

# Challenges in separating of free electrons

آنالیزور اسپین ذاتی الکترون<sup>1</sup> Electron Intrinsic Spin Analyzer

Hosein Majlesi

## خلاصه طرح<sup>۲</sup>:

دستگاه اختراعی که آنالیزور اسپین ذاتی الکترون نامگذاری شده است به منظور بررسی و مطالعه اسپین الکترونهاي آزاد ساخته شده است. نظریه اسپین الکترون برای اولین بار توسط ساموئل گودشمیت و جورج اولنبرگ و ولفگانگ پائولی در سال 1920 بیان گردید. تقریباً از سال 1997 تا کنون در زمینه امکان مشاهده و جدا سازی عینی اسپین الکترونهاي آزاد (بکمک خود الکترونهاي آزاد) راهکارهای مختلفی در این زمینه پیشنهاد و منتشر شده است. به دلایل متعدد علمی (مثل جرم کم الکترونها و ....) کسی تا کنون نتوانسته بود راهکاری علمی و یا روشی فنی در عمل برای ساخت دستگاهی ارائه دهد که بتواند این پدیده را مستقیماً و بدون هیچ واسطه ای بکمک خود الکترونهاي آزاد مشاهده و جداسازی نمود. از نظر تئوری فیزیک غیر عملی تصور شده بود. در خصوص امکان رویت عینی آن بکمک خود الکترونهاي آزاد در عمل، هر چند که برخی از تئوری های مکانیک کوانتومی بکمک بسته موجها امکان مشاهده و جداسازی اسپین الکترونها را ممکن میدانست و برخی شبیه سازیها امکان مشاهده عینی این پدیده را پیشینی کرده است اما هرگز جداسازی و مشاهده اسپین ذاتی الکترونها بصورت عینی و مستقیماً بکمک خود الکترونهاي آزاد مشاهده و جداسازی نشده بود. منابع و مقالات متعدد زیادی در این زمینه موجود است.

<sup>1</sup> شماره اظهارنامه ثبت اختراع ایران: 139350140003006698 ، ثبت اختراع امریکا: US 62/246.629 ثبت اختراع بین المللی: PCT/IB2016/054596

نام مخترع: حسین مجلسی ، بشماره شناسنامه 2966 و کد ملی 2295627710 کد پستی (قم): 3716863914 شماره تماس: 09395232611 طبقه بندی بین المللی: H01J 1/32 H01J

[hoseinmajlesimail@gmail.com](mailto:hoseinmajlesimail@gmail.com) , [Physics@hosein-Majlesi.id.ir](mailto:Physics@hosein-Majlesi.id.ir) , Phone: +98 (0)9395232611

لینک اختراع ثبت شده ایران: <http://ip.ssaa.ir/Patent/SearchResult.aspx?DecNo=139350140003006698&RN=84973>

<sup>2</sup> This present paper studied about the challenge in separating of free electrons and history of experiment in Persian language, This present paper is only for Persian readers that want to know more information about the history of experiment and challenges in the theory and experiment by free electrons.

## دستاوردهای ویژه، کاربرد، نتایج و اهمیت طرح:

مشاهده پدیده جداسازی اسپین الکترونیهای آزاد<sup>3</sup> که خاصیت کوانتومی ذرات ریزی مثل الکترون است، از نظر تئوری فیزیک غیر عملی و محال تصور شده بود و هرگز جداسازی و مشاهده اسپین ذاتی الکترونها بصورت عینی و مستقیماً بکمک خود الکترونها آزاد مشاهده و جداسازی نشده بود هرچند که در این خصوص برخی از شبیه سازیها و محاسبات روئیت آنرا کاملاً غیر ممکن نمیدانست اما عملاً هیچ مشاهده ای تجربی از جداسازی الکترونها آزاد و غیر مقید صورت نپذیرفت، این دستگاه جزء ابزارهای علمی و آزمایشگاهی پیشرفته محسوب میشود این اهمیت را میتوان به روشنی در حوضه های فیزیک و فیزیک کوانتومی و خصوصاً در بحث کامپیوتر کوانتومی که نقش تعیین کننده و اساسی دارد، یا ارتباطات کوانتومی یافت. تنها دستگاههای موجود در دنیا که جزء پیشرفته ترین تکنولوژیها محسوب میشوند و در اختیار محدود کشورهای دنیا است تنها قادر هستند جداسازی اسپین اتمهای آزاد را نشان دهند یا اسپین الکترونها مقید به پتانسیلهای سطح نیمه رسانا را نشان دهند و هرگز قادر به جداسازی اسپین الکترونها آزاد در فضای آزاد و فاقد هیچ گونه قیدی نیستند

## نگاهی به تاریخچه و پیشینه مطالعاتی طرح:

نظریه اسپین الکترون برای اولین بار توسط ساموئل گودشمیت و جورج اولنبرگ و ولفگانگ پائولی در سال 1920 بیان گردید ایشان اظهار داشتند که یک اندازه حرکت زاویه ای ذاتی، کاملاً مستقل از اندازه حرکت زاویه ای مداری، به هر الکترون وابسته است. این اندازه حرکت ذاتی، اسپین الکترون نامیده می شود. [1,2] اسپین از خاصیت های بنیادی ذرات زیراتمی در نظر گرفته میشود که معادل کلاسیک ندارد و یک خاصیت کوانتومی بشمار می آید. برای توصیف حرکت اسپینی الکترون یک گشتاور مغناطیسی در نظر گرفته می شود، چنانچه یک الکترون، با گشتاور مغناطیسی دائمی خود، در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، انتظار می رود که اسپین آن کوانتیده فضایی باشد، یعنی گشتاور مغناطیسی اسپینی و اندازه حرکت زاویه ای اسپینی به سمت گیری های خاصی محدود خواهند بود. برای الکترون تنها دو حالت اسپینی متصوریم. بطور کلی رابطه ی گشتاور مغناطیسی الکترون بصورت  $\mu = \frac{eg}{2m} S$  بیان می گردد، که در آن  $e$  بار الکترون و  $g$  نسبت ژيرو مغناطیس و  $m$  جرم الکترون و  $S$  اپراتور اسپین الکترون است. به عبارت ثابت موجود در گشتاور مغناطیسی الکترون، ثابت مگنتون بوهر می گویند. هنگامی که الکترونها در مقابل یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت قرار می گیرند نیرویی از طرف میدان به آنها وارد میشود. این نیرو بکمک گرادیان انرژی پتانسیل وارد میشود.

