

Workshop avec la HEAR

Julien Bobroff et Camille Debard
octobre 2024

L'invisible

à votre avis, comment
être invisible ?

invisible par la taille

invisible parceque
c'est trop loin

invisible
par la vitesse

invisible
par la couleur

invisible

parce que la lumière

nous évite

tout se résume au fait
que l'oeil humain est limité

Les limites de l'oeil humain



Les limites de l'oeil humain

- taille limite : 50 à 100 mm (l'épaisseur d'un cheveu)
- couleurs limites : 400 à 700 nm (l'arc en ciel)

On ne voit pas les ondes radio, les microondes, les infrarouges, les ultra-violets, les gamma, les RX...)

- résolution temporelle limite :
de l'ordre de 20 msec (50 images par seconde)



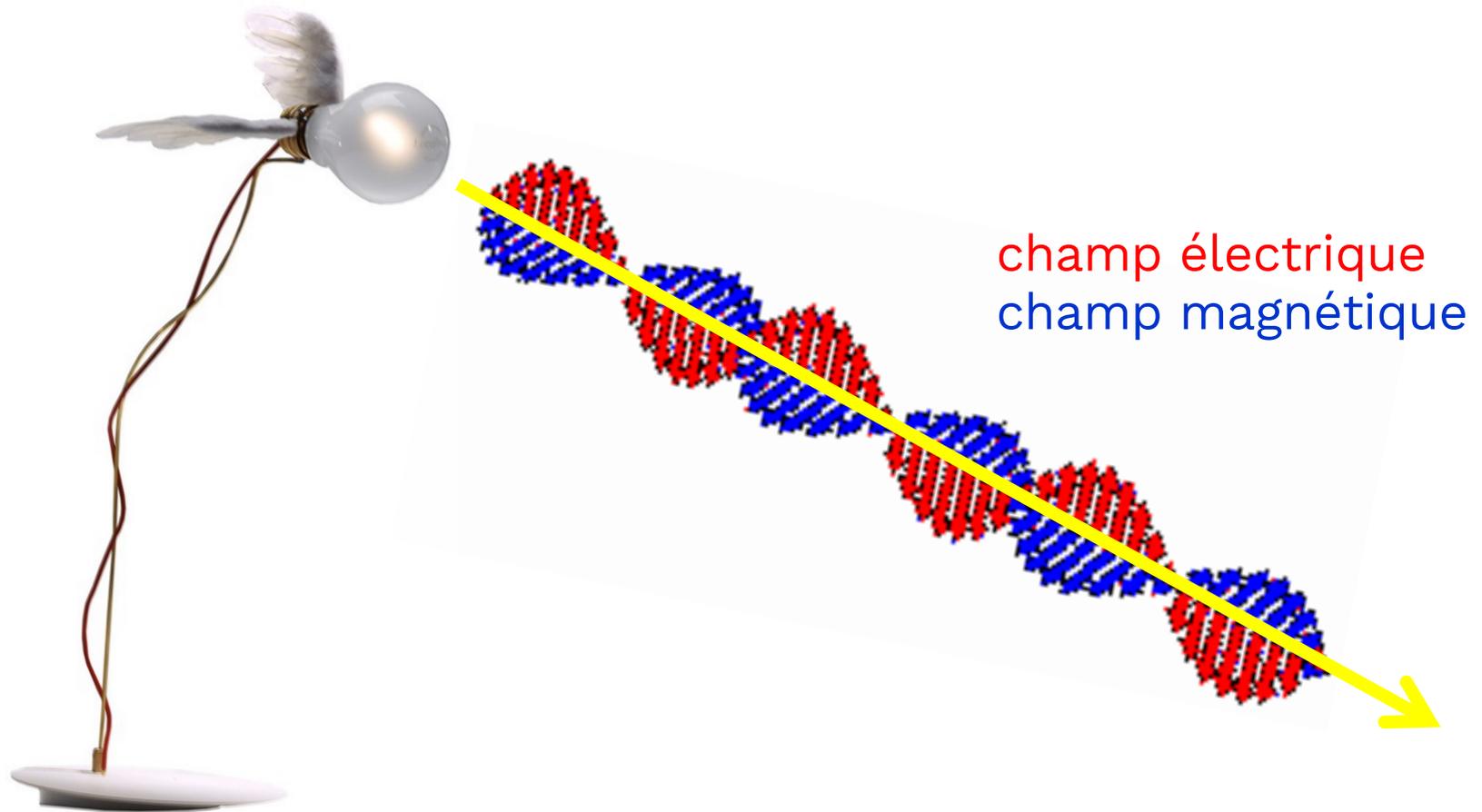
Pour être invisible

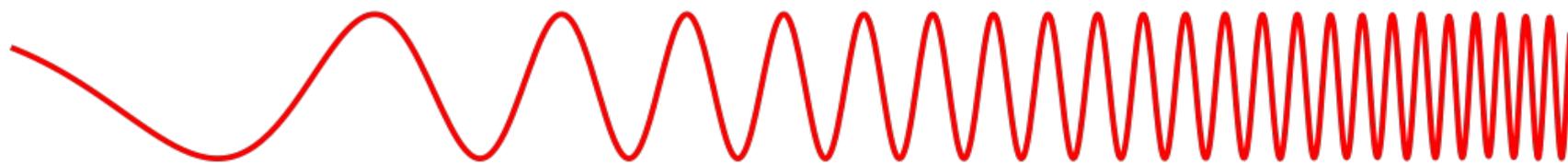
- être plus petit que quelques μm
- avoir une couleur invisible avec $\lambda < 400\text{nm}$ ou $\lambda > 700\text{nm}$
- être très loin
- être assez rapide pour traverser le champ visuel en moins de qq msec exemple : balle de pistolet
- dévier la lumière astucieusement



Comment
les physicien.nes
voient l'invisible
quand ce n'est pas
la bonne longueur d'onde

La lumière est une onde électromagnétique





Type de rayonnement
longueur d'onde λ

Radio
 10^3

Micro-onde
 10^{-2}

Infrarouge
 10^{-5}

Visible
 $0,5 \times 10^{-6}$

Ultraviolet
 10^{-8}

Rayons X
 10^{-10}

Rayons γ
 10^{-12}



H. Hertz
1886
en produisant
puis détectant
ces ondes avec
des antennes



W. Herschel
1800
en étudiant
la température
des couleurs



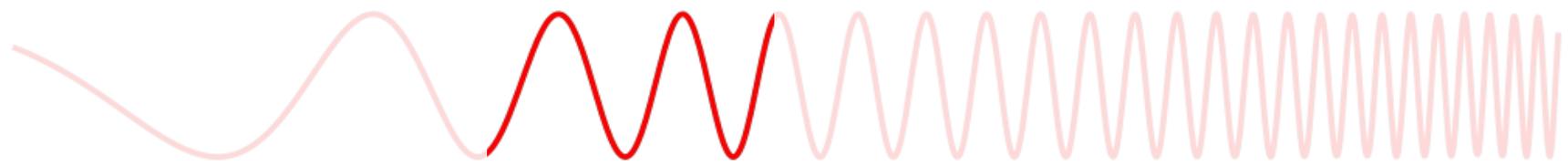
J. Ritter
1801
en étudiant leur
action chimique sur
le chlorure d'argent



W. Röntgen
1895
en étudiant
des décharges
dans des tubes



P. Villard
1900
en étudiant
la radiation
du Radium



Type de rayonnement
longueur d'onde λ

Radio
 10^3

Micro-onde
 10^{-2}

Infrarouge
 10^{-5}

Visible
 $0,5 \times 10^{-6}$

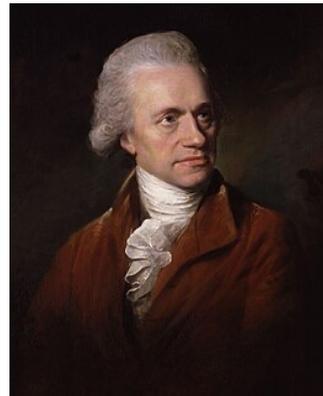
Ultraviolet
 10^{-8}

Rayons X
 10^{-10}

Rayons γ
 10^{-12}



H. Hertz
1886
en produisant
puis détectant
ces ondes avec
des antennes



W. Herschel
1800
en étudiant
la température
des couleurs



J. Ritter
1801
en étudiant leur
action chimique sur
le chlorure d'argent



W. Röntgen
1895
en étudiant
des décharges
dans des tubes



P. Villard
1900
en étudiant
la radiation
du Radium



@National Gallery

William Herschel (1738-1822)



