

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

جلسه نهم

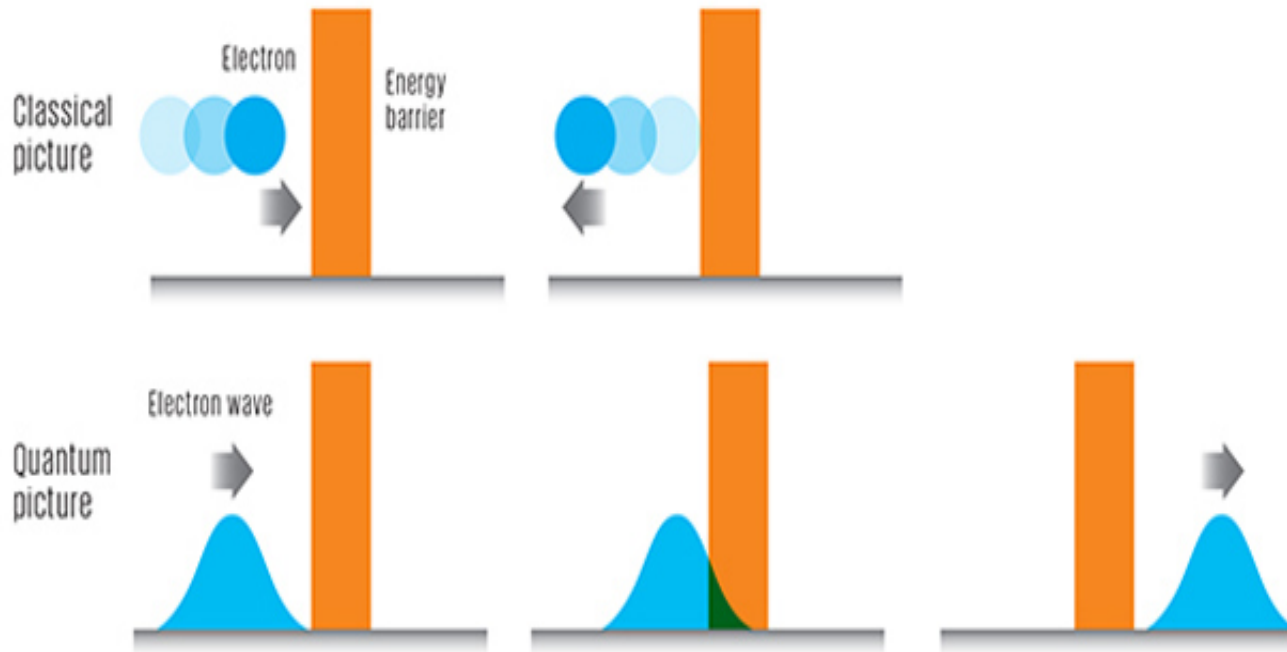
تونل زدن و کاربردهای آن

پدیده تونل زنی کوانتومی

طبق اصل عدم قطعیت، نمی توان مکان و اندازه حرکت یک ذره را با هم اندازه گیری کرد و ما هیچگاه نمی توانیم مکان یک ذره را با اطمینان کامل مشخص کنیم، بلکه همیشه این مقدار با عدم قطعیتی همراه خواهد بود.

پس همواره برای حضور ذره در هر جایی احتمالی وجود دارد!
تونل زنی در واقع به دوگانگی موج-ذره هم بستگی دارد و اینکه مثلاً یک الکترون مثل یک موج، موقعیت مشخصی ندارد و بنابراین می تواند از سدهای به ظاهر غیرقابل نفوذی عبور کند.

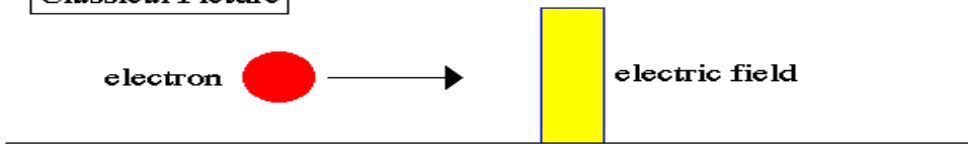
شکل زیر همین پدیده را به تصویر می کشد.



