

Szum w urządzeniu półprzewodnikowym przeszkoda czy szansa?

szczegółowe zastosowania kwantowego szumu őrutowego

J. Tworzydło

Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Warszawski

Symposium Instytutu Fizyki Teoretycznej, Warszawa

Szum w urządzeniu mezoskopowym przeszkoda czy szansa?

szczegółowe zastosowania kwantowego szumu ściągowego

J. Tworzydło

Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Warszawski

Symposium Instytutu Fizyki Teoretycznej, Warszawa

Plan

- 1 Wprowadzenie
 - Urządzenia mezoskopowe
 - Koherentny, kwantowy transport elektronów

- 2 Szum
 - Układ eksperymentalny
 - Ładunek elementarny elektronu (kwazicząstki)
 - Otwarte kanały transmisji

- 3 Zastosowania
 - Zgadanie przejścia kwantowo – klasycznego
 - Detekcja stanów splecionych

Plan

- 1 Wprowadzenie
 - Urządzenia mezoskopowe
 - Koherentny, kwantowy transport elektronów
- 2 Szum
 - Układ eksperymentalny
 - Ładunek elementarny elektronu (kwazicząstki)
 - Otwarte kanały transmisji
- 3 Zastosowania
 - Zgadanie przejścia kwantowo – klasycznego
 - Detekcja stanów splecionych

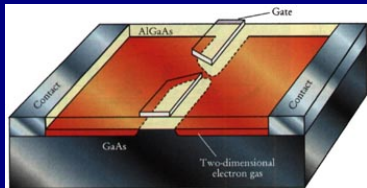
Plan

- 1 Wprowadzenie
 - Urządzenia mezoskopowe
 - Koherentny, kwantowy transport elektronów
- 2 Szum
 - Układ eksperymentalny
 - Ładunek elementarny elektronu (kwazicząstki)
 - Otwarte kanały transmisji
- 3 Zastosowania
 - Zgadanie przejścia kwantowo – klasycznego
 - Detekcja stanów splecionych

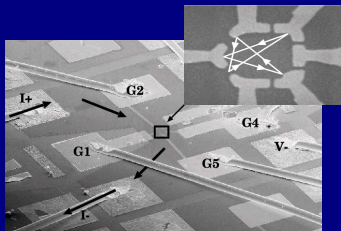
Plan

- 1 Wprowadzenie
 - Urządzenia mezoskopowe
 - Koherentny, kwantowy transport elektronów
- 2 Szum
 - Układ eksperymentalny
 - Ładunek elementarny elektronu (kwazicząstki)
 - Otwarte kanały transmisji
- 3 Zastosowania
 - Zgadanie przejścia kwantowo – klasycznego
 - Detekcja stanów splecionych

Kontakt punktowy i kropka kwantowa

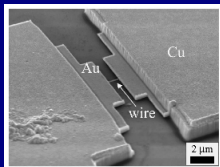


heterostruktura na GaAs,
napięte elektrody
⇒ kwantowy kontakt punktowy

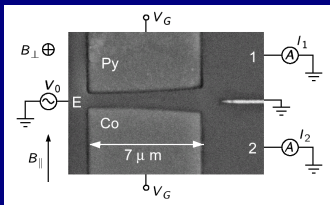


balistyczna, chaotyczna
kropka kwantowa
Oberholzer et al. PRL'01

Druty kwantowe

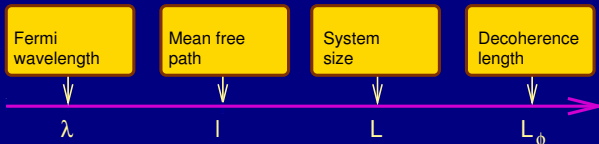


dyfuzyjny drut kwantowy
Henny et al. PRB '99



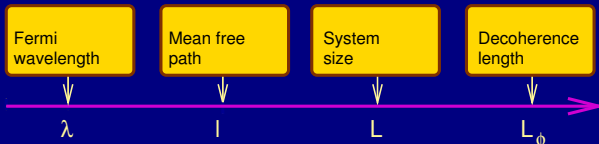
balistyczny/dyfuzyjny
 drut kwantowy z
 mikromagnesami
 ⇒ filtr spinowy
Wróbel et al. PRL '04

