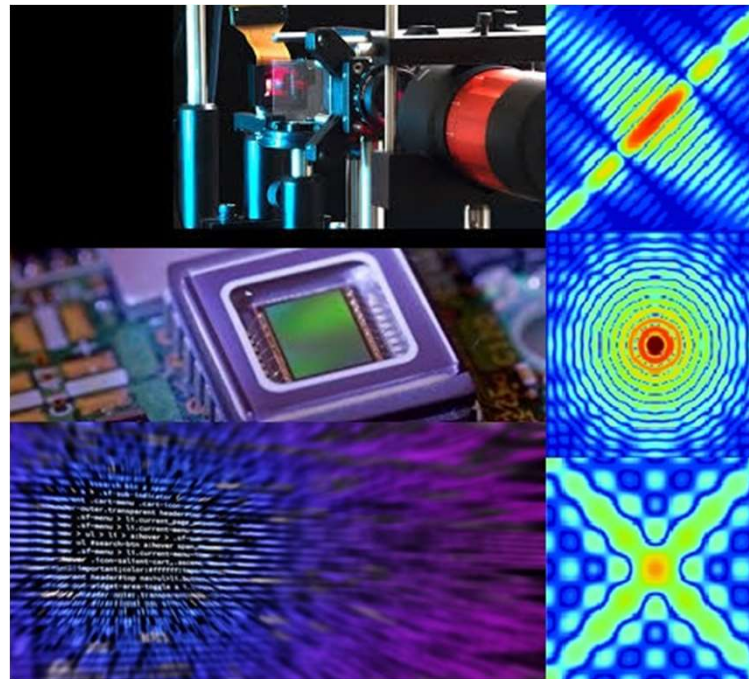




# Imaginería Óptica Computacional: Introducción.



Segundo semestre 2021

**Dra. Julia Alonso**

*Instituto de Física*



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



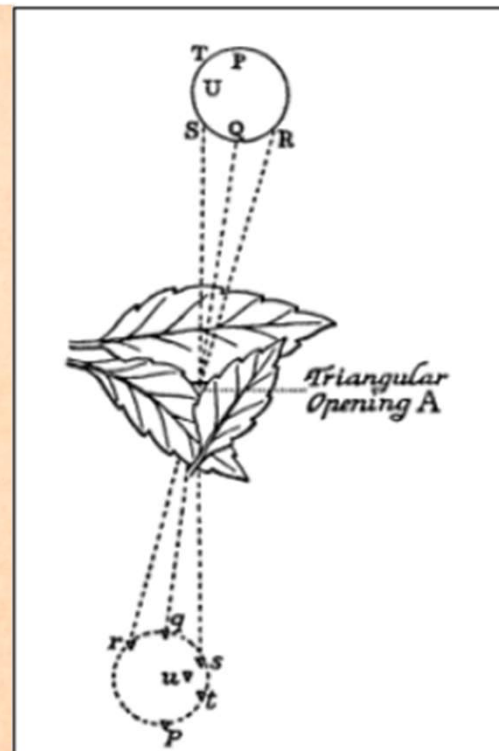


## Camera obscura (Cámara estenopeica / pinhole camera)



Cuando el follaje en un árbol es suficientemente denso y los espacios entre las hojas son suficientemente pequeños, cada pequeño espacio actúa como un orificio a través del cual se proyecta la imagen invertida del sol brillante sobre el suelo.

## Camera obscura (Cámara estenopeica / pinhole camera)



Bragg, "Universe of the light", London 1933.

El nuevo libro de invenciones, oficios e industrias. Leipzig y Berlín: Otto Spamer, 5a edición 1864-1867..

Durante un eclipse de sol parcial, puede verse la imagen del eclipse proyectada invertida, múltiples veces a través de los pequeños espacios entre las hojas de los árboles.

## Camera obscura (Cámara estenopeica / pinhole camera)



El nuevo libro de invenciones, oficios e industrias. Leipzig y Berlín: Otto Spamer, 5a edición 1864-1867..

La *camera obscura* era conocida por chinos, árabes y griegos. Existen escritos de Aristóteles o de alguno de sus seguidores que describen el fenómeno (384 - 322 a.C.).

## Camera obscura (Cámara estenopeica / pinhole camera)

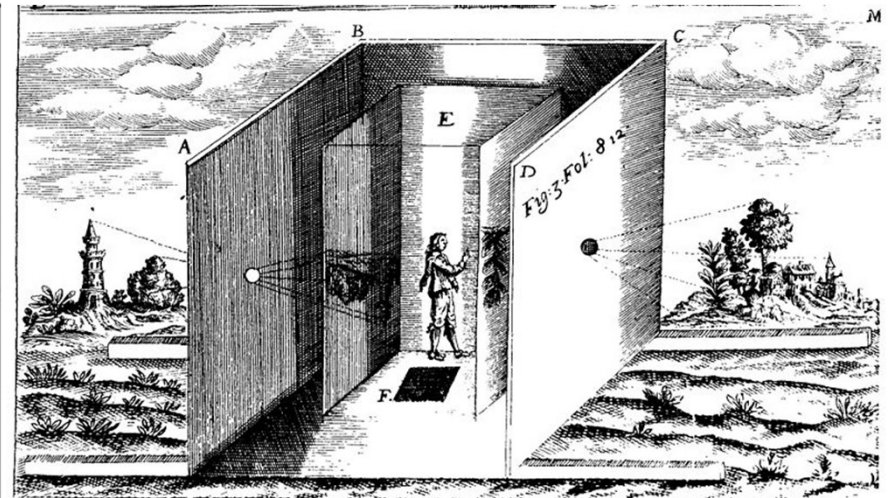
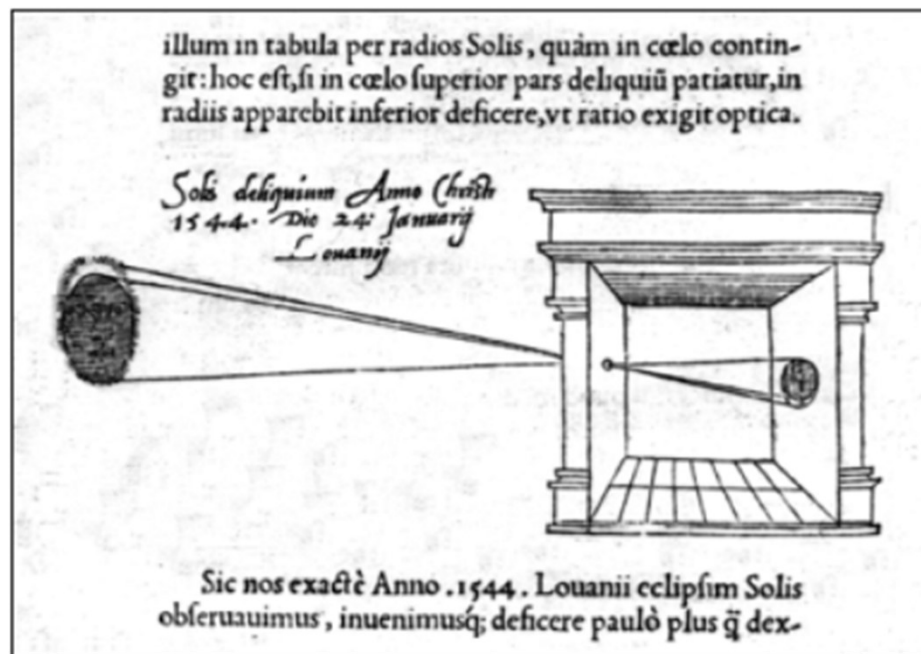
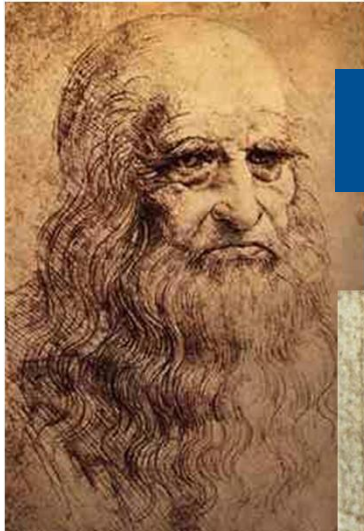
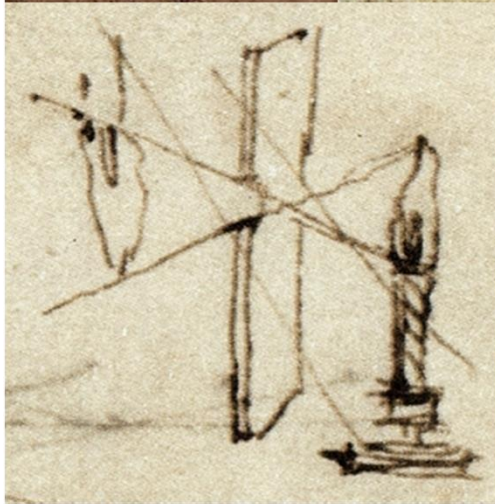
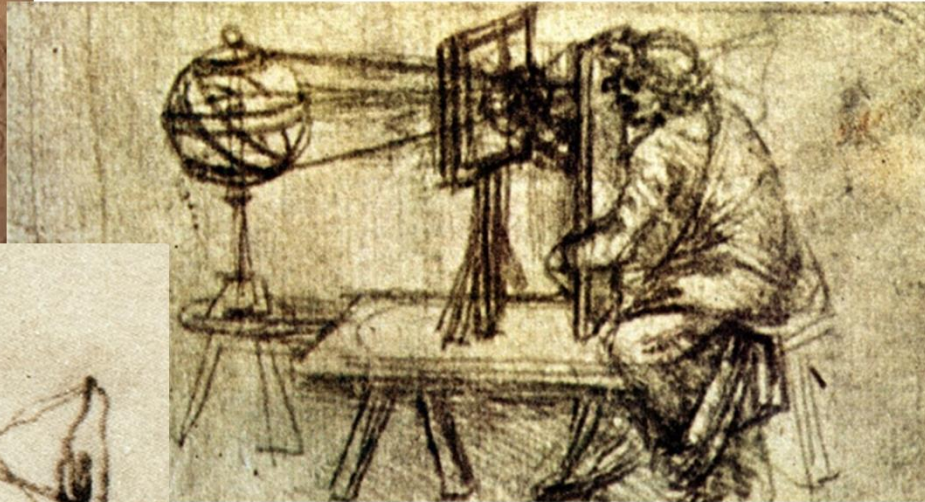


Ilustración del libro de Reinerus Gemma-Frisiu

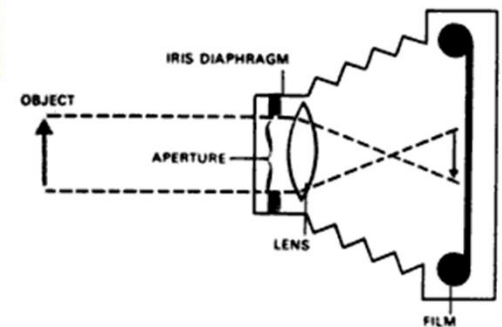
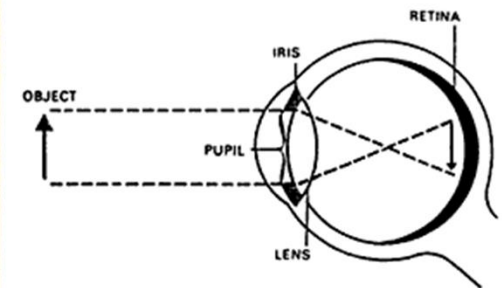
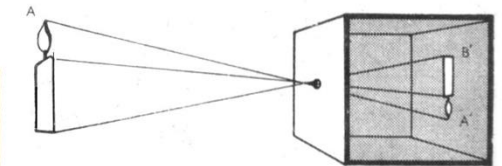
Muchos científicos se han interesado en el color, la luz y la visión a lo largo del tiempo. La cámara oscura sirvió a Leonardo da Vinci como modelo para el estudio de la anatomía del ojo humano.



## Cámara oscura

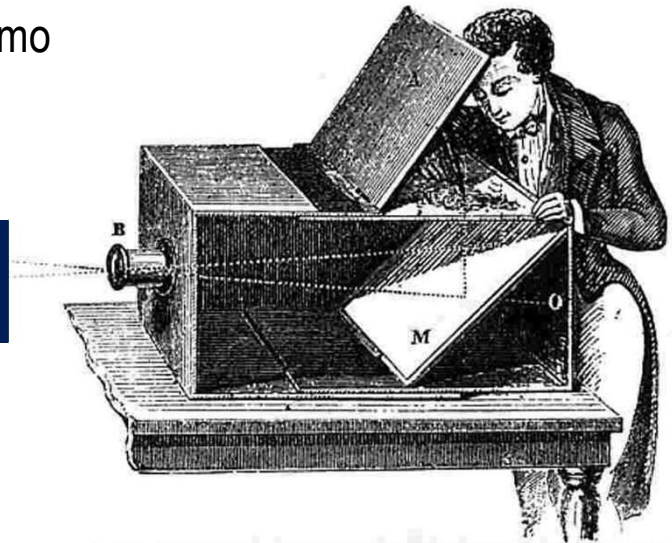


En las bases de la mecánica de la visión, da Vinci hace una analogía entre el funcionamiento del ojo y el de la cámara oscura (Codex Atlanticus, colección de sus dibujos y escrituras entre 1478 y 1519).

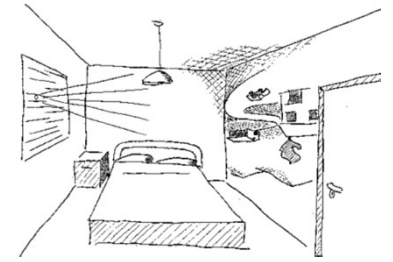


Primer cámara oscura portátil que se comercializó como elemento de dibujo 1795 – 1805.

## Cámara oscura



Es una caja oscura, con un pequeño orificio que permite que los rayos de luz lleguen desde un objeto y se forme su imagen (Óptica geométrica).



## Cámara oscura



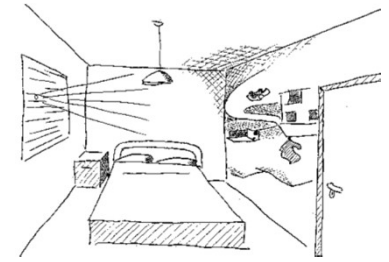
Abelardo Morell. Light Bulb, 1991



Abelardo Morell. Camera Obscura: View of Hotel de Ville, Paris, 2015.



Es una caja oscura, con un pequeño orificio que permite que los rayos de luz lleguen desde un objeto y se forme su imagen (Óptica geométrica).



## Cámara oscura



**Making Your Own Room With a View | National Geographic**

<https://www.youtube.com/watch?v=gvzpu0Q9RTU>.



