



NUEVA DEMOSTRACIÓN SOBRE LA ROTACIÓN DE LA TIERRA

POR EL

R. P. JUAN HAGEN, S. J.

DIRECTOR DEL OBSERVATORIO VATICANO

La cuestión que vamos á exponer se refiere á la *rotación* de la Tierra sobre su eje, no á su *traslación* alrededor del Sol; por consiguiente, proponemos una prueba *mecánica*, valiéndonos de aparatos artificiales, usados bajo la influencia de la rotación terrestre, no de observaciones de fenómenos naturales (vientos ecuatoriales, etc.) Se trata, pues, de experimentos (sirviéndonos de una frase química) *cualitativos* y *cuantitativos*, que demuestran no solo la *naturaleza* sino la magnitud del fenómeno, los cuales no son aun experimentos de precisión absoluta, como los que reclama la Física.

Antepondremos una breve reseña histórica de las demostraciones experimentales, intentadas ó propuestas sobre la rotación de la Tierra.

En la sección de la *Astronomische Gesellschaft* tenida en Breslan (Silesia) del 13 al 16 del pasado Septiembre, el M. R. P. Juan Hagen, S. J., Director del Observatorio Vaticano, pronunció un importante discurso, escuchado con interés, é ilustrado con proyecciones luminosas, en el cual habló de otra nueva demostración suya; es decir, *dos* demostraciones por él propuestas sobre la rotación de la Tierra.

Estas serán publicadas ámpliamente en una monografía que está imprimiendo el Observatorio Vaticano. Entre tanto, nos felicitamos de ser los primeros en comunicar esta importante noticia.

NOTA DEL REDACTOR.

A.—*El primer periodo (1640-1770)* fué de experimentos rudimentarios y mal entendidos. El francés Colignon notó las oscilaciones de un pequeño péndulo suspendido verticalmente, atribuyéndolas á la rotación terrestre, mientras recientes observaciones de péndulos horizontales hechas en Potsdam talvez las atribuirian á la Luna.

Son célebres los experimentos que el P. Mersenne propuso á la Academia de Artillería, los cuales se efectuaban con el disparo de un cañón vertical; tales ensayos se hicieron primero en París, después en Strasburgo y Tolosa; pero como eran demasiado rudimentarios y burdos no obtuvieron resultados satisfactorios, aunque en principio eran aceptables.

En Firenze Vivisin, se anticipó 200 años el experimento del péndulo de Foucault, observando la desviación del plano del péndulo; más sin adivinar la causa.

Newton proponiendo á Hooke la caída de los cuerpos graves, le anunciaba con certeza la desviación de los mismos y de este modo preparaba:

B.—*El segundo periodo con los experimentos de caída de los cuerpos graves (1790-1831)*, que fueron inaugurados en Bognona por Guglielmini. Guglielmini empezó sus experimentos en el Observatorio y los continuó después en la Torre

Asinelli. Sin embargo, hasta seis meses después de la prueba no determinó la vertical, es decir, el cero ó centro al que debía referirse la medida de las desviaciones, quedando inciertos los resultados, y equivocados por error de cálculo. Cayó en el mismo error Olbers, el cual corrigió Gauss y Laplace, quienes demostraron que la desviación teórica es tan solo de $\frac{2}{3}$ de la obtenida por Guglielmini.

El ensayo de Guglielmini fué repetido por Benzenberg, primero en una Torre de Amburgo y más tarde en una mina de Schlebusch, y por Reich en una mina de Freiberg; la existencia de la desviación oriental apareció demostrada; más no medida en su valor. Sirviéndonos de la frase usada más arriba, diremos que el resultado de los experimentos fué *cualitativo*, no *cuantitativo*.

C.—*El tercer período es el de los péndulos* (1832 1852.) Hengler, el inventor del péndulo horizontal, con bastante precisión entrevió, que la fuerza centrífuga es tanto mayor cuanto mayor es la altura, y aseguró que variando la posición de una bola en la estremidad de sus péndulos horizontales, éstos debían resentirse y poner en evidencia la variación y la intensidad de la fuerza centrífuga.

La manera como fué dispuesto el experimento, no era aceptable; pero la idea permaneció, tomándola el Observatorio Vaticano y con un aparato que se está construyendo esperamos permitirá medir la desviación prevista, calculándose 0'3 mm. entre la estremidad del trayecto recorrido por los cuerpos que estén á distinta altura.

