# Un zoo de yeux

This manuscript (<u>permalink</u>) was automatically generated from <u>laurentperrinet/2023-02-01\_un-zoo-de-yeux@4d6cec9</u> on August 12, 2023.

### **Authors**

#### • Laurent U Perrinet

© 0000-0002-9536-010X · ♠ laurentperrinet · ② @laurentperrinet@neuromatch.social
Institut de Neurosciences de la Timone, CNRS / Aix-Marseille Université · Funded by This research was funded by the European Union ERA-NET CHIST-ERA 2018 research and innovation program under grant number ANR-19-CHR3-0008-03 "APROVIS3D", ANR grant number ANR-20-CE23-0021 "AgileNeuroBot", as well as from Initiative d'Excellence d'Aix-Marseille Université-A\*MIDEX grant number AMX-21-RID-025 "Polychronies".

#### Résumé

Pour la plupart d'entre nous, le monde visible qui nous entoure est facilement et immédiatement accessible grâce à nos yeux et au système visuel qui nous permet de traiter ces informations. Or, les problèmes liés à la vision sont courants, qu'il s'agisse d'une hypermétropie ou d'une myopie, qui se corrigent avec des lunettes. Mais des problèmes plus graves peuvent exister, comme les pathologies rétiniennes qui peuvent être liées à l'âge ou à des facteurs génétiques. Il s'agit de conditions graves qui peuvent entraîner des handicaps sévères. Mais en fait, comment fonctionnent les yeux, et quelle est l'origine de ces problèmes potentiels ? Que peut-on apprendre de la diversité des yeux que l'on observe dans le monde vivant ? Peut-on remonter à la source de leur évolution pour connaître comment les yeux sont-ils apparus au cours de l'évolution du vivant ?

### L'œil humain

L'œil humain est l'organe de la vue, et nous ne pouvons que nous émerveiller devant les mécanismes ingénieux qui y sont mis en œuvre. Commençons par quelques caractéristiques de la vision qui nous semblent si naturelles, mais qui rendraient jaloux n'importe quel fabricant de caméra artificielle. En effet, notre vision nous permet de capturer continûment dans le temps en haute définition, en couleur et avec une notion de profondeur. L'œil est capable de fonctionner aussi bien en plein soleil qu'au clair de lune et peut s'adapter à de nombreuses conditions de visibilité. Pour couronner le tout, l'ensemble consomme peu d'énergie relativement à un système artificiel.

De l'extérieur, l'œil laisse apparaitre le globe oculaire, protégé par des paupières, et notamment une pupille autour de laquelle l'iris coloré se dilate ou se contracte au gré des conditions de lumière ou d'attention. Ce globe a une forme sphérique d'environ deux centimètres de diamètre, ce qui lui permet d'effectuer de rapides mouvements de rotation et ainsi de diriger le regard vers des points d'intérêt, ou encore de suivre des objets en mouvement. Une vue en coupe permet de suivre le chemin de la lumière : celle-ci est reçue par la cornée, une surface bombée située sur sa face externe. Elle traverse ensuite le cristallin qui agit comme une lentille pour concentrer les rayons lumineux sur le fond de l'œil. Sur ce fond se trouve un tissu qui constitue l'organe sensible de notre œil, la rétine.

La rétine contient de nombreux neurones sensibles à la lumière, ainsi que des mécanismes capables de transformer ces informations pour les transmettre à notre cerveau. On compte environ 100 millions de photorécepteurs, plusieurs couches de traitement qui permettent de transformer l'énergie électromagnétique transportée par les photons grâce à une cascade de réactions électrochimiques qui peuvent produire une activité neuronale qui va être transformée par différentes couches de traitement. En particulier, les cellules ganglionnaires sont chargées de collecter ces informations pour les transmettre au cerveau. Les sorties de ces neurones se regroupent pour former le nerf optique qui relie la rétine au reste du cerveau. La rétine est ainsi la seule partie véritablement visible de notre système nerveux!

