

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ
НАУК СССР**

(29—30 сентября 1971 г.)

29 и 30 сентября 1971 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. С. Б. Пикельнер. Структура спиральных ветвей галактик и звездообразование.

2. С. Л. Мандельштам. Поляризация излучения и спектр рентгеновских вспышек на Солнце.

3. Д. С. Чернавский. О моделировании некоторых биологических процессов.

4. И. С. Шапиро. Легкие ядра из нуклонов и антинуклонов. Ниже публикуется краткое содержание трех прочитанных докладов.

С. Б. Пикельнер. Структура спиральных ветвей галактик и звездообразование.

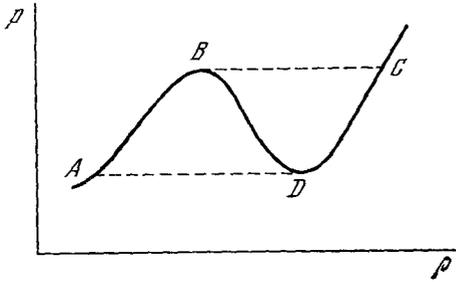
Галактики состоят в общем случае из сферической, промежуточных и плоских подсистем. Галактики первых двух типов образованы старыми звездами, которые сильно концентрируются к центру Галактики, образуя там плотное ядро. Сферическая подсистема представляет собой слабо сплюснутый сфероид, а промежуточные — диск с толщиной порядка 1 *кпс*. Плоская подсистема состоит из газа и молодых звезд; толщина ее от 100 *пс* вблизи центра до 1 *кпс* на периферии Галактики. Галактики разных типов морфологически отличаются прежде всего соотношением сферической и плоской подсистем: эллиптические галактики не имеют плоской подсистемы, спиральные имеют все подсистемы, причем у Sa сферическая подсистема мощная, а плоская слаба, у Sc — наоборот, а Sb — среднее между ними (см. ¹). Масса галактик — от 10^9 до 10^{12} масс Солнца, радиус — от 3 до 30 *кпс* (1 *кпс* = $3 \cdot 10^{21}$ см).

Плоская подсистема образует обычно спиральные ветви — чаще всего две, иногда больше. Часто наблюдаются как бы обрывки ветвей. Ветви не могут быть некоторой массой вещества, сохраняющей свою индивидуальность в течение большей части жизни галактики, так как они должны быть растянуты дифференциальным вращением — угловая скорость вращения галактик убывает с расстоянием, хотя в центральной части она может быть постоянной. Поэтому сейчас принята волновая теория спиральных ветвей, высказанная впервые Линдбладом и потом развитая в другой форме Линден-Беллом, Гумре, Свитом, Лином, Шу, Прецдергастом, Марочником, Фридманом и др. (см. ²). Согласно этой теории ветви представляют собой волны, которые движутся с некоторой угловой скоростью Ω_0 по диску. Звезды и газ диска движутся с угловой скоростью $\Omega(r) > \Omega_0$, догоняют волну, отклоняются от своей орбиты под действием гравитационного поля рукава. Плотность их во время прохождения волны увеличивается, так что волна является самосогласованной.

Происхождение волн связывается с неустойчивостью звездно-газового диска. Сначала рассматривали гравитационную неустойчивость типа Джинса, потом пучковую неустойчивость, связанную с тем, что диск вращается быстрее, чем сферическая подсистема ³, причем во второй работе рассматривается более сильная неустойчивость гидродинамического типа, которая может дать волны значительно короче джинсовских. При этом объясняется, почему большинство галактик имеет две ветви и иногда кольцо и почему форма спиралей — закрученная, как если бы они отставали от вращения

внутренних частей⁴. Генерация волны связана в первую очередь с возмущениями газа, а не звезд, так как скорость звука в нем, включающая турбулентные скорости и давления магнитного поля и космических лучей, ниже, чем дисперсия скоростей звезд, и он является «столкновительным». Плотность звезд в диске больше плотности газа (кроме внешних частей), однако газ сильнее концентрируется в рукава, так что абсолютные вариации плотности звезд и газа там примерно одинаковы.

