

# บทที่ 4

การจำแนกคุณลักษณะวัสดุนาโน  
โดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

รายวิชานาโนเทคโนโลยี ว 40223

นางสาวสิริหทัย ศรีขวัญใจ

ครูวิชาการ สาขาวิชาเคมี

เทคนิคต่างๆที่ใช้ศึกษาโครงสร้างนาโน โดยการใช ไอออน อิเล็กตรอน นิวตรอน หรือโฟตอน

หัววัด	เทคนิคการวิเคราะห์
ไอออนหรือโฟตอน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Secondary ion mass spectrometry (SIMS)</li> <li>- Rutherford backscattering spectroscopy (RBS)</li> <li>- Proton-induced X-ray emission (PIXE)</li> </ul>
อิเล็กตรอน หรือ โฟตอน	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Scanning electron microscopy (SEM)</li> <li>-Electron probe microanalysis (EPMA)</li> <li>-Transmission electron microscopy (TEM)</li> <li>-Energy-dispersive X-ray (EDX)</li> <li>-Electron energy loss spectroscopy (AES)</li> <li>-Auger electron spectroscopy (AES)</li> <li>-Low energy electron diffraction (LEED)</li> <li>-Reflection high-energy electron diffraction (RHEED)</li> </ul>

เทคนิคต่างๆที่ใช้ศึกษาโครงสร้างนาโน โดยการใช้ ไอออน อิเล็กตรอน นิวตรอน หรือโฟตอน  
(ต่อ)

หัวข้อ	เทคนิคการวิเคราะห์
โฟตอน	<ul style="list-style-type: none"><li>-Light microscopy</li><li>-X-ray diffraction (XRD)</li><li>-X-ray fluorescence (XRF)</li><li>-X-ray absorption spectroscopy (XAS)</li><li>-Infrared spectroscopy (IR)</li><li>-Raman spectroscopy</li><li>-X-ray photo electron spectroscopy (XPS)</li></ul>

# Electron microscope; กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง ในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้น สั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถให้ประสิทธิภาพของกำลังขยาย และการแจกแจงรายละเอียดได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยสามารถแยกรายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม หรือ 0.1 นาโนเมตร (กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่  
transmission electron microscope (TEM) และ scanning electron microscope (SEM)

# TEM; transmission electron microscopy

The transmission electron microscope (TEM) operates on the same basic principles as the light microscope but uses electrons instead of light.

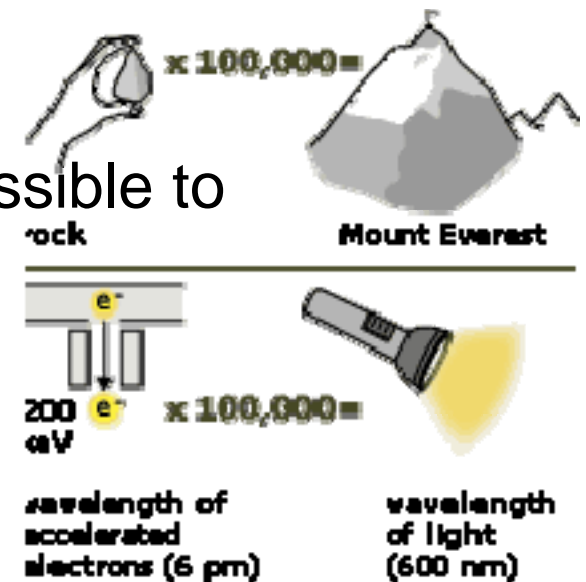
A light microscope is limited by the wavelength of light.

TEMs use electrons as "light source"

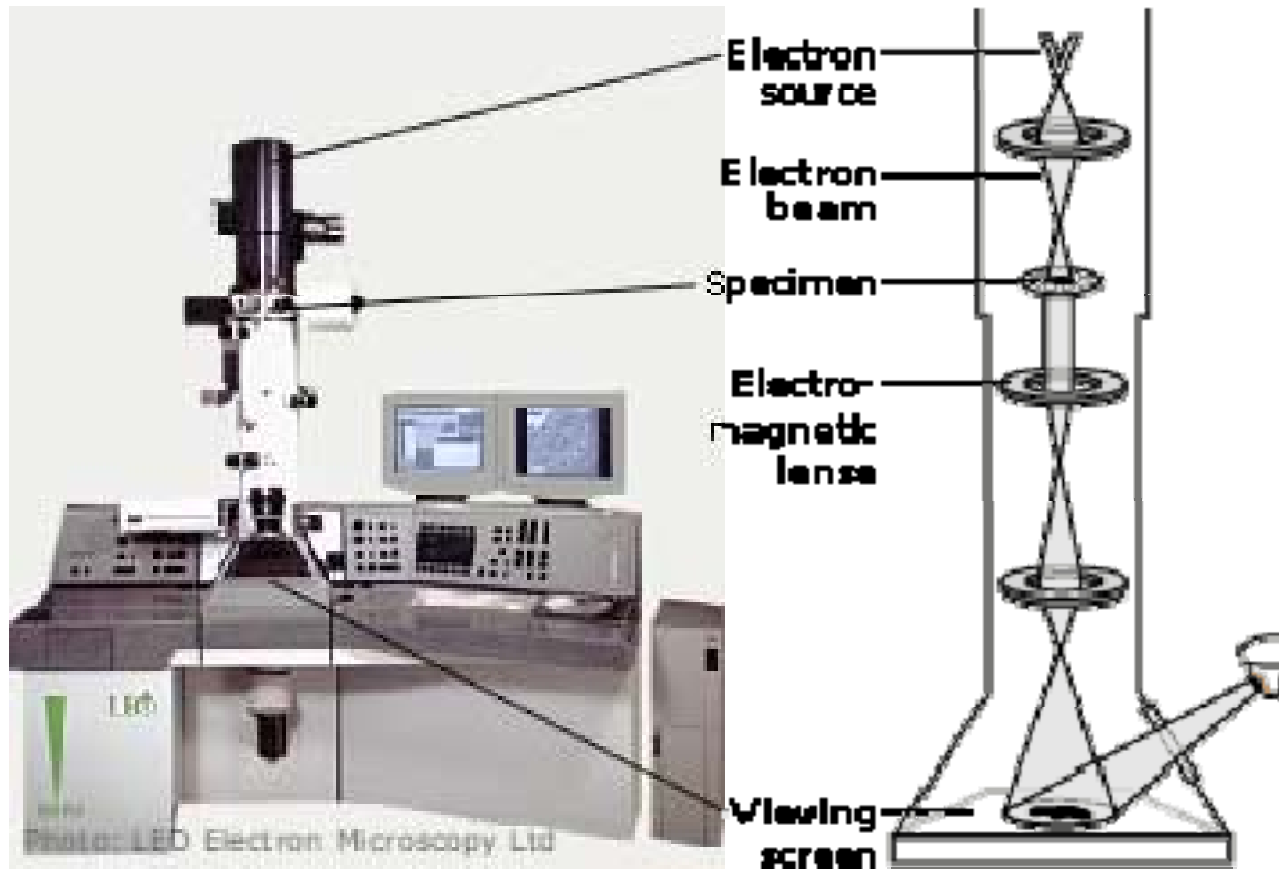
and their much lower wavelength makes it possible to

