Wprowadzenie do SI

prof. dr hab. inż. Bożena Kostek (p. 731)
LAF/KSM WETI, PG

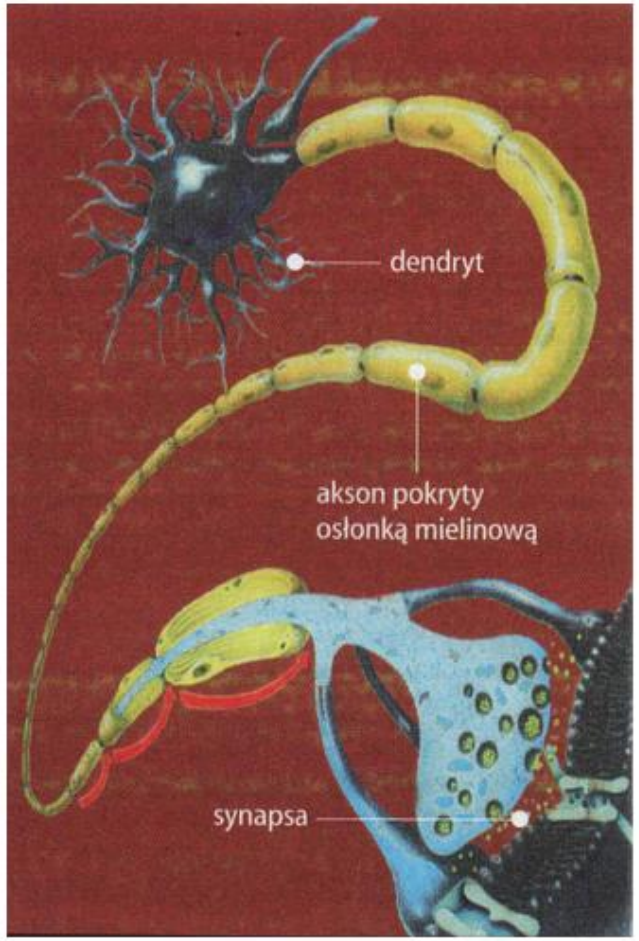
bozena.kostek@pg.edu.pl
wprowadzenie_SI@multimed.org

Wprowadzenie do sztucznej inteligencji

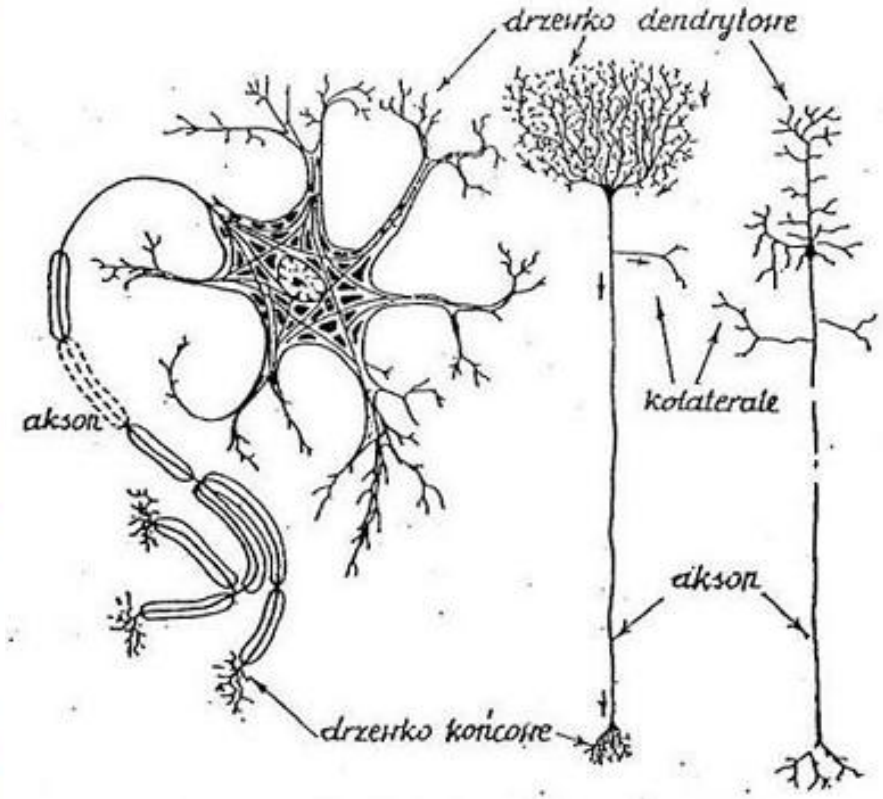
Podstawy SI

- Materiały do wykładu:
- http://galaxy.uci.agh.edu.pl/~vlsi/AI/wstep/
- http://www.neurosoft.edu.pl/media/pdf/tkwater/nowoczesne_techniki_informatyczne/ssn.pdf
- E. Walsh, Fizjologia układu nerwowego, PZWL, Warszawa, 1966.
- J. Renowski, Politechnika Wrocławska

Budowa komórki nerwowej (analogia do neuronu)



Źródło: prezentacja J. Renowski, Pol. Wrocławska



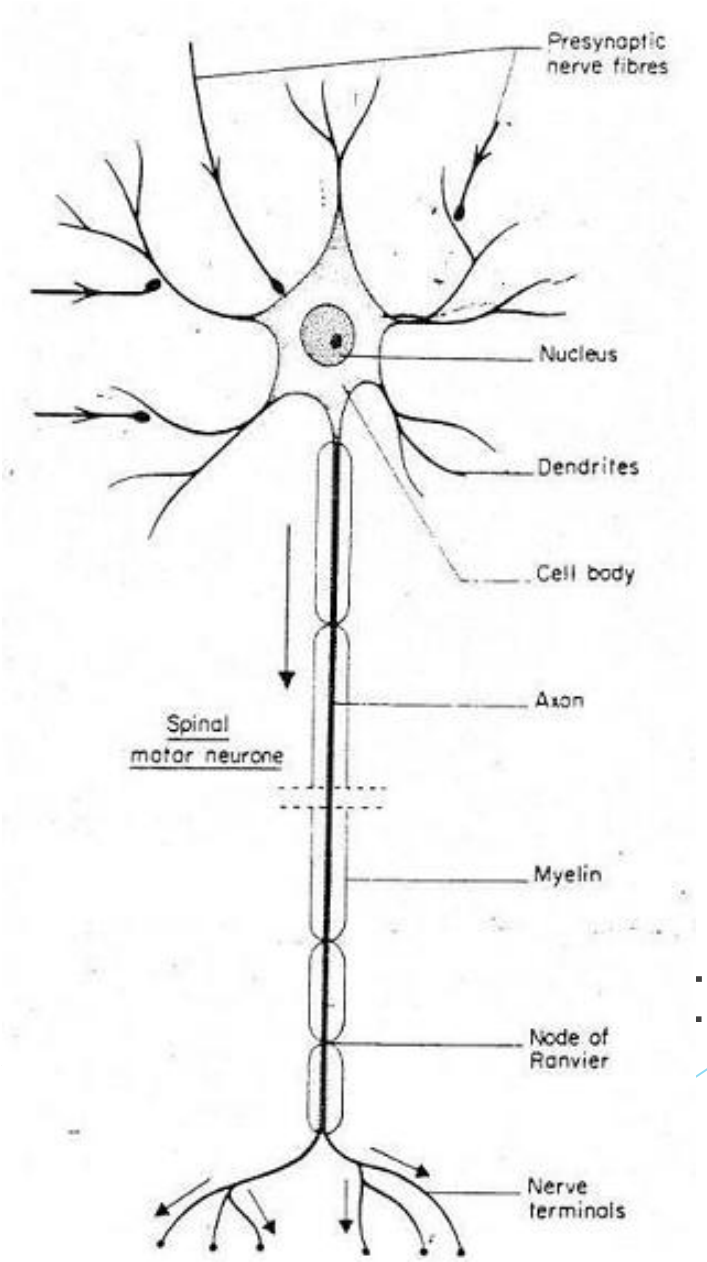
Różnice w kształcie komórki nerwowej wynikają z funkcji, jaką pełni oraz od miejsca występowania np. komórki układu obwodowego mają dłuższy akson.

E. Walsh, Fizjologia układu nerwowego, PZWL, Warszawa, 1966.

Budowa komórki nerwowej

- Część odbiorcza:
  - drzewo dendrytowe,
- Część przewodząca:
  - akson (neuryt),
- Część nadawcza:
  - zakończenia nerwowe

z synapsami.

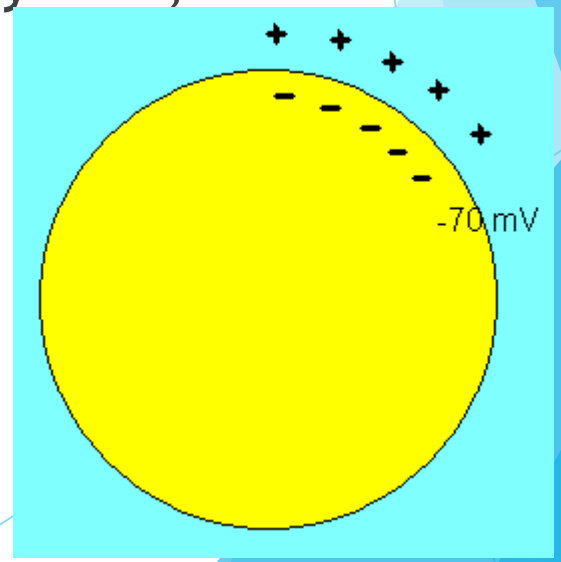


∴. Walsh, Fizjologia układu nerwowego, PZWL, Warsza

Właściwości komórki nerwowej

- Błona komórkowa – **grubość od 50 do 100 Å**
- Istnieje pewna **różnica potencjałów**, po obu stronach błony, czyli na błonie panuje pewne napięcie elektryczne, zwane napięciem na błonie.
- **Różnica potencjałów**

  to ok. 60-90 mV



Właściwości komórki nerwowej

- Pod wpływem określonych bodźców (elektro-chemicznych) powstają pewne złożone, ale krótkotrwałe procesy elektro-chemiczne rozchodzące się wzdłuż powierzchni błony. Te przebiegi nazywa się **potencjałami czynnościowymi**.

Właściwości komórki nerwowej

- **Błoną komórkową rządzą cztery zjawiska:**

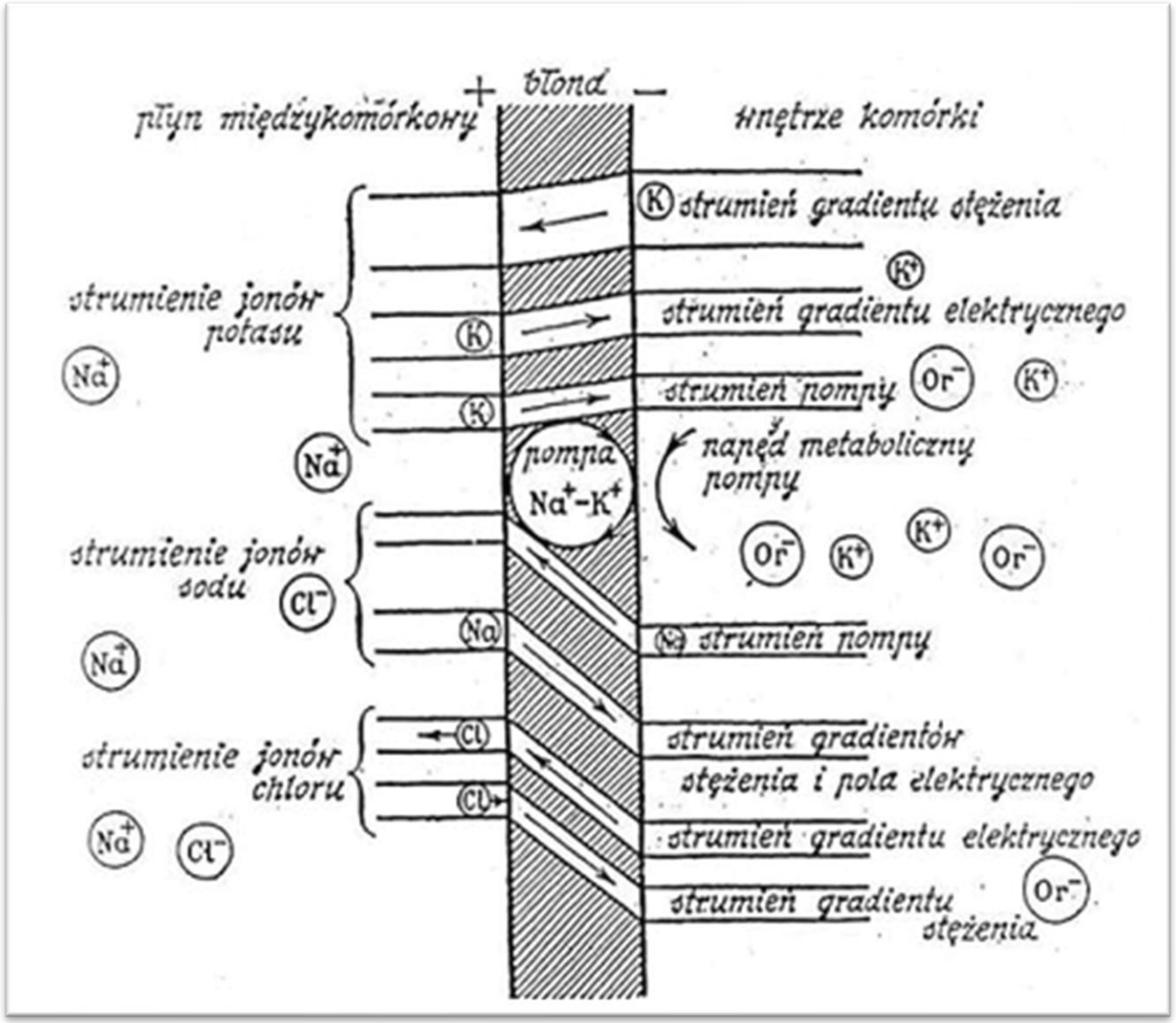
I. Różnica stężenia różnych jonów powoduje ich ruch wzdłuż **gradientu stężeń** tych jonów.
II. Istnieje **selektywność błony** polegająca na różnej zdolności przepuszczania różnych jonów.
III. Możliwy jest ruch jonów pod wpływem pola elektrycznego – **gradient ładunku**.
IV. Istnieje aktywny transport jonów sodu i potasu przez błonę w kierunku przeciwnym do gradientu stężeń: **pompa sodowo-potasowa**.