Comment
les physicien.nes
voient l'invisible
quand c'est trop petit



Les premiers microscopes

Galilée, 1609





Robert Hooke, Micrographia, 1655

**Le microscope de
Van Leeuwenhoek
(1674)**



Le microscope optique
limité en gros à $0,5\mu\text{m}$



Les microscopes électroniques

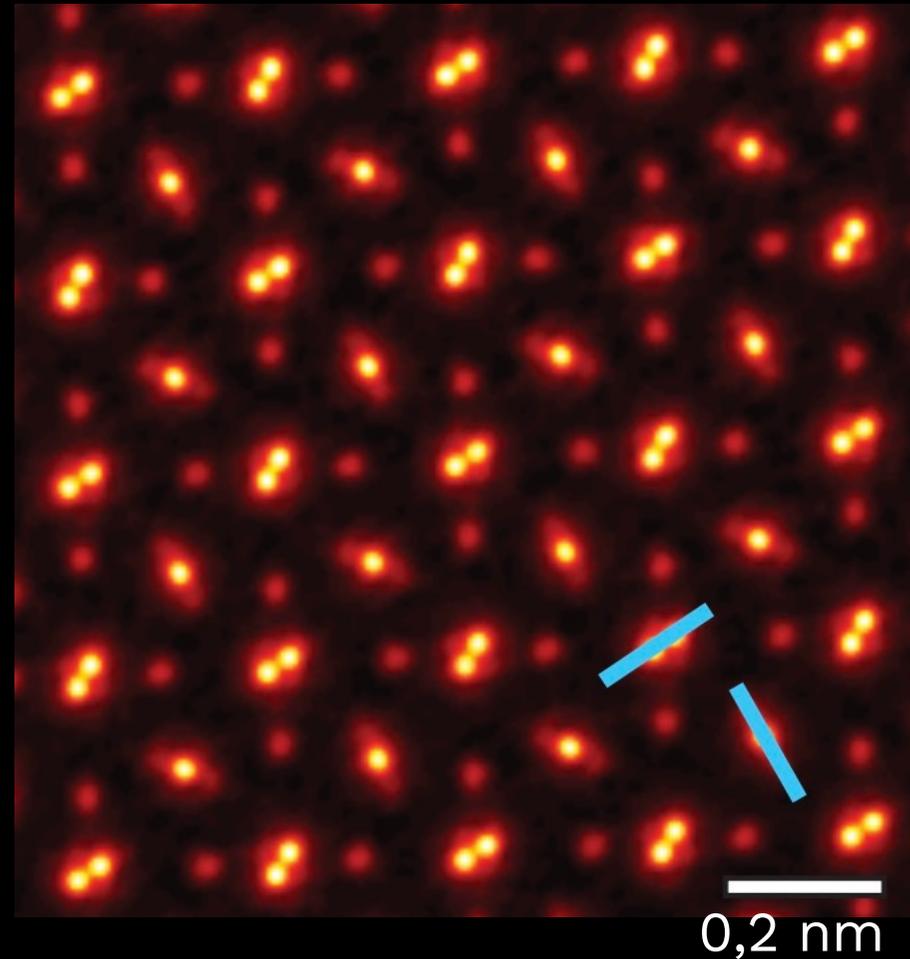
remplacer la lumière
par des électrons



Les microscopes électroniques

remplacer la lumière
par des électrons

l'image la mieux résolue au monde



Z.Chen et al., Science 2022

Les microscopes à force atomique

faire glisser une pointe
sur la surface

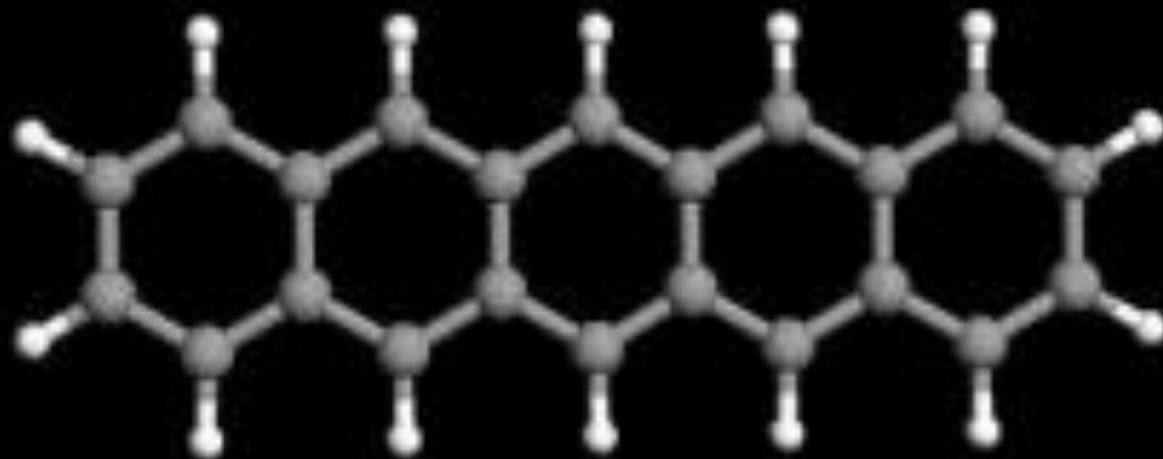


Les microscopes à force atomique

faire glisser une pointe
sur la surface

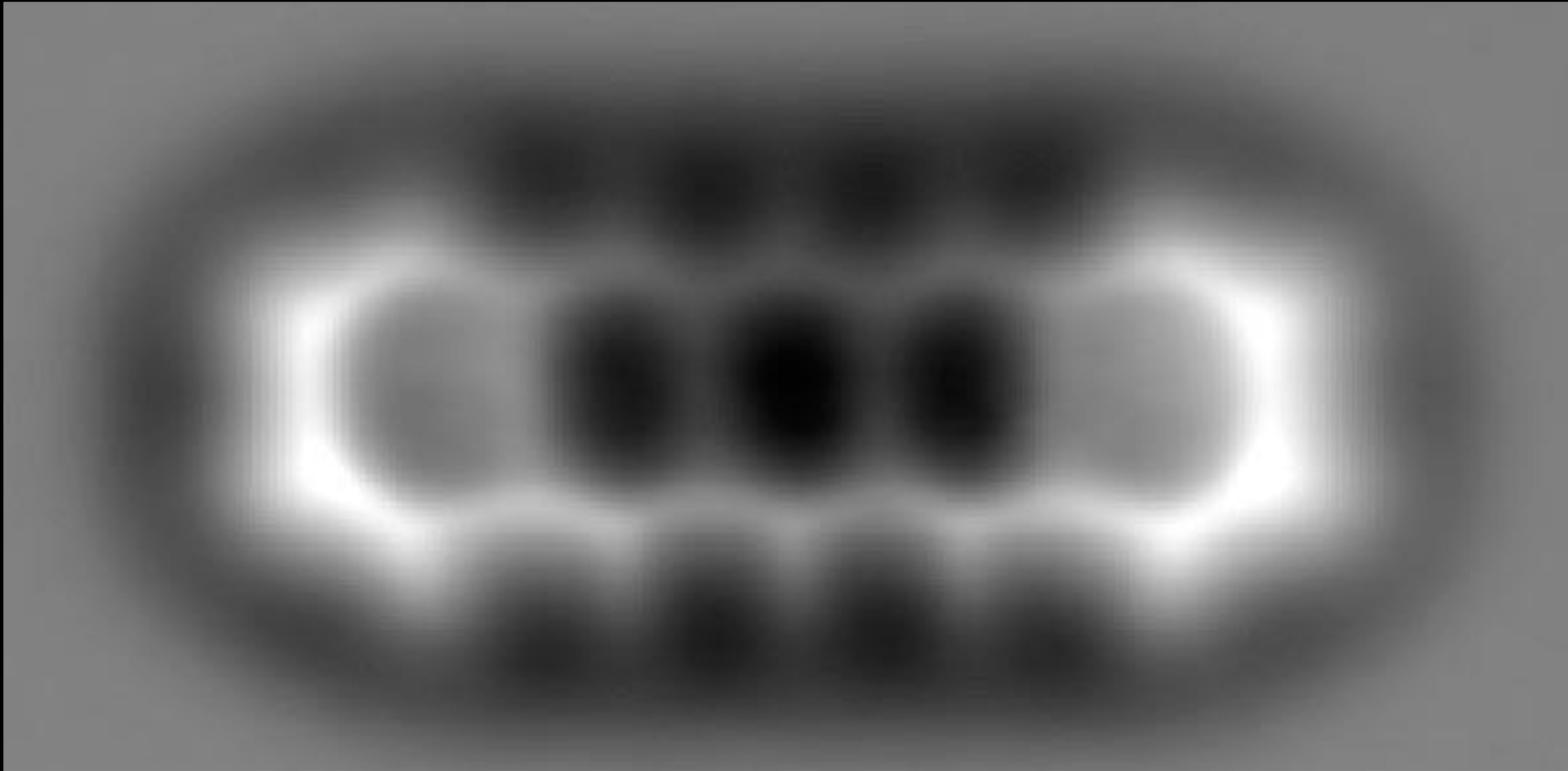
**Microscope
à force atomique**





on peut visualiser des molécules
(ici le pentacène)

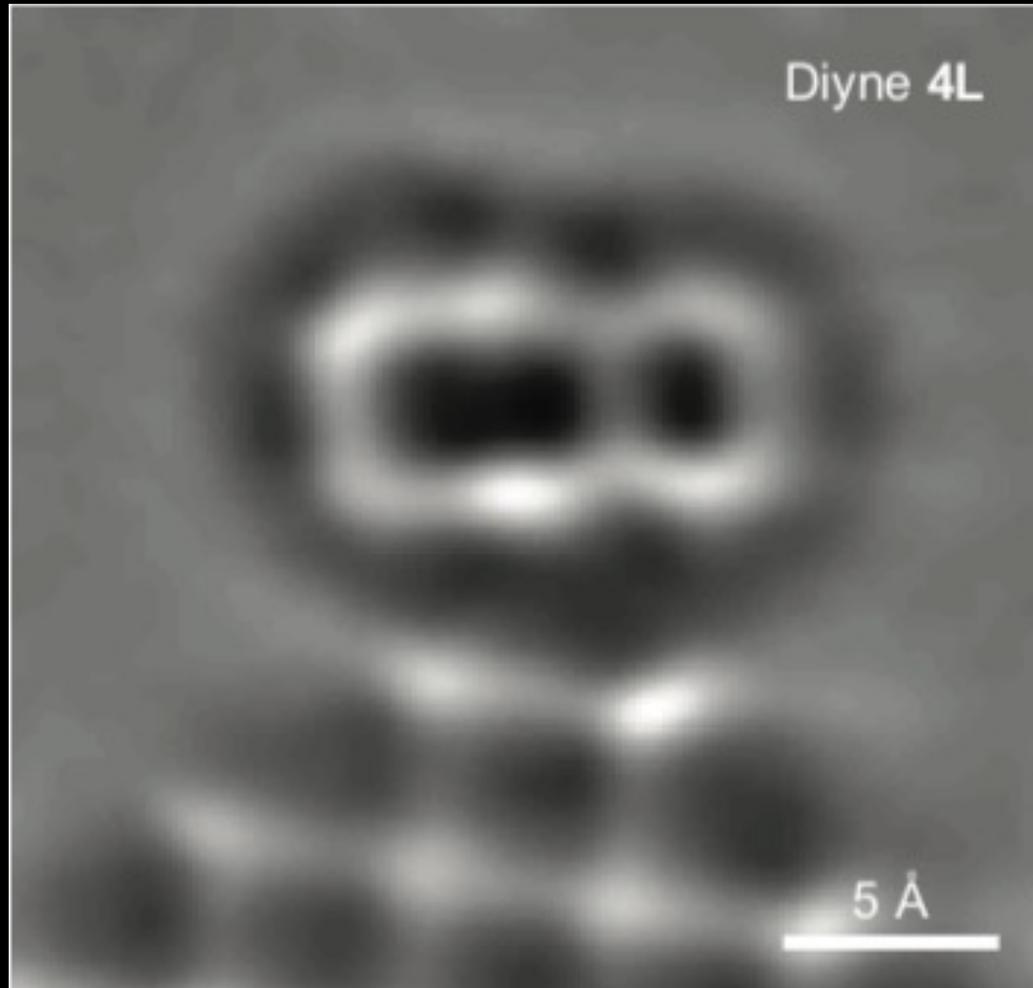
Gross, Science 2009



Gross, Science 2009

on peut visualiser des molécules
(ici le pentacène)

