

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA DE TELECOMUNICACIÓ DE BARCELONA

GRAU D'ENGINYERIA FÍSICA

18 de novembre de 2014

*L'esfera i la llum
des d'Arquimedes a Einstein*

SEBASTIÀ XAMBÓ DESCAMPS

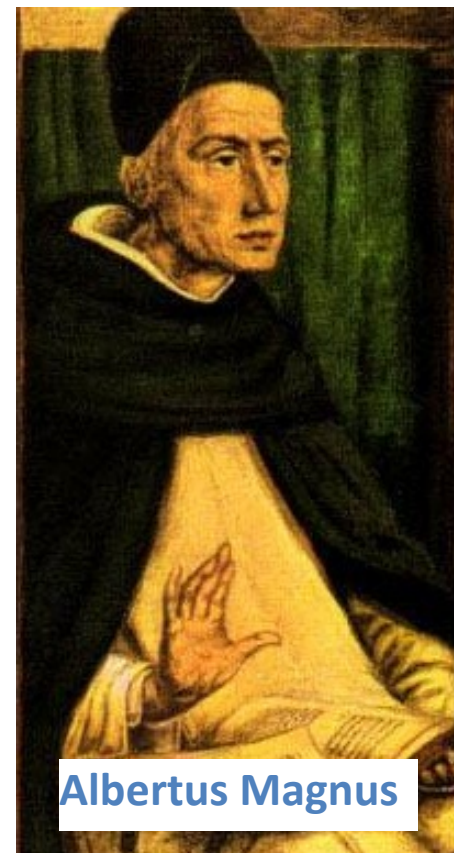
FME Y FIB / MA2



Resum. Després d'unes observacions arran de la contemplació del cel a ull nu, destinades a posar de manifest la profunda i enigmàtica relació entre els fenòmens i el pensament, passarem un moment per la Siracusa del segle -III per assistir a tres moments estel·lars del gran Arquimedes. Tot seguit, en un viatge accelerat de més de vint segles, visitarem uns quants laboratoris per meravellar-nos en comprovar algunes de les subtileses de la llum, i per veure aparèixer un fantàstic nou aspecte de l'esfera. Llavors serà el torn de trucar a les portes d'un tal Albert Einstein. Li preguntarem sobre tres moments estel·lars de la seva relació amb la llum i les esferes. I esperant que ningú s'hagi marejat, reflexionarem un moment sobre alguns fets i expectatives d'ençà d'Einstein. Un viatge que trobareu, perllongat pels estudis i indagacions en què esteu immersos, en la més fascinant de les experiències.

ÍNDEX

- El cel
- La terra
- Eureka!
- De la llum
- Ones electromagnètiques
- Ona i partícula
- Noves esferes
- Cloenda

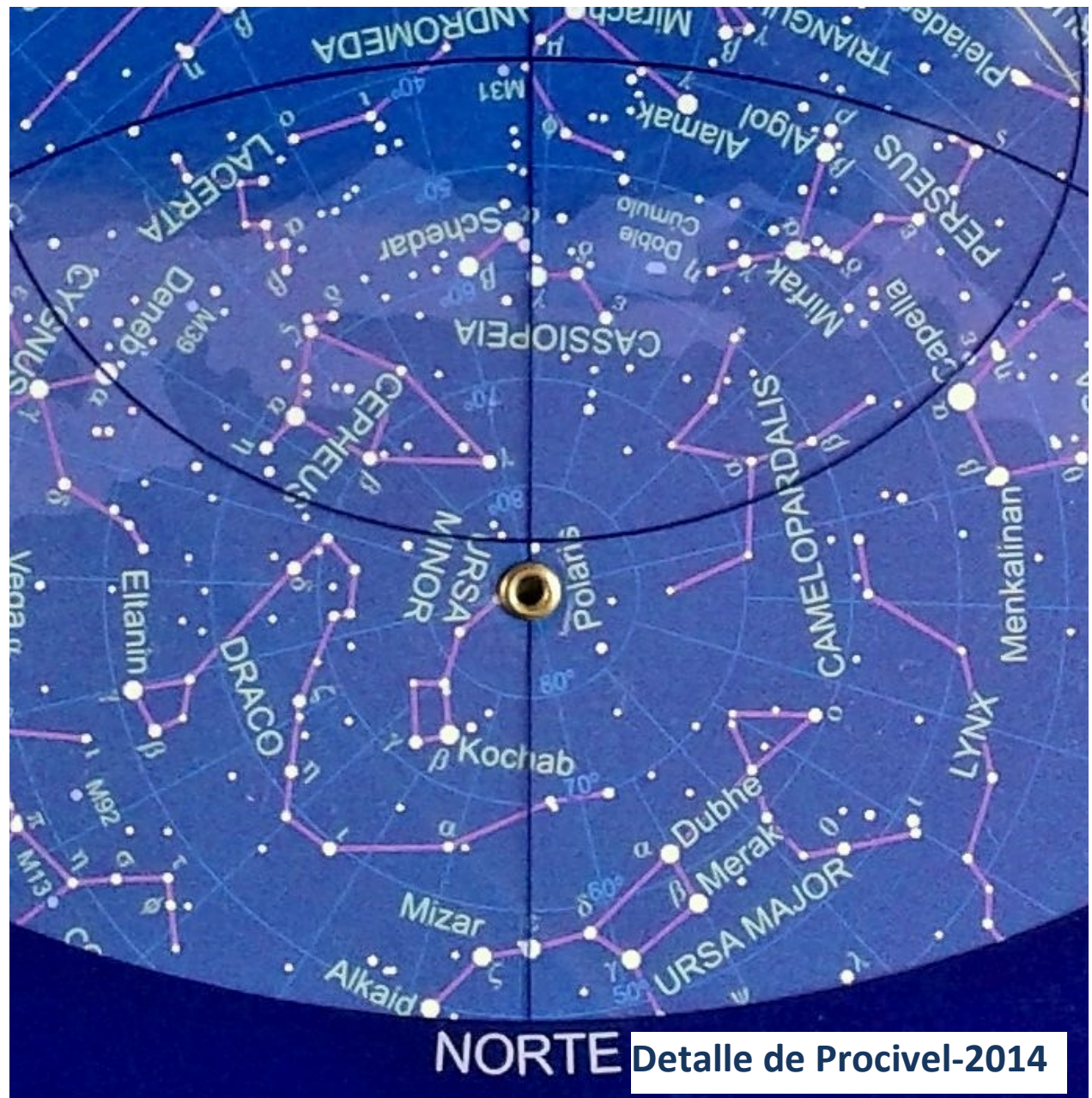


EL CEL

Vista del cel en direcció N des de Barcelona a les 22 h del 18 de novembre (almenys en teoria).

Polaris, a $\approx 42^\circ$ sobre l'horitzó, és l'extrem d'*Ursa Minor* (Um) i està visualment alineada amb ϵ de *Ursa Major* (UM) i λ de Cassiopea. També amb α i β d'UM.

Mizar és doble (Galileu, 1617).

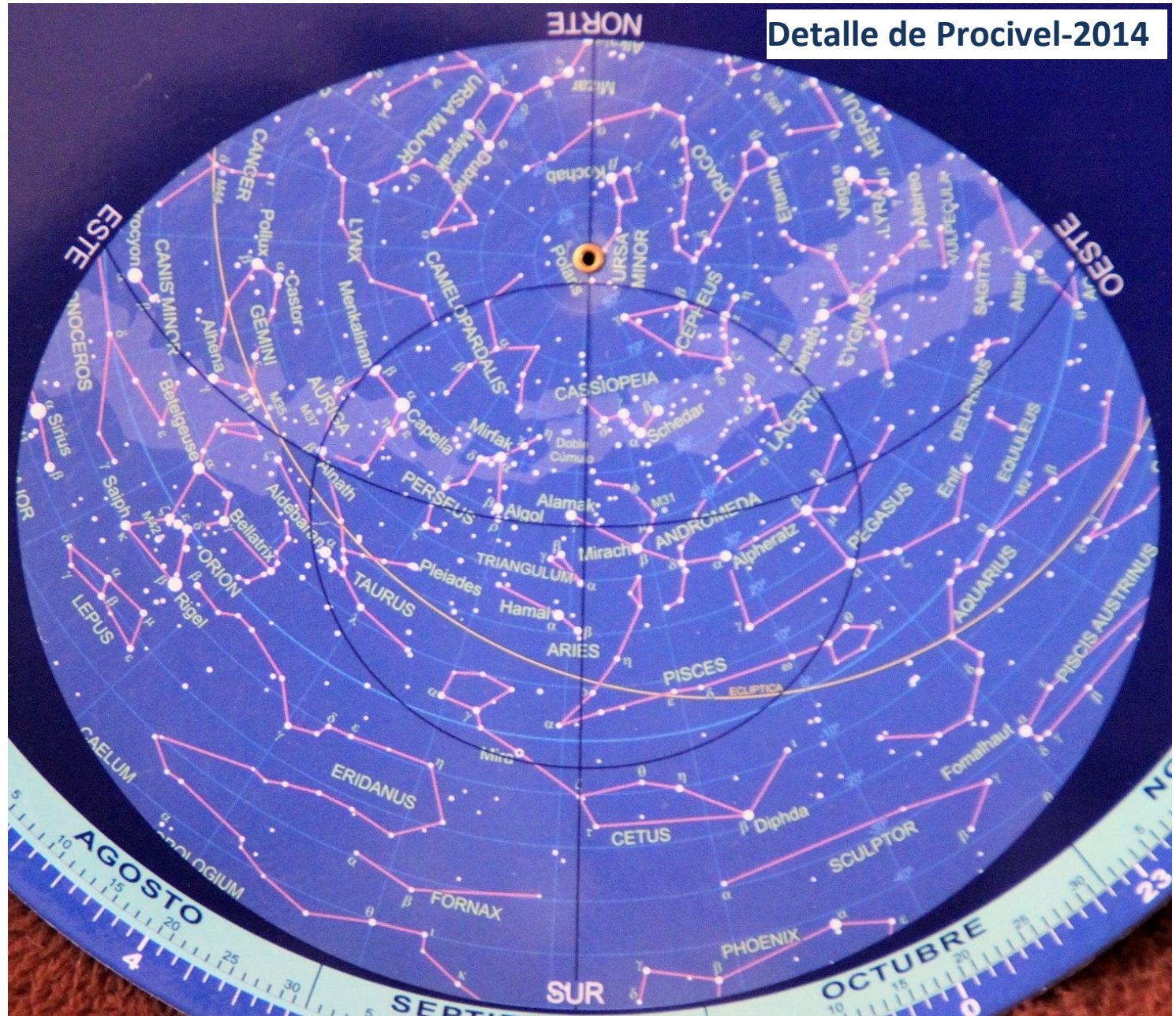


Al cel d'orient Orió, amb el seu cinturó de tres estrelles, i Sirius, l'estrella més brillant del cel (llum blanca).

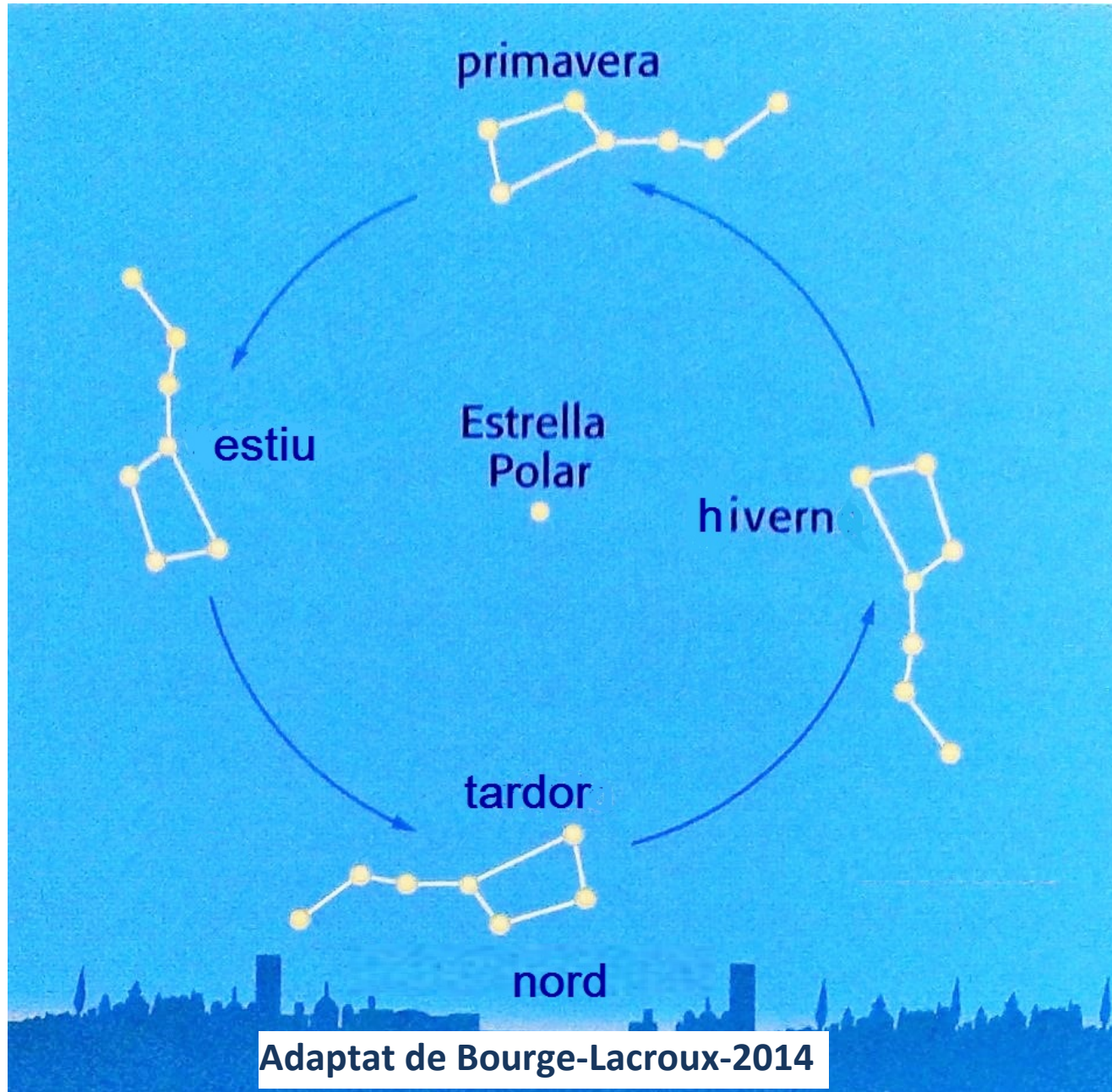
Andròmeda, prop del zenit.

Cygnus, a uns 40° sobre l'horitzó de ponent.

Via Làctea.



Rellotge polar



Adaptat de Bourge-Lacroux-2014

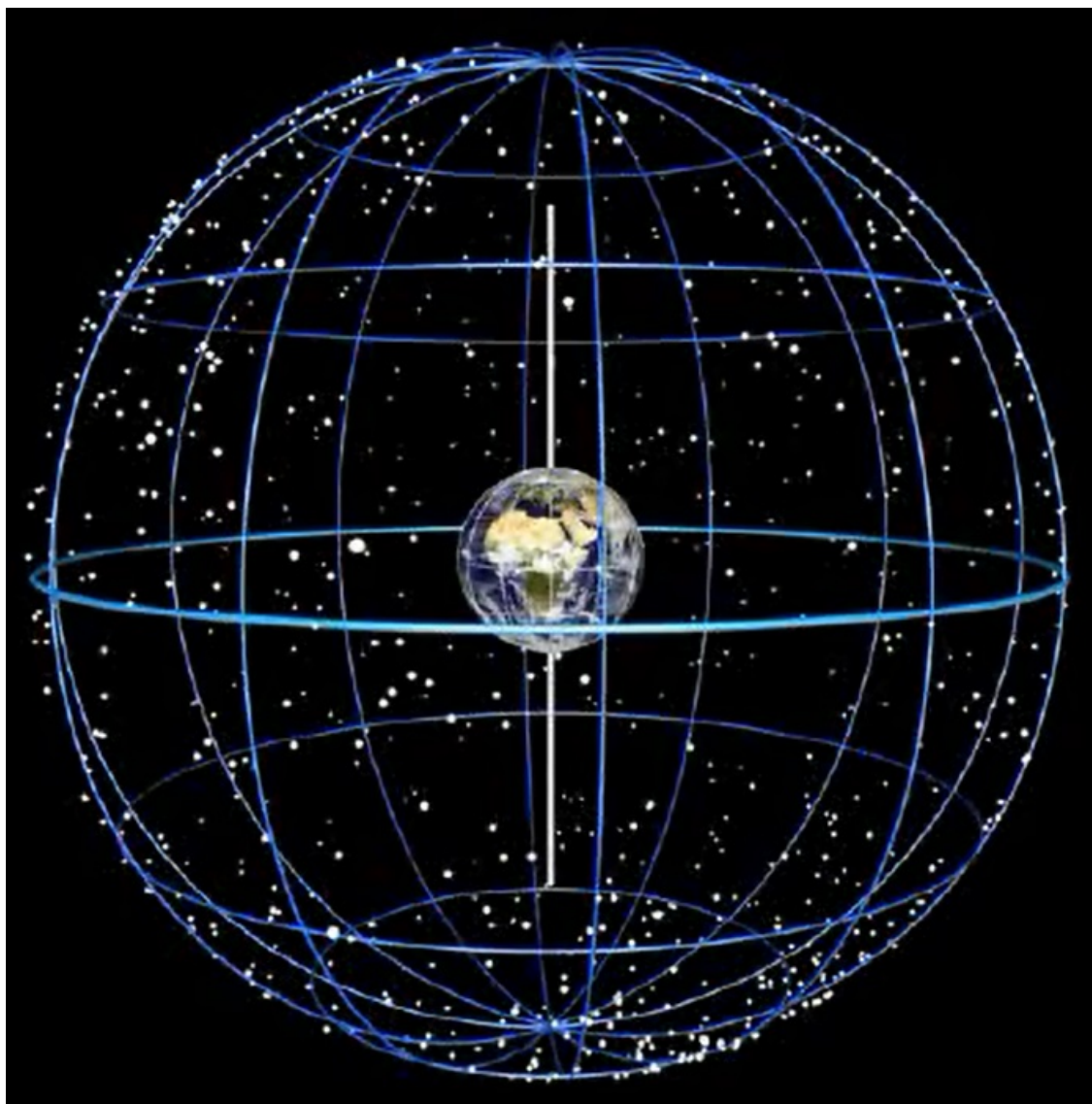
Concepció de la Terra i l'esfera de les «estrelles fixes» (esfera celeste).

