

EL REFRACTÒMETRE D'ABBE, UNA EINA IMPORTANT EN LA RECERCA I EN LA INDÚSTRIA. ESTUDI D'UN EXEMPLAR DE PRINCIPIS DEL SEGLE XX

SANTIAGO VALLMITJANA RICO

LABORATORI D'ÒPTICA, DEPARTAMENT DE FÍSICA APLICADA I ÒPTICA,
UNIVERSITAT DE BARCELONA.

santi.vallmitjana@ub.edu

Paraules clau: *refractòmetre d'Abbe, mesura de l'índex de refracció, instruments científics*

The Abbe refractometer. An important tool in the research and in the industry. Study of an example from the beginning of the xxth century

Summary: Along the xixth century there were great advances in the astronomy and the microscopy fields thanks to the improvements in the image quality obtained through the objectives of the telescopes and microscopes. This improvement was accomplished by the suitable combination of lenses with different refraction index reaching the correction of optical aberrations. In all this process it was essential to measure with precision the refraction index. Ernst Abbe in 1872 design his first model of refractometer based on the measure of the limit angle. The great advantage of his instrument was the simplicity of the design, the compactness, the good precision and the reduced size which was able to be a portable device. In this work a description, a study and analysis, including measurements, of an Abbe refractometer from the beginning of the xxth century are made.

Key words: *Abbe refractometer, measurement of the refraction index, scientific instruments*

1. Introducció

Al llarg del segle XIX es desenvolupen grans avenços en el camp de l'astronomia i de la microscòpia gràcies a les millores en la qualitat de les imatges obtingudes a través dels objectius de telescopis i de microscopis. Aquest guany es va aconseguir per l'adequada agrupació de conjunts de lents amb diferent índex de refracció i diferent distància focal, amb la qual cosa s'obtenia la correcció d'aberracions òptiques, principalment l'esfèrica i la cromàtica.

En tot aquest procés va ser fonamental l'aparició de vidres amb composicions noves (i diferents índexs de refracció) conjuntament amb els avenços en els càlculs matemàtics associats a l'òptica geomètrica. La mesura de l'índex de refracció es feia a través de mesures angulars, que tenien una bona precisió, però exigien una gran cura en la posada en estació dels goniòmetres, en les mesures i en els càlculs posteriors.

El 1872 Ernst Abbe, que s'ha associat amb Carl Zeiss uns anys abans, fabrica el primer refractòmetre basat en la mesura de l'angle límit, que anirà millorant durant les dècades següents. El gran avantatge de l'aparell es concreta en què era precís, senzill i portàtil.

En aquesta comunicació es fa la descripció, estudi i anàlisi, incloent la precisió de les mesures, d'un refractòmetre d'Abbe de principis del segle XX, de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona.

2. Limitacions en la qualitat de la imatge òptica en els instruments òptics

Al voltant de l'última dècada del segle XVI i als inicis del segle XVII es marca una importantíssima fita en la història de la ciència i de la tècnica amb la invenció del microscopi i del telescopi. Malgrat uns avenços notables i espectaculars inicials, conseqüència lògica de la novetat, ja es va constatant que, a mesura que es muntaven combinacions de lents amb augments majors, la qualitat de la imatge no millorava i fins i tot minvava, de manera que apareix un clar límit en les possibilitats a descobrir.

Aquestes limitacions eren degudes al fet que en augmentar les capacitats teòriques dels instruments, també augmentaven les aberracions òptiques. Per causa de les aberracions òptiques, la imatge d'un punt objecte deixa de ser puntual i passa a ser una taca, o bé la imatge de dos punts pròxims queda en un punt difós, i provoca una pèrdua de qualitat i de resolució.

Un bon exemple de com aquestes limitacions de qualitat podien conduir a resultats erronis, el podem trobar si s'analitza la història del descobriment del planeta Saturn, en què inicialment Galileu, el 1610, després Gassendi, el 1641, i Hevelius, el 1656, descriuen formes en la seva perifèria que identifiquen com a satèl·lits, perquè la feble qualitat d'imatge deformava l'estructura de l'anell (Arcimis, 1901: 360-361).

