

**AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI**

*Əlyazması hüququnda*

**KVAZI BİR- VƏ İKİÖLÇÜLÜ SPİN-ORBİTAL  
QARŞILIQLI TƏSİRLİ İFRATKEÇİRİCİLƏRDƏ TOPOLOJİ  
EFFEKTlər**

İxtisas: **2212.01 – Nəzəri fizika**

Elm sahəsi: **Fizika**

İddiaçı: **Səidə Oqtay qızı Məmmədova**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi  
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

**AVTOREFERATI**

**Bakı– 2021**

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun Kondensə olunmuş hal və kvant fəzalar laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: AMEA-nın həqiqi üzvü,  
Fizika elmləri doktoru  
**Ənvər Pirverdi oğlu Nəhmədov**

Rəsmi opponentlər: AMEA-nın həqiqi üzvü,  
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof.  
**Təyyar Cümşüd oğlu Cəfərov**  
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof.  
**Rauf Qədir oğlu Cəfərov**  
Fizika-riyaziyyat elmləri namizədi, dos.  
**Bala Əli Əli oğlu Rəcəbov**

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının AMEA-nın Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,  
akademik  
\_\_\_\_\_  
**Nazim Timur oğlu Məmmədov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi: Fizika elmləri doktoru, dosent  
**Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva**

Elmi seminarın sədri: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,  
professor  
\_\_\_\_\_  
**Şakir Məmməd oğlu Nağıyev**

## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi.** Kvant Holl effektinin kəşfi müasir dövrdə fizikanın keçdiyi təkamül yolunda ən böyük nailiyyətlərdən biri sayılır. Çünki, bu effektin 1980-ci ildə kəşfi daha sonra maddənin fazalarının yeni nəsli sayılan, elm və texnologiyalarda inqilablar yarada bilən sonsuz sayda effektiv tətbiq potensialına malik topoloji fazaların inkişafına təkan vermişdir. Topoloji izolyator və topoloji ifratkeçiricilərin inkişafı əvvəlcə sırf nəzəri elmi tədqiqatlarda çevriliş yaratsa da, daha sonra ən müxtəlif qabaqcıl təcrübələrdə tətbiq olunaraq özünü doğrultmuşdur. Topoloji izolyatorları aşağıdakı kimi təsvir etmək olar: onlar daxilə izolyator olub keçirici səth səviyyələrinə malikdirlər. Topoloji izolyatorlarda səth səviyyələri elektronların güclü maqnit sahəsində hərəkəti zamanı yaranan kvant Holl effektindəki səth səviyyələrini xatırladır.

Hal-hazırda bizə “topoloji kvant halları” kimi məlum olan elmi istiqamət ilk dəfə olaraq ikiölçülü elektron sistemlərində tam və kəsr Kvant Holl effektinin, həmçinin tam spinə malik kvant spin zəncirlərində spin-maye hallarının yeni “qarışıq” formasının kəşfi sayəsində elmin qabaqcıl sahələri sırasına daxil olmuşdur. Bu kəşflərin hamısının malik olduğu bir ümumi və vacib xüsusiyyət, onların “kondensə olunmuş hal fizikasının” məlum fundamental qanunları əsasında izah oluna bilməməsi idi. Kəşf edildikləri zaman bu iki fiziki hadisə arasında hansı əlaqənin mövcud ola biləcəyi məlum olmasa da, son 30-35 ildə aparılan qabaqcıl tədqiqatlar artıq bizə onlar arasındakı mümkün əlaqənin hansı şəkildə mövcud olduğunu tam başa düşməyə imkan yaratmışdır - tam spinə malik kvant spin zəncirlərində spin-maye hallarının yeni “qarışıq” forması “topoloji trivial” fundamental haldan fərqli olaraq, maddənin yeni “topoloji qeyri-trivial” qarışıq halıdır.

Topoloji izolyatorların xassələri bu materialları kvant səviyyəsində manipulyasiya tələb edən yeni texnologiyalar üçün cəlbedicidir. Mövcud olan topoloji izolyatorların keyfiyyətinin yaxşılaşdırılmasına yönəldilən İndiana ştatının Purdue

Universitetində Yonq Çenin laboratoriyası, materialdan faydalana biləcək bir sahə kimi spintronikanı göstərir. Spintronika, fiziki proseslərdə elektronun yükündən deyil, onun spin kimi bilinən daxili maqnit xüsusiyyətindən istifadə olunmasına əsaslanır. Günümüzdə spintronikaya əsaslanaraq kompüter texnologiyası və müasir mikroelektronika üçün yüksək maqnit müqaviməti effektinə əsaslanan bir çox yaddaş elementləri və cihazlar kəşf edilmişdir.

İfratkeçiricilərin böyük əksəriyyətində zamanın geri dönməsinə görə invariantlığının və zərrəcik-deşik invariantlığının olması, bu maddələrin topoloji faza xarakteristikalarını göstərə biləcəyi ideyasını irəli sürmüş, topoloji ifratkeçirici fazanın mümkünlüyü nəzəri və təcrübi olaraq göstərilmişdir. Qeyd etmək lazımdır ki, topoloji izolyatorlarda meydana çıxan keçirici səth səviyyələri relyativistik zərrəciklərin enerji spektri olan Dirak konusuna bənzəyir. Bu səviyyələrdəki kvazizərrəciklər kiral xarakterli olub, zamanın geri dönməsinə görə və zərrəcik-deşik simmetriyalarına əsasən qorunurlar. Paramaqnit aşqarlar, fononlar kimi xarici həyəcanlanmalar bu səviyyələri dağıda bilmirlər. Topoloji ifratkeçiricilərdə müəyyən şərtlər daxilində keçirici səth səviyyələri meydana çıxır və Dirak konusunun təpə nöqtəsindəki sıfır enerjili halda lokallaşan kvazizərrəciklər özlərini Mayorana fermionları kimi aparır. Mayorana kvazizərrəciklərinin də xarici zəif həyəcanlanmalara qarşı qorunması, onların kvant kompüterlərində informasiya daşıyıcıları kimi istifadə olunmasına zəmin yaradır. Mayorana zərrəciyi öz anti-zərrəciyi ilə eyni olub, normal fermionun “yarısı” və sıfır enerjili zərrəcik şəklində əmələ gəlir; kütləsiz və spini normal fermionla eyni olan zərrəcikdir. Mayorana fermionları ikiölçülü, nizam parametri  $p+ip$  - tip dalğa simmetriyalı olan spinsiz ifratkeçirici maqnit burulğanlarına bağlı olaraq və birölçülü ideal  $p$  - tip dalğa simmetriyalı spinsiz ifratkeçiricilərdə topoloji telin uc nöqtələrində yaranmasının mümkünlüyü nəzəri olaraq göstərilmişdir.

Birölçülü sistemlərdə kvazizərrəciyin yaranma yerini, hərəkətini təyin etmənin daha asan olduğunu nəzərə alaraq, ifratkeçirici birölçülü tellərdə 1 qubit kvant informasiya vahidi rolunu oynayan Mayorana zərrəciklərindən istifadə oluna biləcəyi

fiziklərin diqqətini cəlb etmişdir. Mayorana fermionlarının kvant informasiyası daşıyıcıları olmaları üçün aşağıdakı şərtləri yerinə yetirmələri lazımdır:

- bir qubitin, yəni  $|0\rangle$  və  $|1\rangle$  səviyyələrinin yaranması.  $|0\rangle$  səviyyəsi, verilən nöqtədə Mayorana fermionlarının olmaması və ya iki Mayorana fermionunun birləşib yox olması mənasına,  $|1\rangle$  səviyyəsi isə verilən nöqtədə Mayorana fermionunun olması mənasına gəlir;
- Mayorana fermionlarının yerlərini dəyişərək informasiyanın ötürülməsi;
- İnformasiyanın xarici təsirlərə qarşı qorunması və informasiyanın oxunması (ölçülməsi).