Mais nos yeux ne se résument pas simplement à ça! Autour du globe oculaire, un incroyable et fascinant réseau de mécanismes coexiste pour permettre à l'œil de bouger, que sa surface externe soit continûment humidifiée par les larmes, ou simplement pour que nos paupières puisse effectuer un clin d'œil. Globalement, ce système semble former une mécanique parfaite semblable à une horloge. Cette analogie est couramment utilisée par certains pour justifier l'existence d'un dessein intelligent pour l'élaboration de nos yeux : « comment est-ce que cela aurait pu être possible autrement ? »

Face à cet argumentaire, il n'est a priori pas aisé de répondre... En poussant la curiosité encore plus loin, on se rend compte de la diversité de la forme des yeux dans le monde animal, et nous allons voir

que des animaux peuvent utiliser des mécanismes particulièrement ingénieux. D'un côté, cette exploration peut être utilisée dans des applications technologiques futures, mais surtout, ils nous permettront de répondre de mieux comprendre notre propre vision et ainsi de répondre à la question de savoir « qui a inventé l'œil ? »

## La pupille.

Commençons notre exploration de la diversité des yeux dans le monde animal en se focalisant sur sa partie la plus visible, la pupille. Comme nous l'avons vu, cette partie du globe oculaire permet de faire plus ou moins passer la lumière. Commençons notre exploration par un voisin qui nous est proche, le chat domestique, et on est tout de suite frappé par sa forme allongée. En fait, en fonction de la luminosité, la pupille des chats va passer d'une forme tout à fait ronde dans l'obscurité pour graduellement se contracter et former la forme caractéristique en biseau des pupilles de chat. On observe un mécanisme similaire chez les humains, mais la contraction est uniforme dans toutes les directions et la forme reste par conséquent ronde. On pense expliquer que cette contraction chez le chat permet de créer une ouverture très allongée dans le sens vertical et que cela permet de former une image optique sur le fond de la rétine qui privilégiera la résolution dans la dimension horizontale tout en captant un niveau optimal de lumière.

Plus étonnant, la pupille chez le mouton, se contracte suivant un axe horizontal. De la même façon, on explique que cette évolution est due au fait que les moutons sont plus généralement des proies et qu'une telle configuration leur permet de porter leurs intentions sur un plus large champ de vision. En comparaison, les chats sont des prédateurs, et il serait plus utile pour cette espèce de distinguer des différences fines dans cette dimension plutôt que de l'autre. C'est donc le jeu de la sélection naturelle qui a conduit la pupille de ces deux espèces à évoluer de façon différente.

D'autres animaux présentent des formes de pupilles encore plus surprenantes. C'est le cas de la sèche qui présente une pupille caractéristique qui une fois contractée possède une forme allongée et ondulée comme la lettre manuscrite "w". La forme de cette pupille est unique dans le règne animal et la fonction de cette forme est longtemps restée un grand mystère. Il se trouve que ces animaux peuvent changer la couleur de leur peau à des fins de communication ou de camouflage, mais que ces animaux ne possèdent pas de photorécepteurs sensibles à des couleurs différentes, comme on peut les trouver chez les humains par exemple. C'est un paradoxe, car il est impossible d'imaginer que l'on puisse produire une réaction de camouflage si on ne peut pas voir la couleur ou la texture de l'objet que l'on veut imiter.

En fait, il semble que ces deux mystères soit reliés et une hypothèse fascinante propose que la forme de la pupille aide à percevoir les couleurs. En effet, à la manière dont les couleurs sont décomposées par un arc-en-ciel pour former différentes bandes, les systèmes optiques peuvent réfléchir les différentes couleurs suivant des angles légèrement différents. La forme biscornue de la pupille de la seiche permettrait ainsi de créer des formes différentes pour différentes couleurs et leur cerveau pourrait extraire cette information pour en déduire les couleurs, tout cela sans utiliser des photorécepteurs qui y soient sensibles. Cette hypothèse reste à confirmer, mais elle illustre bien les trésors d'ingéniosité que ces systèmes semblent développer pour arriver à leurs fins. Mais n'oublions pas qu'en biologie, tout peut seulement être décrit à la lumière de la sélection naturelle, et que ce sont des millions de générations de croisement entre des milliards d'individus qui ont permis de favoriser ce trait, et ainsi la survie de cette espèce.

