



Институт Физики
Микроструктур РАН



Центр криогенной наноэлектроники
Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева

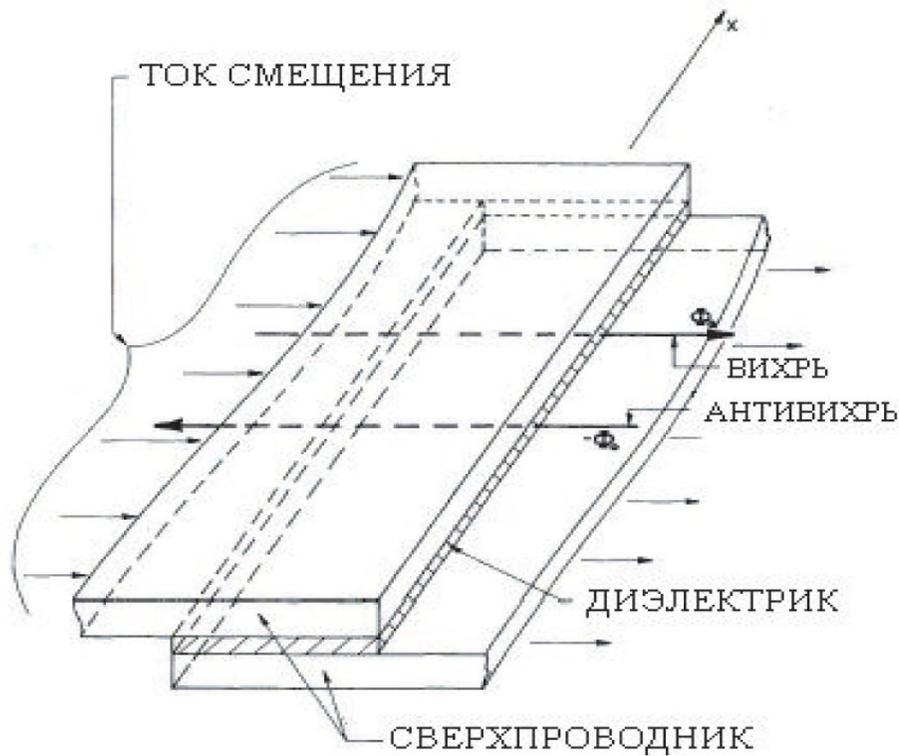


**НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО**
Национальный исследовательский университет

Быстрые переключения нелинейных систем

Панкратов А.Л.

Джозефсоновские контакты

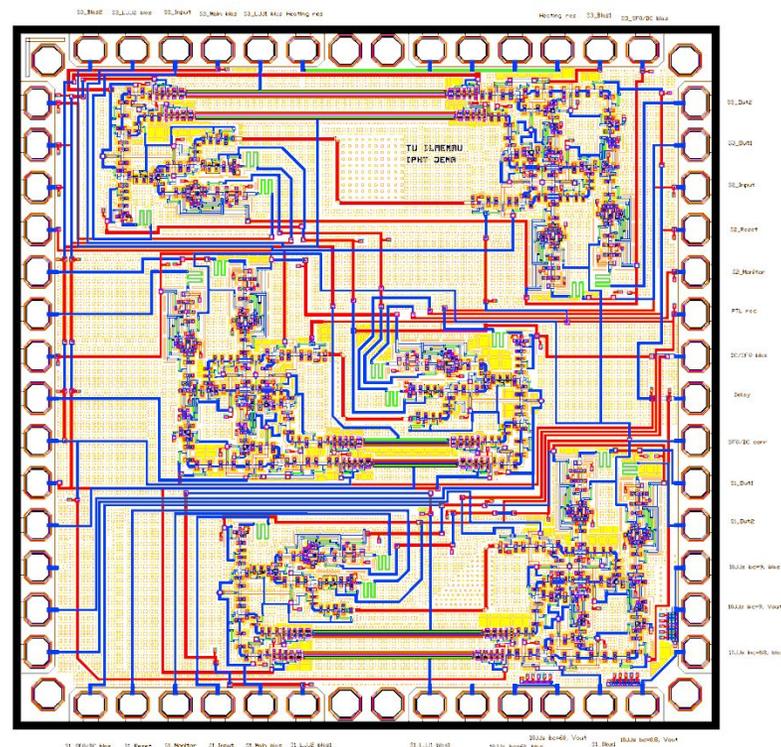
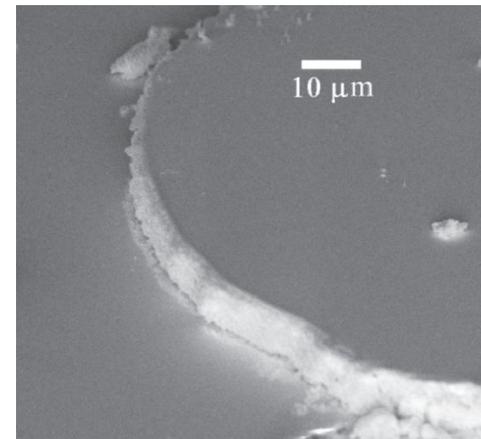
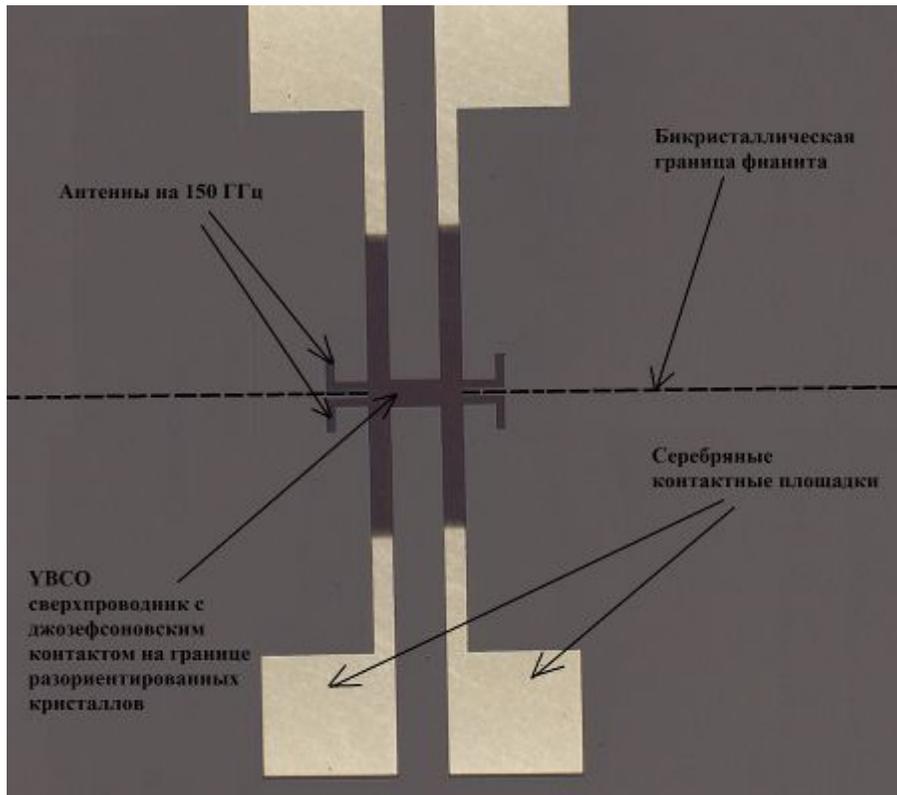


$$I_s = I_c \sin(\varphi)$$

$$V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \eta(x) - \sin(\varphi)$$

Джозефсоновские контакты



Криостаты ЦКН НГТУ



12 11 2014

Компактные криостаты



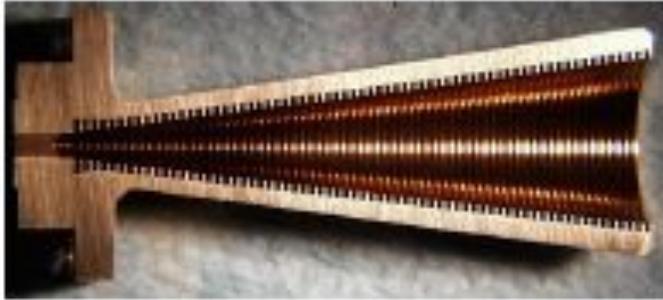
The Unique Cryogen-free Refrigerator of Oxford Instruments for 10 mK! (first in Russia)

Started at NSTU in June 2011!
(the first IV curve on June 17, 2011)

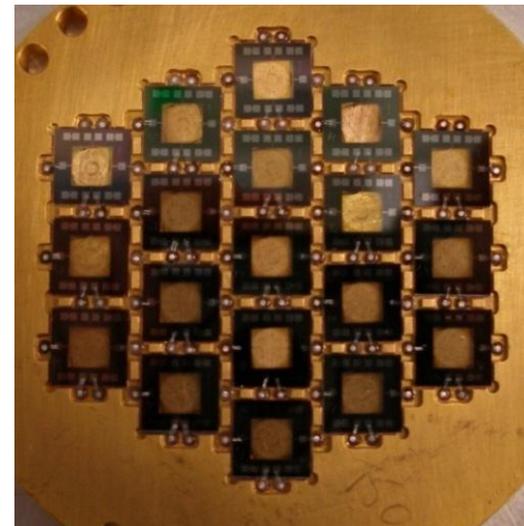
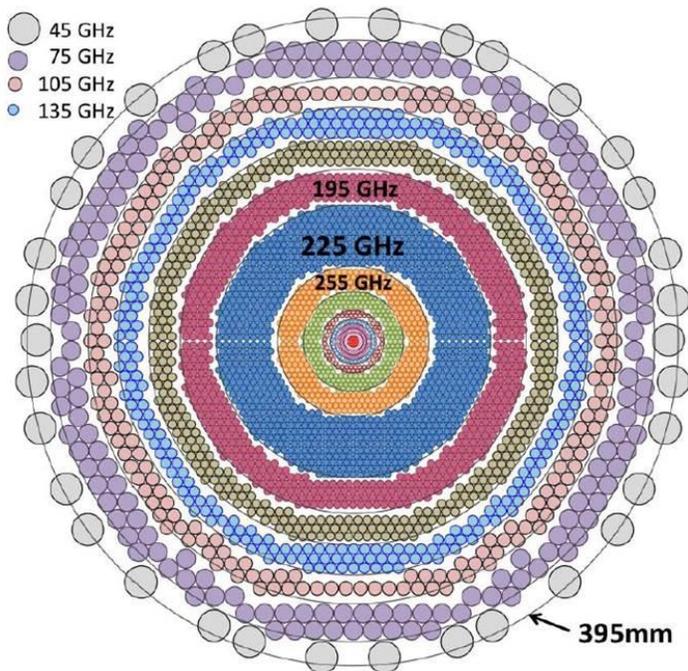


Disadvantage of current technologies

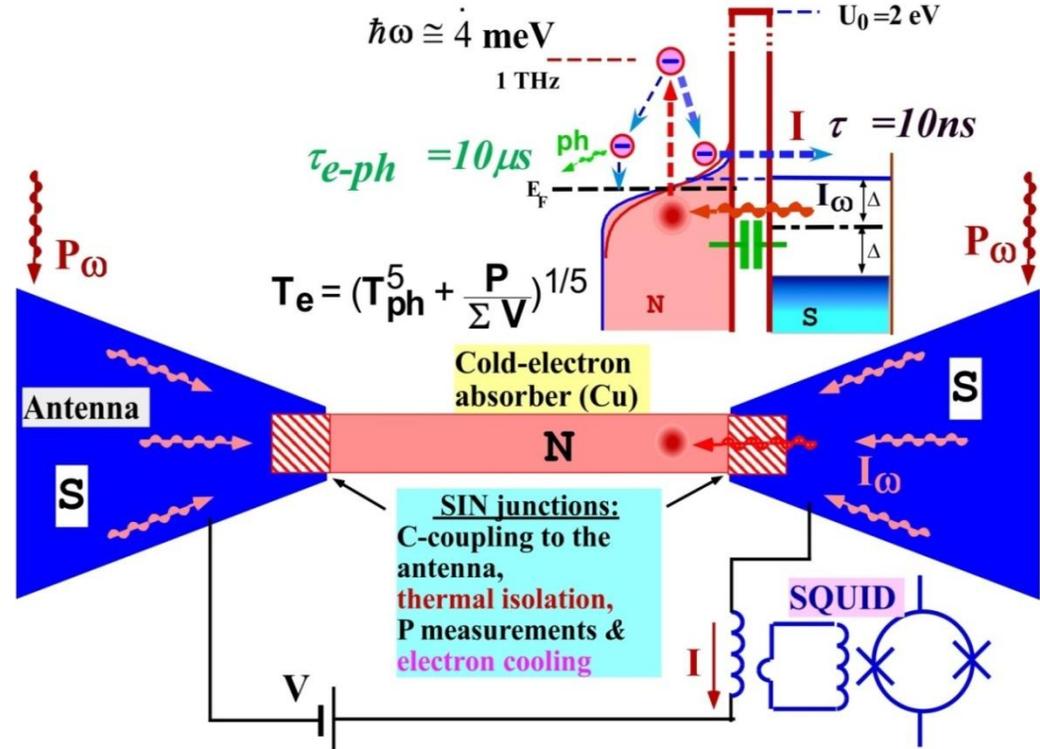
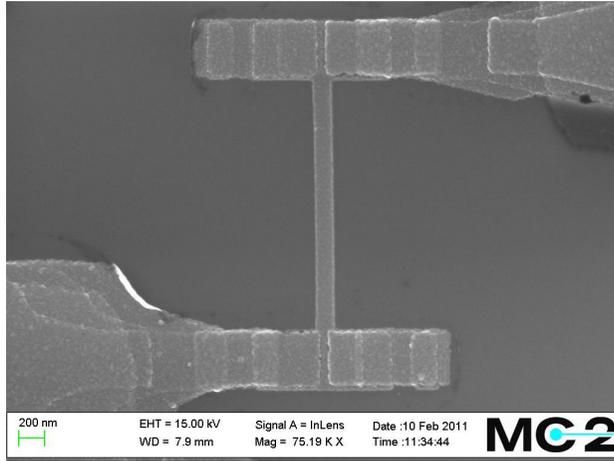
The focal plane of Planck experiment



The focal plane of COrE experiment



Cold-Electron Bolometer (CEB) with Capacitive Coupling to the Antenna



Main features of the CEB:

1. High sensitivity due to electron cooling effect:
2. High dynamic range due to direct electron cooling
3. Very easy to fabricate in arrays on planar substrate
4. Insensitivity to Cosmic Rays
5. Resonance Cold-Electron Bolometer (RCEB) for Multi-Frequency Pixels

Cosmic Rays- dramatic problem!

Cosmic Ray tests of CEB in Rome:

- **137Cs source (660 keV photons) in front of the window.**

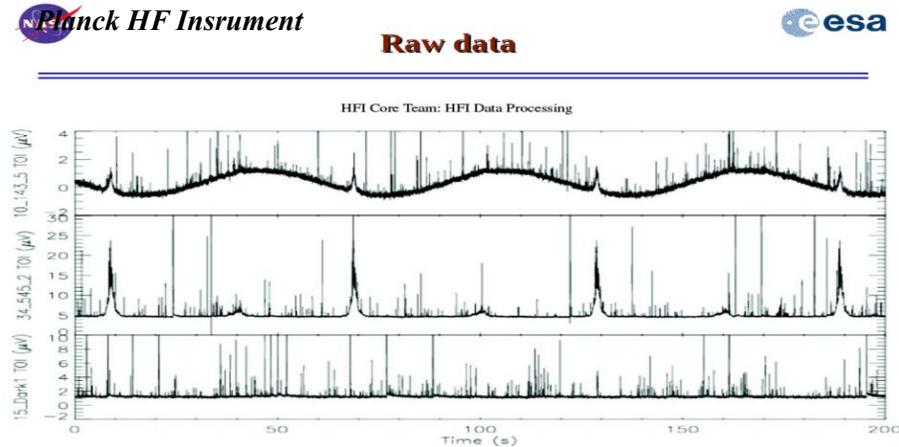
- **No single glitch was detected!**

Expectation time for a single glitch – 40 hours!

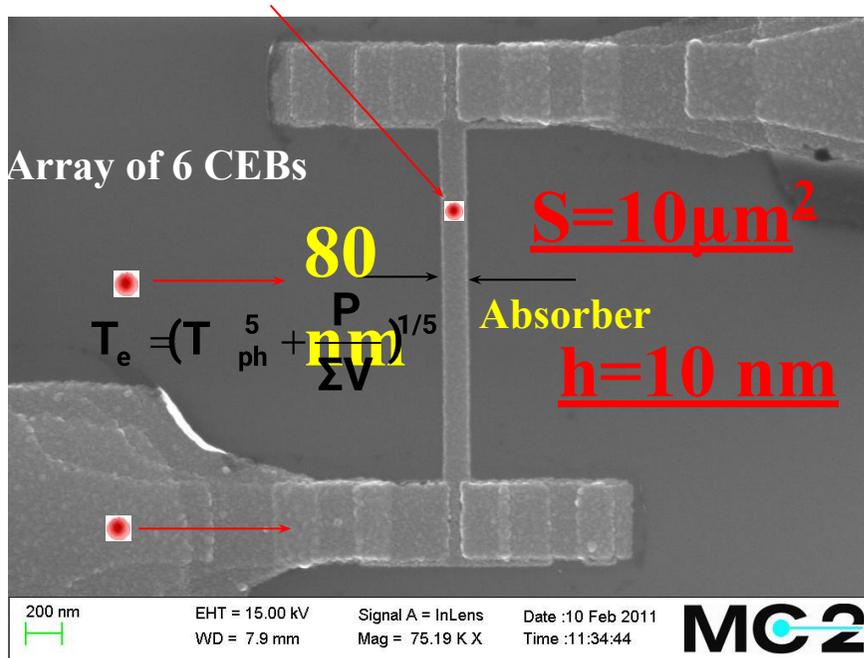
Double protection against Cosmic Rays by extremely small volume of absorber!

CEB for LSPE

J. Low Temp. Phys., 176, 3-4 323, 2014



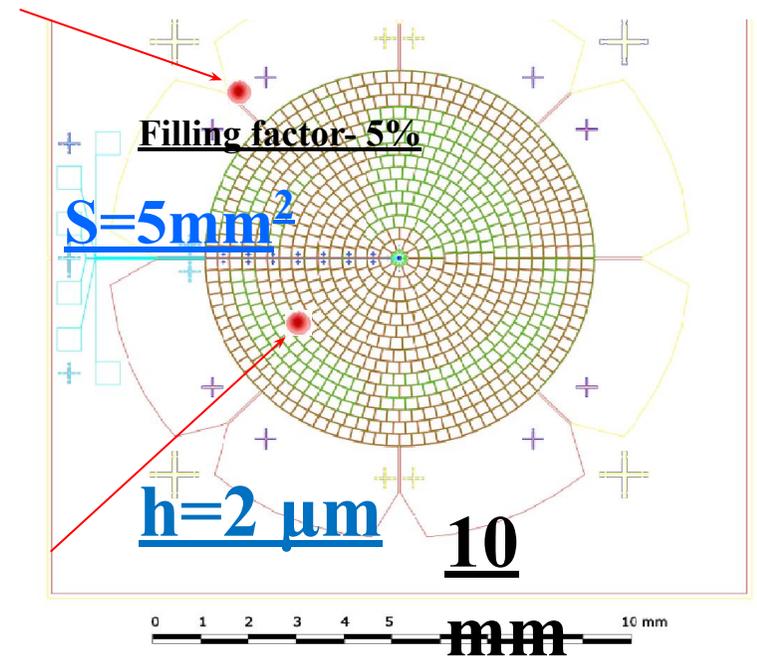
Spider-web with TES for LSPE



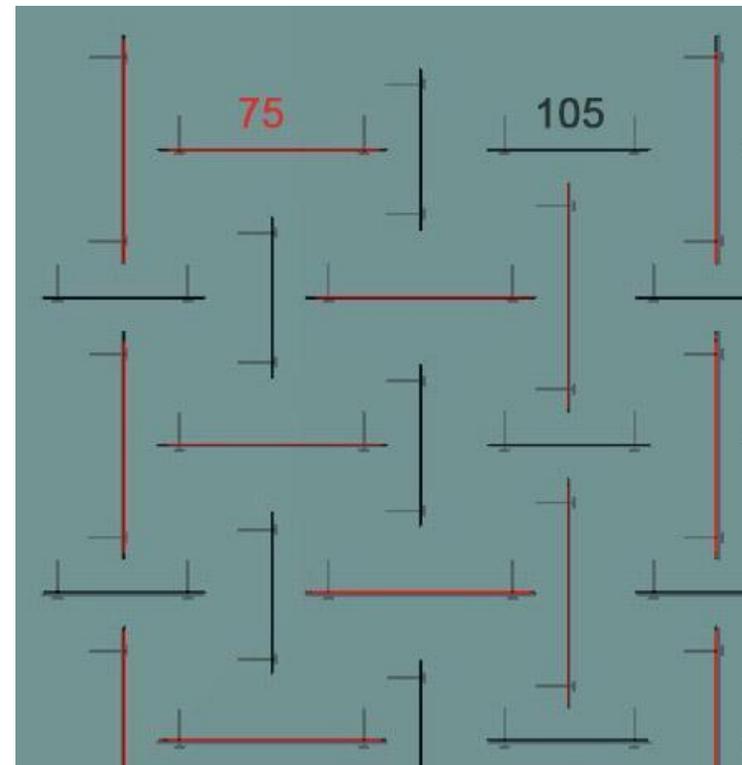
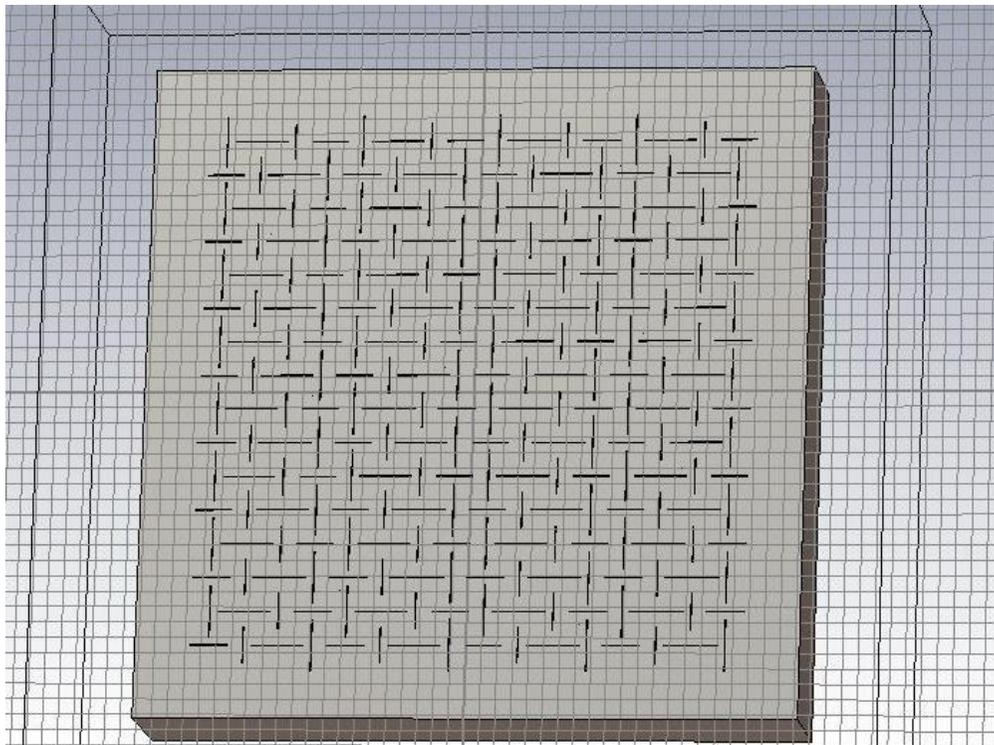
Gain in Area
:1000

