



دانشکده‌ی علوم پایه  
گروه آموزشی فیزیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد  
در رشته‌ی فیزیک گرایش حالت جامد

**عنوان:**

**بررسی ابررساناهای بر پایه آهن و پیوندهای جوزفسون با ابررساناهای چند گافه**

استاد راهنما:

دکتر محمد حمدی پور

پژوهشگر:

عسگر عیوضی

شهریور 1395

نام خانوادگی دانشجو: عیوضی	نام: عسگر
عنوان پایان‌نامه: بررسی ابررساناهای بر پایه آهن و پیوندهای جوزفسون با ابررساناهای چند گافه	
استاد راهنما: دکتر محمد حمدی پور	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: فیزیک
گرایش: حالت جامد	دانشگاه: محقق اردبیلی
دانشکده: علوم پایه	تاریخ دفاع: 95/06/20
تعداد صفحات: 110	
<p>چکیده:</p> <p>ابررساناهای بر پایه آهن، نوعی از ابررساناهای نامتعارف محسوب می‌شوند، و به چهار ترکیب مادر و دسته کلی تقسیم می‌شوند که یک لایه‌ی ابررسانایی که شامل عنصر آهن هم هست، در همه‌ی آن‌ها وجود دارد. این نوع ابررساناها که به آن‌ها چندگافه هم می‌گویند دارای دمای گذاری در بازه‌ی 56-26 کلوین می‌باشند، از آن جهت که هم‌زیستی آنتی‌فررومغناطیس و ابررسانایی را نشان می‌دهند برای ما جذاب هستند. این در حالی است که ابررسانایی الکترون-فونون حالت دیامغناطیس را بروز می‌دهد. سازوکار این نوع ابررسانایی هنوز کشف نشده است و امید است تنوع ترکیبات مادر و تحقیقات روی آن‌ها علاوه بر این که ترکیبات احتمالی خارج از بازه اشاره شده را کشف کند، سازوکار آن‌ها را نیز تعیین کند. حال پیوند جوزفسون بین این نوع از ابررساناها و مطالعه‌ی جریان بین آن‌ها کار ویژه ما خواهد بود، به این صورت که در گام اول مدلی برای توصیف هامیلتونی این نوع فرآیند تونل‌زنی ارائه می‌دهیم و کار را با رهیافت انتگرال مسیر فاینمن جلو خواهیم برد، یعنی از روی هامیلتونی به ترتیب تابع پارش گرند کانونیکی؛ عملگر تحول زمان موهومی؛ کنش موثر؛ و لاگرانژی موثر را به‌دست آورده و نهایتاً از روی لاگرانژی معادلات اویلر – لاگرانژ استخراج می‌شود که این معادلات دینامیک سیستم را برای ما توضیح خواهند داد.</p>	
کلید واژه‌ها: پیوندهای جوزفسون، ابررسانایی دمای بالا، ابررسانایی چند گافه، ابررساناهای بر پایه آهن.	

## فهرست مطالب

شماره و عنوان مطالب	صفحه
---------------------	------

### فصل اول: معرفی ابررساناهای بر پایه آهن

1-1- مقدمه

2.....

1-2- ابررساناهای بر پایه

3..... آهن

1-3- ترکیبات مادر

4.....

1-3-1- خانواده

4..... 1111

1-3-2- خانواده

5..... 122

1-3-3- خانواده

5..... 111

1-3-4- خانواده

6..... 11

1-4- دیاگرام فاز ابررساناهای بر پایه

6..... آهن

1-5- جذابیت ابررساناهای

8..... آهنی

1-6- جزئیات الکترومغناطیسی LATMPNO

10.....

7-1-1- نظم

11.....مغناطیسی

8-1-1- افت و خیزهای

13.....اسپین

15.....1-9-1 مدلهای جفت شدگی

17.....1-9-1-1 مدل Spin Wave

10-1-1- طیف PE فراگیر زاویه-

18.....دار

11-1-1- مقایسه نمایش سه نوع

20.....ابرسانا

### فصل دوم: تونل زنی و پیوند جوزفسون

1-2- تونل زنی و پیوندهای جوزفسون

22.....

1-1-2- تونل-

22.....زنی

2-1-2- تونل زنی در

24.....ابرسانا

1-2-1-2- تونل زنی بین یک فلز عادی و

25.....ابرسانا

2-1-2-2- تونل زنی بین دو ابرسانای

27.....یکسان

3-1-2-2- تونل زنی

29.....جوزفسون

2-2- کاربردهای پیوند

35.....جوزفسون

فصل سوم: همزیستی الکترون‌های سیار و موضعی

3-1- مقدمه

41.....

3-2- الکترون‌های سیار

41.....

3-3- گشتاور

42..... موضعی

3-4- تئوری‌هایی برای ابررساناهای

42..... آهنی

3-4-1- نظریه‌ی الکترون

43..... سیار

3-4-2- نظریه‌ی گشتاور

45..... موضعی

3-4-3- نظریه‌ی

46..... هیبرید

3-5- گذار Mott اوربیتال -

49..... انتخابی

فصل چهارم: اثرات جوزفسون در ابررساناهای چندباند

4-1-

52.....مقدمه

-4-2

53.....مدل

4-3- کنش و چگالی لاگرانژی

53.....موثر

4-4- روابط جوزفسون و معادله

80.....ماکسول

4-5- حرکت هم-

81.....فاز

4-6- معادلات

82.....فاز

4-7- مقایسه چند رهیافت و نتایج

84.....آن

فهرست منابع و مآخذ

### فهرست جدول‌ها

شماره و عنوان جدول	صفحه
--------------------	------

جدول 1 - 1: مقایسه نمایش سه نوع

ابرسانا.....20

جدول 3 - 1: مقایسه تئوری‌هایی برای ابرساناهای

آهنی.....43

## فهرست شکل‌ها

صفحه

شماره و عنوان شکل

- شکل 1 - 1: 4 خانواده مختلف ابررساناهای برپایه آهن.....6
- شکل 1 - 2: مقایسه دیاگرام فاز دو نوع ابررسانای دمای بالا.....7
- شکل 1 - 3: رابطه‌ی دمای گذار و ساختار.....9
- شکل 1 - 4: گذار فلزی 3d فلز انتقال و PN=P,AS.....10
- شکل 1 - 5: نظم مغناطیسی در 11 و 12.....11
- شکل 1 - 6: سطح فرمی تجربی، پاشندگی‌های تجربی، توزیع اندازه گاف ابررسانایی روی سطح فرمی.....16
- شکل 1 - 7: پارامتر نظم S-Wave، d-Wave، S<sup>++</sup>، S<sup>±</sup>.....16
- شکل 1 - 8: مقایسه دیاگرام جفت‌شدگی تبادل مغناطیسی در کوپرات و آهن.....17
- شکل 1 - 9: جفت‌شدگی تبادل برای یک ترکیب.....18
- شکل 1 - 10: مجموعه تجربی ARPES.....19
- شکل 1 - 11: دستگاه طیف‌سنج ARPES.....20

