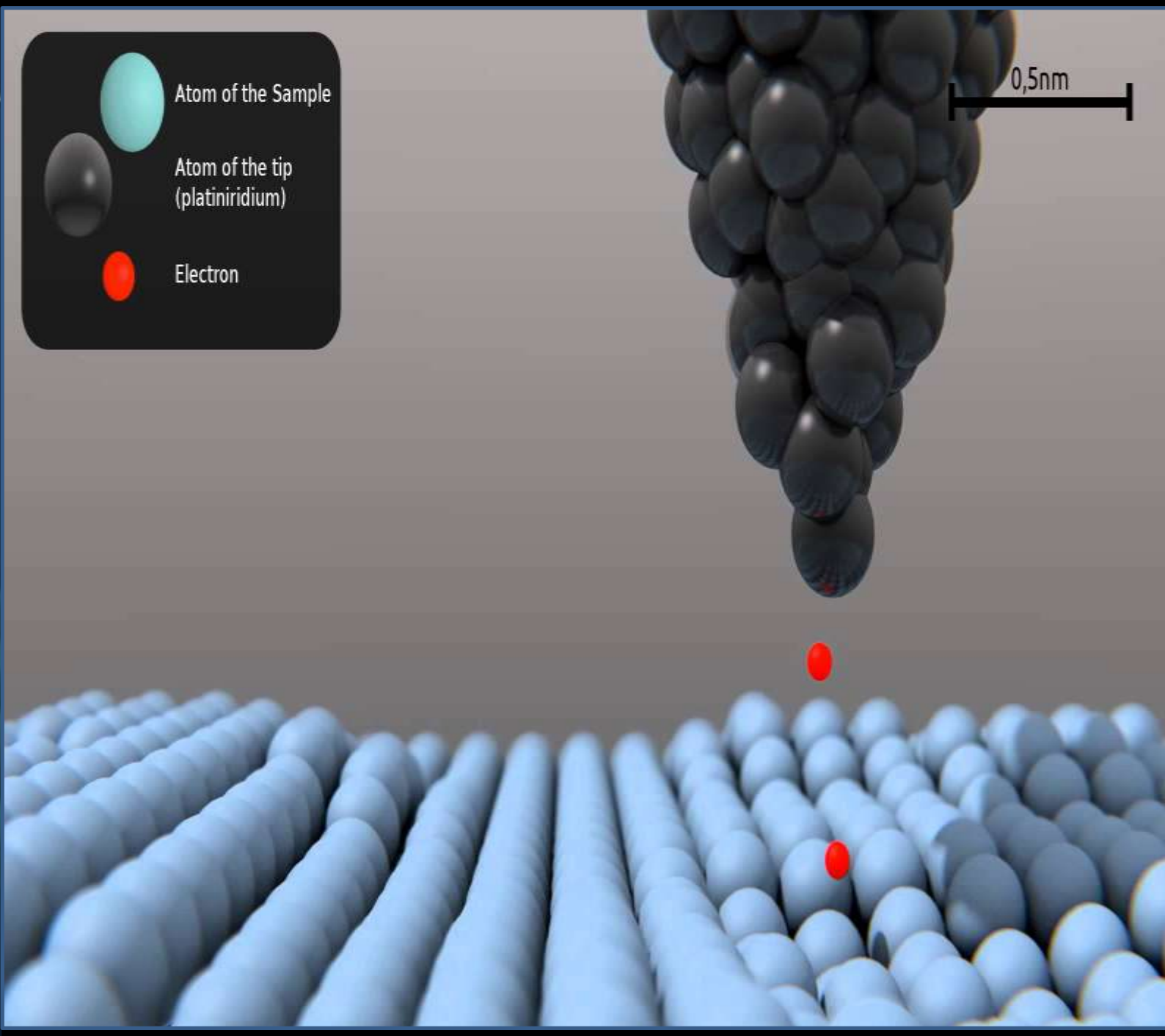
أدوات التعامل مع العالم النانوي:

جهاز STM



م. فـؤاد نـمر عجيل

العراق – جامعة ذي قار – كلية العلوم

2017 - 2016

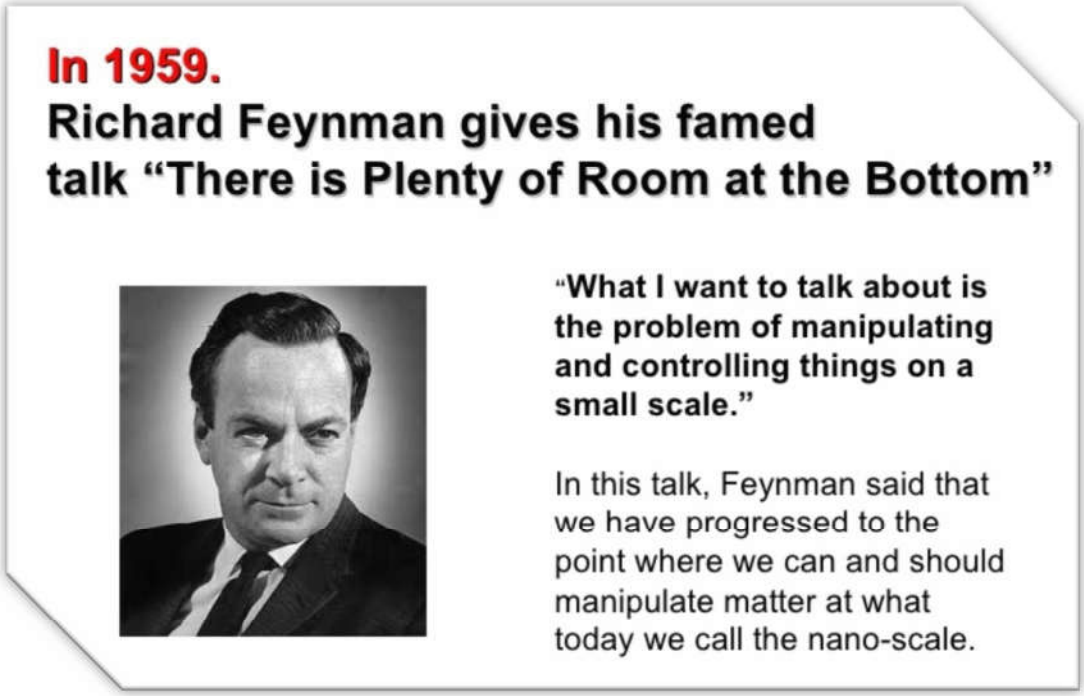
المقدمة

أن ثورة تقنية النانو تدين في تقدمها الى التطور الكبير الذي حدث في تقنيات وتطبيقات الميكروسكوبات النانوية، والتي أدت الى أمكانية تصوير ودراسة الذرات والجزيئات وفتحت مجالاً جديداً وهو إمكانية معالجة الذرات والجزيئات الاحادية بتحديد مواضعها وتحريكها ونقلها الى المواقع المطلوبة. لذا فان مدى تطبيقات هذه الاجهزة يفتح آفاق علمية وتقنية واسعة للدخول والتعامل مع العالم النانوي. وان محاولة استكشاف وفهم مثل هذه العمليات الدقيقة والمعقدة تجعل من تقنيات وتطبيقات هذه الاجهزة مشروع صعب جداً ومسعى مثير للاهتمام على حد سواء.

ويمكن تصنيف الميكروسكوبات النانوية بشكل عام الى ميكروسكوبات المجسات الماسحة (SPM) ومنها الميكروسكوب النفقي الماسح (STM) وميكروسكوب القوة الذرية (AFM)، والميكروسكوبات الإلكترونية (EM) ومنها الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) والميكروسكوب الالكتروني النافذ (TEM). وسنتناول في هذا الكتاب الميكروسكوب الاول وهو جهاز STM. ولإعطاء فكرة واضحة وبطريقة مبسطة حول هذا الجهاز بيّنا اجزاءه وتركيبه ومبدأ عمله، ثم تطرقنا الى اهم تطبيقاته في تقنية النانو. ومن خلال هذا الكتاب نجد بان هذه الاجهزة الدقيقة تمكننا من السفر الى عالم الذرات لتصبح بذلك أيدينا وعُيونُنا التي تصل الى العالم النانوي وتتعامل معه.

1- تحقق النبوءة: هناك متسع كبير في القاع

ما يقارب سبع وخمسون سنة في طريقها للمضي على مقولة العالم الفيزيائي الشهير البروفسور ريتشارد فينمان (Richard Feynman) بأن **"هناك متسع كبير في القاع There is plenty of room at the bottom "** التي كانت عنواناً لمحاضرته التاريخية حول مستقبل التقنية والتي القاها في حفل أقامته الجمعية الأمريكية للفيزياء في شهر ديسمبر عام 1959، وفي حظور كوكبة من علماء الفيزياء الذين أتوا خصيصاً لحظور تلك الاحتفالية المقامة تكريماً له ولمجمل أعماله الإبداعية الأصيلة في علوم ميكانيكا الكم التي نال عليها جائزه نوبل في الفيزياء عام 1965.



الشكل (1): مقطع من كلام العالم الفيزيائي Richard Feynman حول تقنية النانو عام 1959 في مجلة Scientific American .

وقد أبدع فينمان في محاضرته حيث اعطى تصوراً ثاقباً خلاقاً ينبئ عن إمكانية تغيير خواص أي مادة وتعظيم سماتها، وذلك عن طريق إعاده ترتيب ذراتها بالشكل الذي يمكننا من الحصول على تلك الخواص المتميزة والمختلفة تماماً عن سماتها الأصلية قبل أعادة هيكلتها.