get a resolution a thousand times better than

with a light microscope.



# ส่วนประกอบของเครื่อง TEM



# หลักการการทำงานของเครื่อง TEM

เครื่องกำเนิด  $e^-$



$e^-$  ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า



$e^-$  ผ่านเข้ามาที่ condenser lens เพื่อรวบรวมให้เป็นลำ  $e^-$



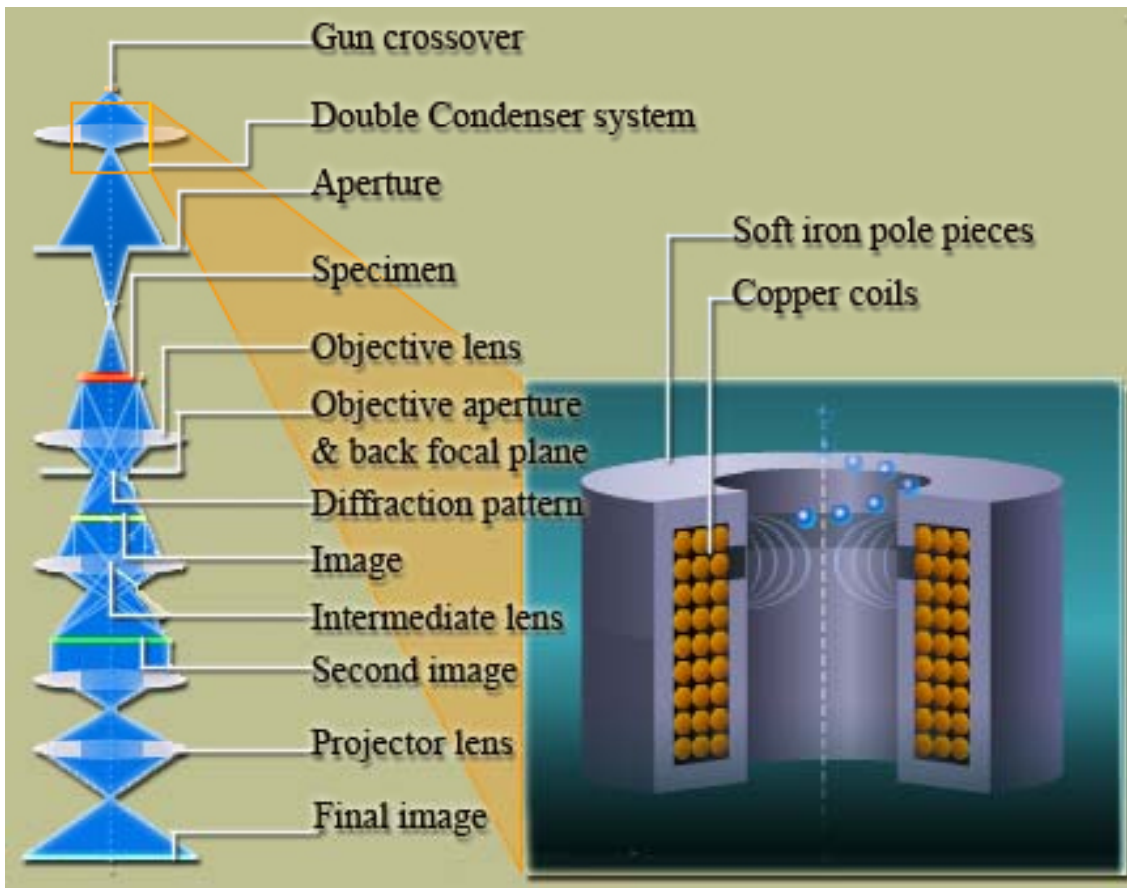
ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (specimen) หนา  $\sim 1-100$  nm