تونل زنی کوانتومی نقش مهمی در همجوئی هسته ای در خورشید، میکروسکوپ تونل زنی روبشی و فلش مموری های کامپیوتر دارد.

Quantum Tunneling

Classical Picture



Quantum Picture



وجود تونل زنی کوانتومی برای نخستین بار در سال ۱۹۲۷ توسط یک فیزیکدان آلمانی بنام فردریک هاند کشف شد. یک سال پس از آن فیزیکدان دیگری بنام جرج گاموف موفق شد بر مبنای همین پدیده شگفت انگیز معمای چگونگی گسیل ذرات آلفا از هسته های رادیواکتیو پرتو ز را حل کند.

محاسبات گاموف نشان می داد که چگونه ذرات آلفا به رغم نداشتن انرژی لازم برای رسیدن به قله سد پتانسل هسته اتمی می توانند با تونل زدن از میان این سد پتانسیل، از درون هسته اتمی فرار کرده و به بیرون هسته پرتاب شوند.

با گذشت زمان مشخص شد که پدیده تونل زنی کوانتومی در عرصه های بسیار مختلف و متعددی - از واکنش های گرما هسته ای در قلب خورشید و سایر ستارگان گرفته تا برخی پدیده های مرتبط با ابر رسانی در جامدات- نقش ایفا می کند.

در سال ۱۹۵۸ یک فیزیکدان ژاپنی بنام لئو ازاکي یک نوع دیود بنام « دیود تونلی » را که بر مبنای پدیده تونل زنی الکترون ها در نیمرساناها کار می کرد در مرکز تحقیقات شرکت سونی ژاپن اختراع کرد. این دیود به واسطه عملکرد بسیار سریع خود از وقوع پدیده تونل زنی کوانتومی در نقطه اتصال دو سیم ابر رسانا پرده برداشت.

