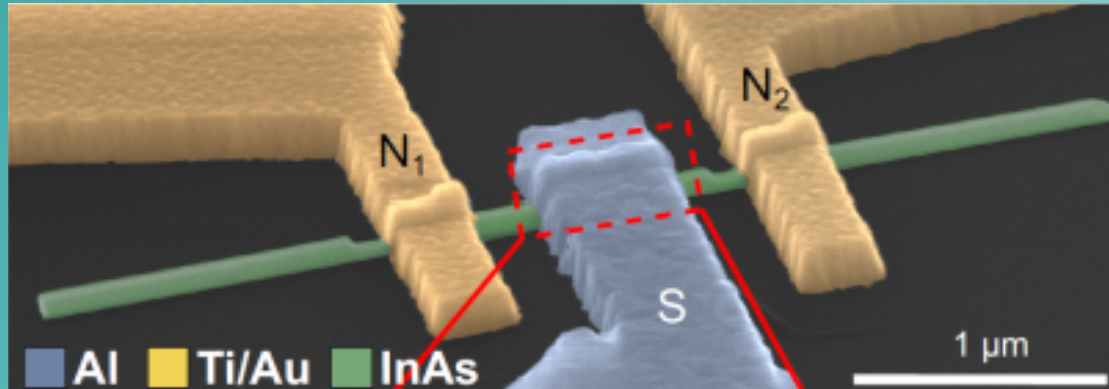


Конверсия заряда в тепло в нанопроводе с наведенной сверхпроводимостью



*Вперемежку на
русском и английском*

В.С. Храпай
(кафедра ИФТТ РАН, Черноголовка)

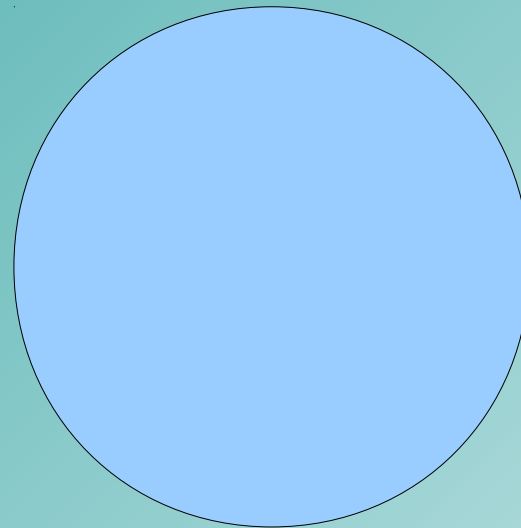
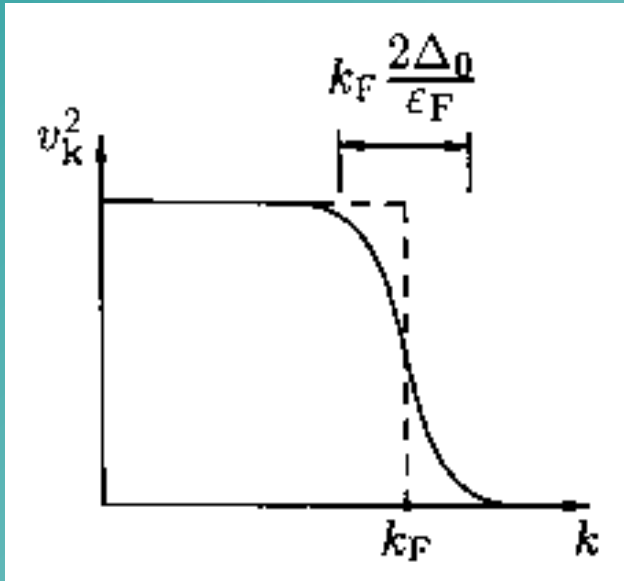
Почитать:

В.В. Шмидт “Введение в физику сверхпроводников”

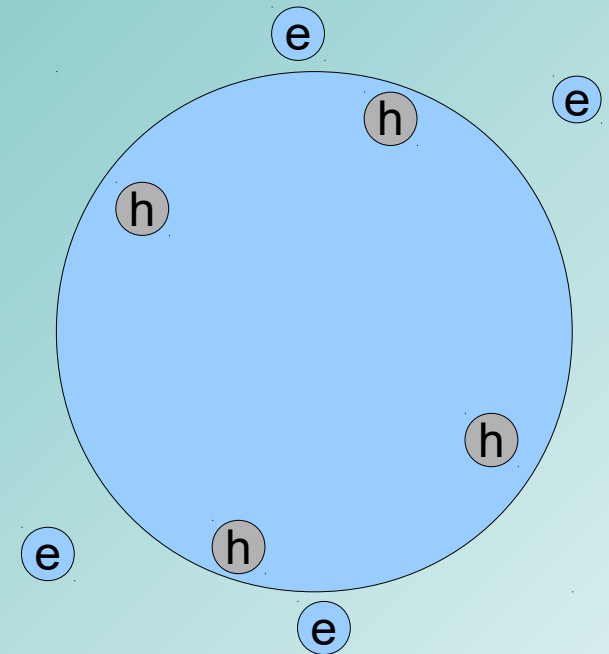
A.O. Denisov et al., arXiv:2006.09803; A.O. Denisov et al., arXiv:2101.02128



Сверхпроводник и распределение Ферми-Дирака



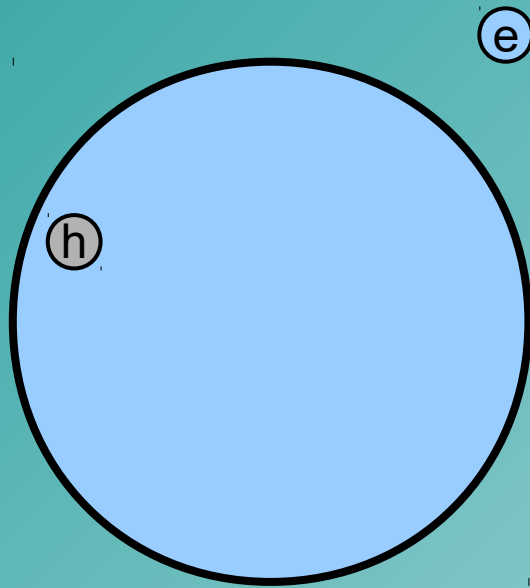
поверхность Ферми
в нормальном металле



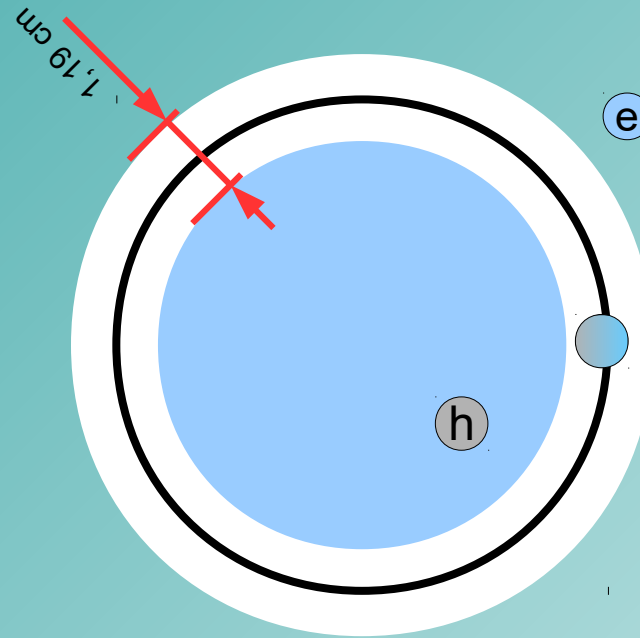
поверхность Ферми
в сверхпроводнике

В основном состоянии сверхпроводника имеются строгие корреляции чисел заполнения электронов с общим импульсом ноль (куперовское спаривание)

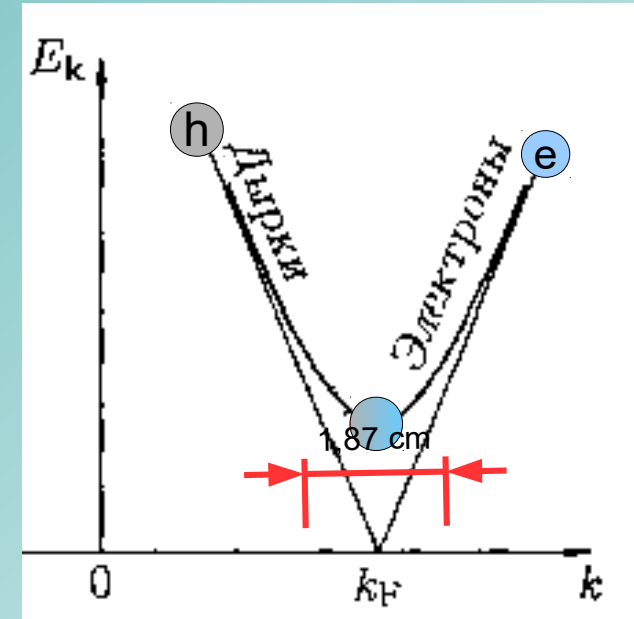
Квазичастицы и щель в сверхпроводнике



Две квазичастицы
в нормальном металле



Три квазичастицы
в сверхпроводнике

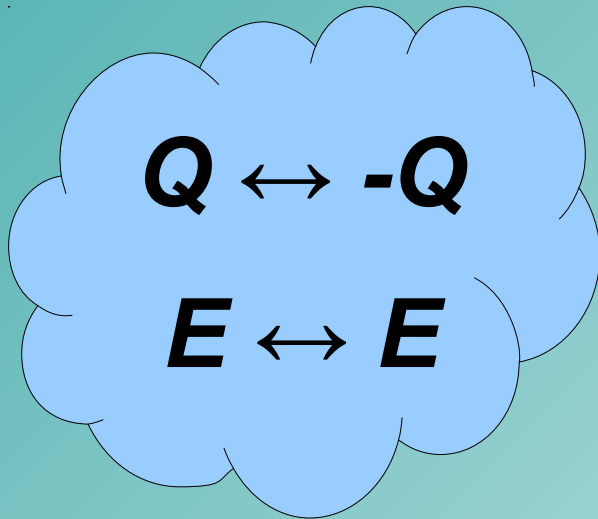


В сверхпроводнике существуют две взаимосвязанные электронные системы – куперовский (бозе-)конденсат и фермиевские квазичастицы. Создание квазичастицы требует пороговой энергии (щель), а ее заряд является дробной величиной

N|S интерфейс: Андреевское отражение

Подщелевая квазичастица
отражается от
сверхпроводника.

