

# Przewidywanie właściwości sekwencji biologicznych w oparciu o analizę n-gramów

Michał Burdukiewicz

Zakład Bioinformatyki i Genomiki, Uniwersytet Wrocławski

Promotor pracy: prof. dr hab. Paweł Mackiewicz

Promotor pomocniczy: dr Paweł Błazej

# Plan prezentacji

n-gramy i uproszczone alfabety

Uproszczone alfabety

Przewidywanie amyloidów

Przewidywanie peptydów sygnałowych

Przewidywanie warunków hodowlanych metanobakterii

Badania *in silico* pozwalają efektywniej planować prace eksperymentalne.

Przykłady:

- ▶ przewidywanie właściwości białek (np. obecność sekwencji sygnałowych, amyloidogenność),
- ▶ przewidywanie warunków hodowlanych mikroorganizmów.

Opracowanie metodologii analizy sekwencji biologicznych opierającej się na zrozumiałych dla człowieka regułach decyzyjnych.

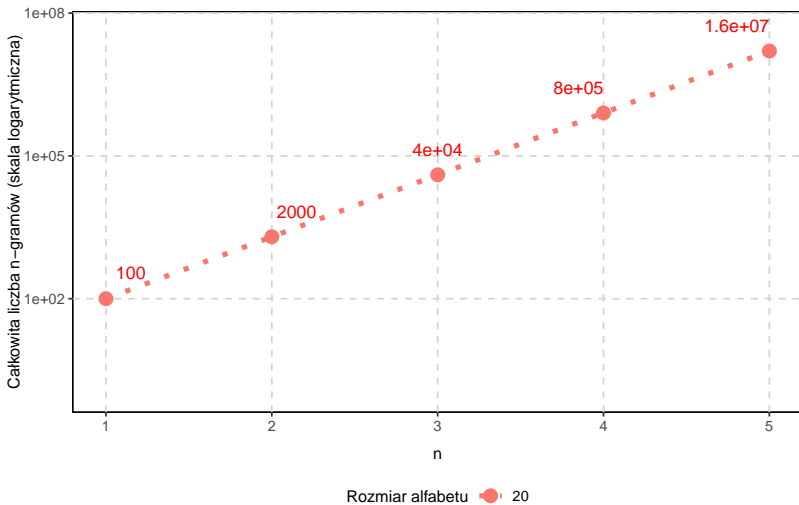
n-gramy (k-tuple, k-mery):

- ▶ podsekwencje (ciągłe lub z przerwami)  $n$  reszt aminokwasowych lub nukleotydowych,
- ▶ bardziej informatywne niż pojedyncze reszty.

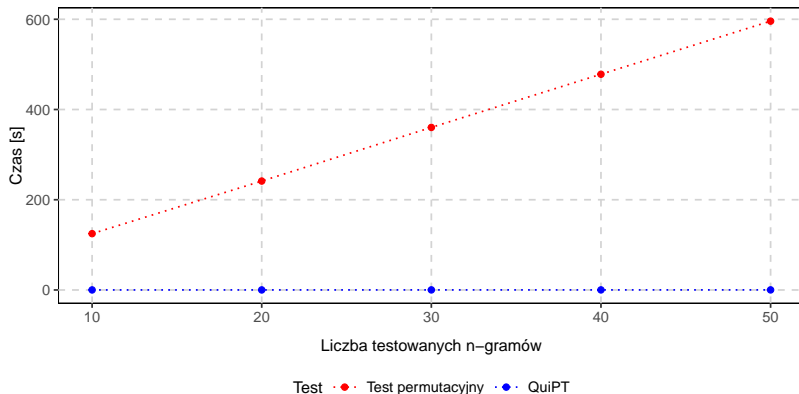
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
S1	H	T	E	S	Q	R	C	W	Y	M
S2	A	Q	R	G	N	D	K	I	P	V

Przykłady n-gramów:

1. H, A, T, Q
2. HT, AQ, TE, QR
3. H-E, A-R, T-S, Q-G
4. H-SQ, A-GN, T-QR, Q-ND



Dłuższe n-gramy są bardziej informatywne, ale tworzą większe przestrzenie atrybutów.



QuiPT (dostępny jako funkcja w pakiecie **biogram**) jest szybszy niż klasyczne testy permutacyjne.



## Uprozczone alfabety:

- ▶ aminokwasy są grupowane w większe zbiory na podstawie określonych kryteriów,
- ▶ łatwiejsze przewidywanie struktur (Murphy et al., 2000),
- ▶ tworzenie bardziej uogólnionych modeli.

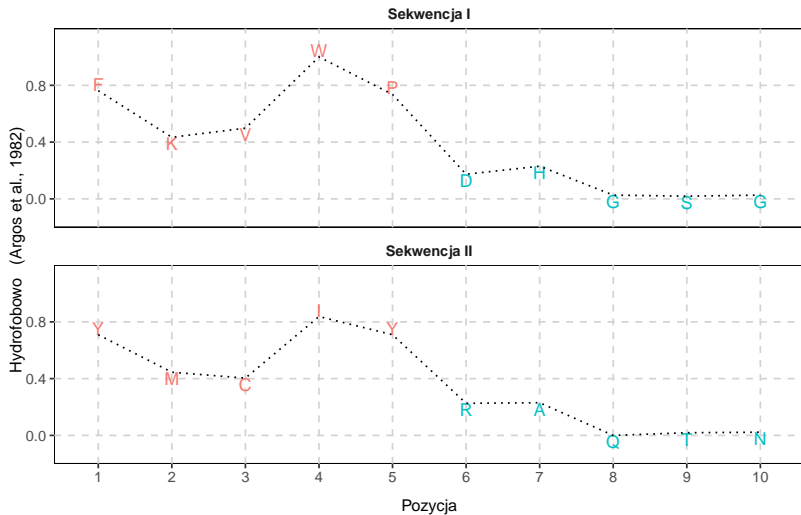
Poniższe peptydy wydają się być całkowicie inne pod względem składu aminokwasowego.