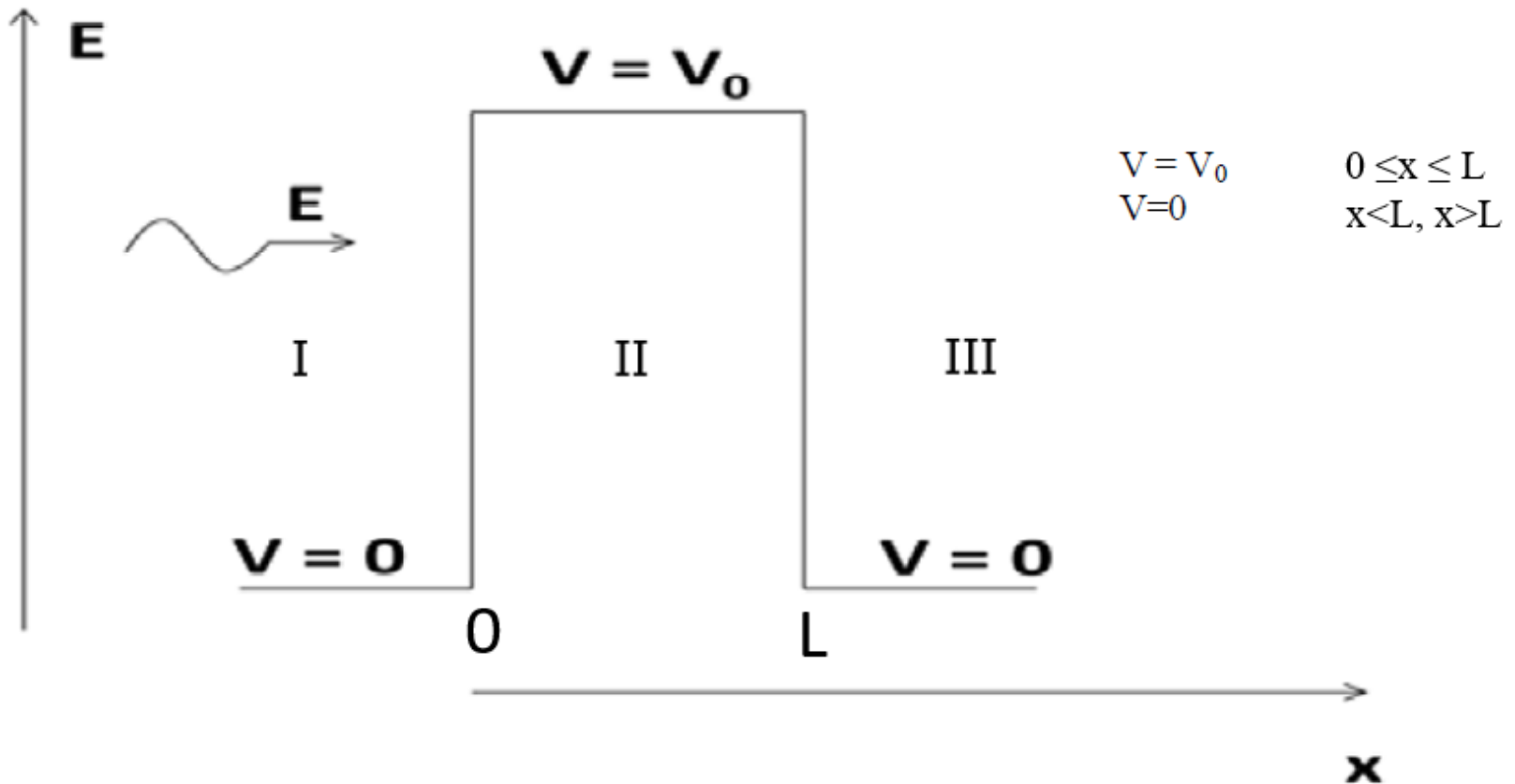
در اوایل دهه ۱۹۸۰ پژوهشگران IBM با استفاده از همین پدیده، میکروسکوپ ویژه ای را ساختند که امکان مشاهده تک تک اتم ها را فراهم کرد. هارتمن در سال ۱۹۶۲ کشف کرد که تونل زنی ذرات کوانتومی از میان یک سد پتانسل- فارغ از پهنای این سد - همواره بطور لحظه ای و آنی صورت می گیرد و این بدان معناست که ذرات کوانتومی حین تونل زدن حتی مرز حیرت انگیز سرعت نور را هم می شکنند!

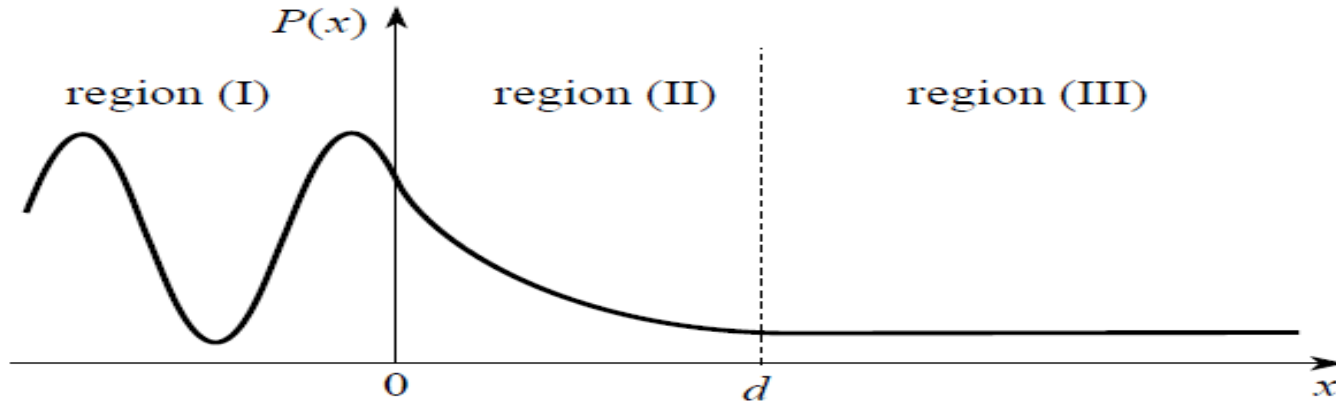
یک آزمایش ساده که صحت تونل زنی کوانتومی را نشان می دهد، قرار دادن یک الکترون در یک جعبه می باشد. در حالت معمول الکترون آنقدر انرژی ندارد که از دیوارهای جعبه عبور کند. اگر فیزیک کلاسیک درست باشد، آنگاه الکترون هیچ گاه قادر به ترک جعبه نخواهد بود. ولی بر طبق تئوری کوانتوم، موج احتمال الکترون از جعبه گذشته و به دنیای بیرون نفوذ خواهد کرد.

