

2.7.- La Fotografía Astronómica.

2.7.1.- Introducción.

El gran legado del siglo XIX a la Astronomía es el nacimiento de la Astrofísica. El análisis espectral abre una puerta a un mundo desconocido al posibilitar el estudio de la composición química y la estructura física de los cuerpos celestes. La espectroscopía y la fotometría, nacidas durante el siglo XIX son la base sobre la cual el hombre actual ha llegado a conocer la estructura de las estrellas, la naturaleza de las galaxias y la estructura del Universo. Este conocimiento fue adquirido gracias al aporte fundamental de la fotografía.

A comienzos del siglo XVIII el médico alemán Schulze observe la acción química de la luz sobre sales de plata. Este efecto fue estudiado por el químico sueco Scheele. Hacia 1800 en distintas partes de Europa se estudiaba la posibilidad de aplicar a la formación de imágenes el ennegrecimiento del cloruro y nitrato de plata al ser expuesto a la luz. Charles en Francia, Wedgwood y Davy en Inglaterra y Ritter y Goethe en Alemania hicieron experiencias al respecto pero sin resultados prácticos.

2.7.2.- El daguerrotipo:



FIG. 72.—L. J. M. Daguerre (1789-1851). (Adapted from Williams' *Story of Nineteenth Century Science*.)

En París el ex-oficial de caballería Joseph Nicéphore Niépce (1765-1833) logra producir el 9 de Mayo de 1816, la primera imagen permanente en la cámara oscura. Esa fecha constituye el nacimiento de la fotografía. Niépce dispuso sobre una capa de plata una delgada capa de betún. La luz descomponía el betún tornándolo insoluble. Las partes oscuras de la fotografía dejaban el betún inalterado. Bastaba con lavar la placa con una mezcla de éter,

petróleo y esencia de lavanda para disolver el betún de los sitios donde la luz no había actuado, obteniéndose así la imagen del modelo. En 1829 Niépce da cuenta de su método en su *"Notice sur l'héliographe"*. Descontento con el rendimiento de su proceso, Niépce se asocia ese mismo año con el pintor Louis Jacques Mandé Daguerre (1787-1851) que estudiaba la solución del problema utilizando una placa sensibilizada con yoduro de plata, que luego sustituye por bromuro de plata en suspensión de gelatina.

Mientras tanto el astrónomo inglés John Herschel había comprobado que el hiposulfito de sodio, empleado como fijador, permitía obtener placas inalterables a la luz. Al mismo tiempo su compatriota William Henry Fox Talbot introducía el uso del papel cubierto por una placa de cloruro de plata que, impresionada en la cámara oscura, daba una imagen que al éter revelado en ácido gálico y una solución de bromuro de potasio, aparecía negativa, permitiendo obtener un número cualquiera de copias en papel de un negativo determinado.

En 1838 el astrónomo francés Francisco Arago presenta al Instituto de Francia el gran descubrimiento y reclamo para los herederos de Niepce y para Daguerre una recompensa nacional, proponiendo además que no se permitiera sacar patente de la invención y que Francia ofreciera ese producto del genio francés, como un regalo, a la humanidad.



FIG. 71.—Dominique Francois Arago (1786-1853). (Adapted from tone in Williams' *Story of Nineteenth Century Science*.)

El proceso del *"daguerrotipo"*, como fue llamado este procedimiento, es descrito por Arago en los siguientes términos: *la placa fotográfica era una delgada capa de plata pulida sobre una base de cobre, sensibilizada mediante la exposición de la cara de plata a un recipiente que contenía partículas de yodo. Estos vapores formaban una capa amarilla de yoduro de plata muy delgada (1 micrón). Después de exponerla por un período más o menos largo*

en una cámara oscura se desarrollaba. La placa se exponía a vapores de mercurio que se calentaban en un recipiente a 75 grados. Estos vapores se adherían en gran cantidad a las zonas expuestas a la luz y no tocaban las zonas que habían quedado oscuras; en general se producía una condensación selectiva dependiendo del grado de exposición. Después la imagen era fijada mediante inmersión de la placa en una solución de tiosulfato de sodio (hiposulfito) que disuelve el yoduro de plata que no había sido usado. Finalmente se enjuagaba con agua destilada caliente, obteniéndose una placa en negativo (las partes de plata representaban la sombra).

Lo que más impresionó al público, según el mismo Arago, fue *"la rapidez de método"* porque: *"escasamente diez a doce minutos se requieren en los días más oscuros de invierno para tomar la foto de un monumento... en verano, a pleno sol, el tiempo se puede reducir a la mitad..."*



FIG. 73.—John W. Draper (1811-1882). (Adapted from Williams' *Story of Nineteenth Century Science*. Source not traced.)

Las aplicaciones astronómicas de este procedimiento fueron escasas y los únicos objetos astronómicos que podían intentarse eran el Sol y la Luna. Así el médico John W. Draper (1811-1882), médico y astrónomo aficionado de Nueva York, realiza la primera exposición de la Luna en 1840. Con una exposición de media hora obtuvo una imagen de la Luna de 1 pulgada de diámetro. Las grandes complicaciones que traía tener que seguir la Luna durante la exposición lo hicieron abandonar los experimentos fotográficos.

