



Cykl wykładów 2007 dla  
kandydatów na stopnie P1 i P2

Zbigniew Niedzielski  
na podstawie prezentacji Witka Trybały

---

## Podstawy fizyki nurkowania

# Odmienne warunki środowiska wodnego

---

- Wysokie i zmienne wraz z głębokością ciśnienie.
- Problemy z pływalnością - prawo Archimedesesa.
- Komplikacje wynikające z oddychania sprężonymi mieszankami gazowymi - prawa gazowe.
- Oszukane zmysły człowieka pod wodą:
  - optyka podwodna,
  - propagacja fal akustycznych pod wodą.
- Szybkie wychładzanie organizmu człowieka.



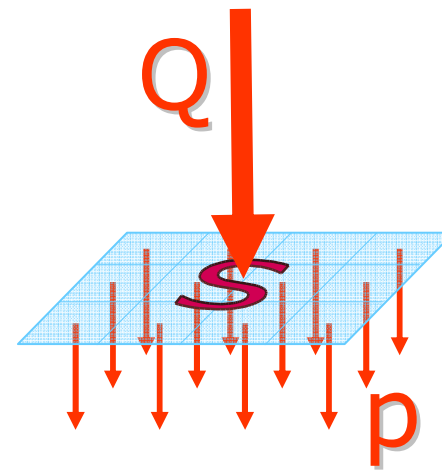
# Ciśnienie

- Pod wodą występuje wysokie, zależne od głębokości, ciśnienie.

Co to jest ciśnienie ?

Ciśnienie to siła działająca na jednostkę powierzchni.

Jeżeli ciśnienie oznaczamy literą  $p$  to możemy zapisać:



$$p = Q/S$$

Skąd pochodzą siły, które wywołują ciśnienie pod wodą ?



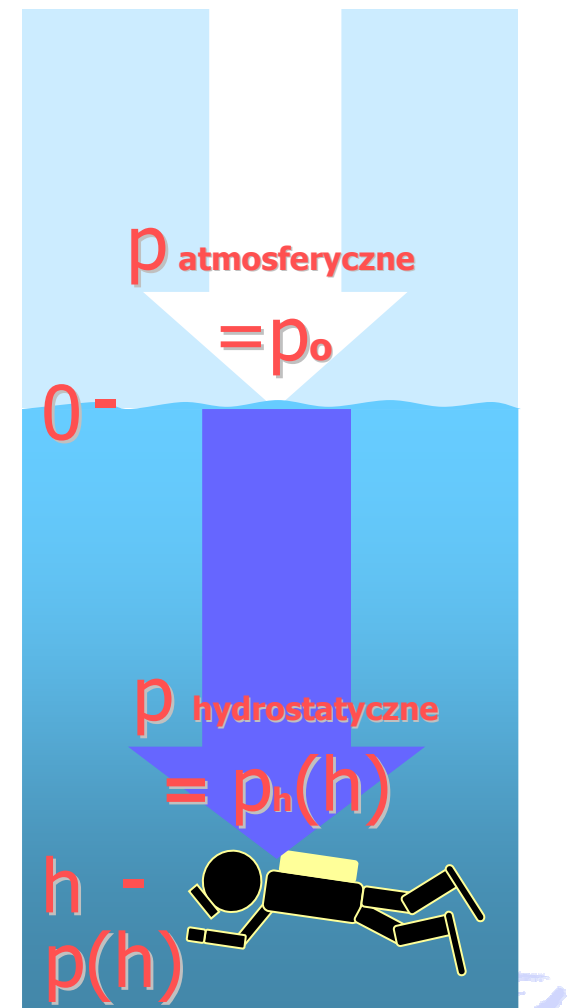
# Ciśnienie cd

Ciśnienie pod wodą pochodzi od **ciężaru** znajdujących się nad nurkiem powietrza i wody.  
**I zależne jest od głębokości !!!**

Ciśnienie całkowite na głębokości  $h$  oznaczamy  $p(h)$  :

$$p(h) = p_{\text{atmosferyczne}} + p_{\text{hydrostatyczne}}(h)$$
$$p(h) = p_0 + p_h(h)$$

Jest to prawo Torricelli'ego



# Jednostki ciężaru i ciśnienia stosowane przy obliczeniach dotyczących techniki nurkowej

Jako jednostkę siły (ciężaru) stosujemy: **1 kG (kilogram-siła)**,  
jako jednostkę ciśnienia atmosferę: **1 at = 1 kG/cm<sup>2</sup>**.

**1 kG (kilogram-siła)** to siła z jaką Ziemia przyciąga masę **1 kg**.

**Masa** jest własnością ciała, a jego **ciężar (siła przyciągania)** zależy także od wielkości pola grawitacyjnego, w którym ciało się znajduje.

Na przykład na Księżycu ciało o masie **1 kg** będzie ważyło tylko około **0,16 kG**.

O wielkości grawitacji świadczy wartość **przyspieszenia** jakie osiąga spadające w nim swobodnie ciało. Zmierzono wartość przyspieszenia ziemskiego i średnio wynosi ono:

Możemy zapisać:  **$Q=mg$** , gdzie  $\left\{ \begin{array}{l} g = 9,81\text{m/s}^2 \\ m - \text{masa ciała w kg,} \\ Q - \text{ciężar ciała w Niutonach.} \end{array} \right.$

**masa 1 kg waży na Ziemi 9,81 N**

Czyli:  **$1 \text{ kG} = 9,81 \text{ N}$**

Niuton (N) to jednostka siły układu SI, stosowana w fizyce.

## Jednostki ciśnienia spotykane w technice nurkowej

- atmosfera techniczna =>  $1 \text{ at} = 1 \text{ kG/cm}^2$
- atmosfera fizyczna =>  $1 \text{ Atm} = 760 \text{ mm Hg}$

to ciśnienie średnie jakie wywołuje atmosfera Ziemi na poziomie morza.

Obliczenia ułatwia fakt, że:

$$1 \text{ Atm} = 1,033 \text{ at} \approx 1 \text{ at}$$

- Paskal =>  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$  - jednostka układu SI
- Bar =>  $1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$  - jedn. pochodna od Pa

Ponieważ  $1 \text{ kG} = 9,81 \text{ N}$  i  $1 \text{ m}^2 = 10\,000 \text{ cm}^2$ , to:

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kG/cm}^2 = 98100 \text{ Pa} \approx 0,1 \text{ MPa} = 1 \text{ bar}$$

Zatem:  $1 \text{ Atm} \approx 1 \text{ at} \approx 0,1 \text{ MPa} = 1 \text{ bar}$

Megapaskal

$1 \text{ MPa} = 1\,000\,000 \text{ Pa}$

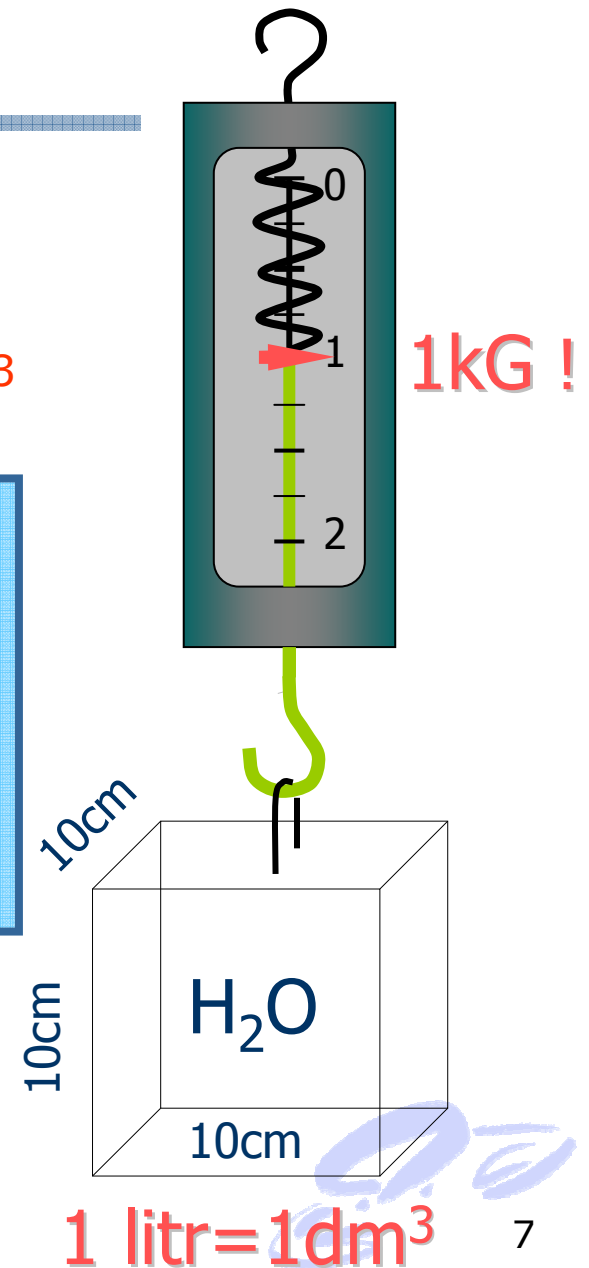
# Ile waży 1 litr wody?

