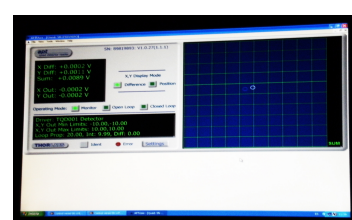
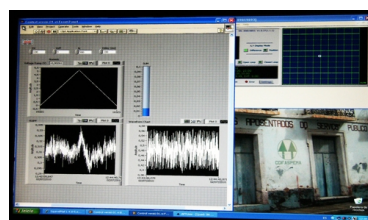
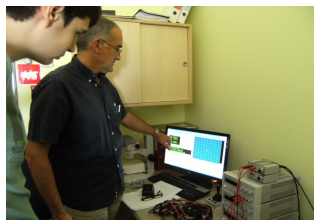
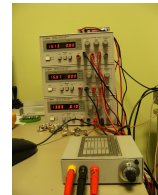
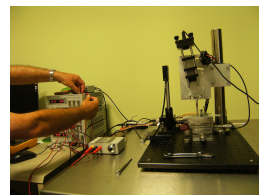
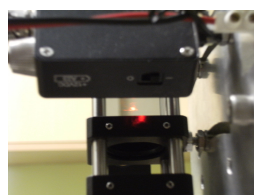
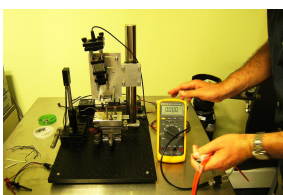
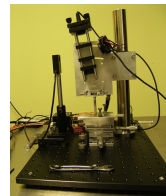
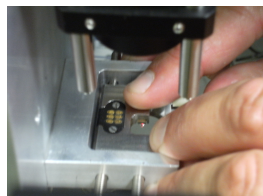
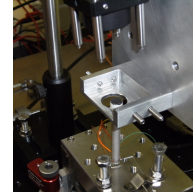
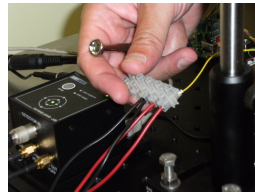


Descripció, funcionament i utilització experimental d'un microscopi de forces atòmiques



Índex

Síntesi

1. Introducció

2. Continguts

2.1 Fonaments físics

2.1.1 Estructura atòmica de la matèria

2.1.2 Forces electrostàtiques

2.1.2.1 Enllaç químic entre àtoms

2.1.2.2 Enllaç químic entre molècules

2.1.2.3 Llei de Coulomb

2.1.3 Oscil·lador harmònic:

2.1.3.1 Oscil·lador harmònic mecànic i oscil·lador harmònic
electromagnètic

2.1.3.2 Fenòmens ondulatoris

2.1.3.2.1 Reflexió

2.1.3.2.2 Refracció

2.1.3.2.3 Exemple de la llum

2.1.4 Òptica:

2.1.4.1 Òptica geomètrica

2.1.5 Corrent elèctric:

2.1.5.1 Voltatge, intensitat i resistència elèctrica

2.1.5.2 Circuits de corrent elèctric

2.1.6. Electrònica:

2.1.6.1 Semiconductors

2.2 El microscopi

- 2.2.1 Origen
- 2.2.2 Microscopi de forces atòmiques
- 2.3 Funcionament físic d'un microscopi de forces atòmiques
 - 2.3.1 Elements del microscopi:
 - 2.3.1.1 Làser
 - 2.3.1.2 Vidre tallat
 - 2.3.1.3 Fotodetector o detector fotoelèctric
 - 2.3.1.4 Tub piezoelèctric
 - 2.3.1.5 Sensor de forces
- 2.4 Anàlisi de materials
 - 2.4.1 Forces d'adherència
 - 2.4.2 Programa Labview
- 2.5 Interpretació de resultats
- 2.6 Estudi experimental d'una mostra
 - 2.6.1 Factor amplificador
 - 2.6.2 Estudi de la mica
- 3. Annexos
 - 3.1 Reflexió del làser
 - 3.2 Lectura del premi Nobel
- 4. Conclusions
- 5. Bibliografia

Síntesi

Poder construir amb les meves pròpies mans un Microscopi de Forces Atòmiques i poder descobrir tot el seu significat en el món de la nanotecnologia és comparable, tenint en compte la meua curta experiència, a la sensació que probablement van experimentar Gerd Binnig i Heinrich Rohrer quan van desenvolupar el microscopi precursor al Microscopi de Forces Atòmiques a la primera dècada dels anys 80 i que va fer que fossin guardonats pel Premi Nobel de Física l'any 1986.

El que realment em va impulsar a fer aquest treball de recerca va ser que poc després de saber algunes coses sobre aquest tema vaig veure que la nanotecnologia és un camp per explotar en la investigació i que aquest microscopi va ser i és una eina per descobrir-la. La millor manera per endinsar-m'hi va ser construint-lo. Ho vaig poder fer gràcies a CatalunyaCaixa i gràcies a Jordi Fraxedas, investigador del Centre d'Investigació en Nanociència i Nanotecnologia (CIN2) de la Universitat Autònoma de Barcelona.

Malgrat que ho podia haver fet, en aquest treball no he tractat la construcció del microscopi sinó, tal i com diu el títol, la descripció, el funcionament i la utilització experimental. Un dels meus objectius o reptes era poder portar a la pràctica allò que a les classes és tan teòric, com la força de Van der Waals. Volia veure com s'atreien els materials quan la distància que els separava fos de nanòmetres. No només això sinó que volia arribar-la a quantificar. A més a més, durant el procediment d'analitzar una mostra per observar aquesta força, em van sorgir dubtes seriosos. Quan allunyava un material de l'altre, que estava subjectat a una palanca, aquest primer l'atreia amb una força suficient com per arribar a fer-la flexionar fins que aquesta ja no ho podia suportar més i tornava a la seva posició inicial. No es podia tractar de la força esmentada.

Ho vaig aconseguir. Vaig aconseguir quantificar la força de Van der Waals i vaig descobrir quin fenomen s'estava produint. Aquest és el que constitueix la part pràctica del treball, és a dir, l'estudi de l'adherència entre materials.

En resum, la investigació de la nanotecnologia, que ha estat el fonament de tot el treball, tot just acaba de començar.

1. Introducció

La nanotecnologia comprèn aplicacions que fan servir el comportament de la matèria quan aquesta forma estructures inferiors a 100 nanòmetres, és a dir, inferiors a 100 milionèsimes de mil·límetre. Jordi Pascual, director de l'Institut Català de Nanotecnologia, parla de la nanotecnologia dient això: *“A vegades hi ha fets que quan es produeixen canvien radicalment la manera de veure les coses i ajuden a enfocar des de noves perspectives els problemes i les oportunitats”*. Podem dir que el Microscopi de Forces Atòmiques igual que el seu precursor obren el món a la nanotecnologia. Jordi Pascual corrobora la seva importància quan afegeix que *“la possibilitat de la manipulació individual d'àtoms i les seves conseqüències es van començar a fer realitat al començament dels anys vuitanta del segle passat, en què Binnig i Rohrer van idear un microscopi que permetia resseguir la topografia d'una superfície a nivell atòmic”*.

La nanotecnologia es convertirà en una tecnologia potent d'aplicació comparable a l'electricitat, la màquina de vapor i l'ordinador. Malgrat ser positiva en qüestió de productivitat, requerirà grans inversions en infraestructures. Sobretot la nanotecnologia destaca perquè té aplicacions pràctiques en gairebé tots els camps. Per exemple, en el món de la medicina, les nanotecnologies mèdiques ofereixen tractaments, implants i aparells quirúrgics; els nanomaterials proporcionen materials de construcció més resistents i lleugers; la nanoelectrònica ha permès crear dispositius de computació més petits i cada cop més potents.

L'AFM (Microscopi de Forces Atòmiques) està directament relacionat amb els processos innovadors d'investigació del món de la nanotecnologia i de la nanociència. Això precisament passa perquè no només pot recrear la topografia d'una mostra a nivell nanomètric sinó que també pot obtenir la imatge de les diferents interaccions o forces que es produeixen entre dos materials a escala nano-newton ja siguin conductors o no.

Les seves aplicacions estan lligades a la microfabricació, a la computació d'alta velocitat però sobretot a la biologia. Els experts afirmen que l'AFM proporciona als científics una eina clau per investigar el món real. Biòlegs investigadors en cèl·lules han aplicat tècniques úniques de l'AFM per estudiar, per exemple, el comportament dinàmic de la

vida i de cèl·lules fixes com els glòbuls blancs i vermells, les bactèries, plaquetes, etc. A més a més, ha permès el progrés significatiu en els àcids nucleics, ja que gràcies a aquest es poden generar imatges nanomètriques sense modificar els àcids nucleics.

2. Continguts

2.1 Fonaments físics

2.1.1 Estructura de la matèria

Àtoms

La matèria està formada per partícules molt petites anomenades àtoms. De la mateixa manera, els àtoms estan formats per dos parts diferenciades: l'escorça i el nucli. A l'escorça es troben altres partícules encara més petites anomenades electrons que, perquè ens fem una idea, tenen una massa de $9,11 \cdot 10^{-28}$ grams i una càrrega de -1 coulomb. El nucli, per altra banda, té protons i neutrons. Aquests dos tenen aproximadament la mateixa massa, 1836 vegades superior que la de l'electró. Els neutrons no tenen càrrega i els protons tenen la mateixa que l'electró però amb polarització contrària, és a dir, de 1 coulomb.

Com que un àtom ha de ser elèctricament neutre, el nombre de protons ha de ser igual que el d'electrons. La mida d'un àtom, que pot ser des de $0,2$ nm a $0,5$ nm on un nanòmetre equival a $1 \cdot 10^{-9}$ metres, ve definida pel nombre de protons, electrons i neutrons que té.

Elements

Un element és la substància constituïda per àtoms que tenen el mateix nombre de protons, és a dir, el mateix nombre atòmic. També podem diferenciar els elements pel seu nombre màssic que és igual a la suma de protons i neutrons.

No obstant, els diferents àtoms d'un element poden tenir diferents nombres de neutrons. Les partícules que tenen el mateix nombre atòmic i diferent nombre màssic s'anomenen isòtops.

La massa atòmica d'un element es defineix com la mitjana aritmètica ponderada de les masses atòmiques relatives dels isòtops d'un element.

2.1.2 Forces electrostàtiques

Les forces electrostàtiques són les forces en què es veuen sotmeses partícules carregades elèctricament. Les forces electrostàtiques poden ser d'atracció o de repulsió. Les forces entre partícules atractives es donen a partir de càrregues oposades. Quan existeix una força atractiva entre càrregues oposades s'originen uns potencials negatius (producte de càrregues amb signes diferents), que provoquen un rebaixament de l'energia dels sistema i, per tant, que donen lloc a una situació de major estabilitat. És per aquest motiu, per a tenir aquesta estabilitat, que en la naturalesa tant els elements com els compostos químics es troben majoritàriament sota la forma de molècules i agregats (atòmics i iònics) i rarament com a àtoms individualitzats.

Així doncs, les forces electrostàtiques atractives que s'estableixen entre àtoms o molècules donen lloc a enllaços químics. Com més elevades siguin les forces més elevada serà l'energia dels seus enllaços o, el que és el mateix, més elevada serà l'energia que caldrà aportar al sistema agregat per trencar els lligams que uneixen les seves partícules i dissociar-lo.

Hem de tenir en compte que les interaccions entre àtoms són ocasionades per la força electrostàtica que existeix entre ells i que dona lloc a enllaços químics. Tot seguit exposo una síntesi d'aquests.

2.1.2.1 Enllaç químic entre àtoms

Hi ha tres tipus d'enllaç: l'enllaç iònic, l'enllaç covalent i l'enllaç metàl·lic.

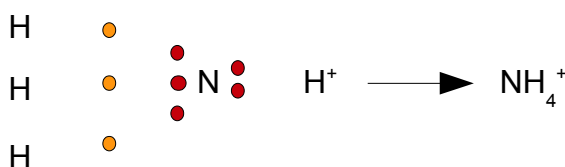
- **Enllaç iònic:**

L'enllaç iònic és el que es forma entre àtoms d'elements amb diferències d'electronegativitat elevades. L'electronegativitat és el nombre que compara la tendència relativa que té un àtom en estat fonamental a guanyar un electró. Per aquest motiu formen estructures cristal·lines ordenades geomètricament, amb ions positius i negatius. Com que les forces electrostàtiques són elevades, aquests sòlids són difícils de deformar, són durs i tenen un punt de fusió i d'ebullició alt.

- **Enllaç covalent:**

L'enllaç covalent es forma entre àtoms d'elements amb diferències d'electronegativitat baixes. Això provoca que formin molècules o estructures per compartició de parells d'electrons.

Hi ha diferents tipus d'enllaç covalent, un d'ells és l'enllaç **covalent coordinat**, també conegut com a datiu. Per explicar-ho, farem servir un exemple: l'amoni $(\text{NH}_4)^+$. D'acord amb l'estructura electrònica d'una molècula, sabem que el nitrogen (N) té a l'última capa o capa de valència cinc electrons, dos d'ells aparellats i tres que no; l'hidrogen (H) té només un electró i, per tant, li'n falta un. Com que al nitrogen li falten tres electrons, tres àtoms d'hidrogen s'aparellen amb aquests tres i formen la molècula d'amoníac (NH_3) . Quan a aquesta se li aproxima un àtom d'hidrogen que ha perdut l'únic electró que tenia, aquest s'ajunta amb el nitrogen i li cedeix els dos electrons aparellats que tenia també a l'última capa. D'aquesta manera, formen el catió amoni. D'acord amb el diagrama de Lewis, obtenim aquest catió:



Hi ha dos tipus de substàncies covalents: les substàncies moleculars, on les seves forces atractives febles fan que siguin compostos tous i que tinguin punts de fusió i d'ebullició baixos i l'altre tipus de substàncies són les atòmiques, on es produeixen estructures gegants formades per enllaços covalents tridimensionals. Aquestes són resistents a les deformacions, són dures i tenen punts de fusió i d'ebullició alts (més elevats que els compostos iònics).

- **Enllaç metàl·lic:**

L'enllaç metàl·lic és aquell format per elements metàl·lics, és a dir, elements d'electronegativitat baixa. Aquest dóna lloc a sòlids forts, de conductivitat elèctrica elevada, ja que els àtoms d'elements metàl·lics s'estabilitzen com a ions

positius i els electrons originats que queden lliures es mouen al seu voltant, formant així l'anomenat “núvol electrònic”.

2.1.2.2 Enllaç químic entre molècules

En l'enllaç químic entre molècules podem distingir les forces intermoleculares.

Forces Intermoleculares

Les forces intermoleculares són interaccions que experimenten entre elles les molècules de substàncies covalents moleculars, ja siguin polars o apolars. Aquestes forces són la causa de la formació de l'enllaç de Van der Waals i de l'enllaç per pont d'hidrogen.

Les molècules de substàncies covalents moleculars són aquelles molècules que estan unides per un enllaç covalent. Tal i com hem dit, aquest tipus d'enllaç es dona preferentment entre els àtoms dels elements més electronegatius, per tant, aquest enllaç es donarà entre els àtoms d'elements no metàl·lics.

En un enllaç covalent es comparteixen parells d'electrons entre els àtoms dels elements que el formen. Aquests electrons es concentren entre els dos nuclis dels àtoms que s'enllacen i la càrrega negativa creada pels dos electrons és el que manté units els dos nuclis positius.

Anteriorment també hem dit que les forces intermoleculares es donen tant en substàncies covalents polars com apolars.

Una substància s'anomena **polar** quan té la càrrega elèctrica distribuïda de manera que una part de la molècula queda carregada negativament i una altra part, positivament. Un exemple de molècula polar és l'aigua (H₂O).

Les molècules **apolars**, en canvi, tenen l'origen en la interacció dels extrems de càrrega oposada de dipols instantanis. Un dipol instantani és generat per una distribució asimètrica de càrrega elèctrica provocat pel moviment dels electrons en un àtom o molècula. Els dipols instantanis poden canviar immediatament o desaparèixer com a conseqüència de la interacció entre ells.

- **Forces de Van der Waals:**

Les forces de Van der Waals són forces d'atracció a la que es veuen sotmeses dues molècules separades.

Aquestes forces són menyspreables quan aquestes molècules estan sotmeses a temperatures suficientment altes, ja que aquestes no són prou intenses per superar l'agitació tèrmica d'aquestes molècules. Quan l'agitació tèrmica de les molècules és menyspreable, les forces de van der Waals són la causa, per exemple, de que les substàncies es condensin en forma líquida i després en sòlida.

Les forces de Van der Waals sorgeixen de la interacció entre dipols elèctrics de les molècules.

Aquest enllaç es pot donar tant entre molècules polars com apolars.

- **Molècules polars:**

L'enllaç de Van der Waals en molècules polars es dona ja que aquestes s'atreuen entre elles perquè tenen càrregues electrostàtiques. Quan hi ha un seguit de molècules polars aquestes produeixen una disposició espacial que deixa a prop l'extrem positiu d'unes molècules i l'extrem negatiu d'altres. Això s'anomena ordenació dipol-dipol.

- **En molècules apolars:**

En l'enllaç de molècules apolars també es produeixen unions dipol-dipol. Aquests dipols no són els dipols de les molècules polars, sinó que són uns dipols instantanis que es generen pel fet que els electrons dels enllaços vibren contínuament generant, així, asimetries momentànies. En comparació amb els dipols de les molècules polars, aquests són més dèbils i depenen fortament de la geometria de les molècules.