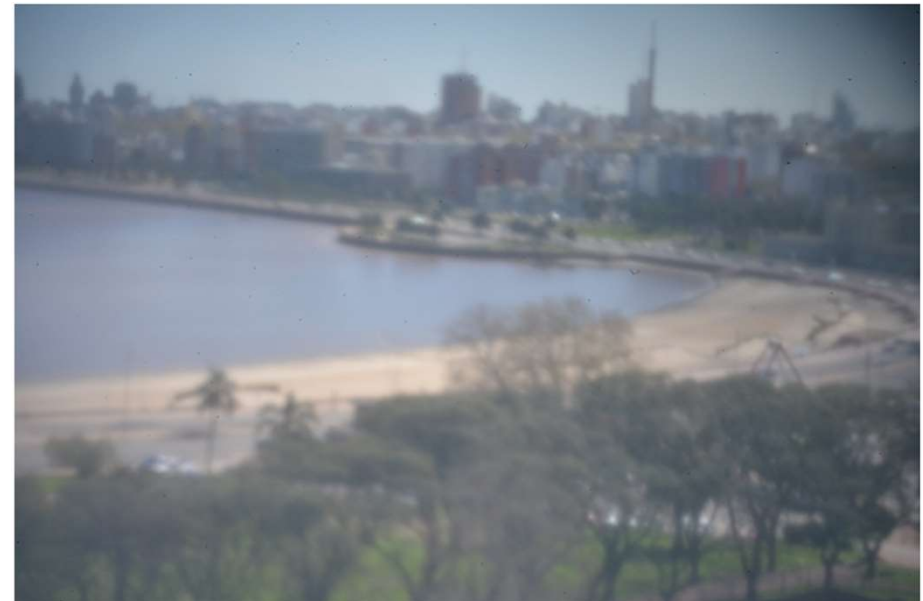
Es una caja oscura, con un pequeño orificio que permite que los rayos de luz lleguen desde un objeto y se forme su imagen (Óptica geométrica).

## Cámara oscura (DSLR *pinhole camera*)

Nikon D5100, sin lente. Tapa con orificio de alfiler. Hay que jugar con el ISO (sensibilidad, amplifica la señal electrónica) y con el tiempo de exposición (tiempo con el obturador abierto). Fotos tomadas desde el Instituto de Física, piso 6 de la Facultad de Ingeniería, setiembre 2017.



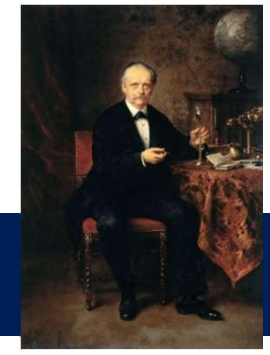
Manual, ISO 200, exposición 1/3 s. Foto: J.Alonso.



Manual, ISO 200, exposición 1/2 s. Foto: J.Alonso.

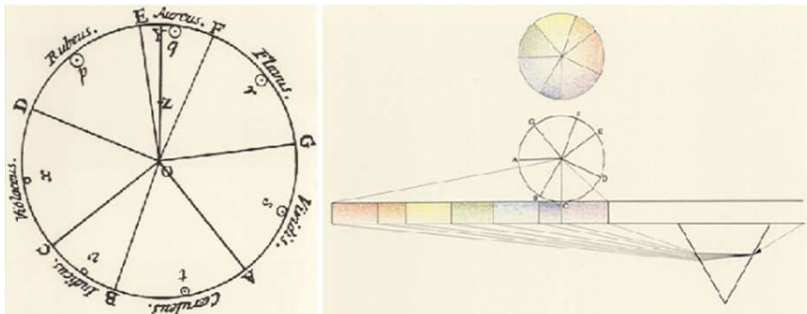


Muchos científicos se interesaron en la luz y los colores...

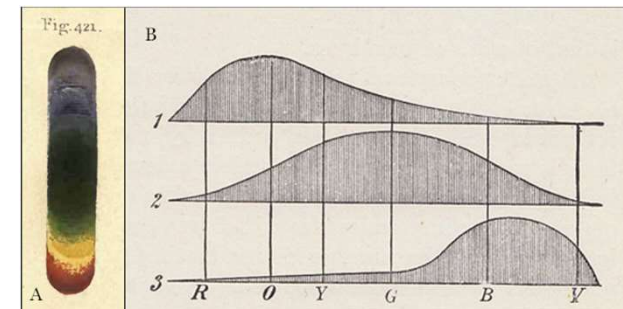


*Isaac Newton* descubrió a través de sus experimentos que era posible combinar los colores del arcoiris en el color blanco (1704). Hizo famoso un **arreglo circular de siete colores** (rojo, naranja, amarillo, verde, cian, azul y violeta).

*Tomas Young* (1802) consideró la sola necesidad de **tres colores primarios** para crear blanco o cualquier color percibido por el ojo. Postuló la existencia de tres tipos de receptores en el ojo (ahora conocidos como conos), cada uno sensible a un rango de la luz visible. Más adelante (1850's) sería *Hermann von Helmholtz* quien establecería mejor la tricromacia (R,G,B).



Combinación de colores de Newton (1704).



Young-Helmholtz teoría de tricromacia (RGB) diagrama espectral (1802 y 1850).



## Primer registro permanente de una imagen

Mientras tanto, los principios básicos de la fotografía habían nacido con la invención de *Joseph Nicéphore Niépce* (1826) de una superficie sensible a la luz. Utilizó una cámara oscura para exponer una placa de cobre recubierta con plata y estaño. Se requirieron cerca de ocho horas de exposición.



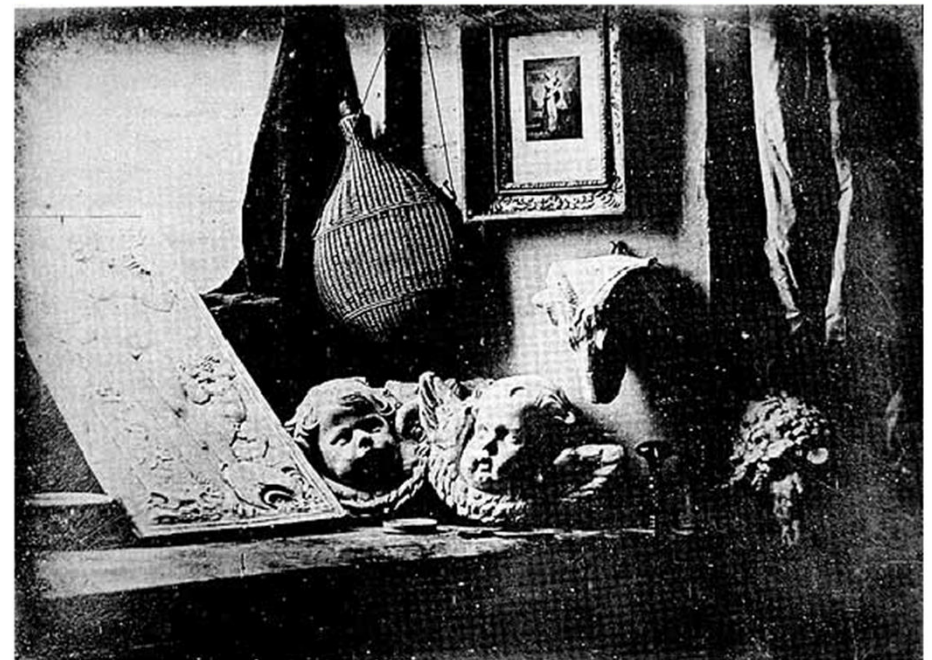
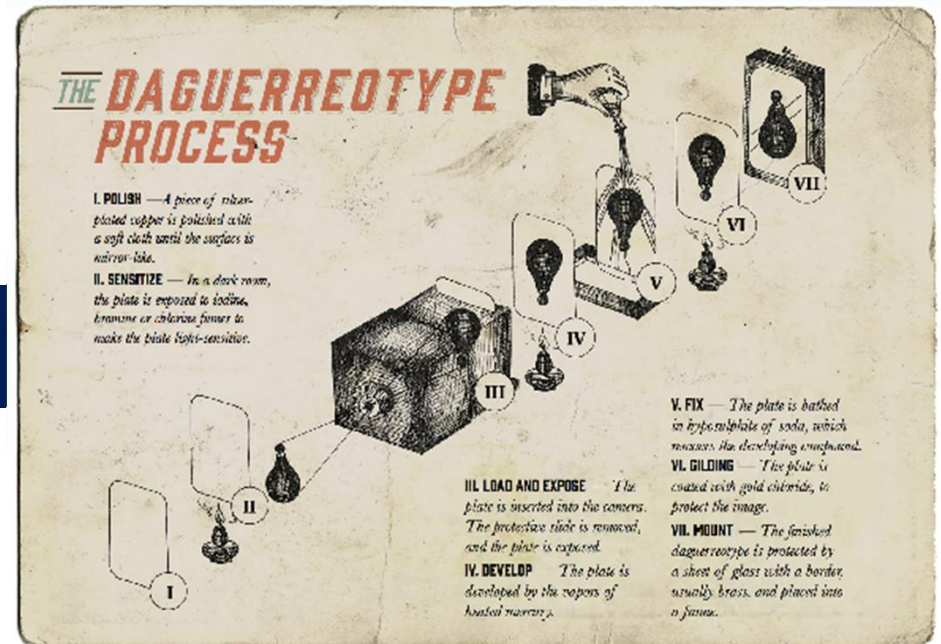
Niépce (1826) primer registro permanente de una imagen.

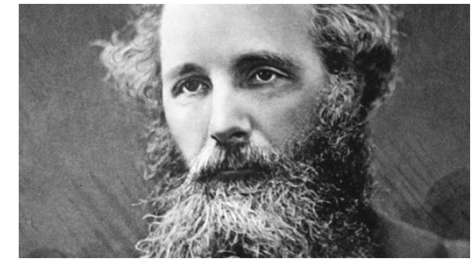


Unos años más tarde *Lois Daguerre*, quien aprendió algunas de las técnicas de Niépce anunciadas en la Academia de Ciencias en París en 1839, mejoró la tecnología de la fotografía a través de un nuevo proceso conocido como **Daguerrotipo**.

Redujo significativamente el tiempo de exposición necesario y resultó el primer proceso fotográfico comercial.

Daguerre (1839). Primer proceso fotográfico comercial.

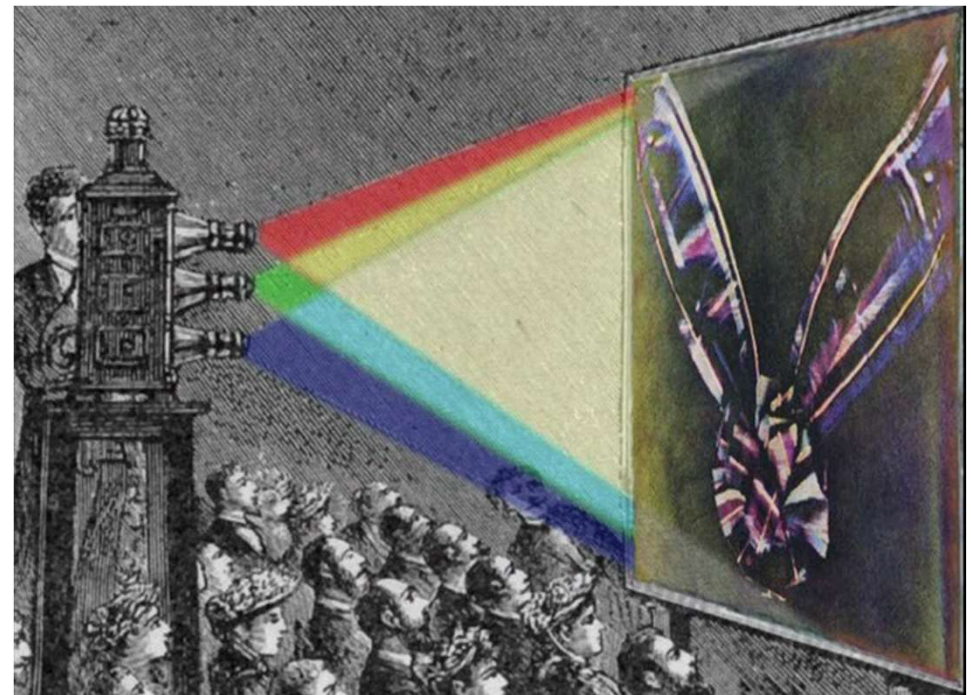




## Primera fotografía permanente a color

En 1861, *James Clerk Maxwell* fue invitado a dar una charla en la Royal Institution sobre su trabajo acerca de la visión del color. Allí realizó una demostración visual de que cualquier color se podía hacer mezclando rojo, azul y verde (R,G;B). Para ello colaboró con su colega en *King's College London*, el fotógrafo *Thomas Sutton*.

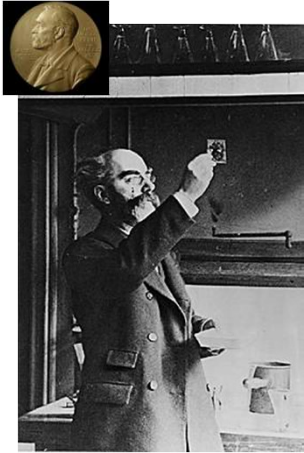
Tomaron tres fotografías sucesivas de una cinta de tartán con tres filtros diferentes (rojo, verde, azul). Luego, proyectaron cada una de las imágenes superpuestas sobre una misma pantalla a través del filtro correspondiente.



Maxwell-Sutton (1861) primer fotografía permanente a color .

Gabriel Lippmann desarrolló una teoría para fotografía en color (1891), basada en la descomposición de la luz blanca en colores debido a la interferencia por reflexión en una capa de mercurio. En 1908 recibió el **Premio Nobel de Física** por ésto. El procedimiento sirvió de base para la holografía. Como físico, fue asesor de tesis de Marie Curie en la Sorbona.

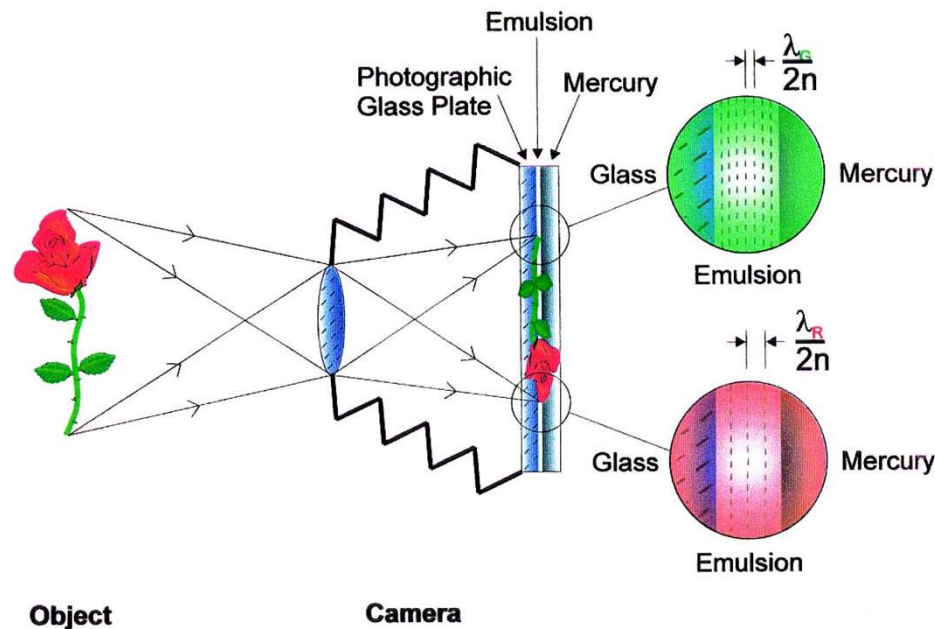
## Fotografía en color por interferencia



Gabriel Lippmann

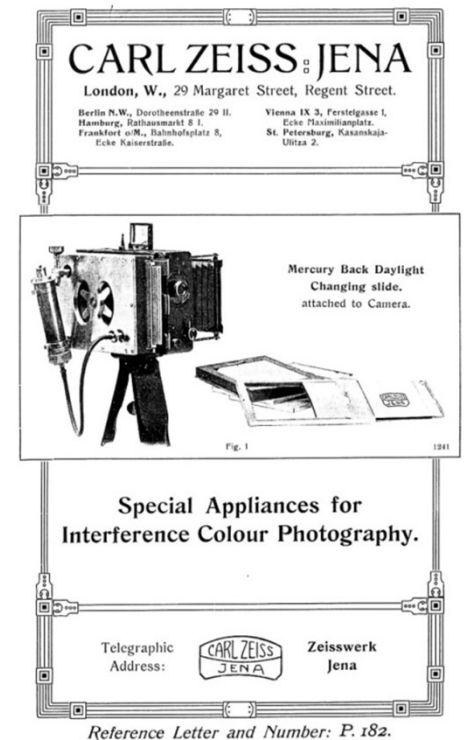


Fotografía tomada por Lippmann



<http://www.hansholo.com/lippmann-photography-principle.html>

Aunque los colores resultaban sorprendentemente fieles el proceso era impráctico para su comercialización.



