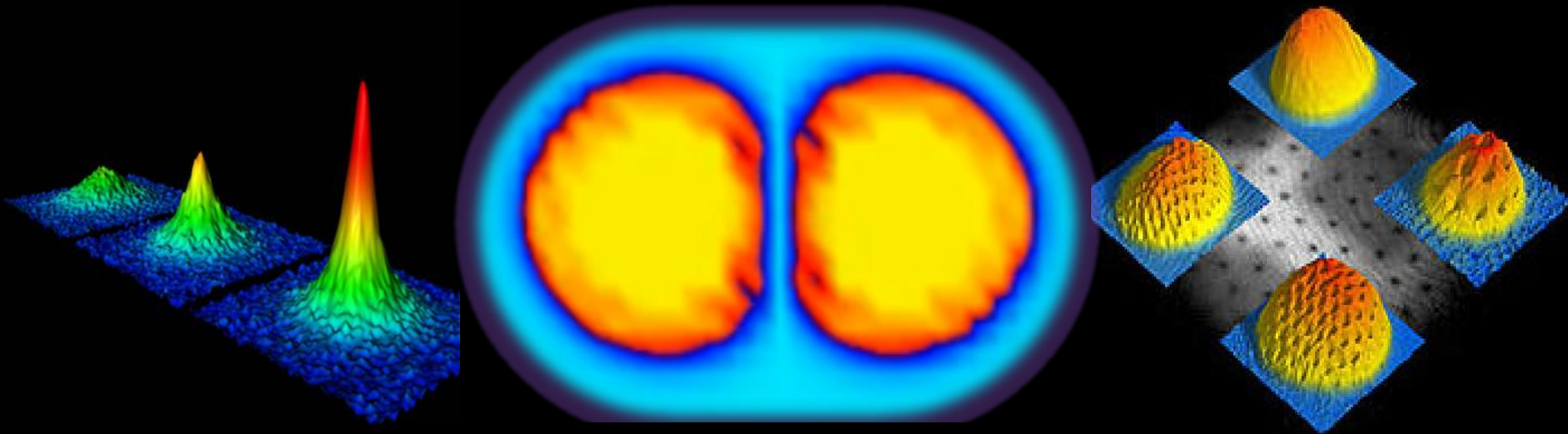
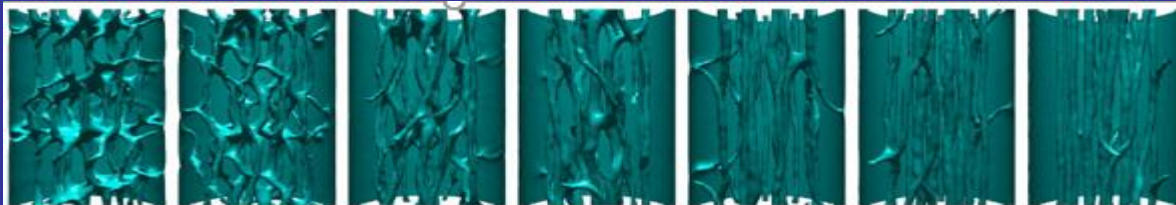


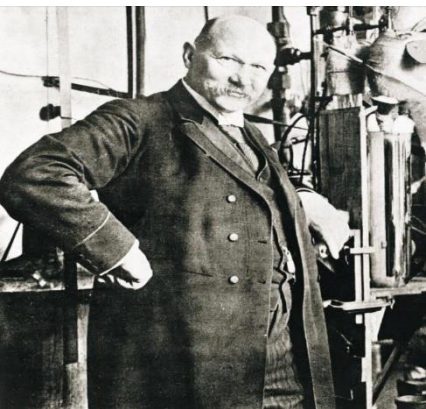
Od kwantowych gazów atomowych do gwiazd neutronowych - tajemnice układów nadciekłych.



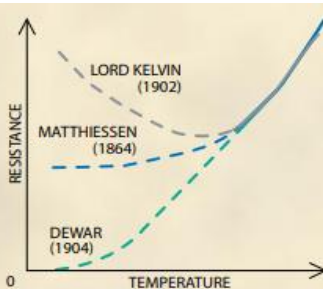
Piotr Magierski

Politechnika Warszawska





Przewidywania teoretyczne przed 1911



Najważniejsze wydarzenia w historii nadprzewodnictwa

- 1911 - Heike Kamerlingh Onnes: Pomiary oporu elektrycznego rtęci w funkcji temperatury. Brak spadku napięcia na próbce rtęci schłodzonej do niskiej temperatury $T=4.2\text{K}$.

Nadprzewodnictwo = brak oporu elektrycznego

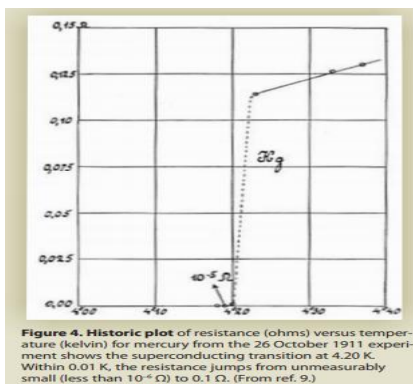
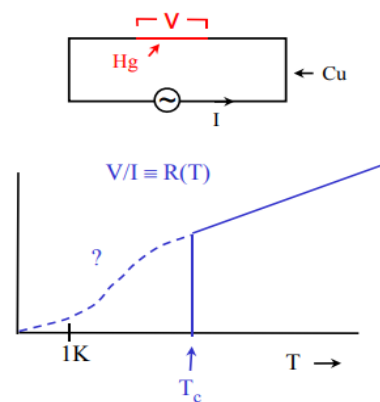


Figure 4. Historic plot of resistance (ohms) versus temperature (kelvin) for mercury from the 26 October 1911 experiment shows the superconducting transition at 4.20 K. Within 0.01 K, the resistance jumps from unmeasurably small (less than $10^{-6} \Omega$) to 0.1 Ω . (From ref. 9.)

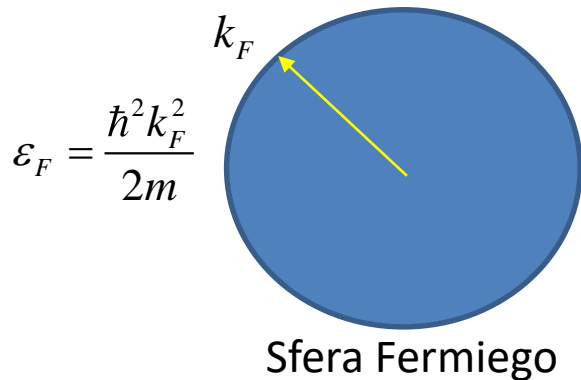
- 1933 - Efekt Meissnera-Ochsenfelda: Wypchnięcie strumienia pola magnetycznego z nadprzewodnika
- 1935 - fenomenologiczna teoria Londonów
- 1950 - odkrycie efektu izotopowego
- 1950 - teoria Ginzburga-Landaua (GL)
- 1957 - mikroskopowa teoria BCS (Bardeen, Cooper Schrieffer)
- 1959 - L. Gorkov wyprowadza równania GL z teorii BCS.
- 1962 - Efekt Josephsona (złącze Josephsona)
- 1986 - Odkrycie nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego



J. Bardeen

L. Cooper

J.R. Schrieffer

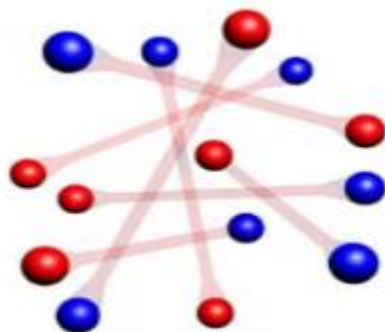
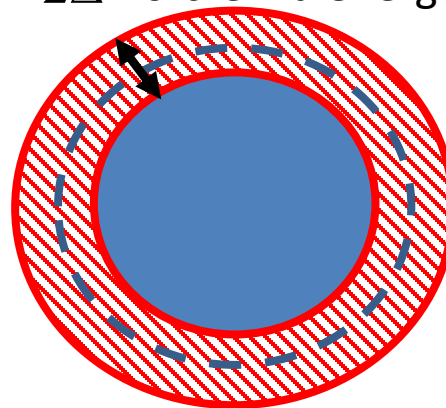


