



# **Podstawy fizyki transportu w układach biologicznych**

**2023/2024**

**Wykład 1**

**Maciej Lisicki, Wydział Fizyki UW**

# Zasady zaliczania

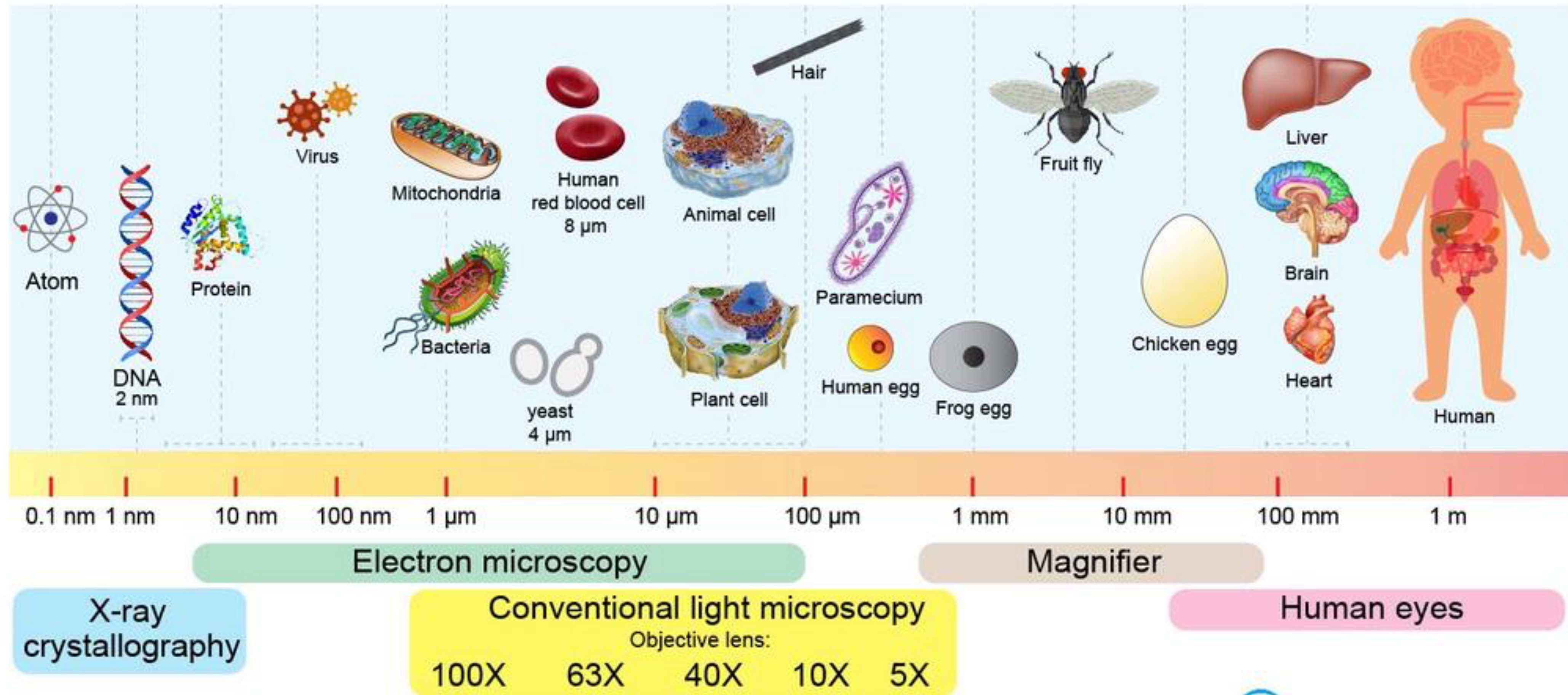
- Obecność na zajęciach (uwaga, nieregularnie)  $\Rightarrow$  lista
- 3-5 krótkich (15 min.) testów na zajęciach  $\Rightarrow$  propozycja oceny
- Slajdy będą udostępniane / strona kursu (wkrótce)

# Transport, czyli co?

- Wstępik fizyczny
- Transport **molekularny**
- Transport **przez błony biologiczne**
- Transport **płynów**
- Transport **sygnałów**
- Transport **energii**
- Transport **mikroorganizmów**

# THE LENGTH SCALE OF BIOLOGY

from atoms, DNA, proteins, viruses, bacteria, mitochondria, animal and plant cells, single-celled organisms, fruit fly, organs, to our bodies



# Duże i małe

## Porównanie proporcji





$$\frac{h}{d} \approx 15$$

Wieża TV, Tallinn

# Smukła wieża

$$\frac{h}{d} \approx 200$$

Trzcina pospolita

Skąd taka duża różnica?



# Szybki owad

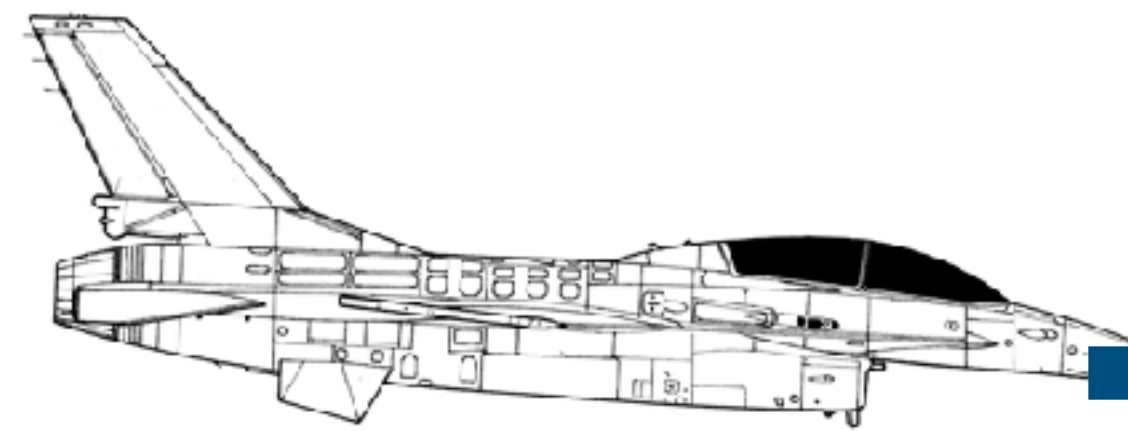


Bzyg



$V \approx 10 \text{ m/s}$

$L \approx 1 \text{ cm}$



$V \approx 10 \text{ km/s?}$

$L \approx 10 \text{ m}$

# Proste porównanie proporcji nie wystarcza!



Dlaczego nartnik może biegać po wodzie, a my nie?



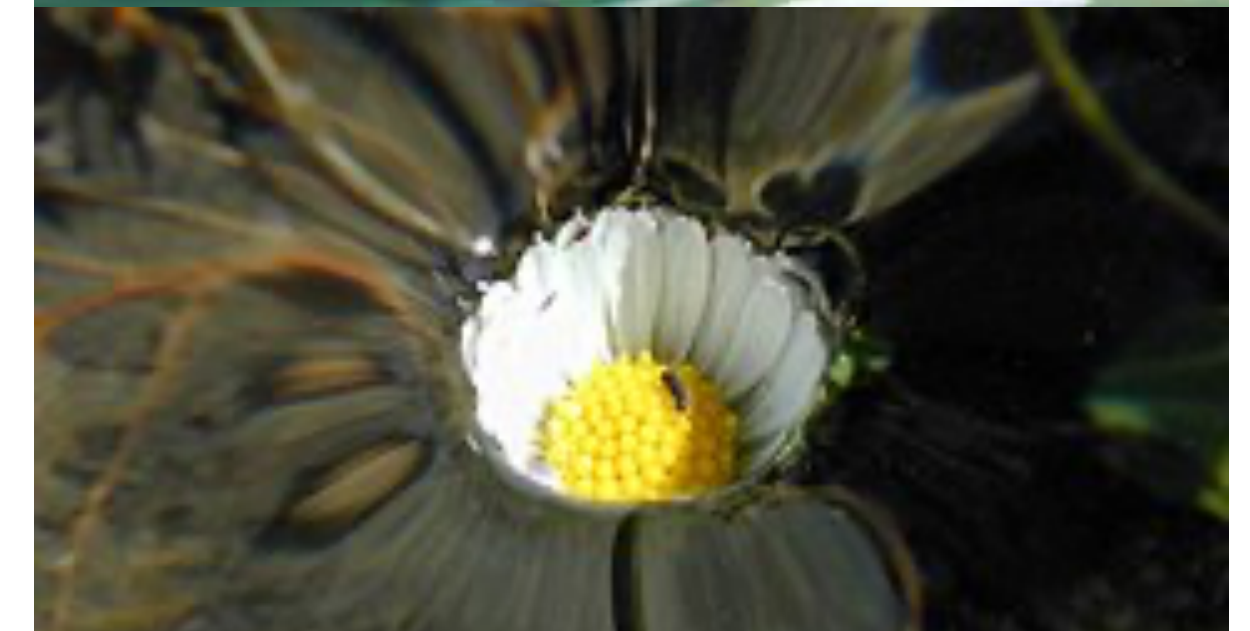
# Napięcie powierzchniowe

Ważymy za dużo, a napięcie powierzchniowe wody jest za małe

Własności materiału nie zależą od wielkości obiektu.

Czyli ważymy za dużo... – powierzchnia jest zbyt obciążona.

**Istnieje systematyczne podejście matematyczne do porównywania organizmów o różnych wielkościach.**



# Skalowanie

## Teoria podobieństw



Rozmiar

$L$

Pole powierzchni

$S$

Objętość

$V$



$3L$

$9S$

$27V$

# Skalowanie

## Teoria podobieństw

Rozmiar	$L$
Pole powierzchni	$S \sim L^2$
Objętość	$V \sim L^3$



Jakie ziemniaki obiera się szybciej? Małe czy duże? (1 kg)

$$\frac{\text{czas obierania}}{\text{ciężar}} \sim \frac{\text{powierzchnia}}{\text{objętość}} \sim \frac{L^2}{L^3} \sim \frac{1}{L}$$

Dwukrotnie większe ziemniaki obiera się dwa razy szybciej.

**Co to ma do nartników?**

# Nartnik

Powierzchnia "stóp" owada  $\sim L^2$

Obciążenie powierzchni = masa na jednostkę powierzchni

$$\text{obciążenie powierzchni} = \frac{\text{ciężar ciała}}{\text{powierzchnia stóp}} \sim \frac{L^3}{L^2} \sim L$$



Człowiek (200x większy od nartnika) mógłby biegać po wodzie o 200x większym napięciu powierzchniowym (albo chodzić na ogromnych i niebywale lekkich nartach wodnych).

Ogromne nartniki również mają trudniej.

# Rozmiary obiektów biologicznych nie mogą być dowolne!

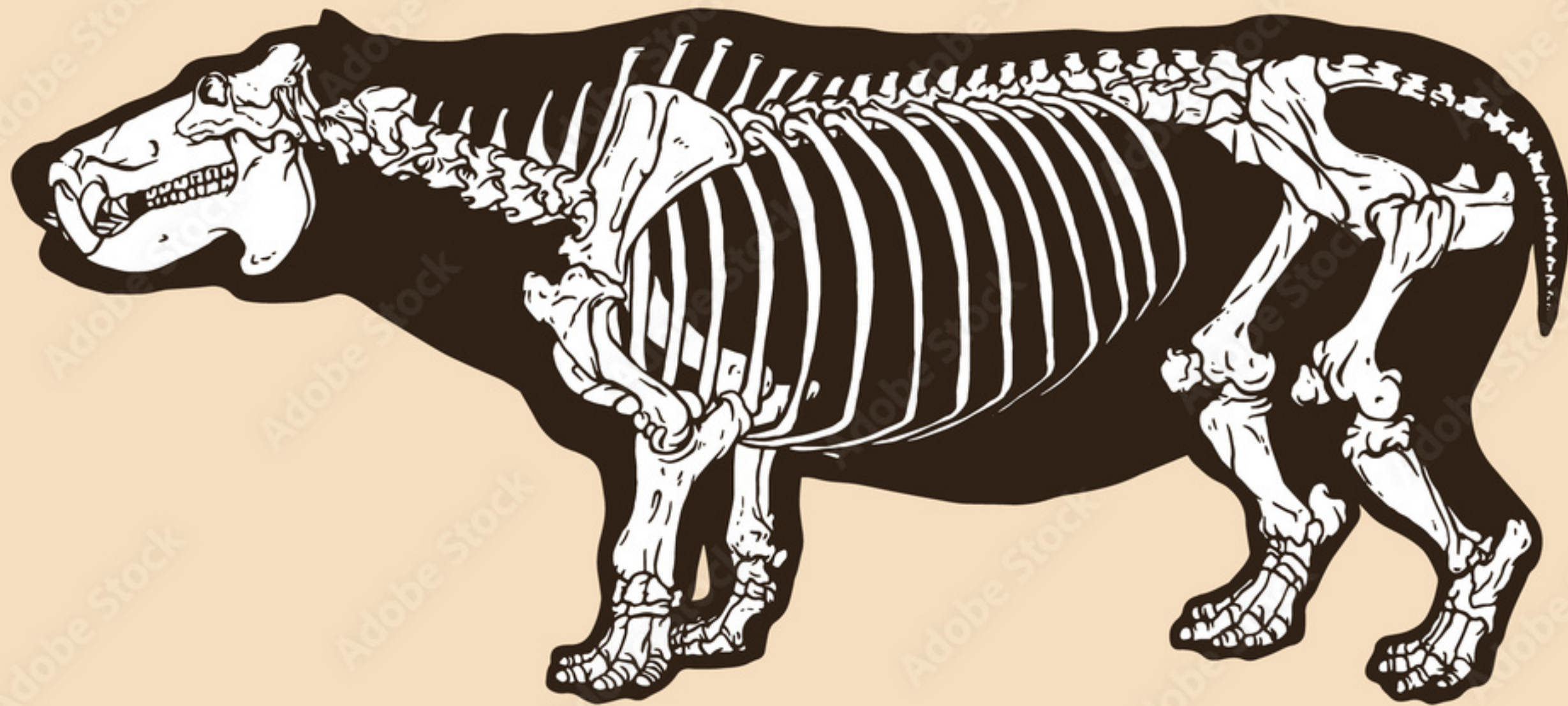
Kości i mięśnie mają określoną wytrzymałość, zależną od materiału, z którego są zbudowane.

Sztucznie powiększona mysz załamałaby się pod własnym ciężarem (obciążenie powierzchni kości)!



# Wytrzymałość kości

Kości i mięśnie mają określoną wytrzymałość, zależną od materiału, z którego są zbudowane.



