

ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო
უნივერსიტეტი



გრიგოლ თანიაშვილი

დოქტორანტის სემინარი:

ზეგამტარობის მოვლენა

ხელმძღვანელი:

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო
მეცნიერებათა ფაკულტეტის
პროფესორი

ალექსანდრე შენგელაია

თბილისი 2019

სარჩევი

სარჩევი	2
აბსტრაქტი	3
Abstract.....	4
შესავალი	5
ზეგამტარობის მექანიზმი.....	6
ზეგამტარი	7
თვისებები.....	8
1.მეისნერის ეფექტი	8
2.ლევიტაცია.....	9
I და II გვარის ზეგამტარი.....	11
ზეგამტარული ღრეჩო და მისი სიმეტრია	15

აბსტრაქტი

1911 წელს კამელინგ ონესმა ვერცხლისწყლის წინაღობის გაზომვისას დაბალ ტემპერატურებზე აღმოაჩინა სპეციფიკური ტემპერატურა (კრიტიკული ტემპერატურა T_c) როდესაც წინაღობა ხდებოდა პირდაპირ 0. ამ დროს ნივთიერება გადადის ზეგამტარულ მდგომარეობაში. ამ მდგომარეობაში ნივთიერებას აქვს ნულოვანი წინაღობა (მეისნერის ეფექტი, იდეალური დიამაგნეტიზმი).

1986 წელს ბოდნორზმა და მიულერმა აღმოაჩინეს ზეგამტარული მდგომარეობა კუპრატებში $80K$ კრიტიკული ტემპერატურით, ამ პერიოდში აღმოჩენილ ზეგამტარებში მაქსიმალური კრიტიკული ტემპერატურა იყო $30K$. ეს ზეგამტარები (კუპრატები) არსებულ თეორემებს არ ემორჩილებოდნენ და საჭირო იყო ახლის მორგება.

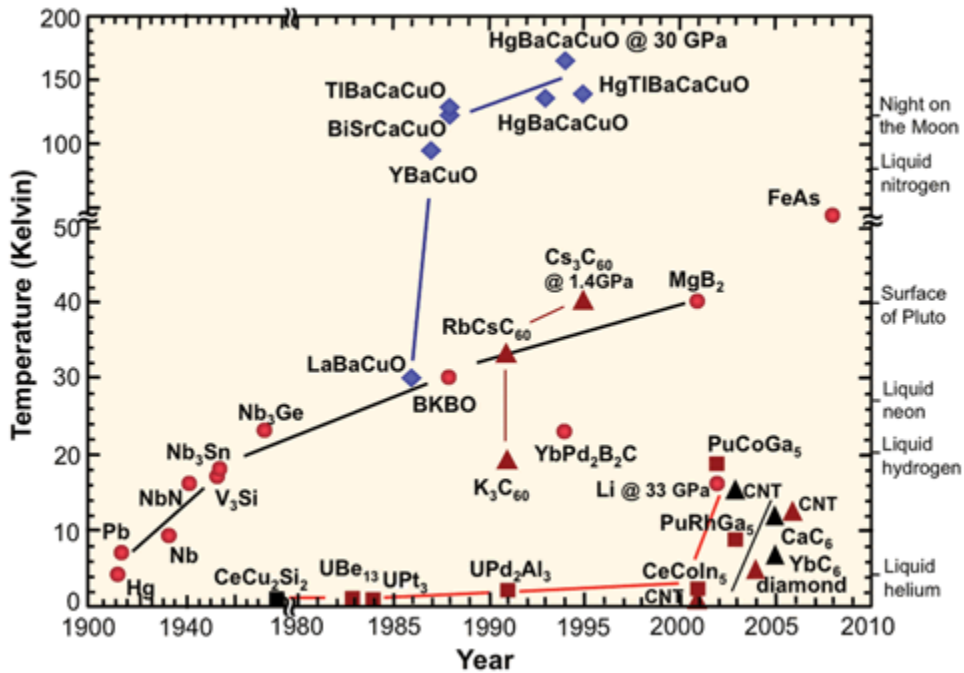
Abstract

While measuring the resistivity of mercury at low temperatures in 1911, Kamerlingh Onnes discovered that at a specific temperature (the critical temperature T_c) the resistivity sharply falls to zero; the material enters the superconducting state. Defining properties of the superconducting state are zero-resistivity, the Meissner effect (perfect diamagnetism) and the energy gap in the density of states of electrons. Since their discovery many theories were developed in order to explain the phenomenon and they succeeded in doing so.

