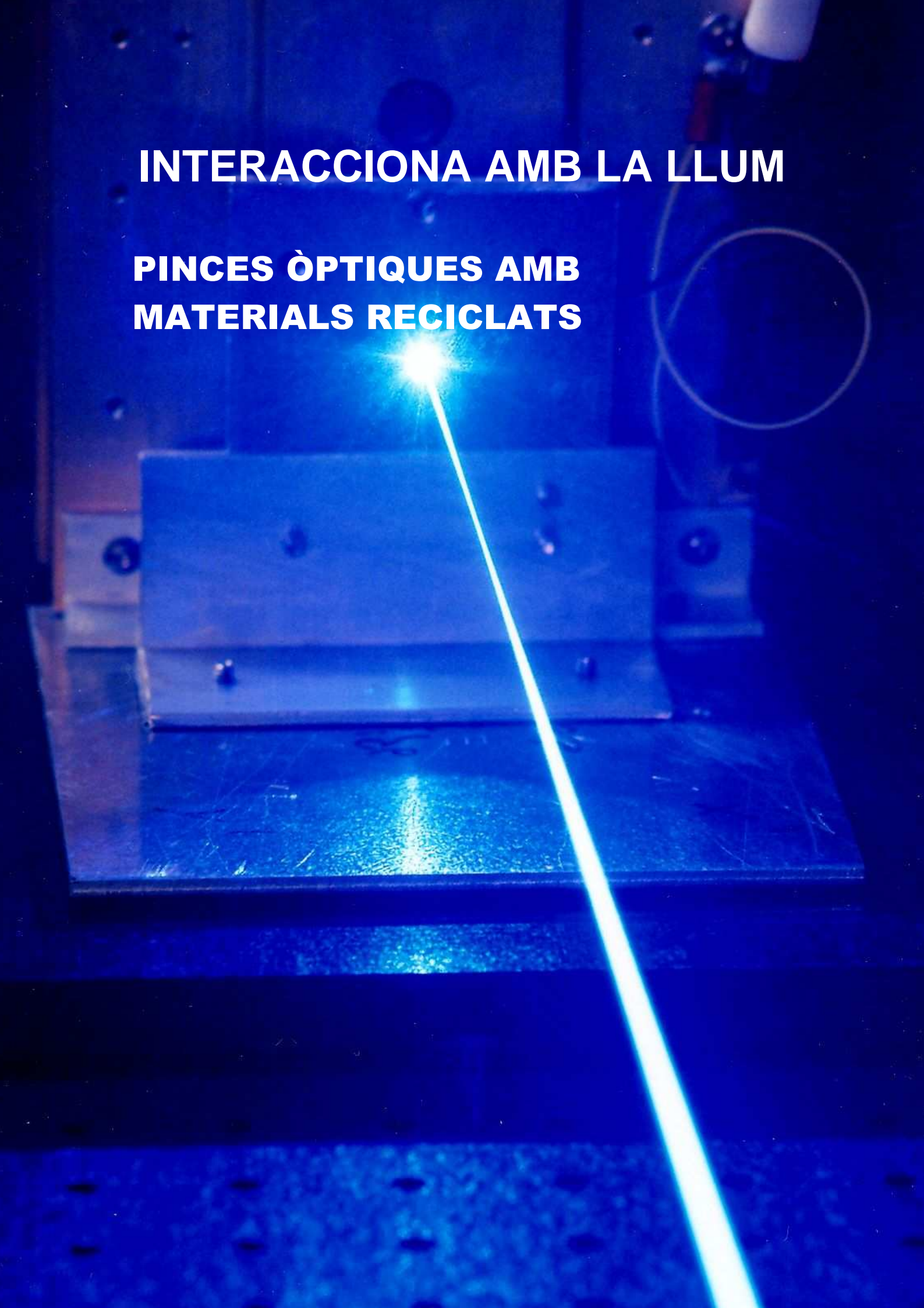


**INTERACCIONA AMB LA LLUM**

**PINCES ÒPTIQUES AMB  
MATERIALS RECICLATS**



*“La llum és l’ombra de Déu.”*

Albert Einstein

*“El disseny no és només l’aparença, sinó com funciona.”*

Steve Jobs

*Als meus pares, sens dubte.*

## ÍNDEX

	Pàg.
<b>- Pròleg .....</b>	<b>5</b>
<b>- Introducció .....</b>	<b>7</b>
 <b>Capítol I. Les pinces òptiques: una potent eina de micromanipulació. ....</b>	<b>9</b>
1.- Definició.....	10
2.- Història i desenvolupament.....	10
3.- Física de les pinces òptiques.....	14
3.1- Principis fonamentals.....	14
3.2- Règim de raigs òptics.....	15
3.3- Règim de camps òptics o règim de Rayleigh.....	16
3.4- Les dimensions de la partícula: un factor important.....	17
3.5- Rang de valors.....	18
4.- Avantatges i inconvenients.....	19
5.- Camp de recerca i noves vies d'investigació.....	20
5.1- Aplicacions en el camp de la Biologia.....	20
5.2- Aplicacions en el camp de la Física i la Química.....	22
5.3- Aplicacions en Física atòmica.....	23
5.4- Recerca actual.....	25
 <b>Capítol II. Disseny bàsic i construcció d'un exemplar de pinces òptiques. ....</b>	<b>26</b>
0.- Introducció.....	27
1.- Previ a la construcció:	
1.1- Disseny bàsic.....	28
1.2- Materials.....	29
1.3- Mecanisme de visualització de mostres.....	30
1.3.1- Càmera web	
1.3.2- Reflexió de la llum làser	
2.- Construcció:	
2.1- Suport horitzontal.....	31
2.1.1- Planxa de fusta	
2.1.2- Estructura del làser	

2.1.3- Lent	
2.1.4- Mirall	
2.1.5- Lent	
2.2.- Suport vertical.....	34
2.2.1- Barra de para-sol	
2.2.2- Mostra:	
2.2.2.1- Porta mostres	
2.2.2.2- Preparació de la mostra	
2.3- Mecanisme de visualització de mostres.....	34
2.3.1.- Càmera web	
2.3.2.- Reflexió de la llum làser	
 <b>Capítol III: Càlcul de les forces que experimenten les partícules.....</b>	<b>38</b>
1.- Presentació i objectius.....	39
2.- Hipòtesi.....	40
3.- Presentació de dades i càlculs	
3.1- Règim de raigs òptics.....	40
3.2- Règim de camps òptics o règim de Rayleigh.....	41
 <b>Capítol IV: Resultats i conclusions.....</b>	<b>43</b>
 <b>Bibliografia.....</b>	<b>46</b>
<b>Annex: Galeria fotogràfica .....</b>	<b>48</b>



## **PRÒLEG**

### **ÉS POSSIBLE CONSTRUIR UNES PINCES ÒPTIQUES AMB MATERIALS RECICLATS?**

Tot va començar l'estiu del 2010, quan vaig realitzar les estades científiques Joves i Ciència de l'Obra Social de Catalunya Caixa. Allà vaig cursar un projecte relacionat amb la llum, la finalitat del qual era construir unes pinces òptiques de laboratori, tot entenent el seu funcionament i processos físics que hi intervenen. Això va despertar-me una gran curiositat per aquesta fascinant eina científica.

Des de la seva invenció l'any 1986 de la mà d'Artur Ashkin, les pinces òptiques no han deixat de créixer i proporcionar múltiples aplicacions i noves vies d'investigació. Tot i així, no posseeixen un gran renom i la seva funció és pràcticament desconeguda.

De ciència-ficció sembla poder atrapar partícules, cèl·lules i àtoms mitjançant la força que pot exercir un feix de llum adientment enfocat. A mi mateix em va sorprendre aquest fet sabent que estàvem dins d'un rang nanomètric. Tota aquesta curiositat i incertesa va desembocar en la pregunta que em vaig formular: seria possible construir unes pinces òptiques amb materials reciclats? Poder respondre-la era sens dubte molt ambiciós i vaig pensar que podia ser molt útil.

Així va ser com vaig començar a pensar les qüestions d'estructura i materials que podia utilitzar, tenint en compte tots els recursos que disposava a casa. El meu anhel per poder donar forma a les meves idees va ser tal que aquell mateix estiu vaig iniciar la construcció de les pinces òptiques. La meva idea era construir-les amb trossos de fusta i metall, a més de les lents i miralls.

Ahora, un dels objectius principals de la construcció és la minimització de costos. Em sembla molt adient tractar de reduir-los al màxim. Aposto per una ciència a l'abast de tothom i considero que en aquests temps que corren aquest és un principi fonamental.

En principi es pot qüestionar la seva utilitat, però s'ha de tenir en compte que no estan destinades a substituir les pinces òptiques de laboratori. La seva missió és completament diferent: introduir, d'aquesta manera, als països subdesenvolupats que requereixen introduir-se al món científic amb instruments de baix cost.

La Garriga, 20 de setembre de 2011

# INTRODUCCIÓ

Tots els materials d'estudi requereixen una motivació prèvia, una petita guspira que ens inciti a entrar en ells amb ganes d'aprendre alguna cosa, per així treure'n algun profit a nivell personal i gaudir amb el coneixement que ens pugui proporcionar. En el millor dels casos, tots aquests factors no ens seran útils a nivell únicament personal, sinó a tots aquells que estiguin al corrent de la passió amb que es realitza l'estudi.

Així doncs, la principal motivació per a dur a terme aquest treball és l'ambició que em produïa poder respondre a la meva hipòtesi inicial: és possible construir unes pinces òptiques amb materials reciclats? Aquesta esdevé la base del treball, però prèviament vaig considerar necessari dur a terme uns fonaments teòrics per a entendre adientment tot el que envolta les pinces òptiques.

D'aquesta manera, el meu treball està estructurat en quatre capítols. El primer es tracta d'una base íntegrament teòrica en la que primerament es defineixen les pinces òptiques per a encarar correctament el tema. Posteriorment, ens remuntem vint-i-cinc segles en la història per a plasmar un dels grans debats de tota la humanitat: la concepció de la llum. En aquest apartat es mostra una cronologia en la què s'expliquen les diferents visions sobre la llum que s'han anat succeint des d' Euclides (s.IV a.C.) fins a Albert Einstein (s.XX).

En aquest primer capítol també hi trobem una detallada explicació de la Física que intervé en l'atrapament òptic. També s'esmenten els avantatges i inconvenients de les pinces òptiques, així com el seu ampli ventall d'aplicacions, des de la seva invenció fins a l'actualitat. El segon capítol – en anglès – presenta l'estructura pròpia d'un article científic i engloba tot el procés de construcció de les pinces òptiques, amb una explicació de tots els elements que hi intervenen, la seva funció i el material amb què han estat fets.

El tercer capítol inclou tots els càlculs de les forces que experimenten les partícules sotmeses a les pinces òptiques. Els resultats i les conclusions que s'extreuen dels càlculs i del procés de construcció es recullen al quart capítol. Finalment, com en tot estudi, hi trobem la bibliografia o recull de les fonts consultades. A mode d'annex, s'inclou una

galeria d'imatges fetes per mi, en les que es pot observar l'aspecte final de les pinces òptiques.

M'agradaria agrair al meu tutor de recerca, August Burgueño, el seu assessorament, recolzament i orientació al llarg de tota la recerca. També m'agradaria esmentar l'ajuda desinteressada que m'han proporcionat diferents professionals de l'òptica, sobretot per a l'elaboració del marc teòric. Aquests agraïments no serien dignes sense l'esment a la col·laboració incondicional de la meua família. A tots ells, moltes gràcies.

## **CAPÍTOL I**

### **LES PINCES ÒPTIQUES: UNA POTENT EINA DE MICROMANIPULACIÓ**

## 1.- DEFINICIÓ

Les pinces òptiques són unes potents eines científiques de micromanipulació, que permeten guiar, atrapar i separar objectes microscòpics, com una cèl·lula, sense contacte mecànic. El seu principi de funcionament és molt senzill, tan sols es requereix un feix de llum làser adientment enfocat i partícules en suspensió per a ser atrapades. El rang de mides dels objectes va des de desenes de nanòmetres (nm) a desenes de micròmetres ( $\mu\text{m}$ ).

## 2.- HISTÒRIA I DESENVOLUPAMENT

Esdevé necessari, per situar-nos, entendre correctament tot el treball que hi hagut durant molts segles per a determinar la naturalesa de la llum que, com s'intueix, ha originat una de les discussions més interessants de la història de la ciència. Moltes són les teories i models que han sorgit al llarg de tots els temps, tots ells intentant donar resposta als fenòmens coneguts. Així s'han anat succeint i rebutjant o modificant a mesura que s'obtenien nous coneixements.