## فصل دوم

شکل 2 - 1: سمت چپ تونل زنی امکان ندارد، سمت راست تونل زنی از چپ به راست.....23

شکل 2 - 2: رابطه‌ی خطی جریان-ولتاژ برای احتمال ثابت تونل-زنی.....24

شکل 2 - 3: نمایش چگالش بوزون ابررسانا و فلز عادی.....25

شکل 2 - 4: نمودار جریان-ولتاژ.....26

شکل 2 - 5: نمایش نیمرسانایی تونل زنی بین ابررسانا و فلز عادی.....27

شکل 2 - 6: نمایش نیمرسانایی تونل زنی بین دو ابررسانای یکسان.....27

شکل 2 - 7: نمایش چگالش بوزون تونل زنی بین دو ابررسانا.....28

شکل 2 - 8: منحنی مشخصه جریان-ولتاژ برای دو ابررسانای یکسان.....28

شکل 2 - 9: نمایش نیمرسانایی، چگالش بوزون، منحنی مشخصه.....29

شکل 2 - 10: نمایش شماتیک پیوند جوزفسون و نمودار جریان-ولتاژ.....30

شکل 2 - 11: مدار معادل پیوند

جوزفسون.....31

شکل 2 - 12: آونگ

ساده.....32



شکل 2 - 13: انواع پیوند

34.....جوزفسون.....

شکل 2 - 14: نمای کلی یک

35.....اسکوئید.....

شکل 2 - 15: پیوند جوزفسون در میدان‌های از صفر تا

37..... $3H_0 / 2$ .....

شکل 2 - 16: الگوی پراش حلقه

37.....جوزفسون.....

شکل 2 - 17: تداخل حاصل از تداخل سنج کوانتومی و مدوله شدن تداخل توسط

38.....پراش.....

### فصل سوم

شکل 3 - 1: وابستگی دما به مقاومت برای خانواده

42.....122.....

شکل 3 - 2: قیاس جفت‌شدگی فونون القا شده و مگنون القا

47.....شده.....

شکل 3 - 3: دیاگرام فاز گذار

49.....OSMott.....

شکل 3 - 4: نمایش شماتیک چگالی حالت‌های الکترون در یک سیستم چندباند با گذار

50.....OSMott.....

### فصل چهارم

شکل 4 - 1: پیوند جوزفسون بین ابررسانای متعارف و ابررسانای

53.....دوبانده.....

شکل 4 - 2: نمایش پیوند جوزفسون بین ابررسانای تک‌گافه و

84.....دوگافه.....

شکل 4 – 3: پیوند جوزفسون بین ابررسانای تک بانده و سه-

بانده.....87

فهرست علائم اختصاری (در صورت لزوم)

علامت اختصاری	مفهوم یا توضیح
AF	پادفرومغناطیس
CAFM	پادفرومغناطیس بار
OSMott	گذار مات اوربیتال انتخابی

فصل اول:

**معرفی ابررساناهای**

**بر پایه آهن**

## 1-1- مقدمه

ابرسانایی در سال 1911 کشف شد به این صورت که وقتی اونس کمرلینگ در مورد ظرفیت گرمایی جیوه تحقیق می‌کرد، متوجه شد از یک دمای بخصوص پایین مقاومت این ماده ناگهان صفر می‌شود. بعدها فهمیده شد که این دمای بخصوص از ماده‌ای به ماده‌ی دیگر متفاوت است و این دما، دمای بحرانی نامیده شد، که در زیر این دما وارد فاز ابررسانا می‌شویم و بالای این دما حالت عادی ماده را داریم. تحقیقات بعد نشان داد که این اتفاق هم‌زمان است با طرد میدان مغناطیسی از داخل ماده (حالت دیامغناطیسی). حامل‌ها در این ابررساناها جفت‌های کوپر بودند و جفت‌های کوپر شامل دو الکترون با اسپین مخالف یعنی دو فرمیون مقید سیستم است، و اینکه جمع دو فرمیون سیستمی با اسپین صحیح را باعث می‌شود که به آن بوزون می‌گویند، پس ما با حالت‌های بوزونی سروکار خواهیم داشت. امروزه می‌دانیم دو نوع ابررسانا داریم: ابررساناهای برپایه نظریه BCS و ابررساناهای با سازوکار نامشخص. مورد اول در دماهای خیلی پایین (زیر 30 کلوین) رخ می‌دهد و به‌طور طبیعی وجود دارد ولی مورد دوم در دماهای خیلی بالا (بالای 30 کلوین تا حدود 130 کلوین) رخ می‌دهد.

در سال 1962 آقای جوزفسون که در آزمایشگاه اندرسون کار می‌کرد به نتایج جالبی رسید که قبلاً به‌صورت تئوری پیش‌بینی کرده بود، او مشاهده کرد که وقتی دو ابررسانا از طریق اتصال ضعیف به هم وصل شوند، یک جریان حتی وقتی اختلاف ولتاژ صفر بین دو ابررسانا باشد وجود خواهد داشت و پدیده تونل‌زنی اتفاق می‌افتد، که به این پدیده اثر DC جوزفسون می‌گویند، این اثر بدون اعمال میدان الکتریکی خارجی است. حال اگر میدان الکتریکی خارجی به دو سر سیستم اعمال شود یک جریان AC در عرض پیوند شارش خواهد کرد که به آن اثر AC جوزفسون می‌گویند.

در ابررساناهای نوع دوم که سرامیکی هستند ساختارهای چند لایه وجود دارد که وقتی دما را پایین بیاوریم تعدادی از لایه‌ها ابررسانا می‌شوند ولی برای تعداد دیگری از لایه‌ها این اتفاق نمی‌افتد و هر تلاش دیگری هم برای ابررسانا کردن این لایه‌ها بی‌نتیجه است. این لایه‌ها که با لایه‌های ابررسانا شده معمولاً یک در میان است پیوندهای جوزفسون تشکیل می‌دهند پس بنابراین یک سری پیوند جوزفسون موازی با هم داریم که اثر هم‌دیگر را تقویت می‌کنند.

