١٠٢٧١٨

دانشگاه زنجان

دانشکده علوم – گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته فیزیک گرایش حالت جامد

عنوان پایان نامه :

خواص مغناطیسی رادیکال های آزاد آلی با برهم کنش آنتی فرومغناطیسی

۱۳۸۷ /۷/ ۱۵

اساتید راهنما :

دکتر یوسفعلی عابدینی – دکتر جواد بداق جمالی

نگارنده : سمیه زارعی

۱۳۸۷ /۷/ ۱۵۱

تیر ۱۳۸۷

۱۰ ۲۷۱۸

دانشگاه زنجان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته فیزیک گرایش حالت جامد

عنوان پایان نامه :

خواص مغناطیسی رادیکال های آزاد آلی با برهم کنش آنتی فرومغناطیسی

اساتید راهنما :

دکتر یوسفعلی عابدینی

دکتر جواد بداق جمالی

نگارنده :

سمیه زارعی

تیر ۱۳۸۷

دانشگاه زنجان

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

شماره: ۶۵۱۳/د
تاریخ: ۵/۴/۸۷

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی‌عصر (عج) جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد
خانم **سمیه زارعی** رشته **فیزیک** گرایش **حالت جامد**
تحت عنوان : خواص مغناطیسی رادیکال های آزاد آلی با برهم کنش آنتی فرو مغناطیسی

در تاریخ ۸۷/۴/۵ با حضور هیأت محترم دوران در دانشگاه زنجان برگزارگردید و نظر هیأت داوران بشرح زیر می‌باشد:
قبول(با درجه :عالی امتیاز: ۱۹/۲۰) دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱- عالی(۲۰-۱۸)
۲- بسیارخوب(۱۷/۹۹- ۱۶)
۳- خوب(۱۵/۹۹- ۱۴)
۴- قابل قبول(۱۳/۹۹- ۱۲)

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر یوسفعلی عابدینی	استادیار	
۲- استادراهنمای دوم	دکتر جواد بداق جمالی	استادیار	
۳- استاد ممتحن داخلی	دکتر سیامک خادمی	استادیار	
۴- استاد ممتحن خارجی	دکتر سهیلا جوانمرد	استادیار	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد ابراهیمی	استادیار	

دانشگاه زنجان
دکتر محمدعلی اسم خانی
معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی
دانشکده علوم
۸۷/۴/۹

دانشگاه زنجان
دکتر نصرت الله رشدی
مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه
استعدادهای درخشان

تقدیم به پدر عزیز و

مادر فداکارم

که در نهایت دلسوزی همیشه و در همه حال پشتیبان من بودند و این امنیت آغوششان بود که پیشرفت مرا در زندگی موجب شد .

قدردانی و تشکر

سپاس خداوند مهربان را که دیگر بار مرا در مسیر یادگیری دانش قرار داد.

از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر جمالی که همواره از نظر علمی و فکری راهنما و پشوانه من بودند و زحمات بسیاری متحمل شدند سپاسگذارم.

از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر عابدینی به خاطر دلسوزی ها و زحماتشان سپاسگذارم.

از داوران گرامی جناب آقای دکتر خادمی و سرکار خانم دکتر جوانمرد که زحمت مطالعه و داوری پایان نامه را قبول نمودند سپاسگذارم.

چکیده

سیستم های رادیکال آزاد آلی با اسپین توزیع شده روی تمام اتم ها (اسپین غیرمتمرکز) ، بخاطر وجود الکترون جفت نشده در ساختارشان دارای خاصیت مغناطیسی بوده و می توان تنوعی از رفتارهای مغناطیسی را بصورت آنتی فرومغناطیس (AFM) ، فرومغناطیس (FM) ، اسپین – پایرلز، فری مغناطیس و پارامغناطیس بعلت تنوع آرایش اسپینی در مولکولها مشاهده نمود. هامیلتونی اسپینی منطبق شده برای برهم کنش تبادلی در این سیستم ها ازنوع هامیلتونی تبادلی هایزنبرگ است. برای بررسی این رفتارهای مغناطیسی ، اندازه گیری های پذیرفتاری مغناطیسی روی نمونه های پودری و کریستالی این رادیکال ها لازم است که برای این تحقیق از نتایج بدست آمده در آزمایشگاه های دمای پایین دانشگاه کیوشو ژاپن استفاده شده است.