No es el caso de describir el experimento de Foucault, demasiado conocido. Tan sólo se debe notar que la teoría de la desviación del plano, no es tan sencilla como les pareció á los primeros observadores. En efecto, la desviación

$$D, \text{ es } D = - \omega \sin \varphi + \frac{3}{8} c,$$

donde $\omega = 15^\circ$ es la velocidad angular de la Tierra en una hora, φ la latitud del sitio del experimento y C un factor dependiente de la amplitud de la oscilación.

Foucault, Sechi y otros usaron solamente el primer término ($\omega \sin \phi$); á pesar de todo, es cierto que el término

$$\left(\frac{3}{8} c \right)$$

no produce cero.

Complemento al de Foucault, es el péndulo circular de Bravais, que parece gira con más velocidad cuando funciona en sentido opuesto al de la Tierra y con más lentitud cuando gira con ella.

La explicación de esta aparente velocidad es sencillísima: el cero, de donde parten las medidas, es la línea señalada sobre el pavimento de la sala, línea que gira con la Tierra; por tanto, en el círculo descrito por el péndulo marcará un circuito más ó menos grande, seguro que el péndulo oscilará en contra ó en el mismo sentido al de la Tierra.

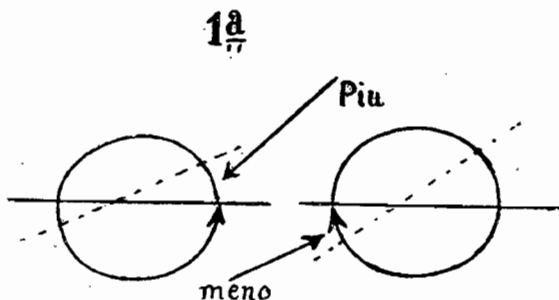


Figura 1.^a

D.—*El cuarto periodo* (1852-1880) es el de los aparatos complicados. Garthe, en primer lugar usa la suspensión cardaniana en los experimentos efectuados en la Catedral de Colonia, mientras Foucault mantiene continua la oscilación de su péndulo con un electro-imán puesto en el centro de las oscilaciones. En este tiempo Foucault inventó el giroscopio y Gilbert el baroscopio. Hund hace su experimento sirviéndose de un ligero recipiente circular, perforado en el centro y lleno de agua cubierto de polvo para que

sean visibles las corrientes que resultan curvas en el centro en vez de rectilíneas.

Combes trató de perfeccionar el experimento del señor Hund haciendo uso no de corrientes convergentes al centro sino centrifugas, pero dicho ensayo no fué aceptado.

A este período pertenece el ingenioso aparato del doctor Enrique Bernardi, descrito en las «Actas del Instituto veneciano», vol. 13, 1868.

El distinguido profesor de Vicenza se propuso reducir la prueba á tales dimensiones que se pudiera efectuar en cualquier gabinete de Física y por esta causa resolvió estos dos problemas:

1.º Mantener el movimiento del péndulo compensándolo de las pérdidas sufridas.

2.º Impedir la influencia de las causas perturbadoras.

De qué manera el profesor Bernardi haya resuelto dichos problemas, puede comprobarse con su mismo aparato que se halla colgado en una de las paredes del Observatorio de Padua.

Kamerlign Onnes con un ligero péndulo demuestra la rotación de la Tierra; y sus experimentos de gabinete, resultan de una precisión admirables.

Como la disertación presentada para su doctorado en la Universidad de Leyden es un poco confusa y por razón del idioma ignorada; la recogió el docto P. Stein del Observatorio Vaticano, la aclaró é ilustró, de modo que aparecerá en francés, como apéndice á la memoria del P. Hagen en el primer número de las publicaciones del Observatorio Vaticano.

E.—*El quinto período es el de los experimentos modernos.* I comprende desde 1902 hasta nuestros días.

Hall en Cambridge (América) repite el experimento de la caída de los graves en un laboratorio de física, obteniendo en pequeña escala, resultados bastantes satisfactorios.

Siguen los experimentos de Föppl, que aplicando un motor eléctrico al giroscopio, consiguió demostrar la rotación terrestre y además medir la cantidad.

Tumlirz, repite los efectuados por Hund con la diferencia que él colorea el agua con anilina y fotografía las corrientes con una máquina colocada en el techo de la habitación.