## D'autres facettes des yeux

Les yeux chez les humains, chats et moutons possèdent donc beaucoup de points en commun, mais aussi une grande variété sur les formes qu'ils peuvent prendre. Ils semblent donc avoir évolué sur des trajectoires différentes et indépendantes, mais probablement à partir d'un ancêtre commun. Si l'on remonte encore plus dans les branches de l'arbre de l'évolution, alors on trouve une autre forme d'œil qui est radicalement différente. Au lieu de concentrer une image sur la rétine grâce à la pupille, ces yeux sont composés de multiples yeux élémentaires de forme allongés et accolés les uns aux autres.

L'exemple le plus caractéristique de cette forme d'œil composé et celui de la mouche. Les yeux d'une mouche commune comportent environ 10000 facettes, organisés suivant une grille hexagonale relativement régulière. Ces yeux permettent un champ de vue panoramique de l'ensemble de l'environnement qui entoure la mouche. Chacune des facettes se compose d'une lentille et de quelques photorécepteurs, et l'ensemble permet aux mouches des prodiges de voltige, et notamment d'atteindre des accélérations dignes des meilleurs avions de chasse. Encore plus extraordinaire, ce système pèse moins d'un gramme et consomme très peu d'énergie. Il serait bien utile de mieux comprendre ce système pour guider des robots aériens du futur!

Ces yeux dérivent sûrement d'un ancêtre commun. Si l'on remonte encore l'arbre phylogénétique, on peut trouver le système le plus rudimentaire dans certains microorganismes qui possèdent un mécanisme phototactique, c'est-à-dire de mouvement guidé par la lumière. Ce mécanisme est l'association simple d'un senseur photosensible, d'un positionnement excentré dans l'organisme qui définit une direction et enfin de cils qui agissent comme des moteurs pour déplacer cet organisme. Suivant que cet organisme cherche à être guidé vers une source de lumière, par exemple, car elle est plus probable de concentrer des sources de nourriture, ou qu'elle cherche à l'éviter, alors un simple mécanisme entre les cellules sensibles et les cellules motrices vont pouvoir implanter ce mécanisme d'orientation.

Dans notre exploration, il semble que les yeux aient évolué dans l'arbre de la vie à partir d'un ancêtre commun, et que la diversité du zoo des yeux que l'on puisse observer découle de différents branchements de cette évolution. Par exemple, on peut noter la forme du système visuel de la coquille Saint-Jacques. Si vous observez la coquille de cet animal, vous noterez les différents trous sur le bord de l'ouverture. Ces 21 trous représentent des ouvertures par lequel peuvent passer 21 différents yeux indépendants, qui permettent à ce mollusque de bouger ses yeux de façon indépendante ainsi et donc d'explorer son environnement lumineux immédiat. Encore plus surprenant, ses yeux peuvent capter jusqu'à 12 couleurs différentes, leur donnant une sensibilité décuplée.

Des études récentes semblent suggérer que les yeux ont sûrement été "inventés" plusieurs fois. En effet, certaines morphologies sont si différentes qu'elle ne semblent pas avoir d'ancêtre commun. C'est notamment vrai pour différentes formes de globe oculaire, mais aussi pour différencier la diversité que l'on observe à travers les espèces vivantes. Cela semble une hypothèse difficile à accepter, car nous sommes habitués à placer l'humain en haut de cette hiérarchie. Mais nous avons aussi vu que les yeux découlent de la nécessité de parvenir à certaines fonctions, et qu'à la lumière de la pression opérée par la sélection naturelle il n'existe pas de nécessité, à ce qu'il y ait un ancêtre commun à tous les yeux dans le monde vivant.

## De l'imitation à la compréhension.

Ainsi, au lieu de considérer l'humain comme la seule source d'inspiration pour construire un système artificiel, on a pu voir l'émergence récemment de nouvelles technologies basée sur l'imitation de formes du vivant et qui pourrait révolutionner notre façon de comprendre la vision. Un exemple exotique est le comportement d'une araignée du désert qui utilise la polarisation de la lumière pour s'orienter. En effet, la lumière peut être caractérisée par son énergie et sa couleur, mais elle possède

aussi une polarisation. Cette propriété est par exemple utilisée dans les lunettes des cinémas 3D et permettre de montrer à chaque œil une image différente et ainsi de créer une impression de binocularité. Cette propriété est aussi utilisée dans les filtres polarisants, qui permettent d'éliminer des rayons qui sont nettement polarisé, comme, quand ils se réfléchissent sur une vitre.

