

# ELS EXPERIMENTS DE FRANCESC ARAGÓ ESSENCIALS EN LA CREACIÓ DE LA TEORIA DE LA RELATIVITAT D'ALBERT EINSTEIN

**Carles Paul Recarens**

Departament d'Enginyeria de l'Escola Superior Politècnica (ESUPT) del Tecnocampus. Mataró. paul@tecnocampus.cat

**Resum:** El segle xx es va caracteritzar des d'un inici per ser un segle de grans avenços científics i tècnics. I sense cap dubte, comença el 1905 amb els articles d'Albert Einstein, sobre la teoria de la relativitat, el moviment brownià, l'efecte fotoelèctric i la relació entre la massa i l'energia. En aquest article es convida el lector a aprofundir en els orígens de l'elaboració de la relativitat en la ment d'Einstein. Es demostra que aquests orígens tenen un denominador comú, el científic Francesc Aragó, el qual va enginyar, construir i utilitzar amb habilitat uns experiments crucials en el segle XIX, bàsics per entendre la creació del segle xx.

**Paraules clau:** Francesc Aragó, Albert Einstein, Michael Faraday, disc d'Aragó, disc de Faraday, aberració estel·lar, èter lumínic.

## FRANCESC ARAGÓ'S EXPERIMENTS: AN ESSENTIAL FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF EINSTEIN'S RELATIVITY THEORY

**Abstract:** The 20th century was characterized by the achievement of great scientific and technical advances. Without a doubt, it all began in 1905 with Albert Einstein's articles on the theory of relativity, Brownian motion, the photoelectric effect and the relationship between mass and energy. In this paper, the reader is invited to delve into the origins of relativity's development in Einstein's mind, as we demonstrate that these origins have a common denominator, the scientist Francesc Aragó, who designed, built, and conducted crucial experiments in the 1800s that are essential to an understanding of the progress of the 20th century.

**Keywords:** Francesc Aragó, Albert Einstein, Michael Faraday, Aragó disk, Faraday disk, stellar aberration, luminiferous ether.

### Introducció

Albert Einstein va publicar l'article «Sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment» el 1905 (Einstein, 1905) fonamentant-se en dos postulats elementals: el principi de la relativitat i el principi de la constància de la velocitat de la llum. Amb el principi de la relativitat establia la hipòtesi que no existia el concepte de repòs absolut, no solament en relació amb les propietats de la mecànica, sinó també amb les de l'electrodinàmica. Amb el principi de la constància de la velocitat de la llum formulava la hipòtesi que la velocitat de la llum en l'espai buit sempre es propaga amb la mateixa velocitat, independentment de l'estat de moviment de l'emissor. Aquesta hipòtesi sembla incompatible amb el principi de relativitat, però d'aquesta manera Einstein podia prescindir de la hipòtesi de l'èter lumínic; hipòtesi necessària dins la teoria ondulatoria de la llum, que imposava l'existència d'un medi material, anomenat *èter lumínic*, que ocupa tot l'Univers i en el qual es propaga la llum com a ona.

No és casualitat que Einstein adoptés aquests dos principis. Henri Poincaré (1854-1912) ja havia establert

uns principis semblants, però sense arribar a abandonar la idea de l'èter o, el que és el mateix, mantenint els principis físics del segle XIX. En aquest sentit, Einstein adopta un nou punt de vista sobre la física i estableix el concepte de física moderna del segle XX. En el seu article és molt escàs en indicar els motius que l'indueixen a enunciar aquests principis i solament cita un únic experiment, el de la màquina unipolar:

A més, és evident que l'asimetria esmentada en la introducció, que sorgeix quan considerem els corrents produïts pel moviment relatiu d'un imant i un conductor, ara desapareix. D'altra banda, les qüestions relacionades amb «l'origen» de les forces electrodinàmiques electromotrius (màquines unipolars) ja no tenen sentit.<sup>1</sup>

Per entendre a què es referia Einstein amb el terme *màquina unipolar*, hem de retrocedir al gener de 1832, quan Michael Faraday (1791-1867) donava a conèixer el que seria el generador de corrent més simple, el disc de

1. Traducció de l'autor a partir de l'original en anglès, Einstein (1905).

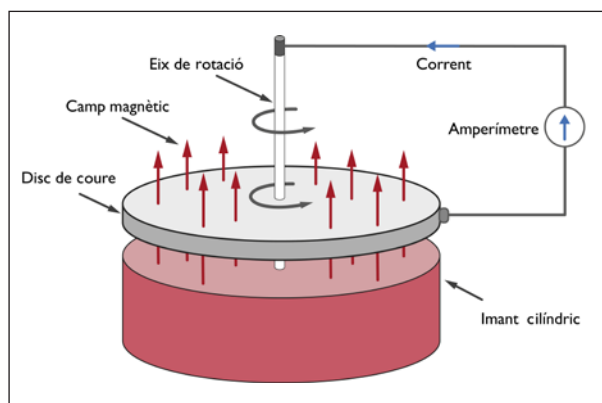


FIGURA 1. Esquema del disc de Faraday.  
FONT: Elaboració pròpia.

Faraday (figura 1), també anomenat *generador homopolar* o *màquina unipolar*. Essencialment està format per un disc de coure, que pot girar respecte del seu eix de simetria i de manera que es trobi proper a un dels pols d'un imant cilíndric (d'aquí el nom *unipolar*). S'observa que, quan el disc gira respecte a l'imant, apareix un corrent continu en el circuit i, si s'inverteix el sentit de gir, també s'inverteix el sentit del corrent generat.