1 litr ( $1\text{dm}^3$ ) wody  $\text{H}_2\text{O}$  waży  $1\text{kG}$ .

Zatem ciężar właściwy wody słodkiej wynosi:  $\delta \text{H}_2\text{O} = 1\text{kG}/1\text{litr} = 1 \text{kG}/\text{dm}^3$

**Uwaga:** Ciężar właściwy słonej wody morskiej jest większy i wynosi: od  $1,002 \text{kG}/\text{dm}^3$  (północny Bałtyk) do  $1,038 \text{kG}/\text{dm}^3$  (oceany).  
W słonych bezodpływowych jeziorach np. w Morzu Martwym ciężar właściwy wody może być jeszcze większy.

Jaka jest wartość ciśnienia  $p_h(h)$  pochodzącego od ciężaru wody, czyli ciśnienia hydrostatycznego?



# Ciśnienie hydrostatyczne

Wyobraźmy sobie słup wody o wysokości 10 metrów i podstawie  $S=1\text{cm}^2$ .

Jaki jest ciężar takiego słupa wody?

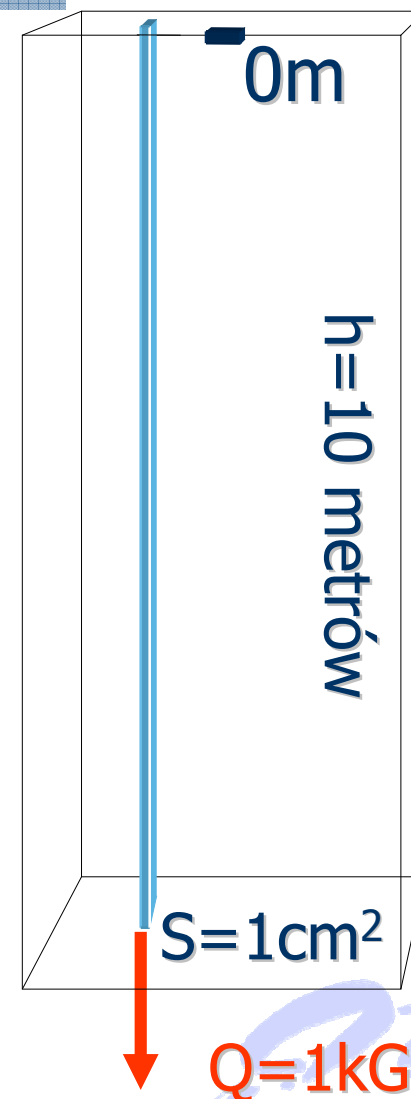
Objętość takiego słupa wody to:

$$\begin{aligned} V &= S \cdot h = 1\text{cm}^2 \cdot 10\text{m} = \\ &= 1\text{cm} \cdot 1\text{cm} \cdot 1000\text{cm} = \\ &= 10\text{cm} \cdot 10\text{cm} \cdot 10\text{cm} = 1\text{dm}^3 \end{aligned}$$

Zatem jego ciężar wynosi 1kG.

Słup taki uciska z siłą 1kG na powierzchnię  $1\text{cm}^2$ , czyli wywołuje ciśnienie:

$$p = 1 \text{ kG/cm}^2 = 1 \text{ at}$$





# Ciśnienie absolutne

W praktyce przyjmujemy, że:

$$p_o = 1\text{Atm} = 1 \text{ at}$$

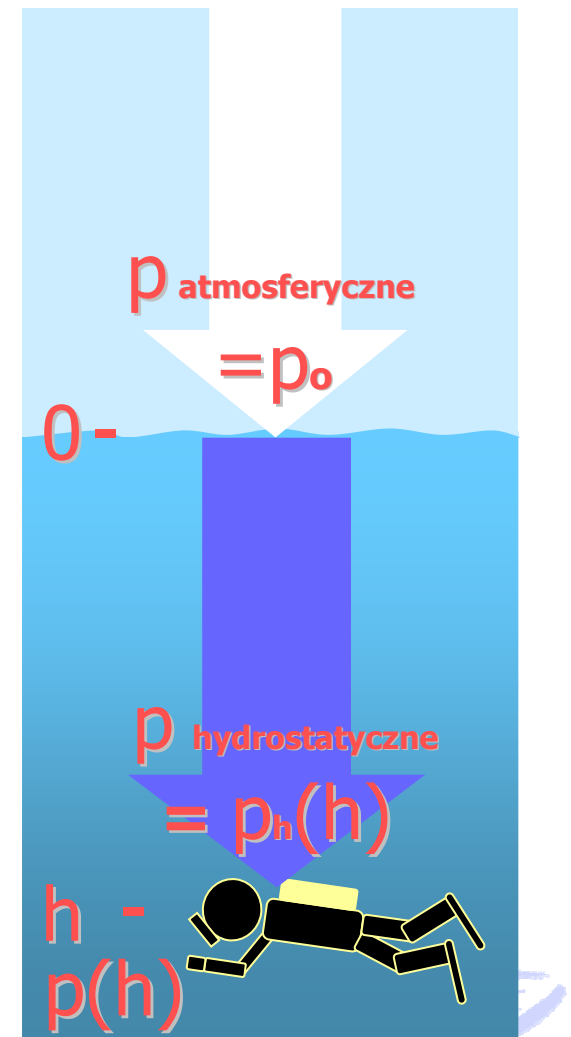
Uwaga! Przy nurkowaniu w górach  $p_o < 1\text{at}$

Zatem ciśnienie całkowite na głębokości  $h$  wynosi:

$$\begin{aligned} p(h) &= p_o + p_h(h) = \\ &= 1 \text{ at} + (h/10) \text{ at} \end{aligned}$$

Przykład: Jakie ciśnienie panuje na głębokości 20m ?

$$p(20\text{m}) = 1 \text{ at} + (20/10) \text{ at} = 3 \text{ at}$$



# Ciśnienie absolutne cd

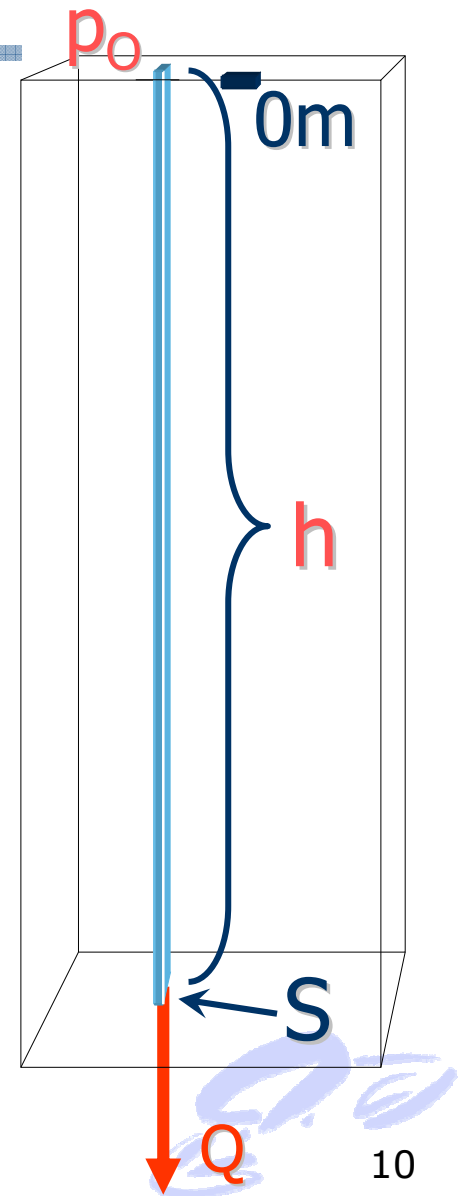
Jakie ciśnienie pochodzi od słupa cieczy o ciężarze właściwym  $\delta_{\text{cieczy}}$ , wysokości  $h$  i podstawie  $S$  ?