Un phénomène remarquable et le fait que la lumière qui nous parvient du soleil est modifiée différentiellement dans le ciel de telle façon à ce que la polarisation autour du soleil dessine une forme caractéristique en forme de croix. Il a été mis en évidence que ces araignées ont la capacité de détecter cette forme grâce à des capteurs sensibles à la polarité et qui leur permettent de deviner la position du soleil, même quand celui-ci n'est pas directement visible par exemple à cause des nuages. L'équipe de Stéphane Viollet à Marseille a récemment développé un robot qui utilise cette propriété. En utilisant la lumière polarisée, leur système est capable de détecter avec une grande précision la position du soleil dans le ciel dans une large gamme de conditions météorologiques, notamment quand le ciel est couvert de nuages, et donc à l'utiliser comme un compas pour un système de navigation. Typiquement ces systèmes sont très dépendants de systèmes d'origines militaires, comme le GPS, mais que ceux-ci peuvent être défaillants ou inaccessibles. Cette nouvelle technologie pourrait se révéler comme un complément essentiel aux systèmes de navigation des voitures du futur.

Une autre avancée récente est le développement de nouvelles caméras basées sur le fonctionnement de la rétine. Cette nouvelle caméra, appelée aussi caméra événementielle, se base sur deux observations. D'abord que les informations sont transformées de façon indépendante par les neurones de sortie de la rétine, sans horloge centrale. Aussi que cette information ne comporte pas une information sur la luminance de ces pixels, mais seulement des événements sur les changements de cette luminance. Ce dernier point est essentiel, car il permet de réduire énormément l'information qui est passé : ainsi une image statique ne produira aucune sortie. De façon encore plus intéressante, l'utilisation de ces caméras induit un changement de paradigme.

À la différence d'une caméra classique, qui va traiter des images de façon séquentielle par exemple à 30 images par seconde, ce type de caméra envoie des informations de façon continue. D'une part, l'information temporelle est beaucoup plus finement représentée, souvent à la microseconde, mais surtout ce sont seulement les zones intéressantes, comme les bords des objets, qui sont représentés. Ce nouveau type de représentation implique un changement de paradigme radical dans la façon de construire les algorithmes de traitement de l'image. Ce changement de paradigme est accompagné par une révolution dans la façon de construire des puces électroniques. En effet, de nouvelles technologies inspirées par le fonctionnement du cerveau permettent de construire des puces dans lequel le calcul est parallélisé à l'extrême. Ceci vient en contraste avec les plus traditionnels dont le rôle est de traiter, sur un nombre limité de processeur, l'information la plus rapidement possible.

Ce type d'ingénierie neuromorphique devrait faire émerger une révolution dans le traitement des images. En effet, l'utilisation de ces processeurs massivement parallèle est particulièrement bien adapté à ces caméras événementielles, notamment par rapport aux caméras classiques. Un caractère novateur de ses technologies est le fait qu'ils utilisent beaucoup moins d'énergie. C'est un point essentiel pour ces systèmes qui visent à être embarqués sur des véhicules autonomes ou des systèmes embarqués et à se démultiplier sur différents systèmes et répondre aux exigences de consommation, d'énergie, de ses systèmes embarqués, mais aussi à celui lié à la transition écologique.

## Que nous apporte cette compréhension?

En explorant la diversité du zoo des yeux observés dans le monde vivant, nous avons opéré sur le système visuel un chassé-croisé entre connaissances fondamentales et appliquées. Les différentes anatomies des yeux que nous avons explorées démontrent que chaque système reste adapté à son

répertoire comportemental. En particulier, nous avons vu que certaines technologies peuvent exploiter ces "inventions" au lieu de simplement affiner le modèle développé autour de l'analogie de l'appareil photo. Et si ces inventions ont parfois des complexités semblables à celle des machines qui sont créés par les mains d'un horloger, nous avons surtout vu que les yeux ont été inventés plusiers fois de façon indépendante, démontrant une nouvelle fois la richesse des systèmes émergents des mécanismes de l'évolution du vivant.