Pary Coopera

2Δ - szczelina energetyczna



oddziaływanie
przyciągające



korelacje między parami (Coopera)
o przeciwnych spinach

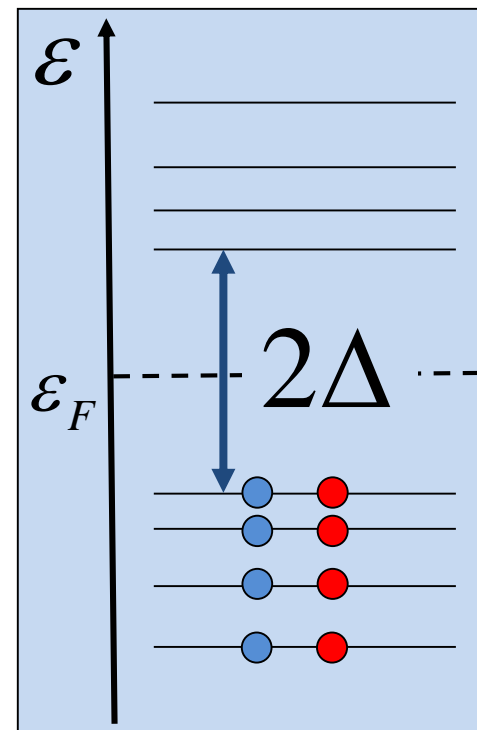
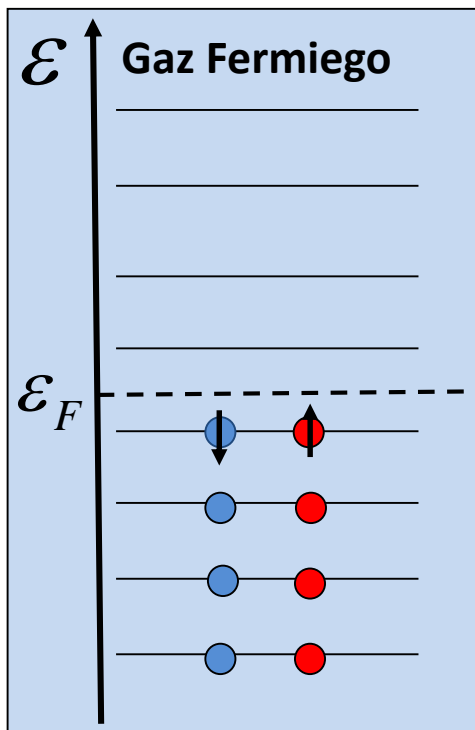
Energia elementarnego wzbudzenia
(kwazicząstki):

$$E_{qp} = \sqrt{(\varepsilon - \varepsilon_F)^2 + |\Delta|^2} > |\Delta|$$

Teoria BCS:

$$|BCS\rangle = \prod_k (u_k + v_k a_{k\uparrow}^\dagger a_{-k\downarrow}^\dagger) |próżnia\rangle$$

$$\Delta = f(u_k, v_k)$$



Temperatury krytyczne dla nadprzewodnictwa w różnych układach

- ✓ Gazy atomów fermionowych: $T_c \approx 10^{-12} - 10^{-9} \text{ eV}$
- ✓ Ciekły ^3He : $T_c \approx 10^{-7} \text{ eV}$
- ✓ Metale i stopy: $T_c \approx 10^{-3} - 10^{-2} \text{ eV}$
- ✓ Jądra atomowe i gwiazdy neutronowe: $T_c \approx 10^5 - 10^6 \text{ eV}$
- Nadprzewodnictwo kolorowe (kwarki): $T_c \approx 10^7 - 10^8 \text{ eV}$
($1 \text{ eV} \approx 10^4 \text{ K}$)

Teoria BCS: $\frac{\Delta}{T_c} \approx 1.76$

Nadciekłość i nadprzewodnictwo

- Kondensacja Bosego-Einsteina (BEC) oddziałujących bozonów
- Przepływ bezstratny cieczy ^4He
- Opis teoretyczny:

$$\Psi(\vec{r}) = |\Psi(\vec{r})| e^{i\phi(\vec{r})}$$

- „Kondensacja” par Coopera
- Zerowy opór elektryczny
- Opis teoretyczny:

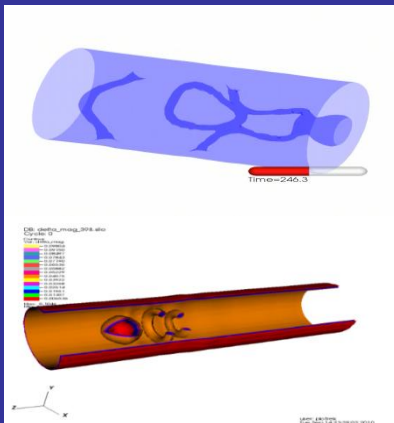
Pole par Coopera

$$\Delta(\vec{r}) = |\Delta(\vec{r})| e^{i\phi(\vec{r})}$$

Niektóre egzotyczne układy „nadprzewodzące”

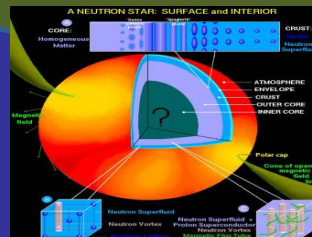
$$\frac{\Delta}{\mathcal{E}_F} \leq 0.5$$

Kwantowe gazy atomowe (fermionowe).
Dynamika wirów kwantowych, wzbudzenia solitonowe, turbulencja kwantowa.



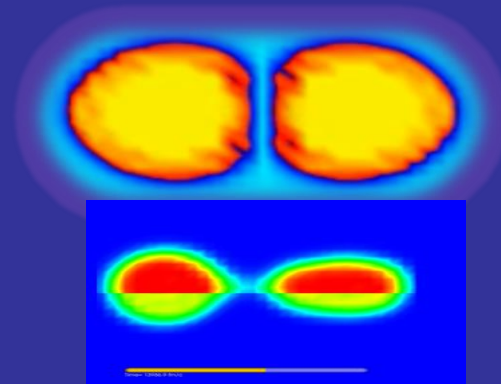
$$\frac{\Delta}{\mathcal{E}_F} \leq 0.1 - 0.2$$

Gwiazdy neutronowe.
Procesy: Dynamika rotacji gwiazdy (efekt glitchu: nagłe przyspieszanie częstości rotacji), chłodzenie gwiazdy neutronowej



$$\frac{\Delta}{\mathcal{E}_F} \leq 0.03$$

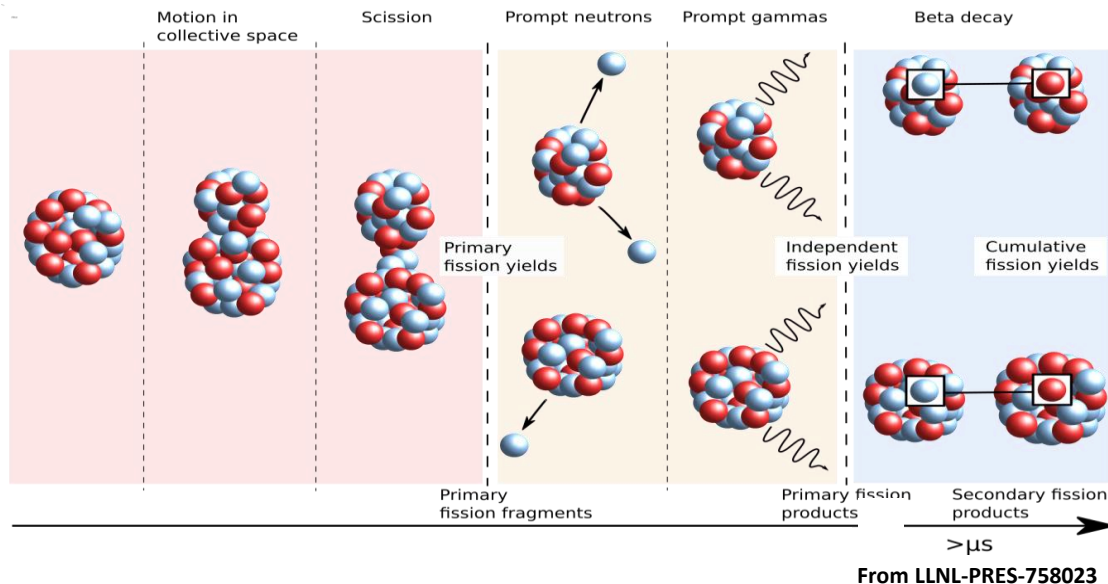
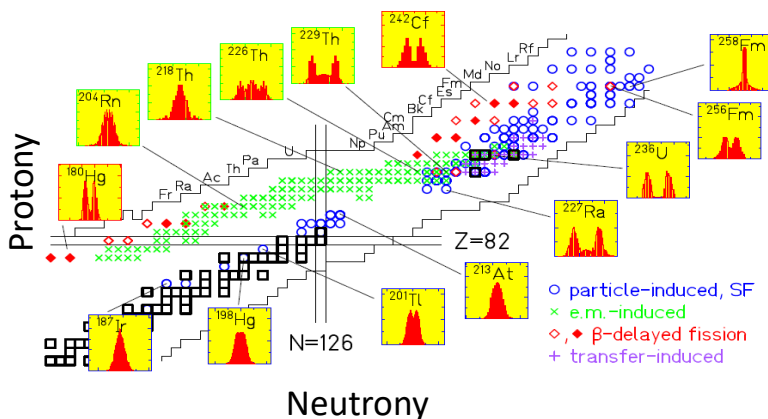
Jądra atomowe.
Procesy: Rozszczepienie jąder, fuzja, zderzenia.