<sup>3</sup> در تئوری فیزیک کلاسیک و کوانتوم چالش اصلی جداسازی خاصیت کوانتومی ذرات ریز بدون هیچگونه قیدی اعم از الکترونها در قید اتمها یا پتانسیلهای سطحی در حدود یک قرن با چالش مواجه بود و بر این اساس تئوری احتمالات در مکانیک کوانتومی نیز شکل گرفت، بر اساس مبانی تئوریک و تاریخی از زمان مطرح شدن تئوری اسپین و چالش آن با بررسی ذرات ریزتر از اتمها گامهای اولیه ساخت آزمایشگاههای بزرگی چون سرن شکل گرفت تا بتوانند با برخورد ذرات ریزتر و خواص کوانتومی آنها را بررسی کنند، امید است طرح حاضر گام نوینی در این زمینه شناخت و مطالعه ذرات ریزتر با استفاده از روشهای بکار رفته ایجاد نماید.

$$F = -\nabla U = -\nabla(\mu \cdot B) ; U = \mu \cdot B ; \mu = \frac{eg}{2m} S ; \mu = 0.927 \times 10^{-23} \text{ amp} \cdot \text{m}^2$$

در سال 1921-1922 اتو اشترن پیشنهاد نمود که ممانهای دو قطبی مغناطیسی مربوط به اتمهای مختلف از طریق آشکار سازی میزان انحراف باریکه اتمی آنها در یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت اندازه گیری شوند.[3] وی پیش از این و در طی دو سال دستیاری انیشتین توانسته بود تکنیک استفاده از پرتوهای اتمی و مولکولی را بنحو چشمگیری بسط و گسترش دهد. همین موضوع موجب شد تا او بتواند با همکاری گزلاخ آزمایشی را پی ریزی نماید و اتمهای نقره را در کوره ای که در شرایط خلاء قرار داشت بخار نموده و با گذشت زمان آنها را از میدان مغناطیسی غیر یکنواخت عبور داده و بر روی پرده ثبت کنند، در واقع اثر اسپین الکترون در اتمهای نقره، مربوط به اثر اسپین الکترون آخرین مدار اتم میباشد و از اثر هسته و سایر الکترونها صرفه نظر میشود. بدلیل بکار بردن اتمها در آزمایش اشترن گزلاخ اثر نیروی لورنس تا حدود زیادی مهار گردیده است. بوهر، پائولی و مات بر این فکر بودند که با توجه به ضریب مگنتون بوهر در مقایسه با گرادیان میدان مغناطیسی امکان روئیت چنین پدیده ای در عمل وجود نخواهد داشت و عدم امکان روئیت اسپینهای الکترونهای آزاد یک اصل کلی است و هرگز نمیتوان این آزمایش را با مفاهیم کلاسیکی مسیر بیان نمود. [4,5,6] بوهر و پائولی چنین اظهار نمودند که:[7]

" این غیر ممکن است که اسپین الکترون بصورتی کاملاً مجزا از تکانه مداری بر اساس مفاهیم مسیر ذره کلاسیکی،

مشاهده شود."

*" it is impossible to observe the spin of the electron, separated fully from its orbital momentum, by means of experiments based on the concept of classical particle trajectories "*

در سال 1930 در ششمین کنفرانس سلوی بریلوئن طرحی را از یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت پیشنهاد داد در طرح او میدان مغناطیسی بطوری که میدان اولیه در امتداد مسیر پرتوها و متقارن بود و تفاوت فاحشی با هندسه ی دستگاه اشترن گزلاخ اصلی داشت. [8] بوهر و پائولی صریحاً با پیشنهاد بریلوئن مخالفت نمودند.[9] بوهر و پائولی به کمک تقریب شبه کلاسیک در مقالات مات و مازلی و کلمپر استناد نمودند و پیشنهاد بریلوئن را رد کردند.[10,11,12]. توجه داشته باشیم که نیروی لورنس در سیستم وجود دارد و قابل حذف نیست بله راستای آن با راستای نیروی اسپینی متفاوت می باشد. و حتماً نیروی لورنس از نیروی اسپینی بزرگتر است. بدلیل برهمکنش فضایی میدان مغناطیسی دو قطبی با تابع موج منتصب به الکترونها، اسپین الکترونها جدا میشوند. بعبارت دیگر بدلیل محدود بودن پهنای پرتوها، پرتوها هنگامی که تحت تاثیر نیروی لورنس قرار میگیرند انحرافی به سمت چپ یا راست خواهند یافت و نیروی اسپینی نیز موجب جدا شدن پرتوها از هم می شود. ترکیب مکانیک نیوتونی و مکانیک کوانتومی در این مورد هرگونه استدلالی را همراه با تردید می کند. پائولی با تعصب بر این عقیده که هرگز اسپین الکترونها را نمیتوان در عمل دید بود ولی بوهر با احتیاط بیشتری برخورد کرد و حتی ایشان در این خصوص چنین گفت:[13]

"گاهی اوقات به مسئله قطبش الکترون می اندیشم و بعد متقاعد میشوم که قطبش آن ممکن است مشاهده پذیر باشد،

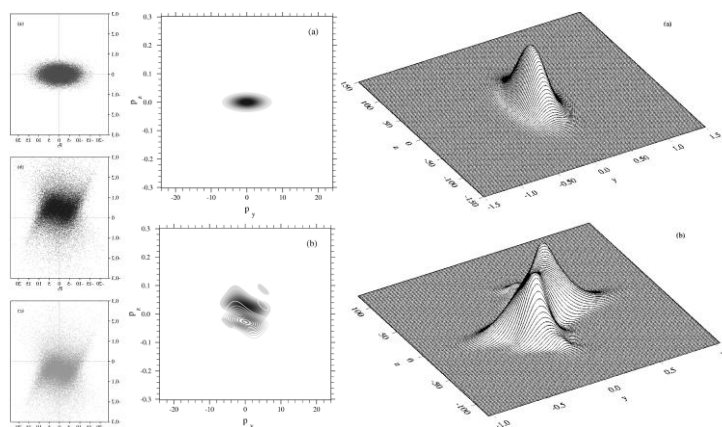
استدلال به ما میگوید .... راه حل تئوری کوانتوم هیچگاه به ما نتیجه مثبتی نخواهد داد"

*"I have sometimes thought of the problem of the realisation of the electron polarization, and after all I am quite prepared that such a polarization might be observable. [Our] argument tells ... not that the closer quantum-theoretical treatment will never give a positive effect".*

