INSTITUTE OF BIOCHEMISTRY AND BIOPHYSICS
POLISH ACADEMY OF SCIENCES

Recruitment for the Doctoral School of Molecular Biology and Biological Chemistry at the Institute of Biochemistry and Biophysics Polish Academy of Sciences

Rekrutacja do Szkoły Doktorskiej Biologii Molekularnej i Chemii Biologicznej Instytut Biochemii i Biofizyki Polskiej Akademii Nauk

Procedure no. DSMBBC/2027/10

1. Prospective Supervisor (Potencjalny Promotor): Prof. dr hab. Wojciech Bal
   (email): wbal@ibb.waw.pl
2. Auxiliary Supervisor (if applicable) (Promotor pomocniczy): dr Tomasz Frączyk
   (email): tfraczyk@ibb.waw.pl
3. Research Unit: Laboratory of Biological Chemistry of Metal Ions
   Jednostka organizacyjna: PN-01, Pracownia Chemii Biologicznej Jonów Metali
4. Research Unit : https://ibb.edu.pl/pracowania-badawcza/wojciech-bal/
   Jednostka organizacyjna: (www): https://ibb.edu.pl/pracowania-badawcza/wojciech-bal/
5. Programme Title (English): The impact of phosphorylation and acetylation of selected human proteins on the binding of zinc and copper ions
6. Programme Title (Polish): Wpływ fosforylacji i acetylacji wybranych ludzkich białek na wiązanie jonów cynku i miedzi
7. The discipline of science (dyscyplina naukowa):
   - chemical sciences (nauki chemiczne)
8. Description of proposed PhD programme (opis planowanych badań):

The goal of this proposal is to determine how PTMs in the vicinity of metal-binding sites change the metal–protein binding affinity. We will also study how metal binding by the target protein affects the enzymatic efficiency of introducing and removing PTMs by kinases, phosphatases, acetyltransferases, and deacetylases. Understanding such phenomena is of relevance to diseases characterized by PTMs and metal ion dysregulation, such as cancer, as well as autoimmune, neurodegenerative, and cardiovascular diseases.

The main objective of this project is to determine the interdependence of PTMs and the binding of Zn(II) and Cu(II) ions by carefully selected human proteins. The experiments on whole proteins will be complemented by research on model peptides that form metal-binding sites. Such approach will allow us to understand the observed impact in a wider context of whole intact proteins and to precisely describe the studied phenomena at the amino acid residue level.

From a search of the UniProt Knowledgebase for human metal-binding proteins with known PTMs and three-dimensional structures deposited in the Protein Data Bank (PDB), we selected all proteins containing metal-binding ligands as well as sites of phosphorylation and acetylation within primary sequences up to 24 residues in length. This selection was supported by careful analysis of protein structures to ensure that the chosen fragments contain independent structural domains encompassing the complete metal coordination sphere. In the literature we found three additional modification sites for the selected Zn(II) binding proteins (Table 1). The proteins binding Cu(II) ions selected here form biologically relevant strong complexes with the

metal ion *via* the Amino Terminal Cu and Ni binding (ATCUN) motif, where the entire coordination sphere is contained within the first three residues. Thus, we can successfully use shorter peptides for this part of the project.

Table 1. Human proteins binding Zn(II) and Cu(II) ions, with known structures, and with phosphorylation or acetylation sites in proximity to metal-binding residues.

Metal ion	UniProt ID	Name of the protein/peptide	The amino acid sequence of the metal-binding site [a]
Zn(II)	Q8N884	Cyclic GMP-AMP synthase	^{388}NNHG**K**S**K**TCCENKEEKCCRK^{407}
	P00441	Superoxide dismutase [Cu-Zn]	^{64}HFNPL**S**R**K**HGGPKDEERHVGD^{84}
	O95863	Zinc finger protein SNAI1	^{181}VCGTCG**K**AFSRPWLLQGHVRTH**T**^{203}
			^{236}YQCQACARTF**S**RM**S**LLHKHQESGC^{259}
	Q9UBU7	Protein DBF4 homolog A	^{295}YCECCLQK**Y**EDLTHLL**S**EQH^{315}
Cu(II)	P15515	Histatin-1	^{1}D**S**HEKR^{6}
	P02768	Albumin	^{1}DAH**KS**E^{6}
	P05067 [b]	$A\beta_{4-x}$	^{4}FRHD**S**G^{9}
Zn+Cu			^{4}FRHD**S**GYEVHHQ**K**^{16}

[a] Phosphorylated or acetylated residues are in boldface; metal-coordinating residues are underlined; numbers represent the position in the primary amino acid sequence; [b] The $A\beta_{4-x}$ is a product of the Amyloid precursor protein processing.