Wymuszone rozszczepienie jądra atomowego

Niskoenergetyczne rozszczepienia jąder

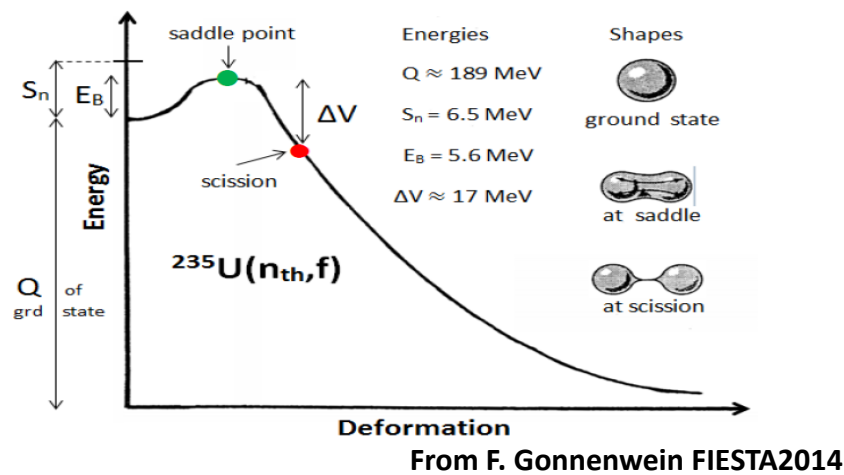
K.-H. Schmidt, B. Jurado, Rep. Prog. Phys. 81 106301 (2018)



Charakterystyczne skale czasowe związane z procesem rozszczepienia (przy energiach < 10MeV):

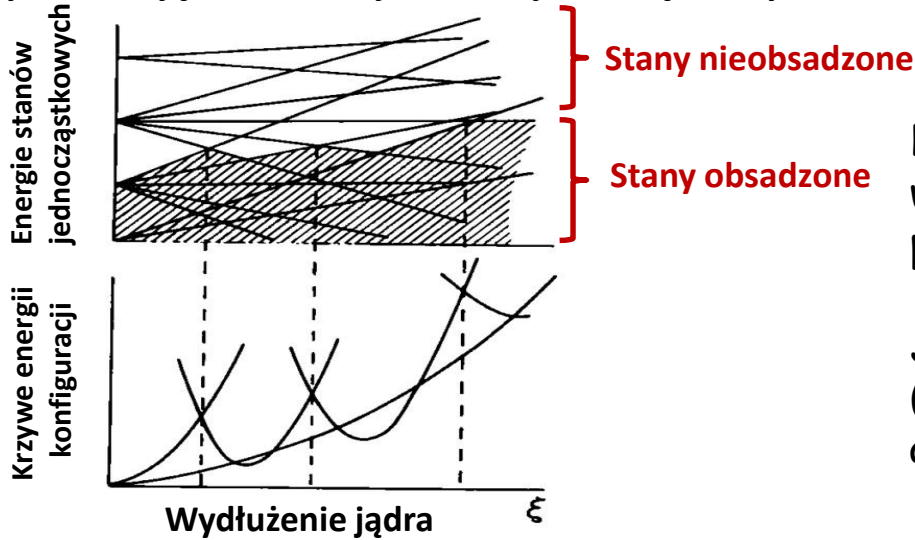
- Stan podst. - pkt. siodłowy (saddle): 1 000 000 zs
 - Pkt. siodłowy - pkt. podziału (scission): 10-100 zs
 - Przyspieszenie fragmentów do 90% ich końcowej prędkości: 10 zs
 - Emisja neutronów: 1 000 zs
- $1zs = 10^{-21}s$

Schematyczny wykres zależności energii jądra od deformacji



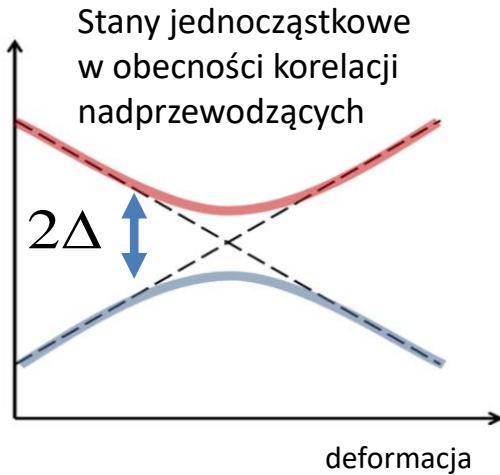
Rozszczepienie jądra i nadprzewodnictwo

Wydłużenie jądra i ewolucja stanów jednocząstkowych



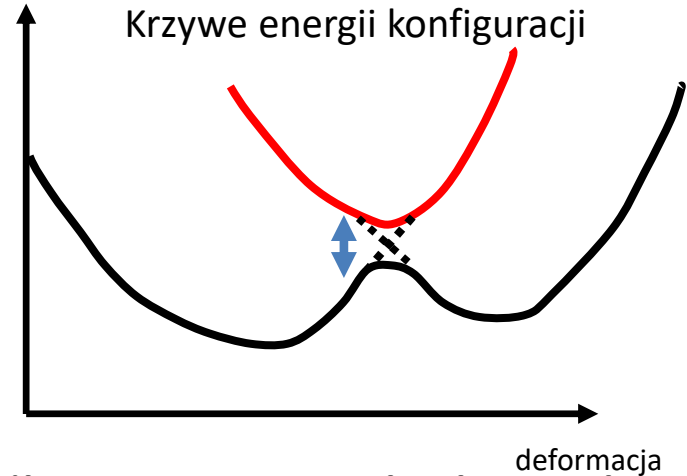
Dzięki istnieniu korelacji nadprzewodzących w jądrze ruch kolektywny jądra (wydłużenie) posiada bardziej adiabatyyczny charakter.

Jednak nie oznacza to, że rozszczepienie (zwłaszcza wymuszone) jest procesem adiabatyicznym.



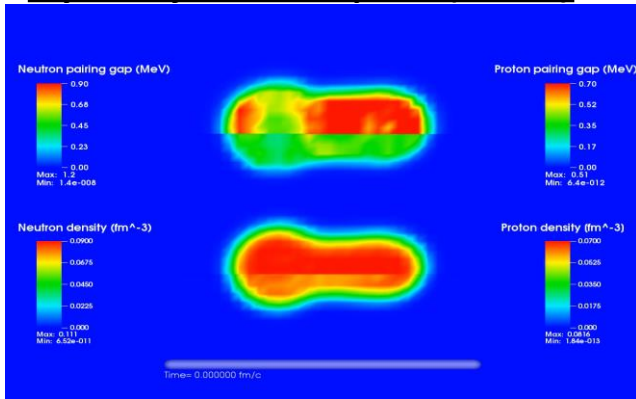
energia wzbudzenia kwazicząstki:

$$E_{qp} = \sqrt{(\varepsilon - \mu)^2 + |\Delta|^2}$$



Teoria: Bez nadprzewodnictwa proces rozszczepienia byłby niemożliwy, a przynajmniej bardzo utrudniony!