**Hipopotam**



**Myszojeleń**

# Kangur vs. pchła

## Biomechanika skoku

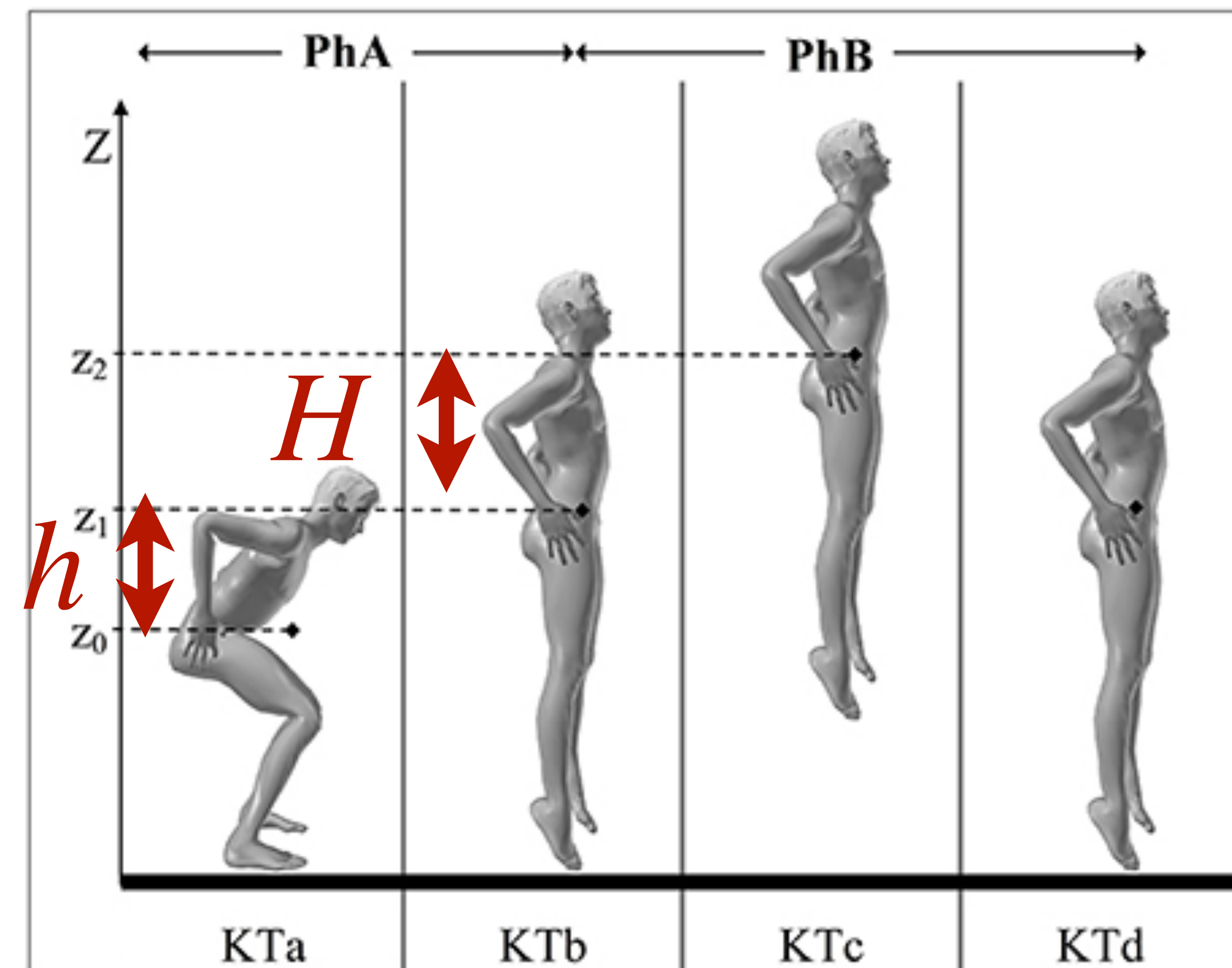
$$\text{praca nóg} = F \cdot h$$

praca nóg  $\rightarrow$  energia kinetyczna

energia kinetyczna  $\rightarrow$  energia potencjalna

$$\text{energia potencjalna} = Mg \cdot H$$

$$H = \frac{\text{siła nóg } F}{\text{ciężar } Mg} \cdot h$$



siła nóg  $\sim$  pole przekroju mięśni  $\sim L^2$

wysokość  $h \sim L$

ciężar  $\sim L^3$

# Kangur vs. pchła

## Biomechanika skoku

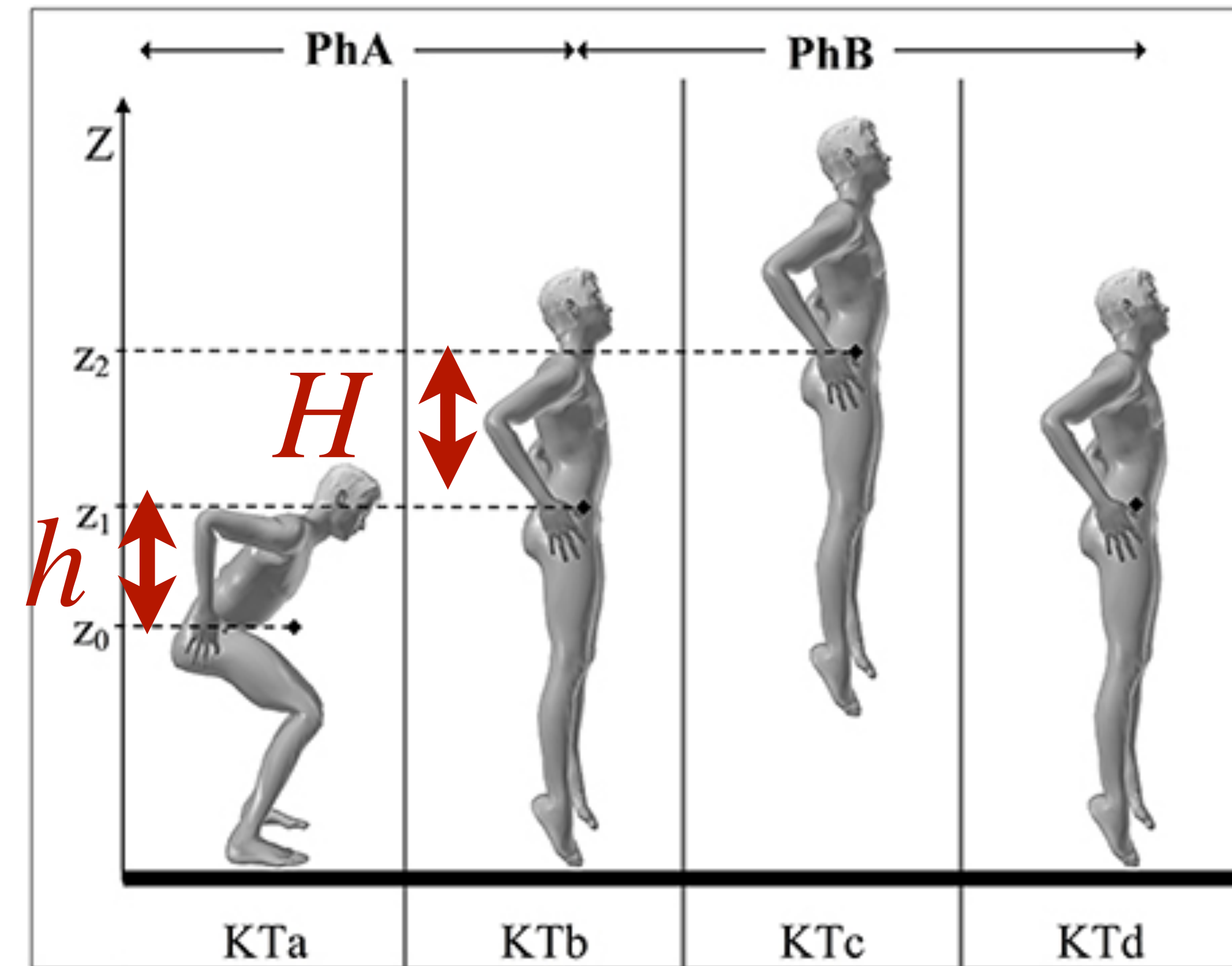
praca nóg =  $F \cdot h$

praca nóg → energia kinetyczna

energia kinetyczna → energia potencjalna

energia potencjalna =  $Mg \cdot H$

$$H = \frac{\text{siła nóg } F}{\text{ciężar } Mg} \cdot h \sim \frac{L^2 \cdot L}{L^3} = 1$$



siła nóg  $\sim$  pole przekroju mięśni  $\sim L^2$

wysokość  $h \sim L$

ciężar  $\sim L^3$

Wysokość skoku podobnych konstrukcyjnie zwierząt nie zależy od wielkości!



# Ciepło – zimno

## Termoregulacja



Ryjówka aksamitna



Słoń afrykański

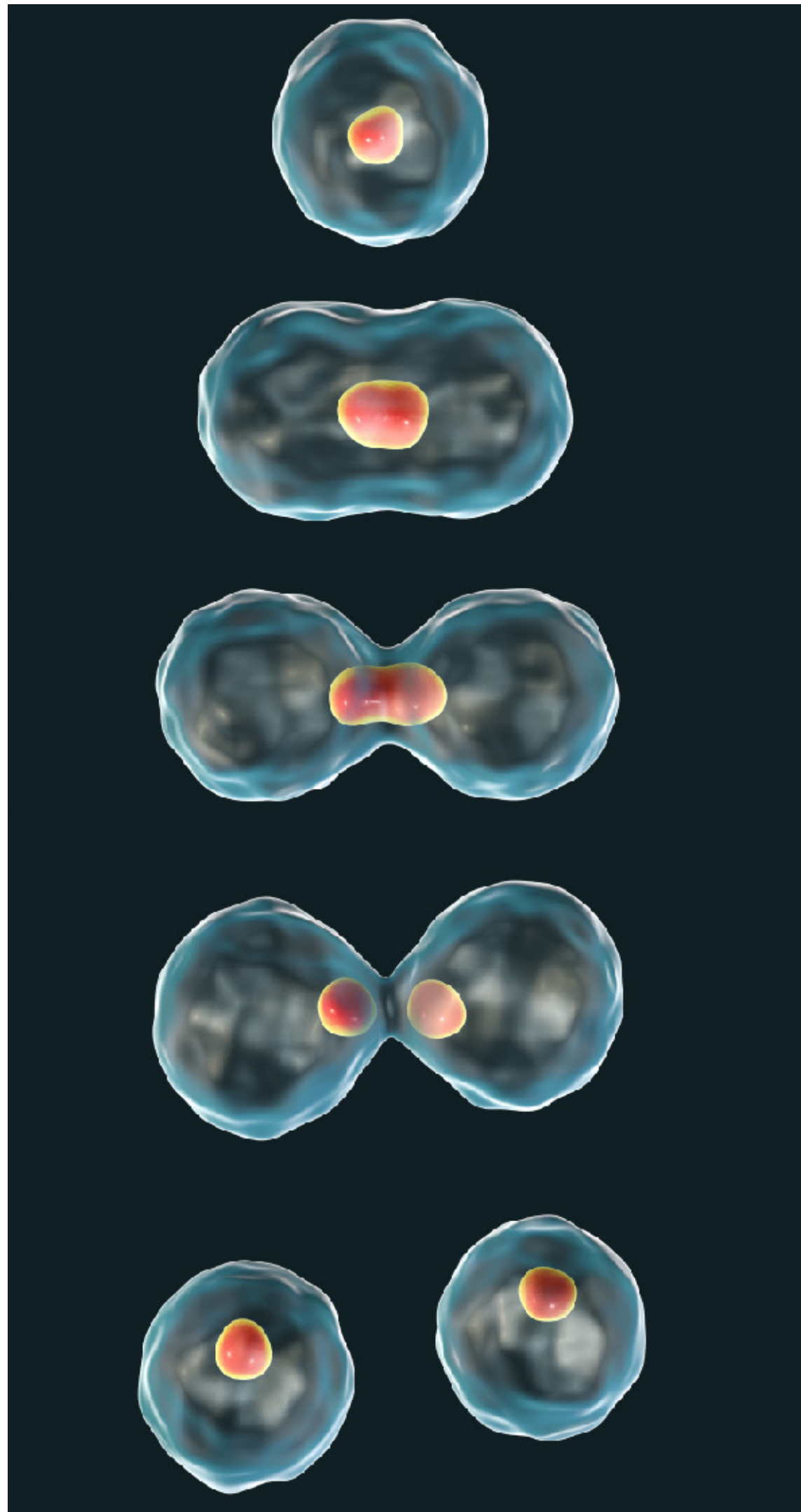
$$\frac{\text{utrata ciepła}}{\text{metaboliczna produkcja energii}} \sim$$
$$\sim \frac{\text{powierzchnia}}{\text{objętość}} \sim \frac{L^2}{L^3} \sim \frac{1}{L}$$

Im mniejszy organizm, tym szybciej ubywa energii.

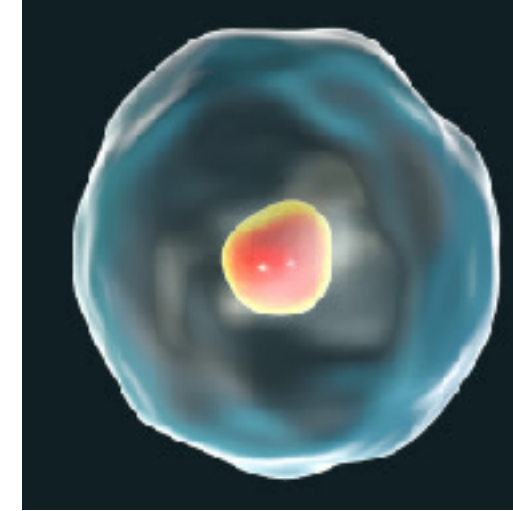
Ryjówka (masa ok. 2g) musi jeść prawie bez przerwy.

# Podział żywych komórek

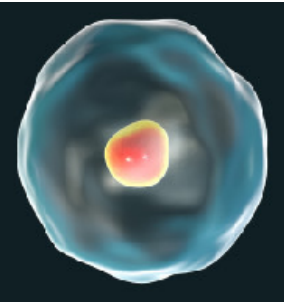
Dlaczego komórki dzielą się po osiągnięciu określonych rozmiarów?