Precisament en aquest experiment apareix el concepte de moviment relatiu entre el disc i l'imant que tant va fascinar Einstein. Aleshores, si l'experiment del disc de Faraday va ser la inspiració per al postulat sobre el principi de relativitat, ens preguntem: quin va ser l'experiment que va inspirar Einstein per al seu postulat sobre la constància de la velocitat de la llum? Generalment s'accepta que va ser l'experiment de Michelson-Morley, però Einstein sempre va negar conèixer-ne l'existència abans de publicar el seu article de 1905. Durant una entrevista realitzada per Shankland (Shankland, 1963) el 1950 a Princeton, Einstein va assegurar que els experiments que van determinar la seva influència sobre la teoria de la relativitat van ser el moviment d'un conductor en un camp magnètic, les observacions sobre l'aberració estel·lar i les mesures realitzades per Hippolyte Fizeau (1819-1896) sobre la velocitat de la llum en un medi en moviment.

A la correspondència amb Mileva Maric del 28 de setembre de 1899,<sup>2</sup> Einstein li escriu sobre un article que ha llegit del professor Wilhelm Wien (Wien, 1898), que tracta sobre les qüestions relatives al moviment de translació de l'èter lluminós, en qual Wien argumenta si l'èter participa o no en el moviment dels cossos i si se li pot atribuir alguna mobilitat. Al final de l'article enumera els experiments principals relacionats amb la mobilitat de l'èter. Entre ells destaquen l'aberració de la llum, l'experiment de Fizeau i l'experiment d'Aragó sobre si el moviment de la Terra influeix en la refracció de la llum procedent de les estrelles fixes. L'experiment de Michelson-Morley apareix en darrer lloc i, pel que es dedueix, Einstein no li va donar gens

d'importància, ja que era una repetició de l'experiment de Fizeau.

## Francesc Aragó i Roig

No ens sorprèn sentir el nom d'Albert Einstein o fins i tot el de Michael Faraday, però sí el nom de Francesc Aragó. No obstant això, darrere de tots els experiments que van condicionar Einstein es troba Aragó.

Francesc Aragó i Roig (1786-1853) va néixer el 26 de febrer de 1786 a Estagell (Pirineus orientals), situat a 25 quilòmetres de Perpinyà. El seu pare, Francesc Bonaventura Aragó (1754-1814), era una persona instruïda, va obtenir el títol de llicenciat en dret per la Universitat de Perpinyà, on va ser partidari de la Revolució Francesa des de l'inici, i es va convertir en l'alcalde del poble d'Estagell, entre altres càrrecs públics. Va prendre part activa en la resistència contra els espanyols que van envair el Rosselló durant la Guerra dels Pirineus o Guerra de la Convenció, declarada per la República Francesa contra Espanya el 7 de març de 1793.

L'any 1796, la família Aragó es va traslladar a Perpinyà, on Francesc Aragó va iniciar els estudis a l'escola municipal. Aragó explica en les seves memòries de joventut (Aragó, 1854) que la casualitat el va fer coincidir, tot passejant per Perpinyà, amb un jove oficial d'enginyeria, François Cellini de Creyssac, que estava dirigint unes reparacions a la muralla de la ciutat. Després d'intercanviar unes paraules, Cellini li va comentar que havia obtingut la titulació a l'Escola Politècnica de París (École Polytechnique de Paris) i que s'hi accedia mitjançant un examen d'ingrés. Cada any el govern enviava el programa de l'examen a l'Administració local i es trobava publicat a la biblioteca de l'escola central. D'aquesta casualitat neix la història d'un dels científics més importants del segle XIX, ja que Aragó va ingressar a l'Escola Politècnica de París l'any 1803, amb disset anys.

Francesc Aragó estava dotat d'una gran cultura científica, d'una gran curiositat intel·lectual i d'una destresa manual envejable, i a més posseïa una atractiva capacitat oratòria. Va trobar el temps necessari per interessar-se en l'astronomia, la geofísica, la meteorologia, la termodinàmica, l'òptica, la fotografia i l'electromagnetisme, i destaca enormement en aquest últim camp científic. Va desenvolupar una llarga carrera científica des de 1805 fins a la seva mort, el 1853.

Les qualitats d'Aragó són les seves habilitats manuals, els seus estudis matemàtics i la seva gran curiositat. Aquestes característiques el van forçar de manera natural a participar activament en gairebé totes les novetats científiques de mitjans del segle XIX. És per això que l'activitat científica d'Aragó és abundant i variada. Els seus dots essencials són d'experimentador i observador, deixant per als altres la recerca de les teories. Tenia un gran entusiasme per tots els nous dominis de la ciència i es precipitava en la recerca i investigació de qualsevol camp que l'interessés.

2. <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol1-doc/301>.

## Disc d'Aragó

Els esdeveniments històrics, igual que la ciència, estan subjectes al principi de causalitat: hi ha un abans i un després, una causa i un efecte. La invenció de la pila d'Alessandro Volta (1746-1827), a començaments de 1800, va crear la font d'energia elèctrica necessària perquè Hans Christian Ørsted (1777-1851) descobrís l'electromagnetisme el 1820. Així doncs, Aragó es troba immers en l'època i el lloc idonis per al naixement de la nova teoria de l'electromagnetisme.