Właściwości komórki nerwowej

- W stanie ustalonym (spoczynku) przepuszczalność błony jest większa dla jonów potasu i chloru niż dla jonów sodu. Temu zjawisku przeciwdziała strumień pompy.

- Błona komórkowa chroni przed dyfuzją jonów oraz elektrycznymi zależnościami – gradientem stężeń.

Pompa sodowo-potasowa



E. Walsh, Fizjologia układu nerwowego, PZWL, Warszawa, 1966.

Pompa sodowo-potasowa

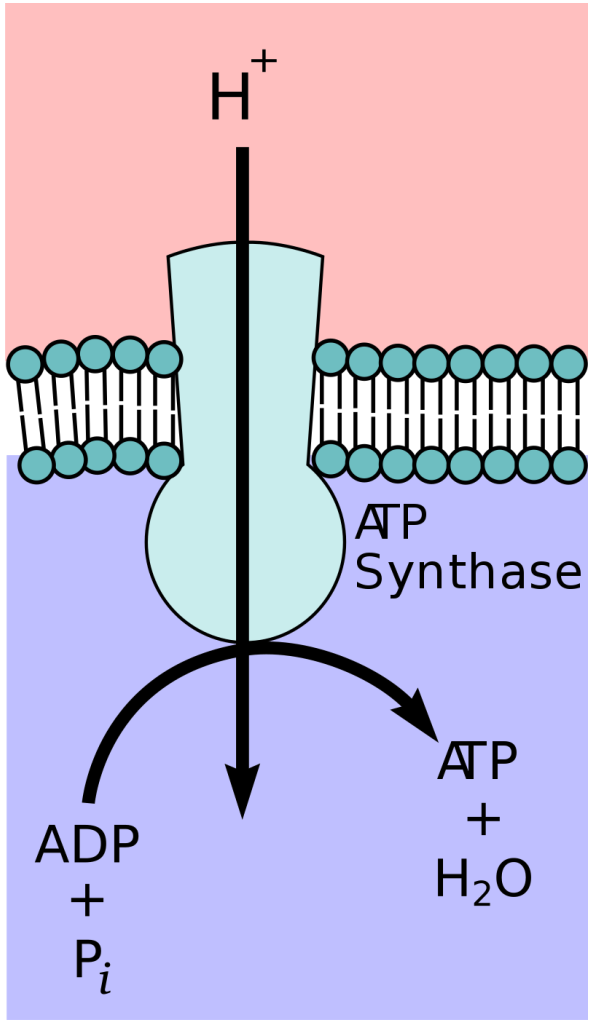
- Pompa jonowa jest to aktywny mechanizm utrzymujący duże stężenie jonów potasu i małe jonów sodu wewnątrz komórki.
- Transmisja jonów wbrew gradientowi stężeń: jony Na^+ na zewnątrz, a jony K^+ do wewnątrz komórki. Do tego celu wykorzystywana jest energia z cząsteczki ATP.
- ATP - **Adenozyno-5'-trójfosforan** (**ATP**) – organiczny związek chemiczny, nukleotyd adeninowy zbudowany z grupy trifosforanowej przyłączonej w pozycji 5' cząsteczki adenozyny, tworząc bezwodnik kwasu fosforowego[2]. Odgrywa ważną rolę w biologii komórki, jako wielofunkcyjny koenzym i molekularna jednostka w wewnątrzkomórkowym transporcie energii[3].

wikipedia.org

Pompa sodowo-potasowa

- Pompa sodowo-potasowa jest to przykład mechanizmu aktywnego transportu. Transport ten polega na "przepompowywaniu" cząstek z obszaru o niższym stężeniu do obszaru o stężeniu wyższym (wbrew malejącemu gradientowi stężenia), energii zakumulowanej w tym gradiencie nie można wykorzystać, konieczne jest zatem dostarczenie jej z innego źródła (często jest nim ATP).

Pompa sodowo-potasowa



By Mitochondriale_Elektronentransportkette.svg: Klaus Hoffmeierderivative work: Matt (talk) Mitochondriale_Elektronentransportkette.svg, Public Domain, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10616036

Akson

- Akson jest swoistym **odpowiednikiem przewodnika** w komórce nerwowej, którego zadaniem jest przesyłanie informacji z ciała komórki do zakończeń nerwowych.

- Neuryt otoczony jest **osłonką mielinową. Mielina** pełni funkcję **ochrony mechanicznej** oraz **izolatora elektrycznego** aksonu.

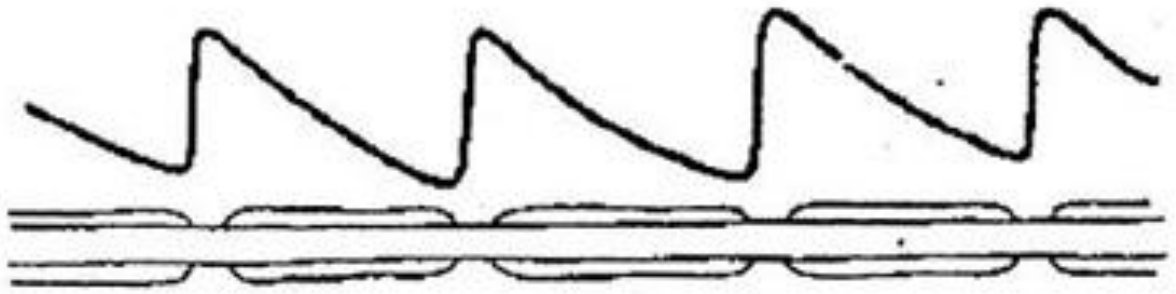
Akson

- Impuls nerwowy przechodzący przez osłonięty neuryt jest tłumiony. Tłumienność zależy od grubości włókna. Jednakże jego prędkość jest ogromna, gdyż jest izolowany.

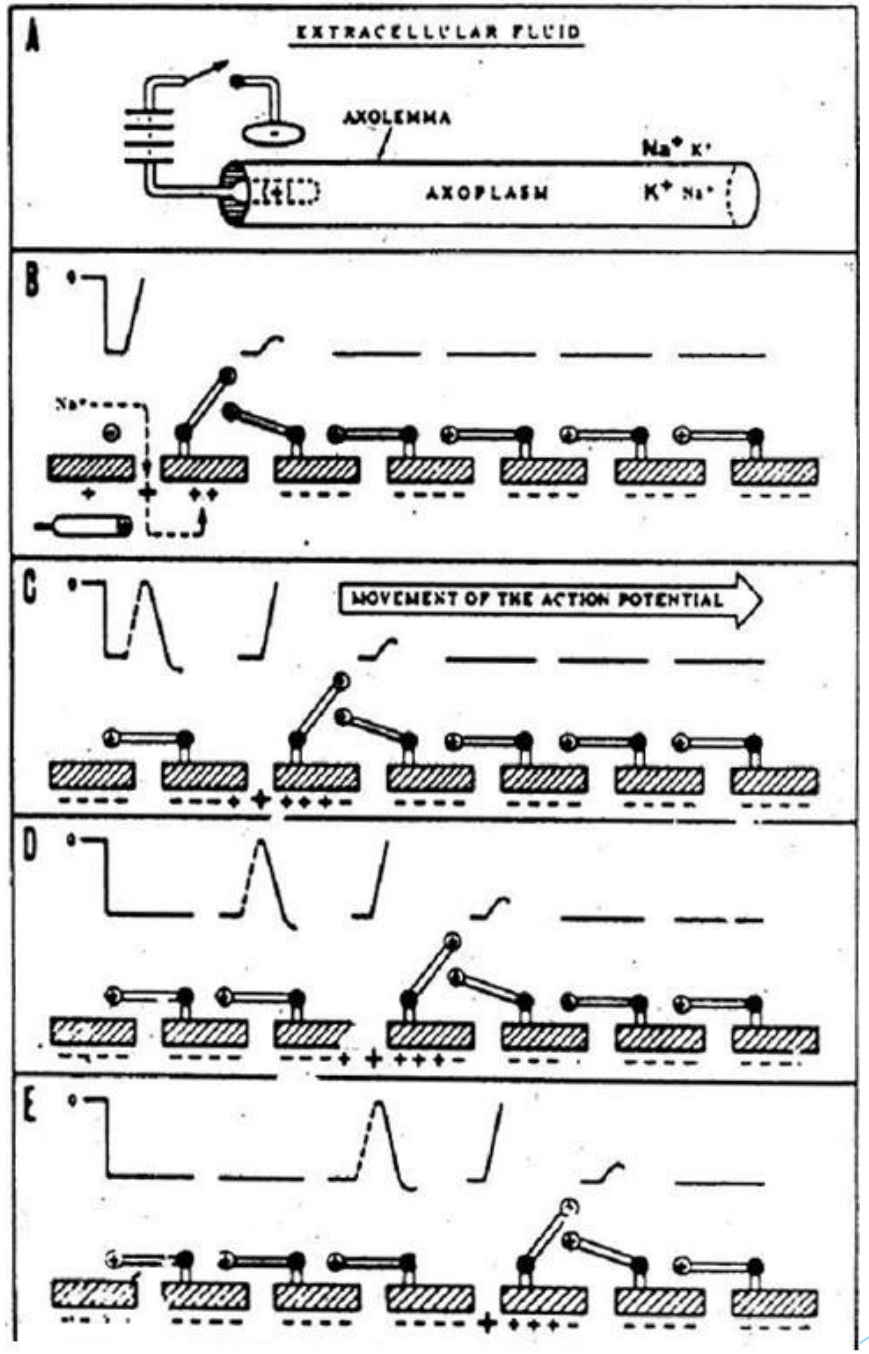
- Aby sygnał mógł się odnowić, co pewną odległość występują przewężenia – miejsca nieosłonięte mieliną – zwane **przewężeniami Ranviera.** Nie ma w nich mieliny, lecz duża liczba kanałów jonowych.

Akson

- W przewężeniu prędkość sygnału jest bardzo wolna, jednakże służą one temu, aby **impuls uległ regeneracji,** czyli powtórne



Rys. Rozkład amplitud przebiegów wzdłuż włókna zmielinizowanego



Rys. 12 Propagacja potancjałów.

Propagacja potencjałów czynnościowych

Akson

Włókno:	Prędkość:
grube	20 – 150 [m/s]
średnie	3 – 15 [m/s]
cienkie	0,5 – 2 [m/s]

	Tłumienie	Prędkość
Przewężenie Ranviera	małe	wolna
Akson otoczony mieliną	duże	duża

Dendryty

- Dendryty pełnią funkcję **odbiorczą** w neuronie. Przesyłają odebraną za pomocą **synaps** informację z innych neuronów do ciała komórki.

- Posiadają rozgałęzioną strukturę.

Synapsy

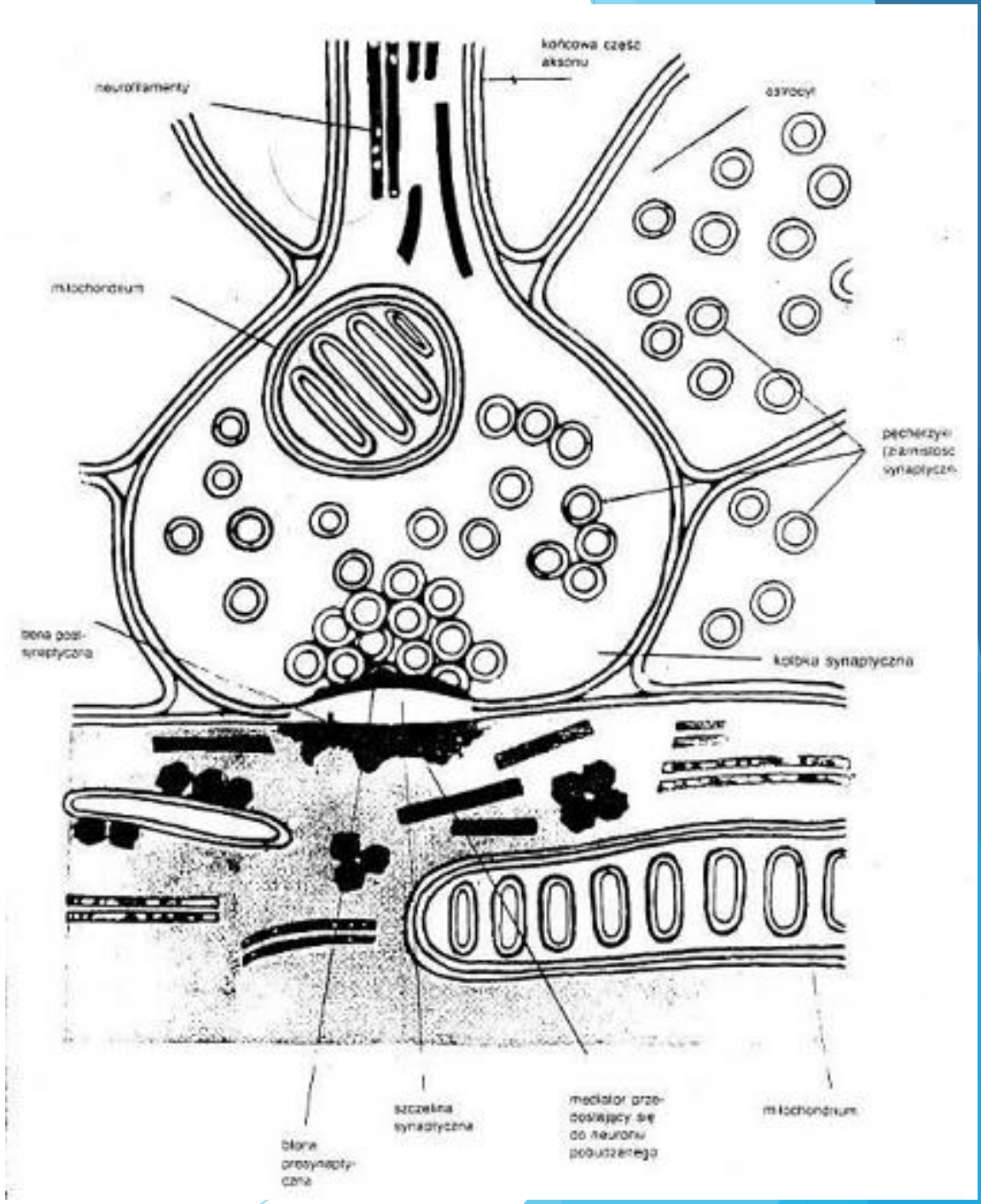
- Za ich pomocą odbywa się **przekazywanie i odbiór sygnałów elektrycznych** pomiędzy komórkami. Dzieje się to za pomocą określonej substancji chemicznej - **mediatora (neuroprzekaźnika)** np.: acetylocholiny.