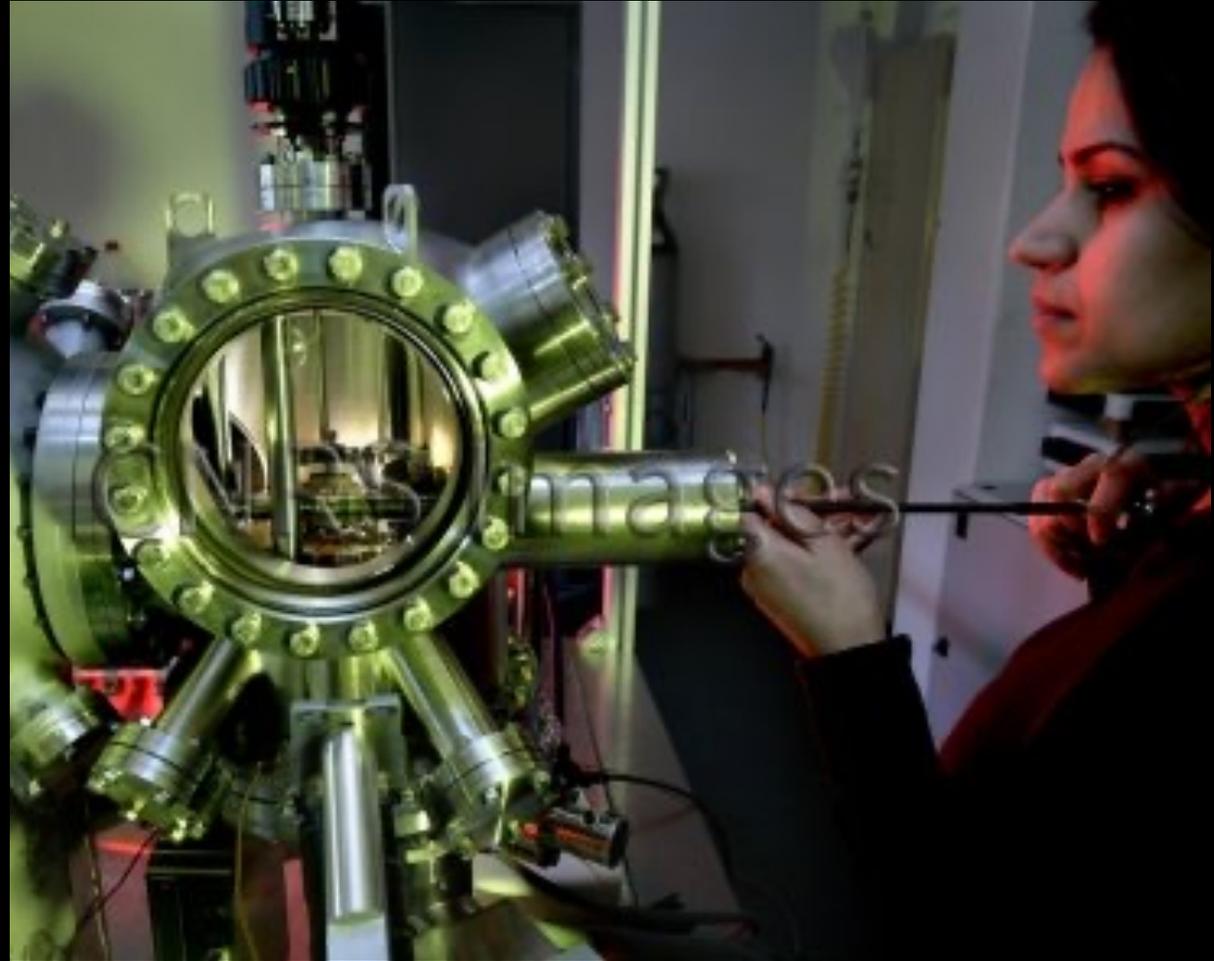
Suivi d'une réaction chimique en direct



Schuler et al., 2016

Les microscopes à effet tunnel

arracher des électrons
de la surface
avec une pointe



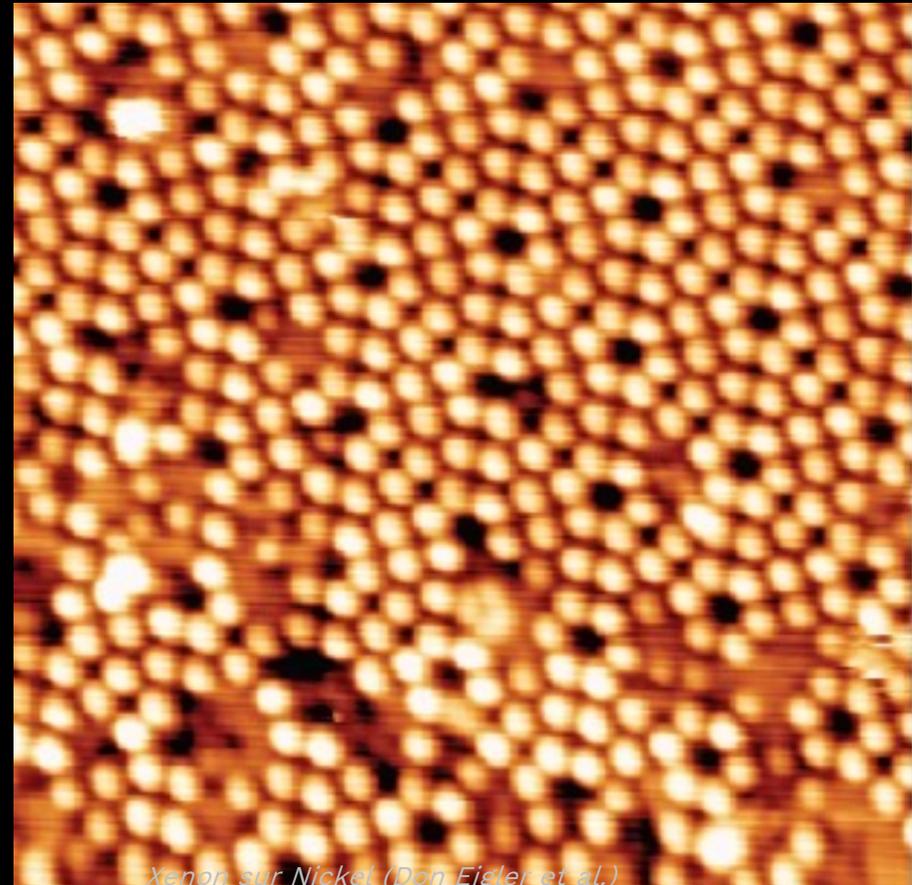
Les microscopes à effet tunnel

arracher des électrons
de la surface
avec une pointe

**Microscope
à effet tunnel**

Les microscopes à effet tunnel

arracher des électrons
de la surface
avec une pointe



1 nm

Les microscopes à effet tunnel

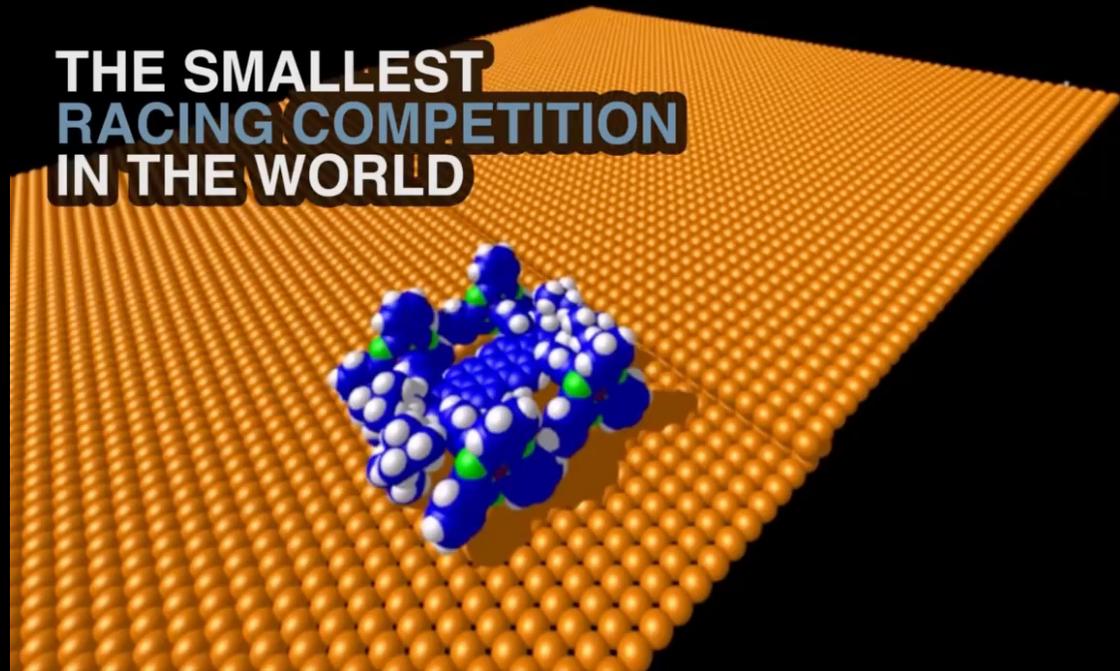
on peut aussi manipuler
les atomes et créer
des motifs



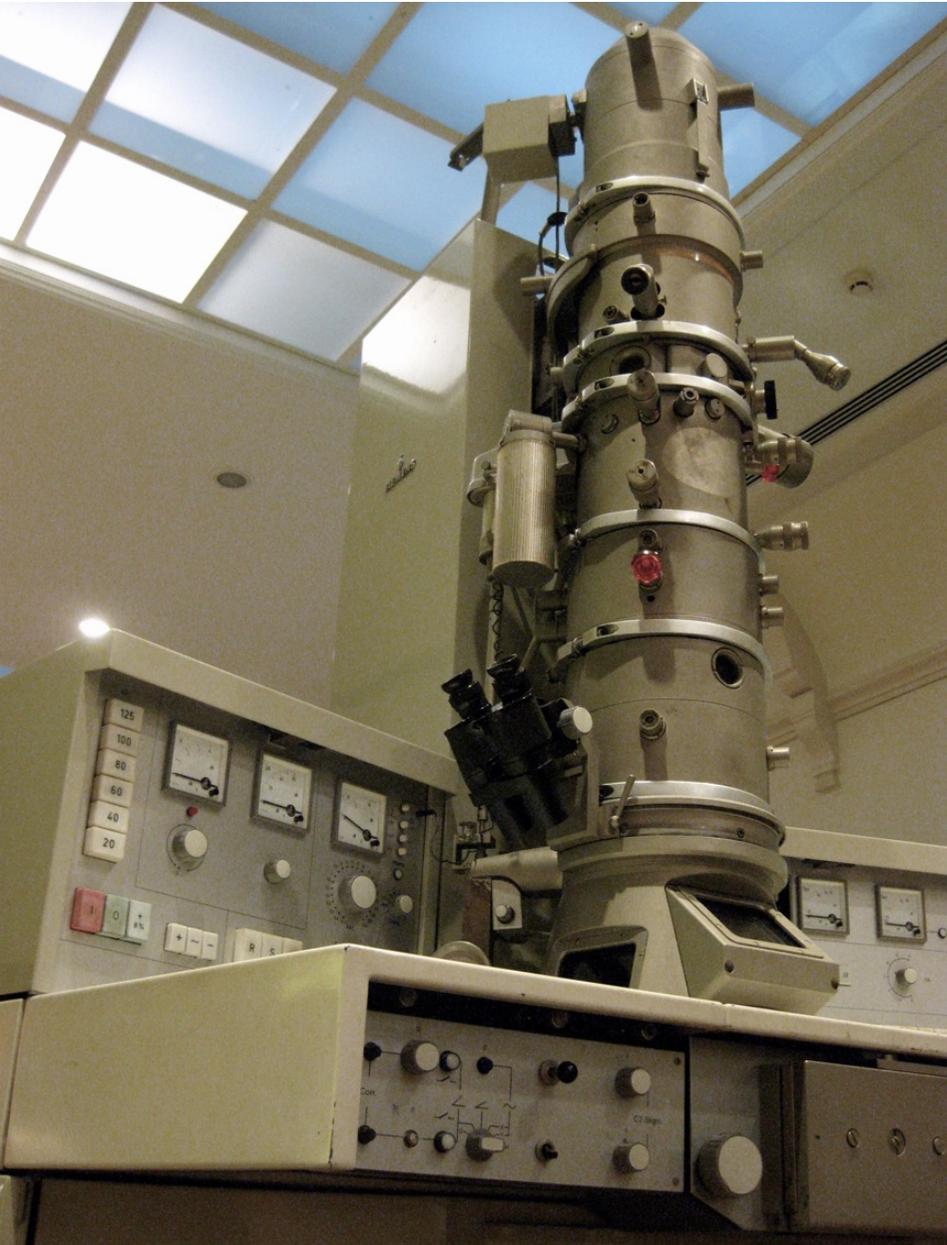
A boy and his atom (IBM)

Les microscopes à effet tunnel

on peut déplacer
des molécules



La nanocar race (CNRS, Toulouse)