$$p_h(h) = \frac{Q}{S} = \frac{V_{\text{słupa}} \cdot \delta_{\text{cieczy}}}{S} = \frac{h \cdot \cancel{S} \cdot \delta_{\text{cieczy}}}{\cancel{S}}$$

$$p_h(h) = h \cdot \delta_{\text{cieczy}}$$

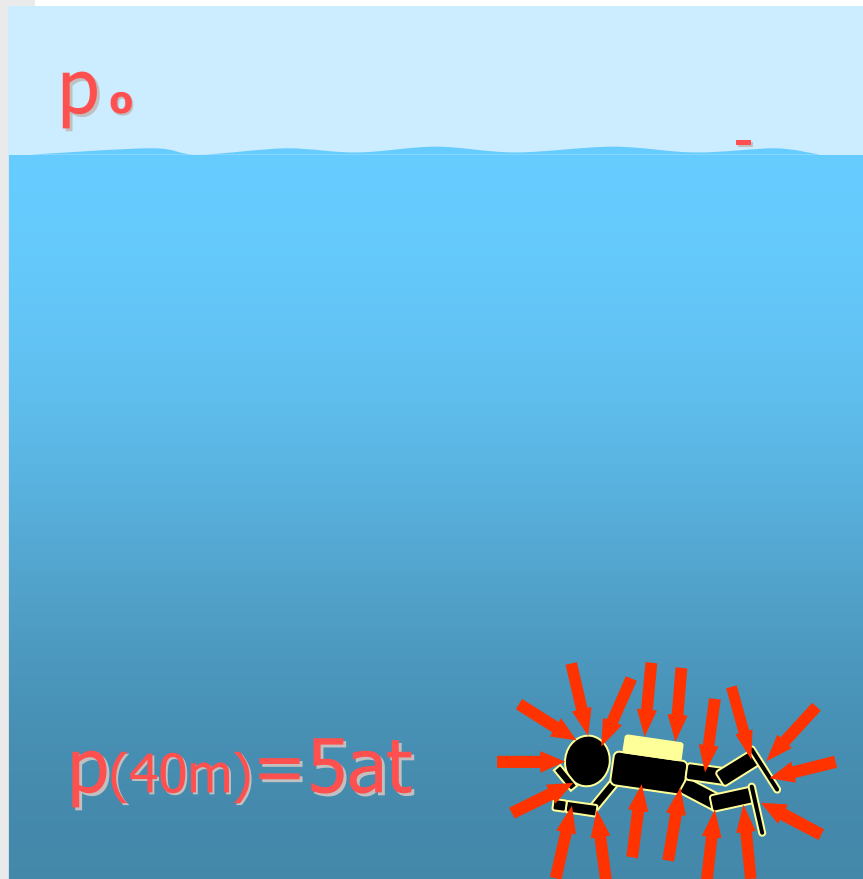
Zatem całkowite ciśnienie w cieczy na głębokości  $h$  wynosi:

$$p(h) = p_0 + h \cdot \delta_{\text{cieczy}}$$



# Wpływ ciśnienia na organizm człowieka pod wodą

Przykład: Jaka siła działa na każdy  $\text{dm}^2$  ciała nurka na głębokości 40 metrów pod wodą?



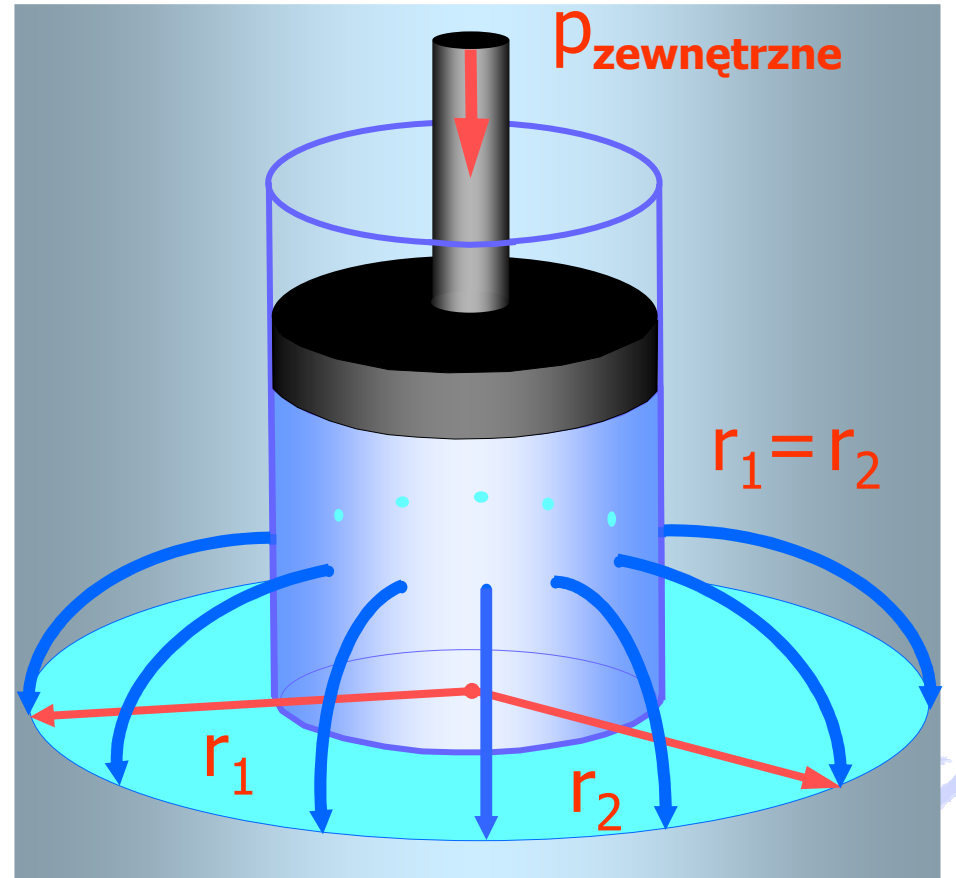
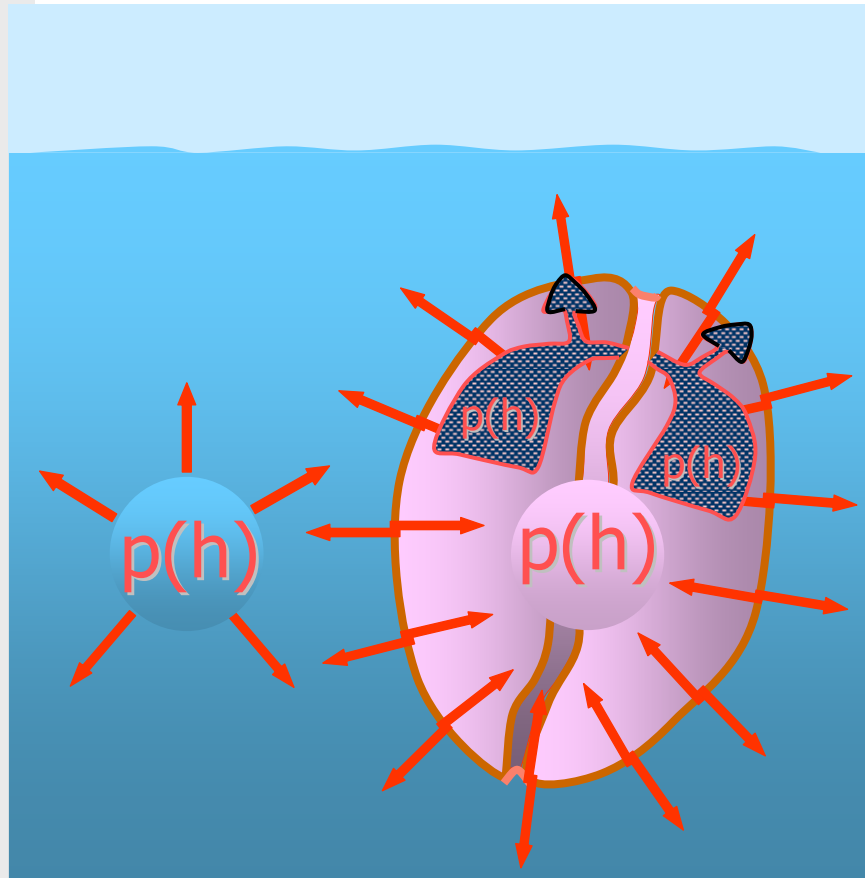
Jest to siła 500kG !!!  
na każdy  $\text{dm}^2$  ciała nurka.

Jak organizm człowieka  
znosi tak duże obciążenia?