Starsza, większa komórka



Młodsza, mniejsza komórka



ilość materiału metabolicznego  $\sim L^3$

☞ zapotrzebowanie na tlen /min.  $\sim L^3$

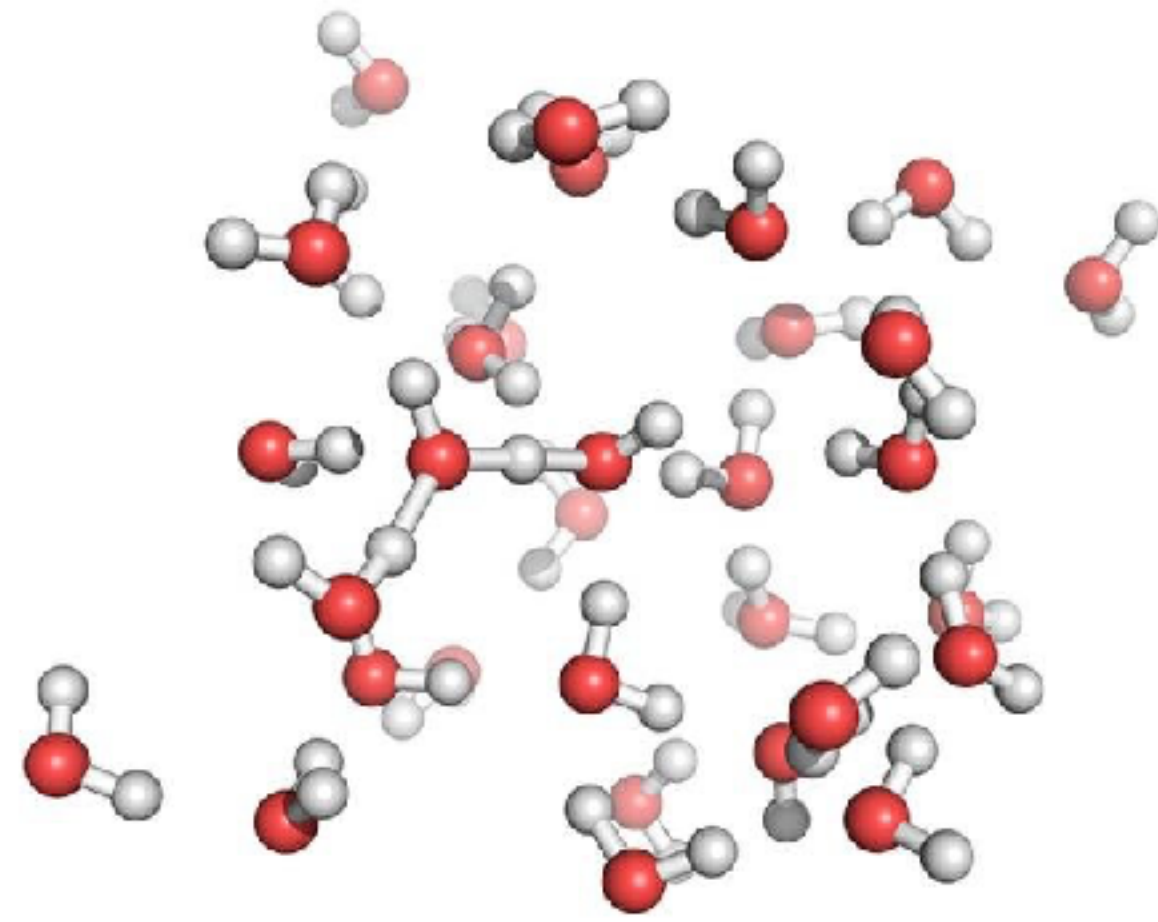
ilość tlenu pobranego przez powierzchnię komórki  $\sim L^2$

**Żywotność komórki  $\dot{Z}$**

$$\dot{Z} = \frac{\text{max. ilość tlenu pobranego przez komórkę}}{\text{zapotrzebowanie na tlen}} \sim \frac{1}{L}$$

Zbyt duże komórki muszą się podzielić

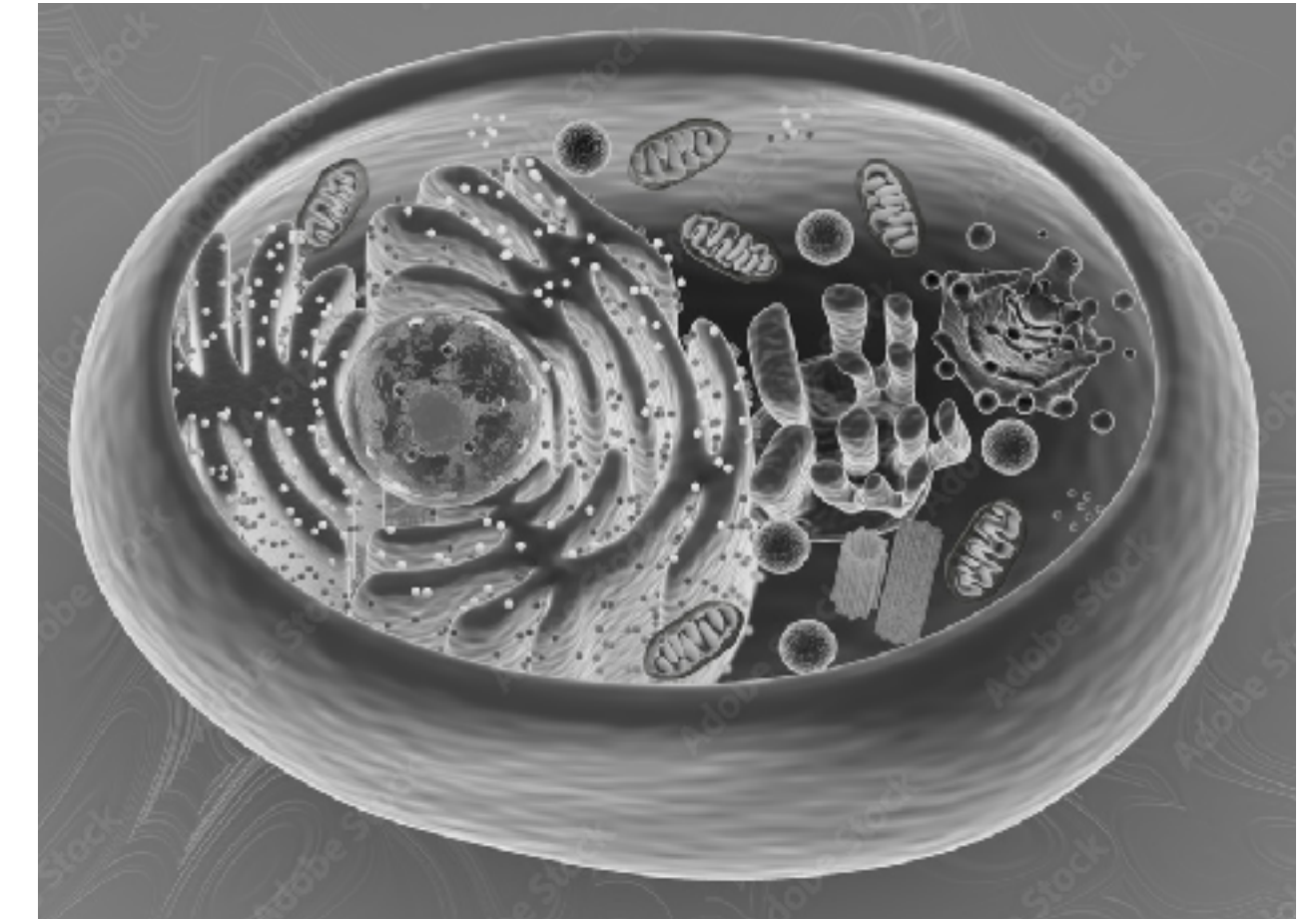
# Procesy transportu w różnych skalach



Poziom molekularny (nm)



Poziom subkomórkowy (nm)



Poziom komórkowy (um)



Mikroorganizmy (um/mm)

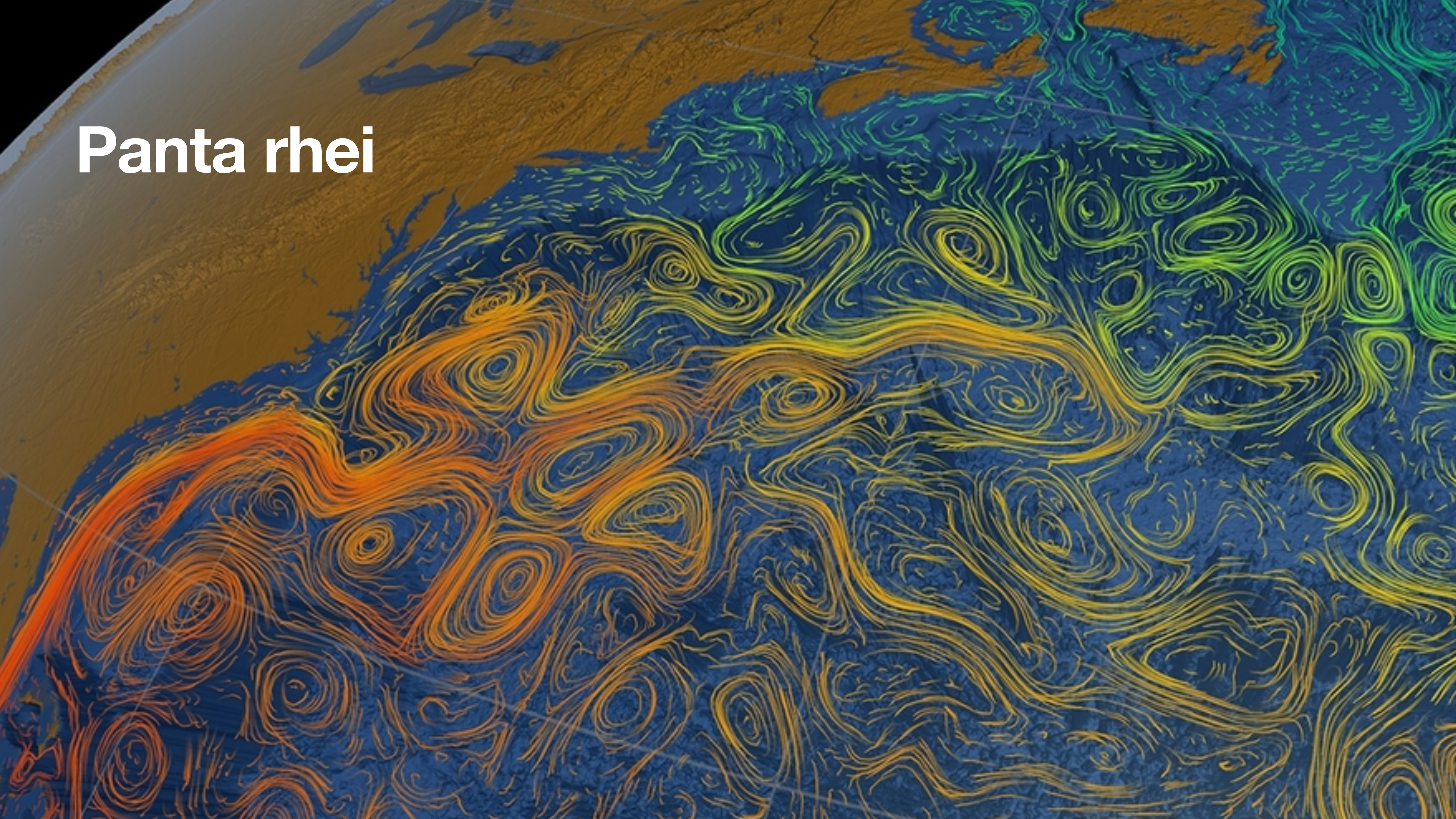


Poziom tkanek/organów (mm/cm)



Poziom organizmów (m)