Sekwencja I:

FKVWPDHGSG

Sekwencja II:

YMCIYRAQTN



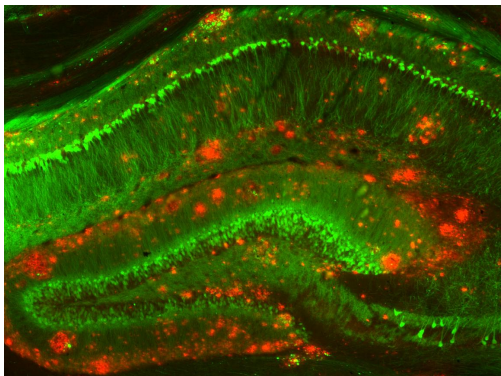
Grupa	Aminokwasy
1	C, I, L, K, M, F, P, W, Y, V
2	A, D, E, G, H, N, Q, R, S, T

Sekwencja I: FKVWPDHGSG → 1111122222

Sekwencja II: YMCIIYRAQTN → 1111122222

# Białka amyloidowe

Agregaty białek amyloidowe występują w tkankach osób cierpiących na zaburzenia neurodegeneracyjne, takie jak choroba Alzheimera i Parkinsona, a także wiele innych schorzeń.

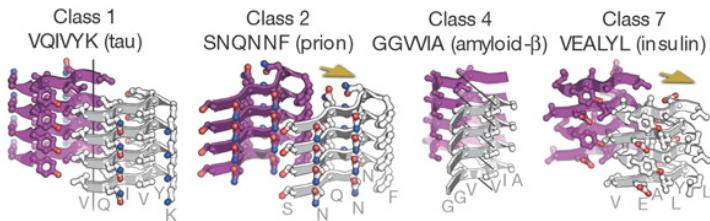


Agregaty amyloidowe (czerwone) wokół neuronów (zielone). Strittmatter Laboratory, Yale University.

# Białka amyloidowe

Za agregację białek amyloidogennych odpowiedzialne są sekwencje peptydowe o właściwościach amyloidogennych (hot spots):

- ▶ krótkie (6-15 aminokwasów),
- ▶ bardzo zmienny, zazwyczaj hydrofobowy skład aminokwasowy,
- ▶ tworzą unikalne  $\beta$ -struktury.



Sawaya et al. (2007)

# AmyloGram

AmyloGram: oparte na analizie n-gramowej narzędzie do przewidywania amyloidów (Burdukiewicz et al., 2016, 2017).

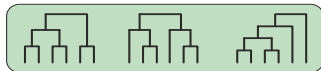
F	I	L	I	Q	A
L	H	Y	S	G	D
K	R	Q	D	K	G
E	K	P	T	R	R



F	F	I	F	L	...
L	L	H	L	Y	...
K	K	R	K	Q	...
E	E	K	E	P	...

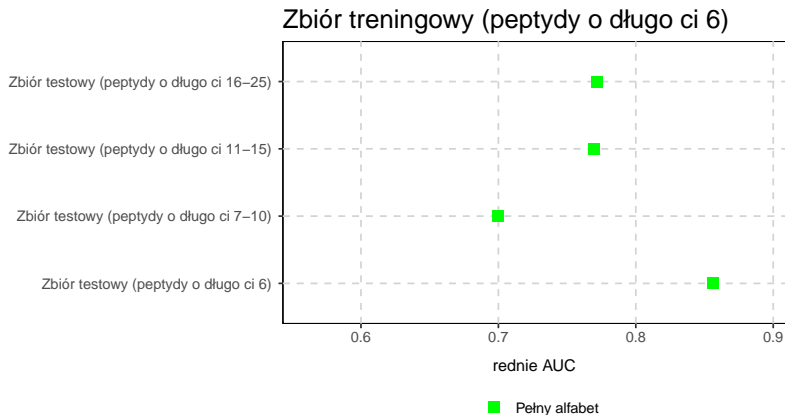


F	F	I	F	L	...
L	L	H	L	Y	...
K	K	R	K	Q	...
E	E	K	E	P	...





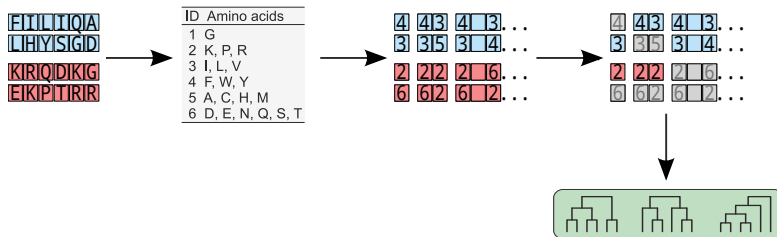
# Walidacja krzyżowa



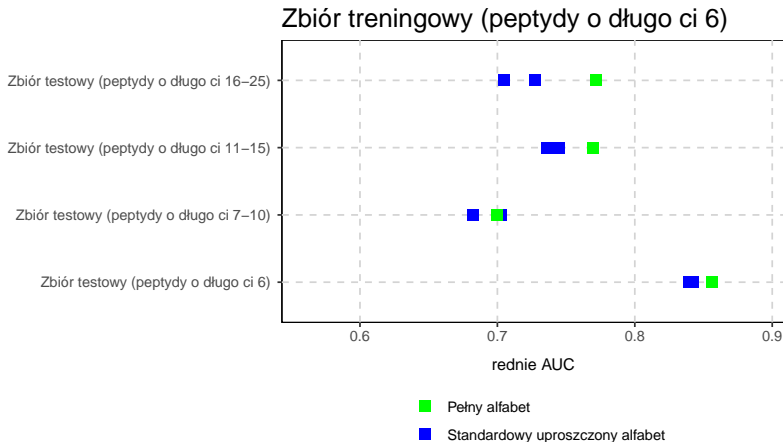
# Standardowe uproszczone alfabety

Opublikowano kilka uproszczonych alfabetów, które w założeniu miały służyć do opisywania struktur drugo- i trzeciorzędowych białek (Kosiol et al., 2004; Melo and Marti-Renom, 2006).