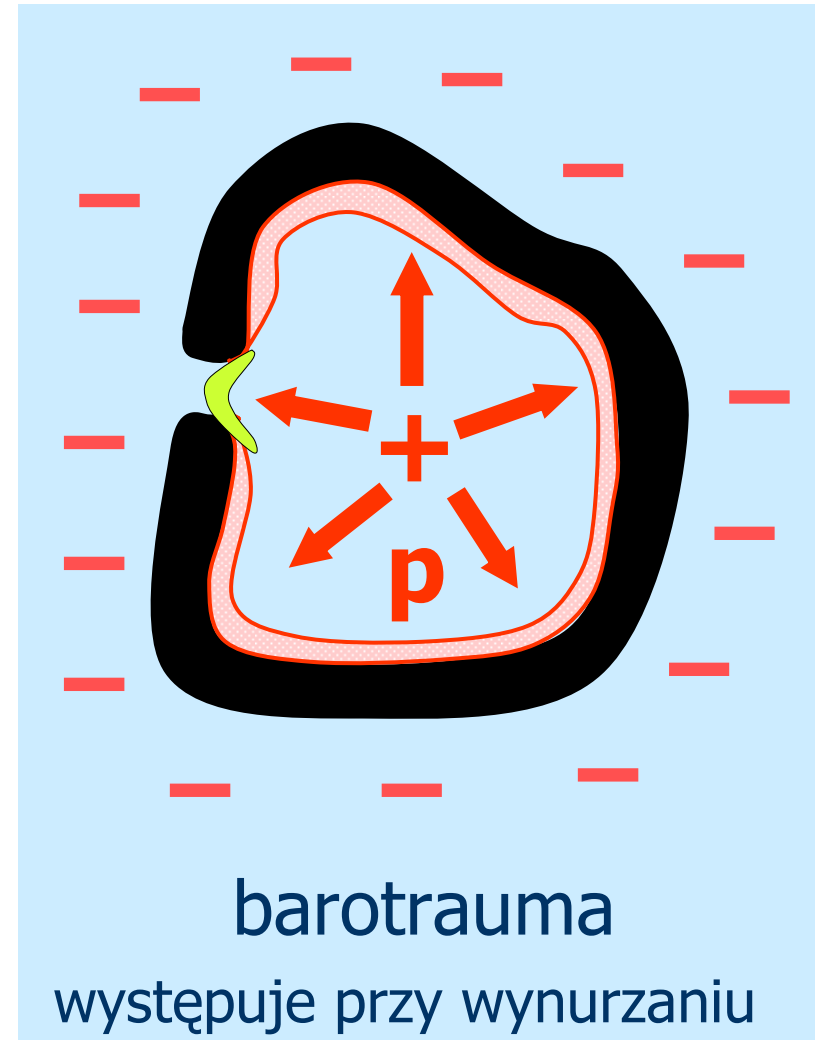
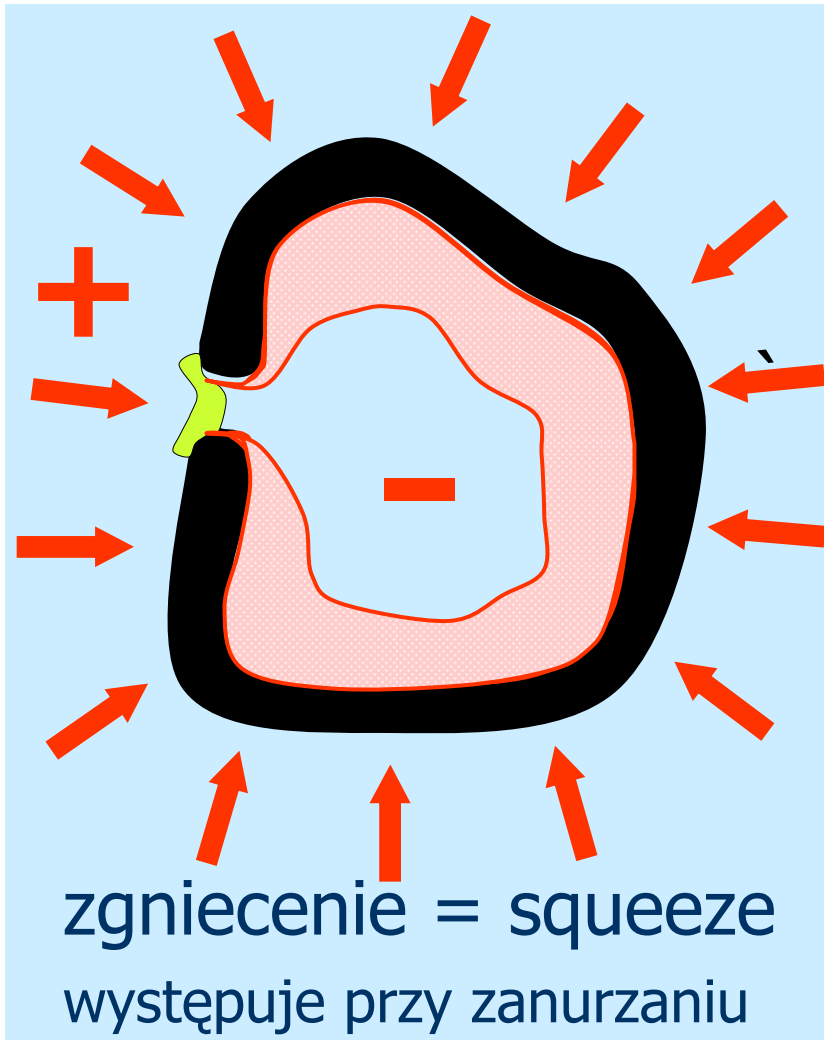


# Wpływ ciśnienia na organizm człowieka pod wodą

Prawo Pascala: W cieczy lub gazie, które znajdują się w stanie spoczynku w zamkniętym naczyniu, ciśnienie zewnętrzne przenoszone jest jednorodnie we wszystkich kierunkach.

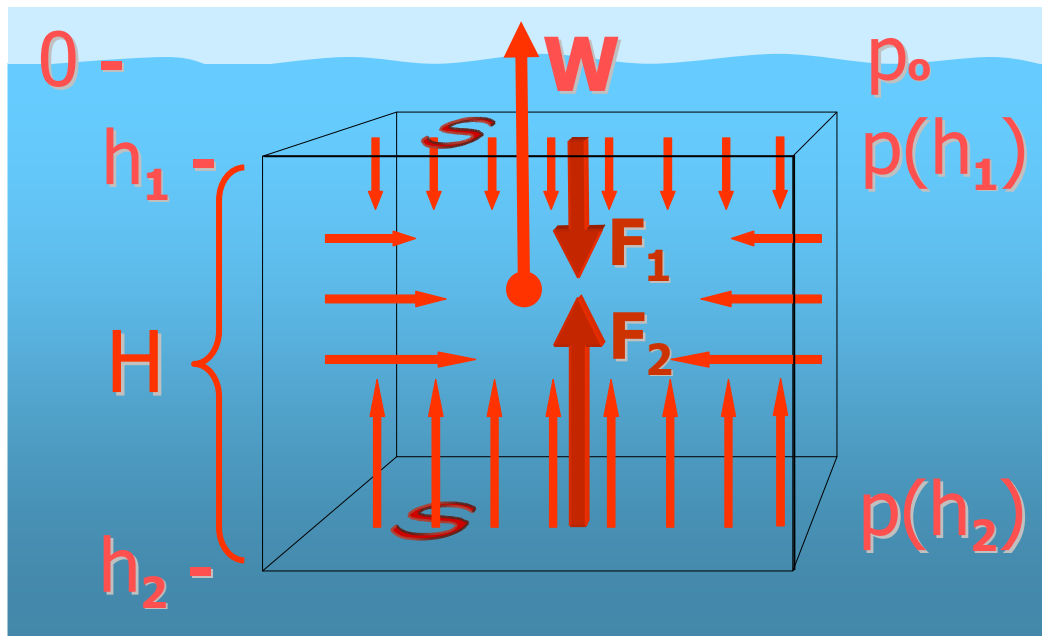


# Wpływ ciśnienia na organizm pod wodą



# Prawo Archimedesesa

$$\begin{aligned}
 \text{Siła wyporu: } \mathbf{W} &= \mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1 = S \cdot p(h_2) - S \cdot p(h_1) = \\
 &= S \cdot \{ \cancel{p_0} + p_h(h_2) - \cancel{p_0} - p_h(h_1) \} = S \cdot \{ h_2 \cdot \delta_{\text{cieczy}} - h_1 \cdot \delta_{\text{cieczy}} \} = \\
 &= S \cdot \{ h_2 - h_1 \} \cdot \delta_{\text{cieczy}} = S \cdot H \cdot \delta_{\text{cieczy}} = \mathbf{V}_{\text{ciała}} \cdot \delta_{\text{cieczy}}
 \end{aligned}$$



$$\mathbf{F}_2 = S \cdot p(h_2)$$

$$\mathbf{F}_1 = S \cdot p(h_1)$$

Pamiętamy, że:

$$p_h(h) = h \cdot \delta_{\text{cieczy}}$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{V}_{\text{ciała}} \cdot \delta_{\text{cieczy}}$$

$V_{\text{ciała}}$  - objętość ciała

$\delta_{\text{cieczy}}$  - ciężar właściwy cieczy

# Regulacja pływalności

$Q > W$  - ciało tonie

$Q < W$  - ciało wypływa

$Q = W$  - zawieszenie w toni

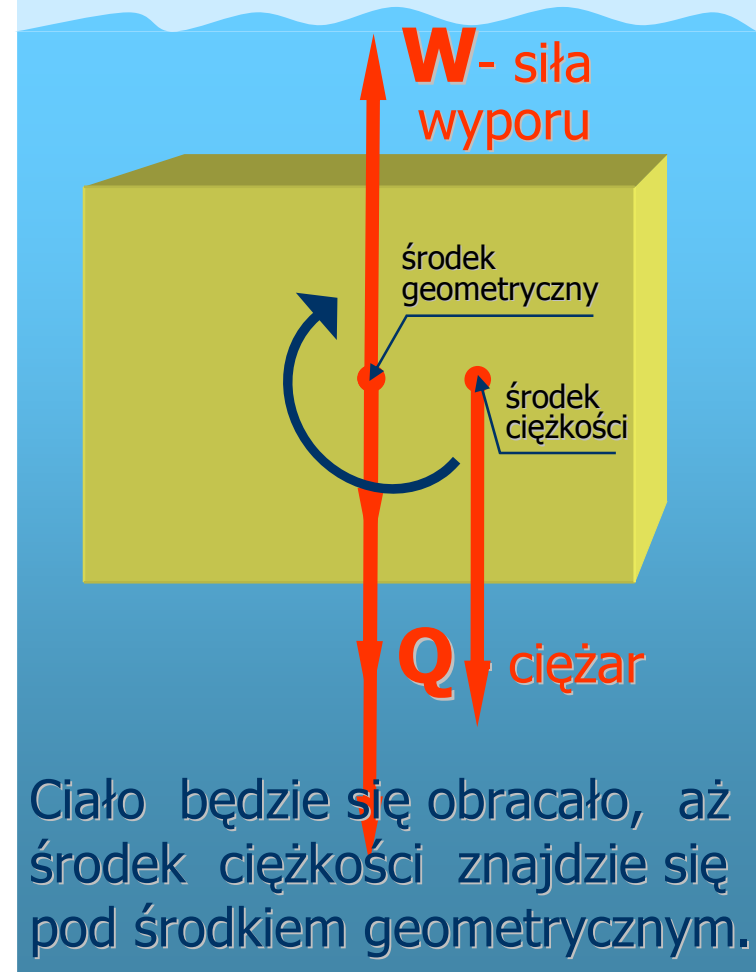
Ciężar człowieka  $Q$  jest w przybliżeniu (+/- 2kG) równy sile wyporu  $W$ , jaka działa na niego, przy zanurzeniu w  $H_2O$ .