**Panta rhei**



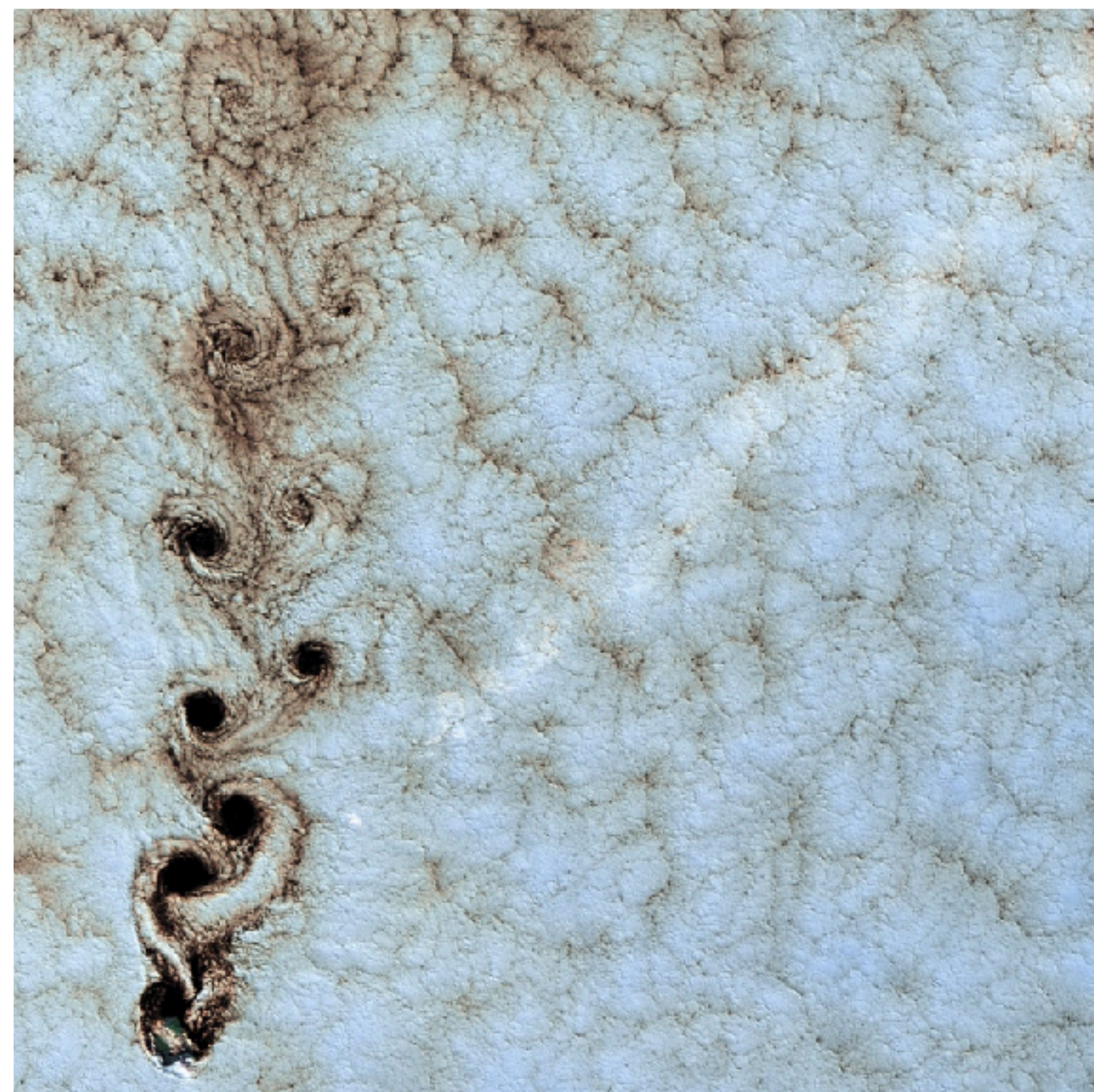
# Podobieństwo przepływów



Helena Valley, Montana. Foto: USRA

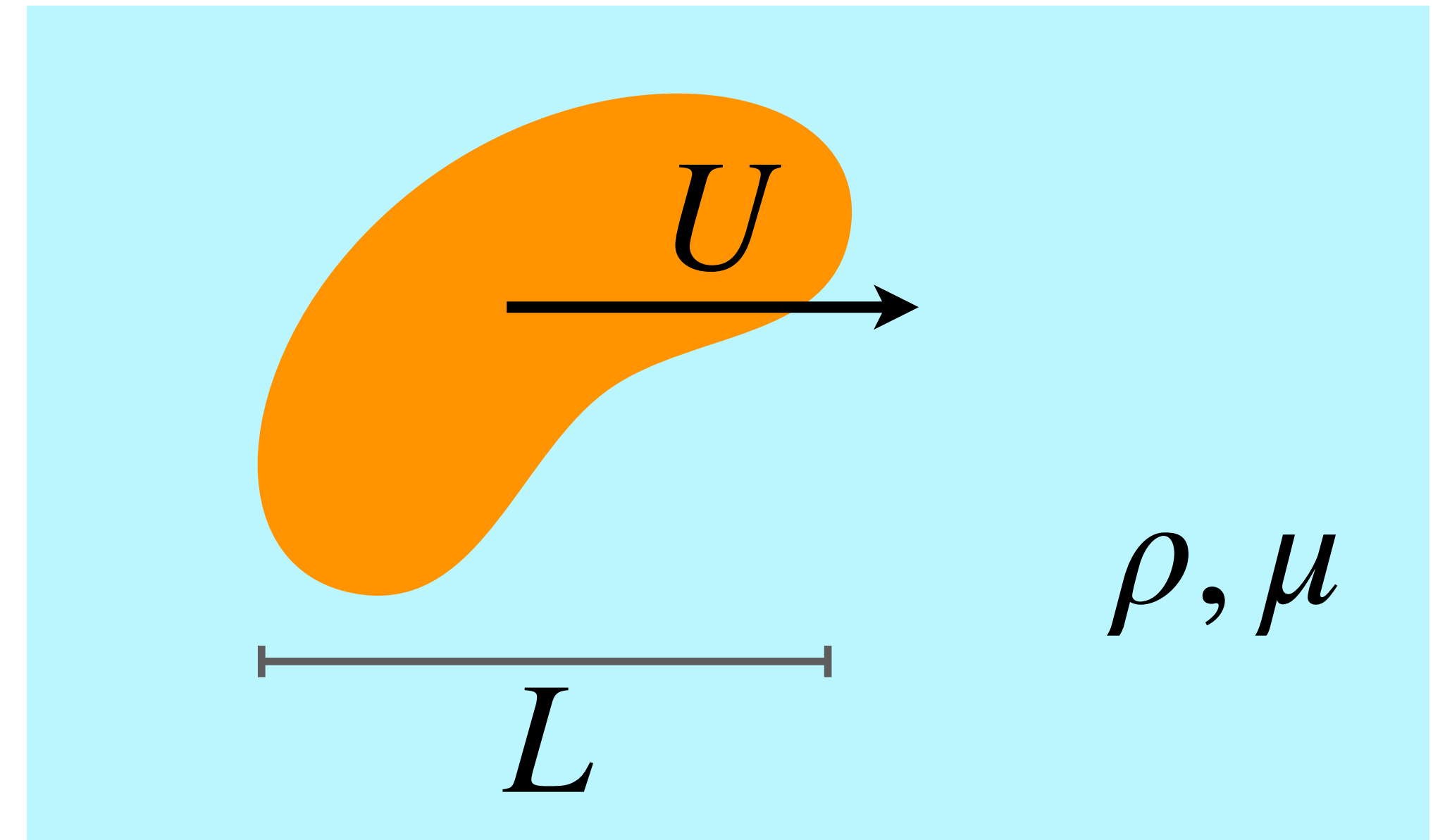


NASA



# Liczba Reynoldsa – *one number to rule them all*

$$\text{Re} = \frac{\text{siły bezwładności}}{\text{siły lepkości}} \sim \frac{\rho UL}{\mu}$$



**Skale i własności płynu określają charakter przepływu**

**Skale procesu**       $\{U, L\}$

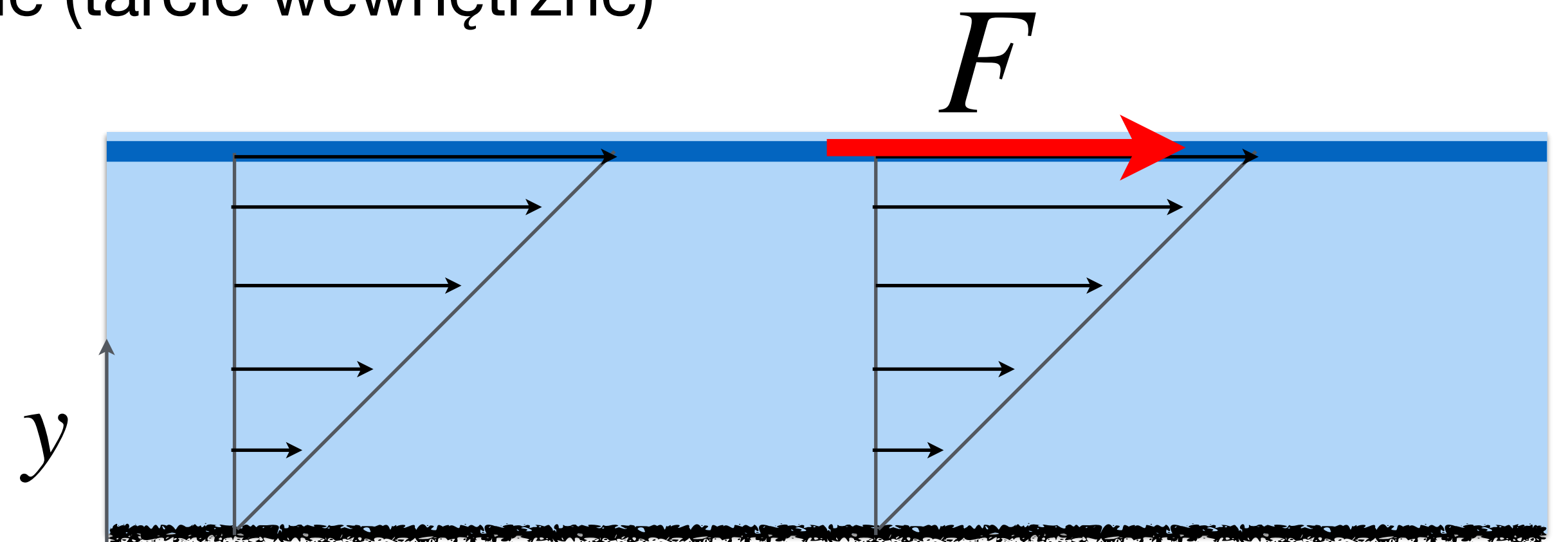
**Własności ośrodka**       $\{\rho, \mu\}$

# Lepkość?



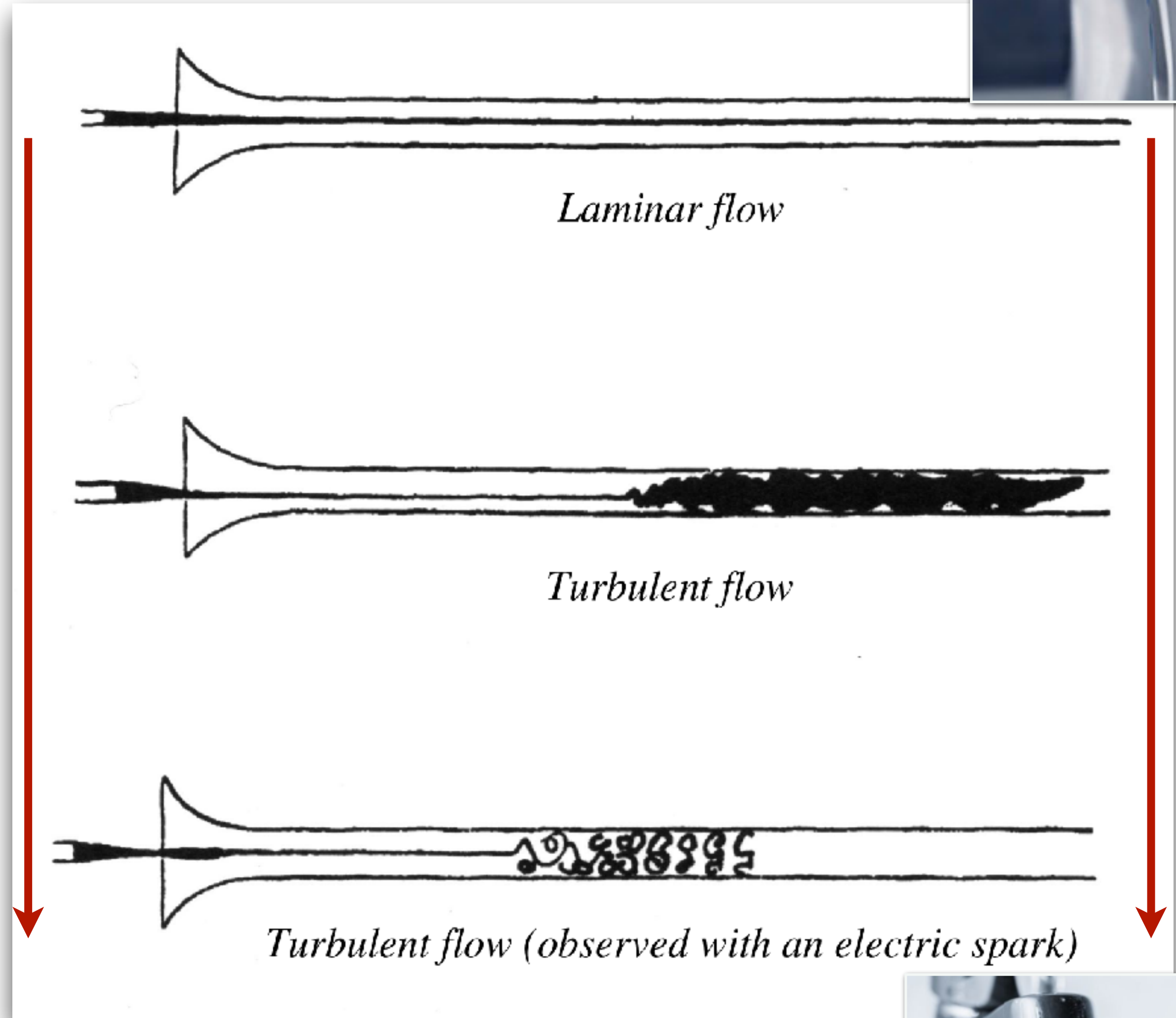
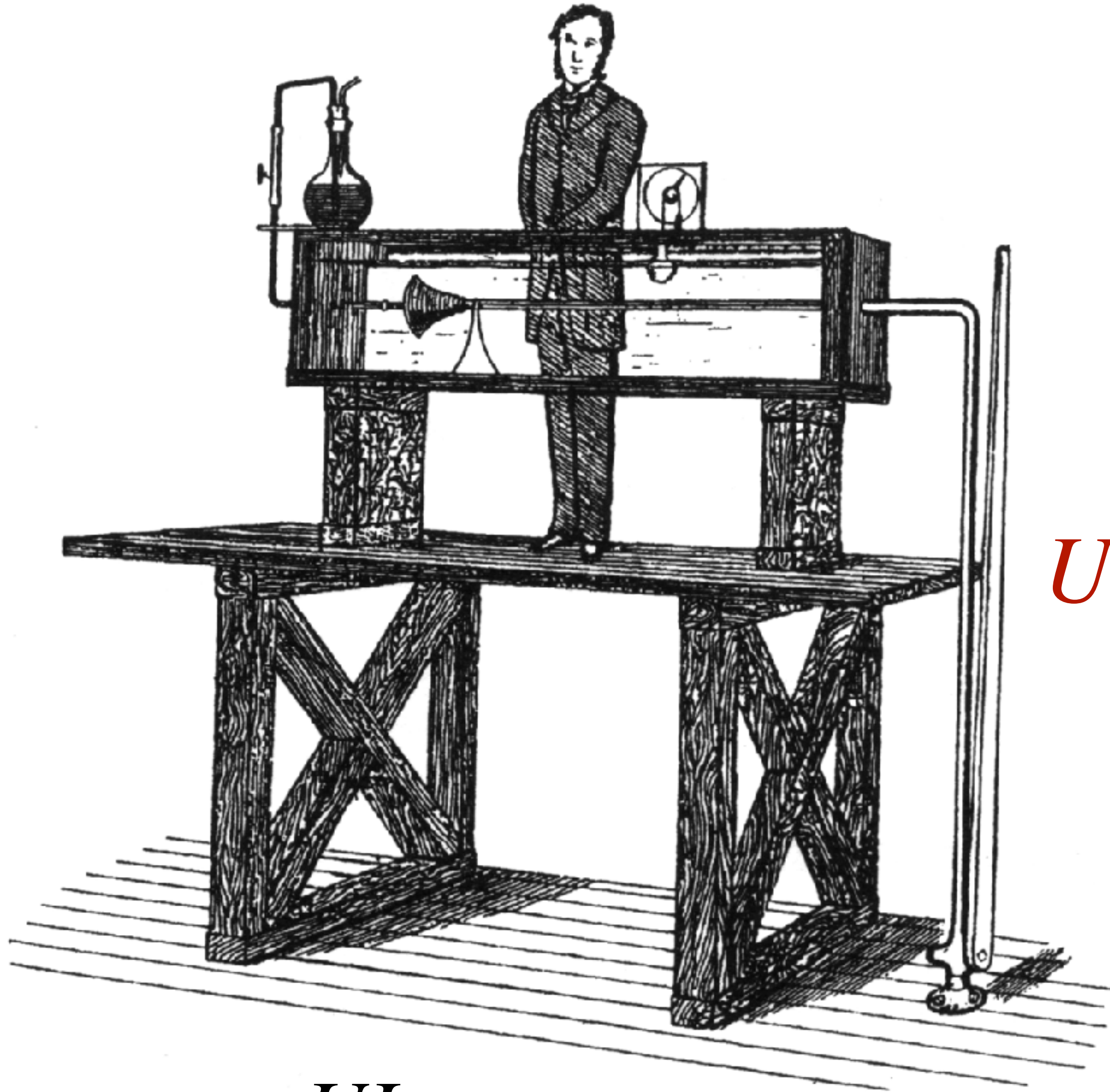
Miara oporu stawianego przez płyn przy przepływie (tarcie wewnętrzne)

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{\Delta v}{\Delta y}$$



# Eksperyment Reynoldsa

przepływ laminarny (lepkość)