Precisament Francesc Aragó es troba a Ginebra el 1820 i pot conèixer i experimentar el descobriment d'Ørsted en una sessió preparada per Charles-Gaspard de La Rive (1770-1834) amb una pila de què disposa. En tornar a París, Aragó publica una traducció al francès de l'original en llatí (Aragó, 1820) i repeteix els experiments a l'Acadèmia de Ciències l'11 de setembre de 1820. André-Marie Ampère (1775-1836) hi és present i queda fortament impressionat; a partir d'ara centrarà el seu interès en aquest nou camp de recerca, ja que fins llavors estava convençut que l'electricitat i el magnetisme eren fenòmens independents. L'enginyer d'Ampère i l'habilitat experimental d'Aragó, conjuntament amb Augustine Fresnel (1788-1827), s'uneixen per obtenir un experiment decisiu, la balança d'Ampère. L'experiment es disposa de forma que dos fils conductors paral·lels poden oscil·lar lliurement, de manera que, quan hi circula un corrent, aquests es mouen. S'ajunten si els corrents són del mateix sentit i se separen si són de sentits oposats. El 25 de setembre de 1820 donen a conèixer aquest resultat experimental sobre l'atracció i la repulsió entre corrents (Ampère, 1820).

El resultat experimental d'aquest aparell sobre l'atracció i repulsió entre corrents és de gran importància en el desenvolupament de l'electromagnetisme, ja que Ampère demostra amb aquest experiment que el magnetisme és una conseqüència de l'electricitat únicament. Malgrat tot, la versió que perdurarà és la de camp magnètic ideat per Faraday el 1831, per explicar l'electricitat i el magnetisme com a acció a distància. Ambdós creen la nova ciència de l'electrodinàmica: Ampère dona una interpretació geomètrica mitjançant forces, seguint la teoria newtoniana, mentre que Faraday s'allunya del concepte newtonià utilitzant camps elèctrics i magnètics que actuen a distància. Aquestes dues interpretacions queden unificades amb la teoria de la relativitat d'Einstein.

Davant de la frenètica investigació en magnetisme i corrents elèctrics, és necessari idear nous aparells experimentals per posar en pràctica les idees que van sorgir. André-Marie Ampère és un teòric sense destresa experimental i Francesc Aragó disposa d'una gran habilitat manual i sensibilitat en l'experimentació. Ampère era molt maldestre, poc hàbil manualment, li costava dibuixar una línia recta i fer un cercle o un quadrat li era gairebé impossible; a més, era lent en els moviments. No obstant això, disposava d'una ment ràpida i un talent natural per al raonament teòric; la seva imaginació i memòria eren espectaculars,

fins a retenir els detalls més minuciosos. Podem dir que Ampère es dedicava a la meditació teòrica i Aragó a l'acció; aquest últim es comparava amb la manera de ser de Faraday. Per pal·liar aquesta mancança experimental, Ampère disposava del suport d'Aragó i Fresnel (1788-1827), que, amb la seva habilitat manual, l'ajudaven sempre que podien en els experiments sobre electromagnetisme, tant al laboratori com en les exposicions públiques.

Francesc Aragó es dedica durant dos anys, des de 1822 fins a 1824, a estudiar el comportament de diversos materials sobre una agulla imantada en moviment. Durant l'estada que va realitzar conjuntament amb Biot i Humboldt (1769-1859) a Anglaterra el 1819 per comparar la longitud del pèndol respecte a les seves oscil·lacions, descobreix un fet altament estrany a la vessant del turó de Greenwich. Els resultats de les observacions sobre el pèndol no eren tan satisfactòries com haurien desitjat. Llavors Aragó es proposa mesurar la intensitat magnètica considerant la mitjana de les oscil·lacions d'una agulla d'inclinació, que consisteix en una brúixola convencional, però situada verticalment, que dona el valor de la inclinació del camp magnètic en un punt de la superfície. Aragó va percebre que l'agulla magnètica, posada en moviment, arribava més sovint al repòs quan estava col·locada en la proximitat de substàncies metàl·liques que quan n'estava lluny. D'aquesta manera experimental descobreix el magnetisme de rotació, com és el cas que una agulla imantada en moviment és immobilitzada per un disc de coure en repòs, sense cap contacte mecànic. Aquest experiment contradiu els principis bàsics de la mecànica newtoniana. El coure no és un material magnètic; en repòs no és atret per un imant, i, en canvi, en moviment actua com si ho fos. Aragó pensa que ha d'existir una simetria contraposada, és a dir: si fa girar el disc sota una agulla imantada en repòs, aquesta hauria de moure's per complir el tercer principi de la mecànica d'acció-reacció. En efecte, comprova que està encertat en la hipòtesi i es pregunta quines lleis dominen aquest estrany fenomen. Dona a conèixer els seus resultats experimentals el 22 de novembre de 1824 als *Annales de Chimie et de Physique* (Aragó, 1824). Va anomenar aquest fenomen *magnetisme de rotació* i avui dia el coneixem com a *disc d'Aragó*:

El senyor Aragó comunica verbalment els resultats d'alguns experiments que ha realitzat sobre la influència que els metalls i moltes altres substàncies exerceixen sobre l'agulla magnètica, i que té l'efecte de reduir ràpidament l'amplitud de les oscil·lacions sense alterar-ne significativament la durada.<sup>3</sup>

El disc d'Aragó va tenir una forta repercussió científica a la dècada de 1820 i va ser la causa dels nous descobriments en electromagnetisme. Això va provocar que el segle XIX fos el segle de les ciències físiques i representés el llançament d'una nova revolució científica, la revolució de les màquines elèctriques.

3. Traducció de l'autor a partir de l'original en francès, Aragó (1824).

## Disc de Faraday

Michael Faraday es trobava ocupat utilitzant la pila de Volta en aplicacions químiques com l'electròlisi, però abandona el seu interès per la química i es dedica plenament a l'electromagnetisme, donada la incomprensió que li provoquen el disc d'Aragó i la teoria d'Ampère.