زمانی که بور و پائولی عدم امکان رویت آنرا بیان نمودند تقریباً اکثر دانشمندان فیزیک آنرا پذیرفته بودند تا اینکه دهملت و همکارانش در سال 1988 آزمایشی بحث برانگیز را انجام دادند و تکانه مغناطیسی یک الکترون را خارج از چهارچوب اتمی بدست آوردند که این برخلاف پیشینی های بور و پائولی بود. [14,15]. تا کنون سوالات زیادی در مورد امکان آزمایش پدیده اشترن گرلاخ با الکترونهاى آزاد مطرح شده است ، آیا واقعاً امکان اندازه گیری اسپین الکترون امکان پذیر است یا نه؟ مطالعات مختلفی در مورد چگونگی صرفه نظر کردن از نیروی لورنس صورت پذیرفته است که در این میان میتوان به شاخصترین آنها که همان پیشنهاد بریلوئن می باشد اشاره نمود. تحلیل کامل تئوری بسته موجها در کوانتوم نشان میدهد که این امر کاملاً امکان پذیر است. تقریباً از سال 1997 به بعد در زمینه امکان مشاهده عینی آن در عمل مقالات متعددی منتشر گردیده است. البته گرچه در آن زمان استدلالهای بوهر و پائولی منجر به سکوت فیزیکدانان بسیاری شد ولی توجه به این نکته ضروری و مهم است که می بایست حتماً نظرات بوهر و پائولی در این زمینه نیز برآورده شود. بعنوان مثال در سال 1997 باتلان و همکارانش طی مقاله ای به استدلال پائولی در رد پیشنهاد بریلوئن پرداخته و با توجه به تقریب نیمه کلاسیک رویت را امکان پذیر دانستند. [16] در سال 1998 رادرفورد و گروب با محاسبه عددی معادلات دیراک نشان دادند که اندازه گیری اسپین الکترونها سخت است ولی مشاهده آن امکان پذیر است. [17] استنهولم و گارای در سال 1999 بکمک تحلیل بسته های موج در مکانیک کوانتومی توانستند ثابت کنند که امکان رویت پدیده اشترن گرلاخ برای الکترونهاى آزاد وجود دارد. [18] در سال 2001 باتلان و گالوپ نشان دادند که با توجه به تقریب نیمه کلاسیک (WKB) جداشدگی اسپینها از هم امکان پذیر است. [19] در سال 2002 نیز باتلان طی مقاله ای مشاهده و ساخت عملی آزمایش اشترن گرلاخ را در عمل امکان پذیر دانست [20] و همچنین در سال 2013 نیز اسکوت مک گرگور و روگر بیچ و باتلان نیز در مقاله ای به راه حلی پیشنهادی در این زمینه با توجه به روش پیشنهادی بریلوئن پرداختند [21] ، این مطالعات علمی تا سال 2014 که نتایج تحقیقات اخیر حسین مجلسی بکمک دستگاه آنالیزور اسپین ذاتی انتشار پیدا کرد ادامه داشته است، امید است که نتایج تحقیقات اخیر گام مهمی در زمینه فیزیک کوانتومی و سایر مباحث علمی مرتبط با آن باشد،

## چالشها و مشکلاتی که طرح بر طرف میکند:

همانطور که پیش از این اشاره گردید این طرح یک مسئله و مشکل مسکوت مانده از اوایل شکل گیری تئوری اسپین را مورد بررسی و ارزیابی قرار میدهد، چالش ریاضی و فلسفی که در این خصوص وجود داشت مربوط به جرم بسیار ناچیز الکترونها آزاد و به طور کلی جرم بسیار کم این ذرات بود خصوصاً ذراتی که از نظر الکتریکی باردار هستند و بسیار تاثیر پذیر هستند، بر اساس تئوری فیزیک کلاسیک و الکترومغناطیس کلاسیک جرم بسیار کم الکترونها آزاد موجب میشود که سرعت الکترونها بسیار زیاد و غیر قابل بررسی باشد بنابراین با توجه به روابط فیزیک کلاسیک یاد شده جداسازی خاصیت کوانتومی ذرات ریزی همچون الکترونها در فضای آزاد و غیر مقید نیازمند گرادیان میدان مغناطیسی بالایی است و از آنجایی که محاسبات الکترومغناطیس کلاسیک در خصوص یک کوئل مغناطیسی ساده این مطلب را نشان میدهد که برای داشتن یک گرادیان میدان مغناطیسی نیاز به داشتن میدان مغناطیسی بالایی هستیم و این مسئله با توجه به وجود نیروی لورنس مغناطیسی غیر ممکن و محال تصور میشود دانشمندان سعی کردند تا ابتدا درستی نظریه اسپین را که برای ذرات مطرح شده بود را مورد آزمایش قرار دهند. در این راستا برای اولین بار اشترن و گراخ برای بررسی صحت تئوری اسپین، آزمایشی را طراحی کردند تا بتواند بکمک اتمهای آزاد این مسئله را بررسی کنند، ایشان برای اولین بار این کار را با اتمهای



1- شکل نمونه ای از شبیه سازیهای انجام شده را نشان میدهد.

خنثی نقره<sup>4</sup> انجام دادند، ایشان موفق به کسب جایزه نوبل فیزیک در این زمینه شدند. اما از آن به بعد کسی نتوانست آزمایش را برای الکترونها آزاد عملاً انجام دهد، البته در این زمینه همچنانکه بیان شد مطالعات زیادی صورت پذیرفت اما بیشتر یک کشمکش علمی بوده است تعدادی از دانشمندان بر این باور بودند که

اساساً محال است، اما برخی دیگر شبیه سازیهایی نیز

در این خصوص انجام دادند از جمله شاخص ترین این شبیه سازیها میتوان به شبیه سازی پروفیسور استنهولم اشاره کرد [18] در این شبیه سازیهای صورت گرفته نحوه جداسازی باریکه الکترونها با دقت زیادی صورت گرفته است.<sup>5</sup> اکثر محاسباتی که تاییدکننده امکان رویت پدیده جداسازی اسپین الکترونها آزاد است به کمک روش تقریب کوانتومی WKB یا همان تقریب بسته موجها در مکانیک کوانتومی است که این محاسبات مستقل از اینکه میدان مغناطیسی چه باشد یا چه گرادیان مغناطیسی موجب ایجاد پدیده مذکور شود

<sup>4</sup> اتم های خنثی چون اتمهای نقره در آخرین لایه خود الکترونها مقیدی دارند که تکانه خود را به تکانه اتمها متصل میکنند و اشترن و گراخ با توجه به این انتقال تکانه استدلال کردند که اگر برای اتمها که جرمی زیادتز از الکترونها آزاد و بدون قید دارند این مسئله صادق باشد بنابراین تئوری اسپین برای تمامی ذرات صحت دارد اما به هیچ عنوان نتوانستند راهکاری در این خصوص برای مشاهده جداسازی اسپین الکترونها آزاد ارائه دهند.

<sup>5</sup> این نتایج با نتایجی که در عمل بکمک دستگاه آنالیزور اسپین ذاتی الکترون مشاهده شده است تطابق زیادی وجود دارد.