براساس این نتایج در سیستم های رادیکالی از طریق رسم منحنی های پذیرفتاری مغناطیسی برحسب دما از دماهای بسیار پایین در حدود 4K تا دماهای بالا در حدود 300K و مطابقت این رفتارهای مغناطیسی مشاهده شده با مدل های نظری موجود می توان نوع برهم کنش تبادلی موجود بین اسپین ها را تشخیص داد که این برهم کنش تبادلی در اغلب موارد بصورت AFM و یا FM می باشد. البته در بعضی از این سیستم ها می توان رفتارهای مغناطیسی خاصی را مثلا بصورت اسپین – پایرلز و یا فرومغناطیس ضعیف مشاهده نمود. درضمن با استفاده از این اندازه گیری ها تأثیر ناخالصی های غیرمغناطیسی روی این سیستم های رادیکالی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

فهرست

عنوان **صفحه**

چکیده ..... پنج

مقدمه ..... نه

۱ اصول و مبانی رفتارمغناطیسی مواد

۱.۱ مقدمه ۱

۲.۱ منشأ مغناطیس در ماده ۲

۱.۲.۱ مقادیر گشتاورهای مغناطیسی اتمی ۵

۳.۱ خواص مغناطیسی جامدات ۵

۱.۳.۱ دیامغناطیس و پارامغناطیس ۶

۲.۳.۱ محاسبه مغناطیدگی بعنوان تابعی از دما ۸

۳.۳.۱ فرومغناطیس ۱۱

۴.۳.۱ منشأ فیزیکی مواد فرومغناطیس ۱۲

۵.۳.۱ فری مغناطیس و آنتی فرومغناطیس ۱۴

۴.۱ پسماند مغناطیسی ۱۷

۵.۱ وابستگی دمایی مواد مغناطیسی ۱۹

عنوان | صفحه

۲ برهم کنش های مغناطیسی در جامدات

۱.۲ مقدمه..... ۲۲

۲.۲ برهم کنش ها و جفت شدگی های مغناطیسی..... ۲۳

۱.۲.۲ جفت شدگی میدان مغناطیسی در راستای محور zها..... ۲۳

۲.۲.۲ برهم کنش اتصالی..... ۲٤

۳.۲.۲ جفت شدگی اسپین الکترونی با میدان های مغناطیسی داخلی و خارجی.... ۲۵

٤.۲.۲ برهم کنش تبادلی الکترونی..... ۲۷

۳.۲ هامیلتونی هایزنبرگ..... ۲۸

۳ روش های تجربی پژوهش در خواص مغناطیسی جامدات

۱.۳ مقدمه..... ۳۵

۲.۳ تأمین داده های موردنیاز تحقیق ازطریق آزمایش های تجربی..... ۳٦

۱.۲.۳ اندازه گیری های مغناطیسی انجام شده..... ۳۸

۳.۳ انواع روش های اندازه گیری مغناطیسی..... ٤۰

۱.۳.۳ روش مغناطوسنجی SQUID..... ٤۱

۲.۳.۳ تکنیک های مغناطوسنجی AC و DC..... ٦۱

۳.۳.۳ تکنیک تشدید پارامغناطیسی الکترون (EPR)..... ۷۳

عنوان	صفحه

۴.۳.۳ تکنیک پراش سنجی نوترونی..... ۸۲

٤ رفتار مغناطیسی رادیکال های آزاد آلی

۱.٤ مقدمه..... ۱۰۰

۲.٤ رادیکال های آزاد آلی..... ۱۰۲

۳.٤ رادیکال های وردازیل..... ۱۰٤

