

# Carl Pulfrich y sus instrumentos de identificación y demostración del *Stereo-Effekt*

D.J. Lanska<sup>1</sup>, J.M. Lanska<sup>2</sup>, B.F. Remler<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Servicio de neurología y <sup>2</sup>servicio de voluntariado. Veterans Affairs Medical Center, Great Lakes VA Healthcare System, Tomah, EE UU.

<sup>3</sup>Servicios de neurología y oftalmología. Medical College of Wisconsin, Milwaukee, EE UU.

<sup>4</sup>Servicio de neurología. Zablocki Veterans Affairs Medical Center, Great Lakes VA Healthcare System, Milwaukee, EE UU.

Parte de este estudio fue presentado en la LXVI reunión anual de la Academia Norteamericana de Neurología, celebrada en Filadelfia (EE UU), el 28 de abril de 2014.

## RESUMEN

**Introducción.** El *Stereo-Effekt*, descrito por el físico alemán Carl Pulfrich en 1922, es una ilusión binocular que se percibe al observar objetos en movimiento y que normalmente se asocia a neuropatías ópticas unilaterales o asimétricas.

**Método.** Tradujimos y revisamos la descripción del fenómeno realizada por Pulfrich, examinamos el equipo estereoscópico que el físico desarrolló y que hizo posible observar el *Stereo-Effekt* y analizamos los aparatos que posteriormente construyó para mostrar este fenómeno al público.

**Resultado.** En 1899, Pulfrich desarrolló un instrumento óptico que medía la posición de los objetos mediante estereofotografías, lo que convertía al estereoscopio en un instrumento de medida (*Stereokomparator*). Allá por 1919, el astrónomo alemán Max Wolf observó un curioso fenómeno estereoscópico que a veces interfería en las precisas mediciones de objetos astronómicos al usar el *Stereokomparator*. Pulfrich y sus colaboradores concluyeron que este efecto se debía a la diferencia de brillo entre las placas fotográficas. A pesar de que Pulfrich era incapaz de observar el fenómeno que él mismo había descrito a causa de su ceguera adquirida en un ojo, el físico alemán y sus colaboradores elaboraron un modelo psicofisiológico fundamentado y aparatos que servían tanto para ilustrar el fenómeno a otros como para poder seguir estudiando los mecanismos psicofísicos subyacentes.

**Conclusión.** Pulfrich describió el *Stereo-Effekt* a raíz de las dificultades técnicas que experimentaron los usuarios de un dispositivo óptico que él mismo había diseñado. Los aparatos desarrollados por Pulfrich ayudaron a demostrar que el fenómeno observado no se debía a un fallo técnico del aparato original, permitieron hacer demostraciones del fenómeno al público, hicieron posible continuar con el estudio científico del fenómeno, y condujeron al descubrimiento de una nueva entidad clínica (es decir, un efecto Pulfrich espontáneo en pacientes con alteraciones de la vía óptica anterior).

## PALABRAS CLAVE

Neurología clínica, neuritis óptica, historia de la neurología, nervio óptico, procesamiento visual, efecto Pulfrich

## Introducción

El efecto Pulfrich es una ilusión óptica binocular en la que un objeto que se mueve horizontalmente a lo largo del campo de visión del observado se percibe en movimiento a una distancia mayor o menor que la real, como resultado de una diferencia de latencia visual entre los dos ojos<sup>1</sup>. Dicho efecto puede ser provocado de manera artificial (p. ej., colocando un filtro de densidad neutra,

o FDN, sobre un ojo) o puede experimentarse de forma espontánea como resultado de lesiones en la vía óptica prequiasmática. Ambas situaciones producen un retraso unilateral en el procesamiento de la señal, de forma que un objeto que se desplaza por el campo de visión se percibe más alejado con el ojo afectado que con el ojo sano o menos afectado. La diferencia resultante en la localización de la imagen retiniana en cada ojo (dispa-



Figura 1. El físico alemán Carl Pulfrich (1858-1927) en 1889. Cortesía de Wikimedia Commons

ridad binocular) altera la distancia percibida del objeto en movimiento y a la vez produce una distorsión en la percepción de la profundidad. Sin embargo, esta distorsión solo se percibe cuando los objetos se mueven respecto al observador.

Los pacientes que experimentan el fenómeno de Pulfrich de manera espontánea (es decir, debido a una patología) normalmente presentan alteraciones para localizar visualmente objetos en movimiento, y objetos inmóviles o en movimiento cuando son los propios pacientes los que se mueven. Así, por ejemplo, aseguran que los coches que vienen de frente o que están aparcados parecen describir una trayectoria curvilínea hacia ellos. Estos pacientes tienen tendencia a chocarse con la gente o con objetos inmóviles mientras caminan y tienen dificultades para golpear un objetivo que se mueve con rapidez al practicar deporte (p. ej., squash, tenis, béisbol)<sup>2-12</sup>. En términos clínicos, el efecto suele manifestarse como un síntoma de neuropatías ópticas asimé-

tricas o unilaterales, y puede suponer una manifestación inicial de esclerosis múltiple, aunque también puede presentarse en trastornos oculares asimétricos o unilaterales (p. ej, cataratas, retinopatía serosa central, agujero macular, etc.)<sup>6,8-12</sup>. Por lo general, la valoración clínica implica el uso de un péndulo. Se ha demostrado que hacer oscilar un objeto suspendido delante de un fondo de fieltro negro constituye un modo fiable de observar el fenómeno en pacientes. Asimismo, se ha comprobado que los resultados obtenidos en pacientes mediante una prueba muy sencilla que consiste en hacer oscilar un bolígrafo (*swinging pen test*) son similares a los conseguidos con un péndulo mecánico en pacientes con neuritis óptica<sup>13,14</sup>.

En los 70, la evaluación de la presencia de un efecto Pulfrich no provocado se usaba como método complementario en el diagnóstico de trastornos del nervio óptico, y especialmente de la neuritis óptica retrobulbar en pacientes con diagnóstico de posible esclerosis múltiple<sup>15-21</sup>. Se demostró que la utilidad de dicho método para estos fines era comparable a la de los estudios de potenciales evocados visuales y que era más sencillo, rápido y económico. No obstante, para ponerlo en práctica era necesario que los pacientes tuvieran una estereopsis intacta, y las alteraciones observadas no permitían distinguir entre la disfunción bilateral asimétrica y la unilateral.<sup>19</sup> Su uso como prueba diagnóstica también se vio limitado por la ausencia de un procedimiento estándar y por el desarrollo posterior de técnicas objetivas como la RM y la tomografía de coherencia óptica de la capa de fibras nerviosas de la retina. Es sin embargo importante reconocer este fenómeno en los pacientes afectados por tres motivos fundamentales. En primer lugar, provoca signos que en ocasiones resultan desconcertantes tanto para pacientes como para facultativos. Por otra parte, los síntomas no tratados suelen resultar molestos para los pacientes, y pueden interferir en la vida diaria y ser incluso peligrosos. Además, el tratamiento es bastante sencillo<sup>6-8,21,22</sup>.