Klassik kompüterlərdə məlumatlar bitlər ilə verilərkən, kvant kompüterləri isə yaddaş vahidi üçün kvant bitlərindən və ya qubitlərdən istifadə edirlər. Qubitlər iki hallı kvant sistemindən ibarətdir. Kvant nəzəriyyəsi isə bizə iki ayrı kvant halının eyni zamanda bir zərrəcik üçün tətbiq oluna biləcəyini bildirir. Superpozisiya və xaos şərtlərinə baxdığımızda bu bizim üçün təəccüblü ola bilər. Çünki, biz gündəlik həyatımızda eyni zamanda müxtəlif hallarda zərrəciklərin olduğuna rast gəlməmişik. Süperpozisiya, kvant fizikasında iki müxtəlif halın eyni zamanda bir zərrəcik üçün mümkün olma halıdır. Heisenberqin qeyri-müəyyənlik prinsipi və Şredingerin pişik paradoksu bu halı izah etməyə çalışır.

**Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri.** İşin əsas məqsədi zamanın geri dönməsinə görə invariant qalan yeni sinif ifratkeçiricilərin topoloji fazaya keçməsi və bu fazadakı xassələrinin öyrənilməsi, Mayorana fermionlarının təkcə ifratkeçiricilərdə deyil, həmçinin, yükdalğa sıxlıqlı kvazi birölçülü yarımkəçiricilərdə də meydana çıxdığını göstərməkdir. Qarşıya qoyulan problemlərin araşdırılması üçün bir müstəvi üzərində yerləşən paralel tellər daxilində s - tip dalğa simmetriyalı və tellər arasında d - tip dalğa simmetriyalı Kuper cütlərinin meydana çıxdığı kvazi birölçülü ifratkeçiricilərdə zamanın geri dönməsinə görə invariant qalan topoloji fazanın (maqnit sahəsi olmadığı halda) meydana çıxacağı göstərilməlidir. Göstərilən

məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər qoyulmuş və həll edilmişdir:

1. Bizim məqsədimiz, bir müstəvi üzərində yerləşən periodik kvazi birözlülük ifratkeçirici strukturlarda maqnit sahəsi olmadığı halda zamanın geri dönməsinə görə invariant qalan topoloji fazanın alınmasının mümkün olub-olmamasını araşdırmaqdır. Kvazi birözlülük sistemlərdə maqnit sahəsi olmadığı halda, əgər tel daxilində  $s$  - tip dalğa simmetriyalı və tellər arasında  $d$  - tip dalğa simmetriyalı cütləşmə meydana çıxırsa, bu halda Fermi səviyyəsinin düyün nöqtələrinin bir tərəfindən digər tərəfinə keçdikdə Kuper cütlərin dalğa funksiyası işarəsini dəyişəcəkdir. Buna görə də ifratkeçirici sistem zamanın geri dönməsinə görə invariant olan topoloji fazaya doğrudan da keçməsi nəzəri olaraq göstərilməlidir;

2. Müstəvi üzərində yerləşən  $N$  zəncirdən ibarət olan belə bir strukturda elektronlar arasındakı korrelyasiyalar hər bir tel daxilində və yaxın qonşu tellər arasında olması göstərir ki, prinsipcə iki topoloji ifratkeçirici zənciri öyrənməklə bütün sistemin xarakteristikasını vermək olar. Bu məntiqi nəticənin riyazi əsaslarının göstərilməsi, yəni  $N$  zəncirdən ibarət sistemin Hamiltonianının iki zəncirin Hamiltonianı ilə ifadə etmənin mümkünlüyü dissertasiya işinin məqsədlərindən biridir;

3. Müstəvi üzərində  $N$  zəncirdən ibarət ifratkeçiricinin topoloji fazasında Mayorana fermionlarının necə meydana çıxacağına araşdırılması;

4. Əgər kvazi birözlülük ifratkeçiricilərdə zamanın geri dönməsinə görə invariant olan topoloji faza meydana çıxarsa, bu halda telin uçlarında meydana çıxan Mayorana fermionlarının dinamikasının necə olacağı, bu kvazizərrəciklərin Cozefson cərəyanının amplitud və periodunun necə dəyişəcəyinin araşdırılması;

5. Müstəvi üzərində yerləşən kvazi birözlülük tellərdə topoloji fazanın xarici maqnit sahəsində meydana çıxıb-çıxmayacağı, bu halda Mayorana fermionlarının xarakteristikalarının necə dəyişəcəyi probleminə ədəbiyyatda baxılmamışdır. Dissertasiya işində bu problemə aydınlıq gətirilməli, sistemdə həm Raşba, həm də Dresselhaus spin-orbital qarşılıqlı təsirlərinin olduğu halda Mayorana

kvazizərrəciklərinin enerji spektrinin simmetriyasının necə dəyişəcəyinin öyrənilməsi;

6. Payerls-Fröhlich dayanıqsızlığı olan bir- və kvazi birölcülü sistemlər yük-dalğa sıxlığı meydana çıxdığında zamanın geri dönməsinə görə invariant olub, elektron-deşik simmetriyasına malik olurlar. Bu fakt da göstərilən strukturun topoloji fazaya keçə biləcəyindən xəbər verir. Dissertasiya işində yük-dalğa sıxlıqlı bir- və kvazi birölcülü sistemlərin spin-orbital qarşılıqlı təsiri və xarici maqnit sahəsinin təsiri ilə topoloji fazaya keçməsinin mümkünlüyünün öyrənilməsi və topoloji fazada telin uclarında Mayorana fermionlarının hansı şərtlər daxilində meydana çıxacağıının göstərilməsi;

7. Sistemdə Mayorana fermionlarının meydana çıxmasını təcrübi olaraq tunel cərəyanını ölçərək isbat etmək olar. Buna görə də, yük-dalğa sıxlıqlı yarımkeçiricilərdən hazırlanmış tunel keçidindən axan cərəyanın hesablanması məqsəd olaraq qarşıya qoyulmuşdur;

8. Yük-dalğa sıxlıqlı sistemlərin kvant kompüter texnologiyasında tətbiqinin daha əlverişli olduğunu göstərmək dissertasiya işinin məqsədlərindən biridir.

**Tədqiqat metodları.** Riyazi hesablama metodlarından, kvant mexanika metodlarından, hesablama proqram paketlərindən və digər hesablama texnologiyalarından istifadə olunmuşdur. Hamilton operator yaxınlaşmasının ikinci kvantlanma operatorlarının tətbiqi ilə Şredinger tənliyinin diaqonallaşdırılıb enerji spektrinin tapılması, tənliklər sisteminin öyrənilməsində texniki çətinliyin yaranmasına görə “Mathematica” hesablama proqram paketindən istifadə olunması kimi metodlar tətbiq edilmişdir.

### **Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:**

❖ Bir- və kvazi birölcülü yük-dalğa sıxlığı anomaliyası olan sistemlərin topoloji fazaya keçməsi və burada Mayorana fermionlarının yaranma şərtləri araşdırılmış və Mayorana fermionlarının kvant kompüterlərində informasiya daşıyıcıları qubit kimi istifadə olunması perspektivləri öyrənilmişdir.

❖ Bir- və kvazi birölçülü yük-dalğa sıxlığı olan topoloji sistemlərdə tunel cərəyanının sıfır potensialında anomaliyası öyrənilmişdir. Tunel cərəyanınındakı sıfır-sürüşmə anomaliyasının kvant kompüterlərində informasiyanın qeydi üçün istifadə olunması təklif olunmuşdur.

❖ Zamanın geri dönməsinə görə invariant qalan yeni ifratkeçirici sistemlər təklif edilmiş, bu sistemlərdə topoloji faza xüsusiyyətləri, Mayorana-Kramers cütlərinin əmələ gəlmə şərtləri öyrənilmiş və sistemdə fraktal Cozefson cərəyanı araşdırılmışdır.