En els seus *Experimental researches in electricity* de gener de 1832 (Faraday, 1832), Michael Faraday donava a conèixer el que seria el generador de corrent continu més senzill, el disc de Faraday. Com hem dit, està format per un disc de coure, que pot girar respecte al seu eix de simetria, col·locat de manera que aquest eix coincideixi amb l'eix de simetria d'un imant cilíndric (figura 1). Es fa una connexió mitjançant un circuit elèctric estàtic entre l'eix i la perifèria del disc en rotació utilitzant un contacte lliscant. S'observa que, quan el disc gira respecte a l'imant, apareix un corrent continu induït en el circuit i, si s'inverteix el sentit de gir, també s'inverteix el sentit del corrent generat. Passa el mateix si es canvia la polaritat de l'imant. Fixem-nos amb més detall en el que significa aquest experiment per a Einstein. El corrent es genera independentment de si gira el disc de coure o gira l'imant. El que produeix el corrent induït és el moviment relatiu entre el disc i l'imant. No apareix en cap moment un moviment absolut de referència; aquest efecte de no distingir entre quin es mou respecte d'un altre és el que dona nom a la teoria de la relativitat d'Einstein.

Vegem a continuació les bases experimentals que formen els orígens del segon postulat o principi de constància de la velocitat de la llum.

## Paral·laxi i aberració estel·lars

Una de les objeccions bàsiques al model heliocèntric de Copèrnic era que no s'havia detectat cap moviment de les

estrelles respecte a la Terra. Quan observem el cel, les estrelles semblen trobar-se en una cúpula bidimensional, és a dir, sembla que les estrelles es troben totes a la mateixa distància de la Terra, girant a l'uníson amb la mateixa velocitat. Determinar la distància de les estrelles i trobar una variació en el seu moviment era fonamental per donar credibilitat al model heliocèntric. Es denomina *paral·laxi estel·lar* el desplaçament aparent observat de les estrelles a causa del moviment de la Terra al llarg d'un any. És semblant a observar un objecte llunyà amb els ulls col·locant un dit a prop del nas: si tanquem l'ull dret, l'objecte llunyà el veiem a l'esquerra del dit, i si tanquem l'ull esquerre, l'objecte apareix a la dreta. Aquest efecte es denomina *paral·laxi*.

El mateix succeeix amb el moviment de la Terra al llarg de la seva òrbita (figura 2). Si amb un telescopi ens fixem en una estrella el mes de gener, podem observar que hi haurà unes altres estrelles que se situen a l'esquerra de l'estrella. Esperem mig any i tornem a observar l'estrella amb el telescopi; llavors les estrelles situades a l'esquerra el mes de gener ara apareixeran a la dreta de l'estrella observada.

Robert Hooke (1635-1703) es va decidir a concebre una manera de mesurar la paral·laxi estel·lar i demostrar per sempre el moviment de la Terra. El juliol de 1669 va anunciar que havia detectat la paral·laxi de l'òrbita terrestre en l'estrella  $\gamma$  Draconis (Hooke, 1674); era la primera vegada que s'establí una comprovació experimental del moviment de la Terra al voltant del Sol. Cal recalcar que Hooke va fer les observacions amb instruments propers al límit de la precisió necessària per detectar aquest moviment. Altres astrònoms es van aventurar a corroborar els resultats de Hooke, un dels quals va ser James Bradley (1693-1762), utilitzant un telescopi amb més precisió. Efectivament, va detectar la paral·laxi estel·lar de  $\gamma$  Draconis, però apareixia un desfasament de tres mesos respecte a la posició esperada. El mateix va succeir en mesurar la paral·laxi d'una altra estrella, 35 Camelopardalis.

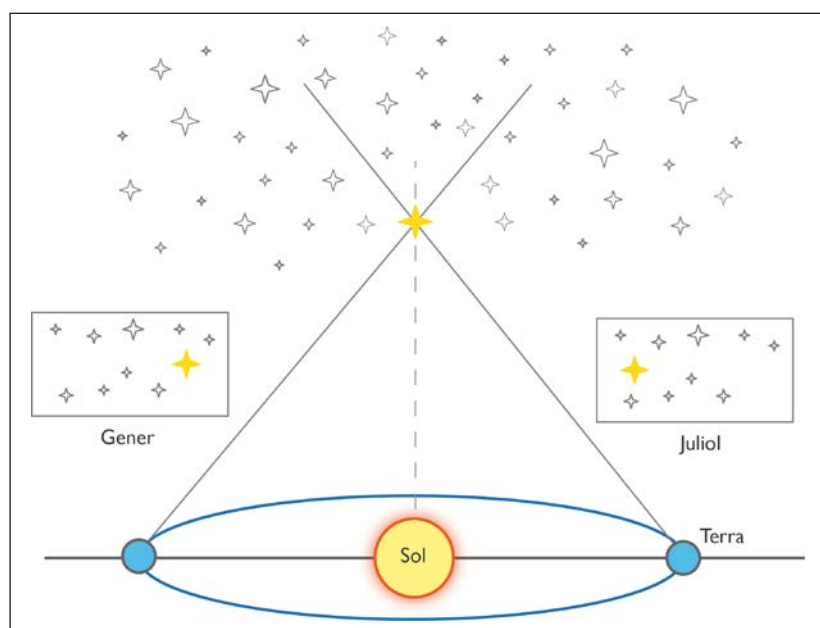


FIGURA 2. Paral·laxi estel·lar.  
FONT: Elaboració pròpia.

Els resultats finals obtinguts per Bradley indiquen que les estrelles realitzen un moviment aparent anual amb una amplitud total de 40,5 segons d'arc. Els resultats més acurats van indicar una desviació màxima de les estrelles respecte a la seva posició mitjana d'uns 20,4 segons d'arc.