L'interès per intentar explicar la llum es remunta vint-i-cinc segles endarrere. Al segle IV a.C., Euclides es va preguntar per la naturalesa de la llum i afirmava que neixia als ulls. Es va interessar per la reflexió de la llum i va establir les seves lleis. Va escriure també el primer tractat sobre òptica. Al mateix segle també va coexistir el reconegut filòsof, lògic i científic grec Aristòtil. Aquest, pel contrari, afirmava l'existència de quatre elements fonamentals que constituïen la naturalesa: aigua, terra, foc i aire. Creia que la llum hauria d'estar subjecta a alguna cosa, però la considerava un constituent de la naturalesa massa gran com per a poder comptar amb ell.

Posteriorment, al segle X, un científic i savi d'origen àrab anomenat Alhazen va donar un canvi substancial a les teories anteriors i va afirmar que la llum és rebuda pels ulls. També es va interessar per la refracció i va crear un utensili senzill per a la observació d'eclipsis, la cambra fosca. Va escriure una obra anomenada *Optical thesaurus*, que va ser traduïda al llatí l'any 1572.

Fent un salt en el temps de set segles i situant-nos ja al segle XVII, apareixen tres personatges importants pel que fa a l'estudi de la refracció de la llum; són el britànic Harriott, l'holandès Snell i el francès Descartes. Aquest últim va publicar el treball que van dur a terme independentment els tres físics l'any 1637, el qual s'establia el que es coneix amb el nom de les lleis d'Snell, vigent encara avui en dia per a explicar la refracció de la llum. Va ser aquell mateix segle, concretament l'any 1610, quan Galileo Galileu va aplicar el telescopi (inventat per artesans holandesos un any abans) a l'observació astronòmica. Aquesta eina òptica que tots coneixem permet observar objectes molt llunyans amb molts més detalls que a simple vista. Pel contrari, Malpighi i Sewenhock van inventar l'instrument òptic que permet veure objectes molt petits amb més detall que a ull nu, el microscopi.

El principi bàsic de funcionament de les pinces òptiques recau en la capacitat de la llum per exercir una força. Aquest fet es coneix com a poc desde 1619, quan Johannes Kepler va explicar en la seva obra *De Cometis* que la cua dels cometes apuntava en direcció contrària a la del Sol, ja que la llum solar era capaç de desprendre partícules del nucli cometari. Ara sabem que aquest fet és degut al vent solar.

El reconegut físic anglès Isaac Newton, que va establir la llei de la Gravitació Universal i les bases de la mecànica clàssica amb les lleis que porten el seu nom, també es va interessar per la llum. Va establir el que es coneix amb el nom de Teoria Corpuscular: *“els focus lluminosos emeten minúscules partícules que es propaguen en línia recta en totes les direccions i que, en xocar amb els nostres ulls, produeixen la sensació lluminosa”*. Amb aquesta teoria es podia explicar fenòmens com la propagació de la llum i la reflexió, però no pas la refracció. Va establir una hipòtesi que posteriorment es va comprovar que era errònia.

Contemporani a Newton, el físic i astrònom francès Huygens l'any 1690 va escriure el *Tractat de la llum*, en el qual critica a Newton. Considerava que la llum es tractava d'ones mecàniques longitudinals similars a les ones sonores. Aquesta hipòtesi explicava la reflexió i la refracció. Tot i així, no va ser acceptada, perquè la majoria de científics van confiar en la Teoria Corpuscular de Newton, pel seu prestigi.



A començament del segle XIX, A.J.Fresnel (1788-1827) va voler mostrar la deficiència de la Teoria Corpuscular de la llum a partir d'uns experiments realitzats pel metge i físic anglès T.Young (1773-1829), l'any 1808, sobre interferències lluminoses, el descobriment de la polarització de la llum, el 1808, i les experiències realitzades pel propi Fresnel sobre la difracció. Així doncs, va suggerir una nova proposta que afirmava que la llum estava formada per ones mecàniques transversals. Però la veritable derrota de la teoria ondulatoria de Huygens i Fresnel es va dur a terme amb l'espai d'Islàndia, un mineral en el que s'observaven imatges dobles d'un únic objecte. Aquest fet era impossible d'explicar amb les ones longitudinals. Les ones transversals també eren inapropiades, doncs s'haurien de propagar dins de l'èter, el qual se'l suposava amb propietats d'un fluid.

Un segle més tard, concretament l'any 1873, James Clerk Maxwell va elaborar la teoria electromagnètica. La llum passava a ser una ona electromagnètica composta per un camp elèctric i un camp magnètic mútuament induïts i essent perpendiculars entre ells, ambdós a la direcció de la propagació i propagant-se a la velocitat de la llum. També va raonar teòricament que la llum podia exercir forces òptiques per sí mateixa. Va predir també que aquesta força era proporcional a la seva intensitat. Alhora, es podia transmetre a objectes il·luminats de manera que es produïa una pressió que empenyia aquests cossos en la direcció de propagació de la llum. A principis del segle XX es van realitzar alguns experiments per verificar les teories de Maxwell. Així, Nichols i Hull als Estats Units i Lebedev a Rússia van detectar amb èxit els resultats de la pressió lumínica sobre objectes macroscòpics. Tot i així, aquests efectes eren molt difícils de detectar ja que eren molt i molt petits.

Posteriorment, gràcies al treball d'Albert Einstein, any 1905, es va elaborar la teoria fotònica, on la llum es comporta com un feix de corpuscles d'energia anomenats fotons. Gràcies a aquest treball, es va poder explicar la quantitat d'energia emesa o absorbida per un electró, la qual sempre serà un múltiple natural de  $h \cdot \nu$ , on  $h$  és la constant de Planck i  $\nu$  la freqüència de l'ona en el medi. Així doncs, a l'igual que les partícules materials, la llum pot exercir pressió sobre els objectes i fins i tot transferir moment.

La invenció del làser l'any 1960 de la mà de Theodore Maiman, dels Laboratoris d'Investigació Hughes, va suposar un canvi transcendental. Des de llavors s'han

desenvolupat una infinitat de làsers diferents d'acord amb les diverses aplicacions. Posseeixen la capacitat de concentrar en una àrea molt petita una intensitat de llum molt gran. Aquest fenomen va permetre a Arthur Ashkin moure partícules microscòpiques usant-los l'any 1970. Però degut a l'ordre de magnitud d'aquestes forces – piconewton – no va ser fins a 1986 quan el mateix Ashkin va inventar les pinces làser als laboratoris Bell. Era un mecanisme que permetia senzillament atrapar, sostenir i manipular micropartícules dielèctriques.

Un any més tard, va demostrar la utilitat de la seva tècnica en organismes vius atrapant virus, bacteris i protozous. A final de la dècada de 1980, van estendre's en el camp de la biologia notablement, atrapant al virus mosaic del tabac i el bacteri *Escherichia coli*. A principis dels 1990 va ser possible observar la dinàmica de motors nanomètrics a nivell molecular com, per exemple, el dels bacteris.

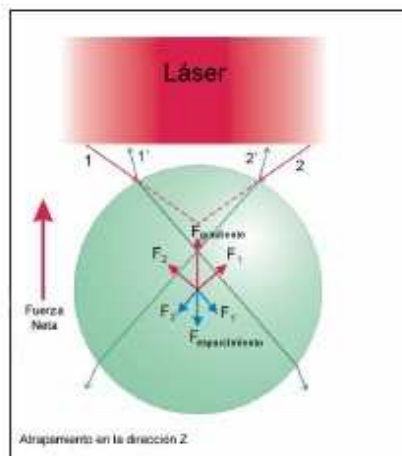
L'any 2003, les tècniques de les pinces òptiques van ser aplicades al camp de la classificació cel·lular, tot creant una gran intensitat òptica sobre l'àrea on es troba la mostra biològica i d'aquesta manera la cèl·lula pot ser classificada segons les seves característiques òptiques intrínseques. El 2004 van millorar estèticament, van passar de ser grans, costoses i complicades, a molt més simples, petites i menys costoses, gràcies a la introducció del DLBT (Diode Laser Bar Trapping). També han estat emprades per a mesurar les propietats visco-elàstiques de biopolímers, per a provar el citoesquelet i per a estudiar la motilitat cel·lular.

### 3.- FÍSICA DE LES PINCES ÒPTIQUES

#### 3.1.-PRINCIPIIS FONAMENTALS

Les pincen òptiques estan basades principalment en els processos de refracció que experimenta un feix al traspasar una diàfana transparent a la llum del làser. En altres paraules, un objecte petit i transparent a un làser de freqüència determinada refracta els raigs incidents, corbant la llum. Degut a aquesta refracció, la quantitat de moviment es transmet de la llum a la diàfana.

Quan exposem un feix de llum enfocada sobre una partícula, dues forces actuen sobre ella. La primera prové de la *pressió de radiació* i es coneix com a *força de dispersió*, la qual s'encarrega d'empènyer la partícula en la direcció de propagació del feix -*Imatge 3.1*-. La segona és la *força de gradient*, la qual atrau a la partícula en la direcció de la major intensitat del gradient. Per aconseguir que la partícula quedi retinguda en la trampa òptica, la força de gradient ha d'ésser més gran que la de dispersió.

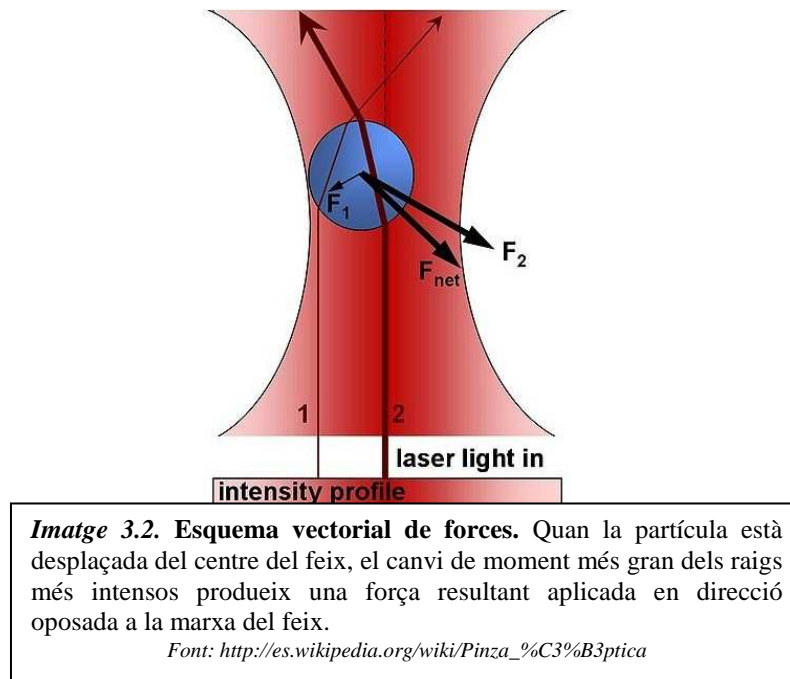


**Imatge 3.1.** Esquema vectorial de forces exercit sobre una partícula dielèctrica sotmesa a un feix Gaussià fortament enfocant.

Font: [http://catalina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lfa/covarrubias\\_j\\_a/capitulo1.pdf](http://catalina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lfa/covarrubias_j_a/capitulo1.pdf)

Si els feixos i la diàfana formen una geometria correcta –com es pot veure a l'*Imatge 3.1*-, la quantitat de moviment transmesa a la diàfana tindrà aquesta en la direcció del feix incident. Així és com el raig pot subjectar a la diàfana en el seu lloc i moure-la a voluntat d'un punt a un altre movent tan sols el feix làser.

Si, pel contrari, la diana es troba desplaçada del centre del feix làser – *Imatge 3.2*-, la força de gradient l'obligarà a retornar, ja que la resultant de la força serà en la direcció del focus. Aquesta força neta en direcció inversa respecte al centre de la trampa és deguda al canvi de moment dels feixos més intensos.



El principi físic de la captura d'una micropartícula es pot descriure d'acord a la seva grandària. Si el diàmetre  $D$  d'aquesta és menor que la longitud d'ona  $\lambda$  del feix de llum, ens trobem en el règim de camps òptics o règim de Rayleigh, on  $\lambda > D > 0.4 \lambda$ . En cas contrari ens trobem en el règim de raigs òptics, on  $\lambda < D < 10\lambda$ . Per tant, segons la mida de les partícules haurem d'emprar un règim o un altre.

### 3.2.- RÈGIM DE RAIGS ÒPTICS

Si ens trobem en el règim de raigs òptics ( $\lambda < D < 10\lambda$ ), és a dir, el diàmetre de la partícula és fins a deu vegades més gran que la longitud d'ona, aquesta i els efectes de difracció poden ser omesos. Tenint en compte aquest factor, la operació bàsica de les pinces òptiques pot ser explicada per la transferència del moment lineal de la llum associada amb el canvi de trajectòria dels raigs en una partícula dielèctrica, ja sigui per refracció o transmissió, i per la tercera llei de Newton.