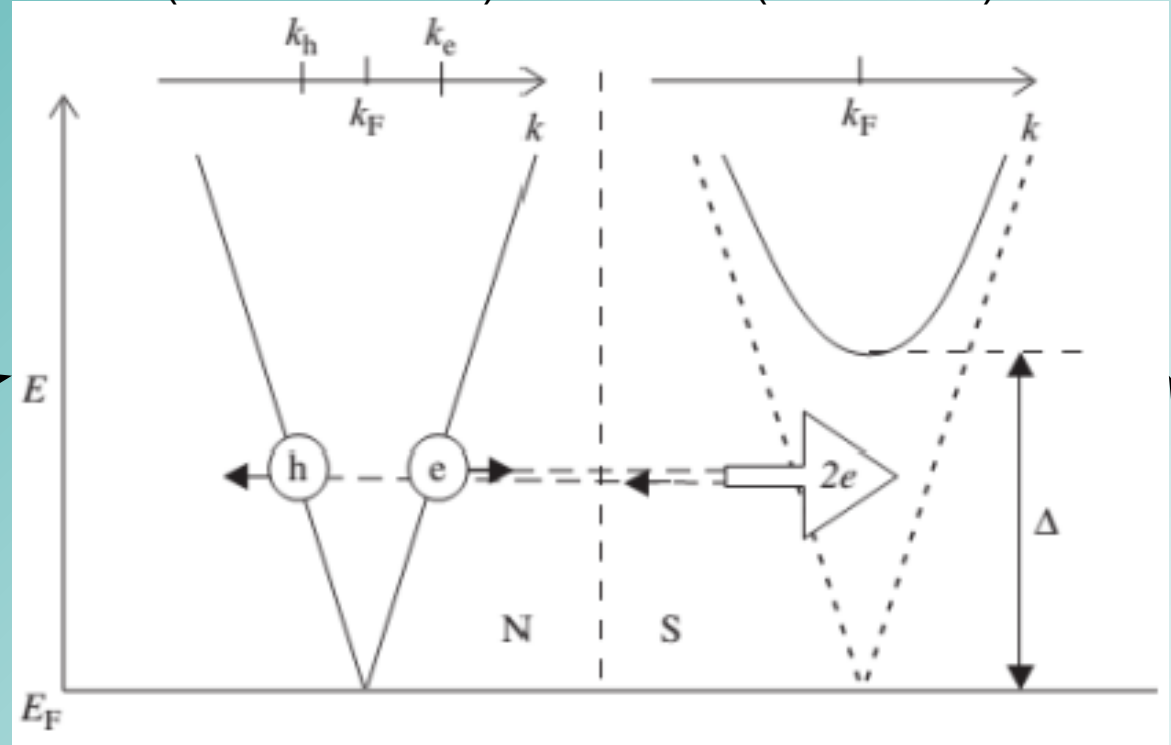
При этом ее заряд меняет
знак, а энергия сохраняется



Sub-gap quasiparticles \equiv
 \equiv those with energy $|\varepsilon| < \Delta$

Normal conductor
(InAs nanowire)

Superconductor
(Aluminum)



Andreev reflection

from Nazarov,
Blanter textbook

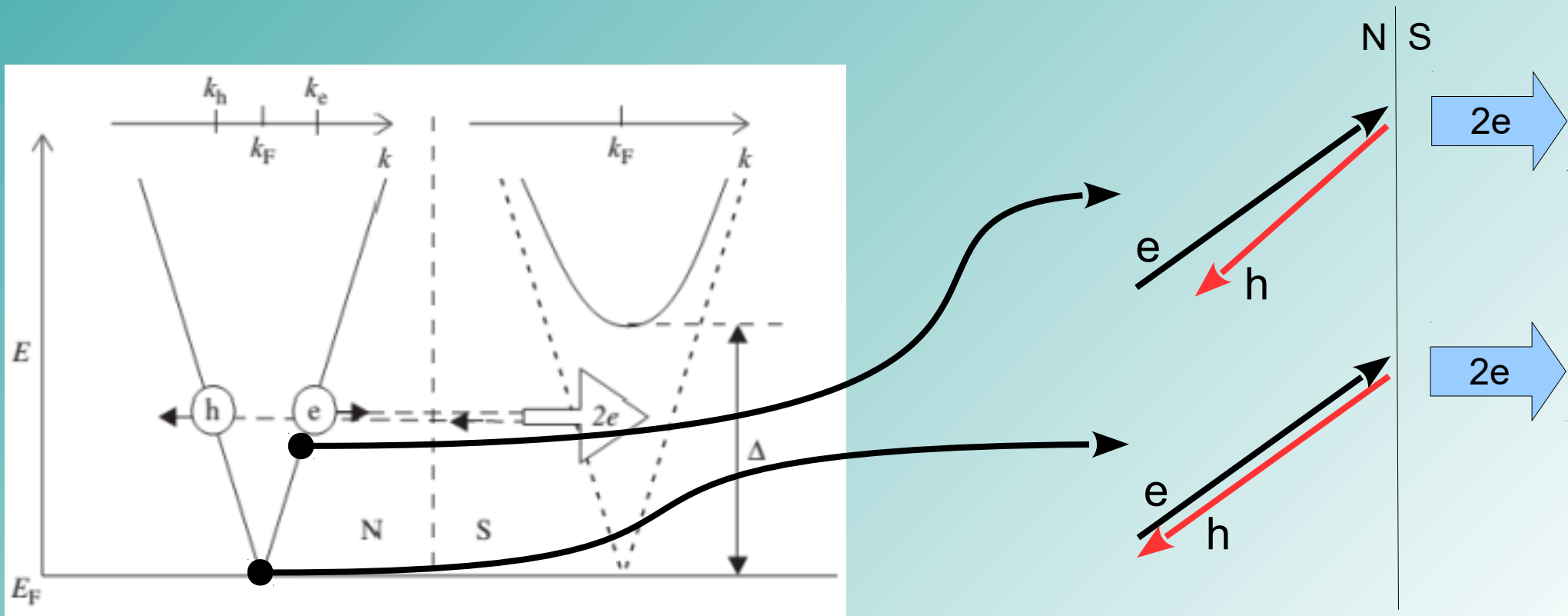
Gap \equiv Superconducting gap Δ

Ретро характер Андреевского отражения

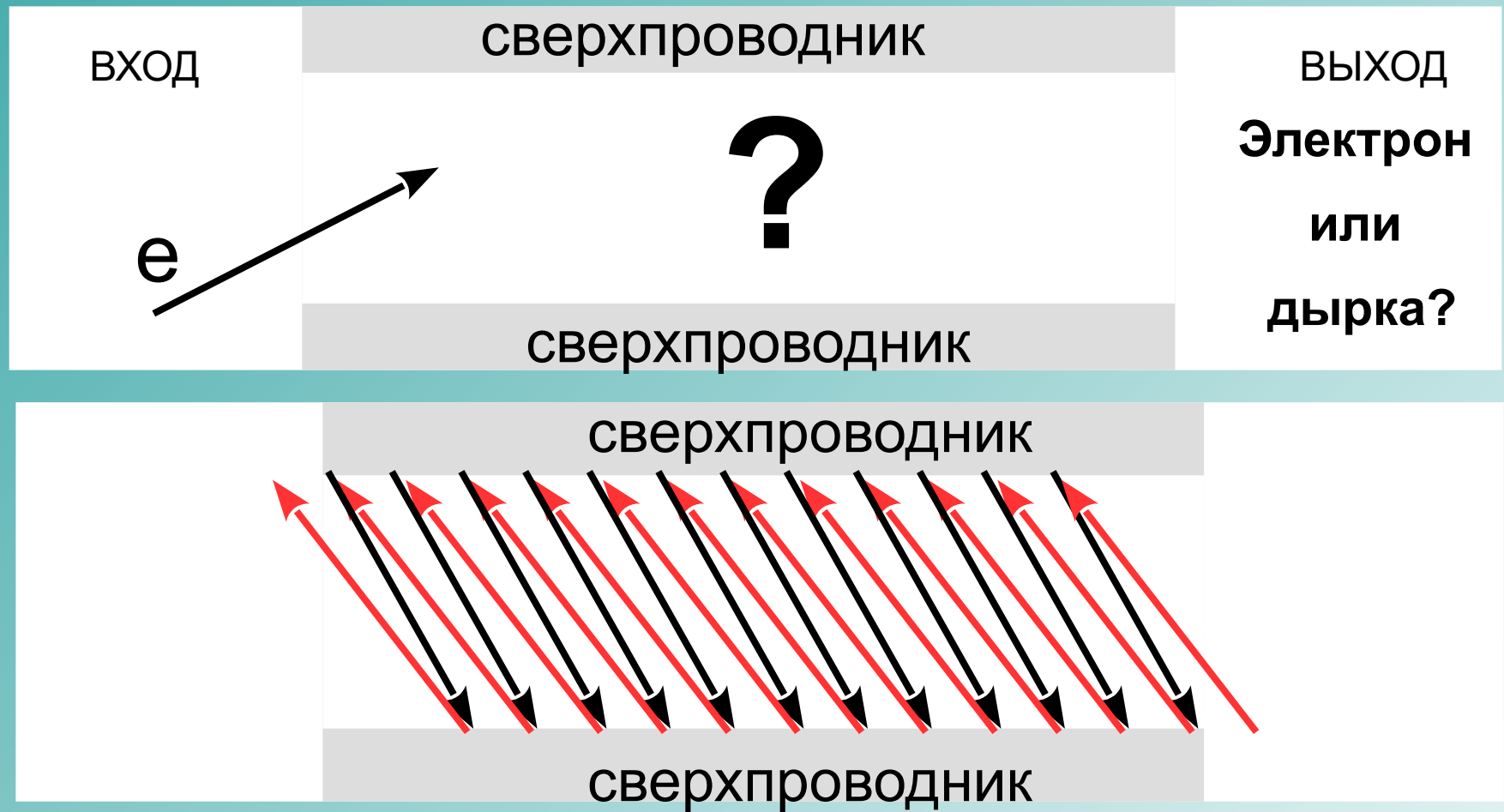
Импульс куперовской пары, уходящей в сверхпроводник, равен нулю.

