



1 / 16

Kwantyzacja ładunku

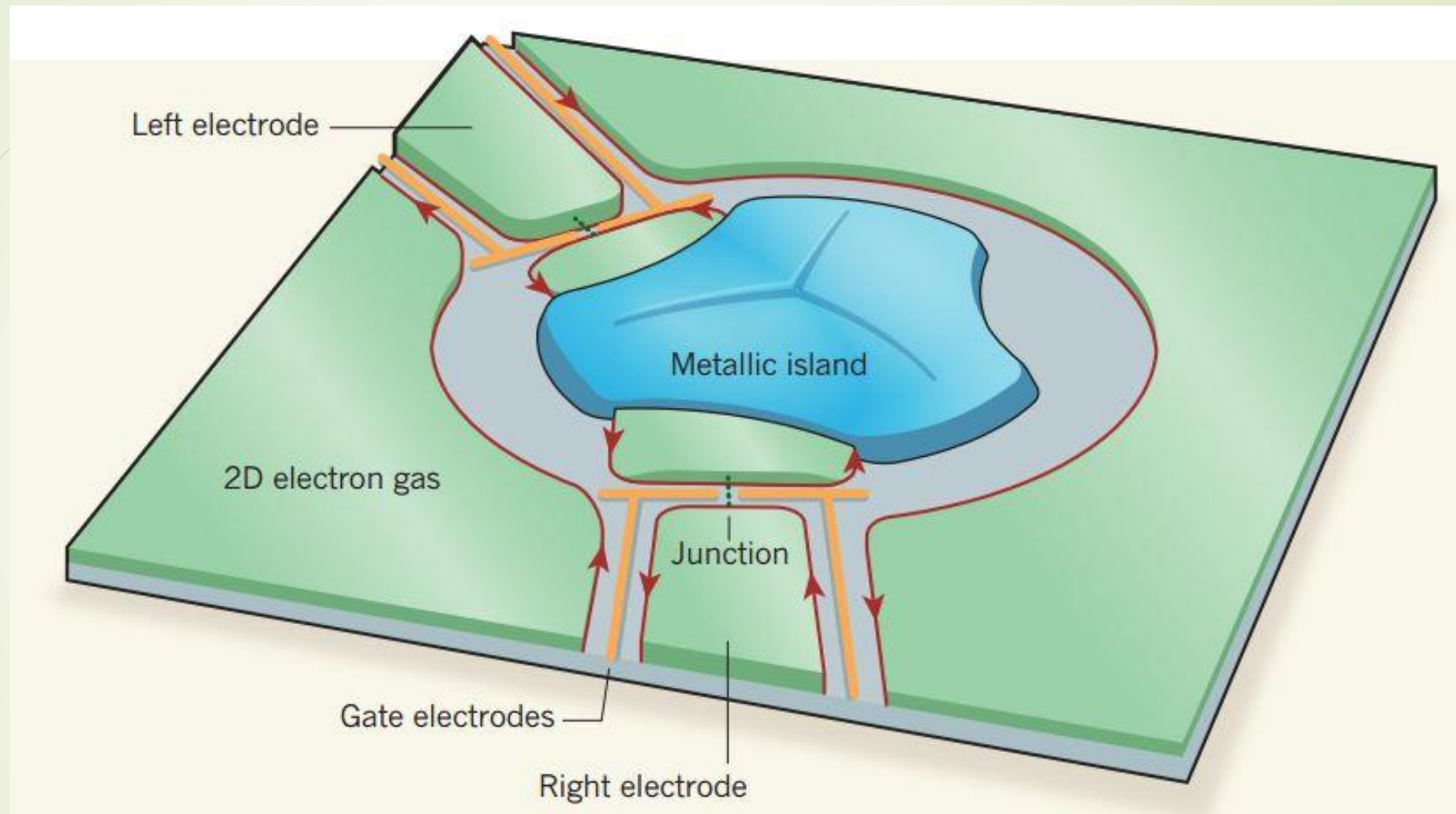
Seminarium Fizyki Technicznej

Amadeusz Filipek

13.01.2017

Spis treści

1. Blokada Coulomba
2. Warunki kwantyzacji ładunku
3. Kwantowy efekt Halla
4. Układ doświadczalny
5. Wyniki pomiarów
6. Podsumowanie
7. Bibliografia



Blokada Coulomba

- Efekt ładowania wyspy – podstawy elektrostatyki
- Energia wymagana aby naładować wyspę jednym elektronem:

$$E_N = E(N+1) - E(N) = \frac{(N+1)^2 e^2 - N^2 e^2}{2C} = \frac{e^2}{2C} (2N+1)$$

$$\Delta E = E_{N+1} - E_N = \frac{e^2}{2C} (2N+3 - 2N-1) = \frac{e^2}{C}$$

- Jaka jest pojemność C izolowanej metalowej sfery o promieniu R ?