Considerant un feix de llum amb perfil d'intensitat Gaussià fortament enfocat per una lent, el valor màxim de la força exercida per la trampa sobre la partícula vindrà determinat per la relació [1]:

$$F = Q \frac{nP}{c} \quad (3.2)$$

on  $c / n$  és la velocitat de la llum en el medi,  $P$  és la potència òptica en watts i  $Q$  és l'eficiència de la trampa. L'eficiència  $Q$  és un factor adimensional que descriu la fracció del moment lineal transferit a la partícula des del làser. Si les ones incideixen en una partícula perfectament absorbent,  $Q = 1$ .

### 3.3.- RÈGIM DE CAMPS ÒPTICS O RÈGIM DE RAYLEIGH

Si ens trobem en un règim de camps òptics o règim de Rayleigh ( $\lambda > D > 0.4 \lambda$ ), el diàmetre de la partícula atrapada és significativament més petit que la longitud d'ona de la llum. En aquestes condicions, la partícula pot ser tractada com un dipol en un camp electromagnètic heterogeni.

En aquest cas, les components de la *força de gradient* i *de dispersió* són fàcilment separables. La *força de dispersió* és deguda a l'absorció i a la radiació de llum emesa pel dipol. Per a una esfera de radi  $a$ , aquesta força és

[4]

$$F_{\text{dispersió}} = \frac{I_0 \sigma_m}{c} \quad , \quad (3.2.1)$$

on

[4]

$$\sigma = \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \quad , \quad (3.2.2)$$

On  $I_0$  és la intensitat de la llum incident,  $\sigma$  és la secció eficaç de dispersió de l'esfera,  $n_m$  és l'índex de refracció del medi,  $c$  és la velocitat de la llum en el medi,  $m$  és la relació entre l'índex de refracció de la partícula i el del medi ( $n_p/n_m$ ) i  $\lambda$  és la longitud d'ona del làser emprat. És necessari dir que la força de dispersió es propaga en la direcció del raig incident i la relació ens indica que és proporcional a la seva intensitat.

El càlcul de la força de gradient és proporcional al gradient de la intensitat i ve determinada per la següent relació

[4]

$$F_{gradient} = \frac{2\pi\alpha}{cn_m^2} \nabla I_0 \quad (3.2.3)$$

on

[4]

$$\alpha = n_m^2 a^3 \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \quad (3.2.4)$$

Denotem que la força aplicada sobre la partícula dielèctrica, tractada com un dipol, és proporcional a la intensitat del feix, és a dir, tendeix a atraure la partícula a la regió de més alta intensitat, permetent així, la seva captura. Cal afegir també que la força de gradient serà més gran quan  $m > 1$ .

### **3.4.- LES DIMENSIONS DE LA PARTÍCULA: UN FACTOR IMPORTANT.**

Quan les dimensions de la partícula capturada són comparables a la longitud d'ona del làser ( $D \sim \lambda$ ), cap dels dos règims anteriors i les seves respectives fórmules són aplicables. Així doncs, s'hauran d'usar teories electromagnètiques més completes per a poder dur a terme una detallada descripció. Afortunadament, la majoria dels objectes que són interessants per atrapar i analitzar amb pinces òptiques es troben en un rang de grandària mitjana ( $0.1 \lambda < D < 10 \lambda$ ).

En la pràctica, també serà molt difícil treballar amb objectes més petits que no poden ser observats ( $\sim 0.1 \mu\text{m}$ ), encara que partícules amb un diàmetre més petit de  $\sim 35 \text{ nm}$  podran ser atrapades amb èxit. Les mostres biològiques que poden ser atrapades directament – bacteris, llevat i orgànuls de cèl·lules més grans- es troben compreses en una rang de  $\sim 0.2 - 10 \mu\text{m}$ .

### **3.5.- RANG DE VALORS**

Ben conegudes les fórmules presentades amb anterioritat, podem verificar que és possible conèixer el valor de les forces aplicades sobre la partícula atrapada. El rang d'aquestes forces és de l'ordre de 1 a 100 piconewtons (pN). Es tracta de quantitats molt petites, imperceptibles i insignificants per a grans organismes, però poden ser significants en l'escala de les macromolècules, orgànuls cel·lulars i fins i tot de cèl·lules senceres. Una força de 10 piconewtons pot moure un bacteri a través de l'aigua a una velocitat superior a la que ell pot assolir, aturar el camí d'un espermatozoide o detenir el transport d'una vesícula intracel·lular.

Una força d'aquesta magnitud també pot allargar, corbar i deformar macromolècules, com el DNA i RNA, o un conjunt de macromolècules, incloent components citoesquelètics. La tècnica de les pinces òptiques és també útil per a estudiar la mecànica o la dinàmica a nivell cel·lular i intracel·lular. Així doncs, denotem una estreta relació entre aquest rang de forces que proporcionen les pinces òptiques i la Biologia. Per aquest motiu, moltes de les seves aplicacions estan destinades a la recerca en aquesta disciplina.



## **4.- AVANTATGES I INCONVENIENTS**

### **PER QUÈ SÓN INTERESSANTS LES PINCES ÒPTIQUES?**

Les pinces òptiques esdevenen una eina científica molt interessant per diversos motius. En primer lloc, i evidentment, pel fet que permetin atrapar partícules amb la utilització de llum sense danyar les propietats intrínseques de la matèria. En conseqüència, seran múltiples les utilitats que podran oferir a diverses branques de la ciència, sobretot en el camp de Biologia, però sense deixar de banda disciplines com la Física i la Química.

A més, les pinces òptiques es poden integrar fàcilment en un microscopi convencional, introduint la llum làser al tub i focalitzant-la amb l'objectiu. També ens han permès “veure i quasi tocar” partícules de forma desconeguda i interessant. S'ha demostrat que, si es pot “veure” un àtom o una partícula microscòpica, podem ser capaços també de manipular-los sense alterar les membranes .

Amb les pinces òptiques, moltes branques de la Física atòmica han fructificat, com les tècniques i aplicacions de refredament i atrapament amb làser, fent realitats somnis que semblaven realment inabastables. Sens dubte, es tracta d'un nou i gran instrument per a la Física, la Química i la Biologia.

### **PER QUINS MOTIUS NO SÓN SUFICIENTMENT INTERESSANTS?**

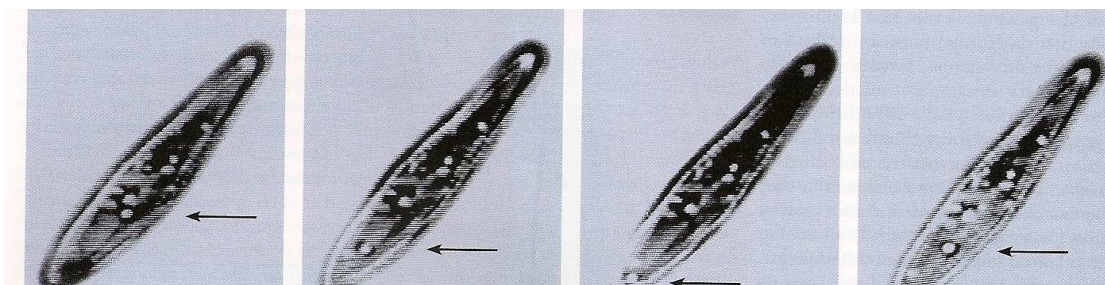
Les pinces òptiques no són suficientment interessants perquè tan sols funcionen amb partícules dielèctriques i requereixen llum molt ben enfocada. Per aquest motiu, hi ha certes restriccions alhora de triar quin tipus de coses es poden manipular, sobretot depenent de la mida de les partícules en qüestió.

## 5.- CAMP DE RECERCA I NOVES VIES D'INVESTIGACIÓ

### 5.1- APLICACIONS EN EL CAMP DE LA BIOLOGIA

Les pinces òptiques proporcionen un ampli ventall d'aplicacions. En primer lloc, el mateix creador de les pinces, Arthur Ashkin, al voltant de 1980 va ser capaç d'atrapar òpticament bacteris i protozous, un a un. Juntament amb el seu grup, van demostrar que podien atrapar i desplaçar cèl·lules senceres i els seus orgànuls.

Steven Chu, Premi Nobel de Física, va comprovar que les pinces òptiques també eren capaces d'atrapar molècules. Ell i el seu equip van desenvolupar un parany atòmic amb l'ús de làsers i bobines magnètiques, de manera que van poder capturar molècules. Steven M. Block i Michael P. Sheetz van utilitzar aquesta tècnica per a motors de quinesines<sup>1</sup>. Aquests motors agiten també les partícules i els orgànuls intracel·lulars – *Imatge 5.1*-.



**Imatge 5.1.** Trasllat d'un orgànul d'un protozoo fins a un extrem de la cèl·lula amb pinces òptiques, tal i com es mostra en les tres primeres figures. La imatge que apareix a l'extrem dret mostra l'orgànul després del seu alliberament.

*Font: "Investigación y ciencia. Temas 60". Física y aplicaciones del láser.*

Greulich i Berns van ser els primers en utilitzar la tècnica de les pinces per a tallar i moure cèl·lules. Greulich va realitzar un treball utilitzant llum ultraviolada i la tècnica de les pinces per a manipular trossos de cromosomes per a l'aïllament genètic. També han estat utilitzades per a posar en contacte dues cèl·lules i així afavorir la seva fusió, tallant la seva paret comú.

Berns i el seu grup van utilitzar les pinces, juntament amb tissores òptiques, per a manipular cromosomes durant la divisió de la cèl·lula. D'aquesta manera, es va presentar una nova forma d'estudiar les complexitats de la mitosi<sup>2</sup>. Una altra interessant

---

<sup>1</sup> *Quinesina*: estructura proteinoàcida responsable del moviment dels flagels o de la cua dels espermatozous. <sup>2</sup> *Mitosi*: en Biologia, és un procés que s'esdevé al nucli de les cèl·lules i que deriva directament a la divisió cel·lular, consistent en el repartiment equitatiu del material hereditari (ADN) característic.

aplicació consisteix en la utilització d'aquesta tècnica per a manipular espermatozous vius en 3-D i poder mesurar la seva velocitat en el medi.

D'aquesta última experiència s'han extret conclusions importants: els espermatozous que neden en zig-zag ho fan a major velocitat que els que neden en línia recta, en conseqüència, els homes que posseeixin un major nombre dels que neden en zig-zag podrien ser més fèrtils que els que els produeixen en línia recta. En resum, podem dir que les pinces òptiques poden ser útils per al tractament clínic de l'esterilitat i per a l'estudi de la motilitat<sup>3</sup> dels espermatozous.

L'any 2003, les pinces òptiques van ser utilitzades per a la classificació cel·lular, segons les característiques òptiques immanents de cadascuna. També s'han usat per a la investigació de les propietats visco-elàstiques dels biopolímers o l'estudi de la motilitat cel·lular.

Uns estudiants de la Universitat de Califòrnia van utilitzar les pinces per a analitzar la relació entre la forma i la funció de les cèl·lules *T* del sistema immunitari. La presència de cèl·lules *B* del sistema immunitari produeix una sèrie de reaccions, entre elles l'augment dels ions calci en les cèl·lules *T*. Això afavoreix a l'abundància de cèl·lules *T*, essencials per a la immunitat. Van comprovar que al situar cèl·lules *B* en els extrems de la *T* es produeix un alliberament de calci.

Amb dues trampes òptiques es va poder realitzar un estudi sobre la col·lisió de dues partícules o cèl·lules sota condicions biològiques essencials controlades. Aquesta tècnica anomenada "OPTCOL", va permetre l'estudi de col·lisions de partícules biològiques com bacteris, virus, cèl·lules *T*, ribosomes<sup>4</sup> i liposomes<sup>5</sup>, tot i que també es pot aplicar amb objectes no biològics.

Per acabar, és adient destacar un dels estudis realitzats pel propi creador de les pinces: Artur Ashkin. En una de les seves experiències va mostrar la capacitat que poseeixen per a deformar glòbuls vermells de la sang i restringir diverses cèl·lules en un mateix atrapament òptic.

---

<sup>3</sup> *Motilitat*: terme de la Biologia usat per a expressar l'habilitat (de les cèl·lules) per a moure's espontàniament i independentment. <sup>4</sup> *Ribosoma*: orgànul cel·lular que té per funció la síntesi de proteïnes i, per tant, un paper de primer ordre en el creixement cel·lular. <sup>5</sup> *Liposoma*: gota lipídica del citoplasma cel·lular, especialment en un ou.

## 5.2- APLICACIONS EN ELS CAMPS DE LA FÍSICA I LA QUÍMICA

Són moltes també les aplicacions que proporcionen les pinces òptiques en diverses àrees de disciplines com la Física o la Química.