Re

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

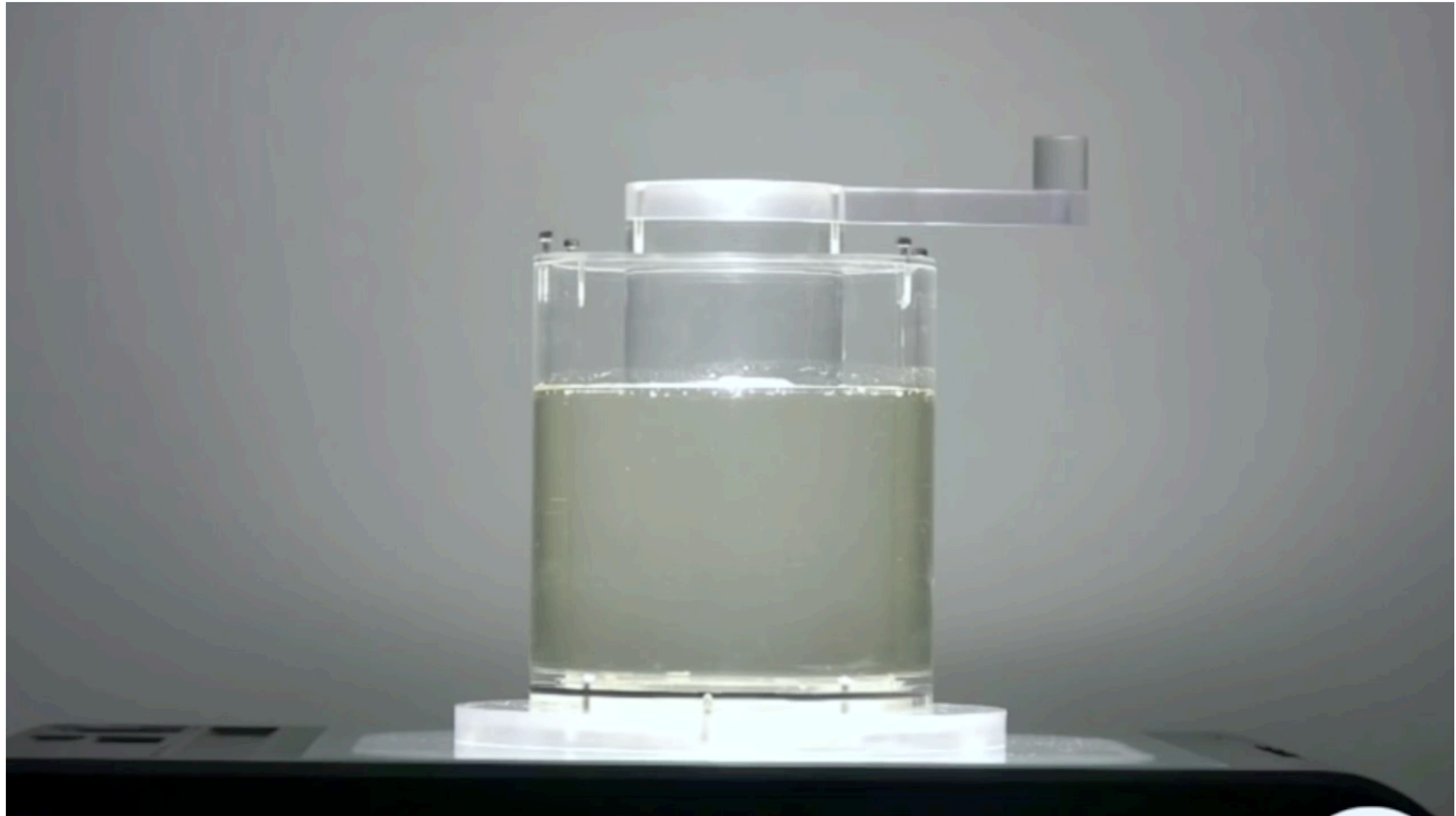
Reynolds, 1883

przepływ turbulentny  
(bezwładność)