В тех случаях, когда газ проходит через волну со сверхзвуковой скоростью, образуется ударная волна. Численные расчеты для нашей Галактики⁵ дали пиковую концентрацию за фронтом $n_{\max} \approx 5 (n)$ при $r \approx 11 \text{ кпс}$ и около $9 (n)$ у $r = 3-4 \text{ кпс}$. Скорость «звука» здесь предполагалась постоянной. С удалением от центра $\Omega (r)$ приближается к Ω_0 , скорость газа уменьшается и волна уже не является ударной, а далее вообще нет рукавов. Ударные волны действительно наблюдаются в галактиках, особенно типа Sc, в виде тонких темных полос на внутренней стороне рукавов. Они образованы пылью, сжатой вместе с газом и поглощающей свет звезд. Плотность газа, пропорциональная плотности пыли, оцененной по величине поглощения, равна в галактиках Sc $10-30 \text{ см}^{-3}$. Оценка показывает⁶, что такое сильное сжатие возможно только



при условии, что поле в этих галактиках не превосходит 10^{-6} гс , т. е. в 3-4 раза меньше, чем в нашей Галактике. Дисперсия скоростей облаков тоже должна быть в несколько раз меньше, чем в Галактике. Учет поля в Галактике тоже должен несколько уменьшить сжатие в волне⁷, но это влияние не так сильно, потому что сама величина сжатия не так велика, как в галактиках Sc.

Зависимость давления p межзвездного газа от плотности ρ схематически изображена на рисунке⁸. При данном давлении существуют две устойчивые фазы, соответствующие плотным холодным

облакам и горячему разреженному газу между облаками. Если сжатие газа в волне очень велико, как в Sc, то весь газ переходит в плотную фазу. Расширение газа за фронтом, вызванное силой Кориолиса, приводит к обратному переходу части газа. Однако если первый переход происходил по линии BC, то обратный переход — по линии DA, т. е. при гораздо более низкой плотности. Следовательно, большая часть массы газа должна остаться между рукавами в состоянии облаков, но более разреженных, чем в рукавах⁶. Газ между облаками тоже соответственно разрежен. Таким образом, к фронту подходит газ с существенными флуктуациями плотности. Разреженный газ образует фронт, преломляется и движется почти вдоль рукава, а облака движутся, практически не замедляясь, по траектории, близкой к звездной. Текущий вдоль рукава разреженный газ сталкивается с облаком и образует уже внутри рукава новую ударную волну, в которой газ переходит в плотную фазу. Эти волны объясняют, по-видимому, появление тонких темных полос («перьев»), отходящих от основных темных полос под углом к ним. Различие скоростей газа с разной плотностью за фронтом создает дисперсию скоростей, «турбулентность», которая может быть одной из причин хаотических движений газа в рукавах.

Сжатие газа в ударной волне должно в общем ускорять процесс гравитационной конденсации и способствовать образованию звезд. Наблюдения действительно показывают, что молодые горячие звезды и ионизируемые ими туманности концентрируются, как правило, в рукаве за темной полосой. Однако эти горячие звезды образуются не по всей длине темной полосы, а только в ее средней части. В центральной области и на периферии галактик полоса видна, но горячих звезд нет⁹, наличие плотного газа там не ведет к звездообразованию.

Отсутствие звездообразования в темной полосе, находящейся во внутренней части галактики, может быть связано с тем, что там плотность звезд сферической подсистемы значительно выше, чем плотность газа. Конденсация газа на фоне более плотной и «горячей» звездной компоненты мало эффективна. Действительно, длина волны джинсовской неустойчивости λ_J определяется плотностью газа, а толщина слоя — общей плотностью, так что она меньше λ_J и неустойчивость не возникает. Вторая причина — в центральной области газ имеет большой вращательный момент, препятствующий конденсации. Момент уносится полем, но здесь, как легко оценить, это требует времени, которое больше времени пересечения полосы. Существует другой механизм конденсации, который может действовать и на фоне большой звездной плотности за счет неустойчивости типа Рэля — Тэйлора. Эта неустойчивость возникает, если давление поля и космических лучей увеличивает толщину газового диска. Тогда газ скользит вдоль силовых линий во впадины, накапливаясь там, а поле между впадинами, освобождаясь от веса газа, поднимается¹⁰. Этот механизм не действует во внутренней части галактик, очевидно, из-за большого момента. Во внешней части полосы, где тоже нет