En l'àmbit de la física estadística<sup>6</sup> i la dinàmica no lineal, Simon i Libchaber van utilitzar ressonància estocàstica<sup>7</sup> per a sincronitzar la fugida d'una partícula amb moviment Brownià d'un parell de trampes òptiques.

Uns científics japonesos van observar esforços de torsió, induïts òpticament, i rotacions de partícules anisotròpiques<sup>8</sup> micromecanitzades, sostingudes amb pinces òptiques. Svodoba i Block van demostrar que les partícules metàl·liques Rayleigh tenen polaritzacions més grans que les partícules dielèctriques i poden ser atrapades amb pinces òptiques.

Les pinces també han estat utilitzades per a la mesura de les forces entròpiques<sup>9</sup>, d'uns 40 femtonewtons, que controlen el moviment de partícules col·loïdals. Les atraccions i repulsions entròpiques van ser directament observades amb pinces en col·loïdes binaris depenent de la concentració de petites esferes.

Altres remarcables aplicacions s'han dut a terme en l'àmbit de la microquímica, que estudia l'espectroscopia<sup>10</sup> i la química d'objectes molt petits ( $\mu\text{m}$ ). Són molts els experiments que s'han realitzat combinant l'atrapament òptic amb la fluorescència, espectroscòpia d'absorció, fotoquímica<sup>11</sup> i electroquímica<sup>12</sup>. La polimerització i altres tècniques de microfabricació han estat demostrades amb mostres micromètriques, gràcies a les pinces òptiques. També han permès l'estudi de les propietats físiques de les membranes i les vesícules.

---

<sup>6</sup> *Física estadística*: part de la Física que tracta de determinar el comportament d'un sistema format per gran quantitat de partícules, analitzant-lo estadísticament.

<sup>7</sup> *Estocàstica*: concepte matemàtic que serveix per a caracteritzar una successió de variables aleatòries –estocàstiques– que evolucionen en funció d'una altra variable, generalment el temps.

<sup>8</sup> *Anisotròpic*: material que pot variar alguna de les seves propietats segons la direcció en la que es mesuren.

<sup>9</sup> *Entropia*: magnitud termodinàmica que indica el grau de desordre molecular de la matèria.

<sup>10</sup> *Espectroscòpia*: estudi de la interacció entre la radiació electromagnètica i la matèria, amb absorció o emissió d'energia.

<sup>11</sup> *Fotoquímica*: subdisciplina de la Química que estudia les interaccions entre àtoms, molècules petites i la llum.

<sup>12</sup> *Electroquímica*: branca de la Química que estudia la transformació entre l'energia elèctrica i l'energia química.

### 5.3- APLICACIONS EN FÍSICA ATÒMICA

El làser permet un control extraordinari sobre les propietats de la radiació electromagnètica. És així com utilitzant un feix de llum làser adientment enfocat i ajustat, es pot reduir l'excitació tèrmica dels àtoms fins a temperatures pròximes al zero absolut ( $T \sim 0$  kelvin). Aquest fet és molt interessant, ja que en aquestes condicions es posen de manifest moltes de les propietats quàntiques fonamentals de la matèria i les insòlites interaccions entre la llum i els àtoms ultrafreds. També ha permès la realització de rellotges atòmics<sup>13</sup> i acceleròmetres<sup>14</sup> de gran precisió.

El principal científic i introductor d'aquesta tècnica va ser l'investigador nord-americà Steven Chu, actual secretari d'Energia dels Estats Units, que va rebre el Premi Nobel de Física l'any 1997 per aquest estudi.

Deu anys abans, quan encara no s'havia descobert aquesta tècnica amb làser, es va desenvolupar una altra que permetia dur a terme la mateixa funció però mitjançant un camp magnètic. L'introduïdor va ser Wolfgang Paul, de la Universitat de Bonn (Alemanya) juntament amb el seu grup. Va ser capaç d'atrapar neutrons en un camp magnètic. Set anys més tard, William D. Phillips, de l'Institut Nacional de Pesos i Mides, va ser capaç d'atrapar àtoms.

Aprofitant que la llum està formada per camps elèctrics i magnètics en continua i ràpida oscil·lació, es pot crear un camp elèctric en un sistema dinàmic<sup>15</sup> amb un màxim local d'intensitat en un punt concret. El fet que el camp elèctric canviï amb tanta rapidesa no és cap problema, ja que quan canvia la polaritat, s'inverteix el moment dipolar de l'àtom. Tot i així, el camp sempre haurà de canviar amb un ritme més lent que les freqüències d'oscil·lació naturals de l'àtom. D'aquesta manera, el moment dipolar de l'àtom romandrà alineat amb el camp. En conseqüència, l'àtom es dirigirà cap al màxim local, garantint-ne l'aprofitament d'aquesta força dipolar per atrapar l'àtom.

---

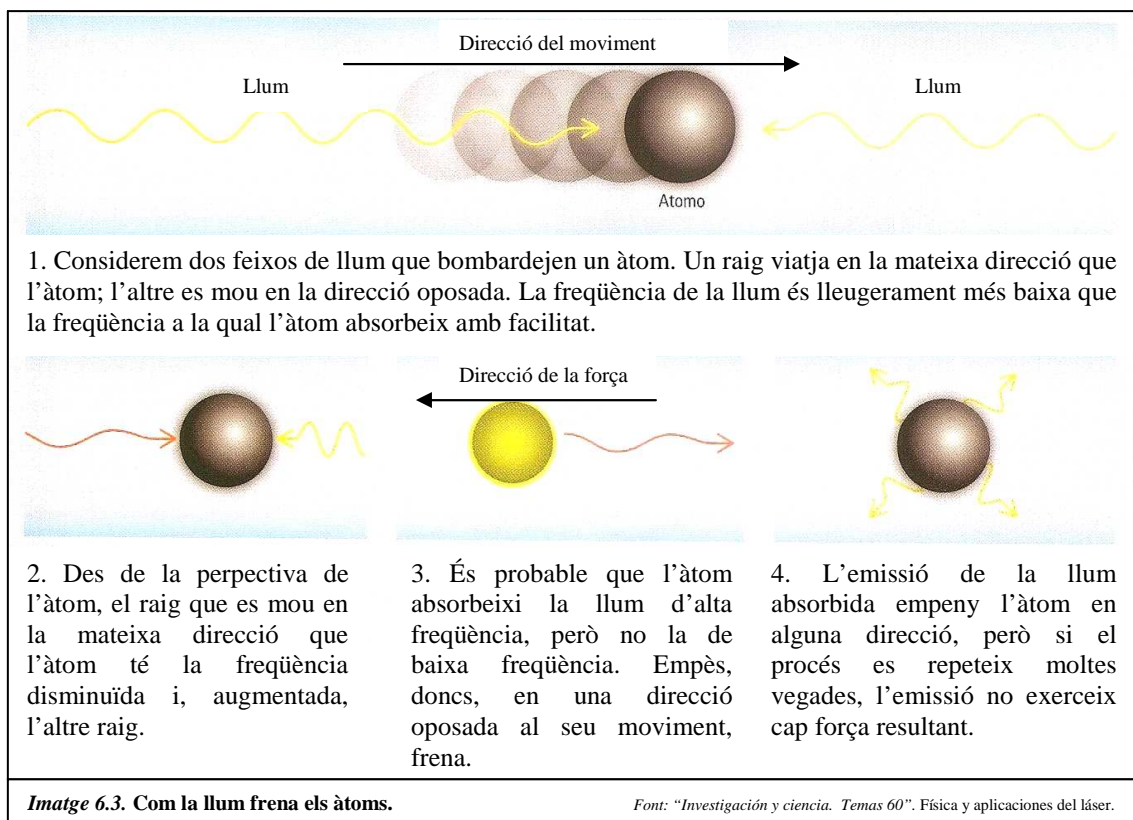
<sup>13</sup> *Rellotge atòmic:* rellotge constituït per un patró atòmic de freqüència que produeix oscil·lacions d'una freqüència molt estable i per un dispositiu electrònic que permet comptar aquestes oscil·lacions.

<sup>14</sup> *Acceleròmetre:* aparell per a mesurar l'acceleració a que és sotmès un cos, respecte a una referència fixa, per a estudiar-ne les conseqüències i els efectes.

<sup>15</sup> *Sistema dinàmic:* és un sistema en el que el seu estat evoluciona amb el temps. El comportament en aquest estat es pot caracteritzar determinant els límits del sistema, els elements i les seves relacions.

Tot i que aquesta trampa de força dipolar és molt cuidadosa, poseeix certs problemes de realització. Per exemple, la llum s'ha de sintonitzar per sota de la freqüència a la que els àtoms absorbeixen fàcilment fotons. A aquest tipus de freqüències tan allunyades, les forces d'atrapament són tan ínfimes que ni tan sols àtoms refredats fins a 0,01 kelvin s'hi poden mantenir. En cas que es poguessin mantenir àtoms més freds, hi podrien romandre unes poques mil·lèsimes de segon.

Degut a aquests múltiples inconvenients, científics de la Universitat de Washington van predir la possibilitat de refredar un àtom si s'irradiava des de dos costats amb llum làser d'una freqüència lleugerament inferior a la necessària per a la màxima absorció. Si l'àtom es mou en direcció oposada a un dels feixos, la llum, des de la perspectiva de l'àtom, augmenta la seva freqüència. Així doncs, podem assegurar que l'àtom absorbirà la llum, la qual ha augmentat la seva freqüència; i aquesta llum absorbida serà la força de col·lisió que aturarà l'àtom – *Imatge 6.3-*



L'any 1985, Artur Ashkin, Leo Hollberg, John E. Bjorkholm, Alex Cable i Steven Chu, van refredar àtoms de sodi a 240 milionèsimes de kelvin. Sense tractar-se de cap trampa, els àtoms van romandre durant períodes de 0,5 segons abans de ser capaços d'escapar dels feixos. Aquesta combinació de làsers per a crear la força de frenada la van anomenar “melassa òptica”. Gràcies a elles, es van poder atrapar àtoms mitjançant la llum.

#### 5.4- RECERCA ACTUAL

Actualment, les pinces òptiques centralitzen el seu camp de recerca en la biofotònica. S'estan utilitzant, per exemple, per a l'estudi de l'electroforesi<sup>16</sup> d'una cèl·lula viva. S'estudia aquest fenomen aplicat a partícules col·loïdals i cèl·lules vives atrapades amb pinces òptiques. Aquests estudis es duen a terme perquè es considera que la caracterització dels sistemes biològics no pot ser entesa sense el coneixement de les seves propietats elèctriques. Doncs bé, les pinces òptiques ens permeten mantenir aquestes cèl·lules subjectes per observar amb detall l'electroforesi.

Combinant l'espectroscòpia Raman<sup>17</sup> i les pinces òptiques, s'han advertit els canvis en l'oxigenació d'un glòbul vermell humà, mentre està sotmès a una tensió mecànica a càrrec de les pinces. Aquesta mateixa combinació també s'ha utilitzat per a obtenir informació sobre els processos bioquímics i biofísics que tenen lloc en cèl·lules i grans molècules. El rang de treball va des de l'estudi dels glòbuls vermells o el DNA fins al de les cèl·lules cancerígenes al cervell.

---

<sup>16</sup> *Electroforesi*: és una tècnica per a la separació de molècules segons la mobilitat d'aquestes en un camp elèctric.

<sup>17</sup> *Espectroscòpia Raman*: és una tècnica fotònica d'alta resolució que proporciona en pocs segons informació química i estructural de quasi qualsevol material o compost orgànic i/o inorgànic permetent-ne la seva identificació.



## **CAPÍTOL II**

### **DISSENY BÀSIC I CONSTRUCCIÓ D'UN EXEMPLAR DE PINCES ÒPTIQUES \***

---

*\* El segon capítol íntegre està escrit en anglès ja que va formar part de l'article científic que vaig presentar per al programa "Joves i Ciència" de l'obra social de Catalunya Caixa, on havia d'ésser obligatòriament escrit en llengua anglesa. Per aquest motiu, l'estructura i disposició de la informació que segueix també és pròpia d'un article científic. L'article va ser presentat el desembre de 2010.*

## ABSTRACT

I built an optical tweezers with recycled materials. Before I decided it, I thought about the possibilities I had at home, that is to say, I needed reachable materials and resources. Optical tweezers have numerous applications and an important utility in research process. So it is interesting to check that it is possible to build one of them with minimum costs at home. For creating them, I used some wood – for the structure and the base -, some metal – for the structure as well -, recycled lenses, some recycled plastic, two mirrors and a normal laser. For the sample set up I prepared a solution of water, soap and the particles I will examine. To obtain better results it is important to improve the design. As you can see, I did not have to buy any of the materials, so the costs are minimal. It was an important aim of my project and it would be a good and easy way to introduce the underdeveloped countries to science and it would contribute to their development.