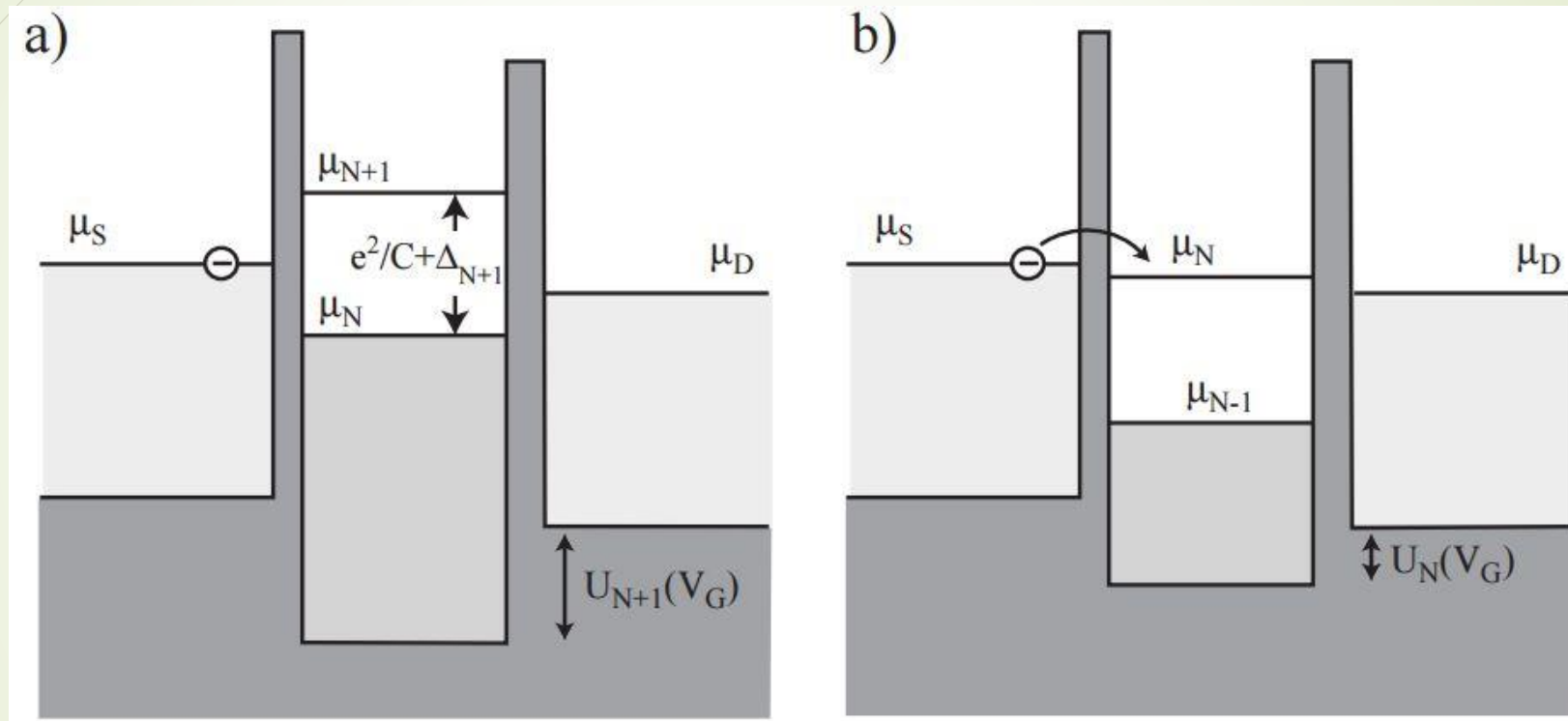
$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{r}, (r > R) \rightarrow V(R) = - \int_R^\infty \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$$

$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi\epsilon_0 R$$

$$E_C = \frac{e^2}{2C}$$

R [μm]	C [F]	E/k _B [K]
10	1.11E-15	0.84
1	1.11E-16	8.36
0.1	1.11E-17	83.58
0.01	1.11E-18	835.83

Blokada Coulomba



Przepływ zachodzi gdy:

$$\mu_S > \mu(N+1) > \mu_D$$

Warunki kwantowania ładunku

- Typowy czas ładowania/rozładowywania kondensatora: $\tau = RC$

$$\Delta E \Delta \tau > h$$
$$\frac{e^2}{C} RC > h \Rightarrow R > \frac{h}{e^2}$$

Warunki niezbędne dla kwantyzacji ładunku

- Fluktuacje termiczne :

$$k_B T < \frac{e^2}{C}$$

- Fluktuacje kwantowe :