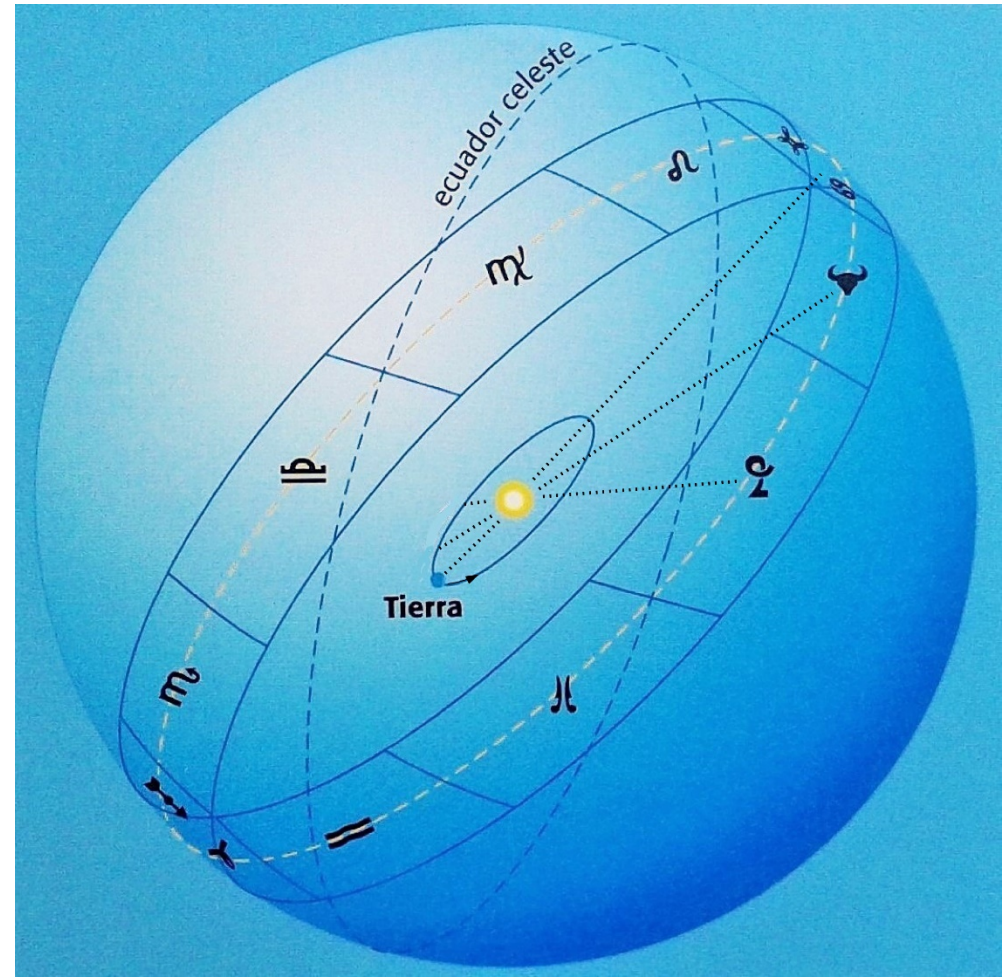
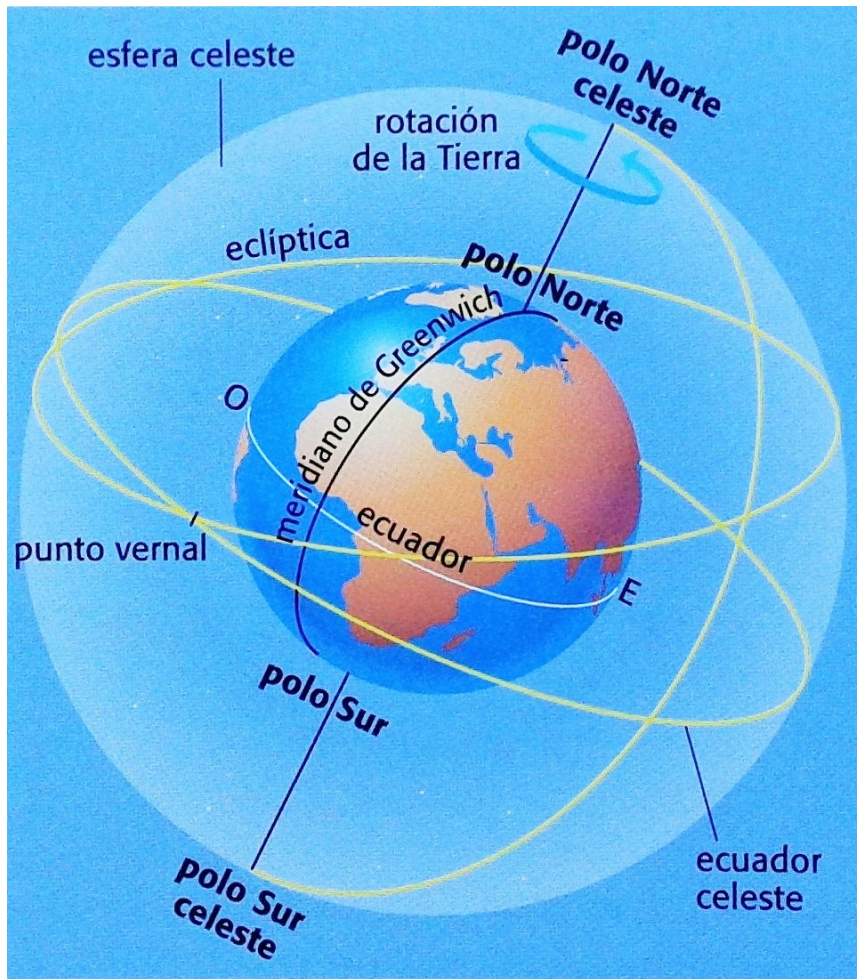
Pols celestes. El pol Nord molt prop de Polaris. Parallels. Equador celeste. Meridians.

A retenir: *els estels són com punts de llum dispersos sobre un fons negre.*

Els grecs (alguns) sabien que estan molt més lluny que la Lluna, el Sol i els 5 planetes:

Mercuri, Venus, Mart, Júpiter i Saturn (els noms dels dies de la setmana es corresponent amb aquests objectes: dilluns, diumenge, dimecres, divendres, dimarts, dijous i dissabte).





♈ Aries ♉ Tauro ♊ Gemini ♋ Cancer ♌ Leo ♍ Virgo
 ♎ Libra ♏ Scorpio ♐ Sagittario ♑ Capricornus ♒ Aquario ♓ Pisces

(Imatges adaptades de Bourge-Lacroux-2014)

LA TERRA

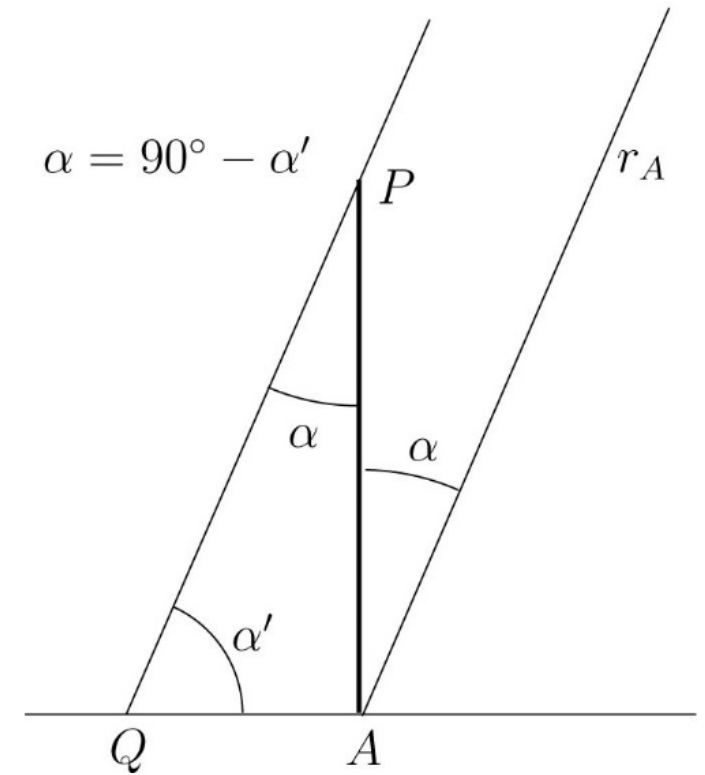
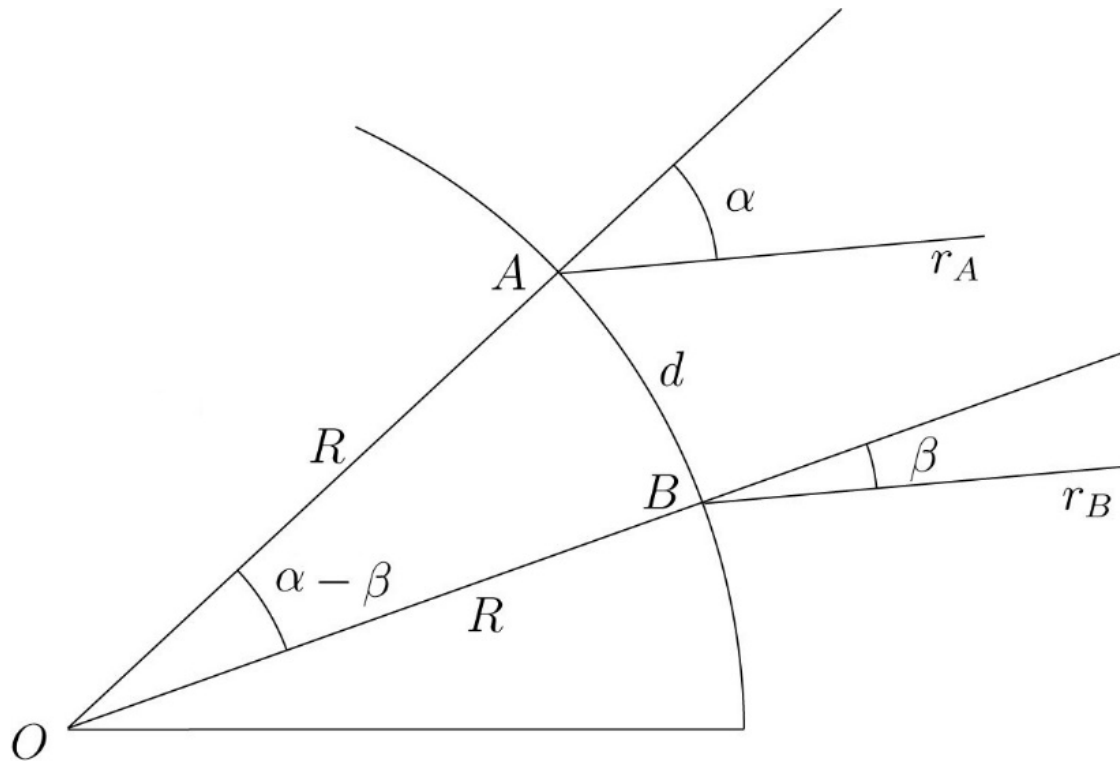
Els grecs sabien que la Terra era esfèrica (variació de l'altura de Polaris en canviar de latitud, ombra circular de la Terra sobre la Lluna en els eclipsis, enfonsament progressiu dels vaixells en allunyar-se de la costa).

I consideraven que girava sobre sí mateixa, una volta per dia (els resultava inversemblant que fos tota l'esfera de les estrelles fixes la que girava al volant d'una Terra immòbil).

S'atribueix a Eratòstenes (−276, ~ −195) la primera determinació, força acurada, del radi de la Terra, basant-se en l'angle d'inclinació dels raigs del Sol respecte de la vertical el dia del solstici d'estiu a Alexandria i a Siena (actual Aswan).



DEL VISIBLE A L'INVISIBLE



Dreta: L'angle α en el punt A és $90^\circ - \alpha'$, i α' és mesurable directament.

Esquerra: α , β i d es poden mesurar directament, i llavors és clar que

$$2\pi R = \frac{360}{\alpha - \beta} d, \text{ o bé } R = \frac{180}{\pi(\alpha - \beta)}.$$

PROJECCIÓ ESTEREOGRÀFICA I L'ART DELS MAPES

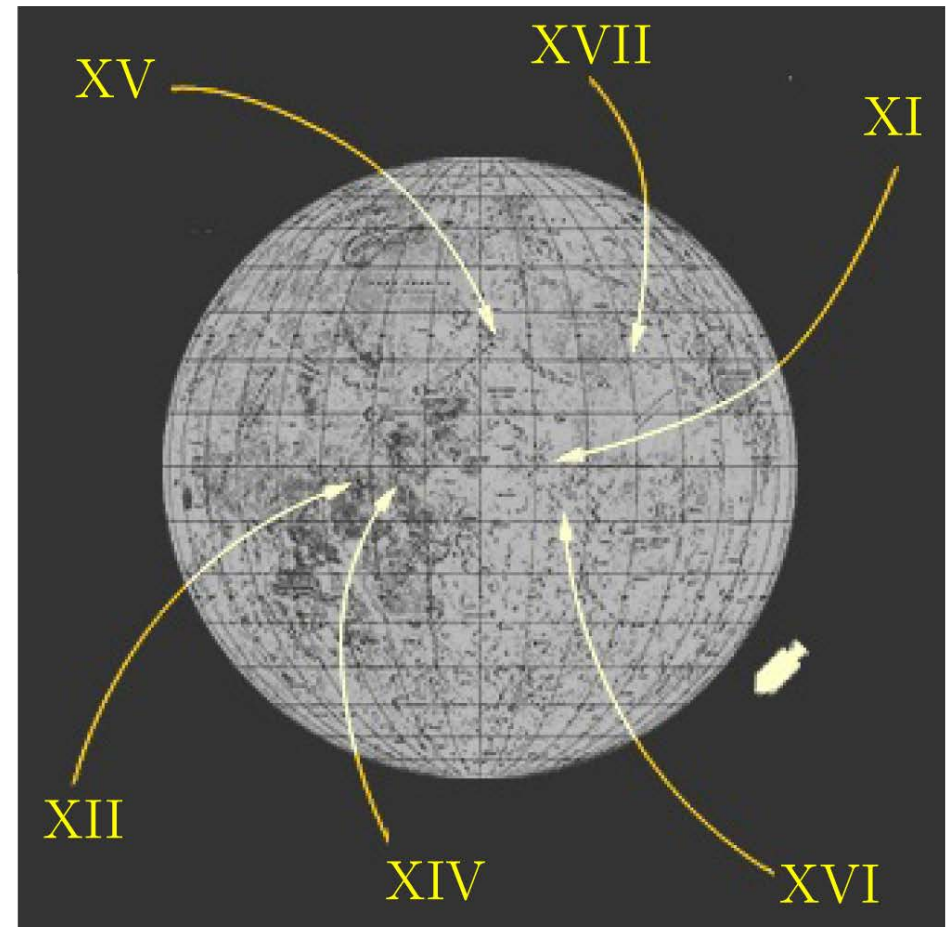


NASA: Programa Apollo

Per representar els punts sobre una esfera, podem usar el vell sistema de *meridians* i *paral·lels*, com en el cas de l'esfera celeste, de l'esfera terrestre o de la lluna.

Si a més convé tenir en compte una distància variable al centre, llavors tenim les *coordenades esfèriques*, que donen una manera de referenciar els punts sobre un objecte irregular, com ara sobre el 67P (cometa Churyumov-Gerasimenko).

Descobert el 1969 pensant que era el 32P/Comas Solà.



XI: Sea of Tranquility. 0.6875 N, 23.43 E

XII: Ocean of Storms. -3.197 N, -23.385 E

XIV: Fra Mauro. -3.67 N, -17.46 E

XV: Hadley-Apennine. 26.1 N, 3.65 E

XVI: Plain of Descartes. -8.99 N, 15.514 E

XVII: Taurus-Littrow. 20.105 N, 30.705 E



L'escola d'atenes. Raphael, 1509-1510









EUREKA! (ARQUIMEDES, –287 a –212)

Física i enginyeria

- Llei de la palanca
- Planetari heliocèntric (cf. *antikytera*)
- Cargol sense fi i politges mòbils
- Centre de gravetat i estàtica de sòlids
- Hidrostàtica. Principi d'Arquimedes
- Enginys bèl·lics (miralls)

Matemàtiques

- Aproximacions de π
- Volum i àrea de l'esfera
- Sistema de numeració perfeccionat
- Axioma d'Arquimedes
- Càlculs geomètrics que anticipen el càlcul infinitesimal



Quadre de Niccolò Barabino (1832-1891)

LLEI DE LA PALANCA


T-1



Vàlid per a 10 viatges al Bus TMB, Metro, o FGC urbà, amb dret a transbordament durant 1 hora únicament entre Metro i FGC urbà.