٤.٤ خواص مغناطیسی رادیکال ها..... ۱۰۷

٥.٤ ساختار الکترونی رادیکال های وردازیل..... ۱۱۰

٦.٤ تحلیل داده های آزمایشگاهی..... ۱۱۲

۱.٦.٤ سیستم های Spin – Peierls..... ۱۱۸

۲.٦.٤ تأثیر ناخالصی های غیرمغناطیسی روی سیستم های رادیکالی..... ۱۲۰

٥ شرح نتایج و جمع بندی

پیوست..... ۱۳٤

مراجع..... ۱٤۱

مقدمه

فیزیک حالت جامد به شاخه های بسیار متنوعی تقسیم می شود که در آنها به جنبه های گوناگونی از خواص مواد جامد پرداخته می شود. یکی از این شاخه ها مغناطیس است که دارای موقعیت بارز و شناخته شده ای می باشد.

علم مغناطیس از این مشاهده که برخی سنگها (سنگهایی که بطور طبیعی مغناطیده اند) مانند آهنرباها رفتار می کردند سرچشمه گرفت. وقتی یونانیان و چینیهای عهد باستان این سنگهای کمیاب را کشف کردند، آنها از توانایی این سنگها در جذب فلز از فاصله های کم در تعجب بودند. خیلی بعد آنها یاد گرفتند که از این سنگهای مغناطیسی در قطب نما برای تعیین جهت استفاده کنند[۲]. امروزه آهنرباها و مواد مغناطیسی همه جا حضور دارند. آنها را در VCR[۱]ها ، نوارهای صوتی، ATM[۲] و کارتهای اعتباری ، گوشی های صوتی و حتی در جوهری که برای چاپ اسکناس بکار می رود می توانیم ببینیم. مهمتر از این صنایع الکترونیکی جدیدی هستند که می شناسیم (شامل حوزه های موسیقی ، اطلاعات و ساخت حافظه های مغناطیسی) که نمی توانند بدون مواد مغناطیسی وجود داشته باشند.

تنوع خواص مغناطیسی در گونه های مختلفی از مواد نشان داده می شود و امکان تحقیقات تجربی گسترده ای را به تشابه موضوعات نظری فراهم می کند. برای اینکه ماده ای مغناطیسی باشد ، باید اتم های آن دارای گشتاور مغناطیسی باشند که گشتاور اتم آزاد معمولا دارای سه منشأ اساسی است: اسپین الکترون ها ، اندازه حرکت زاویه ای مداری الکترون ها به گرد هسته و

---

[۱] Video Casset Recorder

[۲] Automatic Teller Machine

تغییری که میدان مغناطیسی خارجی در گشتاور مداری القا می کند. (البته لازم به یادآوری است که هسته اتم هم دارای اسپین می باشد؛ اما چون هسته نسبت به الکترون دارای جرم بیشتری است هیچ سهمی در گشتاور مغناطیسی اتم ندارد.) اتم هایی که پوسته های الکترونی آنها پر است دارای گشتاورهای اسپینی و مداری صفر هستند: درواقع گشتاورهای مغناطیسی به پوسته های پر نشده مربوط می شوند.