## 2-1- ابرساناهای بر پایه آهن

پس از دو دهه مطالعه نسبتاً زیاد ابرساناهای مسی 1986-2006، هنگامی که خانواده کامل مختلفی از ابرساناها به وسیله‌ی گروه پروفیسور هوزونو<sup>1</sup> در سال 2006 کشف شد، جامعه ماده چگال یک‌بار دیگر شگفت‌زده شد. گروه ژاپنی یک گذار ابررسانشی در LaFePO در یک دمای نسبتاً پایین 4 کلوین را گزارش دادند. این کشف اساسی توجه خاص اما در عین حال محدودی را از جامعه دریافت کرد. شگفتی عمومی دو سال بعد اتفاق افتاد، وقتی که همان گروه ابررسانایی در دمای 26 کلوین، بزرگ‌تر از اغلب ابرساناهای متعارف، در  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$  در میزان آلییدگی  $x=0/12$  را کشف کرد. این کشف، تحقیقات روی این مواد را به‌طور فزاینده‌ای در سرتاسر جهان افزایش داد، به‌طوری‌که کلاس-های ترکیبی جدید  $\text{SmFeAsO}_{0.9}\text{F}_{0.1}$  با  $\text{Tc}=55$  کلوین و  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  با  $\text{Tc}=38$  کلوین نیز یافته شد. این ابرساناهای جدید ابتدا "ابرساناهای نیکتاید"<sup>2</sup> یا همان گروه 5 جدول تناوبی نامیده شدند، به هر حال محققین امروزه به آن بر پایه آهن می‌گویند.

این نوع ابرساناهای دمای بالا، دمای گذاری در بازه (26 – 55) کلوین دارند و فرمول کلی آن‌ها به‌صورت  $\text{REOFePn}$  ( $\text{REO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ) می‌باشد، که RE یک عنصر نادر خاکی و Pn یکی از عناصر فسفر یا آرسناید است، که ترکیبات داری آرسناید دارای دمای بحرانی بیشتری نسبت به فسفر هستند. دمای بحرانی به وسیله RE و آلیش الکترونی کنترل می‌شود. آلیش الکترونی به‌صورت جانشینی فلئور با اکسیژن یا کمبود و خلا اکسیژن انجام می‌گیرد، در حالی که آلیش حفره‌ها به‌صورت جانشینی Sr به-جای La، یعنی  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{OFeAs}$  انجام می‌گیرد.

مشابه آنچه که 22 سال پیش برای ابرساناهای مسی دمای بالا پیدا شده بود، ترکیب مادر گروه جدید، ابرسانا نیست، ولی با جانشینی فلئور به‌جای اکسیژن ابرسانا می‌شود. در این ابرساناها

---

Hideo Hosono<sup>1</sup>  
Pnictide<sup>2</sup>

صفحات FeAs که توسط لایه‌های LaO از یک‌دیگر جدا می‌باشند نقش صفحات CuO<sub>2</sub> در ابررساناهای کوپرات (مسی) را ایفا می‌کنند. همانند کوپرات‌ها، ترکیب مادر این نوع ابررساناها در چگالی آلایش پایین آنتی فرومغناطیس بوده و با افزایش چگالی آلایش، حالت آنتی فرومغناطیس این ماده از بین رفته و ترکیب ابررسانا می‌شود، با وجود این، حالت آنتی فرومغناطیس به‌طور کامل از بین نمی‌رود. (این ترکیبات بر خلاف کوپرات‌ها، که بعد از فرونشانی کامل همبستگی آنتی فرومغناطیسی ابررسانا می‌شوند، در حضور حالت آنتی فرومغناطیسی نیز ابررسانا می‌شوند، به عبارت دیگر حالت‌های ابررسانایی و آنتی فرومغناطیسی به‌طور هم‌زمان در این ترکیبات وجود دارند.) (هوزونو، 2013)

### 3-1- ترکیبات مادر

مواد مادر ابررساناهای برپایه آهن به 4 دسته کلی تقسیم می‌شوند، به‌طور کلی هر ترکیبی از ابررساناهای برپایه آهن باید از این خانواده‌ها پیروی کند. همه‌ی آن‌ها در FePn یا FeCh مشترک هستند، که Ch و Pn به‌ترتیب عناصر گروه 5 و 6 جدول تناوبی هستند، همه‌ی این ترکیبات ساختار نواری الکترونی مشابهی دارند، به‌طوری که حالت‌های الکترونی در سطح فرمی غالباً به‌وسیله‌ی الکترون-های 3d اتم Fe اشغال شده‌اند. (کوردیوک، 2013)

#### 1-3-1- خانواده 1111

با LaO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>Fe As شروع می‌کنیم. این خانواده رکورددار دمای بحرانی هستند (Gd<sub>0.8</sub>Th<sub>0.2</sub>FeAsO) با دمای 56/3 کلوین)، انتخاب این گروه از مواد برای مطالعه و تحقیق چندان معقول هم نیست زیرا اولاً، تک کریستال‌های در دسترس خیلی کم هست دوماً، انتهای کریستال یک سطح دو قطبی با حالت‌های تمییز شده آشکار می‌کند که از ساختار الکترونی بالک متفاوت است و به‌طور شگفت‌انگیزی استفاده از ARPES<sup>3</sup> تجربی را دشوار می‌کند. (کوردیوک، 2013)

## 2-3-1- خانواده 122

این گروه تنوع مختلفی از ترکیبات با محدوده آرایش عریضی در هر دو طرف الکترون و حفره را شکل می‌دهد، دیاگرام فاز غنی (شکل (1 - 2) را ببینید) این گروه نشان از آن دارد که ابرسانایی و مغناطیس با هم رقابت یا هم‌زیستی می‌کنند، اغلب ترکیبات مطالعه شده  $Ba_{1-x}K_x Fe_2As_2$  (BKFA) حفره آلاینده با دمای بحرانی بیشینه 38 کلوین و  $Ba(Fe_{1-x}CO_x)_2As_2$  (BFCA) الکترون آلاینده با 22 کلوین است، هر دو در ترکیب خانواده یکسانی سهیم هستند  $BaFe_2As_2$  (BFA)، که یک فلز خنثی است. یک BKFA بیش از حد آلاینده یک  $KFe_2As_2$  استوکیومتری است، که غیر مغناطیسی با دمای بحرانی 3 کلوین است. از آنجایی که خوب بودن بلور به کیفیت و تنوع ترکیباتش هست، خانواده 122 به وسیله-ی ARPES تجربی بیشتر مطالعه شده‌اند. طیف ARPES ساختار توده الکترونی این خانواده را به خوبی نمایش می‌دهد، که این خانواده 122 را برای مطالعه فیزیک غنی ابرسازهای برپایه آهن محبوب می‌کند.

## 3-3-1- خانواده 111

به دلیل آن‌که این خانواده با هوا واکنش انجام می‌دهد برای مطالعه خیلی چالش‌برانگیز هستند. نماینده اصلی این خانواده،  $LiFeAs$ ، به نسبت بقیه برای طیف‌سنجی ARPES مناسب‌تر است و دمای گذاری در حدود 18 کلوین دارد و می‌توانیم گاف ابررسانشی را بوسیله‌ی ARPES مستقیماً اندازه بگیریم و نتیجه را با محاسبه مقایسه کنیم. این ماده غیر مغناطیسی است و سرانجام باند الکترونی‌اش به‌طور عریضی از هم تفکیک شده، بنابراین آن‌ها می‌توانند به آسانی از هم ناهم‌تنیده شوند که می‌تواند به‌منظور تحلیل ساختارشان استفاده شود.