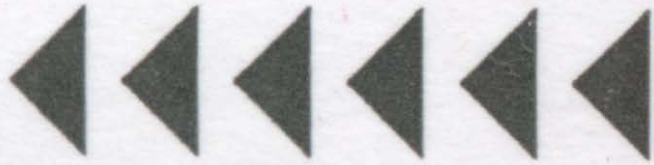
$a f_a = b f_b$

xarxa metropolitana
barcelona


ATM 0557214 UC

Any mundial de les matemàtiques

TEOREMA DE PITÀGORES



T-1

FGC  **TMB**

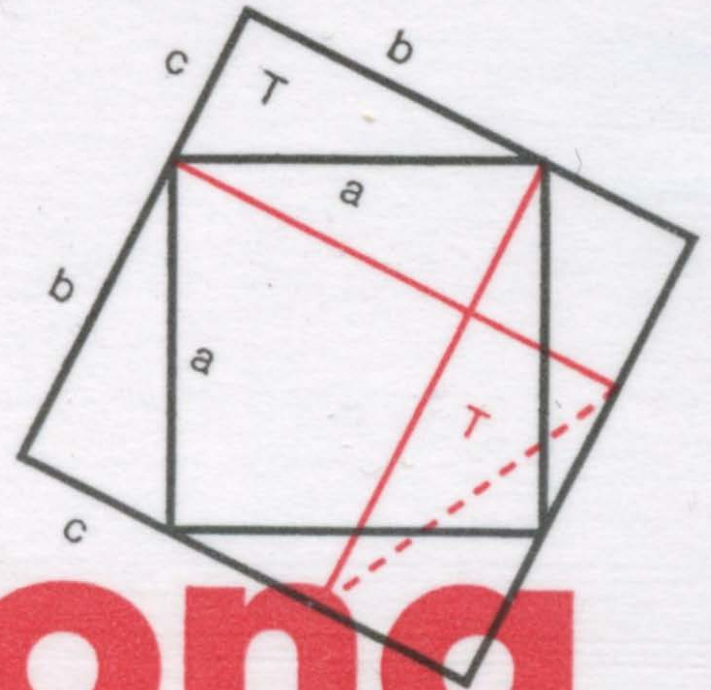
Vàlid per a 10 viatges al Bus TMB, Metro, o FGC urbà, amb dret a transbordament durant 1 hora únicament entre Metro i FGC urbà.

$$\text{quadrat gran} = a^2 + 4T$$


$$\text{quadrat gran} = b^2 + c^2 + 4T$$

$$a^2 + 4T = b^2 + c^2 + 4T$$

$$a^2 = b^2 + c^2$$



xarxa metropolitana
barcelona

 **ATM**

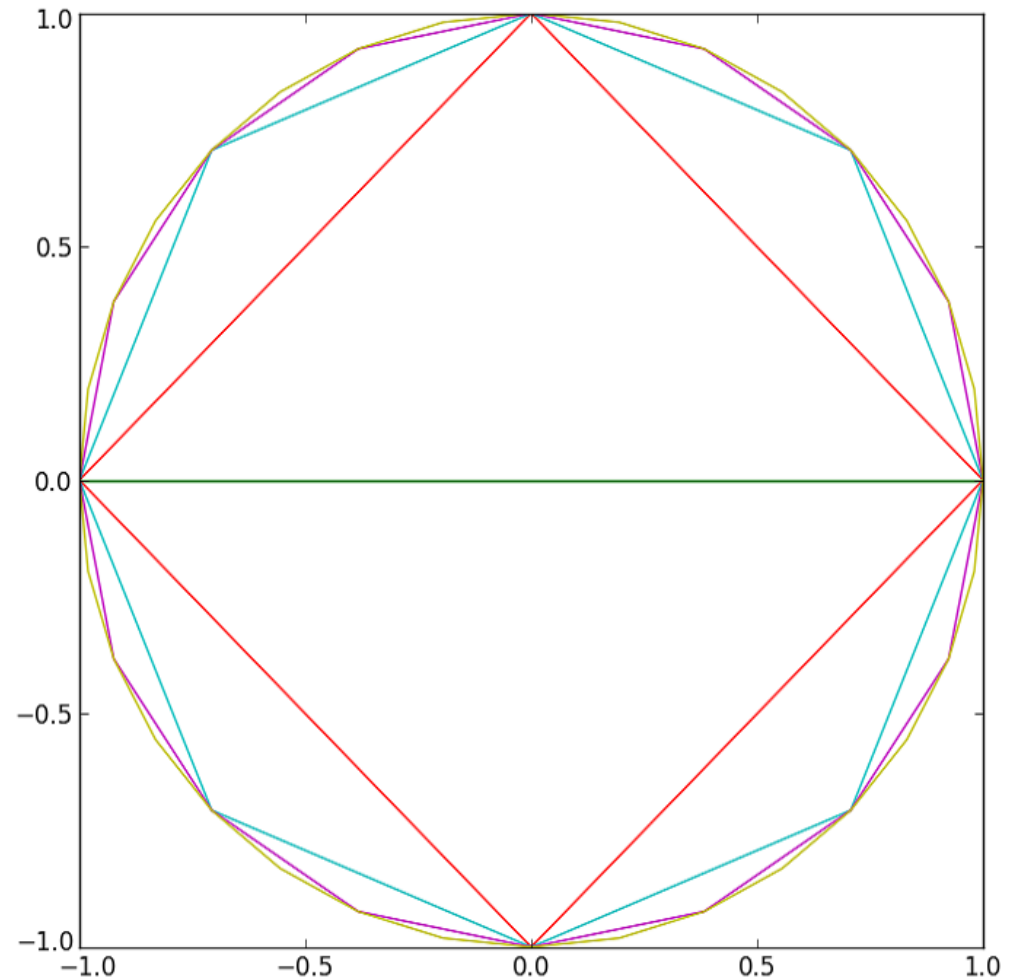
Any mundial de
 les matemàtiques

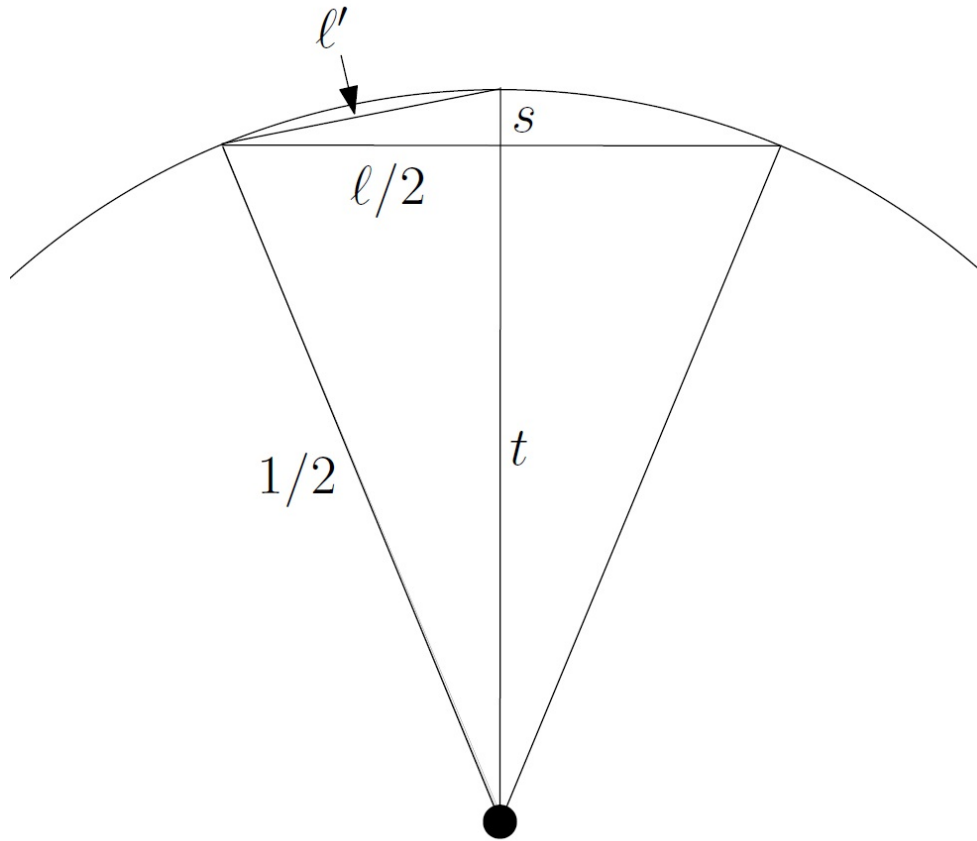
CÀLCUL DE π

El nombre π es la longitud d'una circumferència de radi $1/2$.

El mètode d'Arquimedes és aproximar aquesta circumferència per polígons regulars inscrits de 4, 8, 16, 32, ... costats. Com més gran és el nombre de costats considerats, major és l'aproximació de π que obtenim.

I el punt bàsic és determinar el costat del polígon de 2^n costats a partir del costat del polígon de 2^{n-1} costats. Això es pot fer tal com queda indicat a la pàgina següent. Com a notació, posem π_n per denotar la longitud el polígon de 2^n costats.





$$\ell'^2 = \ell^2/4 + s^2$$

$$s = 1/2 - t$$

$$t^2 = 1/4 - \ell^2/4$$

$$s^2 = \left(1/2 - \sqrt{1/4 - \ell^2/4}\right)^2$$

Multiplicant per

$$2^{2n+2} = (2^{n+1})^2,$$

obtenim:

$$\pi_{n+1}^2 = \pi_n^2 + 2^{2n+2} \left(1/2 - \sqrt{1/4 - \pi_n^2/2^{2n+2}}\right)^2$$

$$\pi_{n+1}^2 = \pi_n^2 + 2^{2n} \left(1 - \sqrt{1 - \pi_n^2/2^{2n}}\right)^2$$

$$(3+10/71 < 38016/12103 < \pi < 29376/9347 < 3+1/7)$$

(2, 2.828427124746190097603377448)
(3, 3.061467458920718173827679872)
(4, 3.121445152258052285572557895)
(5, 3.136548490545939263814258044)
(6, 3.140331156954752912317118524)
(7, 3.141277250932772868062019770)
(8, 3.141513801144301076328515059)
(9, 3.141572940367091384135800110)
(10, 3.141587725277159700628854262)
(11, 3.141591421511199973997971763)
(12, 3.141592345570117742340375993)
(13, 3.141592576584872665681606091)
(14, 3.141592634338562989095478263)
(15, 3.141592648776985669485107969)
(16, 3.141592652386591345803525521)
(17, 3.141592653288992765271943042)
(18, 3.141592653514593120163348243)
(19, 3.141592653570993208887718344)
(20, 3.141592653585093231068905794)

(21, 3.141592653588618236614208589)
(22, 3.141592653589499488000534659)
(23, 3.141592653589719800847116200)
(24, 3.141592653589774879058761587)
(25, 3.141592653589788648611672934)
(26, 3.141592653589792090999900771)
(27, 3.141592653589792951596957730)
(28, 3.141592653589793166746221970)
(29, 3.141592653589793220533538030)
(30, 3.141592653589793233980367045)
(31, 3.141592653589793237342074299)
(32, 3.141592653589793238182501112)
(33, 3.141592653589793238392607815)

$$2^{33} = 8589934592$$

3.14159265358979323846264338327950...

Nota. L'àrea d'un cercle radi R és com la d'un triangle de base $2R$ i altura R : πR^2

VOLUM DE CONS I PIRÀMIDES ($V = \frac{1}{3} Ah$)

Sigui A_j l'àrea de la secció del con (o piràmide) per un pla horitzontal a distància

$x_j = \frac{j}{n} h$ del vèrtex, $j = 1, \dots, n$. En parti-

cular, $A_n = A$ (àrea de la base).

Com que la raó de semblança de A_j i A és

$$x_j/h = j/n, \quad A_j = A j^2/n^2.$$

Per tant el volum entre les seccions $j - 1$

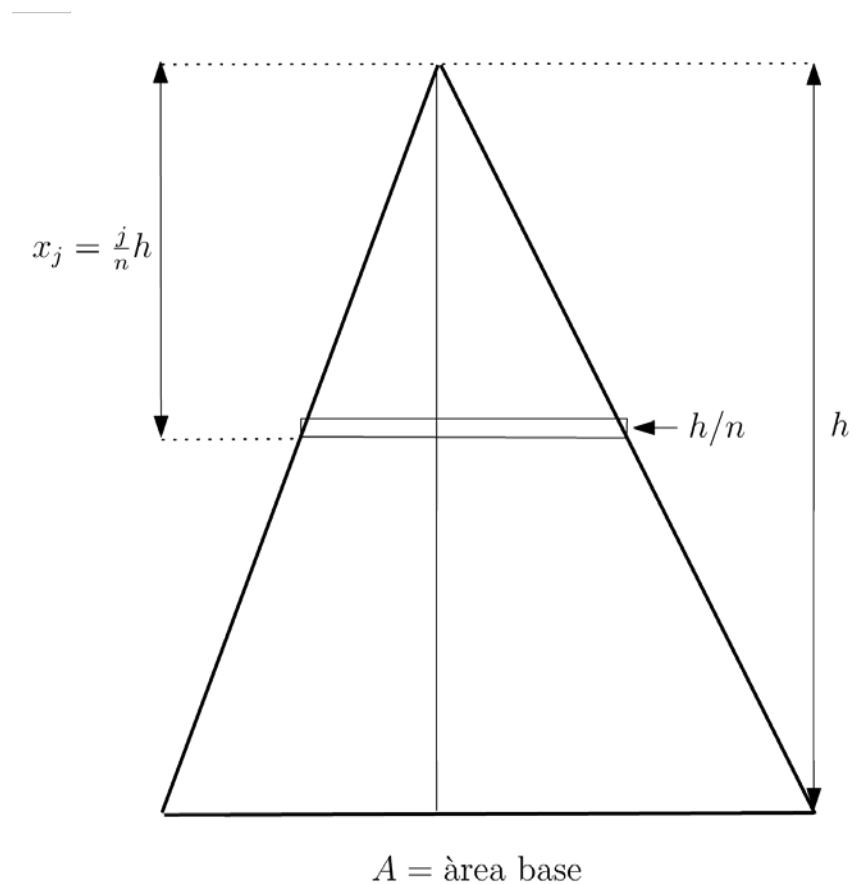
i j és $\simeq A_j \frac{h}{n} = \frac{Ah}{n^3} j^2$ i el volum de la fi-

gura queda aproximat per $V_n = \frac{Ah}{n^3} \sum_{j=1}^{j=n} j^2 = \frac{1}{6} Ah \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(2 + \frac{1}{n}\right)$, ja

que, com sabia Arquímedes, $\sum_{j=1}^{j=n} j^2 = \frac{1}{6} n(n+1)(2n+1)$. Finalment,

$V_n \rightarrow \frac{1}{3} Ah$ quan $n \rightarrow \infty$. En resulta la fórmula usual per calcular el volum

de cons i piràmides. Amb integrals, $V = \int_0^h A(x) dx = A \int_0^h \frac{x^2}{h^2} dx = \frac{1}{3} Ah$.



VOLUM I ÀREA DE L'ESFERA

El pla PQ talla al cilindre, a l'esfera i al con en circumferències concèntriques de radis R , r i x , respectivament (x és la distància del pla al vèrtex del con). Pel teorema de Pitàgores,

$$r^2 = R^2 - x^2.$$

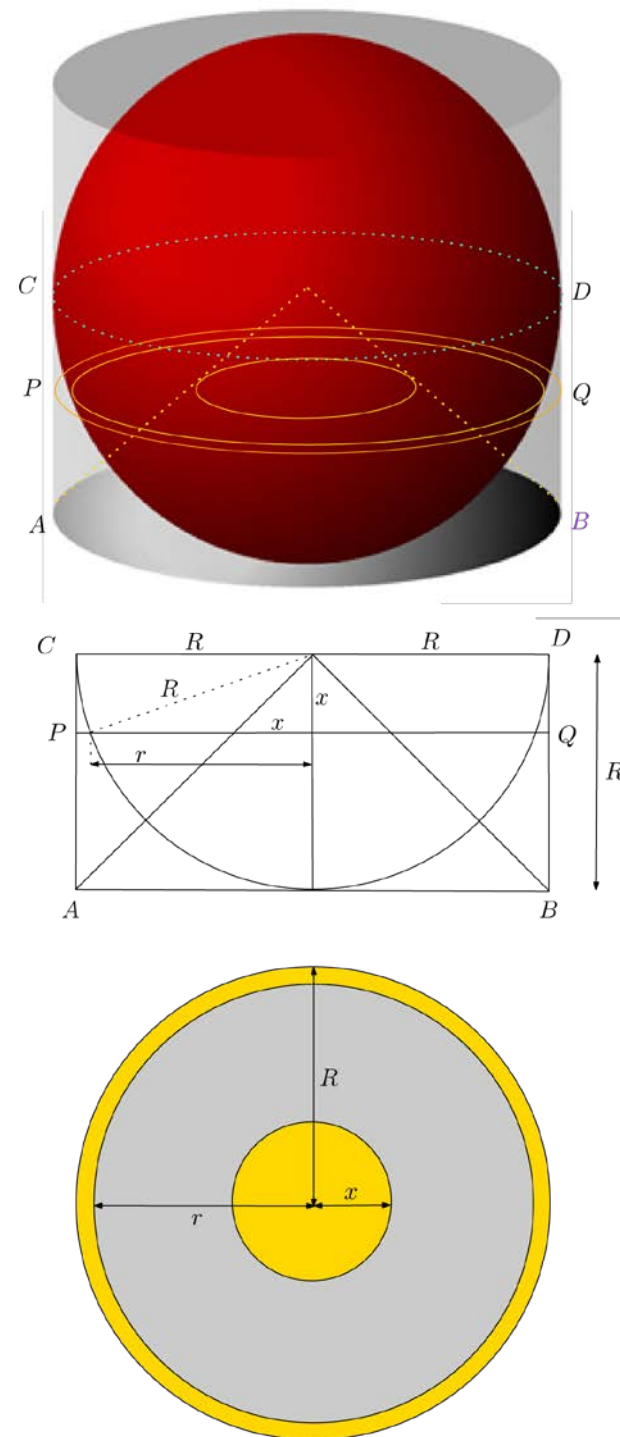
En resulta que l'àrea del cercle de radi x és igual a l'àrea de la corona de radis R i r :

$$\pi R^2 - \pi r^2 = \pi R^2 - \pi(R^2 - x^2) = \pi x^2.$$

Això implica que el volum del con V_{con} és igual al volum del semicilindre V_{cil} menys el volum V de la semiesfera, o bé $V = V_{\text{cil}} - V_{\text{con}}$. Però

$$V_{\text{con}} = \frac{1}{3} \pi R^2 \cdot R = \frac{\pi}{3} R^3 \text{ i } V_{\text{cil}} = \pi R^2 \cdot R = \pi R^3,$$

D'on obtenim $V = \frac{2}{3} \pi R^3$ ($\frac{4}{3} \pi R^3$ per l'esfera).