El físico alemán Carl Pulfrich (figura 1) describió este *Stereo-Effekt* por primera vez en 1922, en un extenso y completo artículo que constaba de cinco partes<sup>1</sup>. Pulfrich no sólo demostró el *Stereo-Effekt* colocando una lente ahumada (es decir, algo parecido a un FDN) sobre un ojo, sino que también evidenció que las alteraciones de la vía óptica pueden producir un *Stereo-Effekt* de origen patológico. En 1925, tan sólo tres años después de que se publicase el estudio de Pulfrich, el cirujano oftalmólogo

británico Harold Barr Grimsdale (1866-1942) demostró el *Stereo-Effekt* patológico en un paciente con neuritis óptica retrobulbar unilateral y propuso que dichas alteraciones perceptivas podían tratarse con un FDN sobre el ojo sano. Posteriormente, otros autores demostraron que un FDN situado delante del ojo sano resulta de hecho efectivo en el tratamiento de pacientes con alteraciones perceptivas derivadas del efecto Pulfrich<sup>22,23</sup>.

El objetivo de este artículo es revisar el descubrimiento de Pulfrich y el uso de los instrumentos para analizar y demostrar este fenómeno de la percepción visual.

### Métodos

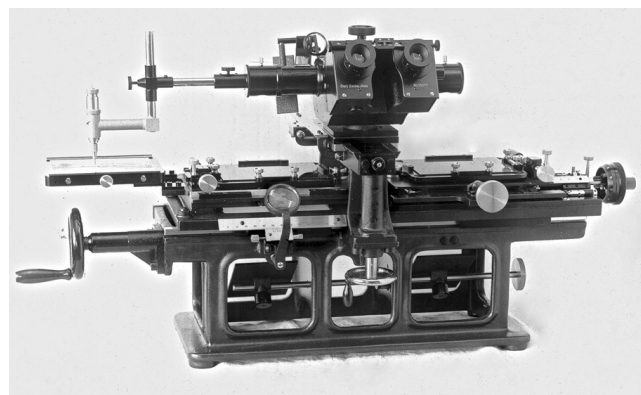
Hemos traducido y revisado la descripción del fenómeno realizada por Pulfrich, examinado el equipo estereoscópico que el físico alemán desarrolló y que hizo posible observar el efecto Pulfrich, y analizado los modelos que posteriormente construyó para mostrar este fenómeno al público. Para ello, hemos localizado los instrumentos originales de Pulfrich en Alemania, visitando incluso el ZEISS Archiv en Oberkochen, el Deutsches Museum en Múnich, y el Optisches Museum en Jena. Igualmente buscamos información biográfica sobre Pulfrich y sus colaboradores en las biografías y necrológicas publicadas, y en el material inédito conservado en el ZEISS Archiv.

### Resultados

Pulfrich, hijo mayor de un maestro de escuela, nació en Burscheid, cerca de Düsseldorf (Alemania). Asistió al Gymnasium de Mühlheim, cerca del río Ruhr, y posteriormente estudió física, matemáticas y mineralogía en la Universidad de Bonn, donde se doctoró en óptica en 1881<sup>24,25</sup>. Posteriormente terminó el servicio militar, y después trabajó como docente en el instituto de física de la Universidad de Bonn<sup>24,25</sup>. En 1890, fue contratado para dirigir el nuevo departamento de instrumentos ópticos de medida de la fábrica de Carl Zeiss (*Zeiß Werkstätten*) en Jena, donde finalmente llegó a ser toda una autoridad en instrumentos estereoscópicos<sup>1,24-29</sup>. Las contribuciones científicas de Pulfrich comprenden más de 100 publicaciones sobre tres áreas de investigación principales: refractometría (1885-1899), que le llevó a desarrollar instrumentos de medida de los índices de refracción para valorar la composición o la pureza de las sustancias; estereoscopia y en particular el subcampo de la estereofotogrametría (1899-1923), sobre los instrumentos que había desarrollado para calcular las coordena-

nadas tridimensionales de los objetos a partir de las mediciones realizadas en las fotográficas tomadas desde diferentes posiciones; y fotometría (1920-1927), acerca de su instrumento para medir la intensidad de la luz producida por una fuente determinada con respecto a una fuente estándar. Pulfrich recibió varios premios por sus aportaciones científicas. En 1917, el gobierno de Prusia le nombró profesor ordinario, y en 1923, la Universidad Técnica de Múnich le otorgó el título honorífico de doctor en ingeniería por fundar la disciplina de la estereofotogrametría; precisamente la investigación en este campo le había conducido al descubrimiento del *Stereo-Effekt*. En 1926, ya estando cerca el final de su carrera científica, fue elegido miembro de la Academia Alemana de las Ciencias Naturales Leopoldina, en Halle<sup>25</sup>.

En 1899, Pulfrich transformó el estereoscopio en un instrumento de medida al inventar y desarrollar el estereocomparador (*Stereokomparator*), un dispositivo óptico diseñado para comparar con precisión fotografías estereoscópicas para su uso en fotogrametría, es decir, la técnica que mide la posición y la forma de objetos a partir de pares de fotografías del mismo objeto tomadas desde diferentes posiciones en el mismo plano<sup>30-33</sup> (figura 2). El estereocomparador estaba compuesto por dos piezas principales: un bastidor

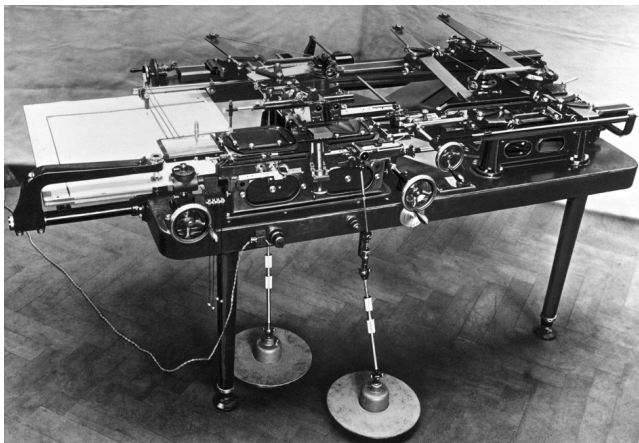


**Figura 2.** Fotografía del estereocomparador de Pulfrich (*Stereokomparator*, 1901), un dispositivo óptico diseñado para comparar fotografías estereoscópicas con precisión. La fotografía muestra una vista frontal del aparato. Cortesía del ZEISS Archiv



donde colocar las placas fotográficas y un microscopio binocular para visualizarlas. Pulfrich presentó el instrumento el 23 de septiembre de 1901 en la Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte (sociedad de científicos y médicos alemanes) en Hamburgo<sup>30</sup>. El primer estereocomparador experimental de Pulfrich forma ahora parte de las colecciones del Deutsche Museum de Múnich, y las imágenes también están disponibles en el ZEISS Archiv.