In the case of Cu(II)-binding peptides, we designed additional SSHSSS-am and KKHKKK-am peptides to scan every position of serine phosphorylation and lysine acetylation, respectively. Some of the peptides contain up to two modified residues. The genuine co-occurrence of such modifications is usually not resolved, but one can speculate that such co-occurrence is possible, depending on the protein's location and lifetime. To cover all possible cases regarding experimentally confirmed PTM sites, we will test either peptide with each one PTM and the peptide with two PTMs. Thus, in addition to 13 proteins (wild-type and respective acetylation and phospho-mimetic mutants), 43 distinct peptides will be tested. Such a rich and diverse library of proteins and peptides will allow us to thoroughly analyze the influence of phosphorylation and acetylation on the binding of Zn(II) and Cu(II).

Binding of Zn(II) ions by proteins and peptides Zinc ions are often labeled "silent" owing to the absence of *d–d* bands detectable using a UV-vis spectrophotometer. Thus, divalent cobalt ions, whose binding is iso-structural compared to Zn(II), will be utilized. The first experiment for Zn(II) binding peptides will involve their titration with Co(II), with spectrophotometric detection. Then, the Co(II)-saturated peptides will be titrated with Zn(II), which will result in a decrease of the signal from the peptide–Co(II) complex because of metal binding competition. Such "reverse titrations" will enable the calculation of the Zn(II) dissociation constant after the initial measurement of the Co(II) dissociation constant (K_d). In the case of too-strong Co(II)-binding, we will conduct additional titrations of the peptide with Ni(II) (together with Ni(II)-Co(II) competition experiments), which usually binds more weakly than Co(II) and will allow us to calculate K_d value for Co(II). Although the "reverse titration" approach does not directly reflect the biochemical situation in the organism, it is a proven tool for the characterization of Zn(II) binding. For peptides/proteins having Zn(II) dissociation constants in the µM–pM range, titrations with competitors Zincon and PAR will be performed and monitored using UV-vis spectrophotometry. Additionally, competition with EGTA will be performed and followed using spectrofluorimetry and CD spectroscopy. Fluorescence measurements will exploit the presence of phenylalanine, tryptophan, or tyrosine residues. CD spectra will monitor the overall structure of the peptide/protein. For more potent Zn(II) binding, with a K_d < 1 pM, competition with DTPA or HEDTA will be monitored using fluorimetry and CD spectroscopy. We will complement the aforementioned methods with NMR measurements, taking advantage of the availability of the spectrometer at the Institute of Biochemistry and Biophysics.

Binding of Cu(II) ions by peptides Direct titration of copper(II) into the peptides at pH 7.4 will not yield measurable dissociation constants because the binding will be too strong for such analysis (K_d < 0.1 pM). Thus, the primary analytical method will be potentiometry, which will be confirmed/controlled using pH-metric titrations of Cu(II)–peptide complexes monitored using UV-vis and CD spectra (*d–d* bands in the range 450–600 nm). Additionally, the Cu(II) binding competition between the tested peptide and the GGH tripeptide (K_d = 0.61 pM at pH 7.4) will be monitored using CD spectroscopy, following the procedure validated and published by our research group. In this approach, the distinct CD spectra of Cu(GGH) and Cu(II) complex with other peptides make it possible to measure the concentrations of each competing species directly. We will complement the aforementioned methods with EPR measurements, taking advantage of the availability of the spectrometer at the Institute of Biochemistry and Biophysics.

