

CIÈNCIA

ANY III REVISTA CATALANA NOBRE.
NÚM. 25 DE DE 1928
CIÈNCIA I TECNOLOGIA

UN NOU METODE INDEPENDENT PER MESURAR LES DIMENSIONS I DISTANCIES DEL SOL

MESURAR la distància del Sol i la de tots els astres del sistema planetari (actualment se'n coneixen més de mil) amb només les observacions que es poden practicar sense sortir del clos d'un observatori determinat, semblarà increïble a molts; no obstant, el lector que recorri les següents pàgines es convencerà, aviat, de la seva possibilitat, gràcies al nou mètode que anem a exposar ¹.

NOCIONS PREVIES

Basant-se en l'analogia amb el so, el qual, aparentment, puja i baixa de to segons que s'acosti o s'allunyi el cos sonor, Cristian DOPPLER anuncià, en 1842, que, així mateix, un cos lluminós havia de presentar canvis de matís vers el violat o vers el vermell, segons que la seva distància, respecte de l'observador, s'escurcés o s'allargués. Aplicada a un cos que emet llum blanca (que és el conjunt de totes les radiacions que actuen sobre la nostra retina), la predicció de DOPPLER resulta fallida, per tal com degut a que l'espectre conté radiacions invisibles, tant en l'infra-roig com en l'ultra-violeta, el moviment del cos lluminós originarà, solament, un corriment de la zona visible, de la qual sortiran unes ondes per entrar-n'hi unes al-

¹ Aquest procediment l'insinuàrem per primera vegada, i en les seves línies generals el posàrem en pràctica, en la Conferència donada davant de la "Real Academia de Ciencias y Artes", de Barcelona, el 25 de novembre de 1922, sota el títol "L'Espectroscopia, clau de l'Astronomia".

tres. Analitzant el fenomen sis anys més tard, 1848, el físic FIZEAU arribà a formular amb precisió el principi que ha passat a la posteritat amb el nom de DOPPLER-FIZEAU.

Segons aquest principi, totes les ratlles espectrals (tant les d'emissió, com les d'absorció) que provenen d'una deu lluminosa, es correran vers el violeta o vers el vermell segons que aquesta s'acosti o s'allunyi de l'aparell dispersor que rep els raigs; és a dir, que radiacions d'una determinada freqüència vibratòria semblaran més ràpides o més lentes segons sigui el moviment del cos que les emet; i com sigui que els fenòmens de refracció a través del prisma i d'interferències mitjançant el *Rowland* són funció de *periode relatiu* amb què arriben les ondes a l'aparell, tot canvi en aquest període relatiu o aparent, motivat pel canvi de distància, desviarà, necessàriament, les ratlles espectrals, les quals apareixeran amb llur longitud d'onda modificada respecte de la seva valor normal.

La fórmula fonamental que relaciona aquest increment $\Delta \lambda$ amb el canvi de distància en la unitat de temps v , és, anomenant V la velocitat de la llum,

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{V}$$

Aquesta expressió ens diu que, per a una longitud d'onda determinada, l'increment és proporcional a la velocitat del cos lluminós. Per orientar el lector no familiaritzat amb aquestes quantitats, avançarem que per a $\lambda = 4295 \text{ \AA}$, un increment de 1 \AA suposa, molt aproximadament, un canvi de distància de 70 km per segon.

Coneguda la dispersió de la placa o de l'espectre visual per la separació en mm entre dues línies de longitud d'onda coneguda, l'increment $\Delta \lambda$ es mesura en funció del desplaçament de la ratlla.

* * *

Ara podem exposar ja el fonament del nostre mètode per mesurar les dimensions i distància del Sol. Quan gira al voltant del seu eix, la vora oriental se'ns acosta, mentre que l'occidental se'ns allunya; si, doncs, comparem o superposem mitjançant prismes apropiats els espectres d'ambdues vores, llurs ratlles no coincidiran, sinó que les de la vora est es desviaran vers el violeta i les de l'oest vers el vermell. Aquesta desviació ens donarà directament $\Delta \lambda$ en funció de la dispersió de l'aparell, i, per consegüent, la *velocitat de rotació*, la qual en la vora mateixa, coincideix amb la tangencial d'aproximació o d'allunyament. Tal fou l'enunciat d'H. G. VOGEL, en