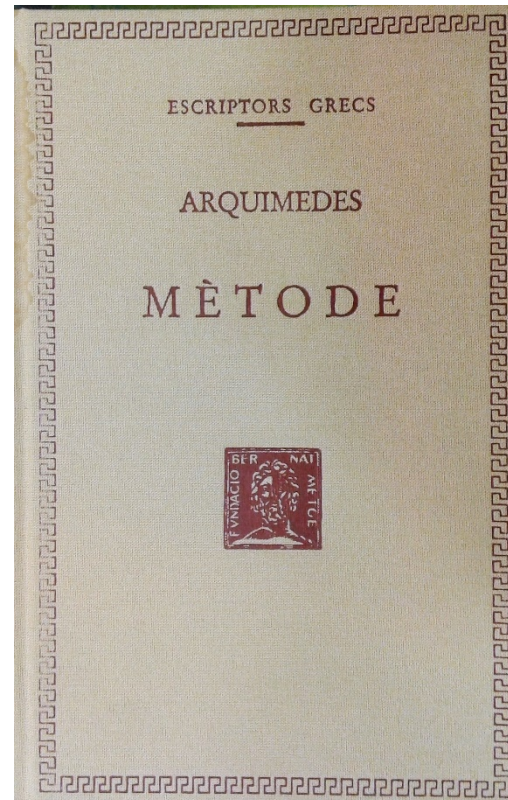
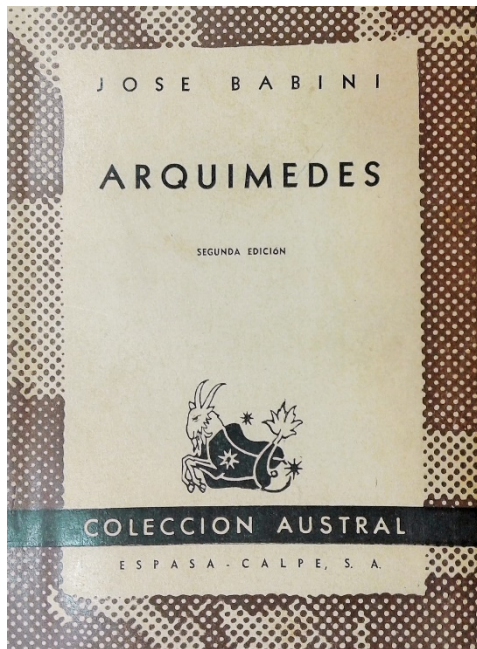
Ara el volum de l'esfera és com un con de base l'àrea A de l'esfera i altura R , és a dir,

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{1}{3}A \cdot R.$$

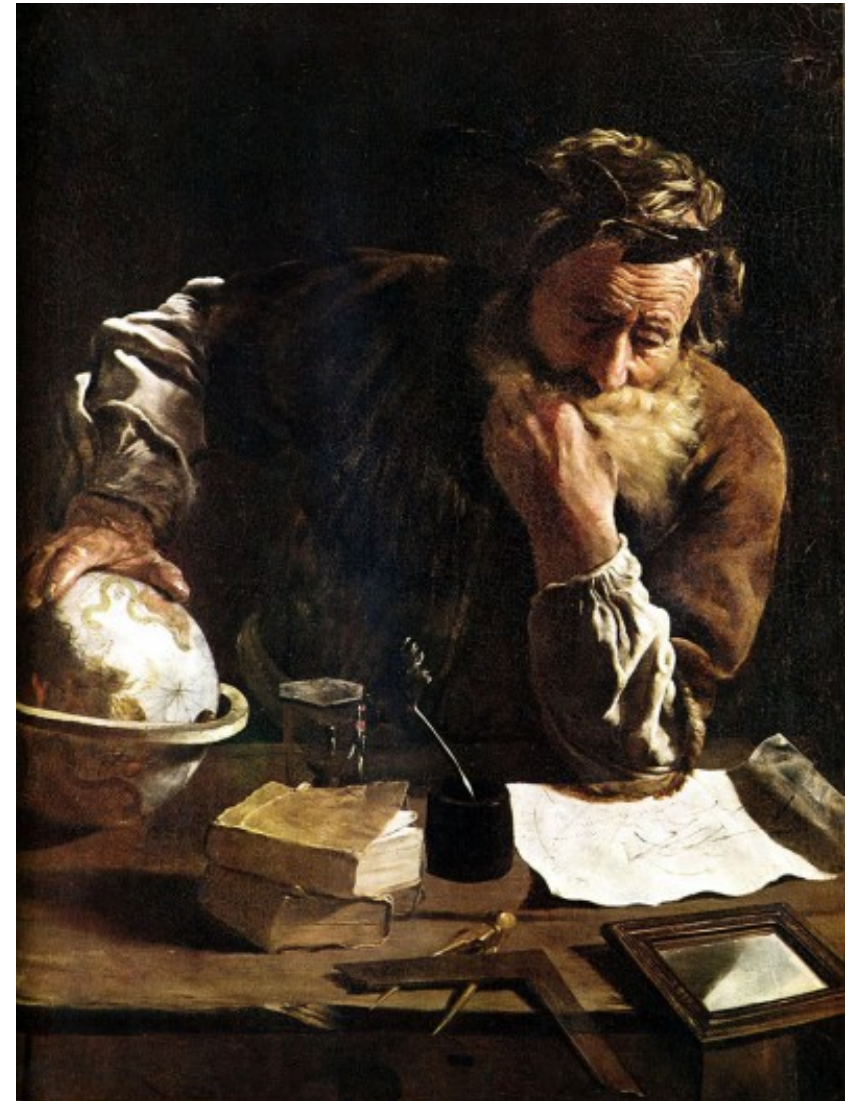
Obtenim així que

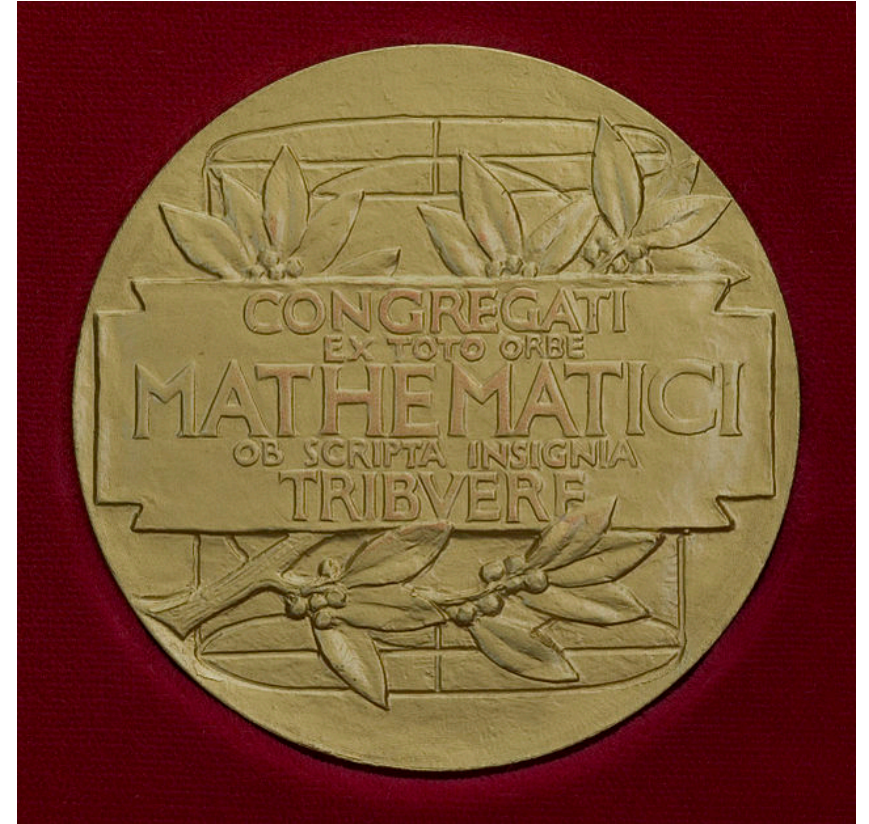
$$A = 4\pi R^2.$$

Eureka!



Quadre de Domenico Fetti (1589-1624)





Anvers: *Transire suum pectus mundoque potiri* (Elevar-se per sobre d'un mateix i comprendre el món). Frase atribuïda a Marcus Manilius.

Revers: *Congregati ex toto orbe mathematici ob scripta insignia tribuere* (Els matemàtics vinguts d'arreu del món han atorgat [aquest premi] per treballs insignes).

Disseny de l'escultor canadenc R. Tait McKenzie.

DE LA LLUM

REFLEXIÓ I REFRACCIÓ

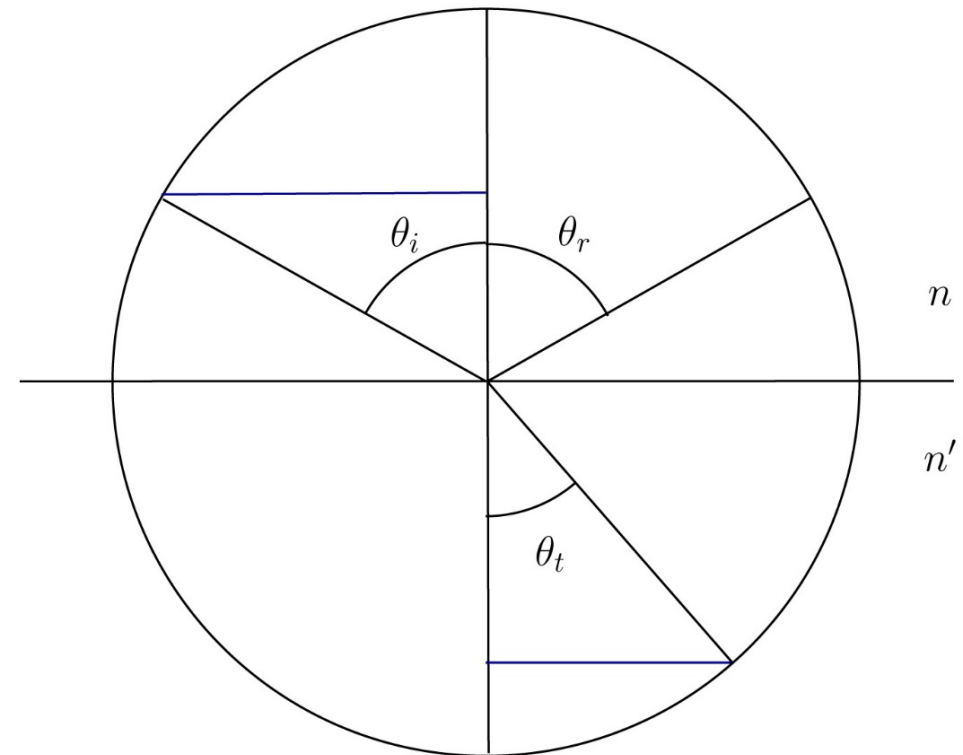
Es regeixen per les anomenades lleis d'Snell (1580,1626), ~1621. També dites lleis d'Snell-Descartes (Descartes (1596,1650) les va redescobrir i *publicar* 16 anys després), eren conegudes, en una forma equivalent, pels àrabs del segle X (Sahl, 984) i potser d'abans.

Observació important: són *reversibles*.

La refracció no es produeix si $n \cdot \sin(\theta_i) \geq n'$.

Fermat (1601 o 1607, 1665): *Principi del mínim temps* (1657).

Lleis d'Snell



Reflexió: $\theta_i = \theta_r$

Refracció: $\sin \theta_t = n \sin(\theta_i) / n'$

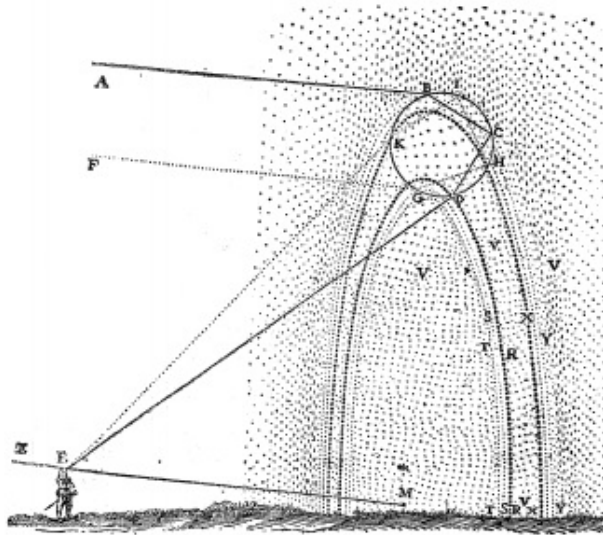
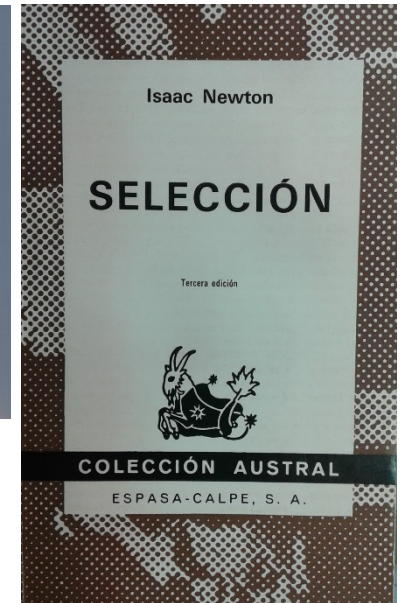
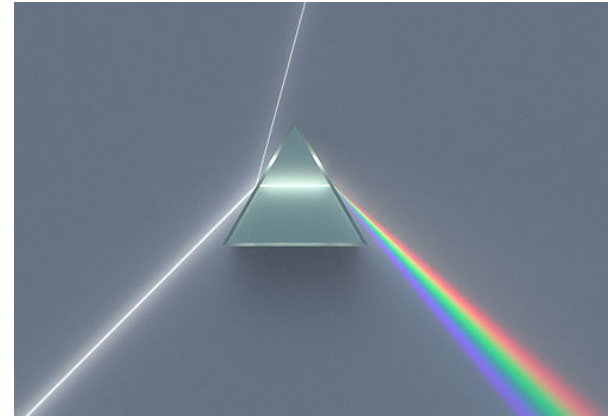
NEWTON (1642-1727)

Espectre de colors.

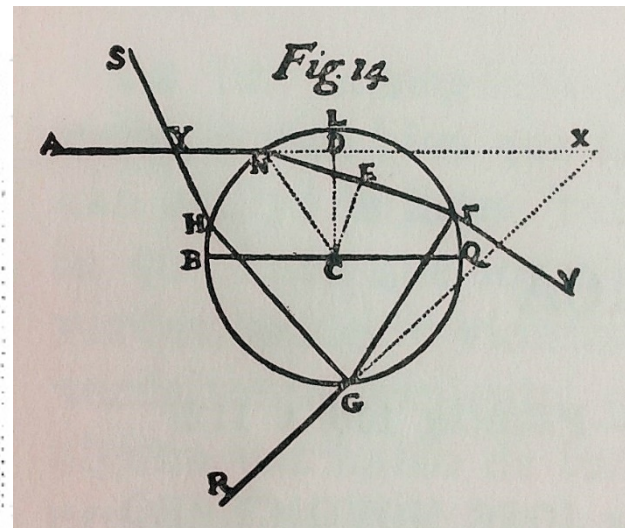
Teoria corpuscular de la llum.

Teoria dels colors.

Explicació de l'arc de Sant Martí una mica més elaborada que la de Descartes (Selección, 75-85):



Esquema de Descartes



Esquema de Newton



From WP/rainbow

reman ad a melle uo p...
 locu otact q a a nlla fia radio q z q ma d pt
 a fozz d m p 14. foz p r p de la p m g e c m
 of p m f f d m ad de a loco r f u s z s l u f c d u s
 ad u a n t e d r a m e c z e m e n t e l i c p a g a t i s f a z
 n l l a e f r a c t i o m i f a z c o q n o m a d f a z a f o l a a
 t e n g t a d e b e n s e i n p u e b t o p o l u m q u i m a d e b e s
 o p t o c o s d n l e d r a f i t f e l i o e r e f l e x r a d i o s p u t
 h e e f p p t e .

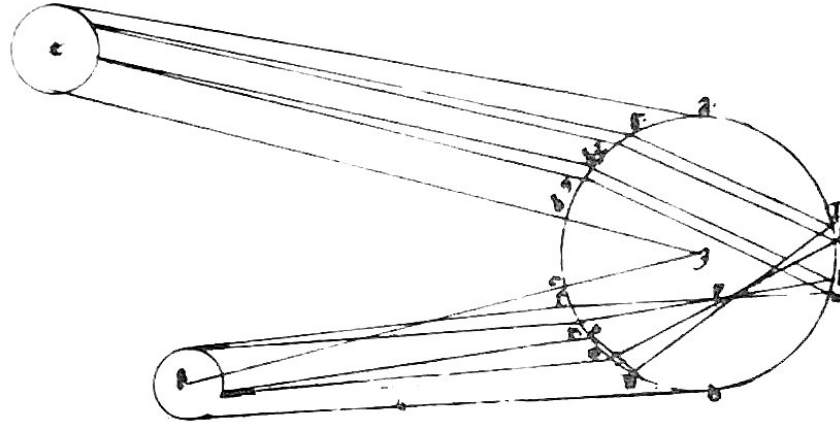


Fig.17. Rays of light in a spherical drop. Illustration from the Basle manuscript of the *De Iride*, Universitäts-Bibliothek, F. IV. 30, fol.21.



Esquema de Teodoric de Freiberg (envers 1300).

La idea principal (paper de les gotes d'aigua individuals) era d'Albertus Magnus (envers 1200) !!