Comment
les physicien.nes
voient l'invisible
quand c'est
trop loin

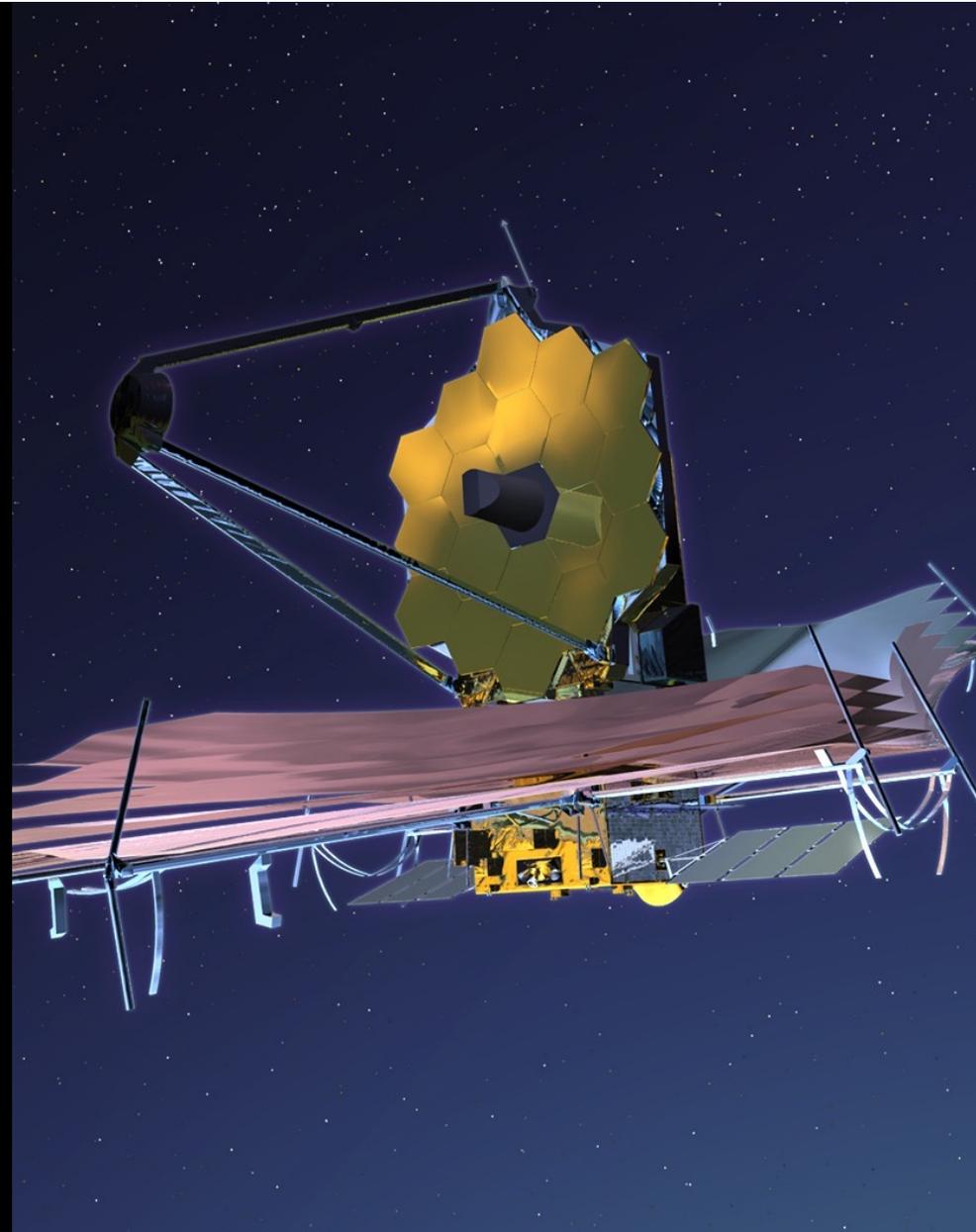
Les télescopes sur Terre

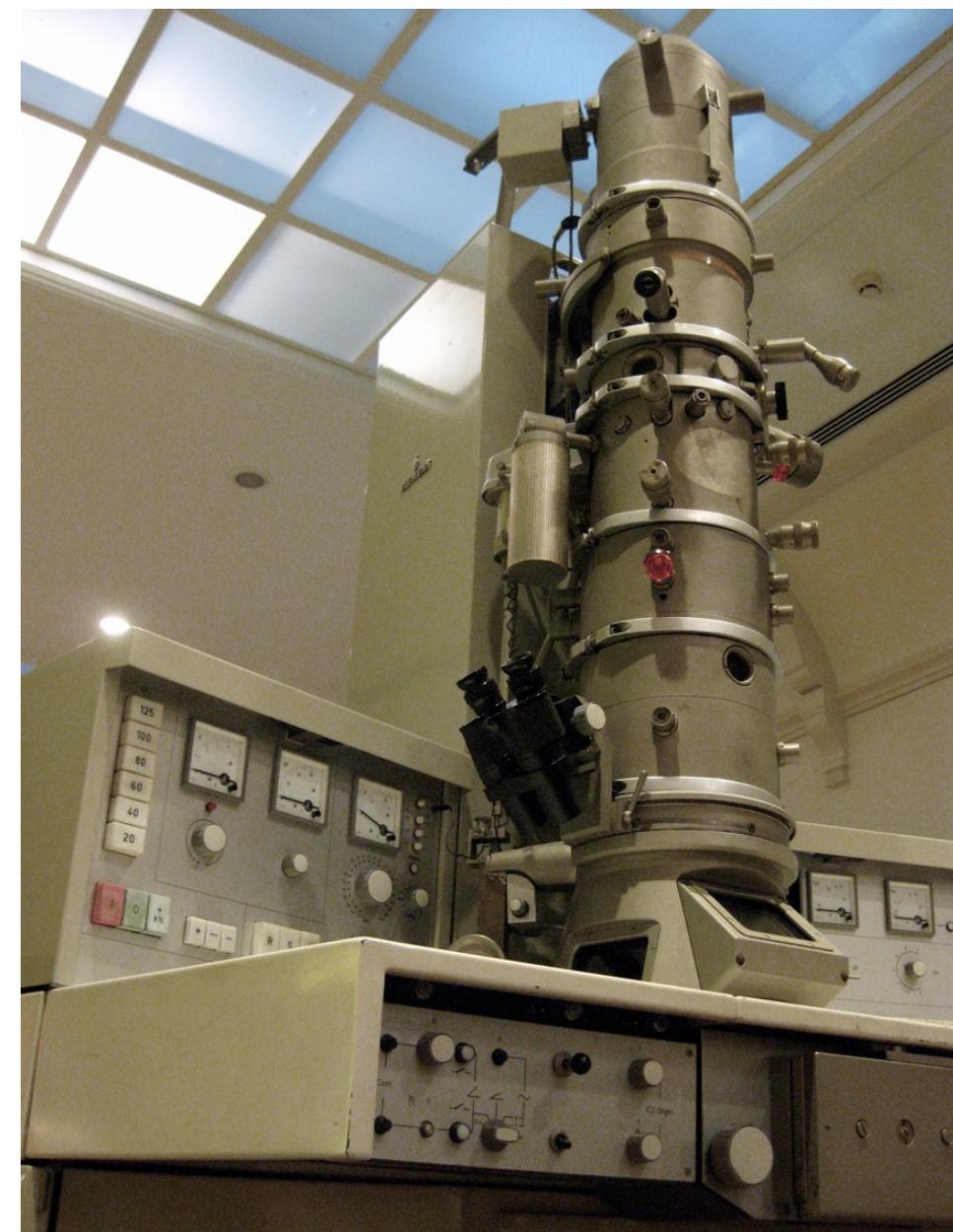
Maunakea, Hawaii



Les télescopes dans l'Espace

James Webb Telescope





Comment
les physicien.nes
voient l'invisible
quand ça va trop vite

La streak-caméra pour filmer à plus de cent mille milliards d'image par seconde

LETTER

doi:10.1038/nature14005

Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second

Liang Gao^{1*}, Jinyang Liang^{2*}, Chiye Li¹ & Lihong V. Wang¹

The capture of transient scenes at high imaging speed has been long sought by photographers^{1–4}, with early examples being the well known recording in 1878 of a horse in motion⁵ and the 1887 photograph of a supersonic bullet⁶. However, not until the late twentieth century were breakthroughs achieved in demonstrating ultrahigh-speed imaging (more than 10^7 frames per second)⁷. In particular, the introduction of electronic imaging sensors based on the charge-coupled device (CCD) or complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS) technology revolutionized high-speed photography, enabling acquisition rates of up to 10^7 frames per second⁸. Despite these sensors' widespread impact, further increasing frame rates using CCD or CMOS technology is fundamentally limited by their on-chip storage and electronic readout speed⁹. Here we demonstrate a two-dimensional dynamic imaging technique, compressed ultrafast photography (CUP), which can capture non-repetitive time-evolving events at up to 10^{11} frames per second. Compared with existing ultrafast imaging techniques, CUP has the prominent advantage of measuring an x - y - t (x , y , spatial coordinates; t , time) scene with a single camera snapshot, thereby allowing observation of transient events with temporal resolution as tens of picoseconds. Furthermore, akin to traditional photography, CUP is receive-only, and so does not need the specialized active illumination required by other single-shot ultrafast imagers^{10–13}. As a result, CUP can image a variety of luminescent—such as fluorescent or bioluminescent—objects. Using CUP, we visualize four fundamental physical phenomena with single laser shots only: laser pulse reflection and refraction, photon racing in two media, and faster-than-light propagation of non-information (that is, motion that appears faster than the speed of light but cannot convey information). Given CUP's capability, we expect it to find widespread applications in both fundamental and applied sciences, including biomedical research.

To record events occurring at subnanosecond scale, currently the most effective approach is to use a streak camera, that is, an ultrafast photo-detection system that transforms the temporal profile of a light signal into a spatial profile by shearing photoelectrons perpendicularly to their direction of travel with a time-varying voltage¹⁴. However, a typical streak camera is a one-dimensional imaging device—a narrow entrance slit (10–50 μm wide) limits the imaging field of view (FOV) to a line. To achieve two-dimensional (2D) imaging, the system thus requires additional mechanical or optical scanning along the orthogonal spatial axis. Although this paradigm is capable of providing a frame rate fast enough to catch photons in motion^{11,12}, the event itself must be repetitive—following exactly the same spatiotemporal pattern—while the entrance slit of a streak camera steps across the entire FOV. In cases where the physical phenomena are either difficult or impossible to repeat, such as optical rogue waves¹⁵, nuclear explosion, and gravitational collapse in a supernova, this 2D streak imaging method is inapplicable.

To overcome this limitation, here we present CUP (Fig. 1), which can provide 2D dynamic imaging using a streak camera without employing any mechanical or optical scanning mechanism with a single exposure. On the basis of compressed sensing¹⁶, CUP works by encoding the spatial domain with a pseudo-random binary pattern, followed by a shearing

operation in the temporal domain, performed using a streak camera with a fully opened entrance slit. This encoded, sheared three-dimensional (3D) x , y , t scene is then measured by a 2D detector array, such as a CCD, with a single snapshot. The image reconstruction process follows a strategy similar to compressed-sensing-based image restoration^{17–19}—iteratively estimating a solution that minimizes an objective function.

By adding a digital micromirror device as the spatial encoding module and applying the CUP reconstruction algorithm, we transformed a conventional one-dimensional streak camera into a 2D ultrafast imaging device. The resultant system can capture a single, non-repetitive event at up to 100 billion frames per second with appreciable sequence depths (up to 350 frames per acquisition). Moreover, by using a dichroic mirror to separate signals into two colour channels, we expand CUP's functionality into the realm of four dimensional (4D) x , y , t , λ ultrafast imaging, maximizing the information content that we can simultaneously acquire from a single instrument (Methods).

CUP operates in two steps: image acquisition and image reconstruction. The image acquisition can be described by a forward model (Methods). The input image is encoded with a pseudo-random binary pattern and then temporally dispersed along a spatial axis using a streak camera. Mathematically, this process is equivalent to successively applying a spatial encoding operator, C , and a temporal shearing operator, S , to the intensity distribution from the input dynamic scene, $I(x, y, t)$:

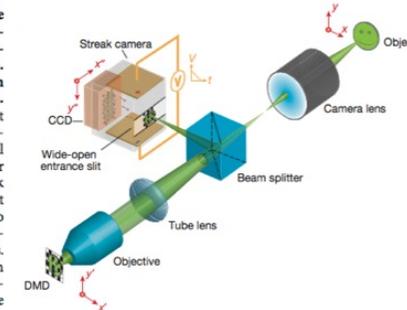
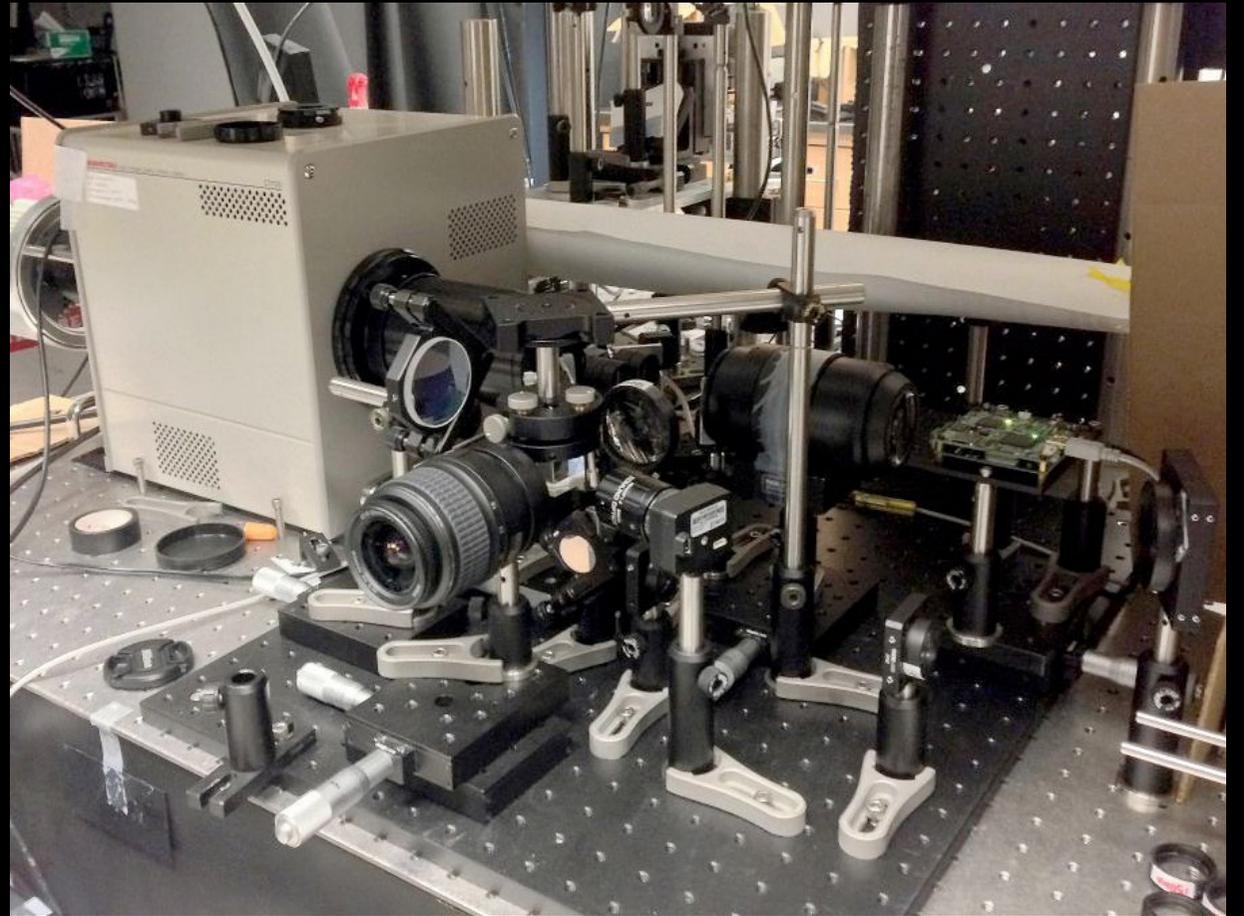
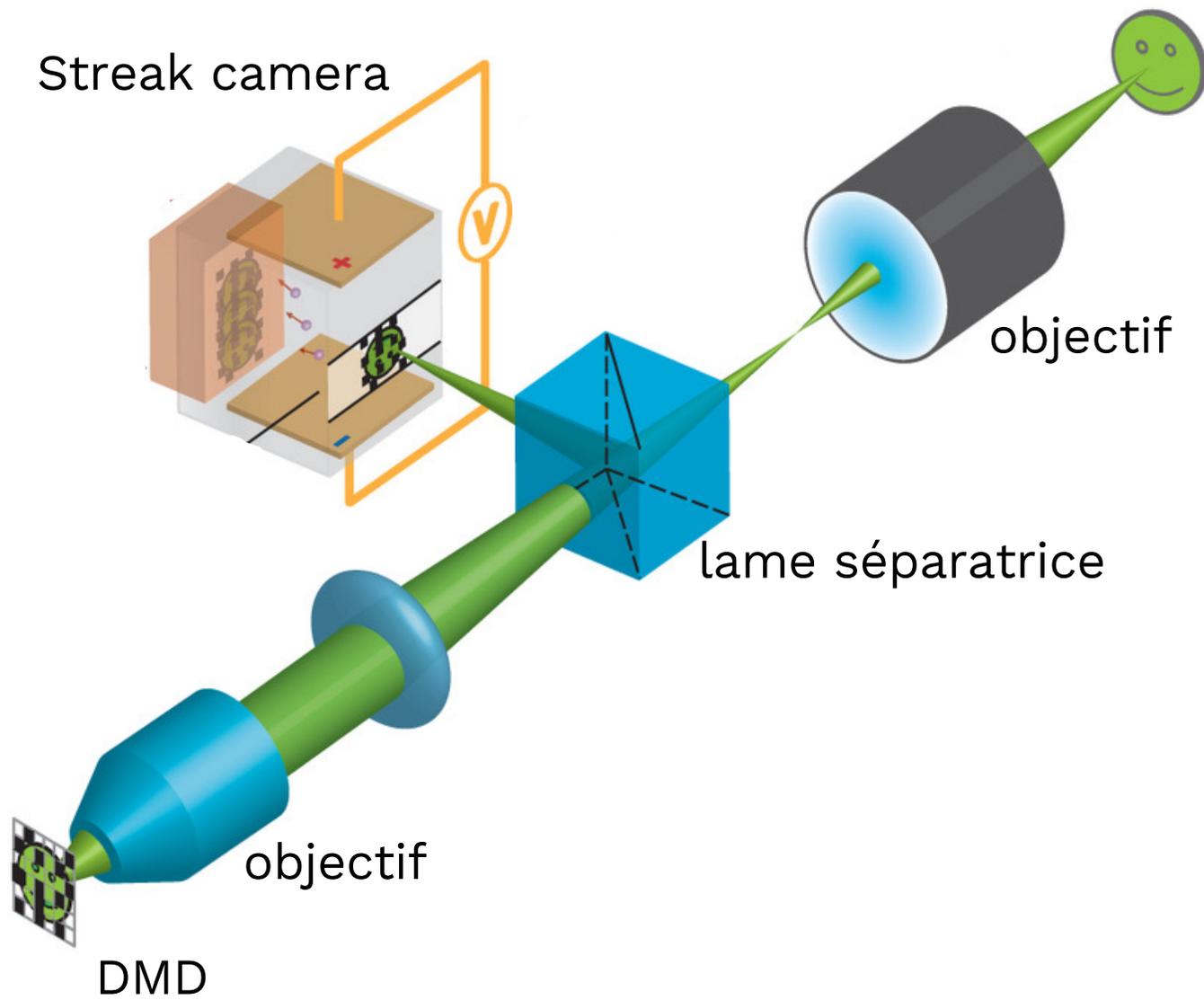