2.1.2.3 Llei de Coulomb

Tots els tipus de força de caràcter electrostàtic es quantifiquen mitjançant la llei de Coulomb, que té com a expressió matemàtica la següent:

$$F = \frac{k \cdot q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

On “F” és la magnitud de la força exercida, en aquest cas força electrostàtica, “ q_1 ” i “ q_2 ” són les càrregues de dos cossos, “r” és la distància entre aquestes i “K” equival a $9 \cdot 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$.

Com a força d'atracció podem posar l'exemple del cas hipotètic en què un electró i un protó estan a una distància suficient com per poder sentir una atracció mínima. En aquest cas, com que l'electró (e) és de càrrega negativa i el protó (p) positiva, s'atrauran tant electrostàticament com gravitatòriament. No obstant, només se sol considerar la força electrostàtica (F_e), ja que la gravitatòria és gairebé imperceptible al costat d'aquesta. Comprove-m'ho:



La massa de l'electró és de $9,11 \cdot 10^{-31} \text{Kg}$ i la càrrega és de $1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$. En canvi la massa del protó és de $1,67 \cdot 10^{-27} \text{Kg}$ i la càrrega és la mateixa que la de l'electró.

Tenint en compte la llei de Coulomb i les càrregues en valor absolut obtenim això:

$$F = \frac{(k \cdot q_1 \cdot q_2)}{(r^2)}$$

$$F_e = \frac{(k \cdot q^2)}{(r^2)} = \frac{(9 \cdot 10^9 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^2)}{r^2} = \frac{(9 \cdot 1,602^2 \cdot 10^{-29})}{r^2} = \frac{(2,31 \cdot 10^{-28})}{r^2}$$

Si la comparem amb la força gravitatòria (F_g) a partir de l'expressió matemàtica que quantifica aquesta, obtenim això:

$$F_g = \frac{(G \cdot M_p \cdot M_e)}{r^2}$$

Tenint en compte les dades d'abans i que “G” és la constant de gravitació i equival a $6,67 \cdot 10^{-11} \text{Nm}^2 / \text{Kg}^2$, el resultat és aquest:

$$F_g = \frac{(6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31})}{r^2} = \frac{(6,67 \cdot 1,67 \cdot 9,11 \cdot 10^{-69})}{r^2} = \frac{(1,015 \cdot 10^{-67})}{r^2}$$

Si relacionem les dues obtenim que:

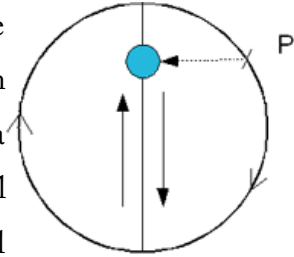
$$\frac{Fe}{Fg} = \frac{\left(\frac{2'31 \cdot 10^{-28}}{r^2}\right)}{\left(\frac{1'015 \cdot 10^{-67}}{r^2}\right)} = \frac{(2'31)}{(1'015)} \cdot 10^{39} \qquad Fe = \frac{(2'31)}{(1'015)} \cdot 10^{39} Fg$$

Es considera la força gravitatòria menyspreable perquè, com podem veure, la força electrostàtica és molt més gran, aproximadament 39 vegades.

2.1.3 Oscil·lador harmònic

Un **oscil·lador harmònic** és un sistema físic material que du a terme un moviment vibratori harmònic simple. Aquest sistema físic pot ser mecànic, electromagnètic o pneumàtic.

El **moviment vibratori harmònic simple** és aquell que s'identifica amb el que realitza un cos que recorre un diàmetre d'una circumferència, les diferents posicions del qual es poden obtenir projectant les d'un hipotètic punt (P), que recorre la circumferència amb moviment circular uniforme, sobre el diàmetre de la mateixa. Per a fer-nos una idea, observe-m'ho al dibuix.



2.1.3.1 Oscil·lador harmònic mecànic i oscil·lador harmònic electromagnètic

La diferència entre un oscil·lador harmònic electromagnètic i un oscil·lador mecànic és el sistema físic que verifica el citat moviment vibratori harmònic simple. Concretament, en aquest primer cas és una càrrega i en el segon és un cos descarregat, per exemple, una bola subjectada a una molla que verifica un moviment vibratori harmònic simple.

2.1.3.2 Fenòmens ondulatoris

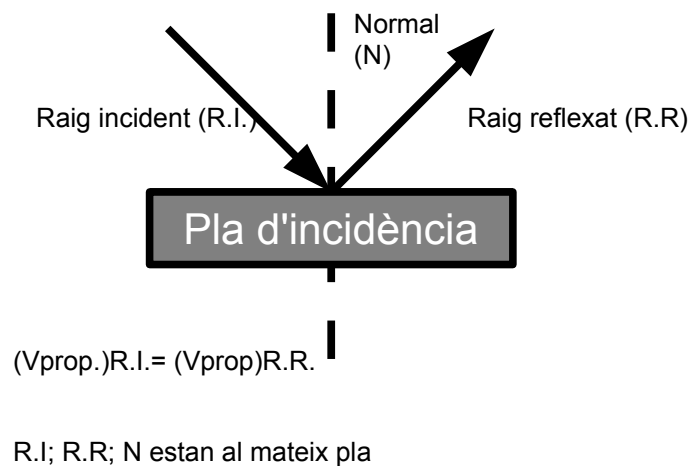
Les ones són la propagació d'una pertorbació originada per la variació d'una magnitud física. A més a més, una ona o moviment ondulatori transmet energia i quantitat de moviment amb velocitat de propagació constant, sense que es produeixi un transport net de matèria.

Les ones, i per tant la llum, estan sotmeses a fenòmens ondulatoris que s'enuncien a continuació.

2.1.3.2.1 Reflexió

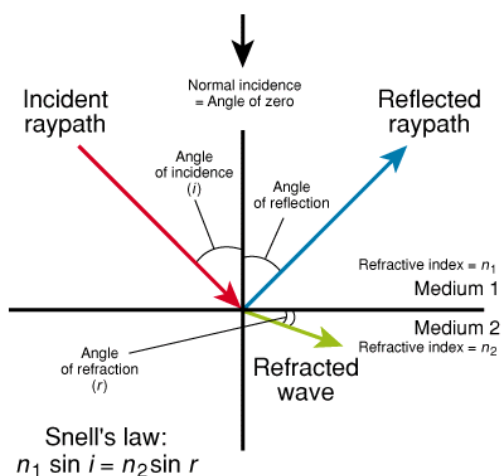
La reflexió es dona quan una ona es veu obstaculitzada per algun sistema i els seus fronts d'ona canvien de direcció, és a dir, es reflecteixen. Un front d'ona és el conjunt de tots els punts que posseeixen les mateixes característiques de vibració. Aquest canvi de direcció dels fronts d'ona es veu produït quan aquests incideixen sobre el límit de separació de dos medis diferents, per exemple, gas i sòlid.

Concretament, el mecanisme físic de la reflexió de la llum consisteix en la absorció i irradiació posterior de la llum, si parlem d'aquest tipus d'ona, pels àtoms del medi reflectant. Per exemple, quan la llum que es transmet en l'aire incideix sobre una superfície de vidre, els àtoms d'aquest absorbeixen la llum i la irradien immediatament amb la mateixa freqüència en totes les direccions. La reflexió suposa que el valor de la velocitat de propagació incident i el valor de la reflectida serà el mateix ja que aquest és en funció del medi i el medi és el mateix quan parlem de reflexió. Veiem-ho amb el dibuix:



2.1.3.2.2 Refració

Aquest fenomen físic, en canvi, es veu produït quan un front d'ones travessa la superfície de separació de dos medis diferents. En el moment que canvia de medi, l'ona varia la seva velocitat de propagació i també la seva direcció però sempre es manté en el mateix pla d'acord amb el principi de Huygens.



On n és l'índex de refracció que ve definit pel quocient entre la velocitat de la llum i la velocitat del medi:

$$n = \frac{c}{v}$$

Si observem el dibuix, podem comprovar que quan una ona incideix en un medi diferent del d'un principi l'angle varia, com també varia la velocitat de propagació. L'equació que quantifica el fenomen de la refracció és la llei de Snell, que posa de manifest la velocitat de propagació incident (v_1) i el sinus de l'angle del raig refractat (\sin_{Er}) amb la velocitat de propagació refractada (v_2) i el sinus de l'angle de l'incident (\sin_{Ei}):

$$v_1 \cdot \sin_{Er} = v_2 \cdot \sin_{Ei}$$

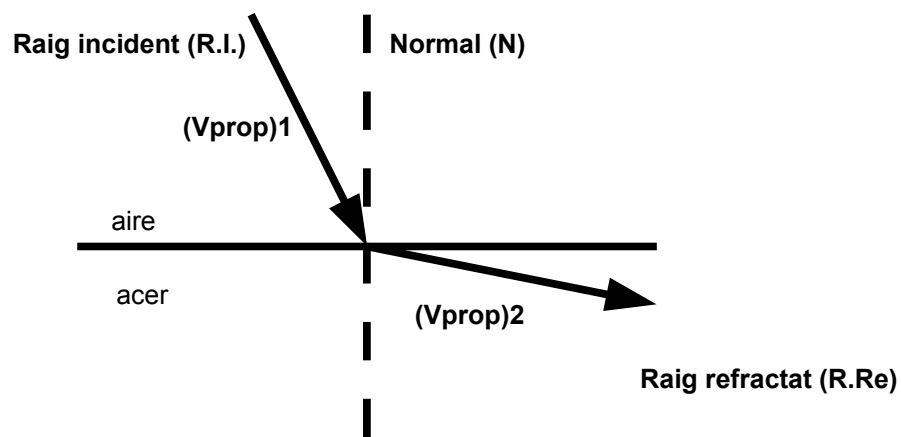
Existeixen dos tipus d'ones:

Les ones mecàniques que necessiten un medi material per a ser transemeses, per exemple, el so i les ones electromagnètiques que, en canvi, no el necessiten, com per exemple la llum.

Després de dir això, interpretem la refracció d'aquests dos tipus d'ones diferents:

- **Ona mecànica:**

Proposem que el raig incident (R.I.) està en aire i el raig refractat (R.R) està en un medi sòlid com l'acer.



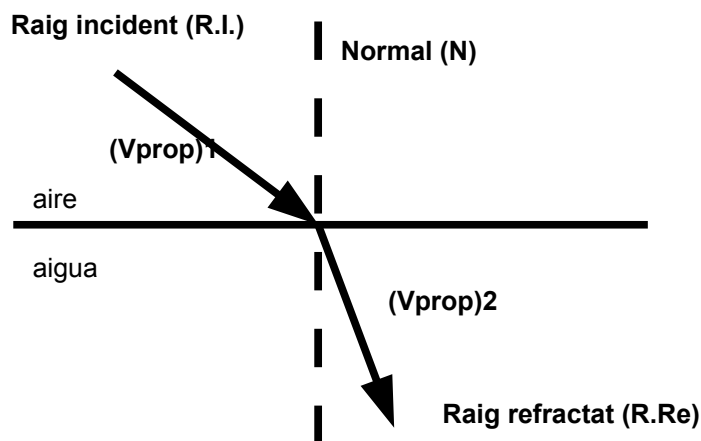
El valor de la velocitat d'una ona mecànica serà més gran com més compacte sigui el medi. Per tant, si el medi del raig refractat és l'acer, la velocitat d'ona d'aquest raig serà més gran. D'acord amb la llei de Snell:

$$v_1 \cdot \sin_{(R,R)} = v_2 \cdot \sin_{(R,I)}$$

Si la velocitat (2), és a dir, la del raig refractat, és més gran, el sinus del raig incident és més petit, de la mateixa manera, la velocitat (1), és a dir, la del raig incident, és més petita i el sinus del raig refractat és més gran i per tant, s'allunya de la normal.

- **Ona electromagnètica:**

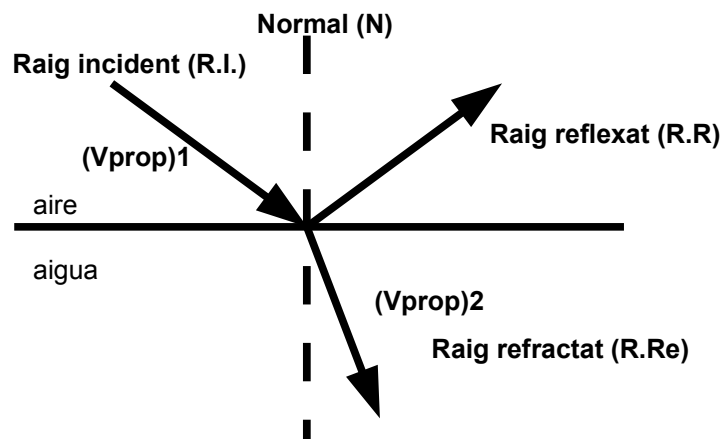
Si posem per exemple la llum i definim que l'ona passa de l'aire a l'aigua observem això:



A diferència d'una ona mecànica, l'ona electromagnètica es mourà amb més facilitat pel medi menys compacte, en aquest cas l'aire. Per tant, la velocitat de propagació en l'aire serà més gran que la que té en l'aigua. D'acord amb el principi de Snell, l'angle d'incidència serà més gran que l'angle refractat respecte de la normal, tal i com hem raonat abans.

2.1.3.2.3 Exemple de la llum

En la majoria dels casos, quan una ona passa d'un medi a un altre es produeixen a la vegada aquests dos fenòmens ondulatoris. Posem l'exemple de la llum quan passa d'un medi gasós com l'aire a un medi líquid com l'aigua. Observem-ho al dibuix:

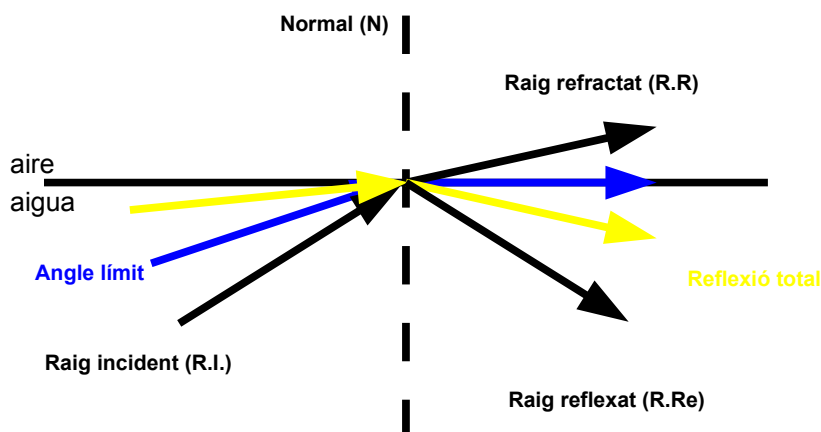


Podem comprovar en aquest dibuix que tant l'angle com la velocitat del raig incident i el reflectit és el mateix i en canvi, l'angle del raig refractat i la seva velocitat depèn de la llei de Snell. Deduïm que la velocitat del raig refractat en medi aquós és inferior ja que posa més obstacles a la llum a l'hora de propagar-se i l'angle és petit respecte a la normal.

Reflexió Interna total

La reflexió interna total és duta a terme quan un raig de llum té un angle d'incidència superior a l'angle límit, essent l'angle límit aquell a qui li correspon un angle de refracció de noranta graus. Per tant, quan un angle d'incidència és superior a l'angle límit, desapareix l'angle refractat i tota l'energia es reflexa.

Veie-m'ho al dibuix:



Una aplicació interessant de la reflexió total és la transmissió d'un feix de llum en una fibra de vidre transparent anomenada fibra òptica.

Aquesta és utilitzada en medicina com a sondes per a examinar diversos òrgans interns sense la necessitat d'intervenció quirúrgica. També s'utilitza en comunicació, ja que es pot transmetre informació sense interacció mecànica i amb una reflexió total dels fotons. Això permet que la velocitat de transmissió d'informació sigui d'aproximadament 200.000Km/s sense interacció mecànica, tenint en compte que:

$$n_{vidre} = \frac{C}{(v_{llum})_{vidre}}$$

On :

n: índex de refracció del vidre (aproximadament 1,5)

c: velocitat de la llum al buit (aproximadament 300.000Km/s)

v: velocitat de la llum al vidre

Si substituïm les dades, ratifiquem el que hem enunciat anteriorment:

$$(v_{llum})_{vidre} = \frac{c}{n_{vidre}} = \frac{(300.000 \text{ Km/s})}{1,5} = 200.000 \text{ Km/s}$$

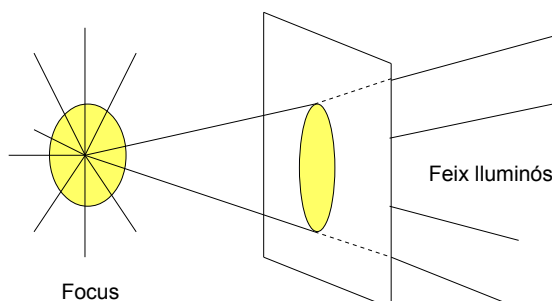
2.1.4 Òptica

L'òptica és la part de la física que s'ocupa de l'estudi de la llum. No obstant, nosaltres només tractarem la part de l'òptica que es fonamenta en el conjunt de principis purament geomètrics, que permeten estudiar fenòmens, deixant de banda les hipòtesis sobre la naturalesa de la llum. Això és òptica geomètrica.