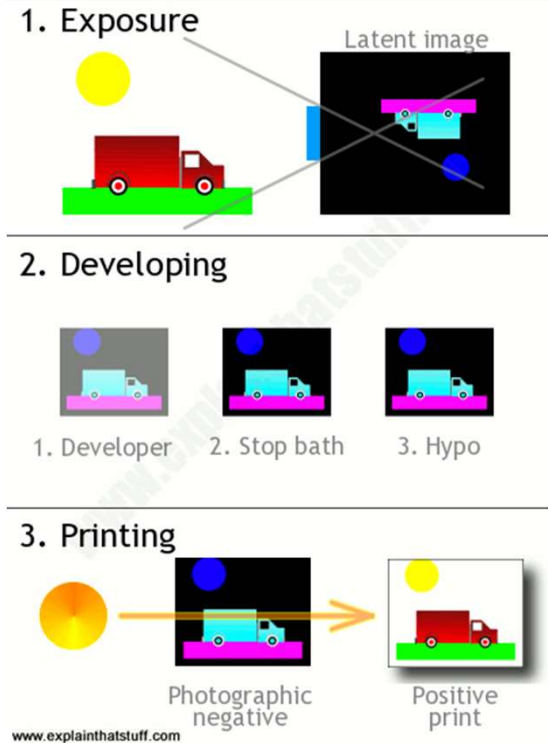


# Fotografía para el público en general

Alrededor de 1883, *George Eastman*, fundador de **Eastman Kodak Corporation**, desarrolló una película flexible que podía ser enrollable, lo que hizo la fotografía más accesible al público en general. El rollo fotográfico permaneció como la forma dominante de la fotografía hasta que los avances en los sensores de estado sólido llevaron a los consumidores a los formatos digitales.



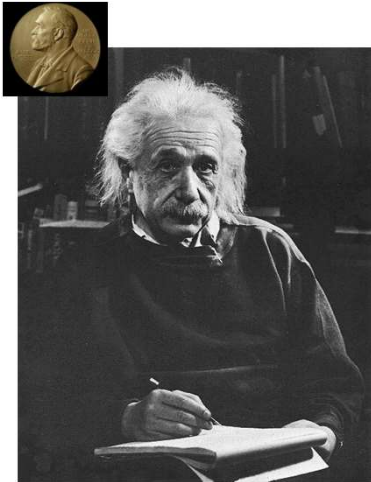
## THE PHOTOGRAPHIC PROCESS



Eastman (fundador de Kodak) desarrolla la primer película flexible enrollable (1883).



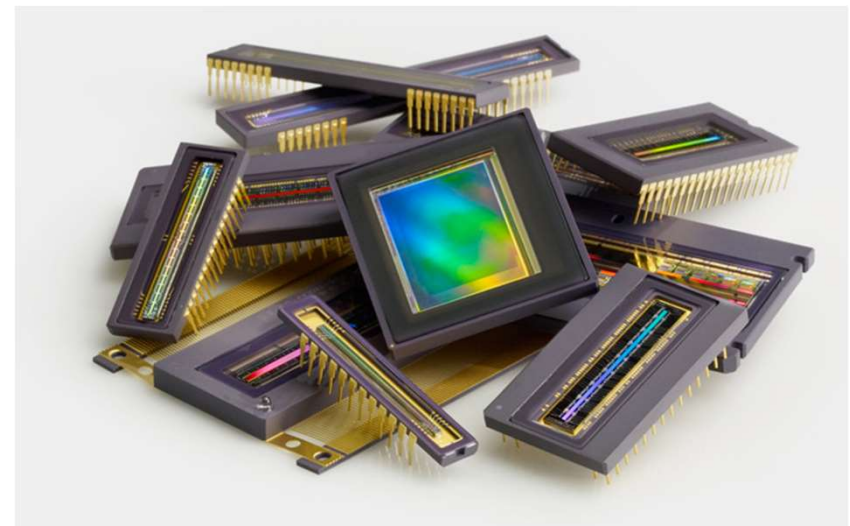
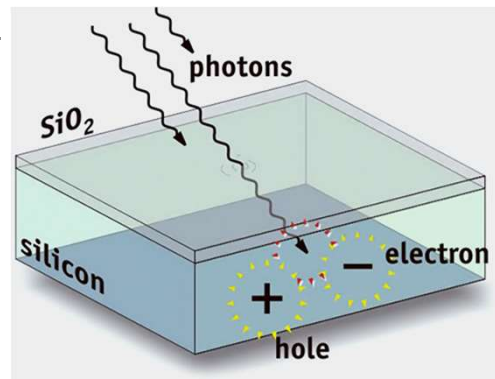
Sensores de estado sólido (CCD, CMOS) se basan en el efecto fotoeléctrico



Albert Einstein explica en 1905 la teoría del efecto fotoeléctrico. Recibe el **Premio Nobel en Física** en 1921.

## Efecto fotoeléctrico y sensores

Cuando un fotón es absorbido por un semiconductor, se crea un par electrón-hueco. Y se genera una corriente de electrones a partir de la cual podemos medir la intensidad de la luz.



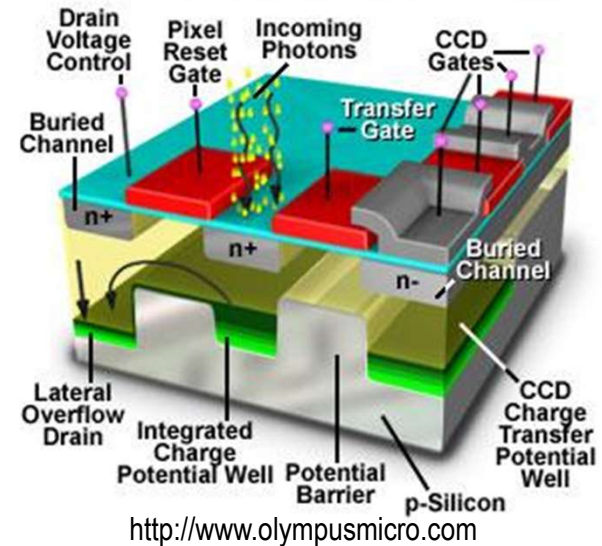
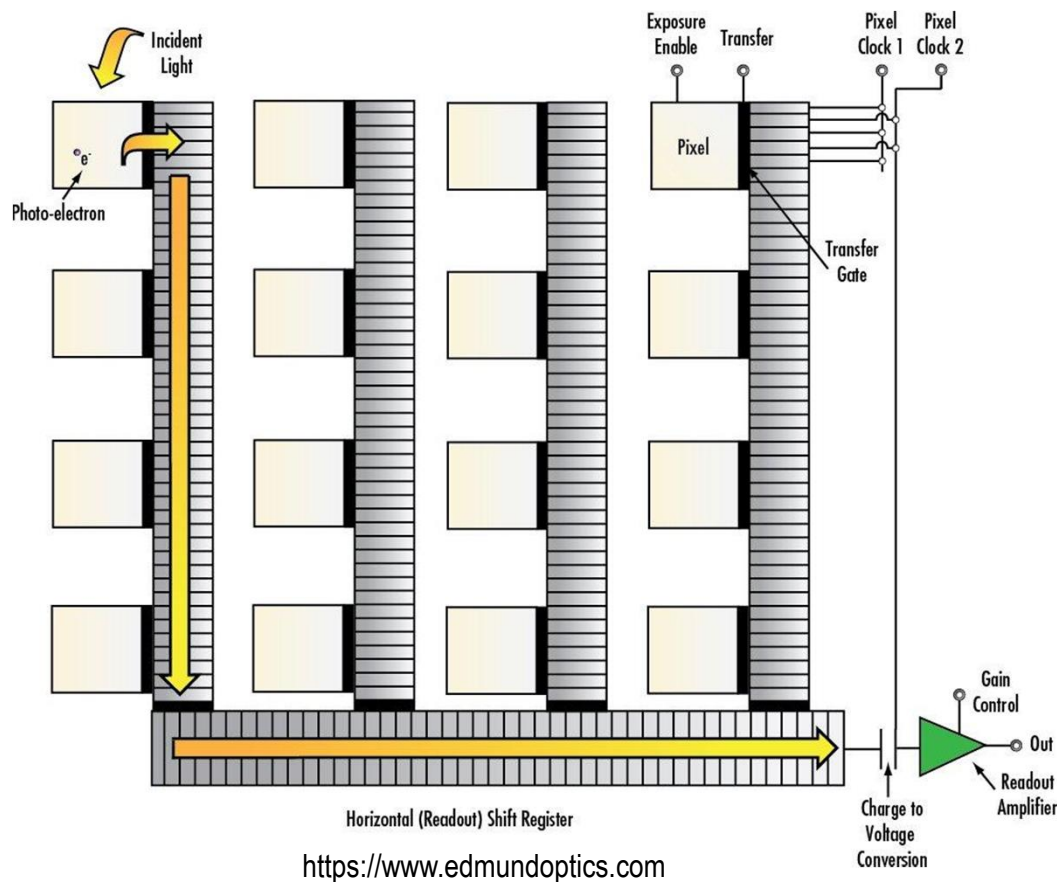
CCD (charge coupled device) y CMOS (complementary metal oxide semiconductor) se basan en diferente tecnología para capturar las imágenes digitalmente.

<https://www.teledynedalsa.com/en/learn/knowledge-center/ccd-vs-cmos/>



Los electrones debidos a la interacción de los fotones con los átomos de silicio son almacenados en pozos de potencial y transferidos en forma secuencial a lo largo del chip, leídos como voltaje y finalmente la señal es amplificada.

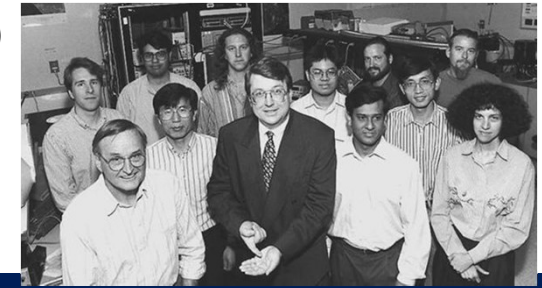
## Charged-Coupled Device (CCD)



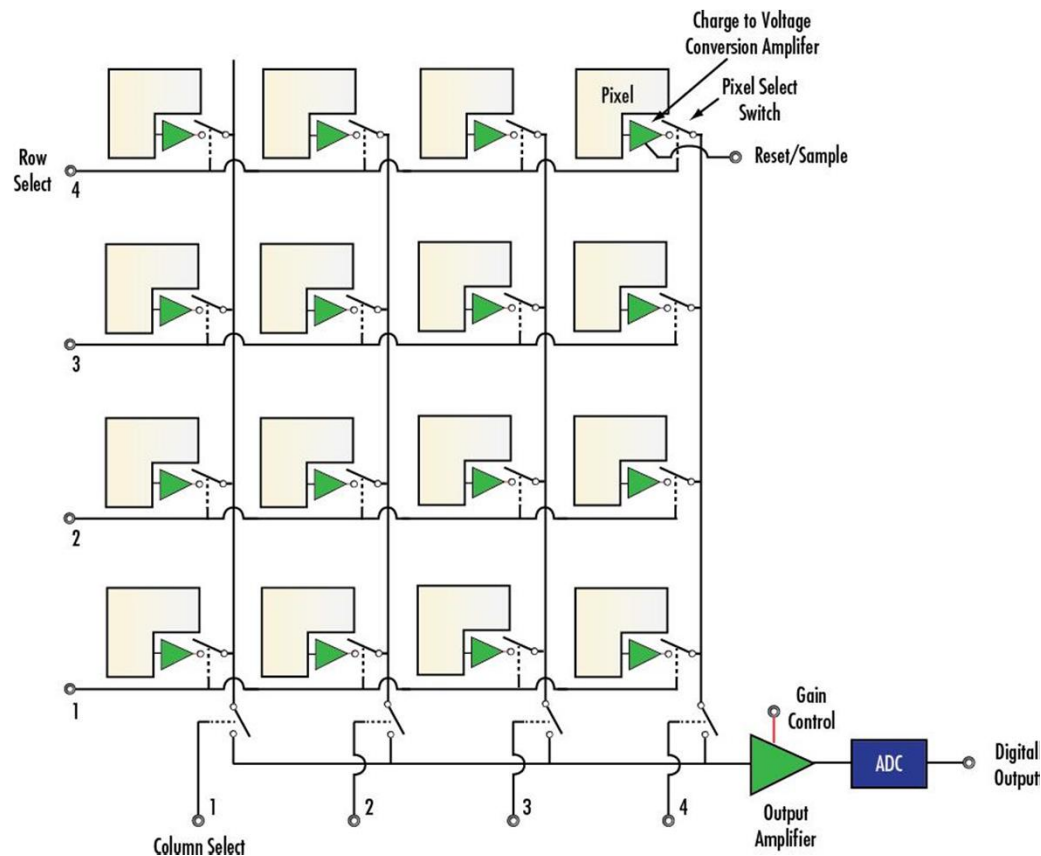
- Relativamente libre de ruido
- Lectura serial de píxeles: lenta
- Consume más energía

Más info en *The Science of Camera Sensors*  
<https://www.youtube.com/watch?v=MytCfECfqWc>

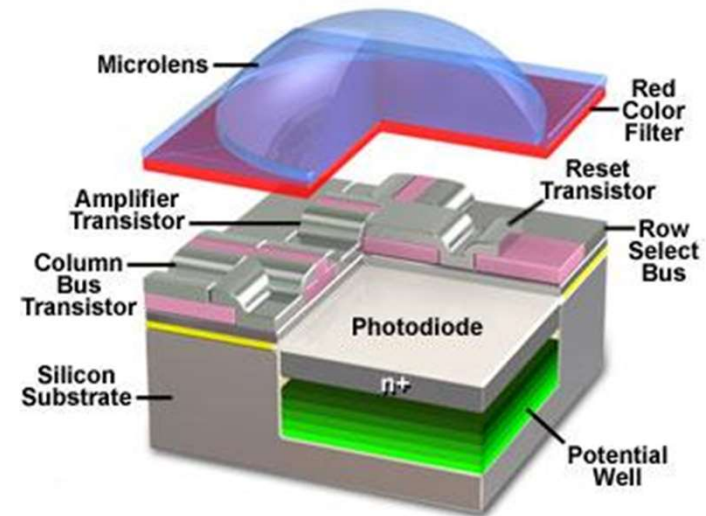
El diseño más popular de CMOS es el *Active pixel sensor* (APS) en el cual el fotodiodo y el amplificador de lectura están incorporados en cada píxel. Esto permite una lectura más rápida de la imagen capturada.



## Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)



<https://www.edmundoptics.com>



- Más ruidoso
- Procesamiento rápido
- Menor demanda de energía
- Más barato de producir

Más info en *The Science of Camera Sensors*  
<https://www.youtube.com/watch?v=MytCfECfqWc>

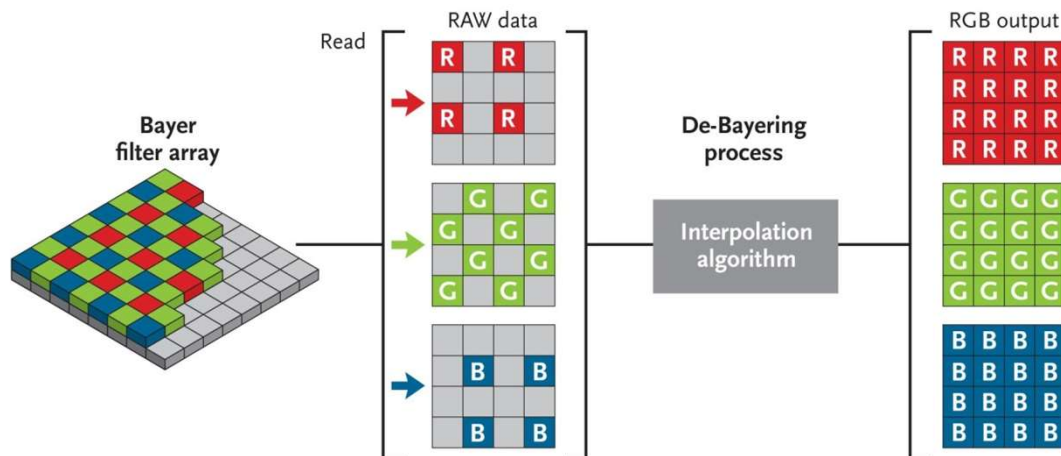
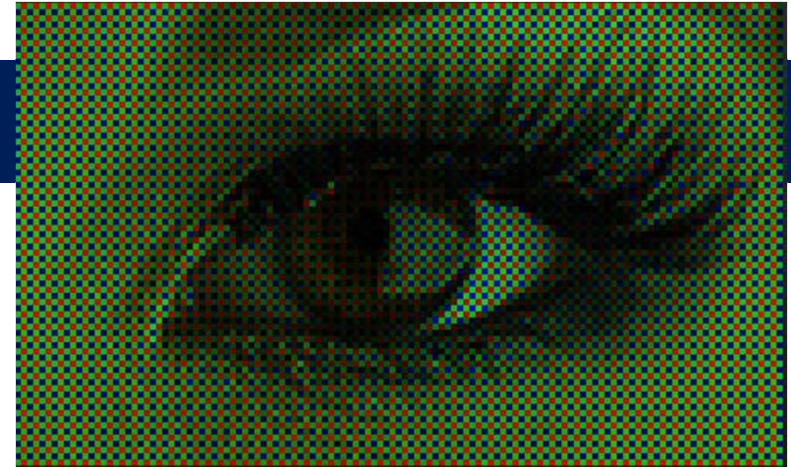
En 1974, Bryce Byer (Kodak) creó la matriz de filtro de color conocida como filtro de Bayer. En esos días, el filtro de Bayer describía un arreglo de tintas de color sobre un film fotográfico. Este filtro se transferiría luego a la fotografía digital.



Bryce Byer,  
(Kodak, 1974).

## Filtro de Bayer

El patrón de Bayer (mosaico de Bayer) es montado directamente sobre un sensor monocromático, de modo que píxeles vecinos registran diferentes colores de la luz.



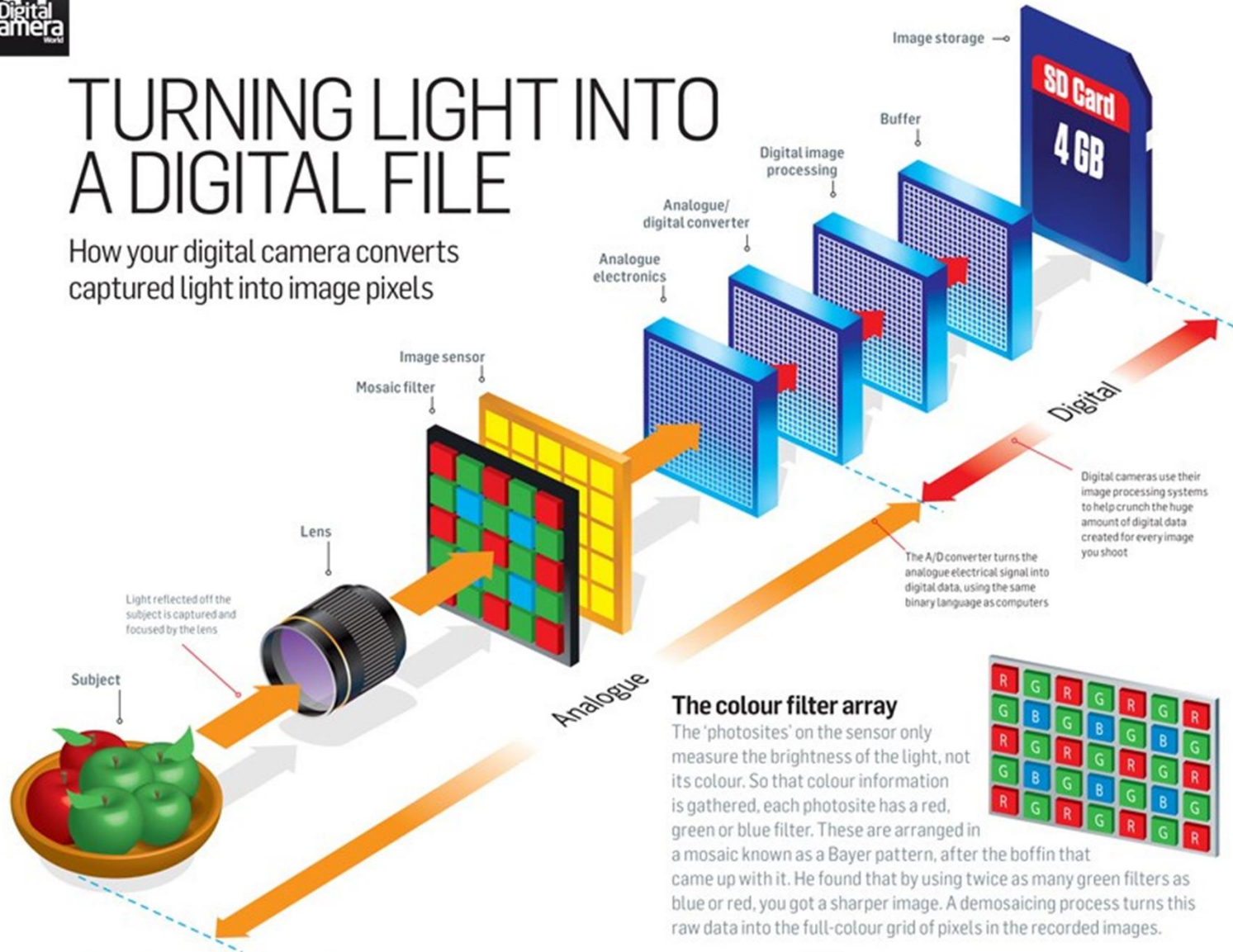
Una imagen a color se reconstruye interpolando todos los colores para cada píxel (*color demosaicing*)

<http://www.red.com/learn/red-101/bayer-sensor-strategy>



# TURNING LIGHT INTO A DIGITAL FILE

How your digital camera converts captured light into image pixels



[www.digitalcameraworld.com](http://www.digitalcameraworld.com)

Steve Sasson (empleado de Kodak) construye la primer cámara digital (1975), patentada en 1978

Entrevista: <https://www.youtube.com/watch?v=wfnpVRiwnM>

Le encomendaron encontrar alguna aplicación comercial para una CCD



## Primer cámara digital



<https://spectrum.ieee.org/how-the-digital-camera-transformed-our-concept-of-history>

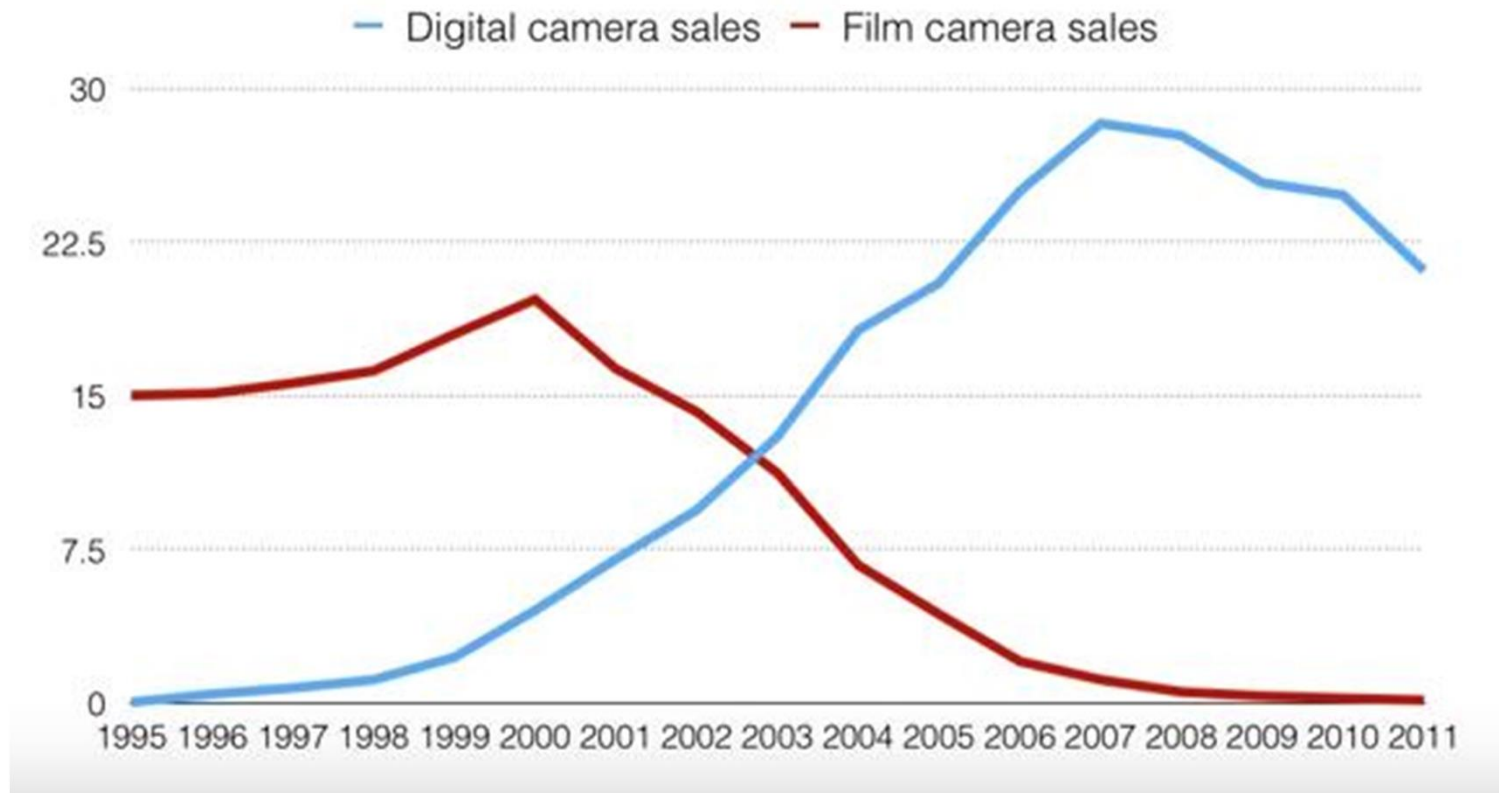


Inventó la primer cámara digital y un dispositivo para ver la imagen capturada y se la presentó a sus jefes: ***“They were convinced that no one would ever want to look at their pictures on a television set”***

<http://www.businessinsider.com/this-man-invented-the-digital-camera-in-1975-and-his-bosses-at-kodak-never-let-it-see-the-light-of-day-2015-8>



# The rise of digital

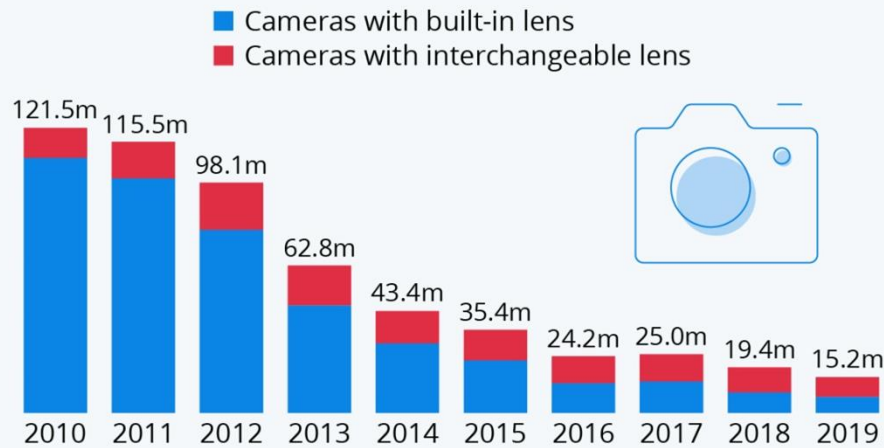


The Rise and Fall of Kodak (<https://www.youtube.com/watch?v=dqwAZKrc6vw>)