❖ Xarici maqnit sahəsində zamanın geri dönməsinə görə invariantlığın pozulduğu halda təklif olunan yeni kvazi birölçülü ifratkeçiricidə topoloji fazada dəyişikliklər, sıfır enerjili Mayorana modunun xüsusiyyətindəki dəyişikliklər öyrənilmişdir.

### **Tədqiqatın elmi yeniliyi:**

1. Zamanın geri dönməsinə görə invariant olan ifratkeçiricilər üçün alternativ yeni sistemlər təklif olunmuşdur. Bu sistemləri azbest və seolit kimi izolyatorların bir müstəvi üzərindəki periodik atom boşluqlarına ifratkeçiricilər doldurmaqla əldə etmək olar. Göstərilmişdir ki, alınan tel daxilində s - tip dalğa simmetriyalı və tellər arasında d- tip dalğa simmetriyalı Kuper cütlərinin meydana çıxdığı halda struktur zamanın geri dönməsinə görə invariant qalan DIII sinfinə aid ifratkeçirici topoloji fazaya keçəcəkdir.

2. Bu sistemlərin enerji spektri hesablanmış, telin uçlarında Mayorana-Kramers cütlərinin necə alınması araşdırılmışdır.

3. Kvazi birölçülü sistemdə, tellərin uçlarında meydana çıxan Mayorana-Kramers cütlərinin tunellənməsi nəticəsində  $4\pi$  periodlu fraktal Cozefson cərəyanı meydana çıxacağı göstərilmişdir. Bu halda tellər arasında həcmdə də  $2\pi$  periodlu bildiyimiz Cozefson cərəyanı da axacaqdır. İkisini də bir-birindən ayırmaq mümkündür.

4. Müstəvi üzərində yerləşən xarici maqnit sahəsi olduğu halda zamanın geri dönməsinə görə invariantlıq pozulur. Bu halda sistemin enerji spektrində və topoloji fazada dəyişikliklər öyrənilmişdir. Göstərilmişdir ki, sistemdə Raşba və Dresselhaus spin-orbital qarşılıqlı təsiri varsa, maqnit sahəsi olmadıqda belə Mayorana



enerji dispersiyasında asimetriya vardır. Maqnit sahəsi olduğu halda Mayorana-Kramers cütləri yerinə hər bir ucda bir Mayorana fermionları meydana çıxır və xarici maqnit sahəsi Mayorana fermionlarının enerji spektrinə yeni bir asimetriya gətirir. Xarici maqnit sahəsinin və Raşba-Dresselhaus spin-orbital qarşılıqlı təsirlərinin təsiri altında enerji spektrlərindəki dəyişikliklər rəqəmsal olaraq hesablanmışdır.

5. İfratkeçirilikdən keyfiyyətə fərqlənən bir- və kvazi birölçülü sistemlərdə yük-dalğa sıxlıqlı Payerls dayanıqsızlığı olan mexanizm əsasında topoloji fazaya keçmə problemi nəzəri olaraq öyrənilmişdir. Göstərilmişdir ki, yük-dalğa sıxlıqlı sistemlərdə güclü spin-orbital qarşılıqlı təsiri olduğunda, xarici maqnit sahəsinin təsiri ilə bu sistemlər topoloji fazaya keçir və topoloji fazada telin uclarında Mayorana fermionları meydana çıxır.

6. Tunel eksperimentində bir tərəfdən Payerls dayanıqsızlığı olan birölçülü sistem götürüb, onu topoloji fazaya keçirtmək, ikinci tərəfən isə başqa bir metallik sistem götürüb, bu iki sistem arasında tunel effektinə baxılmışdır. Burada xarici maqnit sahəsini dəyişməklə, qadağan olunmuş zonanın içərisində sıfır enerjili modun meydana çıxması göstərilmişdir.

**Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti.** Kvant kompüterlərində informasiya vahidi olan qubitin Mayorana fermionları vasitəsi ilə topoloji ifratkeçirici tellərdə yaradılması əsas nəticələrdən biridir. Son zamanlar Mayorana fermionlarından kvant kompüterlərində informasiya daşıyıcısı qubit kimi istifadə olunması ideyası irəli sürülmüşdür. Buna səbəb, topoloji fazada meydana çıxan Mayorana kvazizərrəciklərinin sistemin simmetriyaları nəticəsində temperatur fluktuasiyalarına, elastik fonon və elektron-elektron səpilmələrinə və s. kimi xarici təsirlərə qarşı dayanıqlı olmasıdır. Hal-hazırda InAs, InSb kimi spin-orbital qarşılıqlı təsiri güclü olan yarımkeçiriciləri süni olaraq ifratkeçirici hala keçirərək, kristallarda topoloji ifratkeçirici faza yaradılır. Xarici maqnit sahəsi vasitəsi ilə ifratkeçirici qadağan olunmuş zona mərkəzində keçirici səviyyə yaranır ki, bu da Mayorana kvazizərrəciyi ilə xarakterizə olunur. Bu

prosedur nəticəsi olaraq, qonşuluq effekti nəticəsində reallaşan ifratkeçiricilikdəki topoloji faza çox aşağı temperaturalarda meydana çıxır. Digər tərəfdən də topoloji fazanın yaranması üçün maqnit sahəsindən istifadə olunması ifratkeçiriciliyin kritik temperaturunu daha da azaldır. Bizim təklif etdiyimiz yük-dalğa sıxlıqlı olan yarımkeçiricilərdə topoloji faza olaraq, onlarda Mayorana fermionlarının yaradılmasının üstün tərəfləri var. Birincisi, yük-dalğa sıxlığı kritik temperaturunun çox yüksək olduğu, hətta otaq temperaturunda bu fazanın meydana çıxdığı bir çox yarımkeçirici vardır. Buna görə də kvant kompüterlərində bu mexanizmdən istifadə olunması daha əlverişlidir. İkinci tərəfdən də maqnit sahəsi yük-dalğa sıxlığı fazasının kritik temperaturuna çox zəif təsir edir.

Zamanın geri dönməsinə görə invariant olan  $Z_2$  simmetriya sinfinə aid ifratkeçiricilərin topoloji fazaya keçmələri üçün maqnit sahəsinə ehtiyac olmur. Bu sinif ifratkeçiricilərin belə bir xüsusiyyəti onları daha aktual edir. Bizim təklif etdiyimiz müstəvi üzərində kvazi birölçülü telin daxilində s - tip dalğa simmetriyalı və tellər arasında d-tip dalğa simmetriyalı Kuper cütləri olan ifratkeçiricilərdə topoloji fazanın meydana çıxmasının mümkünüyü göstərilmişdir. Belə sistemlərdə Mayorana fermionları maqnit sahəsinə ehtiyac olmadan meydana çıxır.

### **Aprobasiyası və tətbiqi**

Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıda qeyd olunan Beynəlxalq və Respublika elmi konfranslarında müzakirə edilmişdir:

- “International Conference on Ternary and Multinary Compounds, ICTMC-18” (Salzburg-2012),
- “1st International Scientific Conference of young scientists and specialists”, (Bakı-2014),
- “5th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress, APMAS” (Fəthiyyə-2015).

Dissertasiya işi, həmçinin Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun elmi seminarlarında müzakirə edilmişdir.

**Çap olunmuş işlər.** Dissertasiya mövzusu üzrə təqdim edilən dissertasiyanın axırında siyahısı dərc olunan məqalələr aşağıdakı jurnallarda çap olunmuşdur:

Azerbaijan journal of Physics, 2012, 2015; 2019; The Reports of National Academy of Sciences of Azerbaijan, 2015; Acta Physica Polonica A, 2016; JETP Letters, 2016; Azərbaycan Respublikası Əqli Mülkiyyət Agentliyi, Patent İ 2019.

### **Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı.**

Dissertasiya işi, Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun “Kondensə olunmuş hal və kvant fazalar” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

**Dissertasiya işinin quruluşu və həcmi.** Dissertasiya işi girişdən, 4 fəsildən, əsas nəticələrdən ibarət olub, 143 səhifəlik kompüter mətnində şərh olunmuşdur. İstinad olunmuş ədəbiyyat siyahısı 185 sayda addan ibarətdir. Dissertasiyanın məzmununa 21 şəkil, 1 cədvəl daxildir.