این نفوذ از دیواره را می توان به طور دقیق توسط معادله موج شرودینگر محاسبه کرد. یعنی یک احتمال هر چند ناچیز وجود دارد که الکترون در جایی بیرون از جعبه وجود داشته باشد.

به بیان دیگر، احتمال مشخص ولی اندکی وجود دارد که الکترون از مانع تونل زنی کرده و از جعبه بگذرد. هنگامی که در آزمایشگاه سرعت تونل زنی الکترون ها از این موانع را اندازه می گیریم، نتایج بطور دقیق با تئوری کوانتوم مطابقت دارند.

حال یک وضعیت تونل زنی را در نظر می گیریم. در شکل زیر سه ناحیه نشان داده شده است. ناحیه I که یک ذره با انرژی E با سد پتانسیل برخورد می کند. ما علاقه مند به کسری از موج وابسته به ذره هستیم که از میان ناحیه II به ناحیه III تونل می زند. همچنین به آن کسری از موج وابسته به ذره که بازتاب می یابد.





شکل بالا تابع چگالی ذره $p(x)$ را در نزدیکی سد پتانسیلی به ارتفاع V

نشان می دهد. سه ویژگی مهم در این شکل عبارتند از:

- الگوی تداخلی به علت امواج فرودی و بازگشتی (ناحیه I)
- افت نمایی در داخل سد (ناحیه II) هرگاه $E \leq V_0$ ، در غیر اینصورت رفتار تابع، نوسانی خواهد بود.
- چگالی ثابت بیرون سد (ناحیه III)

در ناحیه I یعنی $x < 0$ که در آن $V=0$ است، معادله شرودینگر بصورت زیر نوشته می شود:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(x) \right) \Psi_1(x) = E \psi_1(x)$$

که جواب آن بصورت زیر داده می شود:

$$\psi_1(x) = A e^{ik_1x} + B e^{-ik_1x}$$

$$k_1^2 = 2m^*E / \hbar^2 \quad \text{در آن داریم}$$

در ناحیه II یعنی $(0 \leq x \leq L)$ که در آن $V=V_0$ است، معادله شرودینگر بصورت زیر نوشته می شود:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(x) \right) \Psi_2(x) = E \psi_2(x)$$

که جواب آن بصورت زیر داده می شود:

$$\psi_2(x) = C e^{\alpha_2x} + D e^{-\alpha_2x}$$

که در آن $\alpha_2^2 = 2m^*(E-V_0) / \hbar^2$ می باشد. ¹³

در ناحیه III یعنی $x > L$ که در آن $V=0$ است، معادله شرودینگر بصورت زیر نوشته می شود:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(x) \right) \Psi_3(x) = E \psi_3(x)$$

که جواب آن بصورت زیر داده می شود:

$$\psi_3(x) = F e^{ik_1(x - L)}$$

که در آن $k_3^2 = 2m^*E / \hbar^2 = k_1^2$ می باشد.