## Digital Camera Sales Dropped by 87% Since 2010

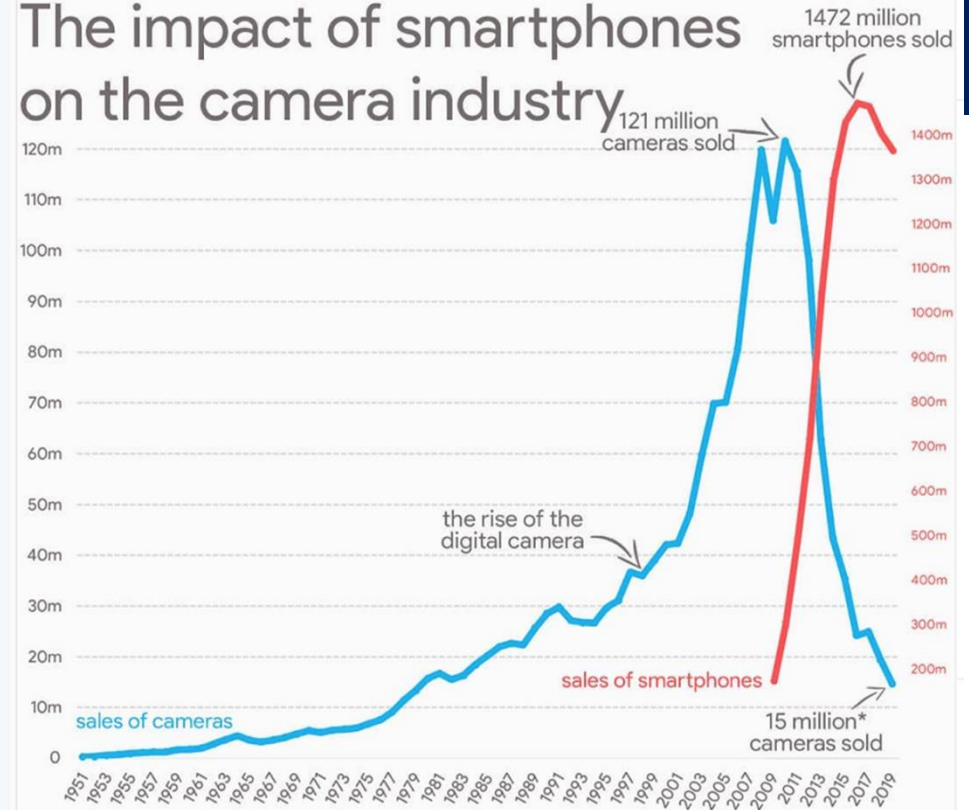
Worldwide digital camera shipments by CIPA members



Camera & Imaging Products Association (CIPA) is an international industry association. Members include Olympus, Casio, Canon, Kodak, Sony and Nikon among others.  
Source: CIPA



## The impact of smartphones on the camera industry



@Statistics\_Data\_Facts

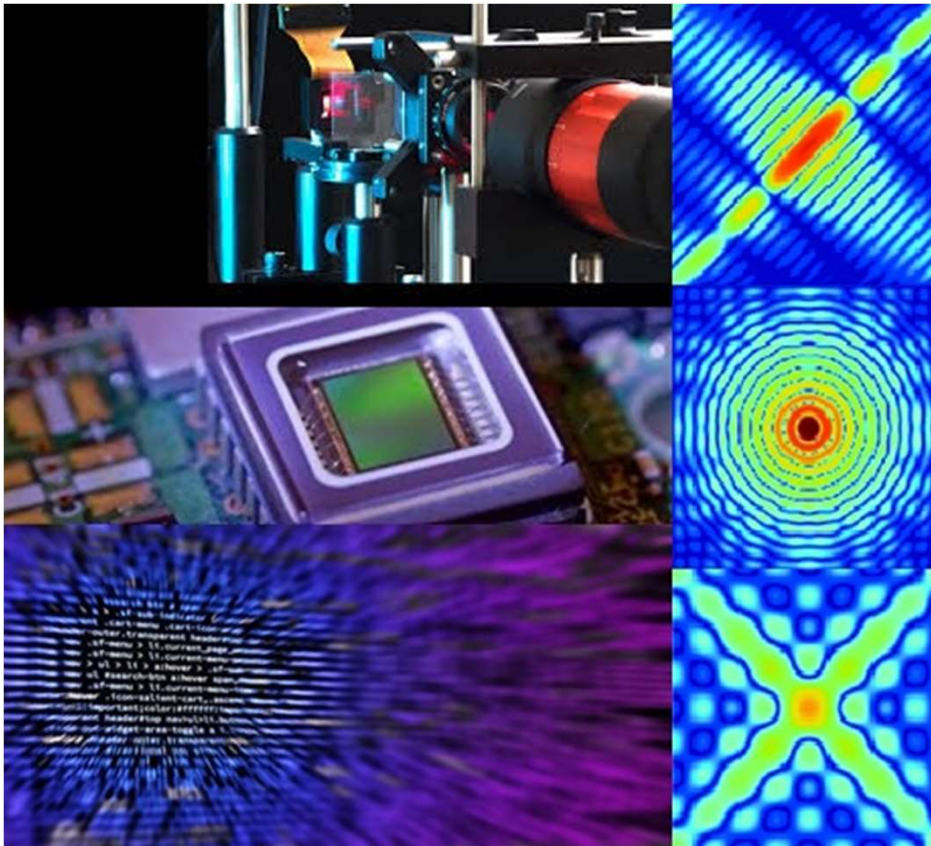
Sources: CIPA, statista.com

\*Q4 2019 sales are estimated





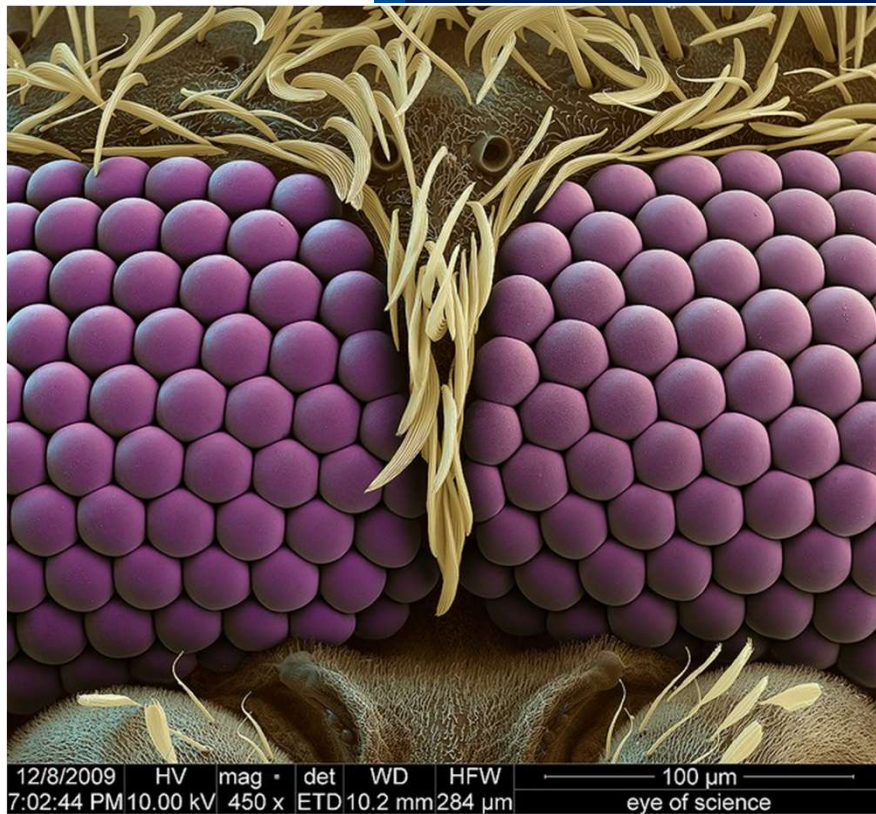
# Imaginería Óptica Computacional



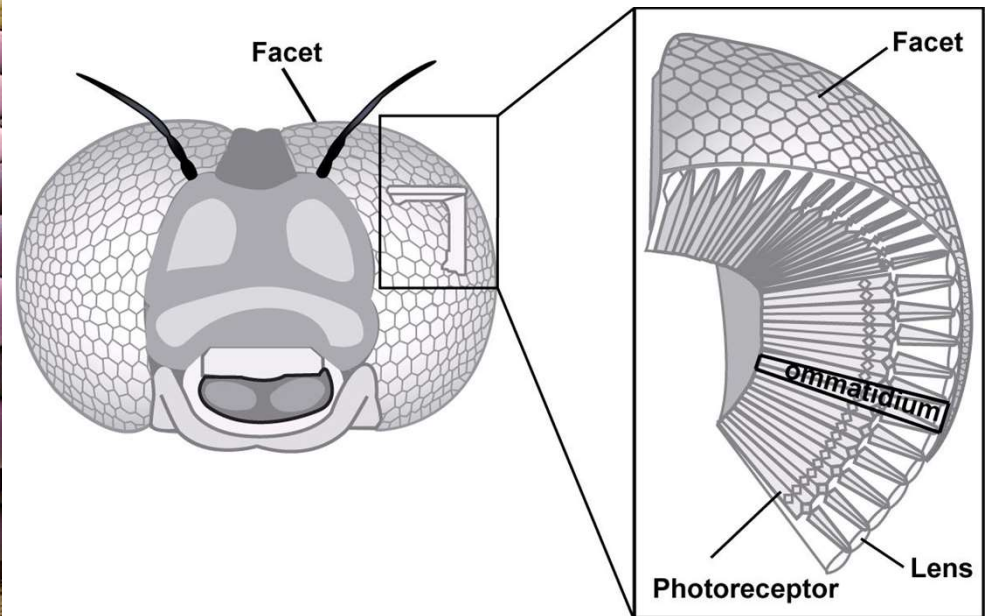
Integración del diseño o modificación de sistemas ópticos con el procesamiento computacional a través de algoritmos para sintetizar imágenes con nuevas características de interés..



## Multiplexado espacial

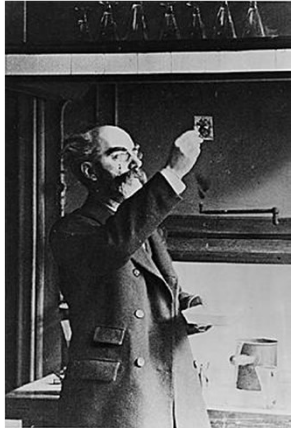


Ojos compuestos de un mosquito por Microscopía Electrónica  
<https://www.fe.i.com/image-gallery/mosquito-eyes/#gsc.tab=0/>

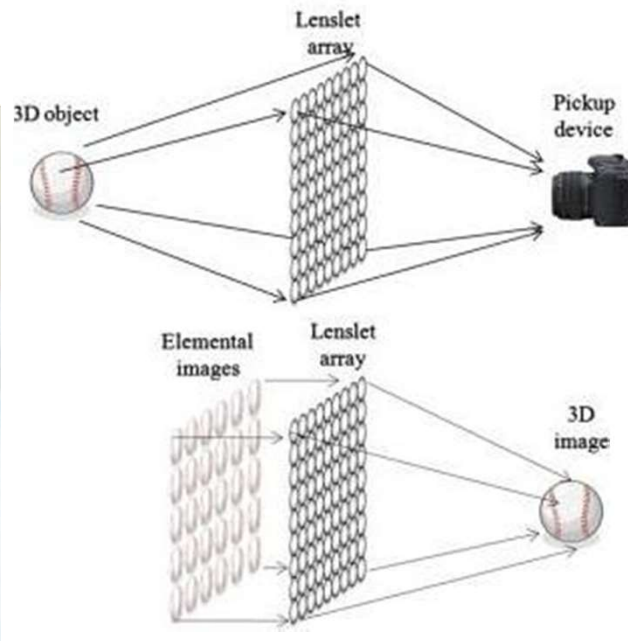
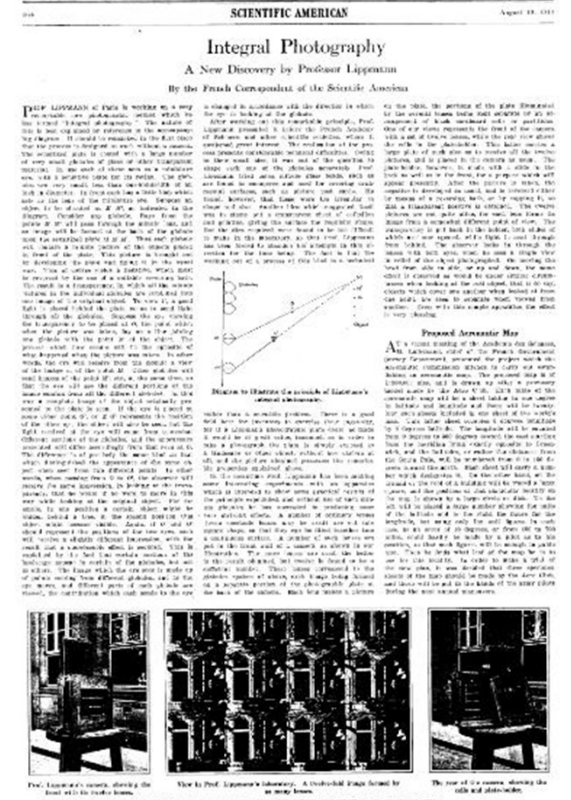


<https://www.epfl.ch/labs/lis/research/completed/curvace/>

# Gabriel Lippmann (1908): Método auto-estereoscópico para capturar y visualizar objetos 3D (*Photographie intégrale*). Cámaras plenópticas / Integral Imaging



## Multiplexado espacial



Hay un compromiso entre la resolución espacial y la resolución angular.

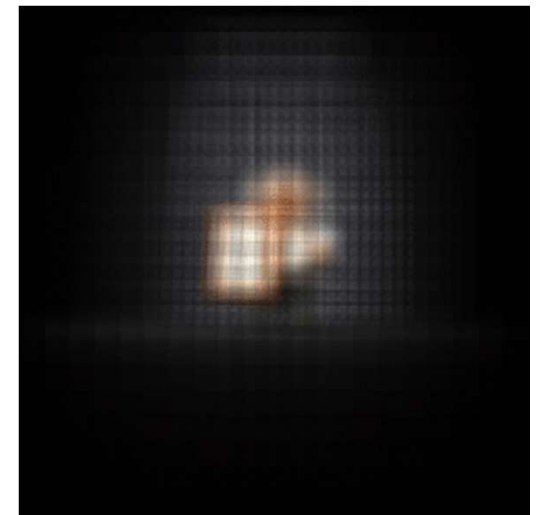
<http://www.tgeorgiev.net/Lippmann.pdf>



## Multiplexado espacial



## Integral Imaging



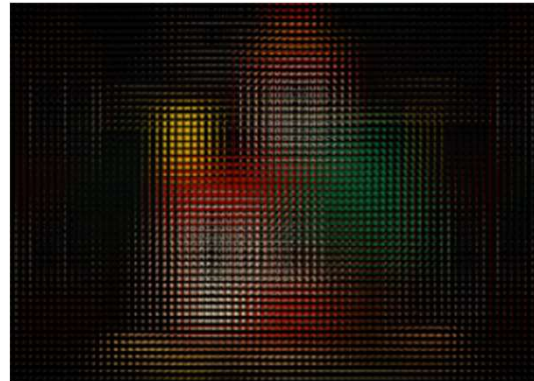
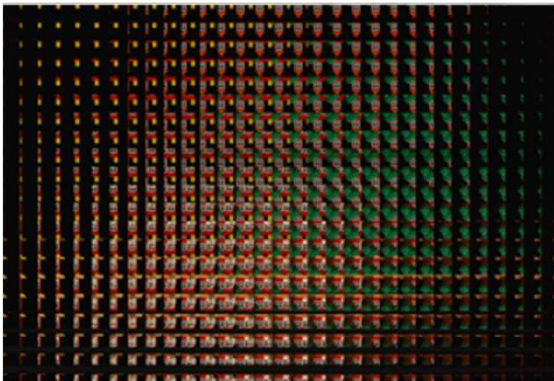
<http://www.uv.es/imaging3/Structure.htm>

Manuel Martínez-Corral, et al. Appl. Opt. **53**, E19-E25 (2014)



# Multiplexado espacial

Integral Imaging



Manuel Martínez-Corral, et al. Appl. Opt. **53**, E19-E25 (2014)

<https://www.uv.es/imaging3/lineas/InI.htm>



## Multiplexado espacial

### The Stanford Multi-Camera Array

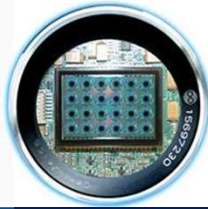


Levoy, M. (2006). Light fields and computational imaging. *Computer*, 39(8), 46-55.