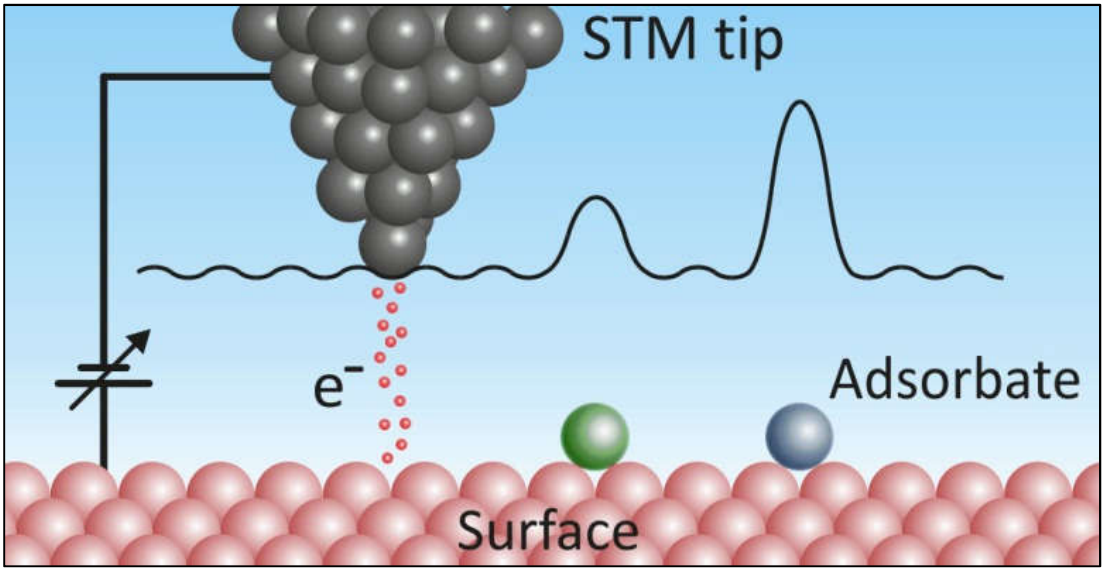
وقد أرجع إيمانه هذا إلى العلاقة المباشرة التي تربط بين بنية المادة وخواصها، سواء كانت هذه الخواص خواص كيميائية تتعلق بالنشاط الكيميائي مثلاً، أو خواص بصرية مثل اللون والشفافية، او خواص ميكانيكية مثل الصلابة والمرونة وغيرها. حيث تعتمد هذه الخواص على البنية الداخلية للمادة وأماكن وجود ذراتها وعددها بالشبيكة البلورية.

إن ما أشار اليه فينمان لم يتلق في حينه الترحيب المنتظر، حيث وصفت افكاره بأنها مجرد خيال علمي يتفوق فيه الجانب النظري على الواقع العملي. وقد استند العلماء آنذاك إلى ما انتهوا إليه من أن تحريك ذرات أي مادة (والتي تصل اطوال أقطارها إلى مادون النانومتر الواحد) يعد أمراً مستحيلاً، وذلك نظراً إلى عدم توفر الوسيلة أو الأداة بالغة الصغر التي نستطيع بواسطتها التقاط الذرات والتلاعب بها (Manipulatin) لتحريكها من مواضعها الأصلية الى مواضع أخرى، ثم دمجها مع ذرات لمواد أخرى لتكوين مركبات وشبكات بلورية من مواد نانوية الأبعاد متميزة الخواص عالية الأداة.

وربما أن البروفسور فينمان نفسه لم يكن يتوقع إنه بمحاضرته تلك قد أطلق الشرارة الأولى لتفجير ثورة القرن الحادي والعشرين التي لقبها العالم الياباني نوريو تانيغوتشي (Norio Taniguchi) في العام 1974 بلقب تقنية النانو (Nanotechnology) لتتوج بذلك كتقنية التصنيع الأولى للقرن الحادي والعشرين وكمعيار يقاس بة تقدم الأمم وتطورها.

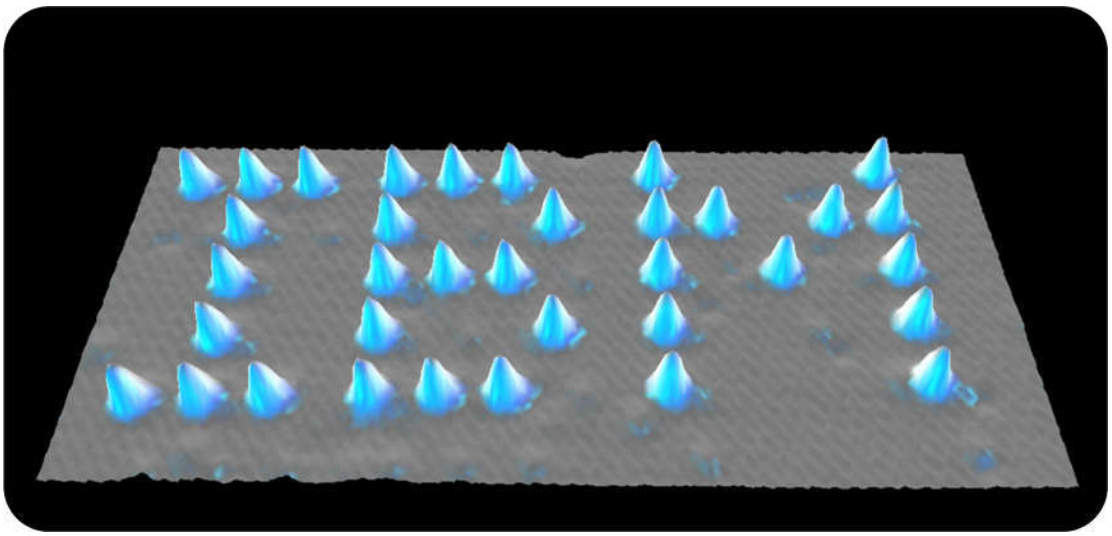
وقد تمكن العالمان الفيزيائيان (Heinrich Roher) وزميله (Gerd Binning) والعاملان بشركة IBM الأمريكية في العام 1981 من التوصل الى إختراع نوع جديد من المايكروسكوبات المعتمدة على المسح البحثي لذرات المادة وهو المايكروسكوب النفقي الماسح STM (Scanning Tunneling Microscopy)، حيث تمكنا به من التعامل المباشر مع الذرات الأحادية للمادة وتحديد أبعادها الثلاثية وذلك عن طريق إبرة (راس المجس tip) دقيقة التركيب والأداء زُود بها هذا المايكروسكوب تستطيع من خلال تطبيق شحنات الكترونية إستشعار الذرات الموجودة على السطوح الخارجية للعينة المُراد توصيفها وتحديد شكل وترتيب ذراتها كما في الشكل (2). ونُشر العمل كاملاً بعد ذلك في العام 1986 وحصلا على جائزة نوبل في الفيزياء في نفس العام لاختراعهما هذا المايكروسكوب.

إن هذا الإنجاز العلمي الكبير أثبت صحة نظرية فينمان خاصة بعد أن تمكن مجموعة من الباحثين بجهد بحثي ومختبري متواصل من نشر بحوث علمية في موضوع يتعلق بامكانية معالجات الذرات وتوظيفها لتطبيقات تقنية النانو.



الشكل (2): رسم توضيحي يبين الإبرة الألكترونية المزود بها المايكروسكوب النفقي الماسح STM والتي تحدد بواسطتها أشكال وأحجام الذرات للمواد المختلفة، وهذه الإبرة تستخدم كذلك في تحريك وترتيب ذرات المواد المختلفة وفقا للغرض المطلوب.

وكانت التجربة المثيرة الأولى من نوعها التي قام بها فريق بحثي بشركة IBM في العام 1989 حين وظفوا الإبرة الدقيقة الموجودة بالمايكروسوب النفقي الماسح STM لألتقاط ذرات عنصر الزينون الخامل وتحريكها بدقة متناهية لإعادة ترتيبها واحدة تلو الأخرى على سطح من فلز النيكل لتشكل معاً شعار الشركة مكتوباً بحروف ذرية وأبعاد نانوية كما في الشكل (3). و لعل نجاح هذه التجربة الرائدة قد فتح الباب لدخول عالم الذرات وعصر تقنية النانو والبدء في تصنيع أجهزة وأدوات لاتتجاوز أحجامها بضعة نانومترات ولتتحقق بذلك نبوءة فينمان وتتأكد نظريته المطروحة منذ عام 1959.



الشكل (3): شعار شركة IBM مكتوباً بـ 35 ذرة من عنصر الزينون المترسبة على سطح شريحة فلزية من النيكل.

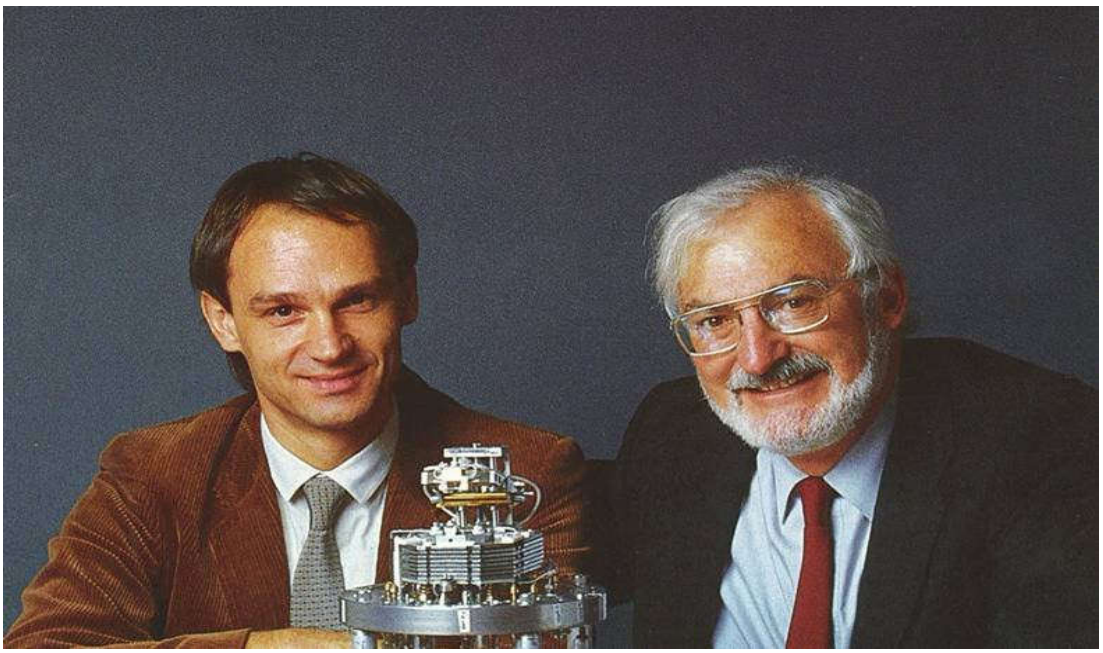
ولغرض تصنيع وتحضير المواد والتراكيب النانوية وايجاد التطبيقات المناسبة منها لتقنية النانو فأنه يفترض أن يعمل الباحث على وضع كل ذرة في الموقع الذي يرغب فيه للحصول على الخصائص المطلوبة. وهذه العمليات يمكن أن تتم عن طريق معالجة الذرات المفردة على سطوح المواد بأستخدام أجهزة المايكروسكوبات النانوية (مثل المايكروسكوب النفقي الماسح STM ومايكروسكوب القوة الذرية AFM) التي تتيح إمكانية فحص وبناء هذه المواد والتراكيب ذات المقياس النانوي، وأدت إلى تطور كبير في الدراسات العملية والنظرية المتعلقة بهذه التراكيب للعديد من المواد وفي مختلف المجالات العلمية والتطبيقية.