Rys. J. Renowski, P. Wrocł.

Synapsy

Sygnał elektryczny dociera do synapsy, tam w pęcherzykach synaptycznych znajduje się **neuroprzekaźnik** . Zostaje on wydzielony do **szczeliny synaptycznej.**

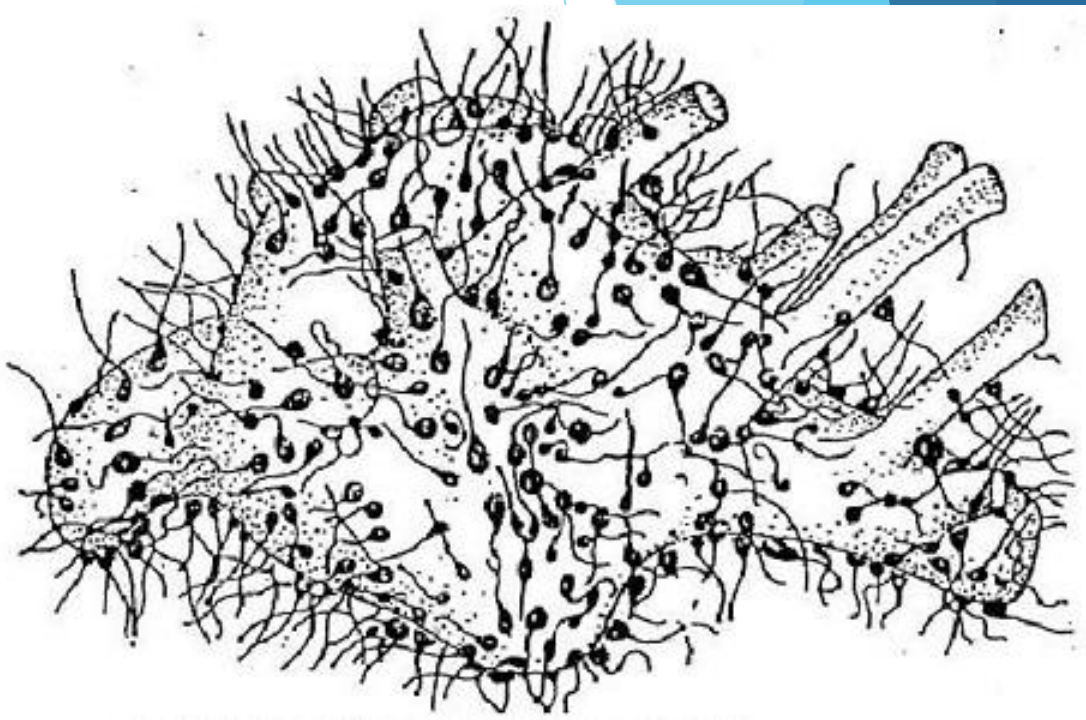
Od strony wydzielającej można wyróżnić **błonę presynaptyczną**, zaś po stronie odbiorczej **błonę postsynaptyczną**.



Rys. Budowa synapsy (E. Walsh, Fizjologia układu nerwowego, PZWL, Warszawa, 1966.)

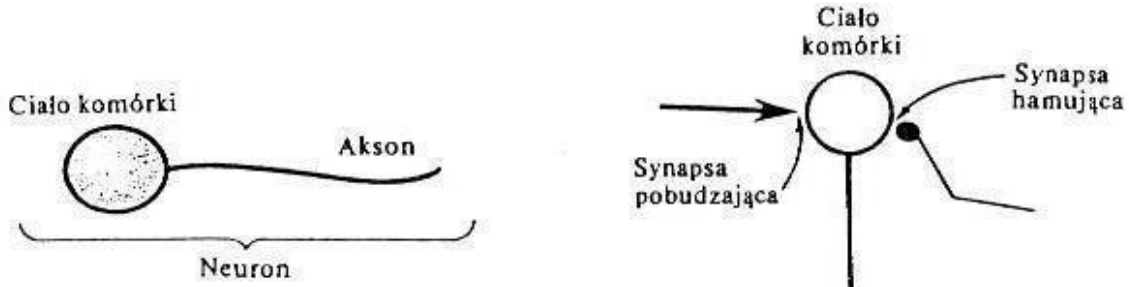
Synapsy

- Synapsy są gęsto ułożone na zakończeniach k. nerwowych. Jest ich bardzo dużo, ich działanie jest rozłożone w czasie (mediator rozkładany jest z pewną stałą czasową: 2 do 4 ms), z czego wynikają opóźnienia w zadziałaniu neuronu.
- Podczas przekazywania informacji nie działa jedna synapsa, lecz wiele. Stąd mówi się o sumowaniu: przestrzennym i czasowym bodźców.
- Rys. Przykład rozmieszczenia synaps na komórce nerwowej (E. Walsh, Fizjologia układu nerwowego, PZWL, Warszawa, 1966.)



Synapsy

- Wyróżnia się synapsy pobudzające i hamujące, które doprowadzają do stanu równowagi.



Rys. 9 Akson – synapsa.

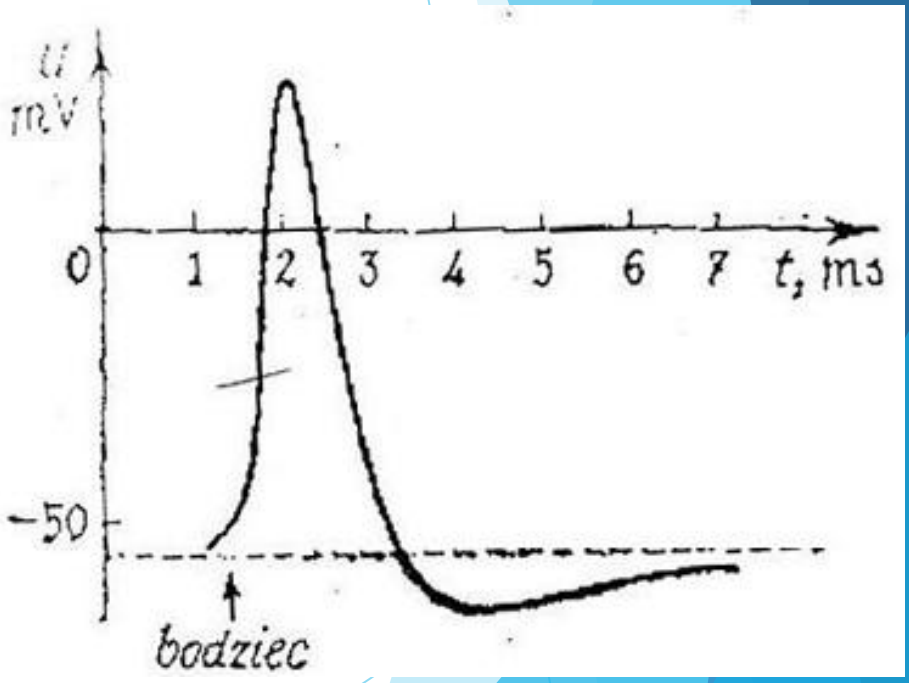
Średnica synapsy	0,5 – 2 [μm]
Szczelina synaptyczna	200 Å
Opóźnienie synaptyczne	0,5 [ms]
Czas przesłania informacji przez włókno nerwowe	0,5 – 12 [ms]

Synapsy

- Typowy akson neuronu łączy się z ok. 10 tys. synaps innych neuronów.
- Duża liczba synaps, z których łączy się każdy neuron, oznacza, że istnieje wiele składników w „sumie” wejść (tzw. sumowanie przestrzenne), którą „oblicza” każdy neuron.
- Oznacza to, że nawet jeśli wystąpią błędy w przekazaniu informacji, to mogą być nieistotne. Dlatego można oczekiwać, że taki system będzie odporny na błędy i nie będzie to miało wpływu na wydajność neuronu.

Potencjały

- **Potencjał spoczynkowy** – jest to różnica potencjałów na błonie komórkowej w stanie spoczynku komórki. Wynosi od -60 do -90 [mV].
- **Potencjał czynnościowy** – jest to chwilowa zmiana potencjału na błonie komórkowej.
- Potencjał czynnościowy trwa ok. 1 [ms] w przypadku komórki nerwowej
- Rys. Potencjał czynnościowey (E. Walsh, Fizjologia układu nerwowego, PZWL, Warszawa, 1966.)



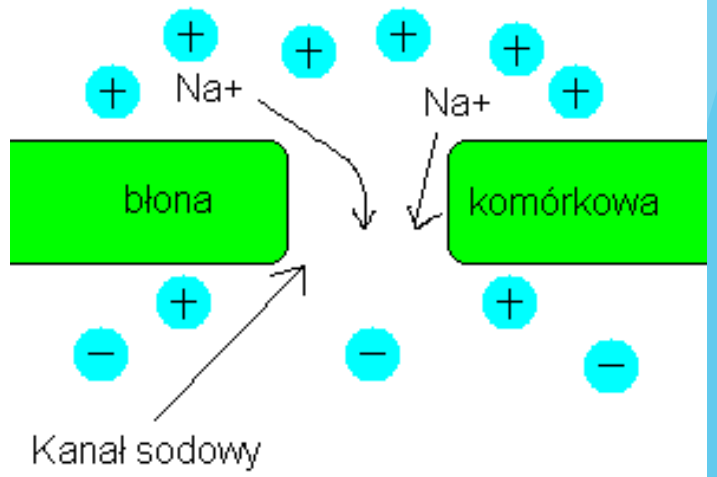
Różnice pomiędzy rozchodzeniem się bodźca w aksonie a pobudzeniem rozchodzącym się w synapsie

Pobudzenie aksonu to zjawisko określane w fizjologii "wszystko albo nic", polegające na tym, że bodziec, jeśli jest dostatecznie silny, wyzwala zawsze tę samą reakcję, jeśli jest zbyt słaby, nie jest w stanie nawet reakcji zapoczątkować.
W synapsie, każdy nadchodzący bodziec powoduje przejście na drugą stronę szczeliny synaptycznej pewnej porcji mediatora chemicznego. Synapsy przewodzą sygnał tylko w jednym kierunku — od aksonu jednej komórki do dendrytu drugiej.

wikipedia.org

Powstanie potencjału czynnościowego

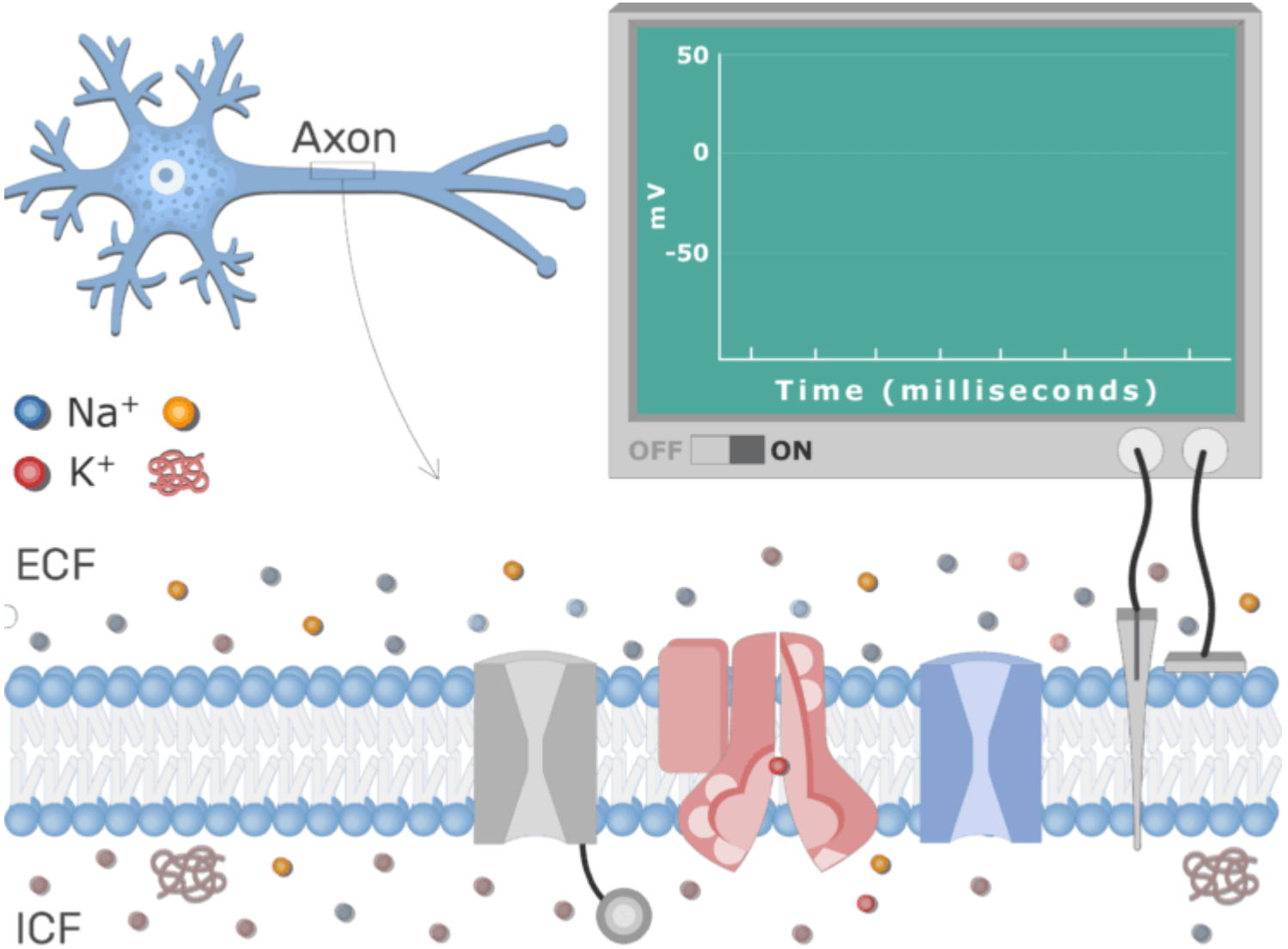
- Gdy pojawia się **potencjał czynnościowy** znikają bariery dla Na^+. Wnika on do wnętrza komórki zgodnie z gradientem stężeń.