Influence of metal ions binding by peptides and proteins on enzymatic introducing/removing of PTMs The activity of kinases (STK39, PAK1, nPKC-zeta, CDC7, FAM20C, and PKA C-alpha) will be followed by luminescent assays. Briefly, the appropriate kinase will be incubated with varying concentrations of peptides or proteins with and without Zn(II) and Cu(II). For peptides/proteins with cysteine residues, this step will be performed in an anaerobic glove box. After phosphorylation, the reagent for luminescent measurements (a constituent of a commercial kit) will be added, and the luminescence, proportional to the concentration of residual ATP or formed ADP, will be measured in a plate reader. The concentrations of peptides/proteins – substrates for phosphorylation, will be chosen to cover the range of 0.1 – 2 K_m values to calculate K_m and V_{max} for every peptide/metal ion-peptide version.

For kinase and phosphatase activity assays, we will also use ESI-MS measurements coupled with HPLC with UV-detection for the quantitative determination of peptides with and without PTMs. The difference in mass and retention time of modified/non-modified peptides will be exploited in these measurements. Detection by HPLC-UV/ESI-MS will also be utilized for the activity of acetyltransferase and deacetylases. For protein phosphorylation/dephosphorylation, a gel-shift technique will be used, where this PTM will manifest in slowed migration of the protein during SDS-PAGE electrophoresis in gels with Phos-Tag molecule (having the affinity to phosphate moiety) covalently attached to the polyacrylamide.

9. Literature references related to conducted/planned research (literatura związana z planowanymi badaniami):

- K. Bossak, W. Goch, K. Piątek, T. Frączyk, J. Poznański, A. Bonna, C. Keil, A. Hartwig, W. Bal; *Unusual Zn(II) Affinities of Zinc Fingers of Poly(ADP-ribose) Polymerase 1 (PARP-1) Nuclear Protein*. Chem. Res. Toxicol. 2015; 28: 191-201;
- K. Bossak-Ahmad, T. Frączyk, W. Bal, S.C. Drew; *The sub-picomolar Cu^{2+} dissociation constant of human serum albumin.* ChemBioChem 2020; 21: 331-334;
- T. Frączyk; *Cu(II)-binding N-terminal sequences of human proteins.* Chem. Biodiversity 2021; 18: e2100043;
- T. Frączyk; *Phosphorylation impacts Cu(II) binding by ATCUN motifs.* Inorg. Chem. 2021; 60: 8447-8450;
- M. Peana, T. Frączyk, M.A. Zoroddu; *Interplay of metal ions and posttranslational modifications in proteins.* Eur. J. Inorg. Chem. 2024; 27: e202400175

10. Requirements for the candidate (wymagania):

a) hold a degree of Master of Science [*Magister*], Master of Engineering [*Magister Inżynier*], medical doctor or equivalent in the field of: exact sciences, natural sciences, medical sciences or related disciplines, granted by a Polish or foreign university; a person who does not possess the qualifications described above may take part in the competition, but must obtain the qualifications in question and provide the relevant documents before the start of the programme at the Doctoral School (i.e., 1st March 2027). Education at the Doctoral School begins on 1st March 2027;

posiadanie tytułu zawodowego magistra, magistra inżyniera, lekarza lub innego równorzędnego na polskiej lub zagranicznej uczelni w dziedzinie: nauk ścisłych, przyrodniczych, medycznych lub pokrewnych; w naborze może wziąć udział osoba nieposiadająca kwalifikacji opisanych w zdaniu poprzedzającym, jednak musi je uzyskać i stosowne dokumenty dostarczyć przed rozpoczęciem kształcenia w Szkole Doktorskiej (tj. przed 1 marca 2027 r.). Kształcenie w szkole Doktorskiej rozpoczyna się: 1 marca 2027 r.

b) to be completed by the supervisor; add additional points if necessary (please add your specific requirement and translate to Polish)

a. the knowledge of spectrophotometry, potentiometry, and enzymology will be beneficial
b. the experience in the affinity determining and recombinant protein production also will be the advantage of the candidate
c. be well organized, eager to gain new knowledge and scientific skills and experience
d. have fluency in spoken and written English.

a. znajomość metod spektrofotometrycznych, potencjometrycznych i enzymologicznych będzie dodatkową zaletą
b. doświadczenie w wyznaczaniu powinowactwa i produkcji białek rekombinowanych także będzie dodatkową zaletą
c. dobra organizacja pracy, chęć do zdobywania nowej wiedzy, umiejętności naukowych i doświadczenia
d. biegłe posługiwanie się językiem angielskim w mowie i piśmie.