in thickness
:100

in volume
:10⁵



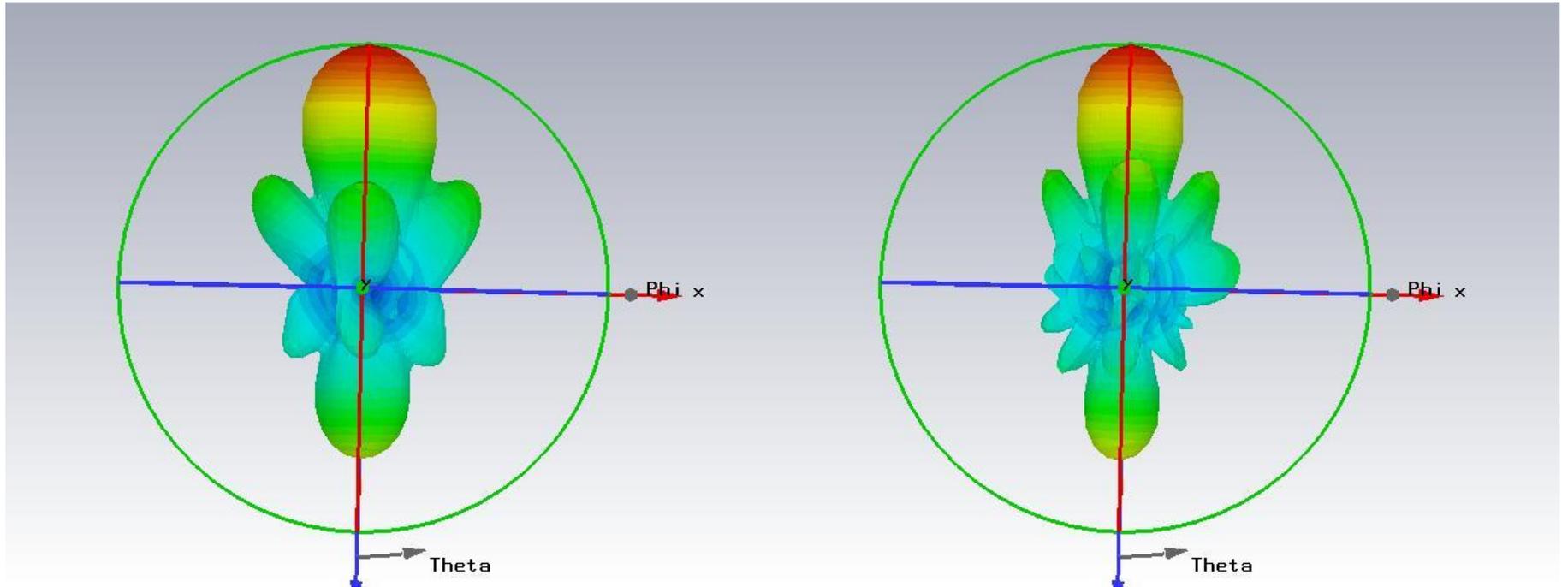
The position of slots, chess order



The microstrip-fed slot antennas.

At the edge of each microstrip line waveguide port is located.

Farfields 3D, chess order



75 GHz, 26 grad beam

105 GHz, 20 grad beam

Иерархия шумов

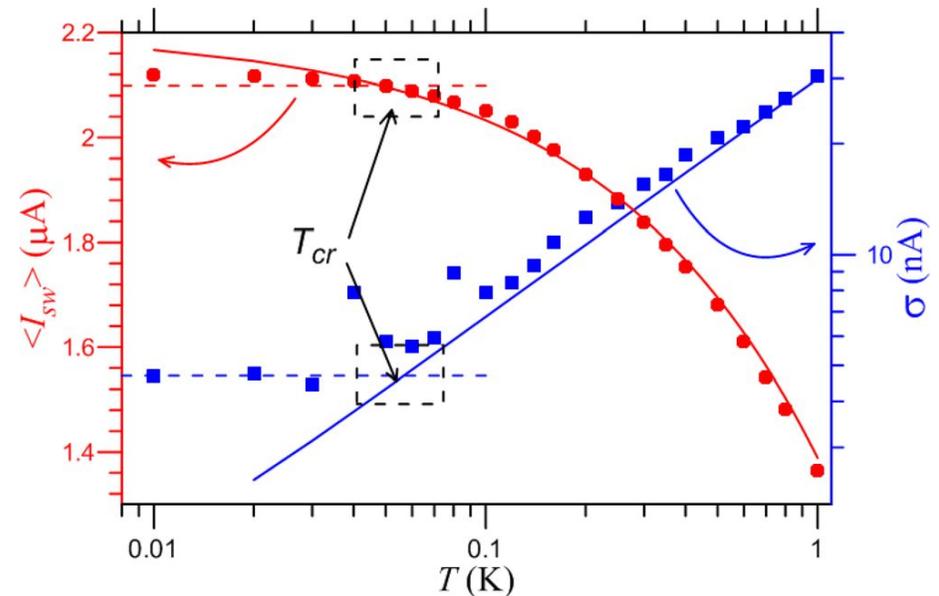
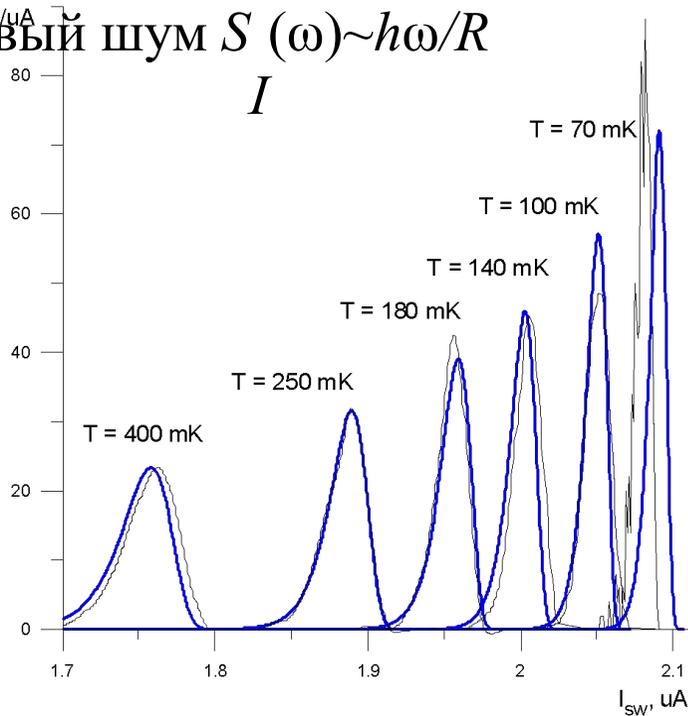
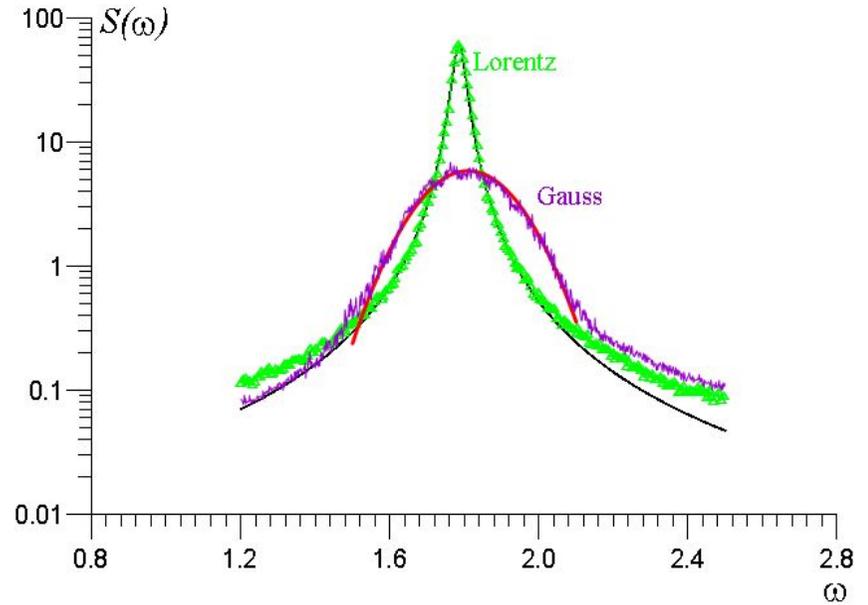
Технические шумы (узкополосные)

Естественные шумы (широкополосные):

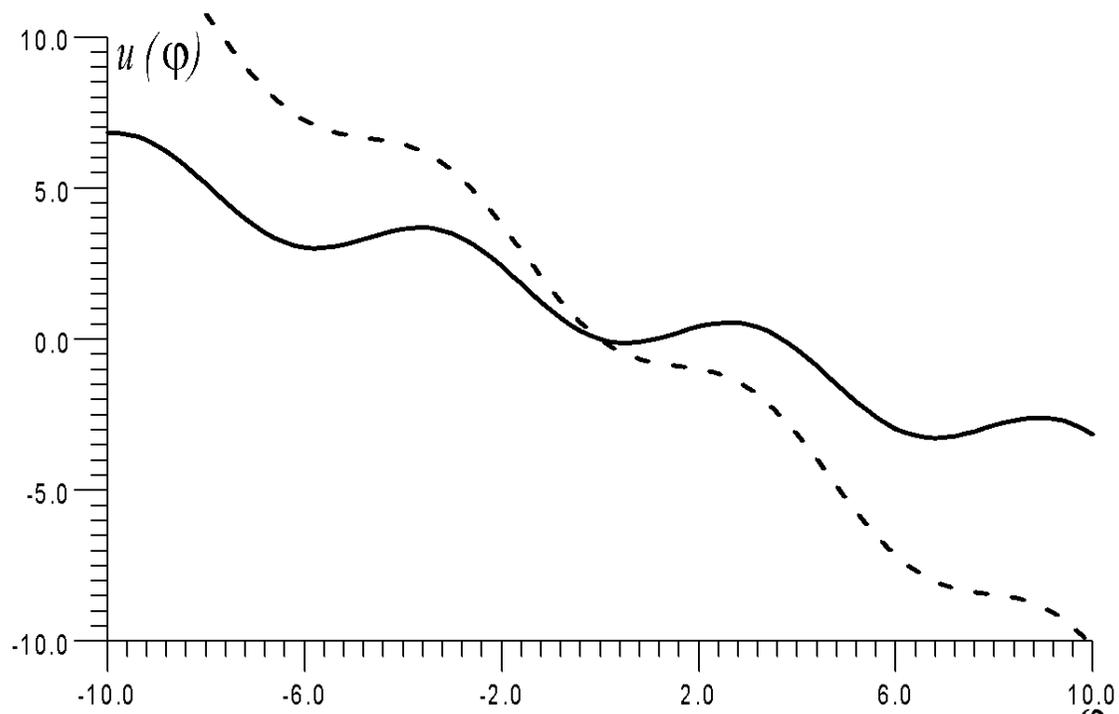
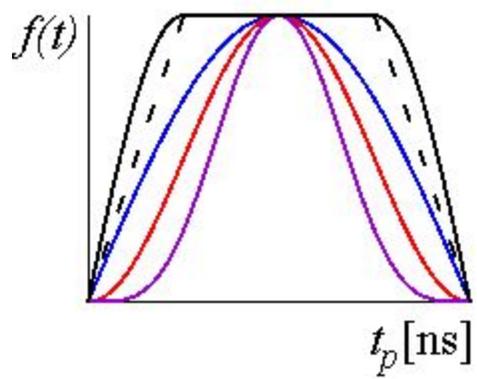
Тепловой шум $S(\omega) \sim kT/R$

Дробовой шум $S(\omega) \sim eI/2$

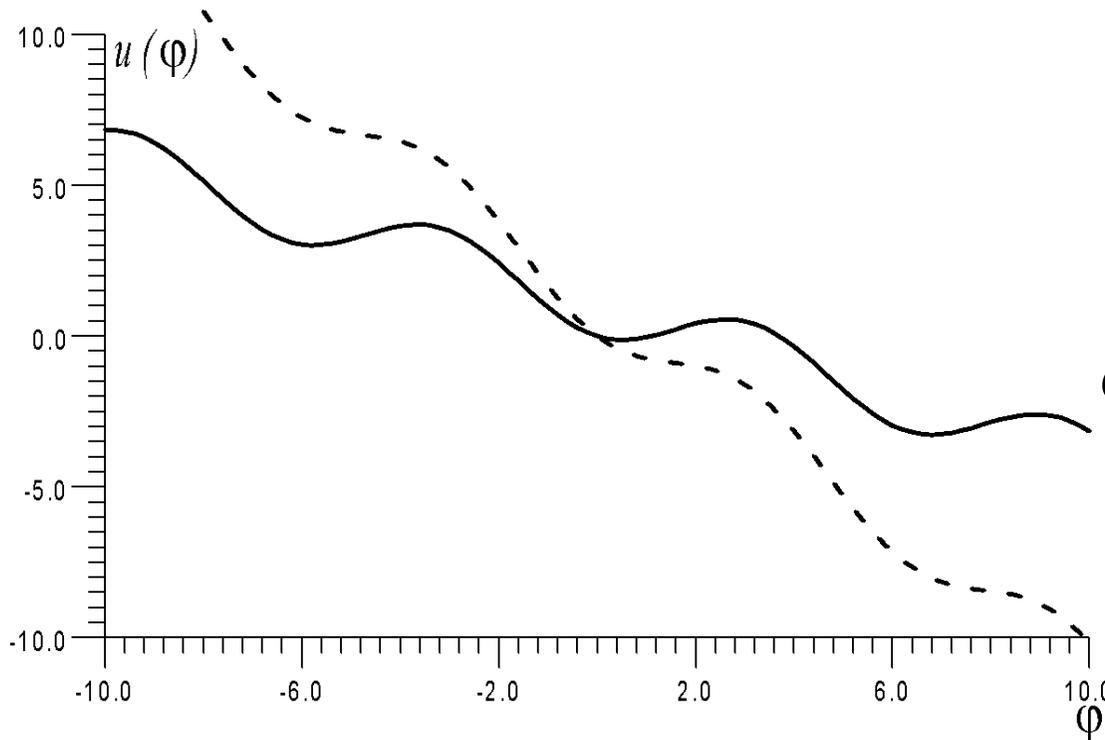
Квантовый шум $S(\omega) \sim \frac{I}{I} h\omega/R$



Что мы понимаем под переключением?



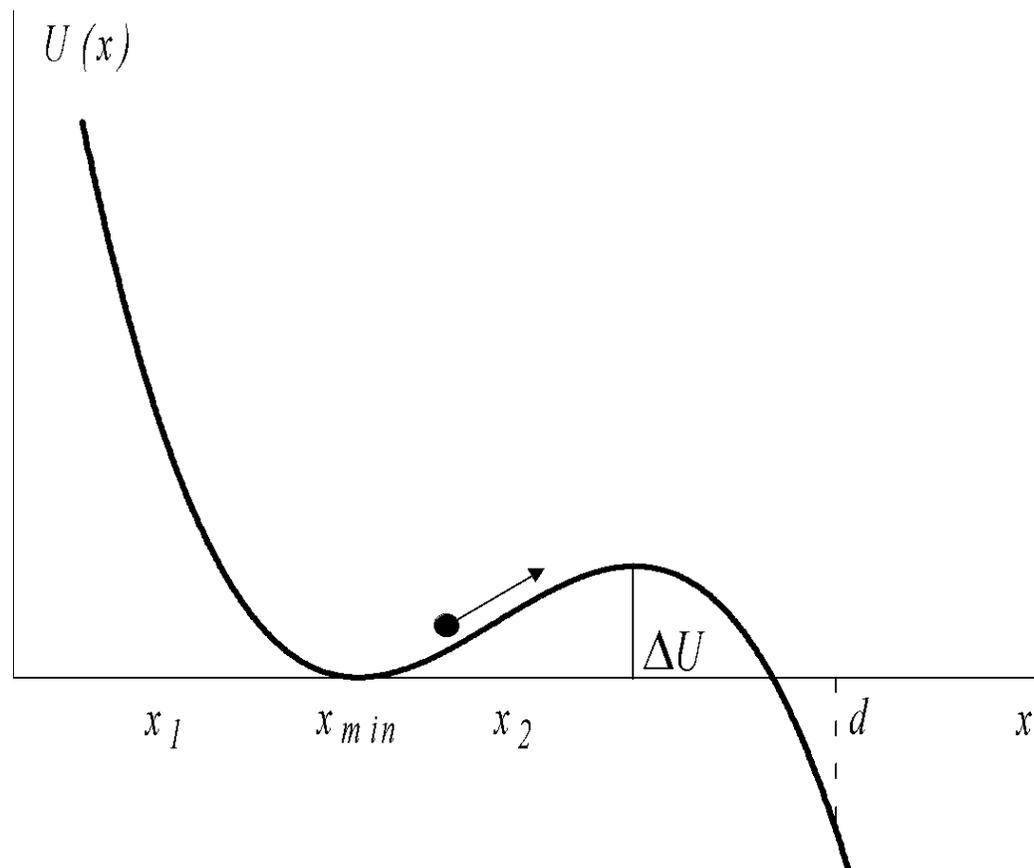
Что мы понимаем под минимизацией шумов?



$$\sigma \sim e^{\Delta U / kT}$$

$$\sigma \sim \sqrt{kT}$$

Проблема Крамерса



$$U(x) = ax^2 - bx^3$$

Уравнения Ланжевена и Фоккера-Планка

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\frac{1}{h} \frac{dU(x)}{dx} + \xi(t)$$

$$\langle \xi(t) \rangle = 0, \quad \langle \xi(t) \xi(t+\tau) \rangle = D \delta(\tau), \quad D = 2kT/h$$

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial G(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{du(x)}{dx} W(x,t) + \frac{\partial}{\partial x} W(x,t) \right]$$

$$B = 1/D, \quad u(x) = U(x)/kT, \quad W(c,t) = 0, \quad G(d,t) = 0.$$

- Безразмерное уравнение ФП

$$\frac{\partial W(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{du(x)}{dx} W(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} W(x, t) \right]$$

- Замена функции:

$$W(x, t) = \Psi(x, t) e^{-\frac{u(x)}{2}}$$

- Замена времени:

$$t = i\tau$$

- Безразмерное уравнение Шредингера

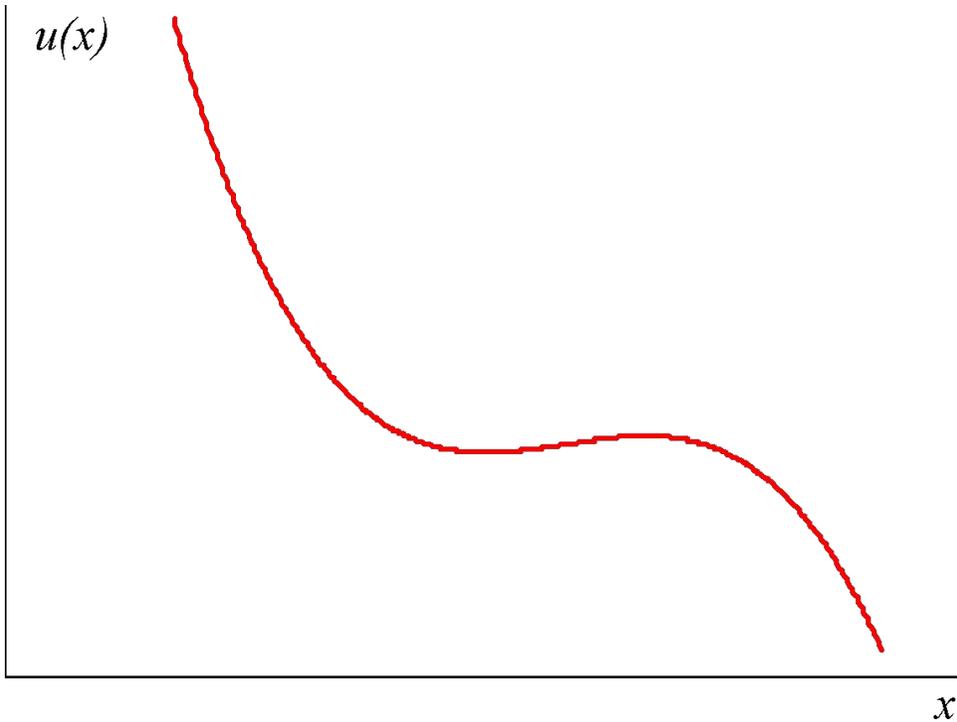
$$\frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial \tau} = iD \left[\frac{\partial^2 \psi(x, \tau)}{\partial x^2} - V(x) \psi(x, \tau) \right]$$

- Связь потенциалов в уравнении ФП и Шредингера

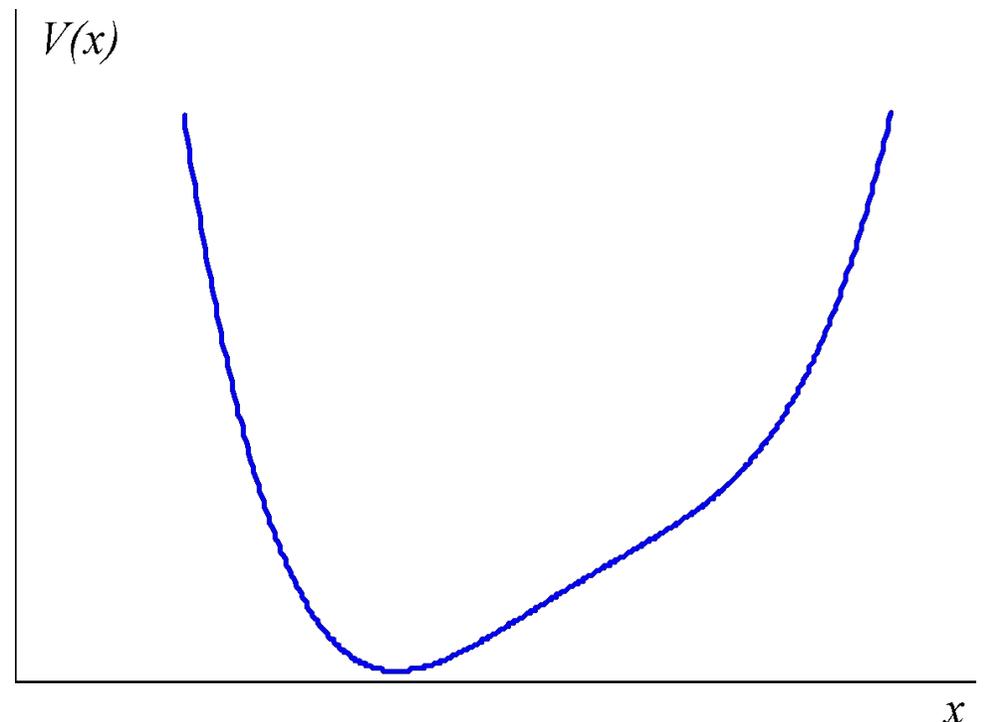
$$V(x) = -\frac{1}{2} \frac{d^2 u(x)}{dx^2} + \left(\frac{1}{2} \frac{du(x)}{dx} \right)^2$$

M. Bernstein and L.S. Brown, Supersymmetry and the Bistable Fokker-Planck Equation, Phys. Rev. Lett., **52**, 1933 (1984).