En 1907, el lugarteniente Eduard von Orel (1877-1941) del Instituto Geográfico Militar austro-húngaro de Viena desarrolló el primer prototipo de estereoautógrafo para trazar mecánicamente perfiles de alzado sin tener que recurrir a los tediosos y laboriosos métodos de interpolación computacional<sup>28,34-36</sup>. Este primer prototipo se basaba en el estereocomparador de Pulfrich e incorporaba un dispositivo de regletas mecánicas y un mecanismo de trazado<sup>36</sup>. Zeiss comenzó fabricando una versión mejorada de este instrumento en 1909 (figura 3), y resultó ser el primer instrumento para el trazado automático de rasgos cartográficos de éxito comercial. Estos instrumentos de medida resul-



**Figura 3.** El estereoautógrafo de Zeiss (1909) se usaba para trazar de forma mecánica perfiles de alzado directamente sin tener que recurrir a los tediosos y laboriosos métodos de interpolación computacional necesarios con el estereocomparador. El primer prototipo de este instrumento fue desarrollado alrededor de 1907 por el lugarteniente Eduard von Orel (1877-1941) del Instituto Geográfico Militar austro-húngaro de Viena. Zeiss comenzó a fabricar una versión mejorada de este instrumento en 1909, que demostró ser el primer instrumento de éxito comercial que permitía trazar rasgos cartográficos automáticamente. El dispositivo combinaba el estereocomparador de Pulfrich (lado izquierdo) con un dispositivo de regletas mecánicas y un mecanismo de trazado. Cortesía del ZEISS Archiv

taron ser de gran utilidad para la topografía, pero también se usaron en astronomía y otras disciplinas.

Uno de los pioneros en el uso del estereocomparador de Pulfrich fue el astrónomo Maximilian (Max) Wolf (1863-1932) (figura 4), director del Observatorio de Heidelberg-Königstuhl y profesor de astrofísica y geofísica, y posteriormente catedrático de astronomía en la Universidad de Heidelberg<sup>37-40</sup>. Wolf se doctoró por la Universidad de Heidelberg en 1888, bajo la dirección del matemático alemán Leo Königsberger (1837-1921). En 1893, Wolf fue designado responsable de supervisar la creación del departamento de astrofísica del histórico Observatorio de Heidelberg-Königstuhl, que se construyó entre 1895 y 1900 en la cima de Königstuhl ‘silla del rey’ en alemán), una colina de 567 metros de altura en las afueras de la ciudad de Heidelberg<sup>39</sup>. Durante su etapa en el observatorio, Wolf se convirtió en pionero en el uso de la fotografía de campo amplio, técnica que empleó en especial para buscar asteroides mediante la observación de cambios de posición de los objetos en fotografías secuenciales. Se trataba de un proceso largo y tedioso en el que se solían producir errores al ponerlo en práctica según su descripción original<sup>37,39</sup>.

Wolf realizó la primera prueba con el estereocomparador en 1901, para la que usó dos fotografías de Saturno tomadas en días consecutivos en 1899. Al usar el dispositivo de Pulfrich como visor, “el planeta y dos de sus satélites parecían suspendidos en el espacio, muy por delante del fondo formado por las estrellas”<sup>38(p250-1)</sup>. Wolf le pidió a Pulfrich que examinara la serie de placas en las que se habían detectado varios asteroides tras una minuciosa búsqueda. Mediante el uso del estereocomparador, Pulfrich “identificó, a los pocos minutos de compararlas [las placas], los asteroides suspendidos en el espacio, a pesar de no estar familiarizado con el examen de fotografías astronómicas, además de localizar otro asteroide” que Wolf había pasado por alto<sup>38(p251)</sup>. Durante esta primera prueba del estereocomparador también se descubrieron diez estrellas variables en la nebulosa de Orión<sup>33</sup>. A partir de entonces, Wolf y Pulfrich mantendrían correspondencia con regularidad sobre cómo aplicaba Wolf el estereocomparador a la astronomía. Éste último pudo visualizar Saturno y sus lunas (1901) y las colas de los cometas (1902), descubrió diferentes asteroides (a partir de 1901), estrellas variables (1901-1903) y supernovas (1909-1926)<sup>33,38,41,42</sup>.

En 1919, Wolf observó que un efecto estéreo muy singular interfería en ocasiones en las precisas mediciones

de los objetos astronómicos que se obtenían al usar el estereocomparador<sup>43</sup>. Cuando se ajustaban las placas estereoscópicas de una estrella en el estereocomparador para generar una imagen que pareciera coincidir en el espacio con la imagen estereoscópica de las marcas de referencia del instrumento, Wolf descubrió con algunos juegos de placas que la imagen de la estrella parecía desplazarse hacia delante o hacia detrás con respecto a su posición original al mover las placas con rapidez de un lado a otro<sup>45</sup>. Tal y como Pulfrich observó:

No fui consciente de esas irregularidades hasta que el profesor Max Wolf del Observatorio de Königstuhl en Heidelberg publicó su trabajo sobre la trayectoria celeste de 1053 estrellas<sup>43</sup> que había medido con el estereocomparador. En su artículo, el profesor Wolf menciona un peculiar efecto estereó como distracción ocasional, que observó mientras escudriñaba pares de placas fotográficas. Consistía en una separación detectable hacia delante o hacia atrás de la imagen de la estrella con respecto al marcador de referencia en el plano al mover rápidamente las placas fotográficas.<sup>1</sup>

Tiempo después Pulfrich supo que otros profesionales habían tenido problemas similares con el estereoautógrafo durante los primeros años de su uso en topografía:

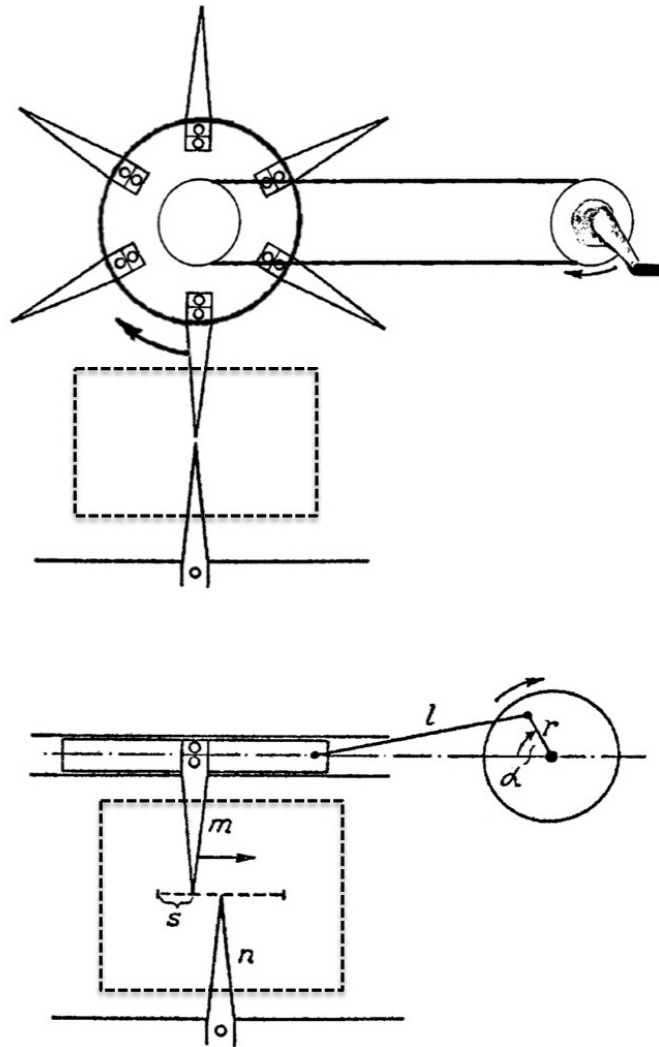
Después de ajustar cuidadosamente la marca flotante a un punto específico del paisaje, en ocasiones se veía cómo seguía una trayectoria circular alrededor del punto objeto mientras las placas fotográficas se movían con rapidez de un lado a otro. Normalmente se recurre a la socorrida explicación de que el acoplamiento mecánico entre las placas se ha aflojado un poco de manera accidental<sup>1</sup>.

Pulfrich y sus colaboradores en un principio sospecharon que la alteración se debía al cambio de separación entre las placas estereoscópicas (p. ej., holgura en las conexiones de las placas), pero investigaciones posteriores demostraron que el desplazamiento espacial era el resultado de una diferencia del brillo total entre las dos placas. Dos de los compañeros de Pulfrich en Zeiss, el ingeniero Joh (Johann) Franke y el técnico Ferdinand Fertsch (1889-1981), “determinaron que las alteraciones observadas no estaban relacionadas con la separación de las placas al moverlas lateralmente a la vez”<sup>1</sup>. De haber existido, dichas separaciones habrían significado un fallo técnico del equipo que podría haber dañado la reputación de la empresa. Por el contrario, determinaron que la “única causa (del fenómeno) era una *diferencia en el brillo entre la placa izquierda y la derecha*” (énfasis en el original), porque “los pares de placas fotográficas aparentemente sin alteraciones, podían presentar anomalías cuando su iluminación era



**Figura 4.** El astrónomo alemán Max Wolf (1863-1932). Wolf fue de los primeros en usar el estereocomparador de Pulfrich en astronomía. Posteriormente advirtió dificultades técnicas que Pulfrich y sus colaboradores finalmente identificaron como resultado de una iluminación desigual de las estereofotografías que se comparan. Al trabajar sobre este problema técnico, Pulfrich y sus colaboradores dieron con una práctica solución técnica. Además, identificaron una ilusión óptica general y propusieron el mecanismo fisiopatológico de este fenómeno. Extraído de la obra de H. MacPherson<sup>38</sup>

desigual” y “las placas que evidenciaban el fenómeno no volvían a hacerlo cuando la iluminación era igual para ambas”. Por lo tanto, antes de comenzar las mediciones con el estereoautógrafo, se aconsejaba a los operarios que controlaran la iluminación de ambas placas colocando un marcador en un punto del paisaje y moviendo después el par de placas hacia delante y hacia atrás. Visualizar movimientos rotatorios indicaba una iluminación desigual de las placas, que podía corregirse o compensarse:



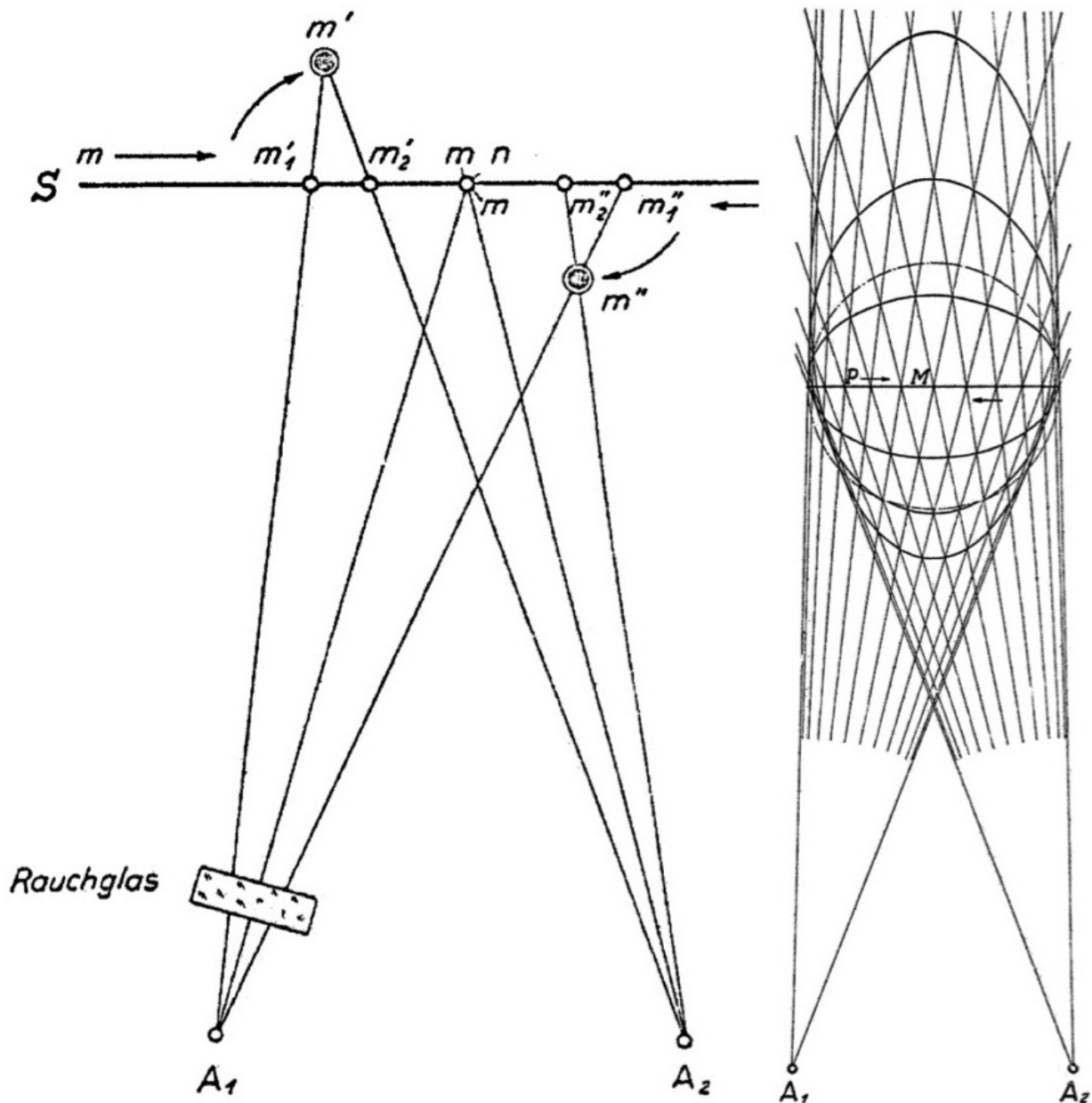
**Figura 5.** Dibujo esquemático de los dos aparatos de Pulfrich usados para explicar el estereofenómeno al público (Pulfrich, 1922). Los aparatos recreaban un movimiento rotatorio unidireccional y un movimiento armónico bidireccional. Aunque ninguno de ellos era pendular, más tarde el fenómeno de Pulfrich se ha evaluado con este tipo de movimiento en la práctica clínica. La imagen de arriba es obra de J.M. Lanska a partir de la información contenida en el artículo original de Pulfrich, mientras que la de abajo ha sido extraída del artículo<sup>1</sup>

Ahora sabemos que cuando el marcador describe movimientos circulares no se trata de un incómodo defecto del equipo, sino más bien de un indicador de la presencia de una diferencia de brillo. Intentamos eliminarlo, por ejemplo, regulando la intensidad de la fuente de luz con mayor brillo con una o varias hojas de papel vegetal, o bien reduciendo la velocidad del movimiento de los pares de placas para evitar que afecte en las mediciones<sup>1</sup>.

Al poner a prueba la percepción con placas con iluminación desigual, Pulfrich y sus colaboradores demostraron

que la dirección de la rotación dependía de cuál de las placas tenía más brillo:

El marcador describe una trayectoria circular en el sentido de las agujas del reloj, parecida a la de una manivela de un molinillo de café, alrededor del punto objeto cuando se ve desde arriba y cuando el ojo derecho recibe la imagen más brillante. El movimiento se aprecia en el sentido contrario de las agujas del reloj cuando el ojo izquierdo ve la imagen más brillante (énfasis en el original)<sup>1</sup>.



**Figura 6.** Dibujos de Pulfrich que muestran el mecanismo del estereofenómeno (izquierda), y las trayectorias percibidas de un objeto que se mueve a lo largo del campo de visión en movimiento armónico lineal a diferentes velocidades (derecha)<sup>1</sup>. Según Pulfrich y sus colaboradores, colocar un filtro de densidad neutra sobre el ojo izquierdo ('Rauchglas', o cristal ahumado) produce una latencia perceptiva mayor en dicho ojo. Por tanto, un objeto que se mueve de derecha a izquierda (es decir, desde el lado opuesto al ojo con FDN) se percibe con retraso en ese ojo, lo que produce una disparidad binocular cruzada. Consecuentemente, el objeto se aprecia a una distancia menor que la real. Del mismo modo, un objeto que se mueve de izquierda a derecha (es decir, desde el mismo lado que el ojo con el FDN) se percibe con un retraso que produce una disparidad binocular no cruzada, por lo que el objeto se ve a una distancia mayor que la real. Cuando el objeto sigue un movimiento armónico lineal, la trayectoria percibida es una curva cerrada que se asemeja a una elipse cuando el objeto se mueve a una velocidad baja. Al aumentar la velocidad, la excentricidad es menor (mayor amplitud de la elipse en el plano transversal). A velocidades aún mayores, Pulfrich sugirió que la trayectoria percibida se convierte en asimétrica.



El mismo Pulfrich era incapaz de percibir el fenómeno porque era ciego del ojo izquierdo:

Yo nunca he sido capaz de observar dichas alteraciones porque no veo por el ojo izquierdo (...) debido a una grave lesión ocular que sufrí cuando era joven(...) Sin embargo, para mí era un reto seguir investigando el fenómeno e intentar entender los principios básicos<sup>1</sup>.

#### Demostración del efecto Pulfrich

A pesar de la incapacidad del mismo Pulfrich para observar el fenómeno, desarrolló una serie de aparatos que sirvieron tanto para mostrar el fenómeno a otros como para seguir estudiando la psicofísica. Se indicaba a los observadores que colocasen un cristal ahumado sobre un ojo para reproducir el tipo de asimetría en el brillo en los dos ojos que en un principio había provocado el fenómeno al usar el estereocomparador.

El fenómeno (...) puede mostrarse a un público más amplio con facilidad; el único requisito es que cada observador tenga un cristal ahumado o cualquier otro elemento que sirva para reducir la entrada de luz en uno de los ojos. Las personas que no tienen visión estereoscópica sea por el motivo que fuere, como es lógico, no podrán experimentar el efecto Pulfrich (...) Los observadores generalmente no experimentan un efecto estereó espontáneo. Sin embargo, en cuanto se coloca el cristal ahumado delante de uno de los ojos, el efecto se aprecia muy claramente; cuando el cristal se coloca delante del ojo izquierdo y se mueve el marcador hacia la izquierda, este pasa por detrás del marcador fijo, mientras que cuando se mueve hacia la derecha, el marcador pasa por delante. El efecto aumenta con la velocidad. Cuando el movimiento para de repente, los marcadores vuelven a percibirse a la misma distancia<sup>1</sup>.