11. Scholarship amount (net, monthly, PLN):
1st year: 4437,00; 2nd year: 4437,00; 3rd year: 4881,14; 4th year: 4881,14;

Wysokość stypendium (netto, miesięcznie, PLN):

Pierwszy rok: 4437,00; Drugi rok: 4437,00; Trzeci rok: 4881,14; Czwarty rok: 4881,14;

12. Number of positions available: 1

Liczba dostępnych miejsc: 1

13. Deadline for submission of documents: **30.11.2026**

Termin zakończenia przyjmowania dokumentów: **30.11.2026**

14. Selected candidates will be invited for **the interview** that **will take place from 08.12.2026 to 15.12.2026** (the exact date will be given in the invitation).

Wybrani kandydaci zostaną zaproszeni na rozmowę kwalifikacyjną, która odbędzie się w terminie **od 08.12.2026 do 15.12.2026** (dokładny termin zostanie przekazany w zaproszeniu na rozmowę).

15. The recruitment procedure will be completed until **17.12.2027**.

Termin rozstrzygnięcia konkursu **17.12.2027**.

16. Required documents:

a) an application for admission to the Doctoral School, together with consent to the processing of personal data for the recruitment procedure and a statement on familiarising oneself with recruitment rules and conditions; (link to the application form) (Information on the processing of personal data)

podanie o przyjęcie do Szkoły Doktorskiej wraz ze zgodą na przetwarzanie danych osobowych na potrzeby postępowania rekrutacyjnego oraz oświadczeniem o zapoznaniu się z zasadami i warunkami rekrutacji; (link do podania o przyjęcie) (Informacja nt. przetwarzania danych osobowych)

b) a diploma confirming completion of higher education or a statement of the expected date of the master's thesis defense;

dyplom ukończenia uczelni wyższej lub zaświadczenie o przewidywanym terminie obrony pracy dyplomowej;

c) a scientific curriculum vitae including information on the candidate's participation in scientific projects and other related activities, such as publications, work in academic clubs, participation in academic conferences with a paper, poster, national and international internships, prizes and awards, participation in grants;

życiorys naukowy zawierający informacje o udziale kandydata w projektach naukowych i innych aktywnościach związanych z działalnością naukową taką jak: publikacje, prace w kołach naukowych, udział w konferencjach naukowych z referatem, posterem, staże krajowe i zagraniczne, nagrody i wyróżnienia, udział w grantach;

d) a list of completed university courses with marks;

wykaz ukończonych kursów uniwersyteckich wraz z ocenami;

e) a motivation letter;

list motywacyjny;

f) contact details to at least one academic adviser or academic staff member holding at least a doctor's degree, who has agreed to give an opinion on the applicant. The opinion should not be attached to the application;

dane kontaktowe do co najmniej jednego dotychczasowego opiekuna naukowego lub innego pracownika naukowego ze stopniem co najmniej doktora, który zgodził się wcześniej wydać opinię na temat kandydata. Opinii nie należy załączać do aplikacji;

g) in the case of having a disability certificate or a certificate on the level of disability, or a certificate referred to in Article 5 and Article 62 of the Act of 27 August 1997 on Vocational and Social Rehabilitation and Employment of Persons with Disabilities – a statement of holding such certificate;

w przypadku posiadania orzeczenia o niepełnosprawności lub orzeczenia o stopniu niepełnosprawności albo orzeczenia, o którym mowa w art. 5 oraz art. 62 ustawy z dnia 27 sierpnia 1997 r. o rehabilitacji zawodowej i społecznej oraz zatrudnianiu osób niepełnosprawnych – oświadczenie o jego posiadaniu;

h) candidates holding a diploma of completing studies abroad shall additionally attach a certified translation of the diploma, including the supplement, into Polish or English, unless the diploma or an official copy thereof, including the supplement, has been issued in English. A diploma issued abroad must be legalised or certified with an apostille clause.

kandydat legitymujący się dyplomem ukończenia studiów za granicą składa dodatkowo poświadczone tłumaczenie dyplomu, wraz z suplementem, na język polski lub angielski, chyba, że dyplom lub jego oficjalny odpis, wraz z suplementem, został wydany w języku angielskim. Dyplom wydany za granicą należy poddać legalizacji lub uzyskać na nim klauzulę apostille.;

17. Language of documents (język dokumentów):

- either English or Polish up to the candidate's choice (angielski lub polski - do wyboru przez kandydata)