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{du(x)}{dx} W(x,t) + \frac{\partial}{\partial x} W(x,t) \right] \quad \frac{\partial \psi(x,\tau)}{\partial \tau} = iD \left[\frac{\partial^2 \psi(x,\tau)}{\partial x^2} - V(x)\psi(x,\tau) \right]$$



$$u(x) = x^2 - x^3$$



$$V(x) = (3x^2/2 - x)^2 + 3x - 1$$

Временные характеристики

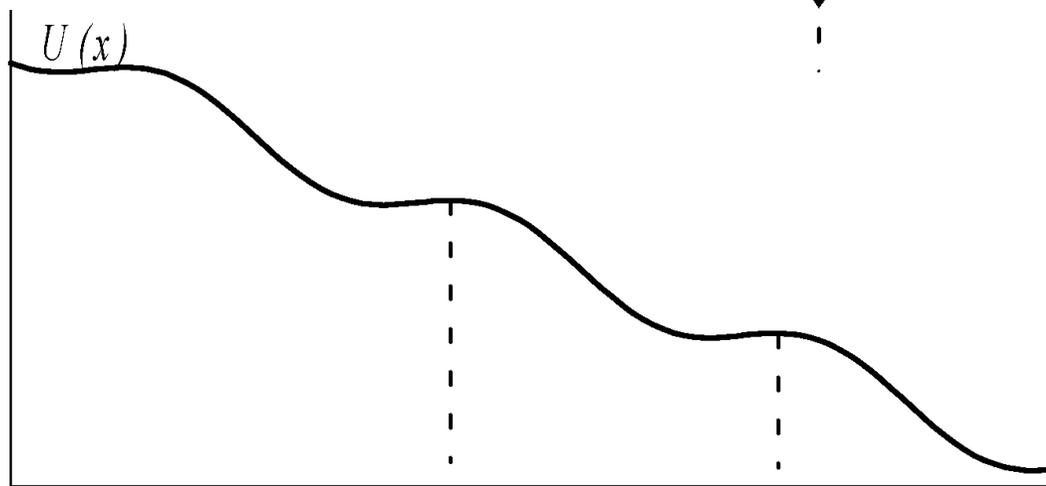
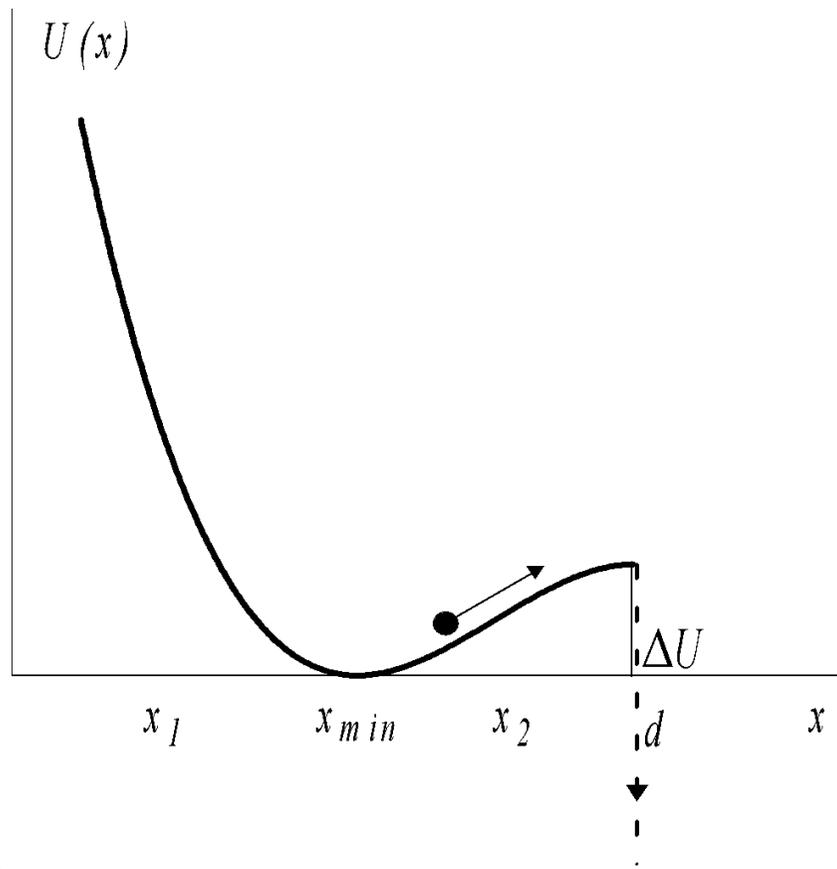
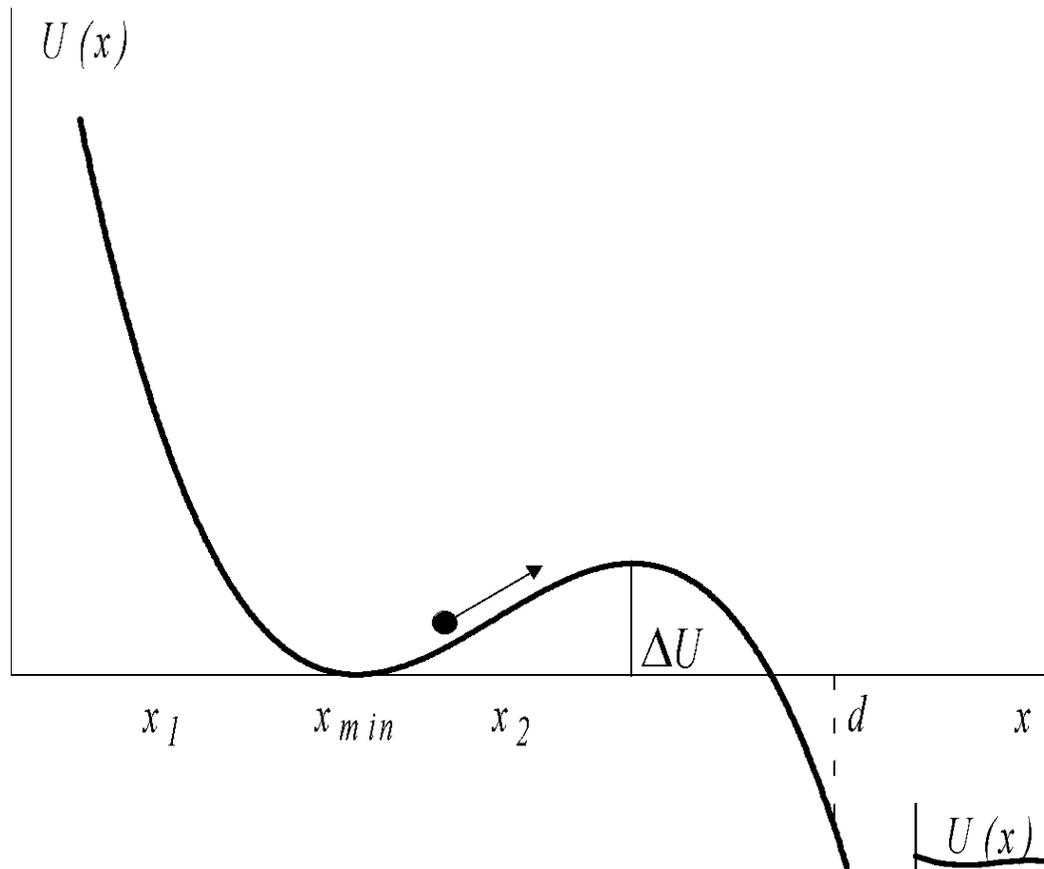
1. Моменты времени первого достижения границ
(Понтрягин, Андронов, Витт, ЖЭТФ, 1933 г.)
2. Метод Крамерса: $\theta \sim \exp(\Delta U/kT)$, *Physica*, 1940 г.
3. Эффективное собственное число (Рискен, Юнг, Гаранин)
4. Обобщенное моментное разложение (Надлер, Шультен)
5. Интегральное время релаксации и цепные дроби
(Коффей, Калмыков, Титов)

$$\theta = \frac{\int_0^{\infty} [P(t) - P(\infty)] dt}{P(0) - P(\infty)}$$

$$\langle t^n \rangle = \int_0^{\infty} t^n w(t) dt$$

$$P(t) = \int_c^d W(x, t) dx$$

вероятность нахождения
в области (c, d)



Метод преобразования Лапласа

$$\frac{d^2 Y(x, s)}{dx^2} + \frac{d}{dx} \left[\frac{du(x)}{dx} Y(x, s) \right] - sBY(x, s) = -B\delta(x - x_0)$$

$$Y(x, s) = \int_0^{\infty} W(x, t) e^{-st} dt$$

$$G(x, s) = \int_0^{\infty} G(x, t) e^{-st} dt$$

$$\theta = \frac{\int_0^{\infty} [P(t) - P(\infty)] dt}{P(0) - P(\infty)}$$

$$\theta = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s\hat{P}(s) - P(\infty)}{s[P(0) - P(\infty)]}$$

$$s\hat{P}(s) - P(\infty) = G(c, s) - G(d, s)$$

$$H(x, s) = sG(x, s) = H_0(x) + sH_1(x) + s^2H_2(x) + \dots$$

$$\tau_1(c, x_0, d) = -(H_2(d) - H_2(c));$$

$$\tau_2(c, x_0, d) = 2(H_3(d) - H_3(c));$$

$$\tau_n(c, x_0, d) = (-1)^n n! (H_{n+1}(d) - H_{n+1}(c)).$$

$$\tau_1 = B \left\{ \int_{x_0}^d e^{u(x)} \int_c^x e^{-u(y)} dy dx + \int_c^d e^{-u(y)} dy \cdot \int_d^\infty e^{u(x)} dx \right\}$$

$$\tau_2 = 2\tau_1^2 + F, \quad \tau_1 = \frac{2\pi}{\omega_c \sqrt{1-i^2}} \exp(\Delta u), \quad \Delta u \gg 1$$

A.N. Malakhov, A.L. Pankratov, *Physica C* **269**, 46-54 (1996).

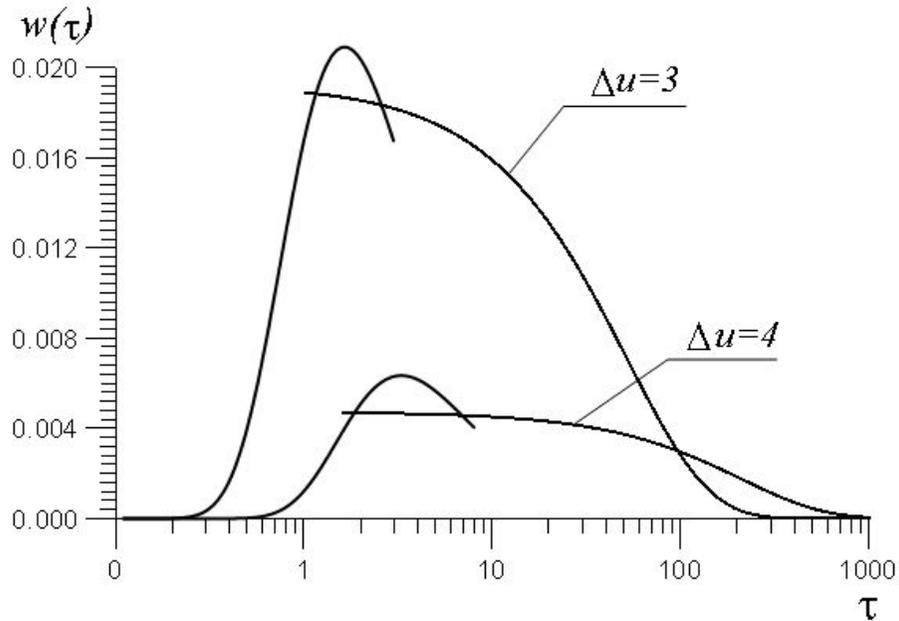
A.N. Malakhov, *Chaos* **7**, 488 (1997).

A.L. Pankratov, *Physics Letters A* **234**, 329-335 (1997).

A.L. Pankratov, B. Spagnolo, *Physical Review Letters* **93**, 177001 (2004).

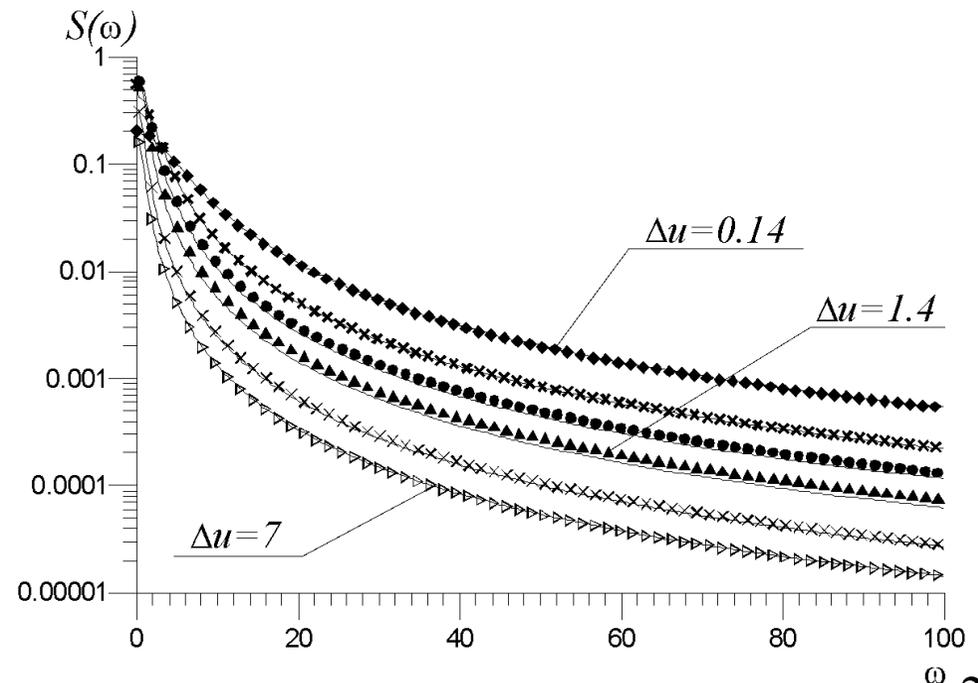
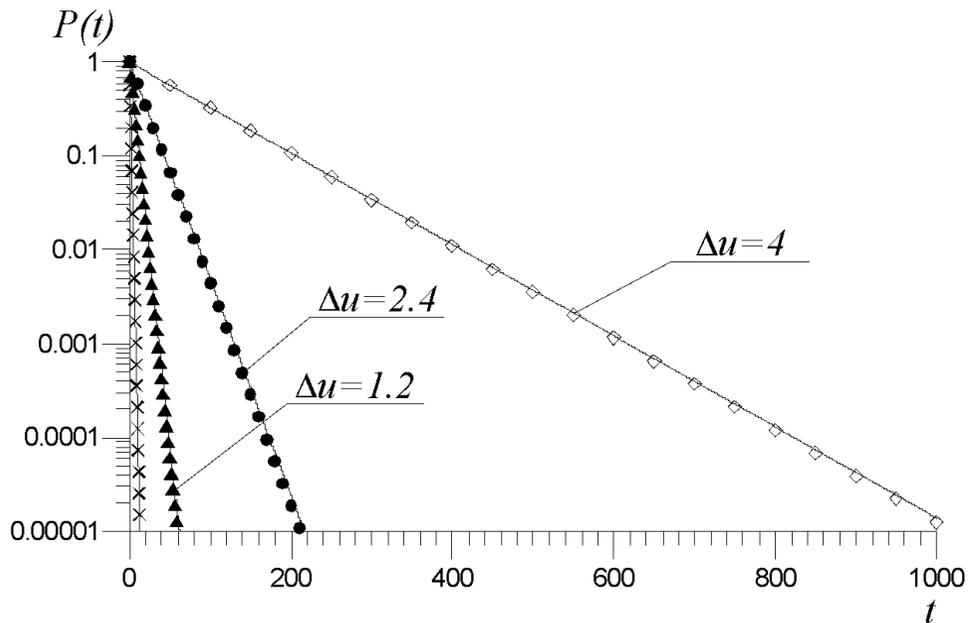
A.N. Malakhov, A.L. Pankratov, *Adv. Chem. Phys.* **121**, 357-438 (2002).