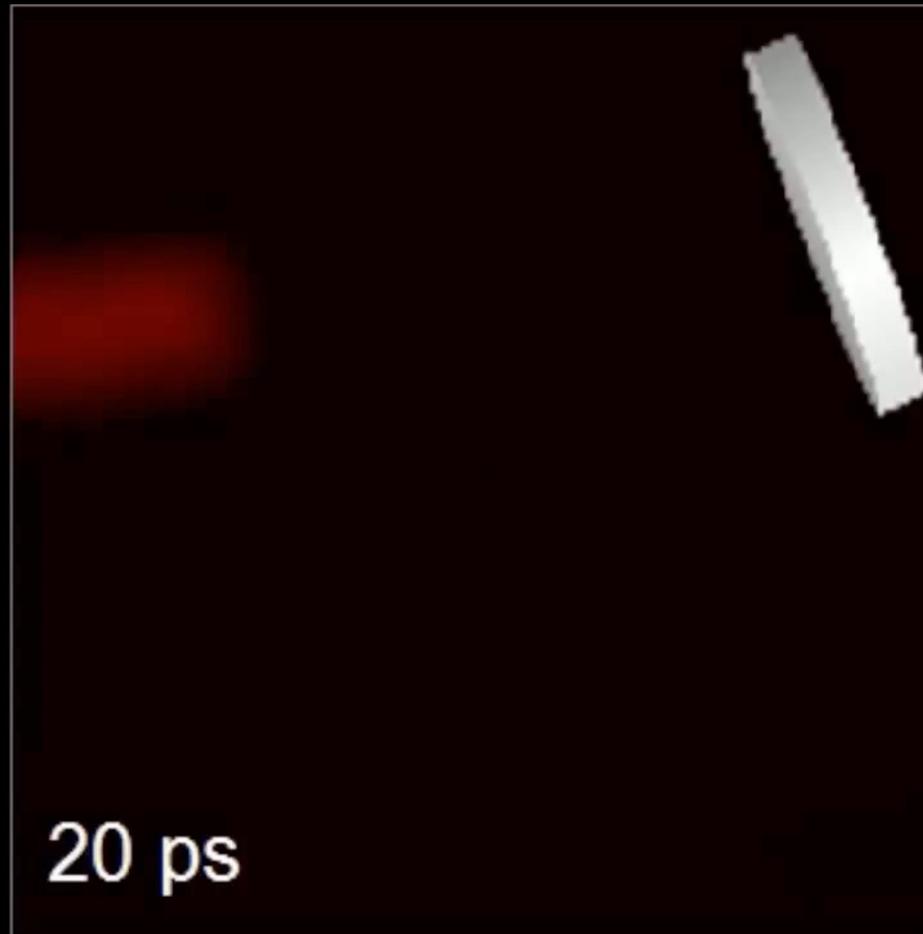
Figure 1 | CUP system configuration. CCD, charge-coupled device; DMD, digital micromirror device; V , sweeping voltage; t , time. Since each micromirror ($7.2 \mu\text{m} \times 7.2 \mu\text{m}$) of the DMD is much larger than the light wavelength, the diffraction angle is small ($\sim 4^\circ$). With a collecting objective of numerical aperture $\text{NA} = 0.16$, the throughput loss caused by the DMD's diffraction is negligible. See text for details of operation. Equipment details: camera lens, Fujinon CF75HA-1; DMD, Texas Instruments DLP LightCrafter; microscope objective, Olympus UPLSAPO 4 \times ; tube lens, Thorlabs AC254-150-A; streak camera, Hamamatsu C7700; CCD, Hamamatsu ORCA-R2.

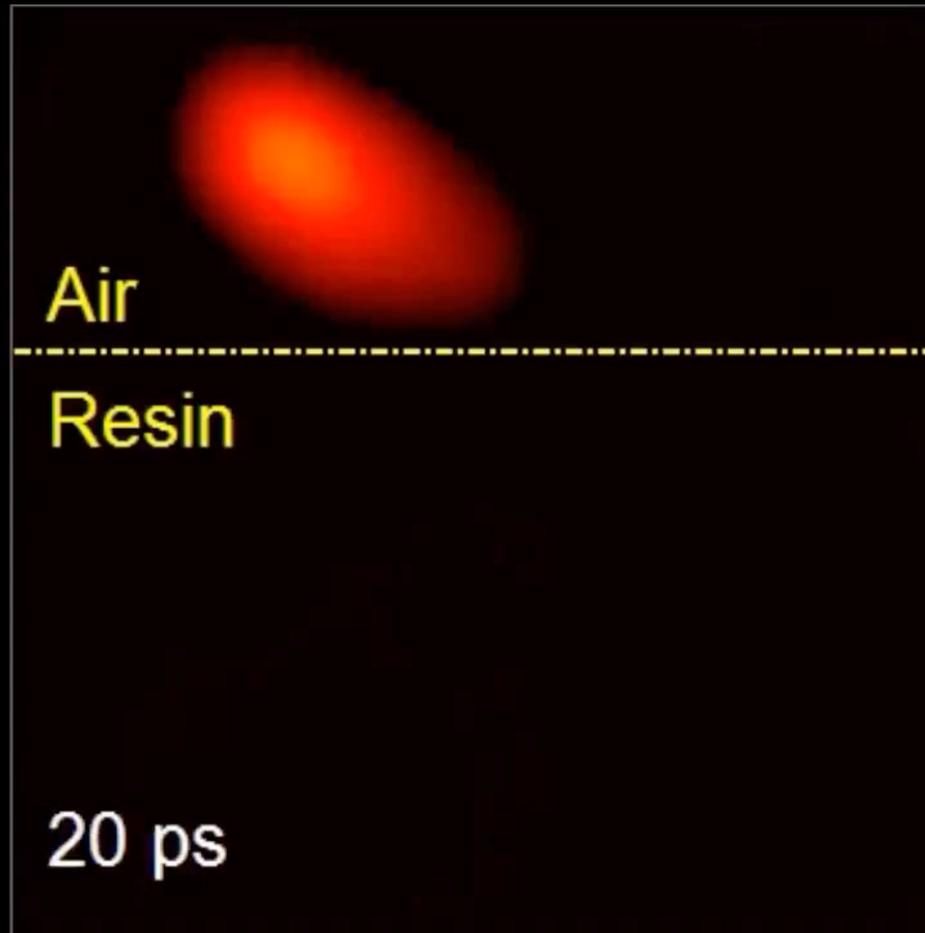
¹Optical Imaging Laboratory, Department of Biomedical Engineering, Washington University in St. Louis, Campus Box 1097, One Brookings Drive, St. Louis, Missouri 63130, USA.
²These authors contributed equally to this work.

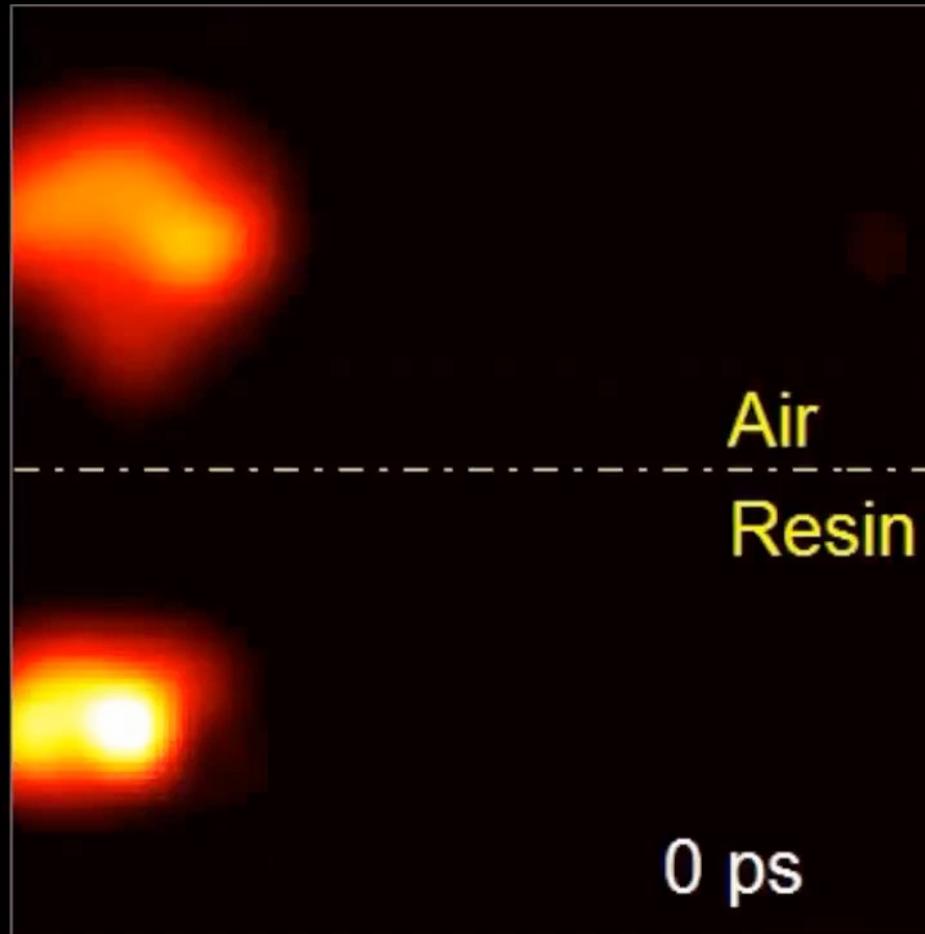
La streak-caméra
pour filmer à plus
de cent mille milliards
d'image par seconde











