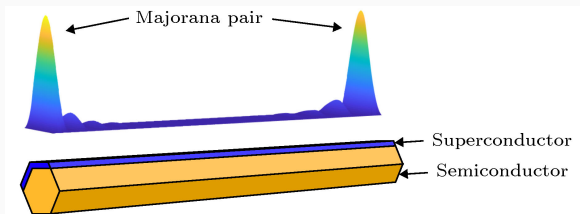


Część 2: realizacja nadprzewodnictwa w materiałach topologicznych

T. Domański

Instytut Fizyki UMCS

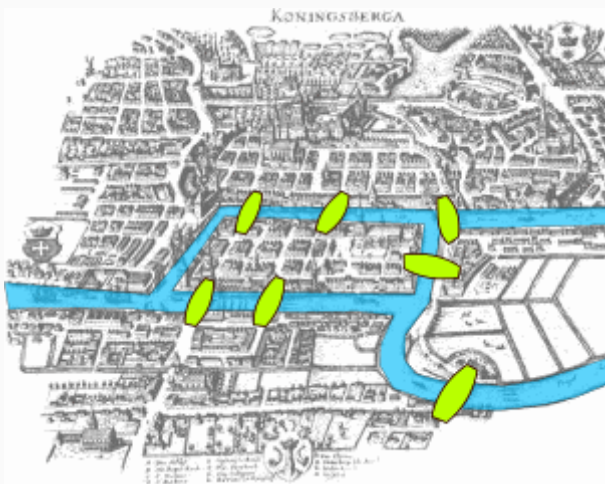


TOPOLOGIA: PRZYKŁAD HISTORYCZNY



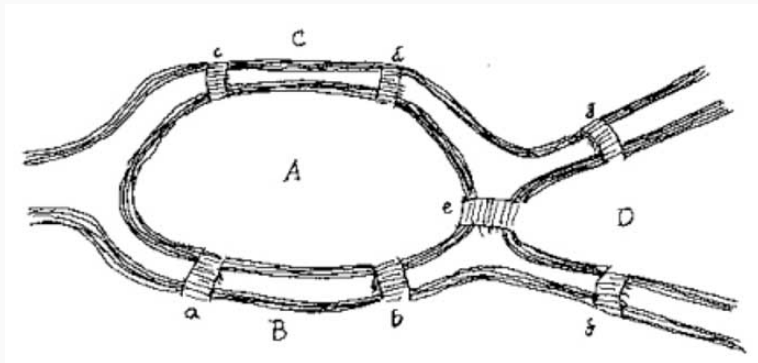
Zagadnienie Eulera: **spacer przez 7 mostów w Królewcu.**

TOPOLOGIA: PRZYKŁAD HISTORYCZNY



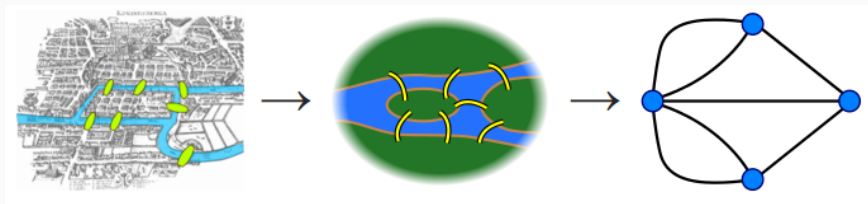
Wymyśl taką trasę spaceru w Królewcu, żeby przez każdy z 7 mostów na rzece Pregoli przejść dokładnie jeden raz.