18. How to apply (jak złożyć aplikację):

- Use the Application form for admission to the Doctoral School (link to the application form) (Information on the processing of personal data)
- Użyj formularza Podania o przyjęcie do Szkoły Doktorskiej (odnośnik do podania o przyjęcie). (Informacja nt. przetwarzania danych osobowych)
- Merge all required documents as a single pdf file

  Połącz wszystkie dokumenty w jeden plik formatu pdf
- Send this file as an attachment to PhDschool-recruitment@ibb.waw.pl **or** post documents to

  Doctoral School (Building D, Room No. 6)
  Institute of Biochemistry and Biophysics
  Polish Academy of Sciences
  Pawinskiego 5a
  02-106 Warszawa
  Poland

  Wyślij plik pdf na adres PhDschool-recruitment@ibb.waw.pl lub prześlij dokumenty na adres:

  Szkoła Doktorska „(Budynek D, pokój nr 6)
  Instytut Biochemii i Biofizyki
  Polska Akademia Nauk
  ul. Pawińskiego 5a
  02-106 Warszawa

Polska

- Include "**Procedure no. DSMBBC/2027/10** and your first and last name as the subject of the e-mail

  W tytule wiadomości e-mail umieść „**Procedure no. DSMBBC/2027/10** oraz Twoje imię i nazwisko.

- The application must contain all documents described in section 16

  Aplikacja musi zawierać wszystkie dokumenty opisane w punkcie 16

19. The recruitment process consists of three stages:

a) selection of candidates by the Committee based on the alignment of the candidate's competencies with the requirements specified in the recruitment program;

b) selection of candidates by the Committee based on their previous achievements and academic results presented in the submitted documents;

c) an interview conducted by the Committee including in particular:

- a presentation delivered by the candidate containing the outcomes of his/her research (a Master's thesis or other research work carried out by the candidate); the presentation must not last longer than 10 minutes;
- questions asked by the members of the Committee related to the presented project, the methods used and interpretation of the results obtained;
- questions asked by the members of the Committee related to the proposed PhD programme described in the recruitment announcement;
- questions related to the candidate's motivation for scientific work.

Rekrutacja składa się z trzech etapów:

a) selekcja kandydatów przez Komisję na podstawie zgodności kompetencji kandydata z wymaganiami określonymi w programie rekrutacyjnym;

b) selekcji kandydatów przez Komisję na podstawie dotychczasowych osiągnięć i wyników w nauce przedstawionych w złożonych dokumentach;

c) rozmowy kwalifikacyjnej z Komisją, która obejmuje:

- prezentację podczas której kandydat przedstawia wyniki swoich badań (pracy magisterskiej lub innej pracy badawczej wykonanej przez kandydata); prezentacja może trwać nie dłużej niż 10 minut;
- zadanie pytań przez członków Komisji sprawdzających znajomości tematyki przedstawionej przez kandydata, stosowanych przez niego metod oraz umiejętności interpretacji uzyskanych wyników;
- zadanie pytań przez członków Komisji sprawdzających znajomość tematyki wymienionej w ogłoszeniu o rekrutacji (proponowanym programie badawczym);
- poznanie motywacji kandydata do pracy naukowej.

20. Language of interview (język rozmowy kwalifikacyjnej):

- either English or Polish up to the candidate's choice (angielski lub polski - do wyboru przez kandydata)

21. Criteria for evaluation of candidates:

a) Stage One

The Committee analyses the application documents in terms of the candidate's competencies and their alignment with the requirements specified in the recruitment program. Candidates who obtain at least 40% of the maximum number of points in the first stage qualify for the second stage.