تولید کند پیشبینی میشود. اما همچنان مسئله گرادیان میدان مغناطیسی یک باور اساسی تا کنون بشمار رفته است. به عنوان مثال یک الکترون آزاد را در نظر بگیرید که در یک اختلاف پتانسیل یک کیلو ولتی قرار گرفته است در این صورت تغییرات انرژی کل ذره بصورت  $E_{Total} = U + T$  بیان می شود با فرض صرفه نظر کردن از تغییرات انرژی، اتلافها و اثرات گرمایی انتظار است که تمامی انرژی پتانسیل الکتریکی به انرژی جنبشی تبدیل شود، بنابراین سرعت خطی الکترون بدست می آید.  $\left(\frac{e}{m_e}\right) \cong 1.75 \times 10^{11} \left[\frac{C}{Kg}\right]$  ;  $v_x \cong 10^7 \left[\frac{m}{s}\right]$  با توجه به نیروی لازم برای جداسازی اسپین الکترونها و زمان اندرکنش،  $F_s = \left(\frac{\mu_B}{m_e}\right) \cong 10^7 \left[\frac{J}{T.Kg}\right]$ ; در رابطه کلاسیکی جابجایی خواهیم داشت  $t = \frac{l}{v} [sec]$  و  $\Delta Z = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\mu_B}{m_e}\right)\nabla B\left(\frac{l}{v}\right)^2 [m]$  در نتیجه گرادیان میدان مغناطیسی بصورت ساده شده زیر بدست می آید:

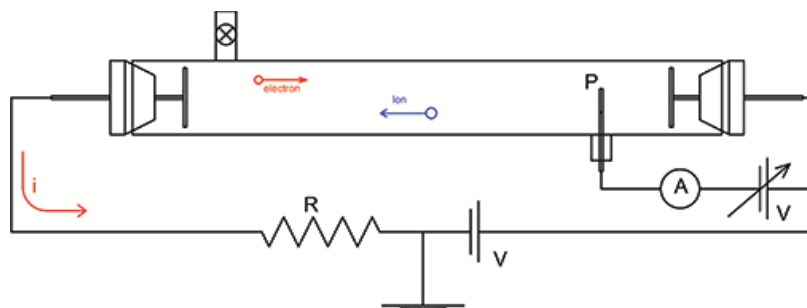
$$\nabla B = \frac{2 \times \Delta Z \times v^2}{10^7 \times l^2} \left[\frac{T}{m}\right] \quad \text{معادله (1)}$$

، حال مسئله را برای یک جداسازی اسپینی در مرتبه 1 میکرومتر تا 10 میکرومتر در نظر بگیرید، چرا که این میزان جداسازی در آزمایشگاه به سهولت امکان اندازه گیری و مشاهده را به کمک ابزارهای در دسترس را دارد. همچنین با فرض اینکه طول مگنتهای سازنده میدان مغناطیسی غیر یکنواخت در حدود 25 سانتیمتر باشد رابطه گرادیان میدان مغناطیسی بصورت

$\nabla B \approx \frac{2 \times 10^{-6}}{0.0625 \times 10^7} \times v^2 \left[\frac{T}{m}\right]$  با توجه به رنج مقادیر سرعت الکترونها آزاد که از روابط فیزیک کلاسیک پیشبینی می شود، برای ولتاژهای نسبتاً متوسط و معمول (بین 300 ولت تا 30 کیلو ولت) سرعت الکترونها در مرتبه  $10^7 \left[\frac{m}{s}\right]$  تا  $10^8 \left[\frac{m}{s}\right]$  که بوضوح مشخص است که گرادیان میدان مغناطیسی باید در حدود  $320 \left[\frac{T}{m}\right]$  تا  $3200 \left[\frac{T}{m}\right]$  باشد. این مطلب بسیار بدیهی و آشکار است که برای مشاهده بصری پدیده مذکور با الکترونها آزاد و معادلات الکترومغناطیس کلاسیک یک کویل مغناطیسی نیاز به گرادیان فوق العاده بالایی را در عمل برای یک تک الکترون آزاد و در شرایط کاملاً ایده آل نیاز مند است. از طرف دیگر چالش مهم دیگری که مطرح است جرم کم الکترونها است که موجب تاثیرپذیری زیاد آن نسبت به میدانهای خارجی اعمال شده به آن می باشد بگونه ای که با کوچکترین تحریکات نیروی لورنس شاهد انحراف در باریکه الکترونها خواهیم بود.

## تخمین سرعت واقعی الکترونها آزاد در عمل :

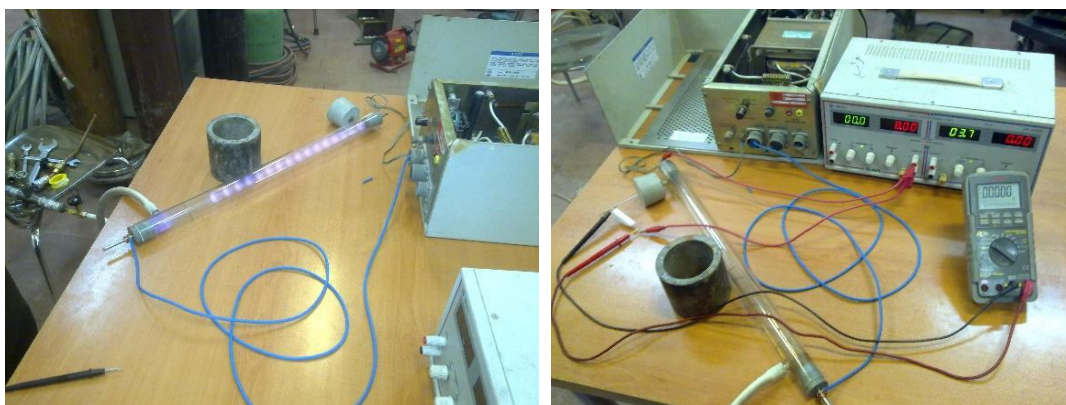
تحقیقاتی که در طرح حاضر صورت پذیرفته است به بررسی نحوه جداسازی الکترونها آزاد از یونهای منفی پرداخته شد و با توجه به پارامترهای پلاسما سرعت دقیق الکترونها آزاد در عمل تخمین زده شده آزمایش پراب لانگیمور یکی از آزمایشاتی است که به بررسی سرعت الکترونها آزاد می پردازد و در آن تخمین دقیقی از سرعت الکترونها آزاد بدست می آید. در دستگاه آنالیزور اسپین ذاتی الکترون جهت حذف موثرتر نوسانات پلاسما و اثرات هاله و نوسانات پلاسما از میدان الکتریکی تولیدی بکمک ترانس فلای بک استفاده شده است، ترانس فلای بک ترانسی است که قادر است تا ولتاژ 54 کیلو ولت دی سی را ایجاد کند، همچنین جهت اطمینان از صافی ولتاژ خروجی از خازنهای دی سی استفاده شده است.



2 - شکل نشاندهنده ساختار کلی آزمایش پراب لانگیمور برای محاسبه سرعت الکترونهاى آزاد در خلاء با توجه به ولتاژ اعمالی است. در این آزمایش بین دو گاف آند و کاتد یک پروب قرار داده میشود و بکمک آن تغییرات سطح پلازما اندازه گیری میشود و در نتیجه تخمین نسبتاً دقیقی از سرعت ذرات شامل یونهاى مثبت و منفی و ذرات ریزتری همچون الکترونهاى آزاد بدست می آید.



3- شکل نشاندهنده یک لامپ لانگیمور است که برای اندازه گیری پارامترهای پلازما به کار میرود، در تصویر باندهای انرژی (این باندها در حالتی دیده میشود که میزان خلاء در محیط لامپ بسیار کم است ولی نه در حالت استاندارد برای آزمایش اشترن گرلاخ با الکترونهاى آزاد) دیده میشود.



4- شکل لامپ لانگیمور و دستگاه ولتاژ بالا را نشان میدهد، نحوه اتصال پروب و آرایش آزمایش نشان داده شده است.