$$G < \frac{e^2}{h}$$

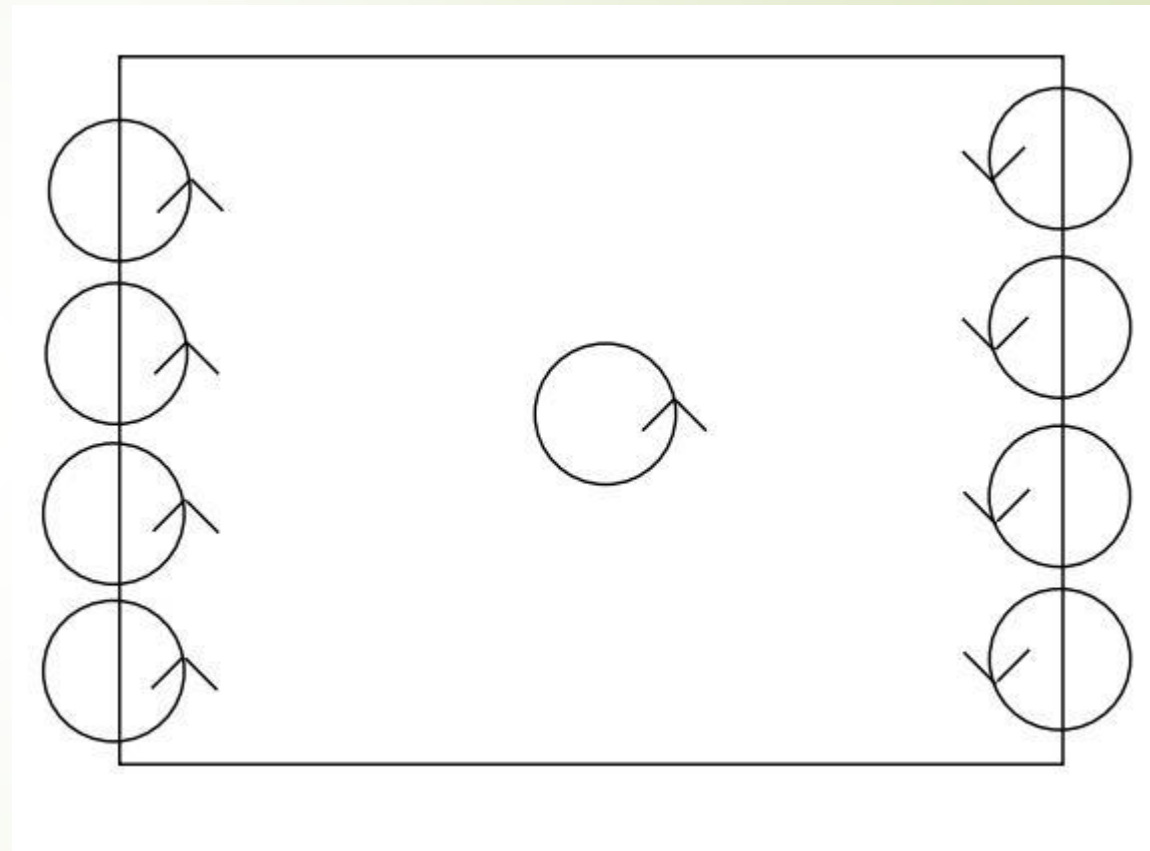
Kwantowy efekt Halla

- Wymaga silnych pól magnetycznych - kilka T
- oraz niskich temperatur ~ 4 K
- Elektrony o ograniczonej swobodzie - 2D electron gas

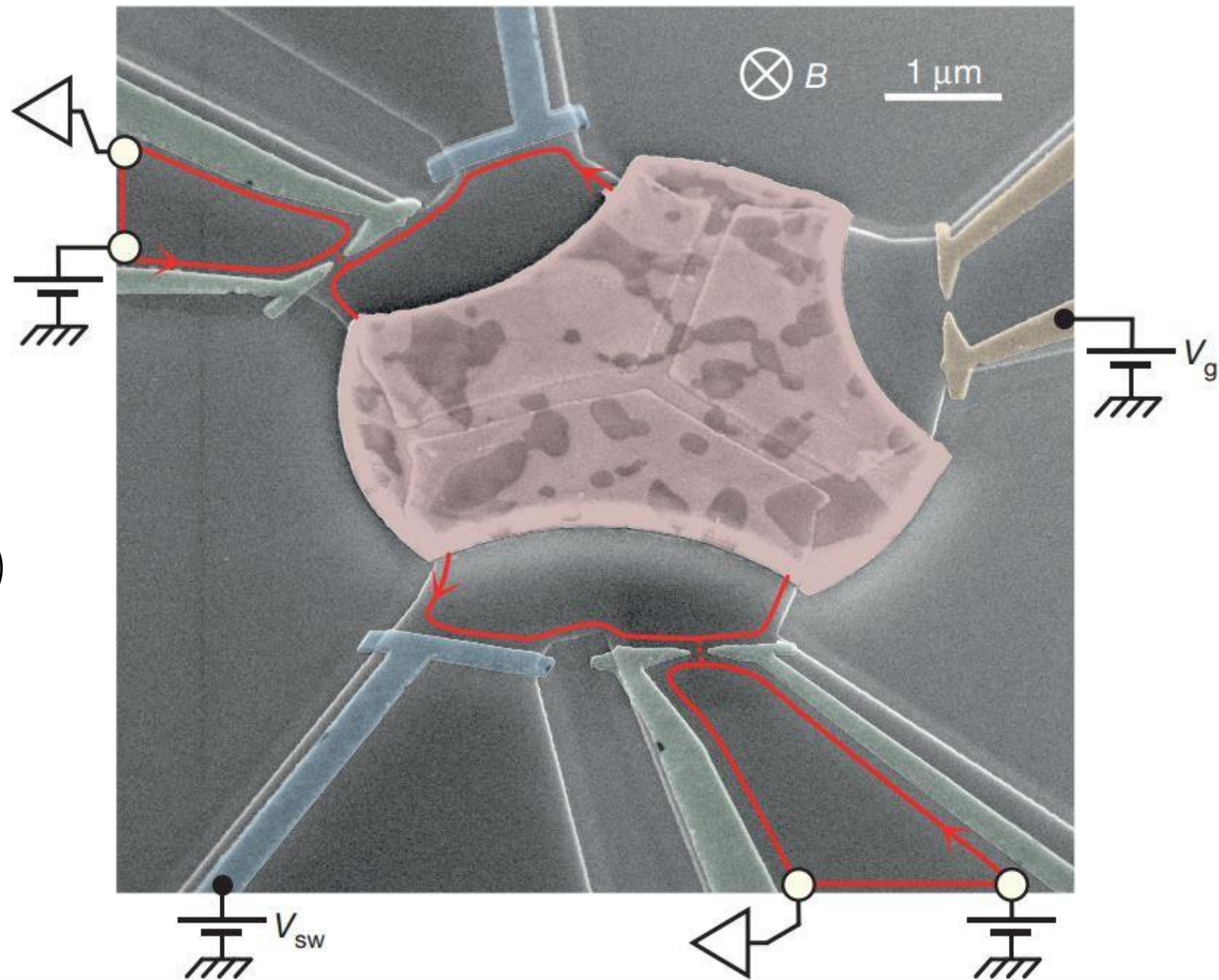
- Przewodnictwo Halla:

$$G_H = \frac{I_{channel}}{V_{Hall}} = \nu \frac{e^2}{h}$$

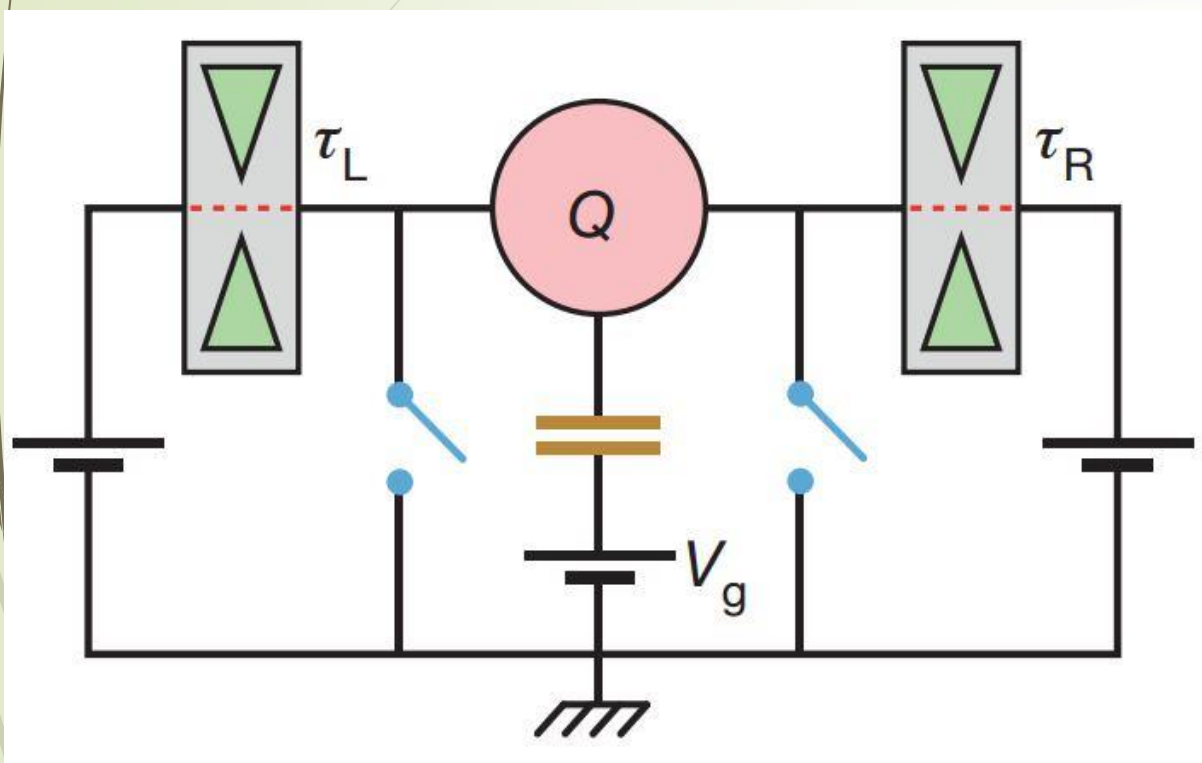
- Zjawisko towarzyszące – mody brzegowe (elektrony chiralne)



- Wyspa – metaliczny stop AuGeNi
- Złącze – półprzewodnik Ga(Al)As (105 nm – 2DEG)
- Metaliczne bramki (zielone)
- złącza tunelowe
- Przyłożone pole $B \approx 4T$
- Temperatura $T \approx 17\text{ mK}$
- Prąd płynie kanałami brzegowymi (czerwony)