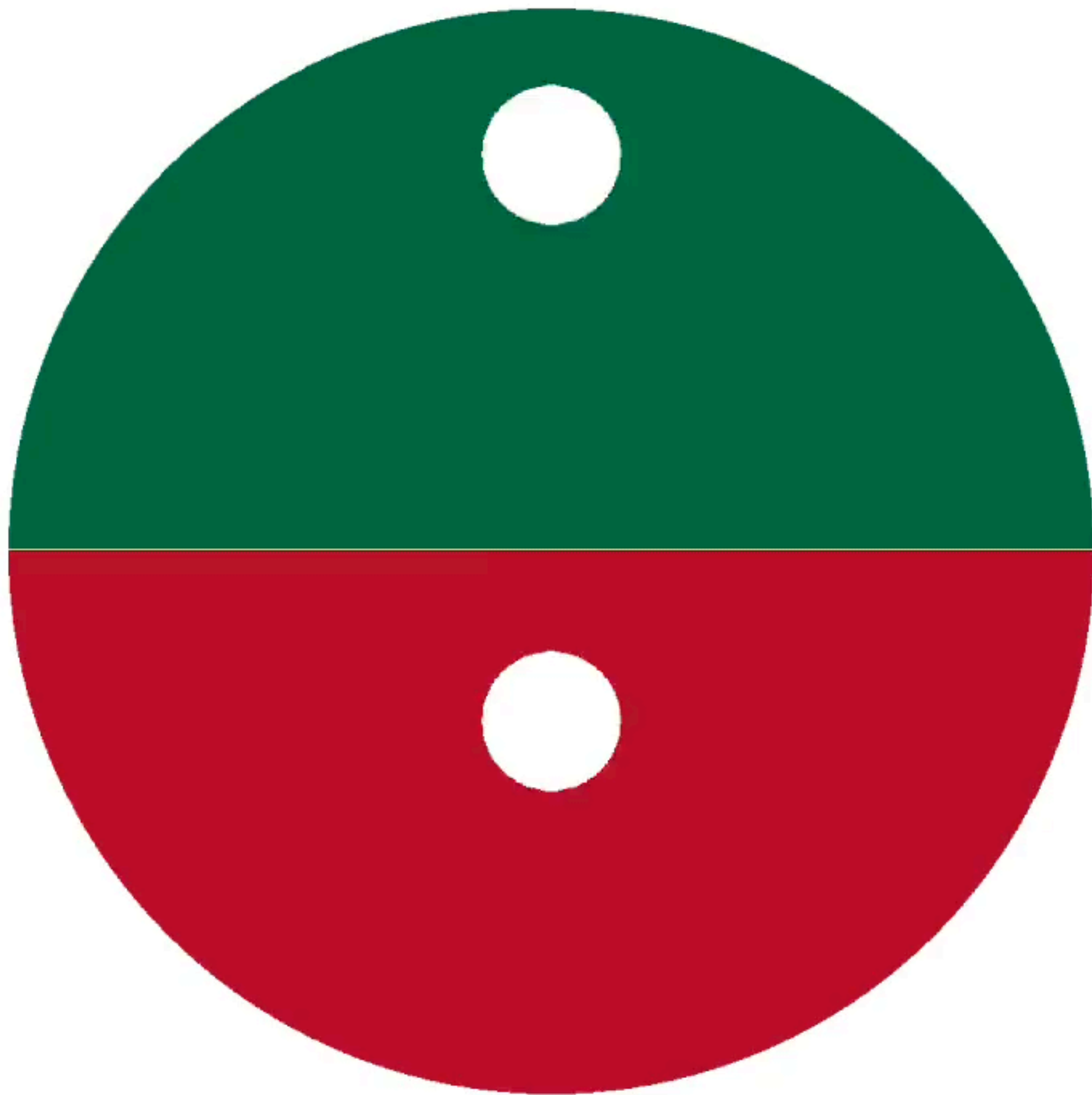


# Bardzo lepkie przepływy

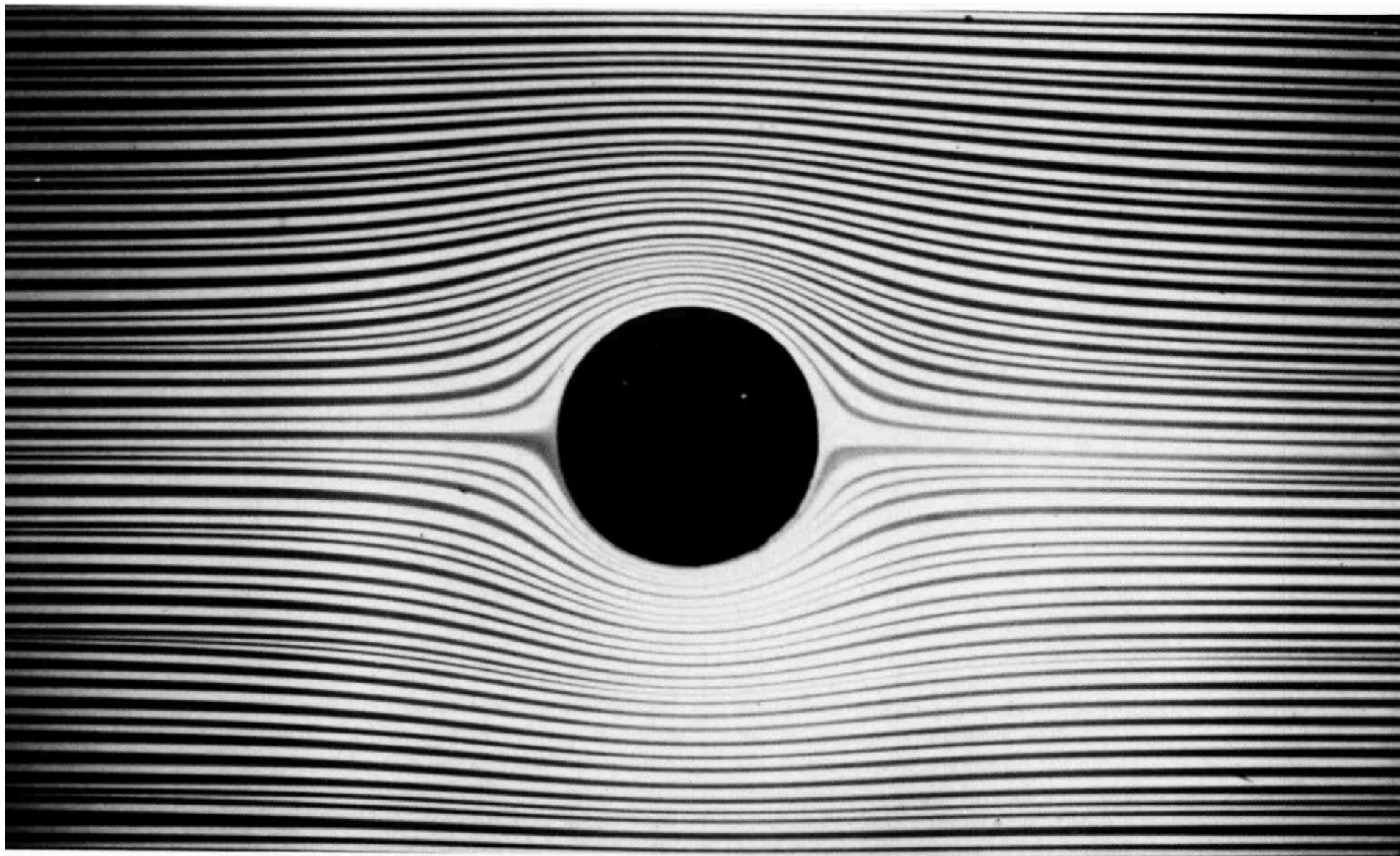


# Mieszanie herbaty

Re = 100

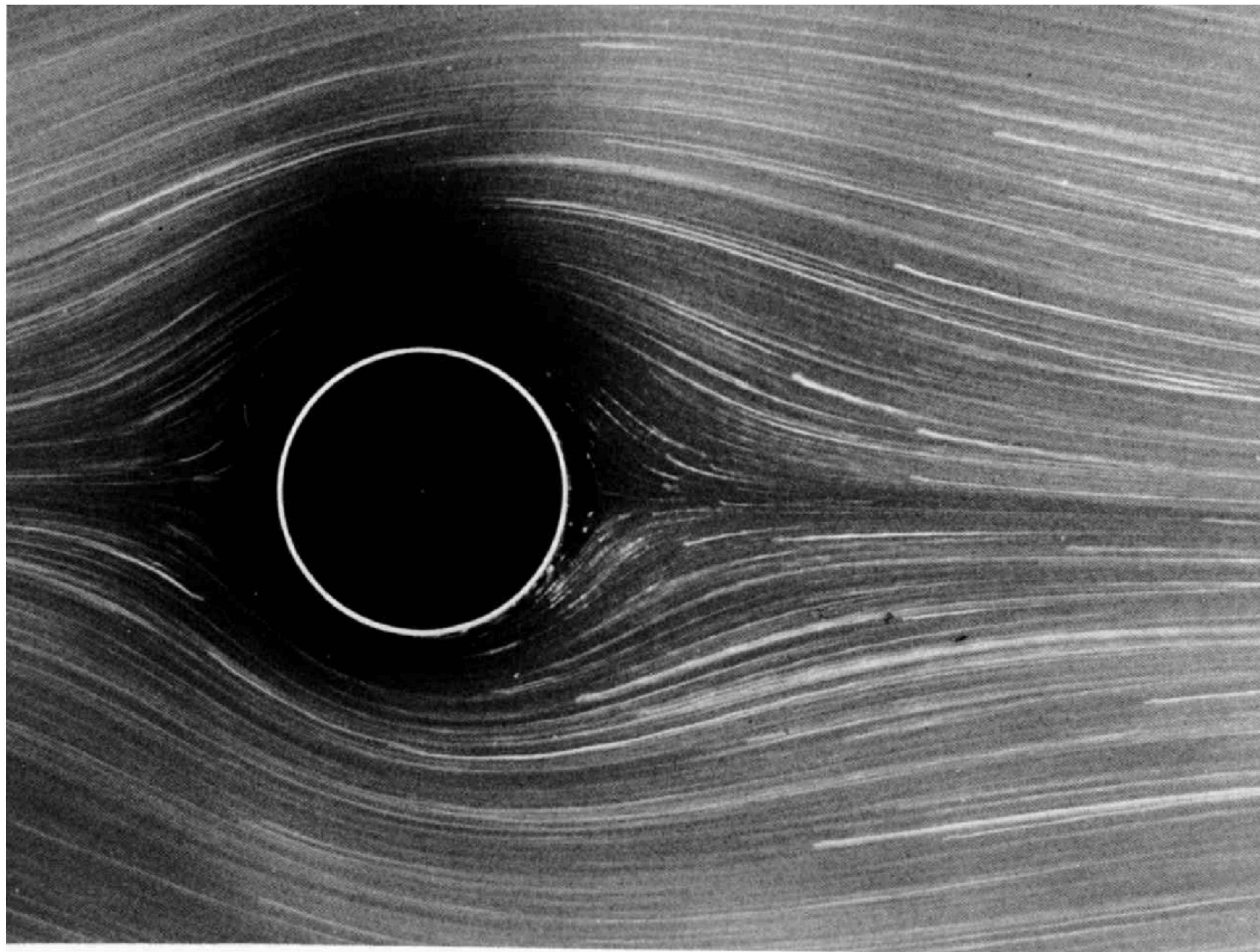


# Optyw walca



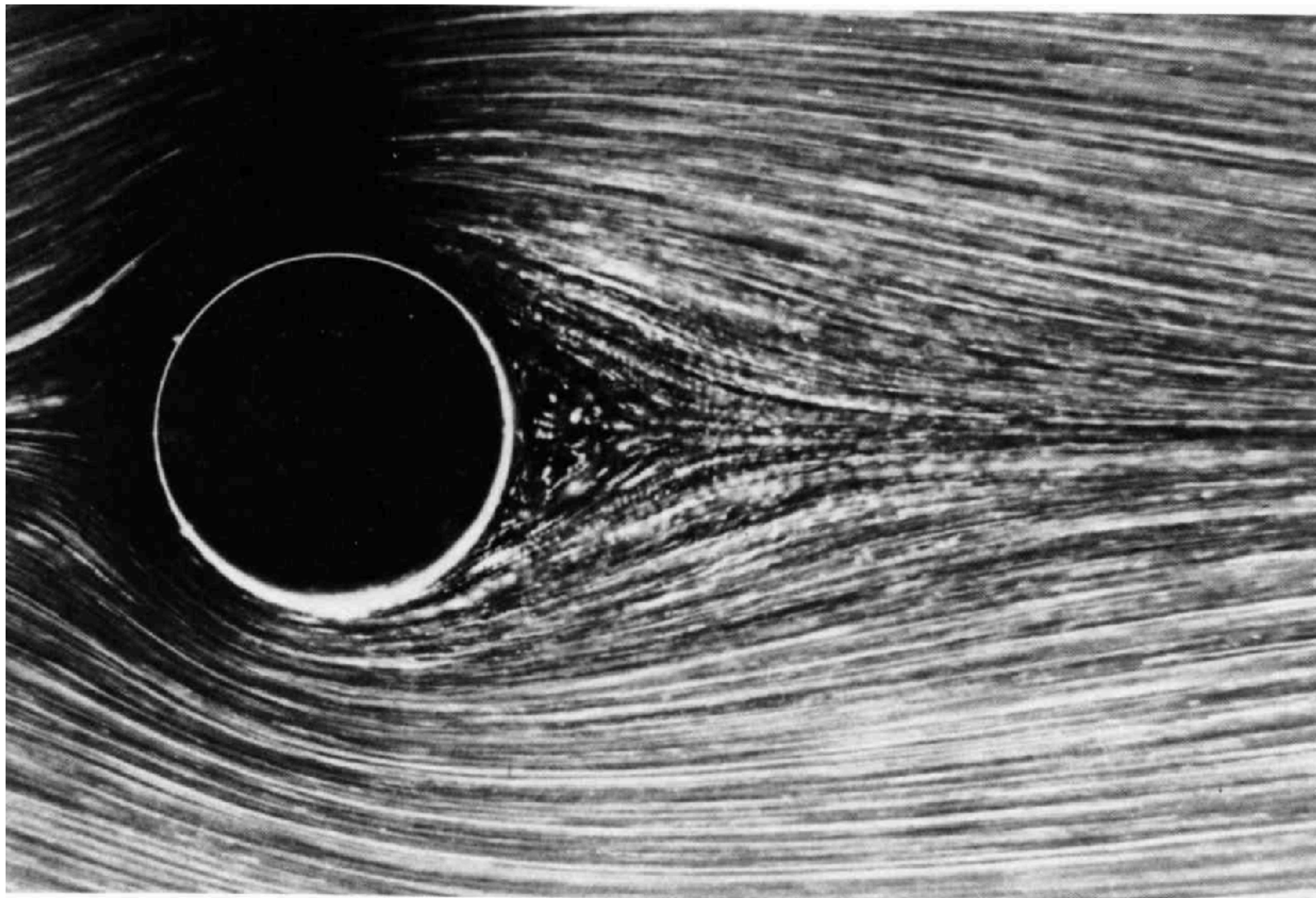
$Re \ll 1$

# Optyw walca



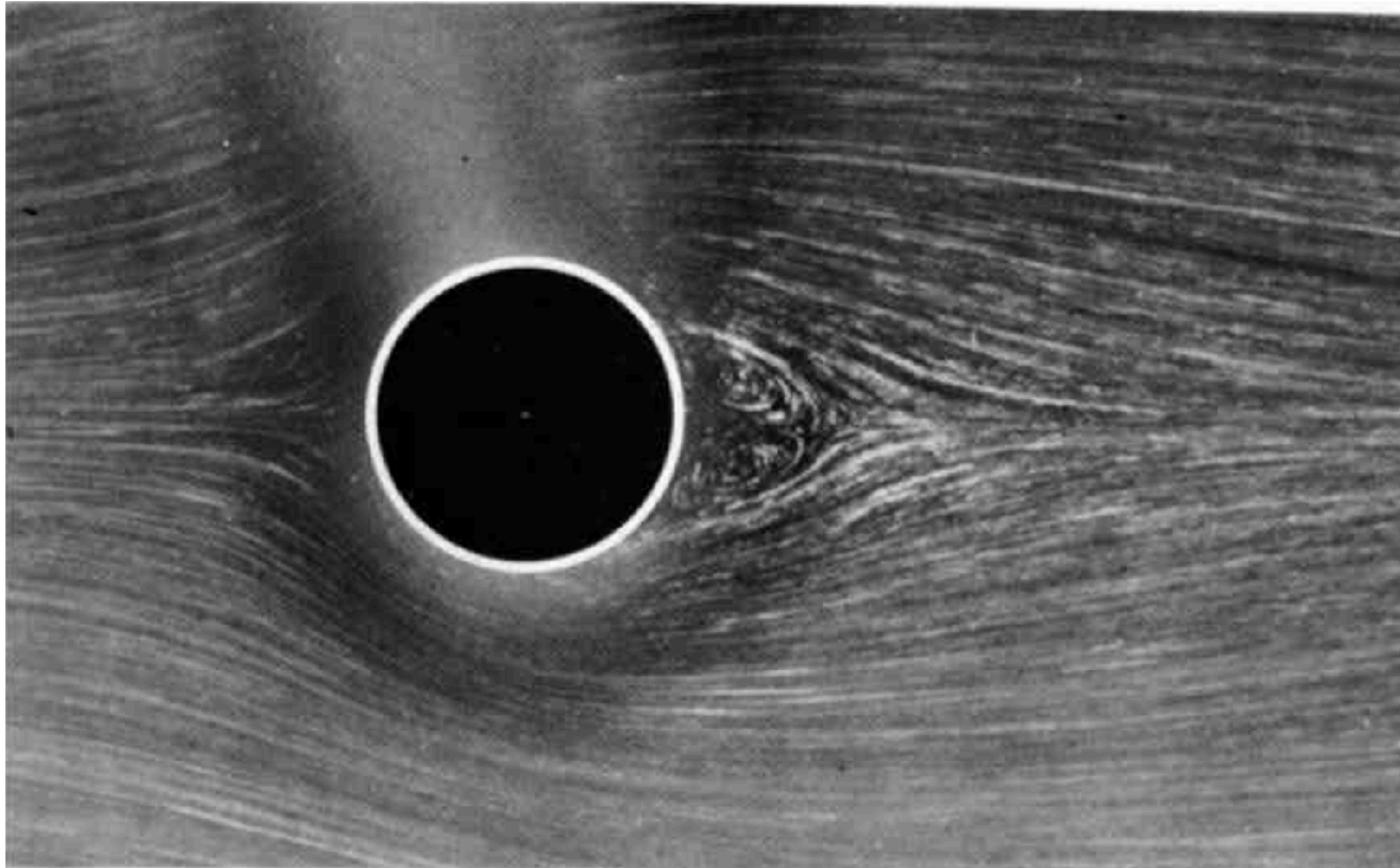
$Re = 1.54$

# Optyw walca



$Re = 9.6$

# Optyw walca



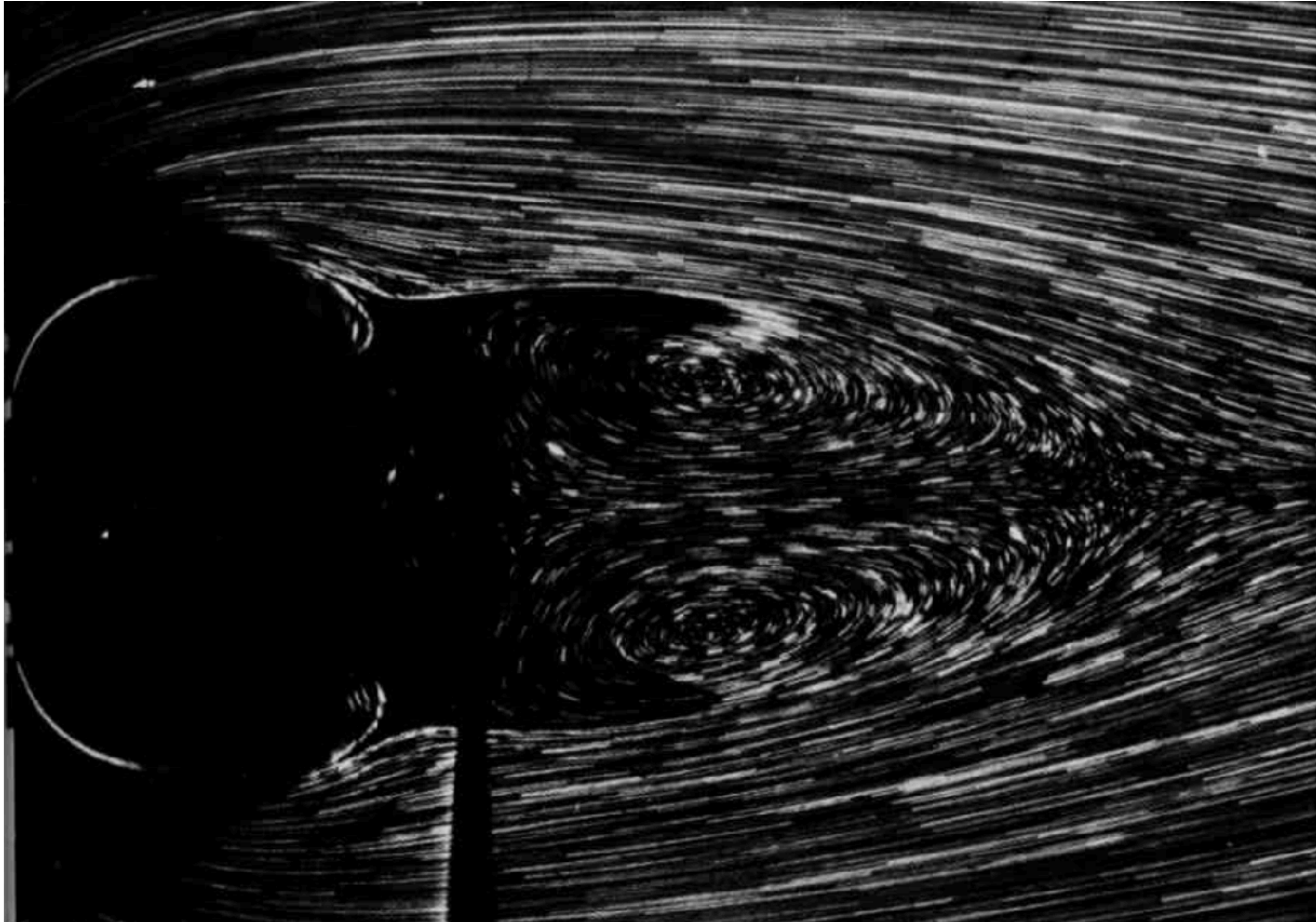
$Re = 13.1$

# Optyw walca



$Re = 26$

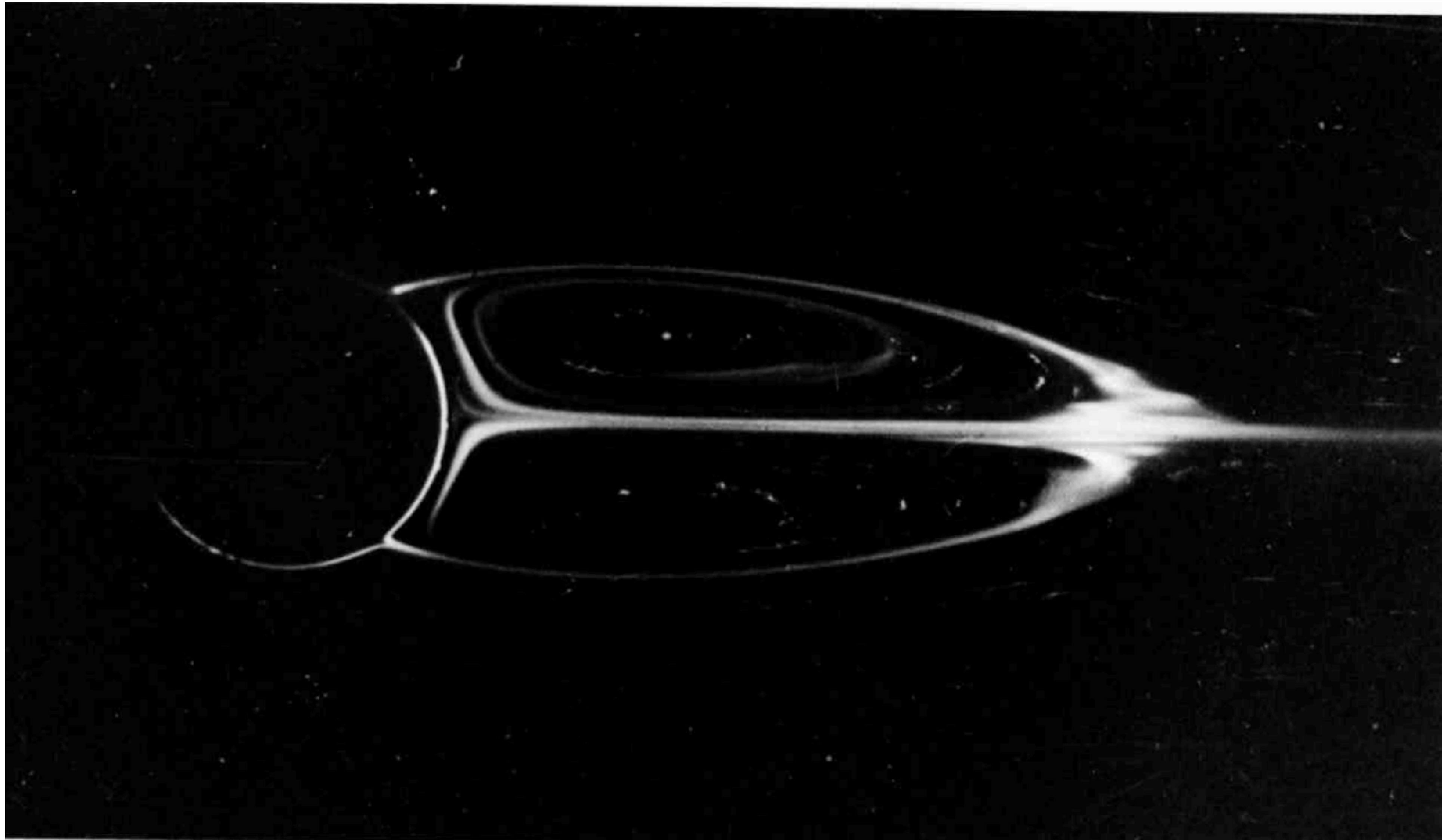
# Optyw walca



$Re = 30.2$

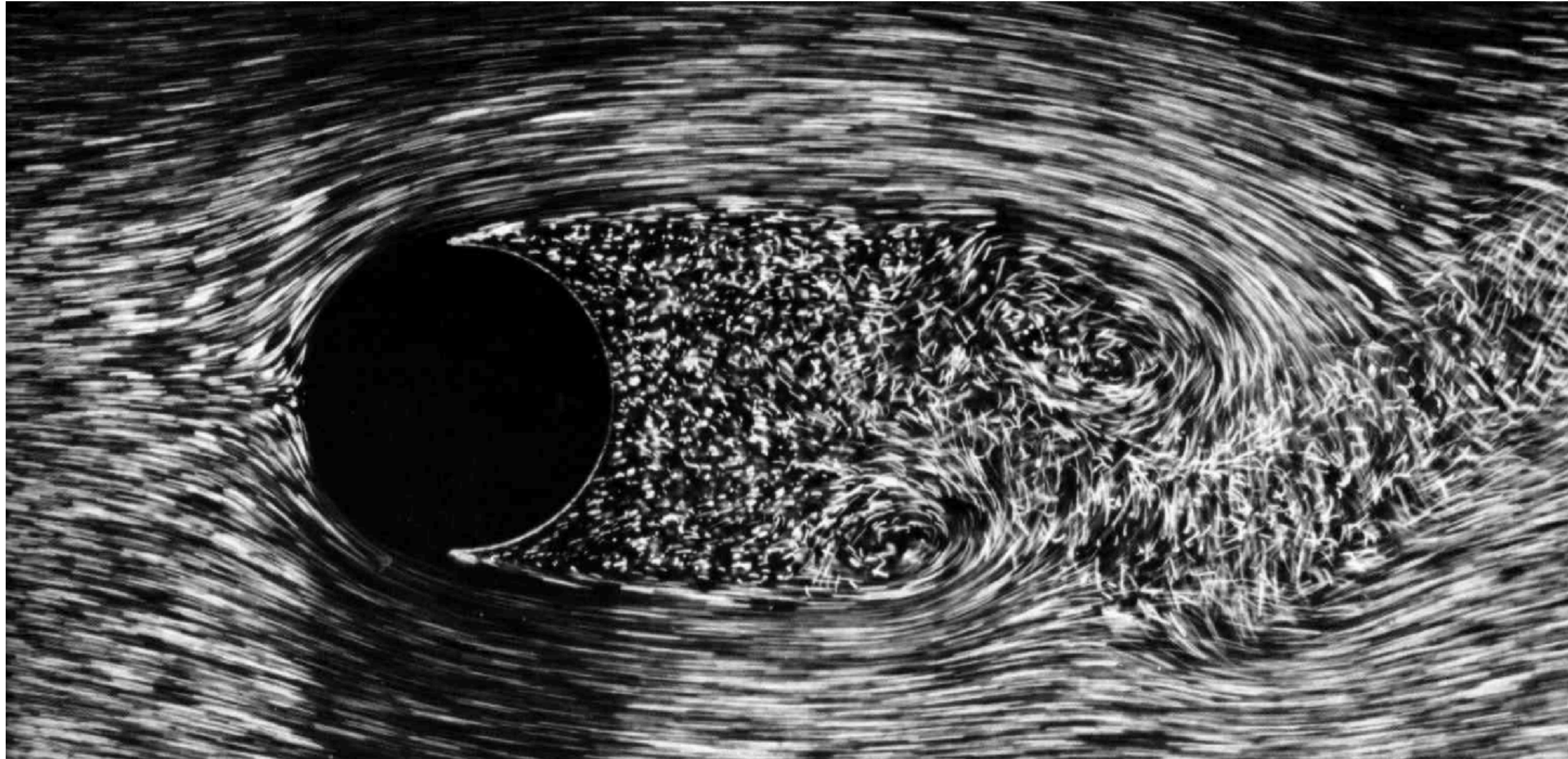


# Optyw walca



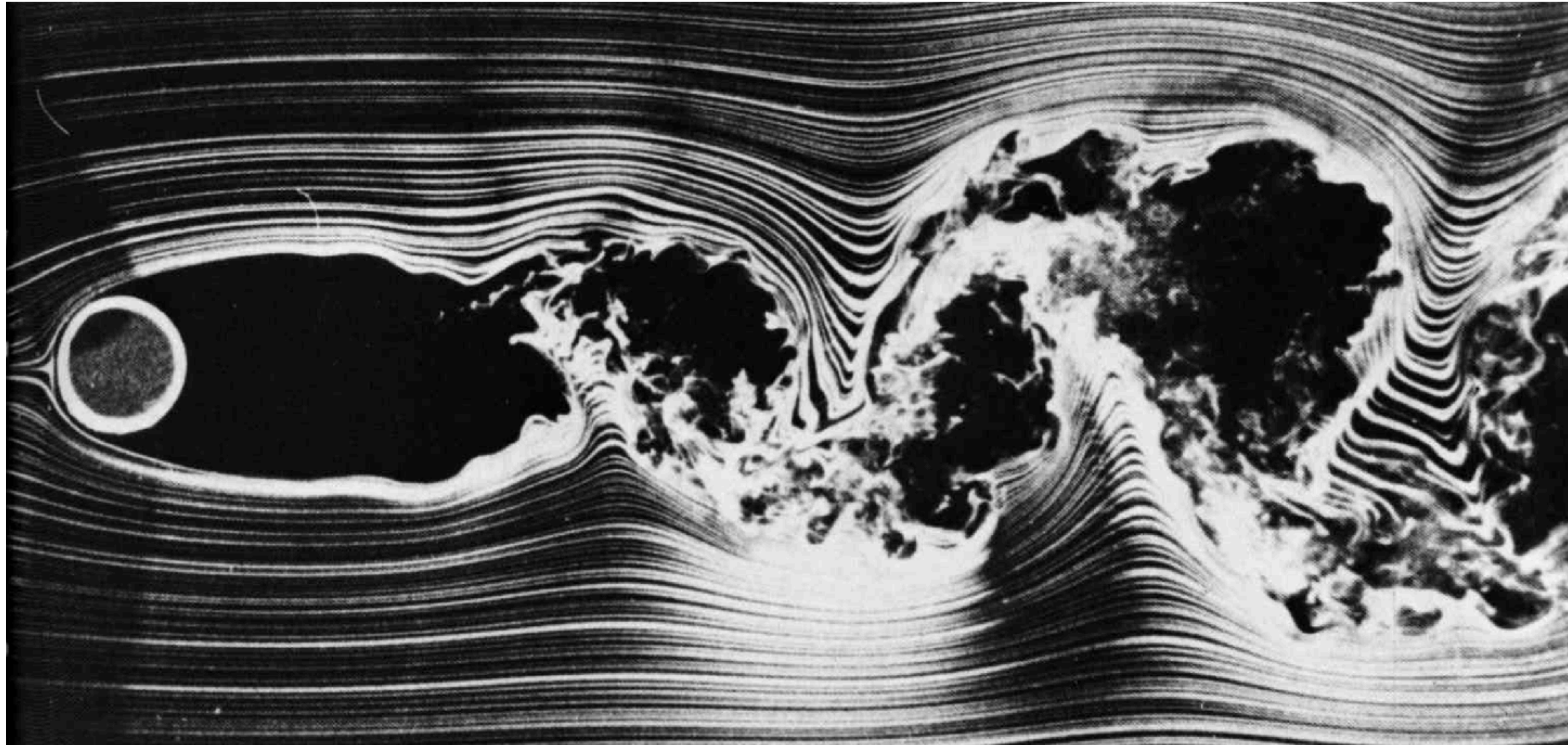
Re = 41

# Optyw walca



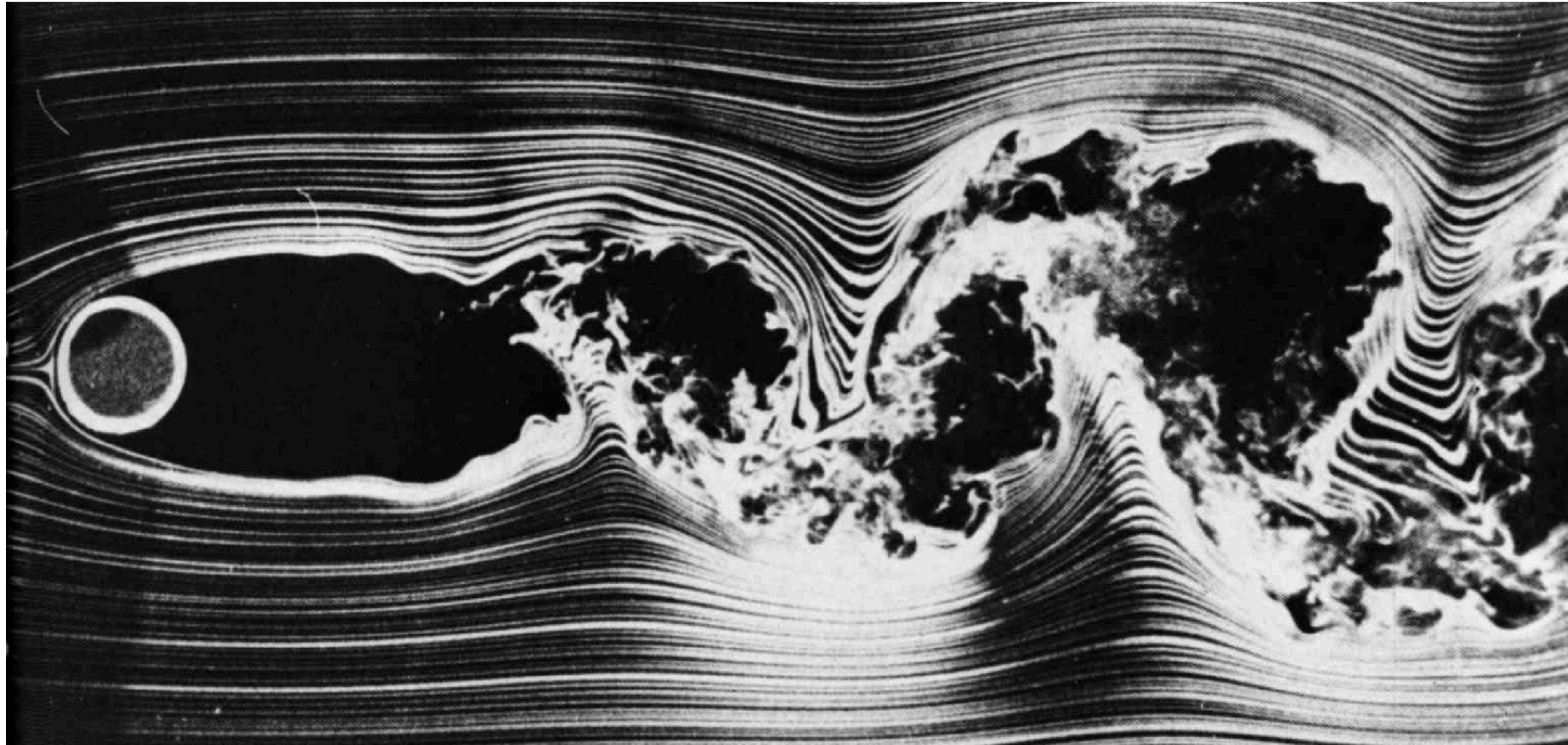
$Re = 2000$

# Optyw walca



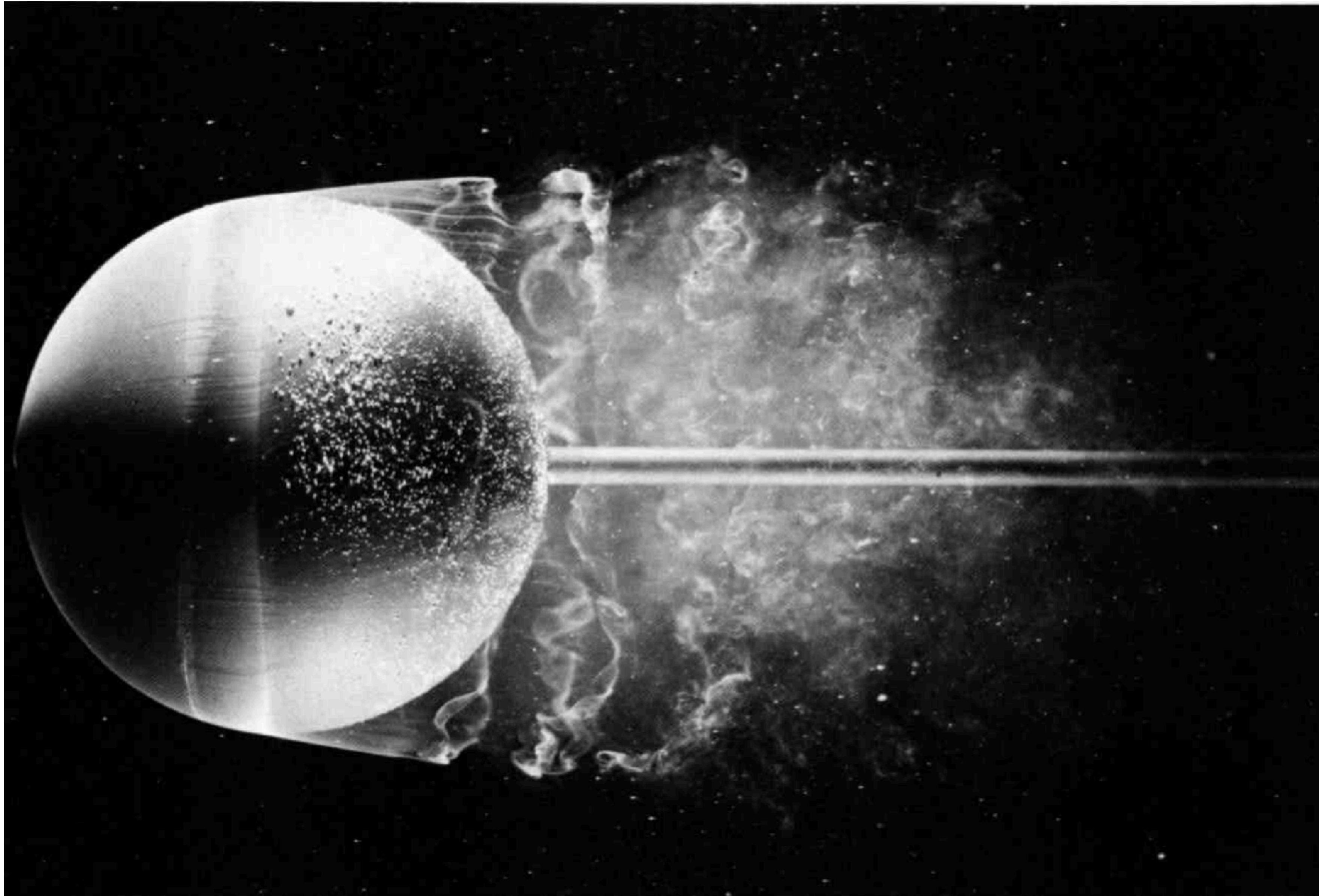
$Re = 10\,000$

# Optyw walca



$Re = 10\ 000$

# Przejscie do turbulencji



$Re = 15\ 000$

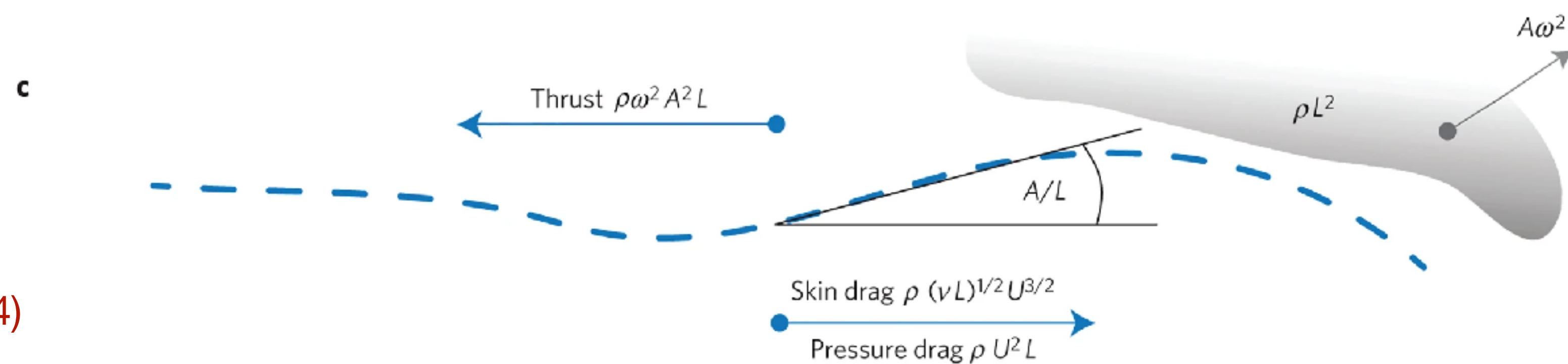