# Standardowe uproszczone alfabety



# Walidacja krzyżowa

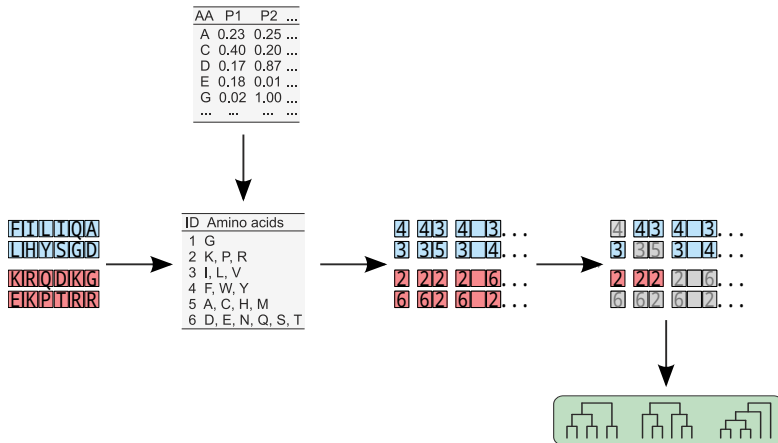


Standardowe alfabety aminokwasowe nie poprawiają jakości predykcji amyloidów.

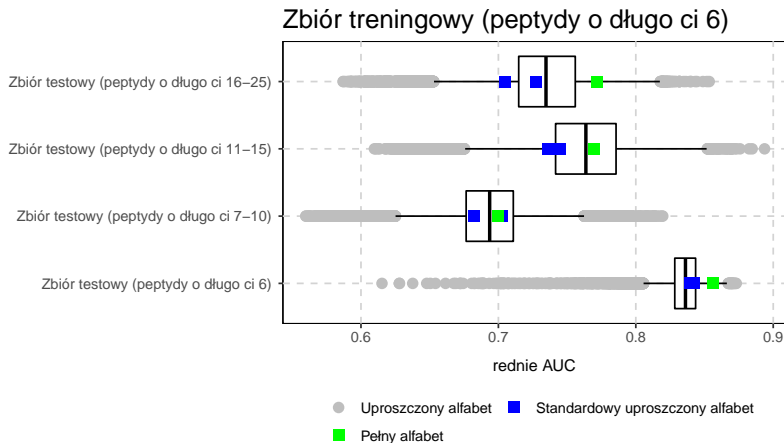
# Nowe uproszczone alfabety

- ▶ 17 miar fizykochemicznych wybranych z bazy AAIndex:
  - ▶ rozmiar,
  - ▶ hydrofobowość,
  - ▶ częstość w  $\beta$ -karkach,
  - ▶ zdolność do tworzenia kontaktów.
- ▶ 524 284 uproszczonych alfabetów aminokwasowych o różnej wielkości (od 3 do 6 grup).

# Nowe uproszczone alfabety

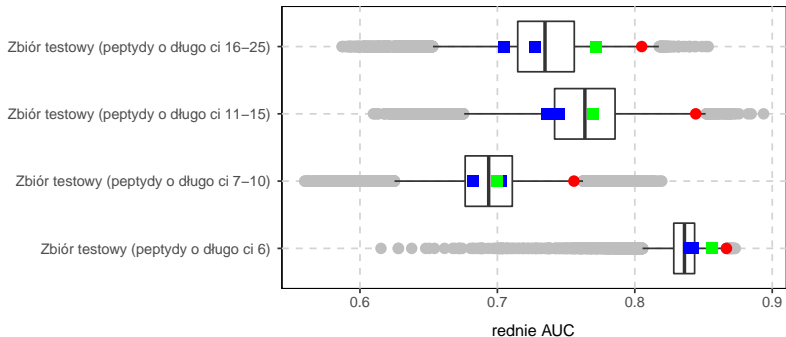


# Walidacja krzyżowa



# Najlepszy uproszczony alfabet

## Zbiór treningowy (peptydy o długości 6)





# Najlepszy uproszczony alfabet

Grupa	Aminokwasy
1	G
2	K, P, R
3	I, L, V
4	F, W, Y
5	A, C, H, M
6	D, E, N, Q, S, T

# Najlepszy uproszczony alfabet

Grupa	Aminokwasy
1	G
2	K, P, R
3	I, L, V
4	F, W, Y
5	A, C, H, M
6	D, E, N, Q, S, T

Grupy 3 i 4 - aminokwasy hydrofobowe.

# Najlepszy uproszczony alfabet

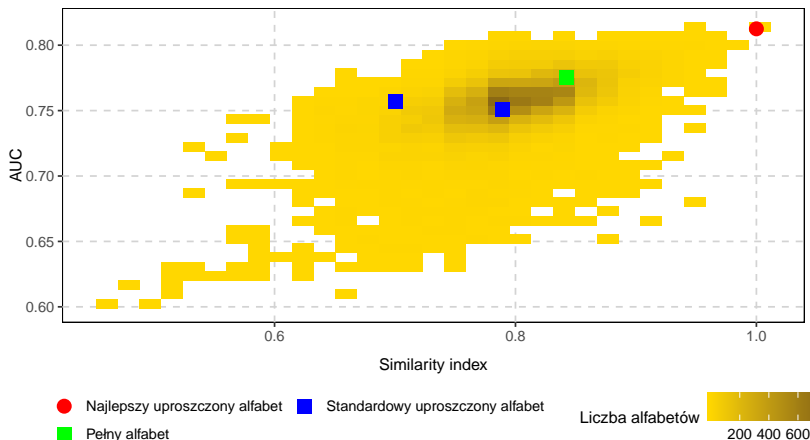
Grupa	Aminokwasy
1	G
2	K, P, R
3	I, L, V
4	F, W, Y
5	A, C, H, M
6	D, E, N, Q, S, T

Grupa 2 - reszty aminokwasowe zakłócające  $\beta$ -struktury.