Vegem què significa mitjançant el següent exemple gràfic (figura 3), en què es mostra la posició de la Terra des de quatre posicions diferents a intervals de tres mesos. En el sistema de referència terrestre, l'altitud de l'estrella respecte a l'eclíptica assoleix un angle determinat. Seguint aquest esquema de la paral·laxi estel·lar, l'altitud de l'estrella és màxima quan la Terra es troba a la posició C i mínima quan es troba a la posició A. No obstant això, les observacions de Bradley sobre  $\gamma$  Draconis indicaven que l'altitud era màxima a la posició D i mínima a la posició B, justament en el punt on la velocitat de la Terra és en la direcció de l'estrella. En la posició B la Terra es mou en sentit cap a l'estrella i en la posició D en sentit contrari. Aquesta combinació entre la velocitat de la Terra, en el seu moviment al voltant del Sol, i la velocitat de la llum que arriba a la Terra procedent de l'estrella provoca una oscil·lació en el seu moviment aparent. Aquest efecte es va denominar *aberració estel·lar*.

Bradley va deduir correctament que l'existència de l'aberració estel·lar indicava que la velocitat de la llum era finita i no es propagava instantàniament (Bradley, 1727). A més, va donar una explicació senzilla sobre el motiu de la variació de l'angle en l'observació d'una estrella al llarg de l'òrbita terrestre. Imaginem que anem caminant pel carrer en un dia plujós. Quan caminem lentament, per no mullar-nos, mantenim el paraigua totalment cap amunt, perpendicular amb el terra, perquè la pluja cau perpendicular a nosaltres. Però, si comencem a córrer, ens mullarem, ja que la pluja cau inclinada cap a nosaltres. Per no mullar-nos hem d'inclinar el paraigua en la direcció del moviment per aconseguir que la tela es trobi perpendicular a la pluja.

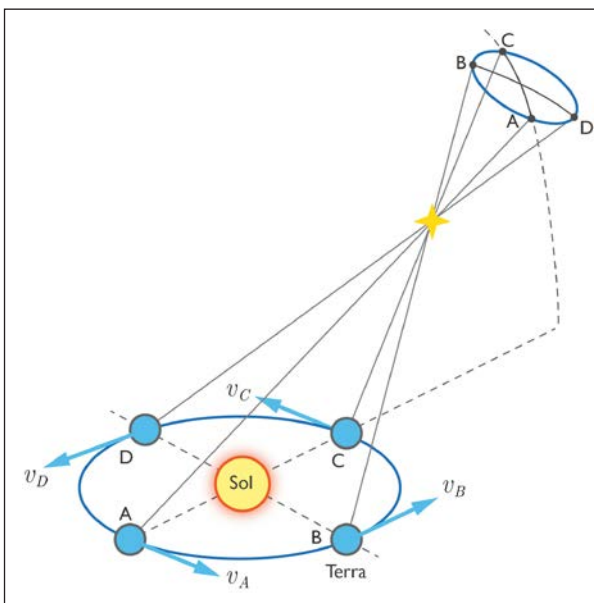


FIGURA 3. Aberració estel·lar.  
FONT: Elaboració pròpia.

Si substituïm al paraigua pel telescopi i la pluja per la velocitat de la llum procedent d'una estrella, obtenim l'aberració estel·lar, la qual depèn de la velocitat del telescopi, és a dir, de la Terra, i de la velocitat de la llum (figura 4).

Vegem a continuació en detall en què consisteix l'aberració estel·lar seguint la il·lustració anterior de la figura 4. Podem apreciar el moviment aparent d'una estrella amb una altitud determinada en el sistema de referència terrestre. Per observar l'aberració estel·lar amb un telescopi situat a l'eix de referència de l'eclíptica terrestre i apuntant directament a l'estrella, haurem d'inclinar-lo precisament un angle  $\theta$ . Amb aquesta configuració els raigs de llum procedents de l'estrella passen a través del telescopi directament de la lent a l'ocular. En canvi, segons el moviment de la Terra, ja sigui acostant-se o allunyant-se de l'estrella, la inclinació del telescopi variarà un angle determinat. Considerem el sistema de referència en repòs S quan la llum procedent de l'estrella travessa el telescopi en una posició d'inclinació de  $\theta$  graus (figura 4a). En el sistema de referència del telescopi en moviment S', aquest ha d'inclinar-se un angle  $\theta'$  perquè la llum procedent de l'estrella el travessi. Quan s'acosti cap a l'estrella (figura 4b), l'angle serà menor, i quan se n'allunyi (figura 4c), serà major. Tornant a observar la figura 3, cal esperar que l'altitud sigui mínima quan la Terra es trobi a la posició B i màxima quan es trobi a la posició D.

Francesc Aragó va començar de manera rutinària les observacions astronòmiques el 1805, com a treball per mesurar el pas del temps, les declinacions de les estrelles, les observacions dels eclipsis dels satèl·lits de Júpiter i les ocultacions de les estrelles per la Lluna. Això el va portar a mesurar el meridià que passa per Catalunya i a una sèrie d'aventures. No va tornar a les observacions fins a l'any 1809 i va començar a interessar-se per diversos experiments relacionats amb la velocitat de la llum i la refracció, a suggeriment de Pierre-Simon Laplace (1749-1827). El resultat de les seves observacions va ser comunicat el 10 de desembre de 1810 a la primera classe de l'Institut (Aragó, 1810), però no va ser publicat fins a 1835 a l'Acadèmia de les Ciències. Aquest treball va ser esmentat per Laplace a *Exposition du système du monde* i per Biot al seu *Traité élémentaire d'astronomie physique*.