Значит, траектория отраженной дырки полностью повторяет траекторию электрона.

Но это верно только если $k = k_F$. В противном случае, траектории чуть расходятся.

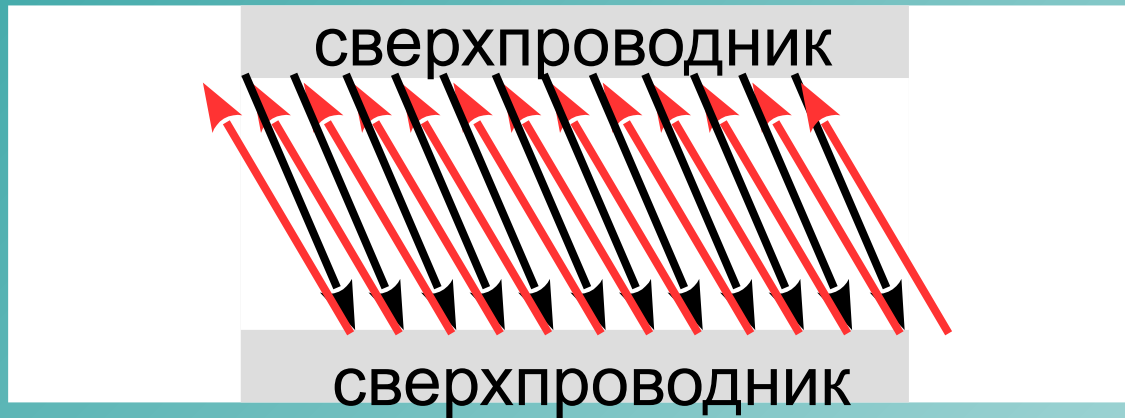


О чем остаток этой лекции?

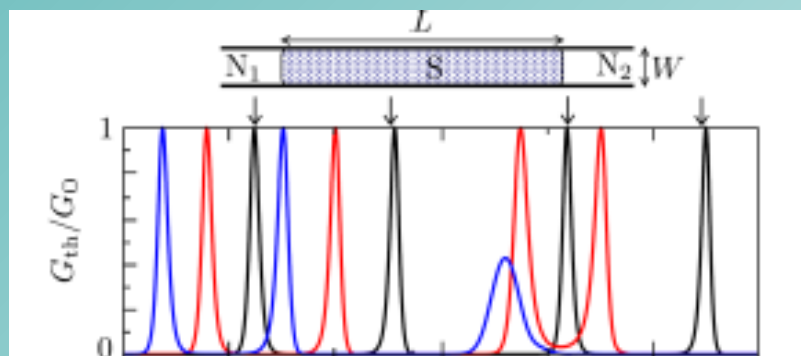


Легко сообразить, что тип квазичастицы сохраняется, если мы имеем дело с баллистическими траекториями. А что если в дело вступает диффузия?

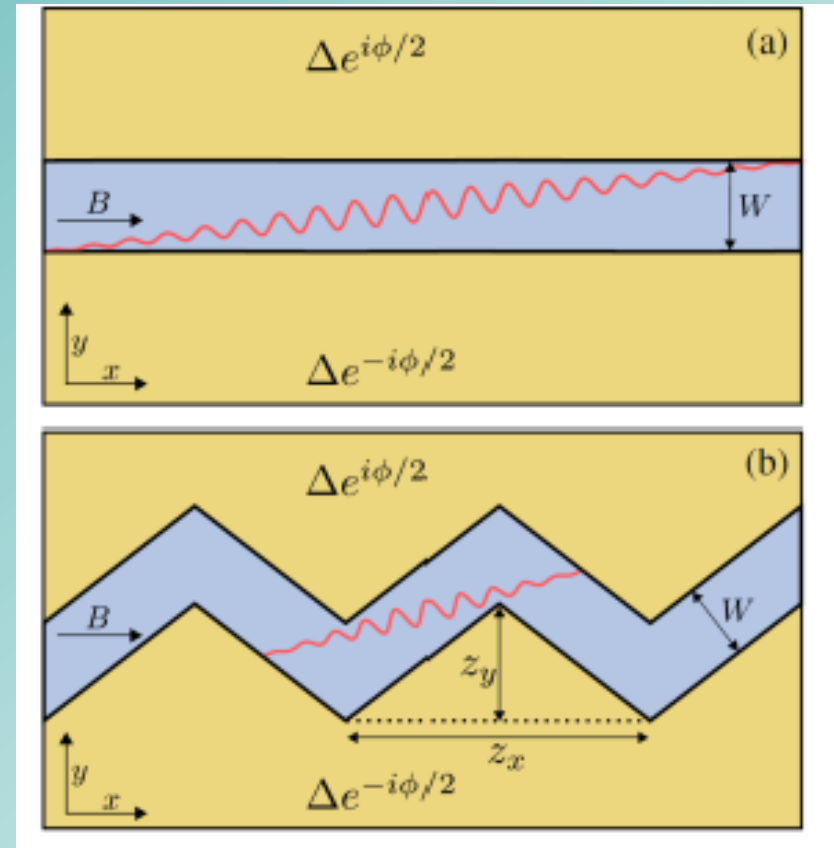
О чем остаток этой лекции?



Topological transition in 1D Majorana wires



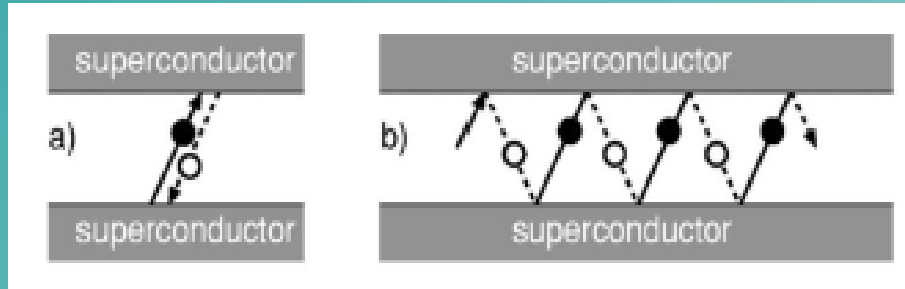
Akhmerov et al., PRL 2011



T. Laeven et al., PRL (2020)

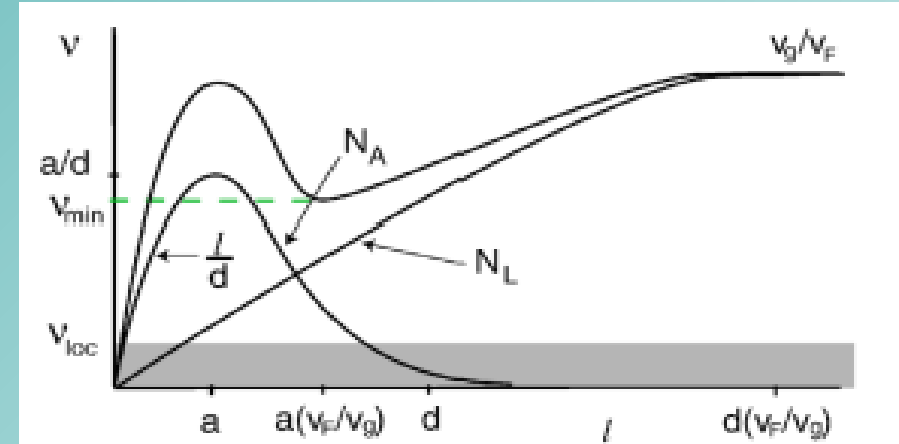
Why else study thermal transport in SC hybrids?