با کاهش میدان الکتریکی سرعت الکترونها که ناشی از میدان الکتریکی است ( $10^7$  متر بر ثانیه) کاهش می یابد و به مرتبه سرعت گرمایی الکترونها نزدیک می شود در این حالت میتوان با قرار دادن رابطه گرمایی الکترونها که از مرتبه  $10^4$  تا  $10^5$  متر بر ثانیه است. در رابطه کلاسیکی دست یافت اندازه گیری سرعت واقعی الکترونها که یکی از مشخصات محیط پلازما است بکمک آزمایش پروب لانگیمور میسر است..



5- شکل پمپ خلاء سازی و دیفیوژن بکاررفته در فرایند خلاء سازی را نشان میدهد.

$$v_{i,th} = \sqrt{\frac{8K_B T_i}{\pi m_i}} = \sqrt{\frac{8K_B}{\pi m_i}} \sqrt{T_i} = 22.89 \sqrt{T_i}$$

$$v_{i,th} = \sqrt{\frac{8eT_i V}{\pi m_i}} = 0.24 \times 10^4 \sqrt{T_i V}$$

$$v_{e,th} = \sqrt{\frac{8K_B T_e}{\pi m_e}} = \sqrt{\frac{8K_B}{\pi m_e}} \sqrt{T_e} = 0.18 \times 10^4 \sqrt{T_e}$$

$$v_{e,th} = \sqrt{\frac{8eT_e V}{\pi m_e}} = 6.7 \times 10^5 \sqrt{T_e V}$$

7- محاسبات نشاندهنده سرعت واقعی الکترونهاى آزاد باتوجه به میزان دما و انرژی ذرات در محیط لامپ لانگیمور است.

پس از بدست آوردن میزان دقیق دما و سایر مشخصات پلاسما میتوان با تقریب نسبتاً خوبی سرعت واقعی الکترونهاى آزاد را در عمل بدست آورد. علاوه بر سرعت الکترونها سرعت یونها (مثبت و منفی) نیز قابل محاسبه و بدست آوردن است. آنچه از آزمایشات فنی انجام شده بر می آید انرژی (دماى) الکترونهاى آزاد در فضای خلا لامپ لانگیمور پس از کنده شدن از سطوح آند و کاتد حدود 10 تا 20 درصد افت انرژی خواهد داشت که بنظر امری طبیعی است و بنا براین سرعت نهایی الکترونهاى آزاد تخمیناً در حدود مرتبه  $10^4$  تا  $10^5$  متر بر ثانیه در فضای لامپ خلا لانگیمور خواهد بود.

Voltage (volt)	$T_{ev}$ in langmuir theory (eV)	$T_e$ in langmuir theory (K)
10	1.72142	19796.4
100	17.2142	197964
200	34.4285	395928
300	51.6427	593891
400	68.857	791855
500	86.0712	989819
600	103.285	1187783
700	120.5	1385747
800	137.714	1583710
900	154.928	178167450
1000	172.142	1979638
2000	344.285	3959276
3000	516.427	5938914
4000	688.57	7918552
5000	860.712	9898190
6000	1032.85	1.2E+07
7000	1205	1.4E+07
8000	1377.14	1.6E+07
9000	1549.28	1.8E+07
10000	1721.42	2E+07
20000	3442.85	4E+07
30000	5164.27	5.9E+07
40000	6885.7	7.9E+07
50000	8607.12	9.9E+07
60000	10328.5	1.2E+08
70000	12050	1.4E+08
80000	13771.4	1.6E+08
90000	15492.8	1.8E+08
100000	17214.2	2E+08
200000	34428.5	4E+08
300000	51642.7	5.9E+08
400000	68857	7.9E+08
500000	86071.2	9.9E+08
600000	103285	1.2E+09
700000	120500	1.4E+09
800000	137714	1.6E+09
900000	154928	1.8E+09
1000000	172142	2E+09

6- نمودار نشاندهنده دمای الکترونها و یونهاى آزاد موجود در لامپ (در فشار رایج کمتر از 100 میلی پاسکال)



## ایجاد تغییرات زیاد در تراکم خطوط و گرادیان میدان مغناطیسی بالا در عمل :

یکی از مهمترین تجهیزات علمی دنیا در حوضه فیزیک کوانتومی و کامپیوتر کوانتومی و ارتباطات کوانتومی و سایر رشته ها که دامنه وسیعی از تحقیقات را شمال میشود با مطالعه و شناخت اسپین ذرات صورت میپذیرد همانطور که بیان گردید تا پیش از اختراع مذکور

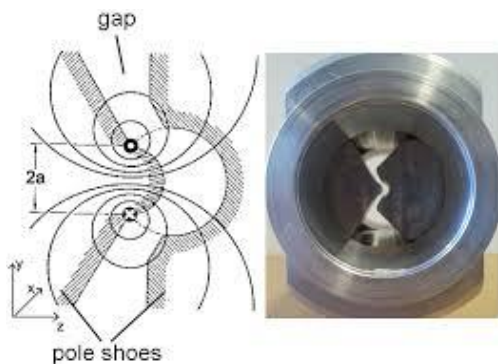


جداسازی خاصیت کوانتومی اسپین تنها در مقیاس اتمی میسر بود، دستگاههای جداسازی اسپین ذرات یکی از پیشرفته ترین و مدرن ترین دستگاههای علمی به شمار میروند چرا که مطالعات و پژوهشهای جدید علمی تنها بکمک چنین تکنولوژیهای امکان پذیر می باشد. یکی از این دستگاهها که به مطالعه جداسازی اسپین اتمهای پتاسیوم می پردازد دستگاه اشترن گرلاخ شرکت فیوه می باشد، این دستگاه بسیار گران قیمت بوده و جزء اقلام تحریمی به شمار میروند. این شرکت محاسبات بسیار دقیقی از نحوه تغییرات گرادیان میدان مغناطیسی با توجه به فرم و انحنای مگنتهای ایجاد کننده گرادیان میدان مغناطیسی دارد، محاسبات این دستگاه زمینه ساز ایده بکار گیری قطعات نوک تیز ایجاد کننده میدان مغناطیسی می باشد.

8- شکل، تصویر یک دستگاه اشترن گرلاخ شرکت فیوه ([www.phywe.com](http://www.phywe.com)) با اتمهای پتاسیوم را نشان میدهد ، این دستگاه شامل منابع تغذیه، ابراهای اندازه گیری، پمپ خلا و دیفیوژن، کوره اتمها، سیم پیچها و دتکتور فوق پیشرفته تیلور میباشد.