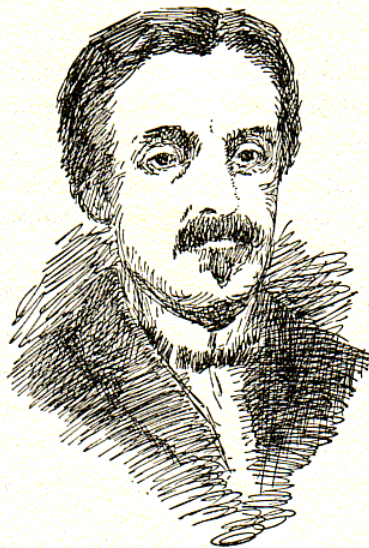


FIG. 74.—Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868). (Adapted from half-tone in Bell's *The Telescope*. Source not stated.)

Foucault y Fizeau obtuvieron el primer daguerrotipo del Sol el 2 de abril de 1845. Este mostraba claramente algunas manchas solares y el oscurecimiento del limbo solar. La placa se obtuvo con 1/60 de segundo de exposición produciendo una imagen de 4,8 pulgadas de diámetro.

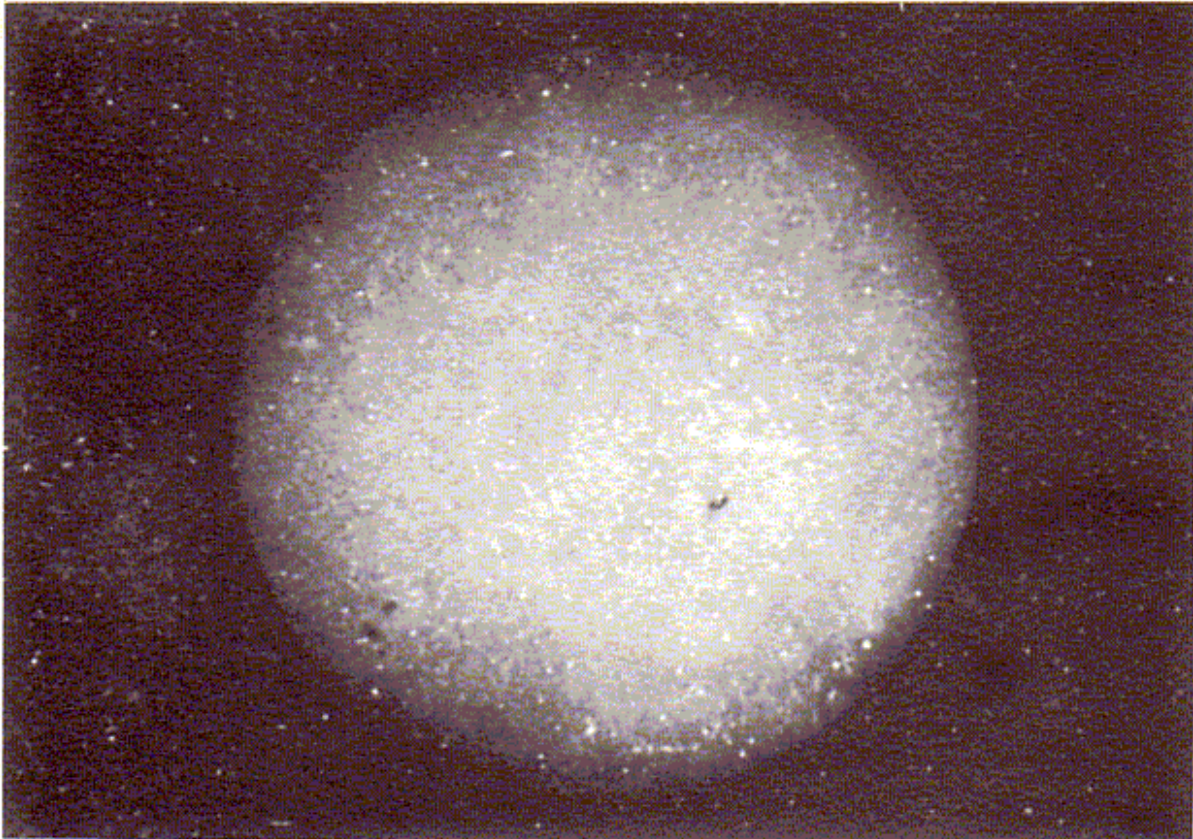


Fig. 22. Daguerreotype of the Sun from the year 1845

Los primeros eclipses en los que se utilizó la fotografía fueron los de 1851 y 1854. El 28 de julio de 1851 el fotógrafo profesional Bertowski obtuvo la primera fotografía de un eclipse solar con el heliómetro del Observatorio de Königsberg, en un tiempo de exposición de 24 segundos.