звездообразования, звезд мало и момент меньше. Там звездообразование останавливается, по-видимому, из-за того, что толщина слоя, близкая к λ_J , велика, а ширина полосы меньше, так что гравитационная неустойчивость не возникает. Кроме того, слабое поле там медленно переносит момент.

Накопление газа во впадинах магнитного поля приводит к тому, что образуется слой, экранирующий мягкие рентгеновские лучи, нагревающие газ. Одновременно пыль экранирует ультрафиолетовое излучение, ионизирующее углерод. Нейтральные атомы С хорошо излучают при низких температурах, поэтому газ охлаждается до 6—8°К. Это приводит к фрагментации слоя и образованию звездной ассоциации¹¹.

Около половины спиральных галактик имеет в центральной части прямолинейное образование — бар. Иногда он служит диаметром кольца. От концов бара или от кольца отходят спиральные ветви. Согласно современным представлениям (см. ¹²) бар образован звездами сферической подсистемы. Это — самосогласованная система, в которой звезды совершают, кроме кругового движения, также движения вдоль бара в направлении, обратном вращению. Бар образуется, по-видимому, в случае, когда сферическая подсистема имеет сравнительно большой угловой момент^{4,12}. Бароподобные структуры появляются в численных расчетах¹³. Газ движется вдоль бара к концам со скоростью до 100 км/сек. Природа спиральных ветвей этих галактик не выяснена — это может быть волна, либо материальный рукав, образованный газом, вытекающим из бара. Решению этого вопроса может помочь рассмотрение темных полос. Эти полосы часто наблюдаются на внутренней стороне ветвей; следовательно, газ догоняет рукав, т. е. последний является, очевидно, волной. Темные полосы видны и в самом баре, причем они находятся там в передней по вращению части. Это можно объяснить тем, что скорость кругового вращения газа направлена перпендикулярно бару, так что скачок скорости в ударной волне велик. При этом газ как бы выметается из бара, ударная волна образуется на выходе из бара, ее положение определяется равновесием кинетического давления потока и притяжением газа звездами бара.

В мощных аморфных барах галактик типа SBa, SBb нет звездных ассоциаций, хотя темные полосы имеются. Очевидно, это также объясняется большой плотностью звезд и большим по сравнению с Sa и Sb моментом при твердотельном вращении бара. В галактиках SBc плотность бара меньше, и меньше скорость вращения. Там наблюдаются звездные ассоциации. Если бар заключен в кольцо, то темных полос в нем нет. Это значит, что нет заметного относительного движения газа в диске и баре, т. е. что газ, так же как и бар, вращается твердотельно. Проблема баров пока еще далека от решения.

Большая часть рукавов в спиральных галактиках представляют собой волны плотности. Однако некоторые более мелкие детали могут быть постоянными (не волновыми) сгущениями газа, растягиваемыми дифференциальным вращением. Таким сгущением считается Орионов выступ. Это можно подтвердить специфической структурой его магнитного поля типа винта, тогда как силовые линии Галактики имеют приблизительно тангенциальное направление. Винтовая структура не могла бы сохраниться, если бы этот выступ был волной плотности.