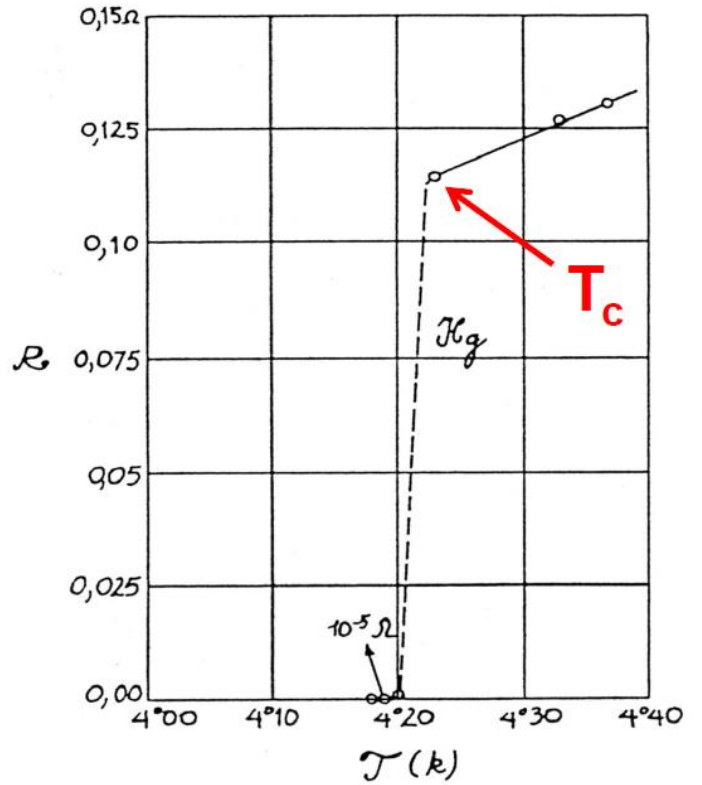
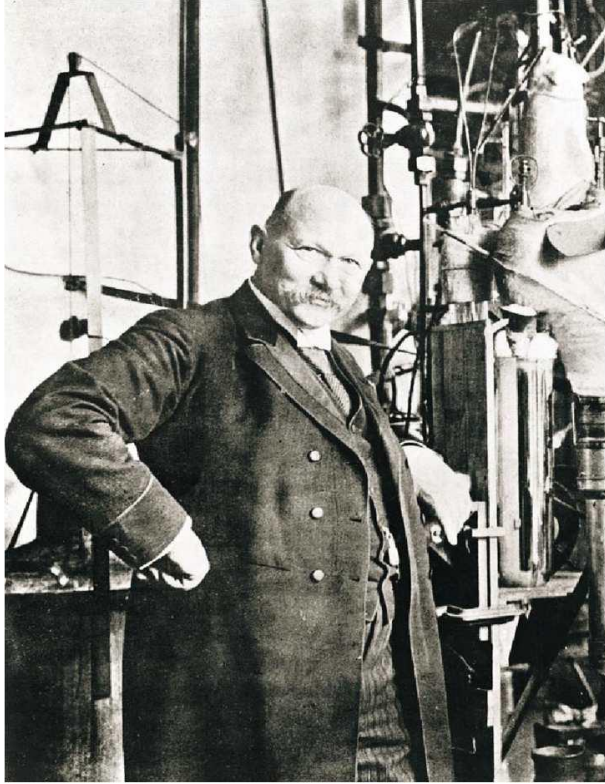
In 1986, however, Bednorz and Muller discovered the superconducting state in cuprates with the surprisingly high critical temperature at around 80 K (at that time no known superconductors had the T_c higher than 30 K). These superconductors (the high temperature superconductors) do not obey the existing theories and so either new theories must be developed or the existing ones adapted to explain the

შესავალი

1911 წელს კამელინგ ონესმა ვერცხლისწყლის წინაღობის გაზომვისას დაბალ ტემპერატურებზე აღმოაჩინა სპეციფიკური ტემპერატურა (კრიტიკული ტემპერატურა T_c) როდესაც წინაღობა ხდებოდა პირდაპირ 0. ამ დროს ნივთიერება გადადის ზეგამტარულ მდგომარეობაში. ამ მდგომარეობაში ნივთიერებას აქვს ნულოვანი წინაღობა (მეისნერის ეფექტი, იდეალური დიამაგნეტიზმი). დროთა განმავლობაში მეცნიერები იკვლევდნენ ზეგამტარებს და ხდებდა მიდგომების დახვეწა, წლების მიხედვით ასევე იცვლება კრიტიკული ტემპერატურა (ნახ.1), მეცნიერების მიზანია რაც შეიძლება მაღალ ტემპერატული ზეგამტარი მიიღონ.



ნახ.1 ზეგამტარები წლების მიხედვით

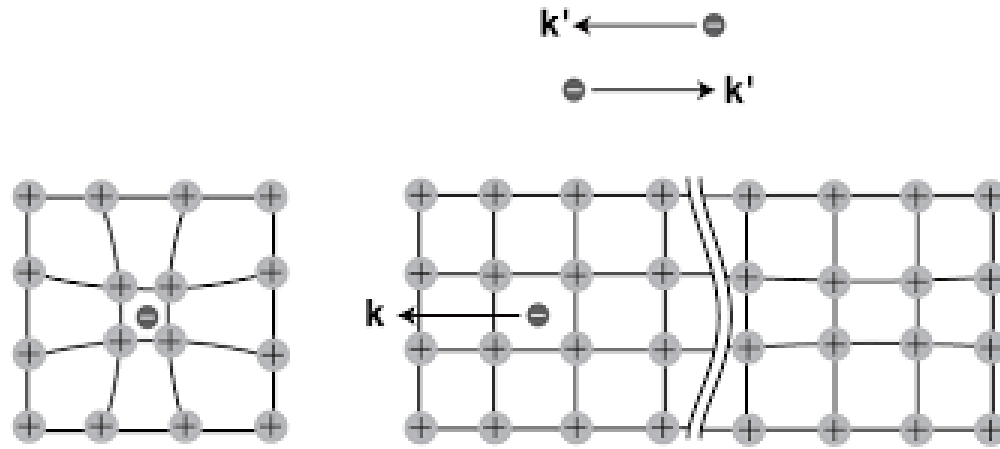


ნახ.2 კამელინგ ონესი, ვერცხლისწყლის ექსპერიმენტი

ზეგამტარობის მექანიზმი

დაწვეილებულ ელექტრონებს ზეგამტარებში კუპერის წვეილები ეწოდებათ. კუპერის წვეილში შემავალ ელექტრონებს აქვთ ურთიერთსაპირისპირო ტალღური ვექტორები k და ურთიერთსაპირისპირო სპინი ისე რომ ჯამური სპინი $S=0$. შესაბამისად კუპერის წვეილი წარმოადგენს ბოზონს და მათ შეუძლიათ დაიკავონ ერთი ენერგეტიკული მდგომარეობა (ბოზე-აინშტაინის კონდენსაცია) შესაბამისი მაკროსკოპული ტალღური ფუნქციით.