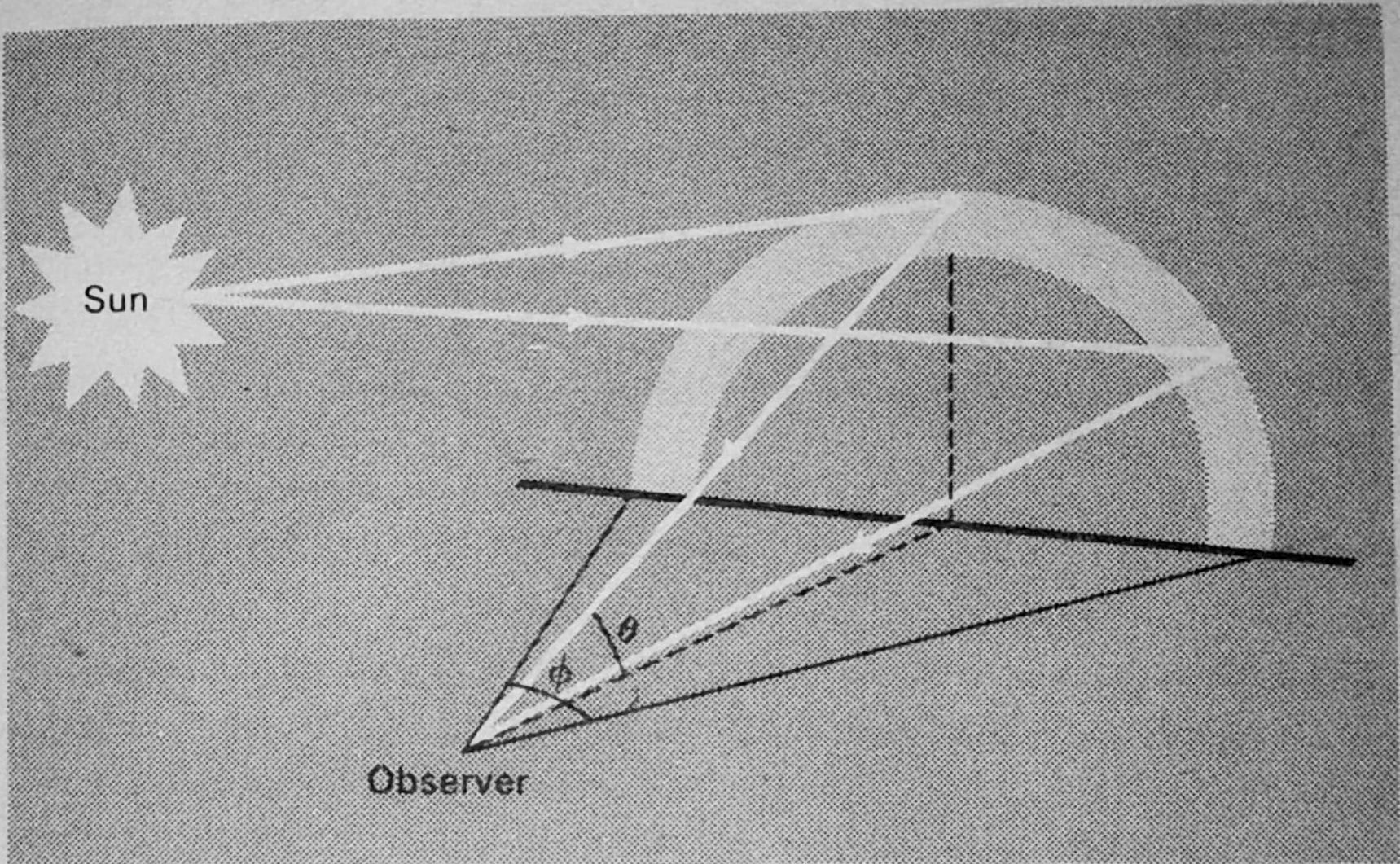
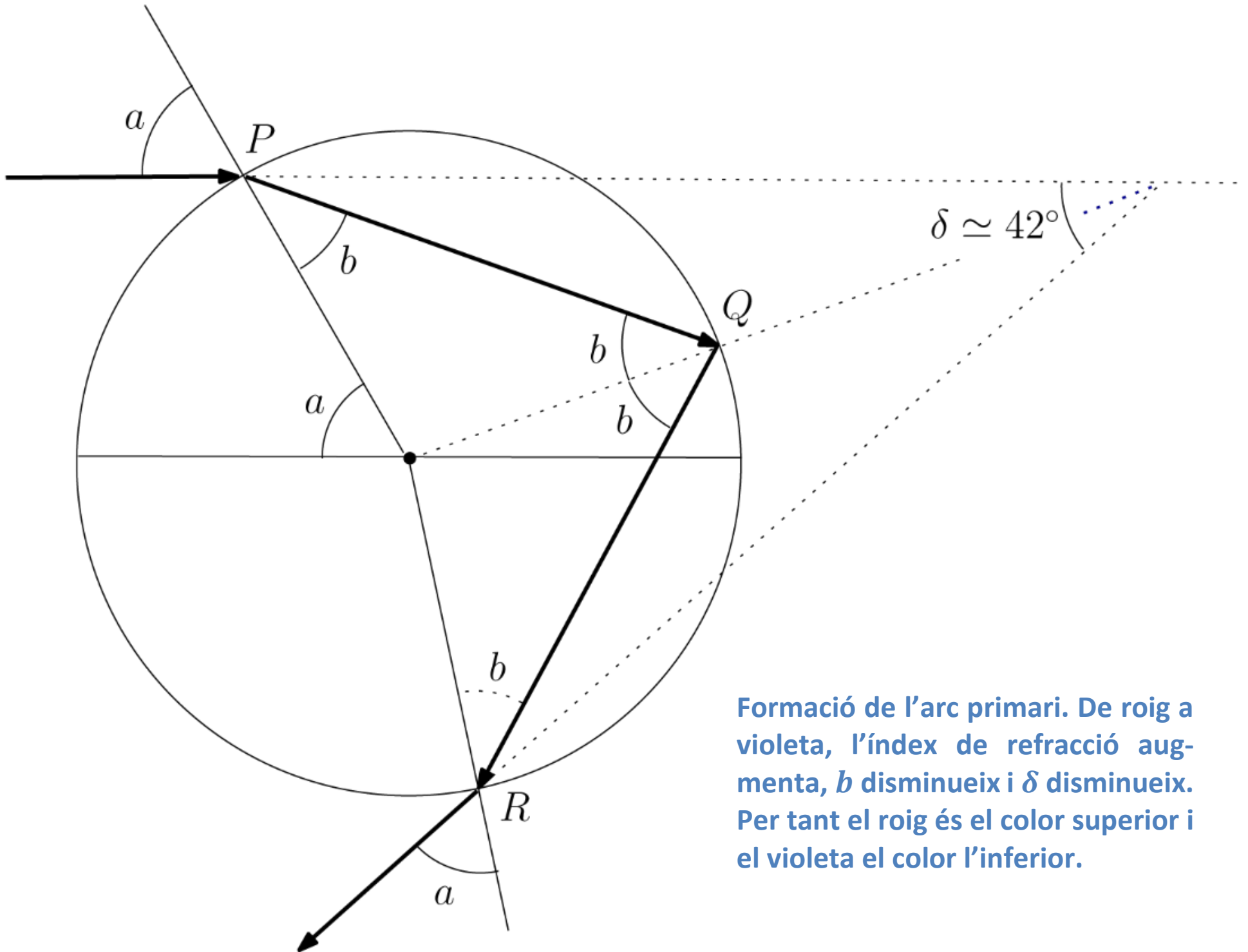
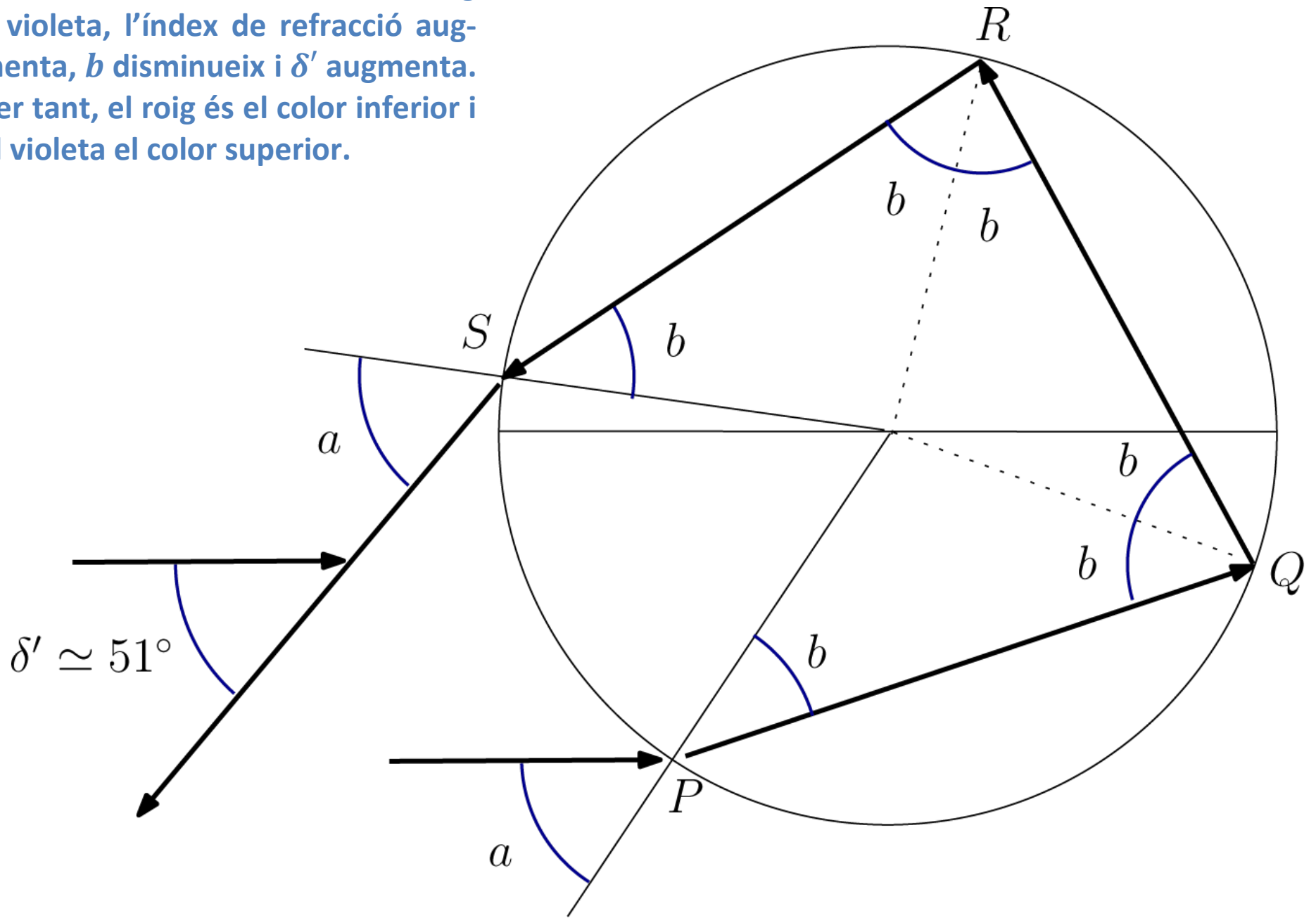


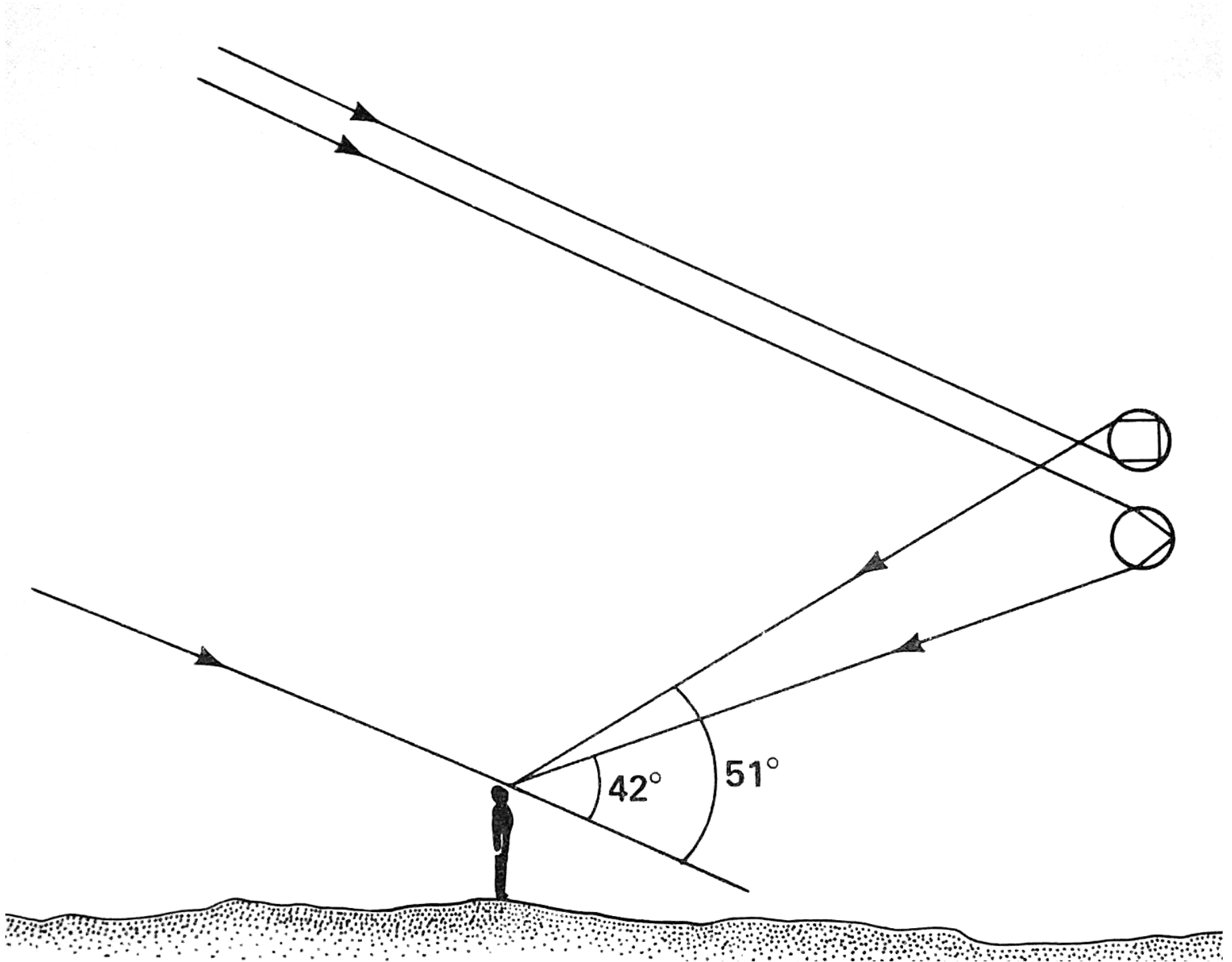
Fig.18. Illustration of Theodoric's explanation of the bow.



Formació de l'arc primari. De roig a violeta, l'índex de refracció augmenta, b disminueix i δ disminueix. Per tant el roig és el color superior i el violeta el color l'inferior.

Formació de l'arc secundari. De roig a violeta, l'índex de refracció augmenta, b disminueix i δ' augmenta. Per tant, el roig és el color inferior i el violeta el color superior.

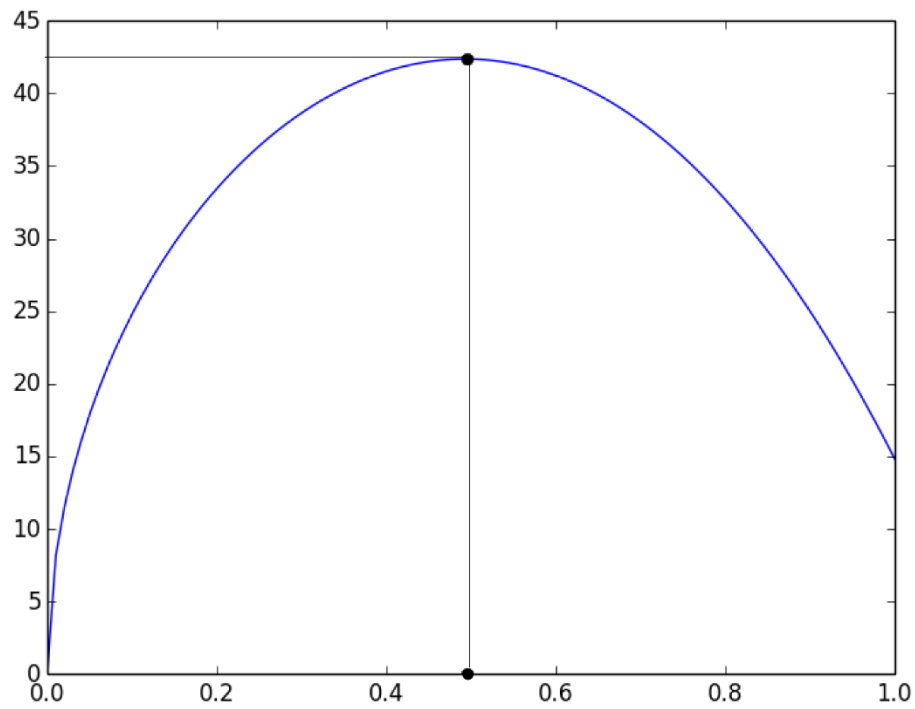




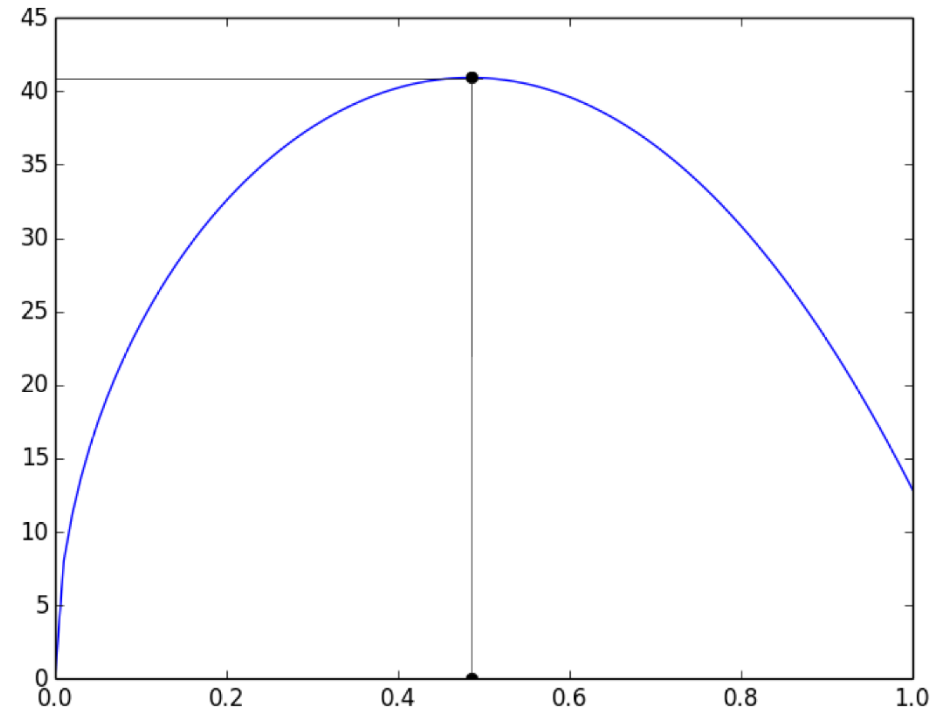
Màxim angle de dispersió de l'arc primari:

$42^{\circ} 22'$ per al roig ($n = 1.33$)

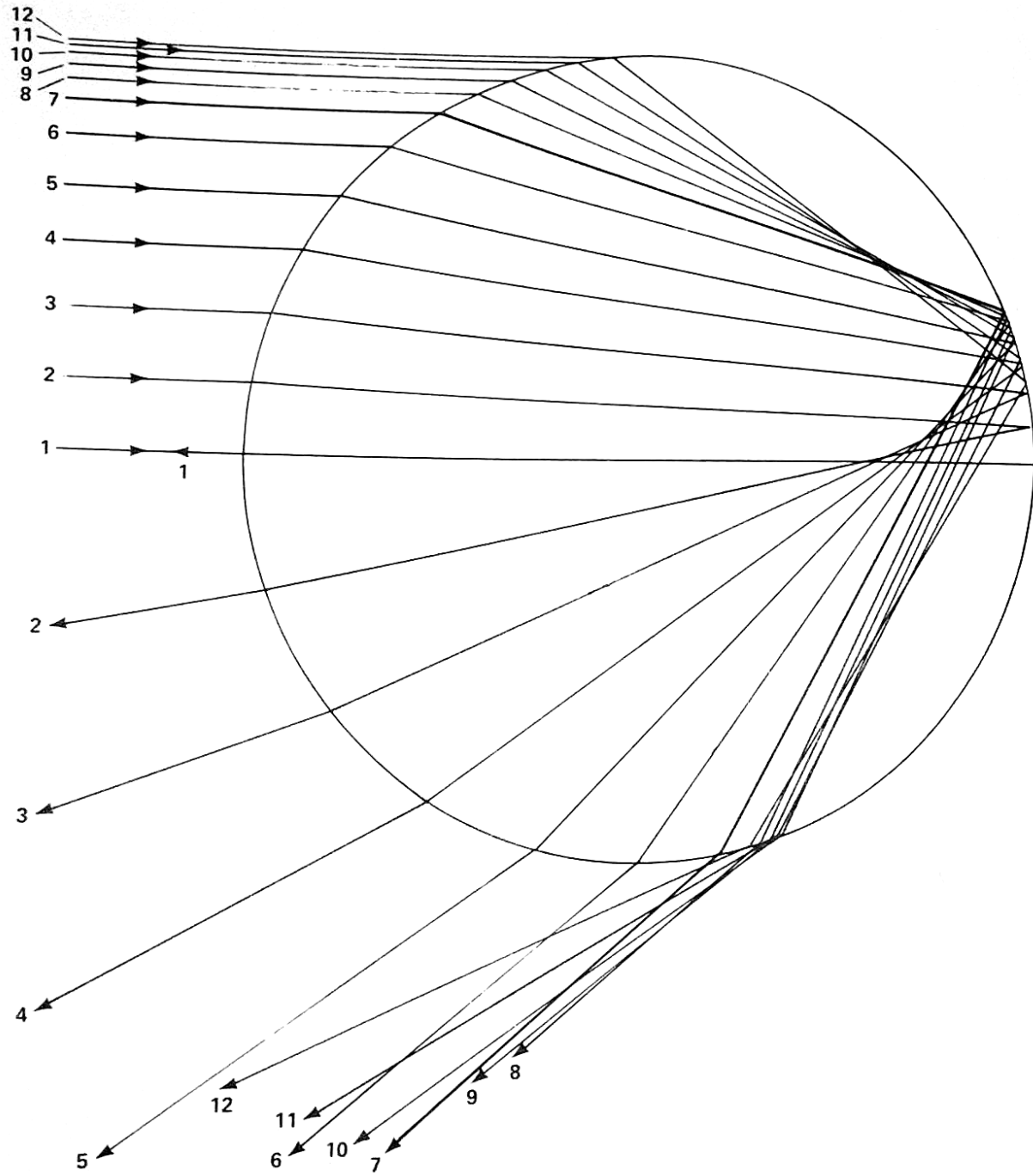
$40^{\circ} 56'$ per al violeta ($n = 1.341$).