Wymuszone rozszczepienie ^{240}Pu - Symulacja mikroskopowa (TDDFT)



Energia kinetyczna fragmentów

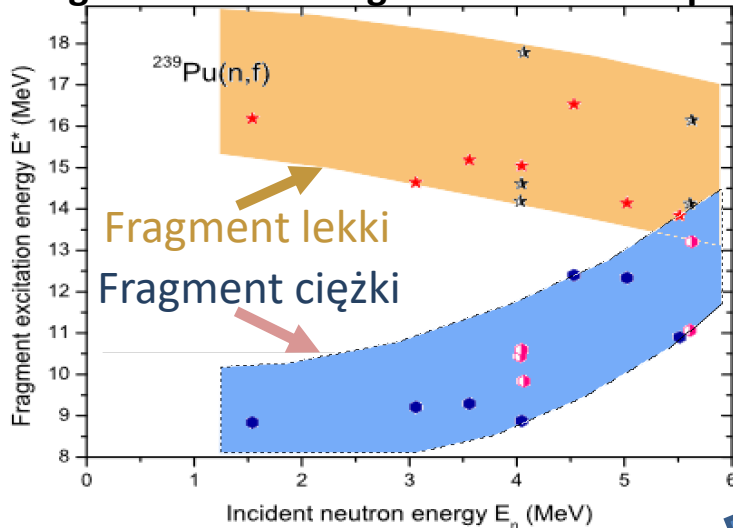
E^* (MeV)	E_n (MeV)	TKE_{TDSLDA} (MeV)	TKE_{syst} (MeV)	err (%)	Z_L	N_L
8.08	1.542	173	177.26	1.95	40.825	62.246
9.60	3.063	174	176.73	1.13	40.500	61.536
10.10	3.560	179	176.56	1.43	41.625	62.783
10.57	4.032	173	176.39	1.55	40.092	61.256
10.58	4.043	173	176.39	1.70	40.146	61.388
10.58	4.047	175	176.39	0.72	40.313	61.475
10.60	4.065	174	176.38	0.92	40.904	62.611
11.07	4.534	176	176.22	0.14	41.495	63.134
11.56	5.024	175	176.05	0.51	40.565	61.894
12.05	5.515	176	175.88	0.49	40.412	61.809
12.15	5.610	176	175.84	0.29	40.355	61.695
12.16	5.626	176	175.84	0.15	41.386	62.764

Dokładność
wyznaczenia
energii kinetycznych
< 2%

Teoria Eksp.

A. Bulgac, P. Magierski, K.J. Roche, and I. Stetcu,
Phys. Rev. Lett. 116, 122504 (2016)

Energie wzbudzeń fragmentów rozszczepienia



Ruch kolektywny jądra prowadzący do rozszczepienia
nie jest adiabatyczny chociaż jest wolny.

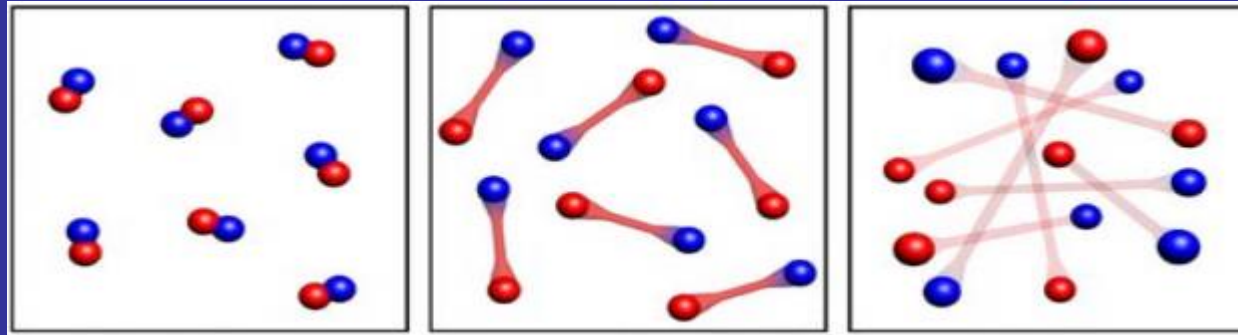
Średnie tempo wydłużania jądra jest stałe do chwili
tuż przed rozszczepieniem.

Jądro podczas procesu rozszczepienia „nagrzewa się”
wskutek przekazu energii związanej z ruchem kolektywnym
do wewnętrznych stopni swobody.

Test dla teorii: pomiar energii wzbudzeń fragmentów –
niestety brak jeszcze danych eksperymentalnych

J. Grineviciute et al. (in preparation)

BCS – BEC crossover



Natężenie (rozwiązania)

Kondensat Bosego-Einsteina
(związane pary fermionów = bozony)

Nadprzewodnik
(pary Coopera)

Nie ma przejścia fazowego między reżimem BCS i BEC

Eagles (1969), Leggett (1980)

George Bertsch (Seattle, 1999). Pytanie do uczestników konferencji dotyczącej zagadnień kwantowej teorii wielu ciał (nagroda \$200):

Jakie są własności stanu podstawowego gazu fermionów o spinie $\frac{1}{2}$ przyciągających się siłą o zasięgu zaniedbywalnym w porównaniu ze średnią odległością pomiędzy cząstkami, ale odpowiadającej nieskończonej długości rozpraszania?

Nieskończona długość rozpraszania: para fermionów jest na granicy związania (energia wiązania wynosi zero)



Unitarny gaz Fermiego: Gaz oddziałujących fermionów w którym średnia odległość między cząstkami jest duża w porównaniu z rozmiarami cząstek (zasięgiem oddz.), ale mała w porównaniu z długością rozpraszania

$$n r_0^3 \ll 1$$

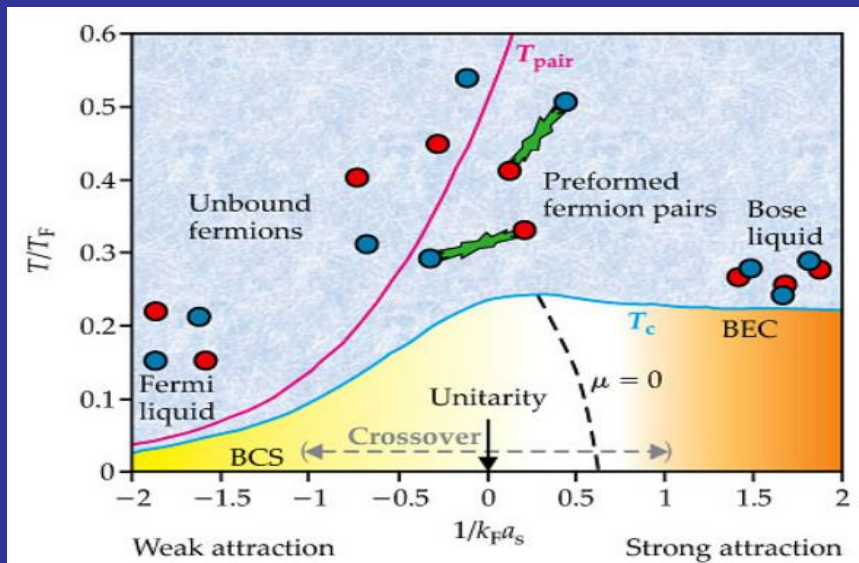
$$n |a|^3 \gg 1$$

n - gęstość cząstek
 a - długość rozpraszania
 r_0 - zasięg oddziaływania

UNIWERSALNOŚĆ:

$$E = \xi E_{FG}$$

E_{FG} - Energia nieoddz. gazu Fermiego
 ξ - Parametr Bertscha



Spodziewane własności układu fermionów w funkcji długości rozpraszania i temperatury

From Sa de Melo,
 Physics Today (2008)