Przebieg pomiaru

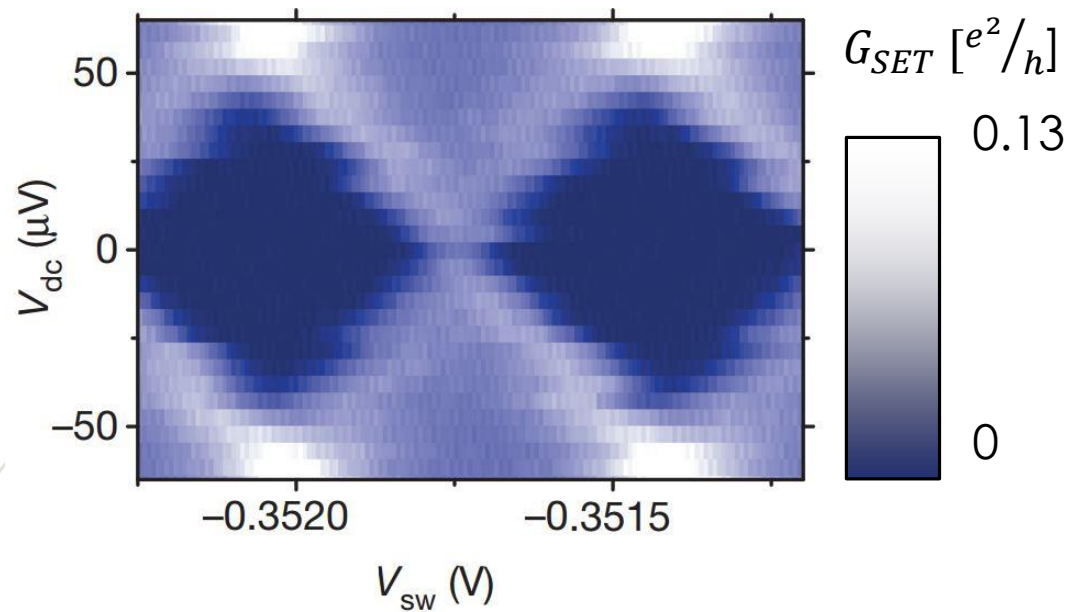


- Pomiar złącz tunelowych przy zamkniętych zworkach (niebieski):

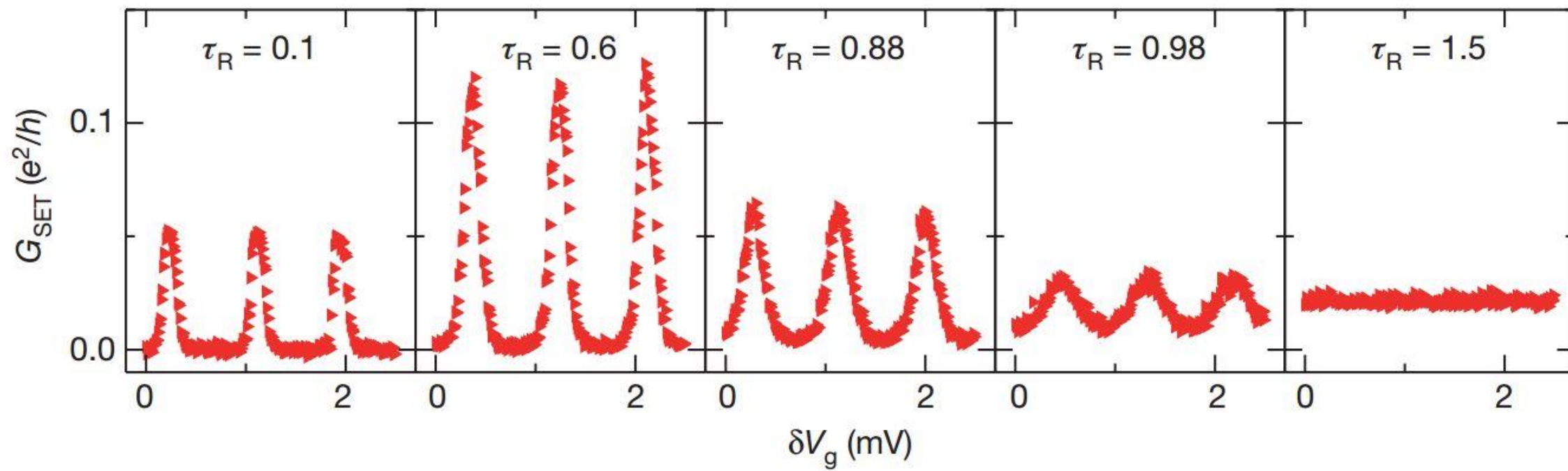
$$\tau_{L,R} \equiv G_{L,R} \frac{h}{e^2}$$