1872, confirmat i practicat, després, per gran nombre d'astrònoms que han estudiat la rotació solar. Però com passar de la velocitat de rotació a les dimensions del Sol? Si la superfície d'aquest astre, vista des de la Terra, fos uniforme i homogènia, això fóra del tot impossible; però, afortunadament, l'atmosfera solar presenta desigualtats característiques—que apareixen en forma de taques, flocculi, filaments, fàcules i protuberàncies—suficientment estables per permetre'ns investigar el temps que empra el Sol a donar una volta. L'originalitat del mètode resideix a combinar les dades espectroscòpiques que ens donen la velocitat de rotació en km per segon amb l'observació directa de les desigualtats de la superfície que ens donen el temps o nombre de segons emprats a donar una volta. L'espai recorregut vt serà, en el nostre cas, la circumferència solar $2\pi r$, i si les observacions es fan en el mateix equador solar, el diàmetre del Sol ve donat directament per la senzilla fórmula:

$$\text{Velocitat radial en km/segon} \times \text{Període} = 2\pi r = \pi D,$$

d'on

$$D = \frac{1}{\pi} \text{Velocitat radial} \times \text{Període}$$

Durant la meua estada a l'Observatori de Mont Wilson, vareig tenir ocasió de mesurar diverses de les plaques obtingudes per l'astrònom ST. JOHN, amb objecte de determinar la velocitat de rotació del Sol. A continuació reproduïxo el resultat de les meves mesures en una de les plaques i tot el procés següent fins arribar a la determinació de la velocitat radial v .

PLACA 374 λ A 3 MM DE LA VORA, DATA 24 GENER DE 1919		
Ratlla espectral	Desviació trobada o $\Delta \lambda$ *	
	Mesura en una direcció	Mesura en direcció contrària
5321 a	0'063 a	0'058 a
5322	62	61
5324	64	61
5339	73	
5365	62	60
5365'4	60	63
5367'6	46	67
5369'7	67	78
5370'1	64	69
5371	69	66
5379'7	63	61
5381	67	66
5383'5	69	60
5393'3	70	62
5405	58	57
5415	63	65
5424	63	66
Promig 5370'3	0'0636	0'0637

* Ometem las mesures en mil·lèsimes de mil·límetre i donem les valors reduïdes ja a Angstroms en funció de la dispersió de la placa.

El lector es sorprendrà, sens dubte, de l'extrem de precisió a què es pot portar avui la mesura d'una placa, la qual, practicada en sentit directe i en sentit invers, dóna dos promitjos que difereixen solament en una deu-mil·lèsima d'Angstrom, que, per a la longitud d'onda mitja 5370 \AA correspon a una diferència de velocitat de $3'5 \text{ m}$ per segon.

Fóra pueril voler determinar les dimensions solars fonamentant-se en les mesures d'una sola placa; però, així i tot—deixant pel moment altres mesures—procedirem endavant amb la valor trobada per donar una idea del mètode i del seu grau d'aproximació.

El promig de la desviació trobada $0'0636 \text{ \AA}$, correspon a una velocitat de $3'5512 \text{ km/seg}$, de la qual s'ha de prendre solament la meitat, $1'7756$, per tal com, per seqüència d'haver comparat les ratlles de la vora est amb les de l'oest, llur separació prové de les dues velocitats oposades amb relació a l'observador. Per no ésser factible rebre la llum de la vora mateixa, donada la seva inestabilitat, cal multiplicar la valor trobada per un factor k igual a la secant de l'angle que formen entre ells els dos plans que, contenint l'eix solar, passen l'un per la vora visible i l'altre pel punt observat; en la imatge de l'observatori de Mt. Wilson; en el supòsit que s'observi a tres mm de la vora, el factor k es redueix a $1'014$ i la velocitat trobada a $1'8009 \text{ km}$. Atès que el 24 de gener, la Terra no es troba en el pla de l'equador solar, sinó que la visual dirigida des de la Terra forma

amb el mateix equador un angle de $5^{\circ}45'$, cal introduir un altre factor $\frac{1}{\cos 5^{\circ}45'}$

per reduir la velocitat al pla equatorial en què s'efectua; la seva valor definitiva obtinguda de la placa esmentada és, doncs,

$$1'8009 \times \frac{1}{\cos 5^{\circ}45'} = \frac{1'8009}{0'9949} = 1'8100 \text{ km/seg.}$$