Des impulsions laser
pour filmer
à la femtoseconde
à l'échelle des atomes

1 femtoseconde = 1 fs = 10^{-15} s
= 0,000 000 000 000 001 s

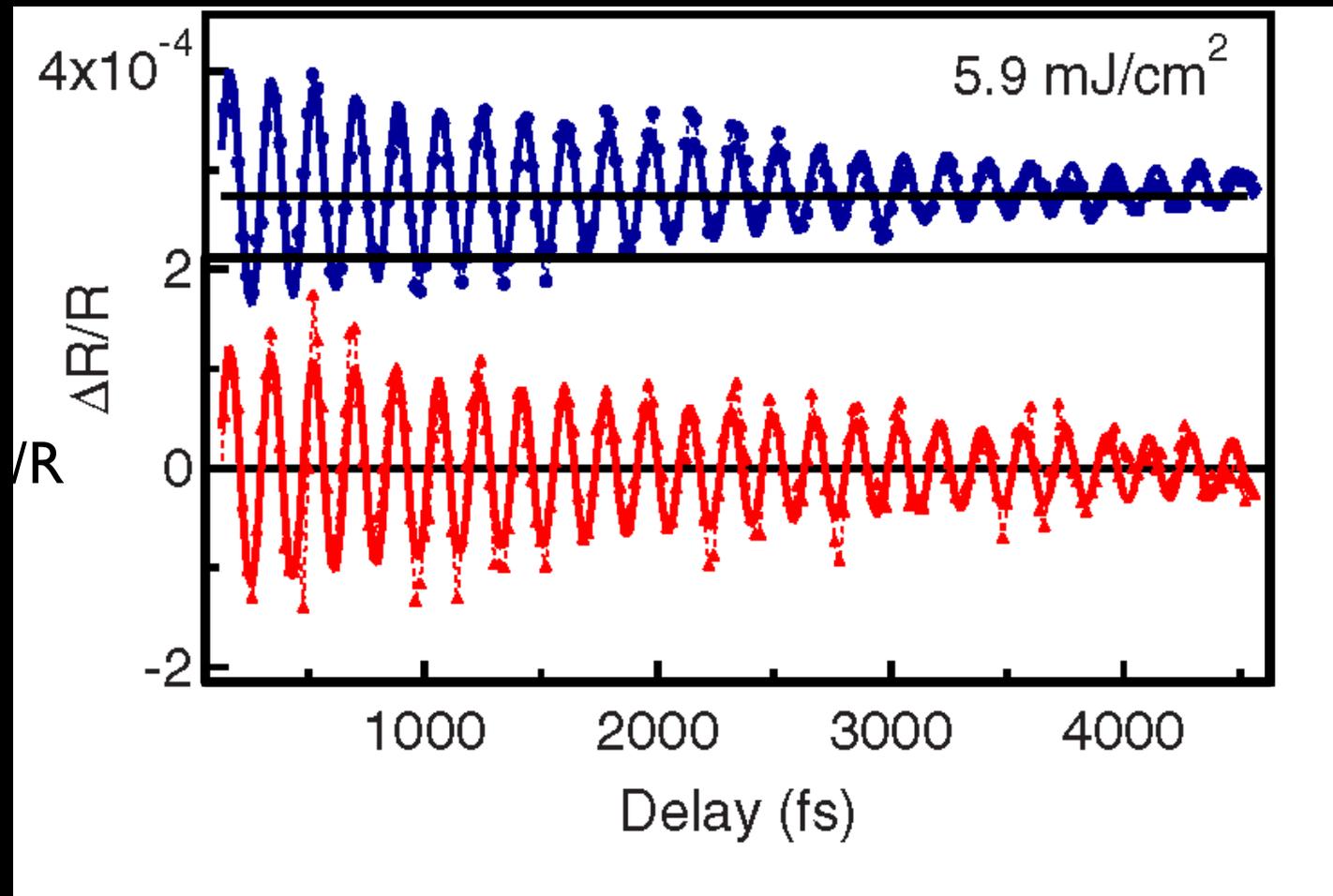
1 attoseconde = 1 as = 10^{-18} s
= 0,000 000 000 000 000 001 s



Des impulsions laser
pour filmer
à la femtoseconde
à l'échelle des atomes

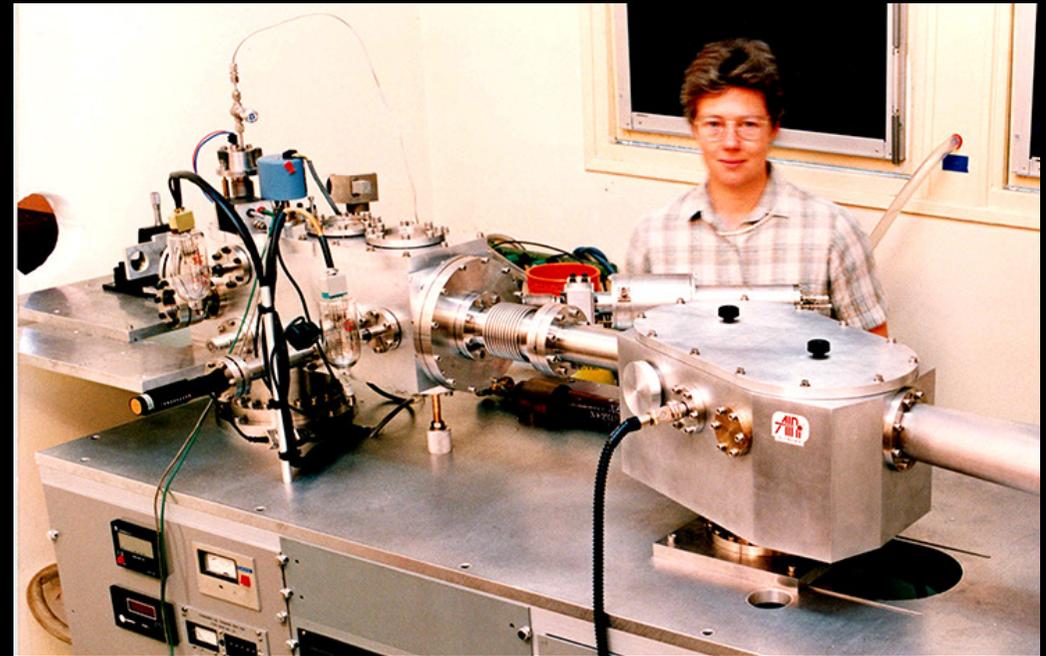
Technique
pompe-sonde

Atomes en train de vibrer



**Des impulsions laser
pour filmer à l'attoseconde
à l'échelle des atomes**

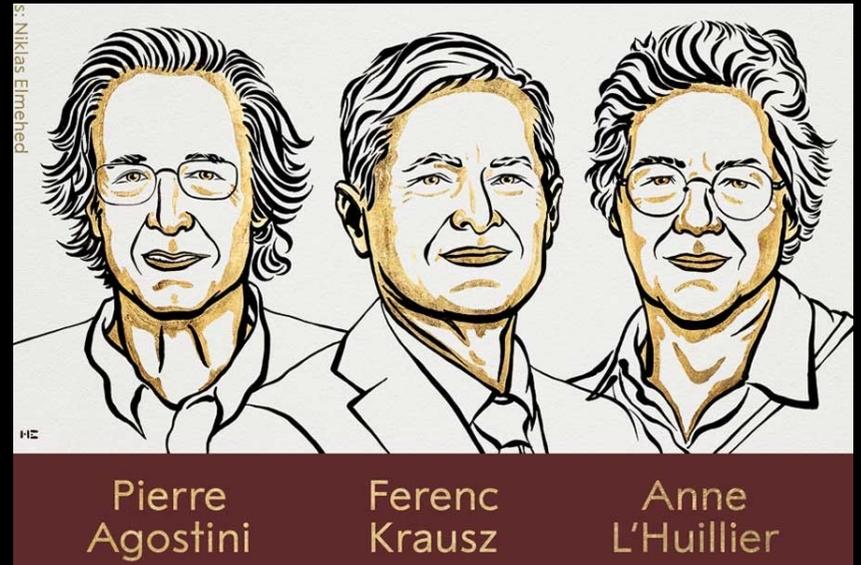
1 attoseconde = 1 as = 10^{-18} s
= 0,000 000 000 000 000 001 s



Nobel de physique 2023

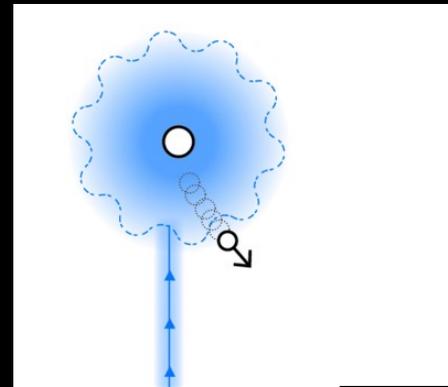
Des impulsions laser pour filmer à l'attoseconde à l'échelle des atomes

1 attoseconde = 1 as = 10^{-18} s
= 0,000 000 000 000 000 001 s

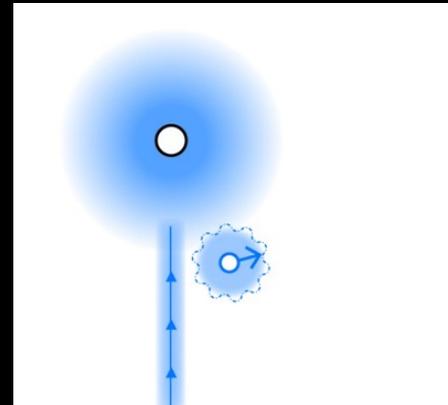


Des impulsions laser pour filmer à l'attoseconde à l'échelle des atomes

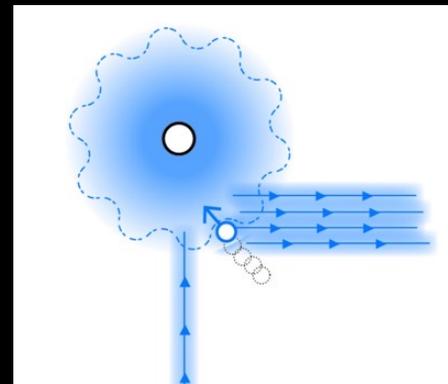
1 attoseconde = 1 as = 10^{-18} s
= 0,000 000 000 000 000 001 s



un laser arrache un électron à un atome.



Cet électron est «rattrapé» par le laser qui le ramène à l'atome.

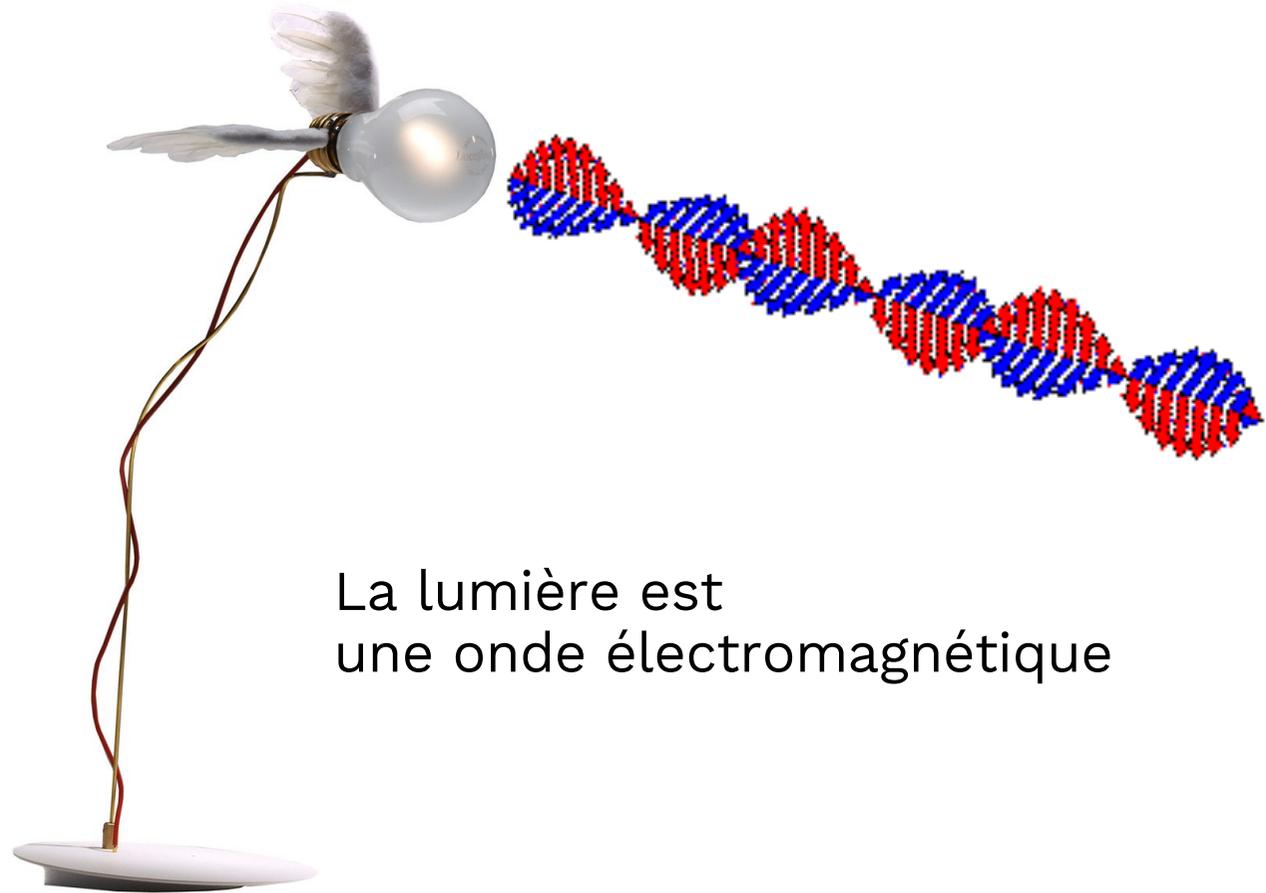


En y revenant, il émet à son tour un flash ultrarapide.