$W$  - zależy od zasolenia wody.

$W$  - regulujemy zmianą objętości płuc, skafandra, jacketu itp.

$Q$  - regulujemy dobierając balast.  
**Uwaga:** w trakcie nurkowania zmienia się ciężar gazu w butli.

$$W = V_{\text{ciała}} \cdot \delta_{\text{cieczy}}$$





# Regulacja pływalności

Morze Martwe - średnie zasolenie 26%.  $\delta_{\text{cieczy}} \approx 1,2 \text{ kG/dm}^3$   
Jaka jest siła wyporu działająca na nurka w Morzu Martwym?



Wyprawa AKP „KRAB” Tridacna II 1988/89

Człowiek bez użycia balastu ( ok. 16 kG ) nie jest w stanie zanurzyć się w Morzu Martwym.

Zakładamy, że ciało dorosłego 😊 nurka waży 80 kG, więc jego objętość wynosi około

$$V_{\text{ciała}} = 80 \text{ dm}^3$$

Zatem siła wyporu działająca na całkowicie zanurzonego nurka to:

$$\begin{aligned} W &= V_{\text{ciała}} \cdot \delta_{\text{cieczy}} = \\ &= 80 \text{ dm}^3 \cdot 1,2 \text{ kG/dm}^3 \end{aligned}$$

Ostatecznie:  **$W = 96 \text{ kG}$**



# Prawa gazowe

---

Człowiek nie potrafi oddychać tlenem rozpuszczonym w wodzie i przy dłuższym pobycie pod wodą zmuszony jest do oddychania sprężonymi mieszankami gazów.

**Wynika stąd wiele niebezpieczeństw !!!**

Dlatego tak ważnym jest poznanie i umiejętne stosowanie podstawowych praw gazowych.



## Prawa gazowe przydatne w technice nurkowej:

---

### 1. Prawo Pascala.

O rozkładzie ciśnienia w gazie.

### 2. Prawo Daltona.

O wartościach ciśnień w mieszaninach gazów.

### 3. Prawo gazu doskonałego.

O zależności ciśnienia, objętości i temperatury gazów.

### 4. Prawo Henry'ego.

O rozpuszczalności gazów w cieczach.



# Prawa gazowe

---

Mieszanki oddechowe podawane są pod wodą pod ciśnieniem panującym w otoczeniu nurka.

**Np: Na głębokości 30 metrów pod ciśnieniem 4 at.**

Najprostszą mieszanką oddechową jest powietrze, którym oddychamy na co dzień.

**Nawet dobrze znane nam powietrze, podawane w wyższych ciśnieniach staje się dla człowieka toksyczne !!!**



# Prawo Daltona

Ciśnienie całkowite mieszaniny gazów jest sumą ciśnień parcyjnych poszczególnych składników:

$$p_c = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n$$

**Przykład:** Ile wynosi ciśnienia całkowite otaczającego nas powietrza, jeżeli ciśnienia parcyjne składników to:

$$p_{O_2} = 0,21 \text{ at}$$

$$p_{N_2} = 0,78 \text{ at}$$

$$p_{CO_2} = 0,01 \text{ at}$$

Wynosi:  $p_c = 0,21 \text{ at} + 0,78 \text{ at} + 0,01 \text{ at} = 1 \text{ at}$

**Uwaga:** W rzeczywistości w powietrzu występują też inne gazy (głównie szlachetne), a zawartość  $CO_2$  w świeżym powietrzu jest dużo niższa.<sup>20</sup>

# Przykład zastosowania prawa Daltona

Do obliczeń przyjmujemy, że powietrze składa się tylko z dwóch gazów: tlenu  $O_2$  (20%) i azotu  $N_2$  (80%), a ich ciśnienia parcjale w naszym otoczeniu ( $p_c = 1\text{at}$ ) wynoszą:

$$p_{O_2} = 0,20 \text{ at} \quad p_{N_2} = 0,80 \text{ at} \quad , \text{ bo: } 0,20\text{at} + 0,80\text{at} = 1 \text{ at}$$

**Pytanie:** Ile wyniosą ciśnienia parcjale  $O_2$  i  $N_2$  w powietrzu wdychanym przez nurka na głębokości 20m ( $p_c = 3\text{at}$ )?

1. Z prawa Daltona wynika:  $p_{O_2} + p_{N_2} = 3\text{at}$
2. Proporcje tlenu (20%) i azotu (80%) są zachowane.

**Odp:** Ciśnienia te na głębokości 20m wyniosą odpowiednio:

$$p_{O_2} = 0,60 \text{ at} \quad p_{N_2} = 2,40 \text{ at} \quad , \text{ bo: } 0,6 \text{ at} + 2,4 \text{ at} = 3 \text{ at}$$

# Ciśnienie parcjalne tlenu

---

Dopuszczalny zakres ciśnienia parcjalnego tlenu

Tlen:  $p_{O_2} = 0,20 \text{at} \div 1,6 \text{at}$

Konieczny do oddychania, ale dla  $p_{O_2} > 1,6 \text{at}$  neurotoksyczny.  
Istotny jest czas ekspozycji.

---

**Przykład:** Na jaką maksymalną głębokość można zanurkować mając butlę nabitą powietrzem?

$$p_{O_2} = 20\% \cdot p \quad p = p_{O_2} / 20\% \Rightarrow p = 1,6 / 20\% = 8 \text{ at}$$

**Odpowiedź:** Maksymalna głębokość to 70 m



# Prawo gazu doskonałego

$$\frac{pV}{T} = nR$$

, gdzie

p – ciśnienie gazu

V – objętość gazu

T – temperatura gazu [ °K ]

n – liczba moli gazu

R – stała gazowa

Prawo to w dobrym przybliżeniu opisuje zachowanie mieszanin oddechowych.

$$0 \text{ °K} \approx -273 \text{ °C}$$
$$273 \text{ °K} \approx 0 \text{ °C}$$



# Prawo gazu doskonałego

Dla pewnych szczególnych sytuacji prawo to możemy upraszczać. Na przykład dla zamkniętej ilości gazu, czyli dla liczby moli gazu  $n = \text{const}$  otrzymamy:

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

dla  $n = \text{const}$   
(zamknięta ilość gazu)

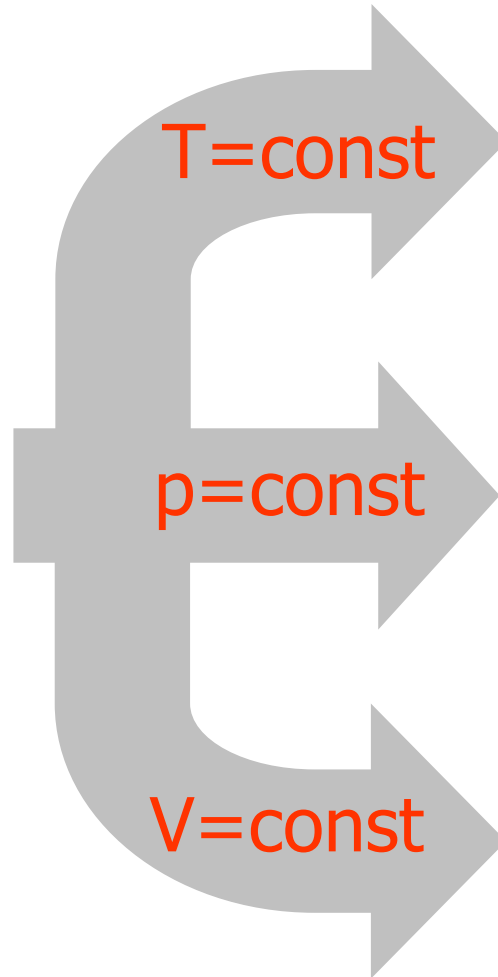




# Prawo gazu doskonałego

dla  $n = \text{const}$  :

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$



$$pV = \text{const}$$

Prawo Boyle'a-Mariotte'a

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

Prawo Gay-Lussaca

$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

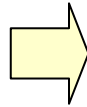
Prawo Charlesa

# Prawo Boyle'a-Mariotte'a

Prawo gazu doskonałego  
dla  $n=\text{const}$  i  $T=\text{const}$  :