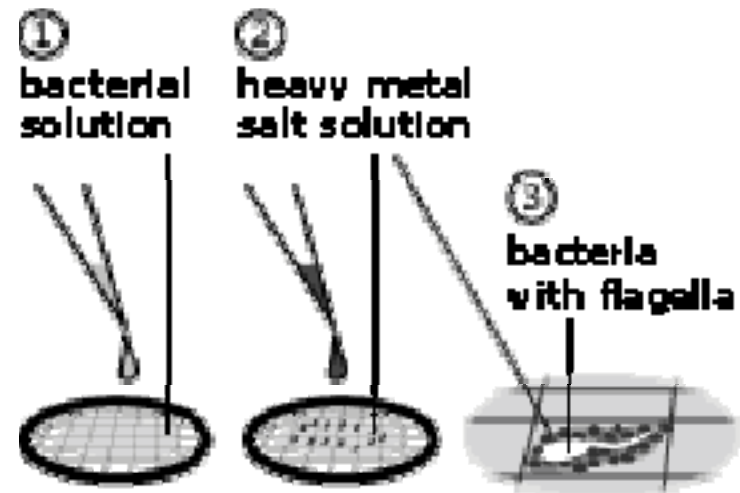
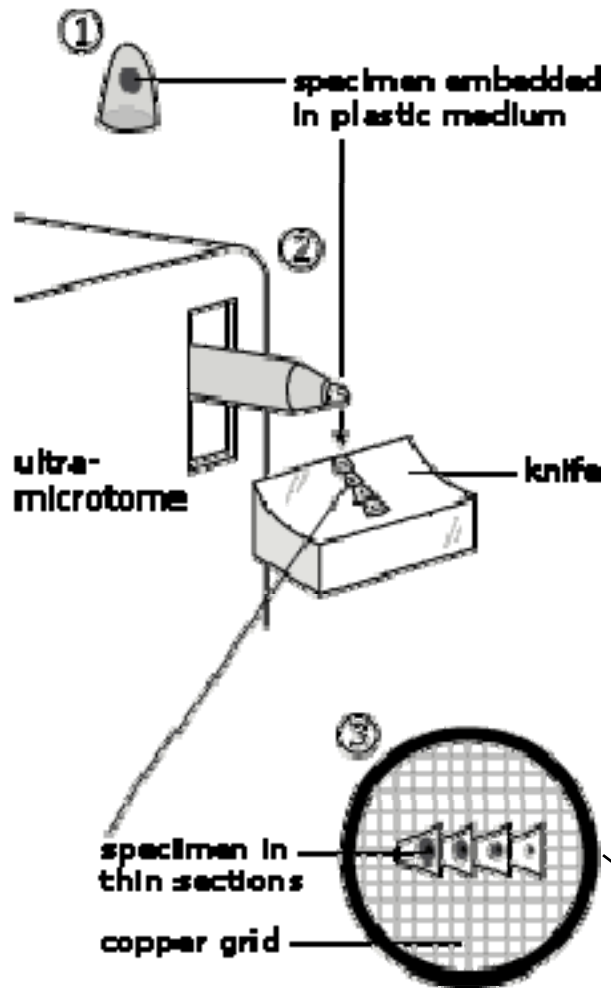
$e^-$  ที่ทะลุผ่าน และ  $e^-$  ที่กระเจิง



เกิดภาพขึ้นที่ฉากเรืองแสง

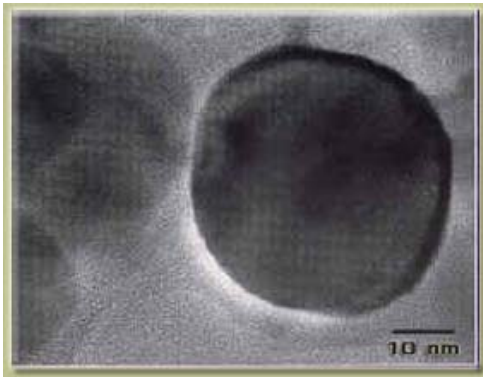


# การเตรียมตัวอย่าง

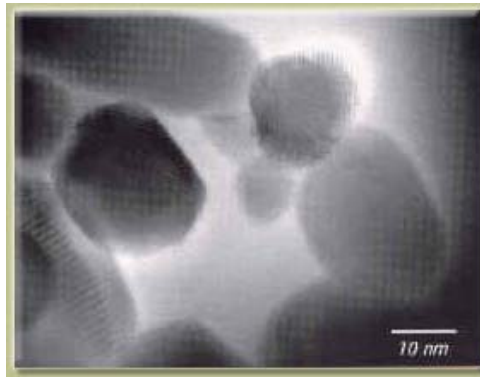




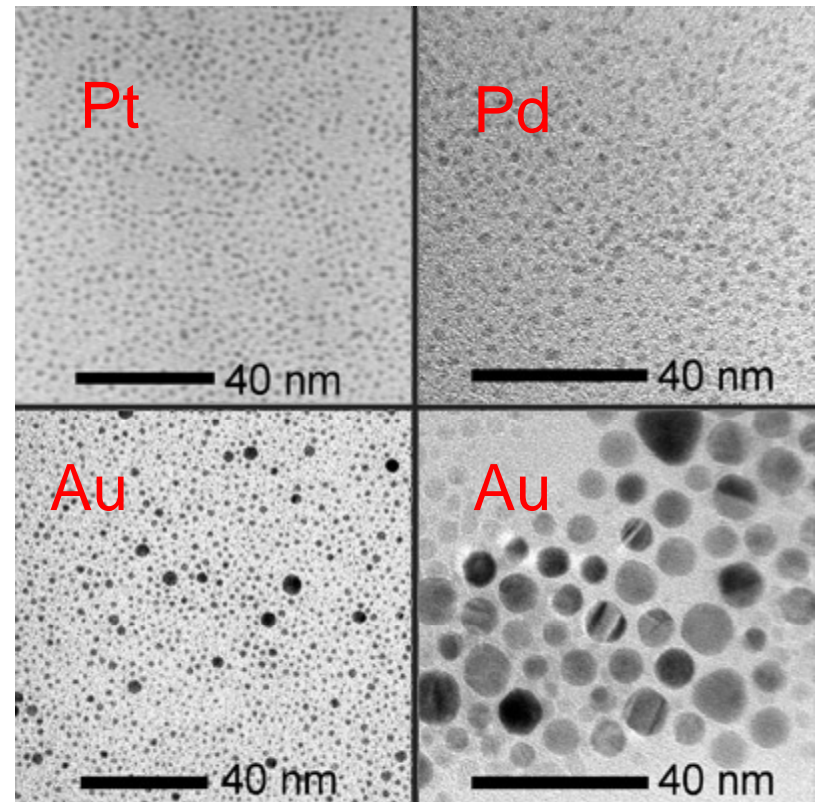
# ตัวอย่างภาพโครงสร้างนาโนที่ได้จากเครื่อง TEM