Angle de dispersió del color roig
en funci del parmetre d'impacte.



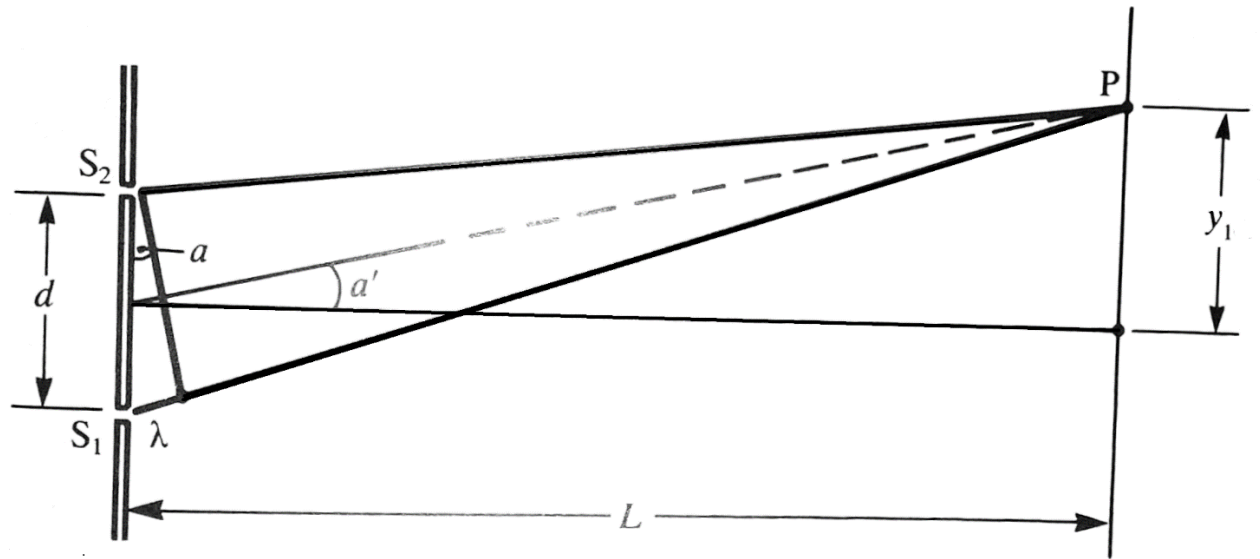
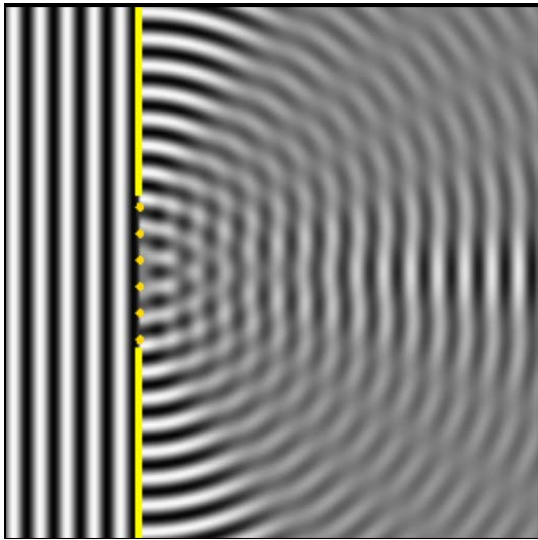
Angle de dispersió del color violeta
en funci del parmetre d'impacte.



TEORIA ONDULATORIA

Christian Huygens (1629,1695). 1678, 1690 (*Traité de la lumière*): teoria ondulatoria de la llum (oscil·lacions *longitudinals* de l'èter). Fronts d'ona.

Thomas Young (1773,1829). Experiments crucials d'interferència i difracció. En particular el de la doble escletxa.



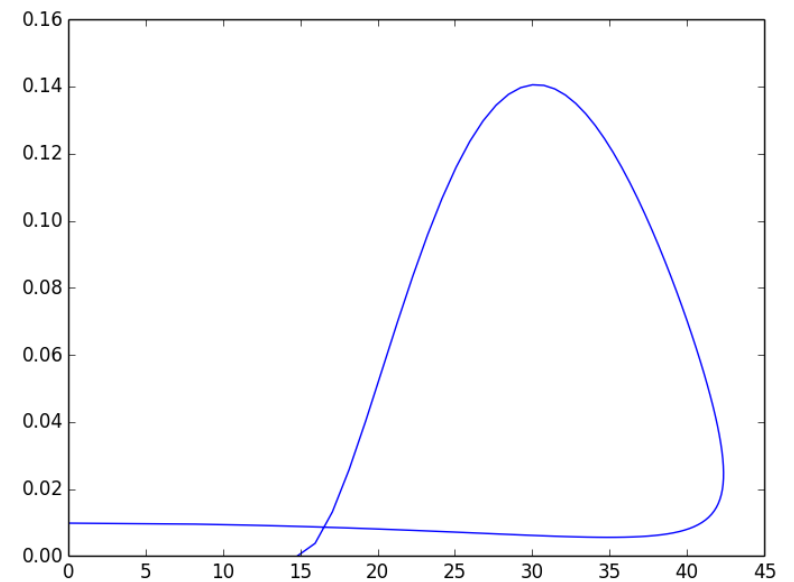
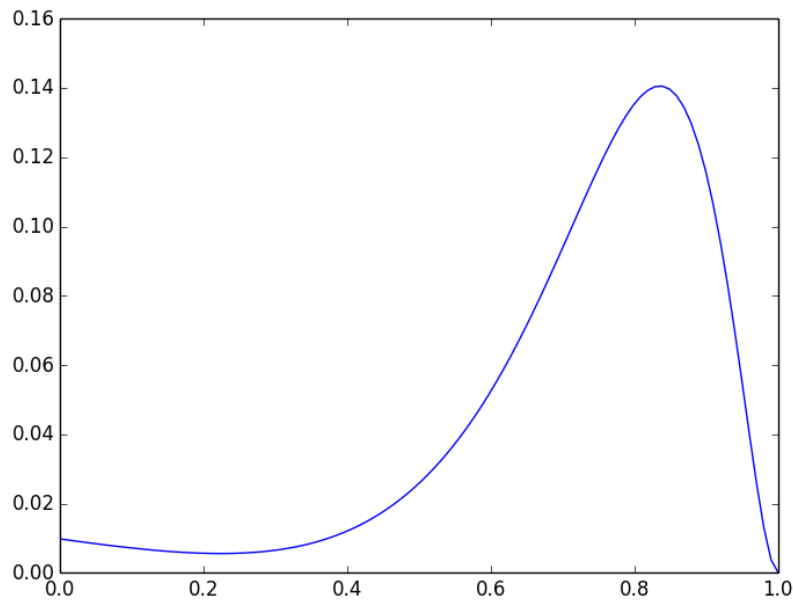
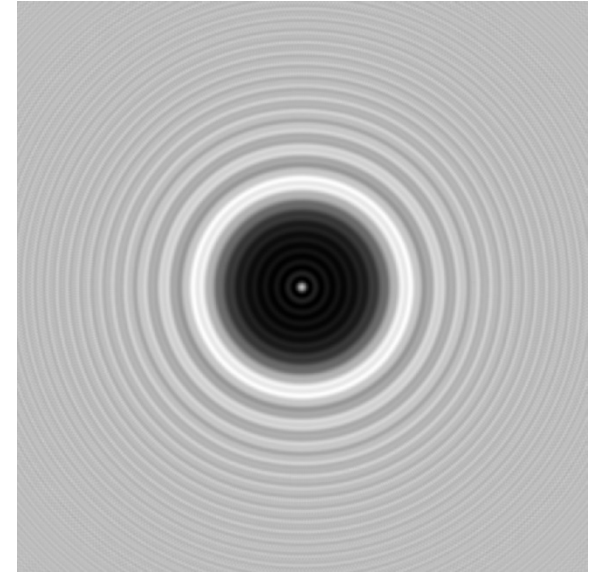
$$\lambda = \frac{y_1 \cdot d}{L}, \quad \lambda_{\text{roig}} = 6.5 \times 10^{-7} \text{ m}, \quad \lambda_{\text{violeta}} = 4.3 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Augustin-Jean Fresnel (1788, 1827).

El punt de Poisson (o D'Arago, o de Fresnel)

Fórmules d'intensitat de reflexió/refracció.

Gràfiques en el cas de l'arc de Sant Martí primari,
llum roja:



Velocitat de la llum

Rømer (1676): velocitat en el buit.

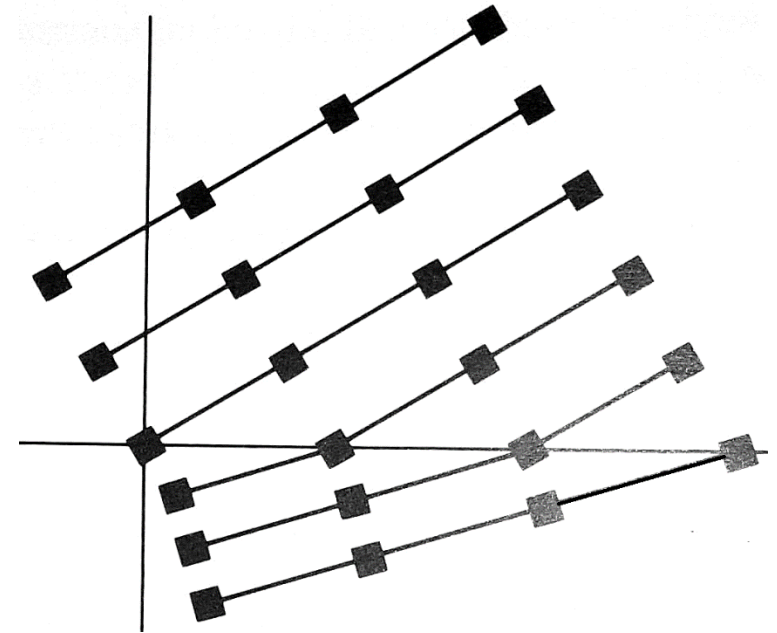
Fizeau (1849): velocitat de la llum a l'aire.

Foucault (1850): velocitat de la llum a l'aigua (i altres líquids).

Fórmula màgica de la refracció:

$$\frac{n_i}{n_t} = \frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_t)} = \frac{v_t}{v_i}; \quad v_t = v_i \cdot \frac{n_i}{n_t}$$

Meravella: el valor de l'índex de refracció aire-aigua (per exemple) obtingut *mesurant angles* és igual al valor mesurant *velocitats de la llum* ! (1.33)



ONES ELECTROMAGNÈTIQUES

Equacions de Maxwell: Teoria del camp electromagnètic (vers 1862).

Predicció de l'existència d'ones electromagnètiques en el buit (confirmada experimentalment per Hertz el 1888).

Velocitat de propagació:

$$V = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

(μ_0 , ϵ_0 constants *mesurables en el laboratori*).

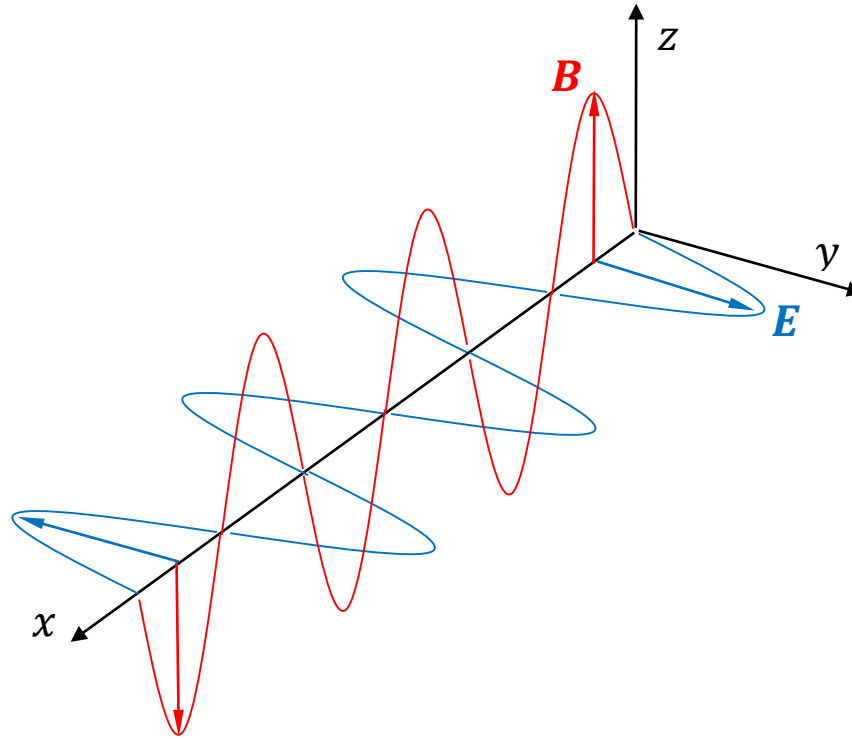
Sorpresa:

$$V = c.$$

Conclusió (Maxwell): la llum és una ona electromagnètica.

Ones monocromàtiques:

$$\mathbf{E} = (0, E_1 \cos k(x - ct), E_2 \cos k(x - ct - \phi)), c\mathbf{B} = \mathbf{e}_x \wedge \mathbf{E}.$$



Polarització: Per $x = 0$, tenim l'anomenat vector de polarització de l'ona (amb $\omega = kc$):

$$\mathbf{E}_0(t) = (0, E_1 \cos(\omega t), E_2 \cos(\omega t + \phi))$$

En el cas $\phi = 0$,

$$\mathbf{E}_0(t) = (0, E_1, E_2) \cos(\omega t),$$

de manera que sempre és paral·lel al vector $(0, E_1, E_2)$ i es diu que l'ona és *linealment polaritzada* (v. la figura anterior).

En el cas $\phi = \pm\pi/2$,

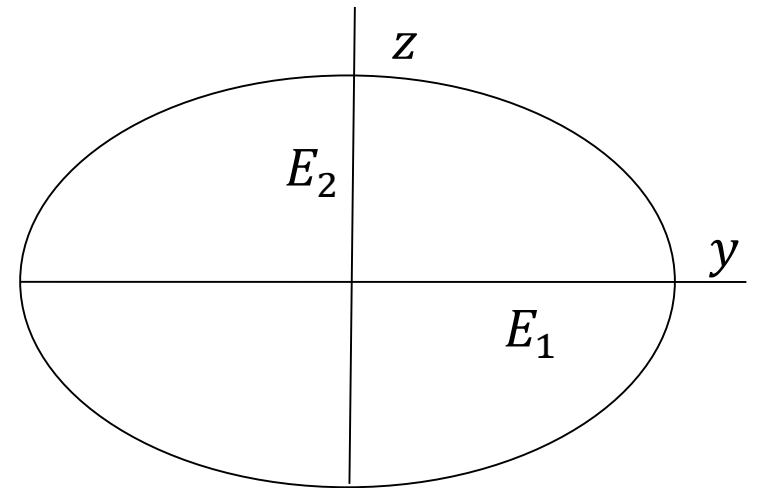
$$\mathbf{E}_0(t) = (0, E_1 \cos(\omega t), \pm E_2 \sin(\omega t))$$

i \mathbf{E}_0 descriu l'el·lipse d'equació

$$\frac{y^2}{E_1^2} + \frac{z^2}{E_2^2} = 1$$

de semieixos principals E_1 i E_2 (es diu que

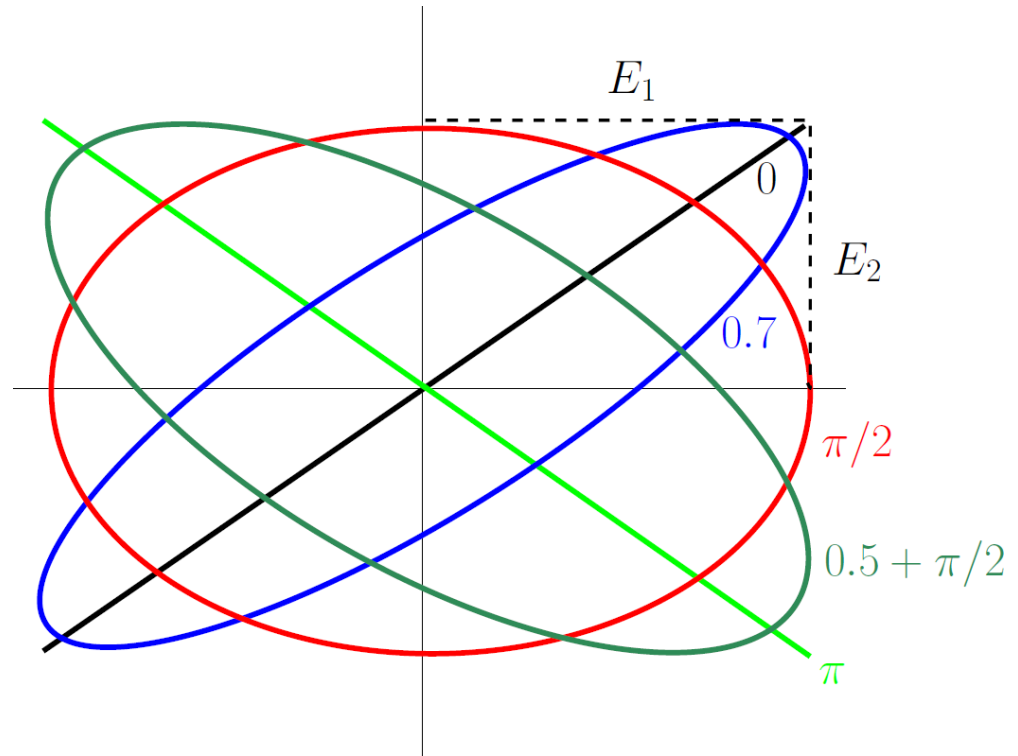
l'ona és *el·lípticament polaritzada* (*circularment polaritzada* si $E_1 = E_2$).