وفي بحثنا هذا سوف نتطرق إلى أحد أهم هذه المايكروسكوبات وهو المايكروسكوب النفقي الماسح (STM) الذي يعتبر الاداة الاولى في مجال معالجة الذرات والجزيئات في تقنية النانو.

2- الميكروسكوب النفقي الماسح

في بدايات القرن العشرين مع اكتشاف الفيزياء الحديثة والخاصية الثنائية للإشعاع الكهرومغناطيسي والجسيمات المادية ونظرية ميكانيك الكم التي تدرس الاجسام على المستوى الذري الدقيق اصبح بالإمكان تصميم ميكروسكوب يعمل على التكبير بدرجة عالية جداً تصل الى مئات الاف المرات معتمدة على استخدام موجة الالكترون، مثل الميكروسكوب الالكتروني. وتوالت الاكتشافات والتطور في اجهزة التكبير ليظهر لنا في بداية الثمانينات من القرن الماضي ميكروسكوب جديد من حيث فكرة عمله وامكانياته وقدراته واستخداماته المتنوعة واحدث ثورة في عالم التكبير والدخول الى عالم الذرات، هذا الجهاز هو الميكروسكوب النفقي الماسح (Scanning Tunneling Microscopy) ويرمز له اختصاراً بـ STM.

حيث يعتبر STM من الاجهزة الاساسية في تقنية النانو والذي ساعد في دراسة المواد على المستوى الذري وفي بناء وفحص التراكيب النانوية. ويعتبر جهاز STM اداة قوية للحصول على صور لسطوح المواد على المستوى الذري. حيث تم اختراع هذا الجهاز في العام 1981. وحصل مخترعي هذا الجهاز العالمين الالمانيين Gerd Binnig و Heinrich Rohrer في شركة IBMعلى جائزة نوبل في عام 1986 لاختراعهما هذا الجهاز الذي سمح لأول مرة برؤية الذرة وفي الابعاد الثلاثة، حيث يتمتع بقدرة تحليلية عالية تصل الى المستوى الذري.

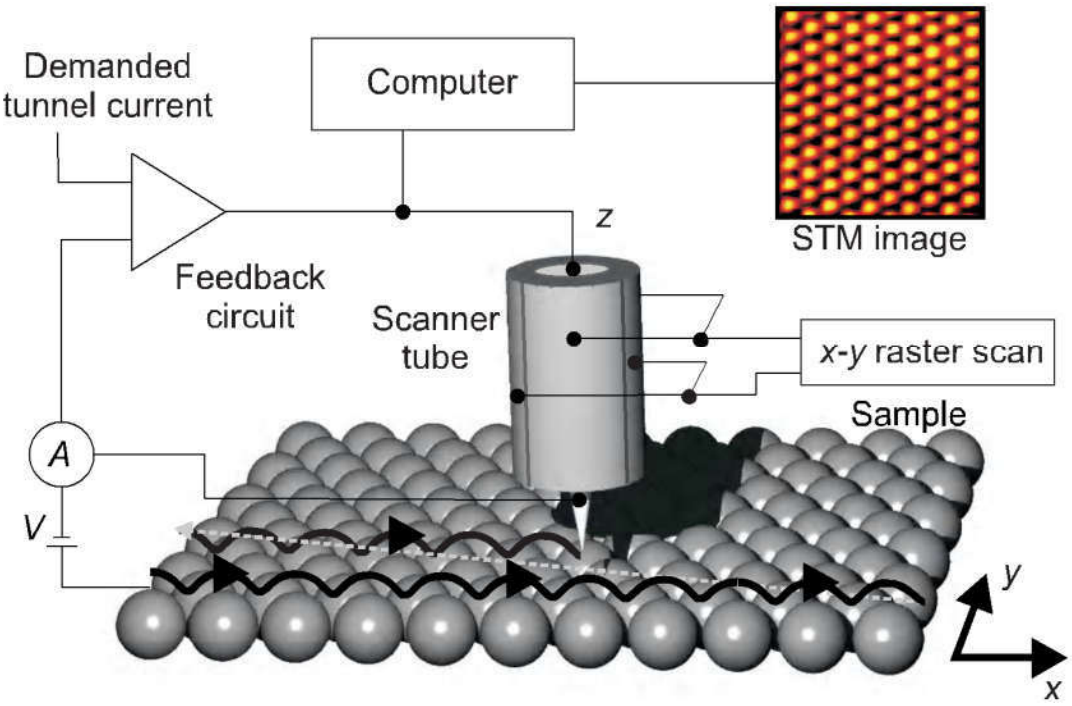


الشكل (4): صورة العالم Gerd Binnig على اليسار والعالم Heinrich Rohrer على اليمين في مختبرات شركة IBM عند تصميم اول جهاز STM في عام 1981.

3- تركيب الميكروسكوب النفقي الماسح

ان تركيب جهاز STM يحتوي على الابرة الدقيقة الالكترونية او المجس (tip) وماسح يعمل بالإجهاد الكهربائي (piezoelectric) للتحكم في الارتفاع وفي الابعاد السطحية x و y وجهاز التحكم في المسافة z بين مجس المسح وسطح العينة ، ونظام العزل من الاهتزازات ، وكمبيوتر.

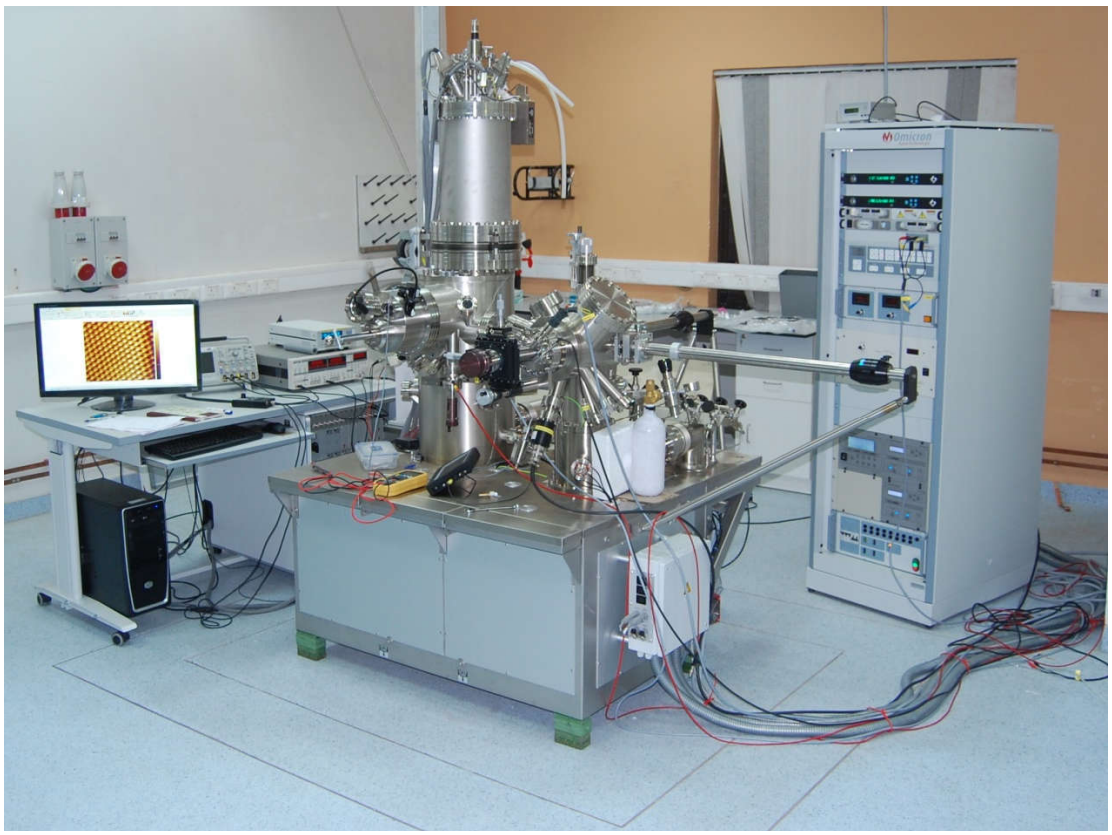
يتطلب تشغيل ميكروسكوب STM درجة عالية من النظافة والاستقرار لسطح العينة ولهذا يتم تشغيله في غرفة مفرغة من الهواء (vacuum chamber) ودرجة حرارة وضغط واطئين جداً. ويكون المجس حاد جداً بحيث يكون طرفه بسمك ذرة واحدة. ويتصل المجس بأجهزة تحكم دقيقة لتحريكه في الابعاد الثلاثة بالنسبة للعينة وتستخدم ايضاً الكترونيات متطورة لرصد التيار وترجمة التغيرات فيه الى صورة.



الشكل (5): مخطط توضيحي لتركيب ميكروسكوب STM .

ونتيجة التحسس العالي لتيار النفق الالكتروني للتغير الحاصل في ارتفاع راس المجس عن سطح العينة يجب عزل المجس عن الاهتزازات او تثبيت الجهاز على قاعدة صلبة للحصول على نتائج مفيدة، حيث استخدمت نوابض ميكانيكية او نوابض غازية.

وللحفاظ على موضع المجس بالنسبة للعينة وللتحكم في عملية مسح سطح العينة بالمجس والحصول على البيانات يتم استخدام كمبيوتر، الذي يستخدم ايضا لتحسين الصورة عن طريق برامج معالجة الصورة والقيام بالقياسات الكمية على العينة.



الشكل (6): صورة لمختبر الميكروسكوب النفقي الماسح STM.

4- مبدأ عمل الميكروسكوب النفقي الماسح

ان المعلومات التي نحصل عليها من ميكروسكوب STM هي مراقبة التغير في التيار النفقي عند مسح سطح العينة بالمجس وتعرض البيانات في شكل صورة. حيث تعتمد فكرة عمله على مبدأ النفق الكمي (quantum tunneling) ، فعندما يقترب رأس المجس (tip) من السطح المراد فحصه يسلط فرق جهد على المجس الماسح ليتحرك عمودياً باتجاه سطح العينة وعندما يصبح على بعد مسافة صغيرة جداً (عدة انكستروومات) من سطح العينة يتوقف المجس.