Aquesta velocitat és relativa a la Terra que gira, també, al voltant del Sol i en el mateix sentit de la seva rotació; però la reducció a la velocitat referida a un punt fix—per exemple una estrella—no és necessària, ja que tota disminució aparent de la velocitat vindrà compensada per una major duració del període dit sinòdic respecte del període sideral, de forma que el producte vt continuarà essent constant; hem assolit, doncs, de mesurar v sense sortir del laboratori.

L'observació de 58 reparacions de taques en el disc solar efectuada en l'Observatori de l'Ebre, durant els anys 1918-1919, en què fou obtingu-

da la placa, dona com a promig del temps emprat a donar una volta, 27'138 dies; per tant, la dimensió solar, deduïda d'una sola placa i de l'observació de 58 taques vé donada per

$$\text{Diàmetre solar} = \frac{1'81 \times 27'138 \times 24 \times 3600}{\pi} = 1,350,890 \text{ km.}$$

Partint del diàmetre real solar en km, podem ja determinar la seva distància, amb només mesurar el seu diàmetre aparent en minuts i segons d'arc, la qual cosa podem, també, realitzar asseguts en el laboratori. Prement com a valor d'aquest diàmetre aparent l'assenyalada per G. F. AWERS i adaptada en les Efemèrides Astronòmiques, $\alpha = 31'59''26$, obtenim de la senzilla fórmula:

$$\text{distància} = \frac{\text{diàmetre real}}{2 \sin (1/2 \text{ diàmetre aparent})}$$

$$\text{distància del Sol} = \frac{1,350,890}{2 \sin 959''63} = 145,180,000 \text{ km aprox.}$$

Com veu el lector, amb una sola placa i amb les dades d'un sol Observatori, obtenim ja un resultat que no arriba a discrepar en un 3 per cent de la valor mitja adoptada en Astronomia com a fruit de les millors determinacions fetes pels diferents mètodes clàssics i que dona 149,145,000 kilòmetres ².

Diguérem més amunt que fóra pueril i inútil fonamentar la determinació de les dimensions i distància solars en les mesures de velocitat radial obtingudes d'una sola placa. Perquè la nostra determinació tingui pes científic, cal basar-la en el major nombre possible d'observacions. Per tal de procedir d'aquesta guisa, hem analitzat i discutit el resultat de totes o quasi totes les observacions efectuades en 25 anys a partir del 1889, en què els treballs de N. C. DUNER ens proporcionen les primeres valors fidedignes sobre la velocitat radial en el nimbus solar; no podem servir-nos de l'observació de taques en períodes anteriors, ja que donada la possibilitat d'un canvi en la rotació, la mateixa naturalesa del problema reclama que la velocitat radial i la duració d'una volta es refereixin a la mateixa època. També cal que les dades siguin homogènies pel que es refereix a la regió solar observada, tota vegada que, com se sap, la velocitat de rotació és més ràpida a l'equador i va disminuint vers els pols. No cansarem el

² Vegi's RUSSELL, "Astronomy", I, pàg. 188.

lector amb l'enumeració i reducció de totes les observacions emprades en aquest treball i ens limitarem, solament, a esmentar les fonts principals que ens han servit de fonament ³. Per establir la valor mitja de la velocitat rotacional del Sol durant el període 1889-1913, ens hem servit dels resultats obtinguts per N. C. DUNER ⁴, J. HALM ⁵, V. S. ADAMS ⁶, J. S. PLASKET ⁷, R. E. DE LURY, i H. H. PLASKET. Per a aquells anys en què no tenim observacions, s'ha pres la valor mitja de l'any anterior immediat, assignant-li un pes igual al nombre d'anys que ha d'omplir; aquest criteri queda justificat per la possible variació de la velocitat de gir durant el cicle d'activitat solar. Quan, per a un mateix any, hem disposat de diverses valors, hem adoptat llur promig, considerades d'igual pes. En alguns casos, la velocitat radial ha estat reduïda a la latitud exacta de la regió observada, emprant les fórmules donades pels respectius autors, concedint sempre, però, preferència a les valors trobades directament quan aquestes discrepen de les calculades.