อนุภาค  $\text{TiO}_2$



อนุภาค ZnO



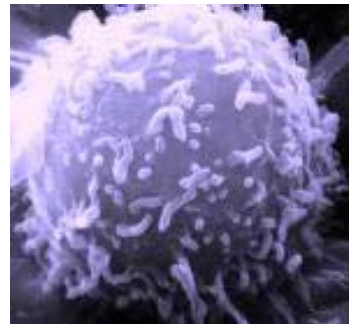
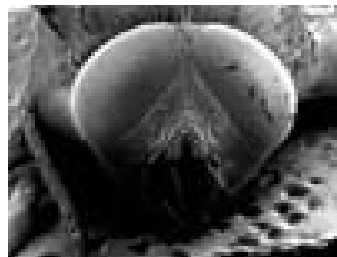
# SEM; scanning electron microscopy

SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับ TEM

และการเตรียมตัวอย่างไม่จำเป็นต้องมีขนาดบางมาก เพราะภาพที่เกิดขึ้น

ตรวจวัดจากอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง

และภาพที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ



# ส่วนประกอบของเครื่อง SEM

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ( Electron gun )

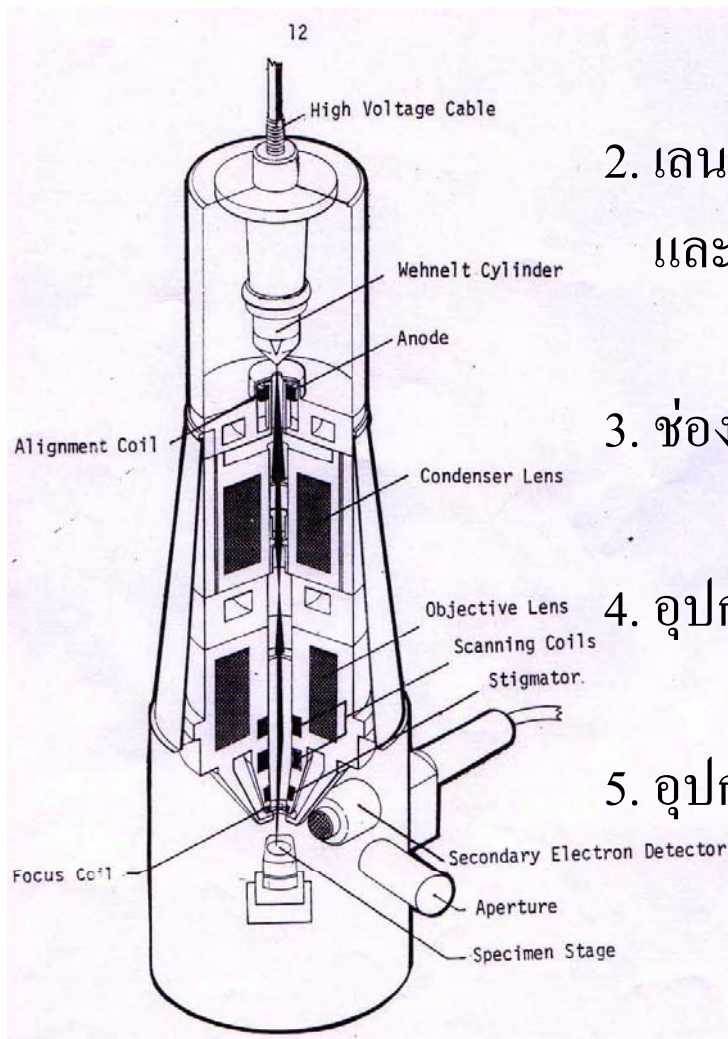
2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน ( Electromagnetic lens )

และขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน ( Scan coil )

3. ช่องตัวอย่าง ( Specimen Chamber )

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ ( Collector & scintillator )

5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ ( Imaging photographic devices )



# หลักการการทำงานของเครื่อง SEM

เครื่องกำเนิด  $e^-$



$e^-$  ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า



$e^-$  ผ่านเข้ามาที่ condenser lens เพื่อรวบรวมให้เป็นลำ  $e^-$



ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (specimen)