### **Dissertasiyanın qısa məzmunu**

**Dissertasiya işi** giriş, dörd fəsil, əsas nəticələr və istifadə edilmiş ədəbiyyatın bibliografik siyahısından ibarətdir.

Dissertasiyanın **girişində** mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, işin məqsədi, qoyulmuş məqsədə çatmaq üçün həll edilmiş məsələlər, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, alınan nəticələrin elmi yeniliyi və praktiki əhəmiyyəti verilmişdir.

**Birinci fəsildə** dissertasiya işində alınmış nəzəri məlumatların sonrakı analizi üçün lazım olan materialların xüsusiyyətləri haqqında əsas nəzəri fikirlərin qısa icmalı verilmişdir. Bu fəsildə topoloji izolyatorlar və ifratkeçiricilərin yaranma mexanizminin ardıcılığı göstərilmişdir. 80-ci illərdə kvant Hall effekti ilə ikiölçülü elektron qazlarda von Klitzing və digərləri tərəfindən işlənmiş məşhur təcrübə ilə topoloji izolyatorların ixtirası haqqında xülasə verilmişdir. Kvant Hall effektinin kəşfinin topoloji fazaların yaranmasına dəlalət etməsi barədə qeydlər aparılmışdır.

Həmçinin Keyn və Mele tərəfindən araşdırılmış kvant spin Holl izolyatoru modelinə baxılmışdır. Analoji təsnifat həmçinin topoloji ifratkeçiricilər üçün tətbiq edilmişdir.

**İkinci fəsildə** birölçülü spinsiz p-tip dalğa ifratkeçiricilərinin Kitayev modelindən istifadə etməklə, yaradılan Mayorana modlarının konsepsiyası daha ətraflı şəkildə təsvir edilmişdir. Kitayev tərəfindən verilmiş modeldə hər ucunda tək Mayorana modlarına malik birölçülü topoloji ifratkeçirici tel yerləşir. Bu model “D” sinifinə daxil olan qeyri-trivial birölçülü topoloji sisteminin nümunəsidir. “Kitayev teli” Mayorana fermionlarının həyata keçirilməsi üçün ən sadə sistemlərdən biri olduğu üçün, onun tətbiqi də bir çox yeni nəzəri təkliflərin predmeti olmuşdur. Əsas tərkib hissələri aşağıdakılardır: ifratkeçirici, spin-orbital əlaqəsi və zamanın geri dönməsinə görə pozulma. Kitayev modelindən fərqli olaraq, 2010-cu ildə Oreq və s., eyni zamanda Lutcin və s. işlərində birölçülü sistemlərdə Mayorana fermionlarının necə meydana çıxacağını göstərmək üçün təklif olunan real modelin nəzəriyyəsi verilmişdir. Onlar, Mayorana fermionlarının meydana çıxmasını real sistemdə göstərmişlər. Qeyd edək ki, Oreq və digərləri tərəfindən təklif edilmiş modeldə ifratkeçiricilərdə topoloji fazanın meydana çıxması üçün güclü spin-orbital qarşılıqlı təsiri, spinə təsir edən Zeyeman maqnit sahəsi mövcud olmalıdır. Bu o deməkdir ki, bu modeldə enerji spektri Dirak dispersiyası kimi olur və sıfır enerjili mod nöqtəsində Mayorana fermionları meydana çıxır. Bu modeldə müəlliflər, s-tip dalğa simmetriyalı ifratkeçirici altlıq üzərində yerləşmiş güclü spin-orbital qarşılıqlı təsiri olan yarımkeçirici tellərin ifratkeçirici hala keçməsi nəticəsində, onlarda sıfır enerjili Mayorana hallarının müxtəlif şərtlərdə yaranmasını göstərmişlər. Bu, xarici maqnit sahəsi, ifratkeçirici qadağan olunmuş zona və ya kimyəvi potensial tel boyunca dəyişdiyində baş verir. Növbəti olaraq, Mayorana fermionlarının eksperimental müşahidəsi üçün nümunə olaraq Mourik və başqaları tərəfindən verilmiş təcrübəyə baxılmışdır.

**Üçüncü fəsildə** Zamanın geri dönməsinə görə invariant olan yeni ifratkeçirici sistemlər təklif edilmişdir və bu sistemlərdə topoloji faza xüsusiyyətləri öyrənilmişdir. Suni olaraq kvazi birölçülü

ifratkeçiricilərin alınmasının mümkünlüyü 1970-ci illərdə A. F. İoffe İnstitutunda Boqomolov qrupu tərəfindən göstərilmişdir. Beləki, onlar 30 *kbar*-a qədər yüksək təzyiqdə seolit və azbest kimi dielektriklərin matrislərdə atomlar arası boşluqlarına ifratkeçirici maddəni doldurmaqla, periodik strukturlar almışlar. Seolit kristalında 5-10Å diametrlı və azbest 20-30Å-dan 100-150Å qədər diametrlı requlyar boşluqlara doldurulmuş ifratkeçirici maddələr müxtəlif bir-, iki-, üçölçülü periodik qəfəslər kimi formalaşır. Bu şəkildə alınmış kvazi birölçülü ifratkeçiricilərdə kritik temperaturun eyni maddədən olan həcmi ifratkeçiricilərin kritik temperaturuna nəzərən yüksələcəyi göstərilmişdir. Strukturun yüksək təzyiq altında hazırlanması, onlarda Raşba spin-orbital qarşılıqlı təsirinin böyük olacağına zəmin yaradır və topoloji fazaya keçə biləcəklərini təsdiq edir. Bu fakt təcrübi olaraq da göstərilmişdir. Bu sistemlər maqnit sahəsi olmadığı halda reallaşır. Biz də yeni kvazi birölçülü sistemlərdə zamanın geri dönməsinə görə invariant olan ifratkeçiriciliyin mümkünlüyünü işlərimizdə araşdırmışıq. Burada biz maqnit sahəsi tətbiq etmədən yəni, zamanın geri dönməsinə görə simmetriyanı qoruyan ifratkeçiricidə də topoloji fazaya keçmə ehtimalını araşdırmışıq. Kvazi birölçülü zəncirvari sistemlərdə tel daxilində s-tip dalğa simmetriyalı və tellər arasında d-tip dalğa simmetriyalı Kuper cütlərinin meydana çıxdığını göstərmişik. Burada (x,y) müstəvisində x-istiqamətində yerləşən eyni məsafəli ifratkeçirici tellər impuls fəzasındakı Hamilton operatoru, telin daxilində s-tip və tellər arasında d-tip dalğa simmetriyalı cütləri olduğu halda, spin-orbital qarşılıqlı təsirinin iştirakı ilə aşağıdakı şəkildə təsvir olunur:

$$\hat{H} = \sum_j \{ \hat{H}_{j,j} + \hat{H}_{j,j+1} + \hat{H}_{j+1,j} \}. \quad (1)$$

burada  $\hat{H}_{j,j+1} = \hat{H}_{j,j+1}^+$  və

$$\hat{H}_{j,j} = \sum_{\sigma, \sigma'} \int \frac{dk_x}{2\pi} \{ \psi_{j,\sigma}^+(k_x) \xi_{k_x} \psi_{j,\sigma}(k_x) +$$

$$\begin{aligned}
& +\psi_{j,\sigma}^+ [2\sin k_x (\alpha(\sigma_y)_{\sigma,\hat{\sigma}} + \beta(\sigma_x)_{\sigma,\hat{\sigma}}) + \\
& +\omega_z ((\sigma_z)_{\sigma,\hat{\sigma}} \cos\theta + \beta(\sigma_x)_{\sigma,\hat{\sigma}} \sin\theta \cos\varphi + (\sigma_y)_{\sigma,\hat{\sigma}} \sin\theta \sin\varphi)] \psi_{j,\hat{\sigma}} \\
& +\Delta_0 \psi_{j,\uparrow}^+(k_x) \psi_{j,\downarrow}^+(-k_x) + \Delta_0^* \psi_{j,\downarrow}(-k_x) \psi_{j,\uparrow}(k_x)\}, \\
\hat{H}_{j,j+1} & = \sum_{\sigma,\hat{\sigma}} \int \frac{dk_x}{2\pi} \{t_{\perp} \psi_{j,\sigma}^+(k_x) \psi_{j+1,\sigma}(k_x) + \\
& +i\psi_{j,\sigma}^+ (\bar{\alpha}(\sigma_x)_{\sigma,\hat{\sigma}} + \bar{\beta}(\sigma_y)_{\sigma,\hat{\sigma}}) \psi_{j+1,\hat{\sigma}} + \\
& +\Delta_1 \psi_{j,\uparrow}^+(k_x) \psi_{j+1,\downarrow}^+(-k_x) + \Delta_1^* \psi_{j,\downarrow}(-k_x) \psi_{j+1,\uparrow}(k_x)\}.
\end{aligned}$$