Fizyczna realizacja: gaz atomów fermionowych

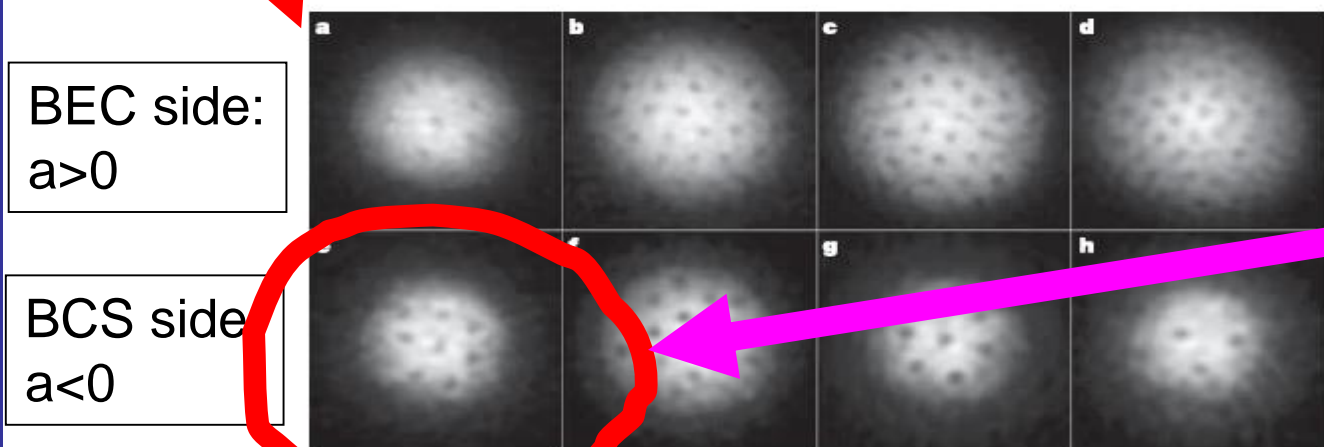
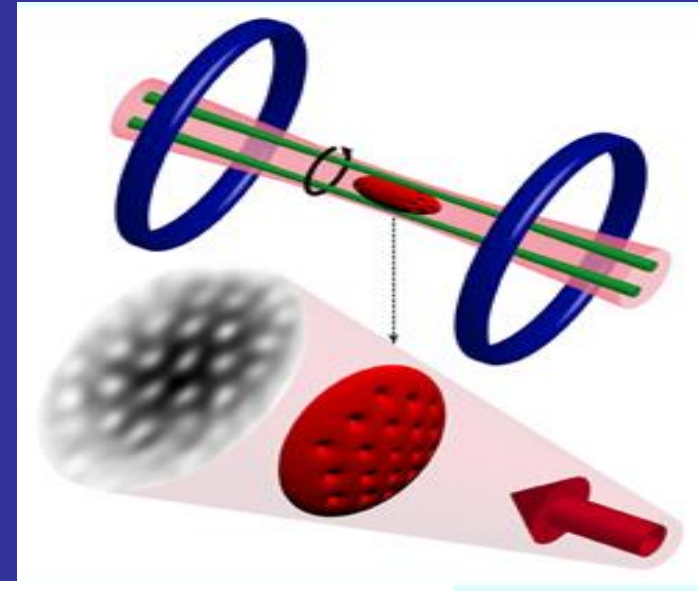
Długość rozpraszania (natężenie oddziaływanie) można zmieniać przy pomocy zewn. pola magnetycznego – rezonans Feshbacha.

Liczba atomów w gazie: $10^5 - 10^6$.

Krótką historia (eksp.):

- ✓ W roku 1999 DeMarco and Jin otrzymali zdegenerowany atomowy gaz Fermiego.
- ✓ W roku 2005 grupa Zwierleina i Ketterle zaobserwowała wiry kwantowe w gazie atomowym - dowód istnienia nadciekłości/nadprzewodnictwa.

gaz atomów ${}^6\text{Li}$



BEC side:
 $a > 0$

BCS side:
 $a < 0$

Reżim unitarny

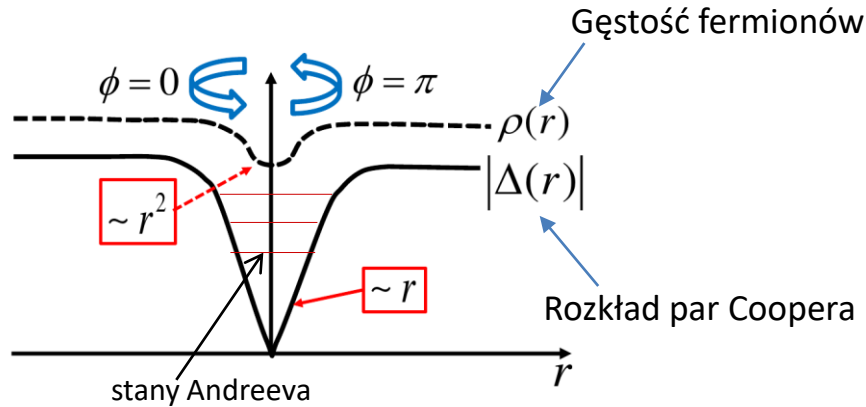
Figure 2 | Vortices in a strongly interacting gas of fermionic atoms on the BEC- and the BCS-side of the Feshbach resonance. At the given field, the cloud of lithium atoms was stirred for 500 ms (a) or 500 ms (b–h) followed by an equilibration time of 500 ms. After 2 ms of ballistic expansion, the

magnetic field was ramped to 735 G for imaging (e). The magnetic fields were 740 G (a), 766 G (b), 792 G (c), 818 G (d), 843 G (f), 853 G (g) and 863 G (h). The field of view is $880 \mu\text{m} \times 880 \mu\text{m}$.

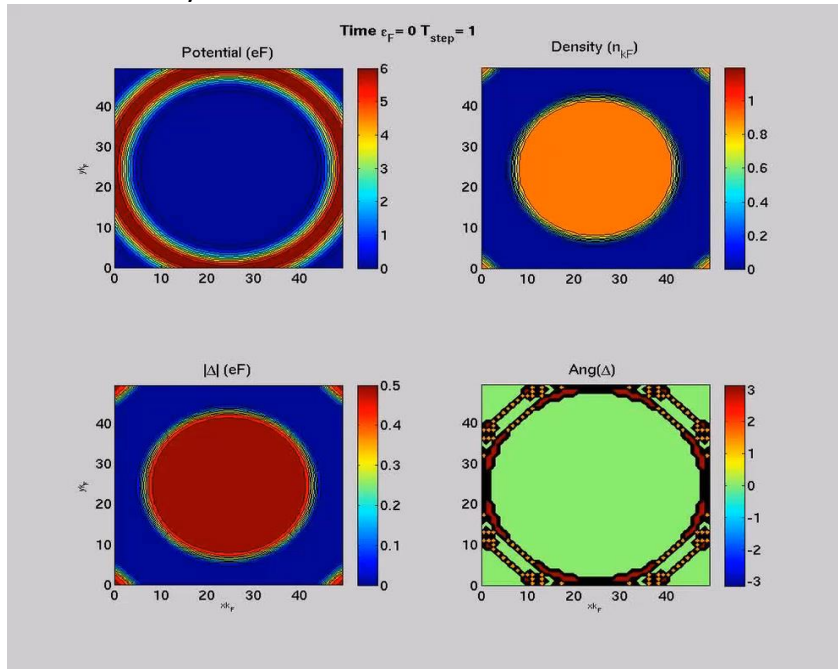
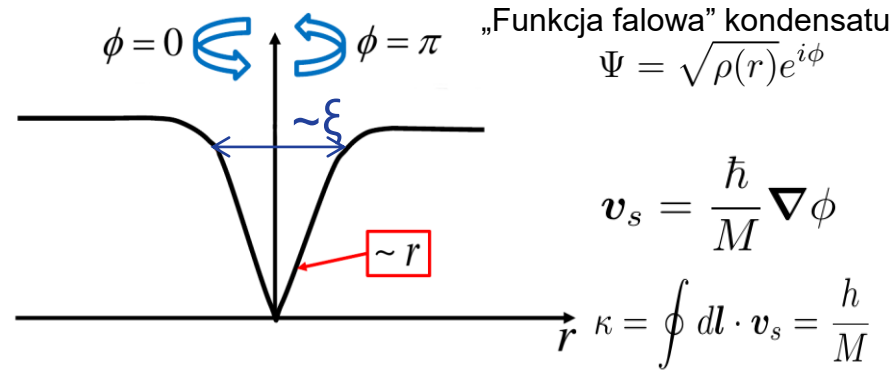
M.W. Zwierlein et al.,
Nature, 435, 1047 (2005)

Struktura wirów kwantowych

FERMIONY:



BOZONY:



Powstawanie wirów w gazie unitarnym na skutek mieszania – symulacja mikroskopowa (TDDFT)

Bulgac, Luo, Magierski, Roche, Yu, Science **332**, 1288 (2011)