La duració mitja d'una volta solar durant el mateix període 1889-1913, l'hem deduïda de les sèries d'observacions d'E. W. i A. S. D. MAUNDER ⁸, 1872 grups de *taques* de durada igual o superior a sis dies i *taques* de llarga duració tractades separadament; Stanislas CHEVALIER, S. J., sobre les *fàcules* ⁹; G. E. HALE i FOX sobre *els flòcculi de calci*; Fox i Mt. WILSON sobre els mateixos *flòcculi*; HALE, filaments d'Hidrogen, H α ¹⁰; i molt particularment dels cicles I i II de l'Observatori de Greenwich ¹¹, que abasten, precisament, els 25 anys 1889-1913. A cada sèrie li hem assignat un pes proporcional al nombre d'anys a què s'estenia; també hem donat preferència a les valors provinents de l'observació directa, i només hem recorregut a la interpolació quan mancaven les valors esmentades per a la latitud exacta que ens interessava. Les expressions que donen la rotació en funció de la latitud són de la forma

$$\xi = (a - b \sin^2 \phi) \cos \phi$$

en què les constants a i b presenten lleugeres variants segons sigui la sèrie analitzada.

La valor resultant del nostre anàlisi per a la velocitat de rotació en

³ Una exposició més minuciosa podrà veure-la el lector en les *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes*, de Barcelona, sessió del 13 de novembre de 1928.

⁴ *Astr. Nachr.*, 167, pàg. 167.

⁵ *Astr. Nachr.*, 173, pàg. 295.

⁶ *Mt. Wilson Contribution*, I, pàg. 235, i *Astr. Journal*, 29, pàg. 110.

⁷ *Astr. Jour.*, 37, pàg. 73 i 42, pàg. 373.

⁸ M. N. 65, pàg. 813. L'observació que allí es fa, segons la qual el període més curt correspon a $\alpha = 1^\circ$, no s'ha tingut en compte, car no modifica les dades.

⁹ *Astroph. Journal*, 32.

¹⁰ *Contr. Mt. Wilson Obs.*, I, pàg. 299.

¹¹ "Determination of Solar rotation from long lived spots, Greenwich, Photo-Heliographie Results", 1924.

l'equador solar és $v = 2'0358$ km/seg, i per a la duració d'una volta completa o període, a la mateixa latitud, $P = 24'842$ dies ¹²; aquestes dues valors, combinades, ens donen:

$$\text{Diàmetre solar} = \frac{2'0358 \times 24'842' \times 24 \times 3600}{\pi} = 1,390,867 \text{ km,}$$

resultat que no arriba a diferir en dues deumil·lèsimes del millor promig adoptat en Astronomia com a fruit de mètodes molt més minuciosos i complicats.

Per passar, d'aquesta dimensió, directament, al paral·laxe (o angle sota del qual es veuria el radi terrestre des del centre del Sol) cal, només, recolzar en la proporcionalitat que existeix entre els diàmetres reals i els aparents, quan es tracta d'objectes molt llunyans; aquesta proporcionalitat ens dona, prenent com a diàmetre terrestre la valor $2 \times 6378'388$ km, assenyalada per HAYFORD,

$$\frac{\text{diàmetre aparent solar}}{\text{diàmetre aparent terrestre}} = \frac{1,390,867}{2 \times 6378'388},$$

o, substituint valors,

$$\frac{31'59''26}{2x} = \frac{1,390,867}{2 \times 6378'388}$$

d'on

$$x = 8''8015$$

La valor adoptada per la Conferència Internacional de París de 1896 és $8''80$, de forma que el nostre resultat competeix en exactitud al de qual-sevol mètode pres isoladament. Cal només recordar, per exemple, que la valor mitja de tots els mètodes, assenyalada per RUSSELL, és $8''803$, de la