TOPOLOGIA: PRZYKŁAD HISTORYCZNY



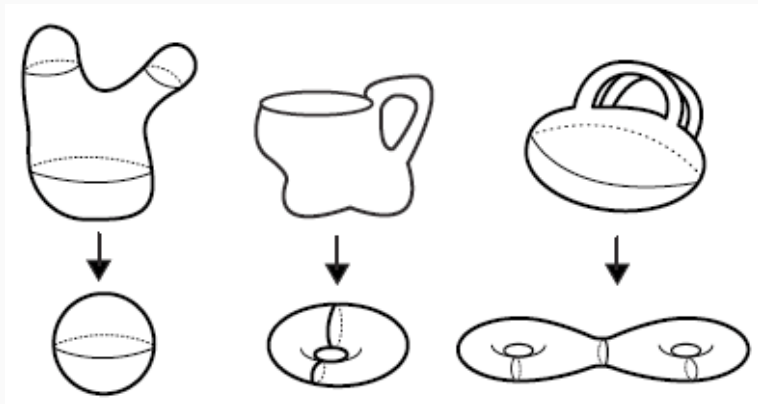
Wymyśl taką trasę spaceru w Królewcu, żeby przez każdy z 7 mostów na rzece Pregoli przejść dokładnie jeden raz.

TOPOLOGIA: PRZYKŁAD HISTORYCZNY



W oparciu o tzw. teorię grafów Euler wykazał, że trasa takiego spaceru jest nierealizowalna.

NIEZMIENNIKI TOPOLOGICZNE: GENUS

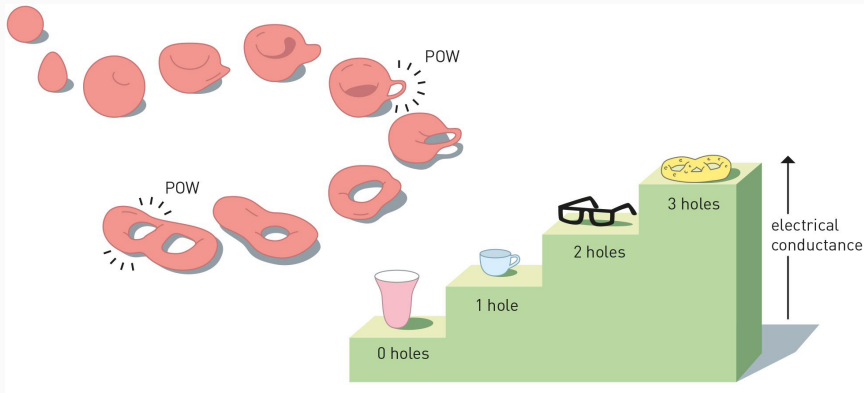


Klasy topologiczne określone w/g liczby dziur.

NIEZMIENNIKI TOPOLOGICZNE: GENUS $G=1$



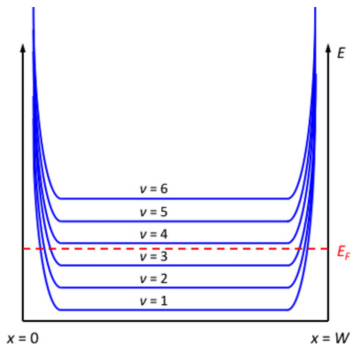
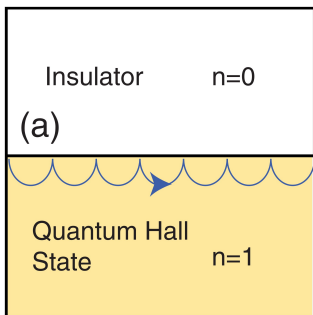
ZWIĄZEK TOPOLOGII Z PRZEWODNICTWEM



Nagroda Nobla z fizyki w 2016 r.

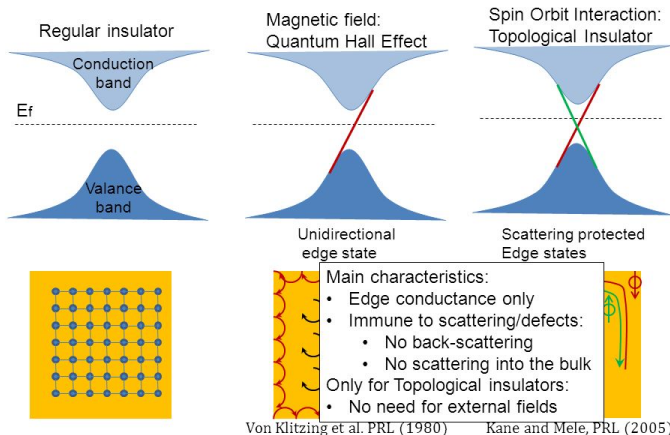
KWANTOWY EFEKT HALLA

Kluczowe znaczenie odgrywają wędrówne (*itinerant*) stany elektronowe realizujące się na brzegach/powierzchniach.