Y, por último, los experimentos efectuados en el Observatorio Vaticano.

La Torre leoniana (donde está el anteojo fotográfico) es circular, formado por un muro de cuatro metros de espesor, encerrando en su centro una sala circular de 9 metros de diámetro: la altura de dicho torreón está dividida en tres pisos: la pieza inferior que no tiene ventanas está destinada para los experimentos y la abertura de entrada se cerró con tres puertas, una exterior y dos interiores, ambas con vidrios: entre la puerta exterior y las dos interiores se coloca el observador, el cual tiene á la mano las comunicaciones eléctricas del interior.

De este modo el aparato puede funcionar y ser observado, independiente de cualquier acción ó causa perturbadora.

El primer aparato, bastante imperfecto, tenía la forma de un huso construido por una rejilla de madera ligera y dura, de 9 metros de largo, suspendido horizontalmente de su centro B al centro de la cámara A; la suspensión es unifilar con un alambre de cobre dulce.

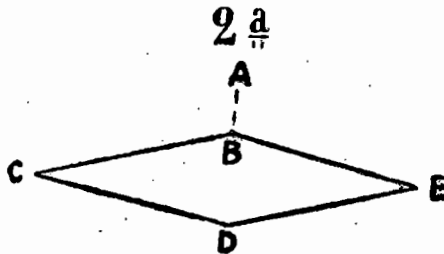


Figura 2.ª

En el punto B dos vasos contienen casi 16 Kg. de mercurio: los vasos tienen en la parte inferior dos válvulas cerradas por dos palancas, unidas cada una á un hilo, los dos hilos

son fusibles y se pueden quemar con la corriente eléctrica; el observador desde fuera da paso á la corriente, fúndense los hilos y abriéndose las válvulas hacen salir el mercurio por unos tubos acomodados, desde B á E y C. En C y E hay dos vasos con palancas, como en B, y se puede á voluntad pasar el mercurio de C y B á D. Es decir, el aparato trasvasa del centro (B) á la periferia (C y E) y de la periferia al centro (D) la cantidad de casi quintal y medio de mercurio.

A la altura del aparato, sobre el muro de la estancia se halla trazada la graduación en 360° .

Al hilo de suspension del aparato va unido un espejo plano en donde el observador puede leer la graduación á través de los vidrios de las puertas, auxiliada por una linterna.

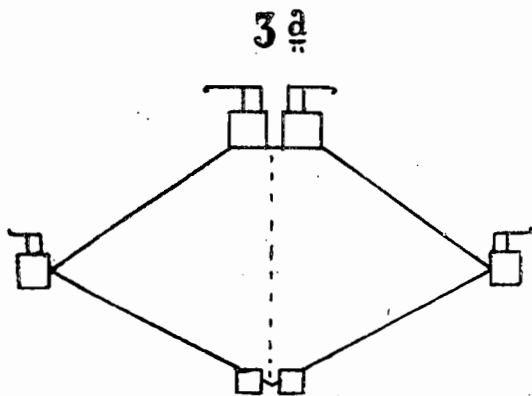


Figura 3.^a

Llenos de mercurio los vasos C i E., y dispuestos los hilos, se cierra la pieza y se deja el aparato un día entero en reposo para que tome una quietud absoluta: al día siguiente desde fuera, se da paso á la corriente, se funden los hilos y el mercurio corre desde C y E á D. Después de 37 segundos, tiempo empleado en pasar el mercurio desde la estremidad al centro, empieza el aparato á moverse con lentitud; pero con gran regularidad en la misma dirección de la rotación de la Tierra, haciendo un ángulo de $40\frac{1}{2}$.

Cambiando el experimento, se coloca el mercurio en B para dejarlo salir con la debida precaución á C y E. Después de 37 segundos el aparato se mueve de nuevo, más en dirección opuesta y con un ángulo menor que el del primer experimento.