Результаты автора, упоминаемые в докладе, частично опубликованы в работах^{6,8,11} остальные готовятся к публикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ж. В о к у л е р, — Строение звездных систем, под редакцией А. Блау и М. Шмидта, М., ИЛ, 1962, стр. 351, 376.
2. The Spiral Structure of our Galaxy, ed. by W. Becker and G. Contopoulos, Amsterdam, D. Reidel, 1970, pp. 303, 371, 415.
3. Л. С. М а р о ч н и к, А. А. С у ч к о в, Астрон. ж. 46, 319, 524 (1969); Г. С. Б и с н о в а т ы й - К о г а н и др., ПМТФ, № 3, 3 (1969).
4. В. Л. П о л я ч е н к о и др., Астрон. ж. 48, 1174 (1971).
5. W. W. R o b e r t s, Astrophys. J. 158, 123 (1969).
6. С. Б. П и к е л ь н е р, Астрон. ж. 47, 752 (1970).
7. W. W. R o b e r t s, С. Y u a n, Astrophys. J. 161, 877 (1970).
8. С. Б. П и к е л ь н е р, Астрон. ж. 44, 915 (1967).
9. В. Т. L y n d s, Distribution of Dust and HII Region in Spiral Galaxies. Univ. of Arizona Preprint, 1970.
10. S. B. P i c k e l n e r, I. S. S h k l o v k s y, Ann. d'Astrophys. 22, 913 (1959); E. N. P a r k e r, Astrophys. J. 145, 811 (1966).
11. С. Б. П и к е л ь н е р, Астрон. ж. 47, 254 (1970).
12. К. С. F r e e m a n, —², p. 351.
13. W. J. Q u i r k, Astrophys. J. 167, 7 (1971).

С. Л. Мандельштам. Поляризация излучения и спектр рентгеновских вспышек на Солнце.

Одним из замечательных проявлений солнечной активности являются так называемые «вспышки» на Солнце — внезапное сильное уярчение некоторого участка солнечной поверхности в активных областях, связанных с магнитными пятнами, особенно заметное в свете спектральной линии H_{α} . С развитием радиоастрономии было установлено, что оптические вспышки, как правило, сопровождаются всплесками радиоизлучения в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах. Вынос аппаратуры за пределы земной атмосферы с помощью спутников и ракет позволил обнаружить вспышки

рентгеновского излучения, а также выбросы ускоренных электронов, протонов, тяжелых ядер и сгустков плазмы. Вспышки на Солнце вызывают ряд эффектов на Земле и в околоземном пространстве — нарушения радиосвязи, магнитные бури и т. д., а также являются источником радиационной опасности для космонавтов. Исследование вспышек на Солнце имеет важное значение для понимания физических процессов на Солнце и для всего комплекса проблем солнечно-земных связей.

Существенное значение для понимания механизма солнечных вспышек имеет детальное исследование рентгеновского излучения вспышек. Рентгеновское излучение возникает в результате взаимодействия в области вспышек быстрых электронов с ионами, в виде тормозного и рекомбинационного непрерывного и линейчатого излучения ионов. Исследование рентгеновского излучения вспышек позволяет определить физические параметры плазмы — ее электронную и ионную температуру и плотность частиц, а также локализацию, размеры и структуру областей рентгеновских вспышек.

В докладе приводятся результаты исследований рентгеновских вспышек, выполненных в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР группой в составе И. Л. Бейгмана, Л. А. Вайнштейна, Б. Н. Васильева, И. А. Житника, В. Д. Иванова, В. В. Крутова,

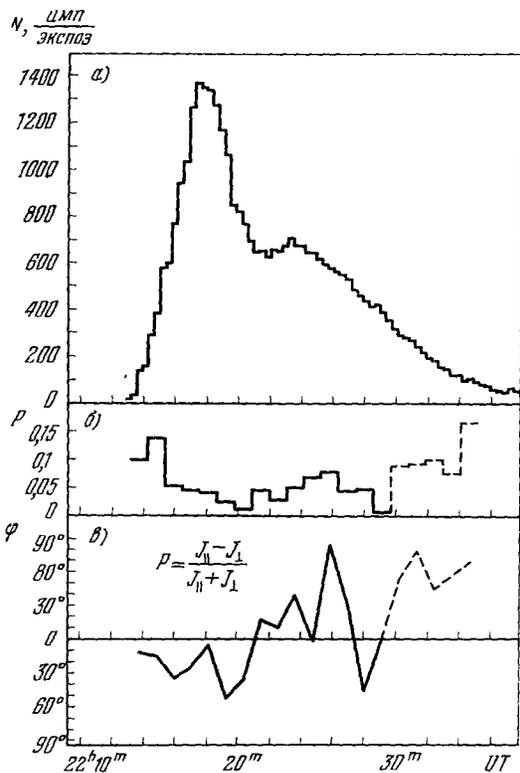


Рис. 1.