از آنجائیکه نیازی به استفاده از اندیس های زیرین برای α و k نیست، روابط سه گانه فوق بصورت زیر بازنویسی می شوند:

$$\psi_1(x) = A \exp(ikx) + B \exp(-ikx)$$

$$\psi_2(x) = C \exp(\alpha x) + D \exp(-\alpha x)$$

$$\psi_3(x) = F \exp [ik(x - L)]$$

از آنجائیکه چگالی احتمال در ناحیه سوم ثابت می باشد، احتمال یافتن الکترون در این ناحیه در همه جا یکسان است. با اعمال شرایط مرزی زیر، چهار معادله بدست می آید. البته در ابتدا به نظر می رسد که 4 معادله داریم و 5 مجهول! اما با توجه به اینکه هدف یافتن نسبت دامنه عبور، یعنی F/A می باشد، بنابراین با حذف سه مجهول B ، C و D نسبت مورد نظر بدست خواهد آمد.

$$\psi_1(0) = \psi_2(0) \quad A + B = C + D$$

$$\psi'_1(0) = \psi'_2(0) \quad ikA - ikB = \alpha C - \alpha D$$

$$\psi_2(L) = \psi_3(L) \quad C \exp(\alpha L) + D \exp(-\alpha L) = F$$

$$\psi'_2(L) = \psi'_3(L) \quad \alpha C \exp(\alpha L) - \alpha D \exp(-\alpha L) = ikF$$

با انجام عملیات جبری رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{F}{A} = \frac{i4\alpha k}{\exp(-\alpha L) (\alpha + ik)^2 - \exp(\alpha L) (\alpha - ik)^2}$$

در مسائل مربوط به سد پتانسیل می توان فرض زیر را در نظر گرفت:

$$\exp(\alpha L) \gg \exp(-\alpha L)$$

به این ترتیب نسبت F/A به صورت تقریبی زیر بدست می آید:

$$\frac{F}{A} \approx \frac{(-i4\alpha k) \exp(-\alpha L)}{(\alpha - ik)^2}$$

احتمال تونل زنی بصورت زیر تعریف می شود:

$$T = \frac{k_3 |F|^2}{k_1 |A|^2} = \frac{|F|^2}{|A|^2} = \frac{(4\alpha k)^2 \exp(-2\alpha L)}{(k^2 + \alpha^2)^2}$$

پس:

$$T = \frac{(4\alpha k)^2 \exp(-2\alpha L)}{(k^2 + \alpha^2)^2}$$

این رابطه را می توان با نوشتن k و α بر حسب انرژی بصورت زیر نوشت:

$$T = \frac{16E(U_o - E)}{U_o^2} \exp(-2\alpha L)$$

مثال ۱: الکترونی با انرژی 1 eV به سد انرژی به ارتفاع 1.5 eV برخورد می کند. عرض سد 0.5 nm است. احتمال اینکه الکترون از میان آن سد تونل بزند را حساب کنید. ($m = 9.11 \times 10^{-31}\text{ kg}$ و $\hbar = 1.055 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$)

حل: با توجه به انرژی های داده شده می توان بدست آورد:

$$\frac{16E(U_0 - E)}{U_0^2} = \frac{16(1\text{ eV})(1.5\text{ eV} - 1\text{ eV})}{(1.5\text{ eV})^2} = 3.56$$

$$\alpha L = \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}} L$$

$$= \sqrt{\frac{2(9.11 \times 10^{-31}\text{ kg})(1.5\text{ eV} - 1\text{ eV})(1.6 \times 10^{-19}\text{ J/eV})}{(1.055 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s})^2}} (0.5 \times 10^{-9}\text{ m}) = 1.81$$

$$T = 3.56 \exp[-2(1.81)] = 0.0955$$

کاربردها

تونل زنی در سدهایی با ضخامت حدود ۳-۱ نانومتر و کمتر اتفاق می افتد و دلیل بسیاری از پدیده‌های فیزیکی ماکروسکوپی است.

واپاشی رادیواکتیو

واپاشی رادیواکتیو عبارت است از انتشار ذرات و انرژی از هسته ناپایدار یک اتم برای تشکیل یک حالت پایدار. این پدیده در اثر تونل زنی کوانتومی ذره خارج از هسته انجام می‌شود (تونل زنی ذره درون هسته جاذبه الکترون است)، که اولین کاربرد تونل زنی کوانتومی بود.

گسیل سرد

گسیل سرد الکترون ها مربوط به فیزیک نیمرساناها و ابر
رساناهاست. این پدیده شبیه پدیده گرمایونی است.