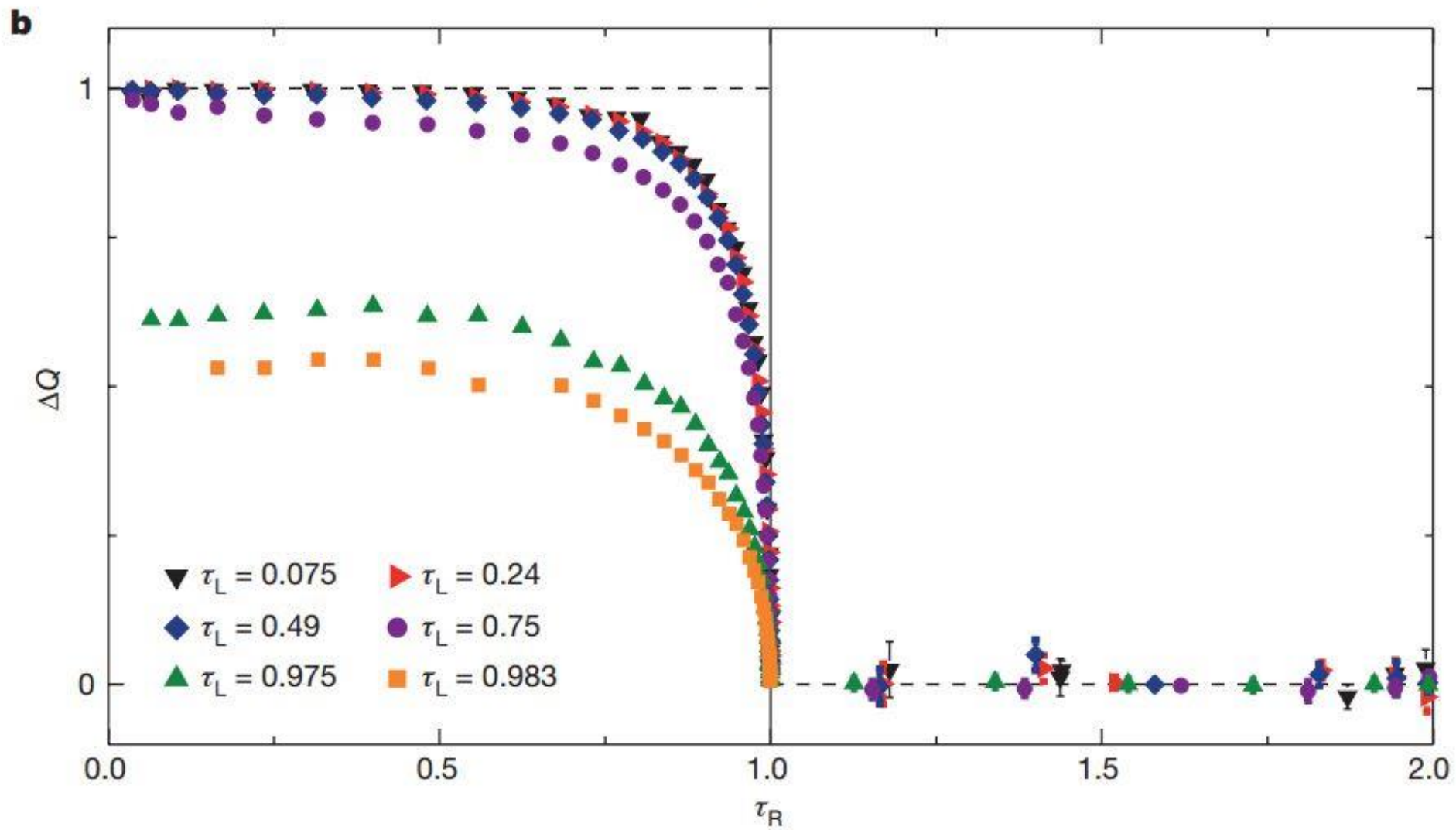
- $\tau_{L,R}$ - opisuje prawdopodobieństwo transmisji elektronów w składowych kanałach
- $\tau_{L,R} < 1$ – pojedynczy, spinowo spolaryzowany kanał
- $1 < \tau_{L,R} < 2$ – dwa kanały, jeden balistyczny