Les aberracions òptiques més decisives en la pèrdua de qualitat són bàsicament l'aberració cromàtica i l'aberració esfèrica. Les dues es manifesten amb més amplitud a mesura que s'augmenta l'obertura relativa dels objectius, factor important que, per altra banda, es desitja per augmentar la quantitat de llum que entra en l'instrument.

Si s'examinen els avenços en astronomia i en biologia, a part dels descobriments inicials, es troba un estancament a finals del segle XVII i meitat del XVIII per les limitacions dels instruments òptics degudes a les esmentades aberracions òptiques. Les correccions de les aberracions comencen passada la meitat del segle XVIII, i van millorant al llarg de tot el segle següent.

3. La correcció dels objectius

3.1. L'índex de refracció i l'índex de dispersió

L'òptica geomètrica es basa en les lleis de la reflexió i de la refracció. L'índex de refracció d'un medi es defineix com la relació entre la velocitat de la llum en el buit i la velocitat de la llum en el medi. Quan la llum canvia de medi, es desvia segons la llei de la refracció, enunciada el 1621 per Willebrod Snellius (1591-1625) i més tard publicada, el 1637-38, a *Dioptrica* per René Descartes (1596-1650).

Tal com Newton va demostrar el 1666 amb la descomposició de la llum en un prisma, l'índex n depèn del color o longitud d'ona. Aquesta petita diferència en l'índex de refracció per les diferents longituds d'ona de l'espectre visible fa que les lents focalitzin en diferent lloc els diferents colors, cosa que provoca l'aberració cromàtica.

Per quantificar aquest fenomen es defineix un paràmetre molt important que dóna compte del grau de descomposició (pròpiament dispersió) anomenat índex de dispersió o nombre d'Abbe d'un medi com:

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

On n_d , n_F , n_C són valors de l'índex de refracció de l'esmentat medi (normalment un vidre) per tres valors de la longitud d'ona diferents, corresponents, respectivament, a la part groga 587,6 nm, vermella 656,3 nm i blava 486,1 nm de l'espectre (Hecht & Zajak, 1986). El nombre d'Abbe permet classificar els vidres en dos grans grups: els poc dispersius o *crown*, amb un valor major que 50, i els més dispersius o *flint*, amb valor menor que 50.

3.2. La mesura de l'índex de refracció

La mesura de l'índex de refracció es feia sempre indirectament, a través de mesures angulars, dels angles d'incidència i de refracció, i per la llei de la refracció. Altres mètodes es basaven en mesurar els diferents angles de desviació a través d'un prisma, en condicions de mínima desviació. Per tant, calien bons goniòmetres o teodolits, i el procés era lent, cosa que exigia una gran cura en la posada en estació dels goniòmetres, en les mesures i en els càlculs posteriors.

Entre les mesures basades en la llei de la refracció hi ha un cas particular, que és a partir de la mesura de l'angle límit, que és la base del funcionament del refractòmetre d'Abbe, tal com es descriu posteriorment.

3.3. La correcció dels objectius en telescopis i microscopis

L'aberració cromàtica és la que més afecta la qualitat de les imatges dels objectius dels telescopis. La correcció es fa mitjançant un doblet (en context òptic, la paraula *doblet* indica una combinació de dues lents) que compleix:

$$f_1 v_{a1} + f_2 v_{a2} = 0 \quad \text{i les focals:} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

On f_1 i f_2 són les focals de les dues lents del doblet, de focal equivalent total f . Les dues equacions impliquen que una focal sigui positiva i l'altra negativa, que tinguin valors diferents i també que cada component del doblet tingui valors diferents de n_d (un *flint* i un *crown*).