**KEYWORDS:** optical tweezers, minimum costs, basic design, mechanism to see the sample.

## INTRODUCTION

Optical tweezers have become a fundamental tool over the last years. Since the first time Arthur Ashkin was able to trap suspended microscope particles in 1970, this instrument has not stopped developing. The optical tweezers research line is more and more extended, especially focusing on biological sciences.

The optical tweezers operating principle is very simple. It just requires a laser beam focused with the help of a lens similar to a microscope's one and suspended particles. Therefore, my aim is to build an optical tweezers taking into account its simple principle of operation. Moreover, the costs are minimal as I will use common recycled materials.

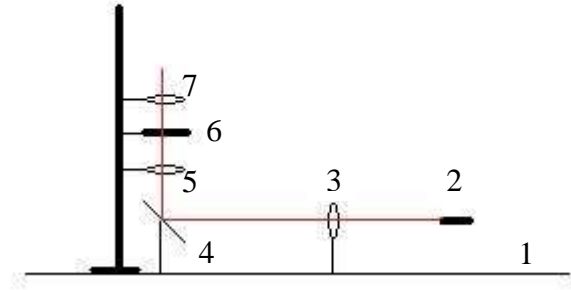
A priori one can question its functionality, but it should be noted that it is not intended to substitute laboratory optical tweezers. Its utility is different: introduce science to the underdeveloped countries which need to start in the scientific world with low cost instruments.

## MATERIALS AND METHODS

### 1.-PREVIOUS TO THE SETTING UP

#### 1. 1- BASIC DESIGN

On the elaboration process of the optical tweezers the design is fundamental. It must be simple and precise. Optical tweezers requires a stable and a functional design, with differentiated parts among themselves, emphasizing the vital importance of the mirrors, the lenses and the laser.



**Figure 1.** Structure basic design, where:  
1.Horizontal support; 2. Laser; 3. Lens; 4. Mirror;  
5. Lens; 6. Stage; 7. Lens; 8. Vertical support.

As we can see in *Figure 1*, the basic design only includes the essential parts to trap particles. That is why the sample display system, as it could be a webcam, does not appear.

Another important aspect of the design is that it requires a constant and invariable alignment. It needs fixed and immobile pieces and structures, except for the stage (*Figure 1* (6)). It is vital to minimize the possible vibrations in the room where someone is working with the optical tweezers (we can achieve it by using a pressure table), but in this case we are going to minimize vibrations just by reducing the movement of the people there are in the room.

It is also interesting to do an optical tweezers with independent parts to make its transport easier, but always preserving the structure rigidity and alignment. In this case the vertical support - with its respective lens and stage - will be independent of the horizontal support - with its laser, lenses and mirror -. We can only achieve this by using rigid material that does not modify the established alignment.

## 1.2- MATERIALS

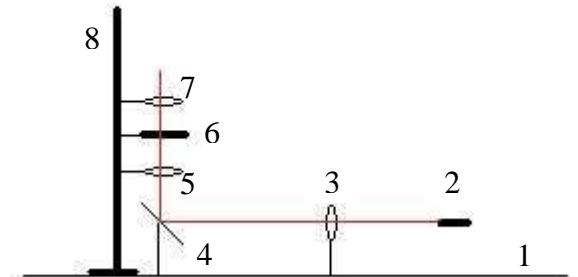
Before starting the setting up it is necessary to evaluate the materials and resources I have and the access to them. According to the basic design (*Figure 1*), it is obvious that we need resistant materials which provide rigidity and stability to the structure. Furthermore, we need the specific material for the optical tweezers like the laser or the lenses. But always taking into account the ideal of minimal costs.

Analyzing these previous conditions, I decided that for the structure I would use wood, metal pieces and plastic I already had at home; the lenses would be recycled from a nearby optician's and the laser would be one quite new I had at home.

Before starting the set up process I decided the approximate utility of each piece, as well as their organization and function in the established base design (*Figure 2*).

Material	Function	Cost (€)
Wood plank 1250x218 mm	Support	0
Laser	Trap	0
Lens(es) (3)	Focalize laser	0
Mirror(s) (2)	Reflect laser	0
Wood pieces	Structure	0
Metal pieces	Structure, stage	0
Plastic pieces	Structure	0
Umbrella tube	Structure	0

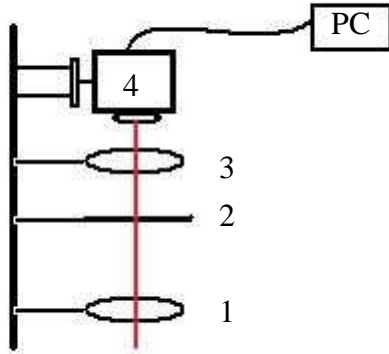
**Table 1.** Table of materials to built the basic design. Column 1: Material; Column 2: Function; Column 3: Cost (€).



**Figure 2.** Key design of the structure according to the agreed materials , thus: 1. Wood plank; 2. Laser; 3. Lens; 4. Mirror; 5. Lens; 6. Metal piece; 7. Lens; 8. An umbrella tube. The parts that subject the lenses, the sample and the laser are made with pieces of wood, plastic and metal.

### 1.3- DESIGN OF THE MECHANISM TO SEE THE SAMPLE

#### 1.3.1 WEBCAM



**Figure 3.** Design of the mechanism to see the sample with a webcam, where: 1. Lens; 2. Stage; 3. Lens; 4. Webcam.

Apart from the basic design, it is also important the elaboration of the mechanism to see the sample. I considered the possibility to use a webcam in order to see the images and the recorded videos on the computer. Furthermore, it would not have been an additional cost as it is something I have at home.

The design of this mechanism is apparently simple, but the alignment of the laser beam to

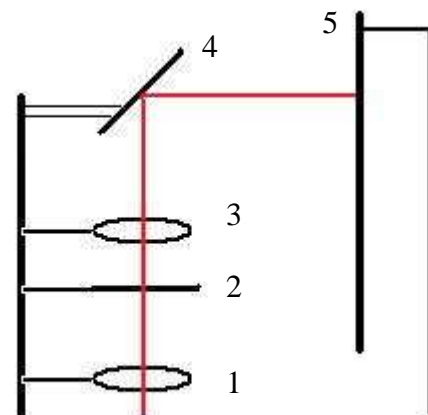
the webcam objective is very complicated as it is very small.

Using this mechanism allows us to see the images on the computer, and it gives us the possibility to make videos. Probably one of the main drawbacks is the loss of image quality due to the low resolution the webcam has.

#### 1.3.2- REFLECTION OF THE LASER BEAM

This mechanism is based on the reflection of light. It consists on positioning a mirror with a determined angle and it has to deflect the laser beam towards a white screen. In this screen we can visualize the sample with its trapped particles.

We need to incorporate a mirror and a screen as we can see in *Figure 4*. Even so, its set-up is simple. It is not so meticulous as the mechanism with a webcam.



**Figure 4.** Design of the mechanism to see the sample with reflection of light, where: 1. Lens; 2. Sample preparation; 3. Lens; 4. Mirror; 5. Screen.

Using this mechanism would not allow us to make a video or take pictures of the particles. But it does not affect the main function of the optical tweezers, to trap particles. This system gives us a higher image resolution than a system made with a webcam. Besides we avoid possible errors with technologic problems of the webcam.

## 2.- BUILDING

### BASIC DESIGN

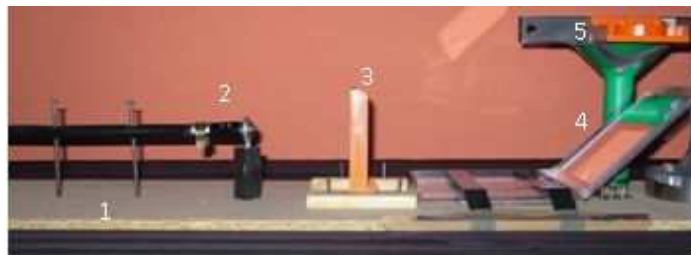
The key principles for the basic design are the stability and rigidity, with a well defined structure and a constant alignment. The study of the pieces that make up the optical tweezers will be according to the laser beam trajectory. It is necessary to bear in mind that the global structure is divided in two groups: the horizontal support and the vertical one. Thus, the transport of the optical tweezers will be much easier.

#### 2.1- Horizontal support

As we can see in *Figure 5*, the horizontal support is made by the wood plank, the laser, the first lens, the mirror and the second lens.

Each piece has its own structure.

The height at which we fix the laser pointer will be the one that will define the height of the other components.

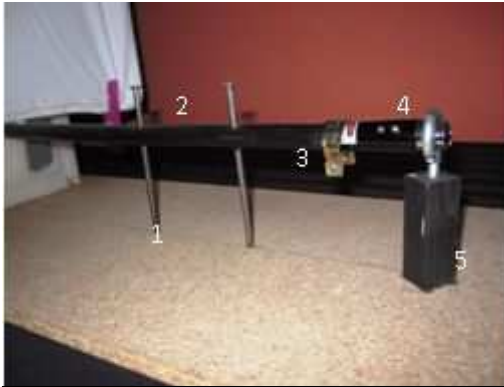


*Figure 5. Profile of the horizontal support, where: 1. Wood plank; 2. Laser; 3. Lens; 4. Mirror; 5. Lens.*

##### 2.1.1- WOOD PLANCK

The wood plank is a key component, apart from being the support it can be drilled and we can fix the pieces on it. The plank has a thickness of nine mm and its dimensions are 1250 x 218 mm. It is the base over which the optical tweezers are built. Furthermore, it follows the cost reduction ideal, as it was a part from an old piece of furniture.

### 2.1.2- LASER STRUCTURE



**Figure 6.** Laser structure, where: 1. Nail; 2. Plastic tube; 3; Metal ring; 4. Laser; 5. Piece of wood with a hook.

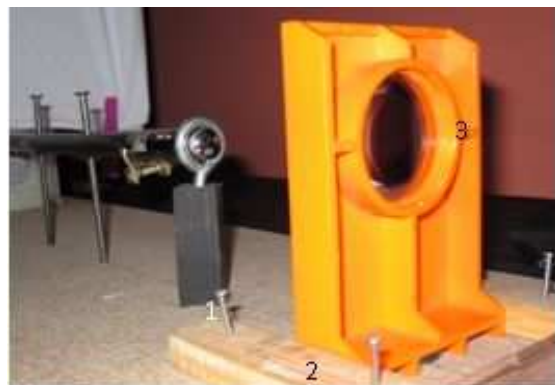
The laser pointer is the essential component for the proper working of the optical tweezers. The laser I use is a conventional one, with  $650\pm 10$  nm (red colour) wavelength and 20 mW of power. Its form and dimensions requires building a structure to fix it in an adequate height. It is also necessary to keep it fixed.

For the back part of the laser I built a structure with two nails and a plastic hard tube in order to hold it properly. For the front part I made a piece with a wood bit and a hook. With these structures I ensured the immobility of the laser. Furthermore, these fixing structures allowed me adjusting the height I wanted (*Figure 6*).

Then I decided to put a metallic ring on the laser to avoid pressing the switch constantly (*Figure 6 (3)*). Like this, every time I want to switch the laser on I just have to slide the ring and put it on top of the switch.

### 2.1.3- LENS

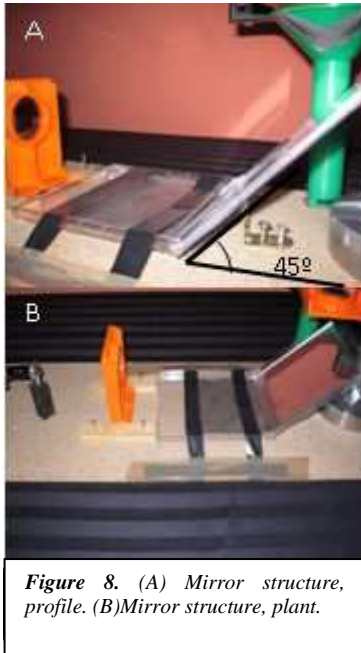
If we follow the laser beam trajectory, we see that the first obstacle it finds is the first lens, which is necessary to focus the beam. I got the lenses from an optician's I know; they have a plastic structure. I made a support with two pieces of wood and I fixed it to the base. The centre of the lens coincides with the height of the laser pointer, doing this I avoid deflections as its profile it is biconvex. It has a focal distance of 100 mm ( $f' = 100\text{mm}$ ).



**Figure 7.** Structure of the first lens, where: 1. Nail; 2. Piece of wood; 3. Lens.



#### 2.1.4 MIRROR



The mirror is a very important part of the project as it allows the reflection of the laser beam in a 90 degree angle. To achieve that, the mirror must be in a 45 degree angle to the horizontal support (*Figure 8 (A)*).