Mayorana kvazizərrəciklərinin enerji spektrinin simmetriyasındakı dəyişikliklər rəqəmsal olaraq hesablanır:

$$\begin{aligned}
\{E^2 + \xi_k^2 - S - \omega_z^2 - |\Delta(k)|^2\}^2 - 4\xi_k^2(S + \omega_z^2) - 4\Delta^2(k)\omega_z^2 - \\
-4(\omega_z \sin\theta_0 H)^2 - 8\xi_k E \omega_z \sin\theta_0 H = 0. \quad (2)
\end{aligned}$$

Qeyd edək ki,  $\theta_0 = 0$  və  $\omega_z = 0$  götürsək,  $\det|E_0 - H_0| = 0$  -dan alınmış enerji spektri aşağıdakı şəkildə olar:

$$E_0 = s \sqrt{(\xi_k^2 \pm \epsilon_s)^2 + \Delta^2(k)},$$

burada  $s = \pm$  və

$$\epsilon_s = \sqrt{(k_x^2 + k_y^2)(\alpha^2 + \beta^2) - 4\alpha\beta k_x k_y}.$$

$\Delta(k_y) = 0$  şərti nizam parametrinin düyün nöqtələrini təyin edir. Əgər  $|\Delta_0| < 2\Delta_1$ ,  $k_y$  boyunca  $k_y = 0$ -dan  $k_y = \pi$ - qədər hərəkət edildiyində,  $\Delta(k_y) = (\Delta_0 + 2\Delta_1 \cos k_y) e^{i\phi}$  düyün nöqtələrində işarəsini dəyişir,  $\cos k_y = \mp \frac{\Delta_0}{2\Delta_1}$ . Düyün nöqtələrində  $E_{0N} = s \left[ 2t_{\parallel} \cos k_x + \mu - t_{\perp} \frac{\Delta_0}{2\Delta_1} \pm \epsilon_{sN}(k_x, k_{yN}) \right]$  və  $\epsilon_s$  enerjisinin  $k_{yN} = \arccos\left(-\frac{\Delta_0}{2\Delta_1}\right)$  düyün nöqtəsində qiyməti aşağıdakı kimi verilir:

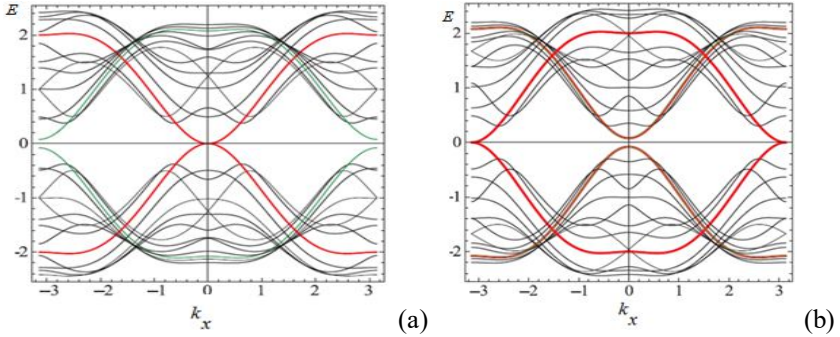
$$\epsilon_{sN}(k_x, k_{yN}) = 2\sqrt{(\sin^2 k_x + \delta^2)(\alpha^2 + \beta^2) - 4\alpha\beta\delta \sin k_x}.$$

$\epsilon_{sN}(k_x, k_{yN})$  uyğun olaraq maksimum və minimum qiymətləri arasında dəyişməsi növbəti şəkildə verilib:

$$\epsilon_{sN}^{max}\left(\pm \frac{\pi}{2}, k_{yN}, \alpha, \beta\right) = 2\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \sqrt{1 + \delta^2 \mp \frac{4\alpha\beta\delta}{\alpha^2 + \beta^2}}$$

$$\epsilon_{sN}^{min}(k_{x0}, k_{yN}, \alpha, \beta) = 2\delta \frac{(\alpha + \beta)|\alpha - \beta|}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}.$$

Düyün nöqtələri bir tərəfdən başqa tərəfə keçdikdə nizam parametrinin işarəsi dəyişir. Digər tərəfdən spin-orbital qarşılıqlı təsiri Fermi səthini parçalayır. Parçalanmış Fermi səthi düyün nöqtələri ətrafında bir-birindən  $\epsilon_{sN}(k_x, k_{yN})$  enerji intervalında yerləşirlər. Kinetik enerjinin ( $E_{0N}$ -də ilk üç hədd) maksimum qiyməti spin-orbital qarşılıqlı təsiri vasitəsi ilə parçalanır. Parçalanmış enerjinin  $\epsilon_{sN}(k_x, k_{yN}, \alpha, \beta)$ ,  $\left| 2t_{\parallel} + \mu - t_{\perp} \frac{\Delta_0}{\Delta_1} \right| < \epsilon_{sN}^{min}(k_{x0}, \alpha, \beta)$  minimum qiymətindən kiçik olduqda, qeyri-trivial zamanın geri dönməsinə görə invariant olan  $\nu = 1$  ilə topoloji faza reallaşa bilər.  $\left| 2t_{\parallel} + \mu - t_{\perp} \frac{\Delta_0}{\Delta_1} \right| > \epsilon_{sN}^{max}(k_{x0}, \alpha, \beta)$  olduqda, ifratkeçirici tamamilə qadağan olunmuşdur.



**Şəkil 1:** İkiözlü ifratkeçiricilərin enerji spektrinin  $k_y = 0.0, \pm 0.5, \pm \frac{\pi}{3}, \pm 1.5, \pm \frac{2\pi}{3}, \pm 2.5, \pm 3.0$  müxtəlif qiymətlərində  $k_x$  funksiyasından asılılığıdır. Hər iki halda  $2t_{\parallel} = 1, |\Delta_0| = 0.5 \cdot 2t_{\parallel}, t_{\perp} = 0.2 \cdot 2t_{\parallel}, \alpha = 0.6 \cdot 2t_{\parallel}, \beta = 0, \mu = -0.061 \cdot 2t_{\parallel}$  və  $0.061 \cdot 2t_{\parallel}$  seçilir.

Sıfır enerjili səth səviyyələri ilə topoloji ifratkeçiricinin zona quruluşu şəkil 1 (a) və (b)-də verilib.  $\Delta_0 < 0$  olduqda, Mayorana kənar halları  $k_x = 0$  nöqtəsində yaranır və şəkil 1 (a)-də qırmızı əyrilərlə göstərilmişdir.  $\Delta_0 > 0$  olduqda, sıfır enerji halı Brillüen zonanın sərhədlərinə  $k_x = \pm\pi$  keçir (Şəkil 1 (b)).