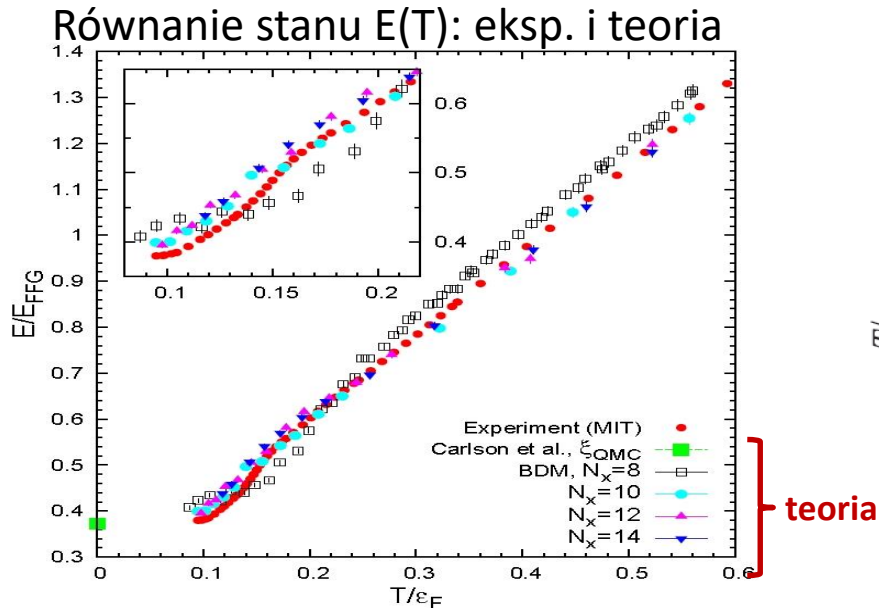
Co już wiemy o gazie unitarym

Posiada największy w przyrodzie stosunek: $\frac{\Delta}{\varepsilon_F} \approx 0.5$

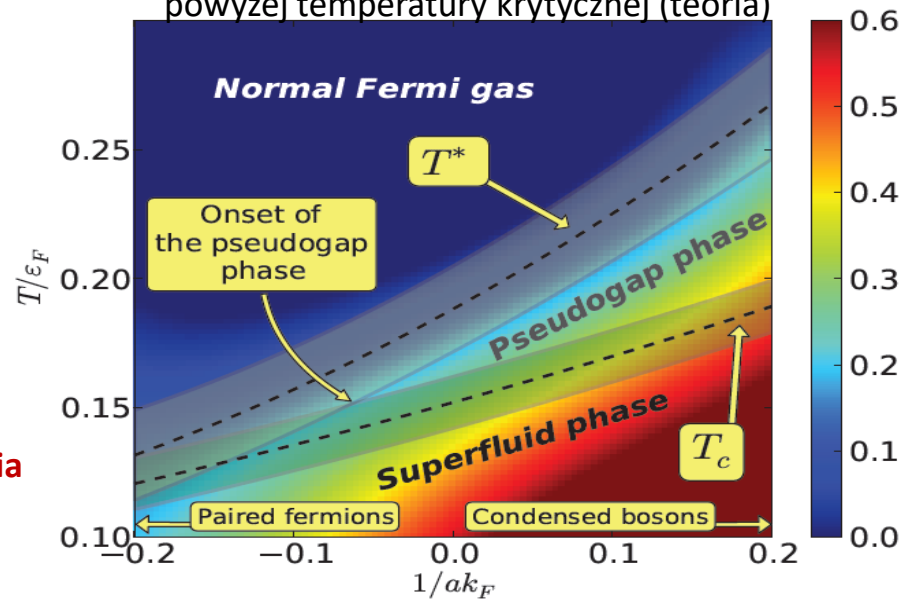
Parametr Bertscha (eksp.): $\xi = 0.37(1)$; Temperatura krytyczna: $T_C \approx 0.17(1)\varepsilon_F$

Nie jest to nadprzewodnik podlegający teorii BCS: $\frac{\Delta}{T_C} \approx 2.94 \neq 1.76$

Prawdopodobnie istnieją pary Coopera powyżej temperatury krytycznej (teoria)



Bulgac, Drut, Magierski, *Phys. Rev. Lett.* 99, 120401(2006)
 Carlson et al., *Phys. Rev. A* 84, 061602(R) (2011)
 Drut, Lähde, Wlazłowski, Magierski, *Phys. Rev. A* 85, 051601 (2012)



Magierski, Wlazłowski, Bulgac, *Phys. Rev. Lett.* 107, 145304(2011)
 Magierski, Wlazłowski, Bulgac, Drut, *Phys. Rev. Lett.* 103, 210403(2009)

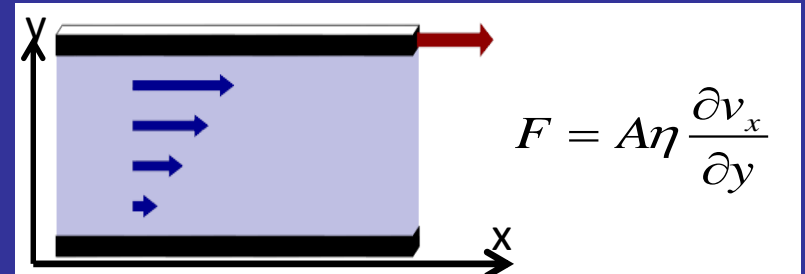
Ciekawostka: hydrodynamika gazu unitarnego

W gazie unitarnym brak innej skali długości poza średnią odległością między cząstkami



Równomierna ekspansja gazu jest procesem równowagowym. Lepkość objętościowa jest równa zero!

Lepkość (shear viscosity):



Hipoteza: dla każdego płynu zachodzi relacja:

Kovtun, Son, Starinets, Phys.Rev.Lett. 94, 111601, (2005)

$$\frac{\eta}{S} \geq \frac{\hbar}{4\pi k_B}$$

Gęstość entropii

Z teorii kinetycznej Maxwella: $\eta \sim$ średnia droga swobodna

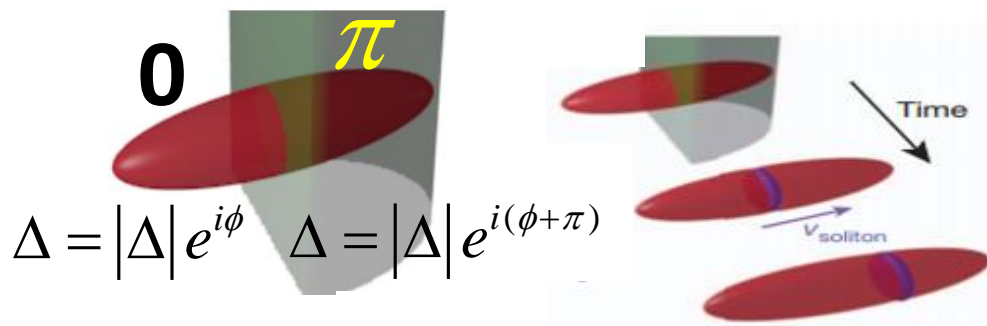
Płyn doskonały $\frac{\eta}{S} = \frac{\hbar}{4\pi k_B}$ - silnie skorelowany układ kwantowy

Kandydaci : unitarny gaz Fermiego, plazma kwarkowo-gluonowa

Eksp.: brak jak dotąd precyzyjnych pomiarów lepkości w gazie unitarnym

Teoria: $\frac{\eta}{S} = (0.15 - 0.2) \frac{\hbar}{k_B} > \frac{\hbar}{4\pi k_B}$