Por último, en 1850 William Cranch Bond, primer director del Observatorio de Harvard en EE.UU., junto con el fotógrafo John S. Whipple fotografiaban por primera vez una estrella. Esta fue la estrella de primera magnitud Vega (alfa Lyrae), tras una exposición de 100 segundos. Luego lograron fotografiar la estrella Castor, de segunda magnitud, alcanzando con ella el límite de las posibilidades del daguerrotipo. Aquí finalizó el uso del daguerrotipo en Astronomía. Cabe señalar que este procedimiento no aportó ningún conocimiento sobre el Universo al no poder superar al ojo en su detectabilidad. Sin embargo este método estimuló en mucha gente el interés por la fotografía descubriendo sus grandes ventajas al constituir un registro objetivo permanente de los fenómenos celestes.

2.7.3.- El colodión húmedo:

En 1851 un nuevo método fotográfico fue propuesto por G. Le Gray y Frederick Scott Archer. El proceso constaba de las siguientes partes: preparación de algodón pólvora (nitrocelulosa muy fina, mediante la reacción (por 6 minutos a 60° - 80°C) de ácido sulfúrico y nitrato de Potasio en una pequeña cantidad de algodón (alrededor de 15 gramos por litro). Después de lavar y secar el algodón pólvora se disolvía en una mezcla de alcohol y éter con yoduros y bromuros de Cadmio, Potasio y amoníaco en solución. El colodión así preparado era esparcido en una capa uniforme sobre una placa de vidrio que tras una rápida evaporación dejaba una delgada película muy fina y homogénea de nitrocelulosa impregnada con los bromuros y yoduros. Tan pronto como se secaba la placa era sumergida en una solución de nitrato de plata saturada con yoduro de plata; esta operación transformaba los yoduros y bromuros del colodión en sales de plata. La superficie, ahora sensible a la luz, debía ser expuesta mientras permanecía húmeda y sin ningún tipo de enjuague y de otro modo el exceso de nitrato de plata cristalizaría en la capa de colodión, perdiendo sus propiedades fotográficas. Por esta razón el tiempo útil de la exposición del colodión estaba limitado a unos 10 a 15 minutos. La imagen obtenida se desarrollaba luego en un baño de sulfato de Hierro y ácido acético, al cual se agregaba alcohol para facilitar la penetración del revelador a la capa de colodión. La imagen desarrollada era fijada en una solución ácida de nitrato de Plata. La estructura microscópica de la imagen resultante era extremadamente fina y sin granos, comparada con las emulsiones modernas. Pese al cuidado en elaborarlas, era común el depósito de partículas de polvo.

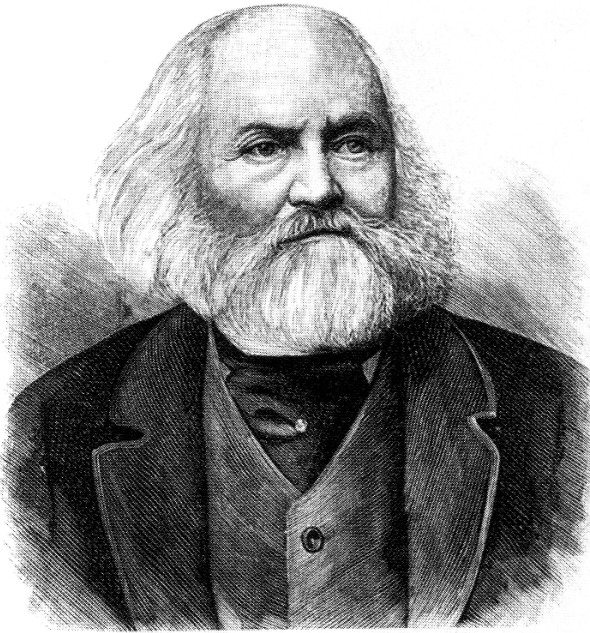
El colodión húmedo tuvo grandes aplicaciones en astronomía. George P. Bond, hijo y sucesor de William C. Bond en la dirección del Observatorio de Harvard, con la ayuda de los fotógrafos Whipple y Black registraron en 1852 las imágenes de Mizar y Alcor en sólo 80 segundos. La imagen de Mizar, estrella de tercera magnitud era detectable con una exposición de 3 segundos. En lugar del límite del daguerrotipo de segunda magnitud, encontraron que con el telescopio de 15 pulgadas podían alcanzar la sexta magnitud. El éxito obtenido con estas fotografías estelares impulsó a G. P. Bond a emprender el primer programa de observaciones fotográficas, referente a estrellas dobles. El método fotográfico rivalizaba en precisión con las mejores observaciones visuales. Bond escribe, en 1858: *"En verdad en todas direcciones el arte parece ser susceptible de más grande perfección, que podría hacer posible su extensión a estrellas de cuatro o cinco magnitudes bajo nuestro límite actual"*.