$NaFeAs$  دیگر عضو خانواده 111 هست که سه گذار پی در پی حول 52، 49 و 23 کلوین دارد که به ترتیب ساختاری، مغناطیسی و ابررسانشی هستند. این ترکیب کمتر از  $LiFeAs$  با هوا واکنش نشان



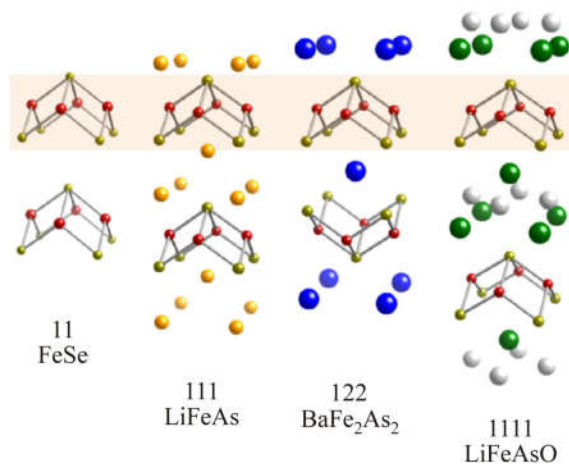
می‌دهد ولی در عین حال تماس با هوا Tc را قویا تحت تاثیر قرار می‌دهد. تعویض Fe با هر دو Co یا Ni مغناطیس را متوقف و ابرسانایی را افزایش می‌دهد. (کوردیوک، 2013)

#### 4-3-1- خانواده 11

این خانواده ساده‌ترین ساختار را در بین این نوع از ابرساناهای کشف شده دارد، که شامل لایه‌های یک در میان FeSe است. هر اتم Fe با 4 اتم Se در صفحه خودش همسایه است.

هر چند در برخی نوشته‌ها دسته پنجمی هم وجود دارد که به آن خانواده همسان‌گون می‌گویند و فرم آن به صورت  $(\text{Fe}_2\text{As}_2)(\text{AE}_{n+1}\text{M}_m\text{O}_y)$  است، که AE قلیایی خاکی و M فلز هست، که ضرایب استوکیومتر آن‌ها از هم مستقل است، منتهی در دسته‌بندی کلی ما قرار نمی‌گیرند.

شکل (1-1) این 4 خانواده را نشان می‌دهد:



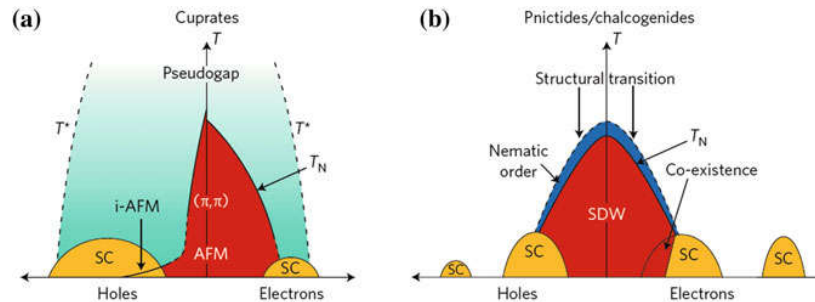
شکل (1-1): 4 خانواده مختلف ابرساناهای برپایه آهن. (کوردیوک، 2013)

#### 4-1- دیاگرام فاز ابرساناهای برپایه آهن

دیاگرام فاز نموداری است که در آن دما را برحسب میزان آلیش و یا موارد دیگر برای مواد مورد علاقه نشان می‌دهد. در مورد ابرساناهای برپایه آهن، آلیش شیمیایی یا فشار خارجی بر روی ترکیبات مادر برای بدست آوردن ابرسانایی ضروری است. مطالعه روی دیاگرام فاز مربوطه برای فهم احتمالی

مکانیسم ابررسانایی مفید است و محققین را در نواحی مختلف دیاگرام فاز راهنمایی می‌کند. (چارنوخوا،

(2014)



شکل (1-2): مقایسه دیاگرام فاز دو نوع ابررسانای دمای بالا. (چارنوخوا، 2014)

شکل (1-2) مقیاسه‌ای از دیاگرام فاز ابررساناهای برپایه آهن و مسی را نمایش می‌دهد که توجه به آن چند نکته را به ما می‌رساند. اول این‌که سه نوع فاز در هر یک از دو شکل وجود دارد که عبارتند از 1- فاز نرمال 2- فاز ابررسانایی و 3- فاز آنتی فرومغناطیسی (AFM)

محور سمت راست آلایش الکترون‌ها و محور چپ آلایش حفره‌ها، هم‌چنین محور عمودی دما را برحسب کلونین نمایش می‌دهد. فاصله‌ی بین گذار ساختاری که در دمای  $T_s$  اتفاق می‌افتد و گذار آنتی فرومغناطیسی که در دمای  $T_N$  اتفاق می‌افتد، و به دمای نیل مشهور است، را ناحیه شبه‌گاف می‌گویند. دمای گذار ساختاری دمایی است که در آن ابررسانا به دلیل فشار یا آلایش از تتراگونال<sup>4</sup> به اورتورومبیک<sup>5</sup> تغییر شکل می‌یابد. و نهایتاً موضوع دوم در مورد ابررساناهای آهنی مواد مادر فلز هستند و نمایش آنتی فرومغناطیسی دارند، با آلایش الکترون‌ها یا حفره‌ها هر دو گذار آنتی فرومغناطیسی و ساختاری به‌طور پیوسته‌ای متوقف می‌شود و به فاز ابررسانایی می‌رسیم؛ با این وجود، حالت آنتی فرومغناطیسی کاملاً از بین نمی‌رود و حالت‌های هم‌زمان ابررسانایی و آنتی فرومغناطیسی به وجود می‌آید، که به آن هم‌زیستی یا رقابت ابررسانایی و مغناطیسی می‌گویند. در مسی‌ها مواد مادر عایق‌های مات (Mott) هستند و برخلاف آهنی‌ها این بار بعد از فرونشانی کامل هم‌بستگی آنتی فرومغناطیسی این ترکیبات ابررسانا می‌شوند.

