

$$\hat{S}(t, t') = \exp\left(\sum_{n=1}^{\infty} \hat{A}_n\right), \quad (2)$$

где

$$\hat{A}_1 = -\frac{i}{\hbar} \int_{t'}^t dt \hat{W}(t),$$

$$\hat{A}_2 = -\frac{1}{2} \left(-\frac{i}{\hbar}\right)^2 \int_{t'}^t dt_1 \int_{t'}^{t_1} dt_2 [\hat{W}(t_1), \hat{W}(t_2)],$$

$$\hat{A}_3 = -\frac{1}{6} \left(-\frac{i}{\hbar}\right)^3 \int_{t'}^t dt_1 \int_{t'}^{t_1} dt_2 \int_{t'}^{t_2} dt_3 \left\{ [\hat{W}(t_1), [\hat{W}(t_2), \hat{W}(t_3)]] + \right.$$

$$\left. + [[\hat{W}(t_1), \hat{W}(t_2)], \hat{W}(t_3)] \right\}; \dots$$

Операторы \hat{A}_n представляют собой n -кратные интегралы от $(n-1)$ -кратных коммутаторов операторов $\hat{W}(t)$, взятых в разные моменты времени. В некоторых случаях ряд в экспоненте (2) обрывается и оператор временной эволюции записывается в конечном виде. Так происходит, напр., в задаче об эволюции гармонич. осциллятора, на к-рый действует произвольная внеш. сила [4], и в задаче об эволюции в поле, линейном по координатам \hat{r} и импульсам \hat{p} произвольной квантовой системы с гамильтонианом, квадратичным по \hat{r} и \hat{p} [5]. М. р. используется при построении теории внезапных возмущений в процессах «встряски» типа рассеяния (см. *Внезапных возмущений метод*). В нулевом порядке по параметру «мгновенности» $\omega \tau \ll 1$ (τ — характерное время взаимодействия, $\hbar\omega$ — типичные собств. значения невозмущённого гамильтониана) оператор временной эволюции отличается от (2) заменой в \hat{A}_n (ф-лы (3)) $\hat{W}(t)$ на

$$\hat{W}_0(t) = \exp\left(\frac{i}{\hbar} \hat{H}_0 t_0\right) \hat{W}(t) \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \hat{H}_0 t_0\right),$$

где t_0 — момент «встряски».

М. р. удобно для построения разл. рода унитарных теорий возмущений, т. к. ввиду эрмитовости операторов \hat{A}_n любой способ обрывания бесконечного ряда в экспоненте (2) не нарушает унитарности оператора эволюции $\hat{S}(t, t')$.

Матем. структура операторов $\hat{W}(t)$ или $\hat{W}_0(t)$ допускает иногда суммирование бесконечного числа членов М. р. Как правило, это происходит в тех случаях, когда $\hat{W}(t)$ [а чаще $\hat{W}_0(t)$] представляет собой линейную комбинацию генераторов L_j конечной Ли алгебры с коэффициентами $a_j(t)$ — линейно-независимыми ф-циями времени:

$$\hat{W}(t) = \sum_{j=1}^m a_j(t) \hat{L}_j,$$

$m \leq n$, n — размерность алгебры Ли. Наиб. естественное и простое в матем. отношении решение дифференц. ур-ния для оператора эволюции, альтернативное М. р., записывается в конечной форме в виде произведения нескольких (в зависимости от числа генераторов группы) экспоненц. операторов

$$\hat{S}(t, t') = \prod_{j=1}^n \exp\{g_j(t) \hat{L}_j\}.$$

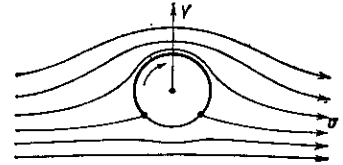
Такой подход, эквивалентный суммированию членов М. р., наз. процедурой временного упорядочивания Вэя — Нормана [6]. Незвестные ф-ции времени $g_j(t)$ удовлетворяют системе дифференц. ур-ний вида

$$\frac{dg_j(t)}{dt} = \sum_{k=1}^n \eta_{jk} a_k(t)$$

с граничными условиями $g_j(t') = 0$; η_{jk} — нелинейные функции от $g_j(t)$. Решения этой системы исследуются как для конкретных физич. задач теории излучения и квантовой оптики, так и для моделей, включающих алгебры Ли $SU(1,1)$, $SU(2)$, $SU(3)$ и др.