Fig. 21. Lunar photograph by Rutherford from the year 1865

En 1857 un aficionado de Nueva York, Lewis Rutherford (1816-1892), inició sus experiencias fotográficas con un telescopio refractor. Con la ayuda del óptico Henry Fitz diseñó un sistema de lentes para uso exclusivamente fotográfico, completando su nuevo telescopio en 1864. Con éste pudo fotografiar objetos como cúmulos estelares hasta la novena magnitud en tan sólo 3 minutos. Un telescopio refractor está acromatizado para la zona espectral en la cual el ojo posee su máxima sensibilidad (el amarillo); alejándose en el espectro todas las lentes presentan un error cromático residual que puede ser bastante notorio. La emulsión fotográfica es sensible en

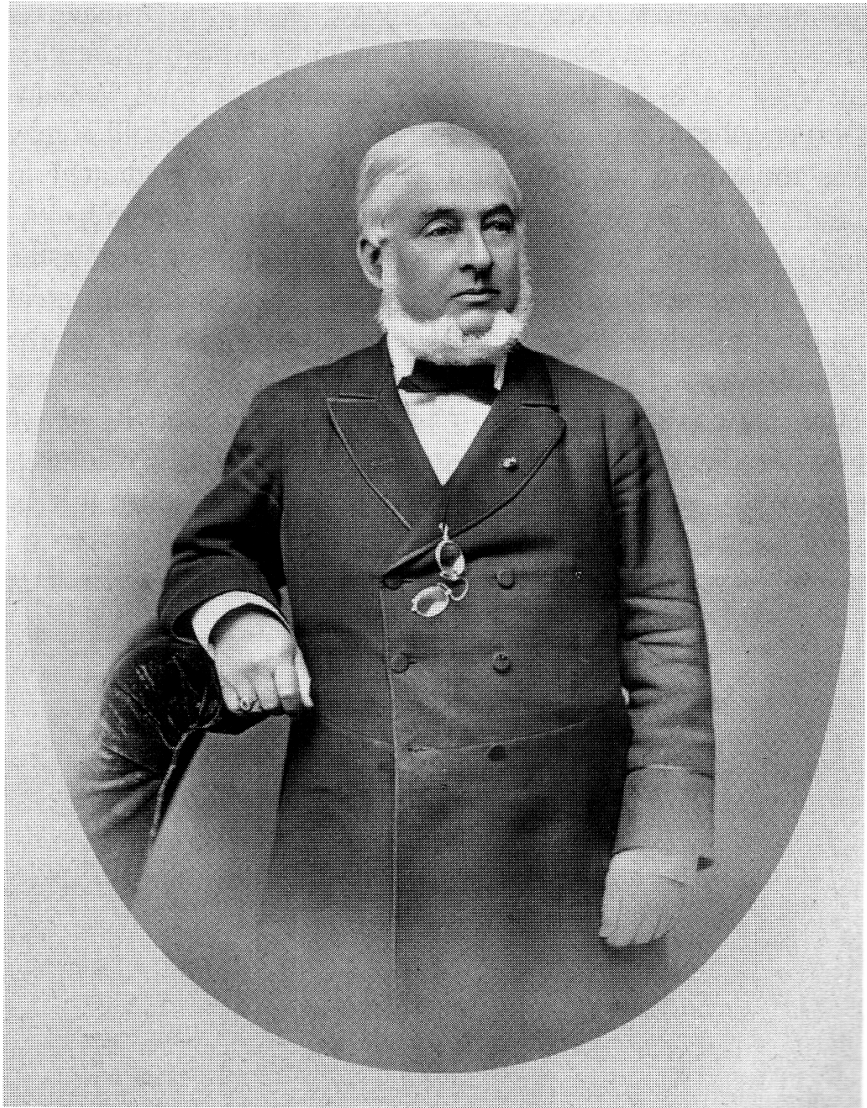
especial a la luz azul por tanto un refractor fotográfico debe ser acromatizado para una longitud de onda menor que un refractor visual. Esto fue hecho por Rutherford y Fitz por vez primera. Rutherford también diseñó varios instrumentos para determinar posiciones con exactitud (micrómetros unidos a microscopios). Esto lo aprendió Rutherford con la experiencia. Fotografió inicialmente con su refractor visual de 11¼ pulgadas (28 centímetros) la Luna y algunas estrellas pero los resultados fueron malos hasta que finalmente le puso a su telescopio un objetivo “fotográfico”.



In the 1860s New York lawyer-turned-astronomer Lewis Morris Rutherford (1816–92), shown at left, together with telescope maker Henry Fitz, developed the essential elements of the “photographic” refractor, which he used to record high-quality images of the Moon, star clusters, and the solar spectrum. From *Atlas der Himmelskunde*, 1898; courtesy the author.

telescope design that had endured since the time of Isaac Newton and instead perfect the art of grinding and silvering glass disks. Henry and his brother, Daniel, took turns on the treadmill-powered grinding machine he designed — except

Luego el astrónomo B. A. Gould se unió a los trabajos de Rutherford. Gould veía dos ventajas a las placas fotográficas con relación a las observaciones visuales: proporcionan información posicional para un conjunto de estrellas y además constituyen un registro permanente: *“Su valor consiste principalmente - escribe Gould - en la precisión con que pueden medirse las posiciones relativas de muchos puntos”* y también agregaba *“las grabaciones fotográficas pueden ser sujetas a mediciones repetidas y mantenerse a través de los años... después del paso de los siglos permitía la detección de cualquier cambio de posición que pudiera ocurrir entre las muchas estrellas”*. Las mediciones de Gould de unas placas de las Pléyades tomadas por Rutherford en 1866 representan el primer uso de la placa fotográfica para detectar movimientos propios (Gould comparó sus mediciones con las hechas por Bessel un cuarto de siglo antes).