Временная эволюция средних



$$\tau_n \approx n! \tau_1^n$$

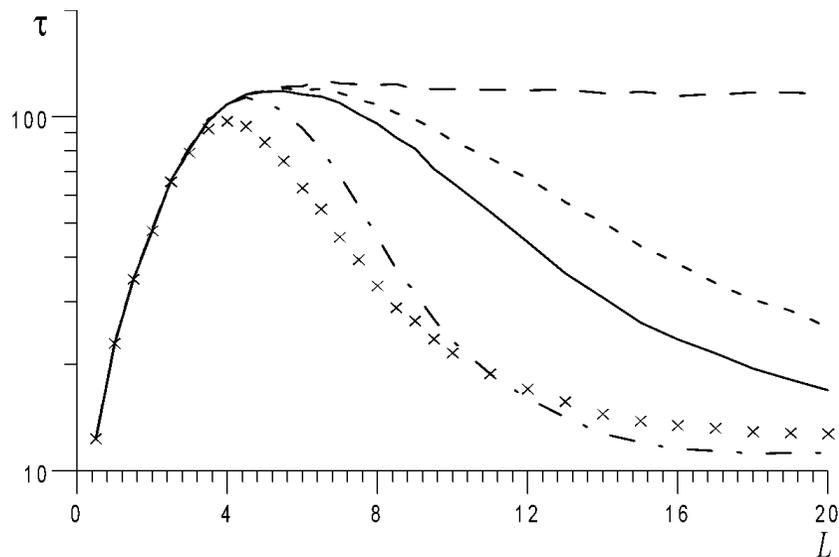
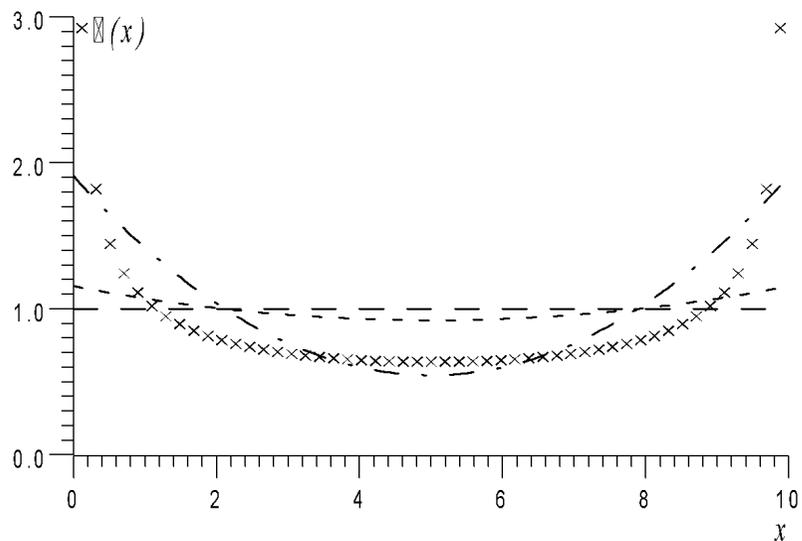
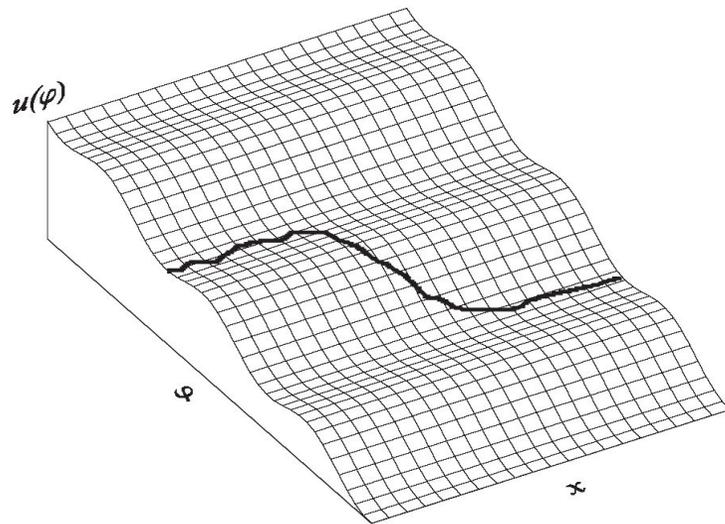
$$F(t) = F_0 \exp(-t / \tau)$$

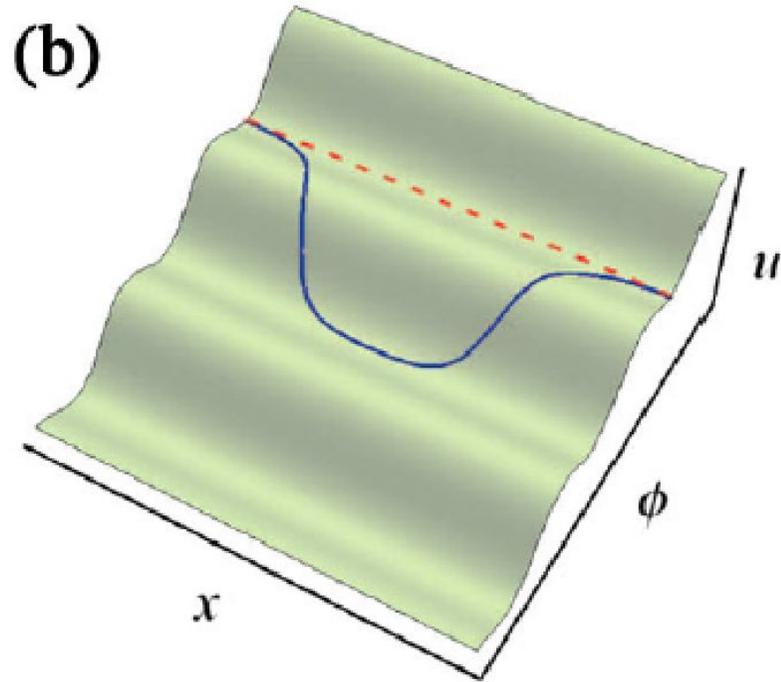
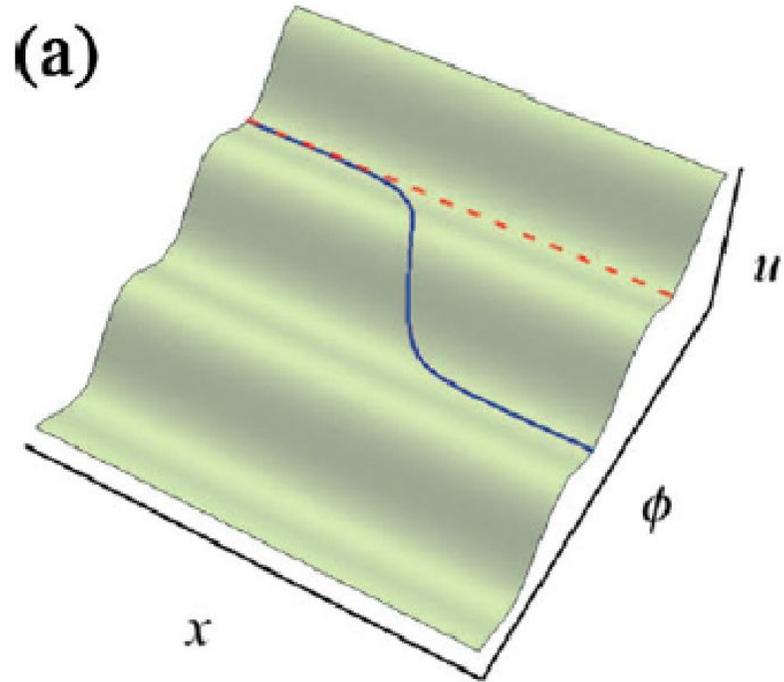


Время жизни сверхпроводящего состояния

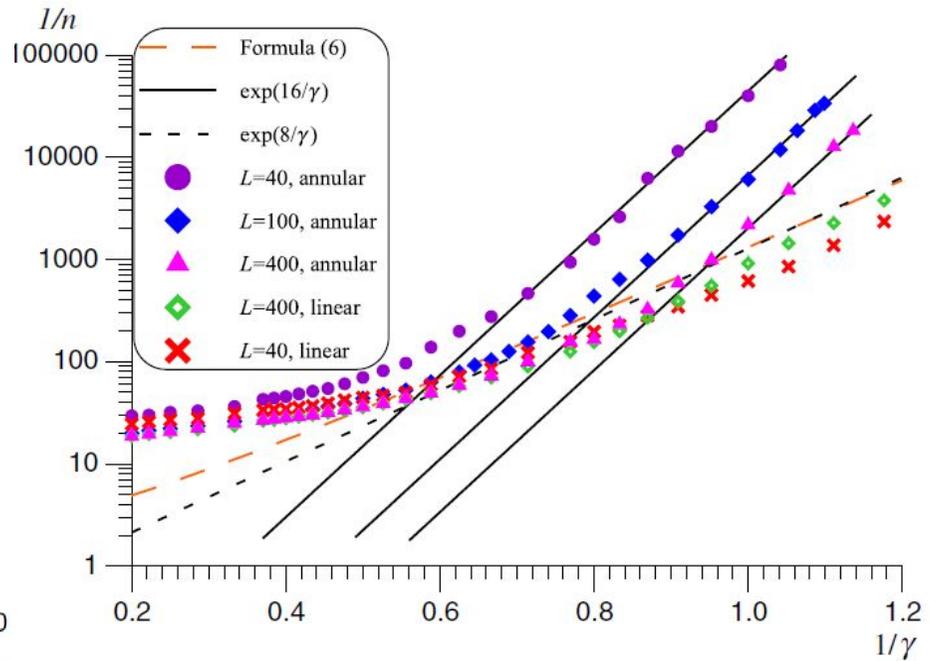
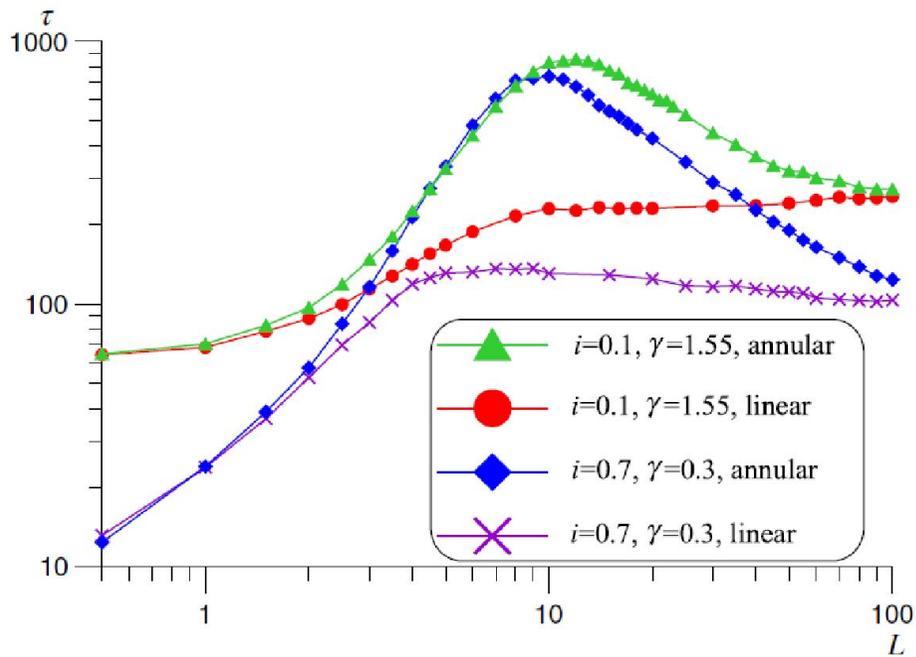
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \eta(x) - \sin(\varphi)$$

$$\frac{\partial \varphi(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial \varphi(L,t)}{\partial x} = H$$





K.G. Fedorov, and A.L. Pankratov, Phys. Rev. Lett., 103, 260601 (2009).



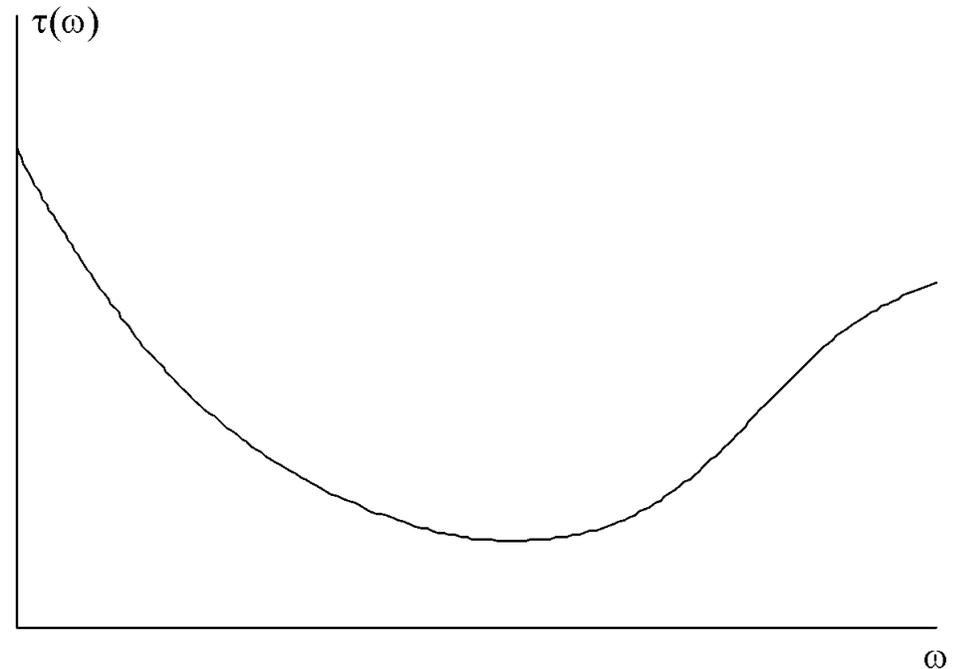
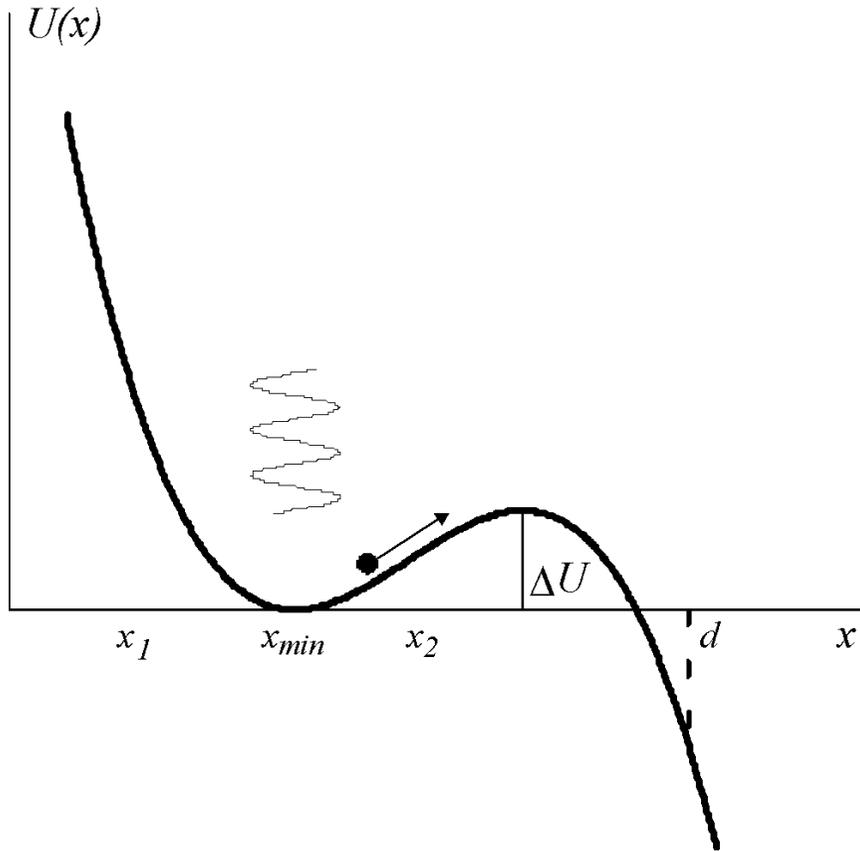
$$n = \sqrt{2E_k / \pi \gamma} \exp(-E_k / \gamma), \quad (6)$$

M. Buttiker, and R. Landauer, Phys. Rev. A, 23, 1397 (1981).

M. Buttiker, and T. Christen, Phys. Rev. Lett. 75, 1895 (1995).

Резонансная активация

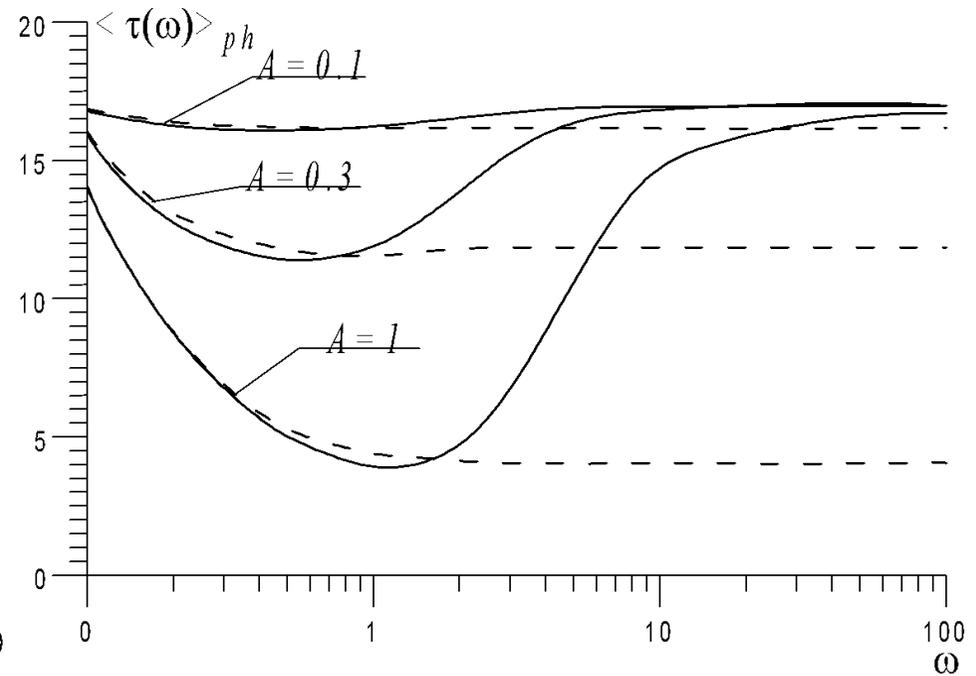
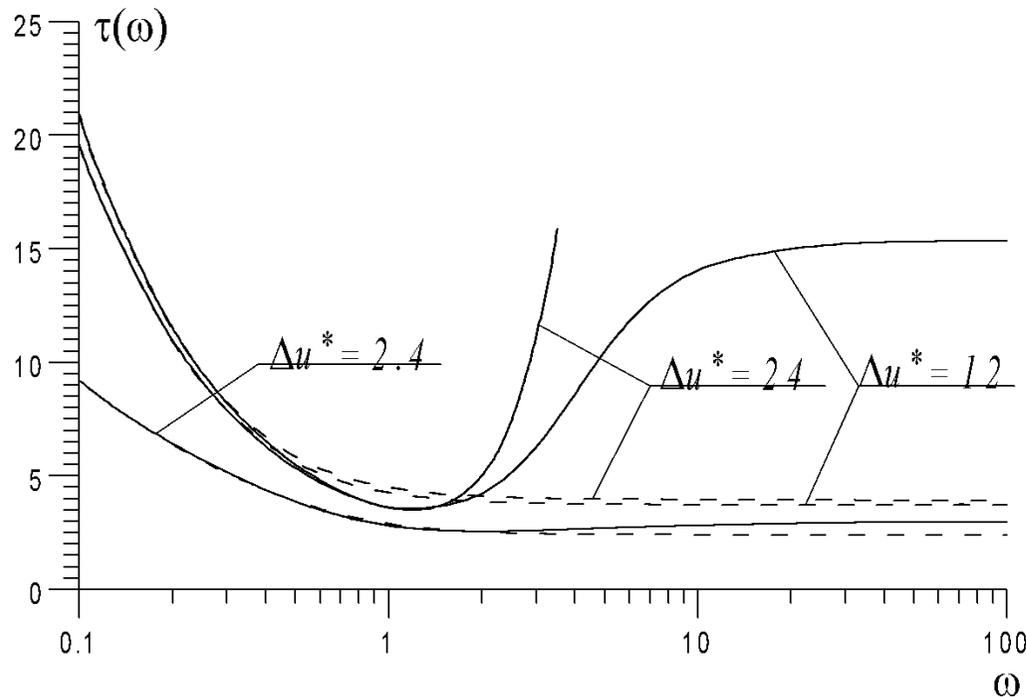
$$\frac{m}{h} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{dx(t)}{dt} = -\frac{1}{h} \left(\frac{dU(x)}{dx} + A \sin(\omega t) \right) + \xi(t)$$



P. Jung, Physics Reports **234**, 175-295 (1993).

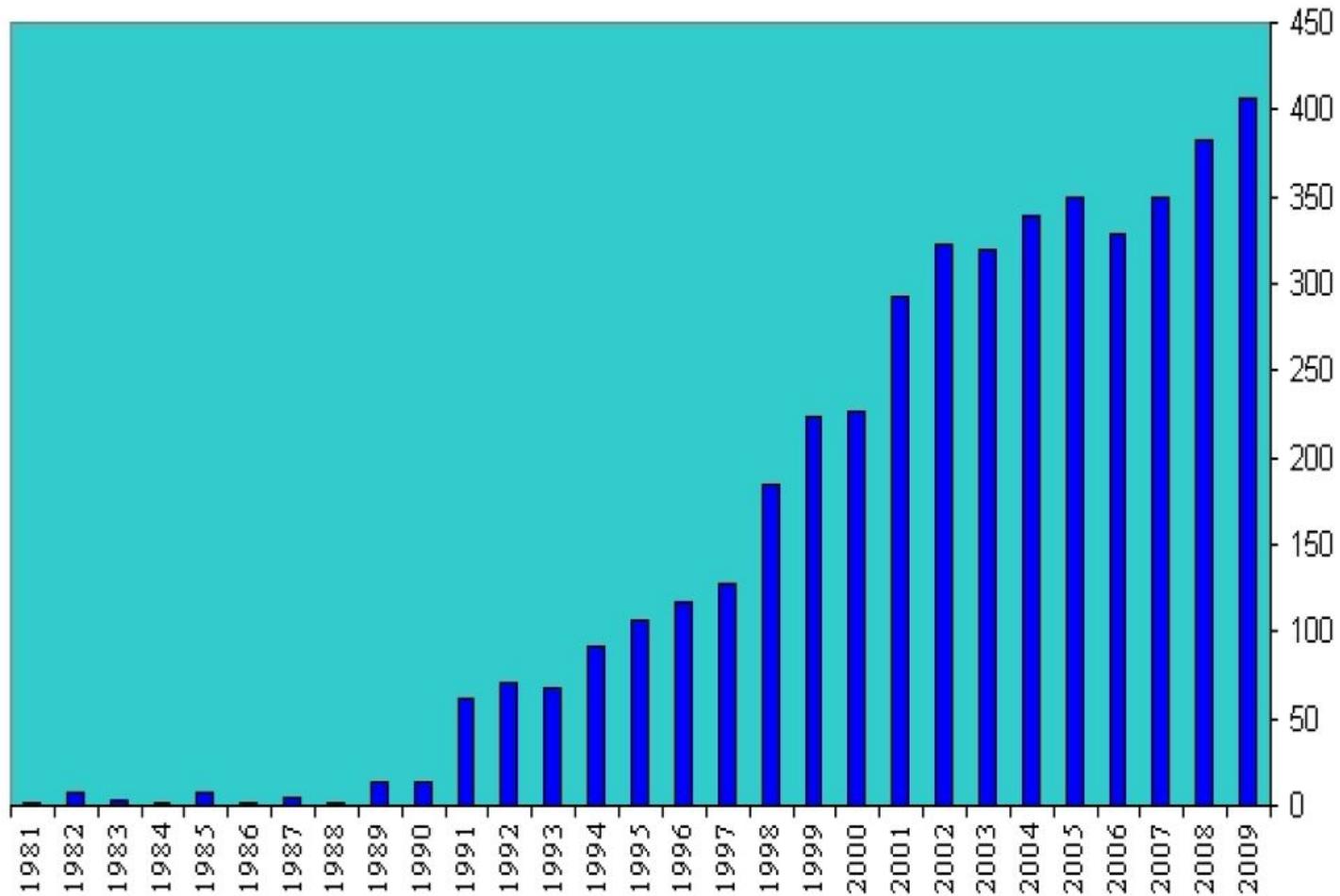
Резонансная активация?