Los aparatos de Pulfrich recreaban diferentes tipos de movimiento del marcador móvil (figura 5). Con el primer aparato, seis puntas en movimiento rotatorio parecían pasar por delante o por detrás del marcador fijo, dependiendo de la dirección del giro. Con el segundo aparato, el marcador se movía de atrás a delante a lo largo de una línea mediante una rueda accionada por una manivela que giraba a una velocidad angular constante. Este mecanismo de acción producía un movimiento linear armónico del marcador móvil.

Aunque actualmente el método más usado para demostrar el efecto Pulfrich es el del péndulo, no fue él quien lo propuso. Sin embargo, era perfectamente consciente de que el efecto estereó podía observarse usando un péndulo; de hecho mencionó lo sorpren-

dido que estaba de que nadie antes hubiera descrito el fenómeno, puesto que cualquier taller de relojería, con todos aquellos péndulos en movimiento, era una demostración del mismo. Pulfrich no propuso usar un péndulo para demostrar o estudiar el fenómeno porque, a menos que la plomada esté suspendida por dos hilos o una varilla rígida, es posible que oscile siguiendo un movimiento rotatorio, lo que interferiría en los resultados del test:

En espacios cerrados y durante el día, recomiendo seguir las siguientes instrucciones: pegar un lápiz con cera a una ventana por donde entre la luz del sol, y colocar otro en posición vertical justo debajo y deslizarlo de un lado a otro. Es recomendable que el segundo lápiz esté en contacto con el cristal ya que, si no está apoyado, es fácil que el brazo describa una trayectoria en curva al deslizarlo. Cuando no hay luz natural, se puede colocar una hoja de papel sobre una mesa, iluminarla con luz artificial y poner los dos lápices encima. Teniendo en cuenta lo fácil que resulta observar el fenómeno del movimiento circular de los marcadores, resulta sorprendente que nadie lo haya descrito antes, sobre todo si consideramos que se puede observar en todos los talleres de relojería. Esta situación ilustra la decreciente habilidad del hombre moderno para observar de una forma pura, sin influencias del pensamiento [sesgo cognitivo] y la experiencia<sup>1</sup>.

Además del uso de un cristal ahumado, Pulfrich indicó otras formas de inducir el fenómeno basadas en reducir la visión de un ojo (p. ej., entrecerrar un ojo o colocar delante un filtro con un agujero o un filtro de color). Sin embargo, Pulfrich descubrió que algunas personas podían observar el efecto de forma espontánea debido a un defecto visual en un ojo. De una manera poco formal, sugirió que dichas personas serían útiles desde el punto de vista clínico para identificar pacientes con disfunción unilateral o asimétrica de la vía óptica anterior:

Parece ser que hay personas que perciben un movimiento circular sin tener que usar ningún elemento adicional, ya sea en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario, dependiendo de cuál de los ojos, el derecho o el izquierdo, responde antes. En dichos pacientes, que son de especial interés para los oftalmólogos, podría demostrarse una diferencia más o menos pronunciada entre ambos ojos...<sup>1</sup>

#### Discusión

Pulfrich descubrió el *Stereo-Effekt*, denominado posteriormente el "efecto Pulfrich", después de que los usuarios de un aparato óptico, el *Stereokomparator*, experimentasen dificultades técnicas con el mismo<sup>1</sup>. El



mismo Pulfrich, que era incapaz de visualizar el fenómeno porque no tenía estereopsis debido a una ceguera post-traumática en el ojo izquierdo, fue sin embargo capaz de elaborar un modelo psicofisiológico aceptable y de construir instrumentos para demostrar el *Stereo-Effekt*. Los aparatos de Pulfrich ayudaron a demostrar que el fenómeno observado no se debía a un fallo técnico del instrumento científico original, permitieron reproducir el efecto para demostrárselo al público, hicieron posible continuar con el estudio científico del fenómeno, y condujeron al descubrimiento de una nueva entidad clínica en sujetos que presentaban un *Stereo-Effekt* espontáneo debido a alteraciones de la vía óptica anterior<sup>1</sup>.

Los aparatos de demostración de Pulfrich usaban dos tipos diferentes de movimiento para demostrar el efecto con un cristal ahumado sobre un ojo. El primero usaba movimiento rotatorio, que hacía que las puntas de la rueda giratoria se movieran hacia delante o hacia atrás desde la perspectiva del observador, dependiendo de la dirección de la rotación. La segunda producía un movimiento armónico simple y unidimensional, que generaba una trayectoria elíptica. En estudios posteriores sobre el fenómeno de Pulfrich, el psicólogo estadounidense Alfred Lit (1914-2000)<sup>44-46</sup> y otros investigadores<sup>13,47</sup> usaron una variante del segundo aparato de demostración de Pulfrich, es decir, un yugo escocés (un mecanismo con una guía ranurada) que convierte el movimiento rotatorio (de un saliente en un disco giratorio) en movimiento lineal al acoplar directamente el saliente del disco a la ranura del yugo deslizante.

Pulfrich desestimó el uso de un péndulo para demostrar el efecto, ya que resultaba complicado hacer que el péndulo oscilara en un único plano, y esta trayectoria irregular influiría en la valoración del *Stereo-Effekt*. Algunos investigadores posteriores intentaron aplicar el efecto Pulfrich para desarrollar una prueba diagnóstica para las alteraciones del nervio óptico, y descubrieron que el uso de péndulos arrojaba resultados inconsistentes, por lo que decidieron sustituirlos por técnicas más sofisticadas<sup>18</sup>. Sin embargo, el péndulo era un dispositivo muy utilizado en evaluaciones o pruebas clínicas, tanto en la consulta como en otros contextos. Se trataba de un péndulo bifilar, es decir, suspendido por dos hilos que forman una V y que limitan la oscilación del péndulo a un único plano vertical<sup>3,48</sup>. Algunos investigadores llamaron erróneamente 'péndulos' a otros elementos que describen un movimiento armónico simple, como el

mecanismo del yugo escocés basado en el segundo aparato de Pulfrich<sup>13,47</sup>.