- Dla potencjału czynnościowego wnętrze staje się bardziej dodatnie w wyniku wnikania jonów sodu. Faza, w której jony wnikają do środka to faza depolaryzacji.

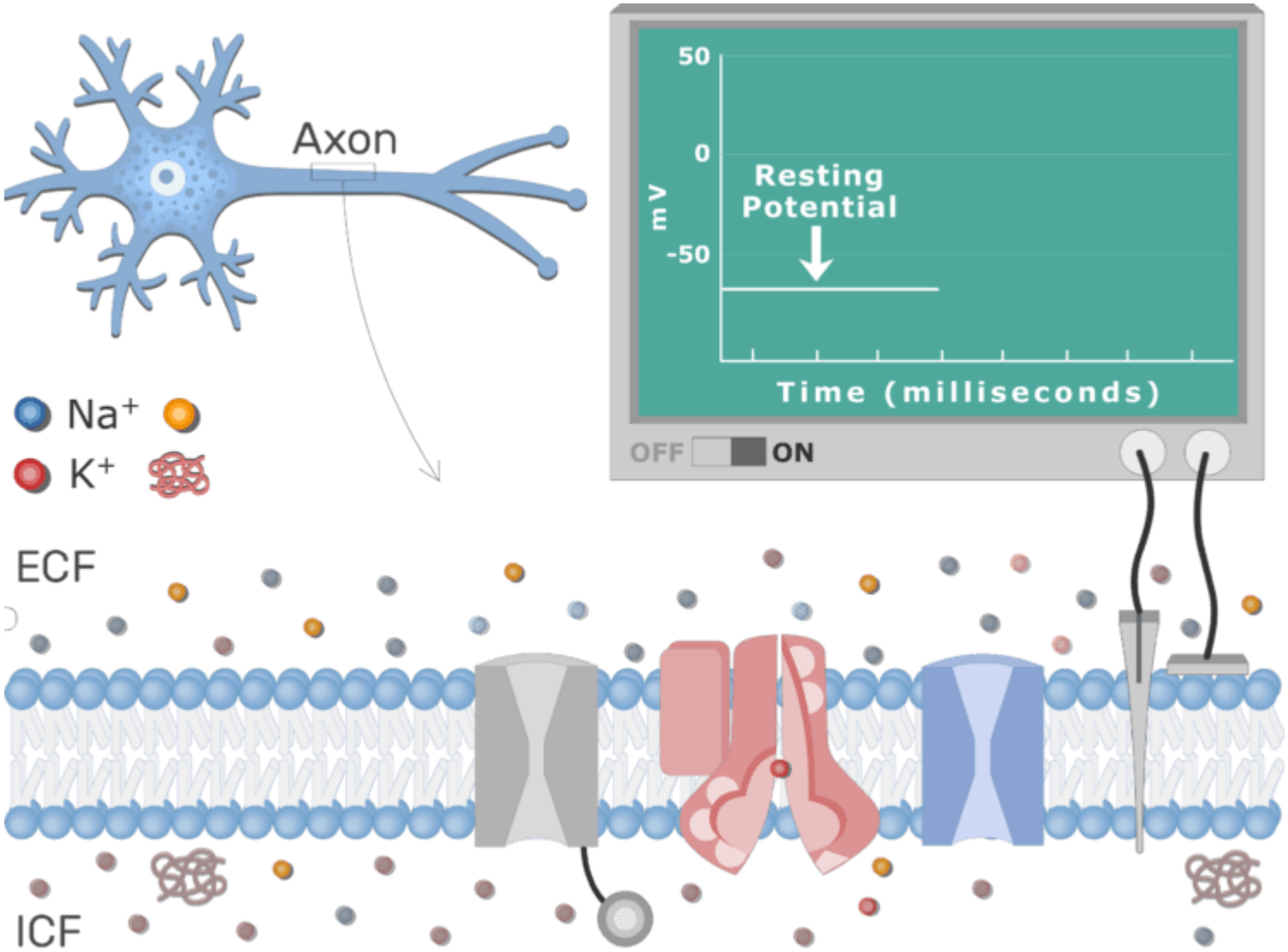
- Kolejnym etapem jest otwarcie kanałów potasowych. Te zmiany zachodzą wzdłuż aksonu – czyli pobudzenie – potencjał się przesuwa.

Powstanie potencjału czynnościowego



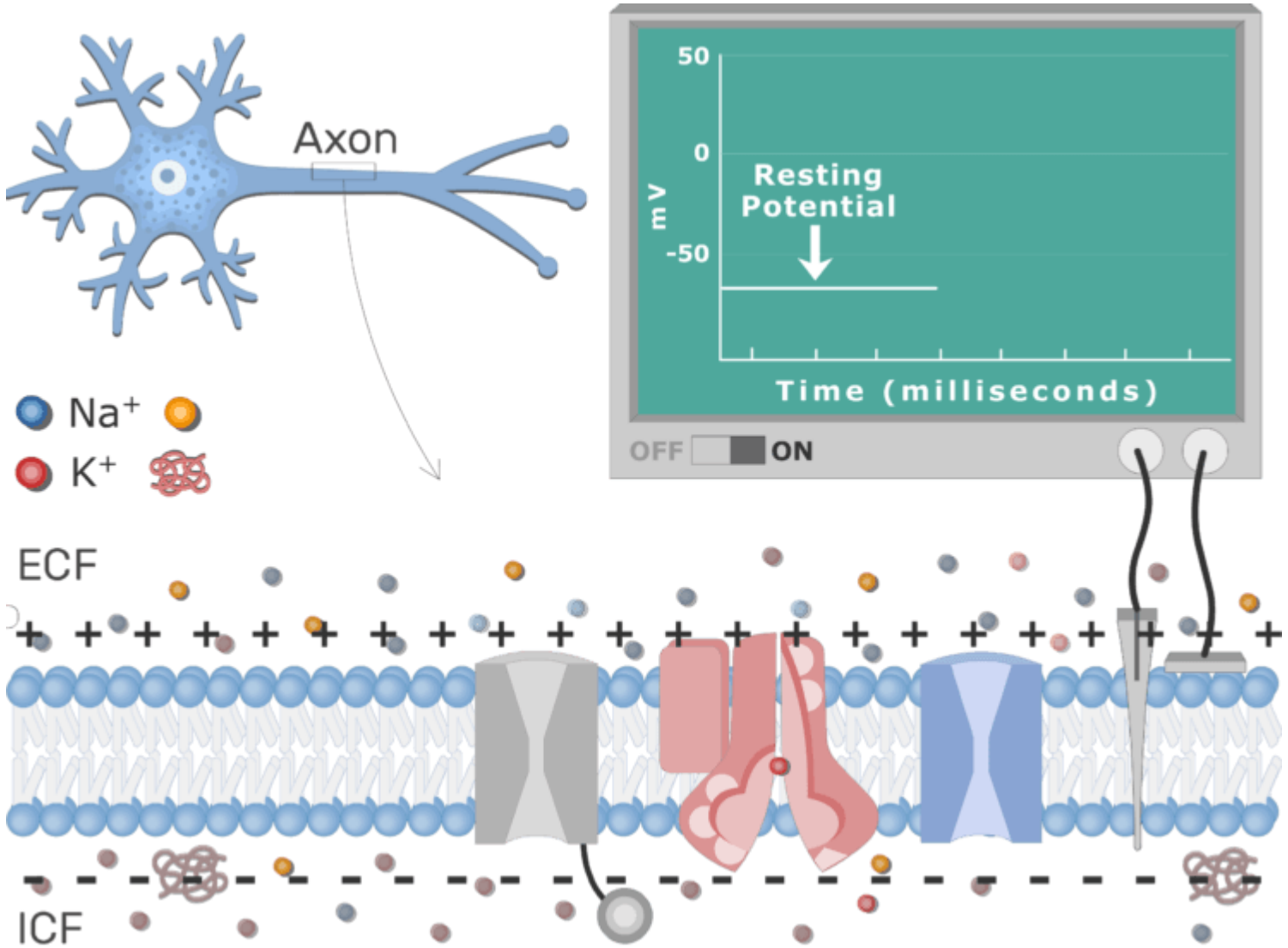
Powstanie potencjału czynnościowego (ilustracja); https://www.getbodysmart.com/nervous-system/action-potential-events

Powstanie potencjału czynnościowego



Powstanie potencjału czynnościowego (ilustracja); https://www.getbodysmart.com/nervous-system/action-potential-events

Powstanie potencjału czynnościowego

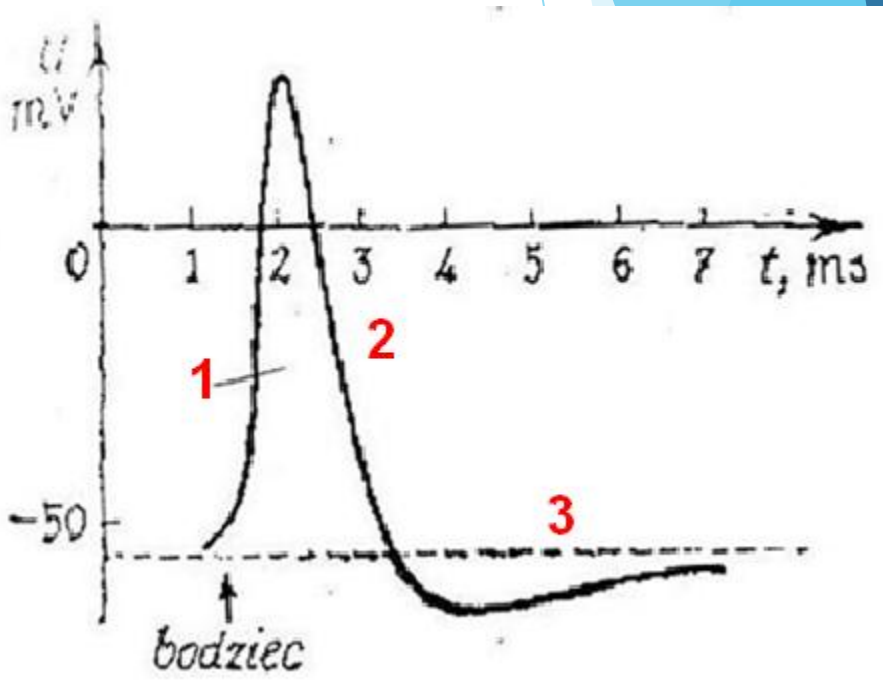


Powstanie poten
czynnościowego
(ilustracja);
https://www.geti ma
rt.com/nervous-
system/action-potential-
events

Potencjał czynnościowy

FAZY:

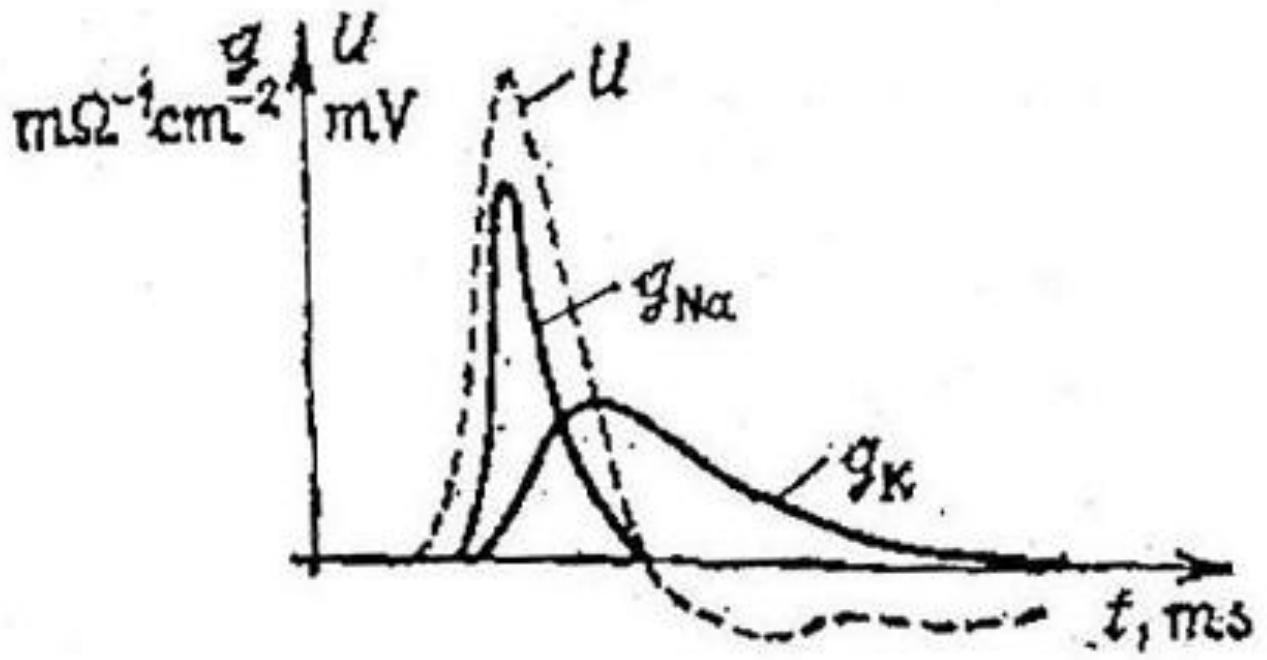
1. Depolaryzacja (narastanie potencjału)
2. Repolaryzacja
3. Polaryzacja