بر اساس پژوهش اخیر بکمک استدلالهای ریاضی آزمایش اتم پتاسیوم [21] نشان داده شد که با داشتن مگنت نوک تیز میتوان میزان تراکم خطوط میدان مغناطیسی را به طرز قابل ملاحظه ای تغییر داد که منجر به ایجاد گرادیان میدان

مغناطیسی بالا میشود. این نتایج تطابق کاملی با آنچه در عمل مشاهده میشود دارد و تنها زمانی که مگنتها نوک تیز هستند جداسازی اتفاق می افتد. مقدار گرادیان میدان مغناطیسی در نزدیکی اشیاء نوک تیز بسیار زیاد و مبهم است با توجه به این مطلب یک راهکار هندسی ساده مطرح میگردد. این راهکار با توجه به هندسه بکار رفته در مگنتهای آزمایش انجام شده اثر اشترن گرلاخ کلاسیک بکمک باریکه اتمهای پتاسیوم مطرح گردیده است. [25,26] و در



9- تصویر مگنتهای دستگاه اشترن گرلاخ شرکت فیوه را نشان میدهد. شکل سمت چپ آرایش هندسی خطوط میدان مغناطیسی را نشان میدهد بلوک سمت راست معرف مگنت 2 و بلوک سمت چپ معرف مگنت 1 میباشد.

عمل نیز درستی آن تحقیقاً مشاهده عینی شد. یک دایره را به عنوان مرکز تمامی محاسبات هندسی در نظر بگیرید (شکل 8) که یکی از مگنتهای آزمایش با شعاع  $a$  به داخل دایره وارد می شود (1) و مگنت دیگر بر سطوح خارجی آن مماس شده است (2). محاسبه ی خطوط میدان مغناطیسی بکمک

دو نقطه تقاطع مگنت (1) با دایره محاسبات صورت میپذیرد. از آنجایی که در آزمایش اثر اشترن گریلاخ کلاسیک بکمک باریکه اتمهای پتاسیوم گرادیان زیادی نیاز نیست شعاع دایره پایینی تقریباً کمی کمتر از شعاع دایره محاسبات است. با توجه به مطالب بیان شده در [24] محاسبه گرادیان میدان مغناطیسی نهایتاً بصورت ساده شده زیر (برای مرکز دایره محاسبات) منتج می شود

$$(معادله 2) \quad \frac{\partial H}{\partial z} = 0.968 \frac{H}{a}$$

که می توان آنرا با ساده سازی بصورت تقریبی زیر نوشت:

$$(معادله 3) \quad \frac{\partial B}{\partial z} = \frac{B}{a}$$

در رابطه مذکور (معادله 3) گرادیان میدان مغناطیسی نهایی نسبتی عکس با شعاع دایره داخلی و نسبتی مستقیم با اندازه میدان مغناطیسی اعمالی به مگنتها دارد. این رابطه علی رغم سادگی ظاهری که دارد میتواند به ما در درک میزان تغییرات گرادیان میدان مغناطیسی با تغییر شعاع داخلی مگنت (1) کند. حال تصور کنید که شعاع مگنت داخلی (1) به سمت صفر میل کند آنگاه شعاع دایره در معادله بسیار کم شده و عملاً با یک مگنت خیلی تیز سر و کار خواهیم داشت عدد بسیار کوچک در مخرج کسر تبدیل به ضریب بزرگی در اندازه میدان خواهد شد و گرادیان میدان مغناطیسی غیر یکنواخت نهایی را به طرز فوق العاده ای بالا می برد. (در عمل مگنتهایی با توجه به پیشینی فوق طراحی گردید (معادله 3) که نوک یکی از آنها تیز بوده و در عمل هنگامیکه در نقطه ای خاص باشد امکان مشاهده عینی جداسازی اسپینها را فراهم می کند. لازم به ذکر است جهت خطوط میدان مغناطیسی اعمالی در شناسایی پدیده بسیار حائز اهمیت است و لبه نوک تیز مگنت باید N و لبه انحنا دار مگنت دیگر باید S باشد. با توجه به اینکه لبه نوکتیز میتواند شعاعی تخمینی را در حدود میکرومتر داشته باشد (a) بنابراین چنانچه اندازه میدان مغناطیسی در حدود صدم یا میلی تسلا باشد به راحتی مرتبه بیان شده و مورد نیاز که پیش از این اشاره شد تامین میشود.

## ساخت لامپ آزمایش ، جداسازی یونها و محیط خلاء بالا :



10- تصویر فوق تفاوت لامپ خاص بکاررفته و یک

ساختار کلی دستگاه آنالیزور اسپین ذاتی الکترون از یک لامپ خلا بالا که به کمک روشهای پیشرفته و خاص خلا سازی شده است ( تکنولوژی ساخت و خلا سازی دتکتورهای حساس اندازه گیری پرتو گاما که بالاترین حساسیت را دارد. ) در ساختار لامپ تفنگ الکترونی و صفحات گرید علاوه بر جداسازی الکترونهاي آزاد از یونهای منفی سنگین تر بکمک گیتر خلا سازی تا مراتب بسیار بالاتری صورت می پذیرد. ایده اصلی لامپ بر گرفته از سیستم لامپ تصویر تلویزیونهای معمولی را نشان میدهد. تصویر تلویزیونهای معمولی اما اگر چه ظاهر آن مشابه با لامپ تصویر تلویزیون است اما تفاوتهایی اساسی با آن دارد به عنوان مثال فاقد سیستم فوکوس در آن می باشد و.... چون جزء اصلی دستگاه از لامپ تشکیل



(a)  
No Magnetic Field,  
Magnets are ground.

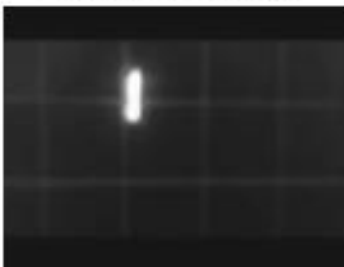
(b)  
With Magnetic Field,  
Magnets are ground.



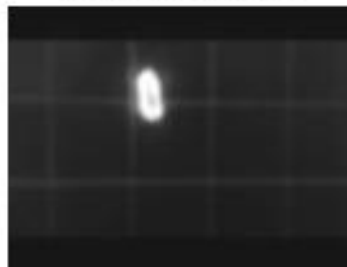
(c)  
With Magnetic Field,  
Magnets are ground.



(d)  
With Magnetic Field,  
Magnets are ground.



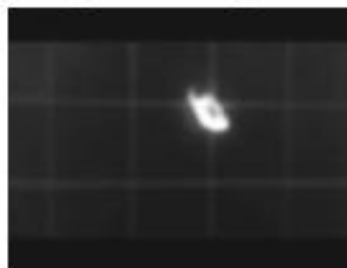
(e)  
No Magnetic Field,  
Magnets are not ground.



(f)  
With Magnetic Field,  
Magnets are not ground.



(g)  
With Magnetic Field,  
Magnets are not ground.



(h)  
With Magnetic Field,  
Magnets are not ground.