# Podobieństwo alfabetów i jakość predykcji

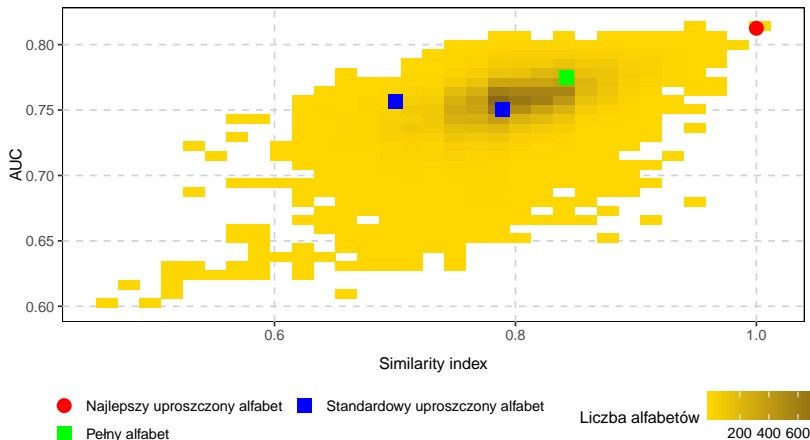
Czy alfabety podobne do najlepszego uproszczonego alfabetu również dobrze przewidują amyloidy?

# Similarity index



Similarity index (Stephenson and Freeland, 2013) mierzy podobieństwo między dwoma uproszczonymi alfabetami (1: identyczne alfabety, 0: zupełnie niepodobne alfabety).

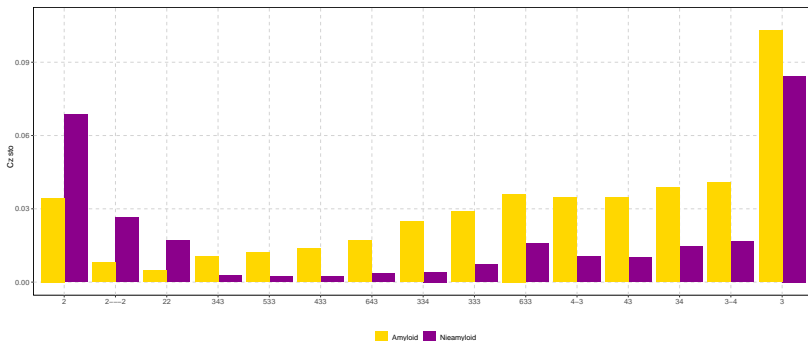
# Similarity index



Korelacja między similarity index i średnim AUC jest istotna ( $p\text{-value} \leq 2.2^{-16}$ ;  $\rho = 0.51$ ).

Czy informatywne n-gramy znalezione przez QuiPT są związane z amyloidogennością?

# Informatywne n-gramy



Spośród 65 najbardziej informatywnych n-gramów, 15 (23%) jest również obecnych w motywach aminokwasowych znalezionych ekperymentalnie (Paz and Serrano, 2004).

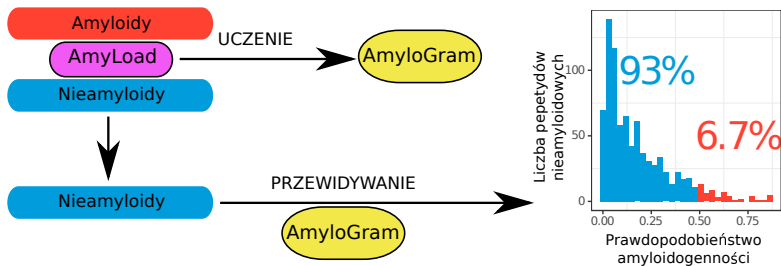


# Porównanie z innymi narzędziami

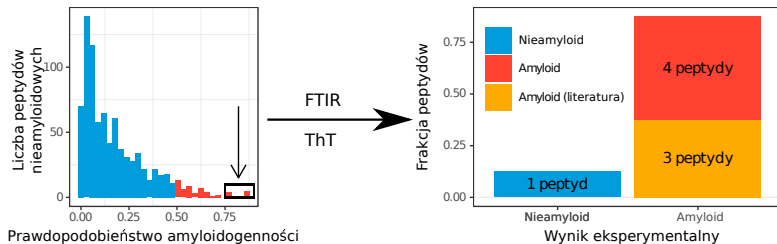
Program	AUC	MCC
AmyloGram	<b>0.8972</b>	<b>0.6307</b>
PASTA 2.0 (Walsh et al., 2014)	0.8550	0.4291
FoldAmyloid (Garbuzynskiy et al., 2010)	0.7351	0.4526
APPNN (Família et al., 2015)	0.8343	0.5823

Klasyfikator wytrenowany z wykorzystaniem najlepszego uproszczonego alfabetu, AmyloGram, został porównany z innymi narzędziami do przewidywania amyloidów z użyciem zewnętrznego zbioru danych *pep424*.

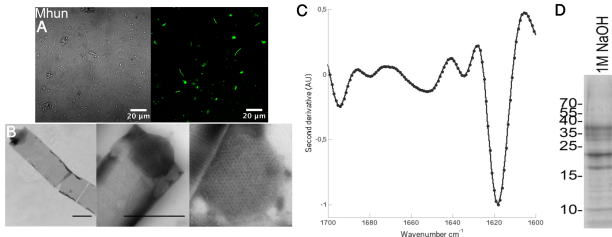
# Walidacja eksperymentalna



# Walidacja eksperymentalna

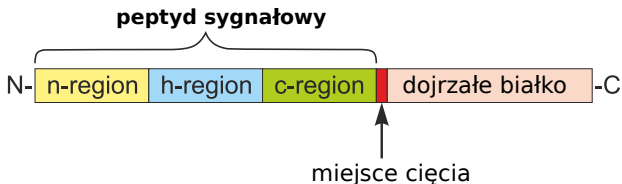


# Nowe białko amyloidowe



Nowy amyloid funkcjonalny produkowany przez *Methanospirillum* sp. (Christensen et al., 2018) został wybrany do analiz *in vitro* przez AmyloGram.