С. Л. Мандельштама, И. П. Тиндо и А. И. Шурыгина на спутниках «Интеркосмос-1» (запущен 14 октября 1969 г.) и «Интеркосмос-4» (запущен 14 октября 1970 г.).

Особый интерес в рентгеновском излучении вспышек представляет импульсивная компонента с энергией фотонов $h\nu \approx 10-20 \text{ кэВ}$, временем нарастания в несколько секунд и длительностью в несколько десятков секунд. Можно полагать, что во время импульсивной фазы рентгеновских вспышек происходит ускорение частиц и выброс плазмы, поэтому представляется весьма существенным выяснить, каков механизм возникновения жесткого рентгеновского излучения: возникает ли оно благодаря нагреву плазмы до высокой температуры, либо обязано направленным потокам ускоренных электронов, возникающих или вторгающихся в область вспышки.

Непосредственным способом выяснения этого вопроса является измерение поляризации этого излучения: если рентгеновское излучение вызвано направленным пучком электронов, то оно частично поляризовано, в противном случае нет (количественные расчеты поляризации выполнены А. А. Корчаком).

Выполненные измерения показали наличие четко выраженной поляризации рентгеновского излучения в начальной фазе вспышек, а также во время второго максимума излучения. На рис. 1 приведены в качестве примера результаты измерений для рентгеновской вспышки кл. 2 16. XI. 70 г.: потока излучения в области 15–20 кэВ (а), поляризации излучения (б) и величины угла поляризации (в). В затухающей фазе вспышек происходит термализация ускоренных направленных электронов и поляризация исчезает.

Информация о параметрах плазмы в области рентгеновских вспышек получена на основании изучения линейчатого спектра вспышек в области 1—15 Å. На рис. 2 изображен участок спектра рентгеновской вспышки кл. 3 16. XI. 70 г. вблизи 1,8 Å — видны линии гелиоподобных и литиеподобных ионов железа. Спектры Fe XXIII — Fe XXV в лабораторных условиях надежно еще не получены; идентификация линий

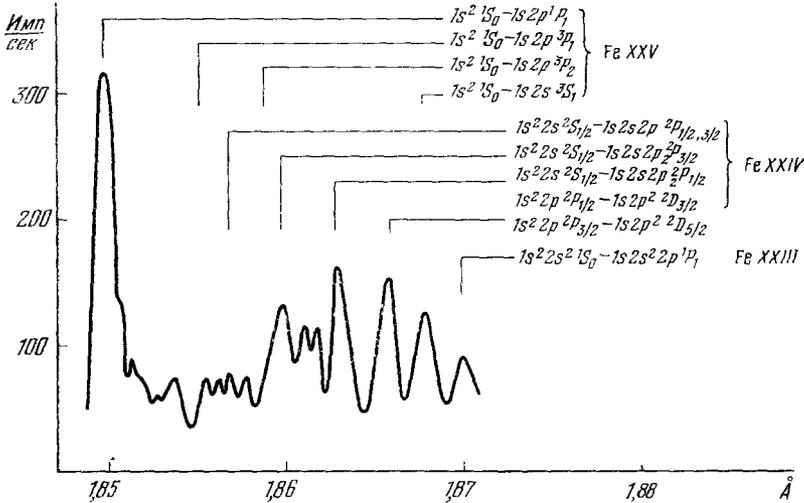


Рис. 2.

произведена путем сравнения с результатами теоретических расчетов длин волн линий (расчеты выполнены У. И. Сафроновой).