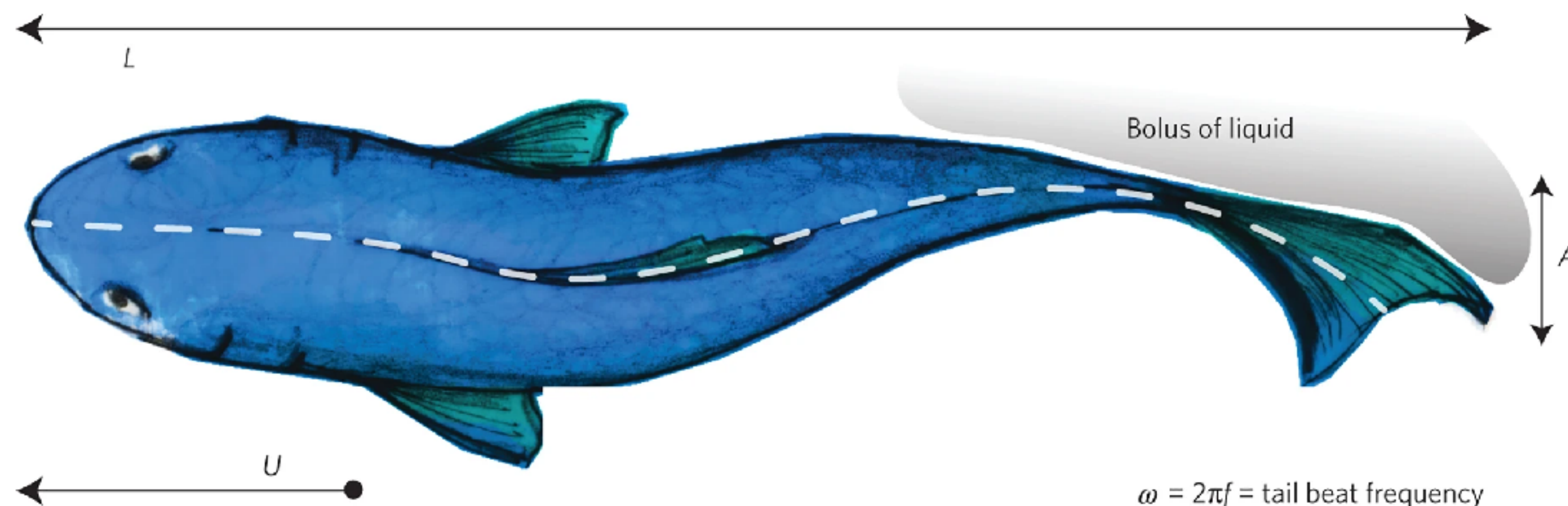
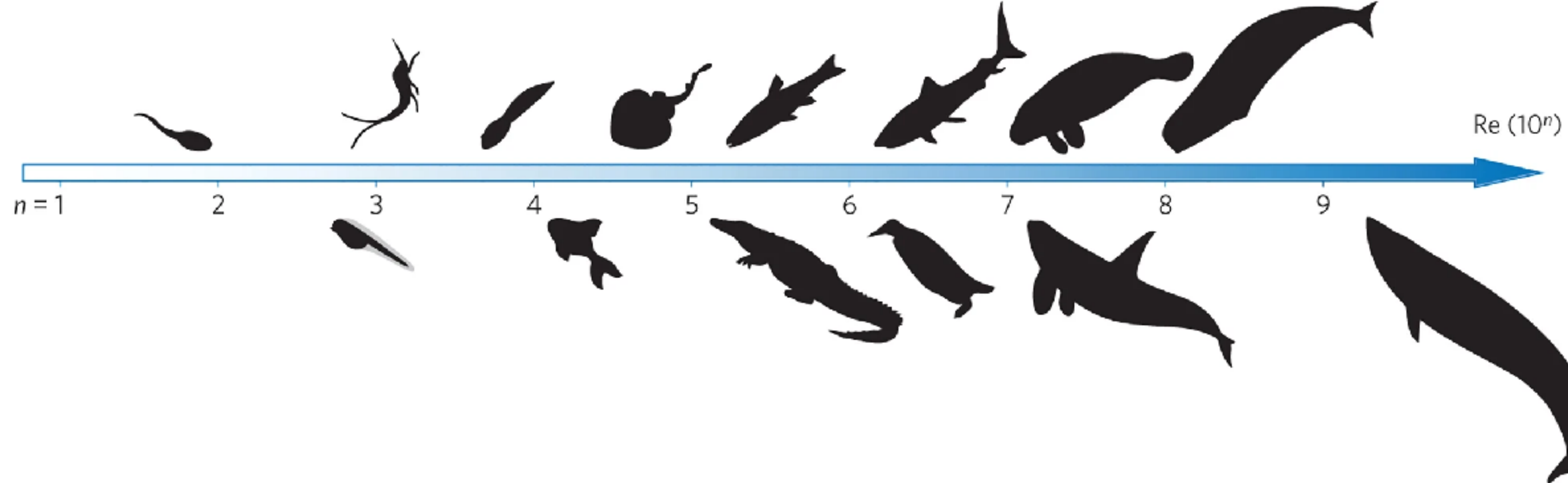
# Pływanie a Re

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

Liczba Reynoldsa

$$Sw = \frac{\rho \omega AL}{\mu}$$

Liczba <sub>b</sub> pływacza





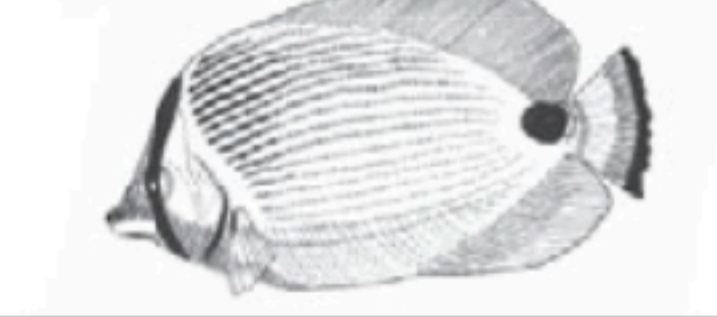




# Typowe Re

Woda

$$\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 10^{-3} \text{ Pa s}$$

		Length	Velocity	Frequency	Re	Sw
Bacterium		10 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m/s}$	100 Hz	$10^{-4}$	$10^{-2}$
Spermatozoon		100 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m/s}$	10 Hz	$10^{-2}$	$10^{-1}$
Ciliate		100 $\mu\text{m}$	1 mm/s	10 Hz	$10^{-1}$	$10^{-1}$
Tadpole		1 cm	10 cm/s	10 Hz	$10^3$	$10^3$
Small fish		10 cm	10 cm/s	10 Hz	$10^4$	$10^5$
Penguin		1 m	1 m/s	1 Hz	$10^6$	$10^6$
Sperm whale		10 m	1 m/s	0.1 Hz	$10^7$	$10^7$

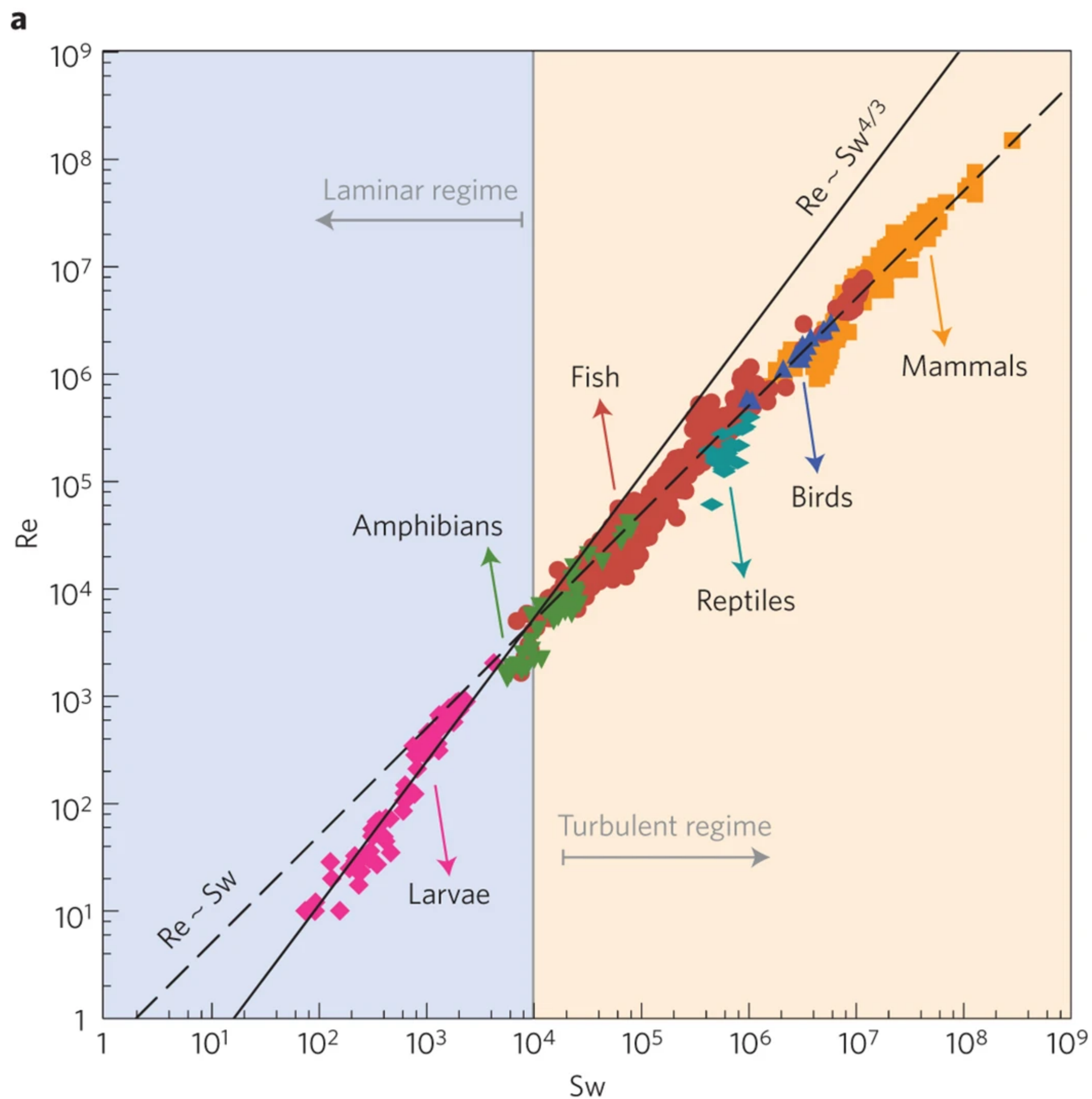