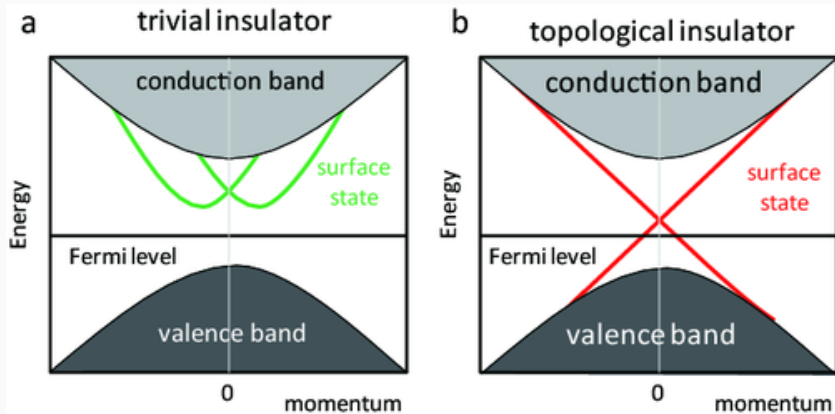
Szkic orbit/poziomów Landaua

What are Topological insulators?



W środku materiał jest izolatorem natomiast na brzegach przewodnikiem.

IZOLATORY TOPOLOGICZNE: ISTOTA ZJAWISKA



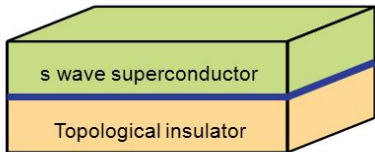
Spektrum izolatorów topologicznie trywialnych oraz nietrywialnych.

POMYSŁ TOPOLOGICZNEGO NADPRZEWODNICTWA

Wkrótce po odkryciu topologicznych izolatorów podjęto próbę znalezienia również ich nadprzewodnikowych odpowiedników.

Superconducting Proximity Effect

Fu, Kane PRL08

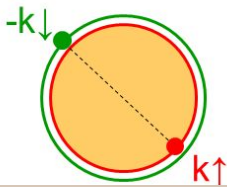


Surface states acquire superconducting gap Δ due to Cooper pair tunneling

BCS Superconductor :

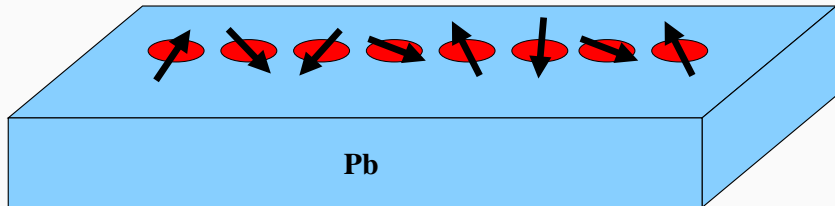
$$\langle c_{k\uparrow}^\dagger c_{-k\downarrow}^\dagger \rangle \propto \Delta e^{i\varphi}$$

(s-wave, singlet pairing)



MAGNETYZM + NADPRZEWODNICTWO

Łańcuch atomów magnetycznych na powierzchni nadprzewodnika jako propozycja realizacji topologicznego nadprzewodnika oraz kwazicząstek Majorany.



T.-P. Choy, J.M. Edge, A.R. Akhmerov, and C.W.J. Beenakker,
Phys. Rev. B 84, 195442 (2011).

CZĄSTKI MAJORANY: CO TO JEST ?

Dygresja nt. sformułowania mechaniki kwantowej

- P. Dirac (1928)

Relatywistyczne równanie $i\frac{\partial}{\partial t}\psi = (\vec{\alpha}\cdot\vec{p} + \beta m)\psi$
dla fermionów implikuje istnienie:

cząstek (dla $E > 0$) oraz antycząstek (dla $E < 0$).