تبدأ بعد ذلك مرحلة التحكم الدقيق في حركة المجس في الابعاد الثلاثة بالقرب من العينة ويستخدم الإجهاد الكهربائي (piezoelectric) للحفاظ على ثبات المسافة بين

المجس والعينة والتي تكون بحدود 4 الى 7 Å التي تمثل مسافة الاتزان. وتكون هذه المسافة لتفاعلات التجاذب بحدود 3 الى 10 Å ولتفاعلات التنافر اقل من 3 Å . في هذه الحالة يعمل فرق الجهد المسلط على دفع الالكترونات للتحرك النفقي بين رأس المجس والعينة مما ينتج عنها تيار نفقي يمكن قياسه. وعند تغيير موضع رأس المجس بالنسبة لسطح العينة ترصد التغيرات في التيار النفقي الناتج.

ان التحليل الموضعي العالي لميكروسكوب STM ناتج عن كون تيار النفق الالكتروني يتغير أسياً مع المسافة الفاصلة بين رأس المجس وسطح العينة، هذه المسافة تتغير نتيجة اختلاف تضاريس سطح العينة. حيث يكون مقدار التغير في التيار كبيراً جداً مع تغير المسافة انكستروم واحد فقط وبذلك يكون مستوى التحليل للميكروسكوب يصل الى ما دون المستوى الذري.

5- عملية النفق الالكتروني في الميكروسكوب النفقي الماسح

تعتبر ظاهرة النفق الكمي من الظواهر المهمة والعجيبة التي اسهمت في تطوير الميكانيك الكمي، حيث ان هذه الظاهرة لا يمكن تفسيرها الا باستخدام قوانين الفيزياء الكمية. ويمكن توضيح ذلك حسب العمليات التالية:

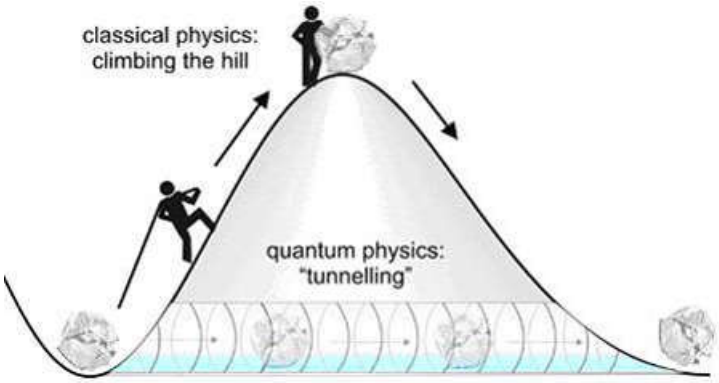
اولاً : اذا كان هنالك جسيم يسير بسرعة معينة باتجاه حاجز جهد وكان هذا الجسيم يمتلك مقدار من الطاقة. في البداية نفترض ان طاقة الجسيم اقل من طاقة حاجز الجهد ففي الميكانيك الكلاسيكي لا يمكن للجسيم عبور الحاجز او اختراقه اما في الميكانيك الكمي فتوجد احتمالية لعبور الجسيم.

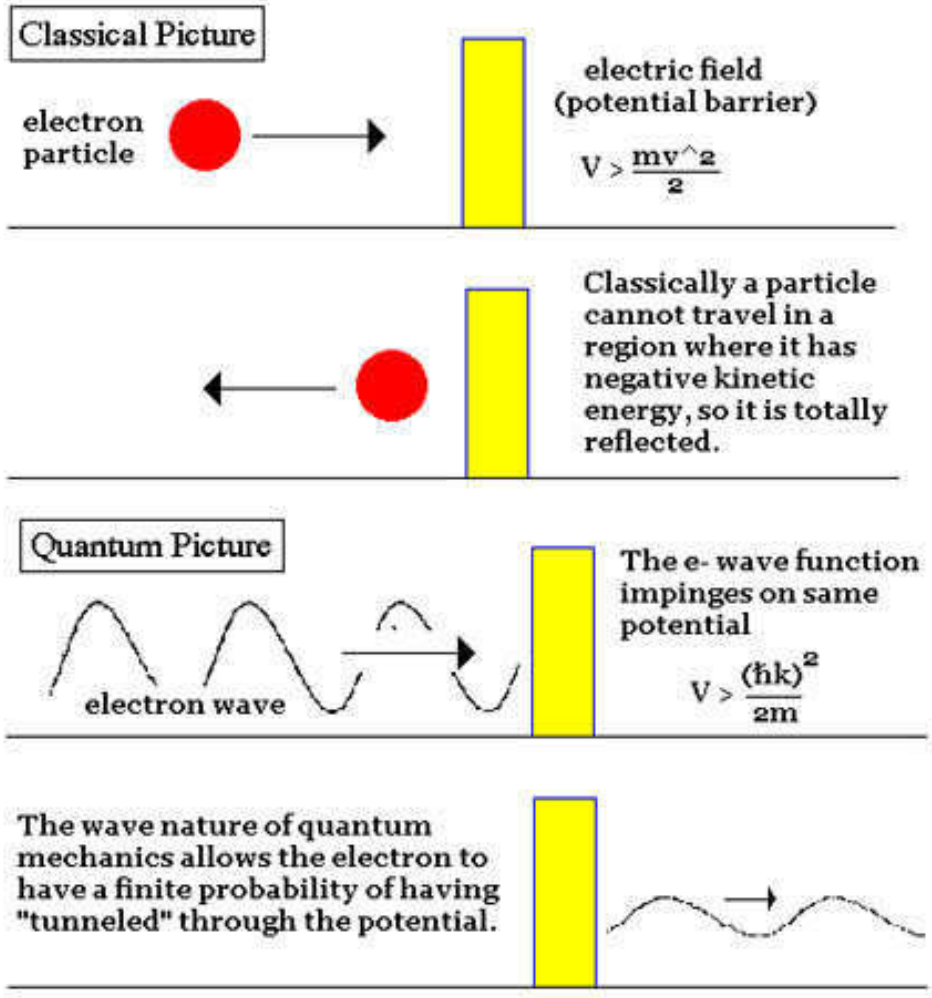
ومن الجدير بالذكر ان تمثيل الجسيم في الميكانيك الكمي هو على شكل دالة موجة فيمكن لهذه الموجة ان تخترق جزء قليل من الحاجز ثم تعود لترتد الى الخلف فتكون سعة الموجة الساقطة هي نفسها سعة الموجة المرتدة.

ثانياً : اذا كانت طاقة الجسيم اعلى من طاقة الحاجز ففي الميكانيك الكلاسيكي يمكن ان يعبر الجسيم حاجز الجهد. اما من وجهة نظر الميكانيك الكمي فان الجسيم سوف يعبر هذا الحاجز وسوف يرتد منه جزء قليل.

ثالثاً : اذا كان سمك حاجز الجهد قليل فيمكن للجسيم الذي تكون طاقة اقل من طاقة حاجز الجهد ان يخترق هذا الحاجز حسب قوانين الميكانيك الكمي. حيث يكون الاختراق داخل الحاجز عبارة عن اضمحلال اسي ويجب ان يصرف طاقة لكي يخترق حاجز الجهد، ففي البداية يسلك الجسيم سلوك موجي (موجة) وعند اختراقه الحاجز يسلك سلوك مادي (جسيم) وعند اختراقه حاجز الجهد من الجهة الاخرى يعود الى الحالة الموجية وهذه خاصية السلوك الثنائي للجسيم وهي احدى نجاحات الميكانيك الكمي.

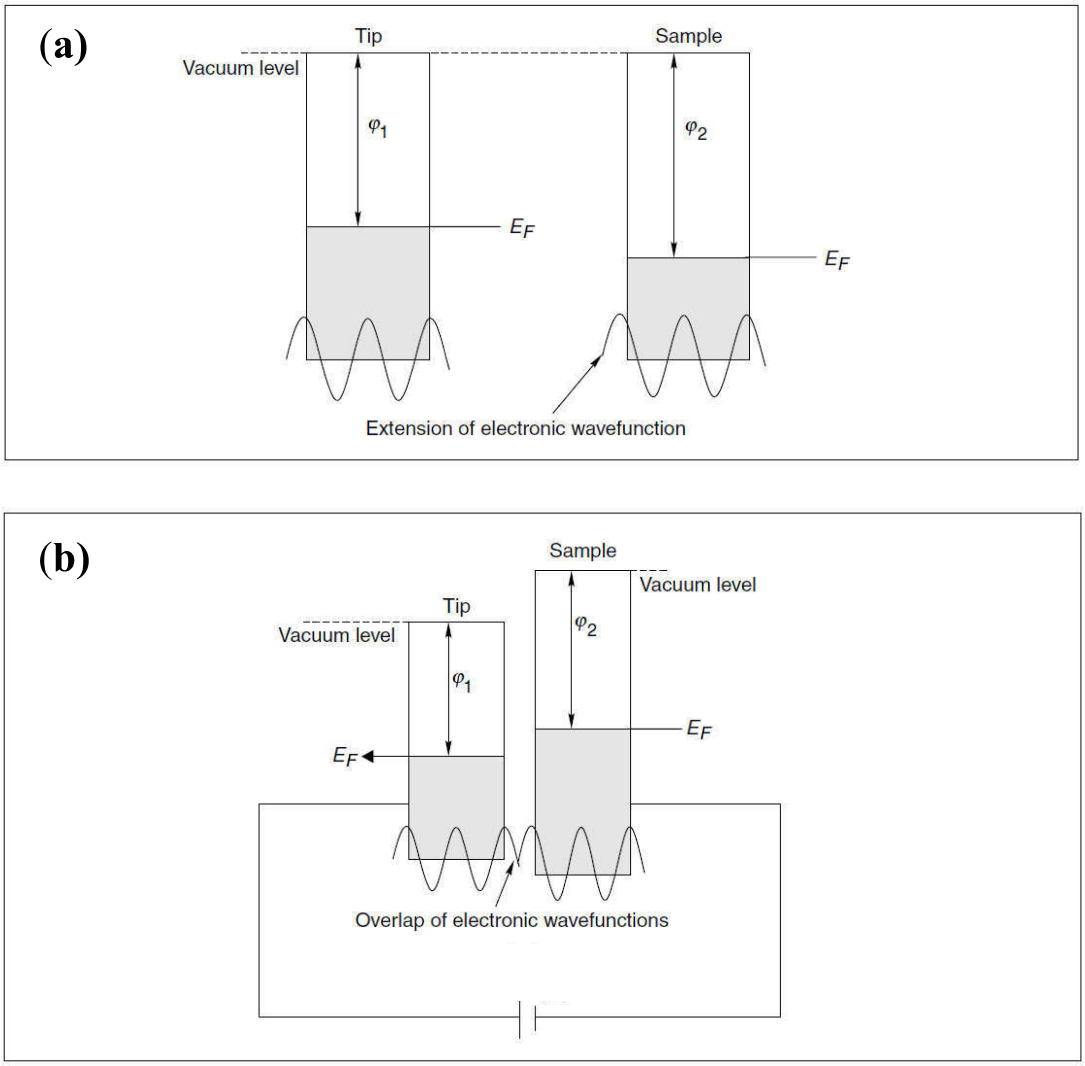
ومن الامثلة على ظاهرة النفق الكمي هي بعض الظواهر الطبيعية مثل النشاط الإشعاعي وانحلال جسيمات بيتا والفا، حيث لا يمكن لجسيمة الفا ان تنحل من النواة الا باستخدام ظاهرة النفق الكمي. وتستغل هذه الظاهرة عملياً في أجهزة الثنائي النفقي الذي يستخدم في الدوائر الالكترونية.