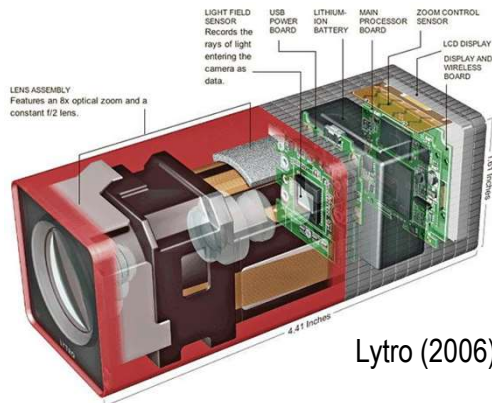
El arreglo de microlentes frente al sensor de la cámara actúa como múltiples pequeñas cámaras que capturan la escena desde ángulos ligeramente diferentes. Hay un compromiso entre la resolución espacial y la resolución angular



Raytrix (2009) www.raytrix.de

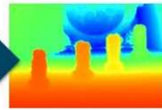


## Multiplexado espacial



Lytro (2006) "Shoot first, focus later"

- Single shot
- One raw image
  - Video possible
  - Makro and Tele lenses
  - Arbitrary object sizes and distances
  - High effective resolution



- Depth Map
- No metric 3D-calibration needed but possible
  - Depth can only be calculated at structured areas



3D-Data



3D-View

- Variable base line
- Variable image orientation
- Multi-View for auto-stereoscopic displays

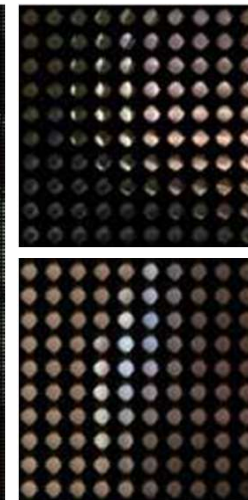
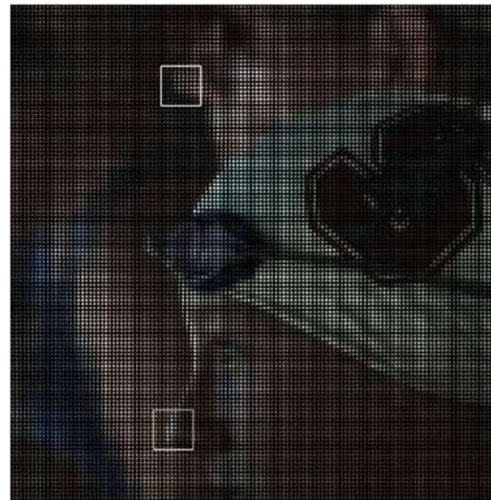


All-In-Focus



Image Processing

- selective per-pixel focus
- Variable view point horizontally and vertically
- Variable 3D-zoom effect



Ren Ng PhD Thesis 2006 Stanford



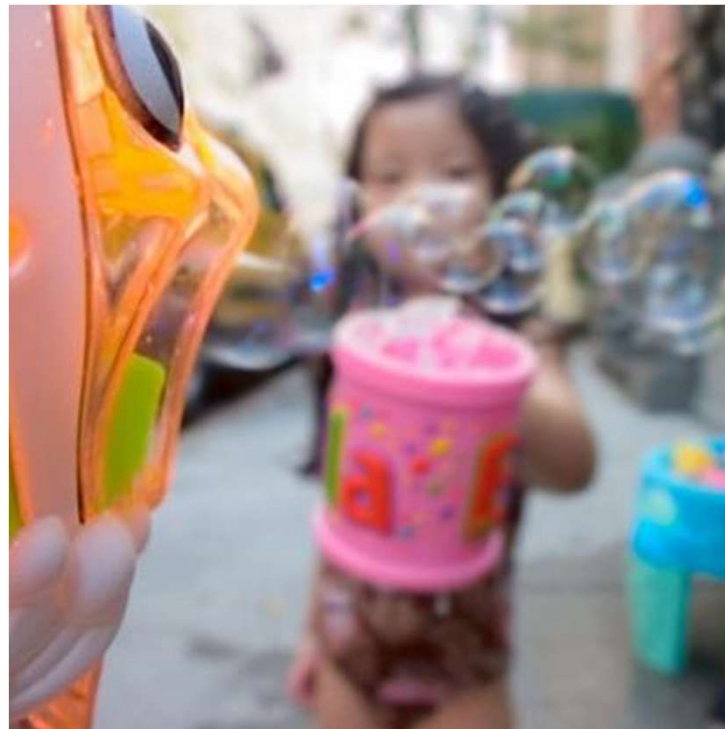
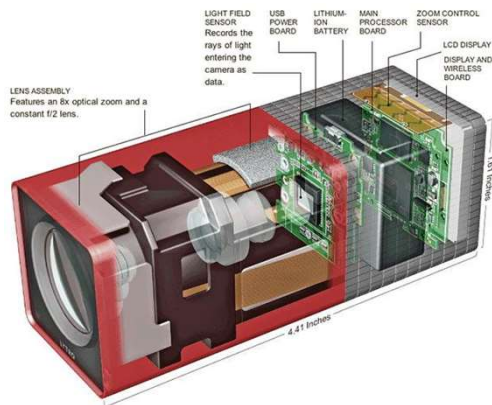
Lytro Illum (2014) *Revolution in photography or expensive toy?*  
<http://www.everyothershot.com/lytro-illum/>

Imagen final de baja resolución

Lytro / Lytro Illum

El arreglo de microlentes frente al sensor de la cámara actúa como múltiples pequeñas cámaras que capturan la escena desde ángulos ligeramente diferentes.

## Multiplexado espacial



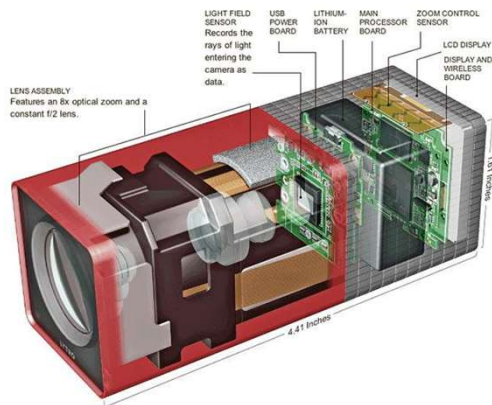
Lytro (2006) “Shoot first, focus later”



Lytro / Lytro Illum

El arreglo de microlentes frente al sensor de la cámara actúa como múltiples pequeñas cámaras que capturan la escena desde ángulos ligeramente diferentes.

## Multiplexado espacial

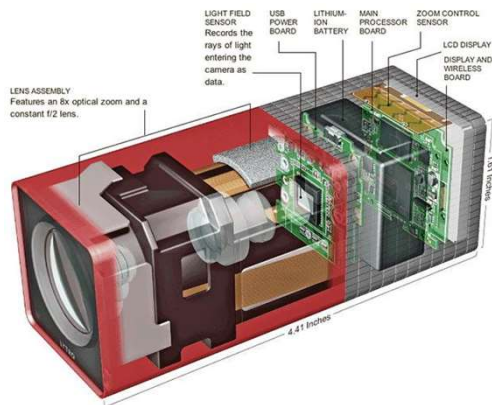


Lytro (2006) "Shoot first, focus later"

Lytro / Lytro Illum

El arreglo de microlentes frente al sensor de la cámara actúa como múltiples pequeñas cámaras que capturan la escena desde ángulos ligeramente diferentes.

## Multiplexado espacial

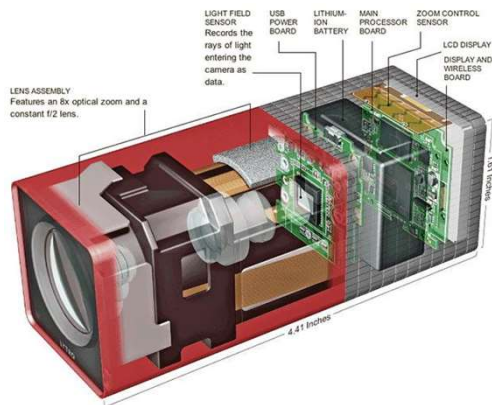


Lytro (2006) “Shoot first, focus later”

Lytro / Lytro Illum

El arreglo de microlentes frente al sensor de la cámara actúa como múltiples pequeñas cámaras que capturan la escena desde ángulos ligeramente diferentes.

## Multiplexado espacial



Lytro (2006) “Shoot first, focus later”



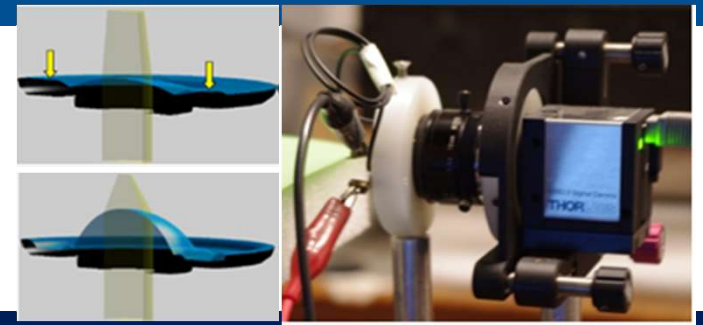
## Desenfoque (DOF limitado)

- El desenfoque permite ver más de una escena que lo que sería posible a través de una apertura pinhole (todo en foco), revelando información que se encuentra parcialmente ocluida.



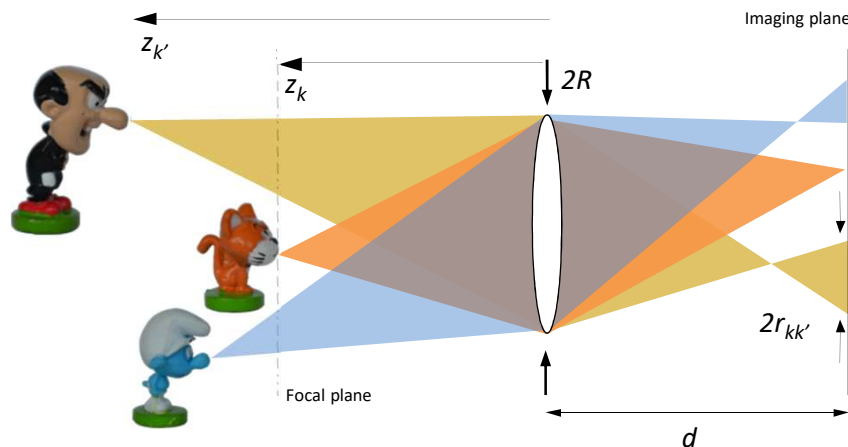
[Favaro and Soato, 2003]

Modelo físico de formación de imágenes: convolución (“borroneo”) con la proyección geométrica de la apertura de la lente sobre el sensor de la cámara (PSF).



## Multiplexado temporal (multi-foco/ focus-stacking)

Se usa todo el sensor de la cámara. Se adquiere una secuencia temporal de imágenes barriendo la escena en profundidad (en este caso en forma no mecánica – ETL)



$$N = 25$$

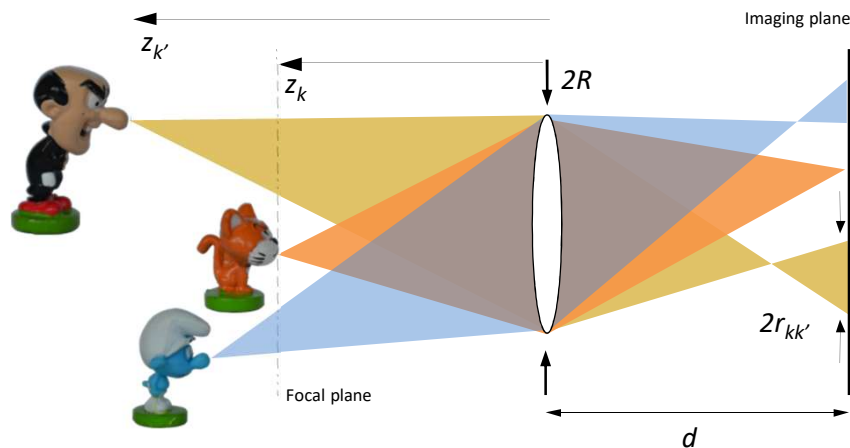
Alonso, J. R. et al., App.Opt., 55(9), 2380(2016)

Implementación de algoritmo computacional en base al modelo físico.



## Extensión de DOF y síntesis de puntos de vista

Nuevas imágenes reconstruidas a partir del movimiento virtual de una cámara pinhole sintética.