10/16



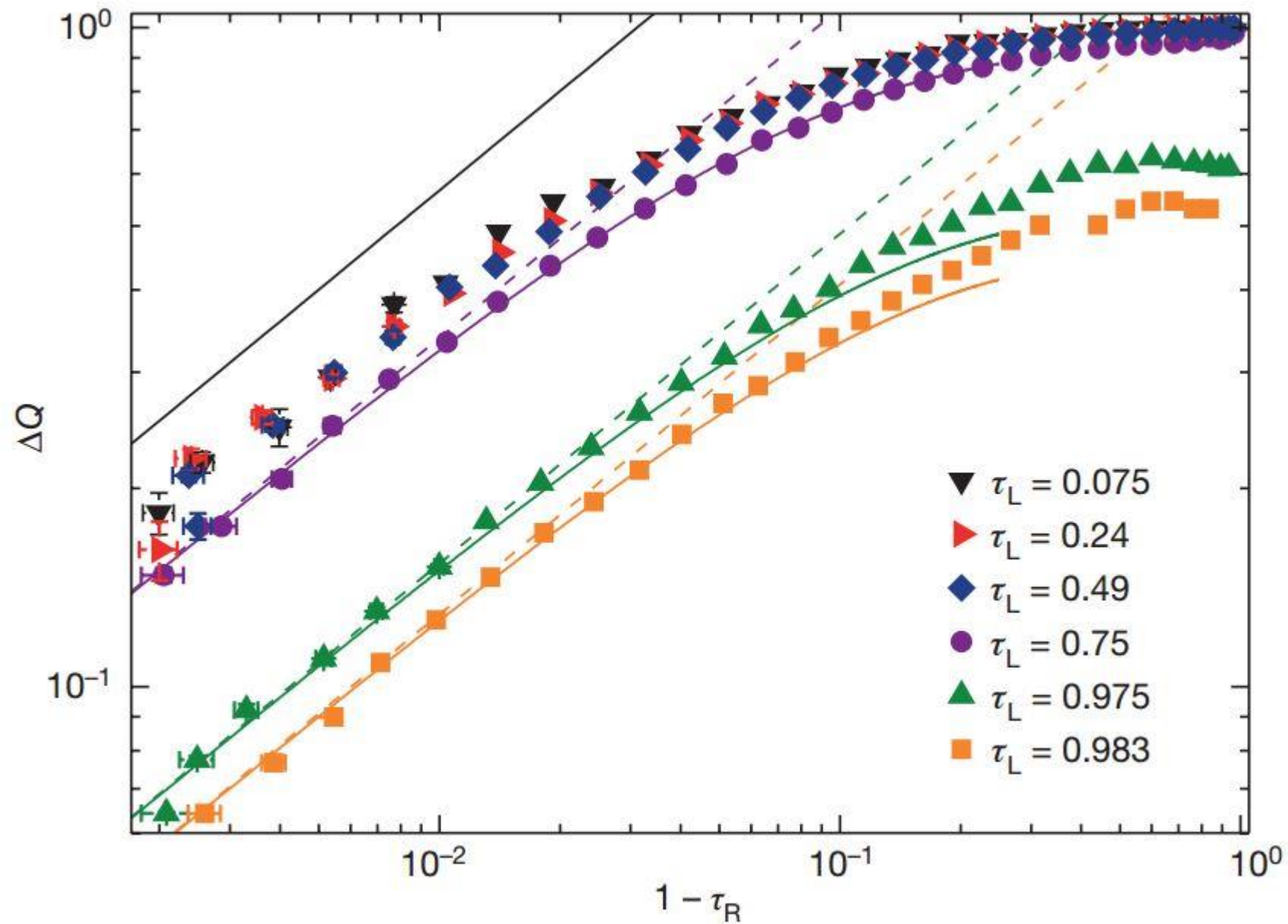
$\tau_L = 0.24$





$$\Delta Q \equiv (G_{SET}^{max} - G_{SET}^{min}) / (G_{SET}^{max} + G_{SET}^{min})$$