Rys. Potencjał czynnościowy w czasie

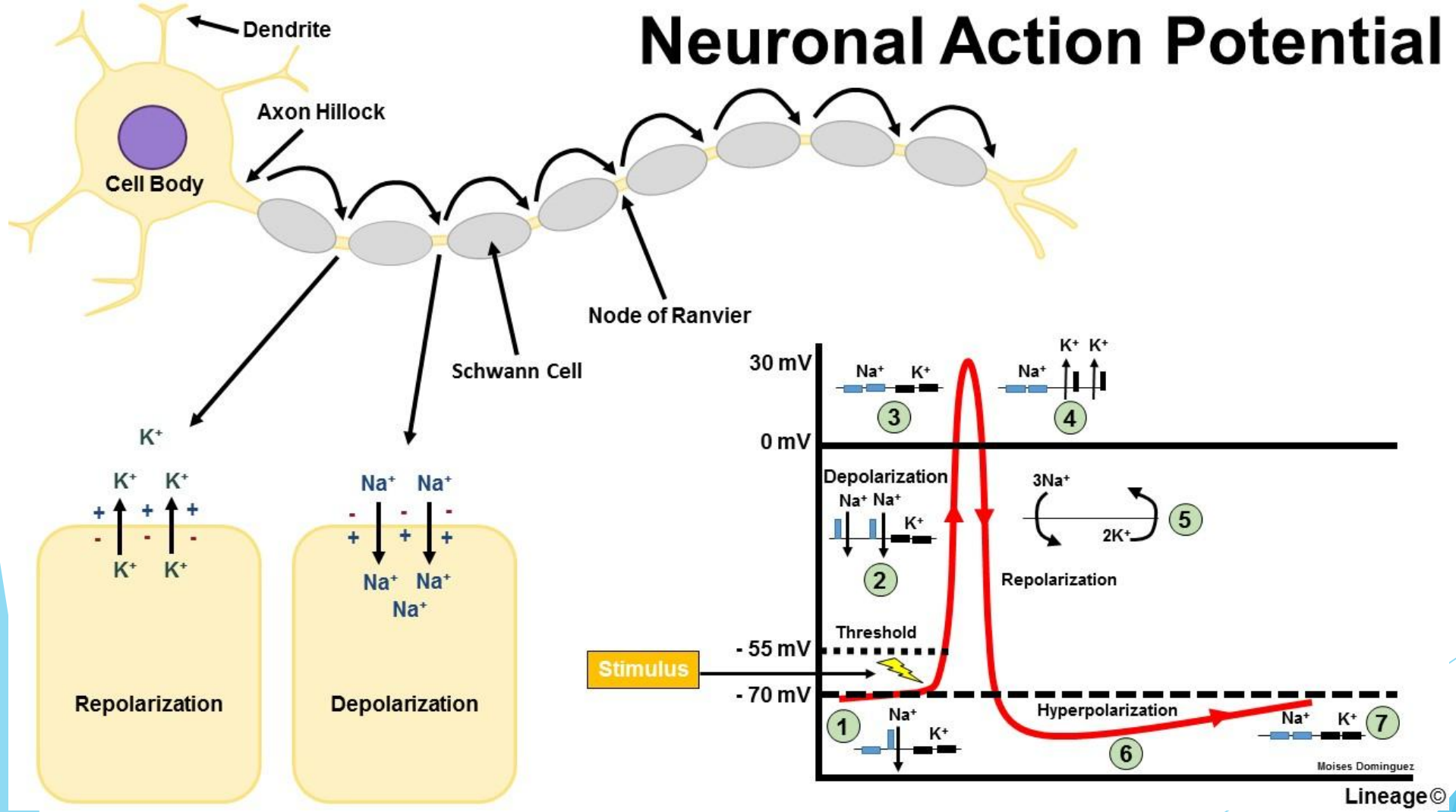
(E. Walsh, Fizjologia układu nerwowego, PZWL, Warszawa, 1966.)

Potencjał czynnościowy



Rys. Zmiany przewodności dla jonów sodu i potasu na tle przebiegu potencjału czynnościowego w czasie.

Rozchodzenie się potencjału czynnościowego w aksonie

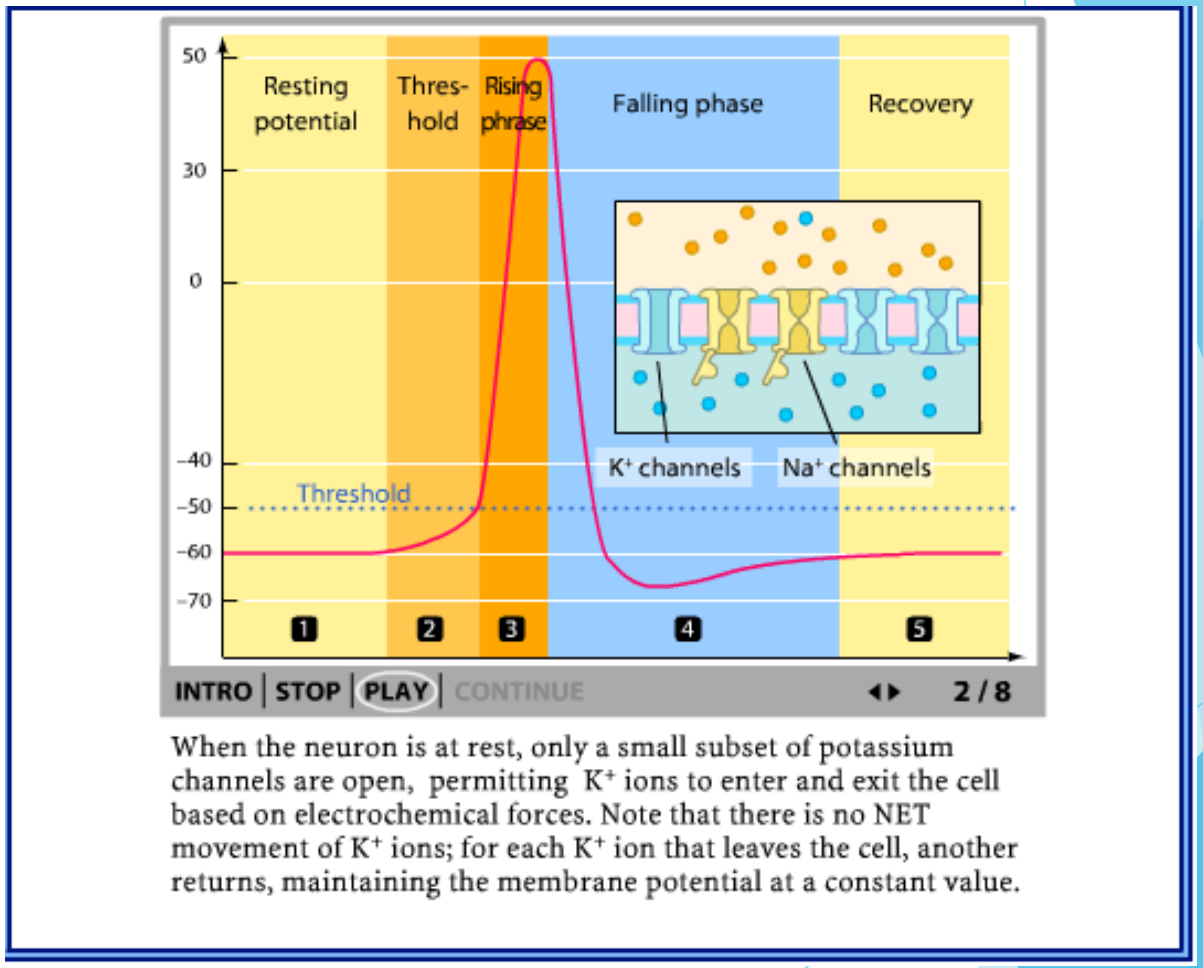


https://step1.medbullets.com/neurology/113052/action-potential-basics

Potencjał czynnościowy

FAZY budowania pot. czynnościowego:

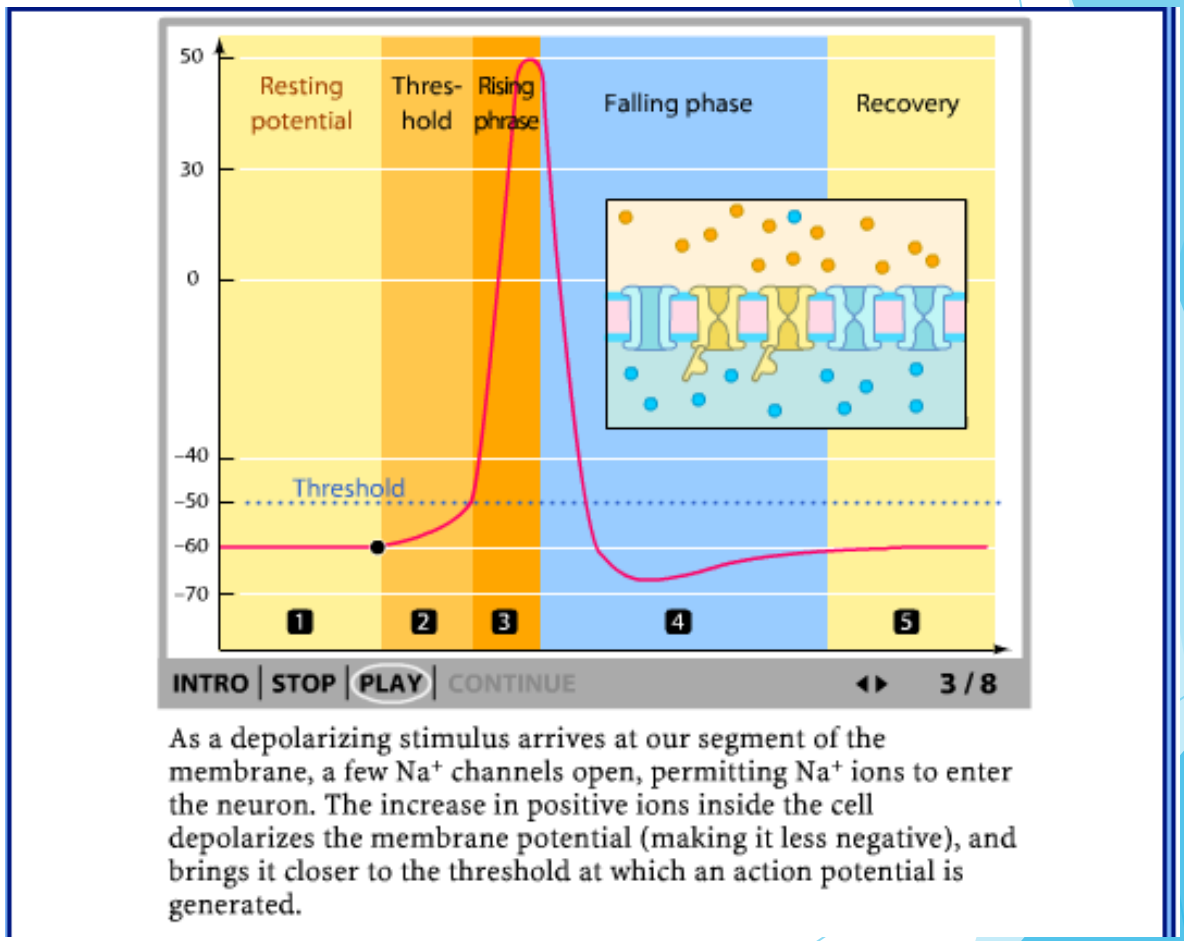
1. Potencjał spoczynkowy
2. Przekroczenie progu
3. Narastanie potencjału czynnościowego
4. Faza opadania potencjału
5. Powrót do stanu początkowego



Potencjał czynnościowy

FAZY budowania pot. czynnościowego:

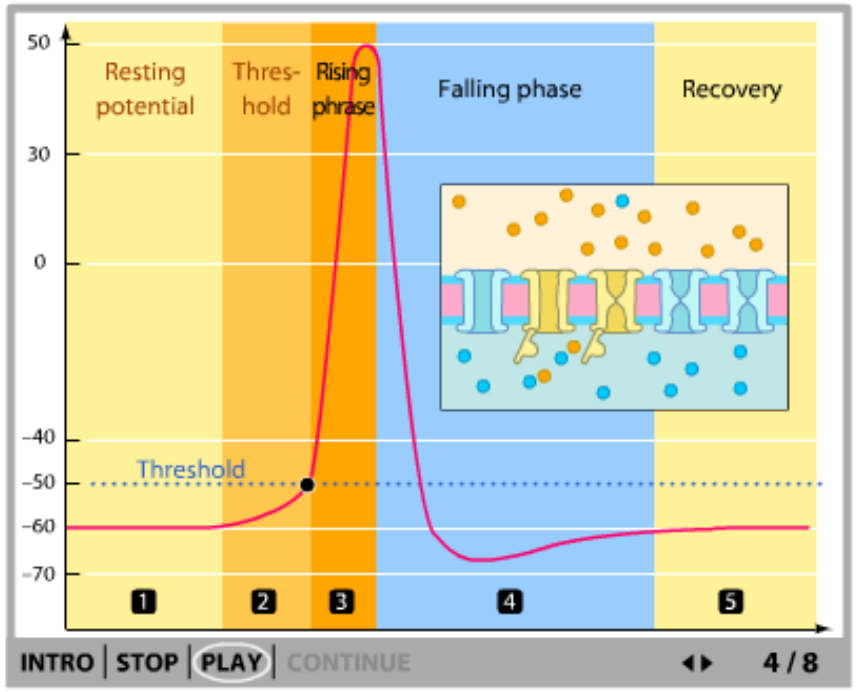
1. Potencjał spoczynkowy
2. Przekroczenie progu (*threshold*)
3. Narastanie potencjału czynnościowego
4. Faza opadania potencjału
5. Powrót do stanu początkowego



Potencjał czynnościowy

FAZY budowania pot. czynnościowego:

1. Potencjał spoczynkowy
2. Przekroczenie progu
3. Narastanie potencjału czynnościowego
4. Faza opadania potencjału
5. Powrót do stanu początkowego