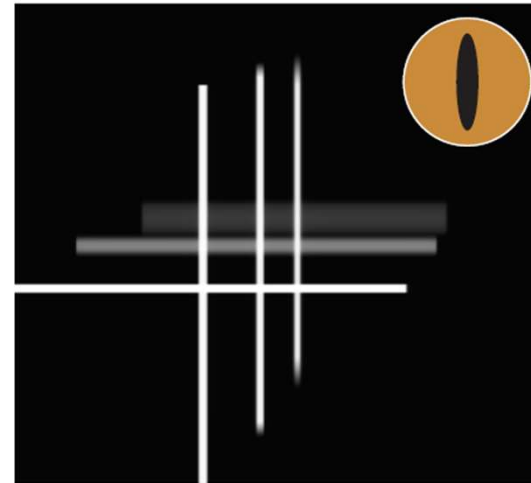
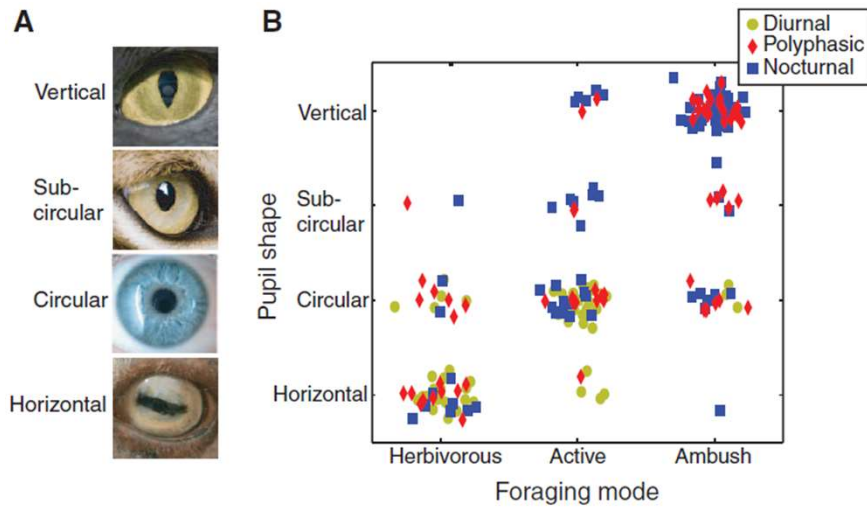


Visualización 3D

Alonso, J. R. et al., App.Opt., 55(9), 2380(2016)



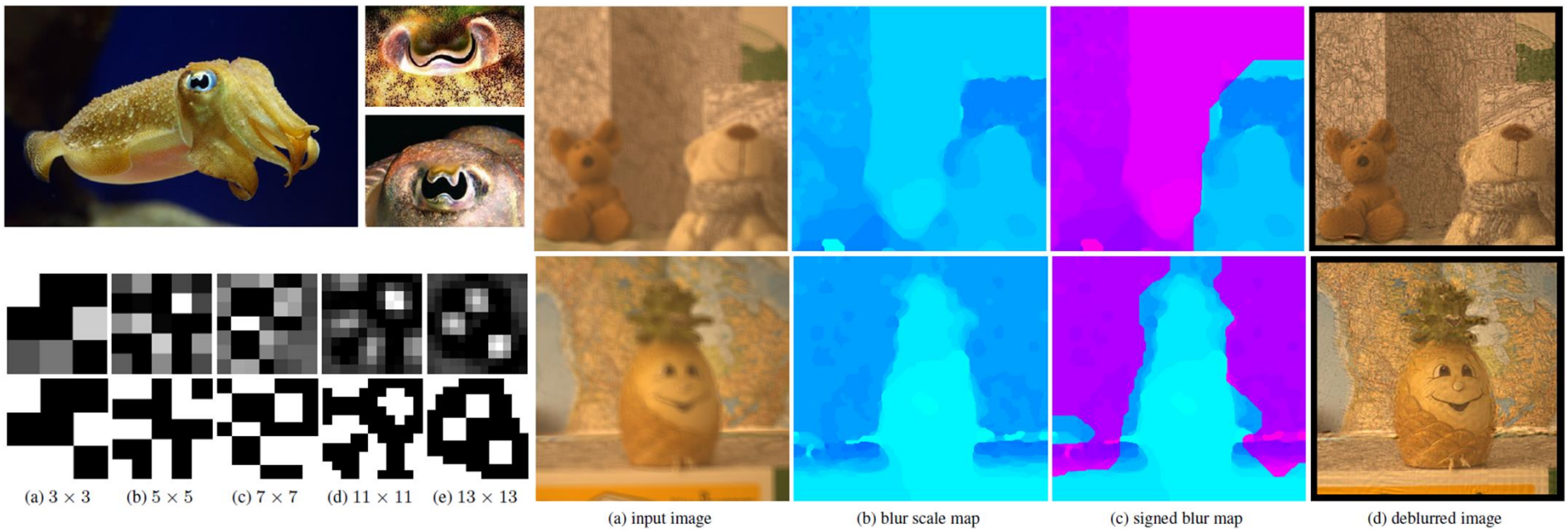
# Aperturas Codificadas



Banks et al. Sci. Adv. 2015;1:e1500391



## Aperturas Codificadas: máscaras asimétricas



Sellent-Favaro ICCP - IEEE 2014



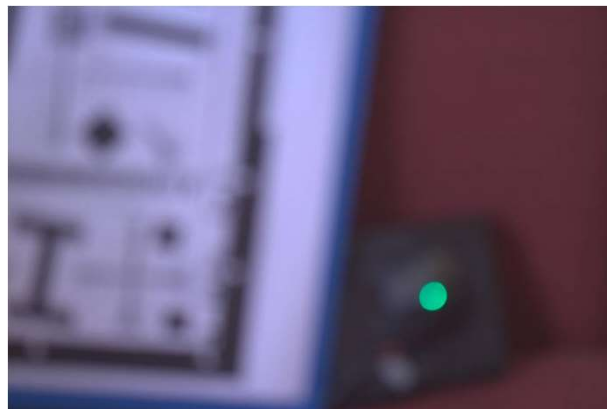
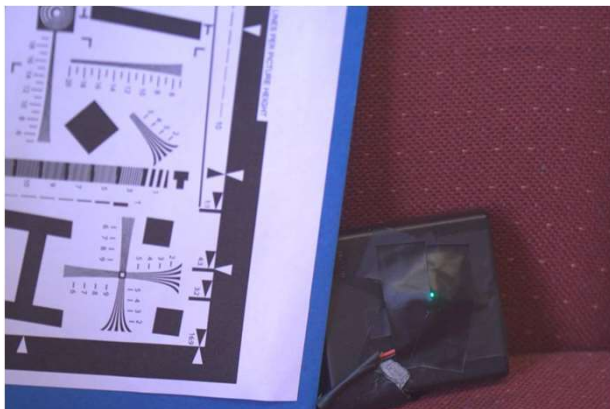


## Aperturas Codificadas: máscaras en la lente o en el sensor



Efecto bokeh: la forma de la apertura de la cámara determina la forma geométrica en que se desenfoca una fuente puntual.

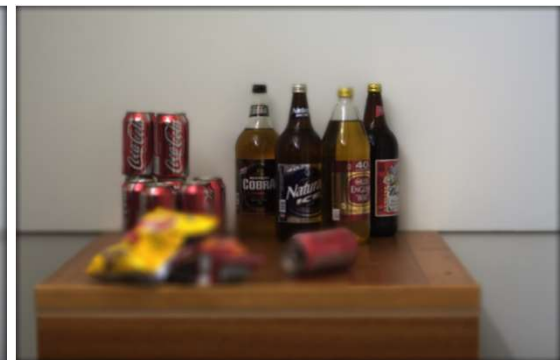
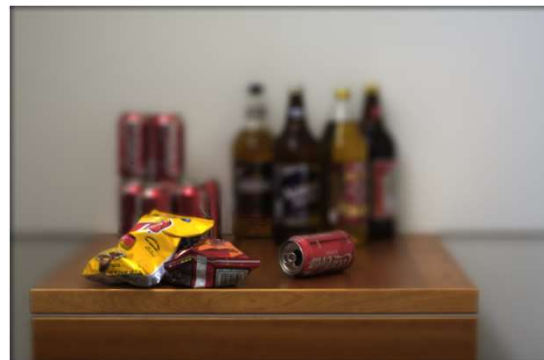
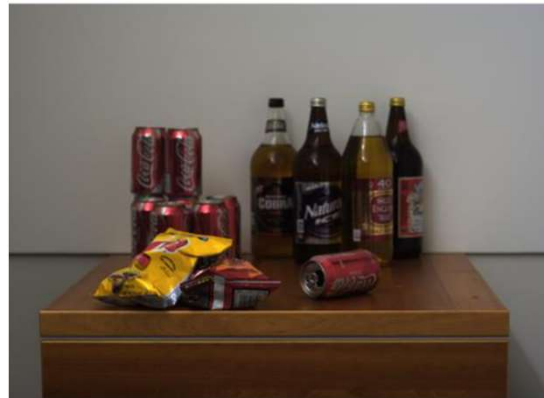
Cambiando la forma de la apertura cambia la PSF de modo de preservar mejor las altas frecuencias para determinar el mapa de profundidad y luego poder reenfocar a partir de una única imagen..



Veeraraghavan et al., SIGGRAPH 2007



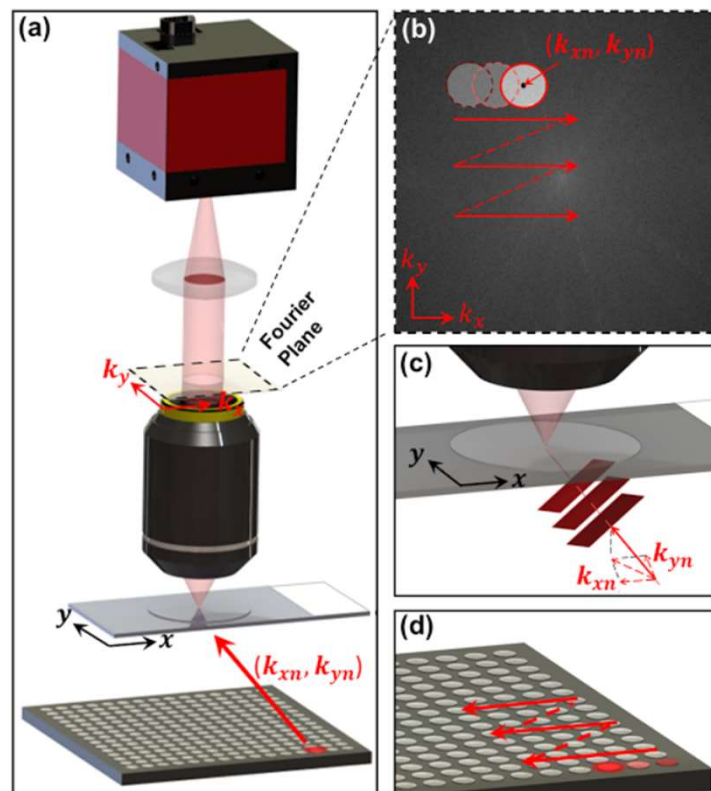
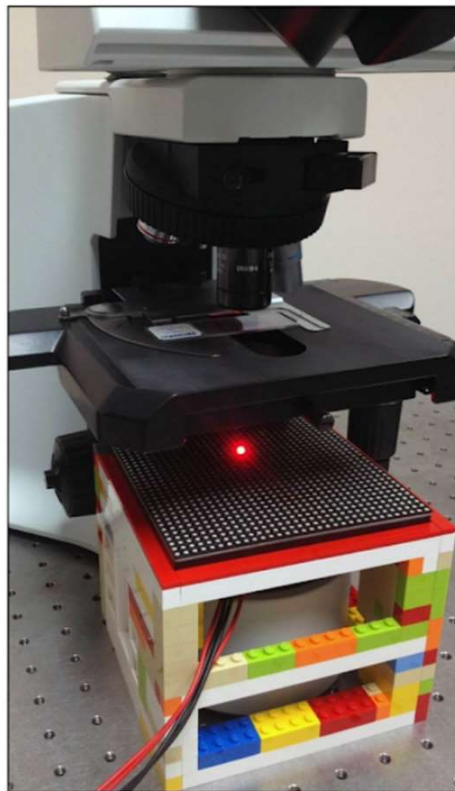
## Aperturas Codificadas: reenfoque



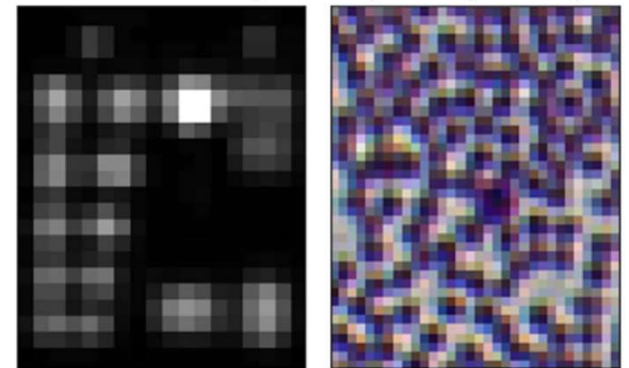
Levin et al., SIGGRAPH 2007



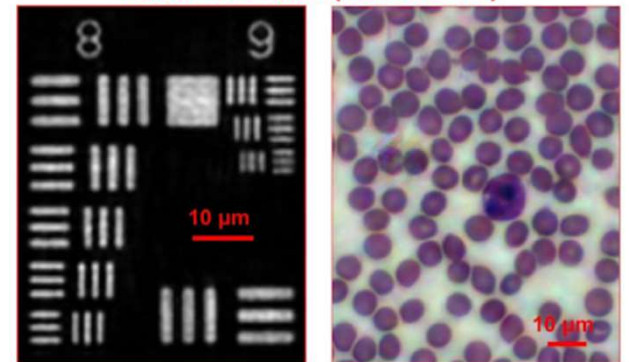
## Ingeniería de la iluminación: Fourier Ptychographic Microscope



Raw data using a 2X objective (0.08 NA)



Reconstruction (max 0.5 NA)

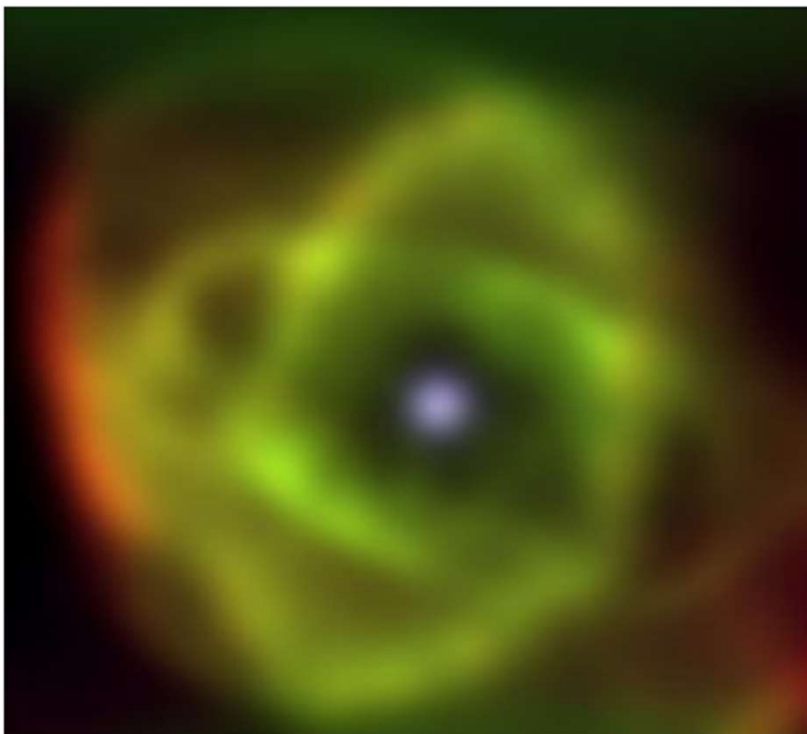


Zheng et al. Nat. Phot. 2013

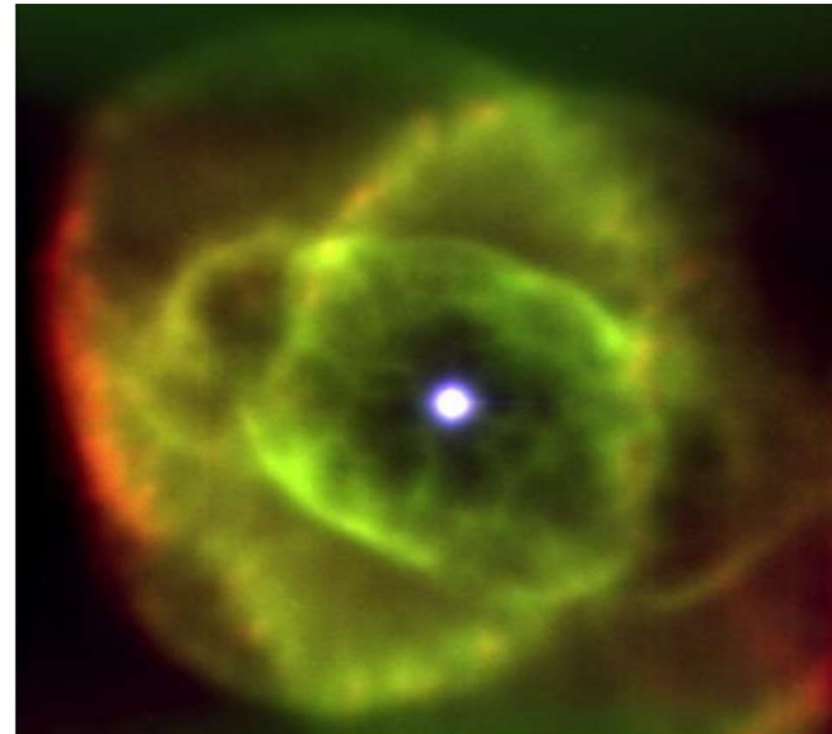
"Lucky Camera" takes sharpest ever images of stars - (and it's 50,000 times cheaper than Hubble)