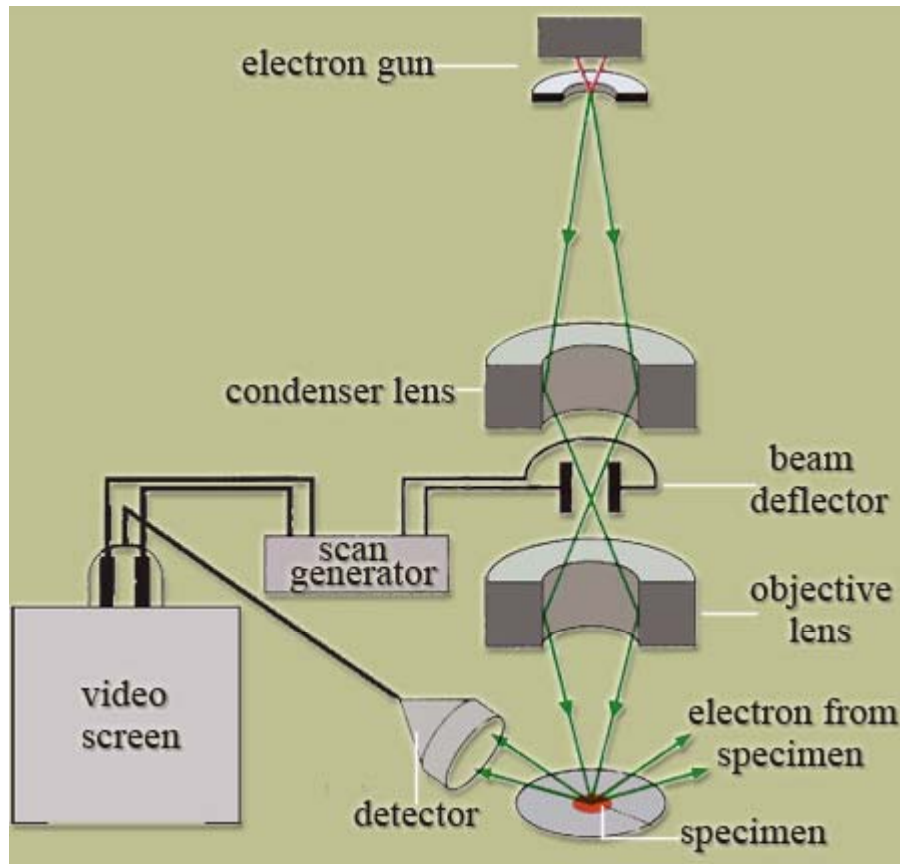
$e^-$  จะสะท้อนกลับเข้าไปยังตัวรับ



แปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า



แปลงเป็นภาพ



ตัวอย่างภาพโครงสร้างนาโนที่ได้จากเครื่อง SEM

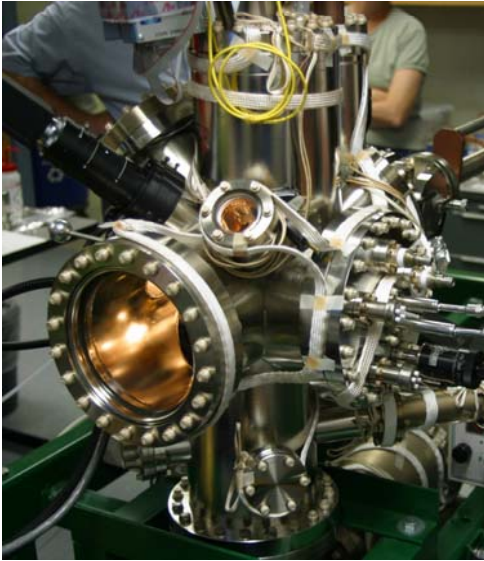


Shark skin

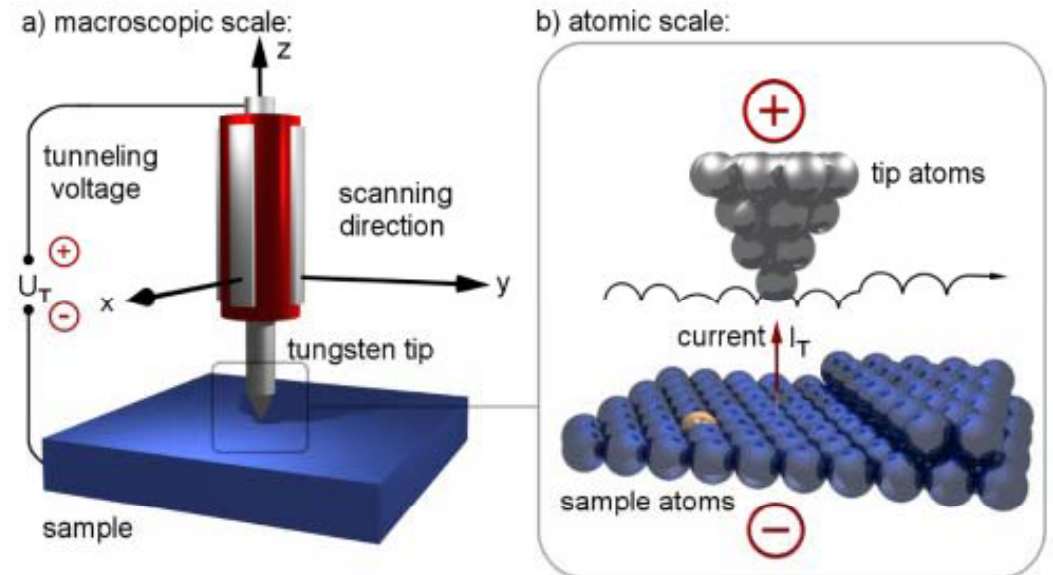
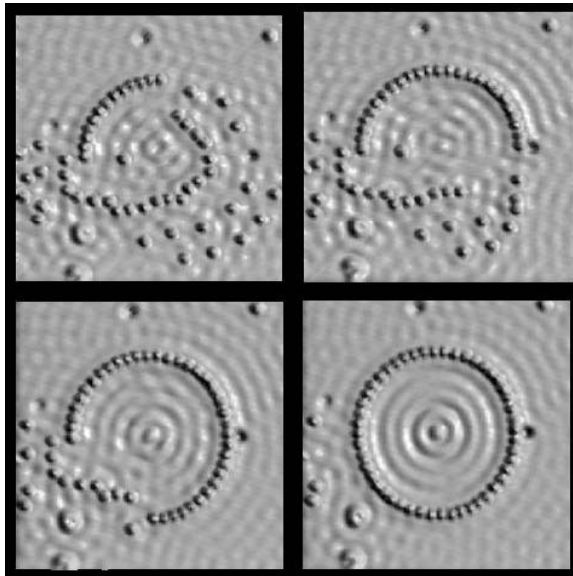