اتصال تونلی

یک سد ساده را می‌توان با استفاده از دو رسانا و یک عایق نازک ایجاد کرد، که اتصال تونل هستند و مطالعه آن نیازمند تونل زنی کوانتومی است. اتصالات جوزفسون از تونل زنی کوانتومی و ابررسانایی تعدادی نیمرسانا بهره گرفته تا اثر جوزفسون را تولید کند. این اثر در اندازه‌گیری دقیق ولتاژ و میدان مغناطیسی مثل سلول‌های خورشیدی چند اتصالی، کاربرد دارد.

دیود تونلی

دیودها قطعات نیمرسانای الکترونیکی هستند که این امکان را به جریان می‌دهند که در یک جهت بیشتر از بقیه برقرار شوند. سازوکار این قطعه وابسته به ناحیه تهی، بین نیمرسانای نوع n و نوع p می‌باشد. وقتی اینها کاملاً پر شوند، ناحیه تهی می‌تواند به قدر کافی برای تونل زدن باریک شود. پس از آن اگر بایاس مستقیم کمی اعمال شود جریان حاصل از تونل زنی بسیار قابل توجه خواهد بود.

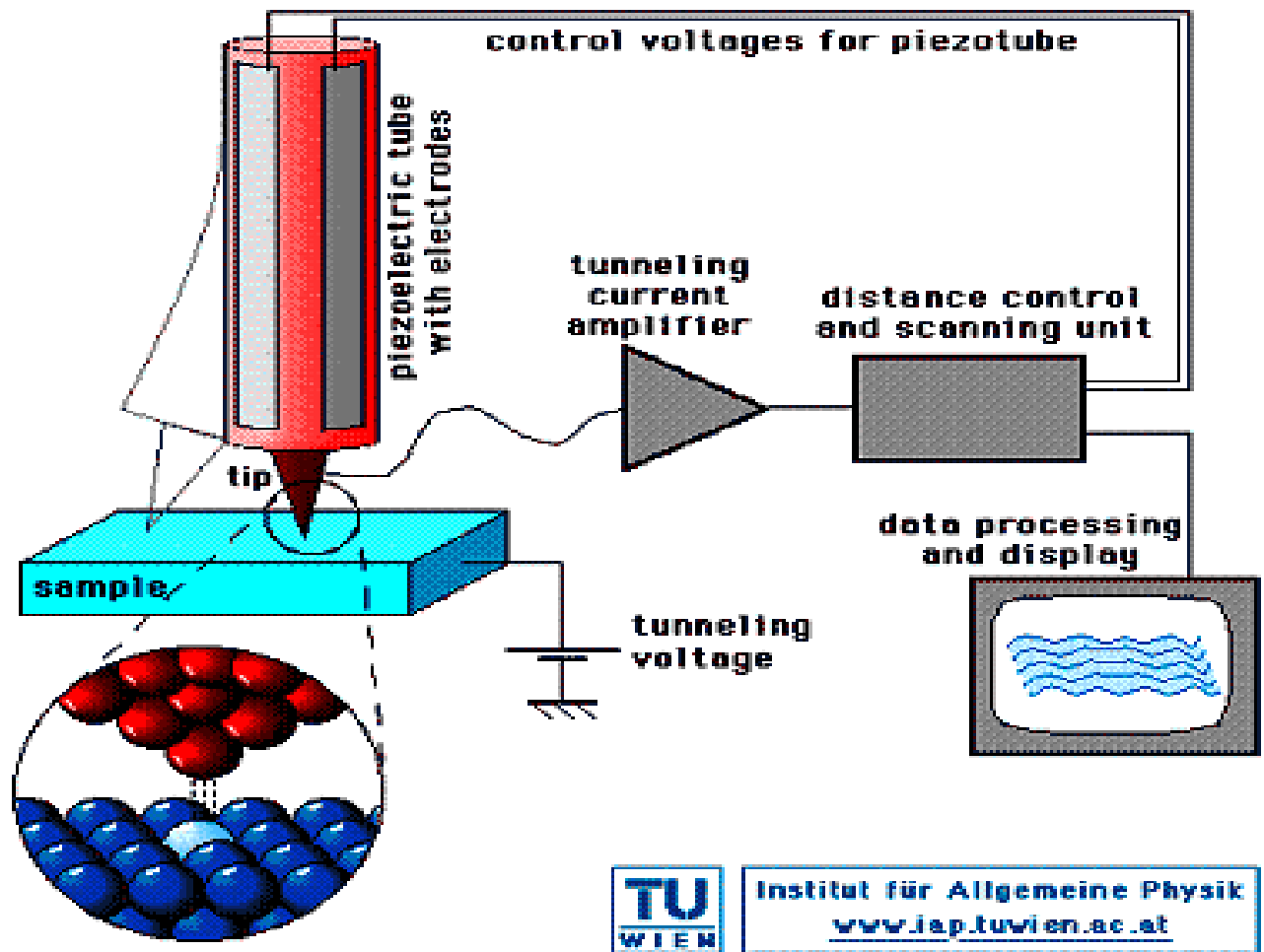
میکروسکوپ تونلی روبشی scanning tunneling microscope (STM)