En el cas dels microscopis, la correcció exigeix més càlculs i combinacions més complexes, però també combina lents amb valors de n_d diferents. Es pot fer correcció acromàtica (focalització de manera que hi ha correcció exacta per dues longituds d'ona), o bé apocromàtica (per tres longituds d'ona), o correcció aplanàtica, (amb correcció de curvatura de camp). Com a exemple, un objectiu actual de gamma alta pot arribar a tenir 10 lents (lent, doblet, triplet, doblet i doblet).

En conclusió, el coneixement i mesura de l'índex del vidre era fonamental i va ser molt important per poder produir vidres amb un ampli rang de valors de l'índex de dispersió.

3.4. Evolució en la correcció dels objectius

El primer d'afrontar la correcció cromàtica per a ulleres astronòmiques és Chester Moor Hall (1703-1771), que el 1733 descriu el problema i fabrica un objectiu acromàtic de dues lents. Més tard, el 1758, John Dollond (1706-1761) patenta el doblet acromàtic per a telescopi. A partir d'aquest moment i al llarg del tot el segle XIX, s'inicia tota una nissaga de grans telescopis refractors, que podríem dir que comença amb els primers telescopis fets per Fraunhofer al voltant de 1812, culminant en els telescopis refractors més grans del món (encara que aquí no considerem els telescopis reflectors, que aconseguen major diàmetre en no estar afectats per l'aberració cromàtica), el de Lick (San José, Califòrnia), amb doblet acromàtic de 91 cm d'obertura i 18,3 m de focal, el 1888, i el de Yerkes (Chicago), amb objectiu de 101 cm, focal de 18 m, acabat el 1897 (Asimov, 1975).

En el cas dels objectius dels microscopis, a causa de la major complexitat per ser de diàmetres i focals molt menors, les combinacions de lents per corregir arriben més tard. El 1759, Benjamin Martin presenta treballs teòrics per acromatitzar, i s'aconsegueixen els primers resultats, bastant mediocres, el 1791. El 1811, Fraunhofer realitza proves i després, el 1823, també ho fa Selligie, que treballa per al fabricant francès de microscopis Chevalier, fa *crown* biconvex i *flint* bicòncav. El 1827, Giovanni Battista Amici (1786-1863) fa un objectiu de 6 lents i experimenta amb objectius d'immersió en aigua el 1855. Entre els construc-

tors anglesos, Andrew Ross (1831), Hugh Powell (1834) i James Smith (1839), presenten objectius corregits. La culminació d'aquesta etapa, la podem fixar quan el 1873 Ernst Abbe dissenya l'objectiu apocromàtic (Bradbury, 1968).

A partir d'aquest moment, s'ha arribat al límit. No és una limitació tecnològica, sinó una limitació per les lleis naturals, a causa de la naturalesa ondulatoria de la llum, és a dir, la limitació per difracció. Aquesta qüestió no es resoldrà fins que es proposa un canvi en la longitud d'ona, que donarà pas, el 1938, al naixement del microscopi electrònic.

3.5. *La important activitat d'Abbe*

Ernst Abbe (Eisenach, 23-01-1840-Jena, 14-01-1905) va estudiar a la Universitat de Jena, on es va doctorar el 1861 amb un treball sobre termodinàmica, i el 1863 ja és contractat com a professor en la mateixa universitat. El 1866 pren contacte amb l'industrial Carl Zeiss i entra a la seva empresa per dirigir la secció d'òptica. Conscient de la necessitat d'experimentar amb lents de diferents característiques (índex de refracció i dispersió), contacta amb el fabricant de vidre Otto Schott. La relació fructífera d'aquests tres personatges culmina oficialment el 1884, quan funden Glastechnisches Laboratorium (que després seria Jenaer Glasswerk), on poden fabricar vidres de gran qualitat amb diferents valors de dispersió.