This manuscript is a template (aka "rootstock") for <u>Manubot</u>, a tool for writing scholarly manuscripts. Use this template as a starting point for your manuscript.

The rest of this document is a full list of formatting elements/features supported by Manubot. Compare the input (.md files in the /content directory) to the output you see below.

## **Basic formatting**

**Bold text** 

Semi-bold text

Centered text

Right-aligned text

Italic text

Combined italics and bold

#### Strikethrough

- 1. Ordered list item
- 2. Ordered list item
  - a. Sub-item
  - b. Sub-item
    - i. Sub-sub-item
- 3. Ordered list item
  - a. Sub-item
- List item
- · List item
- List item

subscript: H<sub>2</sub>O is a liquid

superscript: 2<sup>10</sup> is 1024.

unicode superscripts<sup>0123456789</sup>

unicode subscripts<sub>0123456789</sub>

A long paragraph of text. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in

reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

Putting each sentence on its own line has numerous benefits with regard to <u>editing</u> and <u>version</u> <u>control</u>.

Line break without starting a new paragraph by putting two spaces at end of line.

## **Document organization**

Document section headings:

# **Heading 1**

## **Heading 2**

**Heading 3** 

**Heading 4** 

**Heading 5** 

**Heading 6** 



#### Horizontal rule:

Heading 1's are recommended to be reserved for the title of the manuscript.

Heading 2's are recommended for broad sections such as Abstract, Methods, Conclusion, etc.

Heading 3's and Heading 4's are recommended for sub-sections.

#### Links

Bare URL link: https://manubot.org

<u>Long link with lots of words and stuff and junk and bleep and blah and stuff and other stuff and more stuff yeah</u>

Link with text

Link with hover text

Link by reference

#### **Citations**

Citation by DOI [1].

Citation by PubMed Central ID [2].

Citation by PubMed ID [3].

Citation by Wikidata ID [4].

Citation by ISBN [5].

Citation by URL [6].

Citation by alias [7].

Multiple citations can be put inside the same set of brackets [1,5,7]. Manubot plugins provide easier, more convenient visualization of and navigation between citations [2,3,7,8].

Citation tags (i.e. aliases) can be defined in their own paragraphs using Markdown's reference link syntax:

## Referencing figures, tables, equations

Figure 1

Figure 2

```
Figure 3

Figure 4

Table 1

Equation 1

Equation 2
```

## **Quotes and code**

Quoted text

Quoted block of text

Two roads diverged in a wood, and I—I took the one less traveled by, And that has made all the difference.

Code in the middle of normal text, aka inline code.

Code block with Python syntax highlighting:

```
from manubot.cite.doi import expand_short_doi

def test_expand_short_doi():
    doi = expand_short_doi("10/c3bp")
    # a string too long to fit within page:
    assert doi == "10.25313/2524-2695-2018-3-vliyanie-enhansera-copia-i-
        insulyatora-gypsy-na-sintez-ernk-modifikatsii-hromatina-i-
        svyazyvanie-insulyatornyh-belkov-vtransfetsirovannyh-geneticheskih-
        konstruktsiyah"
```

Code block with no syntax highlighting:

```
Exporting HTML manuscript
Exporting DOCX manuscript
Exporting PDF manuscript
```

## **Figures**



**Figure 1:** A square image at actual size and with a bottom caption. Loaded from the latest version of image on GitHub.



**Figure 2:** An image too wide to fit within page at full size. Loaded from a specific (hashed) version of the image on GitHub.



Figure 3: A tall image with a specified height. Loaded from a specific (hashed) version of the image on GitHub.



**Figure 4:** A vector .svg image loaded from GitHub. The parameter sanitize=true is necessary to properly load SVGs hosted via GitHub URLs. White background specified to serve as a backdrop for transparent sections of the image.