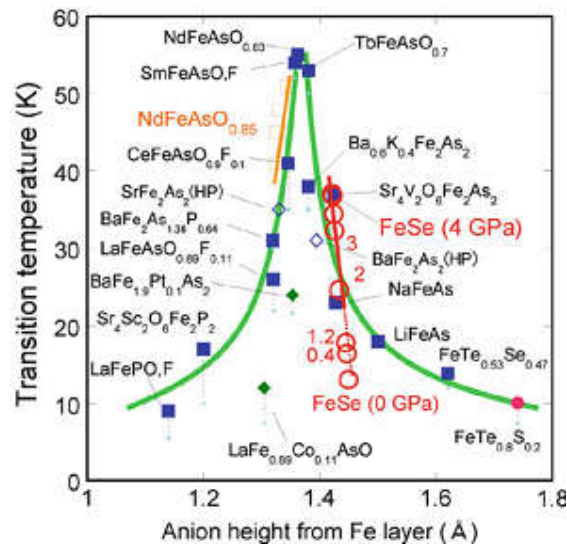
Tetragonal<sup>4</sup>  
Ortorhombic<sup>5</sup>

## 5-1- جذابیت ابرساناهای آهنی

دو دلیل عمده برای جذاب بودن این نوع ابرساناها برای تحقیق و مطالعه وجود دارد. 1- هم-زیستی ابرسانایی و مغناطیس، این در حالی است که در مورد ابرساناهای متعارف ابرسانایی متناظر با حالت دیامغناطیس است، یعنی طرد کامل شار مغناطیسی از درون ماده (اثر مایسنر). 2 - وجود تنوع زیادی از ترکیبات آن‌ها و ساختار الکترونی چند بانده‌شان.

خواص بالا این امید را به ما می‌دهد که سرانجام مکانیسم و سازوکار ابرسانایی دمای بالا را کشف و راهی برای افزایش دمای بحرانی و یافتن ترکیبات جدید پیدا کنیم. هم‌چنان که از ابرسانایی متعارف می‌دانیم سازوکار آن‌ها برهم‌کنش الکترون - فونون است ولی در مورد دمای بالا این مکانیسم هنوز کشف نشده است. این ترکیبات میدان بحرانی،  $H_c$ ، خیلی بزرگ‌تری از کوپرات‌ها و جریان‌های بحرانی همسانگرد بزرگ دارند. آن‌ها برای نیروی الکتریکی و کاربردهای مغناطیسی جذاب هستند، در حالی که هم‌زیستی ابرسانایی و مغناطیس آن‌ها را برای الکترونیک اسپینی علاقه‌مند می‌کند.

موضوع مهم دیگر رابطه‌ی بین ساختار و ابررسانایی است. با خلاصه کردن داده‌های کثیری درباره‌ی ساختار بلور و دمای بحرانی برای ابررساناهای برپایه آهن، محققین رابطه خاصی بین پارامترهای ساختار و Tc کشف کردند. یکی از بارزترین رابطه‌ی نوعی بین ارتفاع آنیون (در مورد As,P,Se,Te) از لایه آهن و دمای بحرانی است. ارتفاع به نوع آنیون وابسته است، در تبدیل از FeP,FeAs,FeSe به FeTe ارتفاع افزایش می‌یابد. در شکل (3-1) دمای گذار برحسب ارتفاع آنیون از لایه آهن رسم شده است.



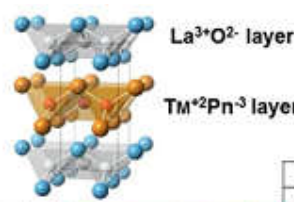
شکل (3-1): رابطه‌ی دمای گذار و ساختار. (جانسون و همکاران، 2015)

به دلیل ارتفاع نسبتاً کوتاه در ابررساناهای برپایه FeP، دمای بحرانی‌شان معمولاً کمتر از دمای بحرانی برای برپایه FeAs هستند. برای مثال در فازهای LA1111، چون عنصر فسفر با آرسناید جایگزین شده، Tc به طور شگفت‌آوری از 7 به 26 کلوین، مطابق با افزایش ارتفاع، افزایش یافته است. برای فاز 1111 برپایه FeAs نیز تعویض‌های Nd, Sm با La ارتفاع را به حدود 1/38 انگستروم افزایش می‌دهد. دمای بحرانی به طور ناگهانی از 26 کلوین به 56 کلوین افزایش می‌یابد و به یک بیشینه‌ای در بین ابررساناهای برپایه آهن می‌رسد، بعد از عبور از این بیشینه، دمای بحرانی ترکیباتی از قبیل TbFeAsO<sub>0.7</sub>، Ba<sub>0.6</sub>K<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>، و .... با افزایش ارتفاع‌شان در تبدیل به ماده‌ی دیگر، کاهش می‌یابد. (جانسون و همکاران، 2015)

به‌عنوان یک نتیجه، وابستگی بیشتر دمای بحرانی به ارتفاع به‌نظر می‌رسد برای 111 و 122 و 111 و 11 فراگیر باشد، با وجود این برای داده 42622 کمی انحراف از منحنی وجود دارد. برخی استثنائات وجود دارد که ممکن است حاکی از وجود برخی اصول فیزیکی جدید در ابررساناهای برپایه FeSe در مقایسه با ابررساناهای برپایه FeAs باشد.

## 6-1- جزئیات الکترومغناطیسی LaTmPnO

وقتی یک آنیون گروه 6 با بار 2- در LaCuOCH (همان گروه 6 است) با یک آنیون گروه 5 با بار 3- جایگزین می‌شود،  $Cu^+$  با ترکیب الکترونی  $3d^{10}$  می‌تواند با گذار کاتیون فلزی Tm (فلز انتقال) با بار 2+ تعویض شده باشد. برخی از ترکیبات فلز داخلی بین Tm و Pn (گروه 5) وجود دارند که خواص مغناطیسی متفاوت دارند. بنابراین انتظار داشتیم که نقش خواص الکترومغناطیسی از ساختار الکترونی دو بعدی TmPn در ترکیب LaTmPnO افزایش پیدا کنند، این انگیزه‌ای بود که تحقیقات روی این سری از مواد را شروع کنیم. شکل (4-1) جزئیات الکترومغناطیسی LaTmPnO که به مرور زمان به‌دست آمده را نشان می‌دهد.