Neutral modes in graphene SNS



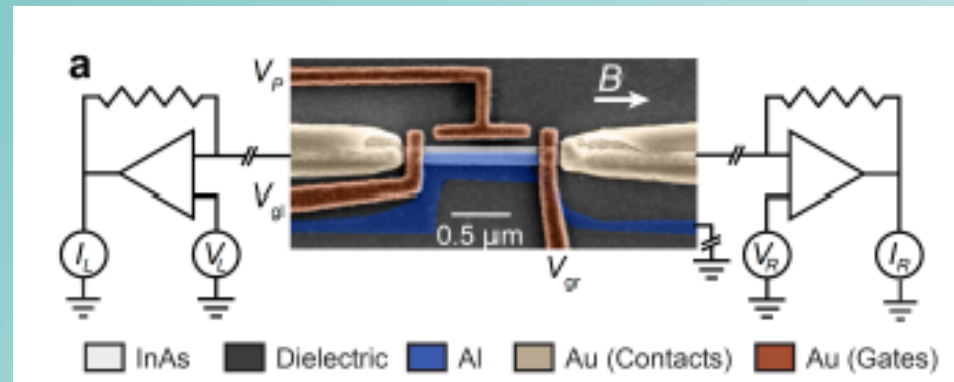
Titov et al., PRL 2007

Re-entrant localization in Andreev wires



Kopnin et al., PRB 2004

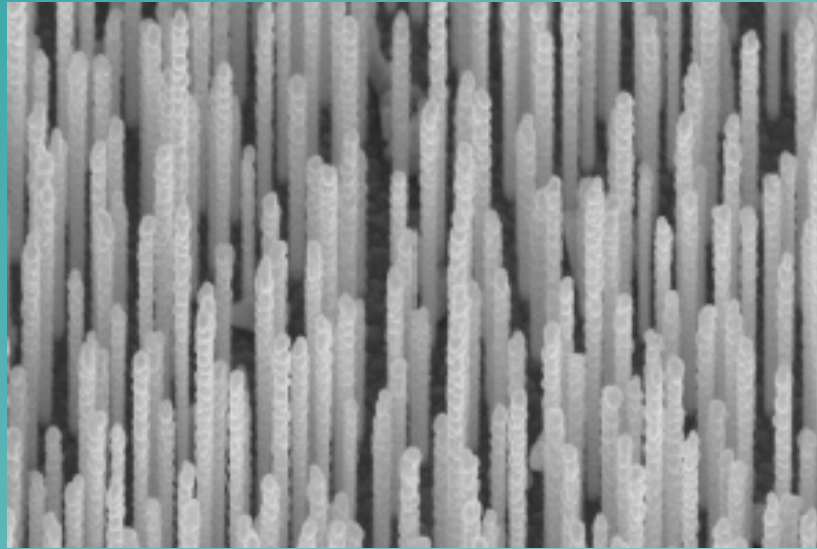
Nonlocal response in NSN Majorana wires



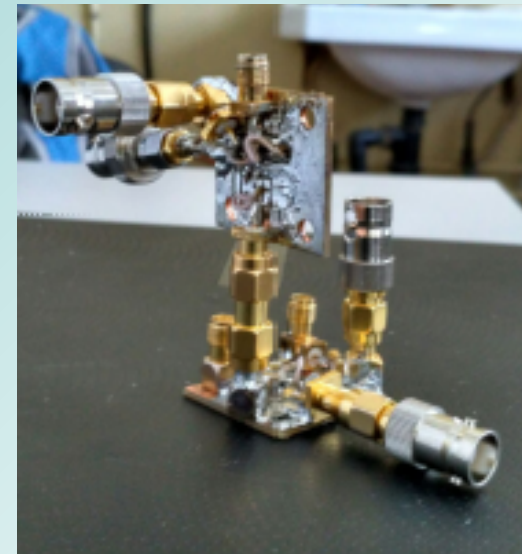
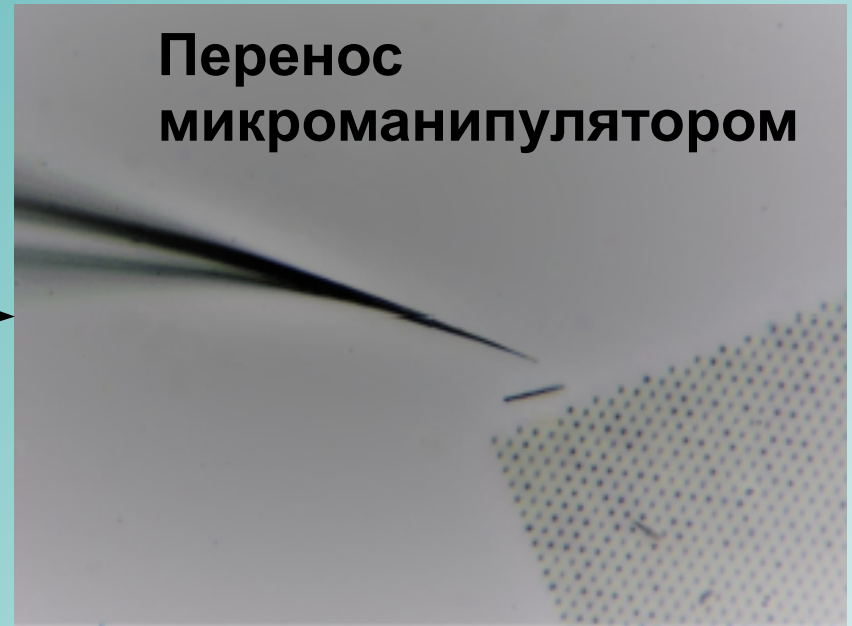
Menard et al., PRL 2020; Puglia et al., arXiv 2020



Образцы

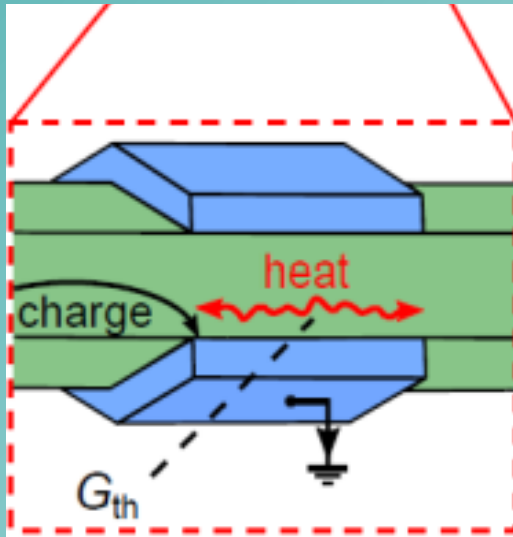
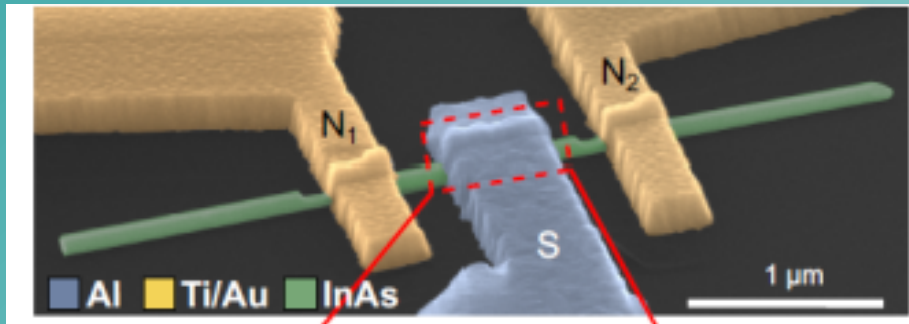


Рост нанопроволок



Main result: charge-heat separation in open nanowire devices

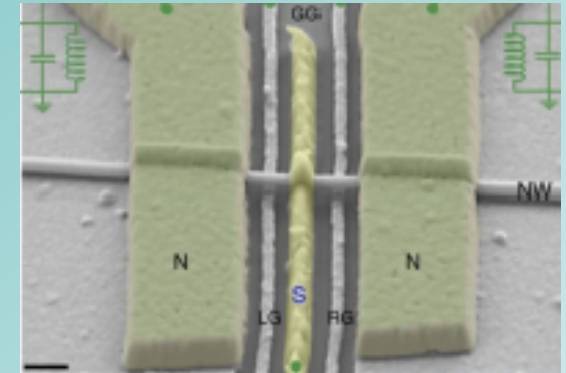
Three-terminal NSN device



Quasiparticle
source

Quasiparticle
detector

Open device, unlike those used
for Cooper-pair splitting



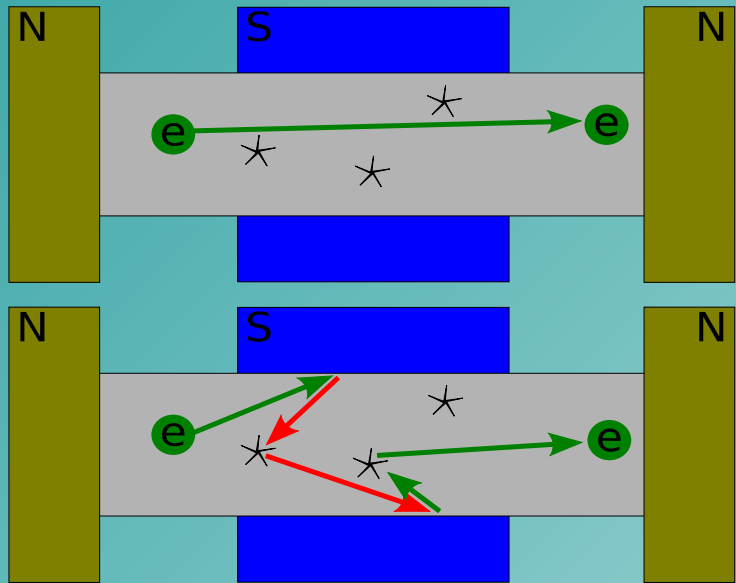
Hofstetter et al., Nature 2009

Figure from
Das et al., Nat. Comm 2012

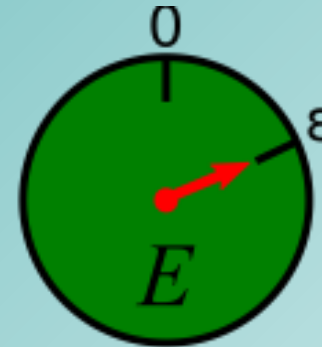
Almost perfect charge-heat separation

Tiny average charge of quasiparticles traversing the super-region $q \ll e$

Should I measure charge or heat?

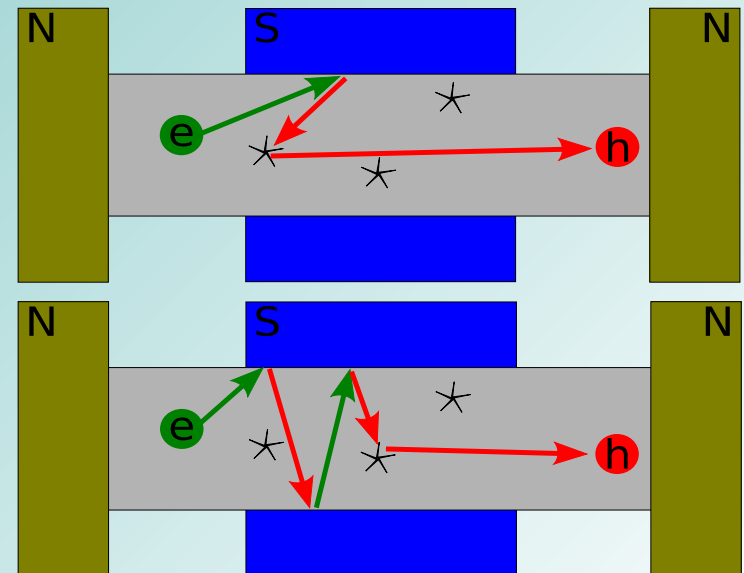
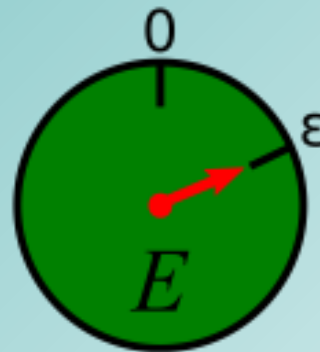
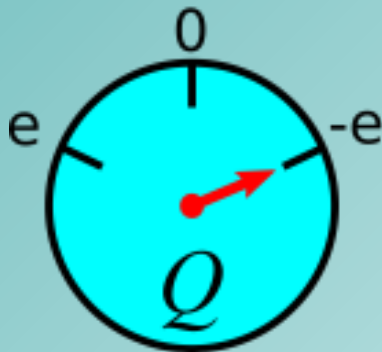


