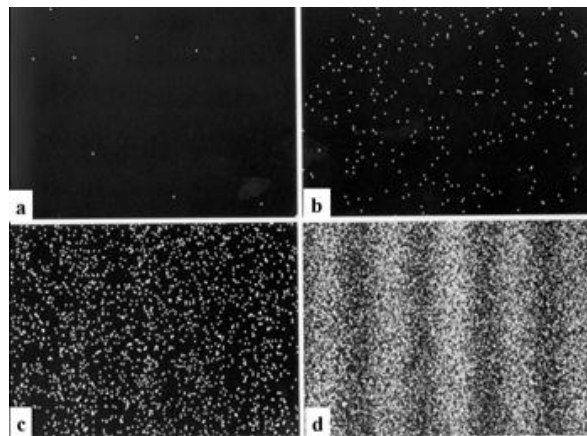
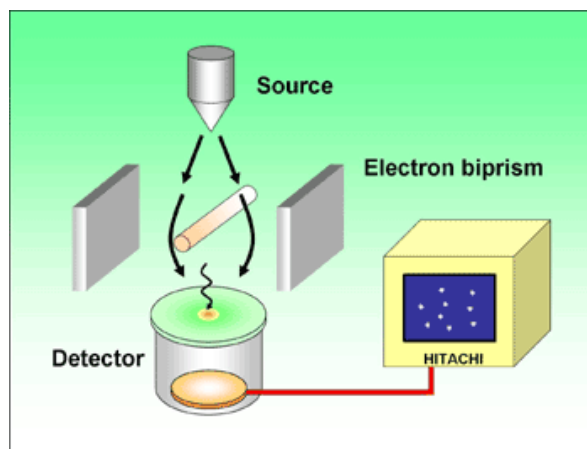


علیه مفهوم دوگانگی موج- ذره

آزمایش دو شکافی با الکترون

نگارنده: حمید

آزمایش دو شکافی با الکترون سرانجام در سال 1961 به دست Claus Jönsson از توپینگن انجام گرفت؛ در سال های 1973 و 1974 و در جریان يك کار پژوهشي در دانشگاه توپینگن، Gottfried Tonomura با Möllenstedt همکاری داشت، یعنی با نخستین پژوهشگری که با بهینه سازی تداخل (تفرق) سنج های دو منشوری توانست الگو های تداخلی الکترون یا به عبارت درست تر الگو های تفرقی الکترون را مشاهده نماید؛ آزمایش دو شکافی با تک الکترون در سال 1974 توسط Pier Giorgio Merli، Gian Franco Missiroli و Giulio Pozzi در شهر Bologna انجام شد و در سال 1989 توسط Tonomura و همکارانش در Hitachi تکرار گردید. تلاش های این پژوهشگران در حقیقت گام مهمی است در راستای رد گمان واهی موجود در مکانیک کوانتومی، یعنی "دو گانگی موج- ذره" که در تفسیر کپنهاگی به عنوان **اصل مکمليت** شناخته می شود.



<http://www.hitachi.com/rd/portal/research/em/doubleslit.html>

<http://www.youtube.com/watch?v=oxknfn97vFE&feature=related>

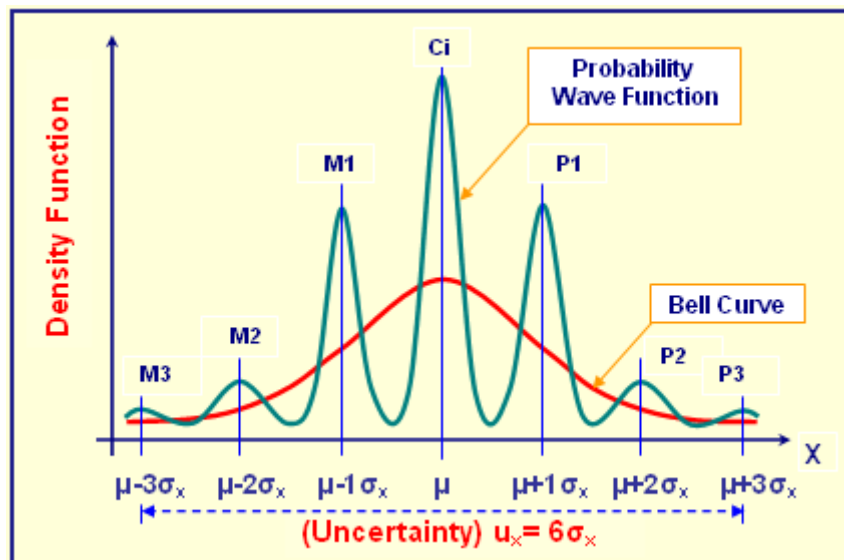
بگذارید حواس خود را متمرکز کنیم روی سخنان پایانی Akira Tonomura در باره نتایج آزمایشی که در Hitachi انجام شده است:

"به نتیجه ای پُر رمز و راز رسیده ایم. اگر چه الکترون ها یکی یکی ارسال شده اند، ولی نوار های تداخلی را می توان مشاهده کرد. این نوار های تداخلی تنها زمانی تشکیل می شوند که موج های الکترون در يك زمان از دو طرف منشور الکترون (electron biprism) عبور نمایند و نه چیزی غیر از این. هر گاه الکترون ها مشاهده می شوند، همواره خود را مانند ذرات منفرد آشکار می سازند. اما هنگامی که انباشته شدند، نوار های تداخلی تشکیل می گردند. لطفاً به یاد داشته باشید که در هر لحظه حد اکثر فقط يك الکترون در میکروسکوپ وجود داشت. به نتیجه ای رسیده ایم که دور از آن چیزی است که عقل سلیم به ما می گوید."

بر اساس يك اصل در فيزيك، تداخل عبارت است از جمع (superposition) دو يا چند موج كه موجب به وجود آمدن يك موج جديد مي شود. در نتيجه، باور همگان بر اين است كه در آزمايش دو شكافي تشكيل نوارهاي تاريك و روشن ناشي از تداخل دو موج تركيب شده است، مانند: موج هاي نور، موج هاي فوتون، موج هاي ماده يا موج هاي الكترون! اما آيا امكان پذير است كه الگوي تداخلي داشته باشيم در حاليكه در اين آزمايش دو شكافي الكترون ها تك تك ارسال شده اند؟ نه، غير ممكن است. از سوي ديگر، چگونه يك الكترون مي تواند با خودش تداخل داشته باشد؟ اين موضوع بيشتر بايد براي كساني پرسش برانگيز باشد كه بدون مبناي علمي گمان مي كنند ذراتي همچون فوتون ها و الكترون ها رفتار موج مانند نيز دارند. در هر حال نوار ها تشكيل مي شوند و حتي مشاهده پذيراند. بنابراين لازم است علت تشكيل نوار ها را در آزمايش دو شكافي پيدا نماييم.

پيش از پرداختن به دلايل تشكيل الگوي آزمايش دو شكافي با الكترون، داشتن يك تصوير نسبتاً روشن در مورد گسيل كننده الكترون (emitter) در اين آزمايش مفيد خواهد بود. معمولاً در ميكروسكوپ هاي الكتروني يك منبع الكترون با تفنگ الكتروني به كار برده مي شود كه در آن الكترون ها از يك افروزه تنگستني (كاتد)، از نوع مقاومتي حرارتي، آزاد مي شوند. به بيان ديگر، با گرم كردن افروزه، الكترون هائي از اتم تنگستن كه داراي بيشترين تراز انرژي مي باشند و در خارجي ترين اوربیتال گرد هم مي آيند به اندازه كافي انرژي به دست مي آورند تا بر سد تابع كار (work function barrier) چيره شده و به سوي قطب مثبت (آند) حركت كنند. اين الكترون ها، كه بعداً براي تصوير سازي مورد استفاده قرار مي گيرند، از يك منبع نقطه اي تقريباً كامل (the space charge) گسيل مي شوند. بنا بر اين منطقي است اگر نتيجه گيري كنيم كه لكه هاي درخشان روي صفحه نمايش (مونيتور) نشان دهنده مكان هاي تصادفي الكترون هاي اوربیتال خارجي تعداد بسيار زيادي از اتم هاي تنگستن مي باشند. بايد ياد آور شد كه عموماً گفته مي شود اتم تنگستن در خارجي ترين اوربیتال خود فقط داراي دو الكترون است.