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\frac{1}{h} \left(\frac{dU(x)}{dx} + A \sin(\omega t) \right) + \xi(t)$$



A.L. Pankratov, M. Salerno, Physics Letters A **273**, 162-166 (2000).

Стохастический резонанс



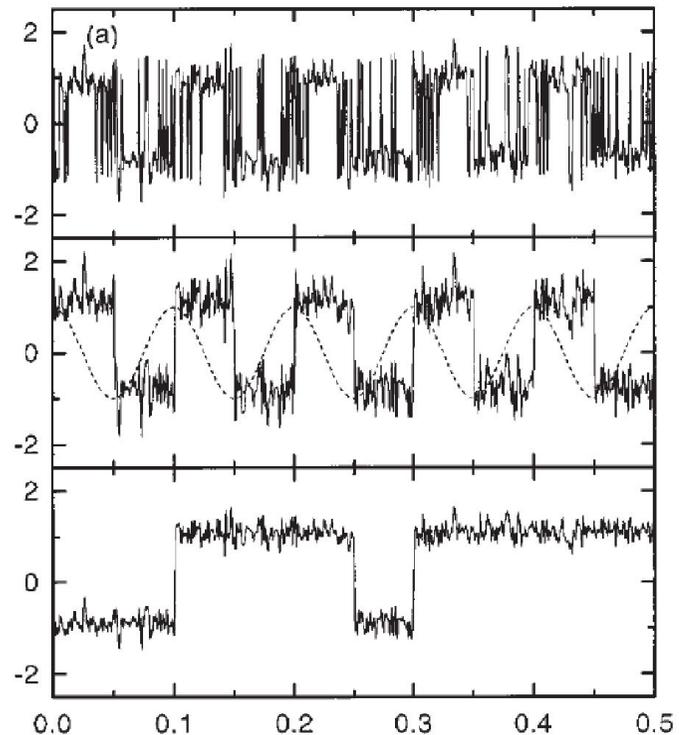
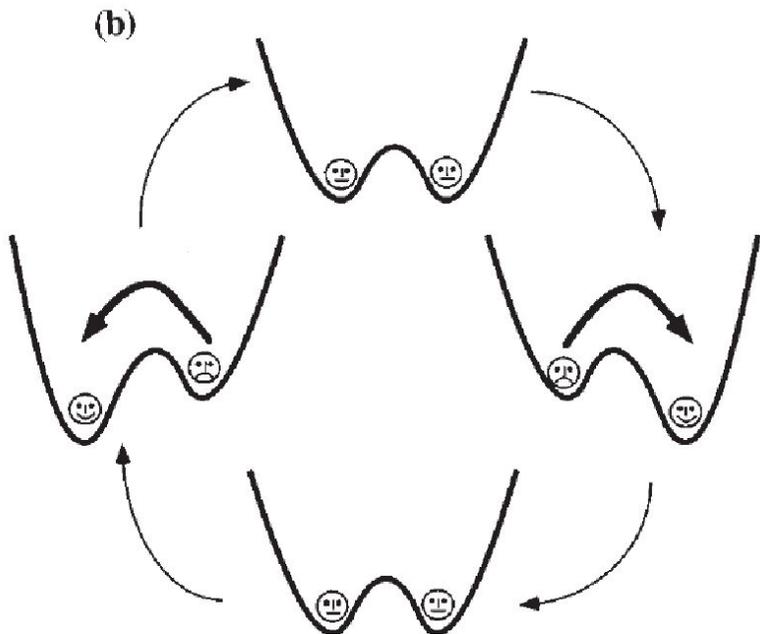
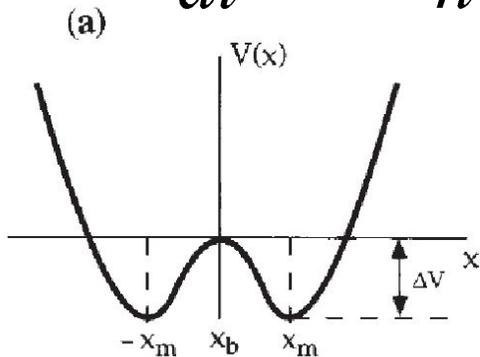
L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung and F. Marchesoni, *Rev. Mod. Phys.* 70, 223-287 (1998).

В.С. Анищенко, А.Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шиманский-Гайер, *УФН*, 169, №1, 7 (1999).

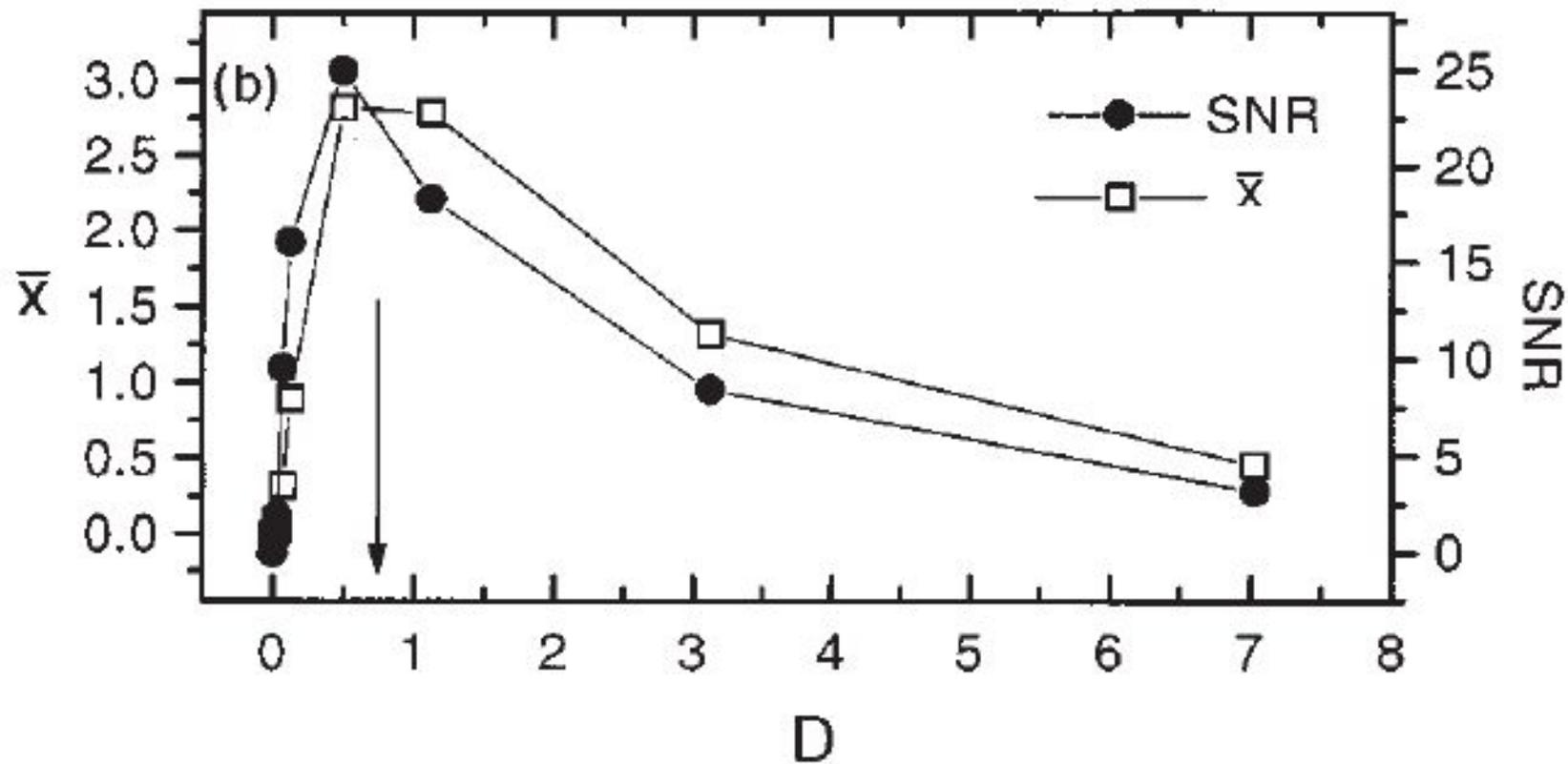
Th. Wellens, Y. Shatokhin and A. Buchleitner, *Rep. Progr. Phys.* 67, 45-105 (2004).

Стохастический резонанс

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\frac{1}{h} \left(\frac{dU(x)}{dx} + A \sin(\omega t) \right) + \xi(t)$$



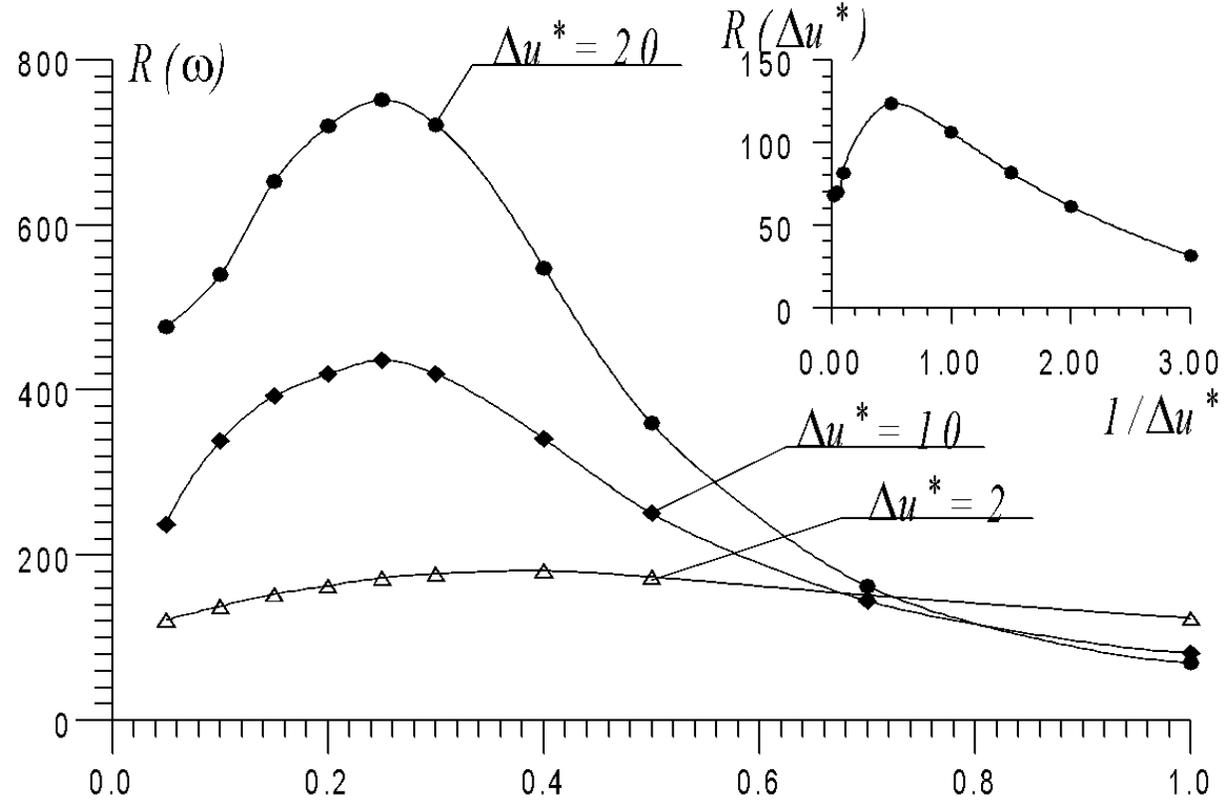
Стохастический резонанс



Подавление шума сильным периодическим сигналом

$$\tilde{x} = x - x^3 + A \sin(\omega t + \psi) + \xi(t)$$

$$R(\omega) = \frac{1}{S_N(\omega)} \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \int_{\omega - \Delta\Omega}^{\omega + \Delta\Omega} S(\omega) d\omega$$



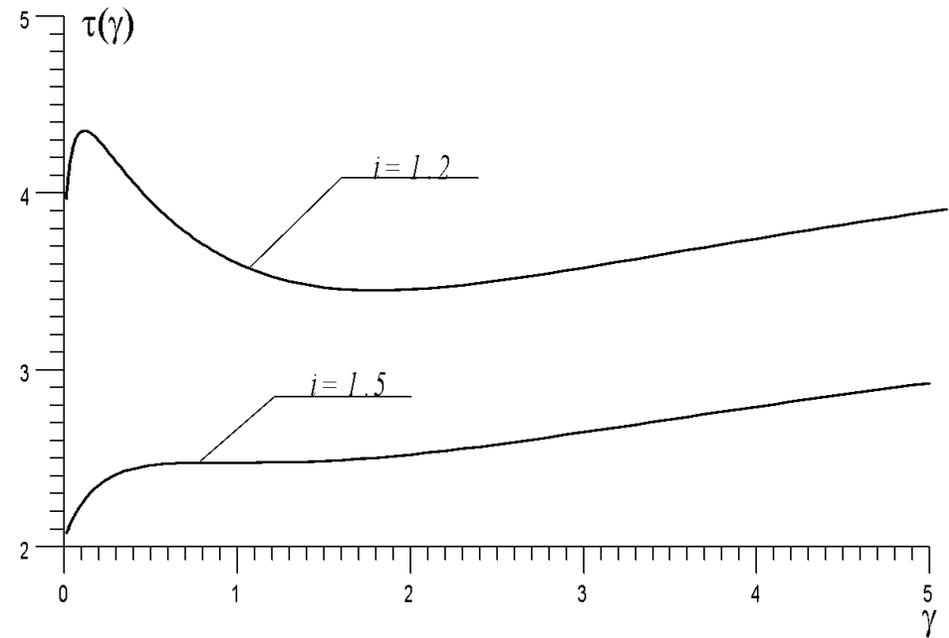
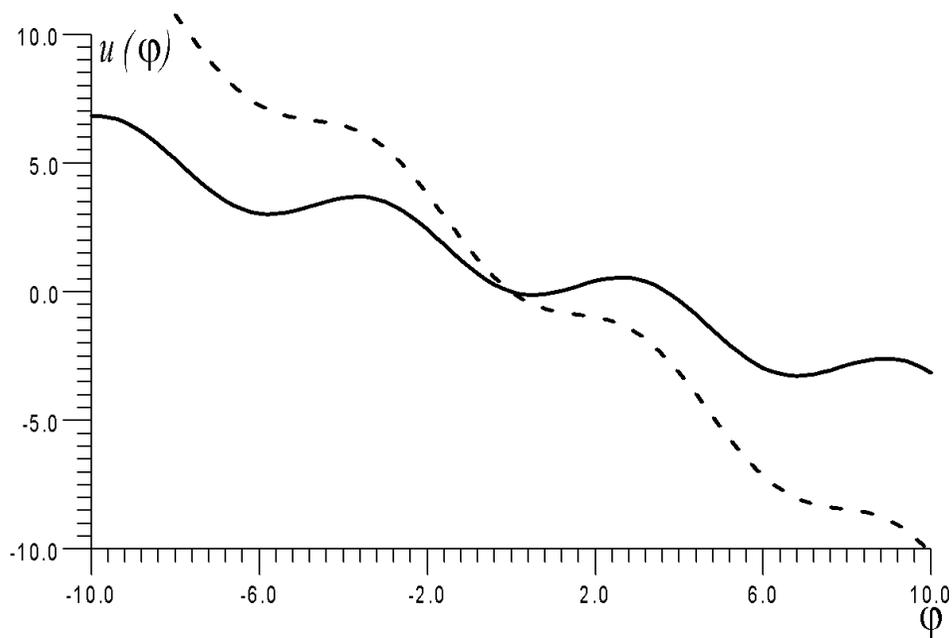
Подавление ошибок переключения в устройствах БОК логики

$$\frac{d\varphi}{dt} = \sin(\varphi) - i(t) + i_F(t)$$

$$\tau = \langle t \rangle = \int_0^{\infty} t w(t) dt, \quad \sigma = \sqrt{\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2}$$

$$\begin{aligned} \tau = & \frac{1}{\omega_C} \left\{ \frac{2}{\sqrt{i^2 - 1}} \arctan \left(\frac{i \tan(y/2) - 1}{\sqrt{i^2 - 1}} \right) \Bigg|_{y=x_0}^{y=d} + \right. \\ & + \gamma \left[\frac{1}{2(i - \sin d)^2} + \frac{1}{2(i - \sin x_0)^2} \right] + \\ & \left. + \gamma^2 \int_{x_0}^d \left[\frac{3 \cos^2 y}{(i - \sin y)^5} - \frac{\sin y}{(i - \sin y)^4} \right] dy + \dots \right\} \end{aligned}$$

Задержка шумом распада неустойчивого состояния



Rylyakov A.V., Likharev K.K., **Pulse jitter and timing errors in RSFQ circuits**, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 9, □2. - P. 3539-3544 (1999).

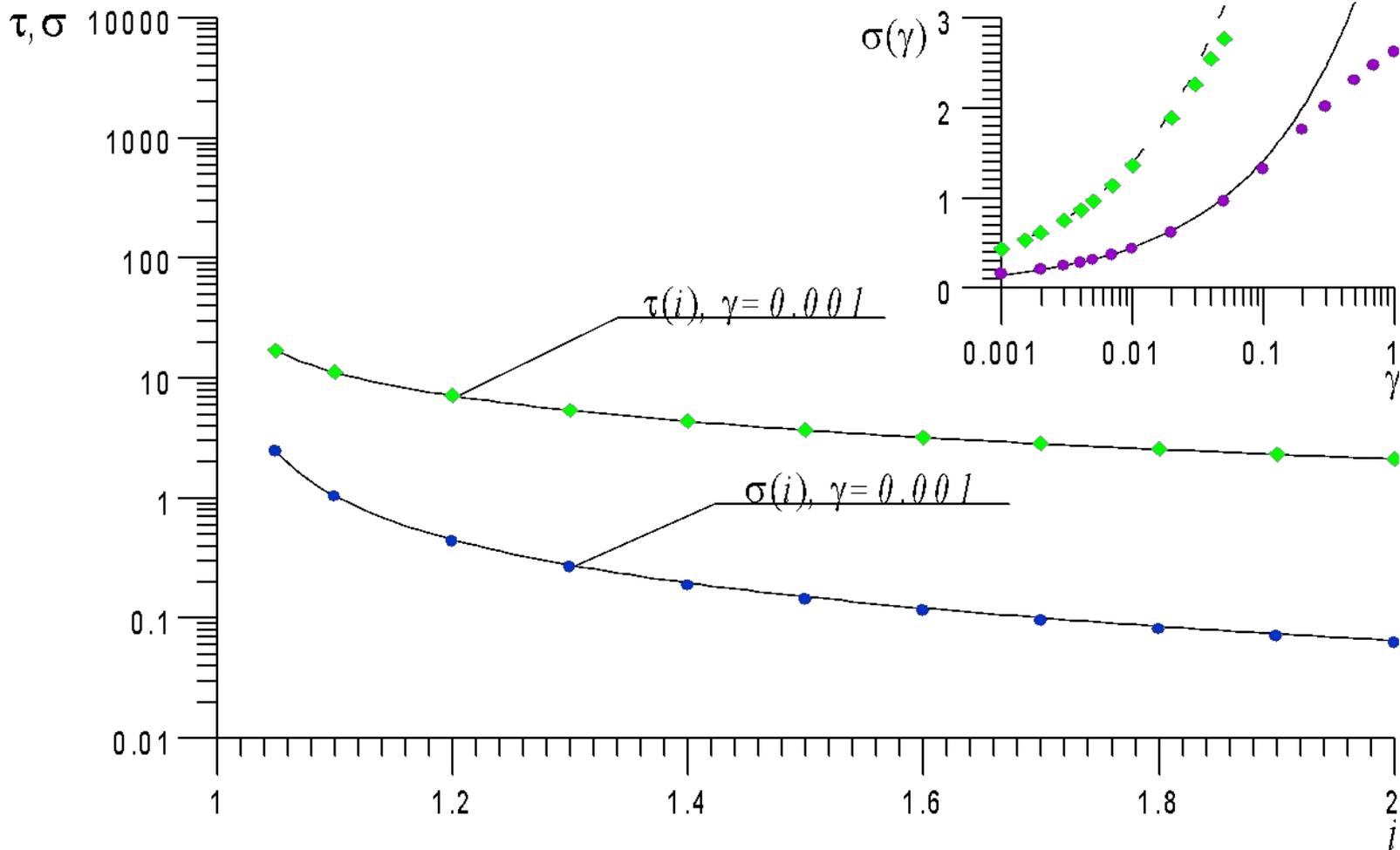
A.N. Malakhov, and A.L. Pankratov, Physica C, 269, 46 (1996).