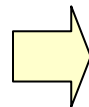
$$pV = \text{const}$$

przy  
zanurzeniu:  $p$  ↗



$V$  ↘

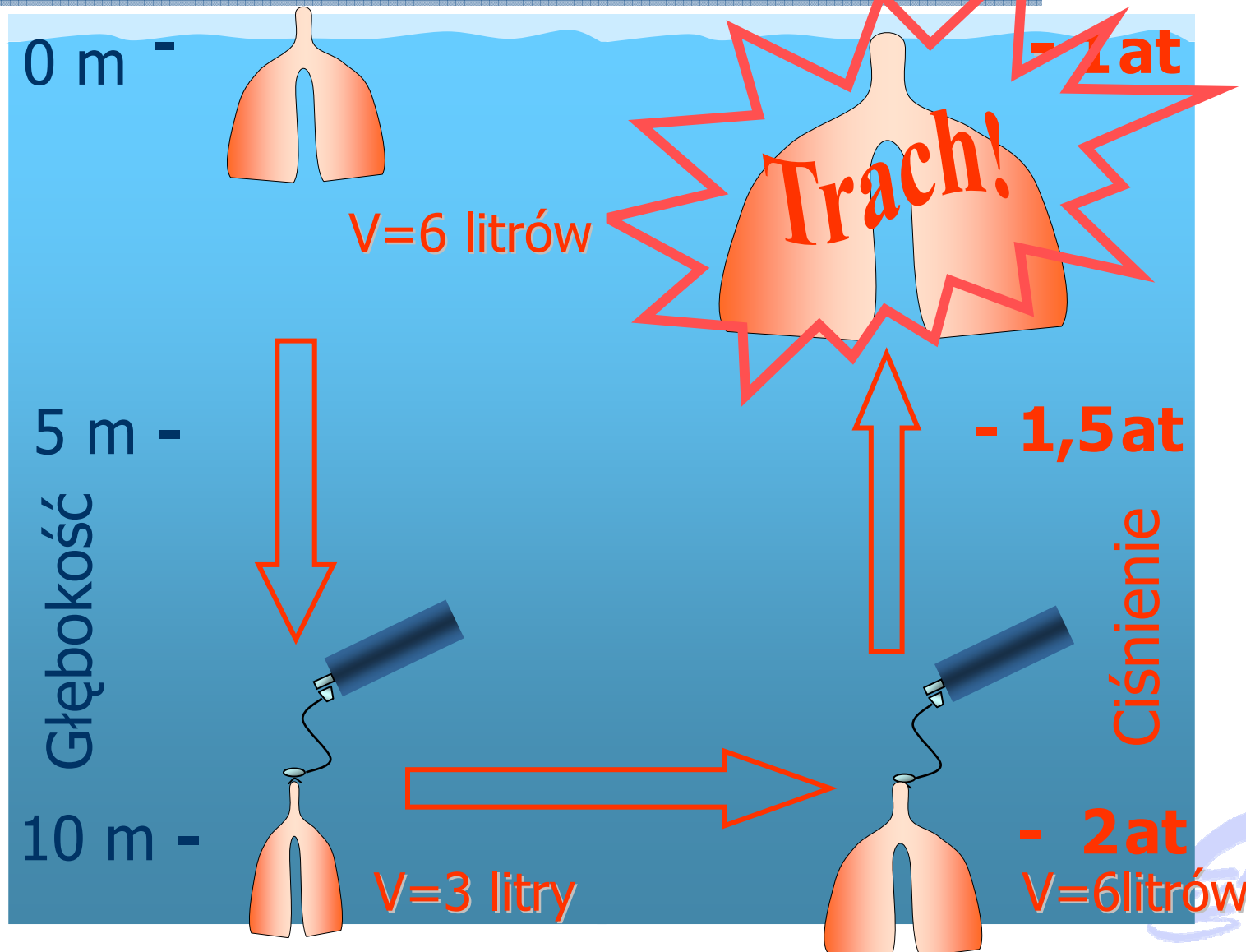
przy  
wynurzeniu:  $p$  ↘



$V$  ↗



# Prawo Boyle'a-Mariotte'a

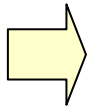


# Prawo Charlesa

Prawo gazu doskonałego  
dla  $n=\text{const}$  i  $V=\text{const}$  :

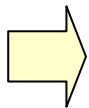
$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad T [^{\circ}\text{K}]$$

przy  
ogrzewaniu:  $T \nearrow$

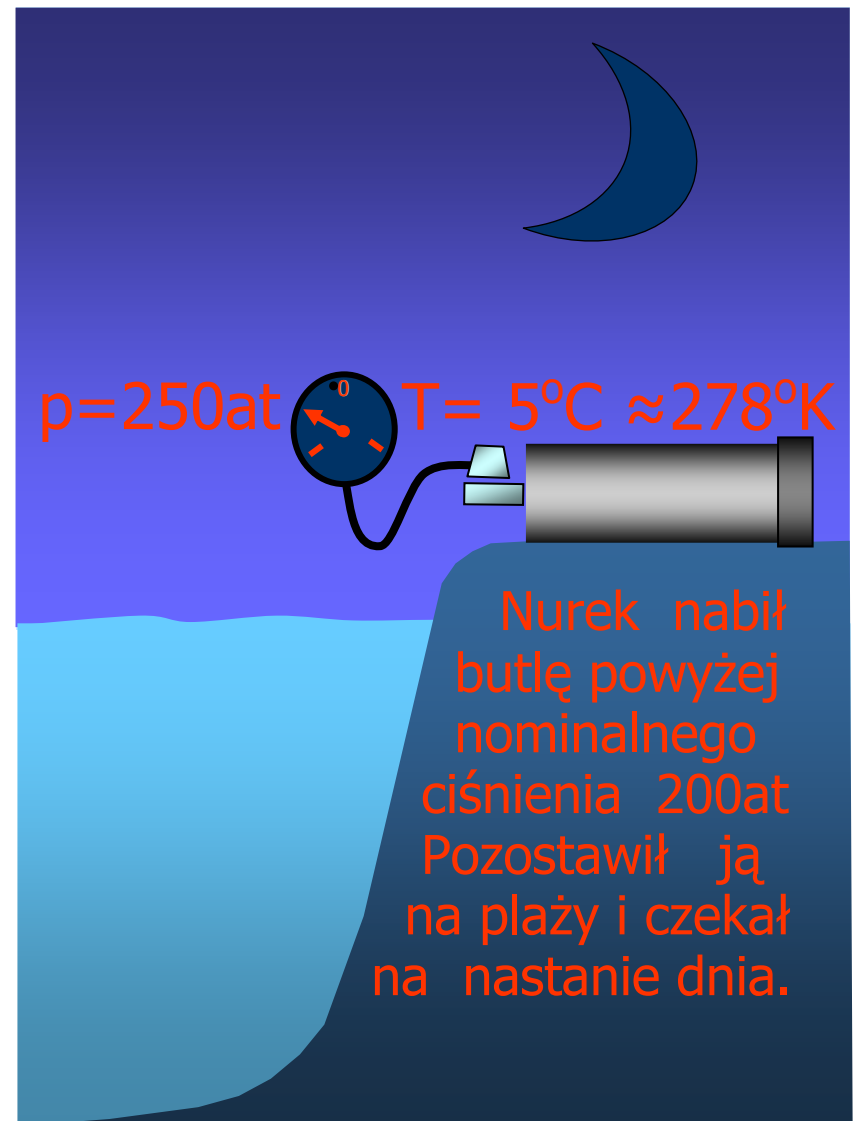


$p \nearrow$

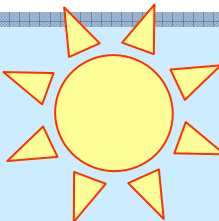
przy  
ochładzaniu:  $T \searrow$



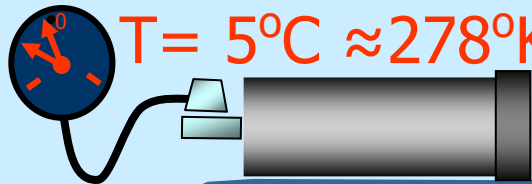
$p \searrow$



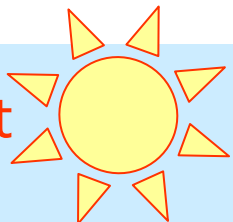
# Prawo Charlesa

$$250\text{at} \cdot \frac{323^\circ\text{K}}{278^\circ\text{K}} \approx 290\text{at}$$


$$p=290\text{at} \quad T=50^\circ\text{C} \approx 323^\circ\text{K}$$
$$p=250\text{at} \quad T=5^\circ\text{C} \approx 278^\circ\text{K}$$



Tak wysokie ciśnienie w butli grozi jej rozerwaniem!!!

$$290\text{at} \cdot \frac{300^\circ\text{K}}{323^\circ\text{K}} \approx 270\text{at}$$


$$p=290\text{at}$$
$$T=50^\circ\text{C} \approx 323^\circ\text{K}$$

$$p=270\text{at}$$
$$T=27^\circ\text{C} \approx 300^\circ\text{K}$$



**Uwaga!**

Nie nabijaj butli powyżej ciśnienia nominalnego !!!  
Chroń butle przed nagrzaniem, np. trzymając je w wodzie