Bundan əlavə, xarici maqnit sahəsində zamanın geri dönməsinə görə invariantlığın pozulduğu halda da təklif etdiyimiz yeni kvazi birözlü ifratkeçiricinin topoloji fazasında yaranan dəyişiklikləri, sıfır enerjili Mayorana modunun xüsusiyyətindəki dəyişiklikləri öyrənmişik. Xarici maqnit sahəsinin iştirakı ilə Boqolyubov-de Gennes kvazizərrəcikləri üçün enerji dispersiyasını aşağıdakı şəkildə ifadə etmək olar:

$$(E^2 - \xi_k^2 - \epsilon_s^2 - \omega_z^2 - |\Delta|^2)^2 - 8\xi_{k_x}\omega_z \sin\theta \Phi_k(\varphi)E - 4\xi_k^2(\epsilon_s^2 + \omega_z^2) - 4(\omega_z \sin\theta \Phi_k(\varphi))^2 - 4\omega_z^2|\Delta|^2 = 0 \quad (3)$$

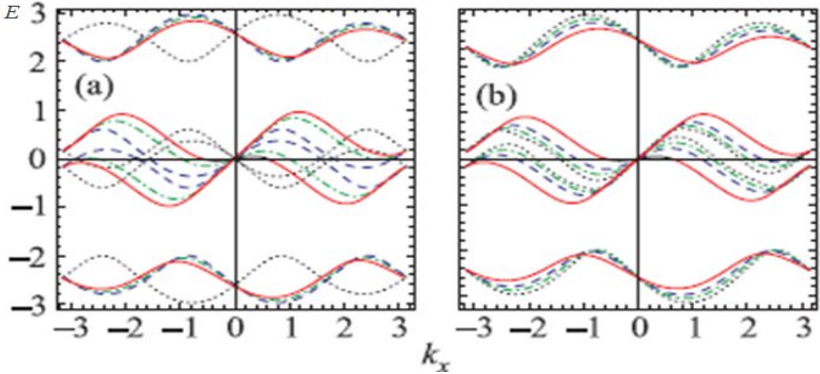
burada  $\Phi_k(\alpha, \beta, \varphi) = \sin k_x(\alpha \sin \varphi + \beta \cos \varphi) - \sin k_y(\alpha \cos \varphi + \beta \sin \varphi)$  ifadəsi enerjinin  $\varphi$  azimut bucağından asılılığını təyin edir.



$\Phi_k(\alpha, \beta, \varphi)$  ifadəsi maqnit sahəsi və spin-orbital qarşılıqlı təsiri kimi koplanar vektor sahələri arasında interferensiyaya görə yaranır və (3) tənliyinə xətti  $E$  həddini daxil edilir. Bu xətti hədd enerji dispersiyasının simmetriyasını pozur və ifratkeçirici səthə perpendikulyar olan maqnit sahəsində ( $\theta = 0$ ) bu hədd yox olur. Bu halda, enerji spektri üçün (3) tənliyindən

$$E^2 = \xi_k^2 + \epsilon_s^2 + \omega_z^2 + |\Delta(k_y)|^2 \pm 2\sqrt{\xi_k^2(\epsilon_s^2 + \omega_z^2) + |\Delta(k_y)|^2 \omega_z^2}$$

alınır, burada Brillüen zonanın mərkəzində  $E(0) = s|\omega_z \pm \sqrt{\tilde{\mu}^2 + |\Delta(0)|^2}|$  sıfırıncı enerji halına malikdir. Bu ifadə göstərir ki,  $\omega_z > \sqrt{\tilde{\mu}^2 + |\Delta|^2}$  olduqda topoloji qeyri-trivial faza reallaşır, burada  $k = 0$  –olduqda bir Mayorana sərhəddə yerləşir,  $\omega_z < \sqrt{\tilde{\mu}^2 + |\Delta|^2}$  olduqda isə telin uclarında Mayorana kvazizərrəciyi yerləşən topoloji trivial hal meydana çıxır.



**Şəkil 2:** Enerji dispersiyasının  $k_x$  ( $k_y = 0$ )-dən asılılığı.

Dresselhaus spin-orbital sabitinin qiyməti  $\beta = 0$  olduqda, səthdə maqnit sahəsinin istiqamətinin  $\varphi = \frac{3\pi}{2}, \frac{2\pi}{3}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}$  müxtəlif qiymətlərinə uyğun olaraq nöqtələrlə, nöqtə-qırıq xətlərlə, qırıq xətlərlə, bütöv əyrilərlə şəkil 2 (a)-da verilmişdir.  $\varphi = \frac{\pi}{4}$  olduqda,

$\beta = 0.4, 0.3, 0.2, 0.0$  qiymətinə uyğun olaraq nöqtələrlə, nöqtə-qırıq xətlərlə, qırıq xətlərlə, bütöv əyrilərlə şəkil 2 (b)-də göstərilmişdir. Hər iki halda ölçüsüz parametrlər  $2t_{\perp} = 0.1, \mu = 0, \alpha = 0.5, \epsilon_z = \sqrt{1.7}, |\Delta| = 0.7$  ( $2t_{\parallel}$ -in vahidində) kimi seçilir.

**Dördüncü fəsildə** Mayorana fermionlarının yeni sistemdə - yük-dalğa sıxlıqlı kvazi biröçlü yarımkəçiricilərdə də yarandığı bizim tərəfimizdən göstərilmişdir. Bu işdə biz bir- və kvazi biröçlü Payerls dayanıqsızlığı olan sistemlərin yük-dalğa sıxlığı meydana çıxdığı zaman spin-orbital qarşılıqlı təsiri və xarici maqnit sahəsinin olduğu halda topoloji fazaya keçməsi və sistemin uclarında Mayorana fermionlarının yaranmasını nəzəri olaraq vermişik. Həmçinin ifratkeçirici olmayan yeni sistemin topoloji fazaya keçməsi və sistemdə Mayorana fermionlarının yaranması bu işin prinsipial tərəfidir. Bu sistemlər bir- və kvazi biröçlü yük-dalğa sıxlığı olan sistemlərdir. Burada biz Raşba və Dresselhaus spin-orbital qarşılıqlı təsirinə və Zeyeman maqnit sahəsinin varlığında Kulon təsiri ilə biröçlü Habbard modelinə baxacağıq. Sistemin Hamilton operatorunu aşağıdakı şəkildə yazırıq:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_{int} \quad (4)$$

burada  $\hat{H}_0$  elektronlar arasında qarşılıqlı təsiri olmadığı halda sistemin Hamilton operatorunu, isə  $\hat{H}_{int}$  elektronlar arasında korrelyasiyanı ifadə edir və bu operatorları uyğun olaraq, aşağıdakı şəkildə yaza bilərik:

$$\begin{aligned} \hat{H}_0 = & \sum_{0 < k < \frac{G}{2}} \sum_{\sigma, \sigma'} \{ \xi_k c_{k, \sigma}^+ c_{k, \sigma'} \delta_{\sigma, \sigma'} + \omega_z c_{k, \sigma}^+ (\sigma_x)_{\sigma, \sigma'} c_{k, \sigma'} + \\ & + \alpha \sin(kd) c_{k, \sigma}^+ (\sigma_z)_{\sigma, \sigma'} c_{k, \sigma'} + \\ & + \beta \sin(kd) c_{k, \sigma}^+ (\sigma_y)_{\sigma, \sigma'} c_{k, \sigma'} + (k \leftrightarrow k - \frac{G}{2}) \}, \end{aligned}$$