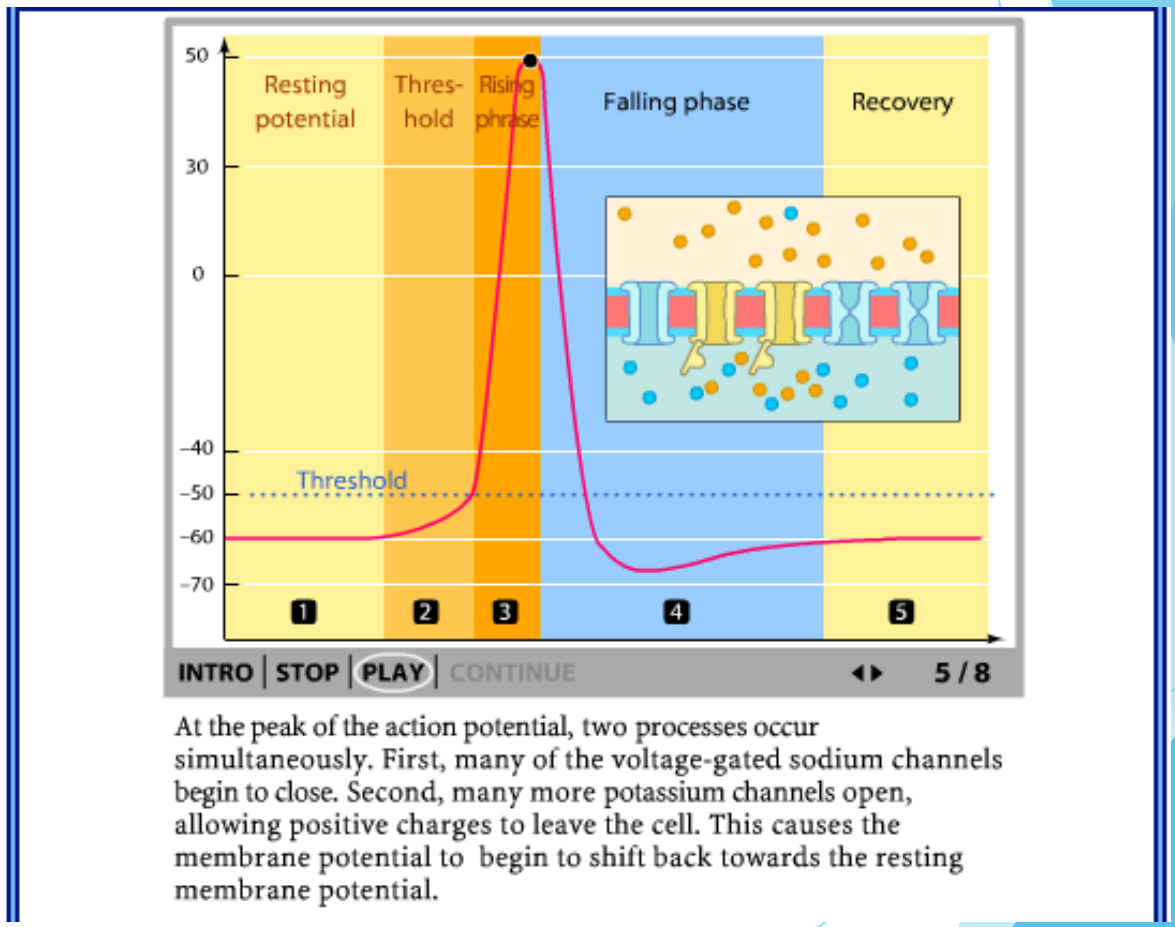


If the depolarization reaches the threshold potential, additional voltage-gated sodium channels open. As positive Na^+ ions rush into the cell, the voltage across the membrane rapidly reverses and reaches its most positive value.

Potencjał czynnościowy

FAZY budowania pot. czynnościowego:

1. Potencjał spoczynkowy
2. Przekroczenie progu
3. Narastanie potencjału czynnościowego
4. Faza opadania potencjału
5. Powrót do stanu początkowego

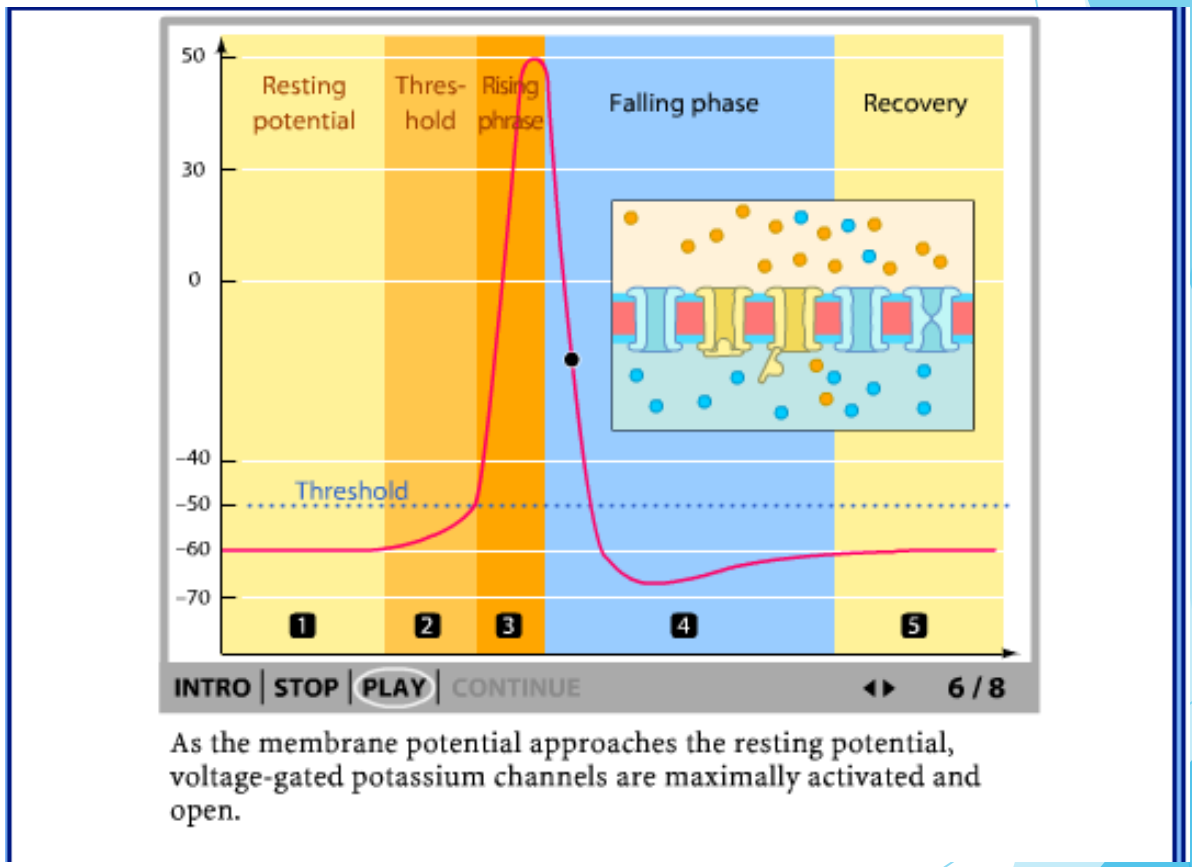


At the peak of the action potential, two processes occur simultaneously. First, many of the voltage-gated sodium channels begin to close. Second, many more potassium channels open, allowing positive charges to leave the cell. This causes the membrane potential to begin to shift back towards the resting membrane potential.

Potencjał czynnościowy

FAZY budowania pot. czynnościowego:

1. Potencjał spoczynkowy
2. Przekroczenie progu
3. Narastanie potencjału czynnościowego
4. Faza opadania potencjału
5. Powrót do stanu początkowego

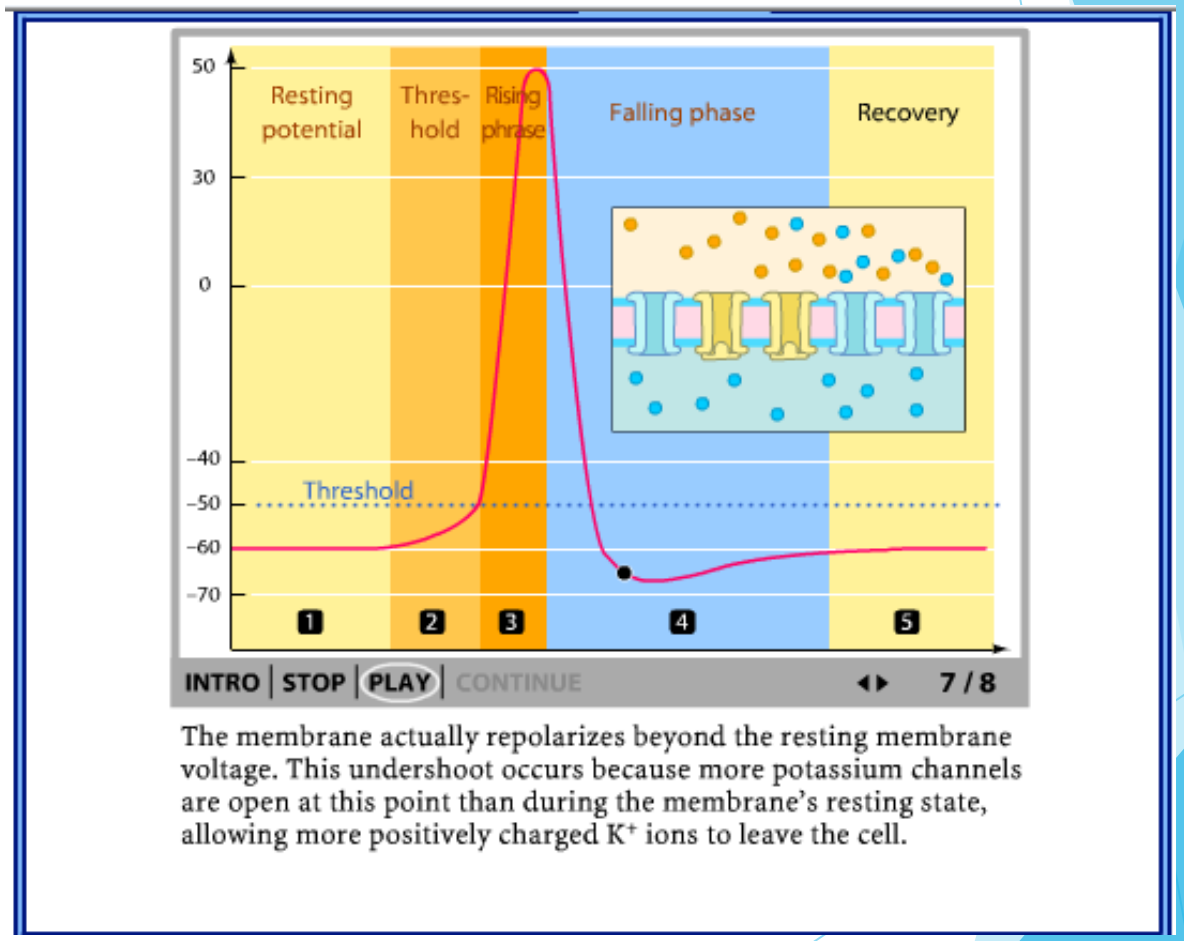


As the membrane potential approaches the resting potential, voltage-gated potassium channels are maximally activated and open.

Potencjał czynnościowy

FAZY budowania pot. czynnościowego:

1. Potencjał spoczynkowy
2. Przekroczenie progu
3. Narastanie potencjału czynnościowego
4. Faza opadania potencjału
5. Powrót do stanu początkowego

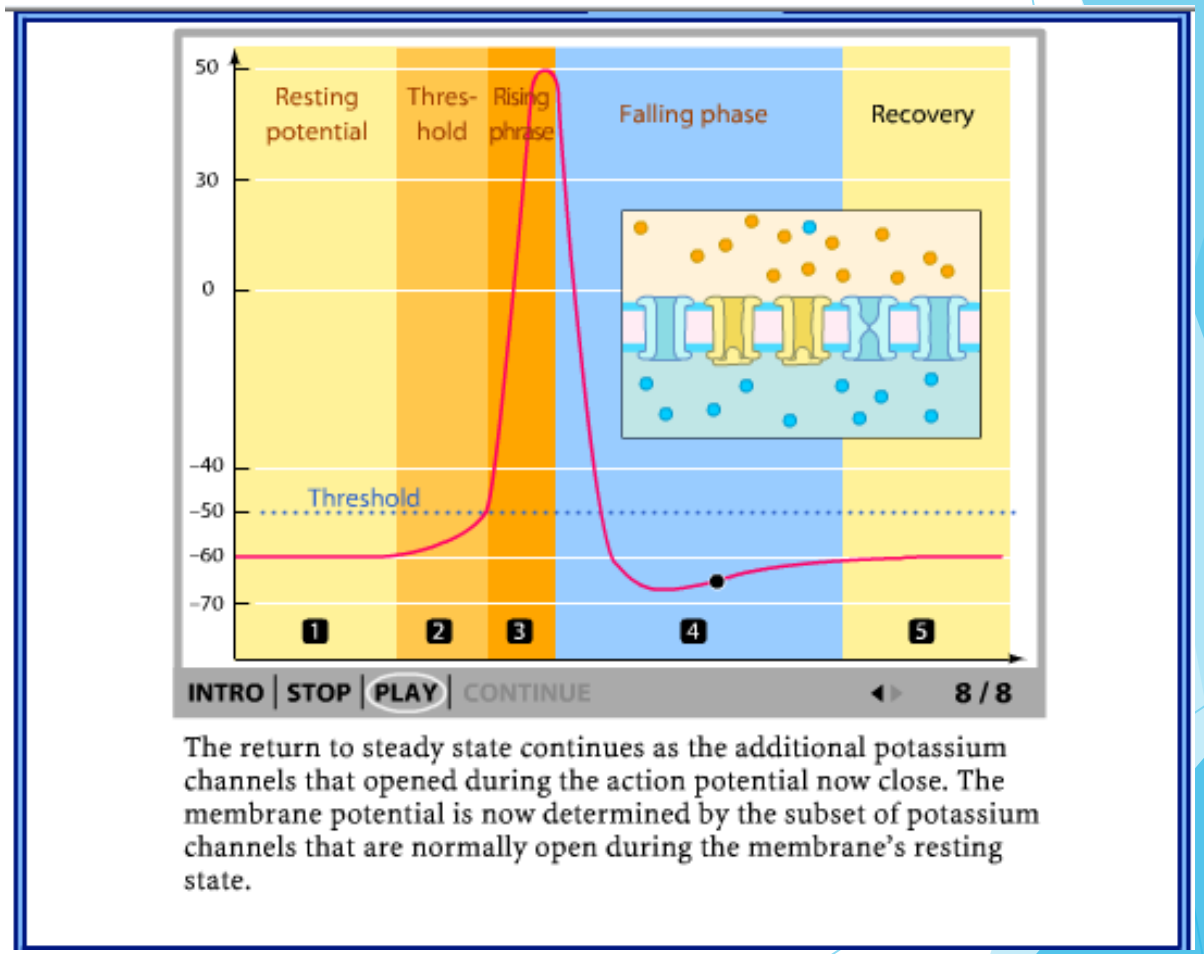


The membrane actually repolarizes beyond the resting membrane voltage. This undershoot occurs because more potassium channels are open at this point than during the membrane's resting state, allowing more positively charged K^+ ions to leave the cell.