En el camp de la microscòpia, cal ressaltar que el 1868 produeix els primers objectius acromàtics i, més tard, el 1886 es millora amb els objectius apocromàtics. El 1872 fabrica el primer refractòmetre basat en la mesura de l'angle límit, dissenyat tres anys abans, que anirà millorant durant les dècades següents.

4. El refractòmetre d'Abbe

4.1. *Base del funcionament*

El refractòmetre d'Abbe es basa en el fenomen de la reflexió total, que es produeix quan la llum passa d'un medi d'índex major a un altre de menor, amb una incidència major que el valor de l'angle límit. L'angle límit α_1 depèn dels índexs de refracció de la mostra n , i de l'altre medi n_v que correspon al portamostres de l'aparell, segons: $\sin \alpha_1 = n/n_v$; $n < n_v$.

En el portamostres del refractòmetre, la llum entra formant tots els possibles angles. A partir d'un cert valor, que és l'angle límit, hi ha reflexió total i la llum entra en un ocular, on s'observa una zona clara (per la llum reflectida) i una zona fosca (sense llum), tal com es veu en la figura 1. Si l'índex és baix, l'angle límit és menor, mentre que si és alt, el corresponent angle límit és major, com es mostra en la figura 2.

Mitjançant el moviment del conjunt, es posiciona (figura 3) fins que es veu la zona que separa la part clara i fosca centrada. En el moviment del conjunt, una part que consta d'una placa amb una ratlla que fa d'índex llisca sobre un semicercle graduat fix, on es registra directament el valor de l'índex.

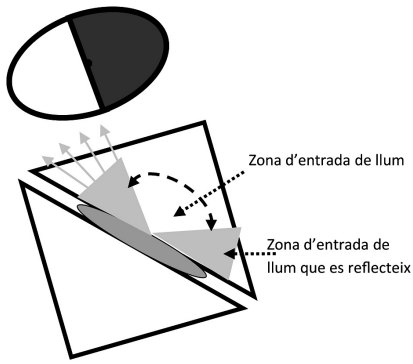


Figura 1. Reflexió total cap a l'ocular.

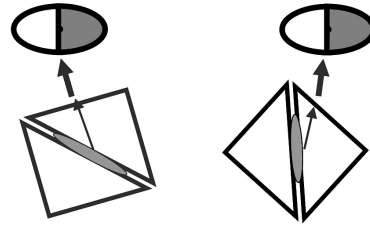


Figura 2. Angle límit menor i major.

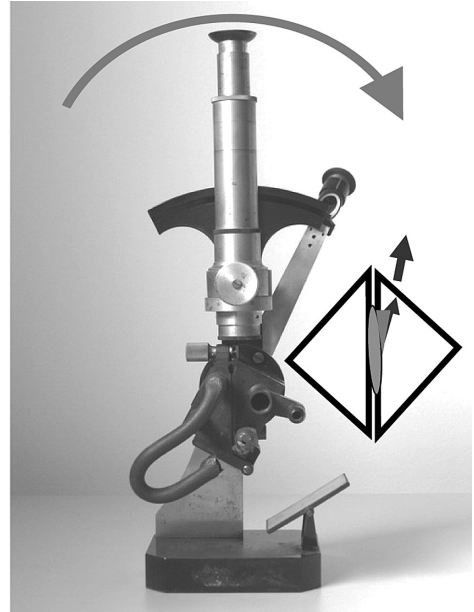
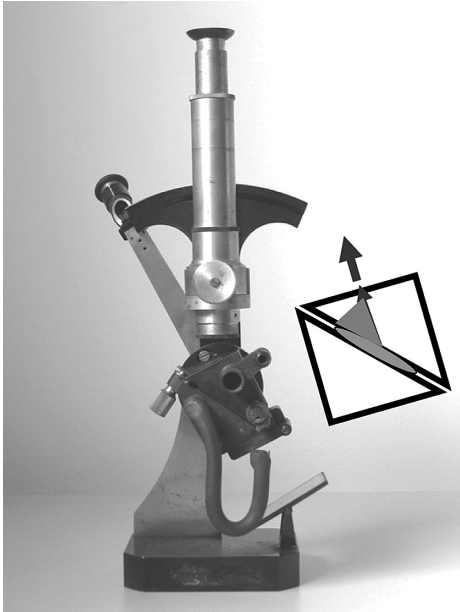


Figura 3. Posicionament en dos casos: índex baix, angle límit menor; índex alt, angle límit major.