Per $\phi \neq 0, \pi$, la polarització

$$\mathbf{E}_0(t) = (E_1 \cos(\omega t), E_2 \cos(\omega t + \phi))$$

(situada en el pla yz) és el·líptica, recorreguda en sentit horari si $\phi \in (0, \pi)$ i en sentit antihorari si $\phi \in (\pi, 2\pi)$.



La teoria de Maxwell inclou la determinació de la densitat d'*energia* d'un camp electromagnètic i del *flux* en què aquesta energia travessa una superfície donada.

També del *moment* i del *moment angular*.

I permet una fonamentació electromagnètica de les fórmules d'intensitat de reflexió/refracció de Fresnel.

ONA I PARTÍCULA

Einstein (1905): postula el *principi de relativitat* (per a tota la física, no només per a la mecànica) i, sense esmentar explícitament el resultat de Maxwell, la constància de c independentment de l'estat de moviment del focus emissor o de l'observador. Transformacions de Lorentz. $E = mc^2$.

Segons les convencions actuals, c ha quedat fixada en

299 792 458 m/s

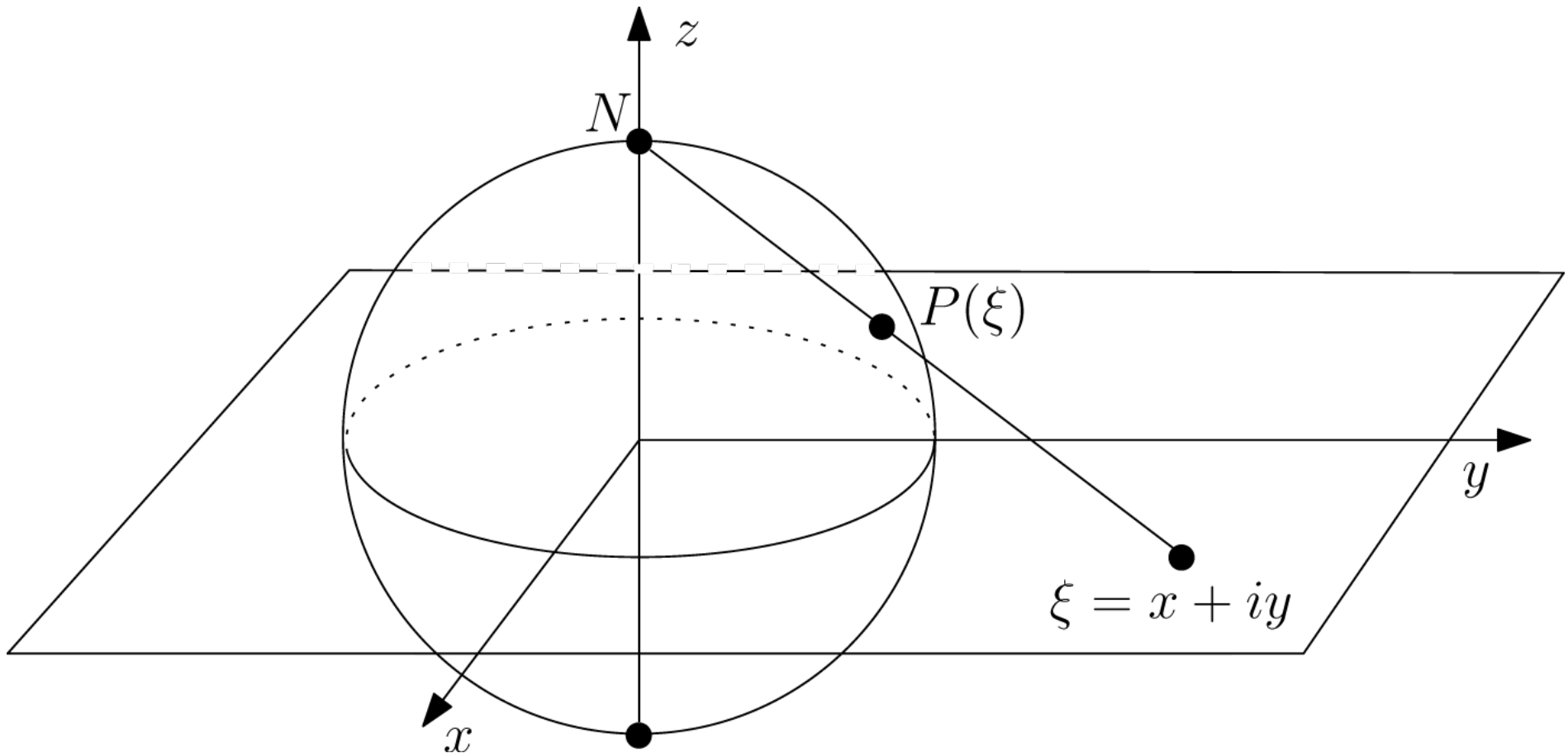
i l'espai es mesura en temps: $s = ct$.

Einstein (1905 i següents): partint del treball de Max Planck, arriba a la dualitat ona-partícula de la llum.

Einstein (1917): emissió estimulada (làser 30 anys després).

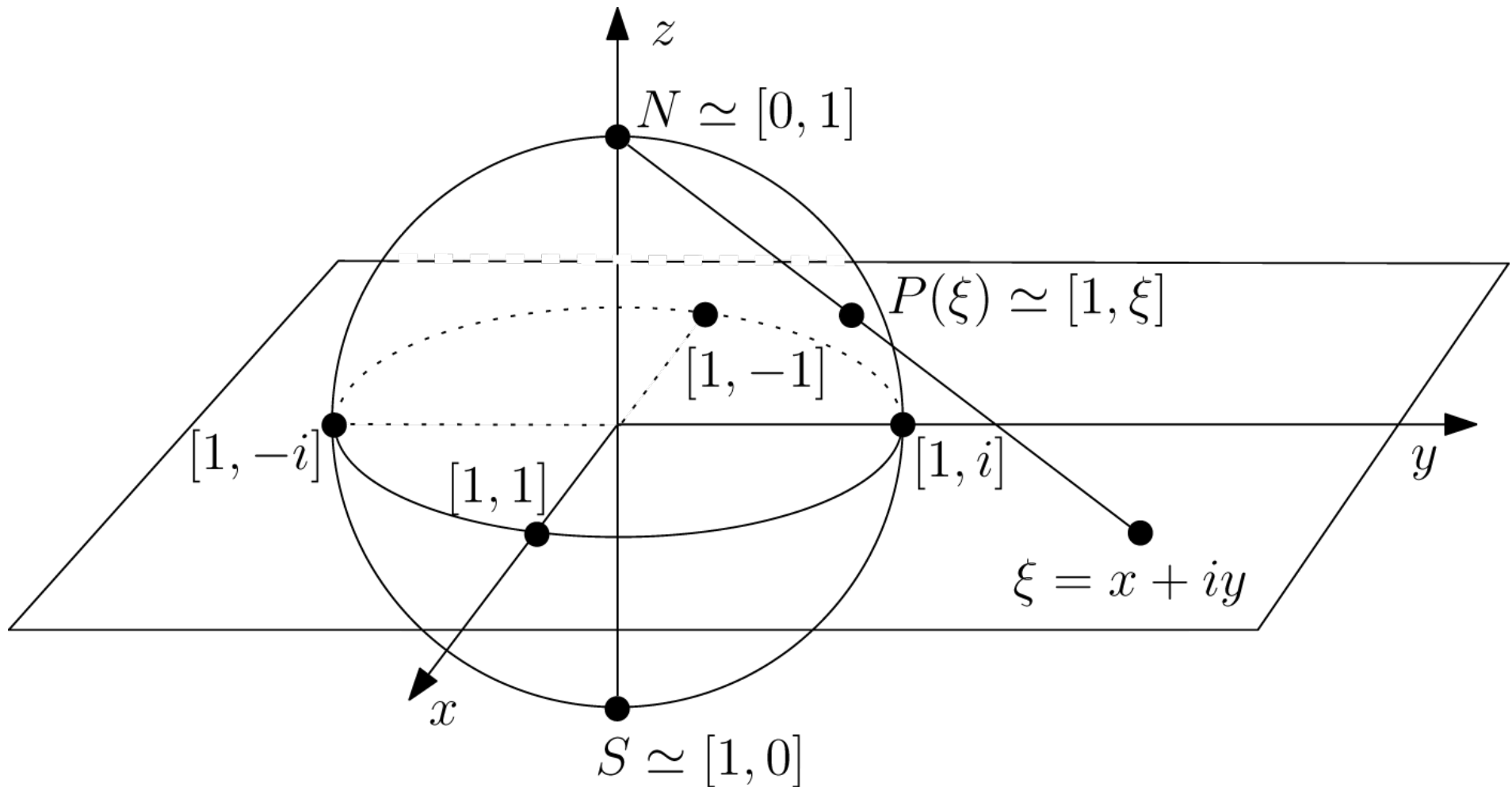
NOVES ESFERES

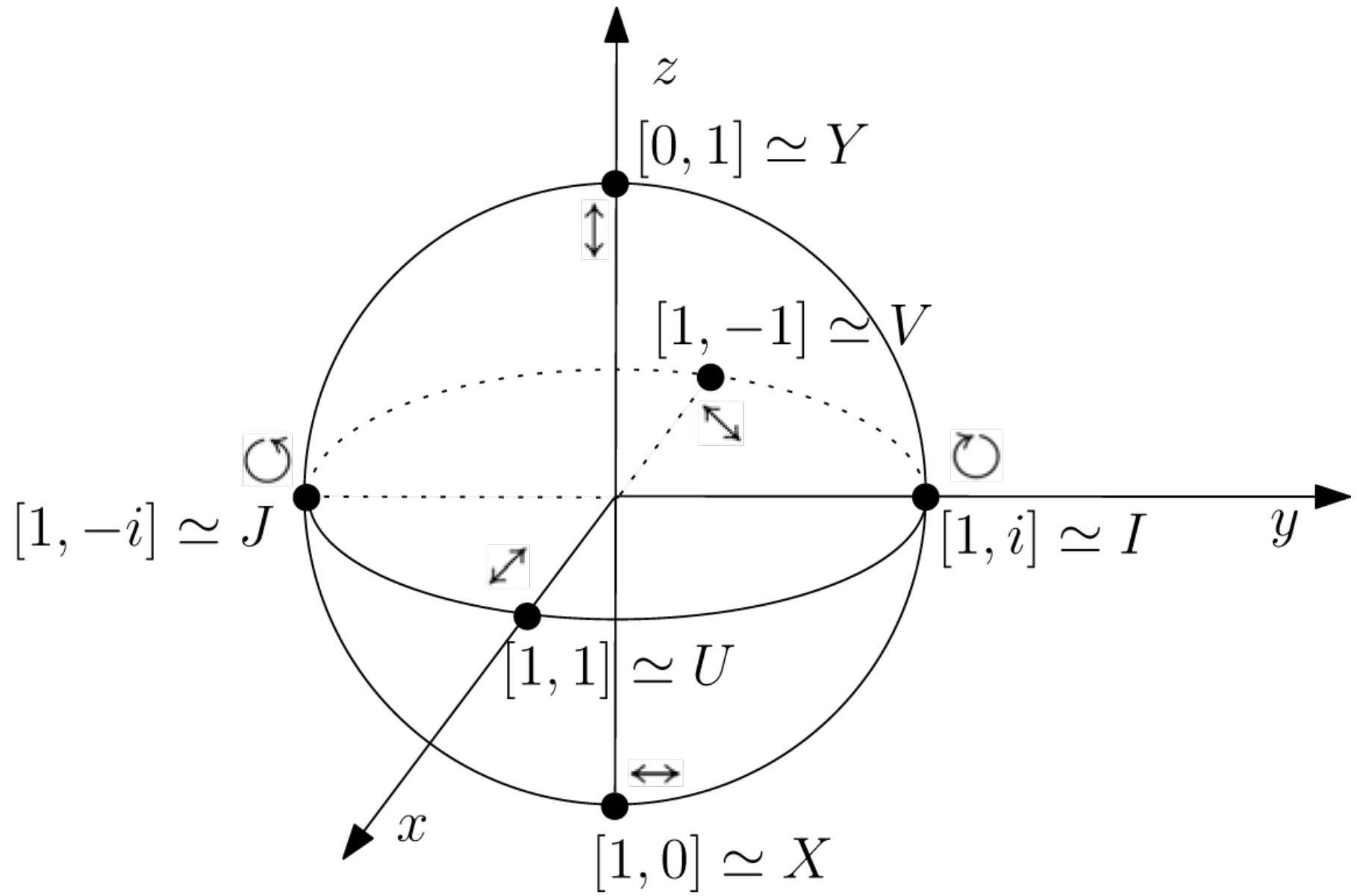
L'esfera de Riemann: $S^2 \simeq \hat{\mathbb{C}}$ (estructura complexa de S^2)



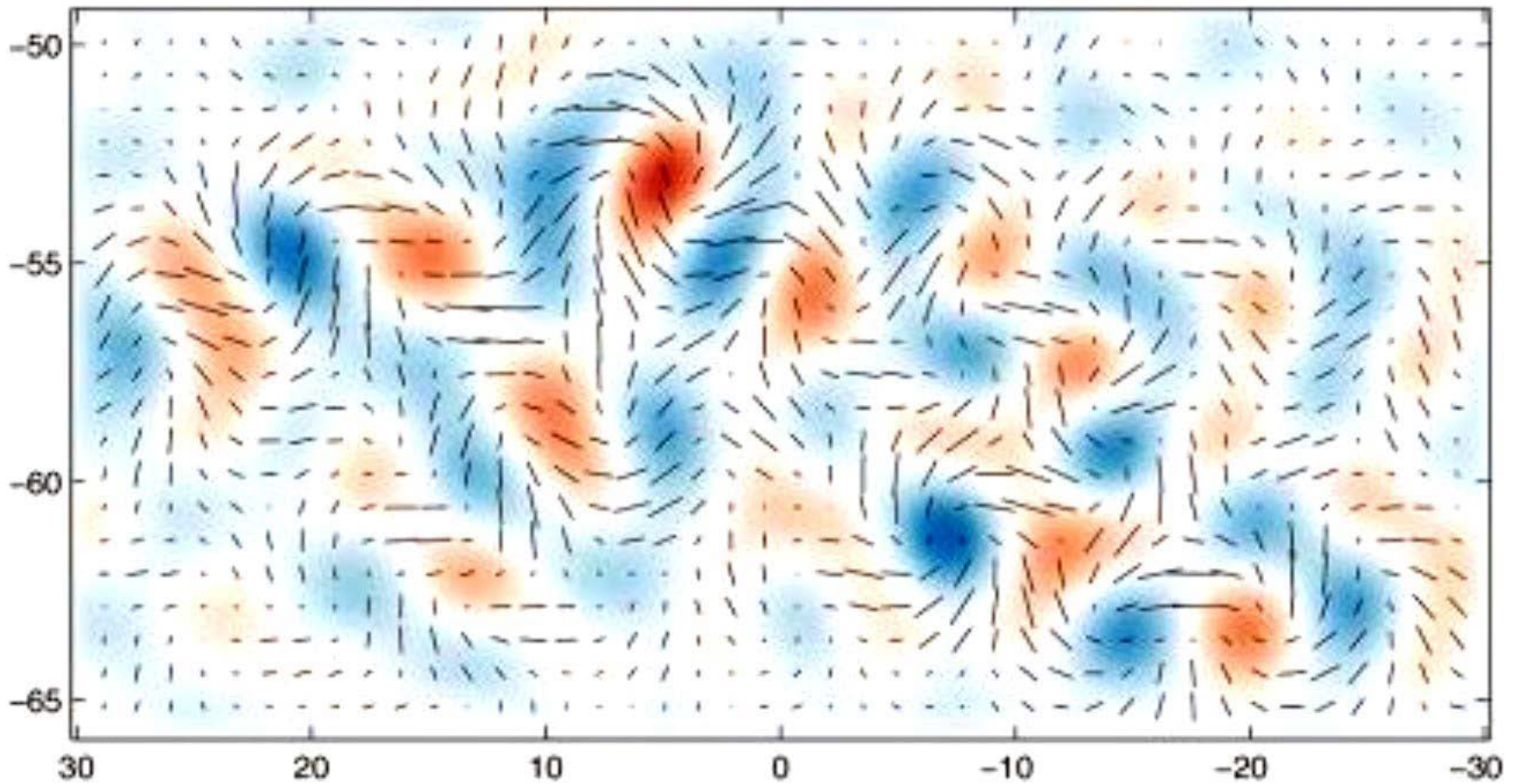
L'esfera de Poincaré. Estats (vectors) de polarització de la llum:

$$[E_{0x}e^{i\phi_x}, E_{0y}e^{i\phi_y}] \in \mathbf{P}_{\mathbb{C}}^1 \simeq \hat{\mathbb{C}} \simeq S^2$$

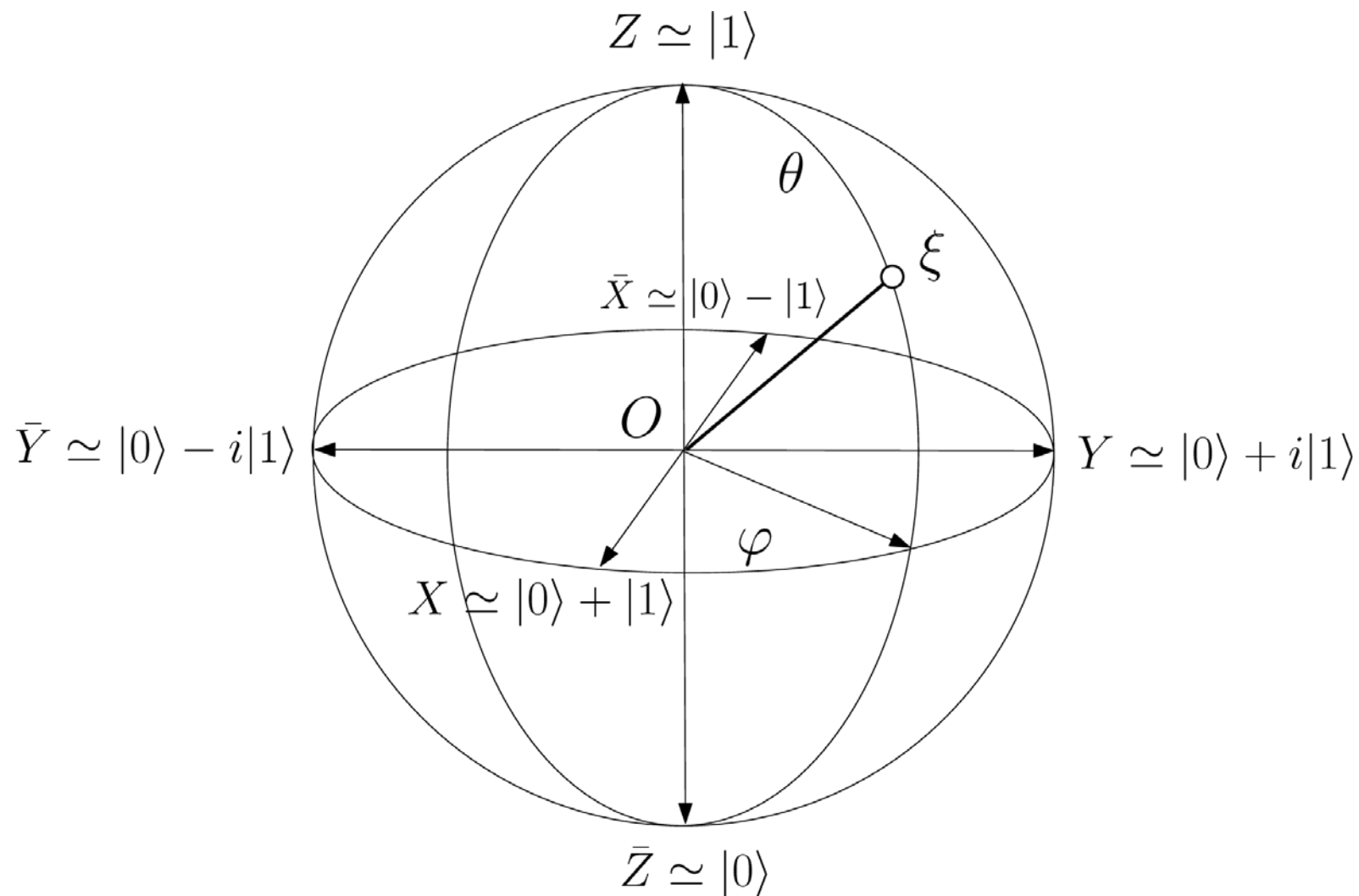




Bicep2 (març 2014). Planck (setembre 2014).