2.1.4.1 Òptica geomètrica

La llum

Un feix de llum és el conjunt de radiacions lluminoses que es transmeten en l'interior d'un con on el seu vèrtex es troba en el focus lluminós i està limitat per l'obertura efectuada en la pantalla. Com podem veure en el dibuix:



Un feix de llum es convertiria en un raig quan el con lluminós es fes estret pràcticament fins a l'infinit. Un raig de llum s'identifica amb cada una de les direccions de propagació de la llum.

La zona on no hi arriba cap raig de llum s'anomena ombra i la zona on només hi arriben una part dels rajos s'anomena penombra.

Sistema òptic

Un sistema òptic és un conjunt de superfícies que separen medis d'índexs de refracció diferents.

La interacció entre rajos i el sistema òptic dóna lloc a imatges. Una imatge òptica és una figura formada per un conjunt de punts els quals provenen de rajos convergents, que són originats per fonts puntuals d'un objecte després de la interacció amb el sistema òptic.

Les imatges poden ser de dos tipus:

- **Imatge real d'un objecte:** La qual es produeix quan tenim un objecte “O”, davant d'un sistema òptic i els rajos lluminosos que parteixen d'aquests es tallen en un punt “O”, ja que són convergents, com veurem en el segon punt.
- **Imatge virtual d'un objecte:** s'originen quan tenim un objecte “O”, davant d'un sistema òptic i els rajos reflexats o refractats no es tallen, ja que són divergents, com també veurem en el segon punt, després de reflectir-se o refractar-se al sistema. Com que per formar una imatge es necessita que els rajos conflueixin en punts, les seves prolongacions ho fan en sentit contrari.

Lents

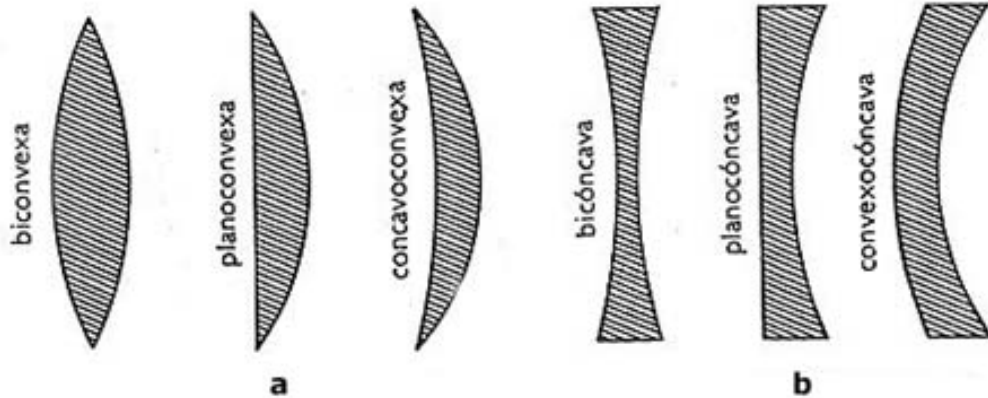
Les lents són porcions de medis refringents limitats per dos superfícies, una de les quals, com a mínim ha de ser corba.

Les lents més comunes són les lents de vidre, en les quals les superfícies solen ser esfèriques. En una lent destaca:

- **L'eix òptic de la lent**, que ve definit per la recta que uneix els centres de la corba de les cares de la lent.
- **L'espessor de la lent**, que és la distància entre les cares mesurada sobre l'eix òptic.

En funció del seu comportament respecte de la llum, les lents es poden classificar en:

- **Lents convergents (a):** són més gruixudes dels centre que dels extrems. Tenen la característica que fan confluïr els rajos lluminosos paral·lels que incideixen sobre elles. Aquestes es poden classificar segons la forma en: “biconvexes”, “plano-convexes” i “còncavo-convexes”.
- **Lents divergents (b):** són més estretes del centre que dels extrems. Les lents divergents separen els rajos lluminosos paral·lels que incideixen sobre elles. Com a conseqüència, són les prolongacions dels rajos que surten de la lent, en sentit contrari, les que es tallen per formar imatges. La classificació d'aquestes és en : “bicòncaves”, “plano-còncaves” i “convexo-còncaves”.



Construcció d'imatges a partir de lents

Per a la construcció d'imatges en lents hi ha unes normes:

- Tot raig lluminós que travessa una lent passant pel centre òptic o geomètric de la lent, es refracta sense desviar-se.
- Qualsevol raig que incideix sobre la lent seguint una direcció paral·lela a l'eix òptic, es refracta de manera que ell o la seva prolongació en sentit contrari passa per un punt de l'eix òptic anomenat **focus imatge de la lent (F')**.
- Tot raig lluminós que surt de la lent paral·lelament al seu eix òptic, incideix sobre ella de manera que el raig o la seva prolongació passa per un punt de l'eix òptic anomenat **focus objecte de la lent (F)**.

Els focus són punts significatius de l'eix òptic molt importants en l'òptica de les lents. N'hi ha dos:

- **Focus objecte d'una lent:** és un punt de l'eix òptic la imatge del qual es forma en l'infinit i sobre l'eix.
- **Focus imatge d'una lent:** és un punt de l'eix òptic que és la imatge d'un punt que es troba a l'infinit i sobre l'eix.

2.1.5 Corrent elèctric

2.1.5.1 Voltatge, intensitat i resistència elèctrica

El **corrent elèctric** és el moviment de càrregues elèctriques a través d'un medi que l'hi permeti, és a dir, a través d'un medi conductor.

Per entendre què és el corrent elèctric necessitem saber què és allò que el defineix, és a dir, la càrrega elèctrica:

La **càrrega elèctrica** és la propietat que adquireix la matèria quan es produeix un desequilibri entre el nombre de protons dels àtoms que la constitueixen i el nombre d'electrons dels mateixos.

Hi ha dos tipus de càrregues elèctriques:

- **Càrrega elèctrica positiva:** és la que adquireix un cos quan perd electrons de la seva estructura partint d'una situació de neutralitat.
- **Càrrega elèctrica negativa:** és la que adquireix un cos quan guanya electrons partint d'una situació de neutralitat.

Com hem dit abans, el medi que permet el moviment de càrregues elèctriques s'anomena conductor. Existeixen dos tipus d'aquests:

- **Conductors de primera classe:** constituïts pels metalls i els seus aliatges.
- **Conductors de segona classe:** constituïts per les dissolucions electrolítiques d'àcids, bases i sals. Els electrolits són un àcid, una base o una sal. Això vol dir que en dissoldre's en aigua les seves molècules es dissocien en ions del signe contrari. Aquests ions obtinguts són els que defineixen el seu caràcter conductor.

La **diferència de potencial entre dos punts, el voltatge o la tensió** d'un camp elèctric és el treball realitzat per la força electrostàtica que utilitza per a traslladar la unitat de càrrega elèctrica positiva entre dos punts. També hem de tenir en compte que el **camp elèctric** és la zona de l'espai que envolta a una càrrega elèctrica on aquesta manifesta els seus efectes d'atracció o repulsió sobre altres càrregues.

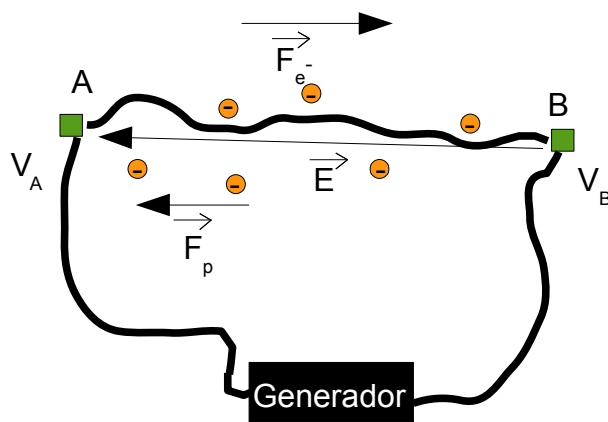
L'expressió matemàtica que posa de manifest el voltatge en funció de la intensitat i de la resistència és **La llei d'Ohm** :

$$(V_A - V_B) = I \cdot R$$

Un ohm és la resistència entre dos punts d'un conductor que, en establir entre ells una diferència de potencial d'un volt, circula entre els mateixos un corrent elèctric d'un amper de intensitat.

2.1.5.2 Circuits de corrent elèctric

Tot seguit desenvoluparem un estudi del corrent elèctric i utilitzarem els conductors de primera classe, que formaran circuits a través dels quals circularà el corrent. Posem per exemple que disposem d'un conductor metàl·lic i sotmetem els seus extrems a una diferència de potencial, com a conseqüència, s'originarà un camp elèctric al seu interior dirigit cap als potencials decreixents. Observe-m'ho gràficament:



Apliquem una diferència de potencial en un conductor o semiconductor, com en aquest cas, si suposem que és un cable de coure. A més a més, hi col·loquem un generador.

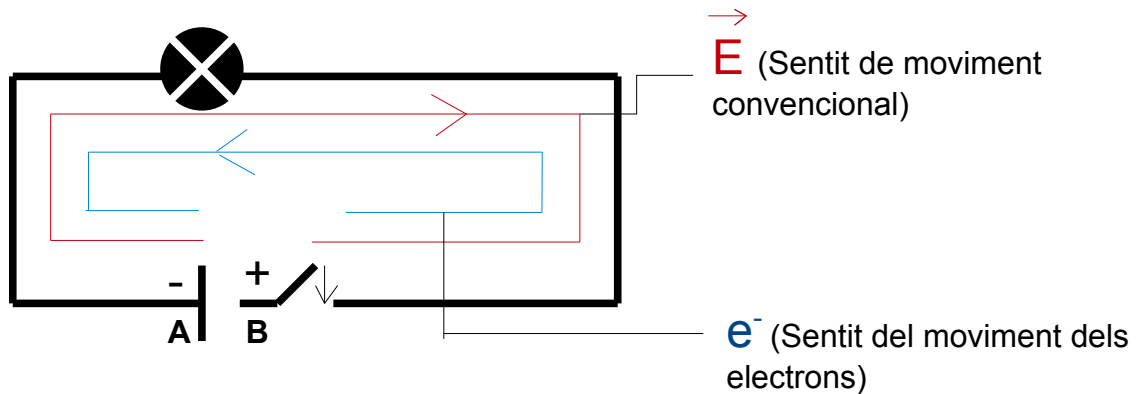
Tal i com hem anunciat en el punt 1.2.1 *Forces electrostàtiques*, en un enllaç covalent i, per tant, entre metalls, els electrons queden lliures envoltant els seus àtoms.

D'aquesta manera, la diferència de potencial, gràcies al generador, produirà el moviment dels electrons amb una determinada intensitat i vencent l'oposició que el material del conductor ofereix a la circulació d'electrons, és a dir, la resistència "R" del conductor. Que el corrent tingui més o menys intensitat depèn de la secció del conductor que travessa i del temps que tarda en fer-ho.

El camp elèctric que es produeix en aplicar una diferència de potencial generarà el moviment de càrregues elèctriques negatives. El sentit del seu moviment anirà del menor potencial al major. En aquest dibuix, hem decidit que el major potencial és V_B i el menor V_A . El mateix sentit del camp elèctric el tindrà la força que s'exerciran els nuclis dels àtoms dels protons del conductor sobre ells (\vec{F}_p). Com que el material conductor és un sòlid i, per tant, té una estructura estable, la força que s'exerceixen els protons entre ells serà compensada per la força reticular. Com que el sentit del moviment dels protons seria contrari al dels electrons, aquests darrers tindran també, un

sentit de moviment oposat al del camp elèctric. Tanmateix, el corrent elèctric ve definit pel moviment dels electrons, és a dir, la força que aquests s'exerceixen sobre ells (\vec{F}_e) i té un sentit de moviment del menor potencial al de major.

No obstant, el comportament espontani dels fenòmens sempre va en el sentit de més a menys. Per exemple, un llapis quan es deixa en llibertat cau de més altura a menys altura. Per aquest motiu, en el cas del corrent elèctric es considera un sentit convencional de circulació d'aquest, que va del major potencial al menor:



L'anàlisi matemàtic d'aquest cas, es realitzaria a partir de la definició de camp elèctric:

$$\vec{E} = -\frac{dV}{dr}$$

El camp elèctric (\vec{E}) és la disminució de voltatge ($-dV$) respecte de la distància (dr). Si aïllem la variació de voltatge i l'integrem, veiem que és igual a la diferència de potencial del de major al de menor potencial:

$$\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_A^B [-dV] = -(V)_A^B = -V_B + V_A = V_A - V_B$$

Com que el camp elèctric és igual a la força (\vec{F}) que s'exerceix sobre la unitat de càrrega positiva, observem que:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Una diferència de potencial genera un camp elèctric que té un sentit de moviment que va del major potencial, que tal i com hem decidit abans és V_B , cap al de menor que és V_A . A la vegada, el corrent elèctric ve definit pel moviment dels electrons i aquest serà el contrari al sentit del camp elèctric i, com hem deduït abans, es mouran de V_A cap a V_B .

$$V_B - V_A \rightarrow \exists \vec{E}_{(B \rightarrow A)} \rightarrow e_{(V_A \rightarrow V_B)}$$

2.1.6 Electrònica

L'electrònica estudia fenòmens relacionats amb l'electró. Més en concret, tracta de dissenyar, analitzar i utilitzar dispositius en els que entrin en joc una emissió o absorció d'electrons.

La propietat fonamental d'aquests dispositius és la de produir una ampliació de les senyals que els arriben. És en aquesta propietat en la que es basen bona part de les aplicacions del mateix.

2.1.6.1 Semiconductors

Els electrons d'un àtom lliure es distribueixen, depenent dels nivells energètics que posseeixen, al voltant del nucli. Per exemple, els electrons situats a prop del nucli tenen menys energia, és a dir, es troben en nivells més baixos. Això s'explica perquè la càrrega d'un electró és negativa i el nucli està format per protons i neutrons on els neutrons no tenen càrrega i els protons la tenen positiva. Per tant, la força d'atracció que experimentarà l'electró i el nucli, si és elevada farà que es mantinguin a prop. Els electrons que estiguin situats a prop del nucli tenen nivells d'energia més baixos que un que estigui més allunyat.

Per a poder separar un electró del nucli s'ha de vèncer l'atracció mútua entre l'electró i el nucli. D'acord amb la llei de Coulomb, que hem anunciat en l'apartat *1.2.1 Forces electrostàtiques*, la força és inversament proporcional al quadrat de la distància. Per aquest motiu, l'electró que es trobi a prop del nucli estarà sotmès a una força d'atracció més elevada que els que estiguin més allunyats. Dit això, per a poder separar un electró que està a prop del nucli s'ha d'utilitzar una certa quantitat d'energia més elevada que la que es necessita per un electró que està més allunyat.

En el moment en què un electró passa d'un nivell d'energia més alt a un altre més baix, s'allibera una determinada quantitat d'energia anomenada fotó. En canvi, si l'àtom absorbeix un fotó, l'electró passa a un nivell d'energia més gran. En conclusió, podem dir que l'energia dels electrons varia només en proporcions determinades, és a dir, per fotons.

Teoria de bandes del cos sòlid

Aquesta teoria posa de manifest que els nivells d'energia s'uneixen en bandes individuals i els electrons de la capa exterior de l'àtom omplen una sèrie de nivells d'energia que componen la **banda de valència**.

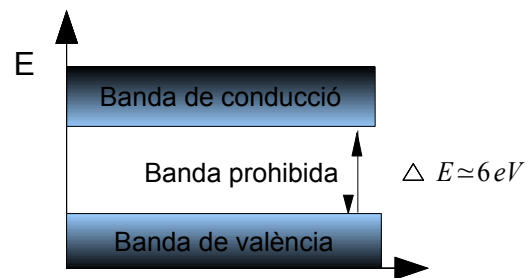
En els metalls i en els semiconductors existeix una gran quantitat d'electrons que es troben en nivells d'energia més alts. Aquests nivells són els que formen la **banda de conducció**. Els electrons d'aquesta banda són anomenats **electrons de conducció**. Aquests tenen un moviment desordenat dins del cos i passen d'uns àtoms a uns altres. Concretament, els electrons de conducció són els responsables de l'electroconductivitat dels metalls.

Els àtoms de les substàncies que entreguen electrons a la banda de conducció es poden considerar com ions positius, els quals es disposen en un ordre determinat i formen l'anomenada **xarxa espacial**, o també **iònica** o **crystal·lina**. Dins d'aquesta hi té lloc el moviment desordenat dels electrons de conducció.

Segons l'estructura de bandes que disposen els cossos, es classifiquen en aïllants, conductors i semiconductors.

- **Aïllants o dielèctrics**

En aquestes substàncies les bandes de conducció i de valència estan separades per una àmplia banda prohibida. Aquesta correspon a nivells d'energia en les quals no pot haver-hi electrons. La diferència entre l'energia de conducció i el nivell superior de la banda de valència correspon a l'amplada de la banda prohibida i es quantifica aproximadament amb 6 eV. A una temperatura normal, a la banda de conducció dels aïllants existeix una quantitat molt petita d'electrons i per això l'aïllant té una conductivitat inapreciable.



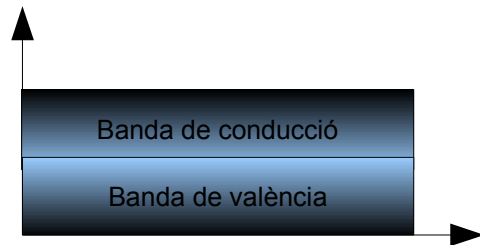
- **Conductors**

En els metalls, la banda de conducció està solapada a la banda de valència. Per això, a temperatura normal una gran quantitat d'electrons tenen energia suficient com per saltar de la banda de valència a la banda de conducció.