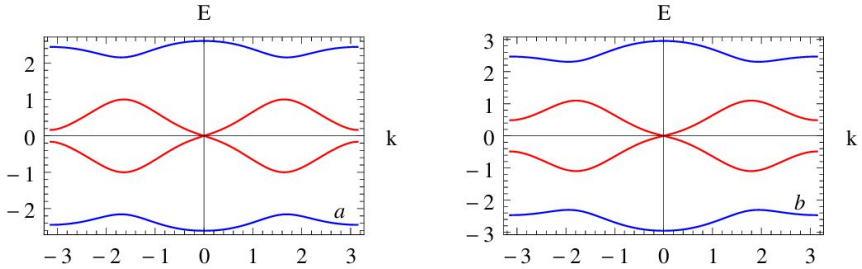
$$\begin{aligned}
& \hat{H}_{int} = \\
& = \frac{1}{2N} \sum_{0 < q < G} \sum_{\sigma} \left\{ \sum_{\substack{-G/2 < k < G/2 - q \\ q - G/2 < k' < G/2}} U(k, k', q) c_{k+q, \sigma}^+ c_{k, \sigma} c_{k' - q, -\sigma}^+ c_{k', -\sigma} + \right. \\
& \quad \left. + \sum_{\substack{G/2 - q < k < G/2 \\ -G/2 < k' < q - G/2}} U(k, k', q) c_{k, \sigma}^+ c_{k+q - G, \sigma} c_{k' - q, -\sigma}^+ c_{k' - q + G, -\sigma} \right\}.
\end{aligned}$$

Tək zərrəcikli Qrin funksiyasının polyusu  $G^{-1}(E, k) = E - \hat{\mathcal{H}}$  kvazizərrəcik enerjisini verir:

$$\begin{aligned}
E_{YDS}^2 &= \xi_k^2 + \gamma^2 \sin^2 k + |\Delta|^2 + \omega_z^2 \pm \\
&\pm 2\sqrt{\xi_k^2 \gamma^2 \sin^2 k + \omega_z^2 |\Delta|^2 + \xi_k^2 \omega_z^2}. \quad (5)
\end{aligned}$$

Brillüen zonanın mərkəzindəki topoloji yük-dalğa sıxlığı üçün sıfır enerji kənar halları üçün enerji spektri aşağıdakı şəkildə yazıla bilər:

$$E_{YSD}^{(0)} = E(0) = \left| \omega_z - \sqrt{\mu_t^2 + |\Delta|^2} \right|$$



**Şəkil 3:** Enerji spektrinin k-dan asılılığı.

Qeyd edək ki, şəkil 3-də enerji spektri (5) bərabərliyində  $t = 0.5$ ,  $\tilde{\alpha} = 0.8$  fiksə olunmuş qiymətləri üçün və ölçüsüz parametrlərin (a)-da  $\tilde{\Delta} = 0.7$ ,  $\tilde{\omega}_z = \sqrt{1.3}$ ,  $\tilde{\mu} = -0$ , (b)-də  $\tilde{\Delta} = 0.7$ ,  $\tilde{\omega}_z = \sqrt{2.18}$ ,  $\tilde{\mu} = -0.3$  qiymətlərində hesablanmışdır. Zona mərkəzində  $\omega_z^2 > \mu_t^2 +$

$|\Delta|^2$  olduqda, maqnit sahəsinin üstün olduğu qadağan zolağa,  $\omega_z^2 < \mu_t^2 + |\Delta|^2$  olduqda, cütləşmə enerjisinin üstün olduğu zolağa çevrilir. Qeyri-trivial fazadan trivial fazaya kvant faza keçidi  $\omega_z^2 = \mu_t^2 + |\Delta|^2$  olduğunda baş verir.

Payerls dayanıqsızlığı olan sistemlər təcrübi olaraq uzun müddət öyrənilmişdir, hətta son illər xüsusi sistemlərdə Si(111) və Si(555) istiqamətlərində üzərində uzun periodlu ziqzaq şəklində zəncirlər yerləşən səthlər meydana çıxır. Skanedici tunel mikroskopu ilə bu səthlərə zəncirlər boyunca qızıl, gümüş atomları bir-bir yerləşdirilir və kvazi birölcülü zəncirlər suni olaraq alınır. Bu sistemlərdə Payerls dayanıqsızlığı nəticəsində, yəni elementar qəfəsin periodunun ikiyə qatlanması nəticəsində, sistemlərdə yük-dalğa sıxlığı meydana çıxır və sistem metallik haldan dielektrik hala keçir.

Tunel eksperimentində Payerls dayanıqsızlığı olan birölcülü sistem və metallik sistemin tunel keçidlərinə baxılmışdır. Adətən Payerls dayanıqsızlığı olan belə sistemlərdə zəncirlər ətrafında deformasiya potensialı meydana çıxır ki, bu da Raşba spin-orbital qarşılıqlı təsirinə yaranmasına səbəb olur. Tunel cərəyanını ölçərək xarici maqnit sahəsini və ya sistemdəki spin-orbital qarşılıqlı təsirini dəyişərək qadağan olunmuş zona içərisində keçirici Mayorana fermiona qarşılıq gələn sıfır enerjili modunun meydana çıxacağını nəzəri olaraq vermişik.

Payerls qadağan zolağında sıfır enerjili Mayorana halı tunel təcrübələrində təcrübi olaraq aşkar edilə bilər, burada tunel keçiriciliyi tək-zərrəcikli hal sıxlığı  $\rho(\epsilon, T)$  vasitəsi ilə ifadə edilir:

$$\frac{\delta G(V, T)}{G^{(0)}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\epsilon}{4T} \frac{\delta \rho(\epsilon)}{\rho^{(0)}} \left[ \frac{1}{\cosh^2 \frac{\epsilon - eV}{2T}} + \frac{1}{\cosh^2 \frac{\epsilon + eV}{2T}} \right]. \quad (6)$$

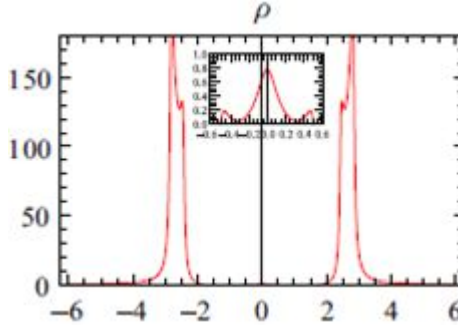
(6) bərabərliyində  $T = 0$  götürsək, onda bu ifadə aşağıdakı şəkildə yazılır:

$$\frac{\delta G(\epsilon)}{G^{(0)}} = \frac{[\rho(\epsilon, 0) - \rho^{(0)}]}{\rho^{(0)}} = \frac{\delta\rho(\epsilon)}{\rho^{(0)}},$$

burada  $\rho^{(0)}$  aşqarsız sistemin hal sıxlığıdır. Hal sıxlığı aşağıdakı ifadədən tapılır:

$$\rho(\epsilon) = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{dk}{2\pi} \sum_n \delta(\epsilon - E_n(k))$$

burada (5) bərabərliyi ilə  $n = 1, 2, 3, 4$  üçün verilən  $E_n(k)$  enerji spektridir.



**Şəkil 4:**  $\tilde{\alpha} = 0.3, \tilde{\Delta} = 1.0, \tilde{\omega}_z = \sqrt{2.0}$  üçün hal sıxlığında nisbi dəyişiklik

$\delta\rho(\epsilon)/\rho^{(0)}$ -nin enerjiden asılılığı ölçüsüz parametrlər  $\tilde{\alpha}, \tilde{\Delta}, \tilde{\omega}_z$ -in fərqli qiymətlərində şəkil 4-də göstərilmişdir, şəkildən görüldüyü kimi, mərkəzi pik yalnız  $\omega_z^2 = \mu_t^2 + |\Delta|^2$  kritik şərti ödəyən xarici parametrlərin xüsusi qiymətləri üçün yaranır.

Dissertasiya işi nəticələr və ədəbiyyat siyahısı ilə tamamlanmışdır.

## ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. Azbest və seolit kimi izolyatorların bir müstəvi üzərindəki periodik atom boşluqlarına ifratkeçiricilər doldurmaqla, zamanın geri dönməsinə görə invariant topoloji ifratkeçiricilər üçün alternativ yeni sistem əldə etmək olar. Müstəvi üzərində yerləşən və spin-orbital qarşılıqlı təsiri güclü olan yarımkeçirici tellərin daxilində s simmetriyalı və tellər arasında d simmetriyalı Kuper cütlərinin meydana çıxdığı halda struktur zamanın geri dönməsinə görə invariant qalan DIII sinfinə aid ifratkeçirici topoloji fazaya keçəcəyi göstərilmişdir.