Un péndulo simple limitado a un plano vertical experimenta un movimiento armónico simple cuando no hay fricción y la amplitud es pequeña. Si asumimos un desplazamiento angular (amplitud) reducido, la frecuencia y el periodo del movimiento del péndulo son independientes del desplazamiento angular inicial y la amplitud. La aproximación para ángulos pequeños es válida para desplazamientos angulares iniciales de unos 20° o menos. Sin embargo, para amplitudes mayores, como las que se daban con frecuencia en el contexto clínico, el movimiento del péndulo es matemáticamente más complejo y, a diferencia del segundo modelo de demostración de Pulfrich, tiene un importante componente vertical. Como resultado, se observan disparidades binoculares tanto horizontales como verticales.

La disparidad binocular hace referencia a la diferencia en la posición de las imágenes de un objeto generadas por cada uno de los ojos, y normalmente es el resultado de la separación de estos. El cerebro utiliza la disparidad binocular para extraer información sobre la profundidad a partir de las imágenes retinianas bidimensionales. El científico inglés Sir Charles Wheatstone (1802-1875) había demostrado en 1838 que las disparidades binoculares horizontales eran suficientes para percibir la profundidad estereoscópica<sup>49</sup>. De hecho, la profundidad percibida aumenta uniformemente con la disparidad horizontal desde el umbral hasta el límite de la fusión binocular<sup>50</sup>. La disparidad horizontal no cruzada tiene lugar cuando se observa un objeto situado más lejos del ojo que el punto de fijación, mientras que la disparidad horizontal cruzada se da cuando el objeto observado se sitúa más cerca que el punto de fijación.

Pulfrich atribuyó a su colaborador Ferdinand Fertsch la explicación más ampliamente aceptada del fenómeno. Según este último, dicho fenómeno sería el resultado de las diferencias en la latencia perceptiva entre los dos ojos<sup>1</sup>, una interpretación que se basa en la idea ahora aceptada de que las diferencias en la iluminación de ambos ojos provoca diferencias en la latencia visual<sup>18,44,47,51-53</sup>. Cuando un objeto está en movimiento, el ojo afectado percibe la imagen con retraso respecto al otro ojo, de modo que se genera una disparidad binocular horizontal que se interpreta como un cambio de la distancia del objeto.

Colocar un cristal ahumado 'Rauchglas' o FDN sobre el ojo izquierdo produce una latencia perceptiva mayor en

dicho ojo similar a la que produciría una alteración prequiasmática (p. ej., neuritis óptica) (figura 6). Por tanto, el ojo izquierdo percibe con retraso un objeto que se mueve de derecha a izquierda, lo que produce una disparidad binocular cruzada. Consecuentemente, dicho objeto se percibe a una distancia menor que la real. Del mismo modo, el ojo izquierdo percibe con retraso un objeto que se mueve de izquierda a derecha. Esto produce una disparidad binocular no cruzada y por tanto el objeto se aprecia a una distancia mayor que la real. Para un objeto en movimiento armónico simple lineal, la trayectoria percibida es una línea curva cerrada que se asemeja a una elipse cuando la velocidad a la que se mueve el objeto es baja. La excentricidad disminuye (mayor amplitud de la elipse en el plano transversal) a medida que la velocidad del objeto aumenta. A velocidades aún mayores, Pulfrich sugirió que la trayectoria percibida se convierte en asimétrica.

El mecanismo propuesto explica la alteración en la distancia percibida de un objeto que se mueve horizontalmente a través del campo de visión, un tipo de movimiento parecido al que producía la primera maqueta de Pulfrich, e idéntico al descrito por la segunda. Sin embargo, y especialmente al usar un péndulo, el movimiento es tanto vertical como horizontal. Por tanto, cuando el péndulo describe un movimiento de gran amplitud, en los extremos de la trayectoria la disparidad vertical puede provocar que las imágenes se vean borrosas o separadas temporalmente dependiendo del desplazamiento angular, tamaño y velocidad del péndulo, y de la magnitud de la diferencia en latencia perceptiva entre los dos ojos (Joseph T. Lanska, comunicación personal de 2014).

### Financiación y conflicto de intereses

Los Dres. Lanska y Remler cuentan con financiación del US Department of Veterans' Affairs. Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

### Bibliografía

1. Pulfrich C. Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie. *Naturwissenschaften*. 1922;10: 553-64, 569-74, 598-601, 714-22, 735-43, 751-61.
2. Breyer A, Jiang X, Rüttsche A, Bieri H, Oexl T, Baumann A, et al. Influence of the Pulfrich phenomenon on driving performance. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2006; 244:1555-61.
3. Diaper CJ. Pulfrich revisited. *Surv Ophthalmol*. 1997;41(6): 493-9.
4. Hofeldt AJ, Hoefle FB. Stereophotometric testing for Pulfrich's phenomenon in professional baseball players. *Percept Mot Skills*. 1993;77:407-16.
5. Hofeldt AJ, Hoefle FB, Bonafede B. Baseball hitting, binocular vision, and the Pulfrich phenomenon. *Arch Ophthalmol*. 1996;114:1490-4.
6. Grimsdale H. A note on Pulfrich's phenomenon with a suggestion on its possible clinical importance. *Br J Ophthalmol*. 1925;9:63-5.
7. Diaper CJ, Dutton GN, Heron G. The Pulfrich phenomenon: its symptoms and their management. *J Neuroophthalmol*. 1999;19(1):12.
8. Heng S, Dutton GN. The Pulfrich effect in the clinic. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2011;249(6):801-8.
9. Heron G, Dutton GN, McCulloch DL, Stanger S. Pulfrich's phenomenon in optic nerve hypoplasia. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2008;246(3):429-34.
10. Gordon GE, Heron G, Dutton GN. The Pulfrich phenomenon in optic disc drusen. *Br J Ophthalmol*. 2008;92(3):434-5.
11. Larkin EB, Dutton GN, Heron G. Impaired perception of moving objects after minor injuries to the eye and midface: the Pulfrich phenomenon. *Br J Oral Maxillofac Surg*. 1994;32(6):360-2.
12. O'Doherty M, Flitcroft DI. An unusual presentation of optic neuritis and the Pulfrich phenomenon. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2007;78(8):906-7.
13. Mojon DS, Rösler KM, Oetliker H. A bedside test to determine motion stereopsis using the Pulfrich phenomenon. *Ophthalmology*. 1998;105:1337-44.
14. Diaper CJ, Heron G, Dutton GN. The Pulfrich phenomenon. *Ophthalmology*. 1999;106(9):1645-7.
15. Burde RM, Gallin PF. Visual parameters associated with recovered retrobulbar optic neuritis. *Am J Ophthalmol*. 1975;79:1034-7.
16. Frisen L, Hoyt WF, Bird AC, Weale RA. Diagnostic uses of the Pulfrich phenomenon. *Lancet*. 1973;2:385-6.
17. Nishida T, Becker PS, Ho SU. Pulfrich stereo-illusion phenomenon: Poor man's VEP? *Neuro-ophthalmology*. 1989;9:203-6.
18. Rushton D. Use of the Pulfrich pendulum for detecting abnormal delay in the visual pathway in multiple sclerosis. *Brain*. 1975;98:283-96.
19. Slagsvold JE. Pulfrich pendulum phenomenon in patients with a history of acute optic neuritis. *Acta Ophthalmol (Copenh)*. 1978;56:817-26.
20. Sokol S. The Pulfrich stereo-illusion as an index of optic nerve dysfunction. *Surv Ophthalmol*. 1976;20:432-4.
21. Wist ER, Hennerici M, Dichgans J. The Pulfrich spatial frequency phenomenon: a psychophysical method competitive to visual evoked potentials in the diagnosis of multiple sclerosis. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 1978;41:1069-77.
22. Heron G, Dutton GN. The Pulfrich phenomenon and its alleviation with a neutral density filter. *Br J Ophthalmol*. 1989;73:1004-8.
23. Heron G, Thompson KJ, Dutton GN. The symptomatic Pulfrich phenomenon can be successfully managed with a coloured lens in front of the good eye—a long-term follow-up study. *Eye (Lond)*. 2007;21:1469-72.