4.2. Descripció i estat

La figura 4 mostra el refractòmetre d'Abbe que pertany a la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona, que té el número de sèrie 4691. Consta d'una base similar a l'estructura d'un microscopi, amb un mirall per dirigir la llum que arriba a un conjunt de dos prismes. El prisma de base té una superfície plana, on es col·loca la mostra a analitzar o una gota, si

es tracta d'un líquid, i el segon prisma, que és mòbil, tapa la mostra. A continuació hi ha un tub amb l'ocular. Tal com s'ha descrit, girant el conjunt del tub i els prismes, s'aconsegueix veure una zona clara-fosca, que enrasa en un reticle en creu, també visible en l'ocular, tal com es veu en la figura 5.



Figura 4. Dues vistes del refractòmetre d'Abbe. Una, amb el termòmetre muntat.

Un cop centrat el canvi fosc-clar en el reticle, es pot veure directament en un cercle graduat la lectura de l'índex de refracció, amb l'ajut d'un petit ocular que actua de lupa, figura 6. L'escala està graduada en un interval de valors entre 1,3 i 1,7, amb subdivisions que poden donar tres xifres decimals. La zona del portamostres té entrada i sortida d'aigua amb un termòmetre, per tal de mantenir-se a temperatura controlada. També té un mecanisme que permet, mitjançant la rotació d'uns altres prismes amb un botó, donar informació de l'índex de dispersió, quan en girar l'esmentat botó s'anul·la la debil irisació que apareix en la línia de separació.

El conjunt es troba en molt bon estat de conservació, a excepció d'una part de la base, en què la pintura s'ha després, i del tub de goma que permet l'entrada d'aigua per a la conservació de la temperatura, que està malmès. Només ha calgut engrèixar la part mòbil per posar-lo en funcionament.

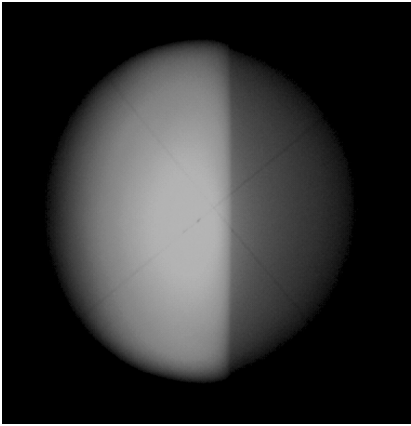


Figura 5. Reticle vist a través de l'ocular.

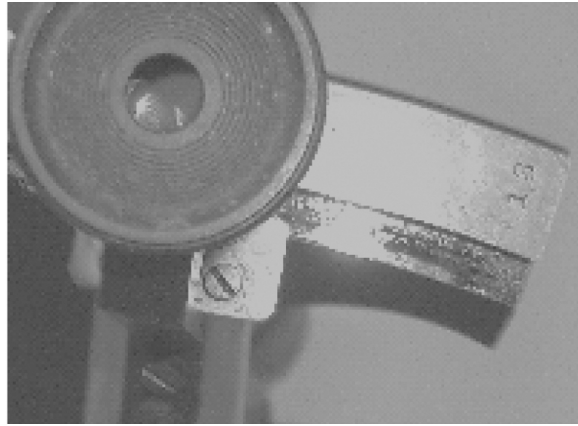


Figura 6. Escala de lectura de l'índex i lupa auxiliar.