2. Müstəvi üzərində yerləşən xarici maqnit sahəsi olduğu halda zamanın geri dönməsinə görə invariantlıq pozulduğu halda ifratkeçirici paralel tellərin enerji spektrində və topoloji fazada dəyişikliklər öyrənilmişdir. Sistemdə Raşba və Dresselhaus spin-orbital qarşılıqlı təsirlərinin olduğu ümumi halda göstərilmişdir ki, Zeyeman maqnit sahəsinin təsiri ilə Mayorana enerji dispersiyasında asimmetriya yaranır. Maqnit sahəsi olduğu halda Mayorana-Kramers cütləri yerinə hər bir ucda bir Mayorana fermionları meydana çıxır. Xarici maqnit sahəsinin və Raşba-Dresselhaus spin-orbital qarşılıqlı təsirlərinin təsiri altında enerji spektrlərindəki dəyişikliklər nəzəri və rəqəmsal olaraq hesablanmışdır.

3. Müstəvi üzərində yerləşən N zəncirdən ibarət olan belə bir strukturun Hamiltonianını hər zaman iki zəncirdən ibarət olan strukturun Hamiltonianına endirib, sadəcə iki dənə zənciri öyrənməklə bütün sistemin xarakteristikasını vermək olar.

4. Göstərilmişdir ki, bu sistemlərdə tellərin uclarında Mayorana-Kramers cütləri meydana çıxır. Burada maqnit sahəsi olduğu halda hər birözlü telin uclarında spindən asılı olmayan Kramers cütləri deyil, spindən asılı olmayan tək bir Mayorana fermionları meydana çıxır. Maqnit sahəsi olmayan halda bir telin iki ucunda da iki dənə Mayorana fermionu meydana çıxacaq. Bu fermionlar müstəvi üzərində kvazi birözlü ifratkeçiricilərin uclarından axan  $4\pi$  periodlu Cozefson cərəyanına səbəb olacaqdır.

5. Əgər kvazi birözlü ifratkeçiricilərdə zamanın geri dönməsinə görə invariant olan topoloji faza meydana çıxarsa, bu

halda telin uclarında meydana çıxan Mayorana fermionları bir teldən başqa telə tunelləyərək  $4\pi$  fraktal periodlu cərəyanın meydana çıxmasına səbəb olacaqlar. Beləliklə, belə sistemdə iki periodlu cərəyan olacaq: həcmdə normal  $2\pi$  periodu ilə müşahidə olunan Cozefson cərəyanı, səthdə isə Mayoran-Kramers cütlərinin tunelləşməsi nəticəsində meydana çıxan  $4\pi$  periodlu fraktal Cozefson cərəyanı olacaqdır.

6. Bir- və kvazi birölçülü Payerls dayanıqsızlığı olan sistemlərin yük-dalğa sıxlığı meydana çıxdığı zaman spin-orbital qarşılıqlı təsiri və xarici maqnit sahəsinin olduğu halda topoloji fazaya keçməsi və sistemin uclarında Mayorana fermionlarının yaranması nəzəriyyəsini vermişik.

7. Əgər sistem birölçülü deyilsə, kvazi birölçülüdirsə, onda sistemdə mütənasib fazadan qeyri-mütənasib fazaya keçidlər olmasına baxmayaraq, bəlli bir temperatur intervalında sistemdə zərrəcik-deşik simmetriyasının qorunacağı, Mayorana fermionunun hələ də sistemdə olacağını göstərmişik.

8. Güclü spin-orbital qarşılıqlı təsiri olan və yük-dalğa sıxlıqlı fazaya keçən yarımkeçirici və metaldan hazırlanmış tunel keçidində tunel cərəyanı xarici maqnit sahəsində hesablanmışdır. Göstərilmişdir ki, sistem topoloji fazaya keçdiyində qadağan olunmuş zona içərisində Mayorana fermionuna qarşılıq gələn sıfır enerjili keçirici modun meydana çıxması ilə tunel keçidindən cərəyan axacaqdır. Belə ki, bizim hesablamalara əsasən sistem əgər topoloji fazada deyilsə, qadağan olunmuş zona içərisində heç bir yeni səviyyə yoxdur. Əgər sistemdə güclü spin-orbital qarşılıqlı təsiri varsa, xarici maqnit sahəsinin dəyişməsi ilə topoloji fazaya keçirsə, onda sistemin uclarında Mayorana fermionları yaranır və sıfır enerji ətrafında pik meydana çıxır. Nəzəri olaraq hesablanmış tunel cərəyanını hansı sistemlərdə eksperimental olaraq müşahidə olunacağı izah olunmuşdur.

## Dissertasiya mövzusu üzrə çap olunmuş elmi işlərin siyahısı

1. Məmmədova, S. O. Topoloji izolyator və ifratkeçiricilərdə Mayorana fermionlarının kvant informasiya daşıyıcısı olan qubit kimi meydana çıxma mexanizmləri // Azerbaijan Journal of Physics, - Bakı: - 2019. C. XXV, №3, - s. 47-49.
2. Nəhmədov, Ə. P., Mayorana fermionları vasitəsi ilə biröçülü kristallarda qubit kvant informasiyası daşıyıcısının yaradılması üsulu, İxtira İ2019 0002, Azərbaycan Respublikası / Məmmədova S. O., Ələkbərov O. Z. - 2019.
3. Nəhmədov, Ə. P., Məmmədova, S. O., Ələkbərov, O. Z. Kvazi biröçülü ifratkeçiricilərdə Majorana Fermionlarının yaranma şərtləri // Azerbaijan journal of Physics, - Bakı: - 2015. C. XXI, №4, - s. 13-16.
4. Mammadova, S. O. Majorana fermions in one- and quasi-one dimensional insulator with charge-density wave // Azerbaijan Journal of Physics, - Bakı: - 2019. Vol. XXV, №3, - p. 22-24.
5. Mammadova, S. Suppression of the critical temperature by spin-orbit interactions in a weakly-coupled layered superconductor // 1st International Scientific Conference of young scientists and specialists, - Bakı, -15-16 october, - 2014, -p.221-222.
6. Mammadova, S., Nakhmedov, E., Alekperov O. Quasi-One-Dimensional Topological Superconductor // 5th International Advances in Applied Physics and materials Science Congress (APMAS-2015), - Oludeniz, - 16-19 april, - 2015, p. 545.
7. Mammadova, S., Nakhmedov, E., Alekperov, O. Quasi-One-Dimensional Topological Superconductor // Acta Physica Polonica A, - 2016. Vol. 129, №4, - p. 800-802.
8. Nakhmedov, E., Alekperov, O., Mammadova S. Suppression of the critical temperature of layered organic superconductors by disorder // International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-18), - Salzburg: - 27-31 august - 2012, - p.128.
9. Nakhmedov, E., Alekperov, O., Mammadova, S. Effects of randomness on the critical temperature in quasi-two-dimensional



organic superconductors // Azerbaijan journal of Physics, Baku: - 2012. Vol. XI-XVIII, № 4, - p. 37.

10. Nakhmedov, E., Mammadova, S., Alekperov, O. Topological superconductivity and fractional Josephson effect in quasi-one dimensional wires on a plane // JETP Letters, - 2016. Vol. 103, iss. 1, - p. 20-26.
11. Nakhmedov, E., Mammadova, S., Alekperov, O. Topological superconductivity in quasi-one dimensional structures // The Reports of National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku: - 2015. Vol. LXXI, № 2, - p. 19-24.





Dissertasiyanın müdafiəsi \_\_\_\_\_ il tarixində saat \_\_\_\_\_ Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1143, Bakı şəh., H. Cavid pr. 131,  
e-mail: *director@physics.science.az*

Dissertasiya ilə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq olar.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat \_\_\_\_\_ il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 18.02.2021  
Kağızın formatı: A5  
Həcm: 39508  
Tiraj: 100 nüsxə