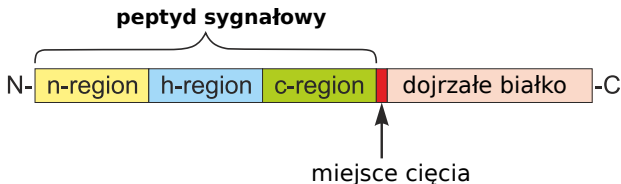
# Peptydy sygnałowe



Peptydy sygnałowe:

- ▶ krótkie (20-30 reszt) N-końcowe fragmenty białek tworzące  $\alpha$ -helisy,

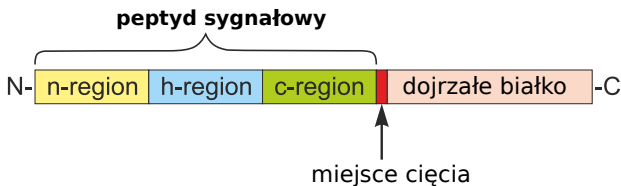
# Peptydy sygnałowe



Peptydy sygnałowe:

- ▶ krótkie (20-30 reszt) N-końcowe fragmenty białek tworzące  $\alpha$ -helisy,
- ▶ kierują białka do układu wewnątrz błonowego a następnie do sekrecji lub kompartmentów wewnątrzkomórkowych.

# Peptydy sygnałowe

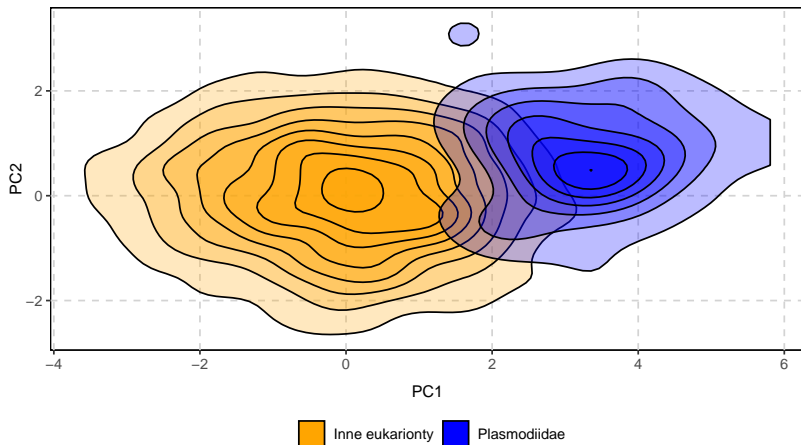


Peptydy sygnałowe są bardzo zmienne, ale zawsze zawierają trzy charakterystyczne domeny (Hegde and Bernstein, 2006):

- ▶ n-region: 5-8 dodatnio naładowanych reszt aminokwasowych (Nielsen and Krogh, 1998),
- ▶ h-region: bardzo hydrofobowe reszty (Nielsen and Krogh, 1998),
- ▶ c-region: kilka (3-5) polarnych reszt.

## Peptydy sygnałowe

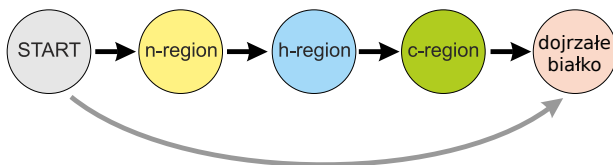
Skład aminokwasowy peptydów sygnałowych u *Plasmodium* sp. (do których należy m. in. zarodek malarii) jest inny od składu peptydów sygnałowych innych eukariontów. Dlatego też narzędzia do przewidywania peptydów sygnałowych źle radzą sobie z przewidywaniem peptydów sygnałowych u *Plasmodium* sp.





# signalHsmm

signalHsmm (Burdukiewicz et al., 2018b): zastosowanie ukrytych modeli semi-Markowa i uproszczonych alfabetów aminokwasowych w celu przewidywania peptydów sygnałowych w białkach *Plasmodium* sp.



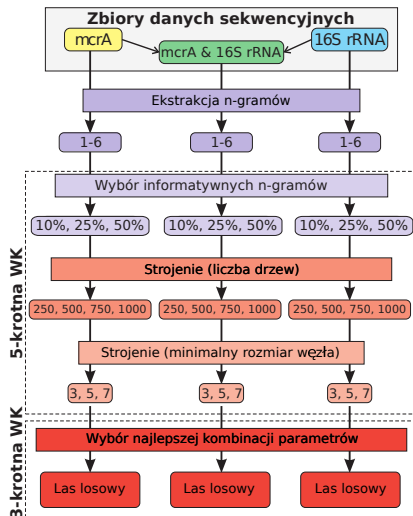
## Porównanie z innymi predyktorami

Algorytm	Czułość	Swoistość	MCC	AUC
signalP 4.1 (no tm)	0.8235	0.9100	0.6872	0.8667
signalP 4.1 (tm)	0.6471	0.9431	0.6196	0.7951
signalP 3.0 (NN)	0.8824	0.9052	0.7220	0.8938
signalP 3.0 (HMM)	0.6275	0.9194	0.5553	0.7734
PrediSi	0.3333	<b>0.9573</b>	0.3849	0.6453
Philius	0.6078	0.9336	0.5684	0.7707
Phobius	0.6471	0.9289	0.5895	0.7880
signalHsmm-2010	0.9804	0.8720	0.7409	0.9262
signalHsmm-2010 (ident. 50%)	<b>1.0000</b>	0.8768	<b>0.7621</b>	<b>0.9384</b>
signalHsmm-2010 (pełny alfabet)	0.8431	0.9005	0.6853	0.8718
signalHsmm-1987	0.9216	0.8910	0.7271	0.9063
signalHsmm-1987 (ident. 50%)	0.9412	0.8768	0.7194	0.9090
signalHsmm-1987 (pełny alfabet)	0.7647	0.9052	0.6350	0.8350