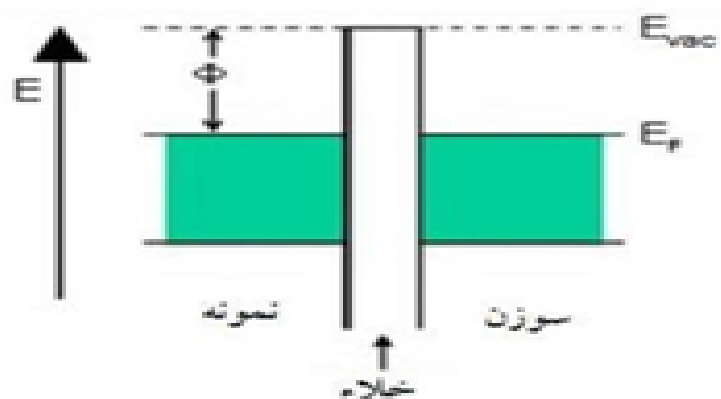
اصل تونل زنی الکترون ابتدا توسط ایوار گیور (Ivar Giaever) برنده جایزه نوبل ۱۹۷۳، مطرح شد. او چنین تصور کرد که اگر یک اختلاف پتانسیل به دو فلزی که توسط یک فیلم نازک عایق از هم جدا شده اند، اعمال شود، بدلیل توانایی نفوذ الکترون در سد پتانسیل موجود، جریانی ایجاد خواهد شد. برای اینکه محاسبه جریان تونلی ایجاد شده، امکان پذیر باشد، دو فلز نمی بایست بیش از ۱۰ نانومتر از هم فاصله داشته باشند.

بطور کلی جریان تونلی یک اثر مکانیک کوانتوم
با دو اثر مهم برای STM است:

اول: این جریان بین دو الکتروود، حتی از میان لایه
نازکی از عایق یا شکاف نازکی از خلاء برقرار
می شود.

دوم: این جریان در مقیاس طول در حد شعاع یک
اتم، افت می کند.