Segons la teoria corpuscular de Newton, la llum havia de viatjar més ràpid en un medi dens que en un medi més fluid. Aquest resultat teòric li va suggerir a Aragó un experiment per mesurar-ne la velocitat. La idea consistia a determinar l'augment de la velocitat de la llum en passar d'un medi a un altre medi més dens. Així doncs, quan s'observés la llum procedent de les estrelles amb un telescopi ple d'aigua, s'hauria de detectar una aberració diferent a causa de la variació de la velocitat de la llum en aquest medi, respecte d'un telescopi normal, amb aire. Aquesta és una idea preliminar que Aragó desenvolupa i intenta emprar tots els mitjans, amb la màxima precisió possible segons els instruments de la seva època, per determinar la veritable naturalesa de la llum.

John Michel (Michel, 1784) havia suggerit que la velocitat de la llum procedent de les estrelles havia de variar se-



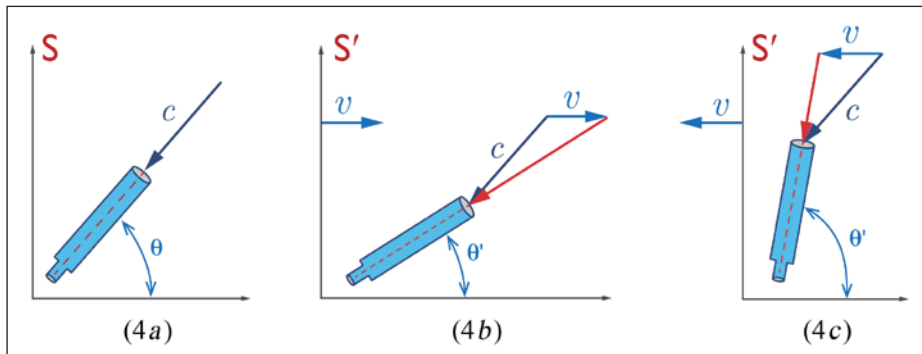


FIGURA 4. Esquema de telescopi i aberració estel·lar, on  $c$  indica la velocitat de la llum,  $v$  la velocitat de la Terra,  $\theta$  la inclinació del telescopi sense l'aberració i  $\theta'$  la inclinació del telescopi amb aberració.  
FONT: Elaboració pròpia.

gons la seva brillantor i mida. Considera, a més, que la gravetat de l'estrella podria afectar la velocitat de la llum i arribar a evitar fins i tot que surti de l'estrella en el cas d'una gravetat prou gran. Fixem-nos que aquesta és una idea preliminar sobre l'existència dels forats negres.

Aleshores, Arago va suposar que s'haurien d'observar diferències en la velocitat de la llum en funció del moviment de translació de la Terra, perquè el moviment de la Terra s'hauria de combinar amb el moviment de l'estrella. Tenim, en conseqüència, que Arago, a suggeriment de Laplace i motivat per les idees de John Michel, es va proposar mesurar la diferència de la velocitat de la llum procedent de diferents estrelles i va detectar d'aquesta manera quan la Terra s'apropa a una estrella o se n'allunya. Seguint la suma de velocitats newtoniana, quan la Terra s'acosta a una estrella, la velocitat detectada de la llum ha de sumar-se a la de l'estrella (figura 5a), i quan la Terra se n'allunya, la velocitat detectada de la llum ha de restar-se a la de l'estrella (figura 5b).

En aquest punt, cal remarcar l'habilitat experimental d'Aragó per aconseguir la precisió necessària en els aparells de mesura per realitzar amb èxit aquestes observacions, les quals, entre altres, esdevindran amb el canvi de segle el detonant sobre la impossibilitat de detectar el moviment absolut de la Terra i l'origen de la relativitat especial per Albert Einstein.

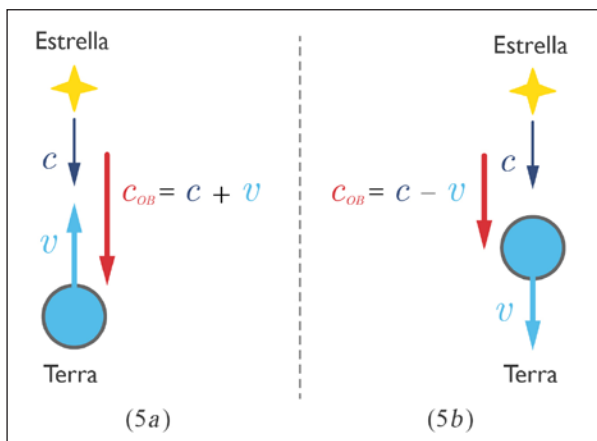


FIGURA 5. Velocitat de la llum observada ( $c_{ob}$ ) des de la Terra procedent d'una estrella, on  $c$  és la velocitat de la llum i  $v$  la velocitat de la Terra.  
FONT: Elaboració pròpia.