0, 2, 4... number of AR is even



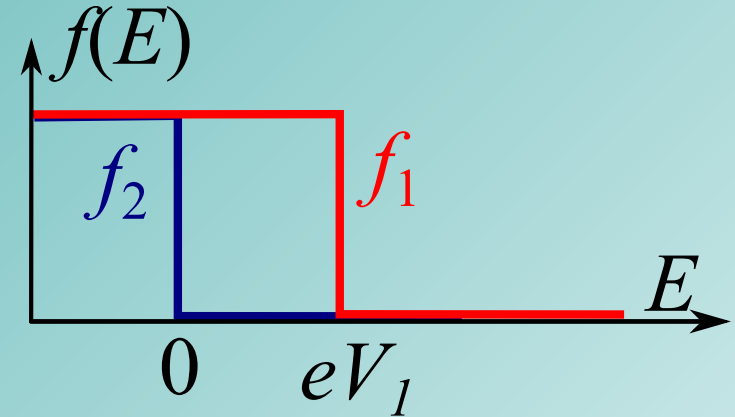
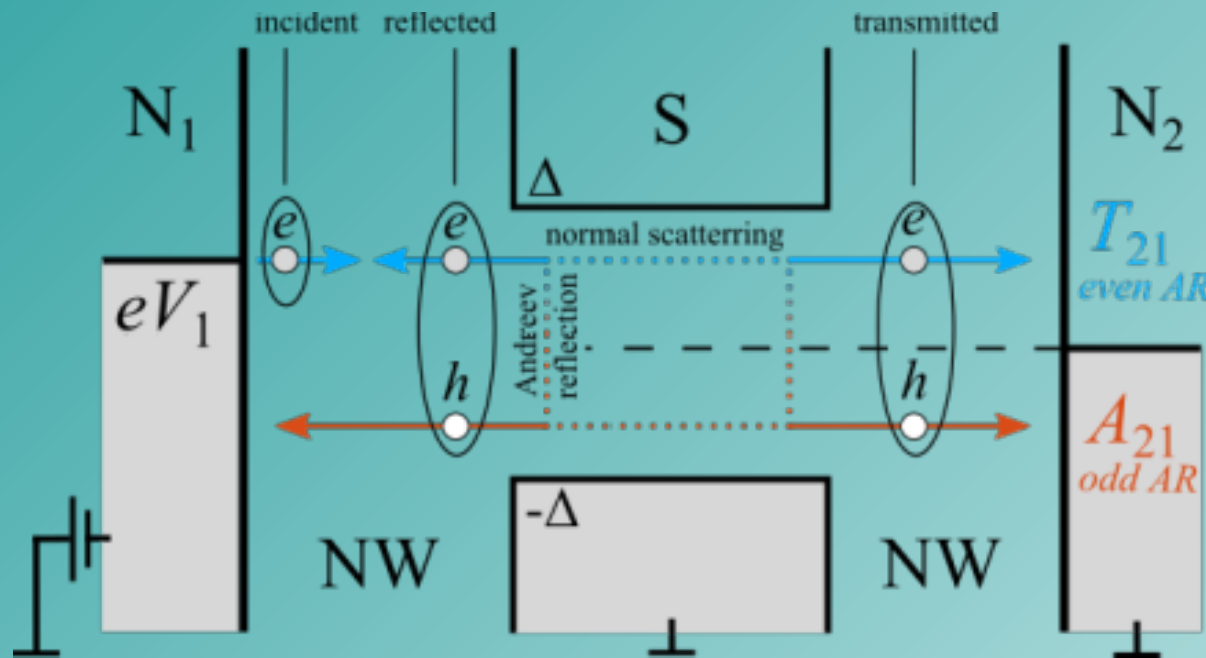
T_{21}

1, 3, 5... number of AR is odd



A_{21}

Transmission probabilities and nonlocal response



$$\mathcal{T}_{\pm} \equiv T_{21} \pm A_{21}$$

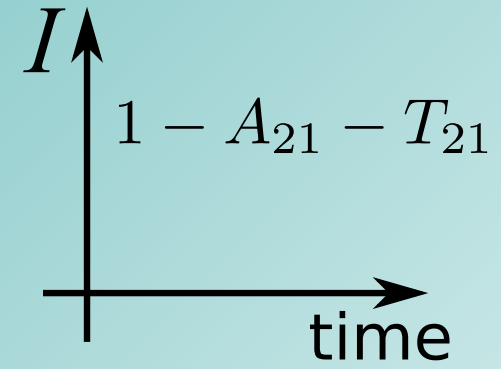
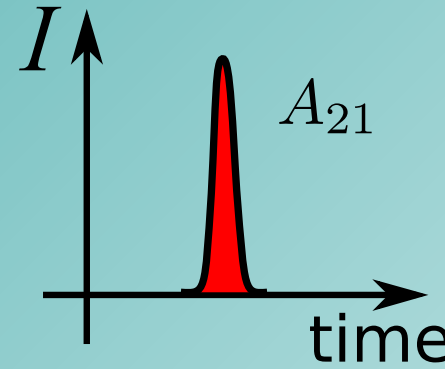
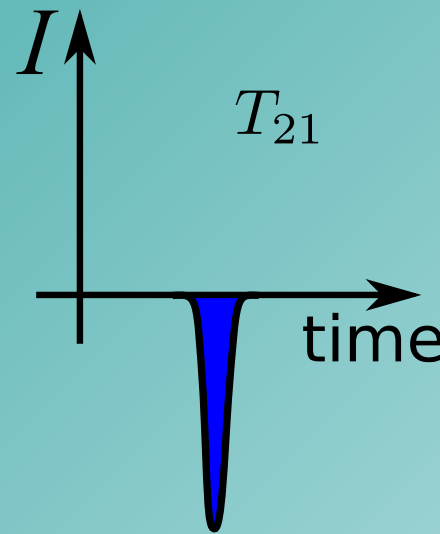
$$\text{charge: } I_2 = \frac{T_{21} - A_{21}}{h} \int e [f_1(E) - f_2(E)] dE = -\frac{e^2}{h} V_1 \sum \mathcal{T}_-$$

$$\text{heat: } J_2 = \frac{T_{21} + A_{21}}{h} \int |E| [f_1(E) - f_2(E)] dE = \frac{e^2}{2h} V_1^2 \sum \mathcal{T}_+$$

Don't choose – measure both!

«I hate heat. Can I measure smth else?» – Yes, noise!

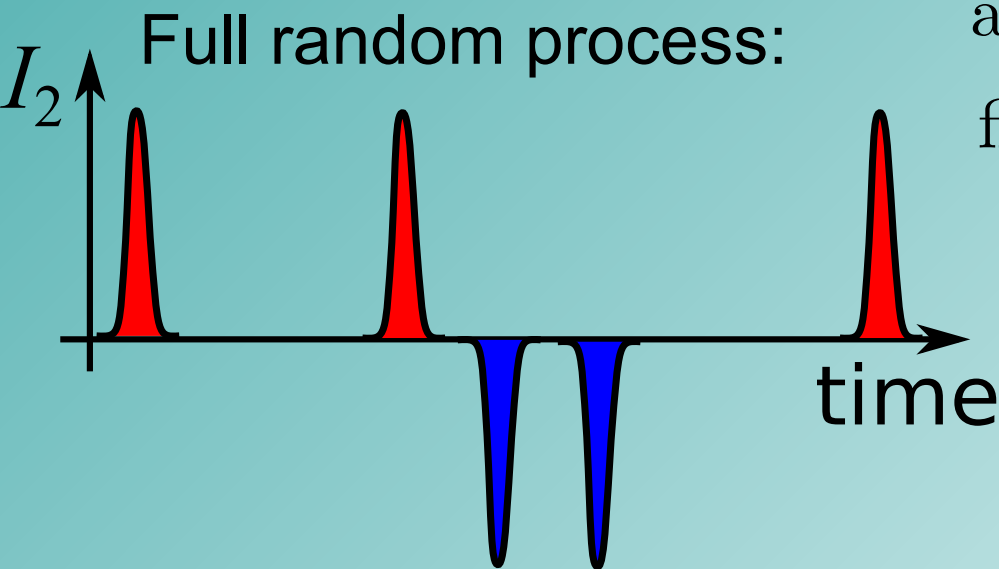
Possible outcomes of a single event:



average charge: $\langle Q_2 \rangle = |e| \mathcal{T}_-$

average squared charge: $\langle Q_2^2 \rangle = e^2 \mathcal{T}_+$

fluctuation: $\langle (\delta Q_2)^2 \rangle = e^2 (\mathcal{T}_+ - \mathcal{T}_-^2)$



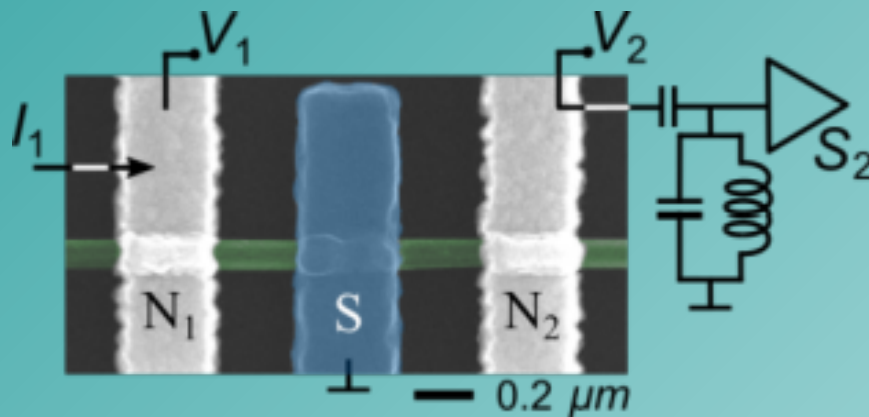
Noise spectral density:

$$S_2 = \frac{2e^3}{h} |V_1| \sum (\mathcal{T}_+ - \mathcal{T}_-^2)$$

Akhmerov et al., PRL 2011

Nonlocal vs local conductance

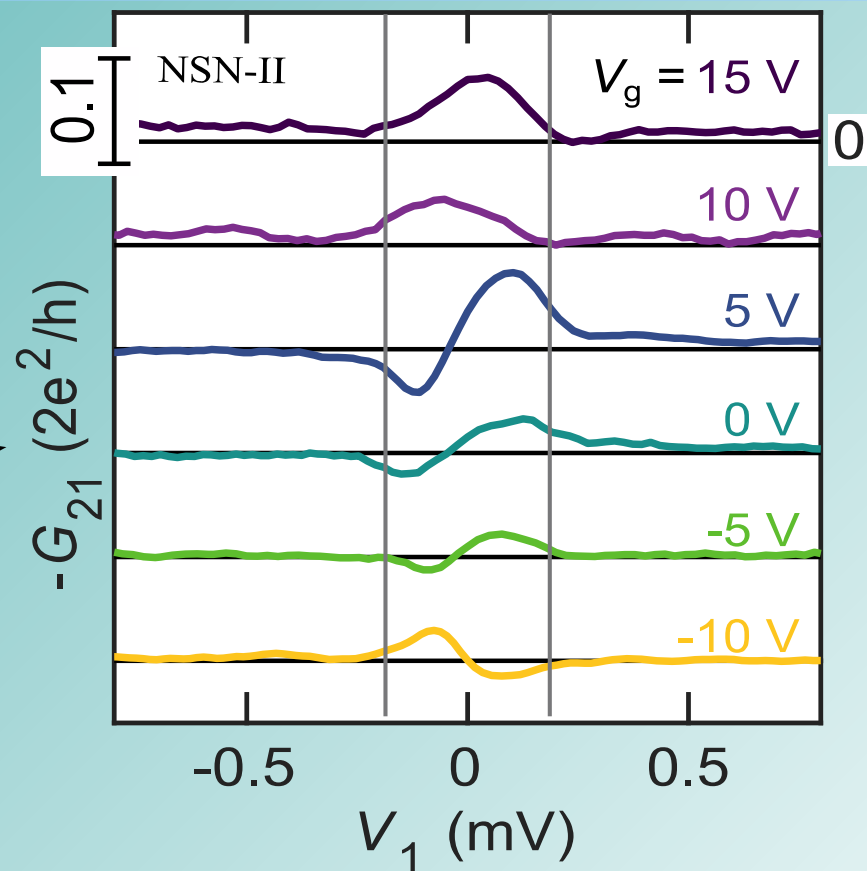
Configuration



small non-diagonal elements

$$\hat{G} = \begin{pmatrix} \frac{\partial I_1}{\partial V_1} & \frac{\partial I_1}{\partial V_2} \\ \frac{\partial I_2}{\partial V_1} & \frac{\partial I_2}{\partial V_2} \end{pmatrix} \quad \hat{R} = \begin{pmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial I_1} & \frac{\partial V_1}{\partial I_2} \\ \frac{\partial V_2}{\partial I_1} & \frac{\partial V_2}{\partial I_2} \end{pmatrix}$$

$$G_{21} \approx -R_{21} (R_{11} R_{22})^{-1}$$

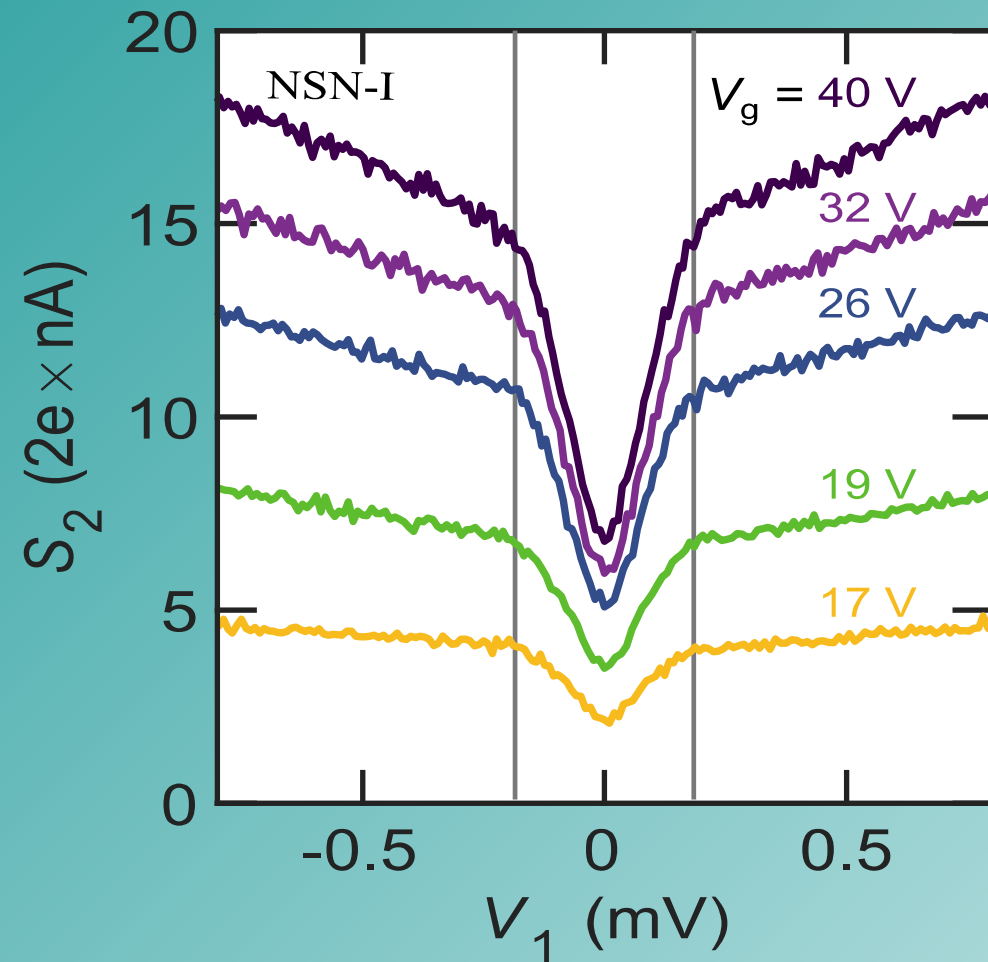


Main features: $|G_{21}| \ll G_{11}, G_{22}$;

G_{21} largest in gap, changes sign;

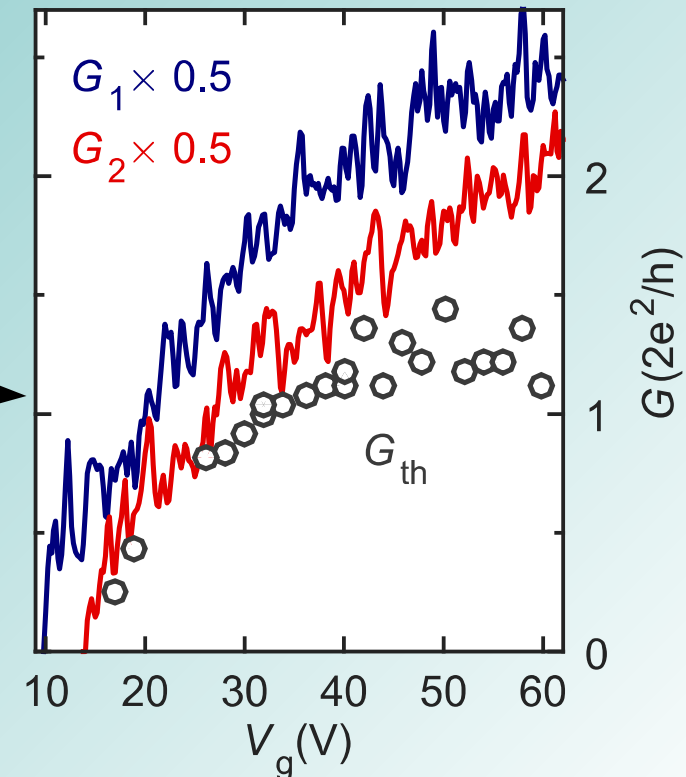
$$\left| \sum \tau_- \right| \lesssim 0.1 \Rightarrow T_{21} \text{ competes with } A_{21}$$

Nonlocal shot noise, thermal conductance



Main features: S_2 behaves regularly;
clear kinks at $V_1 = \pm \Delta/e$;

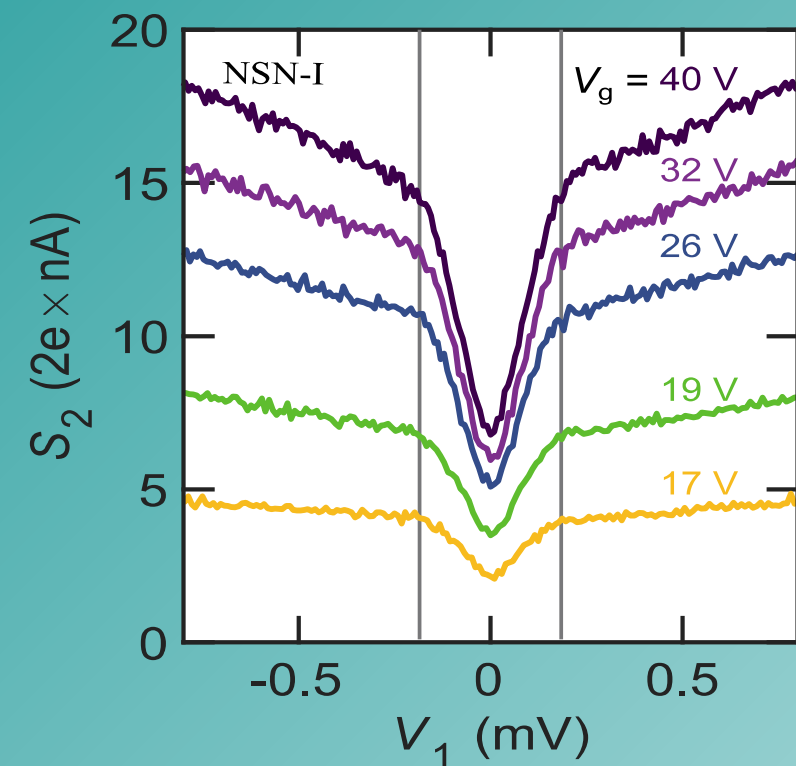
$$\sum (\tau_+ - \tau_-^2) \sim 1;$$



Thermal conductance obtained

neglecting $\tau_-^2 \Rightarrow G_{th} \equiv \mathcal{L}T \frac{e^2}{h} \sum \tau_+$