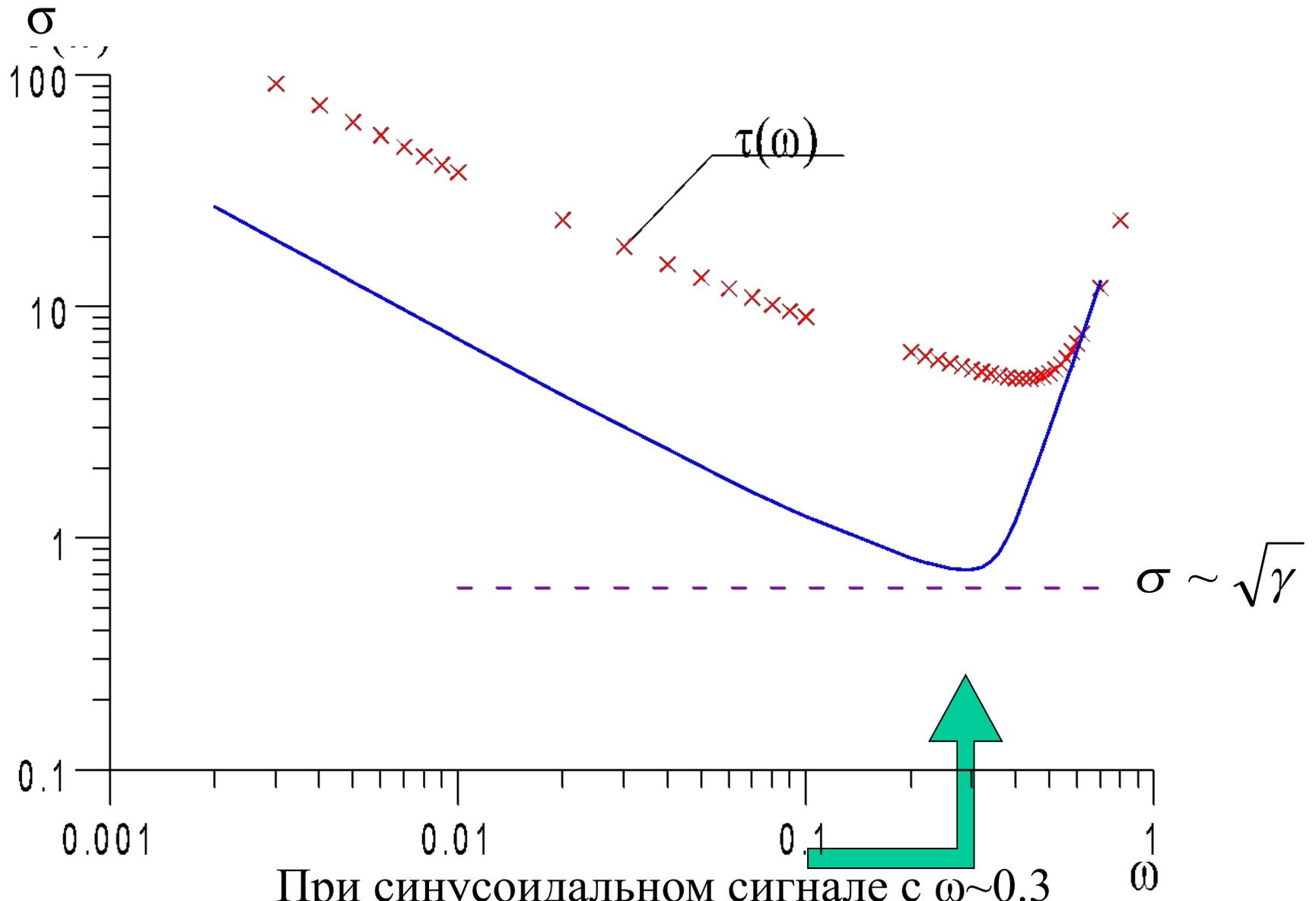
A.L. Pankratov and B. Spagnolo, Phys. Rev. Lett., 93, 177001 (2004).

V.K. Semenov and A. Inamdar, IEEE Trans. Appl. Supercond., 15, 435 (2005).

A.V. Gordeeva and A.L. Pankratov, Appl. Phys. Lett., 88, 022505 (2006).

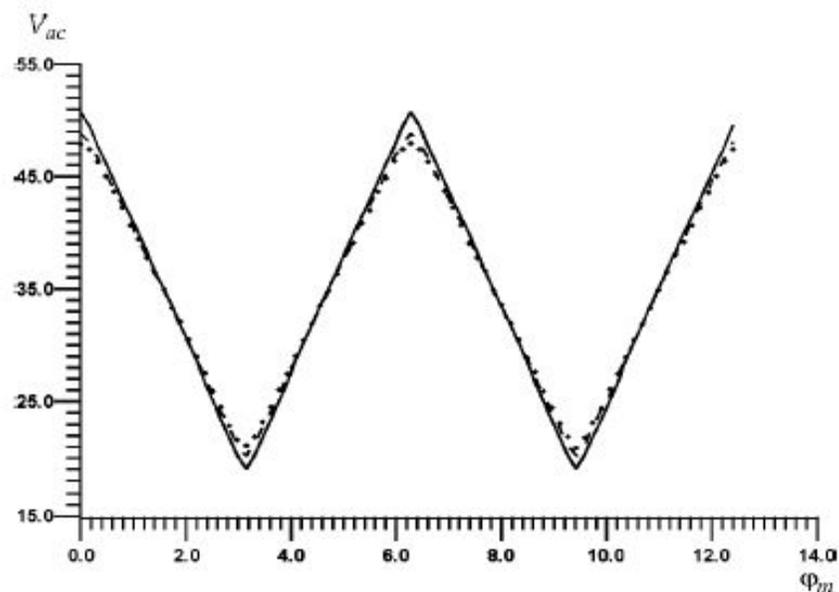
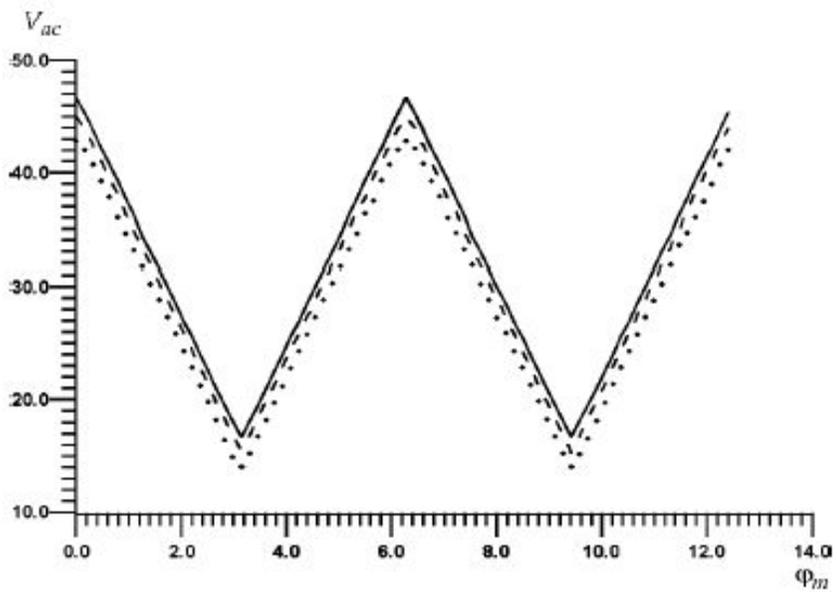
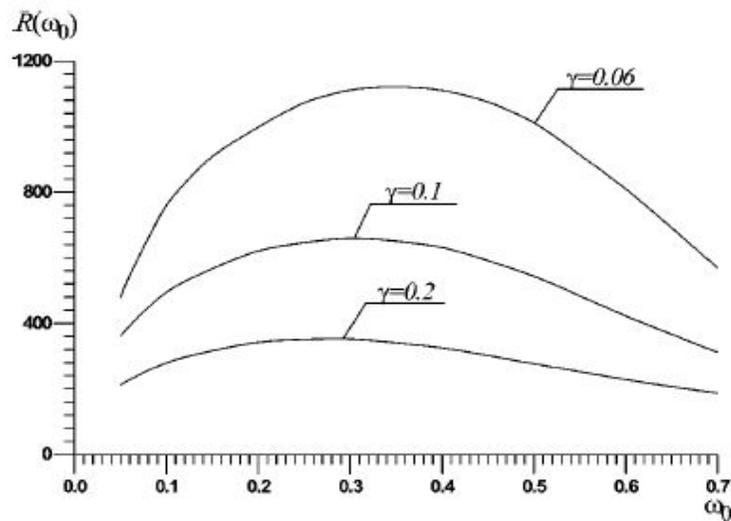
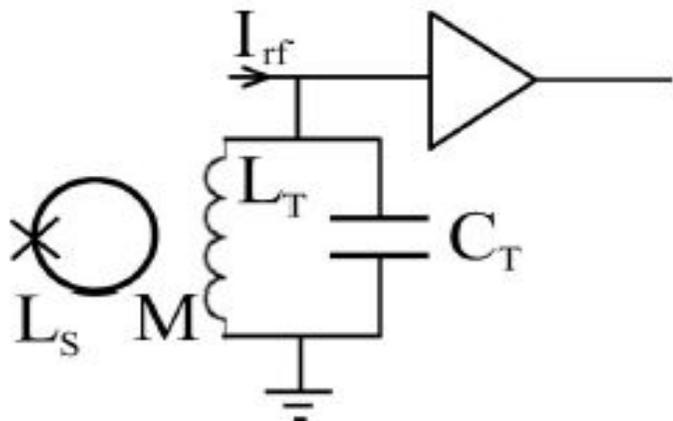
$$\sigma = \frac{1}{\omega_C} \sqrt{2\gamma[F(\varphi_2, \varphi_0) + f_3(\varphi_2, \varphi_0)] + \dots}$$





При синусоидальном сигнале с $\omega \sim 0.3$
 практически достигается СО для
 телеграфного сигнала

Повышение чувствительности СВЧ СКВИДа



Высокоскоростное переключение магнитных диполей

Уравнение Ландау-Лифшица

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} \left[\vec{M} \times \vec{H}_{eff} \right] - \frac{\gamma\alpha}{(1+\alpha^2)M_s} \left[\vec{M} \times \left[\vec{M} \times \vec{H}_{eff} \right] \right]$$

γ - гиромагнитная константа, α - затухание

M_s - намагниченность насыщения

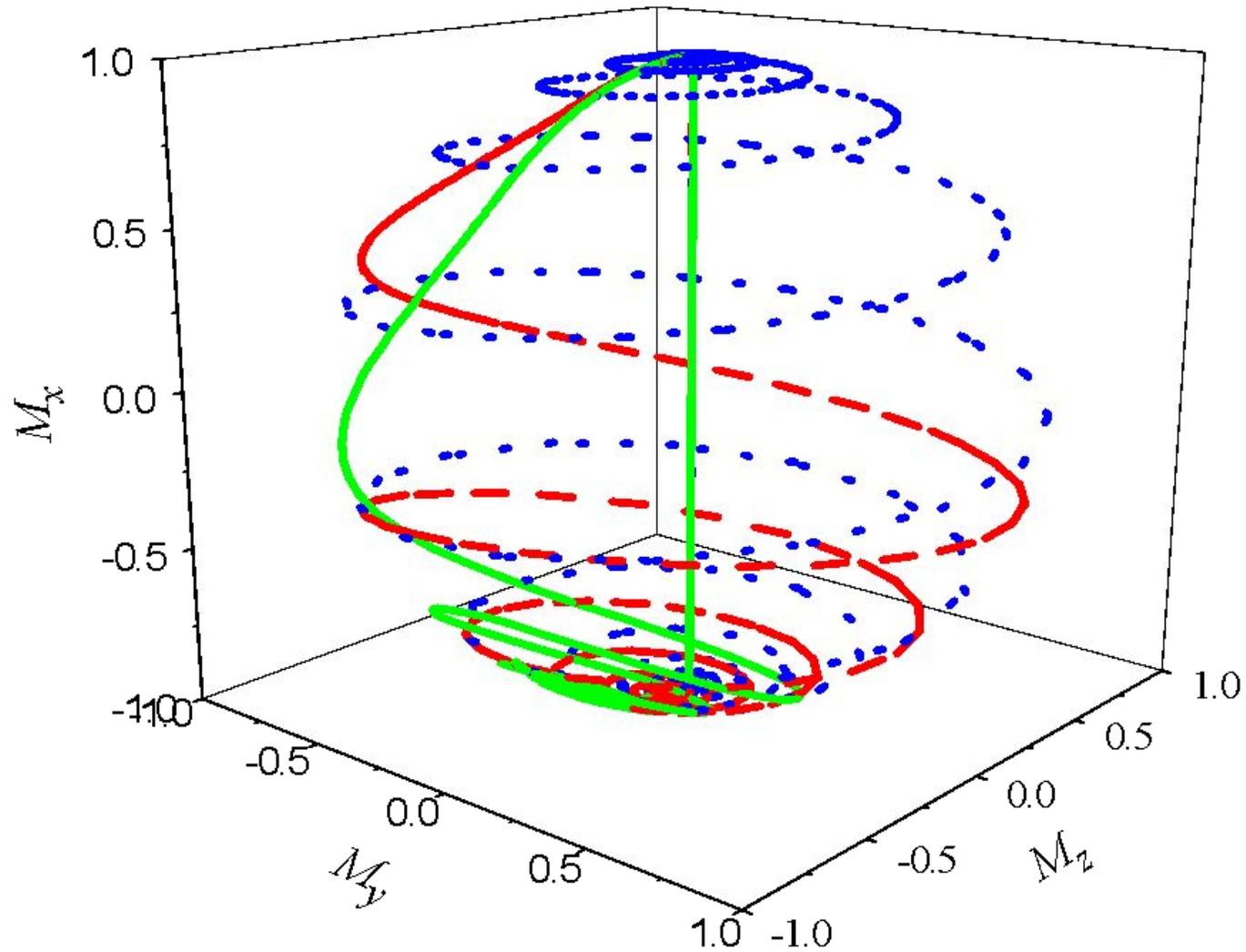
$$\vec{H}_{eff} = \vec{H}_a + \vec{H}_e + \vec{H}_T$$

$$\langle \vec{H}_T(t; \vec{r}) \rangle = 0 \quad \sigma^2 = \frac{2\alpha kT}{\gamma M_s V}$$

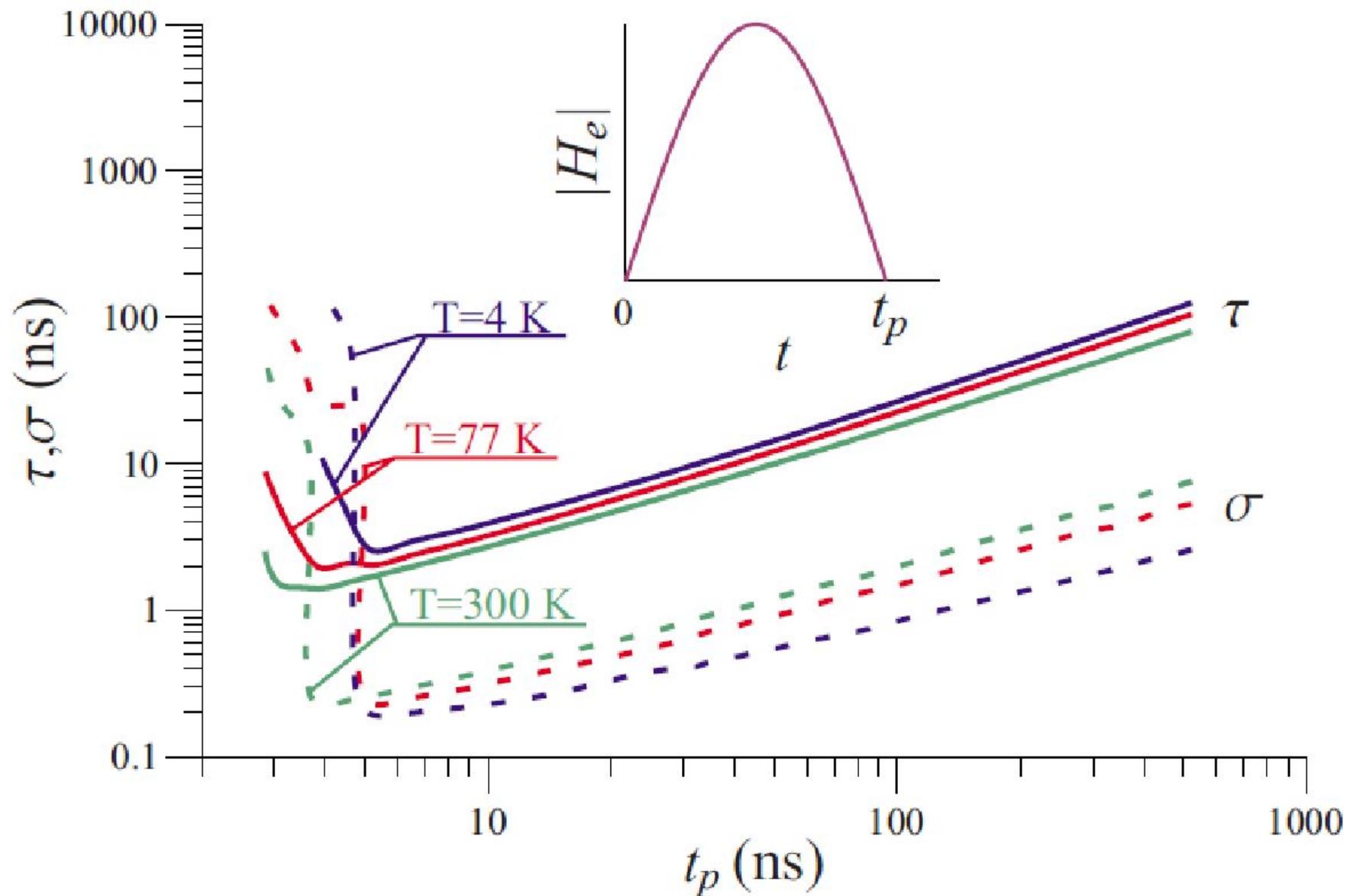
$$\langle H_i(t; \vec{r}), H_j(t'; \vec{r}') \rangle = \sigma^2 \delta(t-t') \delta(\vec{r} - \vec{r}') \delta_{ij}$$

$$\vec{H}_a(\vec{r}) = \frac{2K_a}{M_s^2} \left(\vec{M}(\vec{r}), \vec{n}_a \right)$$