آرایش متنوع اسپین ها در ماده بصورت اتم و یا یون تنوعی از رفتارهای مغناطیسی شامل پارامغناطیس، دیامغناطیس، فرومغناطیس، آنتی فرومغناطیس ، اثرمیزنر(دیامغناطیس کامل) و ..... را نمایش می دهند. در این بین سیستمی که دارای الکترون جفت نشده باشد بخوبی می تواند بیانگر نظم مغناطیسی باشد . ازجمله این سیستم ها ، سیستم های رادیکالی هستند که بارزترین مشخصه آنها وجود الکترون جفت نشده در ساختار مولکولی می باشد. در ترکیبات آلی گشتاورهای مغناطیسی از یک الکترون 2p جفت نشده در اربیتال مولکولی سرچشمه می گیرند و شامل سیستم های اسپینی جایگزیده و غیرجایگزیده می شوند[۲۳]. ازاین رو خواص مغناطیسی چنین ترکیباتی طبیعت منحصر به فردی را در مقایسه با مواد مغناطیسی معمولی نشان می دهند. بدلیل وجود الکترون جفت نشده در ساختار رادیکال آزاد آلی ، این ترکیبات ناپایدار می باشند اما دراین بین رادیکال هایی که دارای حلقه بنزن باشند بدلیل وجود رزونانس در ساختارشان ، پایداری آنها افزایش می یابد. ازجمله رادیکال های آزاد آلی پایدار ، رادیکال های وردازیل[۳] می باشند که شامل چهار هسته نیتروژن در یک حلقه بنزن می شوند. اما نکته بسیار مهم این می باشد که اسپین الکترون آزاد نه تنها دارای رزونانس (تشدید) برروی حلقه بنزن (دراینجا شامل چهار

[۳] Verdazyl

اتم نیتروژن) می باشد ، بلکه این اسپین برروی تمام اتم های رادیکال توزیع می شود. در بعضی اتم ها چگالی اسپین توزیع شده بالا بوده و در بعضی بسیار ضعیف می باشد و مهم تر اینکه علامت جهت گیری اسپین برروی همه اتم های یک رادیکال یکسان نبوده و بصورت مثبت و منفی (بالا و پایین) توزیع می شود.

یکی از نکات مهم در زمینه رفتارهای مغناطیسی مواد و برهم کنش های موجود در آنها این است که بزرگی برهم کنش مغناطیسی در مقایسه با بزرگی برهم کنش الکتروستاتیکی بسیار کوچک بوده و لذا عامل اصلی در برهم کنش های تبادلی بین اسپین ها از نوع الکتروستاتیک بین الکترون های همسایه می باشد [۲]. برهم کنش های تبادلی برای پی بردن به برهم کنش های مغناطیسی در جامدات دارای اهمیت اساسی می باشند که از برهم کنش الکتروستاتیکی و اصل طرد پائولی سرچشمه می گیرند.

در زمینه مطالعه خواص مغناطیسی مواد کارهای تجربی صورت گرفته در این زمینه از اهمیت بسیار ویژه ای برخوردار می باشند [۲۳]. البته آزمایشگاه های موردنیاز برای حاصل شدن این داده های تجربی باید دارای شرایط خاصی باشند ؛ ازجمله اینکه در این آزمایشگاه ها باید بتوان داده های مغناطیسی موردنیاز را در دماهای بسیار پایین حتی تا 4mK هم بدست آورد ؛ البته تعداد این آزمایشگاه ها در دنیا تا اندازه ای محدود هستند. ازجمله دستگاه های اندازه گیری مغناطیسی با دقت بسیار بالا ، مغناطیس سنج SQUID می باشد . چراکه این دستگاه قادر است در دماهای بسیار پایین تا دماهای بالا در حدود 300K با بهره گیری از حلقه های ابررسانا میدان های مغناطیسی را به کوچکی $10^{-15}T$ اندازه گیری کند.

در این تحقیق اندازه گیری خواص مغناطیسی مربوط به سیستم های رادیکالی مورد استفاده هم در دماهای بسیار پایین و هم در میدان های مغناطیسی قوی و ضعیف بااستفاده از این دستگاه در آزمایشگاه های دمای پایین دانشگاه کیوشو ژاپن انجام گرفته اند.