# Pływanie a Re

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

Liczba  
Reynoldsa

$$Sw = \frac{\rho \omega AL}{\mu}$$

Liczba  
pływacza





# Podobieństwo przepływów

**Przepływy o tej samej liczbie Reynoldsa mają podobny charakter**

# Podobieństwo przepływów



Model DC-11 (NASA wind tunnel)

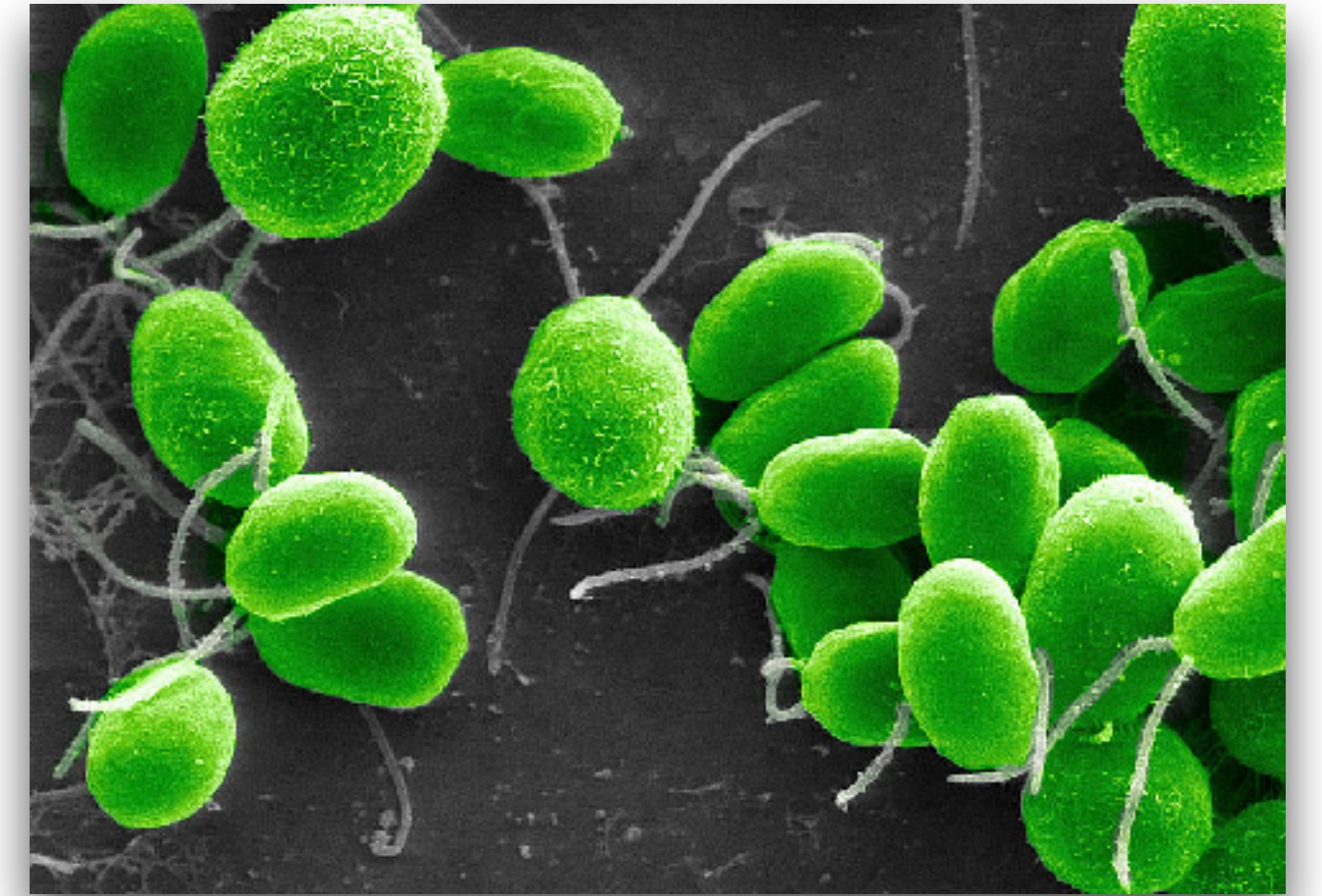


Prawdziwy DC-11 / Wiki

**Duże i szybkie przepływy** 📍  $Re \gg 1$

**Mniejsze & bardzo szybkie** 📍  $Re \gg 1$

# Podobieństwo przepływów



Bardzo małe i powolne 🖱  $Re \ll 1$

Duże & bardzo powolne 🖱  $Re \ll 1$

Bardzo lepkie 🖱  $Re \ll 1$

# Podsumowanie odcinka

- 1. Skale przestrzenne procesów biologicznych – od nm do m**
- 2. Skalowanie jako narzędzie interpretacji i porównań**
- 3. Panta rhei – transport biologiczny w środowisku wodnym**
- 4. Liczba Reynoldsa i podobieństwo przepływów**
- 5. Przepływy w skali mikro**