ზეგამტარობა არის მაკროსკოპული კვანტური მოვლენა. (ნახ.3)



ნახ.3 კუპერის წყვილი

ზეგამტარი

ზეგამტარი ეწოდება ისეთ გამტარს, რომელიც ელექტროულ დენს წინააღობის გარეშე ატარებს. სადენს, რა გინდ კარგი გამტარიც არ უნდა იყოს ის, აქვს წინააღობა, რომელიც იწვევს ენერგიის დაკარგვას. თუმცა გამტარების გაცივებასთან ერთად, მისი წინააღობა იკლებს, ხოლო გარკვეული ტემპერატურის შემდეგ (კრიტიკული ტემპერატურა) ის ნულდება. მაგალითად ვერცხლისწყლის 4 კელვინამდე (-269 C) გაცივებისას, მისი წინააღობა ნულამდე ეცემა.

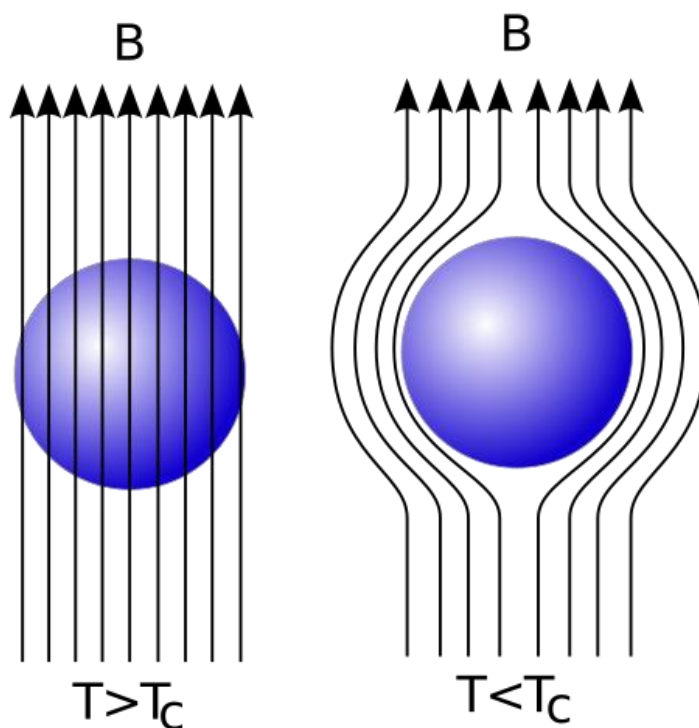
1933 წელს, გერმანელმა ფიზიკოსებმა, ვოლტერ მეისნერმა და რობერტ ოშენფელდამ აღმოაჩინეს, რომ ნივთიერების გაცივებისას კრიტიკულ ტემპერატურაზე უფრო დაბალ ტემპერატურამდე მაგნიტური ნაკადი გამოიძევება ნივთიერებიდან. ამ მოვლენას მეისნერის ეფექტი ეწოდება. მეისნერის ეფექტი იმდენად ძლიერია, რომ მაგნიტს შეუძლია ილივილივოს ზეგამტარული ნივთიერებაზე (ლევიტაცია). მეცნიერების ისტორიაში. ზეგამტარობა პირველად დამზერილ იქნა ლეიდენის ლაბორატორიაში ჰოლანდიელი ფიზიკოსის კამერლინგ ონესის მიერ. როდესაც მან ვერცხლიწყალი გააცივა 4 კელვინამდე (-269 C) მისი წინააღობა გაქრა. (ნახ.2) მოგვიანებით, 1913 წელს მან მიიღო ნობელის პრემია ფიზიკის დარგში.

მაღალტემპერატურული ზეგამტარის მისაღებად/გასაციებად ადვილად ხელმისაწვდომი თხევად აზოტიც (77 კელვინი) გამოდგება, ამიტომ მან დიდი დაინტერესება ჰპოვა ტექნოლოგიური კომპანიების მხრიდან. თუმცა ზეგამტარი ოთახის ტემპერატურაზე ჯერ კიდევ მიულწეველია, ამიტომ ზეგამტარების ფიზიკა კვლავაც საინტერესო რჩება არა მერთო ინჟინრების არამედ ფიზიკოსებისთვისაც.