در تحقیقاتی که روی این رادیکال های وردازیل انجام گرفته ، نمونه پودری این رادیکال های آزاد بصورت خالص و آلاییده شده با ناخاصی های غیرمغناطیسی ، مورد استفاده قرار گرفته اند و پذیرفتاری مغناطیسی و مغناطیدگی از دمای اتاق ، 300K ، تا دمای 4K تحت میدان مغناطیسی 200G مورد اندازه گیری قرار گرفته اند. معمولا تحلیل رفتار مغناطیسی این رادیکال ها ازطریق داده های پذیرفتاری مغناطیسی برحسب دما صورت می گیرند و ازروی منحنی های بدست آمده مثلا می توان به نوع برهم کنش های موجود در این سیستم های رادیکالی بصورت آنتی فرومفناطیسی (AFM) ، فرومغناطیسی (FM) و فرومغناطیس ضعیف (WFM) ، پی برد. البته براساس مدل های تئوری موجود ، داده های تجربی مواد مورد تحلیل و برازش قرار گرفته و میزان بزرگی و نوع برهم کنش مغناطیسی بین اسپین های همسایه و غیر همسایه را تعیین می کنیم . در این مدل هامیلتونی برهم کنش تبادلی خطی هایزنبرگی (بصورت یکنواخت و نامتقارن) با داده های تجربی سازگاری و تطابق نشان داده است. درضمن ازطریق طرح های پراش اشعه — x اندازه گیری شده روی نمونه های پودری این رادیکال ها نیز می توان به تحلیل ساختارهای کریستالی این نمونه ها پرداخت.

این پایان نامه شامل پنج فصل می شود که در فصل های اول و دوم مباحث نظری مربوط به مغناطیس ارائه شده است. در فصل سوم به روش های تجربی در مغناطیس از جمله انواع روش

های اندازه گیری خواص مغناطیسی پرداخته شده است. در فصل چهارم که درواقع بخش اصلی پایان نامه را تشکیل می دهد براساس دانش کسب شده در طول تحقیق و شناخت حاصل شده از نحوه برهم کنش مواد مغناطیسی ، ما به تحلیل رفتار مغناطیسی این سیستم ها می پردازیم. در فصل پنجم هم به شرح نتایج حاصله از این تحقیق اشاره می شود. درخاتمه امید است این پژوهش قدمی هرچند کوچک در راستای توسعه علم مغناطیس در بین دانشجویان و محققین کشور باشد.

فصل اول

اصول و مبانی رفتار مغناطیسی مواد

۱.۱ مقدمه

در فیزیک حالت جامد ، مبحث مغناطیس موقعیت بارزی را دارا مـی باشـد . تنـوع خـواص مغناطیسی در گونه های مختلفی از مواد نشان داده می شود و امکان تحقیقات تجربی گسـترده ای را به تشابه موضوعات نظری فراهم می کنـد. ازسـوی دیگـر کاربردهـای عملـی مغنـاطیس دارای اهمیت تجاری و تکنیکی زیادی می باشند.

خواص مغناطیسی مواد از خواص اسپینی الکترون ها سرچشمه می گیرند چراکه هر الکترونی دارای خاصیت اسپین است. ازطرفی چون الکترون باردار بوده و دارای حرکـت مـی باشـد ، یـک میدان مغناطیسی را ایجاد می کند و این شبیه به ایجاد میدان مغناطیسی بوسیله جریان الکترونـی از یک سیم حلقه ای می باشد. درواقع این تغییر میـدان الکتریکـی اسـت کـه منجـر بـه یـک میـدان مغناطیسی می شود. آرایش متنوع اسپین ها در ماده بصـورت اتـم و یـا یـون تنـوعی از خـواص مغناطیســـی شـــامل پارامغنـــاطیس، دیامغنـــاطیس، فرومغنـــاطیس، آنتـــی فرومغنـــاطیس ، اثرمیزنر(دیامغناطیس کامل) و ..... را نمایش می دهند. اما درحالت کلی اغلـب مـواد هـیچ پاسـخ

بدیهی به یک میدان مغناطیسی اعمال شده ندارند و این بدین خاطر است که اربیتال های الکترونی اتم ها با جفت های الکترونی هریک با اسپین مخالف ،پر می شوند؛ به همین دلیل ترتیب الکترون ها در اربیتال های یکسان ، منجر به لغو گشتاورهای مغناطیسی می شوند. با توجه به موضوع پایان نامه که درخصوص خواص مغناطیسی رادیکال های آزاد می باشد ، در این فصل خواص مغناطیسی مواد مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرند.