English amateur astronomer Warren De la Rue (1815–89) took up celestial photography after seeing the lunar daguerreotypes of William Bond and John Whipple at the 1851 London Exposition. De la Rue dramatically improved photography of the Moon, using the wet-collodion process with a homemade 13-inch clock-driven reflector. His detailed reports were crucial in building early support for celestial photography among practicing astronomers.

En 1851 llegó a Londres la carta fotográfica lunar realizada por Bond en Harvard. Esto impulsó a William de la Rue (1815-1889), rico fabricante de papel, a dedicarse a la fotografía celeste utilizando placas de colodión. En 1852 fue el primero en utilizar el nuevo proceso para fotografiar la Luna. La "*Royal Society*" le pidió, a instancias de John Herschell, la construcción de un "*fotoheliógrafo*" para fotografías solares, que estuvo terminado en 1857 siendo instalado en el Observatorio de Kew, comenzando un programa fotográfico de observaciones solares que aún continúa en nuestros días. En

1860 de la Rue logró fotografiar las etapas sucesivas de un eclipse solar. Estas imágenes mostraron que las protuberancias visibles durante el eclipse pertenecían al Sol y no a la Luna como había sido supuesto. También desarrolló la técnica de fotografía estereoscópica con la cual reveló la verdadera naturaleza de las manchas solares en 1861. Estudiando el Sol aclaró también la naturaleza de la corona solar, descartando su origen en fenómenos asociados a la Luna o la atmósfera terrestre. Esto lo logró mediante observaciones del eclipse de 1861 que observó junto con Secchi. Por último cabe mencionar que de la Rue fue el primero en utilizar un telescopio reflector en fotografía astronómica.

Durante la era del colodión el nuevo arte de la fotografía fue combinado con el otro gran logro del siglo XIX: la espectroscopia. Este trabajo pionero fue realizado por Henry Draper (1837-1883) en Nueva York (hijo de John W. Draper). Huggins obtuvo el primer registro fotográfico de un espectro estelar, en 1863. Fotografió el espectro de Sirio y Aldebarán. Estos eran muy poco definidos y no mostraban la presencia de las líneas de absorción. En mayo de 1872 Henry Draper grabó los primeros espectrogramas de Vega, mediante un espectrógrafo construido por él. Este aparato le permitió asegurar buenos espectrogramas estelares que mostraban las líneas de absorción presente en los espectros.

2.7.4.- La placa seca:

A partir de 1871 se introdujo la forma actual de fotografía: la placa seca de

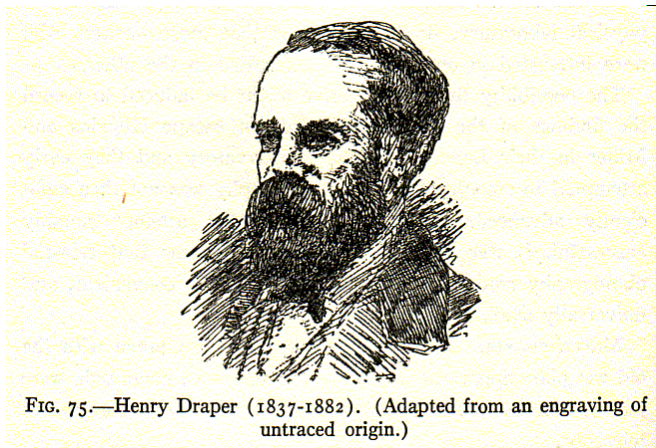


FIG. 75.—Henry Draper (1837-1882). (Adapted from an engraving of untraced origin.)

la placa seca de bromuro de plata. Tuvo sus precursores en Common, Draper y E. Pickering (director del Observatorio de Harvard desde 1877). Henry Draper murió en 1882 donando su fortuna a la Fundación Henry Draper que proporcionó recursos a Pickering para realizar sus estudios y construir nuevos instrumentos fotográficos). Common construyó el reflector Crossley de 36 pulgadas. Este instrumento fue adquirido por Pickering para la estación astronómica de Harvard en Sudáfrica.

El 7 de marzo de 1882 Common fotografió la nebulosa de Orión. En sus placas se manifiestan tenues nebulosidades nunca antes vistas en Orión. Esto marcó una era pues fue la primera vez que la placa fotográfica conducía a descubrir algo no observable con un telescopio a simple vista.