Charakterystyczne skale długości



- **Obszar naszych zainteresowań**
 - ważne efekty kwantowe
 - koniecznie wymagane: $L < L_\phi$
- Układy:
 - kontakt punktowy $w \approx \lambda_F$
 - dyfuzyjny drut $l_{free} < L$
 - balistyczna kropka $l_{free} > L$

Charakterystyczne skale długości

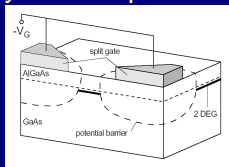


- Obszar naszych zainteresowań
 - ważne efekty kwantowe
 - koniecznie wymagane: $L < L_\phi$
- Układy:
 - kontakt punktowy $w \approx \lambda_F$
 - dyfuzyjny drut $l_{\text{free}} < L$
 - **balistyczna** kropka $l_{\text{free}} > L$

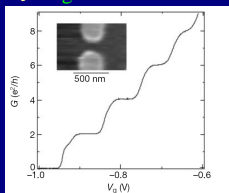
Kwantowe stopnie przewodności

$G = I/V$ wielkością fundamentalną ($G \neq \sigma W/L$)

kwantowy kontakt punktowy (QPC)



G w funkcji V_{gate}



Przewodność jako transmisja

$$G = \frac{2e^2}{h} \sum_n T_n,$$

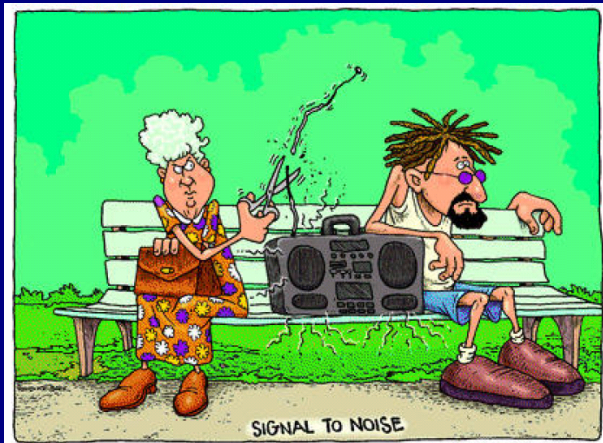
prawd. transmisji – T_n .

Plan

- 1 Wprowadzenie
 - Urządzenia mezoskopowe
 - Koherentny, kwantowy transport elektronów
- 2 Szum
 - Układ eksperymentalny
 - Ładunek elementarny elektronu (kwazicząstki)
 - Otwarte kanały transmisji
- 3 Zastosowania
 - Zgadanie przejścia kwantowo – klasycznego
 - Detekcja stanów splecionych

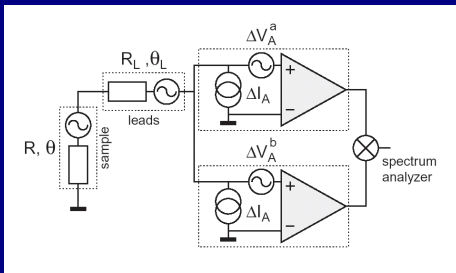
Co to jest szum?

– zależy kogo spytać ...

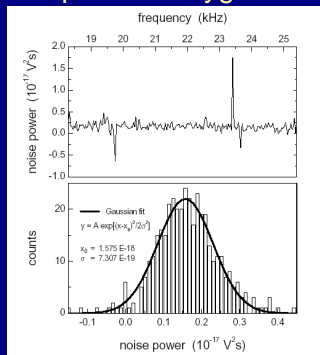


Jak zmierzyć?