თვისებები

1. მეისნერის ეფექტი

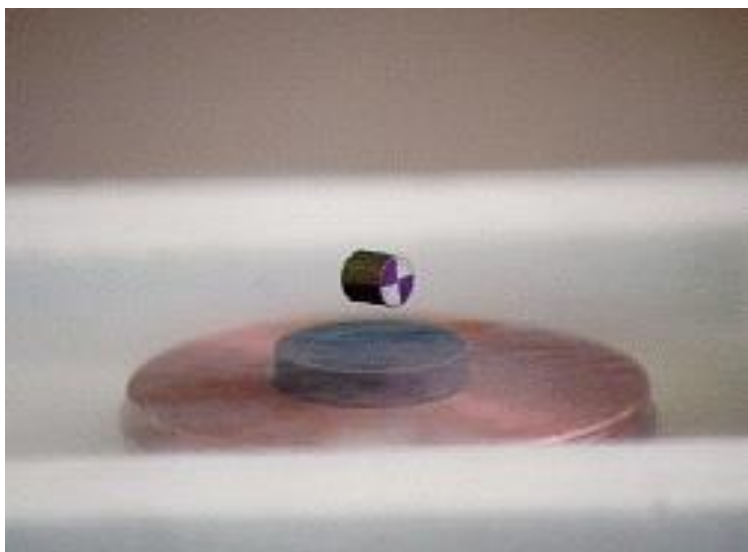
მოვლენა, როდესაც მაგნიტური ველი გამოიდევენება ზეგამტარიდან და გადადის ზეგამტარულ მდგომარეობაში (ნახ.4). ეს მოვლენა აღმოაჩინეს გერმანელმა ფიზიკოსებმა მეისნერმა და ოსჩენფილდმა როდესაც ზომავდნენ მაგნიტური ველის განაწილებას ზეგამტარის გარეთ. თუ მაგნიტურ ველში მოთავსებულ ნიმუშს გავაციებთ კრიტკულ ტემპერატურამდე, მასში არსებული ველის განუღდება, გამოიდევენება. ეს მოვლენა არ აღიწერება კლასიკური მექანიკით და ზეგამტარებისთვის დამახასიათებელ ერთ-ერთ თვისებას წარმოადგენს. სუსტ მაგნიტურ ველში ზეგამტარი გამოდევენის თითქმის მთელ მაგნიტურ ველს. ეს გამოწვეულია ზედაპირზე წარმოქნილი ელექტრული დენის მიერ. ეს ზედაპირული დენი ქმნის მაგნიტურ ველს, რომელიც ანულებს ნიმუშის მოცულობაში არსებულ ველს. ნიმუშის ზედაპირზე, ველი სრულიად არ ნულდება, მაგნიტური ზედაპირის სისქე ზეგამტარი ნიმუშის ერთ-ერთი მახასიათებელი სიდიდეა და ცნობილია როგორც შედწევის სიღმე. ნებისმიერი იდეალური გამტარი, მაგნიტურ ველში მოთავსებისას წარმოქმნის ზედაპირულ დენებს, რომელიც, თავის მხრივ, ქმნის გამანულებელ მაგნიტურ ველს.



ნახ.4 მეისნერის ეფექტი

2. ლევიტაცია

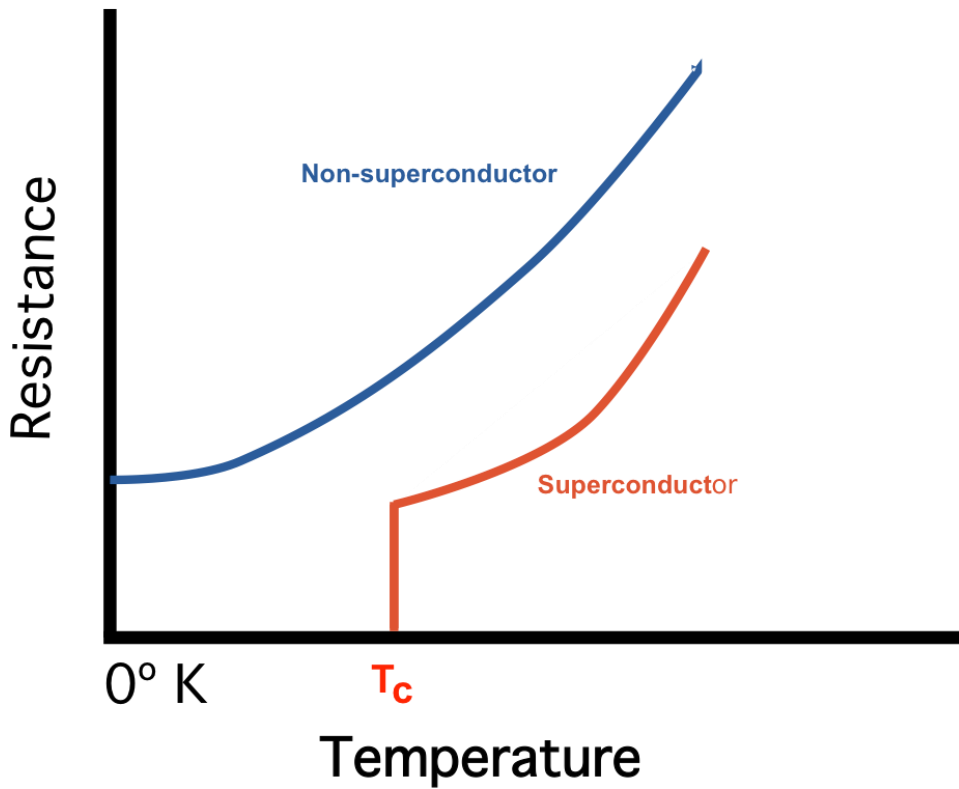
მეისნერის ეფექტი აიხსნება იმით, რომ მაგნიტურ ველში ზეგამტარის ზედაპირზე აღიძვრება ისეთი სიდიდის და მიმართულების დენი, რომლის მაგნიტური ველი სრულიად აკომპენსირებს გარე მაგნიტურ ველს. თუ ზეგამტარის ზედაპირზე მოვათავსებთ მუდმივ მაგნიტს, მაშინ ზეგამტარში აღძრული დენი შექმნის ისეთ მაგნიტურ ველს, რომელიც გამოიწვევს მუდმივი მაგნიტის განზიდვას და მაგნიტი ჰაერში ჩამოეკიდება. ამ ეფექტს მაგნიტური ლევიტაცია ეწოდება (ნახ.5).