Este procedimiento, utilizado con leves variaciones hasta nuestros días, consiste en recubrir con una delgada capa fotosensible (emulsión) un vidrio, película o papel. La emulsión es una suspensión de cristales de sal de plata en gelatina, tratándose en

general de sales de bromuro de plata con un poco de yoduro de plata. Recubrir un vidrio con emulsión es un proceso muy delicado. La capa sensible tiene un espesor de 2 a 5 micrones sobre un vidrio de 1 a 3 milímetros de espesor, según su tamaño. Es fundamental que la base de vidrio sea plana-óptica, es decir, que no se desvíe en ningún punto más de 0,01 mm de un plano perfecto. La luz que incide sobre uno de los cristales de plata libera electrones que se combinan, en impurezas del cristal, con iones de plata para depositar en él plata neutra. Al sumergir la placa expuesta en un baño revelador se logra un ennegrecimiento de los granos expuestos a la luz. Luego en un baño fijador se destruye la sensibilidad a la luz de todos los cristales de plata. Finalmente después de un lavado en agua se logra una imagen negativa permanente.



SOUTH AFRICAN ASTRONOMICAL OBSERVATORY

David Gill, director of the Royal Observatory at the Cape of Good Hope in South Africa, photographed the Great September Comet of 1882 with a borrowed 2.5-inch commercial portrait lens. Surprised by the number and quality of star images, such as in this 110-minute exposure made on November 14th, Gill embarked on a 5½-year photographic survey of the southern sky that yielded positions and magnitude estimates for nearly 455,000 stars. He became a crusader for the adoption of celestial photography by professional astronomers.

La observación desde la Ciudad del Cabo del gran cometa de 1882 por David Gill (1843-1914) astrónomo del Observatorio inglés en esa ciudad, lo impulsó a utilizar la fotografía para realizar un gran mapa fotográfico del hemisferio austral con el fin de confeccionar un catálogo que complementara el *Bonner Durchmusterung* publicado por Argelander para el cielo boreal. Gill tomó todas las placas que fueron enviadas a Gröningen en Holanda donde la difícil tarea de medir las posiciones de las estrellas fue realizada por Jacobo C. Kapteyn (1851-1922). Como resultado de este esfuerzo se publicó en 1900 el "*Cape Photographic Durchmusterung*" que presentaba posiciones y magnitudes para 454.000 estrellas australes. Este trabajo estaba recién en sus inicios cuando en 1887 se celebró en París un Congreso Internacional a iniciativa de Gill y los hermanos Henry, ópticos del Observatorio de París, Paul Pierre Henry (1848-1905) y Mathieu Proper Henry (1849-1903). En ese congreso se decidió elaborar un mapa fotográfico de todo el cielo, una "*Carte du Ciel*", que debía llegar hasta estrellas de magnitud 14, para confeccionar un catálogo completo hasta magnitud 11 inclusive. Este trabajo monumental sería realizado por una cooperación internacional de 18 observatorios, entre ellos el Observatorio Astronómico Nacional de Chile. Las fotografías serían obtenidas por telescopios idénticos fabricados por la fábrica francesa Gauthier, con ópticas gemelas realizada por los hermanos Henry de París. Los observatorios que se comprometieron en 1887 adquirirían un telescopio y realizarían la labor correspondiente a una franja del cielo que se les asignaría. El cielo completo se cubriría con 22.000 placas, cada una de las cuales cubre una zona de $2^\circ \times 2^\circ$ en el cielo. Se estimaba que el mapa celeste contendría unos 50 millones de estrellas. Este trabajo monumental nunca fue completado por la falla de varios observatorios en cumplir la tarea asignada.

Uno de los grandes legados del siglo XIX a la astronomía del siglo XX fue el Catálogo Henry Draper, realizado en Harvard con la ayuda financiera de la fundación Draper. En este catálogo junto con las posiciones y magnitudes de las estrellas se consignan para ellas sus tipos espectrales de acuerdo a la clasificación desarrollada en Harvard, que constituye la base del sistema actual de clasificación espectral.