### Experiment d'Aragó

La mesura de l'angle de l'aberració estel·lar, com hem vist, és una mesura indirecta de la velocitat de la llum coneguda la velocitat de la Terra. El 1672 Giovanni Cassini (1625-1712) havia calculat la distància de la Terra al Sol. Prèviament havia mesurat la paral·laxi de Mart i, deduïda la distància amb la Terra i aplicada la tercera llei de Kepler, va poder calcular la distància de la Terra al Sol. Una vegada coneguts la distància i el període, és immediat el càlcul de la velocitat de translació terrestre. Arago coneix perfectament el seu valor, uns 30 km/s, que corresponen a 1/10.000 parts de la velocitat de la llum. Així, quan la Terra s'acosti a una estrella, la velocitat de la llum observada haurà d'augmentar en 1/10.000 parts i quan se n'allunyi haurà de disminuir en el mateix factor. Segons els càlculs d'Aragó, aquesta petita variació en la velocitat de la llum no és apreciable amb el mètode de l'aberració estel·lar, donat que una variació en la velocitat de la llum d'1/20 en la velocitat total correspondria a una variació d'1", precisió que no es pot obtenir amb els instruments de què disposa. Arago busca un mètode alternatiu i més precís. Tornant a aplicar la teoria newtoniana corpuscular de la llum, la seva velocitat augmenta quan passa a través d'un medi refractari (més dens que l'aire) i produeix una desviació en la direcció del raig de llum. Arago pensa que solament la velocitat de la llum relativa al prisma intervé en aquesta desviació. Per tant, com que el prisma es mou amb la Terra, la desviació de la llum es veurà afectada per aquesta velocitat, tal com s'il·lustra en la figura 6.

Per fer les mesures, Arago acobla un prisma acromàtic en l'ocular d'un telescopi i observa diverses estrelles a través d'aquest prisma, comparant la posició desviada respecte de la posició real. Segons els seus càlculs, hauria d'observar una desviació d'uns 6".

Els resultats experimentals obtinguts per Arago, com podem observar en la taula 1, no van mostrar signes de variació sobre la velocitat de la llum dins del marge d'error que esperava trobar. Donada l'absurditat dels resultats, Arago repeteix les observacions usant un altre prisma que millora el mètode d'observació, de manera que el nou prisma ocupa la meitat de l'ocular del telescopi i l'altra meitat es troba lliure. Amb aquesta configuració, pot observar directament les estrelles a través de l'aire i a través del pris-

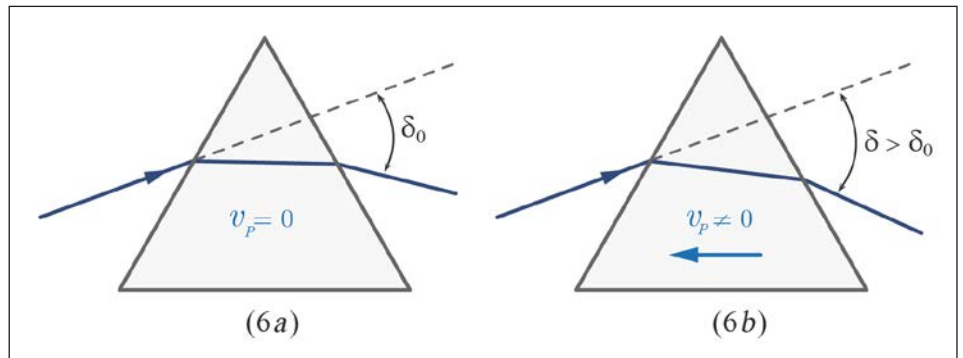


FIGURA 6. Desviació de la llum en travessar un prisma: a) el prisma no es mou; b) el prisma es mou amb velocitat  $v_p$ .  
FONT: Elaboració pròpia.

ma indistintament. D'aquesta manera es poden obtenir desviacions teòriques de fins a 14". A la taula 2 es mostren els resultats mesurats el 8 d'octubre de 1810.

TAULA 1  
Desviacions el 27 de març de 1810. S'indica quan es va observar l'estrella i la desviació mesurada

Temps	Estrella	Desviació
18:18	$\alpha$ Orió	10° 4' 33".28
19:55	Càstor	10° 4' 27".92
20:02	Proció	10° 4' 32".31
20:06	Pòl·lux	10° 4' 32".78
21:51	$\alpha$ Hidra	10° 4' 30".21
00:12	$\beta$ Leo	10° 4' 30".21
01:47	Spica	10° 4' 26".29
02:39	Arcturus	10° 4' 28".05
03:58	$\alpha$ Corona Boreal	10° 4' 31".39
04:49	Antares	10° 4' 28".19
04:58	$\zeta$ Ofiüc	10° 4' 29".64
01:04	$\gamma$ Virginis	10° 4' 27".80
01:18	$\delta$ Virginis	10° 4' 27".34
01:24	$\epsilon$ Virginis	10° 4' 31".42
23:37	$\delta$ Leo	10° 4' 34".02

FONT: Adaptat d'Eisenstaed i Combes (2011).

TAULA 2  
Desviacions el 8 d'octubre de 1810

Temps	Estrella	Desviació
19:26	$\alpha$ Àguila	22° 25' 9"
21:24	Cràter de la Lluna	22° 25' 9"
21:40	$\alpha$ Aquari	22° 25' 2"
2:35	$\alpha$ Balena	22° 25' 3"
4:08	Aldebaran	22° 25' 0"
4:48	Rigel	22° 24' 59"
5:28	$\alpha$ Orió	22° 25' 2"
6:19	Sírius	22° 25' 8"

FONT: Adaptat d'Eisenstaed i Combes (2011).