Se sap que pràcticament cada àtom de metall entrega a la banda de conducció com a mínim un electró. D'aquesta manera, el nombre d'electrons de conducció en els metalls no és menor que el nombre d'àtoms.

Els metalls són bon conductors degut a dos maneres de conducció de l'energia diferents. Una és per **bandes semi-plenes**, on tant les bandes de valència com les de conducció no estan totalment complertes. Aquesta es pròpia dels metalls alcalins i terris els quals només tenen un o tres electrons a l'última capa.

L'altra manera és per **recobriment**, en la qual la banda de conducció i la de valència es recobreixen parcialment i tenen una zona en comú a la que poden saltar els electrons de la capa

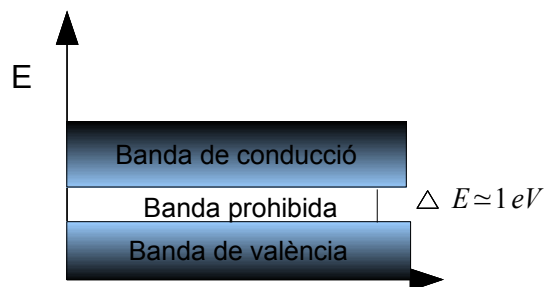


de valència mitjançant una energia d'excitació obtinguda per la calor o per un camp elèctric. Ho podem veure en el dibuix de la dreta.

- **Semiconductors**

Com indica el seu nom, posseeixen una conductivitat intermèdia entre la dels conductors i la dels aïllants. Aquesta conductivitat creix en augmentar la temperatura.

En els semiconductors, el diagrama de bandes és similar al dels aïllants, però en el cas d'aquests l'amplada de



la banda prohibida és menor, aproximadament d'1 eV. És per aquest motiu que en baixes temperatures els semiconductors es comporten com a dielèctrics però, en canvi, a temperatura normal, una quantitat considerable d'electrons salta de la

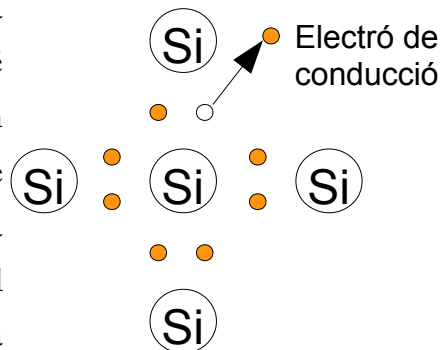
banda de valència a la de conducció. Això dóna lloc a parells d'“electrons-forat” que possibiliten la conducció.

Hi ha dos tipus de conducció: la intrínseca i la extrínseca.

- **Conducció Intrínseca per electrons i forats:**

Per explicar-la farem ús de dos exemples de dos elements semiconductors: el germani i el silici. Les capes externes d'aquests dos tenen quatre electrons de valència. La seva xarxa cristal·lina està composta per àtoms enllaçats entre sí per electrons de valència i formen, per tant, un enllaç covalent. Dos electrons de valència es mouen per òrbites al voltant de cada parell d'àtoms.

A temperatura del zero absolut, és a dir, a 273 K, el semiconductor que no conté impureses és un aïllant. En el moment en què s'eleva la temperatura, magnitud que s'identifica amb el grau d'agitació interna d'una partícula d'un sistema, del semiconductor, els electrons de valència



reben una energia suplementària i molts d'ells superen la banda prohibida i passen de la banda de valència a la banda de conducció. Aquests electrons passen a anomenar-se electrons de conducció i s'origina la conducció per electrons.

Com veiem en el dibuix, cada electró que passa de la banda de valència a la banda de conducció deixa un lloc lliure o *forat* (falta d'un electró en un àtom). Aquests forats es comporten com càrregues positives i aquests forats de conducció són del mateix nombre que dels electrons que salten a la banda de conducció. Podem dir que juntament amb la conducció d'electrons es crea la conducció de *forats*. En aquesta conducció si s'aplica una diferència de potencial, els forats es desplacen com a càrregues positives. Els electrons i els forats que poden desplaçar-se i crear la conductivitat s'anomenen **portadors de càrrega**. Per a poder generar parells d'“electró-forat” es pot aplicar calor o l'acció de la llum d'un camp elèctric.

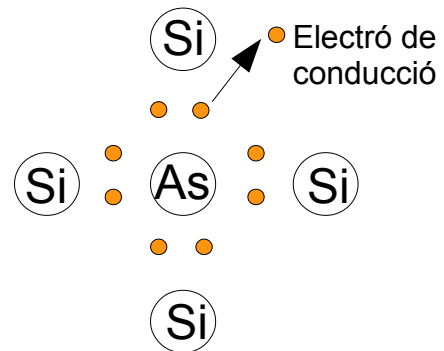
Aquests tipus de semiconductors s'anomenen **semiconductors intrínsecs** i són sense impureses. El valor de la conductivitat d'aquests depèn de la concentració dels portadors de càrrega (quantitat per unitat de volum).

- **Conducció extrínseca**

La conducció extrínseca, en canvi, es dona en els semiconductors en els quals hi existeixen impureses d'altres substàncies. La conducció extrínseca, segons el tipus d'impureses, pot ser donada per electrons o per forats.

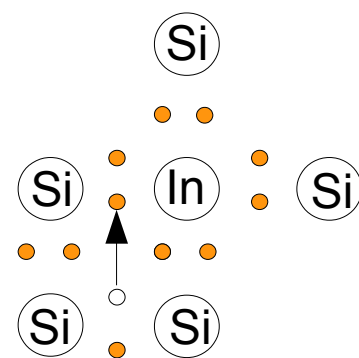
En aquest cas, posem per exemple que el silici, el qual és tetravalent, posseeix una conducció extrínseca per electrons si se li addicionen petites quantitats d'antimoni (Sb) o d'arseni (As), pentavalents.

En aquest cas, els seus àtoms interactuen amb quatre dels electrons dels àtoms de germani. El cinquè electró restant passa a la banda de conducció. Per això, s'obté una certa quantitat d'electrons addicionals de conducció, tal i com podem veure en el dibuix de la dreta.



Hi ha àtoms d'elements que afegeixen electrons i s'anomenen **donadors**. Els semiconductors amb preponderància de la conducció per electrons s'anomenen semiconductors per excés.

En canvi, si el silici conté impureses d'indi (In) o de gal·li (Ga), per exemple, trivalents, els seus àtoms agafen electrons del silici i en aquest hi apareixen forats. Les substàncies que agafen electrons i creen conducció extrínseca per forats s'anomenen **acceptadores**. Els semiconductors amb preponderància de la conducció per forats s'anomenen semiconductors per defecte.



2.2 El microscopi

2.2.1 Origen

Richard Feynman

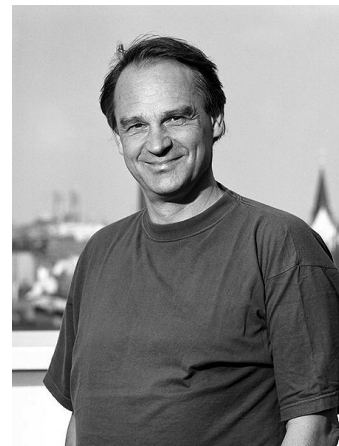
Podem dir que tot va començar el 29 de desembre de 1959 quan Richard Feynman, físic americà nascut l'any 1918 a Queens (Nova York) i mort l'any 1988 a Los Angeles, va pronosticar que tard o d'hora es podrien moure els àtoms de forma individual i construir configuracions diferents de les que existien en la naturalesa, en la seva conferència a l'Institut de Tecnologia de Califòrnia (CalTech) titulada *There's Plenty of Room at the Bottom*, és a dir, "Hi ha molt espai allà sota".



Anys més tard, al 1981, Gerd Binnig i Heinrich Rohrer ideen el Microscopi d'Efecte Túnel (STM Scanning Tunneling Microscope), el microscopi precursor del microscopi de forces atòmiques. El 8 de desembre de 1986 són guardonats pel premi Nobel de física.

Gerd Binnig

Va néixer a Frankfurt am Mein el 20 de juliol de 1947. Fins als 31 anys va viure a Frankfurt i a Offenbach. Quan només en tenia 10 ja volia ser físic. Va començar a estudiar Física a Frankfurt. Al 1969, es va casar amb Lore Wagler. 15 anys més tard van tenir una filla a Suïssa i dos anys després un fill, a Califòrnia.

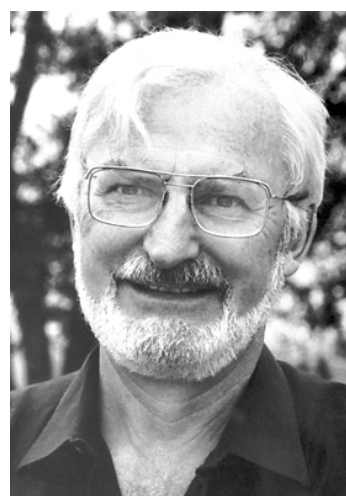


L'any 1978, Lore el va convèncer a que acceptés l'oferta del laboratori de recerca d'IBM Zürich per a formar part d'un grup de físics. Allà va conèixer a Heinrich Rohrer. "La seva manera de veure la física combinada amb la seva humanitat i sentit de l'humor, van restaurar completament la meva curiositat, una mica perduda, de la física" diu Binnig en la seva autobiografia. A més a més, descriu els anys a IBM Research d'excitants no només pel desenvolupament

del STM sinó també per l'atmosfera agradable i estimulant que s'havia creat. “Treballar en un equip amb Heinrich Rohrer, Christoph Gerber i Edmund Weibel va ser una experiència extraordinària” ressalta en la seva autobiografia. Van ser guardonats pel *German Physics Prize*, el *Otto Klung Prize*, el *Hewlett Packard Prize*, el *King Faisal Prize* i, l'últim, el Premi Nobel de Física. Finalment, Binning acaba dient això: “La vida naturalment no es torna més fàcil per a un científic una vegada la seva obra ha tingut certa importància. Però mentre els premis afegeixen algunes complicacions, he d'admetre que també tenen les seves compensacions!”

Heinrich Rohrer

Va néixer el 6 de juny de 1933 a Buchs, Suïssa. Al 1949 es van anar a viure a Zürich. La seva inclinació des de sempre havia estat les llengües clàssiques i les ciències naturals i només a la tardor del 1951, quan s'havia d'inscriure a l'ETH (Institut Federal Suís de Tecnologia), va decidir optar a favor de la física. A la tardor de 1956, va començar a fer la seva tesi. En aquell any va investigar sobre superconductors amb Jørgen Lykke Olsen. Aquest havia estat pioner en l'estudi de la física a temperatures baixes. “Seguint els seus passos vaig perdre tot el respecte als Ångströms” explica Rohrer en la seva autobiografia.

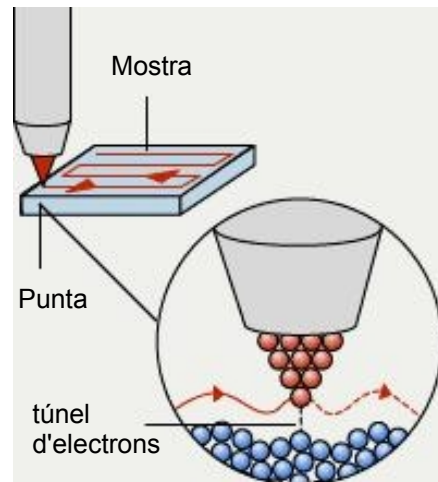


L'any 1961 es va casar amb Rose-Maria Egger i va tenir dos fills Doris i Ellen. Dos anys després, el professor Ambros Speiser, director de l'*IBM Research Laboratory* a Suïssa, li va oferir de participar en un grup d'investigació. Va acceptar. “Van ser uns anys agradables, en els quals alguns col·legues amb paciència m'ensenyaven física. Després els vaig deixar amb remordiments quan vaig aventurar-me amb Gerd Binnig a descobrir costes noves. Les vam trobar. Gràcies, Gerd.” Abans de centrar-se només en l'STM, va estudiar també materials antiferromagnètics.

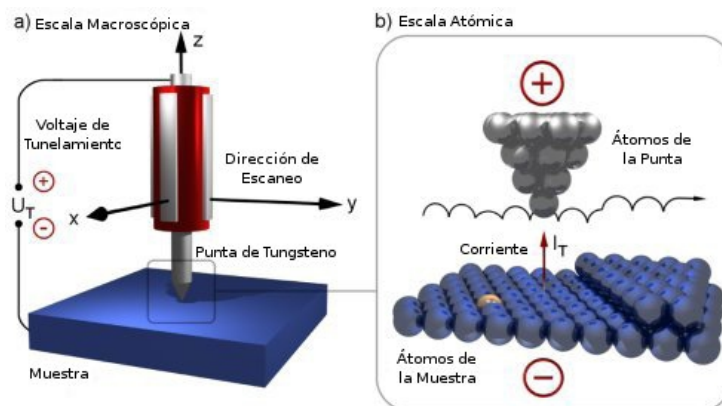
Rohrer aprecia dels anys en que va estar a *IBM Research* la llibertat de seguir les activitats que trobava interessants. Ha gaudit en gran mesura de l'estímul, la cooperació i la franquesa dels anys de treball en l'STM. Es va retirar de l'*IBM research* l'any 1997.

Microscopi d'efecte túnel (STM)

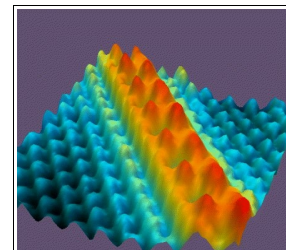
El microscopi d'efecte túnel (STM) és un tipus de microscopi electrònic que permet crear imatges en tres dimensions d'una mostra. En un STM s'estudia la superfície d'un material utilitzant una agulla que escaneja la superfície mantenint-se a una distància fixa d'aquesta. Aquesta agulla conté en la part inferior una punta de forma cònica. D'acord amb la mecànica quàntica que explico a continuació, els electrons del material formen un túnel d'electrons que determina la probabilitat de la seva posició.



Aquest túnel d'electrons produeix un senyal elèctric. L'agulla escaneja a poc a poc la superfície de la mostra a una distància permanent d'un àtom de diàmetre. Per tant, l'agulla mai tocarà la mostra. Com que l'agulla es mou verticalment per tal de mantenir el senyal elèctric constant i, així també la distància, ressegueix en tot detall la superfície que s'està escanejant. Vegeu la imatge següent:



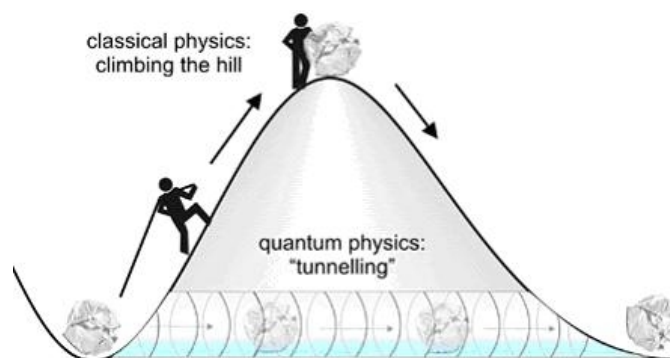
Enregistrar el moviment vertical de l'agulla fa possible l'estudi de l'estructura de la superfície d'àtom a àtom. Finalment, es pot obtenir un perfil tridimensional de la superfície el qual ens permet caracteritzar la duresa de la superfície, observar els defectes en aquesta i determinar la mida i la formació de molècules i agregats en la mateixa. La foto de la dreta és una imatge d'una cadena simple d'àtoms de Cs (rojos) en una superfície de GaAs (blau).



L'estudi de superfícies és una part important de la física, particularment les aplicacions en la física dels semiconductors i de la microelectrònica. En química, les reaccions de superfícies també hi juguen un paper important, per exemple, la catàlisi. Encara que un STM treballa millor amb materials conductors, també és possible fixar molècules orgàniques en una superfície i estudiar la seva estructura. Aquesta tècnica ha estat utilitzada en l'estudi de les molècules d'ADN.

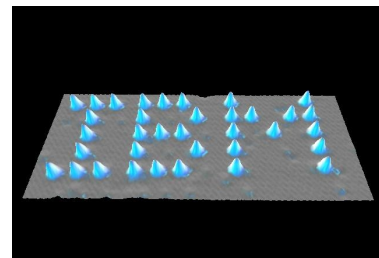
La Microscòpia d'Efecte Túnel (MET) va suposar un gran avenç en la Nano-enginyeria. Algunes de les aplicacions importants en aquest camp poden ser el disseny de components optoelectrònics de capes atòmiques alternades. Aquests components optoelectrònics són dispositius que permeten extreure informació de discs compactes i generar i detectar senyals transoceàniques telefòniques per cables de fibra òptica. Una altra de les aplicacions és en els capçals magnètics d'emmagatzematge, els quals són constituents en ordinadors i telèfons portàtils sense fil. Els capçals magnètics són dispositius transductors capaços de transformar el camp magnètic contingut en una cinta formada per una base de plàstic i revestida d'una emulsió magnètica, en una senyal elèctrica o viceversa.