## Adaptive Optics



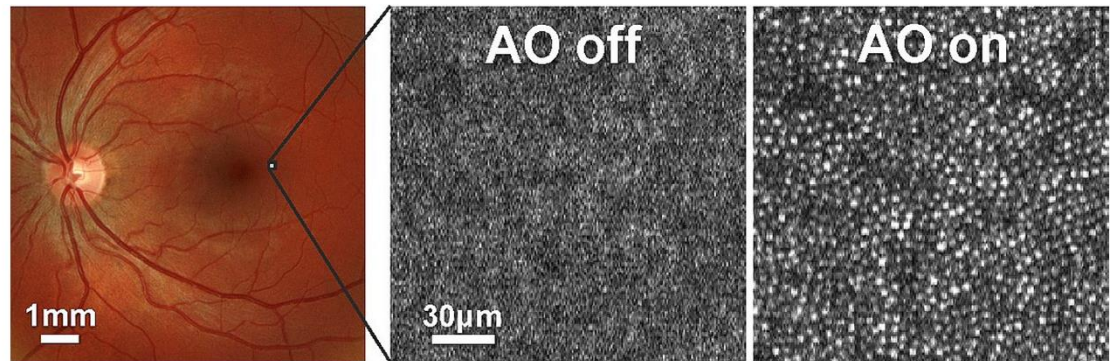
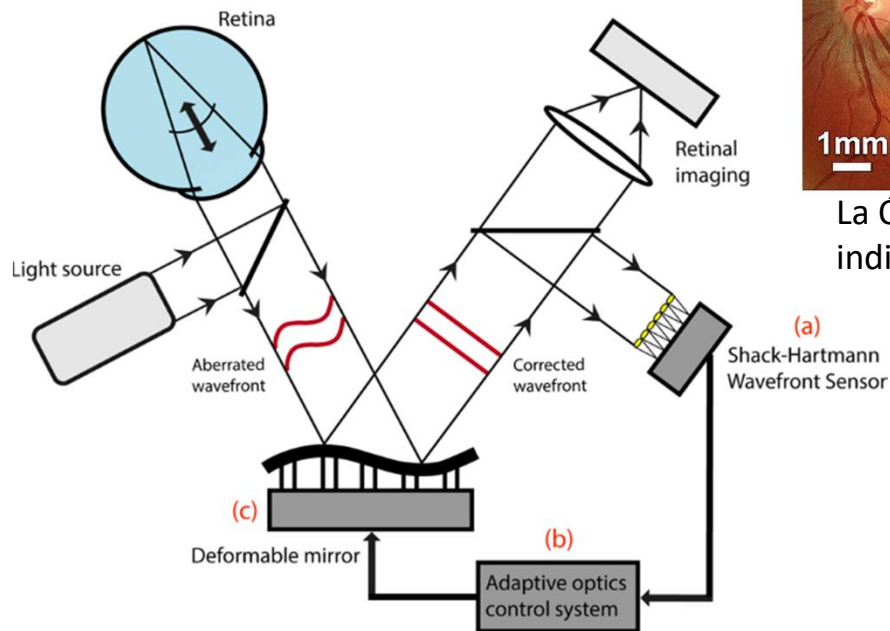
The Cat's Eye Nebula (NGC6543) as imaged conventionally by the Palomar 200 inch telescope. The green light is oxygen emission, the red is hydrogen emission, and the blue is near-infrared radiation.



The Cat's Eye Nebula (NGC7543) which is 25,000 light years away as imaged with the Lucky Camera behind an adaptive optics system on the Palomar 200 inch telescope. Colours as above image.



# Adaptive Optics



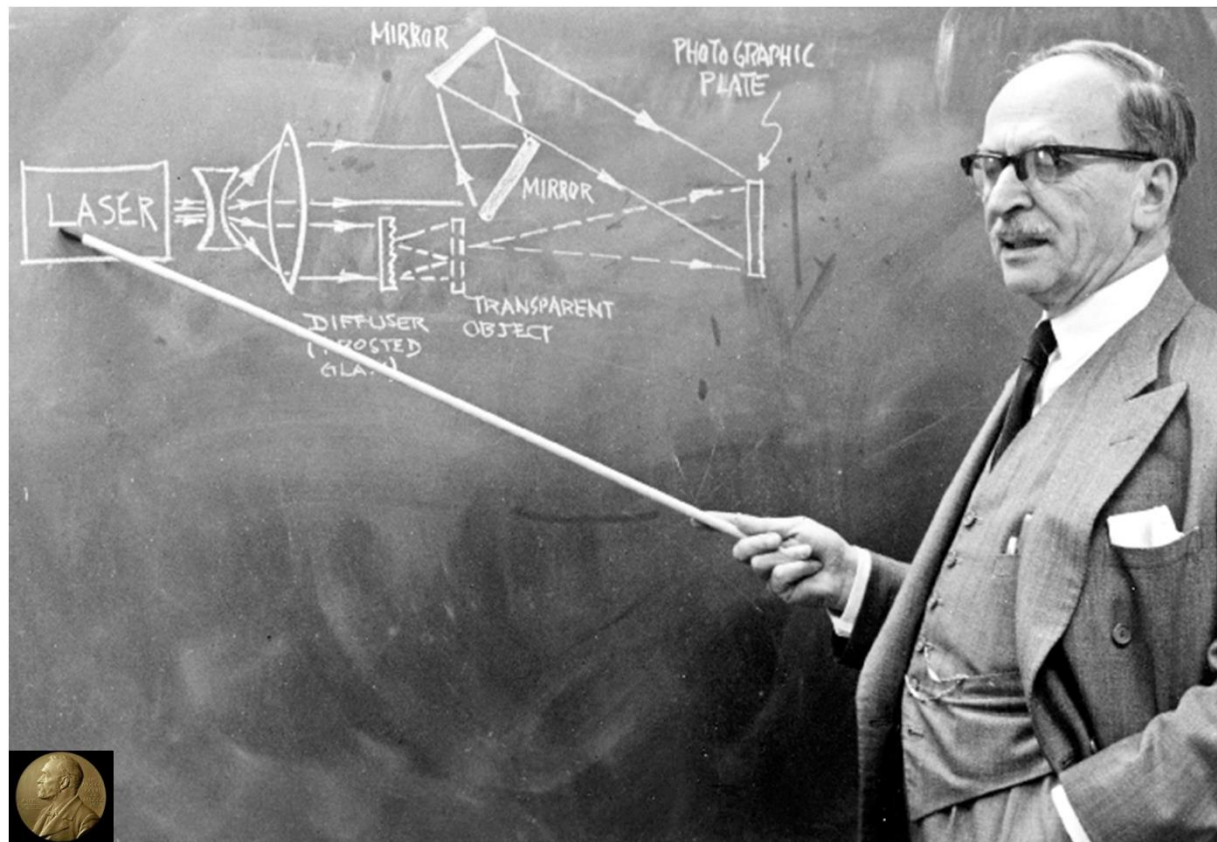
La Óptica Adaptativa (AO) permite la visualización de fotorreceptores individuales en la retina humana

<http://www.vision-research.eu/index.php?id=892>

<https://www.nature.com/articles/s41433-019-0474-3>



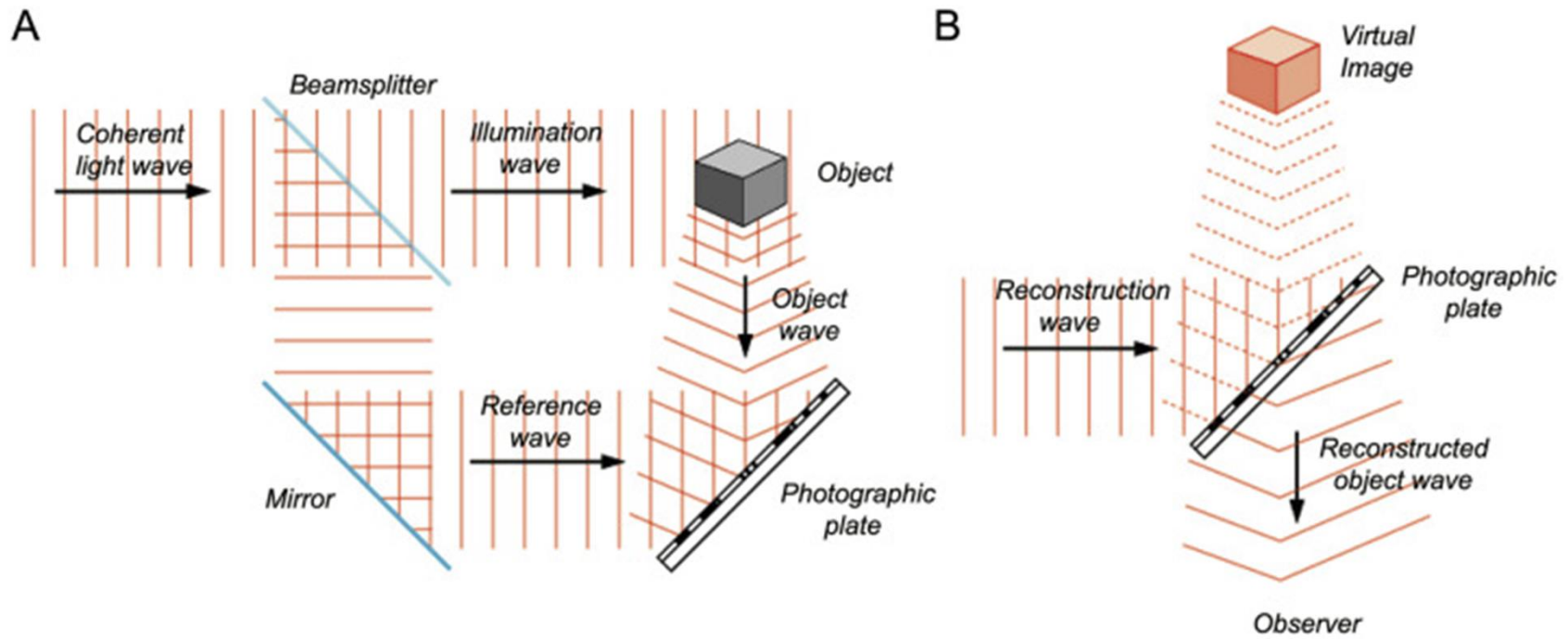
# Digital Holography



Dennis Gabor (1900-1979) AIP Emilio Segré Visual Archives), Physics Today



# Digital Holography

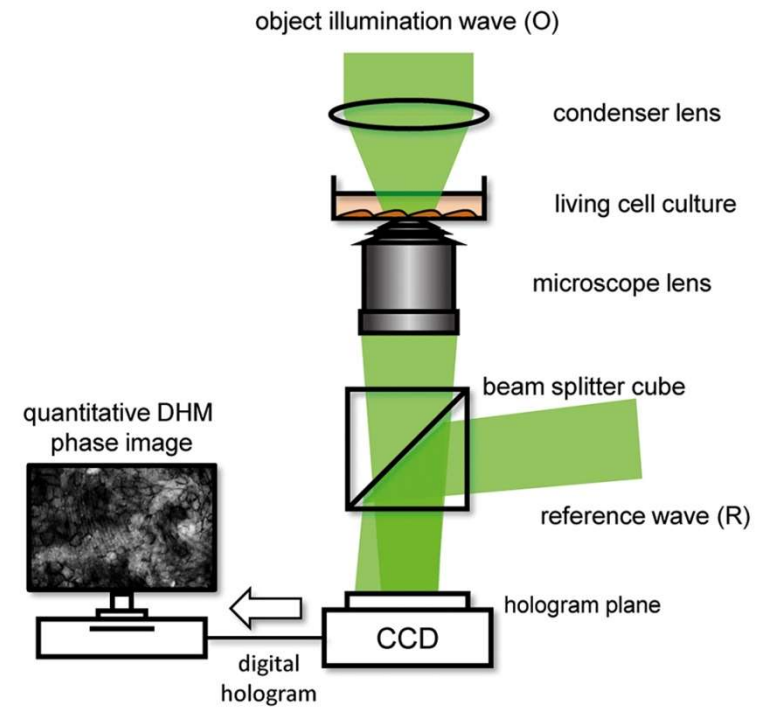
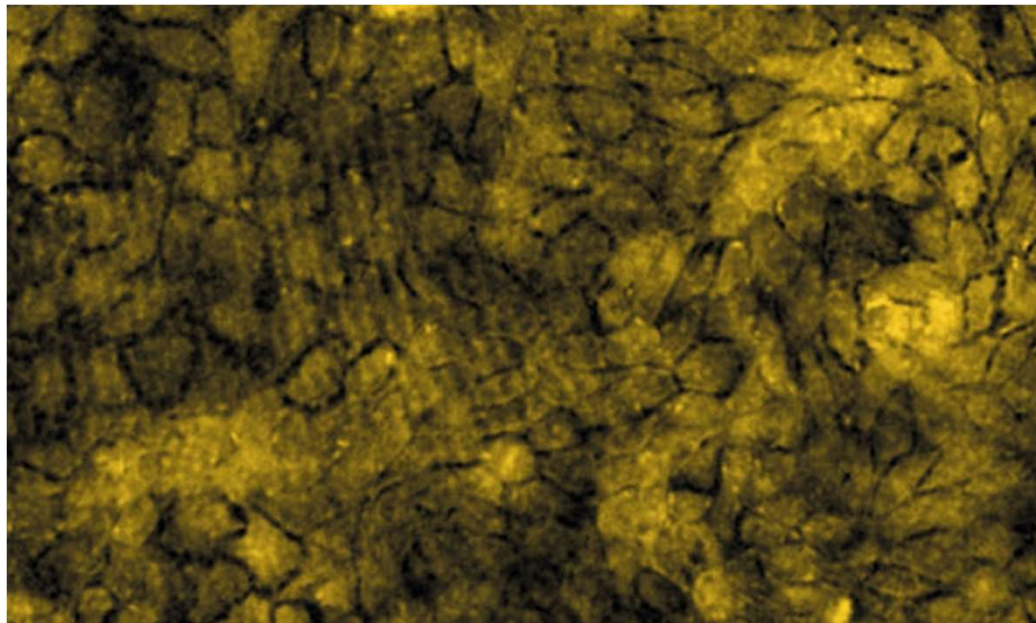


(A) Captura del holograma en una placa fotográfica

(B) Reconstrucción del holograma al volver a iluminar la placa fotográfica con una onda coherente



# Digital Holography



Kemper, 2019.

<https://analyticalscience.wiley.com/do/10.1002/imaging.7055>