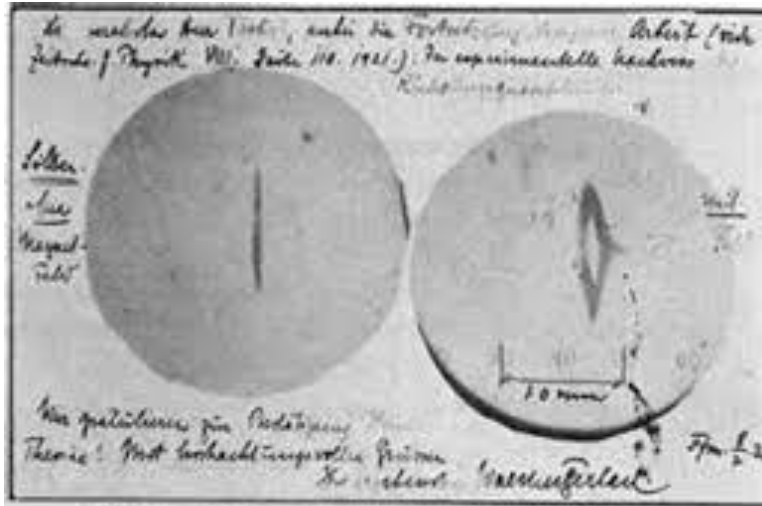
11- چهار تصویر بالایی نشان‌دهنده جدادشدگی اسپین الکترونیهای آزاد است زمانی که مگنتها متاثر از استاتیک قطعات فلزی تولید کننده میدان مغناطیسی هستند و چهار تصویر پایینی نیز تصویر جدادشدگی را زمانی که اثر استاتیک بدنه مگنتها حذف شده باشد.

شده است، تنها یکبار خلاء سازی برای آن لازم است بنابراین دیگر نیازی به تجهیزات خلاء سازی و ... بصورت دائم نیست ، در دستگاه آنالیزور اسپین ذاتی الکترون امکان قفل کردن مگنتها در زوایای مختلف وجود دارد. در دستگاه آنالیزور اسپین ذاتی الکترون امکان تنظیم فاصله مگنتها از صفحه فلورسانت وجود دارد، همچنین امکان آزمایش پدیده اشترن گرلاخ با باریکه الکترونیهای آزاد در آن وجود دارد. همانطور که اشاره گردید در طرح انجام شده حاضر تمامی ولتاژهای بکار رفته DC و ثابت از رنج 10 ولت تا 25 کیلو ولت هستند.

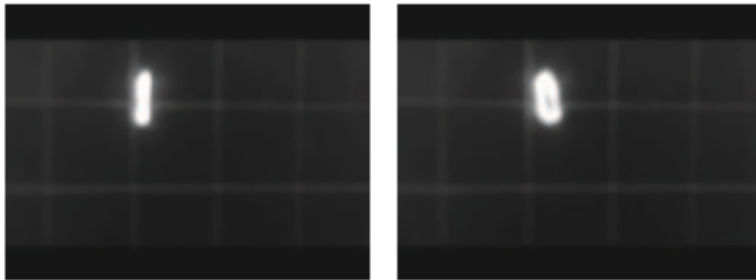
هنگامی که باریکه الکترونیهای آزاد پرتاب شده به سمت صفحه فلورسانت تحت تاثیر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت (دارای گرادیان میدان مغناطیسی = تراکم خطوط میدان مغناطیسی به اندازه ی قابل ملاحظه ای داری تغییرات باشد ) قرار می گیرند جدادشدگی اسپین الکترونیهای آزاد بر اساس تئوری مکانیک کوانتومی صورت می پذیرد.

در کشفیات صورت گرفته در این طرح بوضوح نحوه جدادشدگی اسپین الکترونیهای آزاد در حالتی که مگنتها متاثر از استاتیک سطح هستند یا زمانی که تا اثر پذیر از استاتیک سطح نیستند بسیار متفاوت می باشد، باریکه الکترونها پس از جدادشدگی در جهت نیروی لورنس حرکت می کنند ، جالب توجه این است که در صورتی که مگنتها متاثر از استاتیک سطح باشند شکل ایجاد

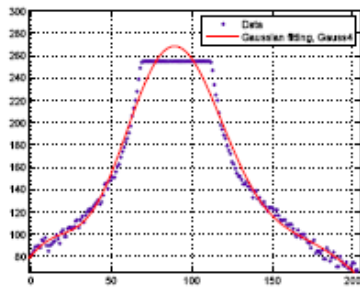
شده که شبیه چشم است بسیار به آزمایش کلاسیک اشترن و گزلاخ با اتمهای نقره است. فاصله این جداشدگی باریکه الکترونها بسیار اندک می باشد اما به راحتی میتوان بکمک نرم افزار مطلب جداشدگی این باریکه الکترونها را ملاحظه نمود،



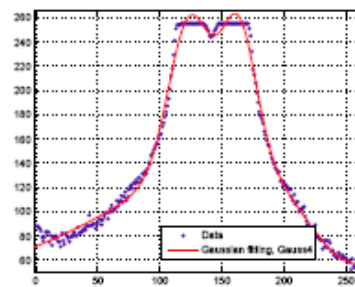
Gerlach's postcard, dated 8 February 1922, to Niels Bohr. It shows a photograph of the beam splitting, with the message, in translation: "Attached [is] the experimental proof of directional quantization. His congratulations [and] on the confirmation of your theory" (Physics Today December 2003)



12- تصویر بالایی عکس گرفته شده از آزمایش کلاسیک اشترن و گزلاخ می باشد، این آزمایش با اتمهای نقره صورت گرفت، تصویر پایینی نتیجه مشابه گرفته شده بکمک دستگاه آنالیزور اسپین ذاتی الکترون است.

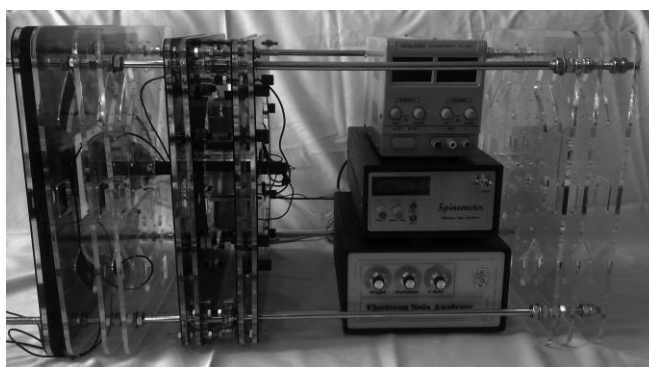
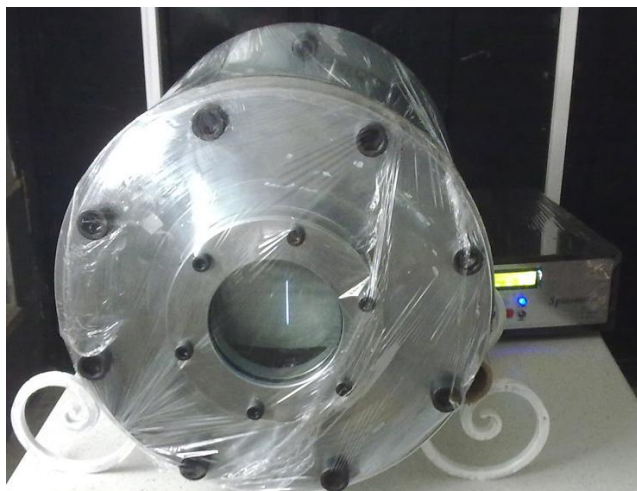


(a)  
MATLAB Gaussian fitting,  
Gaussian4, Before Magnetic Field.