Como pareció muy lenta la salida del mercurio, se modificó el aparato del modo siguiente:

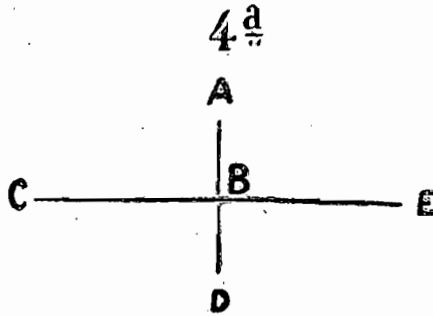


Figura 4.^a

Supongamos que C — E, es una rejilla rectangular, casi un paralelo duro, colgado como el primer aparato de su punto A en dirección horizontal: del centro sale un espigón que tiene en D un peso-motor, este motor puede salir y entrar por un espacio hecho en el pavimento de la sala reservada al aparato: sobre el telopalelo se colocan dos carretes ó vagoncitos que movidos por el peso D pueden pasar desde E y C á B ó vice-versa, según la rotación de las poleas colocadas en B, C y E.

Los carretes y el peso D quedan libres al fundirse los hilos con la electricidad: cada carrete lleva 80 Kg. de plomo y están colocados fijos en la estremidad por medio de unos ganchos con muelle, además de la palanca indicada con hilos fusibles.

La suspensión de este aparato es bifilar: el hilo usado es de acero y lo regaló la Casa Felten Guillaume de Viena: el aparato tiene así mayor estabilidad; aunque es fácil comprender que serán de menor amplitud las oscilaciones.

Colocados los vagoncitos en C y E quedan libres para moverse hacia el centro B. Estos llegan en seis segundos y el aparato funciona en *sentido directo* un grado.

Si ponemos los vagoncitos en B y los hacemos correr hacia la estremidad C y E, el aparato se mueve en *sentido inverso* medio grado.

He aquí la teoría del experimento:

I

La velocidad relativa angular

Sea A el momento de inercia del aparato en el *primer* estado; y A' el momento de inercia en el *segundo* y sean V y V' la velocidad angular del aparato: *Por el principio de los arcos constantes* en el *primero* y *segundo* estado se debe obtener:

$$A V = A' V' \text{ y por lo mismo } V' = V \frac{A}{A'}$$

Esta velocidad V y V' son absolutas, no relativas, es decir, V es la velocidad común al aparato y á la sala donde está suspendido. Pero en el experimento no es la velocidad absoluta la que observamos, sino la relativa, y en el estado de *quietud aparente* tendremos la velocidad relativa $V - V' = 0$, mientras *después del cambio* de los pesos la velocidad relativa será:

$$V' - V = V \left(\frac{A}{A'} - 1 \right)$$

Se presentan estos dos casos:

a) $A' < A$, ahora $V' - V > 0$ y la rotación es positiva en la dirección de la Tierra y será tanto mayor cuanto es mayor $\frac{A}{A'}$.

b) $A' > A$ y por consiguiente $V' - V < 0$ la velocidad aparente es negativa, cuya cantidad es siempre inferior á V .

En el caso (a) los pesos se mueven hacia el centro; en el caso de (b) hacia los extremos.

II

Péndulo de torsión

Ademas de la *velocidad angular* es fácil observar la *amplitud* de las oscilaciones. El aparato descrito es un *péndulo torsión*, cuya teoría es bien conocida. La amplitud u de la oscilación es proporcional á la velocidad inicial $V' - V$, ó sea:

$$u = c (V' - V)$$

donde c es una constante dependiente del aparato, la cual se determina fácilmente por la duración de una oscilación. La misma duración de las oscilaciones determina además el *momento de inercia*. En efecto, si t y t' son los dos tiempos de oscilación:

$$\frac{A}{A'} = \left(\frac{t}{t'} \right)^2$$

Los dos valores t y t' corresponden á los dos estados del instrumento (con los pesos en el centro y con ellos en los extremos) que son las *constantes* del aparato; es suficiente observarlas una vez para una série de experimentos.

Indicando los factores constantes con la letra c , tendremos:

$$u = c. V \text{ en un caso (pesos al centro)}$$

$$u = c'. V \text{ en el otro (pesos a los extremos)}$$

La cantidad V es la misma en las dos fórmulas y no es otra que la velocidad angular de la duración del experimen-

to, velocidad que siendo = 15° por cada hora en el polo, es = 10° por cada hora en Roma. La unidad de tiempo adoptada para los experimentos es el minuto, y por eso para Roma:

$$V = \frac{10^\circ}{60} = 0^\circ, 167.$$

Experimentos

1.º Los primeros que llamaremos *cualitativos*, fueron hechos con el aparato unifilar de trasvasación del mercurio.