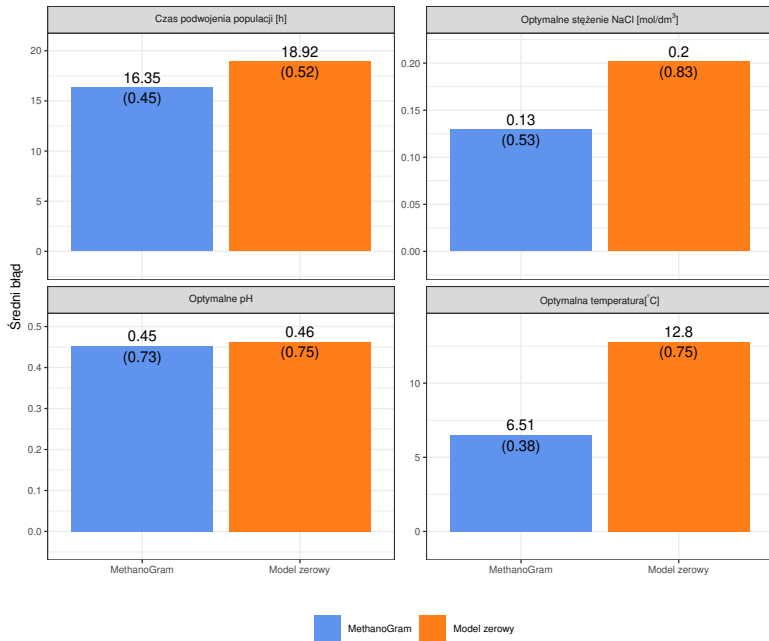
# Porównanie z innymi predyktorami

signalHsmm efektywnie uczy się rozpoznawać peptydy sygnałowe na bardzo małych zbiorach danych.

Przewidywania signalHsmm są na tyle uniwersalne, że pozwalają również przewidywać nietypowe peptydy sygnałowe spotykane w białkach *Plasmodium* sp.



metanogen.biotech.uni.wroc.pl (Jabłoński et al., 2015;  
Burdukiewicz et al., 2018a)



## Podsumowanie

- ▶ Zastosowanie n-gramów (k-merów), czyli ciągów aminokwasów lub nukleotydów o długości  $n$  okazało się skuteczne do charakterystyki sekwencji peptydów sygnałowych i amyloidogennych oraz markerów molekularnych metanogenów, a następnie do przewidywania tych peptydów oraz optymalnych warunków hodowli metanogenów w oparciu o te markery.
- ▶ Zastosowanie uproszczonych alfabetów aminokwasowych, w których aminokwasy są grupowane ze względu na swoje podobieństwo fizykochemiczne lub funkcjonalne, okazało się bardzo dobrym podejściem do opisu sekwencji aminokwasowych o zróżnicowanym składzie i wyeksponowania ich cech istotnych do przewidywania peptydów sygnałowych i amyloidogennych.
- ▶ Opracowana procedura QuiPT (**Q**uick **P**ermutation **T**est) pozwala na szybki wybór najbardziej informatywnych n-gramów i uzyskiwanie dokładnych p-wartości.
- ▶ Zastosowana metodologia tworzenia uproszczonych alfabetów

# Podsumowanie

Web serwery:

- ▶ **AmyloGram:**  
<http://www.smorfland.uni.wroc.pl/shiny/AmyloGram/>.
- ▶ **MethanoGram:** <http://www.smorfland.uni.wroc.pl/shiny/MethanoGram/>.
- ▶ **signalHsmm:** <http://www.smorfland.uni.wroc.pl/shiny/signalHsmm/>.

Pakiety R:

- ▶ **biogram:**  
<https://cran.r-project.org/package=biogram>.
- ▶ **AmyloGram:**  
<https://cran.r-project.org/package=AmyloGram>.
- ▶ **signalHsmm:**  
<https://cran.r-project.org/package=signalHsmm>.

# Podziękowania

Mentorzy:

- ▶ **Paweł Mackiewicz (University of Wrocław).**
- ▶ Lars Kaderali (University of Greifswald).
- ▶ Małgorzata Kotulska (Wrocław University of Science and Technology).
- ▶ Marcin Łukaszewicz (University of Wrocław).
- ▶ Henrik Nielsen (Technical University of Denmark).
- ▶ Stefan Rödiger (Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg).
- ▶ Andreas Weinhäusel (Austrian Institute of Technology).



# Podziękowania

## Współpracownicy:

- ▶ Anna Duda-Madej (Wrocław Medical University).
- ▶ Przemysław Gagat (University of Wrocław).
- ▶ Marlena Gąsior-Głogowska (Wrocław University of Science and Technology).
- ▶ Sławomir Jabłoński (University of Wrocław).
- ▶ Rafał Kolenda (Sanger Institute).
- ▶ Chris Lauber (Technical University Dresden).
- ▶ Piotr Sobczyk (Wrocław University of Science and Technology).

# Podziękowania

## Finansowanie:

- ▶ Narodowe Centrum Nauki (Preludium i Etiuda).
- ▶ COST ACTION CA15110 (Harmonising standardisation strategies to increase efficiency and competitiveness of European life-science research).
- ▶ KNOW Wrocław Center for Biotechnology.
- ▶ InnoProfile-Transfer-Projekt 03IPT611X przyznany przez Ministerstwo Edukacji i Badań Naukowych Niemiec.