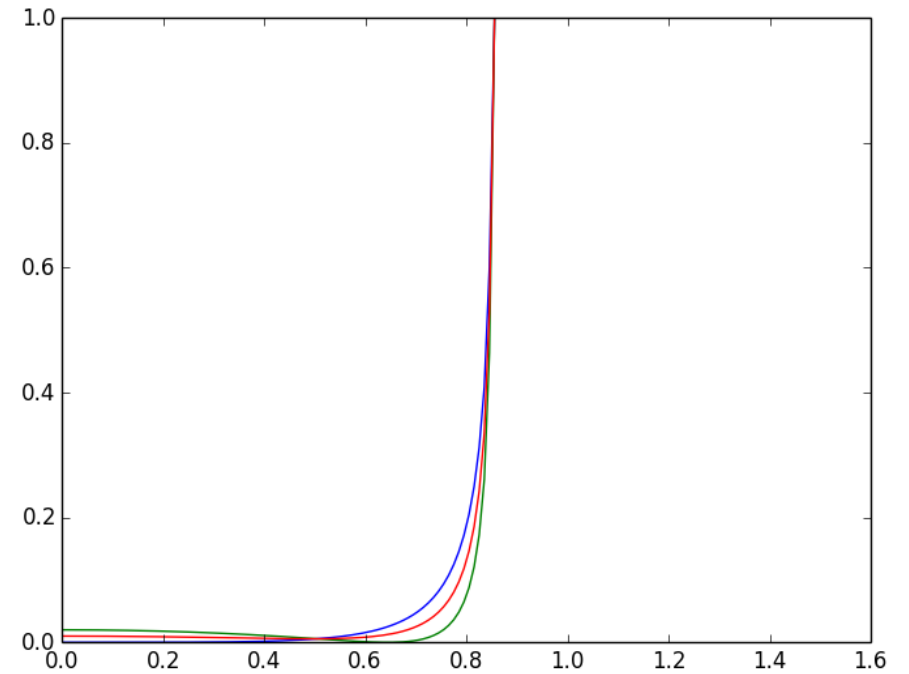
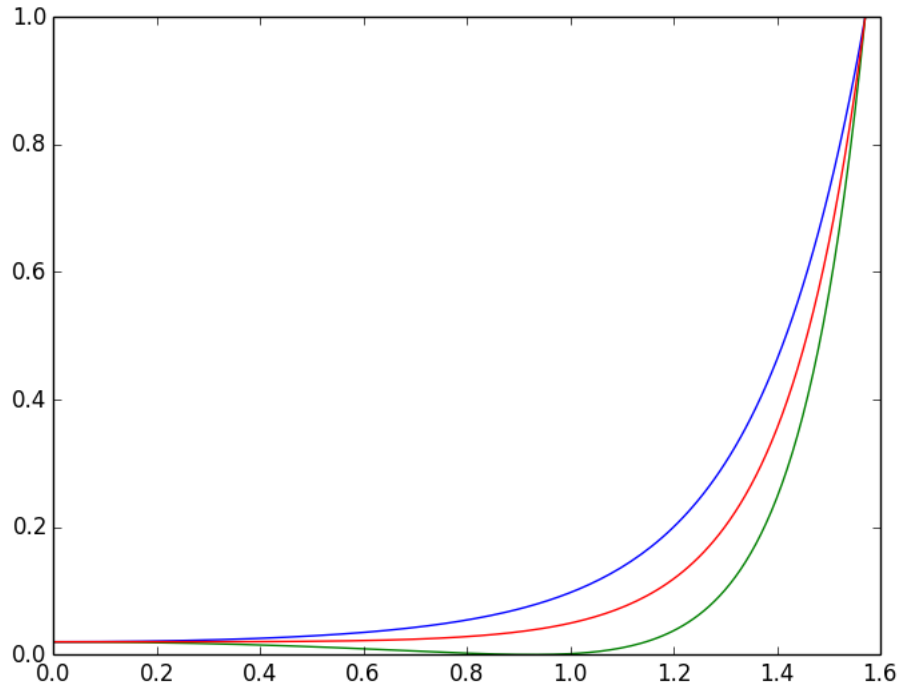
L'esfera de Bloch. Estats purs d'un q -bit:



$$|\xi\rangle \simeq e^{-i\varphi/2} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\varphi/2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle$$

CLOENDA

Explicació de l'arc de Sant Martí (Nussenzveig-1977).

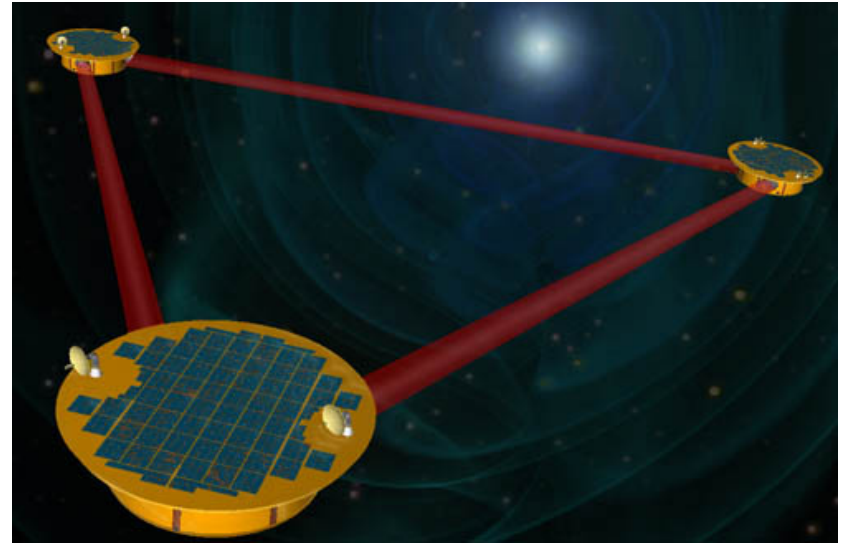


(cf. Nussenzveig-1977, p. 123)

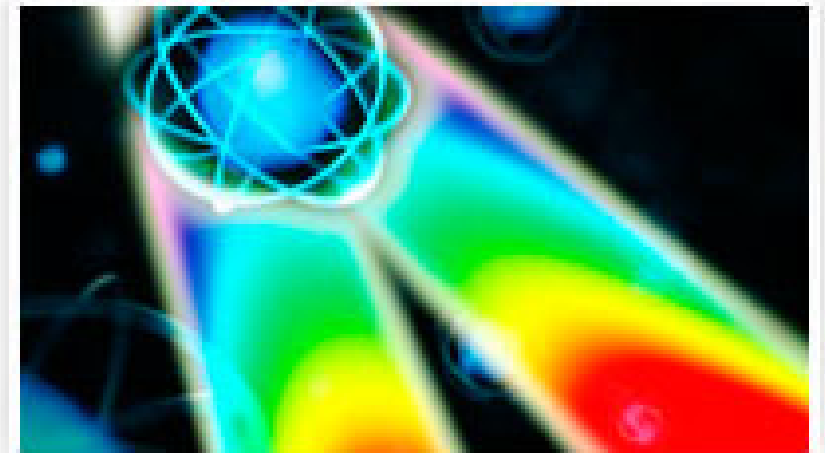
Esfera celeste relativista (Penrose-2005, 18.5).

Bicep2 i Planck.

Projecte Lisa (per detectar ones gravitacionals)



Institu de Ciències Fotòniques
(ICFO)



CURSOS FME: DEDICATS A ...

<http://www.fme.upc.edu/fme/activitats-de-1-fme>

- 2003-2004: Poincaré
- 2004-2005: Einstein
- 2005-2006: Gauss
- 2006-2007: Euler
- 2007-2008: Riemann
- 2008-2009: E. Noether
- 2009-2010: von Neumann
- 2013-2014: Lagrange

EL ÁRBOL DE LA MATEMÁTICAS

GALERÍA DE MATEMÁTICAS, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

<http://www.arbolmat.com/>

- Juan Ignacio Cirac
- Emilio Elizalde
- Pedro Luis García Pérez
- Amable Liñán
- Jaume Llibre i Saló
- Carles Simó Torres
- Mateo Valero Cortés
- Sergio Verdú



Moltes gràcies!

REFERÈNCIES

Adam, John: *Mathematics in nature—modelling patterns in the natural world*. Princeton University Press, 2003.

Asimov, Isaac: *New guide to science*. Penguin books, 1987.

Baierlein, Ralph: *Newto to Einstein—the trail of light*. Cambridge University Press, 1992.

Bourge-Lacrouc-2014: *Observar el cielo a simple vista o con prismáticos*. Larouse, 2014 (© 2004).

Boyer, Carl: *The rainbow. From myth to mathematics*. Princeton University Press, 1987.

Carré, Rom: *Great scientific experiments. Twenty experiments that changed our view of the world.* Oxford University Press, 1981.

Durán, Antonio: *El ojo de Shiva, el sueño de Mahoma, Simbad... y los números.* Destino, 2012.

Elmore, William C., Heald, Mark A.: *Physics of waves.* Dover, 1985 (McGraw Hill, 1969).

Feynman, Richard: *QED. The strange theory of light and matter.* Princeton University Press, 1985.

Greenler, Robert: *Rainbows, halos, and glories.* Cambridge University Press, Paperback, 1989.

Heath, Sir Thomas: *A history of Greek mathematics*. Volume I: *From Thales to Euclid*. Volume II: *From Aristarchus to Diophantus*. Dover, 1981.

Nussenzveig, Moysés: *The theory of the rainbow*. Scientific American, 1977.

Penrose, Roger: *The road to reality. The complete guide to the laws of the Universe*. Knopf, 2005.

Procivel-2014: *Planisferio celeste: el firmamento todos los días del año en la latitud 40° N*. Ediciones Procivel.

Russell, Bertrand: *A history of the western philosophy*. Unwin paperbacks, 1979.

Shamos, Morris H. (ed.): *Great experiments in physics. First-hand accounts from Galileo to Einstein*. Dover, 1987 (reproducció de l'original de 1959 publicat per Holt, Rinehart and Winston).

REFERÈNCIES BIOGRÀFIQUES (ordenades per data de naixement)

L'ordre és segons la data de naixement. Moltes les dates de l'antiguitat s'han d'interpretar com aproximacions.

Tales de Milet (−635, −545). Matemàtic. Astrònom. Considerat com el *fundador de la filosofia occidental*. Fundador de l'escola de Milet.

Anaximandre de Milet (−611, −546). Filòsof. Científic. Deixeble de Tales de Milet. Introdueix la idea que la terra flota a l'espai

Pitàgores of Samos (−570, −495). Matemàtic. Filòsof.

Anaxagoras (−510, −428). Argumenta que la llum de la lluna és reflectida. Explicació correcta dels eclipsis.

Oenopides de Quíos (segle -V). Geòmetra. Astrònom. El primer a mesurar la inclinació de l'eclíptica. Introducitor del Gran Any (59 anys = 730 mesos).

Euclides (–325, –265). Matemàtic. Òptica geomètrica. *Elements*.

Plató (–427, –347). Filòsof (platonisme). Fundador de l'Acadèmia. *Diàlegs*.

Teetet d'Atenes (–414, –369). Matemàtic. Personatge d'un diàleg de Plató del mateix nom (sobre la natura del coneixement).

Èudox de Cnidos (–408, –355). Matemàtic. Astrònom. Metge. Filòsof. Dividí l'esfera celeste en graus de longitud i latitud. Elaborà un mapa d'estrelles. Establí la durada de l'any en 365 dies i 6 hores. Mètode d'exhaustió. Volum del con i la piràmide.

Heràclides de Ponto (–390, –310). Astrònom. Filòsof. Proposà que la terra gira sobre si mateixa en 24 hores.

Euclides (–325, –265). Matemàtic. Òptica geomètrica. *Elements* (segons Russell-1979, «one of the greatest books ever written»). Mètode axiomàtic-deductiu. Síntesi de la matemàtica grega fins –300.

Aristarc de Samos (−310, −230). Hipòtesi heliocèntrica (copernicana).

Arquimedes de Siracusa (−287, −212). Matemàtic, físic, enginyer, astrònom, filòsof. Morí assassinat el −212 per un soldat romà durant el saqueig de Siracusa comandat per Marcel.

Eratòstenes (−276, −195). Matemàtic. Geògraf. Astrònom. Poeta.

Apol·loni de Pèrgam (−262, −190). Geòmetra. Astrònom. Físic (hidrostàtica). *Sobre les seccions còniques*. Introducitor dels termes el·lipse, paràbola i hipèrbola. Model d'epicicles, base del posterior sistema ptolemaic.

Hiparc de Nicea (−190, −120). Astrònom, geògraf i matemàtic grec, també conegut com a Hiparc de Rodes. Inventor de l'astrolabi. Introducitor de la trigonometria. Va descobrir la precessió dels equinoccis. Catàleg de 850 estrelles, amb les seves coordenades esfèriques. Seguidor del model d'epicicles d'Apol·loni (en lloc del model heliocèntric d'Aristarc).

Heró d'Alexandria (10, 75). Matemàtic. Enginyer. Inventor.

Ptolemeu, Claudi (85, 165). Astrònom, geògraf i matemàtic.

Sahl, Ibn (940, 1000). Matemàtic, físic i enginyer òptic. L'any 984 va descobrir la *llei de refracció*.

Albertus Magnus (~1206, 1280). Patró de les ciències naturals. *Física, lògica, metafísica, biologia, psicologia*. Primer en proposar que l'arc de Sant Martí era produït per la interacció de la llum amb cada gota esfèrica.

Teodoric de Freiberg (1250, 1310). Primera explicació correcta, en el marc de l'òptica geomètrica, de l'arc de Sant Martí. El seu treball fou un model d'investigació científica (verificació experimental de les hipòtesis).

Galileu Galilei (1564, 1642). Físic, matemàtic, enginyer, astrònom i filòsof. Figura capital de la revolució científica. Telescopi de refracció.

Kepler, Johannes (1571, 1630). Matemàtic, astrònom i astròleg. Figura clau de la revolució científica del XVII. Òptica (telescopi de Kepler).

Snell, Willebrod (1580, 1626). Astrònom i matemàtic. Descobreix la *Llei de refracció* (v. Sahl), però no la publica.

Girard Desargues (1591, 1661). Matemàtic. Fundador de la geometria projectiva (la geometria derivada de la intuïció visual de l'espai).

Descartes, René (1596, 1650). Filòsof. Matemàtic. *Discurs del mètode*. Primer gran mestre del mètode hipotètic-deductiu.

Fermat, Pierre de (1601, 1665). Matemàtic amateur. *Teoria de nombres*. *Geometria analítica*. *Càlcul diferencial*. *Probabilitat*. *Òptica*.

Huygens, Christiaan (1629, 1695). Matemàtic. Astrònom. Físic. Enginyer. *Teoria ondulatoria de la llum* (oscil·lacions longitudinals de l'èter). *Re-llotge de pèndol*. *Descobreix Titan*.

Newton, Isaac (1642, 1727). Físic i matemàtic. *Lleis de la mecànica*. *Gravitació universal*. *Òptica*. *Telescopi reflector*. Figura cabdal de la revolució científica. Un dels científics més influents de tots els temps.

Rømer, Ole Christensen (1644,1710). Determinació de la velocitat de la llum en el buit (1676).

Young, Thomas (1773,1829). Científic polifacètic: visió, òptica (teoria ondulatòria), mecànica, energia, fisiologia, llenguatge, harmonia musical, egiptologia.

Fresnel, Augustin-Jean (1788, 1827). Físic i enginyer. *Òptica ondulatòria*. Lent de \sim , equacions de \sim .

Foucault, Jean Bernard (1819, 1868). Físic. Pèndol de \sim . Mesura de la velocitat de la llum en el buit i en medis transparents.

Maxwell, James Clerck (1831, 1879). Físic matemàtic. Teoria del camp electromagnètic. Predicció de les ones electromagnètiques. La llum com a fenomen electromagnètic.

Lorentz, Hendrik Antoon (1853, 1928). Físic. Explicació teòrica de l'efecte Zeeman. Precursor de la teoria de la relativitat (transformacions de Lorentz).

Hertz, Heinrich Rudolf (1857-1894). Físic. Demostració experimental de l'existència d'ones electromagnètiques predites per Maxwell.

Poincaré, Jules Henri (1854, 1912). Matemàtic. Físic teòric. Enginyer. Mecànica celeste. Precursor de la teoria de la relativitat. Filòsof i divulgador de la ciència.

Planck, Max (1858,1947). Físic teòric. Iniciador de la física quàntica. Explicació de la distribució d'energia del cos negre.

Einstein, Albert (1879, 1955). Físic. *Relativitat. Física quàntica. Física estadística*. Predicció de l'efecte d'emissió estimulada, fonament teòric del làser.

Compton, Arthur (1892, 1962). Físic. Descobridor de l'efect Compton amb el qual va demostrar experimentalment l'aspecte corpuscular de la radiació electromagnètica predit per Einstein. Natura del ferromagnetisme i dels rajos còsmics.

Feynman, Richard (1918, 1988). Físic teòric. Formulació de la física quàntica mitjançant la integral de camins. Electrodinàmica quàntica. Diagrames de Feynman. Precursor de la computació quàntica i de la nanotecnologia. *The Feynman lectures on physics*.