Potencjał czynnościowy

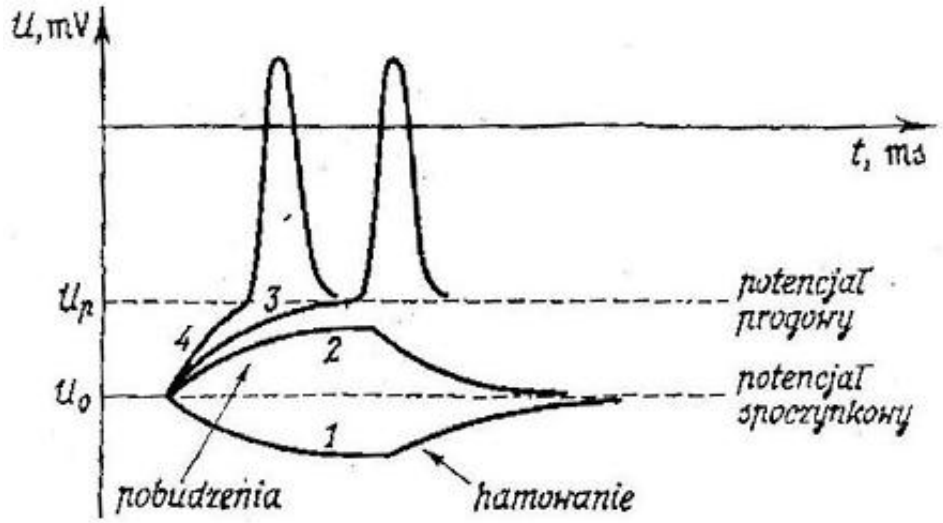
FAZY budowania pot. czynnościowego:

1. Potencjał spoczynkowy
2. Przekroczenie progu
3. Narastanie potencjału czynnościowego
4. Faza opadania potencjału
5. Powrót do stanu początkowego



The return to steady state continues as the additional potassium channels that opened during the action potential now close. The membrane potential is now determined by the subset of potassium channels that are normally open during the membrane's resting state.

Potencjał czynnościowy

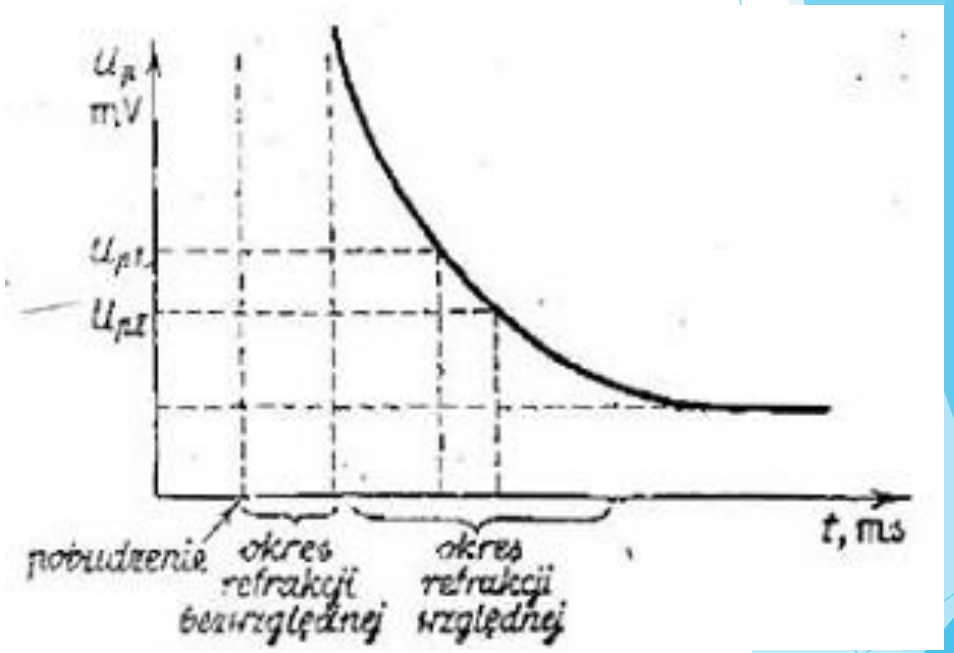


Rys. Przebieg sygnału dla różnych pobudzeń.

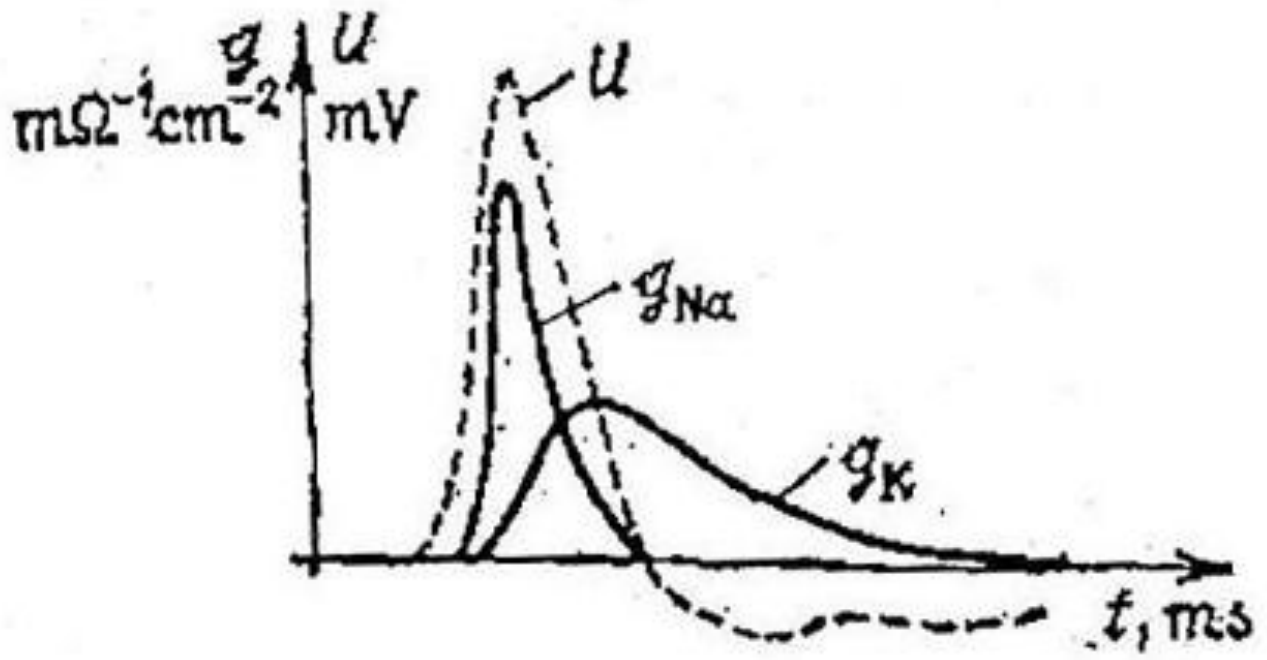
- Aby mógł się wytworzyć potencjał czynnościowy, pobudzenie musi przekroczyć **potencjał progowy Up.**

Potencjał czynnościowy

- W czasie **refrakcji bezwzględnej** nie może wytworzyć się potencjał czynnościowy.
- W czasie **refrakcji względnej** może się wytworzyć, jednakże pobudzenie musi przekroczyć podwyższone napięcie progowe.
- Refrakcja *zabezpiecza przed sumowaniem się* potencjałów cz. oraz zapewnia przewodzenie potencjału tylko w jednym kierunku.

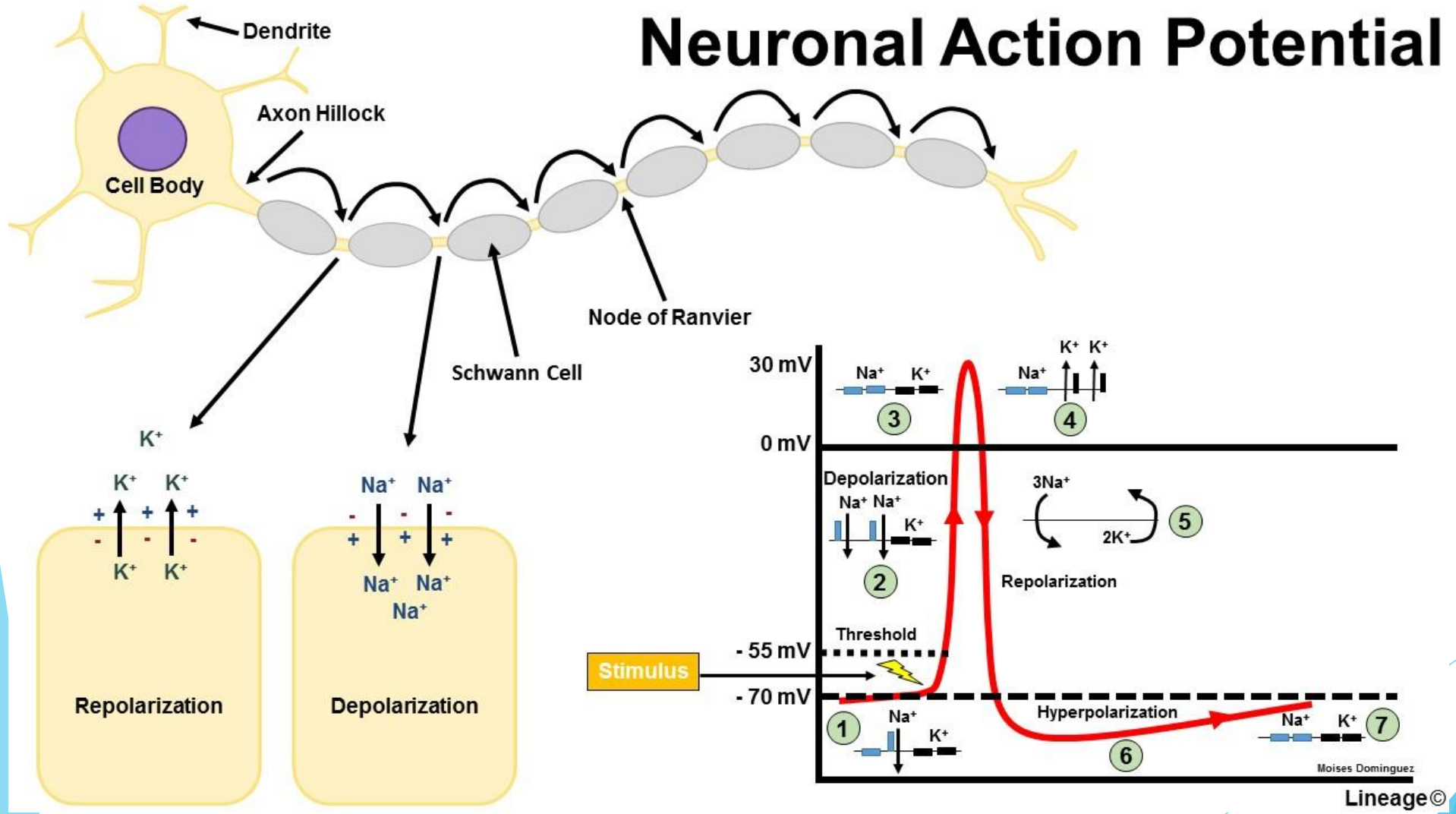


Potencjał czynnościowy



Rys. Zmiany przewodności dla jonów sodu i potasu na tle przebiegu potencjału czynnościowego w czasie.