It also needs a fix structure to maintain the adequate angle of inclination. To fix the structure of the mirror to the wood plank I used duct tape and to keep the angle of inclination I used a metallic piece fixed to the base with nails. I fixed it in order to maintain the 45 degree angle.

#### 2.1.5- LENS

In theory this lens should be part of the vertical support but I decided to put it apart because it was handier for me to work. I built its structure with an industrial reel, duct tape and glue (*Figure 9*).

This lens has a focal distance of 50 mm ( $f' = 50\text{mm}$ ), and it is in that point of maximum intensity of the laser beam, where I put the stage to trap the particles. It has the same function as a conventional objective.



**Figure 9.** Structure of the lens.

## 2.2- VERTICAL SUPPORT



**Figure 10.** Profile of the vertical support ,where:  
1. Umbrella's tube; 2. Iron base; 3. Stage; 4. Lens.

As we can see in *Figure 10*, the vertical support is made by an umbrella's tube, an iron base, the metallic stage and the lens with its own structure.

The iron base plays a very important role as it gives stability and adherence when we put it on the horizontal support. But at the same time it allows separating it from the support and it makes its transport easier.

One of the main characteristic of this support is that all the parts have mobility in order to slide the pieces along the tube. Like this we can adjust the pieces to the adequate height.

For doing that I had to think about a system that allowed me to immobilize those parts but I also needed a system that allowed me to slide the pieces along the tube.

Furthermore, the vertical structure should be in a 90 degree angle to the horizontal support. Like this we guarantee that the laser beam is always perpendicular to the horizontal when it is deflected through the mirror.

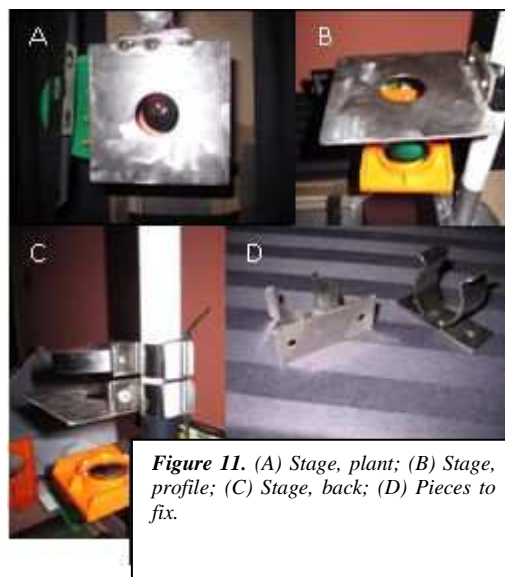
### 2.2.1- UMBRELLA'S TUBE

It is a key component concerning the structure and rigidity. It is a tube of 560 mm long and it has a diameter of 20 mm. And it is the base of the vertical support. The other elements that compose the optical tweezers are organized along them. But to guarantee the immobilization I put a three kilos weight on the base to hold the tube and then I tied it to the weight with duct tape (*Figure 10 (1)*).

## 2.2.2- SAMPLE

### 2.2.2.1- Structure

The stage has to be a rigid part, but at the same time it has to be mobile as it has to allow us to move the trapped particles. Keeping in mind the first aspect, I decided to use a piece of steel. I had to polish and cut it to obtain a 100 x 100 mm squared piece.



To achieve that the stage would be mobile, I made the mechanism shown in *Figure 11* (C). It is a piece that has a circular part with a variable diameter. It has a rectangular surface with two holes on its frontal part (*Figure 11(D)*). I fixed these pieces to the umbrella's tube with two bridles. The bridles allowed me to adjust the diameter of the pieces to the diameter of the tube.

The stage only can be moved from right to left as the mechanism is steady and it cannot be moved towards the tube or separated from it.

### 2.2.2.2- Sample preparation

The hole of the stage plays a very important role to visualize the samples. To trap the particles in an aqueous medium I considered that preparing a solution of water, soap and the particles would be a good method. Like that we obtain a bubble that can be extended and adapted to the form of the hole in the stage.

To trap the particles we will only have to move the stage as they will be suspended in the bubble. This method prevents us from doing a new piece to place the particles. Moreover it is very simple to get it as we only need soap and water.

## 2.3- MECHANISM TO SEE THE SAMPLE

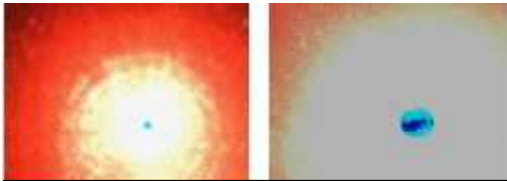
### 2.3.1- WEBCAM

The execution of the mechanism to see the sample is very simple as it is made with basic materials. It just requires an immobile and precise structure. To prepare it I used an iron rail, two magnets and four pieces of metal to design the support for the webcam.



**Figure 12.** Design of the mechanism with webcam.

Adjusting the height is very easy as we only have to move the magnet and it keeps the objects fixed. Once I finished this setting up I aligned the laser beam to the opening of the webcam and then I could finally see the images on the computer (*Figure 13*).



**Figure 13.** Images taken with webcam.

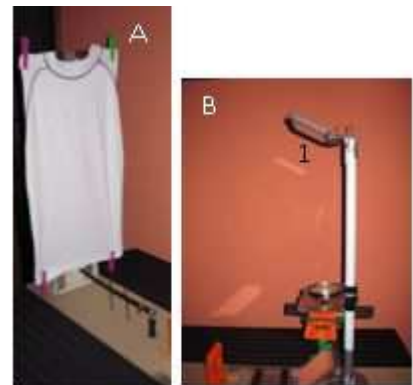
As you can see, the results are not satisfactory since we only have a low quality image with excessive lightness and brightness. This is due to the low resolution the webcam has and because of the fact that in a webcam we cannot adjust the image contrast or the brightness.

It is obvious that the mechanism made with a webcam is not feasible for the reasons I have just exposed. We would need a better quality webcam that could adjust the image.

### 2.3.2- REFLECTION OF LIGHT

This mechanism to see the sample is based on the reflection of light. Its setting up just needs a mirror and a white screen. So, as you can see it is very simple.

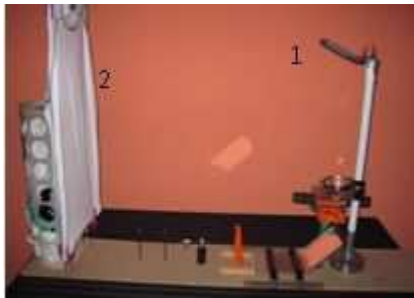
The mirror has to be fixed in a determined angle, the angle that will project the laser beam towards the t-shirt that works as the white screen. The mirror I have used has a base that allows me adjusting the angle. (*Figure 14(B1)*).



**Figure 14.** (A) Screen; (B1) Mirror.

Thanks to that base and to a piece of metal – the same one that I have used for the mechanism of fixation to the tube – I fixed the mirror to the required angle with duct tape.

An elastic t-shirt makes the function of the white screen. I made a plastic structure to hold the t-shirt. I used four clothespins to hang it. As it is an elastic t-shirt I could stretch it to minimize creases, thus the projected image quality would be better.



**Figure 15.** Mechanism to see the sample with reflection of light, where: 1. Mirror; 2. Screen.

The results after doing the mechanism of the reflection of light were very satisfactory as the image projected to the white screen had a great clarity. I realized that this mechanism was much more efficient than the mechanism made with the webcam. Although I am conscious of the disadvantages that it has. As I said before, we cannot record or see the images on the computer.

But what really matters of this tool is to trap particles and cells in suspension, and the optical tweezers I have made can develop this function.

## **CAPÍTOL III**

### **CÀLCUL DE LES FORCES QUE EXPERIMENTEN LES PARTÍCULES**

## 1.-PRESENTACIÓ I OBJECTIUS

Les força que exerceix el feix de llum làser adientment enfocat sobre la partícula esdevé el principi bàsic de funcionament de les pinces òptiques. Sense aquesta interacció entre la llum i la matèria no seria possible l'atrapament òptic. Gràcies a les fórmules presentades al primer capítol d'aquest treball\*, podem calcular i quantificar les forces que és capaç d'exercir el meu exemplar de pinces òptiques.

Recordem que el rang de valors en el que treballen és de l'ordre de 1-100 piconewtons (pN). Una força compresa entre aquests valors garantirà l'atrapament òptic, mentre que una inferior no serà capaç de dur a terme la funció i una superior podria danyar la partícula amb la què tractem. D'aquesta manera, segons els resultats obtinguts, podrem saber la utilitat, la funcionalitat, el tipus de partícules que podrà atrapar depenent del seu diàmetre i amb quines no podrà operar. Així doncs, podem afirmar que amb els càlculs i els resultats obtinguts veurem on es situa el límit i l'abast de les pinces òptiques construïdes. En conseqüència, denotarem també els punts o els factors en els quals es podria millorar.

Esdevindrà convenient dur a terme els càlculs de forces relacionats amb les meves pinces òptiques, però paral·lelament aplicar-los també per a unes pinces òptiques de laboratori. Serà així com també podrem advertir les diferències o semblances, pel que fa a les forces, existents entre una i altra.

Cal treballar en els dos règims existents\*, el règim de raigs òptics i en el de Rayleigh o de camps òptics, així serà possible conèixer el rang de mides amb el que pot operar les pinces òptiques construïdes. Per al primer règim, suposarem l'ús de partícules de poliestirè de diàmetre 20 $\mu$ m. Pel segon, farem ús de partícules de diàmetre òbviament més petit que el de la longitud d'ona del làser, per tant, aquestes seran de 400 nm de diàmetre.

---

\* vegeu pàgines 15-16- 17 ,Capítol I: apartats 3.2 i 3.3.

## 2.- HIPÒTESI

Els resultats que s'esperen obtenir són els que aparentment semblen lògics. Degut als recursos i les limitacions que presenten els materials emprats, sembla evident pensar que aquest muntatge de pinces òptiques permetrà atrapar partícules amb un diàmetre més gran que la longitud d'ona. Molt més difícil és creure que siguin capaces d'atrapar partícules amb diàmetre més petit que la longitud d'ona. Aquestes intuïcions són a simple vista, ja que les limitacions existents són visibles, sobretot pel que fa a l'ús d'un làser poc sofisticat.

En aquest cas, podríem afirmar que tan sols engloba el règim de raigs òptics i no el règim de Rayleigh o de camps òptics. Els càlculs, però, ens revelaran si aquesta hipòtesi és certa o no.

## 3.- PRESENTACIÓ DE DADES I CÀLCULS

### 3.1- RÈGIM DE RAIGS ÒPTICS

Per a dur a terme els càlculs d'aquest règim caldrà utilitzar i aplicar la fórmula explicada al primer capítol. Emprarem partícules de poliestirè de 20  $\mu\text{m}$  de diàmetre, que no ha estat triat a l'atzar, sinó perquè per a aquest tipus de partícules W.H. Wright [8] i el seu grup van calcular el valor del factor adimensional  $Q$ .

Sabent que  $n_{H_2O} = 1,33$  ;  $P_{\text{làser}} = 20 \text{ mW}$  ;  $Q = 0,132$  i  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , la força que exercirà la pinça òptica sobre la partícula serà:

$$F = Q \frac{nP}{c} = 0,132 \cdot \frac{1,33 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^8} = 1,1704 \cdot 10^{-11} \text{ N} = 11,704 \text{ pN}$$

Per a calcular la força que exerciran sobre aquesta mateixa partícula unes pinces òptiques de laboratori, tan sols variarà  $P_{\text{làser}} = 150 \text{ mW}$ , així:



$$F = Q \frac{nP}{c} = 0,132 \cdot \frac{1,33 \cdot 150 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^8} = 8,778 \cdot 10^{-11} \text{ N} = 87,78 \text{ pN}$$

Els resultats obtinguts ens permeten verificar que la força que exerceixen les pinces òptiques construïdes sobre una partícula de diàmetre més gran que la longitud d'ona, és de l'ordre de piconewtons. A més el resultat es troba entre 1 i 100 pN, en conseqüència, podem deduir que el muntatge serà capaç d'atrapar partícules satisfactòriament dins d'aquest rang.

També apreciem la notable diferència existent entre la força que exerceix un exemplar de pinces òptiques de laboratori i la que proporciona les construïdes, entre set i vuit vegades més gran una respecte a l'altra.

### 3.2- RÈGIM DE CAMPS ÒPTICS O RÈGIM DE RAYLEIGH

La condició indispensable per a entendre correctament aquest règim recau en el fet que el diàmetre de les partícules és notablement més petit que el de la longitud d'ona del làser. Així doncs, imaginem una partícula amb un diàmetre de 400 nm. Les fórmules a aplicar són les corresponents a la *força de dispersió* i la *força de gradient*.