Empezaron en el mayor momento de inercia (para obtener la mayor amplitud) dejando pasar al mercurio de la estremidad al centro; se hicieron seis pruebas: el aparato desvió siempre á la izquierda de 3 á 4 grados.

A estos seis primeros, siguieron otros diez experimentos alternados con el mayor momento de inercia (mercurio de los extremos al centro) y con el menor (mercurio del centro á los extremos): en el *momento mayor* el aparato giró *siempre* en la dirección de la Tierra de 3 á 4 grados, en el *momento menor* giró *siempre* en sentido contrario, cerca de un grado y medio.

2.º *Cuantitativos* se pueden llamar, y lo son en realidad, los experimentos realizados con el segundo aparato.

Los ensayos fueron 20, 10 en una dirección y 10 en otra. Los primeros con los vagoncitos que partían de los extremos al centro, y los otros, del centro á los extremos.

En la fórmula $u = c \cdot V$ la cantidad u es la amplitud observada, c es la conocida, V la incógnita, que debe ser = $0^\circ, 167$.

El resultado fué el siguiente:

De 10 amplitudes angulares *positivas* $V = 0^\circ, 154$ (vagoncitos al centro).

De 10 amplitudes angulares *negativas* $V = 0^\circ, 181$ (vagoncitos á los extremos).

Medio aritmético de las 20 amplitudes angulares $V = 0^\circ$, 167 exactamente como había previsto la teoría.

Por tanto, con este nuevo procedimiento la rotación de la Tierra queda demostrada y además, medida y contada.

3.º Deben hacerse algunas observaciones.

a) La diferencia V entre la amplitud positiva y negativa depende de la imperfección del aparato y probablemente de la suspensión: el aparato parece que se mueve con más facilidad en determinada dirección.

b) El resultado de la fórmula por la velocidad inicial relativa $V' - V$, fué indicada la primera vez por Poincot. Este propuso que se colocase en el aparato un muelle doblado, *ressort coudé*, colgado en el techo de la cámara de experimentos y que se pudiera abrir por un procedimiento que él no indicó y le encargó á Foucault para la construcción.

Foucault construyó en su lugar el giroscopio y la idea de Poincot fué completamente abandonada.

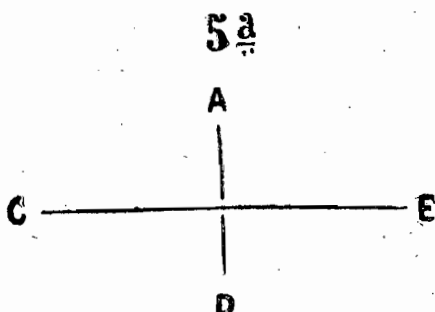
c) Tessan propuso el uso de una barra pesada, suspendida por el centro en sentido horizontal y deducía que si giraba 180° en arco vertical, se obtendría una rotación en sentido horizontal.

Sin duda que Tessan no conocía la fórmula $A V = A' V'$ porque en el experimento que él proponía resultaba $A = A'$ y $V = V'$ por tanto la torsión cero. Si hubiese practicado el experimento habría notado su error. No obstante el uso de la barra ó asta, como propuso Tessan, es bueno y resulta más sencilla y fácil la construcción del aparato, en el cual se suprime el mercurio y los vagoncitos cargados de plomo.

Según estas indicaciones es el nuevo aparato, que la Casa Leybold de Colonia está construyendo y que se podrá usar para demostrar la rotación en los gabinetes y en las escuelas como el péndulo de Foucault.

He aquí el aparato usado en el Observatorio Vaticano.

El telar ó rejilla horizontal C. E.

Figura 5.^a

En lugar de las poleas para los vagoncitos, se coloca un espigón duro fijo en B y á las estremidades C y E dos pesos iguales.

Si el asta permanece horizontal, el aparato se halla en el caso de los vagoncitos á los extremos. Si hacemos que el asta se levante vertical y que los dos pesos de los extremos pasen á la vertical A D, tendremos reducido el aparato al caso de los vagoncitos en el centro.

Como se vé la construcción resulta muy simple, más aún que la del péndulo. He aquí la teoría: el principio de los arcos constantes ($AV = A'V'$) se aplica sin correcciones, mientras en el péndulo de Foucault, el cual nunca puede oscilar sobre un plano, pues, debe hacerse siempre una corrección debida á su movimiento elíptico.

A. M. D. G.