- pomiar korelacyjny wzmacnionych sygnałów
- .. do analizatora spektralnego



Analiza spektralna sygnału AC



- nowe układy: J. Przybytek (Hoża), J. Wróbel (IF PAN)

Cechy szumu  rutowego

Gęstość spektralna szumu

$$S_I = \langle \delta I(\nu)^2 \rangle / \Delta \nu$$

- filtrami kontrolujemy $\Delta \nu$
- $1/f$ szum $\lesssim 10\text{kHz}$
- szum niezależny od ν
 $\gtrsim 10\text{kHz}$

Funkcja korelacji

$$S_I(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{2\pi i \nu t} \langle \delta I(t) \delta I(0) \rangle$$

Fundamentalne
źródła szumu:

- termiczne fluktuacje obsadzeń
- dyskretna natura ładunku

Szum kuleczek

Argument statystyki Poissona

- m kolejnych prób, z prawd. T w czasie τ
- prawdopodobieństwo transmisji n cząstek
$$p_m(n) = \binom{n}{m} T^n (1 - T)^{m-n}$$
- wtedy $\langle n \rangle = mT$ oraz $\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle n \rangle$
(dla $n \gg 1$, $mT = \text{const.}$)
- prąd $I = ne/\tau$, fluktuacja $\langle \delta I^2 \rangle = e \langle I \rangle / \tau$
- gęstość spektralna szumu (dla $\nu \ll \tau^{-1}$) $S_I = 2e \langle I \rangle$

Szum kuleczek

Argument statystyki Poissona

- m kolejnych prób, z prawd. T w czasie τ
- prawdopodobieństwo transmisji n cząstek
 $p_m(n) = \binom{n}{m} T^m (1 - T)^{n-m}$
- wtedy $\langle n \rangle = mT$ oraz $\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle n \rangle$
(dla $n \gg 1$, $mT = \text{const.}$)
- prąd $I = ne/\tau$, fluktuacja $\langle \delta I^2 \rangle = e \langle I \rangle / \tau$
- gęstość spektralna szumu (dla $\nu \ll \tau^{-1}$) $S_I = 2e \langle I \rangle$

Szum kuleczek

Argument statystyki Poissona

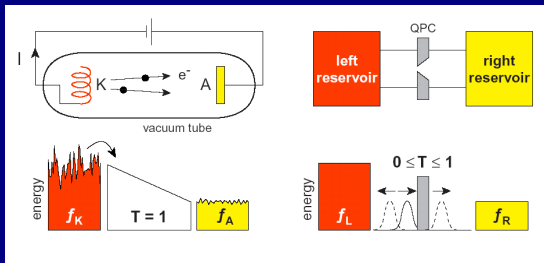
- m kolejnych prób, z prawd. T w czasie τ
- prawdopodobieństwo transmisji n cząstek
$$p_m(n) = \binom{n}{m} T^n (1 - T)^{m-n}$$
- wtedy $\langle n \rangle = mT$ oraz $\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle n \rangle$
(dla $n \gg 1$, $mT = \text{const.}$)
- prąd $I = ne/\tau$, fluktuacja $\langle \delta I^2 \rangle = e \langle I \rangle / \tau$
- gęstość spektralna szumu (dla $\nu \ll \tau^{-1}$) $S_I = 2e \langle I \rangle$

Szum kuleczek

Argument statystyki Poissona

- m kolejnych prób, z prawd. T w czasie τ
- prawdopodobieństwo transmisji n cząstek
 $p_m(n) = \binom{n}{m} T^n (1 - T)^{m-n}$
- wtedy $\langle n \rangle = mT$ oraz $\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle n \rangle$
(dla $n \gg 1$, $mT = \text{const.}$)
- prąd $I = ne/\tau$, fluktuacja $\langle \delta I^2 \rangle = e \langle I \rangle / \tau$
- gęstość spektralna szumu (dla $\nu \ll \tau^{-1}$) $S_I = 2e \langle I \rangle$

Szum śrutowy Shottky'ego



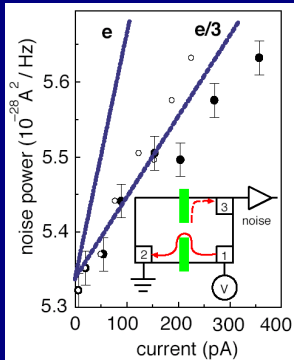
Wzór Shottky'ego 1918

$$S_I = 2eI$$

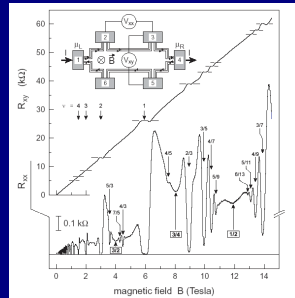
- ⇒ zastosowanie do wyznaczania ładunku w triodzie
(Am. Jour. Phys. **63**, 932 (1995))
- ⇒ Reznikov et al. PRL '95 dla bariery tunelowej