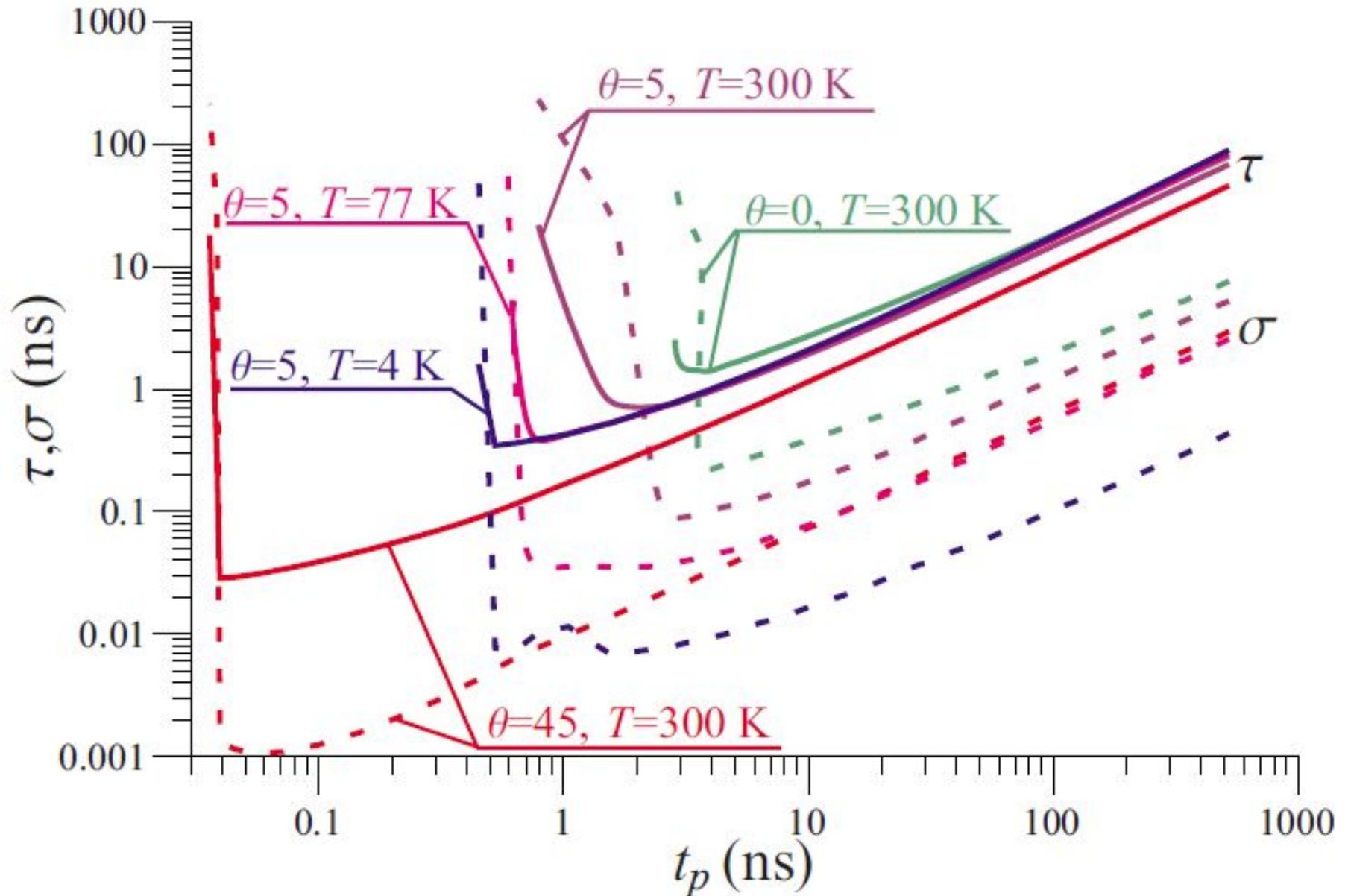
Перемагничивание при различных углах



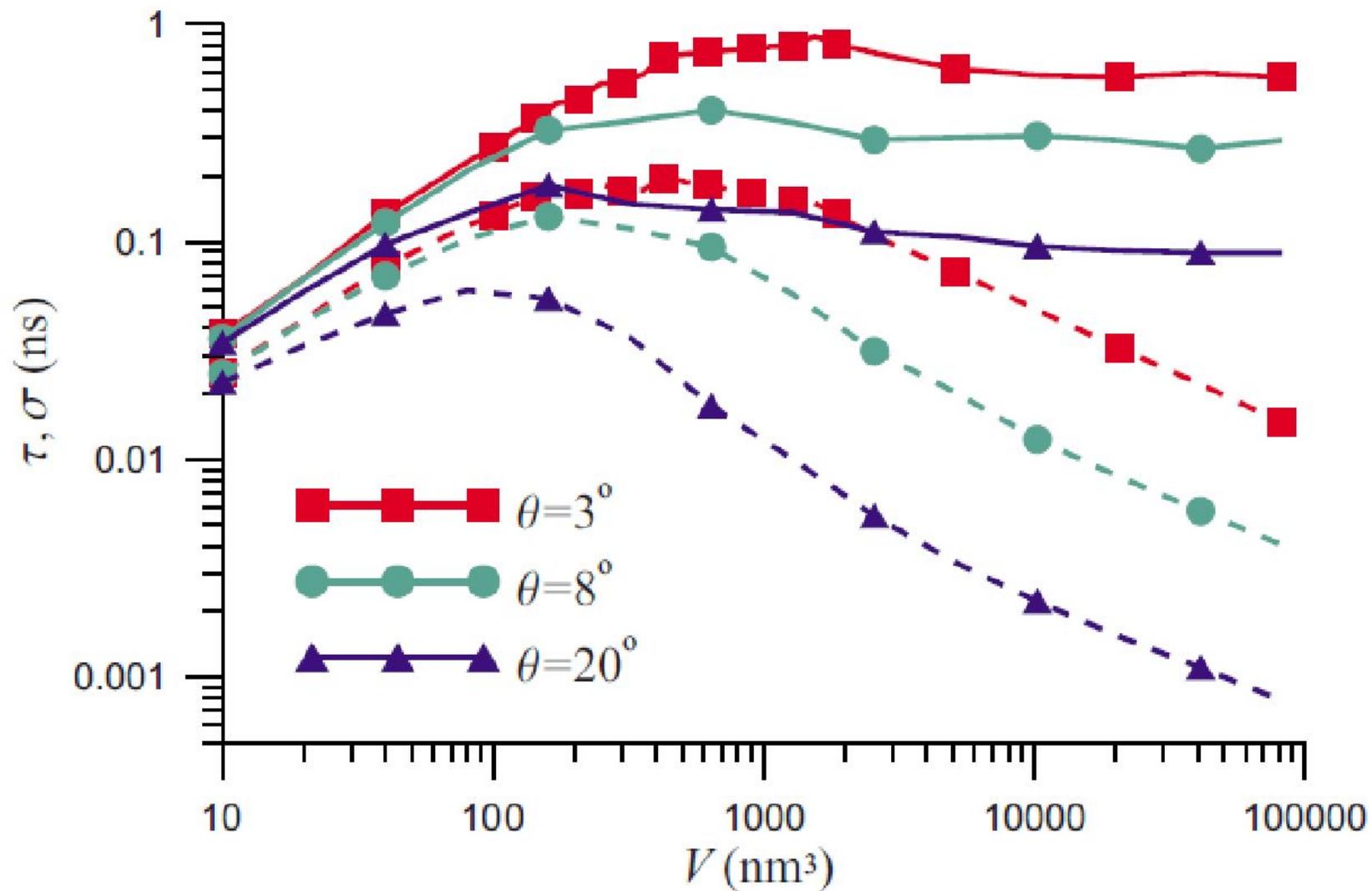
Осевая симметрия

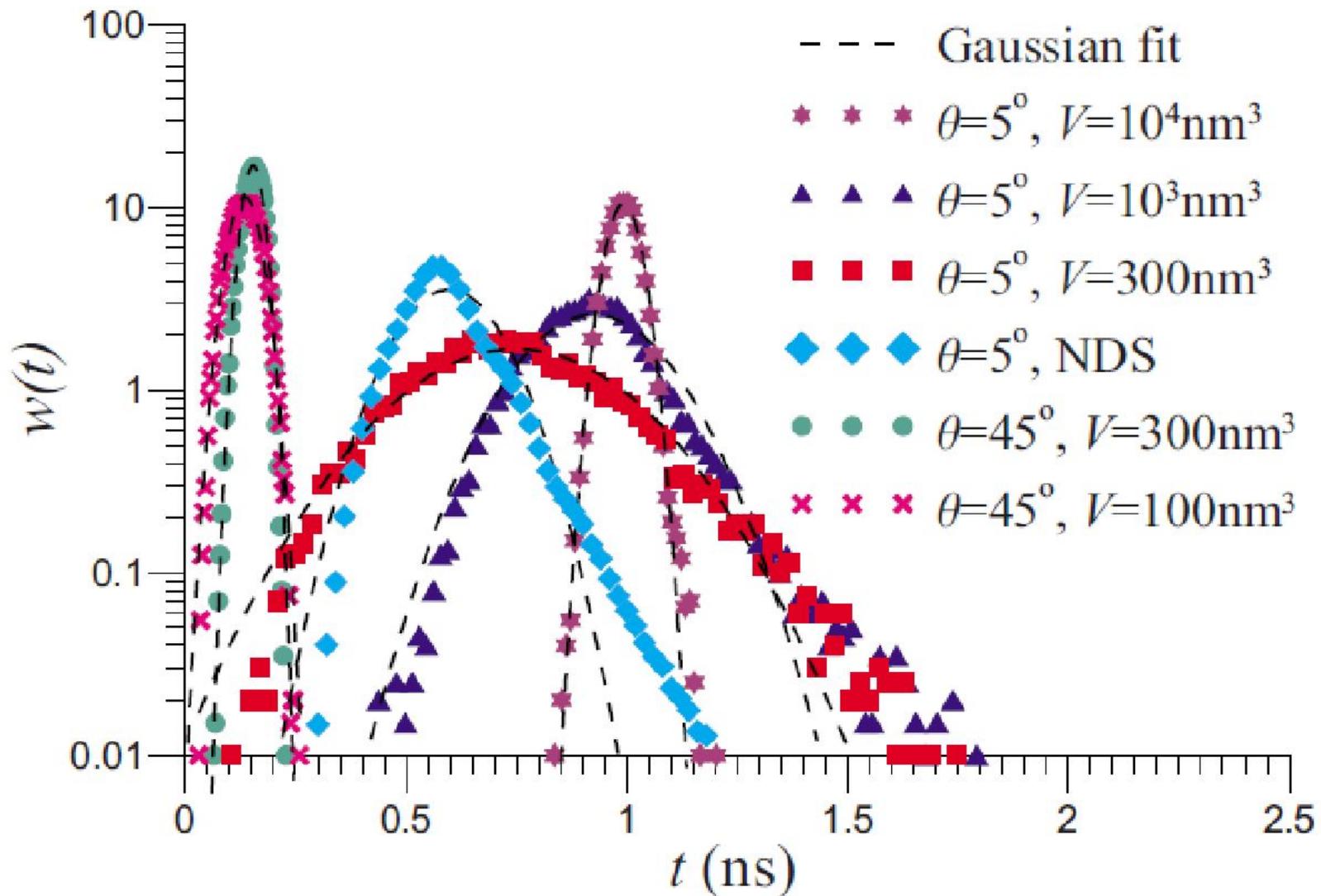


Углы 0, 5, 45 градусов



Зависимости от объёма частицы

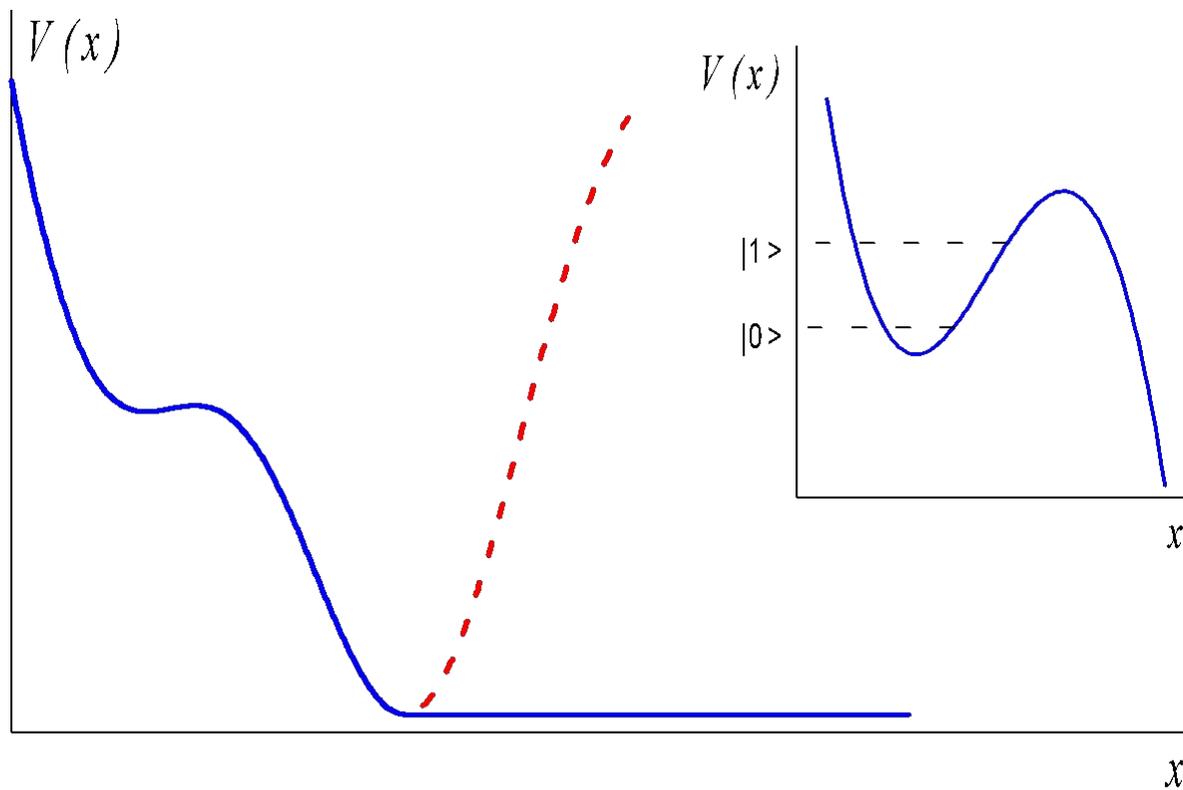




A.L. Pankratov, S.N. Vdovichev, I.M. Nefedov, Physical Review B, 78, 052401 (2008).
 A.A. Smirnov, A.L. Pankratov, Physical Review B, 82, 132405 (2010).
 A.L. Pankratov, S.N. Vdovichev, I.M. Nefedov, I.R. Karetnikova, Journal of Applied Physics, 109, 033906 (2011).

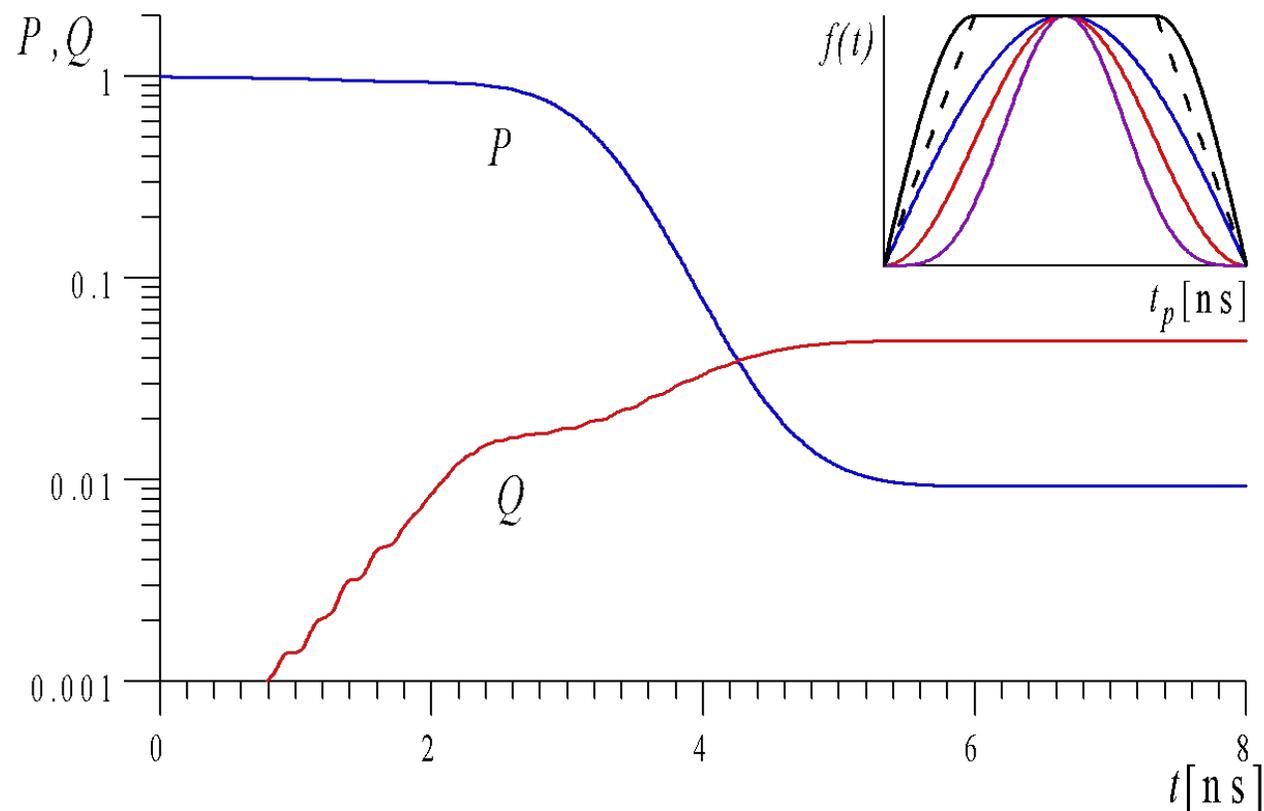
Оптимальное быстрое считывание состояния кубита

$$i \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{2e^2}{\hbar C} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + \frac{V(x, t)}{\hbar} \Psi(x, t)$$



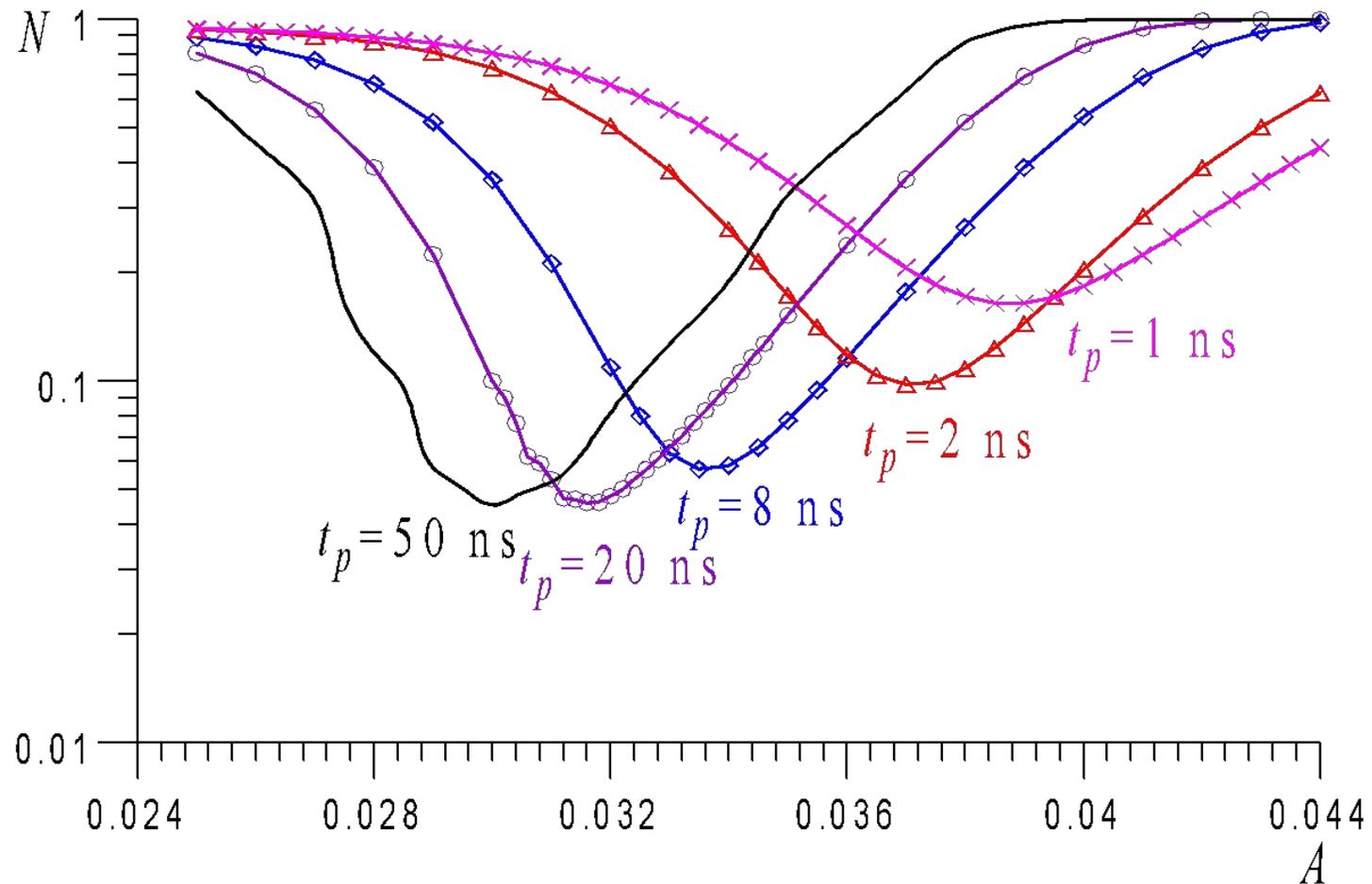
Эволюция вероятности

$$N = P(t_p) + Q(t_p) = P_{10} + P_{01}, \quad F = 1 - N$$

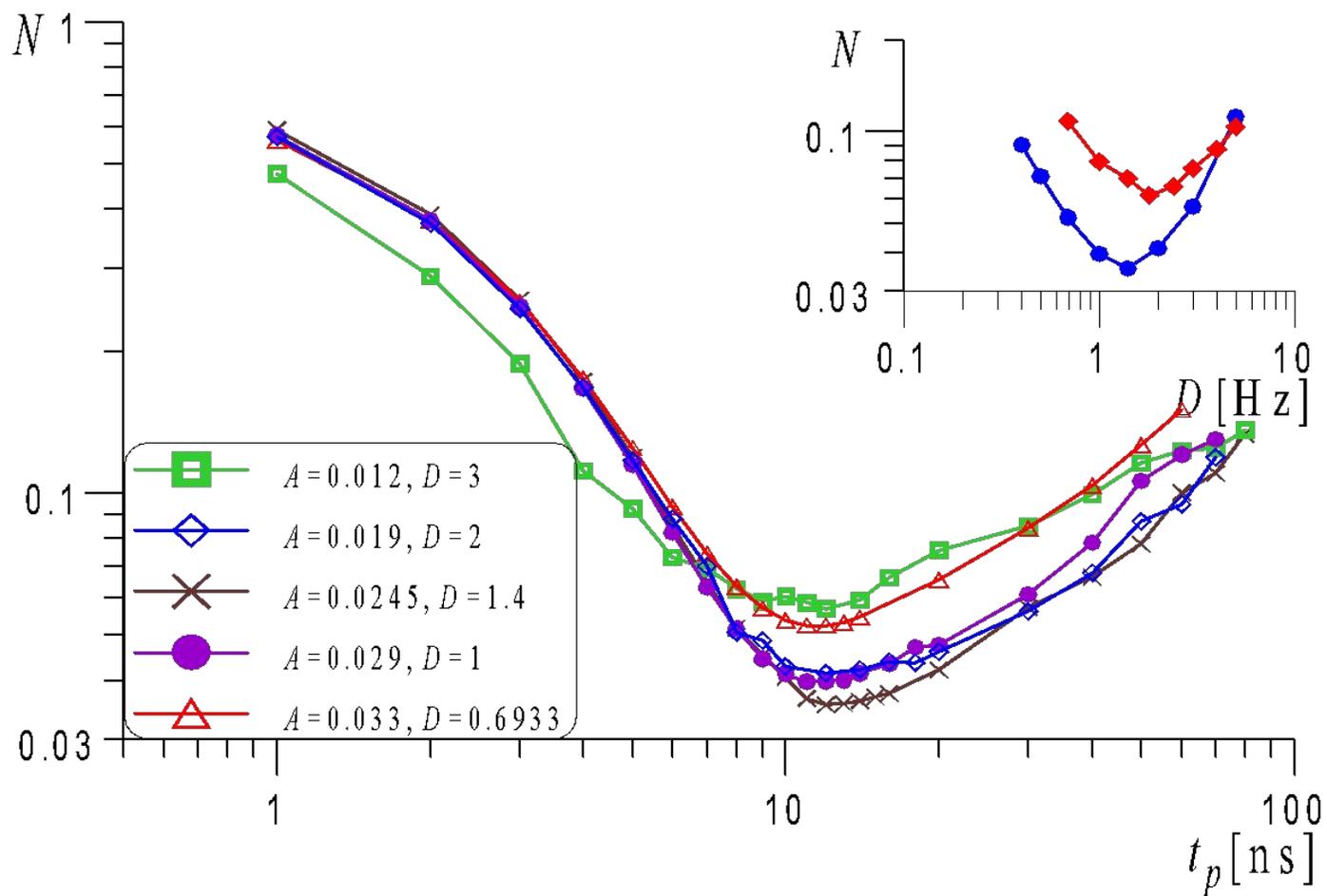


Q. Zhang, A. G. Kofman, J. M. Martinis, and A. N. Korotkov,
Phys. Rev. B **74**, 214518 (2006).

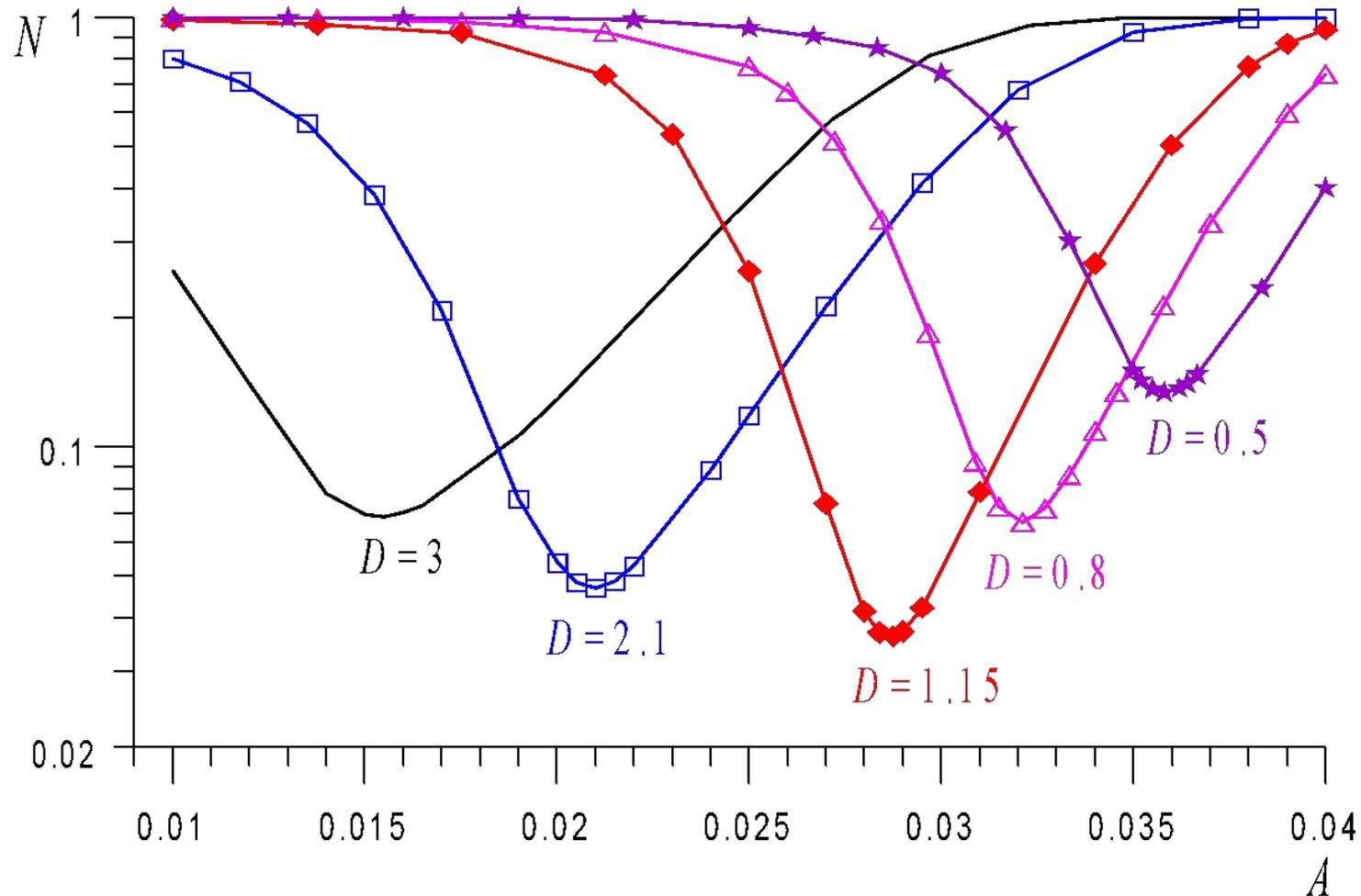
Ошибка считывания как функция амплитуды импульса



Ошибка считывания как функция длительности импульса



Ошибка считывания как функция глубины потенциальной ямы



A.L. Pankratov and A.S. Gavrilov, Phys. Rev. B, 81, 052501 (2010).