- E. Majorana (1937)

Wydedukował wybór $\vec{\alpha}$ oraz β , który gwarantuje rzeczywistą funkcję ψ . W konsekwencji:

cząstka = antycząstka czyli **kreacja = anihilacja**



Ettore Majorana był genialnym matematykiem pochodzącym z południowych Włoch. Pracował w grupie E. Fermiego w Rzymie, dla którego nie miał jednak należnego respektu. Teorię Fermiego uważał za banalną.

Zaginął 25 marca 1938 r.

MAJORANY W MATERII SKONDENSOWANEJ

- cząstka = antycząstka

$$\hat{\gamma}_{i,n}^\dagger = \hat{\gamma}_{i,n}$$

- ⇒ neutralne ładunkowo

(50 % elektron + 50 % dziura)

- ⇒ o zerowej energii

(tzn. energii Fermiego)

- frakcyjalny charakter

$$\hat{\gamma}_{i,n}^\dagger \hat{\gamma}_{i,n} = 1/2$$

- ⇒ w połowie wypełnione/puste

- przestrzennie splątane

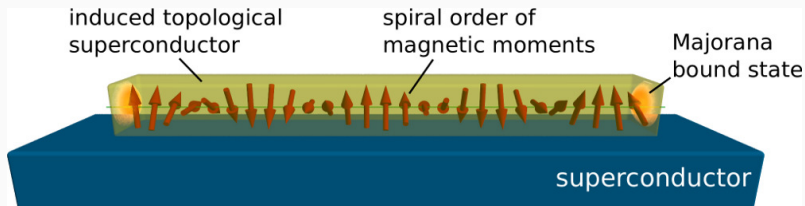
- ⇒ zawsze występują parami

- chronione topologicznie

- ⇒ odporne na defazowanie/dekoherencję

ZLOKALIZOWANE KWAZICZĄSTKI MAJORANY

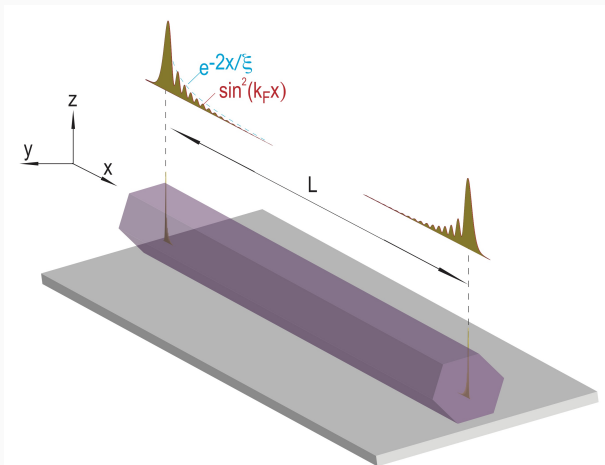
Helikalne uporządkowanie spinów (które można zaindukować np. oddziaływaniem Rashby w obecności pola magnetycznego) w kontakcie z nadprzewodnikiem generuje międzywęzłowe pary identycznych spinów (typu *p-wave*).



R. Lutchyn, J. Sau, S. Das Sarma, Phys. Rev. Lett. **105**, 077001 (2010).

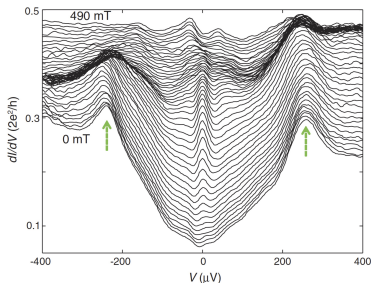
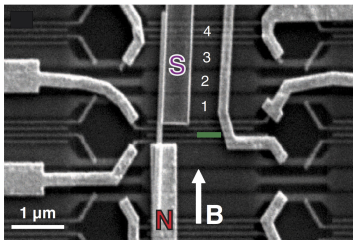
Y. Oreg, G. Refael, F. von Oppen, Phys. Rev. Lett. **105**, 177002 (2010).

Majorany lokalizują się przy końcach łańcucha.