# Publikacje I

1. Kolenda R., Burdukiewicz M., Schiebel J., Rödiger S, Sauer L., Szabo I., Orłowska A., Weinreich J., Nitschke J., Böhm, A., Gerber U., Roggenbuck D., Schierack P., Adhesion of Salmonella to pancreatic secretory granule membrane major glycoprotein GP2 of human and porcine origin depends on FimH sequence variation, **Frontiers in microbiology**, 2018 [liczba cytacji: 0].
2. Mackiewicz D., Posacki P., Burdukiewicz M., Błażej P. *Role of recombination and faithfulness to partner in sex chromosome degeneration.* **Scientific Reports**, 2018 [liczba cytacji: 0].
3. Burdukiewicz M., Gagat P. Jabłoński S., Chilimoniuk J., Gaworski M., Mackiewicz P., Łukaszewicz M. *PhyMet2: a database and toolkit for phylogenetic and metabolic analyses of methanogens.* **Environmental Microbiology Reports**, 2018 [liczba cytacji: 0].
4. Burdukiewicz M., Sobczyk P. Rödiger S., Duda-Madej A., Mackiewicz P., Kotulska M., *Amyloidogenic motifs revealed by n-gram analysis.* **Scientific Reports**, 2017 [liczba cytacji: 2].

## Publikacje II

5. Schiebel J., Böhm A., Nitschke J., Burdukiewicz M., Weinreich J., Ali A., Roggenbuck D., Rödiger S., Schierack P., *Genotypic and phenotypic characteristics in association with biofilm formation in different pathotypes of human clinical Escherichia coli isolates*, **Applied and Environmental Microbiology**, 2017 [liczba cytacji: 2].
6. Rödiger S., Burdukiewicz M., Spiess A.-N., Blagodatskikh K., *Enabling reproducible real-time quantitative PCR research: the RDML package*. **Bioinformatics**, 2017 [liczba cytacji: 0].
7. Burdukiewicz M., Rödiger S., Sobczyk P., Menschikowski M., Schierack P., Mackiewicz P., *Methods for comparing multiple digital PCR experiments*, **Biomolecular Detection and Quantification**, 2016 [liczba cytacji: 2].
8. Spiess A.-N., Rödiger S., Burdukiewicz M., Volksdorf T., Tellinghuisen J., *System- specific periodicity in quantitative real-time polymerase chain reaction data questions threshold-based quantitation*, **Scientific Reports**, 2016 [liczba cytacji: 4].

## Publikacje III

9. Kolenda R., Burdukiewicz M., Schierack P., *A systematic review and meta-analysis of the epidemiology of pathogenic escherichia coli of calves and the role of calves as reservoirs for human pathogenic E. coli.* **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology**, 2015 [liczba cytacji: 34].
10. Rödiger S., Burdukiewicz M., Schierack P., *chipPCR: an R Package to Pre-Process Raw Data of Amplification Curves.* **Bioinformatics**, 2015 [liczba cytacji: 12].
11. Rödiger S., Burdukiewicz M., Blagodatskikh K., Jahn M., Schierack P., *R as an Environment for the Reproducible Analysis of DNA Amplification Experiments*, **R Journal**, 2015 [liczba cytacji: 14].
12. Spiess A.-N., Deutschmann C., Burdukiewicz M., Himmelreich R., Klat K., Schierack P., Rödiger S., *Impact of smoothing on parameter estimation in quantitative dna amplification experiments.* **Clinical Chemistry**, 2014 [liczba cytacji: 13].

# Podsumowanie

- ▶ Zastosowanie n-gramów (k-merów), czyli ciągów aminokwasów lub nukleotydów o długości  $n$  okazało się skuteczne do charakterystyki sekwencji peptydów sygnałowych i amyloidogennych oraz markerów molekularnych metanogenów, a następnie do przewidywania tych peptydów oraz optymalnych warunków hodowli metanogenów w oparciu o te markery.
- ▶ Zastosowanie uproszczonych alfabetów aminokwasowych, w których aminokwasy są grupowane ze względu na swoje podobieństwo fizykochemiczne lub funkcjonalne, okazało się bardzo dobrym podejściem do opisu sekwencji aminokwasowych o zróżnicowanym składzie i wyeksponowania ich cech istotnych do przewidywania peptydów sygnałowych i amyloidogennych.
- ▶ Opracowana procedura QuiPT (**Q**uick **P**ermutation **T**est) pozwala na szybki wybór najbardziej informatywnych n-gramów i uzyskiwanie dokładnych p-wartości.
- ▶ Zastosowana metodologia tworzenia uproszczonych alfabetów

# References I

- Burdukiewicz, M., Gagat, P., Jabłoński, S., Chilimoniuk, J., Gaworski, M., Mackiewicz, P., and Łukaszewicz, M. (2018a). PhyMet2: A database and toolkit for phylogenetic and metabolic analyses of methanogens. *Environmental Microbiology Reports*, 10(3):378–382.
- Burdukiewicz, M., Sobczyk, P., Chilimoniuk, J., Gagat, P., and Mackiewicz, P. (2018b). Prediction of Signal Peptides in Proteins from Malaria Parasites. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(12):3709.
- Burdukiewicz, M., Sobczyk, P., Rödiger, S., Duda-Madej, A., Mackiewicz, P., and Kotulska, M. (2017). Amyloidogenic motifs revealed by n-gram analysis. *Scientific Reports*, 7(1):12961.
- Burdukiewicz, M., Sobczyk, P., Rödiger, S., Duda-Madej, A., Mackiewicz, P., and Kotulska, M. (2016). Prediction of amyloidogenicity based on the n-gram analysis. Technical Report e2390v1, PeerJ Preprints.

## References II

- Christensen, L. F. B., Hansen, L. M., Finster, K., Christiansen, G., Nielsen, P. H., Otzen, D. E., and Dueholm, M. S. (2018). The sheaths of methanospirillum are made of a new type of amyloid protein. *Frontiers in Microbiology*, 9:2729.
- Família, C., Dennison, S. R., Quintas, A., and Phoenix, D. A. (2015). Prediction of Peptide and Protein Propensity for Amyloid Formation. *PLOS ONE*, 10(8):e0134679.
- Garbuzynskiy, S. O., Lobanov, M. Y., and Galzitskaya, O. V. (2010). FoldAmyloid: a method of prediction of amyloidogenic regions from protein sequence. *Bioinformatics (Oxford, England)*, 26(3):326–332.
- Hegde, R. S. and Bernstein, H. D. (2006). The surprising complexity of signal sequences. *Trends in Biochemical Sciences*, 31(10):563–571.