Comment
les physicien.nes
crèent l'invisible

Les métamatériaux
« tricher » avec les lois
de l'optique grâce à
l'électricité



La lumière est
une onde électromagnétique

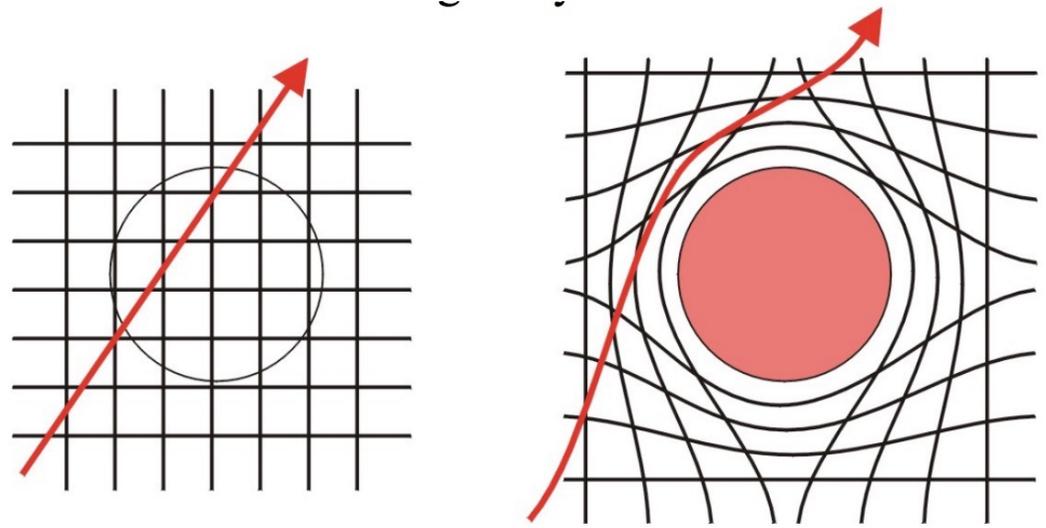
Les métamatériaux
des composants
électriques
micrométriques qui
agissent sur la lumière
pour la manipuler.

D. R. Smith, W. J. Padilla, et al, Phys. Rev. Lett. 14, 234 (2000)



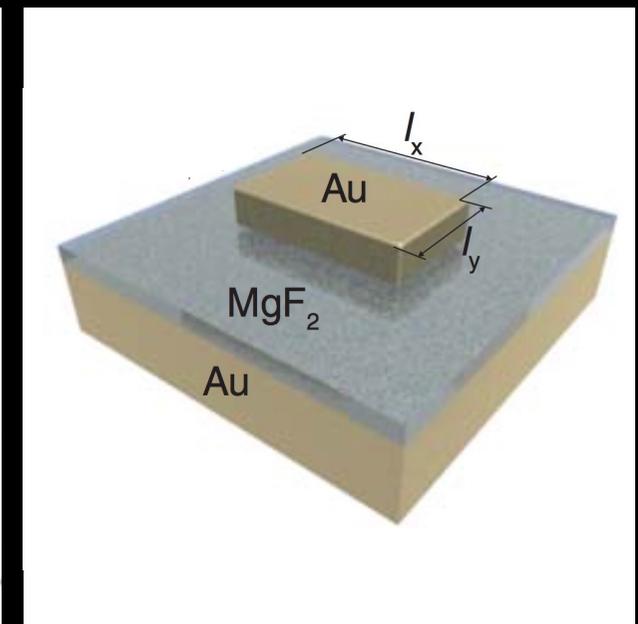
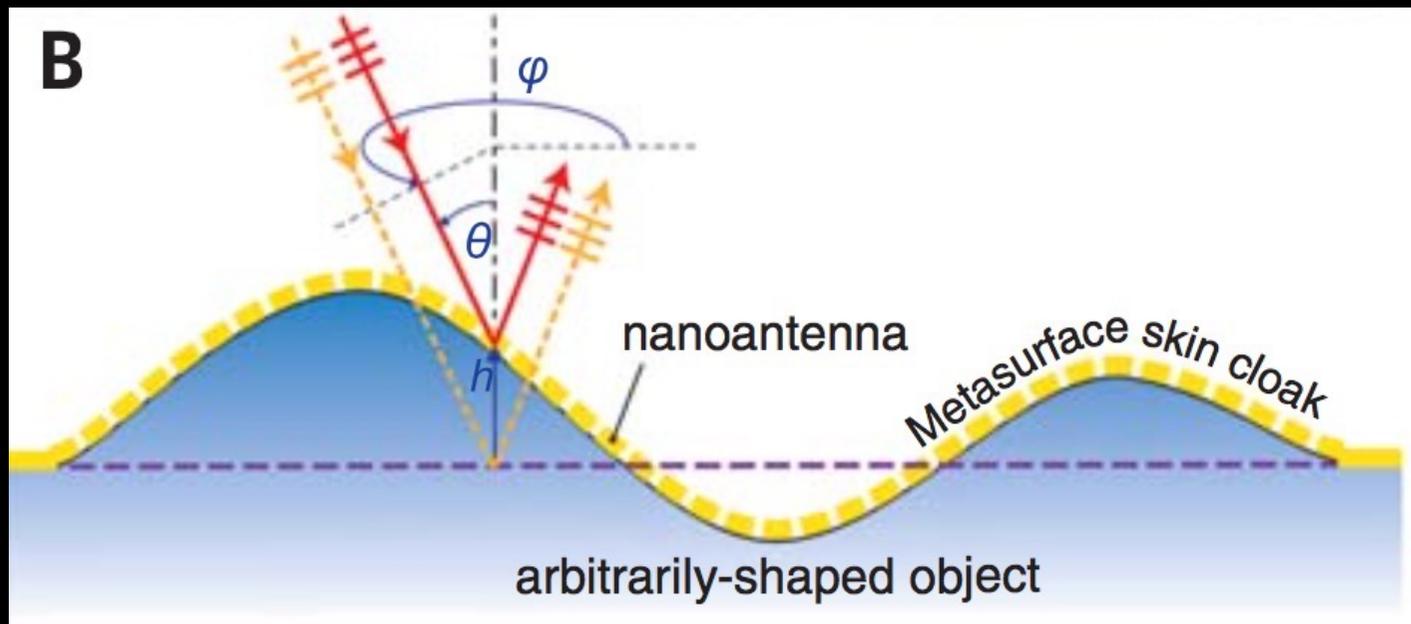
Les métamatériaux pour rendre invisible

pour rendre invisible, il faut dévier la lumière
comme si l'objet n'était pas là



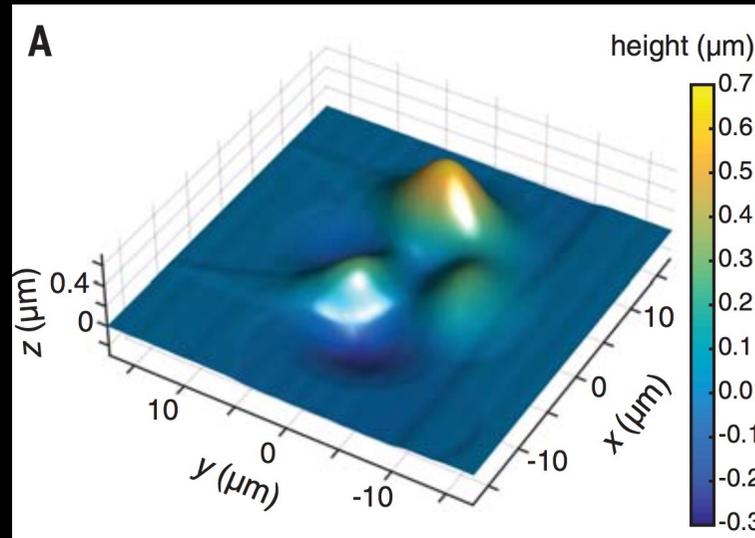
Les métamatériaux pour rendre invisible

métasurface ultrafine (80nm) composée de nano-antennes d'or :
chaque nano-antenne produit via l'ajustement de sa taille (l_x , l_y) un déphasage pour rattraper l'effet de la hauteur de matériau h : émission comme si il s'agissait d'un miroir plan (au niveau violet)