Red blood cell

# Scanning tunneling microscope; STM



เป็นอุปกรณ์ที่บอกรายละเอียดของภาพพื้นผิวของวัตถุ  
ในระดับอะตอม



## หลักการพื้นฐานของเครื่อง STM

คือ เมื่อลากปลายแหลมผ่านพื้นผิวของ โครงสร้าง  
(ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปได้ 3 ทิศทางตามแนวแกน)  
เครื่อง STM จะทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่าง  
ปลายแหลมกับพื้นผิวระดับนาโน  
(อันเกิดจากการที่อิเล็กตรอนลอดผ่านได้ระหว่างปลายแหลมกับพื้นผิววัสดุ  
แล้วส่งสัญญาณไฟฟ้ากลับไปเพื่อประมวลผลผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์  
แล้วสร้างเป็นภาพโครงสร้างระดับนาโนของพื้นผิวนั้นออกมาได้  
และเครื่อง STM บางแบบในปัจจุบัน  
ได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดลักษณะ โครงสร้างพื้นฐาน  
และความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าภายในโครงสร้างนาโนได้อีกด้วย

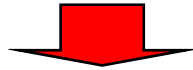
การนำเครื่อง STM มาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน สามารถแบ่งลักษณะการนำมาใช้ ออกได้เป็น 2 วิธีการ ได้แก่

- การสแกนภาพอะตอม (atom image mode)
- การเคลื่อนย้ายอะตอม (atom manipulation mode)



## การสแกนภาพอะตอม

STM has a sharp tip, which can be moved very accurately close to the sample



If voltage is applied between tip and sample, and the tip is very close to sample, a current (the so-called tunneling current) starts to flow



If the tunneling is too high, the distant control retract the piezotube until the preset current value is reached



By applying a voltage to the piezoelectric tube,  
The tip can be moved over the surface



The movement of the tip is record displayed  
on the computer screen



If the tip reaches a protrusion such as this step,  
the tunneling current increase



Again, the distant control retract the piezotube until  
the preset current value is reached



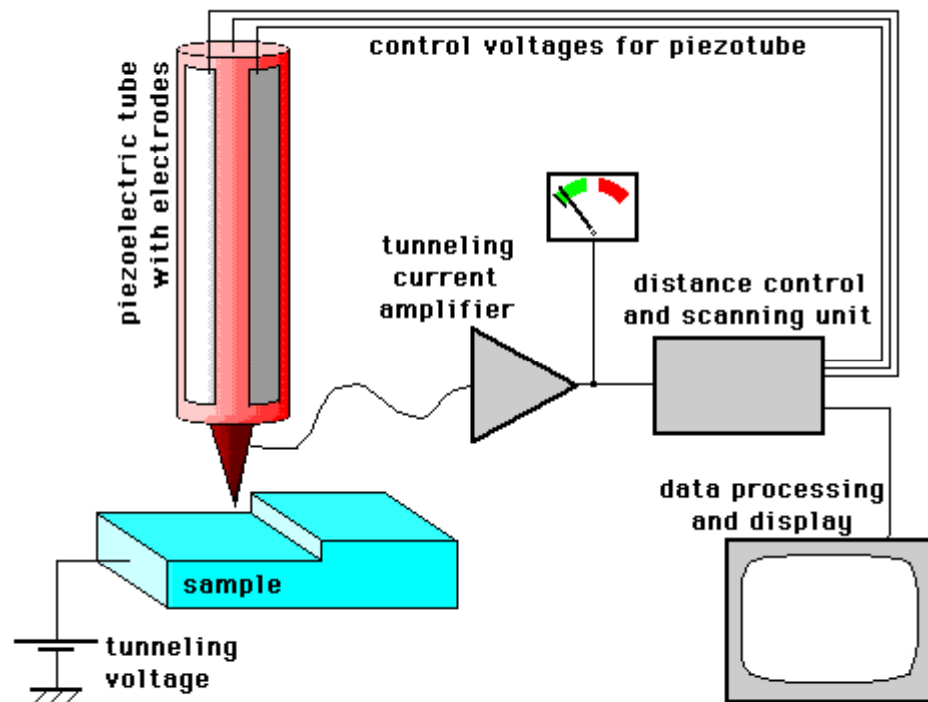
Always, keeping the tunneling current constant,  
the tip follow the surface profile