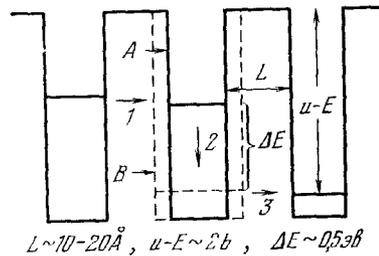
По относительной интенсивности линий Fe XXV $\lambda = 1,850 \text{ \AA}$ и Fe XXIV $\lambda = 1,886 \text{ \AA}$ определена электронная температура области вспышки $T_e \approx 20 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{K}$, а по доплеровскому уширению линий Mg XII $\lambda = 8,418 \text{ \AA}$ и Fe XXV $\lambda = 1,850 \text{ \AA}$ — температура ионов $T_i \approx 16 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{K}$.

Области рентгеновских вспышек имеют вытянутую волокнистую структуру с яркими узлами, быстро меняющуюся со временем: длина волокон $\approx 100''$, диаметр $< 10-20''$, плотность электронов $\approx 10^{10} - 10^{11} \text{ эл/см}^3$. Высота и структура областей рентгеновских вспышек оказались весьма близкими к высоте и структуре оптических вспышек, что свидетельствует о тесной связи рентгеновских и оптических вспышек.

Д. С. Чернавский. О моделировании некоторых биологических процессов.

Речь идет о применении методов теоретической физики к решению некоторых биологических проблем. В настоящее время имеет несколько аспектов этого направления. Мы рассмотрим два из них: 1) Физические аспекты биохимических процессов. 2) Математическое моделирование (точнее, математические модели кинетики биологических процессов). Приведем несколько примеров.

Первый пример относится к электронному транспорту, являющемуся основной энергоснабжения клетки, т. е. образования АТФ. Заключается он в следующем. В некоторой молекуле электрон возбуждается (в растениях это молекула — хлорофилл, а возбуждение осуществляется за счет светового кванта). Затем электрон переходит на другие молекулы — переносчики; уровень его снижается. В некоторой молекуле снижение уровня сопровождается переходом энергии в другие формы (в конечном счете в химическую форму — образование АТФ). Переносчики представляют собой макромолекулы; размеры их порядка десятков Å; они расположены в мембране и плотно пригнаны друг к другу. На рисунке приведена схема, иллюстрирующая процесс.



Физический аспект вопроса — как происходит перенос электрона, путем ли вадбарьерного перескока, или туннельного эффекта. По многим соображениям туннели-

рование предпочтительнее, но против него были высказаны два возражения: 1) полагали, что скорость туннелирования не должна зависеть от температуры (экспериментально обнаружена зависимость с энергией активации порядка $0,14 \text{ эв}^{-1}$); 2) для туннелирования необходимо очень точное (практически нереализуемое) совпадение уровней.

В работе ² было показано, что при учете связи электрона с небольшим числом нормальных колебаний оба возражения снимаются: разность уровней может достигать $0,1 \text{ эв}$ (характерная величина энергии нормальных колебаний); скорость процесса зависит от наличия нормальных колебаний и, следовательно, от температуры (при этом энергия активации того же порядка, $0,1 \text{ эв}$).

Физическая модель главного акта — трансформации энергии — рассматривалась в работах ³. Молекула переносчика трансформатора может находиться в двух формах: A — равновесной в отсутствии и B — равновесной в присутствии электрона; уровень электрона в A выше, чем в B .

Процесс трансформации энергии состоит из следующих стадий (см. рисунок): 1) Электрон с предыдущего переносчика туннелирует на молекулу-трансформатор: $A + e \rightarrow Ae$. 2) Состояние Ae релаксирует к равновесному: $Ae \rightarrow B$; изменение формы молекулы сопровождается понижением уровня. 3) Электрон туннелирует в следующий переносчик, уровень которого близок к уровню B . Состояние B содержит избыток энергии, поскольку ее форма (и расположение активных групп) неравновесна; эта форма энергии может перейти в химическую, что и происходит при 4) релаксации $B \rightarrow e \rightarrow A$. Таким образом энергия переходит из формы электронного возбуждения в энергию деформации и затем в энергию химической связи.

Участие энергии деформации, по-видимому, характерно для широкого класса ферментативных реакций (а не только для электронного транспорта). Образно выражаясь, фермент работает как механическая машина. Эти соображения и связанные с ними оценки приведены в работе ⁴. Многие вопросы этого направления (как-то: связь энергии деформации макромолекулы с ее поляризацией и т. п.) еще ждут своего разрешения.