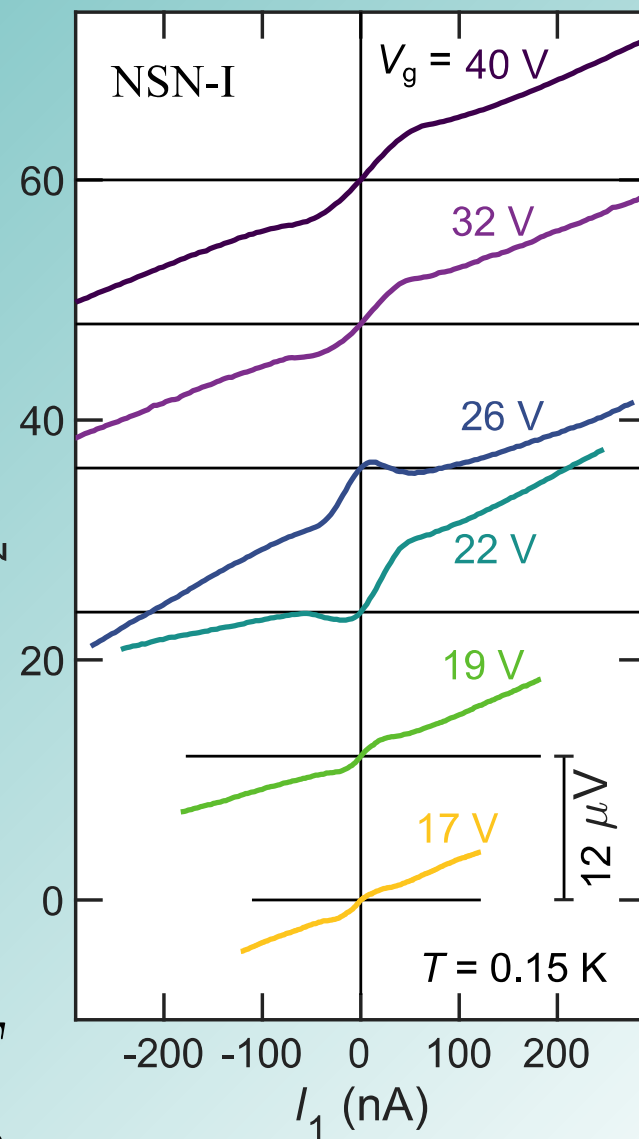
What else charge and noise data tell us?



1st, get current
from voltage:

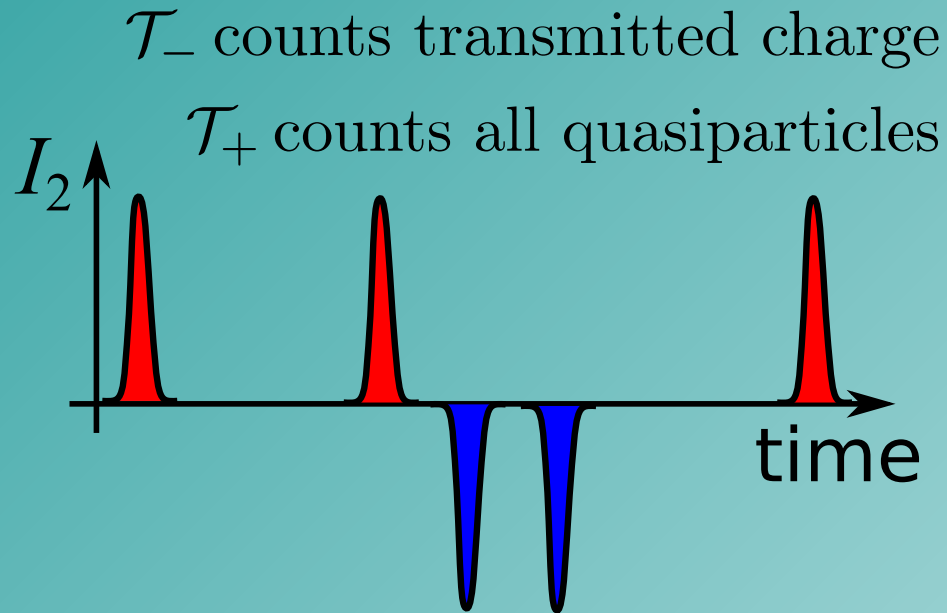
$$I_2 \equiv -G_{22}V_2$$

V_2 (μV)



2nd, noise above Johnson, yet $|eV_2| \leq k_B T$
looks like heating, but can we know more?

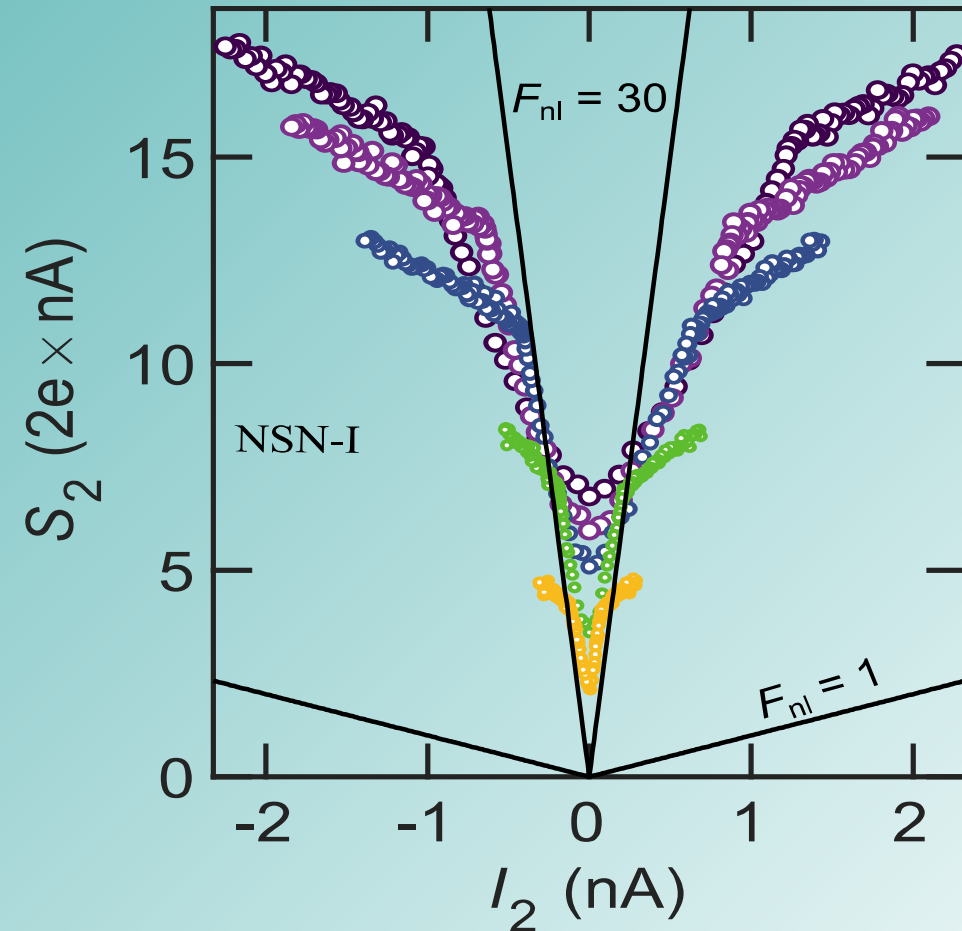
Nonlocal Fano factor, vanishing quasiparticle charge



Average charge of a quasiparticle:

$$\frac{\langle q_T \rangle}{e} = \frac{\sum \mathcal{T}_-}{\sum \mathcal{T}_+}$$

$$F_{nl} \equiv \frac{dS_2}{|2edI_2|} = \frac{\sum (\mathcal{T}_+ - \mathcal{T}_-^2)}{|\sum \mathcal{T}_-|} \leq \left| \frac{e}{\langle q_T \rangle} \right|$$

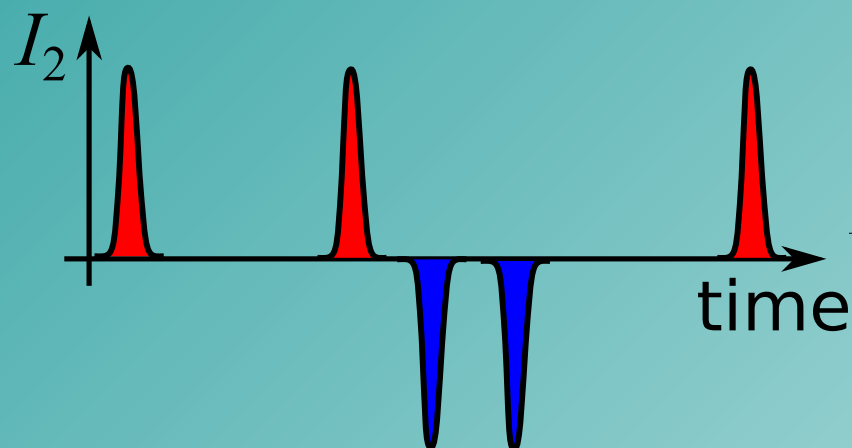


charge-neutrality:
 $|\langle q_T \rangle| \leq 0.03|e|$
 $0.01|e|$ in another device