۲.۱ منشأ مغناطیس در ماده

برای اینکه میدان مغناطیسی بر روی ماده ای تأثیر فوق العاده ای داشته باشد، باید حداقل یک گروه از اتم های داخل آن مانند آهنرباهای کوچک رفتار کنند؛ یعنی اینکه باید دارای گشتاور مغناطیسی باشند ؛ علاوه براین از نقطه نظر مغناطیسی توصیفی از یک ماده جامد شامل تعیین جهت گشتاور مغناطیسی در هر نقطه از شبکه می باشد که این جهت ممکن است از هر اتم به اتم دیگر تغییر کند[۱].

گشتاور مغناطیسی مربوط به ساختار الکترونی اتم بوده و می تواند بصورت زیر معرفی شود:

۱- یک الکترون چه بصورت آزاد یا مقید به یک اتم، دارای اسپین $\frac{1}{2}$ بوده و یک گشتاور زاویه ای ذاتی دارد که فقط شامل دو مقدار $\frac{\hbar}{2}$ و $-\frac{\hbar}{2}$ می باشد ؛ که

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.054 \times 10^{-34}\ Js \quad . \qquad (1.1)$$

این گشتاور زاویه ای به الکترون یک گشتاور مغناطیسی می دهد که بزرگی آن به عنوان مگنتون بوهر[۱] شناخته می شود :

[۱] Bohr magneton

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.27 \times 10^{-24}\ Am^2 \quad . \qquad (۲.۱)$$

گشتاور مغناطیسی الکترون می تواند دو مقدار μ_B+ و μ_B- را بگیرد که وابسته به جهت الکترون است. البته برای هسته اتم هم می توان این گشتاور مغناطیسی را در نظر گرفت اما مقدار آن در مقایسه با گشتاور مغناطیسی الکترون (با توجه به بزرگ بودن جرم هسته های اتم در مقایسه با جرم الکترون) کوچک بوده و قابل صرفنظر کردن است.

۲- الکترون اتم از راه دیگری هم می تواند در گشتاور مغناطیسی اتم مشارکت داشته باشد. در حرکت الکترون بدور هسته ، الکترون یک میدان مغناطیسی خلق می کند . پس گشتاور مغناطیسی در اینجا وابسته به گشتاور زاویه ای اربیتالی الکترون است. گشتاور مغناطیسی برابر می شود با :

$$\mu = m\mu_B\ , \qquad (۳.۱)$$

که m عدد کوانتومی مغناطیسی است. البته این گشتاور مغناطیسی را می توان بصورت کلاسیکی هم محاسبه کرد: اگر فرض کنیم مداری که الکترون بدور آن در حال حرکت است بصورت دایره ای بوده و الکترون با جرم m_e در نقطه $\vec{R}$ در فضا قرار گرفته باشد و باسرعت υ بدور یک مرکز ثابت در حال حرکت باشد، دراینصورت گشتاور زاویه ای برابر می شود با:

$$J = \vec{R} \times m_e \vec{\upsilon} = m_e R \upsilon \hat{n}\ , \qquad (٤.۱)$$

که $\vec{R}$ شعاع مدار و $\hat{n}$ بردار عمود بر صفحه مدار است. الکترون چرخنده معادل با یک حلقه حامل جریان است که جریان آن برابر می شود با :

$$I = \frac{-e}{t} = \frac{-e}{\frac{2\pi R}{\upsilon}} = \frac{-e\upsilon}{2\pi R}\ . \qquad (۵.۱)$$