الشكل (7): مخطط توضيحي لظاهرة النفق الالكتروني في الميكانيك الكلاسيكي والميكانيك الكمي.

في ميكروسكوب STM، تستخدم ظاهرة النفق الإلكتروني للحصول على صور توضح طبوغرافية السطح. فعندما يقترب رأس المجس الموصل من السطح المراد فحصه فان دوالهما الموجية سوف تتداخل وعند تسليط فرق جهد بينهما فان هذا التداخل بينهما يسمح بمرور الالكترونات من خلال عملية النفق الكمي في الفراغ بينهما وبذلك يسري تيار يمكن ملاحظته وقياسه، انظر الشكل (8).



الشكل (8): (a) مستويات طاقة الإلكترون في العينة ورأس المجس قبل تسليط جهد الانحياز. (b) عندما يُقرّب رأس المجس من العينة يحصل تداخل في دوالهما الموجية الالكترونية عند المسافات الصغيرة جداً إذ يمكن ملاحظة تيار النفق.

6- تطبيقات الميكروسكوب النفقي الماسح

ان التطبيقات الواسعة والمهمة للميكروسكوب النفقي الماسح STM كانت السبب لمنح جائزة نوبل عام 1986 الى العالمين اللذين اكتشفا هذا الميكروسكوب. حيث أدى هذا الميكروسكوب إلى تقدم كبير في دراسة التراكيب النانوية، وذلك من خلال معرفة التركيب السطحي للمواد عن طريق المستوى العالي للتحليل غير المسبوق نتيجة ظاهرة النفق الكمي. حيث كان الأداة الأولى لتصوير الذرات المفردة في الفضاء الحقيقي. ومنذ بداية الثمانينات ولحد الآن، لازالت البحوث مستمرة بتحسين هذه التقنية وتطبيقها في عالم تقنية النانو.

استخدم جهاز STM في بداية الامر للتصوير، لكنه استخدم لاحقاً لاستكشاف الظواهر ذات المقياس الذري باستخدام التحليل الطيفي والمعالجة الذرية من خلال الكترونات النفق المنبعثة من راس مجس STM التي يمكن ان تستخدم كمصدر بمقياس ذري لعمل اثارات الكترونية واهتزازية ولتنفيذ معالجة الجسيمات الملتصقة بطريقة يمكن التحكم بها على سطوح المواد.

ونتيجة الطيف الواسع من تطبيقات ميكروسكوب STM وهي: التصوير (Imaging)، التحليل الطيفي (Spectroscopy)، والمعالجة (Manipulation) جعلته أداة مثالية للتواصل مع عالم النانو. وهذا الطيف الواسع من التطبيقات كان نتيجة تكيّف جهاز STM للعمل في بيئات مختلفة مثل الهواء، السوائل، والتفريغ العالي جداً (UHV)، وفي مدى درجات حرارة واسع.

اولاً: التصوير باستخدام الميكروسكوب النفقي الماسح

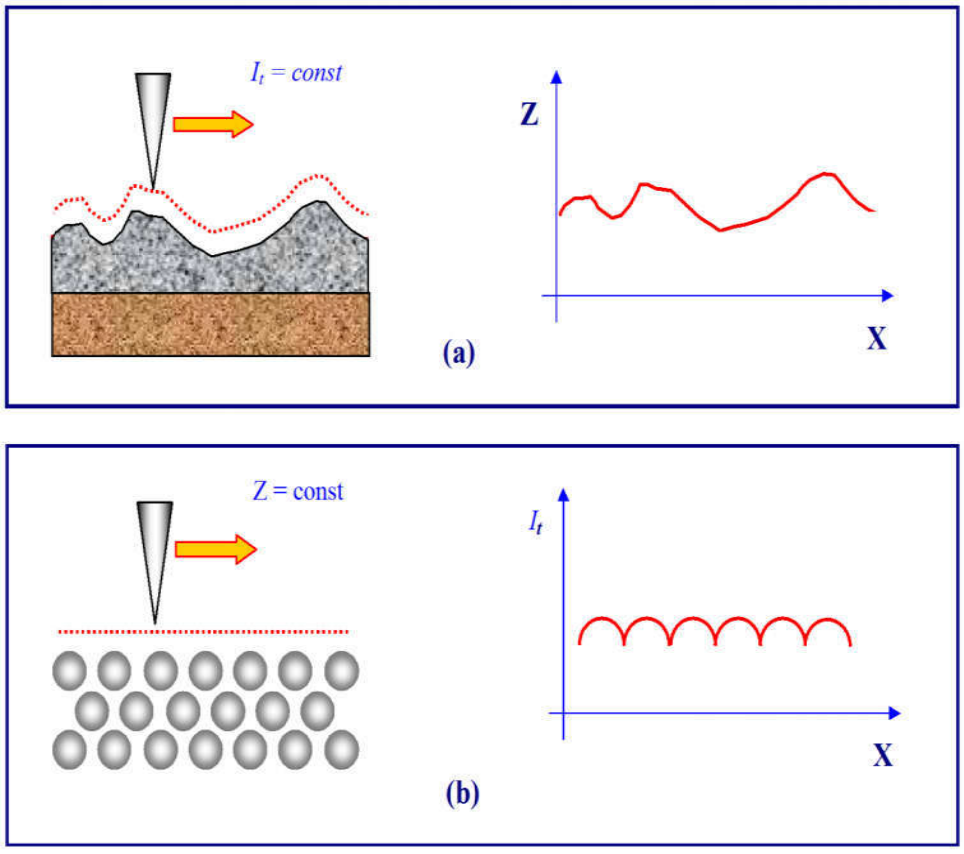
اذا تحرك رأس المجس عبر العينة في المستوى x-y، فان التغيرات في ارتفاع السطح وكثافته تحدث تغيرات في التيار النفقي. هذه التغيرات يتم رصدها ورسمها في شكل صورة طبوغرافية (Topography). ويمكن ان تتم عملية رسم الصورة الطبوغرافية اما عن طريق جعل التيار النفقي ثابت ورصد التغير في ارتفاع راس المجس z من خلال تغير تضاريس سطح العينة، او عن طريق جعل الارتفاع ثابت بين رأس المجس والسطح وقياس التغيرات في التيار النفقي. ولذلك هنالك نمطين لتشغيل جهاز STM للحصول على الصور الطبوغرافية لسطح العينة هما:

1- نمط التيار الثابت (Constant Current Mode):

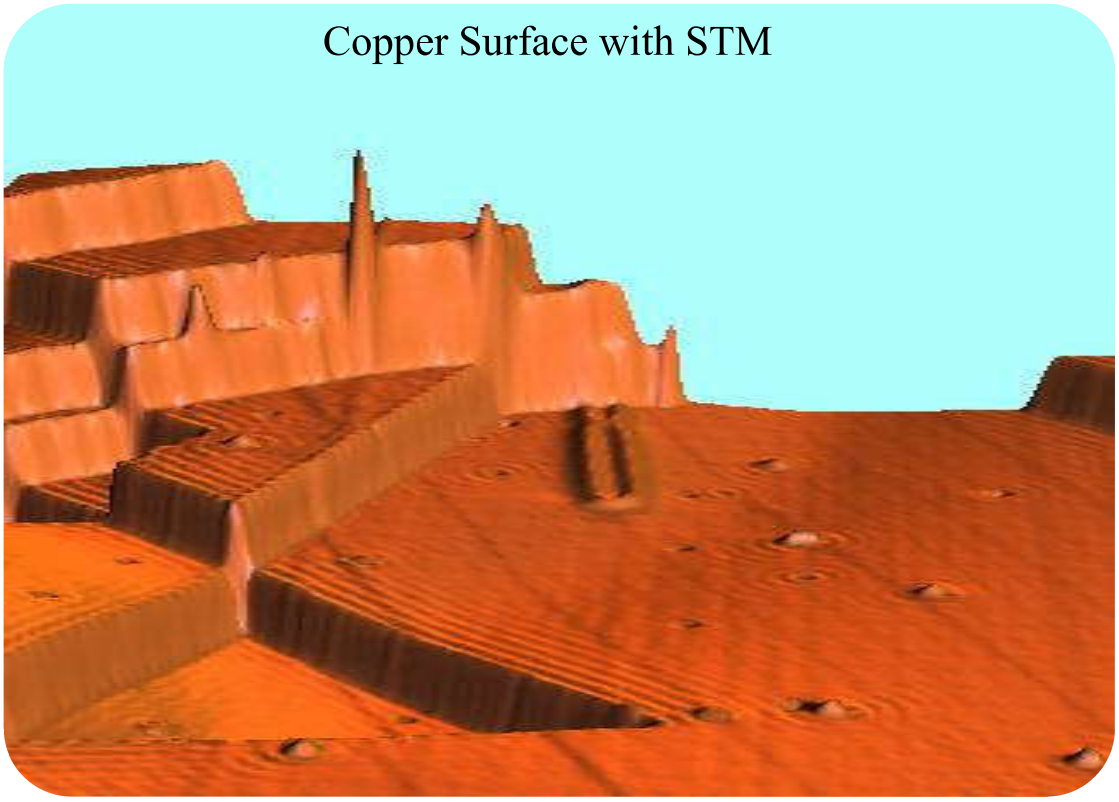
في هذا النمط يمسح رأس المجس سطح العينة مع ابقاء قيمة تيار النفق ثابتة دائماً عن طريق نظام التغذية الاسترجاعية الذي يعدل ارتفاع رأس المجس عن السطح، لذلك فان ارتفاع رأس المجس كدالة للموقع يمثل صورة طبوغرافية تعكس كثافة الحالات الموضعية لسطح العينة. هذا النمط من التشغيل يكون مفيداً للسطوح الخشنة والسطوح غير معروفة التضاريس ويكون اكثر دقة في التحليل العمودي لتضاريس السطح، انظر الشكل (9،a).