Для решения этих биологических задач, по существу, используется квантовая теория твердого тела. Специфика их в том, что размеры объектов (макромолекул) промежуточные: недостаточно велики, чтобы считать тело неограниченным, и слишком велики, чтобы ограничиться квантовохимическими расчетами (подробно о свойствах см. ⁵). В связи с этим много зависит от удачного выбора адекватной модели.

Второе направление — математическое моделирование — связано с составлением и исследованием систем кинетических уравнений ⁶. Его цель — описание регуляторных свойств живых систем и выявление неожиданных на первый взгляд эффектов. Модели триггерного типа используются для исследования развития сложных организмов (дифференциации тканей и образования органов). В высшем организме клетки разных органов выполняют различные функции и существенно отличаются друг от друга. Вместе с тем все они имеют тождественную генетическую информацию и происходят из одной оплодотворенной яйцеклетки. Процесс развития протекает весьма слаженно: каждый орган образуется в нужный момент в нужном месте.

Возникает вопрос: может ли этот процесс протекать «сам собою», за счет регуляторных свойств белков, или же необходим специальный, корректирующий развитие орган? Исследование ряда триггерных моделей показало, что самопроизвольное развитие без специального корректирующего органа вполне возможно и даже предпочтительно. (В работах ⁷ вопрос обсуждался на базе абстрактных моделей, а в работе ⁸ на основе схемы Жакоба и Моно.)

Модели автоколебательных процессов описывают периодические изменения, довольно распространенные в биологических системах (о колебаниях в гликолизе см. ⁹, в фотосинтезе — работу ¹⁰; жизненный цикл клетки тоже условно может рассматриваться как автоколебательный процесс). Автоколебательные модели имеют практическое применение, поскольку позволяют определять оптимальную фазу внешнего воздействия.

В случае, когда имеется набор «осцилляторов», имеющих разные фазы, необходимо предварительно синхронизовать систему. Удачный пример применения этого метода при лечении рака крови описан в работе ¹¹.

Процесс синхронизации микроосцилляторов требует дальнейшего изучения как экспериментального, так и теоретического (некоторые теоретические вопросы возрастной синхронизации изложены в работах ¹²).

ЛИТЕРАТУРА

1. D. de Vault, V. Chance, *Biophys. J.* **6**, 825 (1966).
2. Л. Н. Григоров, Д. С. Чернавский, *Биофизика* **17**, 195 (1972).
Л. Н. Григоров, Канд. диссертация (Москва, 1970).
3. Л. А. Блюменфельд, А. И. Кольтовер, *Мол. биол.* **6**, 161 (1972);
N. M. Chernavskaya et al., *On the Possible Role of a Tunneled Effect in the Electronic Transport*. P. N. Lebedev Phys. Institute Preprint No. 168, 1970.

4. Д. С. Чернавский и др., Мол. биол. 1, 419 (1967).
5. М. В. Волькенштейн, Физика ферментов, М., «Наука», 1967.
6. Труды симпозиума «Колебательные процессы в биологических и химических системах», М., «Наука», 1967; Ю. М. Романовский, Н. В. Степанова, Д. С. Чернавский, Что такое математическая биофизика, М., «Просвещение», 1971.
7. N. R a s h e v s k y, Bull. Math. Biophys. 3, 93 (1941); A. M. T ü h r i n g, Phil. Trans. Roy. Soc. B237, 37 (1952).
8. Л. Н. Григоров и др., Мол. биол. 1, 410 (1967).
9. Е. Е. Сельков, *ibid.* 2, 252 (1968).
10. Н. М. Чернавская, Д. С. Чернавский, УФН 72, 627 (1960).
11. В. С. L a m b k i n et al., Nature 222, 1275 (1969).
12. И. Г. Минкевич, Д. С. Чернавский, Биофизика 14, 564 (1969); Циклическая возрастная синхронизация проточных культур микроорганизмов. Депонент № 3111-71 от 22.7.1971.