ნახ.5 ლევიტაცია

ყველა კუპერის წყვილი ზეგამტარში იმყოფება ერთ ენერგეტიკულ მდგომარეობაში და გააჩნიათ ერთი ჯამური ტალღური ვექტორი k . როცა $k=0$ დენი ნულია. როცა $k \neq 0$, გვაქვს ზეგამტარი დენი.

მეტალებში ნორმალურ მდგომარეობაში ელექტრონი შეიძლება გაიბნეს მესერის რხევებზე და დეფექტებზე და შემცირდეს მისი იმპულსი და შესაბამისად ტალღური ვექტორი k . ზეგამტარულ მდგომარეობაში კი უნდა შეიცვალოს ყველა კუპერის წყვილის ტალღური ვექტორი k ერთდროულად. ამის აღბათობა კი უსასრულოდ მცირეა. ამიტომ კუპერის წყვილების გაბნევა არ ხდება მათი მოძრაობისას და შესაბამისად წინაღობა ნულია.



ნახ.6 წინააღობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება ზეგამტარებში და არაზეგამტარებში

I და II გვარის ზეგამტარი

არსებობს ზღვრული მაგნიტური ველი, რომელზეც ზეგამტარობა ქრება. მაგნიტურ ველში ქცევის მიხედვით ანსხვავებენ 2 გვარის ზეგამტარს: პირველი და მეორე გვარის ზეგამტარებს. ზეგამტარებში არსებობს 2 მნიშვნელოვანი პარამეტრი: მაგნიტური შეღწევადობის სიღრმე λ და კოჰერენტობის სიგრძე ξ . გინზბურგ-ლანდაუს თეორიაში

შემოდის k პარამეტრი $K = \frac{\lambda}{\xi}$, რომელსაც გინზბურგ-ლანდაუს პარამეტრს უწოდებენ. როდესაც $K < \frac{1}{2}$ გვაქვს 1-ლი გვარის ზეგამტარი და როდესაც $K > \frac{1}{2}$ მე-2 გვარის ზეგამტარი, ვნახოთ თუ როგორ გამოიყურება დამაგნიტების მრუდები 1-ლ და მე-2 გვარის ზეგამტარებისთვის. ზეგამტარულ ნიმუშს აქვს ცილინდრის ფორმა და მაგნიტური ველი მოდებულია Z ღერძის გასწვრივ.

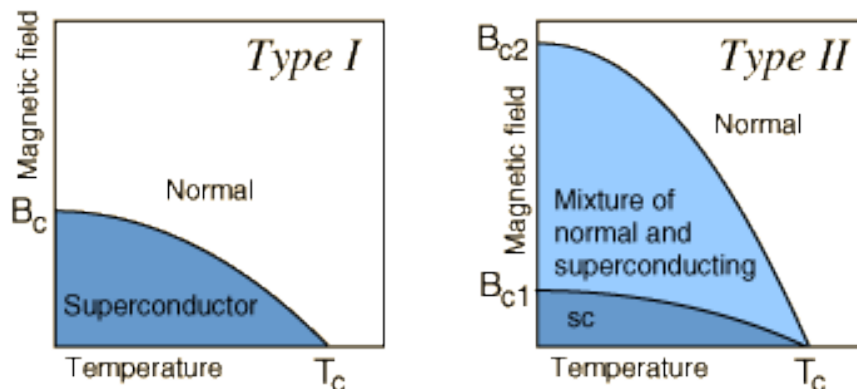
ნახ.7 (ა) - ზე ნაჩვენებია დამაგნიტების მრუდი 1-ლი გვარის ზეგამტარისთვის, სადაც კარგად ჩანს მეისნერის ეფექტი. ველის გაზრდით დამაგნიტება მცირდება წრფივად და ველის რაღაც H_c მნიშვნელობაზე, რომელსაც ეწოდება კრიტიკული ველი H_c ზეგამტარობა ქრება.