## **Tables**

**Table 1:** A table with a top caption and specified relative column widths.

Bowling Scores	Jane	John	Alice	Bob
Game 1	150	187	210	105
Game 2	98	202	197	102
Game 3	123	180	238	134

**Table 2:** A table too wide to fit within page.

	Digits 1-33	Digits 34-66	Digits 67-99	Ref.
pi	3.14159265358979323 846264338327950	28841971693993751 0582097494459230	78164062862089986 2803482534211706	piday.org
е	2.71828182845904523 536028747135266	24977572470936999 5957496696762772	40766303535475945 7138217852516642	nasa.gov

**Table 3:** A table with merged cells using the attributes plugin.

	Colors		
Size	Text Color	Background Color	
big	blue	orange	
small	black	white	

## **Equations**

A LaTeX equation:

$$\int_0^\infty e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \tag{1}$$

An equation too long to fit within page:

$$x = a + b + c + d + e + f + g + h + i + j + k + l + m + n + o + p + q + r + s + t + u + v + w + x + y + z + 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9$$
(2)

## **Special**

▲ WARNING The following features are only supported and intended for .html and .pdf exports. Journals are not likely to support them, and they may not display correctly when converted to other formats such as .docx.

LINK STYLED AS A BUTTON

Adding arbitrary HTML attributes to an element using Pandoc's attribute syntax:

Manubot Manubot Manubot Manubot Manubot. Manubot Manubot Manubot Manubot. Manubot Manubot Manubot. Manubot Manubot. Manubot.

Adding arbitrary HTML attributes to an element with the Manubot attributes plugin (more flexible than Pandoc's method in terms of which elements you can add attributes to):

Manubot Manubot.

Available background colors for text, images, code, banners, etc:

white lightgrey grey darkgrey black lightred lightyellow lightgreen lightblue lightpurple red orange yellow green blue purple

Using the Font Awesome icon set:



Light Grey Banner
useful for general information - manubot.org

## **1** Blue Banner

useful for important information - manubot.org

**♦ Light Red Banner** useful for *warnings* - <u>manubot.org</u>

## References

#### 1. Sci-Hub provides access to nearly all scholarly literature

Daniel S Himmelstein, Ariel Rodriguez Romero, Jacob G Levernier, Thomas Anthony Munro, Stephen Reid McLaughlin, Bastian Greshake Tzovaras, Casey S Greene *eLife* (2018-03-01) <a href="https://doi.org/ckcj">https://doi.org/ckcj</a>

DOI: 10.7554/elife.32822 · PMID: 29424689 · PMCID: PMC5832410

#### 2. Reproducibility of computational workflows is automated using continuous analysis

Brett K Beaulieu-Jones, Casey S Greene

Nature biotechnology (2017-04) <a href="https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6103790/">https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6103790/</a>

DOI: <u>10.1038/nbt.3780</u> · PMID: <u>28288103</u> · PMCID: <u>PMC6103790</u>

#### 3. **Bitcoin for the biological literature.**

Douglas Heaven

Nature (2019-02) https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30718888

DOI: 10.1038/d41586-019-00447-9 · PMID: 30718888

# 4. Plan S: Accelerating the transition to full and immediate Open Access to scientific publications

cOAlition S

(2018-09-04) https://www.wikidata.org/wiki/Q56458321

#### 5. **Open access**

Peter Suber

MIT Press (2012)

ISBN: 9780262517638

#### 6. Open collaborative writing with Manubot

Daniel S Himmelstein, Vincent Rubinetti, David R Slochower, Dongbo Hu, Venkat S Malladi, Casey S Greene, Anthony Gitter

Manubot (2020-05-25) https://greenelab.github.io/meta-review/

#### 7. Opportunities and obstacles for deep learning in biology and medicine

Travers Ching, Daniel S Himmelstein, Brett K Beaulieu-Jones, Alexandr A Kalinin, Brian T Do, Gregory P Way, Enrico Ferrero, Paul-Michael Agapow, Michael Zietz, Michael M Hoffman, ... Casey S Greene

Journal of The Royal Society Interface (2018-04) <a href="https://doi.org/gddkhn">https://doi.org/gddkhn</a>

DOI: <u>10.1098/rsif.2017.0387</u> · PMID: <u>29618526</u> · PMCID: <u>PMC5938574</u>

#### 8. Open collaborative writing with Manubot

Daniel S Himmelstein, Vincent Rubinetti, David R Slochower, Dongbo Hu, Venkat S Malladi, Casey S Greene, Anthony Gitter

PLOS Computational Biology (2019-06-24) https://doi.org/c7np

DOI: 10.1371/journal.pcbi.1007128 · PMID: 31233491 · PMCID: PMC6611653