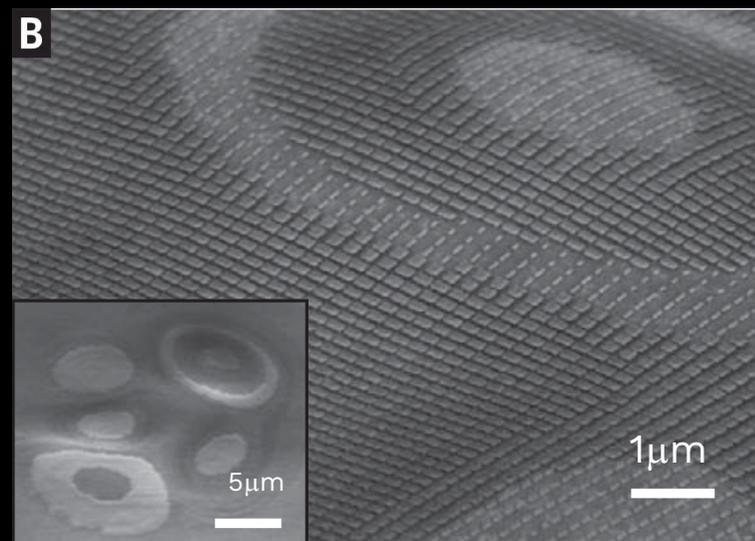


Les métamatériaux pour rendre invisible

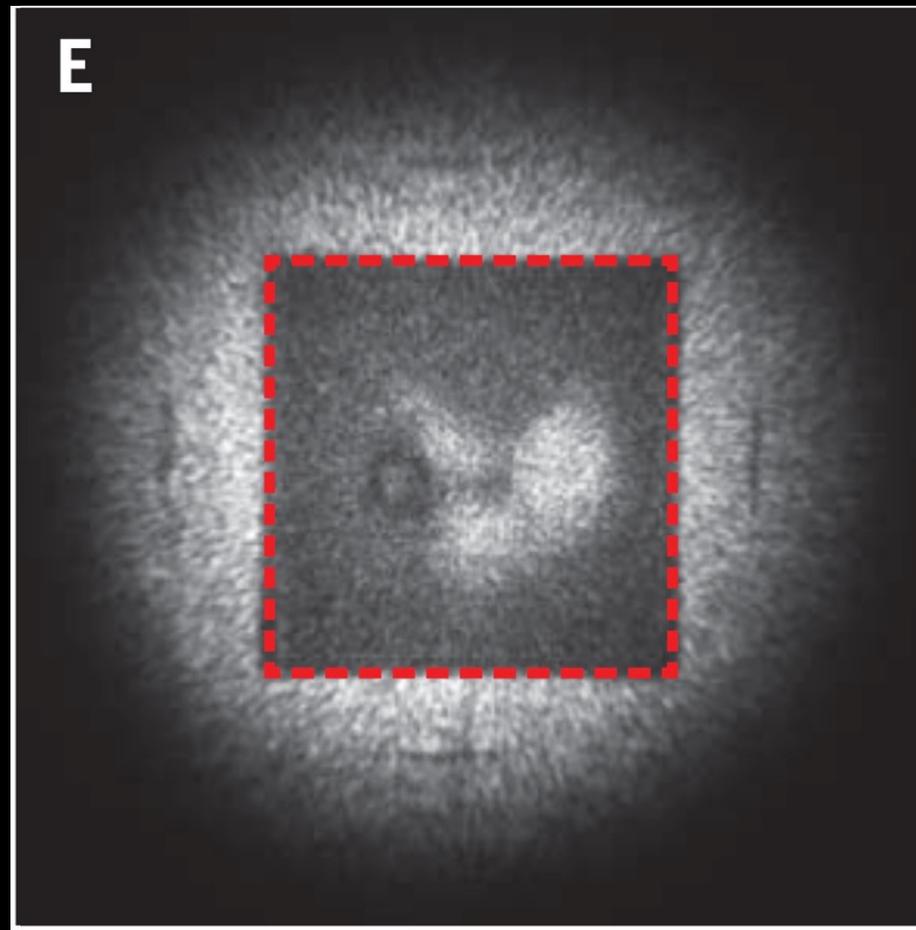
l'objet de départ



l'objet recouvert
des nano-antennes



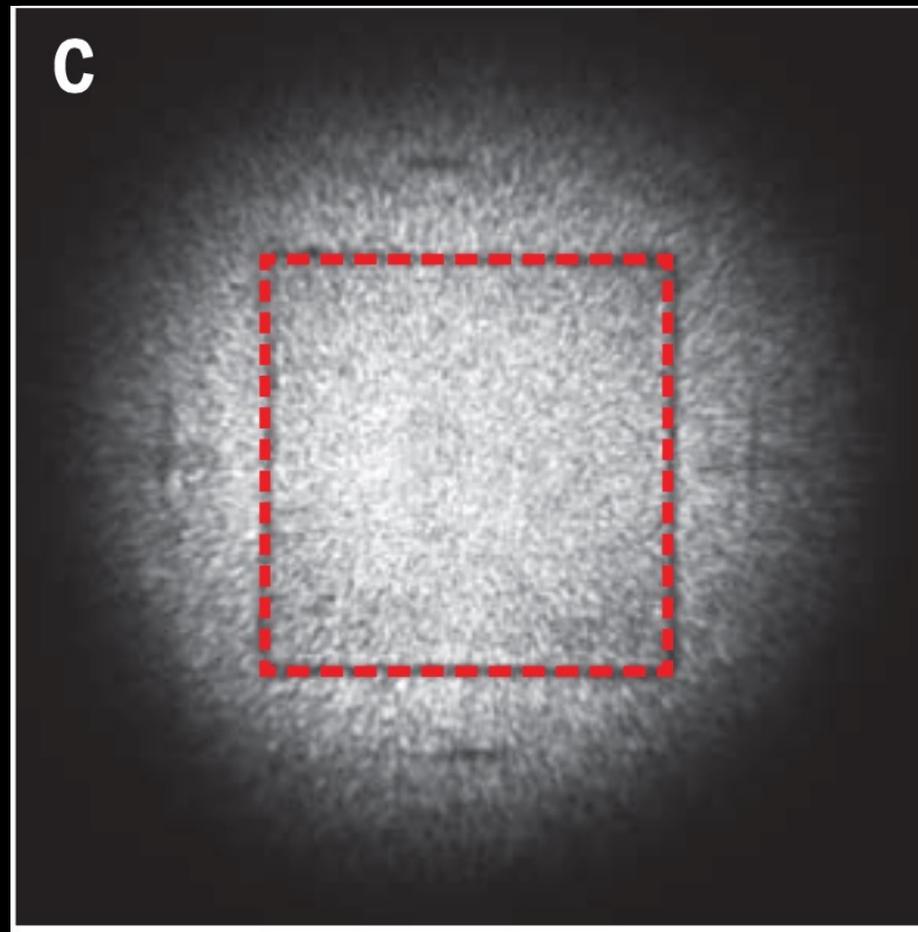
Les métamatériaux pour rendre invisible



30 μm

$\lambda=730\text{nm}$

Les métamatériaux pour rendre invisible



30 μm

$\lambda=730\text{nm}$

Les métamatériaux pour rendre invisible

nature
photonics

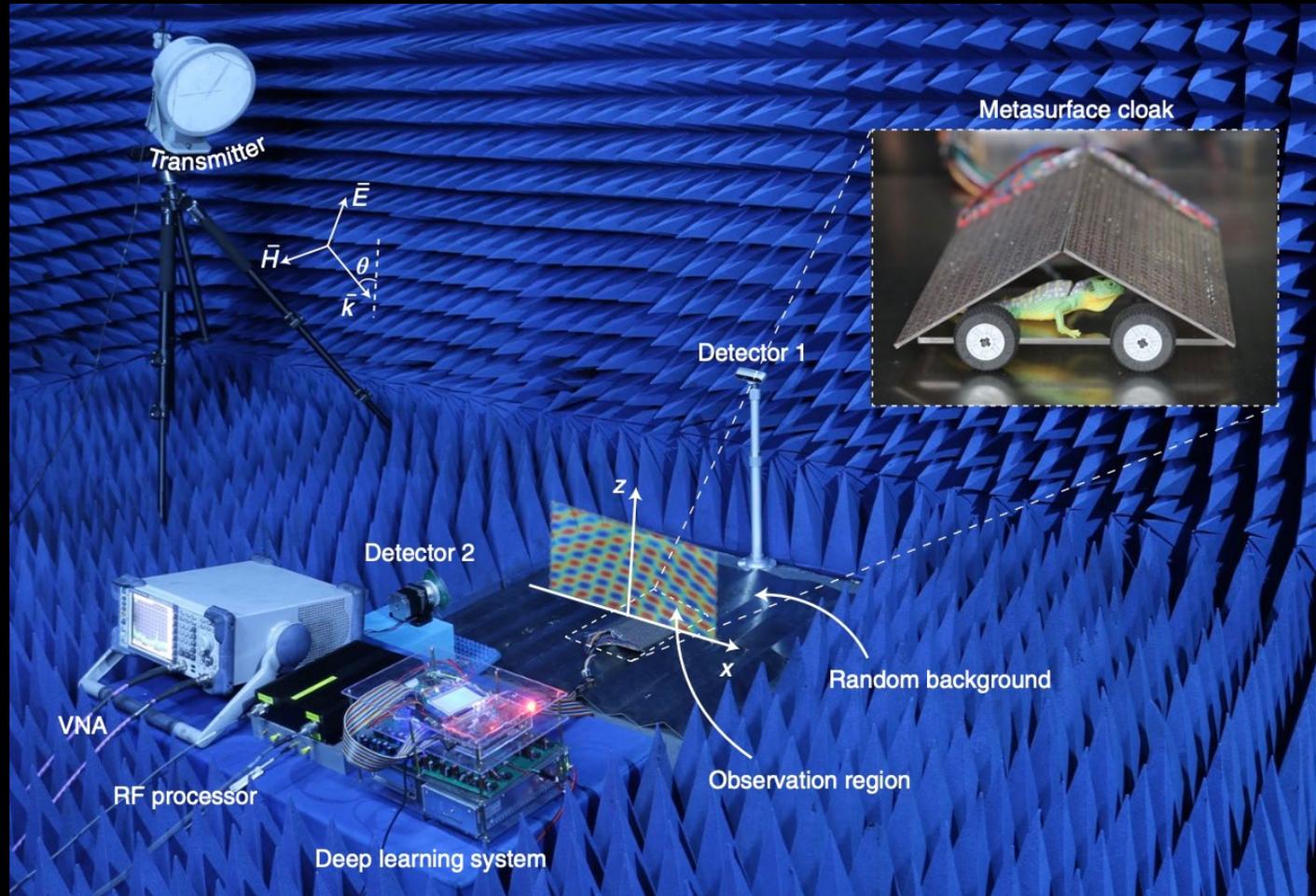
ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41566-020-0604-2>

Check for updates

Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention

Chao Qian^{1,2}, Bin Zheng^{1,2}, Yichen Shen^{3,4}, Li Jing³, Erping Li^{1,2}, Lian Shen^{1,2} and Hongsheng Chen^{1,2,5*}



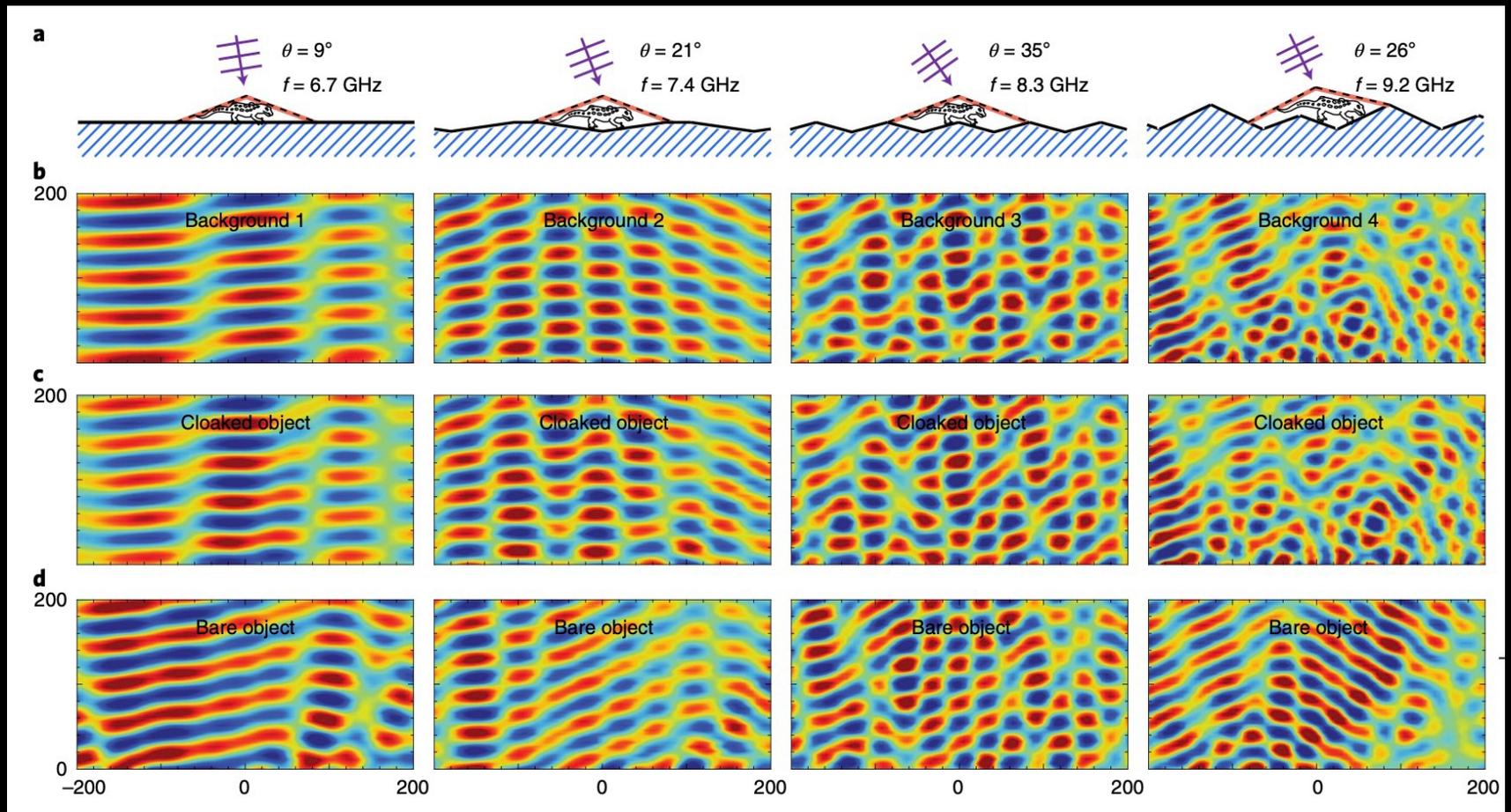
Les métamatériaux pour rendre invisible

changement de la position de l'objet et de la couleur de l'onde incidente (temps de réponse = 15 msec)

sans objet

objet sans
métamatériaux

objet avec
métamatériaux





En résumé, pour voir ou rendre invisible, il faut :

- **comprendre notre oeil**
- **comprendre la lumière et son interaction avec la matière**
- **et ensuite développer beaucoup de concepts et de technologies**

Des sujets possibles sur l'invisibilité

un sujet introductif

l'oeil humain et ses limites
c'est quoi la lumière ?

un sujet historique

les premiers microscopes
les découvertes des lumières
invisibles (IR, UV, RX, gamma...)

un outil de recherche

le microscope à effet tunnel
le microscope à force atomique
le microscope électronique
la streak camera
les télescopes

un sujet de recherche

les métamatériaux
mesurer à la femtoseconde
les attosecondes (Nobel 2023)
la nanocar race

**la présentation est ici,
avec quelques liens en plus**

<https://tinyurl.com/hear2024>