در اینصورت برای گشتاور مغناطیسی اتم داریم:

$$\mu = Is\,\hat{n} = -(\frac{e\upsilon}{2\pi R})\pi R^2\,\hat{n} = \frac{-1}{2}e\upsilon R\,\hat{n} \qquad (٦.١)$$

از طرفی می توان گشتاور مغناطیسی را بصورت زیر هم نوشت :

$$\mu = \frac{-e}{2m_e}m_e R\upsilon\,\hat{n} = \gamma J\ , \qquad (٧.١)$$

که کمیت γ نسبت ژیرومغناطیسی[٢] مربوط به الکترون است:

$$\gamma = \frac{-e}{2m_e}. \qquad (٨.١)$$

اگر $J = m\hbar$ دراینصورت :

$$\mu = -m(\frac{e\hbar}{2m_e}) = -m\mu_B\ . \qquad (٩.١)$$

بنابراین گشتاور مغناطیسی اربیتالی و اسپینی الکترون هر دو شامل کمیت بنیادی μ_B هستند.در واقع برای گشتاورهای اربیتالی و اسپینی می توان نوشت :

$$\mu = g\mu_B J/\hbar\ , \qquad (١٠.١)$$

عامل g برای سهم اربیتالی برابر با ١ و برای سهم اسپینی برابر با ٢ است.

بنابراین گشتاور مغناطیسی یک اتم بصورت مجموع دو اثر می باشد: یکی ناشی از حرکت مداری الکترون و دیگری ناشی از اسپین و در حالت کلی داریم :

$$\mu = g\mu_B J\ , \qquad (١١.١)$$

که g عامل g –لاندهٔ[٣] می باشد.اگر فقط گشتاورهای اسپینی سهیم باشند،g برابر با ٢ و اگر گشتاورهای اربیتالی سهیم باشند، g برابر با ١ بوده و اگر هردو سهیم باشند،g بین ١و٢ قرار می گیرد.

[٢] Gyromagnetic ratio

[٣] Lande g-factor

۱.۲.۱ مقادیر گشتاورهای مغناطیسی اتمی

برای اتم آزاد:

برطبق اصل پائولی فقط دو الکترون با اسپین های مخالف می توانند در یک اربیتال قرار گیرند. وقتی اربیتال پر باشد گشتاور زاویه ای کل ناشی از اسپین های الکترونی جفت نشده صفر است. بنابراین پوسته ای که بطور کامل پر شده باشد، هیچ سهمی در گشتاور مغناطیسی اتم ندارد. در یک اتم با الکترون های زیاد، اغلب الکترون ها در پوسته های کامل داخلی قرار گرفته اند و هیچ سهمی در گشتاور مغناطیسی ندارند. به همین خاطر است که اندازه گشتاورهای مغناطیسی اتمی همیشه دارای یک مقدار کوچکی برابر با یک عدد کوچک مگنتون بوهر می باشند.

برای اتم در یک جامد :

یون های تشکیل دهنده یک جامد دارای ابر الکترونی هستند که در اطراف هسته قرار گرفته اند و در پوسته ای که بطور کامل پر شده باشد، پایان می یابند. بنابراین اگر آنها دارای یک پوسته داخلی کاملا پر نشده باشند ، گشتاور مغناطیسی غیر صفر دارند.

۳.۱ خواص مغناطیسی جامدات

مواد مغناطیسی براساس نحوه پاسخ به میدان های مغناطیسی خارجی طبقه بندی می شوند بصورت : دیامغناطیس ، پارامغناطیس ، فرومغناطیس، فری مغناطیس و.....؛ دیامغناطیس خاصیتی مربوط به تمام مواد بوده و با میدان مغناطیسی اعمال شده مخالفت می کند اما این خاصیت بسیار