# Prawo Henry'ego

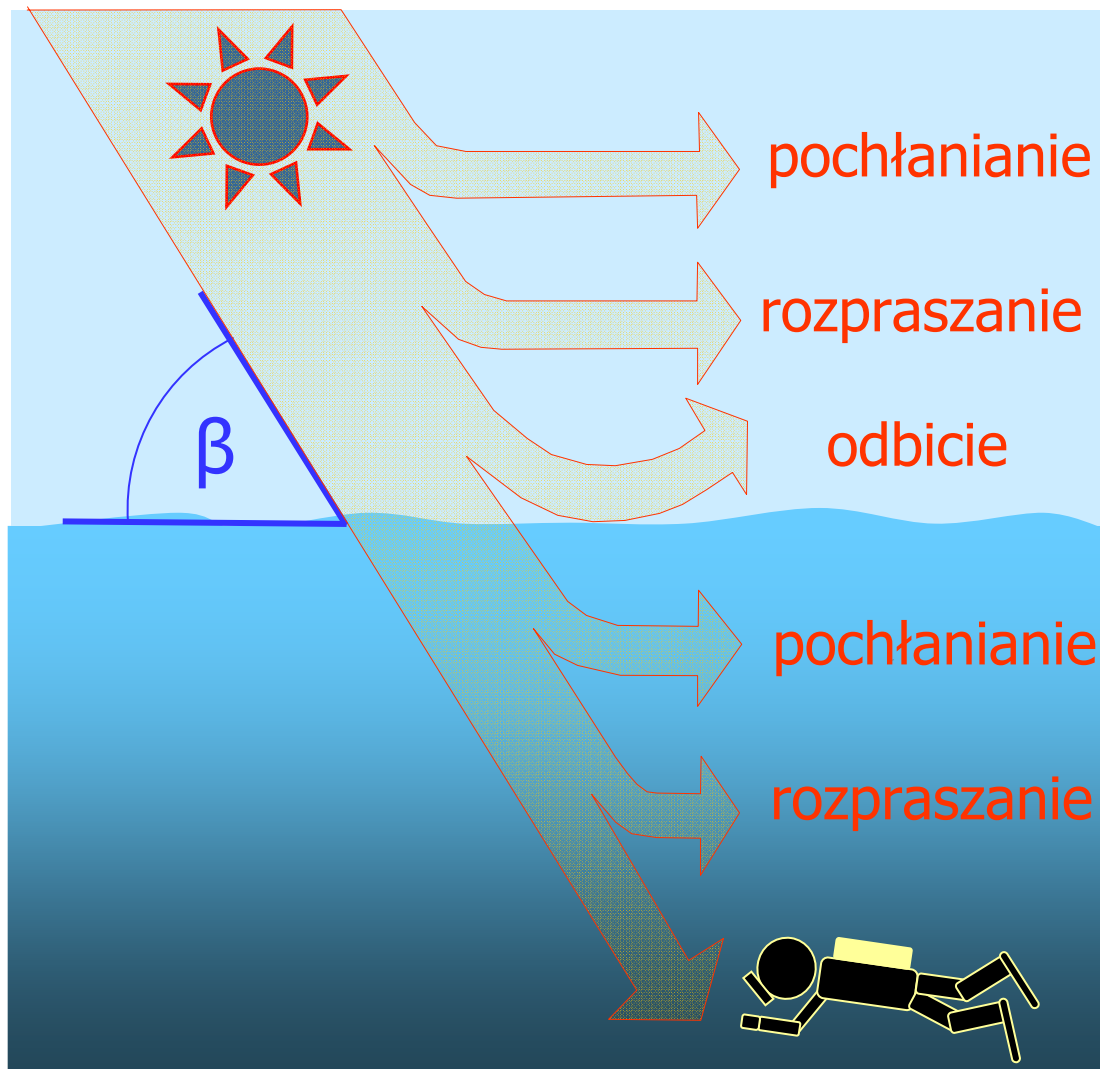
Stężenie gazu rozpuszczonego w cieczy, znajdującego się w równowadze z fazą gazową, jest proporcjonalne do ciśnienia

Stężenie rozpuszczonego w cieczy gazu zależy również od:

- rodzaju gazu i cieczy,
- temperatury układu,
- czasu ekspozycji.



## Straty światła słonecznego w atmosferze i wodzie



Ilość światła odbitego od powierzchni wody zależy od kąta jego padania na lustro wody:

dla  $\beta=40^\circ$  odbicie 5%

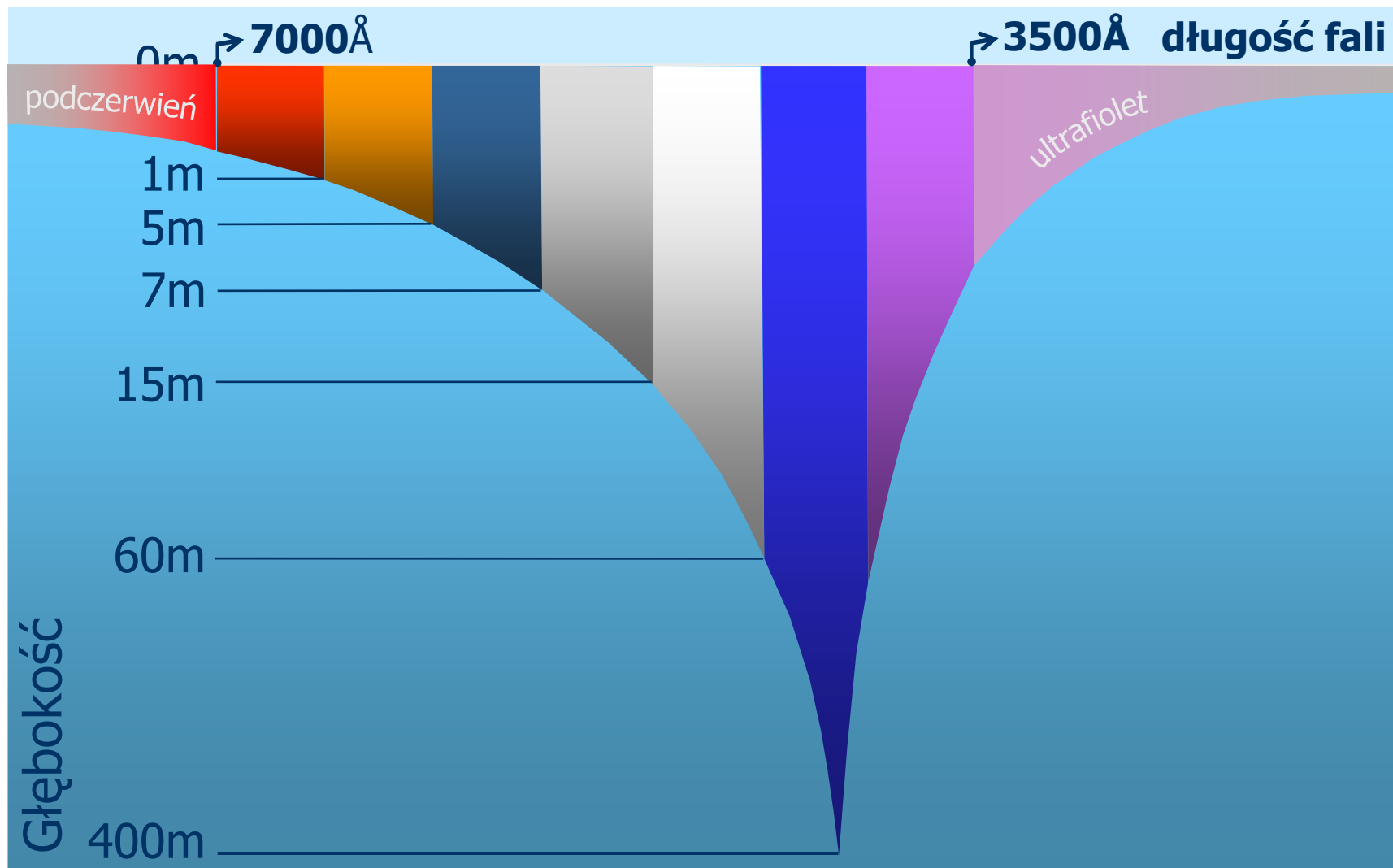
dla  $\beta= 5^\circ$  odbicie 40%

Wniosek:

Pod wodę dociera mało światła, a o zmierzchu gwałtownie robi się ciemno.