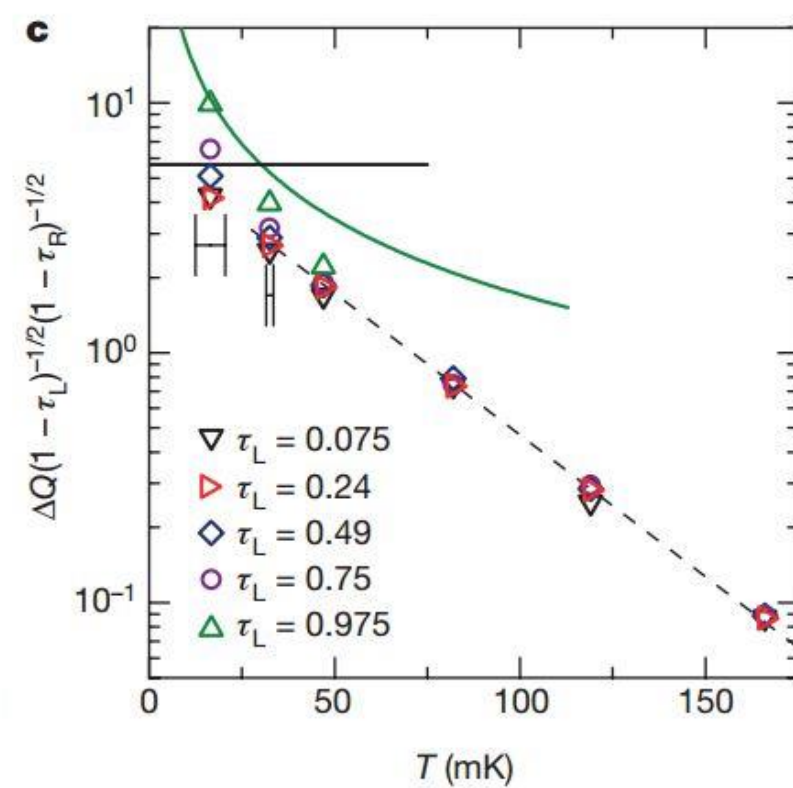
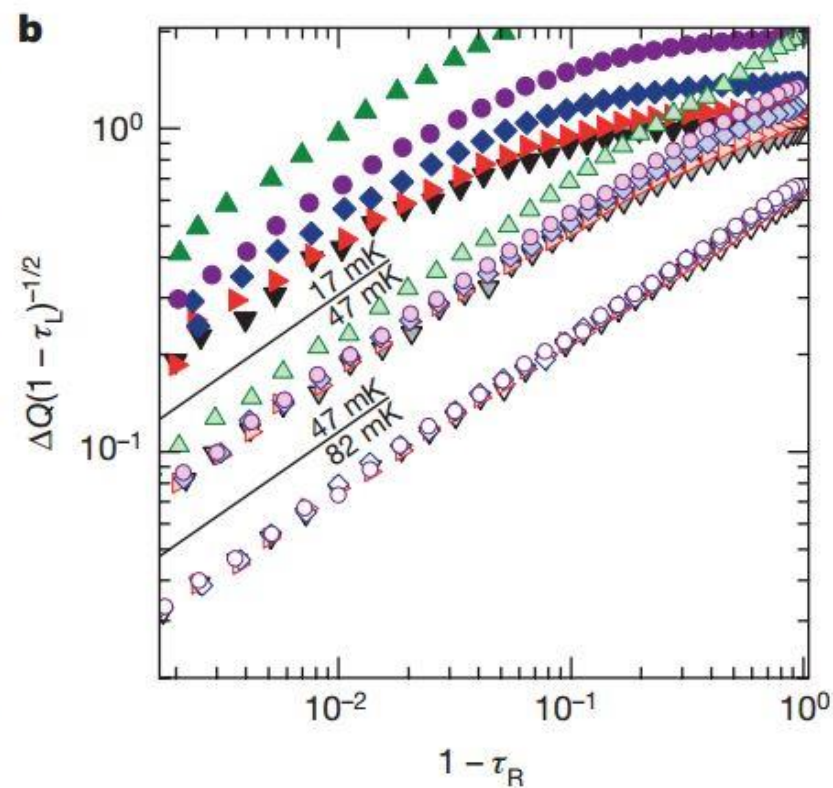
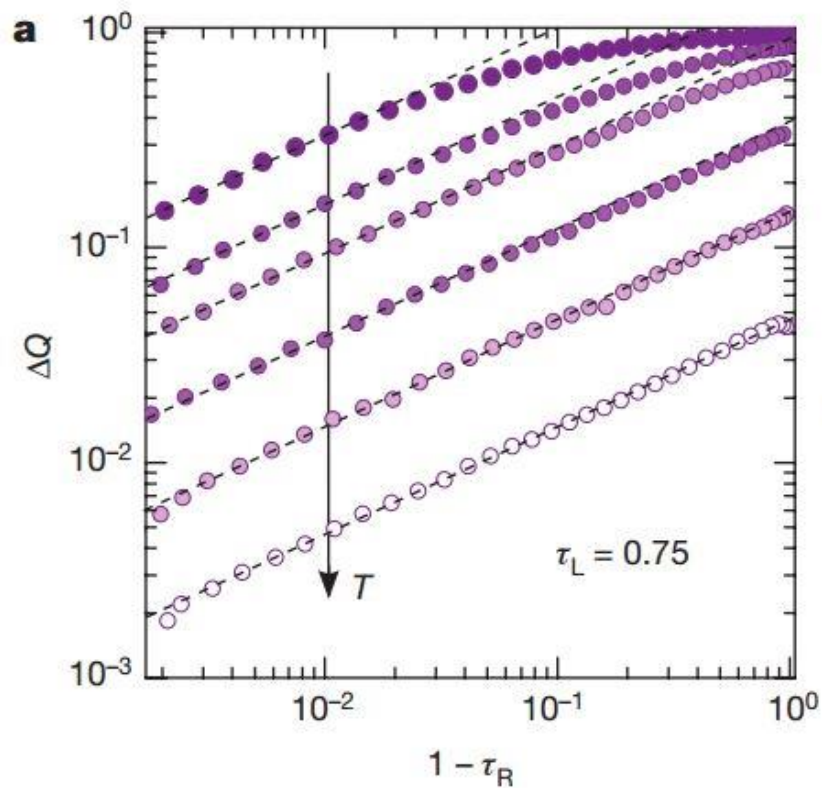
$$\Delta Q \sim \sqrt{1 - \tau_R}$$



Skalowanie
asymptotyczne rozszerza
się na cały obszar $\tau_R \in$
 $[0,1]$

Zjawisko przebiega tak
samo dla τ_L
 $\Delta Q \sim \sqrt{(1 - \tau_R)(1 - \tau_L)}$

Eksponencjalna zależność
temperaturowa
 $\Delta Q \sim \exp(-\pi^2 k_B T / E_C)$



Podsumowanie

- Podstawą kwantyzacji ładunku jest blokada Coulomba
- Fluktuacje termiczne oraz kwantowe są czynnikami ograniczającymi kwantyzację ładunku
- Zrozumienie oraz kontrola nad zjawiskiem może mieć zastosowanie w wielu układach elektronicznych
- Badania nad kwantyzacją ładunku mają istotne znaczenie dla rozwoju kwantowej inżynierii i nanoelektroniki
- Badania nad układami hybrydowymi półprzewodnik – metal są ważnym krokiem ku zaprojektowania bitów kwantowych.

Dziękuję za uwagę !

Bibliografia

- [1]. Nazarov, Y. V., „Destruction of discrete charge”, Nature, Vol. 536, 2016
- [2]. Frolov, S., „Quantum Transport, Lecture 7: Coulomb Blockade”, University of Pittsburgh, 2013,
<https://www.youtube.com/watch?v=PXVnvKWn5ak&t=1703s>
- [3]. Tong, D., „The Quantum Hall Effect”, Department of applied Mathematics and Theoretical Physics, Centre for Mathematical Sciences, 2016, <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qhe.html>
- [4]. Jezouin, S. et al., „Controlling charge quantization with quantum fluctuations”, Nature, Vol. 536, 2016