REALIZACJA DOŚWIADCZALNA

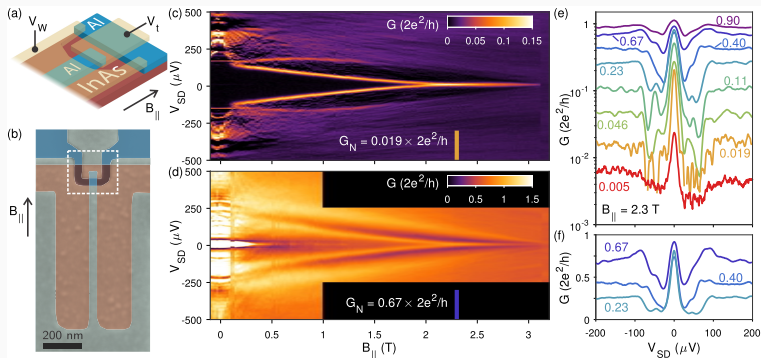
Pomiar przewodnictwa prądu dI/dV dla nanołańcucha InSb w temp. 70 mK i różnych pól magnetycznych.



V. Mourik, ..., and L.P. Kouwenhoven, Science **336**, 1003 (2012).

/ Uniwersytet Techniczny w Delft, Holandia /

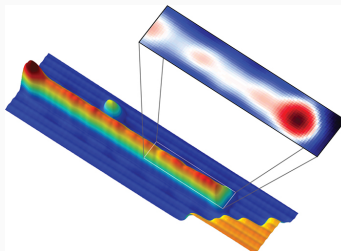
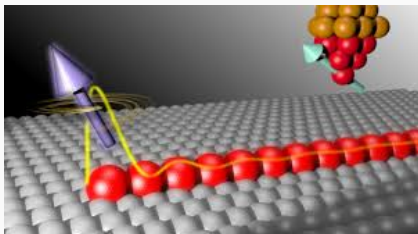
Pomiary dla drutów Al wytwarzanych litograficznie



F. Nichele, ..., and Ch. Markus, Phys. Rev. Lett. **119**, 136803 (2017).

/ Uniwersytet w Kopenhadze, Dania /

Pomiary przewodnictwa STM dla łańcucha atomów żelaza na powierzchni nadprzewodzącego ołowiu.

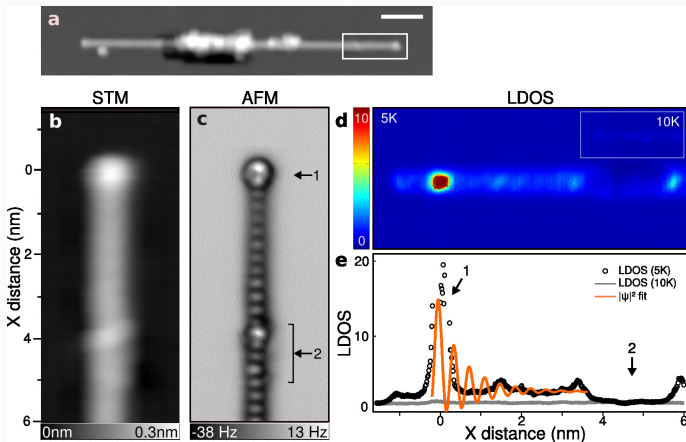


S. Nadj-Perge, ..., and A. Yazdani, Science **346**, 602 (2014).

/ Uniwersytet w Princeton, USA /

REALIZACJA DOŚWIADCZALNA

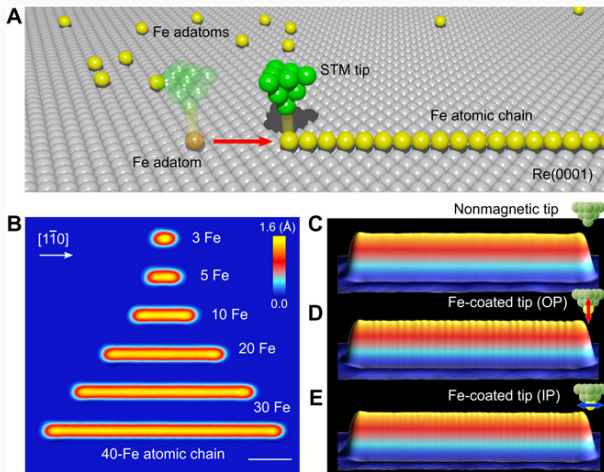
Spektroskopia AFM & STM dla łańcucha atomów Fe na powierzchni Pb(110).