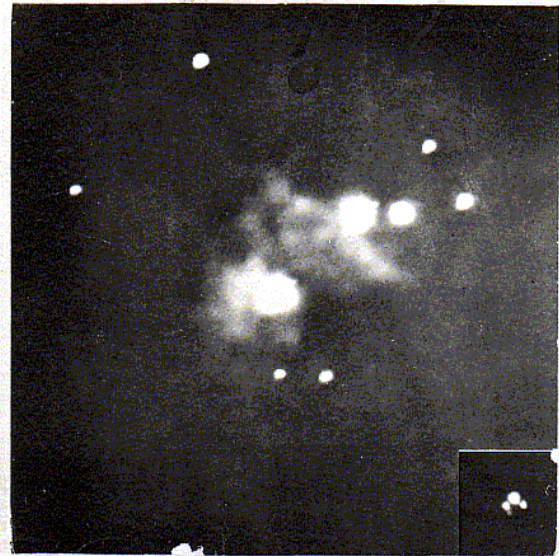
Photography enters astronomy

Most of the improved understanding about the nature of the Sun came about by the gradual addition of photography to the tools of research available to astronomers. Indeed the very brightness of the Sun made it an attractive subject for the very slow and inefficient early photographic processes. The first daguerreotype of the solar disc was made by the French physicists J.B.L. Foucault (1819–68) and A.-H.-L. Fizeau (1819–96) in Paris in 1845. The faster collodion process, invented by the English sculptor F.S. Archer (1813–57) in 1850, was used by his fellow-countryman, the photographer and amateur astronomer Warren De la Rue (1815–89), to photograph the sunspots on the solar disc with a specially constructed camera at the Kew Observatory, near London. This he did in 1858, only a few years after Humboldt's publicity of Schwabe's discovery of the sunspot cycle. The 'autographic' recording of the daily state of the solar disc started there almost immediately, and was continued until 1872, when it was further extended by large programmes of almost continuous recording on a worldwide basis, not only of the spots on the photosphere but also of the outer chromosphere over the disc and at the edge of it.

The greatly improved dry gelatine plate became available in the late 1870s. It was sensitive enough to record the flash spectrum of the Sun (which lasted only a few seconds during a total eclipse), so enabling the lines to be measured later in the laboratory. More importantly, these plates were at last sensitive enough for them to be applied to telescopes at night, to photograph the very much fainter stars and nebulae (see page 288).

Top: The first photograph of the Orion Nebula, taken by Henry Draper in 1880.

Bottom: The nebula as photographed by A. A. Common only three years later, showing the strides in technique.

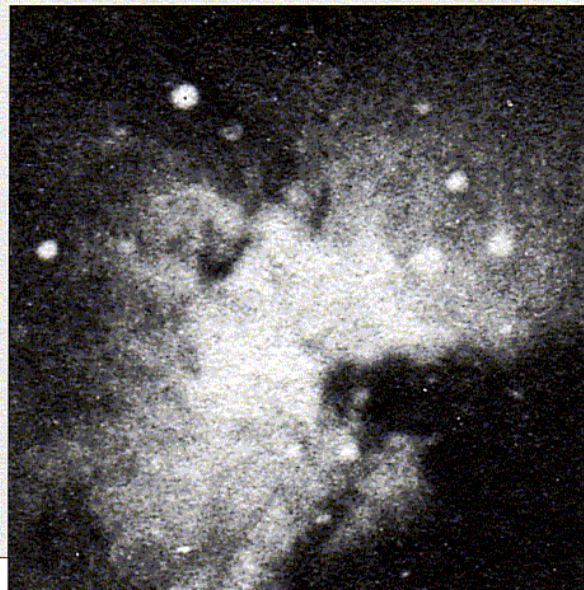


FIRST PHOTOGRAPH OF THE NEBULA IN ORION.

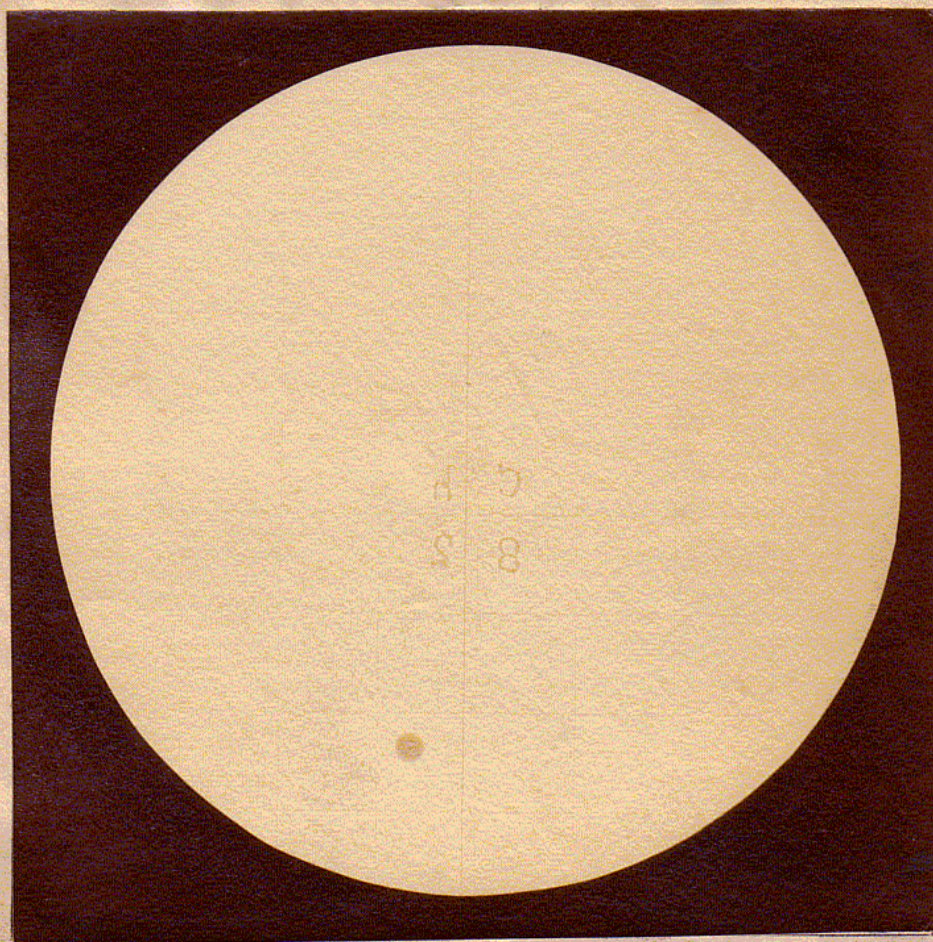
TAKEN BY PROFESSOR HENRY DRAPER, M.D.