H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					

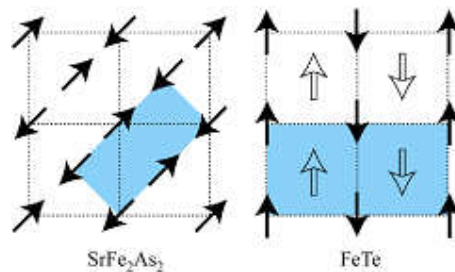
$TM^{2+}$ (electron configuration)	Mn(3d <sup>5</sup> )		Fe(3d <sup>6</sup> )		Co(3d <sup>7</sup> )		Ni(3d <sup>8</sup> )		(Cu)	Zn(3d <sup>10</sup> )	
<b>Pn</b>	<b>P</b>	<b>As</b>	<b>P</b>	<b>As</b>	<b>P</b>	<b>As</b>	<b>P</b>	<b>As</b>		<b>P</b>	<b>As</b>
Elect. Prop.	Mott Insulator		Superconductor		Metal		Superconductor			Semiconductor	
Magnetism	AF				FM					Non-magnetic	
$E_g$	~1 eV		-		-		-			~1.5 eV	
$T_C$ (SC) $T_{NC}$ (Mag.)	> 400 K		Undoped: 4 K	F-doped: 26 K	43 K	66 K	Undoped: 3 K	Undoped: 2.4 K		-	
Ref.	Yanagi et al. IAP (2009)		Kamihara et al. JACS (2008), Kamihara et al. JACS (2008)		Yanagi et al. PRB (2008)		Watanabe et al. IC (2007), Watanabe et al. JSSC (2007)			Koyanuma et al. PRB (2007), Koyanuma et al. ISF (2008)	

شکل (4-1): گذار فلزی 3d فلز انتقال و PN=P, As (جانسون و همکاران، 2015)

واضح است که جزئیات الکترومغناطیسی به طور موثری با تعداد الکترون 3d در Tm به صورت، آنتی فرومغناطیس نیمه رساناها برای Mn، فرو مغناطیس فلزات برای Co و فلز پارامغناطیس اما ابررسانا در دماهای کم برای Ni، تغییر می کند. وقتی Tm=Fe است، بین سیستم فسفر و آرسناید وضعیت کاملا متفاوت است، LaFePO یک فلز پارامغناطیس است و گذار ابررسانایی در 4 کلوین را نشان می دهد، این رفتار تقریبا با LaNiOCH یکسان است. از سوی دیگر، LaFeAsO وابستگی دمایی منحصر بفردی را نمایش می دهد این ترکیب یک فلز پارامغناطیس پائولی در دماهای بزرگ است، اما وقتی دما کاهش می یابد یک کاهش ناگهانی در مقاومت و پذیرفتاری مغناطیسی حول 160 کلوین اتفاق می افتد، به یک کمینه می رسد و بعد افزایش می یابد. سیستم Tm با تعداد الکترون های فرد 3d، نظم اسپینی بلندبرد دارد و ابررسانایی را نمایش نمی دهد در حالی که سیستم Tm با تعداد الکترون های زوج یک فلز پارامغناطیس پائولی است و ابررسانایی را نمایش می دهد.

## 7-1- نظم مغناطیسی

تقریبا همه ترکیبات مادر یک موج اسپینی آنتی فرومغناطیسی زیر دمای نیل با بردار موج دقیقا یکسان دارند، این مشابهت بیشتر پیکره بندی اسپین اتم های آهن در شکل (5-1) (قسمت چپ) نشان داده شده، این گفته محل مباحثات جدی برای اهمیت برهمکنش های اسپین های جای گزیده شده است.



شکل (5-1): نظم مغناطیسی در 11 و 122. (کوردیوک، 2013)

از تجربه دو استدلال موافق و مخالف روی این مسئله وجود دارد. موافق: وقتی سطح فرمی آشیانه ای واضح است (BFA) و دیگر ترکیبات خانواده 122 (NaFeAs) یک موج اسپینی وجود دارد، و وقتی

آشپانه ضعیف یا غایب است (BKFA ابررسانشی، BFCA و LiFeAs استوکیومتریک)، نظم مغناطیسی وجود ندارد. مخالف:  $Fe_{1+\gamma}Te$  نظم اسپینی مختلفی نشان می‌دهد (شکل (5-1) قسمت راست)، با وجود این توپولوژی سطح فرمی خیلی مشابهی با بقیه دارد. بنابراین ممکن است نتیجه بگیریم که مکانیسمی برای نظم مغناطیسی در FeAs هنوز واضح نیست اما چیزی که به طور سراسر است و همیشه مشاهده شده است، این است که نظم مغناطیسی همیشه مجاور با فاز ابررسانشی است و اغلب با آن هم-زیستی می‌کند. در مقایسه با کوپرات‌ها می‌بینیم که گشتاورهای مغناطیسی در آهن، راه - راه گونه (هم-تراز و هم‌ردیف در صفحه) ولی در کوپرات‌ها، بالا-پایین (Up-Down) هستند. در کوپرات‌ها، فاز مادر آنتی‌فرومغناطیسی عایق مات است که الکترون‌ها جای‌گزیده هستند، برای ابررساناهای آهنی فاز آنتی‌فرومغناطیسی فلزی باقی می‌ماند. (کوردیوک، 2013)

حال در مورد نظم مغناطیسی آهنی‌ها دو سوال مهم به ذهن خطور می‌نماید. اول این‌که آیا آن‌ها هم‌زیستی میکروسکوپیکی دارند؟ دوم این‌که آیا مغناطیس و ابررسانایی از الکترون‌های رسانش یکسانی استنتاج و به دست می‌آیند؟ موضوع دوم به مسئله "سیاری در مقابل جای‌گزیده" مربوط است و به طور مفصل در فصل سوم بحث خواهد شد. موضوع اول مربوط به همگنی نمونه است و در برخی نوشته‌ها به آن اشاره شده است، مخصوصاً، برای بلورهای BFCA، همگنی حالت ابررسانشی به وسیله‌ی تصویر مگنتواپتیک تا حد 2 میکرومتر و به وسیله‌ی  $NMR^1$  تا حد مقیاس زیر نانومتر اثبات شد. ترکیب دیگر 122، BKFA، ناهمگن شناخته شده و برخی تفکیک ناحیه‌های مغناطیسی و ابررسانشی روی مقیاس نانومتر یافت شده است. شواهد همگنی برای خانواده 245،  $K_{0.8}Fe_{1.6}Se_2$ ، گزارش شده اما به وسیله‌ی اندازه‌گیری مغناطیسی روی نمونه‌های مشابه تایید نشده است.

## 8-1- افت و خیزهای اسپین

ابرسانایی دمای بالا بدون شک یکی از مهم‌ترین موضوعات حل نشده در فیزیک ماده چگال مدرن است. مشخص کردن نقش افت و خیزهای اسپین برای ابرسانایی دمای بالا یکی از کلیدی‌ترین موضوعات است. دینامیک اسپین در ابرساناهای آهنی به‌طور مقدماتی به‌وسیله‌ی آزمایشات پراکندگی نوترون ناکشسان آشکار شده، و در برخی موارد به‌وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های تشدید مغناطیسی نوترون فرآهم شده است. در این ترکیبات تعریف‌های "ترکیب مادر" و "غیر آلاینده" نسبتاً به سراسری کوپرات‌ها نیست، این تنها دلیلی نیست که برخی ترکیبات "ناآلاینده" ابرسانایی یا جزئیات دیگری از نظم آنتی فرومغناطیسی نشان می‌دهد بلکه هم‌چنین از حقیقتی که قابل بحث است فیزیک مات (Mott) در کوپرات‌ها یک تصویر طبیعی از آرایش حفره‌ها یا الکترون‌ها به داخل آنتی فرومغناطیس هایزنبرگ کلاسیکی می‌دهد، در حالی که ریشه و اصل نظم آنتی فرومغناطیسی و اثر آرایش در ابرساناهای آهنی هنوز محل بحث است. با این حال ذکر سه نکته زیر ضروری به‌نظر می‌رسد.