El concepte del funcionament del túnel sorgeix de la mecànica quàntica. Clàssicament, un objecte que colpeja una barrera impenetrable no la podrà travessar mai. En canvi, segons la mecànica quàntica una partícula, com per exemple un electró, pot passar d'una regió on està sotmesa a una determinada energia a una altra, a través d'una altra regió anomenada "barrera de potencial". En aquesta "barrera de potencial" hi ha una energia superior a la que té la pròpia partícula. El pas d'una regió a una altra passant per la "barrera de potencial", es dona amb una probabilitat que depèn de l'amplada i l'altura de la barrera. És per aquest motiu que a aquest fet se l'anomena efecte túnel. Per fer-nos una idea vegeu el dibuix:



Per obtenir aquest túnel, s'ha d'aplicar una polarització i s'ha d'apropar la punta i la mostra. S'ha d'utilitzar un tub piezoelèctric per a que la punta es trobi separada de la mostra un rang de 4 a 7 Àngstroms. La polarització aplicada farà que els electrons formin aquest túnel entre la punta i la mostra, creant un corrent elèctric que es pot mesurar. Quan ja està establert el túnel, la polarització i la posició respecte de la mostra poden ser modificades. Això permetrà analitzar els canvis en l'estructura de la superfície i els canvis en el corrent. Si la punta es mou a través del pla x i y, aquests canvis en el corrent respecte de la posició poden ser mesurats. A més a més d'observar la mostra, també ens pot donar informació de l'estructura electrònica d'aquesta.

El microscopi d'efecte túnel també permet manipular àtoms individuals des de 1989 quan Donald Eigler i Erhard Schweizer del Centre d'Investigació Almaden de IBM van aconseguir escriure les inicials de la companyia amb 35 àtoms de xenó sobre una superfície de níquel.



2.2.2 Microscopi de forces atòmiques (AFM)

Com ja hem dit abans, el microscopi de forces atòmiques ha estat l'evolució del microscopi d'efecte túnel. Avui en dia, aquest és, de lluny, el més prevalent dels dos. La diferència essencial és que l'AFM pot estudiar materials aïllants de la mateixa manera que semiconductors i conductors. En canvi, l'aplicació de l'STM no és concretament en l'estudi de materials aïllants.

El microscopi de forces atòmiques no només permet observar les interaccions a escala nano-newton fins i tot en el cas de materials aïllants, sinó que també permet resseguir la topografia de la superfície d'un material a escala atòmica.

A efectes pràctics, l'AFM s'utilitza per a resoldre problemes de processament i de materials que afecten a una àmplia gamma de tecnologies. Algunes d'aquestes són l'electrònica, les telecomunicacions, la biologia, la química, indústries d'enginyeria, etc. Els materials que s'estan investigant inclouen recobriments de capa fina i gruixuda, ceràmics, compostos, vidres, membranes sintètiques i biològiques, metalls, polímers i semiconductors. A més a més, l'AFM estudia fenòmens com l'abrasió, l'adherència, la neteja, la corrosió, la lubricació, el cromat i el polit. El fenomen que nosaltres estudiarem és l'adherència.

L'element bàsic del microscopi és que la sonda d'un AFM és una punta de forma cònica situada a un extrem de la part inferior de la palanca. Aquesta palanca acostuma a tenir una llarga de 100 a 500 micres. Aquesta punta normalment és de menys de 5 micres d'alçada i aproximadament de menys de 10 nanòmetres de diàmetre.

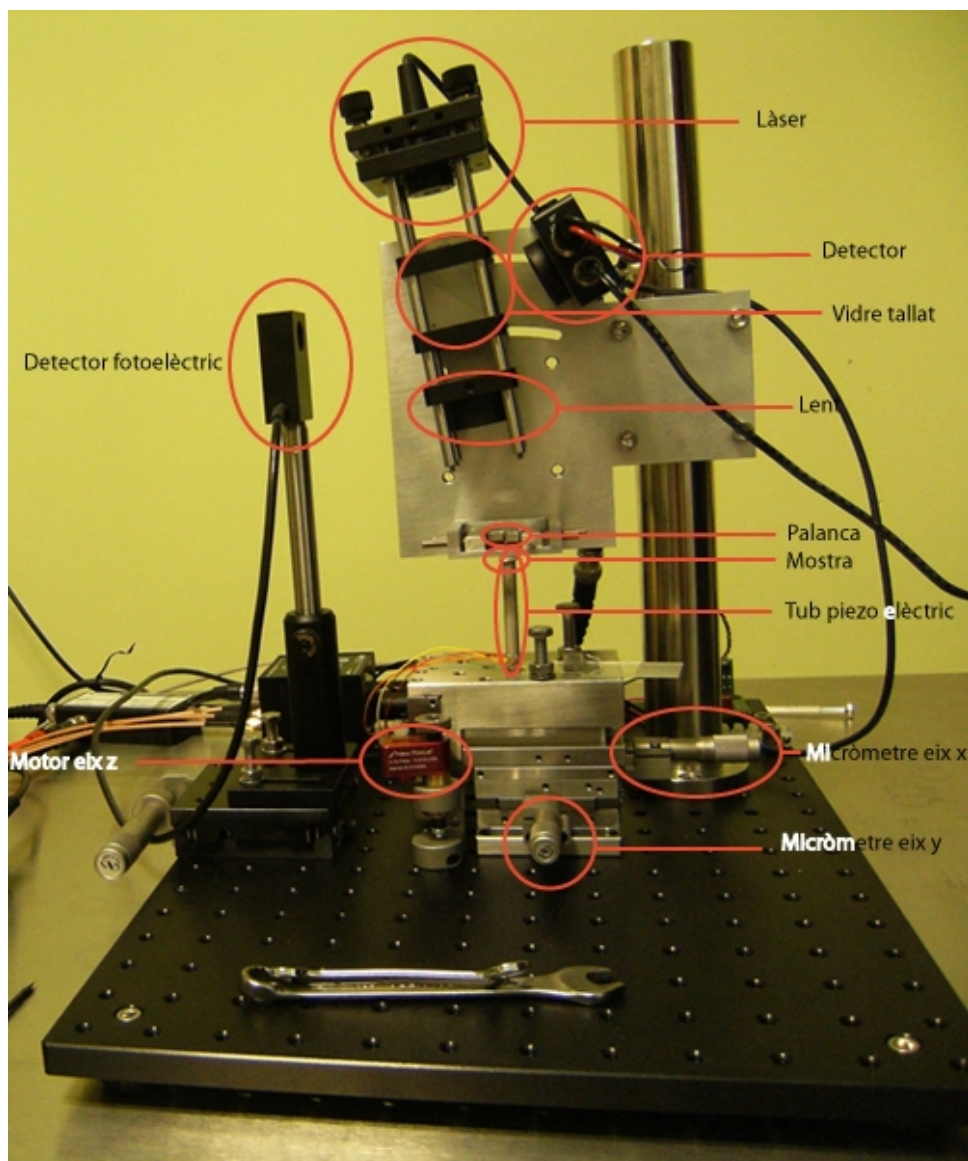
La força que s'experimenta entre la palanca i la punta fa que la palanca es doblegui. Un detector fotoelèctric mesura la desviació d'aquesta i això permet, per exemple, que un ordinador generi una corba de forces on es posa de manifest les forces que han experimentat dos materials quan es posen molt aprop.

Les aplicacions de l'AFM estan lligades a la micro-fabricació, a la computació d'alta velocitat però sobretot en la biologia. Biòlegs investigadors en cèl·lules han aplicat tècniques úniques de l'AFM per estudiar, per exemple, el comportament dinàmic de la vida i de cèl·lules fixes com els glòbuls blancs i vermells, les bacteries, plaquetes, etc.

2.3 Funcionament físic d'un microscopi de forces atòmiques

Encara que un AFM tingui dos objectius principals: resseguir la topografia d'una mostra i veure les interaccions entre dos superfícies que estan molt aprop per explicar fenòmens com la corrosió, l'adherència, etc. Nosaltres en aquest treball només aprofundirem en les interaccions entre materials quan aquests estan situats molt pròxims l'un de l'altre.

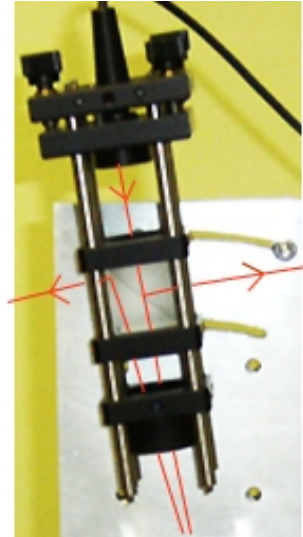
Les parts principals del microscopi de forces atòmiques són les que podeu veure en aquesta fotografia:



El seu funcionament consta bàsicament de tècniques òptiques com també d'un suport informàtic, com veureu en el punt *2.5 Anàlisi d'un material*.

L'esquema bàsic de funcionament és aquest:

El raig làser, situat a la part superior del microscopi, incideix sobre una palanca i es reflecteix. En el trajecte del làser per a què incideixi en la palanca, aquest ha de passar a través d'un cub de vidre tallat en diagonal i d'una lent. Aquest cub de vidre tallat, té un objectiu principal: fer que el raig làser arribi en el detector fotoelèctric després d'incidir en la palanca i poder saber així la variació de posició que ha experimentat la palanca quan la mostra s'apropa suficientment a ella. No obstant, quan el làser incideix per primera vegada en l'escissió del vidre, el raig es bifurca en dos: un que continua en la mateixa direcció i un altre que surt reflectit. El que surt



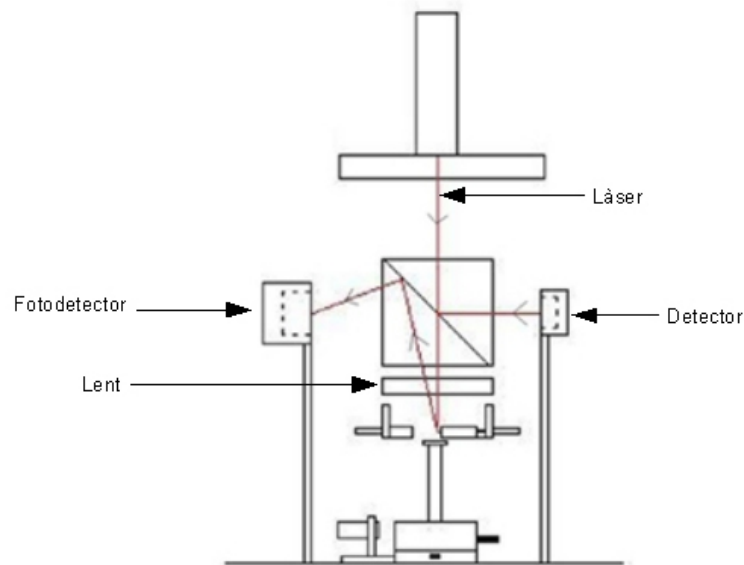
reflectit s'utilitza per comprovar que la intensitat del làser sempre és la mateixa. Això ens serveix per descartar que provingui del làser alguna variació sobtada en l'anàlisi d'una mostra. La part del làser que continua en la mateixa direcció abans d'incidir en la palanca travessa una lent que el focalitza. Després d'això el làser incideix en la palanca i es reflecteix. La reflexió del làser torna a incidir en el cub de vidre tallat i es torna a reflectir fins que arriba a un detector fotoelèctric. Com ja he dit abans, aquest ens permet saber en tot moment la variació de la posició del làser.

En el nostre treball estudiarem l'adherència que provoca l'aigua quan dos materials estan suficientment a prop l'un de l'altre. Per fer que estiguin molt a prop la distància que els separa ha de ser molt petita. El dispositiu que ens permet el moviment de nanòmetres és el tub piezoelèctric. En el següent punt, *2.4.1 Parts del microscopi*, explicaré detalladament els elements d'aquest.

2.3.1 Elements del microscopi

En aquest apartat estudiarem els elements òptics que intervenen en la construcció d'un microscopi. Per exemple, el làser, el vidre tallat, el fotodetector, el detector i la lent.

Aquests elements estan disposats com veiem en la imatge següent.



2.3.1.1 Làser

LASER correspon a les inicials angleses de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* i en català, amplificació de llum per emissió estimulada de radiació. Així, el làser és un dispositiu que produeix un feix de fotons per una emissió estimulada. Aquest fenomen es produeix quan un sistema format per àtoms, on molts d'ells passen a l'estat excitat quan són irradiats per fotons d'una energia elevada. Aquesta energia correspon a la diferència energètica entre un àtom que està en un estat excitat i un altre que està en estat fonamental. En aquest moment, els àtoms que estan en l'estat fonamental poden absorbir fotons i, per tant, passar a l'estat excitat. Els àtoms que estan en l'estat excitat quan perden energia es desexciten i passen a formar part de l'estat fonamental.

Com que quasi tots els àtoms de l'espectre a temperatures ordinàries es troben en estat fonamental, es necessiten àtoms excitats que quan es desexciten retornin l'energia proporcional a les emissions electromagnètiques en les que es fonamenta l'emissió làser.

Els fotons que s'emeten per l'àtom estimulat posseeixen fase, energia i direcció similars a les del fotó extern que els hi ha donat origen. L'emissió estimulada descrita és l'arrel de

moltes de les característiques de la llum làser. No només produeix llum coherent, és a dir del mateix període i freqüència, sinó que també “amplifica” l'emissió de llum, ja que per cada fotó que incideix sobre un àtom per excitar-lo es genera un altre fotó quan torna a l'estat fonamental.

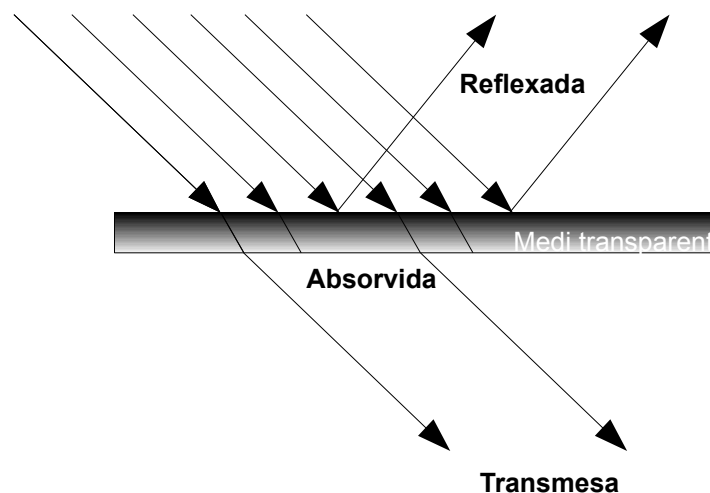
La característica per a que la llum làser es centri en un punt de forma coherent és el que permet que assoleixi una concentració energètica per unitat de superfície molt considerable, que donarà lloc a la intensitat del mateix i dependrà del nombre de transmissions en fase que es produeixin.

Les aplicacions en la medicina com a instrument terapèutic i quirúrgic són degudes, per exemple, a la seva direccionalitat. Aquesta correspon a la capacitat que té el làser de tenir un poder de dispersió mínim, ja que la divergència és mínima. Una altra de les seves característiques és la seva monocromaticitat.

Totes les ones de llum d'un raig làser tenen la mateixa i única longitud d'ona. Això és degut a filtres apropiats que aïllen les diferents longituds d'ona que componen la llum.

2.3.1.2 Vidre tallat

El vidre és un sistema físic refringent. A més a més, és una matèria inerta composta principalment de silicats. En el cas del vidre tallat, ens interessa la propietat òptica d'aquest. Quan una ona incideix sobre una substància, la seva energia pot ser totalment reflectida, transmesa o absorbida, tant sigui aquesta una energia mecànica, com podria ser el so, o una electromagnètica, com en el nostre cas la llum làser. Observe-m'ho al dibuix:



L'absorció d'una ona s'entén com el debilitament que aquesta experimenta en el moment de travessar un medi transparent, com per exemple el vidre. L'expressió de la llei que permet calcular la intensitat de l'ona després de travessar un medi és la de Beer-Lambert. Aquesta parteix de l'expressió la qual manifesta que la debilitació d'una ona és proporcional a la seva intensitat incident i al gruix del medi travessat:

$$\alpha = \frac{-dI}{I dx}$$

On “ α ” és el coeficient d'absorció
 “ I ” la intensitat de l'ona incident
 “ x ” el gruix del medi que és travessat

A partir d'aquesta, si separem les variables i integrem obtenim això: $\int_{I_0}^I \left[\frac{dI}{I} \right] = \int_0^x [-\alpha \cdot dx]$

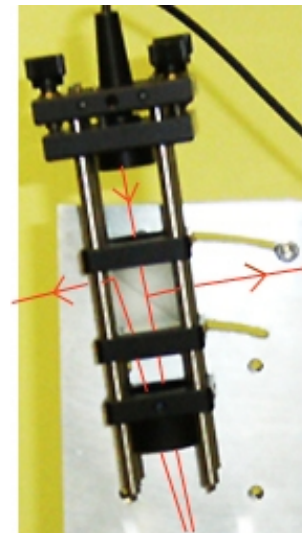
És a dir: $\ln \frac{I}{I_0} = -\alpha \cdot x$

Passant dels logaritmes neperians als números obtenim que: $\frac{I}{I_0} = e^{(-\alpha \cdot x)}$

Finalment, aïllant la intensitat de després de travessar el medi, tenim la llei general d'absorció de qualsevol ona que es propaga i travessa un medi. Com ja he dit abans, aquesta es coneix com **llei de Beer-Lambert**:

$$I = I_0 \cdot e^{(-\alpha \cdot x)}$$

En el nostre cas, hem utilitzat el vidre tallat perquè, com hem dit abans, necessitem que una part sigui reflectida i una altre transmesa. Quan el raig làser incideix en la meitat del cub de vidre i coincideix amb la diagonal tallada, una part del raig serà reflectit amb un angle de reflexió de 45 graus respecte d'una hipotètica normal vertical. Utilitzarem aquesta primera reflexió per situar-hi un detector que permetrà assegurar-nos que en la pràctica que farem a posteriori la intensitat sigui sempre la mateixa.