R. Pawlak, M. Kisiel *et al*, npj Quantum Information **2**, 16035 (2016).

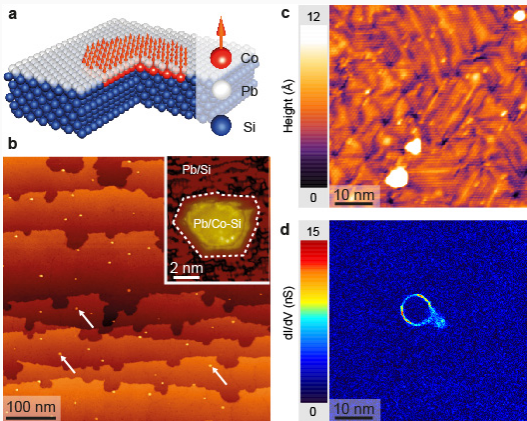
/ Uniwersytet w Bazylei, Szwajcaria /

Pomiary STM dla struktur Fe na nadprzewodniku Re



OBSERWACJA WĘDROWNYCH MAJORAN

Majorany na brzegu wyspy magn. atomów Co



Średnica wyspy:

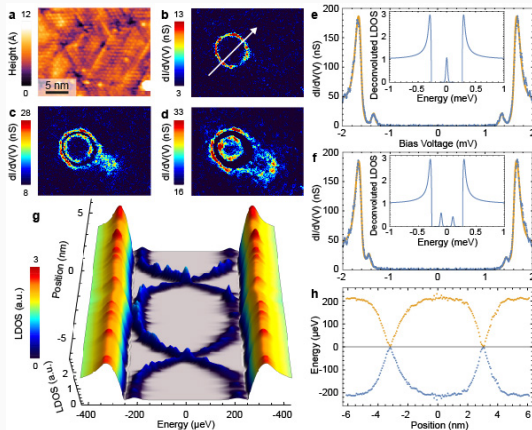
5 – 10 nm

G. Ménard, ..., and P. Simon, Nature Commun. **8**, 2040 (2017).

/ Uniwersytet P. & M. Curie w Paryżu, Francja /

OBSERWACJA WĘDROWNYCH MAJORAN

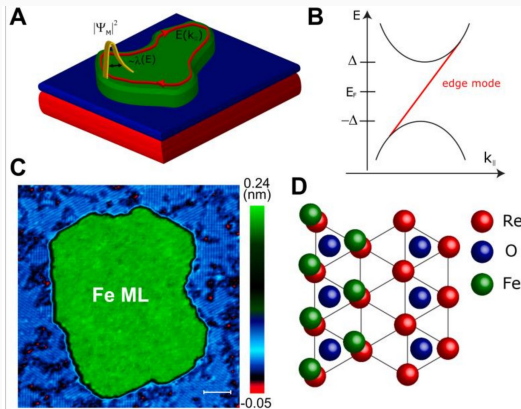
Majorany na brzegu wyspy magn. atomów Co



G. Ménard, ..., and P. Simon, Nature Commun. **8**, 2040 (2017).
/ Uniwersytet P. & M. Curie w Paryżu, Francja /

WĘDROWNE MODY BRZEGOWE MAJORANY

Magnetyczna wyspa atomów **Fe** na powierzchni nadprzewodzącego **Re**



Liczba Cherna:

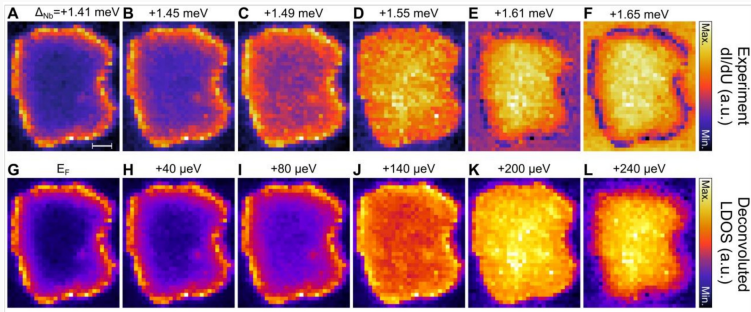
$$C = 20$$

A. Palacio-Morales, ..., and R. Wiesendanger, Science Adv. **5**, eaav6600 (2019).

/ Uniwersytet w Hamburgu (Niemcy) /

WĘDROWNE MODY BRZEGOWE MAJORANY

Mapa przewodnictwa prądu tunelowania (górny panel) oraz widmo energetyczne (dolny panel) wyznaczone dla różnych energii w obszarze pod-przerwowym ($\Delta = 240\mu\text{eV}$).

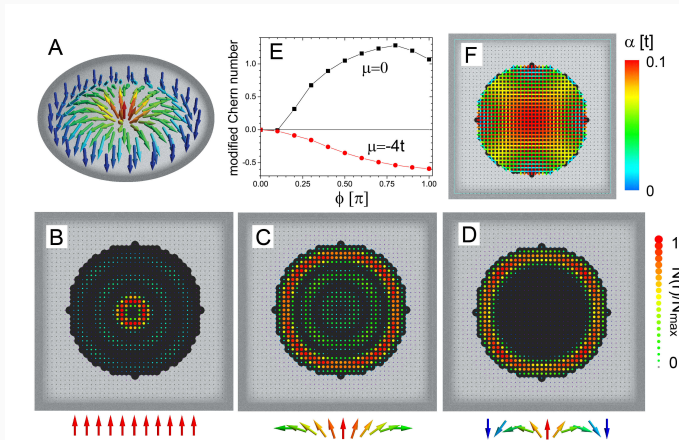


A. Palacio-Morales, ..., and R. Wiesendanger, Science Adv. **5**, eaav6600 (2019).

/ Uniwersytet w Hamburgu (Niemcy) /

PERSPEKTYWY: SKYRMIONY W NADPRZEWODNIKACH

Kw. Majorany zaindukowane na strukturach skyrmionowych



E. Mascot, S. Cocklin, S. Rachel, and D.K. Morr, Nature Comm. **10**, 2587 (2019).

Uniw. Stanu Illinois w Chicago (USA)

EGZOTYKA KWAZICZĄSTEK MAJORANY

- **cząstka = antycząstka**

$$\hat{\gamma}_{i,n}^{\dagger} = \hat{\gamma}_{i,n}$$

⇒ **neutralne ładunkowo**

⇒ **o zerowej energii**

- **frakcyjalny charakter**

$$\hat{\gamma}_{i,n}^{\dagger} \hat{\gamma}_{i,n} = 1/2$$

⇒ **w połowie wypełnione/puste**

- **przestrzennie nielokalne**

⇒ **zawsze występują parami**

- **chronione topologicznie**

⇒ **odporne na defazowanie/dekoherencję**

PERSPEKTYWA ZASTOSOWAŃ

PERSPEKTYWA ZASTOSOWAŃ

- nowe urządzenia spintroniczne

⇒ np. ułamkowy SQUID

PERSPEKTYWA ZASTOSOWAŃ

- nowe urządzenia spintroniczne

⇒ np. ułamkowy SQUID

- stabilne bity kwantowe

qubits

PERSPEKTYWA ZASTOSOWAŃ

- nowe urządzenia spintroniczne

⇒ np. ułamkowy SQUID

- stabilne bity kwantowe

qubits

- kwantowe obliczenia

braiding

PERSPEKTYWA ZASTOSOWAŃ

- nowe urządzenia spintroniczne

⇒ np. ułamkowy SQUID

- stabilne bity kwantowe

qubits

- kwantowe obliczenia

braiding

Inicjatywa firmy IBM: Q-station

⇒ USA (California, Washington)

⇒ Holandia (Delft)

⇒ Dania (Kopenhaga)

⇒ Australia (Sydney)