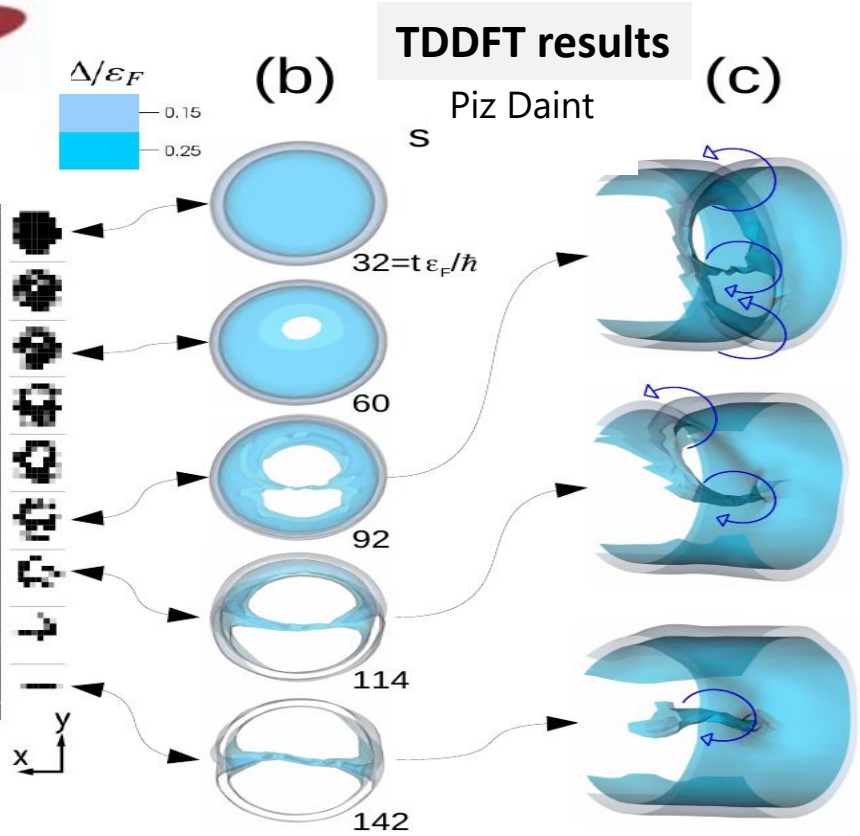
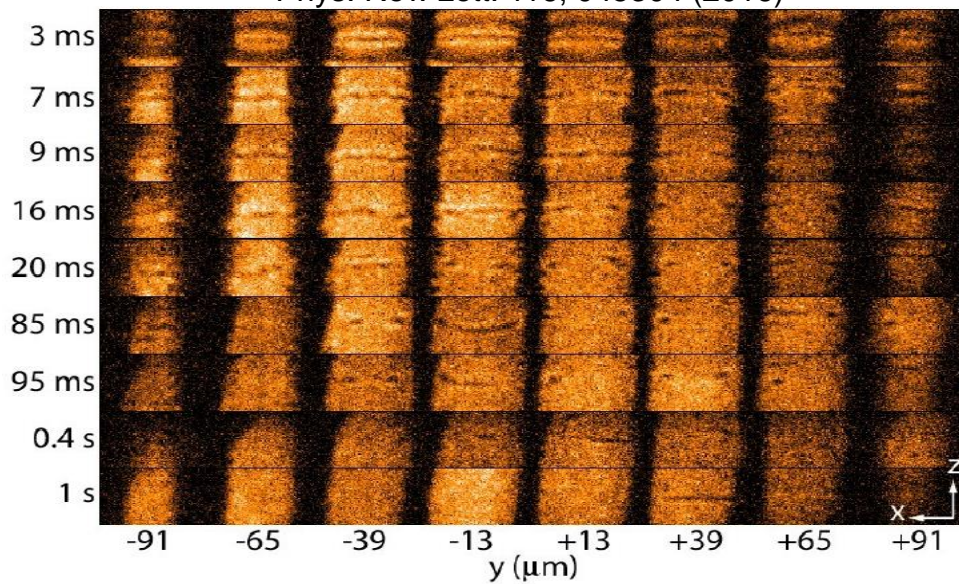
G.Wlazłowski, P.Magierski, J.E.Drut,
Phys. Rev. Lett. 109, 020406 (2012)



Zderzenie nadciekłych chmur atomowych o przeciwnych fazach pola Δ

MIT experiment

Phys. Rev. Lett. 116, 045304 (2016)

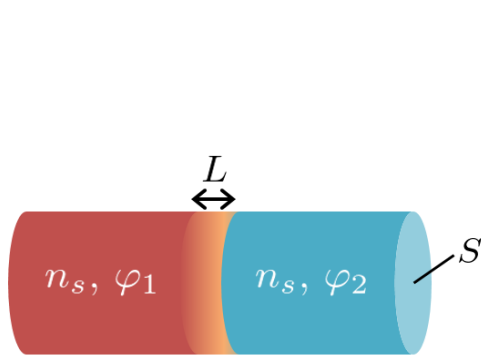


Rozpad solitonu generuje sekwencje wzbudzeń:
 m.in. "Phi"-soliton, pierścien wirowy i wir kwantowy.
 Dynamika rozpadu stanowi silny test dla teorii.
Nie można odtworzyć kaskady solitonowej przy pomocy teorii bozonowej

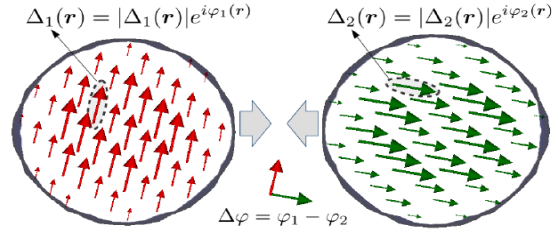
G. Wlazłowski, K. Sekizawa, M. Marchwiany, P. Magierski,
 Phys. Rev. Lett. **120**, 253002 (2018)

Czy podobny efekt występuje przy zderzeniach jąder atomowych?

Trudność: w zderzeniach jądrowych nie potrafimy kontrolować fazy pola Δ

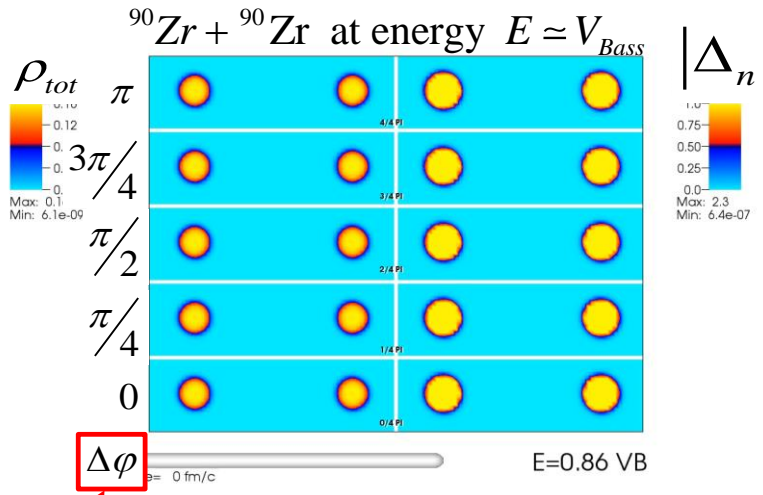


$$\Delta\varphi (\equiv \varphi_1 - \varphi_2)$$

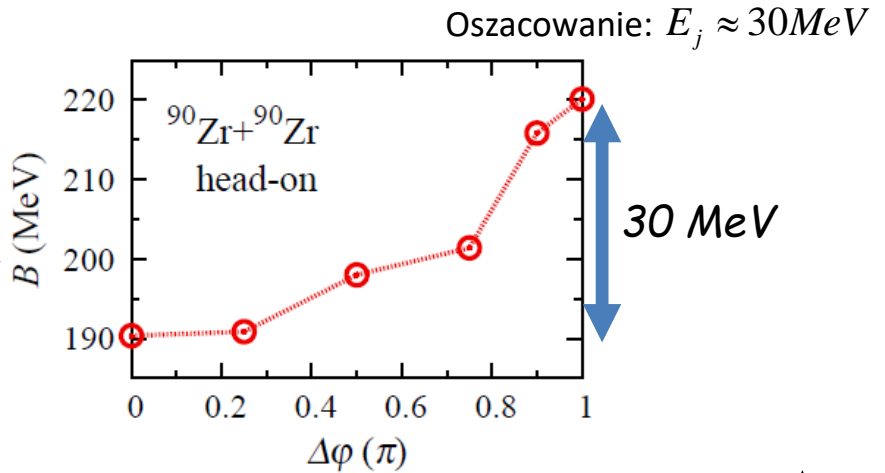
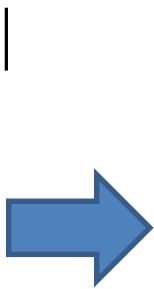


Dodatkowa energia zgromadzona w obszarze zderzenia (z teorii Ginzburga-Landaua):

$$E_j = \frac{S}{L} \frac{\hbar^2}{2m} n_s \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}$$



Różnica faz Symulacje mikroskopowe (TDDFT)



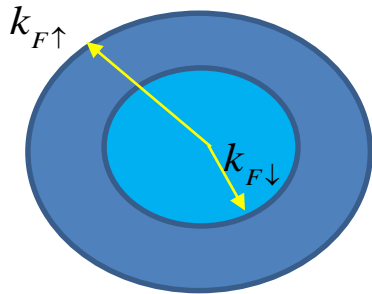
Zmiana bariery na fuzję (wychwyt) w funkcji względnej fazy Δ

P. Magierski, K. Sekizawa, G. Wlazłowski, Phys. Rev. Lett. 119 042501 (2017)

G. Scamps, Phys. Rev. C 97, 044611 (2018): fluktuacje bariery wyznaczone z danych eksp. wskazują, że efekt istnieje ale jest słabszy.