## References III

- Jabłoński, S., Rodowicz, P., and Łukaszewicz, M. (2015). Methanogenic archaea database containing physiological and biochemical characteristics. *Int J Syst Evol Microbiol*, 65(4):1360–1368.
- Kosiol, C., Goldman, N., and Buttimore, N. H. (2004). A new criterion and method for amino acid classification. *Journal of Theoretical Biology*, 228(1):97–106.
- Melo, F. and Marti-Renom, M. A. (2006). Accuracy of sequence alignment and fold assessment using reduced amino acid alphabets. *Proteins*, 63(4):986–995.
- Murphy, L. R., Wallqvist, A., and Levy, R. M. (2000). Simplified amino acid alphabets for protein fold recognition and implications for folding. *Protein Engineering*, 13(3):149–152.

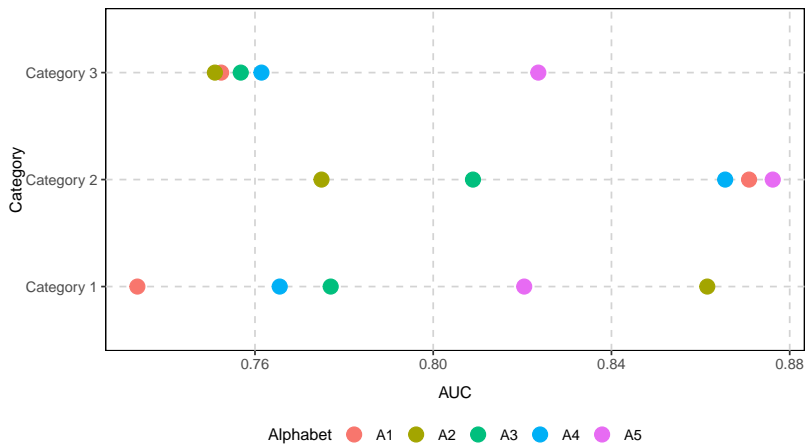
## References IV

- Nielsen, H. and Krogh, A. (1998). Prediction of signal peptides and signal anchors by a hidden Markov model. *Proceedings / ... International Conference on Intelligent Systems for Molecular Biology ; ISMB. International Conference on Intelligent Systems for Molecular Biology*, 6:122–130.
- Paz, M. L. d. I. and Serrano, L. (2004). Sequence determinants of amyloid fibril formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(1):87–92.
- Sawaya, M. R., Sambashivan, S., Nelson, R., Ivanova, M. I., Sievers, S. A., Apostol, M. I., Thompson, M. J., Balbirnie, M., Wiltzius, J. J. W., McFarlane, H. T., Madsen, A. , Riek, C., and Eisenberg, D. (2007). Atomic structures of amyloid cross-spines reveal varied steric zippers. *Nature*, 447(7143):453–457.
- Stephenson, J. D. and Freeland, S. J. (2013). Unearthing the root of amino acid similarity. *Journal of Molecular Evolution*, 77(4):159–169.

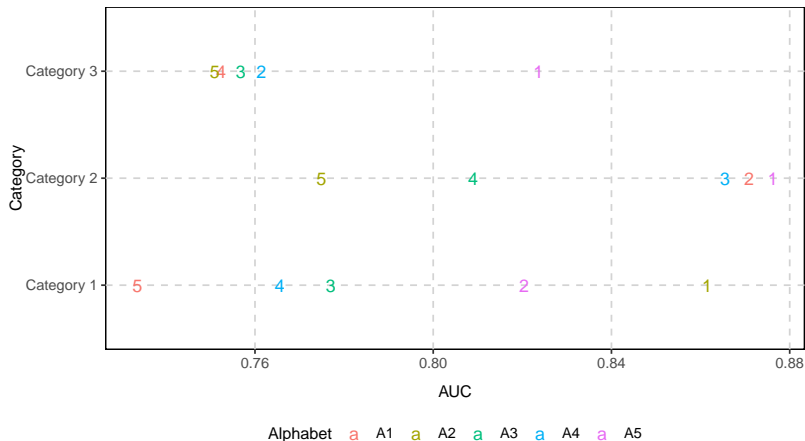
## References V

Walsh, I., Seno, F., Tosatto, S. C. E., and Trovato, A. (2014).  
PASTA 2.0: an improved server for protein aggregation  
prediction. *Nucleic Acids Research*, 42(W1):W301–W307.

# Ranking alphabets

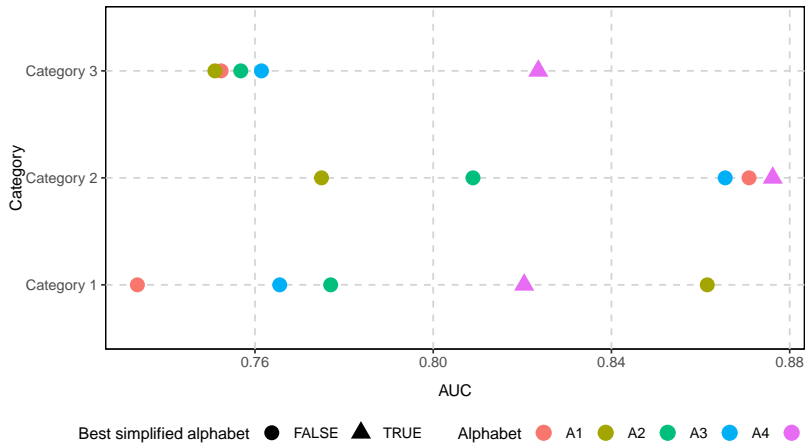


# Ranking alphabets



We rank alphabets separately in all length categories assuming the rank 1 for the best AUC, rank 2 for the second best AUC and so on.

# Ranking alphabets



The best-performing alphabet has the lowest sum of ranks.