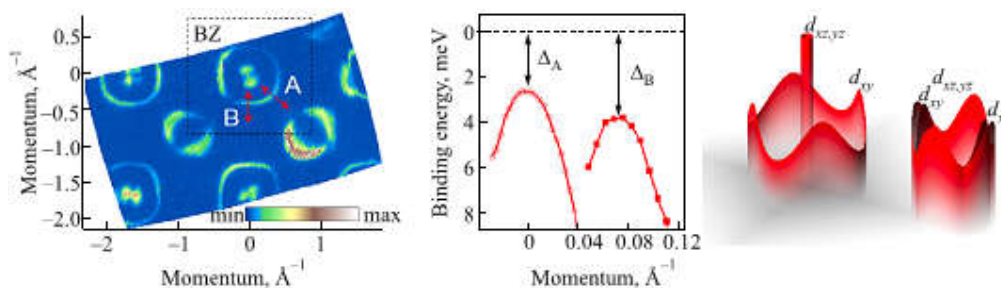
اول، هم‌بستگی بین وزن طیفی افت و خیزهای اسپین و ابرسانایی مشاهده شده است، حداقل در دو مورد (BFCA و  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ ) وقتی ترکیبات مادر دارای نظم آنتی فرومغناطیس‌گونه، به‌وسیله‌ی آرایش الکترون بیش از حد آلاینده شود، سطح فرمی آشیانه‌ای حفره و ابرسانایی باهم ناپدید می‌شوند. این موضوع با ایده‌ای که، افت و خیزهای اسپین به‌وسیله‌ی ساختار نواری الکترونی کاملاً تعریف شده‌اند و نقش مهمی در ابرسانایی بازی می‌کند، سازگار است. دوم، هم‌بستگی بین برانگیختگی‌های اسپین حالت بهنجار و ساختار الکترونی کشف شده است که در همه‌ی ابرساناهای آهنی مشترک است. سوم، یک "پیک تشدید" در طیف افت و خیز اسپین در برخی ترکیبات  $\text{FeSc}^7$  در حالت ابرسانایی، مشاهده شده و به‌وسیله‌ی برخی از نویسندگان به‌عنوان مدرک و دلیل تغییر علامت پارامتر نظم ابرسانایی قلمداد شده است. تشدید اسپین، تشدید در پذیرفتاری دینامیک اسپین، به‌وسیله‌ی واگرایی آن از طریق تغییر



علامت پارامتر نظم ابررسانشی روی قسمت‌های مختلف سطح فرمی اتفاق می‌افتد. برای مشخص کردن نقش آن در ابررسانایی توجه می‌کنیم که در کوپرات‌ها آن مربوط به "پیک تشدید" مشاهده شده در آزمایشات پراکندگی نوترون نا کشسان است، و به‌عنوان یکی از استدلال‌هایی برای تقارن  $d$ -wave گاف ابررسانشی در نظر گرفته می‌شود. در  $FeSc$ ، پیک تشدید بیشتر برای گاف  $S_{\pm}$  اعلام شده است، و به-راستی، پیک در طیف  $INS^8$  برای برخی از ترکیبات  $BKFA$ ،  $BFCA$ ،  $Fe_{1+y}Se_xTe_{1-x}$  و  $Rb_2Fe_2Se_5$  و غیره مشاهده شده است. به‌هرحال، باید این را هم بدانیم که پیک در پذیرفتاری دینامیکی تنها به‌وسیله‌ی تشدید اسپین به‌وجود نمی‌آید بلکه می‌تواند به پیک در پذیرفتاری برهنه (تابع لینهارد)، که، به‌عنوان نتیجه‌ای از خود هم‌بستگی تابع گرین الکترون است، مربوط شود. در مقام مقایسه اشاره می‌کنیم که در برخی از ارجاعات، نشان داده شده که ساختار گنبدی برجسته فقط بالای گاف طیفی، به‌وسیله‌ی منظور کردن به دام اندازی شبه ذرات در حالت ابررسانشی، ظاهر می‌شود. ساختار گنبدی نتیجه‌ی خیلی مشابهی با پیک تشدید در حالت  $S_{\pm}$  wave دارد، گرچه ارتفاع و وزن پیک در حالت بعدی خیلی بزرگ‌تر هستند. این نشان می‌دهد که به منظور حمایت سناریوی تغییر علامت، نه تنها حضور پیک در طیف  $INS$  ضروری است بلکه باید وزن طیفی آن نیز در نظر گرفته شود. به‌طور خلاصه طیف افت‌وخیز اسپین در  $FeSc$  در اولین نگاه با  $CuSc^9$ ، در جمله‌های ظاهر و هم‌بستگی با ساختار الکترونی مشابه است. اما این تفسیر به دقت و تلاش بیشتری نیاز دارد. ترکیب تحلیل‌های پراکندگی نوترون و اندازه‌گیری  $PE$  روی  $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$  ابررسانشی نشان داد که، در حالی که تشدید اسپین در بردار موج نامناسب سازگار با آشیانه اتفاق می‌افتد، هیچ یک از مدل‌های موج اسپینی و نه مدل‌های سطح فرمی آشیانه‌ای نمی‌توانند پاشندگی مغناطیسی را توصیف کنند. نویسندگان جفت‌شدگی اسپین و برهم‌کنش‌های اوربیتال را کلیدی برای توضیح این رفتار پیشنهاد می‌کنند. (کوردیوک، 2013)