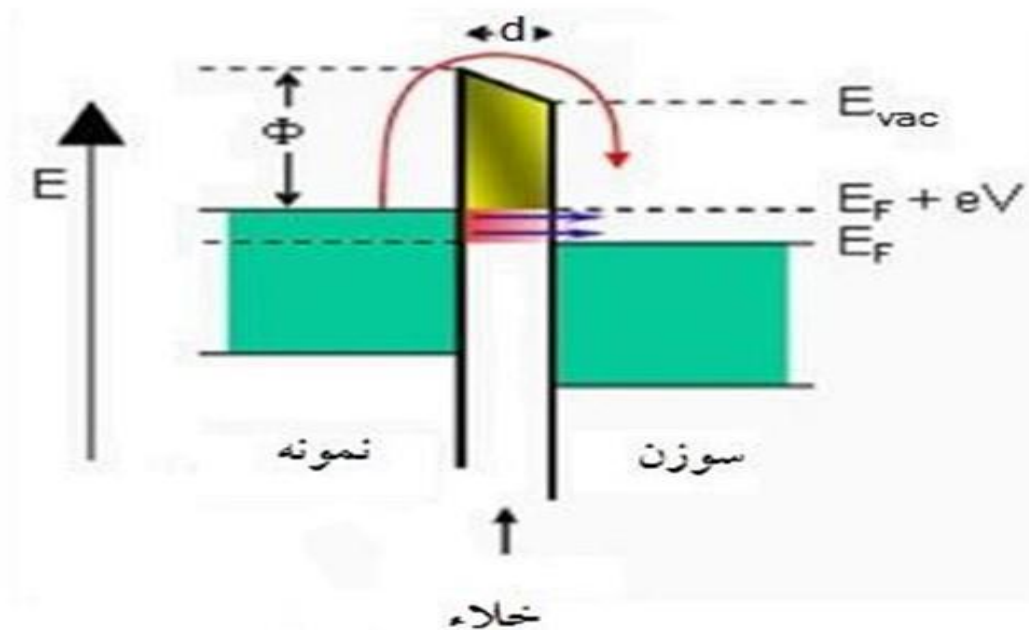


شکل موقعیت یک سوزن و نمونه را در هنگامیکه در مجاورت یکدیگر قرار دارند، نشان می دهد. بین این سطوح، تنها ناحیه باریکی از فضا

وجود دارد، اما هیچ ارتباط و رسانشی بین آنها ایجاد نمی شود. الکترون ها برای حرکت از نمونه به سوزن و یا برعکس، هنوز به انرژی افزونتری (بالتر از انرژی فرمی) نیاز دارند. بر اساس مکانیک کوانتوم طبق فرآیند تونل زنی، الکترون ها می توانند از میان سد موجود عبور کنند.

در **STM** ، سد توسط شکاف خلاء بین نمونه و سوزن ایجاد می شود.

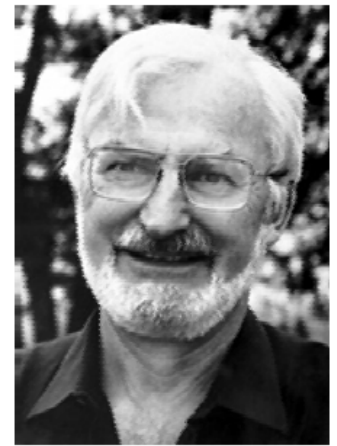
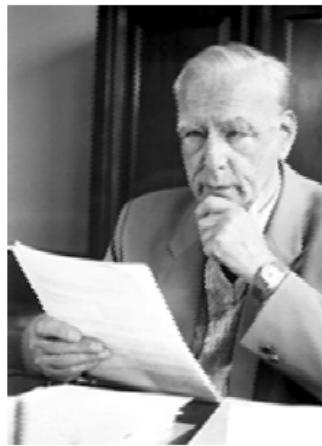
مطابق شکل زیر، زمانیکه یک ولتاژ الکتریکی V ، بین نمونه و سوزن اعمال می شود، پدیده تونل زنی منجر به ایجاد جریانی الکتریکی موسوم به «جریان تونلی» می گردد.



Nobel Prize in Physics (1986)

"for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope"

"for their design of the scanning tunneling microscope"



Ernst Ruska

1/2 of the prize

Federal Republic of Germany

Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft

Gerd Binnig

1/4 of the prize

Federal Republic of Germany

IBM Zurich Research Laboratory

Heinrich Rohrer

1/4 of the prize

Switzerland

IBM Zurich Research Laboratory

برخی کاربردهای دیگر تونل زنی کوانتومی

حوزه الکترونیک حالت جامد:

- فناوری اتصال کوانتومی

- دیودهای تونلی

- Flash Memory

- MOSFET

حوزه پزشکی:

- رادیوتراپی

- تشخیص به کمک رادیواکتیو

علوم بیولوژی:

- تزریق رنگهای رادیواکتیو در حشرات جهت ردیابی اثر آن ها

مردم شناسی:

- تعیین سن اشیاء

علوم ساخت:

- ردیاب های رادیواکتیو برای ردیابی عیوب

قطعات ماشین