Sabent que  $n_{\text{partícula}} = 1,50$ ;  $n_{\text{medi}} = 1,33$ ;  $I_0 = 1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  i  $\lambda = 650 \text{ nm}$ , la força de dispersió que experimenta la partícula serà:

(1)

$$F_{\text{dispersió}} = \frac{I_0 \sigma n_m}{c},$$

on primer caldrà calcular  $\sigma$ ,

(2)

$$\sigma = \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 = \frac{128\pi^5 (200 \cdot 10^{-9})^6}{3(650 \cdot 10^{-9})^4} \left( \frac{(1,50/1,33)^2 - 1}{(1,50/1,33)^2 + 2} \right)^2 = 3,235 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$$

si substituïm el valor de  $\sigma$  a la fórmula (1):

$$F_{dispersió} = \frac{1,23,235 \cdot 10^{-14} \cdot 1,33}{3 \cdot 10^8} = 1,721 \cdot 10^{-22} \text{ N} = 1,721 \cdot 10^{-10} \text{ pN}$$

Per altra banda, la força de gradient que experimentarà la partícula vindrà determinada segons

(3)

$$F_{gradient} = \frac{2\pi\alpha}{cn_m^2} \nabla I_0$$

Podem observar que en aquesta relació apareix el gradient de la intensitat del làser. Degut a la simplicitat dels materials i en concret del làser emprat, el càlcul d'aquest gradient no està a l'abast. D'aquesta manera, la força de gradient no la podrem calcular. De totes maneres, el resultat obtingut de la força de dispersió ens fa pensar en la inutilitat de les pinces òptiques construïdes per a atrapar partícules amb diàmetre més petit que la longitud d'ona.

El valor d'aquesta força de dispersió ha estat insuficient per a garantir l'atrapament òptic. Per aquest motiu, les pinces òptiques emprades per a aquest tipus de necessitats disposen de materials i elements molt sofisticats, utilitzant làsers molt potents, capaços de concentrar una gran quantitat d'intensitat en una superfície molt petita.

## **CAPÍTOL IV**

### **RESULTATS I CONCLUSIONS**

## RESULTATS

Em sento molt satisfet després d'haver dut a terme el procés de disseny i construcció de les pinces òptiques. El treball previ esdevé essencial. La clau per a entendre el projecte correctament és l'adient elecció dels materials en relació a la funció que faran i el disseny bàsic. He hagut de tenir presents tots aquests aspectes durant tot el procés de construcció. És també molt important pensar en tot moment en possibles millores.

El disseny del mecanisme per a veure les mostres ha estat molt important i es tracta d'una tasca decisiva perquè esdevé essencial poder veure les mostres que hem d'analitzar. És important considerar dues opcions. La idea és dissenyar diferents mecanismes, així, si un no funciona sempre podem recórrer a l'altre. A més, cal conèixer els avantatges i els inconvenients d'ambdós per saber les possibilitats i les limitacions amb les que treballem. En aquest cas, he verificat la necessitat d'utilitzar el mecanisme de reflexió de la llum, ja que el de càmera web no funcionava correctament.

Un altre aspecte important que requereix esment és l'ideal de reducció de costos. Puc afirmar que és possible construir unes pinces òptiques amb materials reciclats. No he hagut de comprar cap material. Per a mi, és un dels principals objectius d'aquest projecte perquè volia demostrar que era possible construir unes pinces òptiques amb materials reciclats. Aquest fet el considero molt significatiu, perquè les pinces tenen una disponibilitat molt baixa degut al seu elevat preu. Un dels principals avantatges que ens proporcionen respecte a les de laboratori és la seva portabilitat, ja que totes les parts que les constitueixen són individuals i es poden transportar fàcilment.

El resultat obtingut han estat unes pinces òptiques capaces de capturar partícules amb un diàmetre més gran que la longitud d'ona, per tant, només és aplicable el règim de raigs òptics. En aquest cas, degut a les limitacions imposades pels materials i recursos amb els que es disposen, no seran capaces d'atrapar partícules amb un diàmetre més petit que la longitud d'ona. En conseqüència, no podem dir que hagi obtingut un exemplar capaç de competir o millorar amb els que posseeixen al laboratori, però sí per a cobrir la funció primordial.

## CONCLUSIONS

Amb aquest treball he verificat que es pot donar forma a les idees que un es proposi. En el meu cas, vaig plantejar-me una pregunta que em semblava molt interessant i alhora ambiciosa: puc construir unes pinces òptiques amb materials reciclats? Després de tot el procés puc afirmar satisfactòriament que sí; sí és possible construir aquesta potent eina de micromanipulació amb materials reciclats.

A nivell personal, aquest projecte m'ha servit per a aprofundir i adquirir nous coneixements sobre la llum i en concret de les pinces òptiques. Ja que es tracta d'una eina molt específica, he hagut de buscar informació en articles científics en anglès. A més, el procés de construcció m'ha ajudat a fomentar la creativitat i el constant pensament en possibles millores.

Per altra banda, m'hagués agradat poder treballar amb partícules i dur a terme un experiment amb elles, però ha estat impossible tenir accés a aquest tipus de material tan específic. En un futur, m'agradaria poder disposar d'aquestes partícules i constatar jo mateix el correcte funcionament del muntatge de pinces òptiques.

Amb aquesta recerca, he demostrat que no és necessari disposar de gran recursos per a dur a terme eines científiques que semblen pràcticament inabastables. Òbviament no poden substituir unes de laboratori, però sí que poden dur a terme la funció principal de les pinces òptiques. Aquest fet planteja un dels grans inconvenients de la ciència: la poca accessibilitat per a totes les persones. Quan afirmo això no parlo de coneixements, sinó de recursos. Penso que és molt important dedicar una part de la ciència en aquest àmbit de progrés pels que posseeixen menys recursos. La ciència hauria de ser accessible per a tothom.

## BIBLIOGRAFIA

[1] RICARDEZ V., OROZCO E., HERNÁNDEZ J., *Pinzas ópticas, una herramienta eficaz para micromanipulación*, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 7200 Puebla, Pue. México, FARAUTE Ciens. y Tec., 3(1): 25-30,2008.

- Per a la física de les pinces òptiques (Apartats 3.1 i 3.2).

[2] VOLPE, Giovanni, *Pinzas ópticas: la luz que atrapa*, Optics & Photonics Focus.

- Per a la definició del concepte (Apartat 1).

[3] ASHKIN, Arthur, *History of Optical Trapping and Manipulation of Small-Neutral Particle, Atoms, and Molecules*, Life Fellow IEEE, 2000, pp.841-852.

- Per a la física de les pinces òptiques (Capítol I: Apartat 3.1).

- Per a les aplicacions en Biologia, Física i Química (Capítol I: Apartats 5.1 i 5.2).

[4] NEUMAN, Keir, BLOCK, Steven, *Optical trapping*, Review of Scientific Instruments, Stanford (California), September 2004, pp.2788-2789.

- Per a les fórmules expressades en el règim de camps òptics o de Rayleigh (Capítol I: Apartat 3.3).

[5] BERNS, Michael, "Tijeras y pinzas de láser", *Temas 60. Investigación y ciencia*, nº60, 1998, pp.66-71.

- Per a la física de les pinces òptiques i les aplicacions en el camp de la Biologia (Capítol I: Apartat 3.1 i 5.1)

[6] PETROV Dmitri, *Institut de Ciències Fotòniques (ICFO)*, 2004, <http://www.icfo.es/> (Consulta 18-9-2011)

- Per a les aplicacions en el camp de la Biologia i la recerca actual (Capítol I: Apartat 5.1 i 5.4)

[7] WILLIAMS, Mark, *Optical Tweezers: Measuring Piconewton Forces*, Northeastern University (Boston), 2010, p.1.

- Per a l'obtenció del rang de valors del càlcul de les forces (Capítol I: Apartat 3.5)

[8] SVOBODA, Karel i BLOCK, Steven, *Biological applications of optical forces*, Ann. Rev. Biophys. Biomol. Struct.,23, 1994, pp.266-267.

- Per a l'elaboració dels càlculs que experimenten les partícules (Capítol II: Apartat 3.1 i 3.2)

[9] CHU, Steven, “Trampa de láser para partículas neutras”, *Temas 60. Investigación y ciencia*, 1992, pp.34-37.