La part del raig làser que és transmesa serà la que incidirà en la palanca. Quan aquesta estarà suficientment a prop d'una mostra, la punxa de la palanca experimentarà una força d'atracció. Degut a aquesta força

d'atracció, la palanca s'aproparà a la mostra i per tant la reflexió del raig que hi incideix variarà la seva direcció. Per a que nosaltres puguem observar com actua la força d'atracció sobre la palanca respecte la mostra, el raig làser ha d'incidir a un fotodetector. Per això, la reflexió que s'obté del raig que incideix en la palanca, tornarà a incidir sobre la diagonal del vidre tallat i tornarà a ser reflectit, aquesta vegada, sobre el fotodetector.

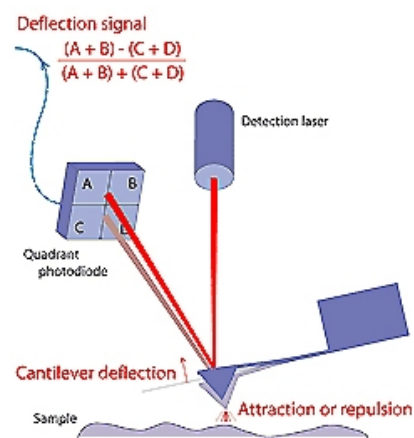
2.3.1.3 Fotodetector o detector fotoelèctric

Un fotodetector és un transductor de la llum que proporciona una senyal elèctrica com a resposta de la radiació òptica que incideix sobre la superfície sensora.

Es distingeixen dos tipus de fotodetector: els detectors tèrmics que detecten l'energia dels fotons incidents en forma de calor. Com a conseqüència, es produeix un increment de la temperatura de l'element sensor i un canvi de les seves propietats elèctriques com la resistència, que ja veurem en el punt següent. La majoria d'aquesta classe de fotodetectors són bastants ineficients i relativament lents com a resultat del temps que requereixen per a canviar la temperatura. Aquest és el motiu pel qual els fan inadequats a la major part de les aplicacions fotòniques.

L'altre tipus de detector i el que ens interessa més a nosaltres és el que inverteix l'energia del fotó en incrementar l'energia dels seus portadors de càrrega, i modifiquen les propietats de conducció elèctrica dels sistemes detectors en funció del flux de fotons rebut. Aquest procés de conversió implica que els fotons incidents es transformin en electrons. Per a què es detecti aquest canvi d'energia aquests electrons necessiten un corrent elèctric i també, per tant, un camp elèctric. Més endavant, s'explicarà detalladament què són aquests dos últims termes sobre electricitat.

El fotodetector que hem utilitzat calcula la posició del raig làser mitjançant la divisió en quatre parts de la superfície sensora. Les operacions que fa servir són, com ja veuen en el dibuix, la diferència de la suma dels quadrants superiors i els inferiors dividit per la suma dels quadrants superiors i inferiors. Un programa informàtic ens descriu gràficament on es troba situat el làser tant en l'inici, quan està la palanca en repòs com quan es varia la seva posició degut a les forces d'atracció.



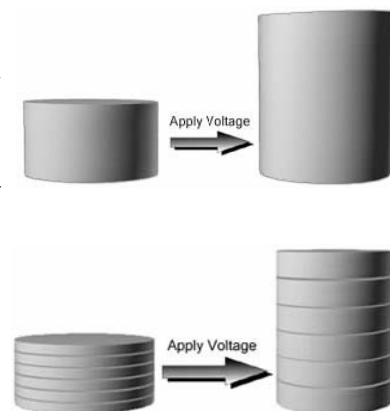
2.3.1.4 Tub piezoelèctric

Per aconseguir observar les interaccions entre la mostra i la palanca, necessitem un instrument que faci un moviment mecànic, en aquest cas vertical, precís, que sigui qüestió de nanòmetres. Així quan la mostra està suficientment a prop i comencen les interaccions podem observar clarament què està passant. Aquest instrument és el tub piezoelèctric. El moviment mecànic que necessitem és creat a partir d'una energia elèctrica que produeix un transductor electromecànic. Un transductor és un dispositiu capaç de convertir un determinat tipus d'energia d'entrada en una altre de sortida. Concretament, un transductor electromecànic converteix l'energia elèctrica en energia mecànica.

Un material piezoelèctric actua sota la piezoelectricitat, fenomen pel qual determinats cristalls en el moment de ser sotmesos a tensions mecàniques adquireixen una polarització elèctrica en la seva massa provocant una diferència de potencial. Aquest fenomen també pot ser presentat a la inversa. En el moment en què aquest material es veu sotmès a un camp elèctric, aquest es deforma. De la mateixa manera que quan es deixa d'aplicar el camp elèctric, el material piezoelèctric torna a la seva posició inicial.

Aquest tipus de materials són cristalls naturals o sintètics que no posseeixen centre de simetria. L'efecte d'una compressió o d'un allargament consisteix en dissociar els centres de gravetat de les càrregues positives i negatives. En conseqüència, apareixen dipols elementals en la massa i, per influència, càrregues de signe oposat en les superfícies respectives.

Que hi hagi més o menys moviment mecànic depèn del tipus de material piezoelèctric que s'utilitzi, de la forma d'aquest i la intensitat de camp que se li apliqui. Com també depèn d'aquest, la direcció del moviment. En la imatge següent podem veure el moviment del piezoelèctric quan està exposat a un potencial elèctric. En aquest li han aplicat un voltatge a la part superior de la superfície i a la part inferior, fent així que s'expandeixi.



Per ordre general s'expandirà aproximadament 1 nanòmetre per volt aplicat. Per a què hi hagi una expansió més gran i dependent de l'exactitud que es necessiti, és habitual fer que els transductors piezoelèctrics continguin diferents capes de materials piezoelèctrics. Poden veure un exemple en la imatge de la pàgina anterior.

2.3.1.5 Sensor de forces

Un sensor de forces mesura la força entre una petita sonda i la superfície de la mostra que està essent estudiada. La sonda en un AFM és una punta de forma cònica situada a la part inferior de la palanca. La majoria de sensors utilitzen la relació entre el moviment de la palanca i la força aplicada. Aquesta relació es quantificable mitjançant la **lleï de Hooke**:

$$F = -k \cdot d$$

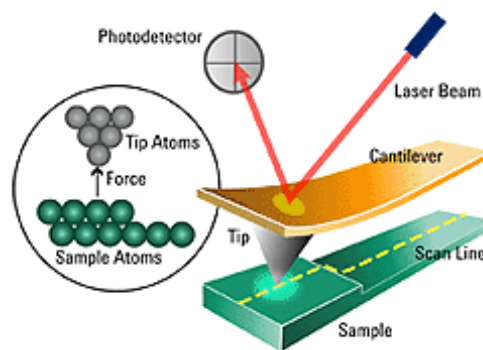
On “k” és la constant d'elasticitat i depèn del material i de les dimensions de la palanca.

On “d” és el desplaçament o moviment de la palanca.

Per una palanca que sigui de silicona, les seves dimensions són de 100 micres de llargada, de 20 micres d'amplada i d'1 micra d'alçada. Si la palanca és desplaçada 1nm quan apliquem una força de 1 nanonewton, la constant de força és d'aproximadament 1 newton/metre.

La mesura del moviment de la palanca és possible amb la incidència d'un làser en una palanca. Aquest raig làser serà reflectit cap a un detector fotoelèctric. Podrem conèixer el moviment de la palanca perquè quan aquesta canviï de posició, la posició del raig làser reflectit, que incidirà en el fotodetector, també ho farà.

En el microscopi de forces atòmiques els desplaçaments tant petits com 1 nm, es calculen amb el utilitzant el làser i el detector fotoelèctric.



2.4 Anàlisi del material

La part pràctica d'aquest treball estarà fonamentada en l'anàlisi d'un material. En aquest cas, estudiarem les forces d'adherència que existeixen entre dos materials que estan situats molt a prop l'un de l'altre.

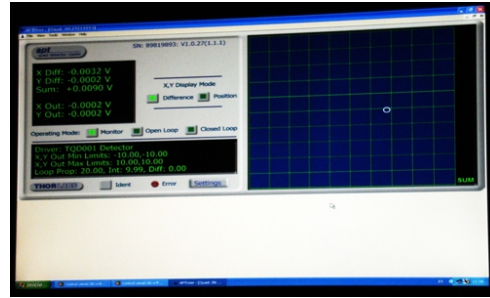
2.4.1 Forces d'adherència

En l'atmosfera, l'aire conté una quantitat determinada d'aigua que depèn de les condicions climatològiques. En l'anàlisi del material, estudiarem l'adherència que existeix entre el material de la mostra i la punta de la palanca com a causa d'aquesta aigua que està en l'aire. El fenomen físic que estem estudiant es dona quan dos materials estan situats molt pròxims l'un de l'altre, quan quasi existeix contacte entre ells. En aquest moment, el que els separa són molècules d'aigua que formen una bombolla d'aigua i les dels elements de l'aire. Aquesta bombolla manté la posició de la punta de la palanca relativament fixa i quasi en contacte amb la mostra.

L'anàlisi de l'adherència que provoca una bombolla d'aigua, constarà de dos parts. En la primera part aplicarem un voltatge creixent al tub piezoelèctric i en la segona, li disminuïrem. Primer de tot, hem d'apropar la mostra a la palanca. Per això, utilitzem un motor que només mou la mostra en direcció vertical. Aquesta part requereix molta atenció ja que és molt fàcil trencar la palanca. Malgrat que l'aproximació amb el motor de la mostra a la palanca sigui lenta i que la palanca sigui flexible, hem de saber quan hem de parar d'apropar la mostra a la palanca. Per aquest motiu i altres que explicaré a continuació, ens veiem obligats a idear un programa que connecti l'ordinador amb el microscopi.

2.4.2 Programa Labview

Per saber exactament quan hem de parar d'apropar la mostra amb la palanca amb el motor, necessitem saber quan comencen a existir forces que puguem apreciar amb el nostre microscopi. Per això necessitem un programa que s'anomena Origin. Aquest ens indica



gràficament la posició de la palanca, vegeu la imatge de la dreta. Quan encara no es perceben forces, la rodoneta blanca es manté quieta en una posició. Al cap de una estona, de sobte, es pot començar a moure. El seu moviment és quasi imperceptible i ràpid. És per això que abans he anunciat que aquesta part requeria molta atenció. Després de saber que la mostra està suficientment a prop com per percebre la interacció de forces, necessitem idear el programa que ens permeti escriure exactament els volts que volem que s'apliqui al tub piezoelèctric perquè aquest es pugui allargar uns determinats nanòmetres. A més a més, aquest programa també ens permetrà llegir els voltatges que arribin al detector fotoelèctric per veure la variació que ha experimentat la punta respecte de la seva posició inicial i poder fer així, un gràfic de corbes de força resultat de l'estudi de l'adherència dels materials. L'aplicació específica que utilitzem per poder realitzar aquest programa s'anomena Labview.

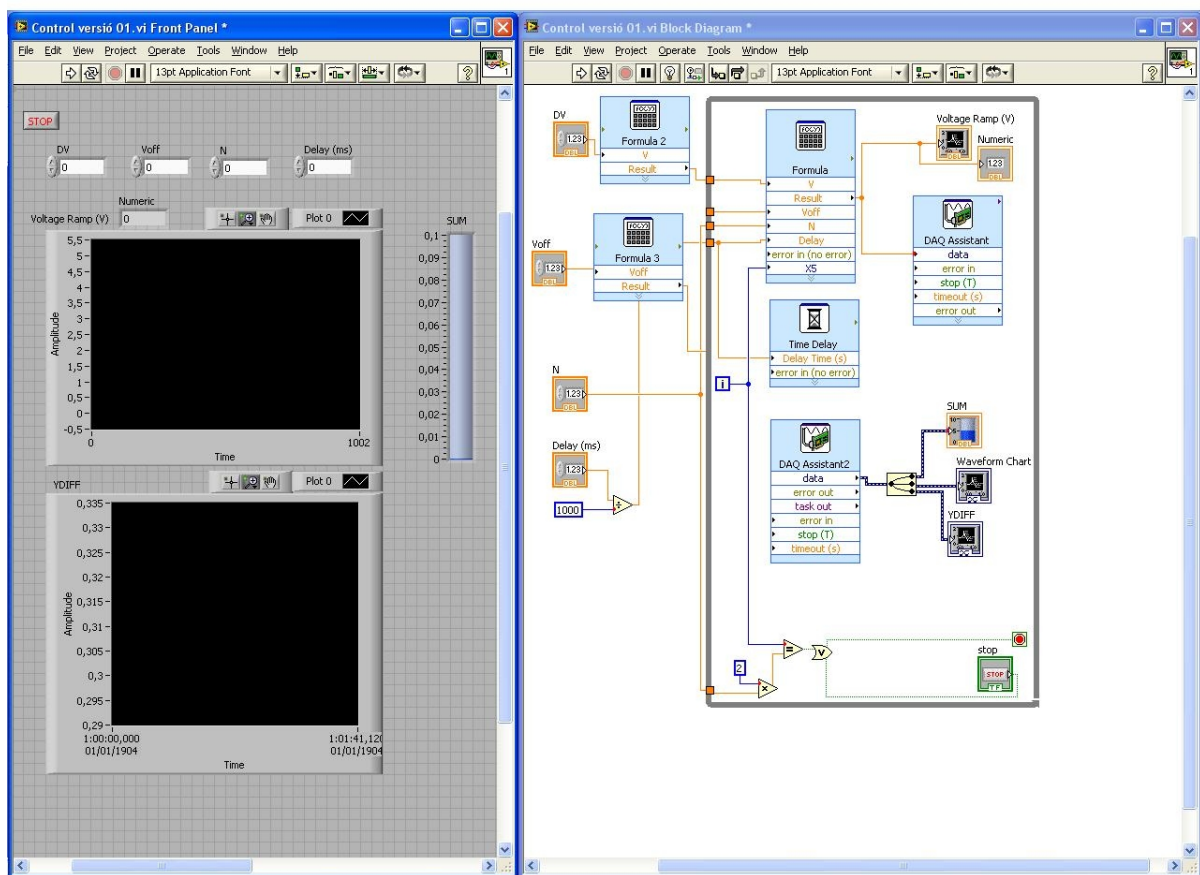
Aquest programa, entre altres coses, connecta l'ordinador amb un dispositiu que permet l'entrada o la sortida de voltatges a l'ordinador. Aquest s'anomena DAQ (Data Acquisition), vegeu la foto de la dreta. Tanmateix el DAQ pot aplicar els voltatges que nosaltres indiquem al programa que hem ideat al tub piezoelèctric. Abans però, hem de saber que aquest dispositiu només permet l'entrada o sortida de deu volts. Com que nosaltres hem de poder aplicar al tub piezoelèctric 200 volts, és per aquest motiu que necessitem un amplificador d'alta tensió (HVA, High Voltage Amplification). Agafem, per tant, un amplificador que multiplica per 20 el voltatge inicial que surt pel DAQ.



Quan nosaltres indiquem al programa el número de volts que volem aplicar al tub piezoelèctric, aquest s'allarga una determinada distància en nanòmetres. A més a més,

per poder fer l'anàlisi de l'adherència dels materials amb l'aigua, podem indicar al programa que s'aturi quan assoleixi tants volts i que disminueixi el voltatge fins que sigui l'inicial. La gràfica es dividirà en dos parts. La primera serà quan s'apliqui un voltatge creixent i la segon quan li disminuïm aquest.

A continuació, podem observar una còpia de pantalla del programa que vam haver d'idear i del que us he explicat bàsicament la idea principal. La part de la dreta conté el programa en si i a l'esquerra hi ha el que permet fer l'anàlisi de les forces que interactuen quan es posa en marxa l'aplicació dels voltatges al tub piezoelèctric:



2.5 Interpretació de resultats

En el gràfic de forces que obtenim mitjançant el programa Labview, com ja he dit, constarà de dos parts. En la primera part i el que podrem observar primer de tot és com la palanca es doblega cap a la mostra. Això s'explica amb les forces de Van der Waals, l'atracció a la que es veuen sotmeses dues partícules separades. En aquest moment, la palanca s'haurà doblegat cap a baix i, per tant, a la gràfica podrem observar com la línia que defineix la corba de forces baixa també. Com que continuem aplicant voltatges fins a un de determinat, la mostra continua pujant.

Les forces d'atracció entre la palanca i la mostra fan que aquestes dues estiguin en contacte o molt pròximes a tenir-lo. Si continuem aplicant voltatge, empenyem també la palanca cap amunt. És per això que veurem com la línia comença a pujar en línia recta fins que el tub piezoelèctric assoleixi els voltatges que hem indicat al programa per a què, en aquell moment, s'aturi i comenci a disminuir-los.

En la segona part, quan disminueix el voltatge, podrem observar l'adherència dels materials en l'aigua. El voltatge disminuirà i la palanca també. És veurà l'adherència quan la palanca continuï baixant després de passar la seva posició inicial. Continuarà baixant fins que la flexibilitat de la palanca li permeti.