By scanning the tip over the surface,  
we get a map surface topography

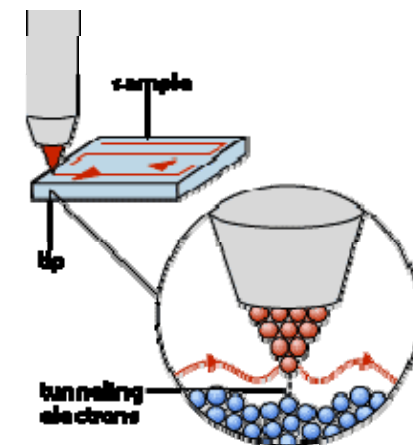


Under ideal circumstance, such as  
a map can show individual sample atoms

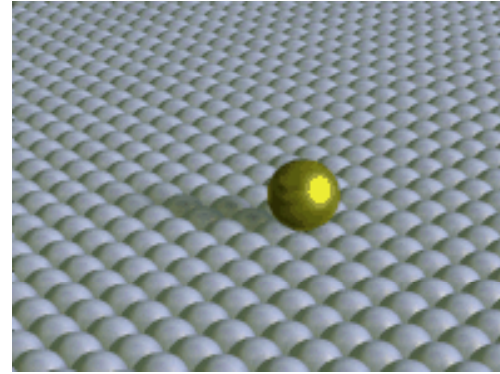
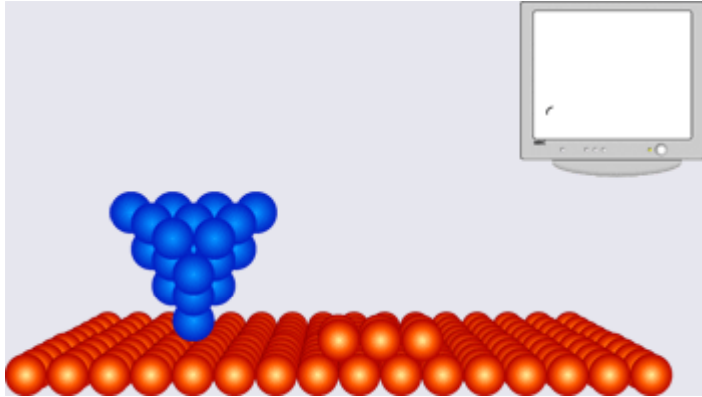


## How an STM works ...

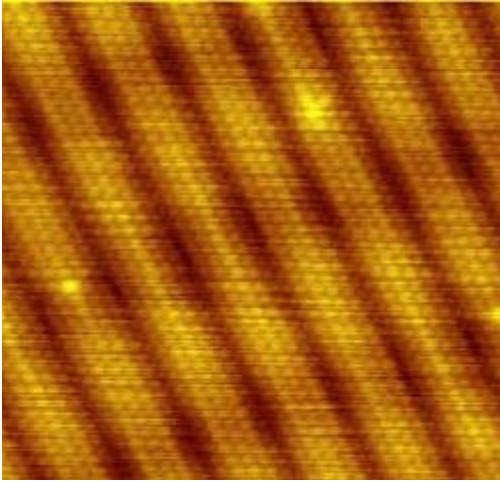
© Michael Schmid  
 Institut f. Allgemeine Physik  
 TU Wien 1997-2002



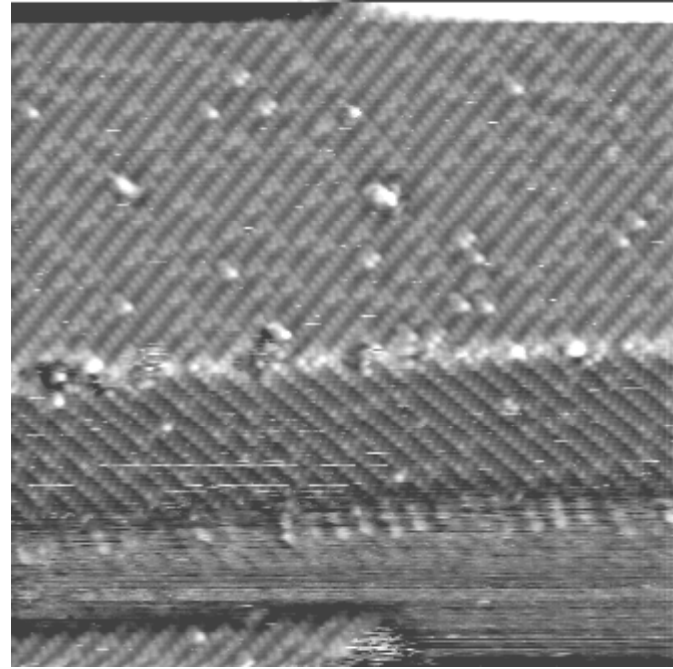
# การสแกนภาพอะตอมแบบสรูป



พื้นผิวจะถูกปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านเพื่อที่จะใช้ตรวจสอบลักษณะของพื้นผิว ซึ่งถ้าเป็นพื้นที่ขนาดเล็กการสแกนก็จะได้รายละเอียดสูง แต่ถ้าเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่รายละเอียดที่ได้ก็จะน้อยตามไปด้วย การบังคับปลายเข็มทำได้โดยใช้ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ในการกระตุ้นผลึกเซรามิกส์ที่ยึดติดกับหัวเข็มให้หดหรือคลายตัว โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้ในการใส่ข้อมูลหรือตัวแปรที่ต้องการควบคุม ตัวอย่างเช่น พื้นที่ในการสแกน ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ในขณะที่ทำการสแกน สัญญาณไฟฟ้าที่ตรวจสอบได้จากพื้นผิว ซึ่งได้แก่ ความต้านทานและกระแสไฟฟ้า จะถูกส่งและนำมาสร้างเป็นภาพจำลองแบบ 3 มิติของลักษณะพื้นผิวนั้นได้