4.3. Precisió de les mesures obtingudes amb el refractòmetre

S'han pres mesures de diferents líquids i els valors s'han comparat amb els obtinguts amb un refractòmetre actual. Els tres primers decimals es poden llegir amb exactitud. La quarta xifra cal deduir-la per interpolació entre les divisions corresponents a la xifra anterior.

Resultats de mesures obtingudes a la temperatura de 22°:

Aigua destil·lada:	1,3330
Oli per a objectiu d'immersió:	1,5125

Per comparació s'han mesurat les mateixes mostres amb un refractòmetre actual:

Aigua destil·lada:	1,3329
Oli per a objectiu d'immersió:	1,5126

Com es pot veure, la mesura és molt fiable. La discrepància de l'última xifra no és significativa, ja que, com s'ha dit, és un valor aproximat.

4.4. Datació

Per a la datació, es pot fer una aproximació per l'observació dels detalls estructurals i consultant catàlegs, ja que, progressivament, s'anaven incorporant millores en l'aparell, a mesura que es perfeccionaven els models. Encara no hem pogut accedir a un catàleg real, però es troben algunes referències i extractes de catàlegs a Internet que correlacionen algunes numeracions de sèrie amb els anys de fabricació (<<http://www.humboldt.edu>>, per exemple). En el present cas, l'aparell té clarament marcat el número de sèrie, 4691, i en principi ens diu que l'instrument ha estat fabricat entre l'any 1906 i el 1911.

5. Conclusions

El 1872, Ernst Abbe dissenyà un refractòmetre basat en la dependència de l'angle límit amb l'índex de refracció. El gran avantatge d'aquest refractòmetre es pot concretar en què era un aparell simple de funcionament precís, senzill i de poc pes. Aquesta última característica va fer que fos portàtil, detall de gran importància.

Es tracta d'un aparell que utilitzaren físics, químics, farmacèutics, enginyers, metges i naturalistes, que va mostrar una bona utilitat com a auxiliar per a anàlisi en diferents camps, com en farmàcia, en medicina, en geologia, en indústria, en general com a element per caracteritzar materials. Ha estat aplicat a l'anàlisi de productes com olis, greixos, xocolates, mantegues, essències i altres substàncies d'interès industrial i ha ofert, de vegades, dades fiables sobre la composició quantitativa de mescles de dos cossos (Bertomeu, 2002).

El fet que la concentració de sucre en una dissolució afecti el valor de l'índex de refracció de la mateixa, va fer que el refractòmetre fos d'aplicació important en anàlisis, especialment les clíniques, o per exemple, en la indústria vinícola, en el control de la qualitat del raïm, per conèixer el moment òptim per a la verema, mitjançant el coneixement de la riquesa de sucre. En aquest sentit, fou el precursor dels sacarímetres, aparells especialment construïts per a mesurar la concentració de sucre.

Cal afegir, finalment, que el disseny dels actuals refractòmetres, exceptuant aspectes secundaris, com ara la posició de l'escala de lectura, no ha canviat i manté la mateixa geometria òptica bàsica que, ara fa més de cent trenta anys, Ernst Abbe va projectar.

Bibliografia

ARCIMIS, A. T. (1901), *Astronomía popular*, Barcelona, Montaner y Simón.

ASIMOV, I. (1975), *Historia del telescopio*, Madrid, Alianza.

BERTOMEU SÁNCHEZ, J. R. (2002), «Refractòmetres i interferòmetres». A: BERTOMEU SÁNCHEZ, J. R.; GARCÍA BELMAR, A., *Obrint les caixes negres. Col·lecció d'instruments científics de la Universitat de València*, València, Universitat de València.

BRADBURY, S. (1968), *The microscope. Past and Present*, Londres, Pergamon Press.

HECHT, E.; ZAJAK, A. (1986), *Optica*, Wilmington (EUA), Addison Wesley Iberoamericana.

<<http://www.humboldt.edu/~scimus/Essays/EvolAbbeRef/EvolAbbeRef.htm>>