Rozchodzenie się potencjału czynnościowego w aksonie



https://www.google.co
search?q=bcs+action+po
ntial&oq=bcs+action+po
ntial&gs_lcrp=EgZjaHJv
WUyBggAEEUYOTIHCAE
igATIHCAIQIRigAdIBCjEv
lyajBqMTWoAgiwAgHxBi
Eizd0zwL&sourceid=chr
e&ie=UTF-
8#fpstate=ive&vld=cid:
89496,vid:oa6rvUJlg7o,
0

Pobudzenie aksonu

Różnice pomiędzy rozchodzeniem się bodźca w aksonie a pobudzeniem rozchodzącym się w synapsie

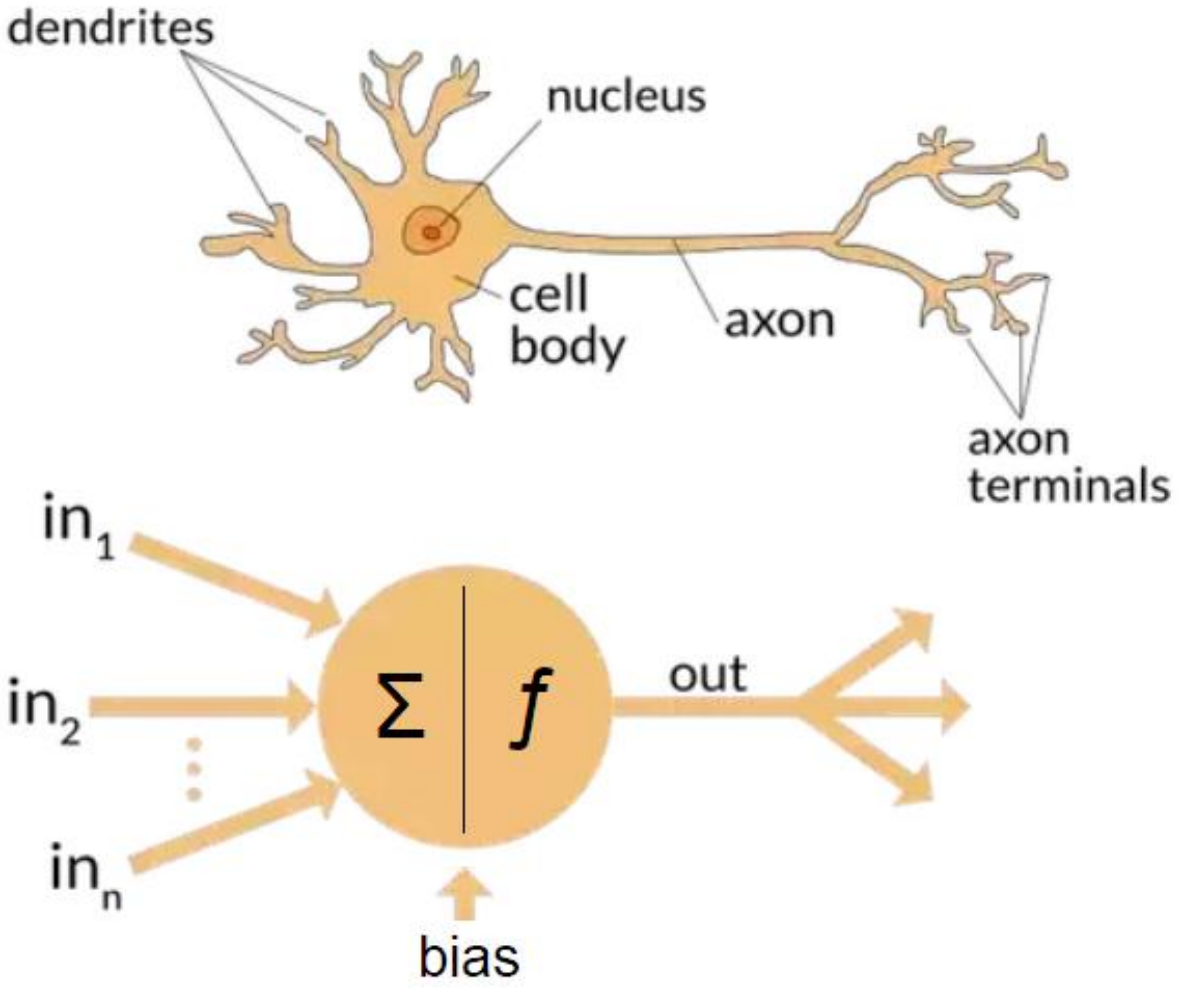
Pobudzenie aksonu to zjawisko określane w fizjologii "wszystko albo nic", polegające na tym, że bodziec, jeśli jest dostatecznie silny, wyzwala zawsze tę samą reakcję, jeśli jest zbyt słaby, może nie być w stanie nawet zapoczątkować reakcji.
W synapsie, każdy nadchodzący bodziec powoduje przejście na drugą stronę szczeliny synaptycznej pewnej porcji mediatora chemicznego. Synapsy przewodzą sygnał tylko w jednym kierunku — od aksonu jednej komórki do dendrytu drugiej.

wikipedia.org

Pobudzenie neuronu

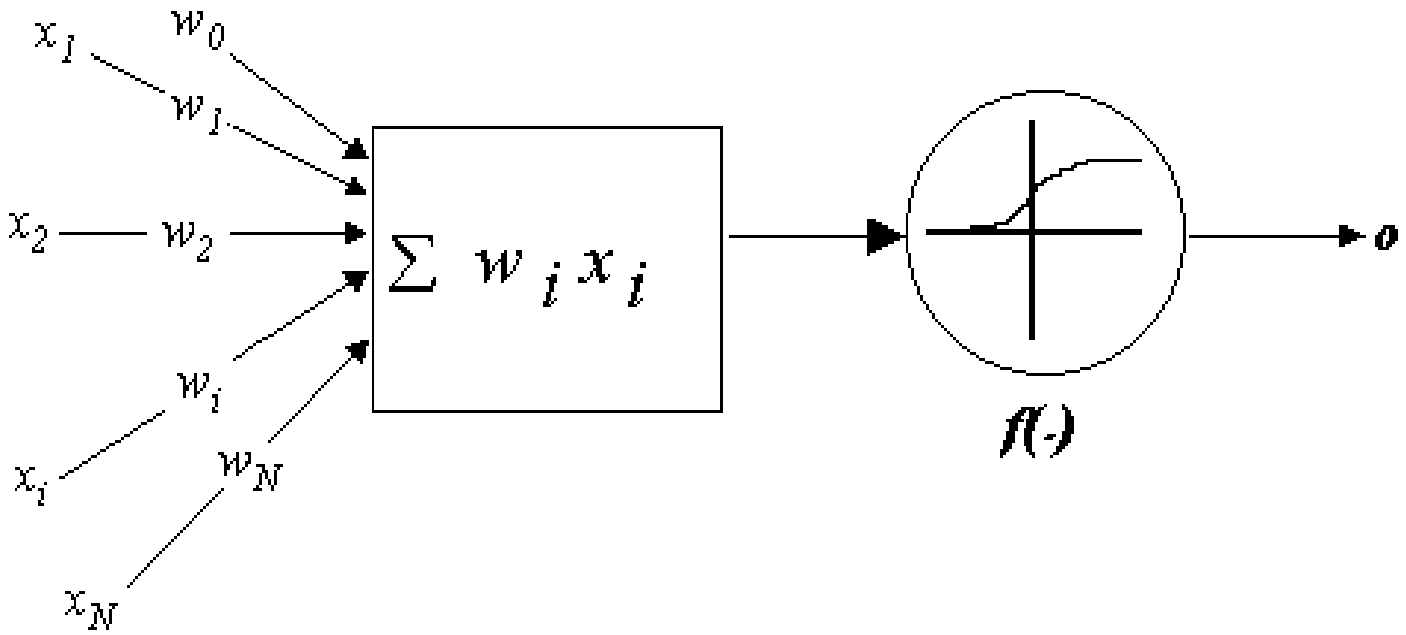
Równowagę zapewnia fakt, że na powierzchni komórki i na dendrytach znajduje się wiele zakończeń aksonów i rzadko neuron pobudzany jest przez bodziec nadchodzący tylko z jednego, nadchodzące po sobie sygnały sumują się.
Dzięki temu systemowi, zniszczenie kilku komórek nerwowych nie zakłóca wykonywanej przez nie czynności, ponieważ ich rolę przejmują komórki sąsiednie (kanały równoległe).

Model neuronu – komórka nerwowa



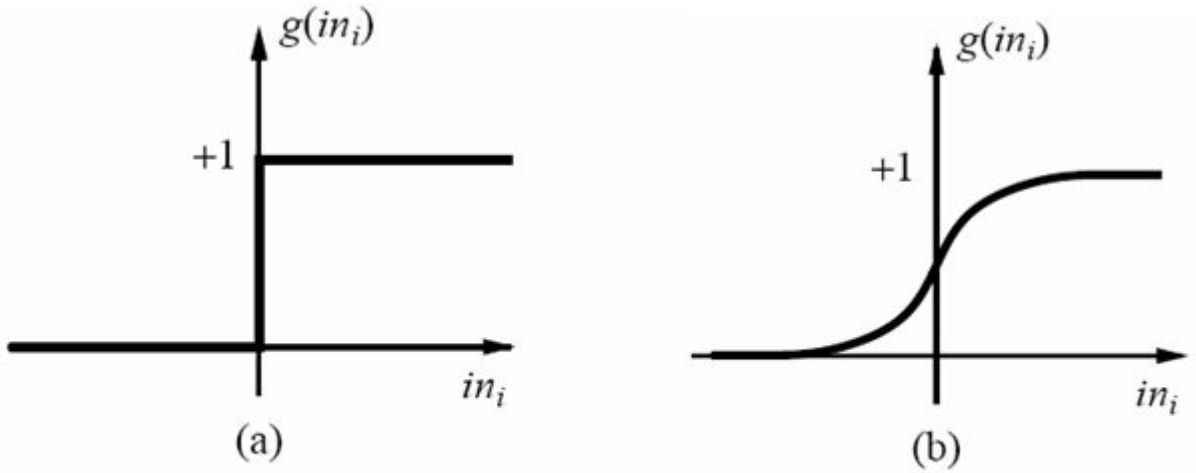
Rys. Neuron biologiczny i sztuczny (perceptron zaproponowany przez F. Rosenblata: dendryty, jądro (*nucleus*), ciało komórki, akson, zakończenia aksonu)
(https://www.quora.com/What-is-the-differences-between-artificial-neural-network-computer-science-and-biological-neural-networks) /

Model neuronu - komórka nerwowa



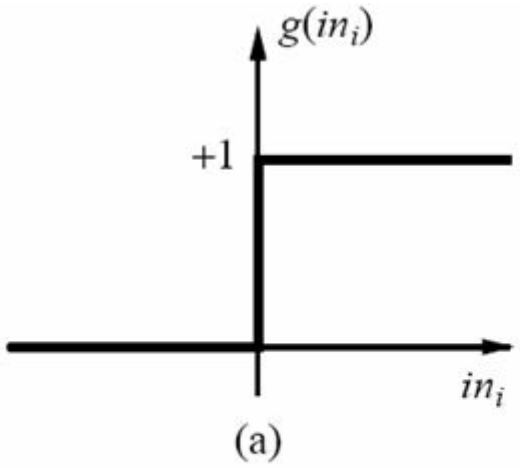
Rys. Perceptron, w_i – wagi synaptyczne, x_i - sygnał wejściowy, f(.) – funkcja aktywacji, *o* - wyjście)

Model neuronu – funkcje aktywacji

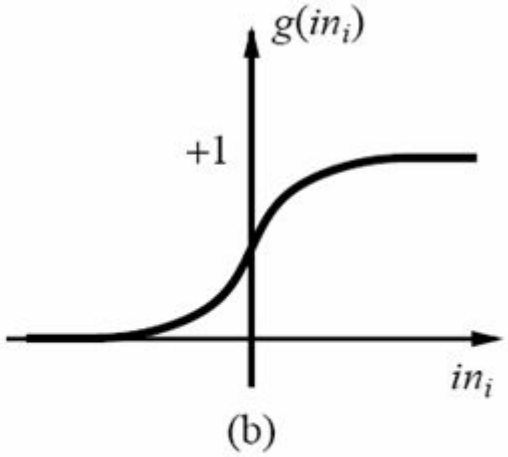


Rys. Przykłady funkcji aktywacji: liniowa bramka - liniowa funkcja skokowa (ang. *step function*); ciągła funkcja aktywacji (ang. *sigmoidal function*); to oznacza, że w przeciwieństwie do neuronów biologicznych, sztuczne neurony nie tylko „odpalają” (ang. *fire*), ale pobudzenie powstaje na skutek wartości ciągłych zamiast sygnałów binarnych;
https://towardsdatascience.com/the-differences-between-artificial-and-biological-neural-networks-a8b46db828b7

Model neuronu – funkcje aktywacji



step function



sigmoid function

Rys. Celem funkcji aktywacji jest wprowadzenie nieliniowości na wyjściu neuronu. Sieć neuronowa składa się z neuronów, które działają w zależności od wagi, biasu (wartość sygnału podawanego na dodatkowe wejście neuropnu) i odpowiadającej im funkcji aktywacji;
https://towardsdatascience.com/the-differences-between-artificial-and-biological-neural-networks-a8b46db828b7

Dla zainteresowanych: Pulsujące sieci neuronowe (Spiking Neural Network)
ŁUKASZ ALEKSIEJEW
(pod kierunkiem Joanna Grabska-Chrząstowska)
https://home.agh.edu.pl/~asior/stud/doc/Spiking%20Neural%20Network.pdf

Neuronowe sieci impulsowe (SNN – *Spiking Neural Networks*) są uznawane za trzecią generację sztucznych sieci neuronowych i wykazują znacznie wyższe podobieństwo do biologicznych neuronów niż klasyczne sieci (ANN). Ich główną cechą jest wykorzystanie **impulsów (spike'ów)** jako nośników informacji, zamiast ciągłych wartości liczbowych.

Główne podobieństwa SNN do biologicznego neuronu:
Przekazywanie informacji impulsami (spiking): Podobnie jak w mózgu, neurony w SNN nie aktywują się w każdym kroku czasowym. Wysyłają impuls (potencjał czynnościowy), tylko gdy zgromadzony potencjał błony przekroczy określony próg.
Uwzględnienie czasu: W przeciwieństwie do tradycyjnych sieci, SNN wprowadzają wymiar czasu (time-dependent) do obliczeń. Impulsy mogą docierać do neuronu w różnych momentach, co wpływa na jego stan.
Wpływ czasu (Opóźnienia synaptyczne): SNN modelują zjawisko, w którym sygnał nie dociera natychmiastowo, co przypomina biologiczne opóźnienia w synapsach.

Potencjał postsynaptyczny: Wejścia do sztucznego neuronu impulsowego są analogiczne do pobudzających i hamujących potencjałów postsynaptycznych, które występują w biologicznych dendrytach.
Plastyczność synaptyczna (Uczenie): SNN mogą wykorzystywać reguły uczenia oparte na czasie, takie jak STDP (Spike-Timing-Dependent Plasticity), które modyfikują wagi synaptyczne w zależności od dokładnego czasu wystąpienia impulsów przed- i postsynaptycznych.
Energooszczędność: Dzięki rzadkiej aktywacji (neurony "milczą", gdy nie otrzymują impulsów), SNN są potencjalnie znacznie bardziej energooszczędne, co naśladuje wysoką efektywność energetyczną ludzkiego mózgu.

Dziękuję

Bożena Kostek