порядка

- физические частицы вне равновесия
- Живые организмы: бактерии, животные, рыбы, птицы
- Пешеходы
- Автомобили
- Социальные системы

T. Vicsek, A. Zafeiris / Physics Reports 517 (2012) 71–140





Bodily synchronization underlying joke telling

R. C. Schmidt^{1*}, Lin Nie², Alison Franco¹ and Michael J. Richardson³

¹ Department of Psychology, College of the Holy Cross, Worcester, MA, USA

² Center for the Ecological Study of Perception and Action, University of Connecticut, Storrs, CT, USA

³ Center for Cognition, Action and Perception, Department of Psychology, University of Cincinnati, Cincinnati, OH, USA



Advances in video and time series analysis have greatly enhanced our ability to study the bodily synchronization that occurs in natural interactions. Past research has demonstrated that the behavioral synchronization involved in social interactions is similar to dynamical synchronization found generically in nature. The present study investigated how the bodily synchronization in a joke telling task is spread across different nested temporal scales. Pairs of participants enacted knock-knock jokes and times series of their bodily activity were recorded. Coherence and relative phase analyses were used to evaluate the synchronization of bodily rhythms for the whole trial as well as at the subsidiary time scales of the whole joke, the setup of the punch line, the two-person exchange and the utterance. The analyses revealed greater than chance entrainment of the joke teller's and joke responder's movements at all time scales and that the relative phasing of the teller's movements led those of the responder at the longer time scales. Moreover, this entrainment was greater when visual information about the partner's movements was present but was decreased particularly at the shorter time scales when explicit gesturing in telling the joke was performed. In short, the results demonstrate that a complex interpersonal bodily "dance" occurs during structured conversation interactions and that this "dance" is constructed from a set of rhythms associated with the nested behavioral structure of the interaction.

Knock-Knock Joke Rhythm

Teller: Knock, Knock.	1 beat
Responder: Who's there?	1 beat
Teller: Pecan.	1 beat
Responder: Pecan who?	1 beat
Teller: Pecan someone your own size!	2 beats
(Laughter & Transition)	2 beats

FIGURE 1 | Knock-knock jokes have an inherent rhythmic structure in how they are performed.

- ▲ Пиковский, Розенблюм, Куртс, Синхронизация, Техносфера, М, 2003
- ▲ Блехман И. И. Синхронизация в природе и технике, Физматлит, 1981
- ▲ Абарбанель и др., Синхронизация в нейронных ансамблях, Успехи Физических Наук, 1996, апрель.
- ▲ Анищенко В. С. и др. Синхронизация регулярных, хаотических и стохастических колебаний, РХД, 2008