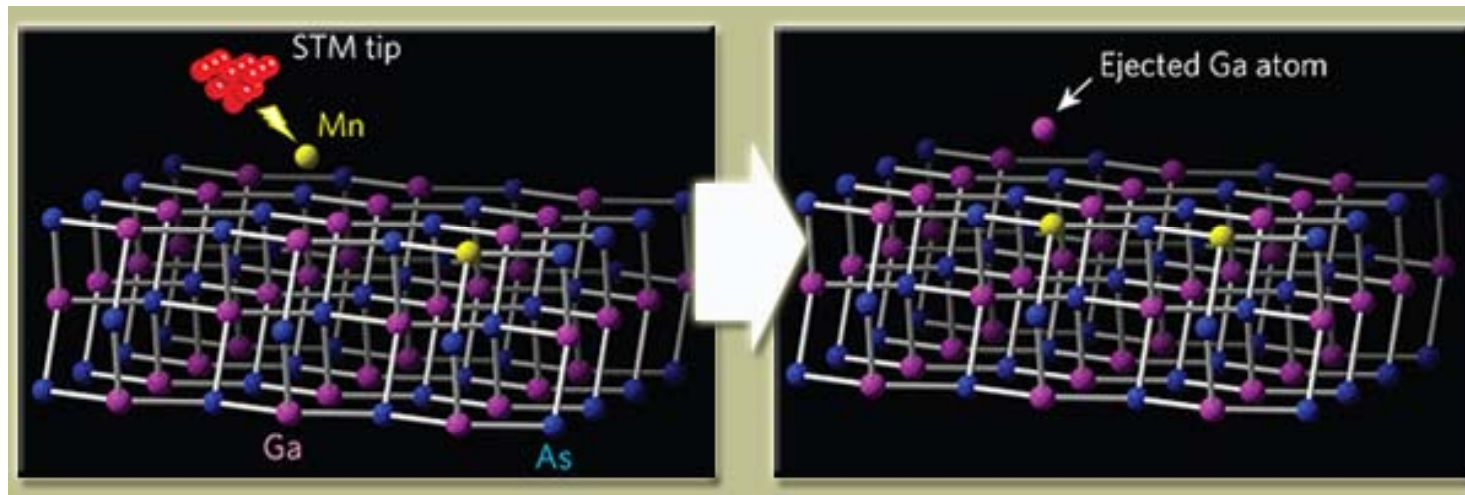
**Image of clean gold surface**



Cu surface

## 2. การเคลื่อนย้ายอะตอม (atom manipulation mode)

วิธีการนี้จะใช้หัวปลายแหลมในการหยิบหรือจับอะตอม และทำการเคลื่อนย้ายไปวาง ณ ตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งกระบวนการของการเคลื่อนย้ายอะตอมนี้ สามารถทำได้โดยการใช้สนามไฟฟ้าระหว่างปลายแหลมและพื้นผิวตัวอย่าง โดยเมื่อปลายแหลมเคลื่อนที่มาอยู่ในตำแหน่งเหนืออะตอมที่เหมาะสม ที่จะสามารถทำการหยิบจับอะตอมที่อยู่บนพื้นผิวที่อยู่ในสนามไฟฟ้าอยู่แล้ว จะทำให้กำแพงที่ขวางความสามารถในการไหล ของกระแสไฟฟ้าทั้งจากปลายแหลมและจากอะตอมนั้นถูกลดลง แต่ขณะเดียวกันความสามารถในการไหล ณ บริเวณปลายแหลมจะมีพลังงานที่ต่ำกว่าบริเวณของอะตอมมาก จึงทำให้อะตอมถูกส่งผ่านขึ้นไปสู่ปลายแหลมได้ง่าย จึงทำให้สามารถที่จะหยิบหรือจับอะตอมได้ และหลังจากนั้นเมื่อต้องการที่จะวางอะตอมลงไป ณ จุดที่กำหนดไว้ ก็สามารถทำได้โดยการถ่วงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านปลายแหลม จะทำให้ความสามารถในการไหลของบริเวณฝั่งพื้นผิวอะตอมมีพลังงานต่ำกว่าของส่วนปลายแหลม จึงทำให้อะตอมที่ถูกจับไว้โดยปลายแหลมนั้นถูกส่งผ่านกลับสู่พื้นผิวตัวอย่างได้



การใช้ปลายแหลมของเครื่อง STM จัดวางอะตอมของแมงกานีสลงไปบนพื้นผิว  
โครงสร้างแทนที่อะตอมของอะตอมแกเลียมบนพื้นผิวของโครงสร้างของแกเลียมอาร์เซไนต์

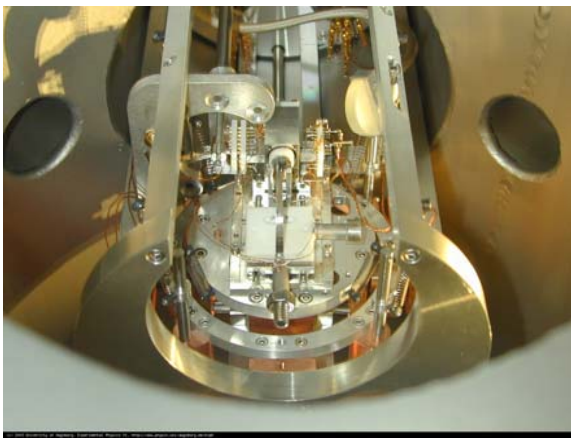


# AFM

## Atomic force microscope



atomic force microscope (AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน โดยเฉพาะเช่นเดียวกับ STM แต่เครื่อง AFM ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากเครื่อง STM และสร้างขึ้นมาด้วยหลักการพื้นฐานเดียวกับเครื่อง STM โดยเครื่อง AFM จะสามารถทำงานได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจหรือ โพรบ (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก (เหมือนกันกับเครื่อง STM) ซึ่งติดอยู่กับคานยื่น (cantilever) ที่สามารถโก่งงอตัวได้ เคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุ (ซึ่งสามารถที่จะวัด แรงกระทำที่ปลายแหลมของโพรบได้ แม้ว่าจะมีขนาดน้อยมากในระดับนาโนก็ตาม) และคุณสมบัติของเครื่อง AFM ที่มีมากกว่าเครื่อง STM ก็คือสามารถที่จะตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เช่น พื้นผิวโพลีเมอร์ เซรามิก คอมโพสิต กระจกหรือแก้ว หรือแม้แต่โมเลกุลทางชีวภาพต่าง ๆ ก็สามารถที่จะวัดได้



## หลักการทำงานของเครื่อง AFM

คือ การผ่านแสงเลเซอร์ไปให้กับส่วนปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดก ในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัว ทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏีสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณรวมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอม ที่มีกำลังการขยายสูงไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอนิเตอร์ เช่นเดียวกันกับเครื่อง STM (และโดยหลักการเดียวกันนี้ก็สามารถที่ใช้ปลายแหลมของคานนี้ ในการสร้างแรงผลักเพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้เช่นเดียวกันอีกด้วย)