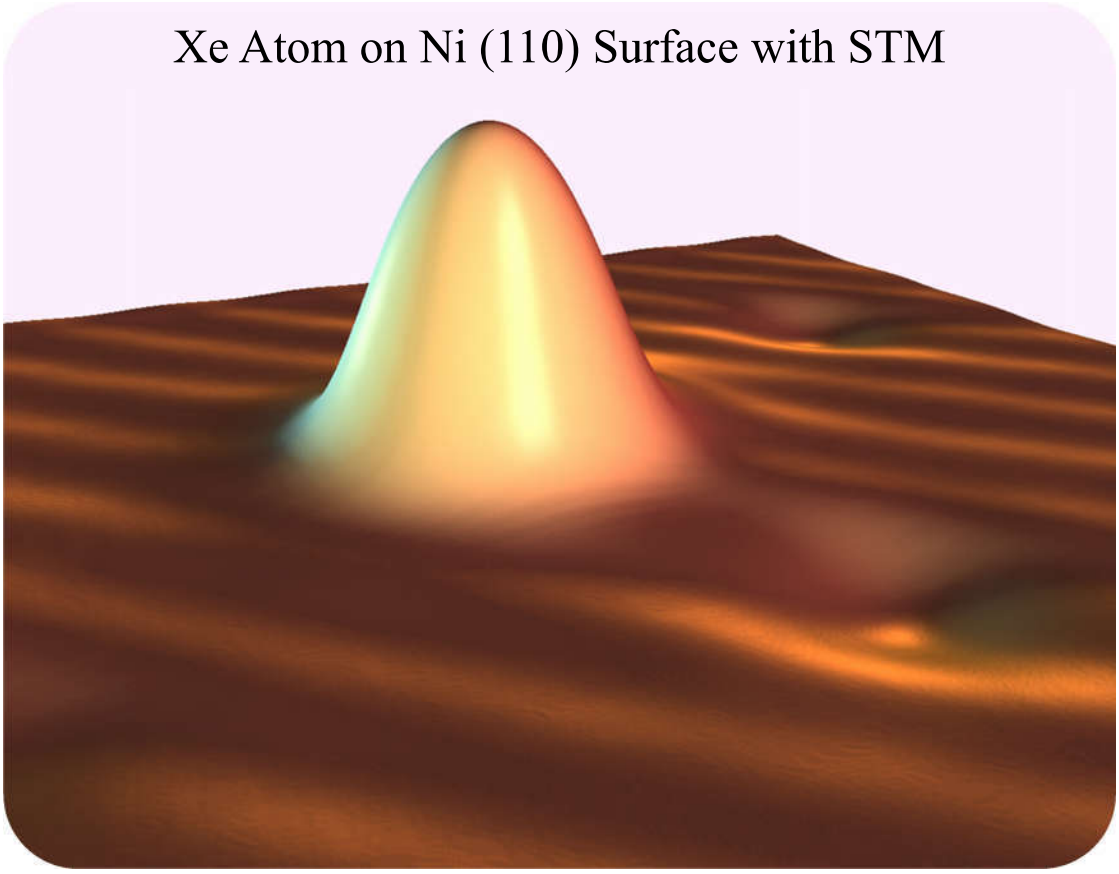
2- نمط الارتفاع الثابت (Constant Height Mode):

في هذا النمط تبقى المسافة الفاصلة بين رأس المجس والسطح ثابتة. وعندما يمسح رأس المجس سطح العينة فان الصورة الطبوغرافية تتولد عن طريق تسجيل قيم التيار كدالة للموقع. هذا النمط من التشغيل مفيد للسطوح الناعمة التي لا تحوي على تموجات عالية للحفاظ على رأس المجس من التحطم. كذلك يمتاز هذا النمط بالسرعة العالية جداً لعملية المسح ومن ثم سرعة الحصول على الصور مما يتيح لنا إمكانية ملاحظة التغييرات الديناميكية التي تحدث عملياً على السطح في الوقت الحقيقي، لكنه اقل دقة في التحليل العمودي للسطح، انظر الشكل (9،b).



الشكل (9): مخططات توضيحية لانماط تشغيل ميكروسكوب STM لتوليد الصور الطبوغرافية لسطوح المواد. (a) نمط التيار الثابت. (b) نمط الارتفاع الثابت. حيث *I* يمثل تيار النفق، z ارتفاع رأس المجس عن السطح، و x المسافة الجانبية للسطح.





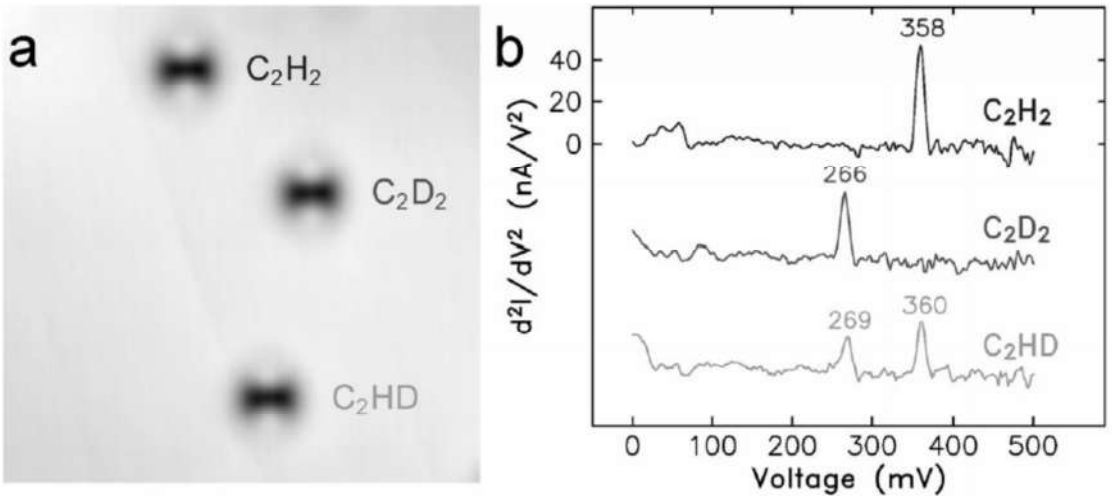
الشكل (10): بعض الصور المهمة المنجزة باستخدام ميكروسكوب STM.

ثانياً: التحليل الطيفي للميكروسكوب النفقي الماسح

بالإضافة الى عملية التصوير لسطح العينة فان المعلومات التي ترصد بواسطة الاجهزة الالكترونية تكون دالة في الموضع بالنسبة لسطح العينة وعند كل موضع على سطح العينة يتم جعل المسافة بين رأس المجس والسطح ثابتة ويقاس التغير في التيار مع فولتية الانحياز. وهذه القياسات تعرف باسم التحليل الطيفي للميكروسكوب النفقي الماسح ويرمز لها بالاختصار STS، وينتج عنها مخططات توضح كثافة المستويات كدالة في الطاقة داخل العينة.

وتتميز تقنية STS في قدرتها على اخذ قياسات موضعية بشكل دقيق مقارنة بالأجهزة الاخرى المستخدمة في قياس كثافة المستويات، فمثلاً يمكن قياس كثافة المستويات في موضع يوجد فيه شوائب ومقارنتها مع موضع اخر لا يوجد فيه شوائب على نفس سطح العينة.

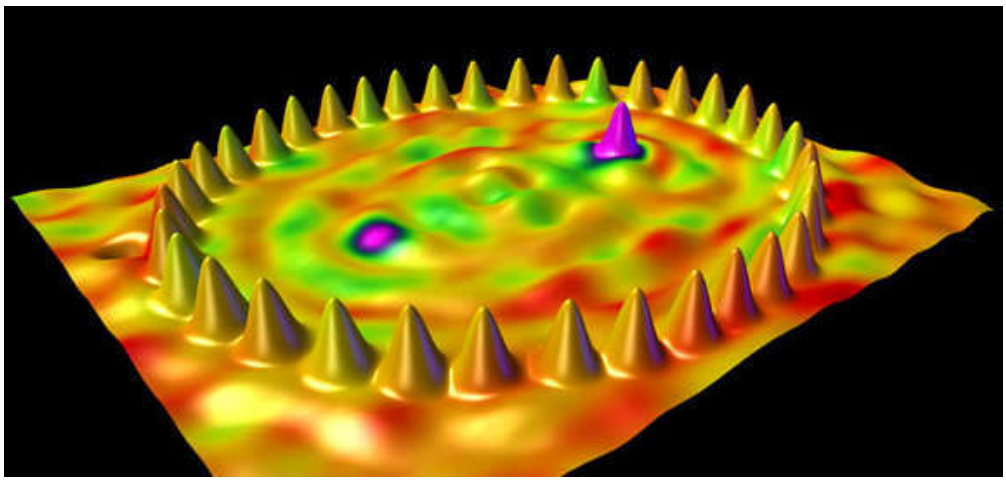
وأظهرت تقنية STS قابلية STM لإيجاد مستويات الطاقة الالكترونية للسطح عند موقع محدد، لذا فهي تمثل تقنية فعالة لإيجاد الخصائص التركيبية والالكترونية للسطوح والجسيمات الملتصقة. وباستخدام المطيافية الاهتزازية إحدى تقنيات STS يمكننا تحديد نوع الجزيئة بتمييز الأواصر الكيميائية التي بداخلها من خلال كثافة الحالات الاهتزازية التي لا يمكن ملاحظتها الا بهذه التقنية، لذلك فان تقنية STS لميكروسكوب STM أداة لا غنى عنها لاستكشاف الفيزياء والكيمياء في المقياس الذري والنانوي.



الشكل (11): (a) صورة طبوغرافية بجهاز STM بالابعاد 56 Å x 56 Å. (b) التحليل الطيفي الاهتزازي للجزيئة المفردة عن طريق STS لثلاثة نظائر لجزيئة الاستلين على السطح Cu(001) عند درجة حرارة 8K . النتوءين المضيئين في الصورة a لكل نظير نتيجة وجود الأواصر C–H و C–D، بينما الانخفاض المركزي المظلم فينسب للآصرة C–C. نمط الاصرة C–H في الصورة b تلاحظ عند 358 meV للجزيئة C_2H_2، والاصرة C–D تلاحظ عند 266 meV للجزيئة C_2D_2، الازاحة الصغيرة للأنماط C–H و C–D تلاحظ عند 360 meV و269 meV للجزيئة C_2HD. حيث ان طيف الجزيئة C_2HD لوحظ لأول مرة بشكل حساس وواضح بتقنية STS.