Лит.: 1) Magnus W., On the exponential solution of differential equations for a linear operator, «Comm. Pure and Appl. Math.», 1954, v. 7, p. 649; 2) Wilcox R. M., Exponential operators and parameter differentiation in quantum physics, «J. Math. Phys.», 1967, v. 8, № 4, p. 962; 3) Pechukas P. H., Light J. C., On the exponential form of time-displacement operators in quantum mechanics, «J. Chem. Phys.», 1966, v. 44, № 10, p. 3897; 4) Дыхне А. М., Юдин Г. Л., «Встряскивание» квантовой системы и характер стимулированных им переходов, «УФН», 1978, т. 125, в. 3, с. 377; 5) Юдин Г. Л., Кулюновская ионизация атома быстрым многозарядным ионом, «ЖЭТФ», 1981, т. 80, в. 3, с. 1026; 6) Wei J., Norman E., Lie algebraic solution of linear differential equations, «J. Math. Phys.», 1963, v. 4, № 4, p. 575. Г. Л. Юдин.

МАГНУСА ЭФФЕКТ — возникновение поперечной силы, действующей на тело, вращающееся в набегающем на него потоке жидкости (газа); открыт Г. Г. Магнусом (H. G. Magnus) в 1852. Напр., если вращающийся бесконечно длинный круговой цилиндр обтекает безвихревой поток, направленный перпендикулярно его образующим, то вследствие вязкости жидкости скорость течения со стороны, где направления скорости v потока и вращения цилиндра совпадают (рис.), увеличивается, а со стороны, где они противоположны, уменьшается. В результате давление на одной стороне возрастает, а на другой уменьшается, т. е. появляется поперечная сила Y ; её величина определяется *Жуковского теоремой*. Аналогичная сила возникает и при набегающем потоке на вращающийся шар, чем объясняется непрямолинейный полёт закрученного теннисного или футбольного мяча.



Направлена поперечная сила всегда с той стороны вращающегося тела, на к-рой направление вращения и направление потока противоположны, к той стороне, на к-рой эти направления совпадают.

Лит.: Прандтль Л., Гидроаэромеханика, пер. с нем., 2 изд., М., 1951; Хайкин С. Э., Физические основы механики, 2 изд., М., 1971.

МАДЖИ — РИГИ — ЛЕДЮКА ЭФФЕКТ — изменение теплопроводности проводника (металла, полупроводника, полуметалла) под действием магн. поля. Открыт Дж. А. Маджи (G. A. Maggi), А. Риги (A. Righi) и независимо от них С. А. Ледюком (S. A. Leduc) в 1887 на Вi. Относится к продольным *термомангнитным явлениям*. М. — Р. — Л. э. обусловлен искривлением траекторий носителей тока в магн. поле под действием *Лоренца силы*, что соответствует уменьшению эфф. длины свободного пробега носителей заряда и приводит к изменению электронной части теплопроводности. В полупроводниках величина М. — Р. — Л. э. значительно больше, чем в металлах. Измерение М. — Р. — Л. э. позволяет отделить электронную часть теплопроводности проводника от решёточной.

Лит.: Цидильковский И. М., Термомангнитные явления в полупроводниках, М., 1960; Аскеров Б. М., Кинетические эффекты в полупроводниках, Л., 1970; его же, Электронные явления переноса в полупроводниках, М., 1985.

Э. М. Эпштейн.

МАЗЕР [Maser — аббревиатура от англ. слов: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation — усиление микроволн (СВЧ) при помощи индуцированного излучения] — квантовые генераторы и усилители радиодиапазона. См. *Квантовая электроника, Квантовый усилитель*.

МАЗЕР НА ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ (МЦР) — СВЧ-генератор (усилитель), в к-ром используется вынужденное излучение пучка электронов, движущихся по винтовым траекториям в однородном магн. поле (или по трохонидальным траекториям в скрещен-