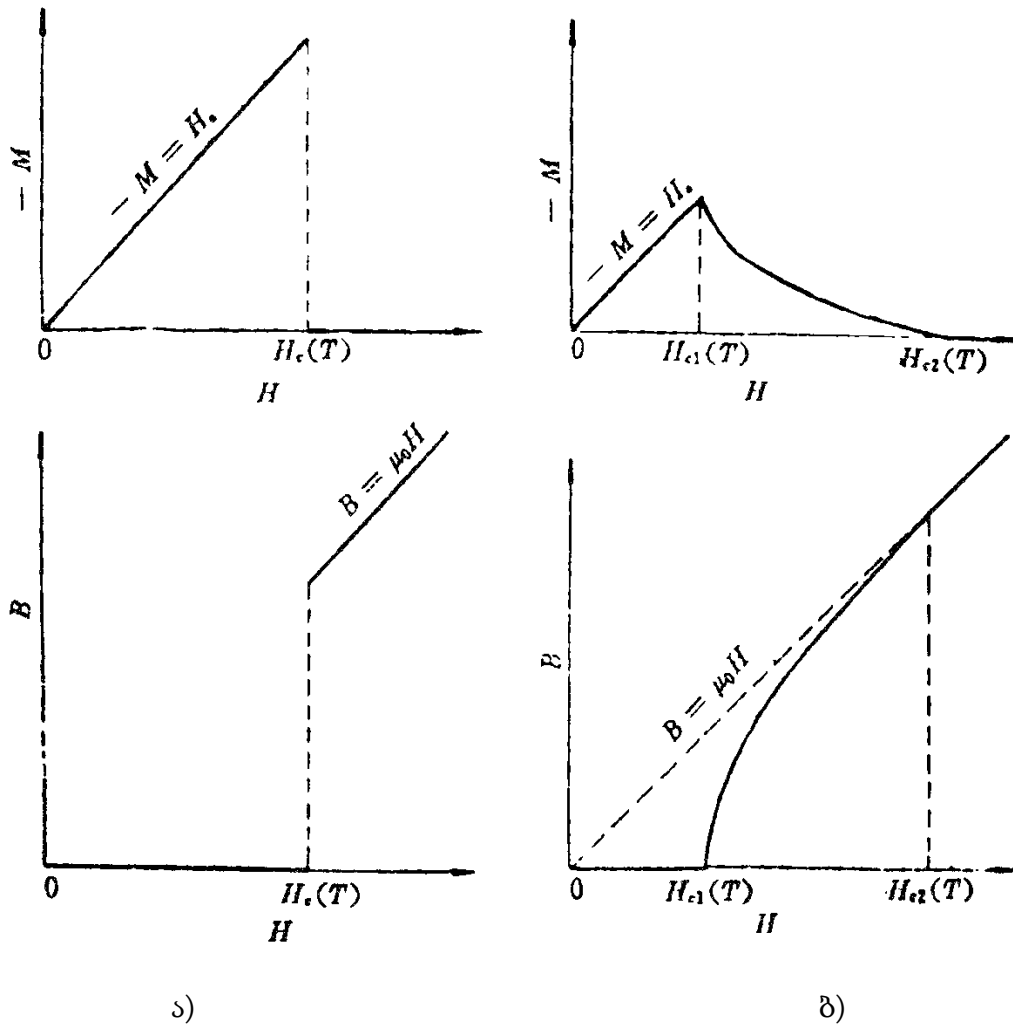
რაც შეეხება მეორე გვარის ზეგამტარებს, ნახ.7(ბ) - ზე ჩანს, მცირე ველებისთვის დამაგნიტება მცირდება წრფივად, როცა ველი მიაღწევს $H=H_{c1}$ -ს, რომელსაც უწოდებენ პირველი კრიტიკულ ველს, მაგნიტური ველის ნაკადი აღწევს ზეგამტარში. დამაგნიტება მონოტონურად იზრდება და მეორე კრიტიკულ ველზე (H_{c2}) ხდება 0. $H_{c1} < H < H_{c2}$ არეს ეწოდება შერეული მდგომარეობა.

არსებობს ფორმულები, რომლითაც პირველი და მეორე კრიტიკული ველები უკავშირდებათ λ და ξ პარამეტრებს:

$$H_{c2} = \frac{\phi_0}{2\pi\xi^2} \text{ და } H_{c1} = \frac{\phi_0}{4\pi\lambda^2} \ln K$$

მეორე გვარის ზეგამტარებში, როდესაც $T < T_c$ არსებობს 3 კარგად განსხვავებული ფაზა: მეისნერის ფაზა $H < H_{c1}$, შერეული ფაზა $H_{c1} < H < H_{c2}$ და ნორმალური ფაზა $H > H_{c2}$. ნარევი ფაზაში მაგნიტური ველი აღწევს ზეგამტარში გრიგალების სახით, რომლებსაც ახასიათებთ რეგულარული განაწილება ნიმუშში. გრიგალები ქმნიან ზეგამტარში მოწესრიგებულ სტრუქტურას.