(b)  
MATLAB Gaussian fitting,  
Gaussian4, After Magnetic Field.

13- گر چه در تصاویر گرفته شده وضوح کافی در خصوص میزان و نحوه جداشدگی وجود ندارد اما در نرم افزار مطلب مشاهده این امر کاملا میسر است.



14- تصویر نشان‌دهنده نمونه های دستگاه ساخته شده آنالیزور اسپین الکترون است، اولین نمونه این دستگاه شامل یک محفظه فلزی خلاء بود.

## منابع و مراجع:

- 1) W. Gerlach and O. Stern, Z. Phys. 9, 349 (1922)
- 2) N. Bohr, Nature.London.121, 580 (1928)
- 3) N. Bohr, J. Chem. Soc.134, 349 ,(1932)
- 4) Pauli W 1932 Proc. of the 6th Solvay Conf. 2(1930) (Brussels: Gauthier-Villars) pp 183{6,217{20, 275{80
- 5) W. Pauli, Handbuch der Physik (Springer, Berlin,1958), vol. 1, chap. Secs. 9, 12, 23.
- 6) L. Brillouin, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 14, 755(1928)
- 7) W. Pauli, in Proceedings of the Sixth Solvay Conference (Gauthier-Villars, Brussels, 1932),pp.183,186, 217,220,275,280.
- 8) N. Mott, Proc. R. Soc. (London) A 124, 425(1929).

- 9) Mott and Massley, The Theory of Atomic Colli-sions (Oxford University Press, 1965),chap. IX.1.
- 10) O. Klemperer, Electron Physics (Butterworths,1961).
- 11) A letter to N. F. Mott in (1929)
- 12) Dehmelt H 1988 New continuous Stern-Gerlach effect and a hint of `the' elementary particle Z. Phys.
- 13) Dehmelt H 1990 Experiments with an isolated subatomic particle at rest Rev. Mod. Phys.
- 14) H. Batelaan, T. J. Gay, and J. J. Schwendiman,Phys. Rev. Lett. 79, 4517 (1997).
- 15) G. Rutherford and R. Grobe, J. Phys. A 31, 9331(1998).
- 16) B. M. Garraway and S. Stenholm, Phys. Rev. A 60, 63 (1999).
- 17) G. A. Gallup, H. Batelaan, and T. J. Gay, Phys.Rev. Lett. 86, 4508 (2001).
- 18) H. Batelaan ,Transverse quantum Stern(Gerlach magnets for electrons, New Journal of Physics,(2011)
- 19) <http://www.ou.edu/research/electron/bmz5364/calc-kv.html>
- 20) CONTROL AND MEASUREMENT OF QUAN-TUM SPINS: THEORY AND SIMULATIONS. Suguru Furuta. Darwin College. University of Cambridge (2005)
- 21) Stern-Gerlach experiment by Potassium atom beams/ [www.phywe.com](http://www.phywe.com) / Stern-Gerlach experiment/ Manual/ LEP 5.1.11 Stern-Gerlach experiment,
- 22) The Stern Gerlach Experiment ,Jeff Lieberman Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology (June 22,1998)
- 23) J.A.Wheeler and W.H.Zurek,Quantum theory and Measurement, (Perinceton University Press,Princeton,1983),P.699.
- 24) W.Pauli ,in le Magnetisme , Proccedings of the VI Solvay conference (Gauthier-Villars , Paris , 1932),Sec.II.1.b,p.175
- 25) N. F.Mott,Proce.R soc.london,s, Ser. A 124,440(1929).
- 26) N.F.Mott and H.S.W.Massey, The Theory of Atomic Collisions, 3rd ed. (Clarendon Press, OxFord, 1965),pp. 214-219.
- 27) W.pauli, in Handbuch der Physik, edited by S. Flugge (Springer, Berlin, 1958),Vol.5,Pt.1,p.165.
- 28) G. A. Gallup, H. Batelaan, and T. J. Gay, Phys.Rev.Lett. 86, 4508 (2001).
- 29) N.Bohr,j.Chem.Soe. 134, 349(1932):134,368(1932).
- 30) M.A.Liberman, j.Lichtenberg , Principles of plasma discharge and materialsprocessing, John Wiley, sons,chapter 6,(2005).
- 31) Langmuir and H. Mott-Smith, The theory of collectors in gaseous discharges, Phys. Rev. 28, 727763 (1926).
- 32) J.Meichsner, Lecture notes in physics, springer, Berlin Heidelberg, chaoter 5, (2005).
- 33) Robert L. Merlino, Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics, Am. J. Phys.75 (12),December 2007.

- 34) Walter R. Hoegy and Larry H. Brace, Use of Langmuir probes in non-Maxwellian space plasmas, Rev. Sci.Instrum., Vol. 70, No. 7, July 1999.
- 35) J.B. Hoag and S.A. Korff, Electron and Nuclear Physics, Van Norstrand (New York, 1952),Chapter 8.
- 36) M.A. Heald and C.B. Wharton, Plasma Diagnostics with Microwaves, Wiley (New York, 1965),page 380.
- 37) A.M. Howatson, An Introduction to Gas Discharges, Pergamon Press (Oxford, 1965).
- 38) Roth, J. Reece, Industrial plasma Engineering, chapter 9,(1995).
- 39) B. E. Cherrington, The use of Langmuir probes for plasma diagnostics:A review, Plasma Chem. Plasma Process. 2, 113140 (1982).
- 40) O. Auciello and D. L. How Langmuir probes work, in Plasma Diagnostics, Discharge Parameters and Chemistry, Flamm (Academic, Boston, 1989), Vol. 1,Chap. 3.
- 41) B. E. Cherrington, The use of Langmuir probes for plasma diagnostics: A review, Plasma Chem. Plasma Process. 2, 113140 (1982).
- 42) K.-U. Riemann, The Bohm sheath criterion and sheath formation, J. Phys. D 24, 493518(1991).
- 43) G. D. Severn, A note on the plasma sheath and the Bohm criterion, Am. J. Phys. 75, 9294 (2007).
- 44) F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 2nded. (Plenum, New York, 1984),Vol. 1, p. 290.
- 45) D.Dorranian, F.Shahbaz Tahmasebi, Y.Golian, M.Alizadeh, J of Theoretical and Apl. Phys.4-1,25-29,(2010).
- 46) Majlesi,Hosein<sup>6</sup>.Observing the spin of free electrons in action(Stern-Gerlach experiment by free electrons), arXiv:1504.07963, 29 Apr 2015
- 47) Majlesi,Hosein.Plasma Theory and Stern-Gerlach Experiment by Free Electron in Quantum Theory, viXra:1601.0206,19-01-2016



<sup>6</sup> Hosein . Majlesi  
Hosein.Majlesi@Yahoo.com ; +98 (0)9395232611