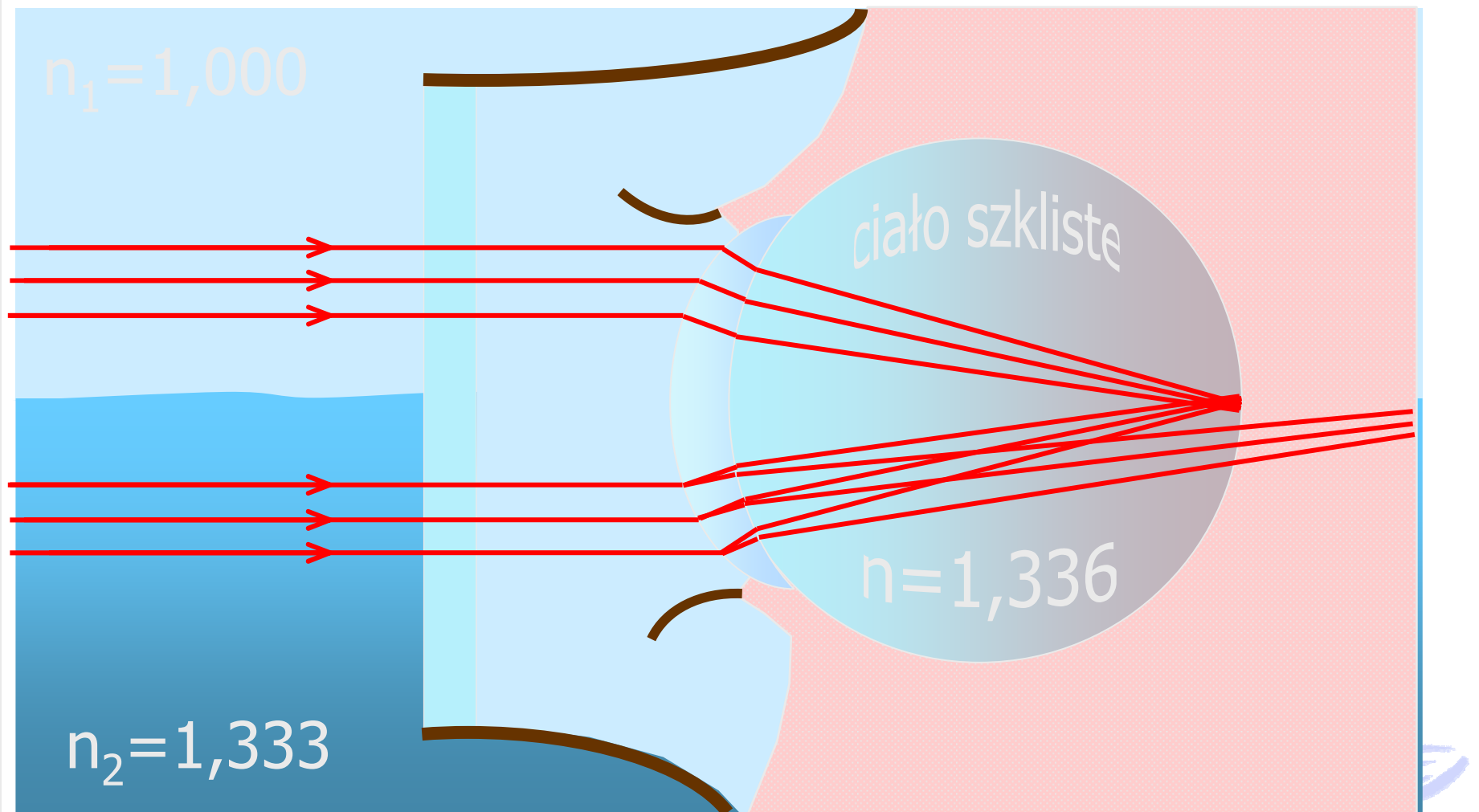
Warto więc na wieczorne nurkowania zabierać latarkę.

# Tłumienie promieniowania widzialnego w wodzie



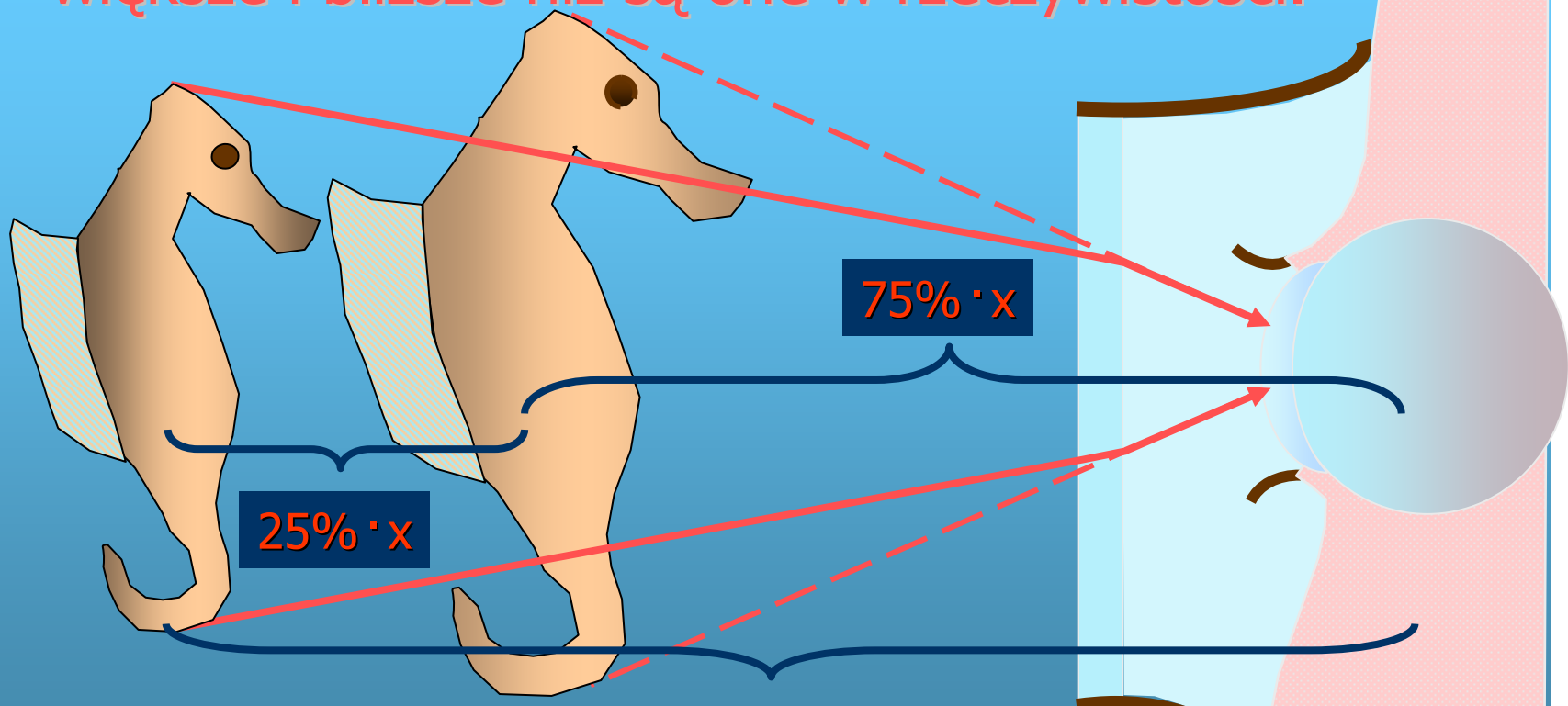


# Jak widzimy w wodzie?



# Jak widzimy w wodzie?

W masce nurkowej obiekty pod wodą widzimy większe i bliższe niż są one w rzeczywistości.



Niech np.  $x = 1,33\text{m}$

Wówczas odległość obrazu pozornego wyniesie:  $1,33 \text{ m} \cdot 75\% \approx 1\text{m}$

## Upośledzenie słuchu – propagacja fal akustycznych

---

Prędkość rozchodzenia się fal akustycznych w wodzie jest pięciokrotnie większa niż w powietrzu i wynosi:  
1500 m/s.

Prędkość ta jest na tyle duża, że nie możemy rozróżnić czasu, w jakim dźwięk dochodzi do poszczególnych uszu i w efekcie nie potrafimy ustalić kierunku źródła dźwięku.

Nieściśliwość wody powoduje, że fale akustyczne rozchodzą się szybko i na duże odległości.

Sz szczególnie niebezpieczne są dla nurka fale pochodzące od echosond i podwodnych wybuchów.

Dźwięk praktycznie nie przekracza granicy woda-powietrze.



# Wychładzanie organizmu człowieka w wodzie

---

Przewodnictwo cieplne wody jest 25 razy większe od przewodnictwa cieplnego powietrza.

Powoduje to szybką utratę ciepła człowieka w wodzie.

Prędkość wyrównywania temperatur jest wprost proporcjonalna do różnicy temperatur ciał.

Spowalnimy wychłodzenie ciała używając izolacji cieplnej, jaką stanowią skafandry nurkowe.



# Materiały dodatkowe

---

- Skrypt klubowy (m.in. zadania)
- Rozszerzona wersja prezentacji
  - [http://www.krab.agh.edu.pl/materialy/fizyka\\_nurkowania.rar](http://www.krab.agh.edu.pl/materialy/fizyka_nurkowania.rar)
- Nurkomania podręcznik
  - [http://www.nurkomania.pl/nurkowanie\\_podrecznik.htm](http://www.nurkomania.pl/nurkowanie_podrecznik.htm)
- G.Zieleniec „Nurkowanie”