براي روشن ساختن اين موضوع كه در باره چه چيزي مي خواهيم صحبت كنيم، لازم است به تابع موج نوين احتمال كه براي اولين بار در مقاله قبلي نگارنده زير عنوان "**تابع موج، توزيع گاوسی پيشرفته**" معرفي شده است رجوع نماييم، شكل ۱. نسخه انگليسي اين مقاله در ماه اوت سال ۲۰۰۸ در سايت toequest.com انتشار يافته است.



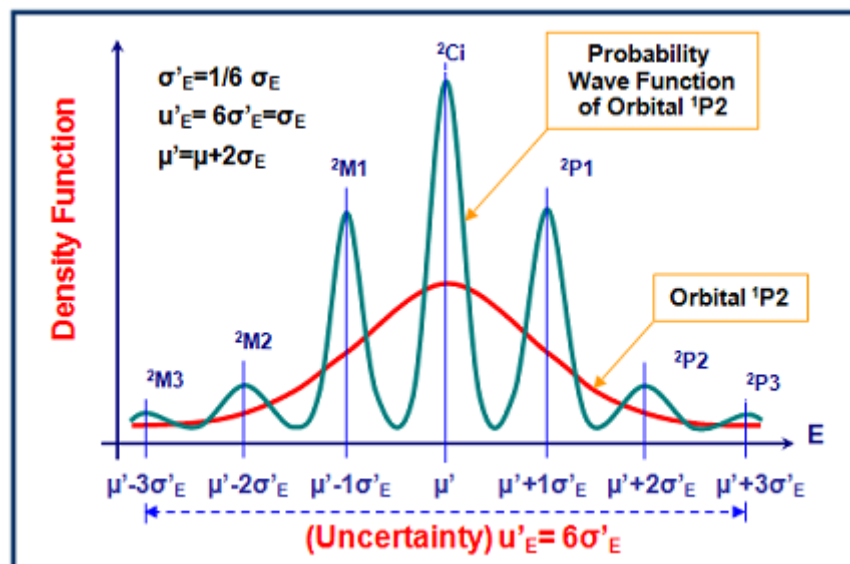
شكل ۱- پيكر بندي كلّي تابع موج نوين احتمال

براي انطباق اين تابع نوين با آرايش الكتروني اتم تنگستن به طور كلّي و با اوربیتال خارجي آن به طور ويژه، ارائه توضيحاتي به شرح زير ضروري است:

- ۱) متغير كوانتومي در اين مورد خاص انرژي يك الكترون است كه مي توانيم آن را به جاي X با E نمايش دهيم.
- ۲) ميزان عدم قطعيت در انرژي الكترون هاي اتم تنگستن برابر است با $60E$. به عبارت ديگر، اگر بيشترين و كمترين مقدار انرژي الكترون هاي اتم تنگستن را بدانيم، پس $U_E = E_{max} - E_{min} = 60E$ كه تقريباً شامل تمام الكترون هاي اين اتم مي شود (99.73%).