## 9-1- مدل‌های جفت‌شدگی

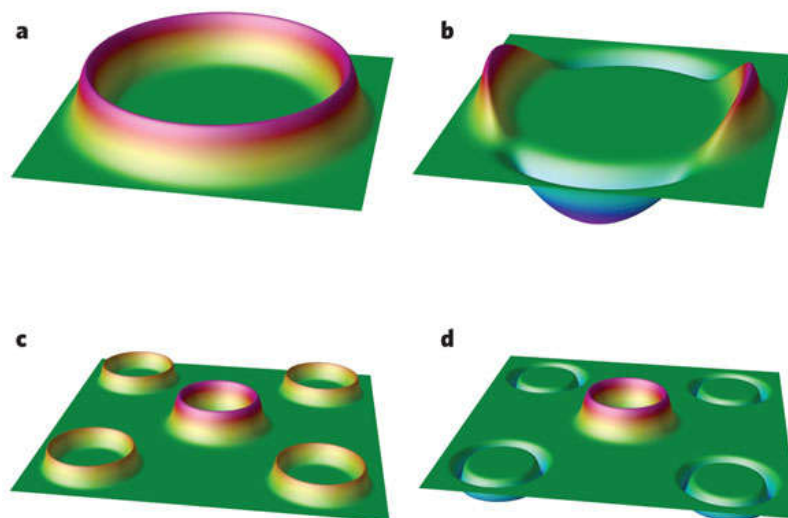
بر پایه مشابتهای دیاگرام فاز ابررساناهای آهنی و کوپرات‌ها، پیشنهاد شده که جفت‌شدگی در FeSc نیز توسط افت‌وخیزهای اسپین با تغییر علامت در پارامتر نظم ابررسانشی به میان می‌آید. سپس با دقت در هندسه سطح فرمی این نوع ابررساناها، می‌توان متوجه شد که تقارن تغییر علامت باید از تقارن d-wave کوپرات‌ها متفاوت باشد و می‌تواند به وسیله‌ی جفت‌شدگی S-wave تعمیم‌یافته با یک علامت معکوس پارامتر نظم بین آشیانه‌های مختلف سطح فرمی ارضا شود. امروزه بیشتر محققین اعتقاد دارند گاف، تقارن  $S_{\pm}$  دارد، این مورد حداقل در ابررساناهای اندکی آلایش یافته و نیز بهینه آلایش یافته صدق می‌کند. مطالعات کثیر ابررسانایی در FeScs اثبات می‌کند که فیزیک جفت‌شدگی می‌تواند از آن چیزی که فکر می‌شد به وسیله‌ی ماهیت چندباند / چنداوربیتال برانگیختگی‌های الکترونی کم انرژی، پیچیده‌تر شود. نتیجه مطلوب آن، این است که در هر دو خانواده ابررسانا جفت‌شدن الکترون‌ها و تقارن گاف نتیجه‌ای از یک سازوکار غیر بدیهی بین تبادل افت‌وخیز اسپین و دافعه کولمبی است. داده تجربی روی ابررسانایی رفتار خیلی غنی را نشان می‌دهد، ساختارهای گاف ابررسانشی با تغییر اساسی از خانواده‌ای به خانواده دیگر و حتی داخل خانواده‌ها به عنوان تابعی از آلایش یا فشار ظاهر می‌شود. هم‌چنین استدلال شده که حضور ناحیه هم‌زیستی ابررسانشی و مغناطیس طرح‌دار (راه - راه گونه) در این ترکیبات اثر انگشتی از گاف  $S_{\pm}$  است، زیرا یک گذار مرتبه اول بین یک مغناطیس خالص و ابررسانشی خالص، برای گاف  $S_{++}$  خیلی بیشتر محتمل است. از سوی دیگر چندین استدلال متضادی که از ARPES می‌آید، وجود مدرک جفت‌شدگی قوی الکترون - فونون در LiFeAs است، که برای توافق با مدل‌های  $S_{\pm}$  مشکل است اما می‌تواند با مدل‌های  $S_{++}$  بر پایه افت‌وخیزهای اوربیتال که به وسیله‌ی فونون‌ها کمک شده، وفق داده شود. شکل (6-1) تقارن گاف در LiFeAs را نشان می‌دهد.



شکل (1-6): سطح فرمی تجربی (سمت چپ)، پاشندگی‌های تجربی در طول برش‌های A و B (وسط)،

توزیع اندازه گاف ابررسانایی روی سطح فرمی (راست). (کوردیوک، 2013)

به‌طور کلی انواع مدل‌های جفت‌شدگی در ابررساناها از این قرار است: برای ابررساناهای متعارف پارامتر S-Wave است، برای ابررساناهای مسی d-Wave، برای ابررسانای  $MgB_2$  به‌صورت  $S_{++}$  است و نهایتاً برای ابررساناهای آهنی  $S_{\pm}$  می‌باشد. در شکل (1-7) این مدل‌ها نشان داده شده‌اند.



شکل (1-7): (a) پارامتر نظم S-Wave، (b) گاف d-Wave، (c) پارامتر نظم  $S_{++}$ ، (d) پارامتر نظم  $S_{\pm}$

(عظیم‌اف و همکاران، 2010)

Family name: <b>Eyvazi</b>	Name: <b>Asgar</b>
Title of Thesis: <b>Investigation of Iron-based Superconductors and Josephson Junctions with Multi-gap Superconductors.</b>	
Supervisor(s): <b>Dr. Mohammad Hamdipour</b>	
Graduate Degree <b>M.Sc.</b>	
Major: <b>Physics</b>	Specialty: <b>Solid State</b>
University: <b>Mohaghegh Ardabili</b>	Faculty: <b>Basic Science</b>
Graduation date: <b>2016/09/10</b>	Number of pages: <b>110</b>
<p>Abstract:</p> <p>Iron based superconductors are a class of unconventional superconductors which are divided to four distinct parent compounds. a superconducting layer exist in all of them which contain iron element (or <math>Fe^{2+}</math> ion). They have transition temperatures in the 26-56k interval. This superconductors are attractive. There are several good reasons why Fe superconductors are so interesting: First, contrary to the electron-phonon superconductors, with the Meissner diamagnetism in the iron-based superconductors, magnetism and superconductivity coexist or are competing each other. Second, they provide much wider variety of compounds for the research, and with their multi-band electronic structure, they offer the hope of finally discovering the mechanism of high temperature superconductivity and finding the way to increase of <math>T_c</math>. Having much higher critical magnetic field than cuprates and high isotropic critical currents, they are attractive for electrical power and the magnetic applications, while the coexistence of magnetism and superconductivity makes them interesting for spintronics. we will study the Josephson junction and Josephson current between iron-based superconductors, in which we introduce Hamiltonian models which are consist with our problem. Our steps will be derivation of the: Hamiltonian, grand canonical partition function, imaginary time operator, effective action, and effective Lagrangian. Finally, we obtain form the Lagrangian, the Euler–Lagrange equations which these equations, describe dynamic of the system under consideration</p>	
Keywords: Josephson Junction, High $T_c$ Superconductivity, Multi Gap Superconductivity, Iron Based Superconductivity.	



**University of Mohaghegh Ardabili**

**Faculty of Basic science**

**Department of Physics**

**Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
M.Sc. in Major of Physics Specialty of Solid State**

Title:

**Investigation of Iron-based Superconductors and Josephson Junctions  
with Multi-gap Superconductors**

Supervisor(s):

**Mohammad Hamdipour (Ph. D)**

By:

**Asgar Eyvazi**

**September – 2016**