ثالثاً: المعالجات الذرية باستخدام الميكروسكوب النفقي الماسح

إحدى الإنجازات الرائعة لتطبيقات ميكروسكوب STM كانت تقنية معالجة الذرات والجزيئات والتراكيب النانوية من خلال السيطرة الدقيقة على التفاعلات بين راس المجس والجسيم الملتصق (مثل الذرة والجزيئة) على سطح المواد لنتمكن من تعديل وتحريك الجسيمات إلى المواقع المطلوبة. والمثال الهام للمعالجة الذرية الناجحة الأولى كانت من قبل الباحث Eigler ومشاركوه بكتابة الرسالة الذرية الاولى "**I-B-M**" من 35 ذرة Xe على السطح Ni(110)، انظر الشكل (3).

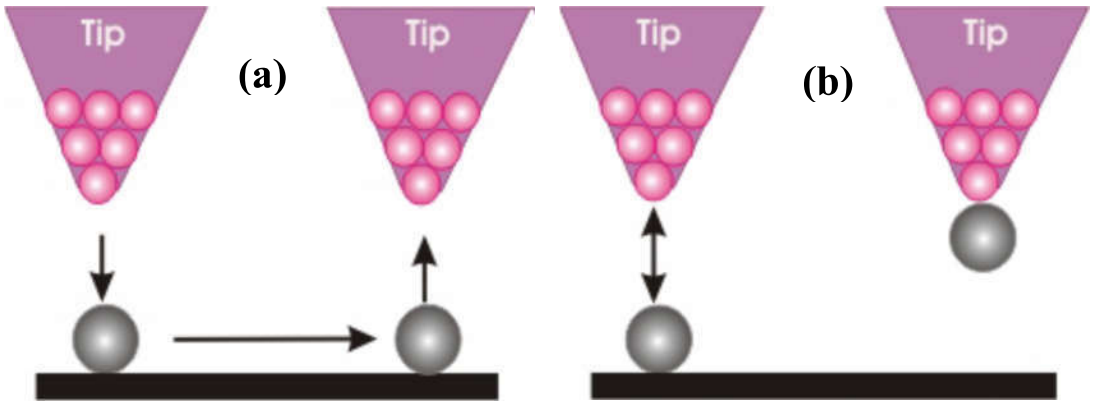


الشكل (12): المعالجة الذرية على شكل (Quantum Corral) من قبل Eigler عام 1993 لتحضير تراكيب نانوية، والتي كان لها الصدى الكبير في الفيزياء الكمية حول فهم طبيعة الدوال الموجية للجسيمات.

إن عملية معالجة الذرات باستخدام ميكروسكوب STM تتم من خلال وضع رأس المجس فوق الذرة بعد ذلك يخفض رأس المجس لزيادة التفاعل بين رأس المجس والذرة. وكنتيجة لذلك فأن تفاعل رأس المجس-ذرة يزداد وبعدها تتبع الذرة حركة رأس المجس إلى الموقع المطلوب. إن التفاعل بين رأس المجس والذرة يكون قوياً إذ يمكن للذرة التغلب على حاجز الطاقة لتتحرك بسهولة على السطح. وعند وصول الذرة إلى الموقع المطلوب يعزل رأس المجس. هذه العملية يمكن إعادتها ذرة-بذرة (atom-by-atom) لإيجاد التركيب النانوي المطلوب.

ويمكن تصنيف تقنيات المعالجة للجسيمات الملتصقة برأس مجس STM بشكل عام الى نوعين رئيسين هما:

1. المعالجة الجانبية Lateral manipulation
2. المعالجة العمودية Vertical manipulation



الشكل (13): مخططات توضيحية لعمليات المعالجة لذرة مفردة على سطح العينة باستخدام رأس مجس STM. (a) المعالجة الجانبية، (b) المعالجة العمودية.

هذه التقنيات تعتمد على ثلاث ميكانيكيات أساسية لعمليات المعالجة تُستخدم لتخفيض حاجز طاقة الحركة للجسيم الملتصق لتسهيل عملية الانتقال، وهي:

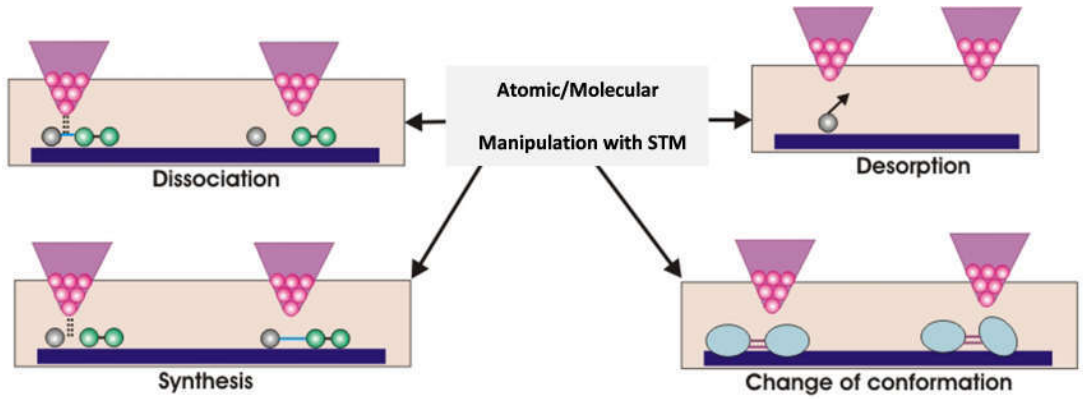
- القوى الكيميائية Chemical forces
- الكترونات النفق Tunneling electrons
- المجال الكهربائي Electric field

هذه الميكانيكيات تلعب دور مهم عندما يواجه الجسيم حواجز طاقة الانتشار، التي تمثل طاقة التصاقه او تموجات السطح. لذلك فان الكترونات راس مجس STM تعمل كاضطراب موضعي قوي يؤثر على حالة الالتصاق للتغلب على حواجز الانتشار.

وعند اقتراب رأس المجس من الجسيمات الملتصقة فان الجسيمات تواجه أما تفاعلات تجاذب أو تنافر، وتكون حركة الجسيمات على السطح موجهة بطبيعة هذا التفاعل. فعندما يكتسب الجسيم الملتصق طاقة كافية نتيجة تفاعله مع رأس المجس فانه يتغلب على حاجز الانتشار، ويقفز إلى الموقع الجديد المناسب.

ان تقنية المعالجة العمودية اعلاه يمكن ان تدرس كمفتاح كهربائي بمقياس ذري من خلال عملية الانتقال العمودي ثنائية الاتجاه للذرة بين رأس المجس والسطح. وان وظيفة الذرة كمفتاح أعطى مفهوم استخدام الذرات والجزيئات كعناصر مفاتيح وثنائيات في الدوائر الكهربائية والالكترونية، والتي تمثل إحدى الأهداف الأساسية في الالكترونيات النانوية.

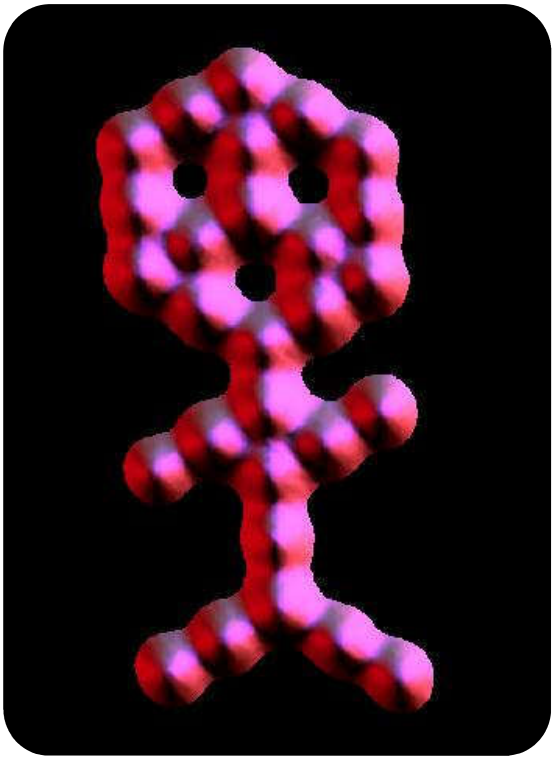
إن تقنيات المعالجة لها اسهامات هامة في الفهم المفصل للجزيئات، فعن طريق المعالجة الجانبية للجزيئات يمكن استكشاف الاستقرار الميكانيكي للجزيئة وتسجيل الديناميكيات داخل الجزيئة ولذلك تعتبر تقنيات المعالجة طريقة مباشرة لاستكشاف نظام التفاعلات داخل الجزيئة. ويمكن تشكيل او كسر الأواصر داخل الجزيئة باستخدام الطاقة المكتسبة من الكترونات النفق النافذة إليها من رأس المجس، بالإضافة لعمليات القلع والقفز والتدوير وتغيير التوجيه للجسيمات الملتصقة. كل ذلك جعل من ميكروسكوب STM أداة تمكننا من السيطرة على التفاعلات الكيميائية للذرات والجزيئات وبناء التراكيب النانوية.



الشكل (14): يوضح بعض مراحل التفاعلات الكيميائية اثناء معالجة الجسيمات الملتصقة برأس مجس STM ، هذه العمليات هي التفكيك، القلع، التجميع، واعادة التوجيه.

حيث إن حركة الجسيمات الملتصقة على سطوح المواد تشكل الخطوة الأساسية المهمة للعديد من التفاعلات الكيميائية. وملاحظة حركة الجسيمات الملتصقة وتشكيل أو كسر أواصرها تزودنا بمعلومات لا غنى عنها للميكانيكيات المجهرية للتفاعلات الكيميائية. لهذا، فان مدى تطبيقات جهاز STM متعدد الاتجاهات والاغراض في الطبيعة ويفتح آفاق علمية وتقنية واسعة للدخول والتعامل مع العالم النانوي.

وان محاولة استكشاف وفهم مثل هذه الظواهر المعقدة بالإضافة للدقة التي يحتاجها ميكروسكوب STM تجعل من تطبيقات المعالجة مشروع صعب جداً ومسعى مثير للاهتمام على حد سواء.