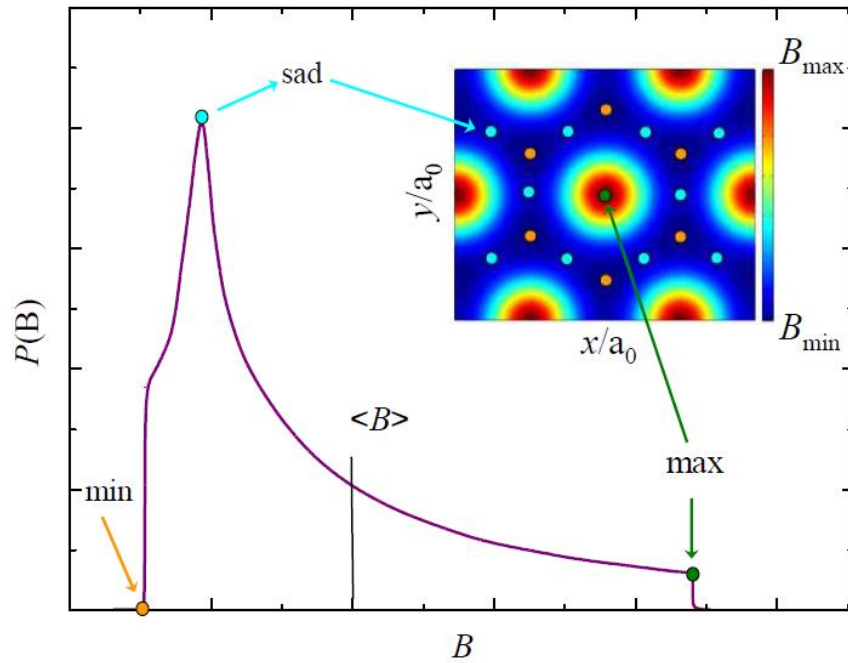
ნახ.7 პირველი და მეორე გვარის ზეგამტარი

არსებობს მართკუთხა გრიგალური მესერი და ასევე კვადრატული მესერი. თითოეულ გრიგალში გადის მკაცრად განსაზღვრული $\phi = h/2e$ ნაკადი, რომელსაც ეწოდება მაგნიტური ნაკადის ქვანტი. გრიგალებს შორის მანძილი დამოკიდებულია ველის სიდიდეზე:

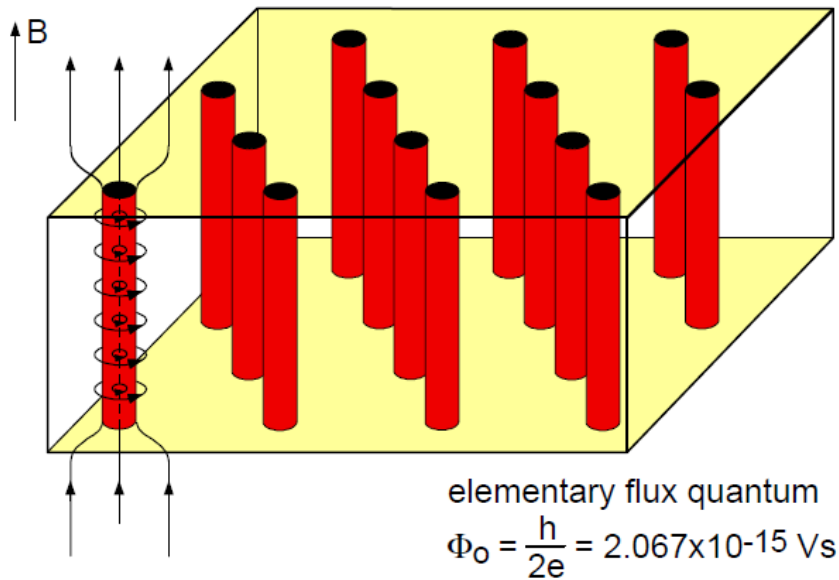
$$d \propto B^{-1/2}$$

მიუონის სპინის ბრუნვის მეთოდი საშუალებას გვაძლევს ვიპოვოთ მაგნიტური ველის შეღწევადობის სიღრმე და ვნახოთ თუ როგორია მაგნიტური ველის განაწილება გრიგალურ მესერში, როდესაც მიუონი მოხვდება ზეგამტარულ ნიმუშში, რომელზეც მოდებულია B მაგნიტური ველი ნორმალურ მდგომარეობაში ყველა მიუონის სპინი პრეცესირებს ერთიდაიმავე სიხშირით, თუ გრიგალის რომელ წერტილში მოხვდება

მიუონი. მაგნიტური ველის თეორიულ განაწილებას იდეალურ გრიგალურ მესერში აქვს სახე:



ნახ.8 მეორე გვარის ზეგამტარში მაგნიტური ველის განაწილება



ნახ.9 მაგნიტური გრიგალები მეორე გვარის ზეგამტარში

$P(B)$ არის ალბათობა იმისა, რომ ნიმუშში შემთხვევით აღებულ წერტილს აქვს B ველი, იმის მიხედვით, მიუონი მოხვდება გრიგალის ცენტრში თუ გრიგალებს შორის

სივრცეში, მასზე მოქმედებს სხვადასხვა სიდიდის ველი და სპინის პრეცესიის სიხშირეც იქნება განსხვავებული, რასაც მივყავართ μ_{SR} სიგნალის დეფაზირებამდე.

ზეგამტარული ღრეჩო და მისი სიმეტრია

როდესაც ნივთიერება ნორმალური მდგომარეობიდან გადადის ზეგამტარულ მდგომარეობაში ჩნდება კუპერის წყვილები რომელთა სპინი შეიძლება იყოს 1 ან 0 (ტრიპლეტი და სინგლეტი). იცვლება ფერმის ფონეც, და ჩნდება ზეგამტარული ღრეჩო რომელიც აღიწერება სიმეტრიით.