Full charge restored in normal state

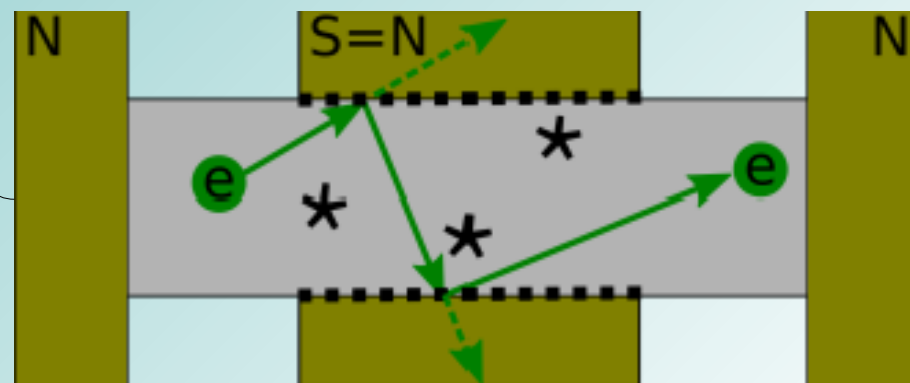
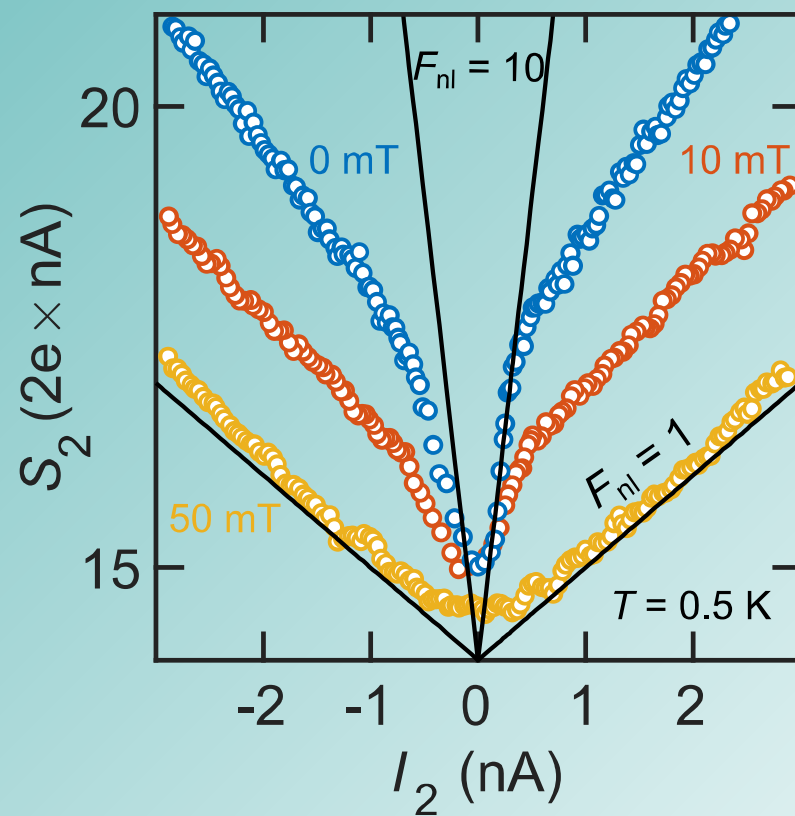
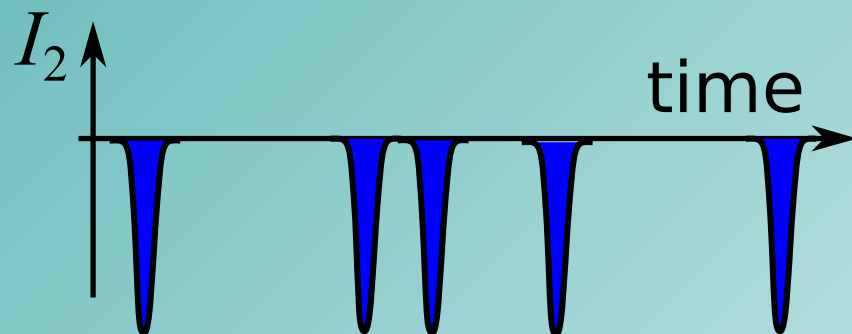
zero B-field – Andreev dominant

$$T_{21} \approx A_{21}; |\langle q_T \rangle| \ll |e| \implies F_{nl} \gg 1$$

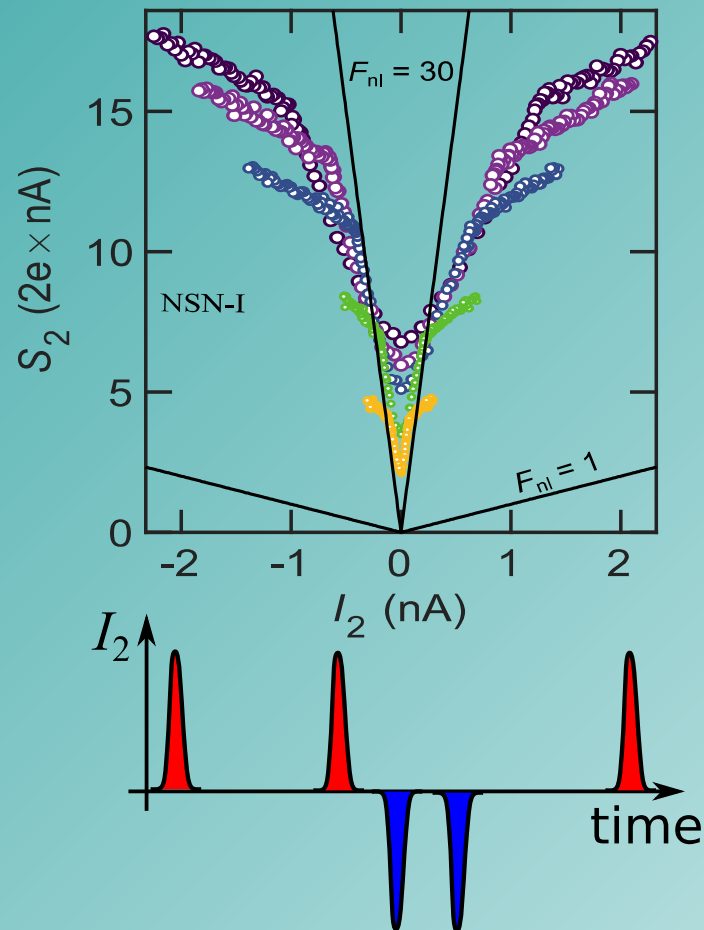
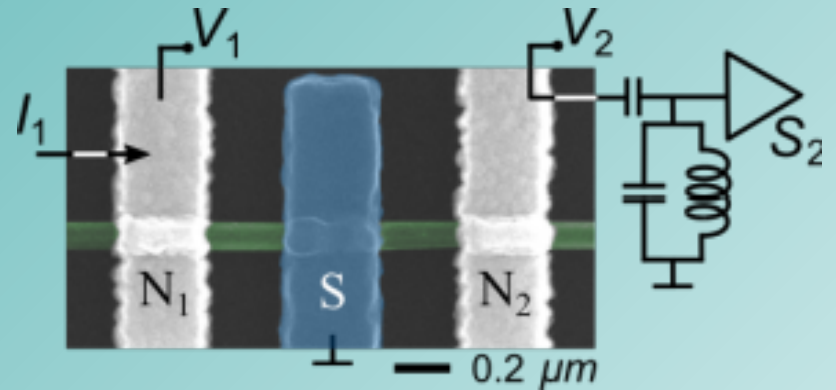
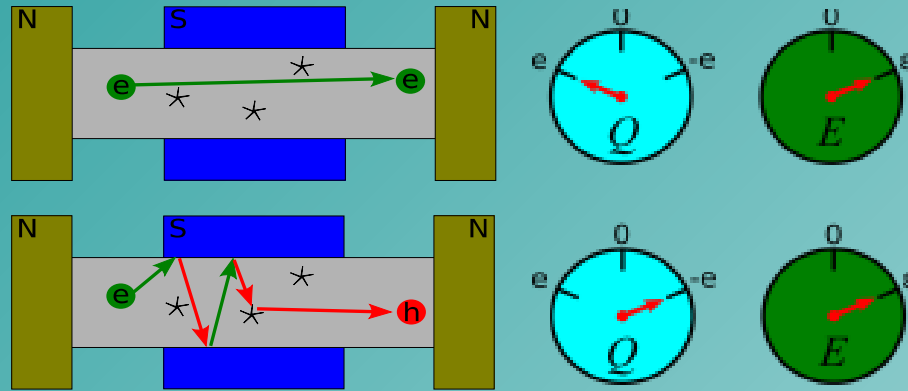


high B-field – interface + disorder

$$T_{21} \ll 1; A_{21} = 0; q_T = e \implies F_{nl} = 1$$



Summary



Quasiparticle response in NSN:

- Charge measurement not enough
- Noise measurement substitutes Heat
- Nonlocal response is charge-neutral

Thank you!

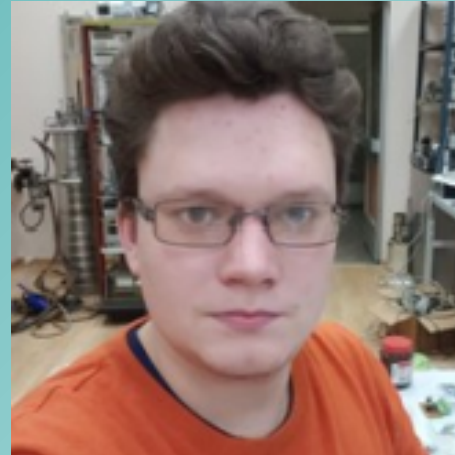
(where is my..) Group



Artem Denisov
@ Princeton



Anton Bubis
@ Skoltech



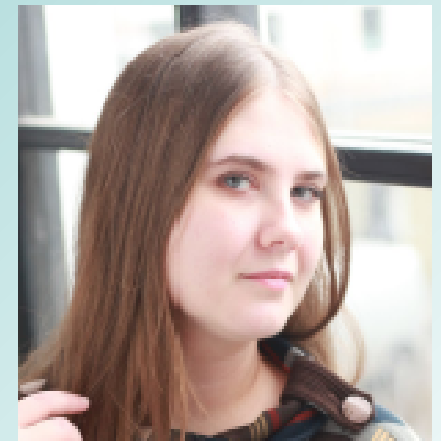
Stas Piatrusha
@ Wuerzburg



Eugene Tikhonov
@ ISSP



InAs nanowires grown by MBE
@ WSI Garching (Germany)
group of Gregor Koblmueller



Nadezhda Titova
@ MPSU

Хочешь заниматься фундаментальной наукой в молодом и дружном коллективе?

Мы выпускники ФОПФа, будет сложно!

Лаборатория электронной кинетики

ИФТТ РАН (г. Черноголовка) приглашает бакалавров и магистров для экспериментальной работы с графеном, топологическими изоляторами, наноструктурами и сверхпроводимостью.

- Международное сотрудничество
- Публикации в ведущих журналах
- Стипендия 40 тыс. рублей + участие в грантах РФ

Зав. лаб. Храпай Вадим Сергеевич
e-mail: dick@issp.ac.ru