الشكل (15): صورة الرجل الجزيئي "Molecular man" طوله 4.5 nm والمتكون من 28 جزيئة CO على سطح Pt المنجز باستخدام تقنيات المعالجة لميكروسكوب STM.

المصادر References

1. كتاب " **مقدمة في تقنية النانو** " ، محمد الصالحي ، عبدالله الضويان ، من مطبوعات جامعة الملك سعود، 2007.
2. كتاب " **مدخل إلى علم النانويات وتقاناتها** " ، ماسيمليانو دي فنترا وستيفان إيفوي وجميس هفين، وتُرجم بجهود مشتركة من د. محمد عبد الستار الشيخلي، ود. حاتم النجدي ود.يمن الأتاسي ود. إبراهيم رشيدي، المنظمة العربية للترجمة، 2001.
3. كتاب " **تكنولوجيا النانو من أجل غد أفضل** " ، محمد شريف الإسكندراني، سلسلة عالم المعرفة ، 2010.
4. كتاب " **مدخل إلى الإلكترونيات النانوية: علم وهندسة وتطبيقات** " ، فلاديمير ف. ميتين، فياتشسلاف أ. كوشلاب، ميكائيل أ.ستروسكيو، ترجمة: د. علي سكاف، ، المنظمة العربية للترجمة، 2008.
5. **كتاب** " **التقانة والمستشعرات النانوية** " ، حسام حايك، فلسطين المحتلة، 2013.
6. كتاب "**مفاهيم اساسية في تقنية النانو**"، فؤاد نمر عجيل، جامعة ذي قار، العراق، 2015.
7. كتاب " **تقنية النانو اين ستقودنا ؟** " ، محمد الصالحي ، عبدالله الضويان، مطبوعات جامعة الملك سعود، 2007.
8. كتاب " **ماهي تقنية النانو؟** "، نهى علوي الحبشي، مكتبة الملك فهد الوطنية، 2009 .
9. كتاب " **التقانة النانوية** " ، مارك راتنر، دانيال راتنر، ترجمة: د. حاتم النجدي، المنظمة العربية للترجمة، 2008.
10. كتاب" **الميكروسكوبات الإلكترونية** "، حازم فلاح سكيك، شبكة الفيزياء التعليمية، 2013.
11. مقالة " **الميكروسكوب النفقي الماسح** "، موقع وموسوعة ويكبيديا.
12. مقالة " **الميكروسكوب النفقي الماسح** " ، حازم فلاح سكيك ، موقع الفيزياء التعليمي.
13. رسالة ماجستير " **معالجة نقطة كمية بحجم الذرة باستخدام المجهر النفقي الماسح** "، فؤاد نمر عجيل، جامعة البصرة- العراق، 2012.
14. كتاب " **فيزياء الحالة الصلبة** " ، مؤيد جبرائيل يوسف، مطبعة بيت الحكمة، بغداد-العراق، 1989.
15. كتاب " **فيزياء الحالة الصلبة** " ، صبحي سعيد الراوي، جامعة الموصل- العراق، 1988.
16. مقالة " **نفق ميكانيكا الكم** " ، موقع وموسوعة ويكبيديا.
17. كتاب " **مقدمة في الميكانيك الكمي**"، هاشم عبود قاسم وجبار أحمد حسين، جامعة البصرة، العراق، 1985.
18. كتاب " **مقدمة في كيمياء الكم** "، ايمن حمودة، جامعة البصرة، العراق، 1985.
19. كتاب " **الفيزياء الذرية والجزيئية** "، محمد انور بطل، مطبوعات جامعة حلب- سوريا، 1989.
20. كتاب " **فيزياء الالكترونات** "، صبحي سعيد الراوي، جامعة الموصل، العراق، 1987.
21. J. Chen, "**Introduction to Scanning Tunneling Microscopy**", New York, Oxford University Press, 2008.
22. H. J. Hug, "**Scanning Probe Methods**", University of Basel, 2007.

كلمة شكر

في ختام هذا العمل لا يفوتني ان اتقدم بأسمى آيات الشكر والعرفان لعائلتي ولكل من شجعني وساندني في دراستي ومسيرتي العلمية.

واخص بالشكر الجزيل البروفسور الدكتورة (جنان مجيد المخ) من جامعة البصرة التي كانت نعم الاستاذ والمشرف في دراسة الماجستير وخير قدوة للباحثين بالعلم والخلق الرفيع.

كما اتقدم بالشكر لأستاذي البعيد عن ناظري والقريب الى قلبي الدكتور (حازم فلاح سكيك) من جامعة الازهر في غزة الذي كان ولا زال معطاءاً ومبدعاً في دروسه وكتبه ومواقعه الالكترونية وكانت لي رافداً غنياً في هذا المجال.

واخيراً شكري وتقديري للأخت الفاضلة الفيزيائية (مروة جابر عبد) لمساعدتها لي في انجاز هذا العمل واخراجه بأفضل صورة.

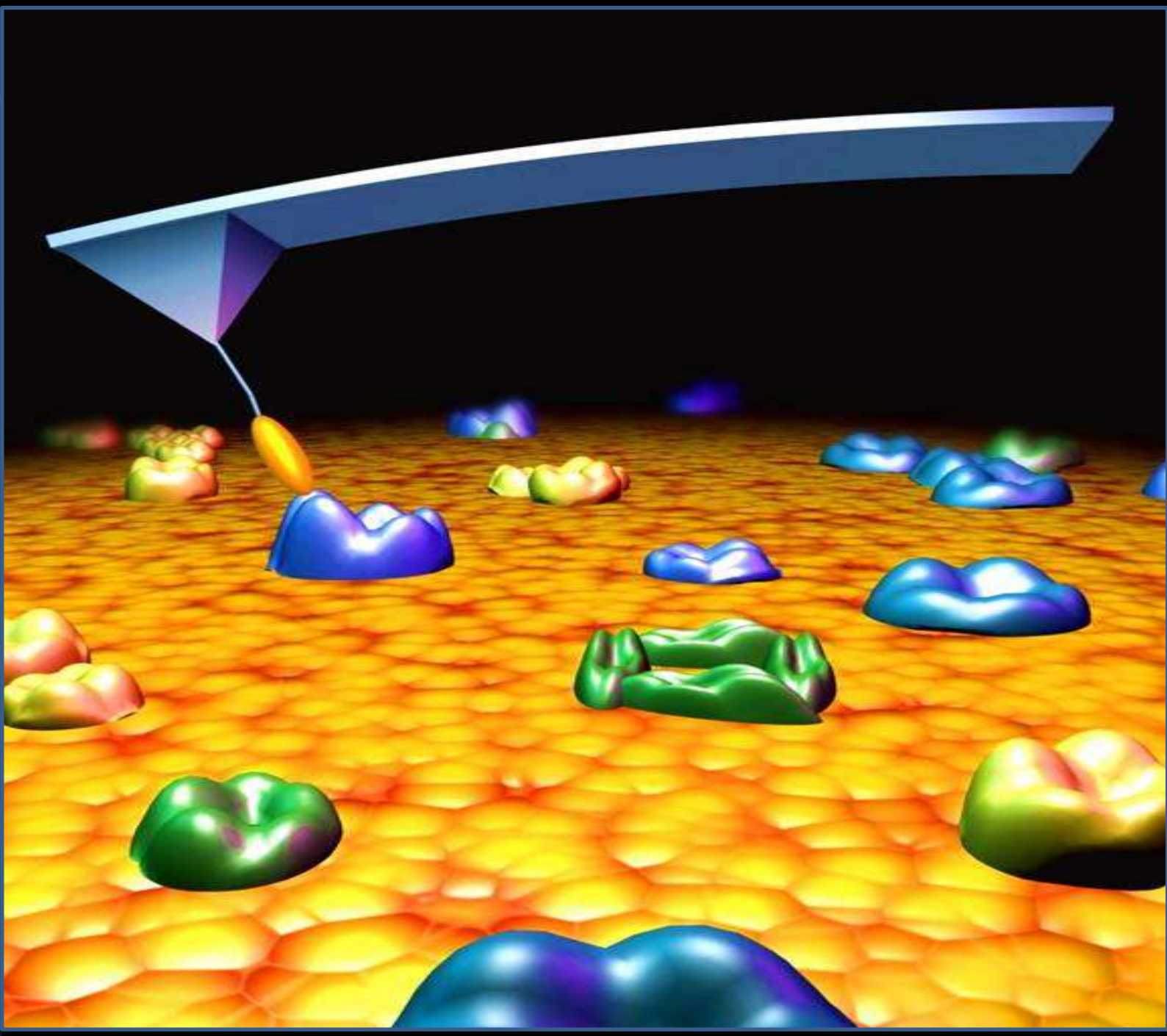
أسال الله تعالى ان يكون لنا صدقة جارية وان ينفع به الاخوة الاعزاء.

وآخر دعوانا ان الحمد لله رب العالمين.

ترقبوا كتابنا:

أدوات التعامل مع العالم النانوي:

جهاز AFM



م. فـؤاد نـمر عجيل

العراق – جامعة ذي قار – كلية العلوم

2017 - 2016

البطاقة التعريفية :

الاسم : فؤاد نمر عجيل Fouad Nimr Ajeel

الجنسية : عراقي .

مكان وتاريخ الميلاد : العراق - ذي قار-الرفاعي- 1984 .

الوظيفة : تدريسي في جامعة ذي قار - العراق.

محاضر في جامعة سومر - العراق.

المؤهلات العلمية :

بكالوريوس علوم فيزياء (2006) - كلية العلوم - جامعة ذي قار- العراق.

ماجستير علوم فيزياء (2012) - كلية التربية للعلوم الصرفة - جامعة البصرة - العراق.

الاختصاص الدقيق : الإلكترونيات النانوية Nanoelectronic .

- نشر مجموعة بحوث علمية في مجلات عالمية ومحلية.
- المشاركة في عدة مؤتمرات علمية دولية.
- الاشراف العلمي على الكثير من بحوث التخرج.

للأخوة الاعزاء صدر لنا :

- مفاهيم أساسية في تقنية النانو.
- كيف تنشر بحثاً علمياً في مجلة محكمة.
- شرح برنامج الرسام اوريجن 8 المتخصص برسم وتحليل ومعالجة البيانات.
- طريقة كتابة تقارير التجارب الفيزيائية.
- تجارب مختبر الالكترونيات التماثلية.
- تجارب مختبر الالكترونيات المنطقية.
- تجارب مختبر الصوت والحركة الموجية.
- تجارب مختبر الكهربائية والمغناطيسية.