ზეგამტარული ტალღური ფუნქცია აღიწერება რადიალური და სპინური ნაწილით.

$$\Psi(r_1, \sigma_1, r_2, \sigma_2) = -\Psi(r_2, \sigma_2, r_1, \sigma_1) \quad \Psi(r_1, \sigma_1, r_2, \sigma_2) = f(r_1-r_2) \chi(\sigma_1, \sigma_2)$$

ეს ფუნქცია უნდა იყოს ანტისიმეტრიული, აქედან გამომდინარე, ერთ-ერთი ნაწილი უნდა იყოს სიმეტრიული მეორე კი ანტისიმეტრიული. (ნახ.10)

- spin wavefunction:

$$\chi_{\sigma_1\sigma_2}^{\text{spin}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \quad \text{singlet} \quad \begin{array}{l} \textit{antisymmetric spin wavefunction} \\ \rightarrow \textit{symmetric orbital function:} \\ L = 0, 2, \dots (s, d, \dots) \end{array}$$

$$\chi_{\sigma_1\sigma_2}^{\text{spin}} = \begin{cases} |\uparrow\uparrow\rangle \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) \\ |\downarrow\downarrow\rangle \end{cases} \quad \text{triplet} \quad \begin{array}{l} \textit{symmetric spin wavefunction} \\ \rightarrow \textit{antisymmetric orbital function:} \\ L = 1, 3, \dots (p, f, \dots) \end{array}$$

ნახ.10 ზეგამტარული ტალღური ფუნქცია. სპინური ტალღური ფუნქციის ვარიანტები

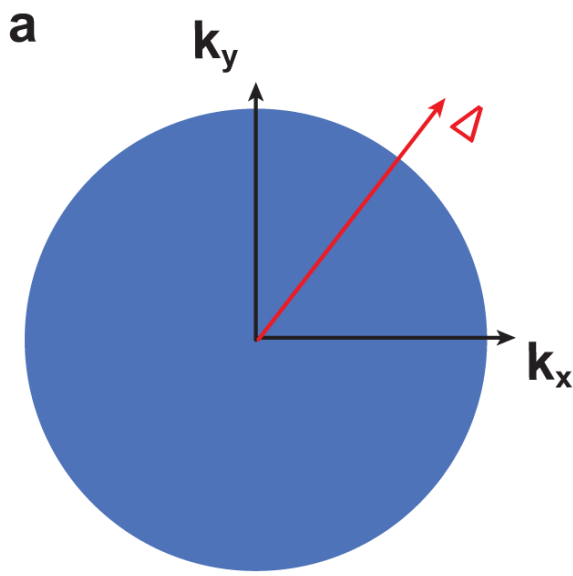
Spin singlet Cooper pairs $S=0$

$L=0, S=0$ დაბალტემპერატურული ზეგამტარების უმრავლესობაში s-wave

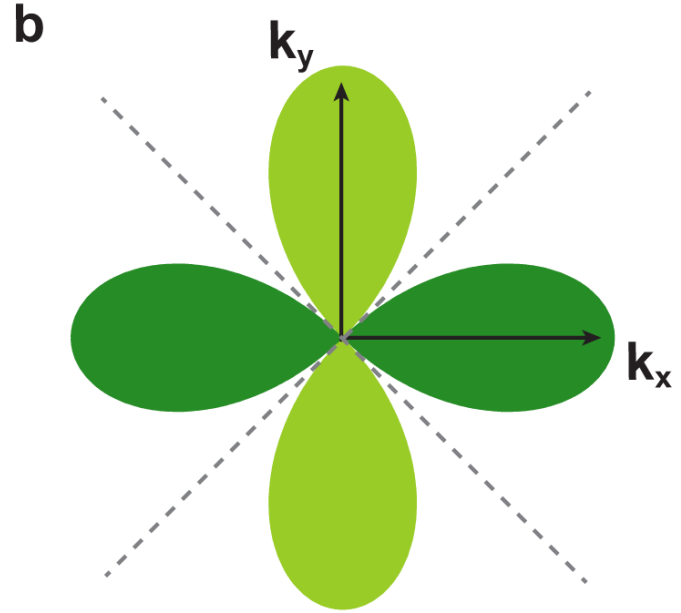
$L=2, S=0$ სპილენძის მაღალტემპერატურულ ზეგამტარებში d-wave

Spin triplet Cooper pairs $S=1$

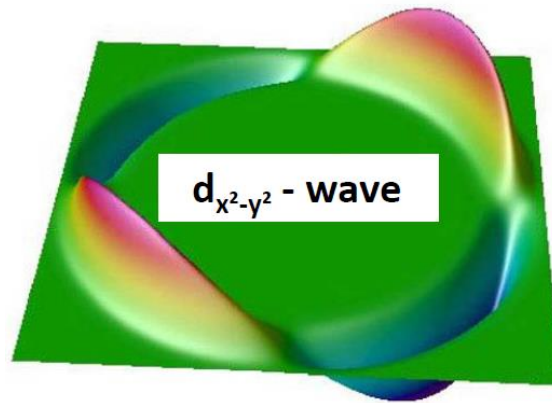
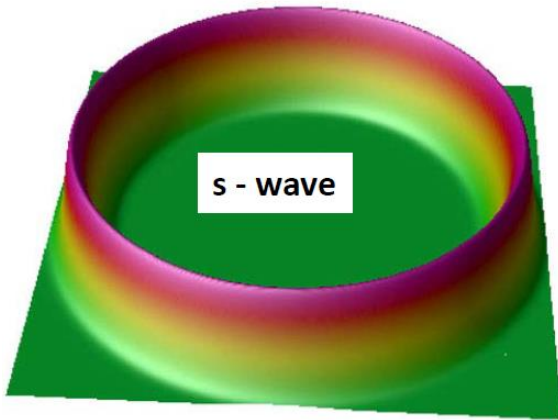
$L=1, S=1$ ზედეწადი $^3\text{He}, \text{Sr}_2\text{RuO}_4$ p-wave



$L = 0, S = 0$



$L = 2, S = 0$



ნახ.11 s და d სიმეტრის ზეგამტარული დრეზოები

a – s სიმეტრის

b – d სიმეტრის

