ном его оси, поляризация вообще не будет обнаружена. Аналогичная картина имеет место при возбуждении атома светом с круговой поляризацией. Магн. поле снимает частично или полностью оптич. ориентацию атомов.

С точки зрения квантовой теории, Х. э. возникает как следствие снятия в магн. поле энергетич. *вырождения* атомных состояний с определ. значением проекции момента и является частным случаем многочисл. явлений *интерференции состояний*. Х. э. используют в спектроскопии как метод измерения характеристики τg атомных уровней, где τ — время жизни уровня, а g — гиромагн. отношение, Х. э. лежит в основе измерения сверхслабых магнитных полей.

Лит.: Новиков Л. Н., Скроцкий Г. В., Соломахо Г. И., Эффект Ханле, «УФН», 1974, т. 113, в. 4, с. 597; Чайка М. П., Интерференция вырожденных атомных состояний, Л., 1975; Александров Е. Б., Хвостенко Г. И., Чайка М. П., Интерференция атомных состояний, М., 1991. *Е. Б. Александров.*

ХА́ОС — сложное, нерегулярное (апериодическое) изменение состояния физ. системы в пространстве и/или во времени.

Происхождение хаотического поведения может быть обусловлено разл. причинами.

Х. может представлять собой нек-рое многопериодическое движение:

$$X=F(\tau_1, \tau_2, ..., \tau_n), \ \tau_i=\omega_i t,$$

где F — 2π-периодическая ф-ция по каждому аргументу. Тогда если среди частот ω_i есть несоизмеримые, то реализация представляет сложное изменение со временем вектора состояния X. С возникновением многопериодических движений связан сценарий появления *турбулентности* по Ландау — Хопфу. В фазовом пространстве n-периодическое движение описывается траекторией, наматывающейся на n-мерный тор. В частном случае n-торы образуются в результате сложения (суперпозиции) конечного числа гармонических колебаний. Напр., автономная система двух связанных осцилляторов, описываемая ур-ниями

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1+\omega^2 x_1&=k^2 x_2, \\ \ddot{x}_2+\omega^2 x_2&=k^2 x_1, \end{aligned} \qquad (1)$$

совершает двухпериодическое движение:

$$\begin{aligned} x_i&=f_i(\omega_1 t, \omega_2 t)\equiv \\ &\equiv A_i\cos(\omega_1 t+\alpha_1)+B_i\cos(\omega_2 t+\alpha_2), \ i=1, 2, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $A_1=A_2$, $B_1=-B_2$, $\omega_1^2=\omega^2-k^2$, $\omega_2^2=\omega^2+k^2$, α_1, α_2 — нач. фазы. Если частоты ω_1 и ω_2 действительные и несоизмеримые, то соответствующее движение в общем случае апериодическое.

Сложная динамика может возникать также за счёт того, что под действием внеш. факторов параметры системы меняются со временем. Примером является неавтономная система, описываемая уравнением Матьё:

$$\ddot{x}+[\omega^2+2h^2\cos\gamma t]\,x=0. \qquad (3)$$

В областях стабильности (за исключением дискретного множества точек) величина x ограничена и меняется апериодически. В соответствии с теоремой Флоке — Ляпунова (иногда называемой *Блоха теоремой*) эта величина является двухпериодической ф-цией.

Х. возникает, если в системе протекают случайные процессы. Такие процессы могут быть связаны со случайными внеш. воздействиями, а также с флуктуациями внутр. параметров. Примером случайного, хаотического процесса является броуновское движение. Динамика случайных процессов описывается ур-ниями для физ. характеристик — координат, скоростей и др., включающими случайные параметры (ур-ниями Ланжевена), а также ур-ниями для вероятностных характеристик системы. Напр., если процесс марковский, то при определ. допущениях эволюция ф-ции распределения f случайной величины u определяется из ур-ния Фоккера — Планка — Колмогорова:

$$\frac{\partial f}{\partial t}=-\frac{\partial(Bf)}{\partial u}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2(Df)}{\partial u^2}, \qquad (4)$$

в к-ром B и D — интегральные моменты вероятности перехода системы между разл. допустимыми состояниями.

Случайный процесс характеризуется такими параметрами, как среднее, дисперсия, корреляц. ф-ция, спектральная ф-ция. Важным признаком случайности процесса является убывание корреляций по мере увеличения интервала времени между сопоставляемыми наблюдениями:

$$K(\tau)=\langle u(t+\tau), u(t)\rangle\to 0 \text{ при } \tau\to\infty. \qquad (5)$$

Этому условию не удовлетворяют, вообще говоря, многопериодические движения, подобные тем, к-рые описываются ур-ниями (1), (3). Кроме того, спектральный анализ таких движений выявляет наличие лишь конечного числа несоизмеримых частот и/или счётного (или конечного) числа кратных частот. Поэтому многопериодические движения и колебания линейных неавтономных систем (если, конечно, внеш. «силы» не меняются стохастически) не обладают необходимыми свойствами истинно стохастических колебаний и по отношению к ним термины «хаотический» и «стохастический» употребляются редко.

Сложное поведение, обладающее основными свойствами случайного процесса, обнаруживается у мн. нелинейных динамических систем (т. н. *хаос динамический*). Качественно происхождение Х. в таких системах связывают с тем, что нелинейные системы можно рассматривать как совокупность неск. взаимодействующих подсистем, обладающих разл. динамическими свойствами. Хаотическая динамика возникает в результате разл. рода процессов синхронизации колебаний указанных подсистем.

Наконец, в квантовых системах, описываемых линейным ур-нием Шрёдингера, стохастические колебания, вообще говоря, невозможны. Однако если характерные времена переходных процессов велики, может наблюдаться явление квантового Х. Возможность подобного режима легко понять из того, что в классическом пределе система будет описываться нелинейными ур-ниями движения, для к-рых такая динамика известна (см. выше).

Лит.: Заславский Г. М., Стохастичность динамических систем, М., 1984; Рабинович М. И., Трубецков Д. И., Введение в теорию колебаний и волн, 2 изд., М., 1992; Гардинер К. В., Стохастические методы в естественных науках, пер. с англ., М., 1986; Неймарк Ю. И., Ланда П. С., Стохастические и хаотические колебания, М., 1987. *Н. А. Кириченко.*

ХА́ОС ДИНАМИ́ЧЕСКИЙ (хаос детерминированный) — нерегулярное, апериодическое изменение состояния (движение) динамич. системы, обладающее осн. свойствами случайного процесса.

Исследования свойств нелинейных динамич. систем показали, что для мн. таких систем характерно не только упорядоченное, регулярное движение, но и случайное изменение состояния. Парадоксальность вывода следует из того, что это движение возникает в отсутствие случайных факторов и полностью определяется нач. условиями. Иллюстрацией может служить матем. маятник с периодически колеблющейся точкой подвеса. Возмущение маятника не случайно, однако его движение может быть как условно-периодическим, так и случайным в зависимости от выбираемых нач. условий.

Явление Х. д. присуще большинству нелинейных систем, как автономных, так и неавтономных. Однако оно может оказаться трудно наблюдаемым, если хаос является слабым или медленным (т. е. наблюдается на очень больших временах) либо если он существует в узком диапазоне значений параметров.

Существование хаоса в динамич. системах связано со специфич. неустойчивостью, называемой локальной неустойчивостью и определяемой след. образом. Пусть $z(t)$ — точка в фазовом пространстве, определяющая состояние системы в момент времени t. Совокупность всех точек $z(t)$ в разл. моменты t образует *фазовую траекторию* системы, выходящую из точки $z_0=z(0)$.