- *Per a les aplicacions en Física atòmica (Capítol I: Apartat 5.3)*

**ANNEX**

**GALERIA FOTOGRÀFICA\***

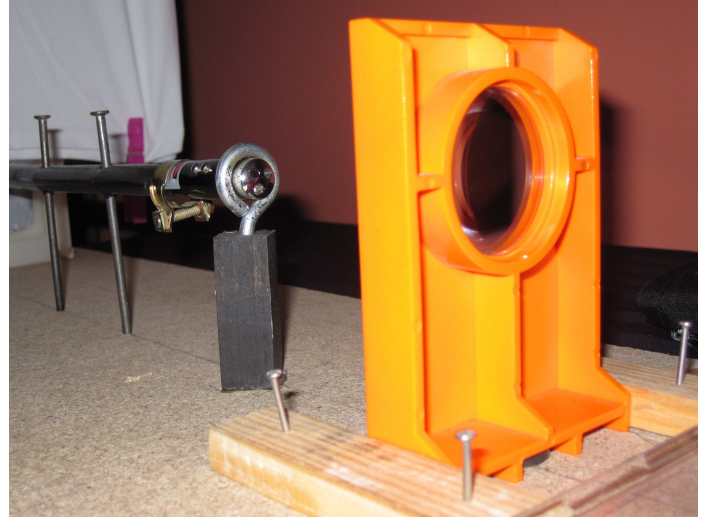
---

*\* Imatges de font pròpia.*





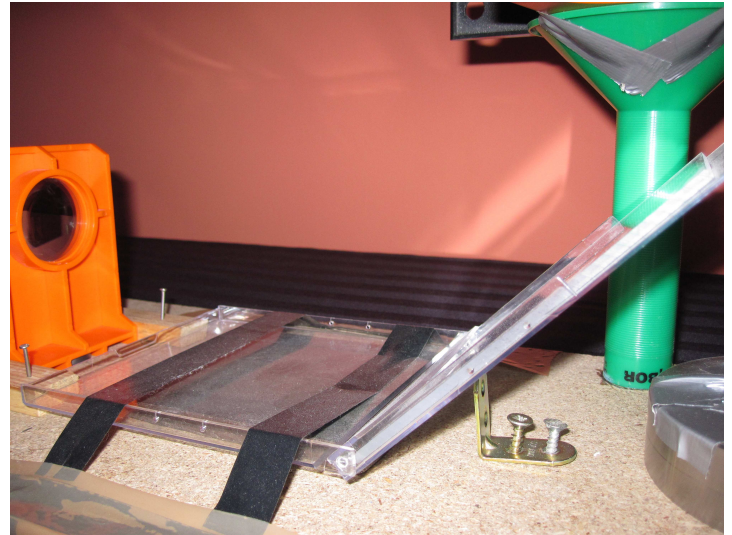
**ESTRUCTURA DEL LÀSER**



**ESTRUCTURA DEL LÀSER I  
LENT**

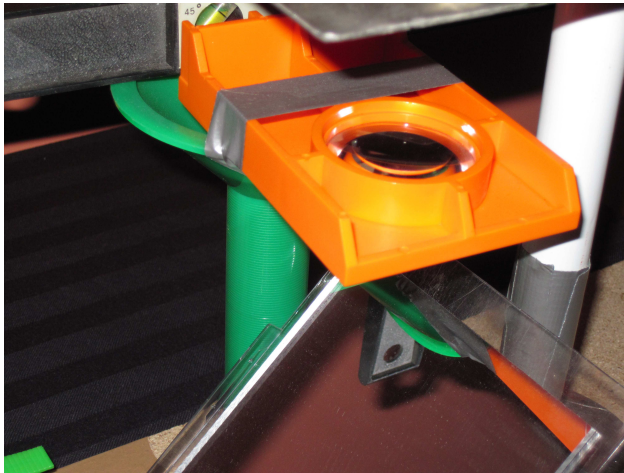


**MIRALL I PERFIL DE LA LENT**

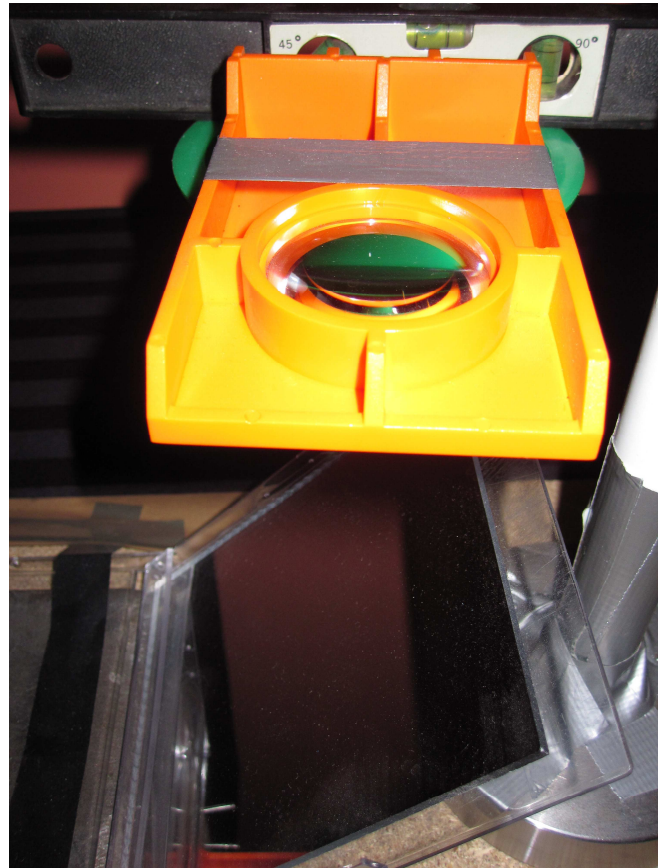


**PERFIL DEL MIRALL**





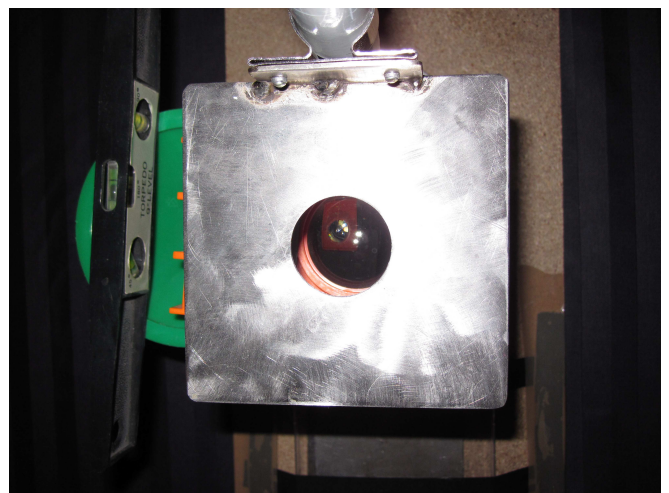
**LENT (I)**



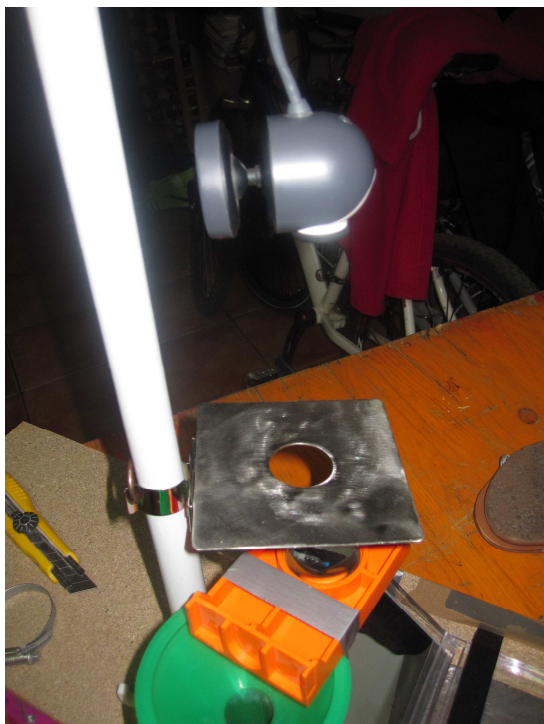
**LENT (II)**



**PORTA MOSTRES**



**PLANTA DEL PORTA  
MOSTRES**



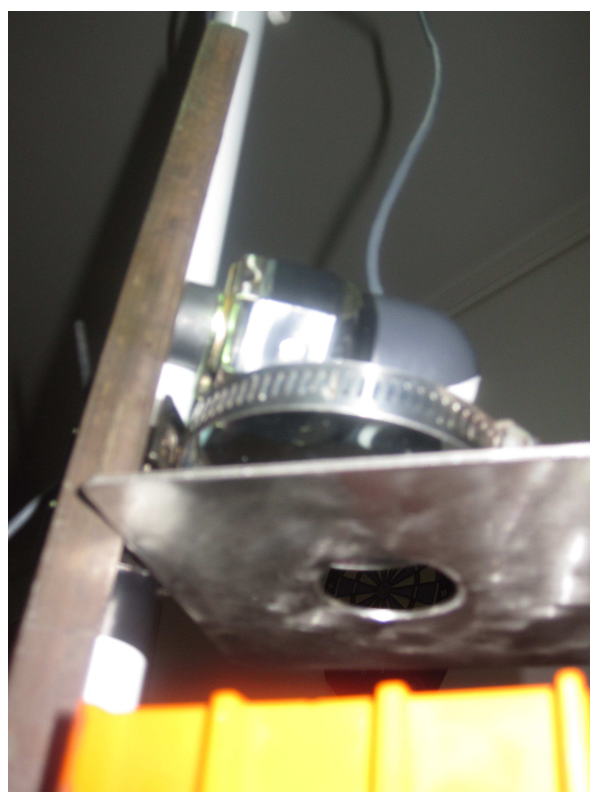
**PRIMERES PROVES AMB  
CÀMERA WEB (I)**



**PRIMERES PROVES AMB  
CÀMERA WEB (II)**

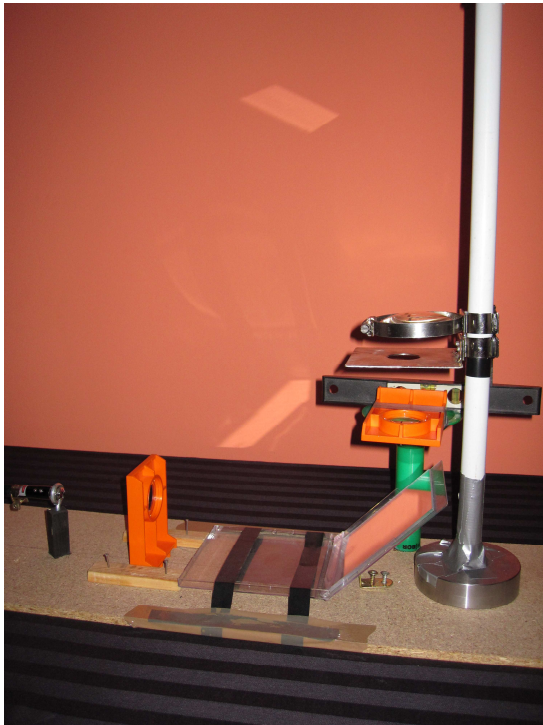


**DISSENY DEL  
MECANISME AMB  
CÀMERA WEB (I)**

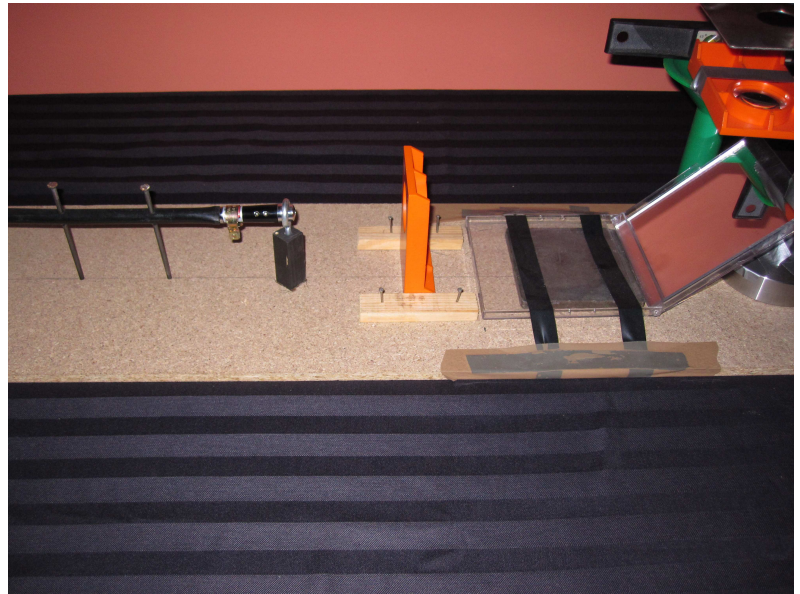


**DISSENY DEL  
MECANISME AMB  
CÀMERA WEB (II)**

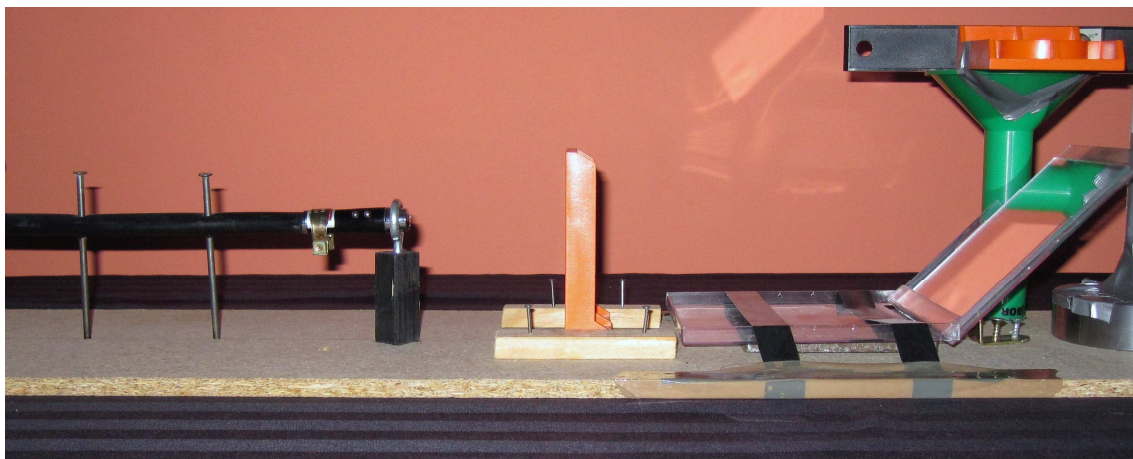




**DISSENY BÀSIC (I)**



**DISSENY BÀSIC (II)**



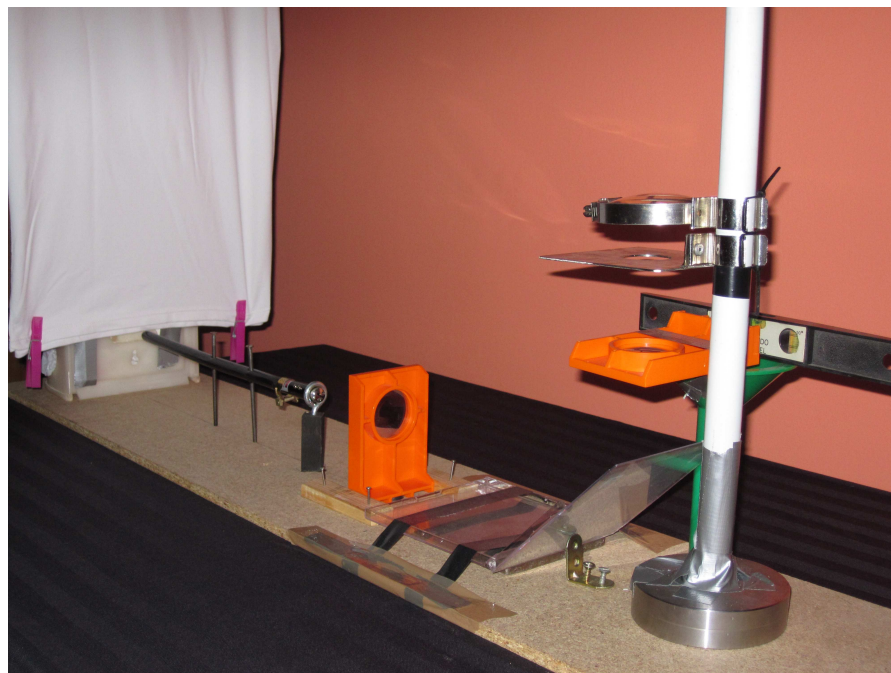
**ELEMENTS DEL SUPORT  
HORIZONTA**



**SISTEMA DE MOBILITAT**



**ELEMENTS DEL SUPORT VERTICAL**



**PINCES ÒPTIQUES FINALS (I)**





**PINCES OPTIQUES  
FINALS (II)**



**PINCES OPTIQUES  
FINALS (III)**



**PINCES OPTIQUES  
FINALS (IV)**



**PINCES OPTIQUES  
FINALS (V)**