September 30th, 1880, Exposure 61 minutes.

The picture is an Artotype enlargement by Harroun & Bierstadt from the original negative. The large stars, being much brighter than the Nebula, are greatly over-exposed. In the lower right hand corner is a photograph of the Trapezium alone, with only 5 minutes exposure.



Para tener una idea cuantitativa del progreso que se logró con el uso de la placa fotográfica en astronomía se puede recordar que en 1888 Dreyer publicó un catalogo de nebulosas llamado "New General Catalogue" en el que se presentan 7.849 objetos, todos los visibles con los telescopios de la época. En 1899 Keeler con el reflector Crossley instalado en el Observatorio de Lick en California, estimaba que se podían registrar con él unos 120.000 objetos. En 1904 Perrine estimó su poder de detección en 400.000 objetos y Herber Curtis lo estimó primero en 200.000 (1913) y luego en 1.000.000 (1916).



TRANSITO DE VENUS POR EL SOL

6 DE DICIEMBRE DE 1882.

Como 3 horas proximately despues del primer contacto.—
Copia de una fotografia tomada por la Comision de los Estados-Unidos de Norte-América.

Respecto a la sensibilidad de las placas fotográficas en 1850 el daguerrotipo podía registrar estrellas de segunda magnitud. En 1857 colodión permitió registrar estrellas de sexta magnitud. En 1887, con placas secas de bromuro de plata se podían registrar objetos de magnitud 10 en 20 segundos y llegar hasta magnitud 16 en 1 hora 20 minutos. Actualmente se puede registrar, con el telescopio de 4 metros de Cerro Tololo, estrellas de magnitud 16 en menos de 1 segundo y es posible llegar hasta

magnitud 24,5 en menos de 1 hora. Con emulsiones modernas pueden registrarse objetos unas 100 veces más débiles que los más débiles visibles a simple vista mediante el mismo telescopio.

Actualmente las placas fotográficas han caído en un paulatino desuso a manos de detectores digitales bidimensionales llamados CCD, que han proliferado como detectores de cámaras de video o de cámaras de imágenes digitales. La inmensa diferencia en eficiencia cuántica entre una placa y un CCD, un 2% para las mejores placas comparado con un 80 a 90% para un buen CCD, ha hecho que todos los nuevos telescopios han incorporado detectores del tipo CCD, abandonando las placas fotográficas. Hace veinte años los CCDs eran arreglos bidimensionales de fotodiodos de 300x500 elementos (píxeles). Ahora son comunes los detectores de 2048x2048 y hasta 4096x4096. Además se fabrican cámaras donde se instala un conjunto de detectores (un mosaico) de 4, 8, hasta más de cien CCDs. Así se totalizan cientos de pagapíxeles por imagen. Pese a que por su naturaleza los CCDs son detectores analógicos, un conversor análogo-digital los hace “contar” fotones. Dentro de un amplio rango un CCD es un detector lineal y por ello mucho más apropiado que la placa fotográfica para efectuar fotometría estelar (la placa fotográfica es un detector logarítmico).

Después de un siglo y medio de evolución la placa fotográfica de Niépce y Daguerre parece haber llegado al fin de su camino. Hace algunos años, hacia 1995, la fábrica norteamericana Kodak, principal proveedor de placas fotográficas para los observatorios discontinuó la producción de placas, poniendo con ello fin a una era en el desarrollo de la astronomía. El siglo XX fue el siglo de las imágenes analógicas; el siglo XXI será el siglo de las imágenes digitales.

Bibliografía:

- Guillermo Delgado 1981: *"Fotografía Astronómica"* (trabajo presentado al curso EH 282 de la Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile).
- Alan W. Hirshfeld "Picturing the Heavens. The Rise of Celestial Photography in the 19th Century", *Sky & Telescope*, Abril 2004, p. 36.
- D. Papp y J. Babini: *"Panorama General de Historia de la Ciencia"*, Vol. X, Espasa-Calpe, B. Aires, 1958, pp. 217-223.
- Miczaika, G. R. y Sinton, W.M. *"Las Herramientas del Astrónomo"*, EUDEBA, B. Aires, 1967, pp. 23-51 .