- ۳) میزان عدم قطعیت در انرژی الکترون های اوربیتال های مرتبه اول (ابر های الکترونی)، یعنی $M1$ ، $M2$ ، Ci ، $P1$ و $P2$ ، یکسان بوده و برابر است با σ_E . این اوربیتال ها همراه با $M3$ و $P3$ ساختار کوانتومی مرتبه اول (ground state) در آرایش الکترونی یک اتم را به وجود می آورند. از این به بعد بهتر است آن ها را دقیق تر نشان دهیم، مانند: 1M3 ، 1M2 ، 1M1 ، 1Ci ، 1P1 و غیره.
- ۴) میانگین انرژی الکترون ها در اتم تنگستن μ است و $\mu = (E_{max} + E_{min})/2$.
- ۵) این تابع موج تصریح می کند که هیچ دو الکترونی در یک اوربیتال منفرد و نیز در یک اتم نمی توانند انرژی های یکسانی داشته باشند.
- ۶) تراز انرژی هر اوربیتال را می توان با مقدار میانگین انرژی الکترون های آن اوربیتال معرفی نمود، به عنوان مثال: $(\mu - 1\sigma)$ برای 1M1 .
- ۷) در یک اتم فاصله بین تراز انرژی اوربیتال های مرتبه اولی که تنگتنگ در کنار یکدیگر قرار دارند یکسان بوده و برابر است با σ_E . فاصله بین تراز انرژی اوربیتال های مرتبه دوم همجوار $1/6\sigma_E$ است، بین تراز انرژی اوربیتال های مرتبه سوم همجوار $(1/6)^2\sigma_E$ است، و الی آخر.
- ۸) در آرایش الکترونی یا الگوی الکترونی اتم تنگستن، هر الکترون مکان معین و منحصر به فردی را اشغال می نماید. فاصله هر الکترون از یک محور مختصات عمودی، مانند خط مرکزی الگو که از میانگین یا امید ریاضی (μ) عبور می کند، به طور همزمان تعیین کننده مکان و انرژی آن الکترون است. این دو ویژگی فیزیکی با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. اگر محور مختصات از نقطه صفر ($E=0$) که نشان دهنده جای هسته اتم تنگستن است عبور نماید، فاصله هر الکترون از محور مختصات شعاع پوسته کروی و منحصر به فرد آن الکترون در گرداگرد هسته اتم می باشد. به بیان دیگر، در هر پوسته تنها یک الکترون می تواند وجود داشته باشد.
- ۹) با توجه به این که اتم تنگستن دارای 74 الکترون است، دو الکترون موجود در خارجی ترین اوربیتال به ابر الکترونی مرتبه اول 1P2 تعلق دارند.

برای روشن تر شدن موضوع لازم است که در مورد کمیته ها توضیح بیشتری داده شود. در حقیقت، آنچه را که در الگوی این آزمایش زیبا می بینیم لکه های کوچکی هستند که از برخورد تعداد زیادی ذرات منفرد ایجاد شده اند. این ذرات دو الکترون موجود در اوربیتال مرتبه اول 1P2 مربوط به هزاران اتم تنگستن در کاتد می باشند. با کاربرد محور مختصات افقی دوتایی و بسیار دقیق می توان به طور همزمان مکان و انرژی هر الکترون منفردی را اندازه گیری نمود. در این حالت خط مرکزی مقیاس می تواند خط مرکزی الگو باشد که از نقطه میانی یا به عبارت دیگر از نقطه نشان دهنده سطح انرژی اوربیتال 1P2 ، یعنی $\mu' = \mu + 2\sigma_E$ عبور می کند، شکل ۲.

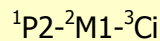


شکل ۲- پیکر بندی کلی تابع موج احتمال در اوربیتال الکترونی 1P2

اکنون به نظر می رسد که فرصت شگفت انگیزی به دست آمده تا شکوه این آزمایش را دریابیم و نیز یک بار دیگر قابلیت های تابع موج نوین احتمال را ارزیابی کنیم.

پنج نوار قابل رؤیت در الگو نماینده ساختار زیر کوانتومی اوربیتال $1P2$ هستند که در آن مشاهده پذیرترین زیر اوربیتال ها عبارتند از $2P1$ ، $2P2$ ، $2M1$ ، $2M2$ ، $2Ci$ و $2P2$. احتمال اوربیتال $1P2$ در اتم تنگستن %6.06 است. در این حالت، فاصله بین تراز انرژی ابر های الکترونی همجوار برابر است با $1/6\sigma_E$. الگوی ایجاد شده در این آزمایش بدون تردید گواه متقاعد کننده ای است که هر یک از دو الکترون موجود در دور ترین اوربیتال اتم تنگستن می تواند به هر یک از زیر اوربیتال های $2M1$ ، $2M2$ ، $2Ci$ ، $2P1$ یا $2P2$ تعلق داشته باشد، زیرا تمام نوار های مربوطه را می توانیم در روی مونیتور ببینیم. باید یاد آور شد که لکه های روشن نشان دهنده الکترون هائی هستند که از تعداد بسیار زیادی اتم تنگستن گسیل شده اند. از لحاظ احتمالات، پیش بینی جای دقیق دو الکترون اوربیتال $1P2$ در اتم تنگستن نا شدنی است. جای دقیق آن ها را فقط از راه اندازه گیری می توانیم معین کنیم، مثلاً با کاربرد محور مختصات دو تایی افقی در روی الگو.