Ładunek ułamkowy

Kwazicząstki w ułamkowym zjawisku Halla (FQHE): $e^* = e/3$



Saminadayar et al. PRL '97



Formalizm Landauera i redukcja szumu

- granica niskiej temperatury, kwazi-równowaga ($eV \gg k_B T$):
 $S_{\text{shot}} = 2e \langle I \rangle F$
- cząstki niezależne $F = 1$, typowo $F < 1$ dla elektronów

Czynnik Fano
 redukcja szumu wobec
 zakazu Pauliego

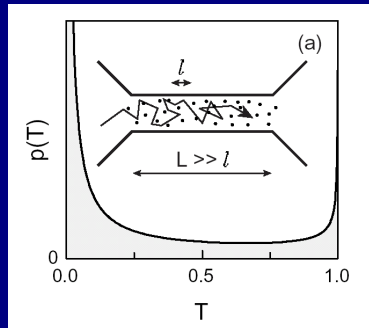
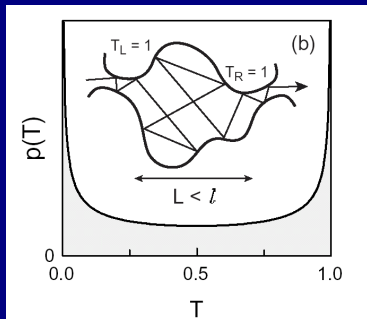
$$F = \frac{\sum_n T_n (1 - T_n)}{\sum_n T_n}$$

Przewodność

$$G = G_0 \sum_n T_n$$

Review: Blanter and Büttiker, Phys. Rep. '00

Otwarte mody transmisji



- $G = N/2$ w obu przypadkach
- $F = \frac{1}{3}$ – kwantowy drut dyfuzyjny *Steinbach, Devoret PRL '96*
- $F = \frac{1}{4}$ – kropka kwantowa *Oberholzer PRL'01*

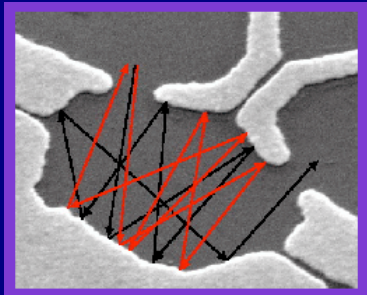
Plan

- 1 Wprowadzenie
 - Urządzenia mezoskopowe
 - Koherentny, kwantowy transport elektronów
- 2 Szum
 - Układ eksperymentalny
 - Ładunek elementarny elektronu (kwazicząstki)
 - Otwarte kanały transmisji
- 3 Zastosowania
 - Zgadanie przejścia kwantowo – klasycznego
 - Detekcja stanów splecionych

Dualizm korpuskularno – falowy

Beenakker, van Houten '91

*Agam, Aleiner, Larkin Phys. Rev. Lett. **85**, 3153 (00)*



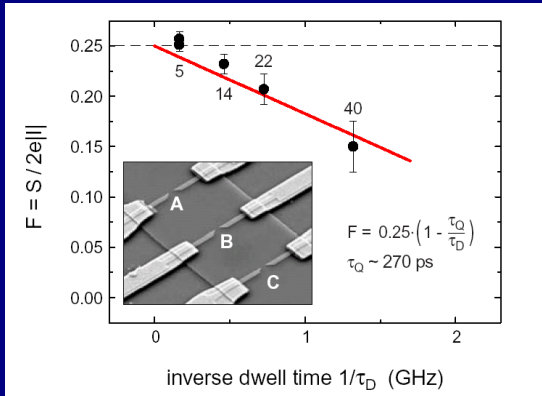
- Klasycznie:
deterministyczne trajektorie.
- Kwantowo:
nieoznaczoność → szum.