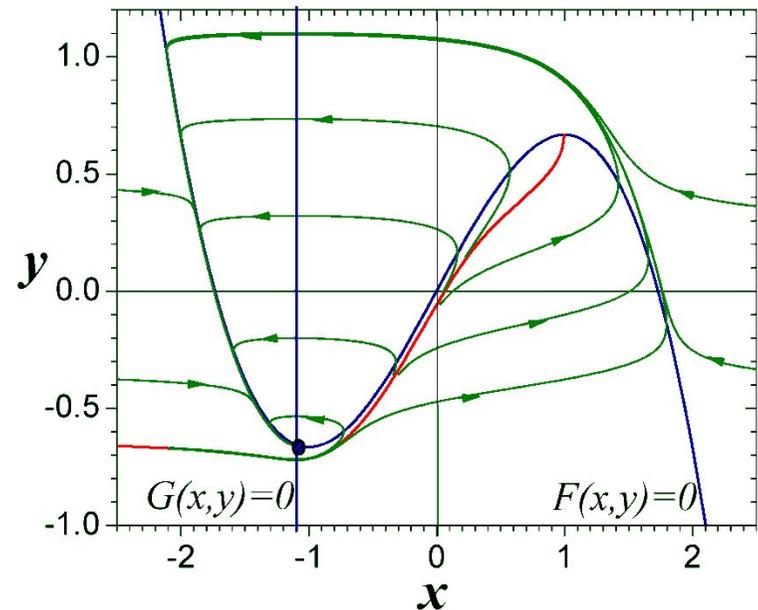
L.S. Revin and A.L. Pankratov, Appl. Phys. Lett., 98, 162501 (2011).

Модели нейронов

Модель **ФитцХью-Нагумо** – двумерная модель, качественно описывающая способность нервной клетки генерировать импульсы действия. Одна из переменных модели, x , носит название переменной возбуждения (*excitation variable*) и имеет быстрый характер изменения во времени. Другая – восстанавливающая (*recovery variable*) переменная y – изменяется медленно:

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x, y) = x - x^3 / 3 - y \\ \dot{y} = G(x, y) = \varepsilon(x + I) \end{cases}$$

Фазовый портрет автономной системы ФитцХью-Нагумо. Синим цветом изображены изоклины горизонтальных и вертикальных наклонов; красным – линия, разделяющая потоки траекторий. Возможные фазовые траектории, полученные при различных начальных условиях, изображены зеленым цветом.



Модель **Ходжкина-Хаксли** – четырехмерная модель нервной клетки, описывающая возбудимые свойства мембран с помощью уравнений баланса ионных токов через мембрану.

$$C_m \frac{dv}{dt} = -G_K n^4 (v - v_K) - G_{Na} m^3 h (v - v_{Na}) - G_L (v - v_L) + S(t) + \xi(t);$$

$$\frac{dm}{dt} = \alpha_m (1 - m) - \beta_m m; \quad \frac{dh}{dt} = \alpha_h (1 - h) - \beta_h h; \quad \frac{dn}{dt} = \alpha_n (1 - n) - \beta_n n.$$

Здесь v задает отклонение мембранного потенциала от равновесного состояния ($V = V_{eq} + v$). Шум $\xi(t)$ - белый гауссов с нулевым средним и корреляционной функцией $\langle \xi(t)\xi(t+\tau) \rangle = D\delta(\tau)$.

Влияние шума на возникновение спайков в системе рассматривается в условиях существования внешнего надпорогового периодического воздействия $S(t) = A \sin(2\pi ft + \phi_0)$.

Значения параметров максимальных проводимостей для натриевого, калиевого каналов и канала утечки соответственно равны:

$$G_{Na} = 120 \text{ mS/cm}^2, \quad G_K = 36 \text{ mS/cm}^2, \quad G_L = 0.3 \text{ mS/cm}^2;$$

$$\text{Емкость мембраны } C_m = 1 \text{ }\mu\text{F/cm}^2.$$

$$\text{Равновесные потенциалы: } v_{Na} = 115 \text{ mV}, \quad v_K = -12 \text{ mV}, \quad v_L = 10.6 \text{ mV}.$$

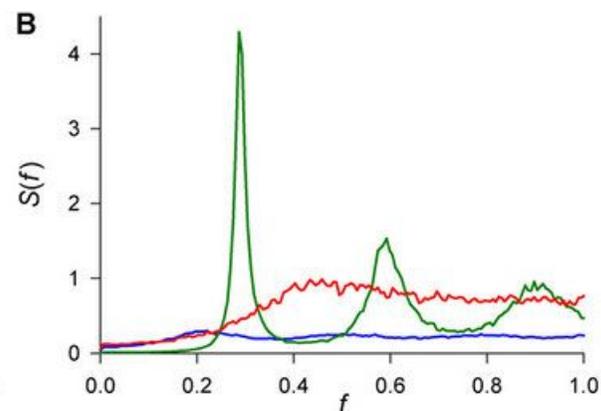
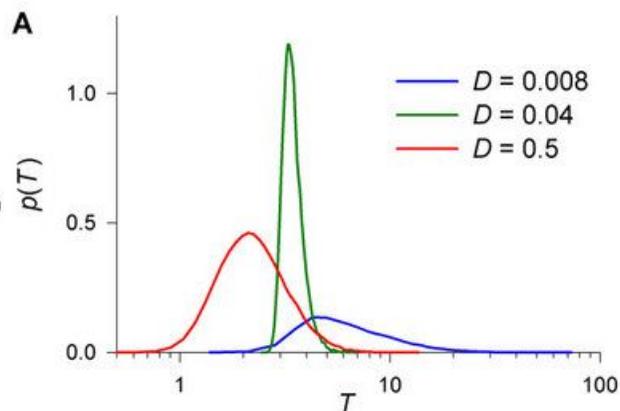
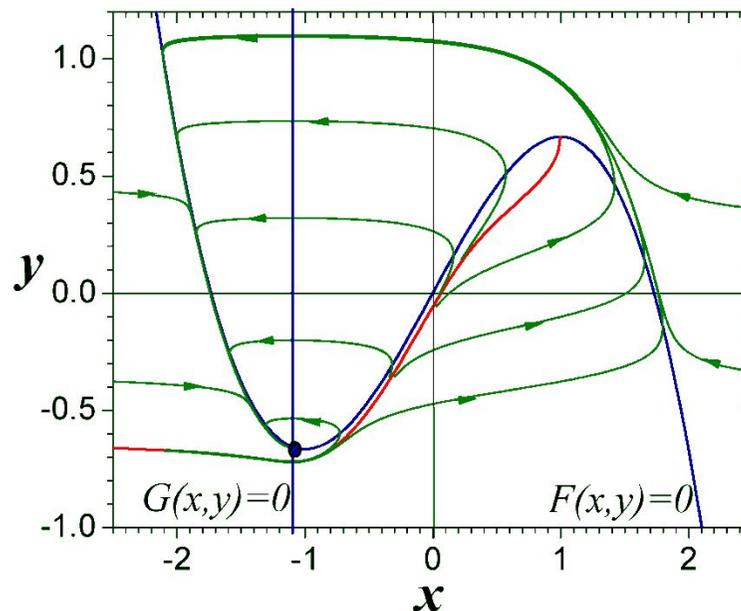
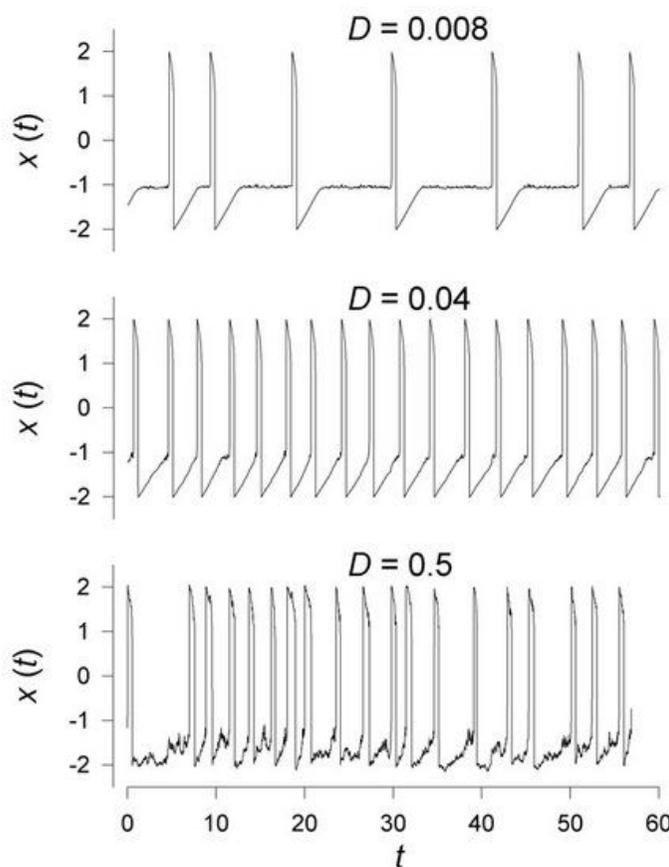
В результате анализа кинетических кривых активации и инактивации А. Ходжкиным и А. Хаксли были построены графические зависимости скоростей $\alpha_m, \beta_m, \alpha_n, \beta_n, \alpha_h, \beta_h$ от мембранного потенциала и подобраны эмпирические соотношения, описывающие ход указанных зависимостей:

$$\alpha_m = \frac{0.1(25 - v)}{\exp\{(25 - v)/10\} - 1}; \quad \alpha_n = \frac{0.01(10 - v)}{\exp\{(10 - v)/10\} - 1}; \quad \alpha_h = 0.07 \exp\left\{\frac{-v}{20}\right\};$$

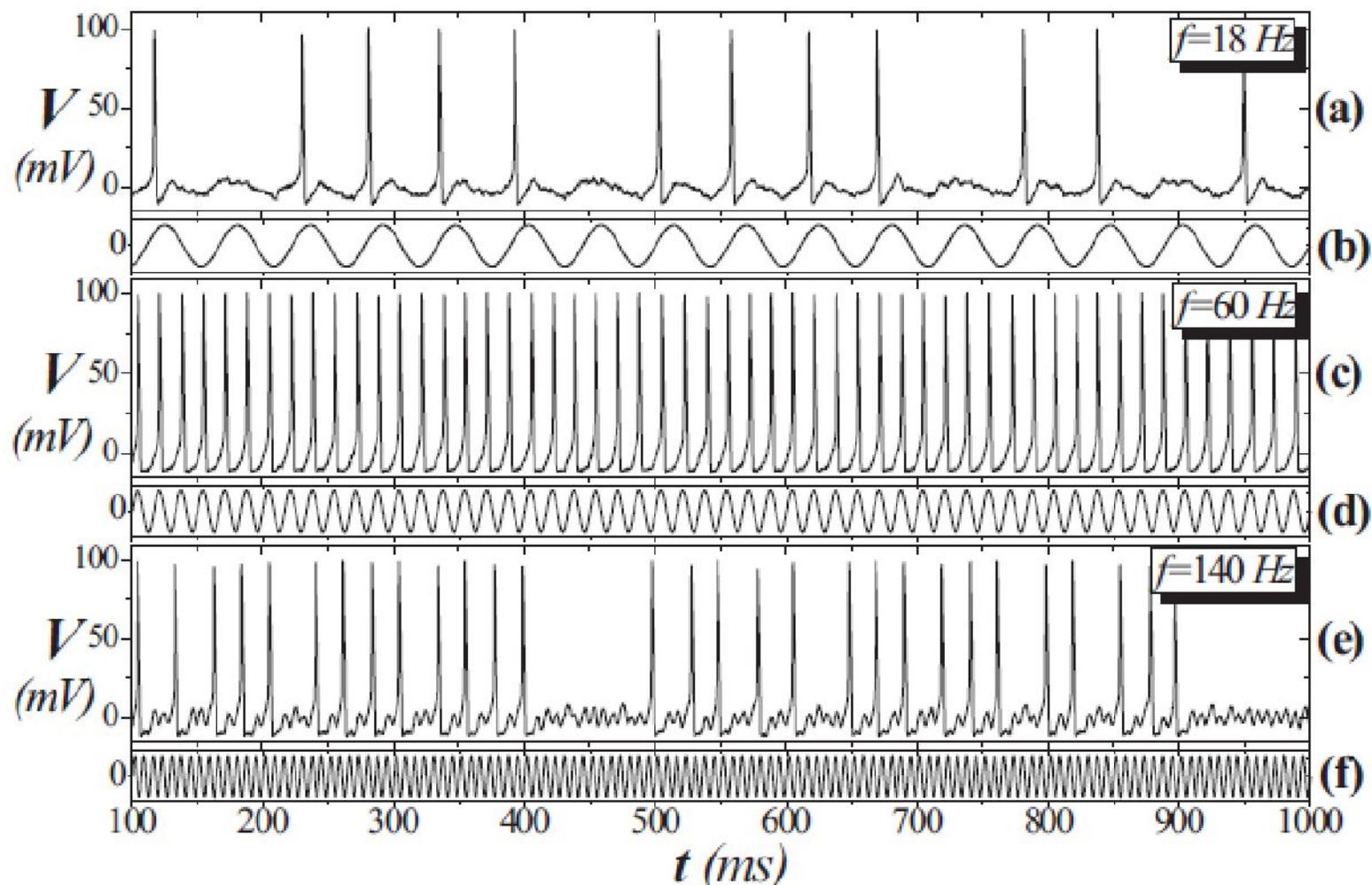
$$\beta_m = 4 \exp\left\{\frac{-v}{80}\right\}; \quad \beta_n = 0.125 \exp\left\{\frac{-v}{80}\right\}; \quad \beta_h = (\exp\{(30 - v)/10\} + 1)^{-1};$$

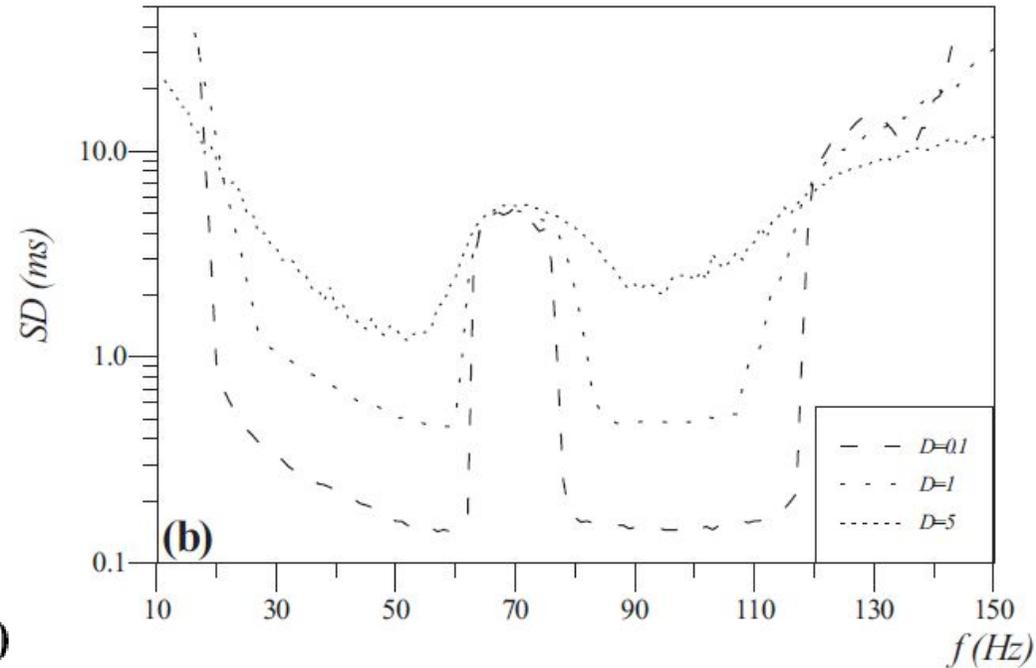
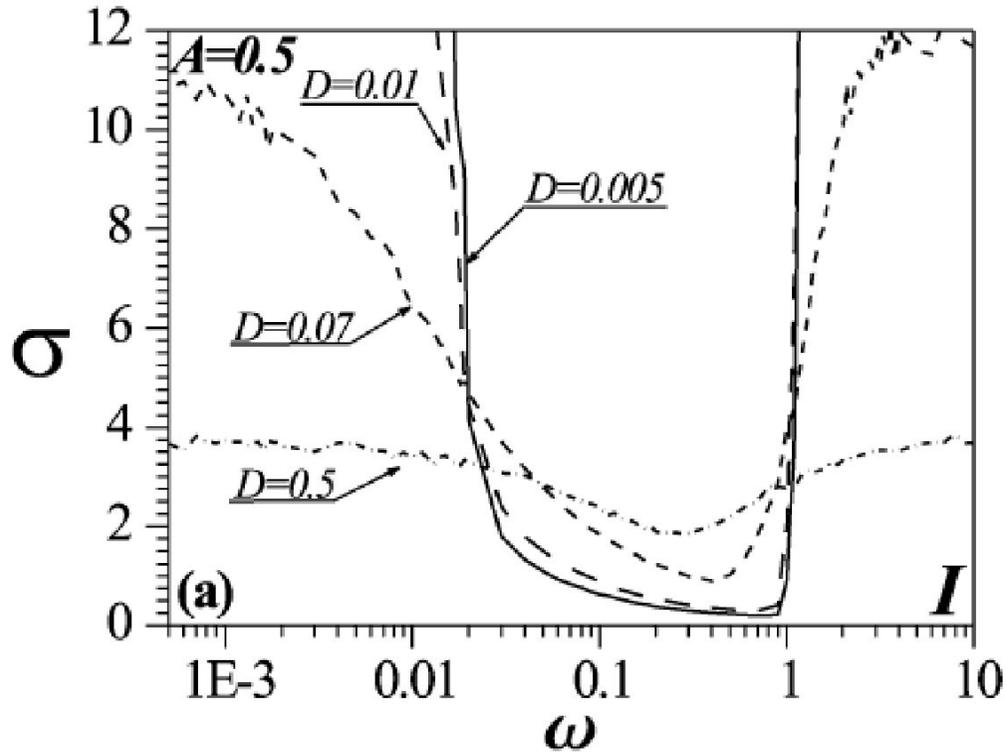
Когерентный резонанс

Pikovsky AS, Kurths J, Coherence resonance in a noise-driven excitable system. Physical Review Letters 78:775-778 (1997).



Подавление шума в нейронных системах





- E.V. Pankratova, V.N. Belykh and E. Mosekilde, Eur. Phys. Journal B, 00401 (2006).
 E.V. Pankratova, A.V. Polovinkin and B. Spagnolo, Phys. Lett. A, 344, 43 (2005).
 E.V. Pankratova, A.V. Polovinkin and E. Mosekilde, Eur. Phys. Journ. B, 45, 391 (2005).

**Спасибо за
внимание!**