در اینجا بهتر است توضیح داده شود که تعداد زیادی الکترون می تواند وارد هر اوربیتال یا زیر اوربیتال شود، اما در هر پوسته تنها یک الکترون منفرد می تواند وجود داشته باشد. علاوه بر این، برای نشان دادن زیر اوربیتال ها به طور مختصر می توان از کُد گذاری زنجیره ای (chain coding) استفاده نمود، مانند:



برای زیر اوربیتال $3Ci$ از زیر اوربیتال $2M1$ از اوربیتال $1P2$. به طور کلی، الگوی این آزمایش آشکارا طبقه بندی یا دسته بندی الکترون ها و نیز تفاوت ها یا فرق هائی را که بین این ذرات وجود دارد به ما نشان می دهد. بنابراین، به جای الگوی تداخلی (*interference pattern*) که برای این مورد نام نادرستی است، بایستی آنرا الگوی تفرقی (*diffraction pattern*) نام نهاد. در واقع امر، در تمام انواع آزمایش دو شکافی فقط با پدیده تفرق (*diffraction phenomenon*) روبرو هستیم. این موضوع قبلاً در مقاله ای از نگارنده زیر عنوان "*Double-Slit Experiment and Quantum Mechanics*" در ماه دسامبر سال ۲۰۰۵ مورد بحث مفدماتی قرار گرفته است.

در این آزمایش، دو الکترون موجود در اوربیتال خارجی اتم های تنگستنی که در سطح کاتد (امیتر) قرار دارند مجموعه ای از متغیر های کوانتومی را تشکیل می دهند ($1P2$). این الکترون ها با عدم قطعیتی برابر با انحراف معیار توزیع الکترونی کامل یک اتم تنگستن، یعنی $U'_E = \sigma_E$ ، در محدوده $\pm 0.5\sigma_E$ واقع شده اند. جالب است به این نکته اشاره شود که این الکترون ها به عنوان یک گروه و تمام الکترون های یک اتم به عنوان یک کل از قانون یکسانی پیروی می کنند.

نتایج آزمایش دو شکافی با الکترون جایگاهی با شکوه و ارزشمند در مکانیک کوانتومی به این آزمایش می دهد، چون این امکان را فراهم می سازد که درستی تابع موج نوین احتمال را با دقت بیشتر یا با عدم قطعیت باریکتر بیآزمائیم، و نیز اطمینان بیشتری به دست آوریم که این تابع برای نتایج اندازه گیری مربوط به تمام پدیده های طبیعی کاربرد دارد.

بدون تردید نتایج این آزمایش دقیق دلیلی است قانع کننده و محکم برای اعلان نا معتبر بودن دو گانگی موج-ذره که گمانی است نادرست و گمراه کننده در گسترده ترین تفسیر پذیرفته شده مکانیک کوانتومی. با تشکر از تمام نهاد ها، سازمان ها و اشخاصی که در جهت گسترش و بهینه سازی آزمایش دو شکافی با الکترون تلاش نموده اند.

کسی که می خواهد جهان را عمیق تر و دقیق تر درک کند بایستی به زبان ریاضی دان ها دست کم به مبانی آن چیرگی داشته باشد.

یادداشت ها:

- نسخه انگلیسی این مقاله زیر عنوان [Against Wave-Particle Duality Concept](#) در ماه اوت سال 2010 در سایت [toequest.com](#) منتشر شده است.
- نسخه آلمانی این مقاله زیر عنوان [Gegen das Konzept des Welle-Teilchen-Dualismus](#) در ماه آوریل سال 2012 در سایت [toequest.com](#) انتشار یافته است.
- کاربرد تابع موج نوین احتمال در ارتباط با نظریه همه چیز (Theory of Everything, TOE) و گرانش کوانتومی (quantum gravity) از طریق لینک های زیر قابل دسترسی است:

[Exact Planck Length Unveils Quantum Gravity](#)
[Genaue Planck-Länge Enthüllt die Quantengravitation](#)