¹² Aquestes valors corresponen a la velocitat i període de rotació siderals, i, per consegüent, estan ja corregits de l'efecte produït per la velocitat de la Terra en la seva òrbita. Això podria semblar, de primer antuvi, un cercle viciós, per tal com la velocitat exacta de la Terra en la seva òrbita suposa la coneixença prèvia dels elements de l'eclíptica i, per consegüent, de l'eix i distància solars; però no és així, ja que el nostre mètode pot recolzar directament—tal com hem fet en l'exemple previ—en la velocitat i període sinòdics en relació amb la Terra i prescindint del moviment d'aquesta al voltant del Sol, car la disminució aparent en la velocitat radial, vindrà exactament compensada per una major duració en el període. Si hem pres les dades referides a la velocitat i al període siderals, ha estat purament per presentar-los així els diversos autors i ésser llur nova reducció molt entretinguda.

qual la nostra difereix, solament, en una millèsima i mitja de segon d'arc, mentre que els resultats de la campanya del pas d'Eros (1900-1901) se'n separen en tres i quatre millèsimes.

El lector haurà notat que hem determinat el paral·laxe solar servint-nos, exclusivament, de les dimensions del Sol determinades directament, prescindint de la seva distància. En aquest punt creiem que el nostre mètode és únic i proporciona, doncs, una brillant confirmació dels resultats obtinguts, seguint camins del tot diferents i independents. Els altres mètodes donen, primer, la distància del Sol i d'aquesta valor passen a les seves dimensions; el nostre dona, primer, independentment de tota mesura angular i terrestre, les dimensions solars, de les quals passa a la distància en funció dels angles aparents.

Per passar del diàmetre solar en km, a la seva distància d , cal, només, dividir la valor trobada per $2 \sin 1/2 \alpha$, tal com insinuem més amunt; tenim, doncs,

$$d = \frac{11390,867}{2 \sin 959''63} = 149.478,384 \text{ km.}$$

Un altre avantatge del nostre mètode consisteix en què permet fer diverses determinacions en diferents latituds solars. Per tal de comprovar el nostre resultat, emprenguérem la determinació de la longitud de la circumferència $2\pi r$ a $\pm 15^\circ$ de l'equador, i d'aquesta longitud passàrem novament a la circumferència equatorial mitjançant la introducció del factor

$$\frac{1}{\cos 15^\circ}.$$

De les mateixes fonts abans esmentades i de les mateixes observacions tractades amb criteri idèntic, obtinguérem com a valor de la velocitat radial v , a $\pm 15^\circ$ de l'equador, 1'943 km/seg i com a duració d'una volta 25'169 dies. Aquestes valors, combinades, ens donen

$$\text{Diàmetre solar} = \frac{1'943 \times 25'169 \times 24 \times 3600}{\pi \cos 15^\circ} = 1.392,381 \text{ km,}$$

que ens porta a la distància de 149,641,739 km i al paral·laxe $8''7922$, el qual resultat concorda suficientment amb l'anterior i li serveix de confirmació; la valor mitja d'ambdues observacions és $8''7968$ amb un error probable de $\pm 0'003''$.

L'exactitud del mètode és limitada, actualment, per la mesura de la velocitat radial, ja que les altres tres quantitats—velocitat de la llum, diàmetre aparent solar i període de rotació—són totes conegudes amb molta ma-

jor exactitud; l'error probable de la valor adoptada per a la velocitat radial en cada determinació no és fàcil de precisar, per tal com els residus no poden ésser tractats com a provinents de la mesura *d'una mateixa valor real*, degut a la possibilitat, i àdhuc probabilitat, d'una variació en la velocitat rotacional del Sol al llarg del cicle d'activitat. De totes maneres, els dos resultats obtinguts mostren que el nou mètode porta a una precisió comparable a l'obtinguda amb les millors determinacions modernes i les avantatja a totes en senzillesa. La distància del Sol es pot mesurar mitjançant aquest procediment sense deixar la cadira del laboratori; i coneguda ja la distància Sol-Terra, la de tots els altres astres del sistema solar queda determinada per la llei harmònica de KÉPLER, que estableix la proporció entre el cub dels eixos majors de llurs òrbites i el quadrat del temps que triguen a recórrer-les. N'hi ha prou, doncs, a observar el temps d'una revolució de cada un d'ells, per anar coneixent llurs distàncies. I el temps d'una revolució d'un astre també es pot mesurar sense necessitat de sortir de casa.

LLUÍS RODÉS, S. J.

Observatori de l'Ebre.
Novembre de 1928.