24. Allmer F. Pulfrich, Carl. En: Historische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften editor. *Neue Deutsche Biographie*. 2003;21:6-7. [citado 18 sep 2013]. Disponible en: <http://www.deutsche-biographie.de/ppn116313013.html>.
25. Kessler H. Carl Pulfrich (geboren am 24. September 1858, gestorben am 12. August 1927). *Astronomische Nachrichten*. 1927;231:277-80.
26. Carney T, Paradiso MA, Freeman RD. A physiological correlate of the Pulfrich effect in cortical neurons of the cat. *Vision Res*. 1989;29:155-65.
27. Christianson S, Hofstetter HW. Some historical notes on Carl Pulfrich. *Am J Optom Arch Am Acad Optom*. 1972;49:944-7.
28. Fritsch D. The photogrammetric week series – a centennial success story. En: Fritsch D, editor. *Photogrammetric Week 05*. Heidelberg: Wichmann Verlag, 2005:3-12.
29. Morgan MJ, Thompson P. Apparent motion and the Pulfrich effect. *Perception*. 1975;4:3-18.
30. Pulfrich C. Ueber einen für metronomische und andere Zwecke bestimmten stereoskopischen Komparator. En: Wangerin A, editor. *Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte*. 73. Versammlung zu Hamburg. 22-28. September 1901. Leipzig: F.C.W. Vogel, 1902:38.
31. Pulfrich C. Ueber neuere Anwendungen der Stereoskopie und über einen hierfür bestimmten Stereo-Komparator. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. 1902;22:65-81,133-41,178-92, 229-46.
32. Pulfrich C. *Neue stereoskopische Methoden und Apparate für die Zwecke der Astronomie, Topographie und Metrologie*. Berlin: J. Springer; 1903.
33. Wolfschmidt G. *Comparator, astronomical*. En: Bud R, Warner DJ, editores. *Garland encyclopedias in the history of science*. Vol. 2; *Instruments of science: an historical encyclopedia*. New York: Routledge; 1998. p. 126-7.
34. Collier P. The impact of topographic mapping of developments in land and air survey: 1900-1939. *Cartogr Geogr Inf Sci*. 2002;29:155-74.
35. Konecny G. *Geoinformation: remote sensing, photogrammetry and geographic information systems 2<sup>a</sup> ed*. Boca: CRC Press; 2014. *Analogue stereo photogrammetry*; p. 150-74.
36. Oriol E von. *Stereo apparatus for plastic reproduction*. US 1090493 (Patent) 1914, 17 May.
37. Dugan RS. Max Wolf. *Popular astronomy* 1933;61:238-44.
38. MacPherson H Jr. Max Wolf. En: *Astronomers of to-day and their work*. London and Edinburgh: Gall & Inglis, 1905:246-52.
39. Tenn JS. Max Wolf: the twenty-fifth Bruce medalist. *Mercury*. 1994;23:27-8.
40. Petzold A, Pitz E. The historical origin of the Pulfrich effect: a serendipitous astronomical observation at the border of the Milky Way. *Neuroophthalmology*. 2009;33:39-46.
41. Wolf M. Stereoscopic pictures of Comet Perrine. *Mon Not R Astron Soc*. 1902;63:35-6.
42. Wolf M. On the use of the stereo-comparator for plates on which a réseau has been impressed. *Mon Not R Astron Soc*. 1903;64:112-8.
43. Wolf M. *Katalog von 1053 stärker bewegten Fixsternen*. Veröffentlichungen der Badischen Sternwarte zu Heidelberg (Königstuhl). 1919;7(10):195-219.
44. Lit A. The magnitude of the Pulfrich stereophenomenon as a function of binocular differences of intensity at various levels of illumination. *Am J Psychol*. 1949;62:159-81.
45. Lit A, Hyman A. The magnitude of the Pulfrich stereophenomenon as a function of distance of observation. *Am J Optom Arch Am Acad Optom*. 1951;28:564-80.
46. Lit A. The magnitude of the Pulfrich stereophenomenon as a function of target velocity. *J Exp Psychol*. 1960;59:165-75.
47. Mojon D, Zhang W, Oetliker M, Oetliker H. Psychophysical determination of visual processing time by comparing depth seen in Pulfrich and Mach-Dvorak illusions. *Am J Physiol*. 1994;267:S54-64.
48. Frisen L, Hoyt WF, Bird AC, Weale RA. Diagnostic uses of the Pulfrich phenomenon. *Lancet*. 1973;2:385-6.
49. Wheatstone C. Contributions to the physiology of vision. Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1838;2:371-93.
50. Ogle KN. Space perception and vertical disparity. *J Opt Soc Am*. 1952;42:145-6.
51. Heron G, McCulloch DL, Dutton GN. Visual latency in the spontaneous Pulfrich effect. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2002;240:644-9.
52. Pestrude AM, Baker HD. New method of measuring visual-perceptual latency differences. *Perception & Psychophysics*. 1968;4:152-4.
53. Williams JM, Lit A. Luminance-dependent visual latency for the Hess effect, the Pulfrich effect, and simple reaction time. *Vision Res*. 1983;23:171-9.