2.6 Estudi experimental d'una mostra

2.6.1 Factor amplificador

Una part de la pràctica consisteix en determinar per quin factor multiplica realment aquest amplificador d'alta tensió. Per fer-ho, creem el programa que connecti els voltatges que apliquem nosaltres (V_{out}), és a dir, els que només poden anar de -10 a +10, amb l'amplificador d'alta tensió. Després connectem el valor obtingut amplificat (que anomenem HVA) amb un dispositiu anomenat tèster que ens dona el número de volts finals amplificats.

La fórmula que permet obtenir el valor del voltatge amplificat és aquesta:

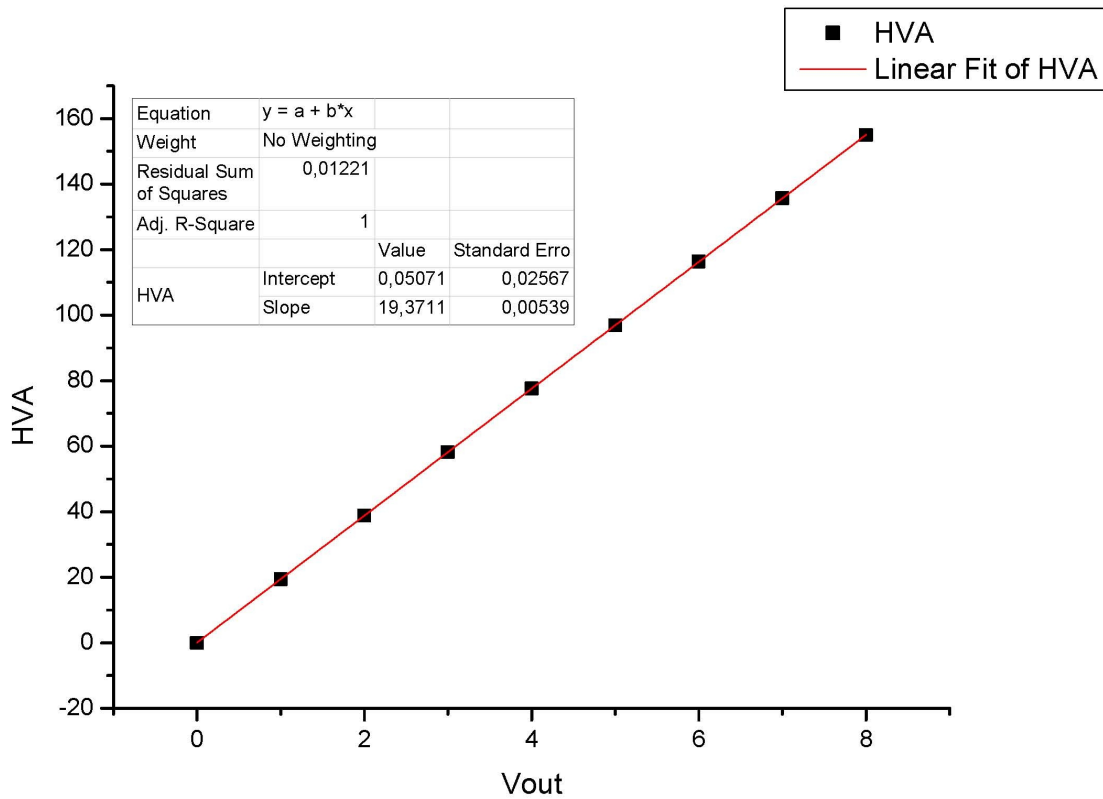
$$HVA = 0,05071 + Factor\ amplificador \cdot V_{out}$$

Li sumen 0,05071 perquè són els voltatges que hi ha i que s'aplicarien al tub piezoelèctric quan nosaltres indiquem al programa 0 volts. Això és degut a que hi ha soroll. Perquè el voltatge que s'apliqués al tub fos 0 i no 0,05071, entre altres coses, hauríem de sotmetre el microscopi al buit.

El següent pas és saber el valor del voltatge que li apliquem al DAQ (V_{out}) i el voltatge obtingut després de ser amplificat (HVA). La relació que obtenim és aquesta:

V_{out}	HVA
0	-0,04
1	19,41
2	38,81
3	58,20
4	77,6
5	96,9
6	116,3
7	135,6
8	155,00

Quan tenim això, fem una gràfica que relacioni els voltatges que apliquem al DAQ amb els voltatges finals amplificats.



En vertical tenim el voltatge amplificat (HVA) i en horitzontal el voltatge que li apliquem al DAQ (Vout). La pendent d'aquesta gràfica és el valor del factor amplificador. Veiem que no és 20 sinó 19,3711.

Per començar a perfeccionar el programa nosaltres podem voler indicar a l'ordinador els voltatges que volem aplicar al tub piezoelèctric, és a dir, el voltatge ja amplificats (HVA). Per això, si abans escrivim al programa la fórmula per a què pogués obtenir el valor del voltatge amplificat, és a dir, aquesta:

$$HVA = 0,05071 + \text{Factor amplificador} \cdot Vout$$

Ara volem indicar al programa el voltatge que s'aplicarà al tub, és a dir, el HVA. Per això, la fórmula que escriurem serà aquesta:

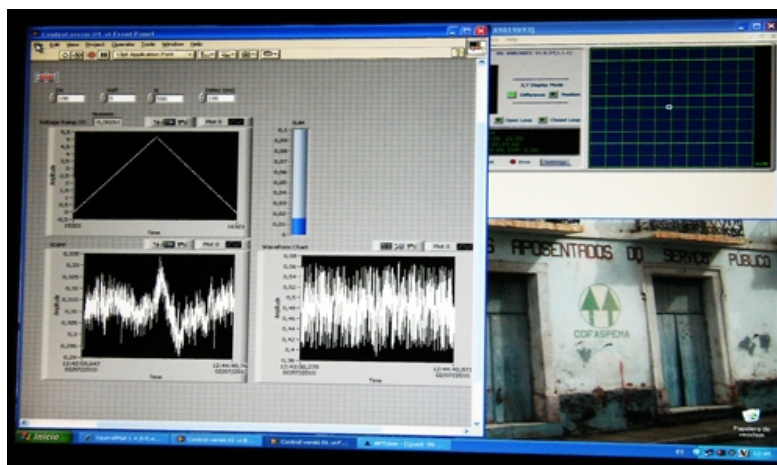
$$Vout = HVA - \frac{0,0507}{19,3711}$$

2.6.2 Estudi de la mica

La mostra que nosaltres estudiem és la mica, vegeu la foto de la dreta. En l'estudi d'aquesta, hem hagut de seguir una sèrie de passos. Primer de tot, ens hem d'assegurar que la mostra estigui lliure d'impureses perquè no influeixi això en l'adherència de l'aigua. El mètode per fer-ho és empegar sobre la mica un tros de cinta adhesiva i treure-la. Tot seguit, amb unes pinces la dipositem a sobre del tub piezoelèctric. Quan la mostra ja està preparada, apropem la mostra a la palanca, utilitzant el motor. Per veure quan comencen a haver-hi interaccions, hem de tenir a la pantalla obert el programa Origin, que llegeix la posició de la palanca a partir del voltatge del fotodetector. Quan la posició de la palanca es comença a moure, escrivim el voltatge que volem que s'apliqui al tub piezoelèctric i també amb quin voltatge volem que s'aturi i comenci a disminuir-lo. Fet això posem en marxa l'aplicació de voltatge. Mentre el voltatge augmenta i disminueix es grava un gràfic de corbes. El que nosaltres estudiem és la variació de la posició de la palanca en sentit vertical.



Una de les imatges que contenen els gràfics que hem obtingut és la que veureu a continuació:

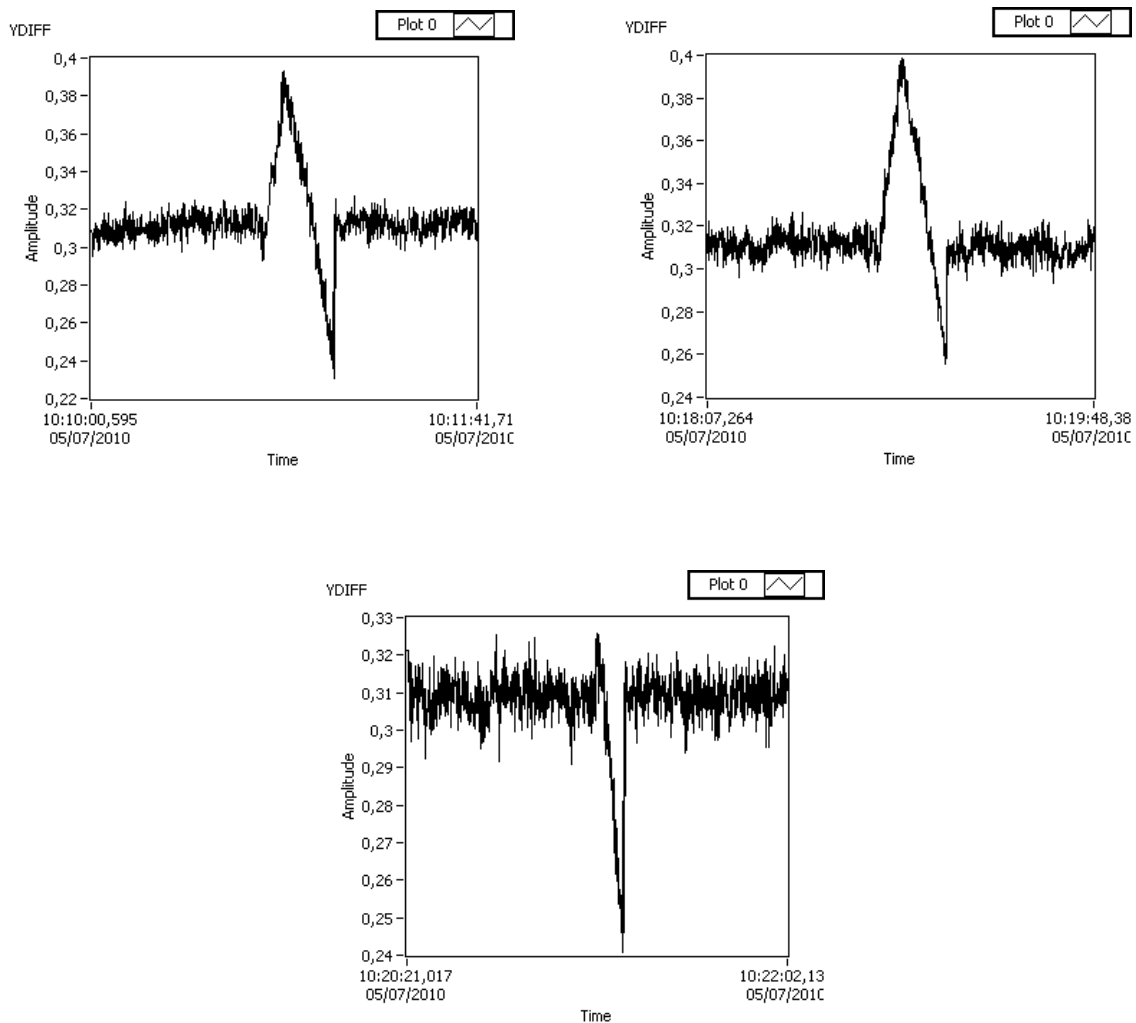


En aquesta, hi apareix a la dreta el programa Origin i a l'esquerra tres gràfics. La primera de dalt indica l'aplicació del voltatge al piezoelèctric on podem diferenciar les dos parts: aplicació de voltatge i disminució de voltatge. A sota d'aquesta gràfica hi ha, en l'eix de les "y", els voltatges que rep el detector fotoelèctric i, en l'eix de les "x", el

temps transcorregut. Al costat d'aquesta, podem veure la gràfica que ens indica més detalladament la precisió de la línia.

Precisió de la corba de forces

Per fer la corba de forces més precisa vam haver de pensar què podíem millorar per tal de no produir tan soroll com havíem fet fins ara. Les primeres coses van ser apagar els llums i evitar parlar durant l'enregistrament de dades. Amb això no n'hi havia prou. A les potes de la taula on estava el microscopi hi havia un matalàs pneumàtic gasós. Aquest matalàs permet l'aplicació d'un gas per a què la part on està el microscopi no senti la vibració del terra. El gas que nosaltres vam utilitzar va ser nitrogen. Com que havíem fet bastantes proves, vam veure convenient tornar a netejar la mostra. A més a més, vam haver d'aturar un microscopi al buit que teníem al costat del nostre perquè aquest feia molt soroll. El resultat de tot això va ser l'obtenció d'aquestes corbes de força:



Gràfica en funció de la força i del desplaçament del tub piezoelèctric

Com ja hem dit abans, en l'eix de les “y” hi apareixen els voltatges que llegeix el fotodetector i en l'eix de les “x”, el temps transcorregut.

El que a nosaltres ens interessa però, no són els voltatges sinó la força que s'exerceix en funció dels nanòmetres que es desplaça el tub piezoelèctric respecte de la seva posició d'equilibri i que repercuteix sobre la palanca ja que aquesta experimenta una variació de la seva posició en direcció vertical.

Per fer això necessitem aquesta fórmula que ens la dóna les característiques del piezoelèctric. Primer de tot, busquem l'allargament que fa el *piezo* en nanòmetres:

On:

$$\text{Variació } L = \frac{d_{31} \cdot V \cdot L}{t}$$

$$d_{31} : 2.62 \text{ \AA} / \text{Volts} = 0,262 \text{ nm} / \text{V}$$

$$L : 2 \text{ inch}$$

$$t : \text{gruix} = 0,014 \text{ inch}$$

$$V : \text{voltatge que li apliquem al } \textit{piezo} \text{ (ja està amplificat)}$$

Substituïm les dades i obtenim aquesta expressió:

$$\text{Variació } L = \frac{0,262 \cdot V \cdot 2}{0,014}$$

Aquesta ens dóna la variació de la longitud que fa el *piezo* per a tots els volts de la gràfica. Per tant, podem tenir la gràfica en funció del voltatge de la palanca i de la variació de la longitud del *piezo*. Per calcular el valor de la força que existeix en tot moment durant l'aproximació i el contacte de la mostra a la palanca, hem de basar-nos en la llei de Hooke:

$$\text{Força} = k \cdot \text{Variació } L$$

On “k” és la constant d'elasticitat de la palanca que és 0,2 nN/nm i “Variació L” és la variació de longitud de la palanca. Per saber aquesta, hem de passar els volts que tenim a nanòmetres. Per això, hem de seguir aquesta operació:

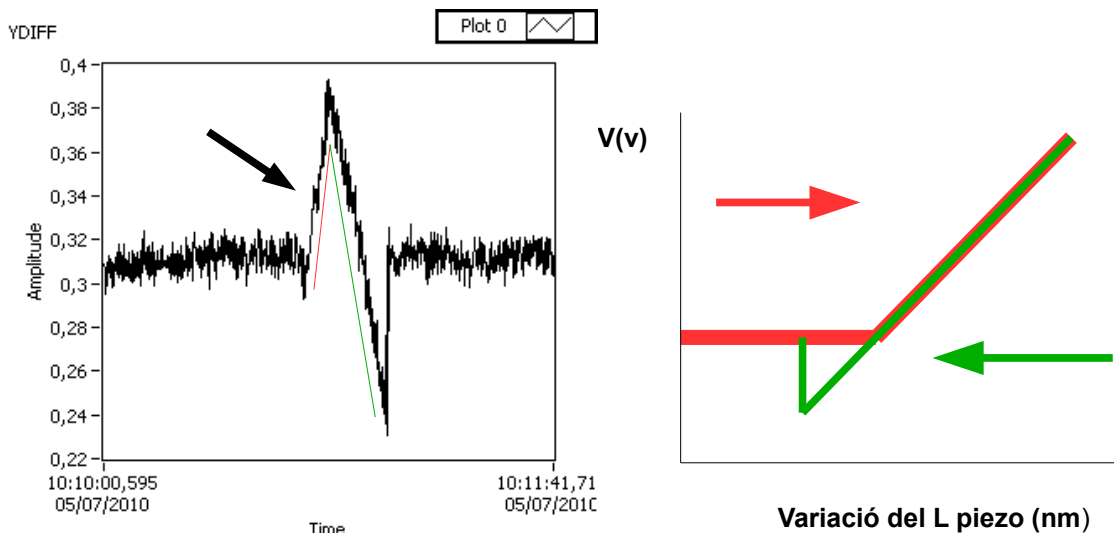
$$\text{Variació } L = \frac{V}{(\text{pendent de la gràfica})} - 1042$$

On:

V : volts de cada punt de la gràfica

1024 : nanòmetres que li restem ja que és la distància en què es troba la palanca en la seva posició inicial. Si li restem aquest valor, serà aquest punt el de 0 nm.

Pendent de la gràfica: la pendent de la gràfica és aquella quan li estem aplicant voltatges o disminuint-los-hi. Vegeu en la imatge de l'esquerra, el que està subratllat en línia roja i verda és la pendent. El seu valor no el sabem. Per deduir-lo, hem de suposar que hem plegat la gràfica de l'esquerra fent que se solapi l'aplicació creixent de voltatges amb la disminució. La imatge de l'esquerra seria el resultat.



En la gràfica de la dreta la línia roja representa l'aplicació de voltatge i la línia verda la disminució. Contemplant així, podem calcular la pendent de la gràfica.