Nadprzewodnictwo w spolaryzowanym spinowo (częściowo) unitarnym gazie Fermiego

Dwie sfery Fermiego o różnych promieniach



Jeżeli promienie są zbyt różne pary Coopera nie mogą się tworzyć i nadprzewodnictwo nie może istnieć

Warunek Clogstona-Chandrasekhara: $|\varepsilon_{F\downarrow} - \varepsilon_{F\uparrow}| \propto \Delta$

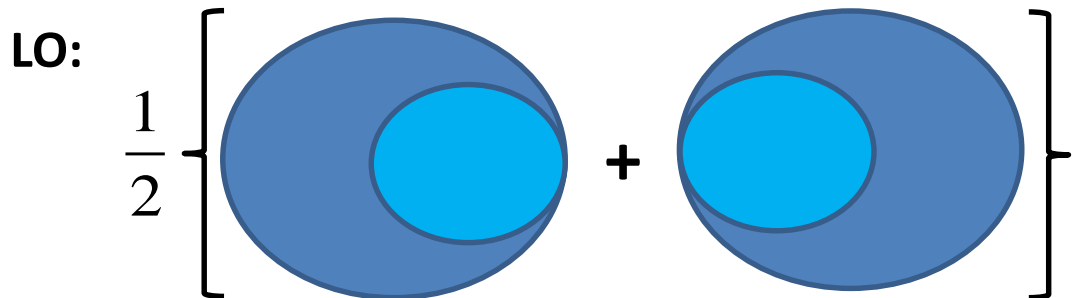
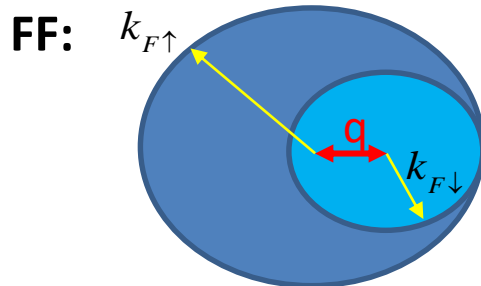
W układzie niejednorodnym są inne możliwości:

Larkin-Ovchinnikov (LO):	$\Delta(\mathbf{r}) \sim \cos(\vec{q} \cdot \vec{r})$
Fulde-Ferrell (FF):	$\Delta(\mathbf{r}) \sim \exp(i\vec{q} \cdot \vec{r})$

A.I. Larkin and Y. N. Ovchinnikov, Sov. Phys. JETP 20, 762 (1965)

P. Fulde and R. A. Ferrell, Phys. Rev. 135, A550 (1964)

Modulacja przestrzenna pola par Coopera podwyższa energię, ale przesunięcie względne sfer Fermiego powoduje, że oddziaływanie prowadzące do ich tworzenia par Coopera może działać bardziej efektywnie (tzn. obniżyć energię).



A. Bulgac, M.M.Forbes, Phys. Rev. Lett. 101,215301 (2008): Faza Larkina-Ovchinnikova istnieje w unitarnym gazie Fermiego

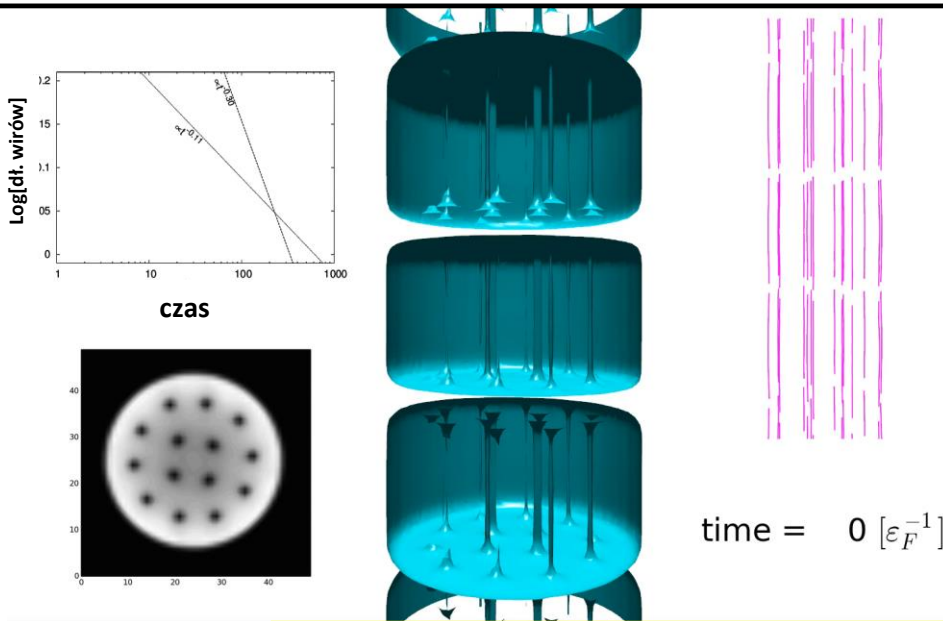
Jak dotąd brak potwierdzenia eksperymentalnego.

Kwantowa turbulencja:

Nierównowagowy stan nieuporządkowanych wirów kwantowych (vortex tangle).

Jak wytworzyć stan turbulentny w nadciekłej gazie fermionów?

Czy istnieje jakościowa różnica pomiędzy ewolucją stanu turbulentnego w układzie bozonowym (np. 4He), a fermionowym (np. gazy unitarnym)?



Kreacja nieuporządkowanego układu wirów w gazie unitarnym i jego ewolucja – Symulacja mikroskopowa (TDDFT) G. Wlazowski et al.

W ewolucji układu kluczową rolę odgrywają rekoneksje wirów:

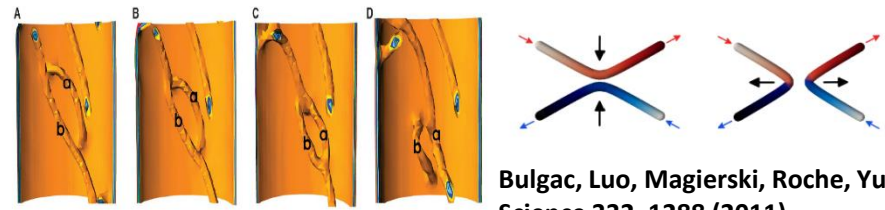
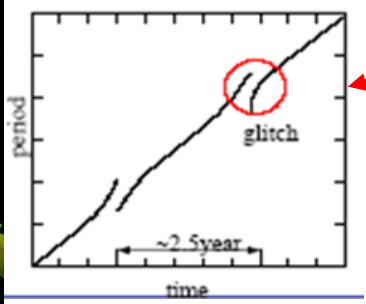
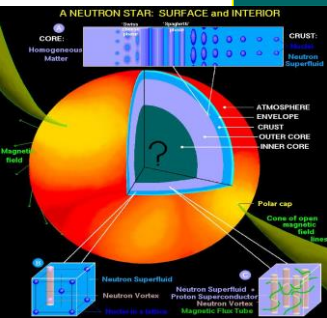


Fig. 3. (A to D) Two vortex lines approach each other, connect at two points, form a ring and exchange between them a portion of the vortex line, and subsequently separate. Segment (a), which initially belonged to the vortex line attached to the wall, is transferred to the long vortex line (b) after reconnection and vice versa.

Bulgac, Luo, Magierski, Roche, Yu, Science 332, 1288 (2011)

Czy gwiazda neutronowa jest układem turbulentnym ?



Obserwuje się okresowe przyspieszenie rotacji gwiazdy neutronowej (glitch phenomenon)

Od lat 70-tych efekt wiąże się z gwałtowną zmianą uporządkowania wirów kwantowych wewnątrz gwiazdy wywołaną niejednorodnością jej struktury.

Brak dotąd teorii pozwalającej na ilościowe oszacowanie efektu.

Robert B. Laughlin, Nobel Lecture, December 8, 1998:

One of my favorite times in the academic year occurs [...] when I give my class of extremely bright graduate students [...] a take home exam in which they are asked TO DEDUCE SUPERFLUIDITY FROM FIRST PRINCIPLES.

There is no doubt a special place in hell being reserved for me at this very moment for this mean trick, for the task is IMPOSSIBLE. Superfluidity [...] is an **EMERGENT** phenomenon – a low energy collective effect of huge number of particles that CANNOT be deduced from the microscopic equations of motion in a RIGOROUS WAY and that DISAPPEARS completely when the system is taken apart.

[...]students who stay in physics long enough [...] eventually come to understand that the REDUCTIONIST IDEA IS WRONG a great deal of the time and perhaps ALWAYS.