Kropka chaotyczna opisana:

czasem życia $t_D = t_{\text{flight}} \frac{V_{\text{circumference}}}{V_{\text{opening}}}$

Eksperyment dla balistycznej kropki kwantowej

grupa z Bazylei *Oberholzer et al. Nature'01*



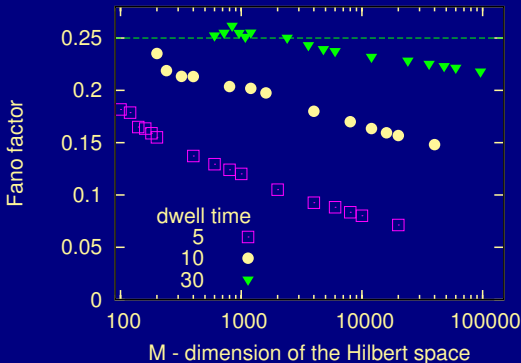
fale chaotyczne,
rozpraszanie stochastyczne



deterministyczne cząstki

Wyniki: J. Tworzydło et al. PRB '03

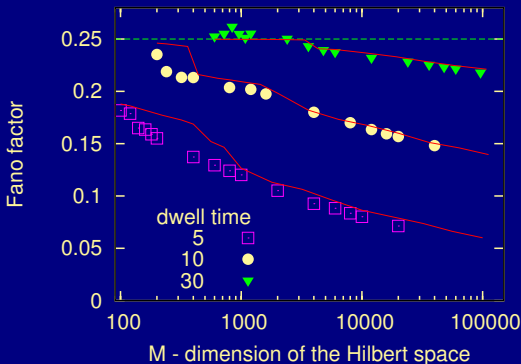
- model klasycznie chaotycznej kropki kwantowej
- ustalony czas życia $t_D = \frac{M}{2N}$, zmieniamy $\hbar_{\text{eff}} = 1/M$



- redukcja szumu w kwantowym układzie chaotycznym

Wyniki: J. Tworzydło et al. PRB '03

- model klasycznie chaotycznej kropki kwantowej
- ustalony czas życia $t_D = \frac{M}{2N}$, zmieniamy $\hbar_{\text{eff}} = 1/M$

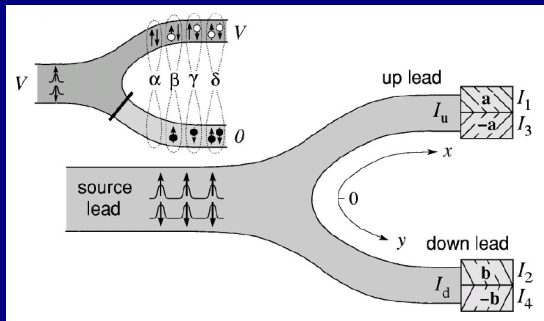


- zgodność z teorią pół-klasyczną (bez dopasowania)

“Najprostszy” układ spinowy

Lebedev, Lesovik, and Blatter PRB '05

- spinowy stopień swody elektronu – *spintornika*
- długie czasy koherencji, ale ... musimy mierzyć prąd \uparrow, \downarrow
- “source lead”: emisja par singletowych



$$C_{ij} = \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{2\pi i \nu t} \langle \delta I_i(t) \delta I_j(0) \rangle, \text{ gdzie } i, j = 1, 2, 3, 4$$

Testowanie stanów splecionych

Korelacja pomiaru spinu

1 el. w kierunku **a** z pomiarem 2 el. w kierunku **b**:

$$C_{ab} = (C_{12} + C_{34} - C_{14} - C_{32}) / (C_{12} + C_{34} + C_{14} + C_{32})$$

Wtedy nierówność CHSH (Clauser-Horne-Shimony-Holt)

$$|C_{ab} + C_{ab'} + C_{a'b} - C_{a'b'}| \leq 2$$

jest naruszona dla splątanych stanów elekronowych
(spinowych st. swobody).

Podsumowanie

- szum (fundamentalny) jako sygnał
- szum śrutowy: póbkuje własności kwantowe ↔ klasyczne
- nadzieje na detekcję stanów splątanych