Per trobar-la, hem de saber que la mostra que nosaltres estem analitzant és mica i aquesta presenta una superfície dura. Com que la palanca és flexible, tot el que es desplaçarà el tub piezoelèctric, es desplaçarà la palanca. Això s'entén perquè la mostra és dura i per tant, l'aplicació de voltatge empenyerà la palanca sense que a la mostra li causi cap deformació.

Si establim, després d'aquest comentari, que tot el que es desplaçarà el piezo, es desplaçarà la palanca, podem saber el valor de la pendent. D'acord amb una corba de forces obtenim que la pendent és $2,6874 \cdot 10^{-4} \text{ V/nm}$.

Si substituïm el valor obtingut a l'expressió que hem anomenat anteriorment, obtenim els nanòmetres que es desplaça la palanca en tots els punts. Tot seguit ja podem calcular el valor de la força que s'experimenta entre els dos materials i l'adherència que produeix l'aigua. Com ja hem dit abans, això s'aconsegueix amb la llei de Hooke:

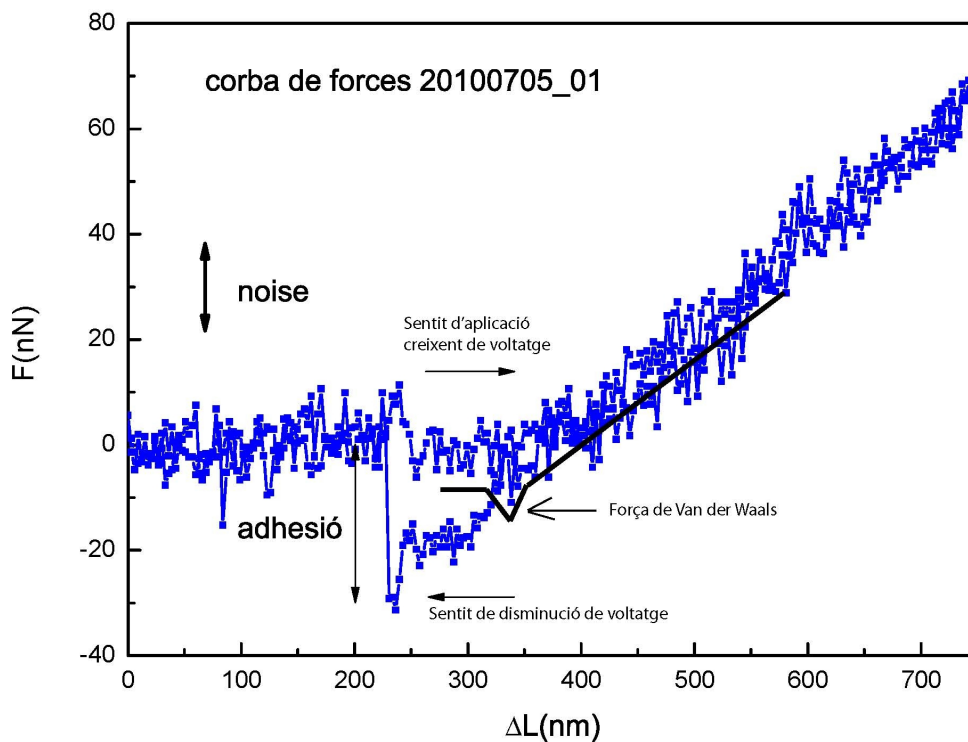
$$\text{Força} = k \cdot \text{Variació} L$$

Si sabem que “k” és 0,2 nN/nm i “Variació L” és:

$$\text{Variació } L = \frac{V}{(2,6874 \cdot 10^{-4})} - 1042$$

Podem trobar la força que s'exercirà en cada punt.

La gràfica resultant que posa de manifest la força en funció de la distància que s'allarga el tub piezoelèctric és la que teniu a continuació:



Com ja hem explicat anteriorment, la gràfica conté solapada l'aplicació de voltatges i la seva disminució. Primerament podem veure que la força de Van der Waals seria la que existeix justament abans de que la mostra toqui la palanca i aquesta comenci a pujar. He subratllat amb una línia negra el que produeix gràficament aquesta força. Si volguéssim quantificar la força de Van der Waals podríem dir que és d'aproximadament 8 nN. Aquesta dada és poc aproximada perquè hauríem de tenir en compte que hi ha un soroll de 20 nN.

Aproximadament la palanca està en contacte amb la mostra quan el *piezo* s'ha allargat 350 nm. A partir d'aquest moment, la palanca ja està en permanent contacte amb la mostra fins que el *piezo* s'atura als 750 nm determinats pel voltatge que havíem aplicat al programa i comença a disminuir-lo, és a dir, el *piezo* comença a escurçar-se. Quan el aquest té una llarga de 350 nm, la palanca continua baixant. En aquest moment és degut a l'adherència que provoca l'aigua. S'ha creat una bombolla d'aigua que manté la punta en contacte amb la mostra i l'arrossega. Podem quantificar la força que fa la palanca a causa de l'adherència i veure que aquesta és de 30 nN aproximadament. També hem de tenir en compte hi ha un soroll de 20 nN més o menys.

Saber que un material té més facilitat a l'adherència de l'aigua o menys és important per exemple per saber quin material ha de formar part d'un dispositiu que conté un oscil·lador la mida del qual és de varies micres. Si aquest material té facilitat en l'adherència de l'aigua pot fer que mantingui fixa la posició de l'oscil·lador i que deixi de funcionar.

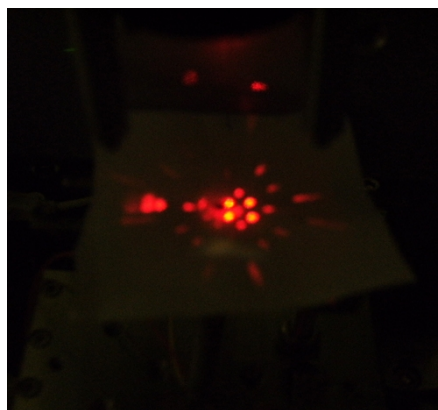
3. Annex

3.1 Reflexió del làser

Encara que el nostre estudi es centrés en l'estudi de la interacció entre dos materials, concretament en l'adherència que provoca l'aigua quan dues superfícies de dos materials estan molt a prop i, per tant, també la construcció del microscopi va tenir com a objectiu aquest, ens vam proposar intentar resseguir la superfície d'una mostra. En aquest anàlisi, que no deixava de ser un intent, vam trobar curiós la reflexió del làser després d'haver incidit en la mostra. La mostra tenia una superfície regular. Més o menys, com la que hi ha a continuació:



La reflexió que produïa el làser no era la d'un punt sinó la de diferents punts que formaven una figura poligonal. Vaig fotografiar aquesta reflexió i encara que la imatge és de molt baixa qualitat perquè en aquell moment estava tot a les fosques, podem veure aquesta estructura perfectament:



L'explicació és que la longitud d'ona del làser és similar a la distància que existeix entre les regularitats periòdiques de la superfície. Quan el làser incideix sobre la superfície de la mostra, el raig làser reflectit es divideix. Cada punt que forma la reflexió prové de la part del làser que ha incidit, per exemple, en un dels vèrtex del rectangle superior de la superfície.

3.2 Lectura del premi Nobel de 1986

El 8 de desembre 1986, Gerd Binnig i Heinrich Rohrer són guardonats pel premi Nobel de Física. En la seva lectura “Scanning Tunneling Microscopy from birth to adolescence” redacten les idees que van tenir, com van actuar i com es van sentir al veure, finalment, que havien ideat un microscopi que sobrepassaria els límits que estaven acostumats a observar. En aquesta exposen que la seva idea original no era la de la construcció d'un nou microscopi sinó de realitzar una espectroscòpia localitzada de menys de 100 Àngstroms. L'espectroscòpia és l'estudi de les interaccions entre la radiació electromagnètica i la matèria amb absorció o emissió d'energia radiant.

Els primers mesos dels seu treball en el STM, es van centrar en solucionar els principals problemes i trobar solucions. Per exemple, com evitar les vibracions mecàniques que feien moure la punta i la mostra? Per protegir-lo de les vibracions i del soroll acústic van posar el microscopi dins d'una cambra de buit. Com moure la punta en línia recta? Utilitzant un material piezoelèctric que seria l'enllaç entre l'electrònica i la mecànica evitant fricció. La primera més important i general era saber com havia de ser la forma de la punta i com aconseguir-ho. Al principi van suposar que havia de ser d'un tipus de matèria contínua amb un cert radi de curvatura. Molt aviat es van adonar que la punta no és suau perquè està formada de mides finites d'àtoms i perquè les puntes eren rugoses sinó les tractaves d'una manera especial. Aquesta rugositat implicava l'existència de mini-xips (tal i com els anomenaven Binnig i Rohrer) i l'extremada sensibilitat del corrent del túnel de la separació entre la punta i la mostra. Van fer també que la mini-punta aconseguís estar molt a prop de la mostra.

Totes aquestes solucions van fer que s'obtingués les primeres imatges estables d'un STM. Després d'això van fixar tota la seva atenció en la resolució atòmica. L'esperança per aconseguir aquest objectiu semblava que es podia complir quan van veure que el túnel al buit proporcionava una nova manera de fer les puntes. Després d'explorar, fer i corregir errors, al mes de març de 1981 es va publicar el primer article sobre el STM.

A la primavera i estiu del 1982, van començar a experimentar amb espectroscòpia, utilitzant or com a mostra. Aquell any ja havien guanyat dos premis: *Cal Quate from Stanford University* i *Paul Hansma from University of California at Santa Barba*. Aquell

estiu van fer el primer intent de posar petites conglomeracions d'àtoms d'or a una superfície de silicona. Els investigadors van descriure les petites conglomeracions com homogènies i planes muntanyetes en una superfície aspra amb una alta barrera de l'efecte túnel. Es podien veure bé les imatges perquè les superfícies tenien diferents propietats electròniques. “No podia parar de mirar les imatges. Era com si estigués entrant en un altre món” va explicar Binning. Després d'això, van decidir publicar un article. En un altre experiment van trobar oxigen al níquel. Aquest experiment demostrava que el revestiment d'oxigen no estava canviat quan la punta s'hi apropava. Al 1983 van investigar les possibles aplicacions del STM en la biologia. Van poder seguir cadenes d'ADN posades en una pel·lícula de carboni dipositada en plata recoberta d'una làmina de silici. El 9 de desembre d'aquell mateix any, van rebre un telegrama del secretari de *King Faisal Foundation* i el dilluns una trucada del secretari de *European Physical Society*, on s'anunciava el premi de ciència *King Faisal* i el premi de *Hewlett Packard Euro-physics*. El mateix divendres, Binning estava a Berlín pronunciant la conferència del premi *Otto Klung*. Podien ratificar que les superfícies estaven electrònicament estructurades com es coneixia, per exemple, d'un experiment d'emissió de fotons i podien aclarir aquestes estructures electròniques en l'espai a escala atòmica. En aquell any van fer amb una setmana 23 conferències.

L'impacte que va causar el STM no era que podien observar superfícies d'àtom a àtom i les seves aplicacions tant extenses, sinó la seva simplicitat en el concepte i en l'instrument en sí.

El microscopi per ell mateix va esdevenir simple i petit. La seva mida reduïda permetia que s'incorporés en altres sistemes, per exemple, en un microscopi electrònic d'escaneig.

El STM va permetre observar materials i estructures a escala atòmica però no només això sinó que es van complir les prediccions de Feynman: amb un alt camp elèctric i densitat de corrent extremes, podien fer deformacions locals, mesurar les forces que podien existir entre àtoms individuals i modificar molècules individuals, com diuen aquests dos grans genis, per utilitzar-lo com una màquina de Feynman.

4. Conclusions

La *Descripció, funcionament i utilització experimental d'un microscopi de forces atòmiques* m'ha permès treure les següents conclusions:

1. Un AFM combina coneixements sobre la matèria, sobre els fenòmens ondulatoris, sobre òptica geomètrica, sobre corrent elèctric i sobre electrònica. L'eina que en resulta és un mecanisme senzill i poderós perquè l'AFM permet registrar la variació nanomètrica de la posició d'una palanca mitjançant l'aproximació entre la mostra i aquesta i la reflexió d'un làser que incideix en un detector fotoelèctric. L'AFM és, en realitat, una eina senzilla que aporta informació valuosa.

2. Els dos objectius principals d'un AFM són:

A. Resseguir la topografia d'un material a escala nanomètrica.

B. Determinar i quantificar el valor de les forces que experimenten dos materials quan estan molt pròxims i avaluar-ne, per exemple, fenòmens com l'adherència.

Encara que aquests siguin els dos objectius, en aquest treball només hem tractat el darrer.

3. L'AFM ha estat fonamental per estudiar la física dels materials i la seva estructura, per això ha estat una de les eines que ha permès l'expansió de la nanotecnologia. El passat mes de març, la Nasa va enviar un AFM a Mart perquè proporcionés imatges de mostres de la mida de 10 nm. Mai s'havia registrat res abans a Mart en una escala tan petita. Volien que L'AFM creés un mapa topogràfic per detallar l'estructura de granets de sòl i de gel.

4. Un dels fenòmens que permet estudiar l'AFM és l'adherència entre materials. L'aire conté molècules d'aigua i quan la distància que separa dos materials és molt petita, aquestes molècules d'aigua produeixen aquesta adherència. El microscopi permet registrar-la.

5. He pogut portar a la pràctica el que abans per a mi era fonamentalment teòric. He vist amb els meus propis ulls com s'atrauen dos masses. Això es produeix per l'acció de la

força de Van der Waals. No només ho he pogut observar sinó que també he pogut quantificar el valor d'aquesta força encara que fos aproximadament.

6. L'oportunitat d'estar al costat del Dr. Jordi Fraxedas, investigador del Centre d'Investigacions de Nanotecnologia i Nanociència de la Universitat Autònoma de Barcelona i del seu equip, m'ha permès treballar de la forma pragmàtica que ho fan els professionals pel que fa a demanar-me explicacions, cercar recursos, elaborar conclusions.

En el fons, la ciència persegueix saber coses de la mateixa manera que persegueix saber-les explicar. Jo he intentat explicar el meu treball de recerca de la millor manera possible. Pel que fa a saber coses, estic segura que he après.

5. Bibliografia

TIPLER; MOSCA. *Física para la ciencia y la tecnología*. vol. 2, *Electricidad y magnetismo, luz, física moderna*. Editorial Raverté: Barcelona, 2008.

R. HAMBLEY Allan. *Electrónica*. 2a edició. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2008.
Fundació Catalana per a la Recerca i la Innovació (FCRI). *Nanotecnologia: què és i com ens afectarà?*. 1a edició. Fundació Catalana per a la Recerca i la Innovació (FCRI), 2009.

CENTELLAS, Francesc; BRILLAS, Enric; DOMÈNECH, Xavier; BASTIDA, Rosa Maria. *Fonaments d'estructura atòmica i de l'enllaç químic*. 1a edició. Barcelona: Barcanova, 1992.

ANGLA I ROCASALBAS, Joan; CASTELLET I MESTRES, Francesc. *Elements de teoria electrònica*. 1a edició. Quaderns experimentals -17, 1992. (no fet servir)

MARTÍNEZ, A; SANTANA, J; GONZÁLEZ, T; PINEDO, F. *Física /Cou-78*. Editorial Bruño.

CASTELLS, Perer; RIBA, Núria; FRANCESC, Andreu. *Química 1 Batxillerat*. Espanya: Mc Graw Hill, 2008.

CASTELLS, Perer; RIBA, Núria; FRANCESC, Andreu. *Química 2 Batxillerat*. Espanya: Mc Graw Hill, 2008.

VEECO. A Practical Guide to Scanning Probe Microscopy (SPM):
http://www.veeco.com/pdfs/library/SPM_Guide_0829_05_166.pdf

Universidad Carlos III de Madrid. Recursos:
<http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/microscopia-de-fuerza-atomica/otros-recursos/>

DAN THOMAS. Tutorial:
<http://www.chembio.uoguelph.ca/educmat/chm729/afm/firstpag.htm>

NORD CAROLINA STATE UNIVERSITY. Analytical Instrumentation Facility.
<http://www.ncsu.edu/aif/SPM/AFM%20Tutorial.pdf>

OPTICAL SCIENCES. Review. General Tutorial: Atomic Force Microscope.
Netherland.
<http://os.tnw.utwente.nl/otonly/afm%20tutorial.pdf>

GERD BINNIG AND HEINRICH ROHRER. Scanning Tunneling Microscopy
-From birth to adolescence. IBM Research Division, Zurich Research Laboratory.
Rüschlikon,
Switzerland, December 8, 1986.
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/rohrer-lecture.pdf

The Official Web Site of the Nobel Prize. The Scanning Tunneling Microscope.
<http://nobelprize.org/educational/physics/microscopes/scanning/index.html>

The Official Web Site of the Nobel Prize. Biography.
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/binnig-autobio.html

NASA. Phoenix Mars Mission. Jet Propulsion Laborator. Microscopy,
Electrochemistry, and Conductivity Analyzer (MECA).
http://phoenix.lpl.arizona.edu/science_meca.php

Agraïments

Jordi Fraxedas representa allò que m'agradaria arribar a ser. Li agraeixo la seva proximitat i el seu temps. Gràcies.

CatalunyaCaixa ha fet possible aquesta experiència de la meva vida. A Maria Calsamíglia Costa, en representació del programa E₂C₃, gràcies.

Sempre em semblaran poques les paraules per agrair al meu tutor la seva dedicació. M'he sentit acompanyada. Gràcies.