Així doncs, l'experiment i els resultats obtinguts per Arago el 1810 indiquen misteriosament que no apareix la desviació esperada. La velocitat de la llum era la mateixa per a totes les estrelles i es conclou que la velocitat de la llum és independent de la font de la qual emana i de la distància que recorre abans d'arribar als nostres ulls. Aquest resultat va causar una gran controvèrsia i va ser l'origen d'altres experiments i mesures, sobretot per part de Fresnel i Fizeau. Aquests resultats experimentals són la hipòtesi de la constància de la velocitat de la llum establerta per Einstein el 1905. Cal destacar també que el resultat negatiu d'Aragó comportava una crítica a la validesa de la teoria corpuscular newtoniana de la llum i donava pas a la teoria ondulatoria defensada per Thomas Young (1773-1829) amb l'experiment de la doble esclatxa el 1801. Young fa passar un raig de llum a través de dues esclatxes paral·leles i el projecta sobre una pantalla, i el resultat són unes zones clares i fosques que es van repetint, fet que demostra que la llum es comporta com una ona. Si la llum es comportés com a partícules, solament s'haurien d'observar sobre la pantalla dues zones clares. Tanmateix, si la llum és una ona, necessita un medi per propagar-se, l'anomenat èter lumínic. Altrament, aquesta suposició contradiu l'observació sobre aberració estel·lar, llevat que l'èter romanguí immòbil al moviment de la Terra, donat que, si l'èter pròxim a la Terra fos arrossegat per aquesta, l'aberració no es produiria. Aquest concepte d'èter com a medi dens, invisible i, alhora, immòbil respecte a la Terra era difícil d'acceptar. Però així ho indicava el resultat negatiu de l'experiment d'Aragó. Aquesta contradicció va imposar en la ment d'Einstein que l'èter com a medi absolut no podia existir i va concloure que solament el moviment relatiu és perceptible i, com a tal, és impossible mesurar la velocitat de la Terra de forma absoluta, cosa que invalida la suma de velocitats de la teoria newtoniana. Acabava de néixer la teoria relativista d'Einstein.

### Conclusions

Podria semblar que les descobertes científiques apareixen després d'aplicar precisament el mètode científic, encara que no sabem gaire bé en què consisteix això del mètode científic. La realitat és més espectacular, la ciència es desen-

volupa al llarg del temps i dels científics, que a cada època van incorporant nous paradigmes i n'eliminen d'antics (Kuhn, 1962). Un experiment amb un resultat no esperat i inexplicable en una determinada època sorgeix com una idea brillant per a una nova teoria, que modifica el paradigma científic i inaugura una nova era.

No cal remarcar que Einstein va participar de manera crucial en la creació d'un nou segle xx científic i tècnic, basat en el domini de l'electromagnetisme. Convé destacar que aquest progrés es va iniciar al segle XIX, en les descobertes de Volta, Ørsted, Ampère, Faraday, Maxwell i altres. No obstant això, existeix un denominador comú en tots ells, Francesc Aragó. Dotat d'una gran cultura científica, curiositat intel·lectual, una destresa manual envejable i una atractiva capacitat oratòria, va trobar, a més, el temps necessari per interessar-se per l'astronomia, la geofísica, la meteorologia, la termodinàmica, l'òptica, la fotografia i l'electromagnetisme. Va desenvolupar la seva llarga carrera científica des del 1805 fins a la seva mort, el 1853.

Aquestes variades especialitats el van conduir a elaborar amb èxit dos experiments crucials en l'elaboració dels postulats de la teoria de la relativitat en la ment d'un jove Albert Einstein. L'experiment fallit en mesurar la velocitat de la llum procedent de les estrelles va conduir al postulat del principi de la constància de la velocitat de la llum, com una constant universal. La invenció del disc d'Aragó va proporcionar la base per al disc de Faraday i el seu enunciat de la inducció electromagnètica, fonament del postulat del principi de la relativitat d'Einstein.

En definitiva, el treball experimental desenvolupat per Francesc Aragó al llarg de la seva carrera científica al segle XIX va generar nous reptes que van concloure en l'elaboració de la teoria de la relativitat per Albert Einstein el 1905.

## Bibliografia

- AMPÈRE, André-Marie (1820). «De l'action mutuelle de deux courans électriques». *Annales de Chimie et de Physique*, tom 15, p. 59.
- ARAGÓ, François (1810). *Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première Classe de l'Institut, le 10 décembre 1810: par M. Arago*.
- (1824). «Communication verbale». *Annales de Chimie et de Physique*, tom 27 (22 novembre), p. 363.
- (1826). «Note concernant les phénomènes magnétiques auxquels le mouvement donne naissance». *Annales de Chimie et de Physique*, tom 32, p. 213.
- (1854). «Histoire de ma jeunesse». A: *Oeuvres complètes de François Arago*. Tom 1. París.
- BRADLEY, James (1727). «A letter from the reverend Mr. James Bradley Savilian professor of Astronomy at Oxford, and F.R.S to Dr. Edmond Haley Astronom. Reg. & giving an account of a new discovered motion of the fix'd stars». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 35, p. 637.
- EINSTEIN, Albert (1905). «Zur Elektrodynamik bewegter Körper». *Annalen der Physik*, vol. 17, p. 891-921.
- EISENSTAEDT, Jean; COMBES, Michel (2011). «Arago et la vitesse de la lumière (1806-1810), un manuscrit inédit, une nouvelle analyse». *Revue d'Histoire des Sciences*, vol. 54.
- FARADAY, Michael (1832). «Experimental researches in electricity». *Philosophical Transactions*, vol. 122, p. 125-162.
- HOOKE, Robert (1674). *An attempt to prove the motion of the earth from observations made*. Londres: T. R. for John Martyn printer to the Royal Society, at the Bell in St. Paul's Church-yard.
- KUHN, Thomas (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University Chicago Press.
- MICHEL, J. (1784). «On the means of discovering the distance, magnitude, &c. of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their light. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a Letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 74, p. 35-57.
- SHANKLAND, R. S. (1963). «Conversations with Albert Einstein». *American Journal of Physics*, núm. 31, p. 47-57.
- WIEN, Wilhelm (1898). «Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen». *Annalen der Physik*, núm. 309, p. 553-563.