Evaluation criteria:

- education in the subject areas listed in the application guidelines; (scoring scale: 0.0 – 2.0 points);
- experience in the subject areas listed in the recruitment program (scoring scale: 0.0 – 2.0 points);

- other competencies specified in the recruitment program (scoring scale: 0.0 – 1.0 points).

b) Stage Two

The Committee evaluates the candidates' previous achievements and their academic performance based on the submitted documents. Candidates with the 5 best scores, not lower than 60% of the maximum number of points, will qualify for the third stage;

- results obtained during studies (scoring scale: 0.0 – 4.0 points)
- competencies specified in the recruitment programme (scoring scale: 0.0 – 3.0 points)
- co-authorship of a scientific publication (depending on the role in the publication) (scoring scale: 0.0 – 1.0 point)
- other achievements, e.g., awards, active conference attendance, honourable mentions, scholarships, domestic and foreign internships, voluntary work, popularisation of science (scoring scale: 0.0 – 2.0 points)

c) Stage Three:

When determining the results of the interview, the Committee takes into account:

- the degree of understanding of one's own work; the ability to interpret the results obtained; the understanding of the methods used, knowledge in the field related
- to the topic of the submitted work (a scale of the evaluation: 0 - 10 points);
- knowledge in the subject matter listed in the recruitment announcement (a scale of the evaluation: 0 - 10 points);
- form of presentation of the candidate's results (a scale of the evaluation: 0 - 3 points).

Kryteria oceny:

a) Etap pierwszy

Komisja dokonuje, analizy dokumentów aplikacyjnych pod względem dopasowania kompetencji kandydata do wymagań określonych w programie rekrutacyjnym. Do drugiego etapu kwalifikują się kandydaci, którzy w etapie pierwszym zdobyli co najmniej 40% maksymalnej liczby punktów.

Kryteria oceny:

- wykształcenie w tematyce wymienionej w programie rekrutacyjnym; (skala oceny 0,0 - 2,0 pkt.)
- doświadczenie w tematyce wymienionej w programie rekrutacyjnym (skala oceny 0,0 - 2,0 pkt.)
- inne kompetencje określone w programie rekrutacyjnym (skala oceny 0,0 - 1,0 pkt.)

b) Etap drugi

Komisja ocenia dotychczasowe osiągnięcia kandydatów oraz ich wyniki w nauce na podstawie złożonych dokumentów. Do trzeciego etapu zakwalifikowane zostaną osoby, które uzyskały 5 najlepszych wyników, nie mniejszych niż 60% maksymalnej liczby punktów.

Kryteria oceny:

- wyniki uzyskane w trakcie kształcenia (skala oceny 0,0 - 4,0 pkt.)
- kompetencje określone w programie rekrutacyjnym (skala oceny 0,0 - 3,0 pkt.)
- współautorstwo publikacji naukowej (w zależności od roli w publikacji) (skala oceny 0,0 - 1,0 pkt.)
- praca w kole naukowym (skala oceny 0,0 lub 0,5 pkt.)
- inne osiągnięcia, np: nagrody, aktywny udział w konferencji, wyróżnienia, stypendia, staże krajowe i zagraniczne, wolontariat, popularyzacja nauki (skala oceny 0,0 – 2,0 pkt.)

b) Etap trzeci:

Przy ustalaniu wyników rozmowy kwalifikacyjnej Komisja bierze pod uwagę:

- stopień zrozumienia własnej pracy; umiejętność interpretacji otrzymanych wyników; zrozumienie stosowanych metod, wiedzę w obszarze związanym z tematem przedstawionej pracy (skala oceny 0 - 10 pkt.),
- wiedzę w tematyce wymienionej w ogłoszeniu o rekrutacji (skala oceny 0 - 10 pkt.),
- formę prezentacji własnych wyników (skala oceny 0 - 3 pkt.).

22. For additional information please contact:

- formal issues: PhDschool-recruitment@ibb.waw.pl (Doctoral School Secretariat);
- PhD programme-related issues: the supervisor at IBB PAS (we **encourage you to contact the supervisor** to learn more about the project before submitting your application)

Kontakt:

- sprawy formalne: PhDschool-recruitment@ibb.waw.pl (Biuro ds. doktoranckich);
- pytania dotyczące planowanych badań: promotor (przed złożeniem dokumentów **zachęcamy do kontaktu z promotorem** w celu uzyskania dodatkowych informacji na temat planowanych badań)

23. Legal basis: https://ibbpan.bip.gov.pl/rekrutacja/zasady-i-warunki-rekrutacji-w-szkoly-doktorskiej-ibb-pan-od-2026-2027.html

Podstawa prawna: https://ibbpan.bip.gov.pl/rekrutacja/zasady-i-warunki-rekrutacji-w-szkoly-doktorskiej-ibb-pan-od-2026-2027.html

24. Source of Scholarship:

Źródło finansowania stypendium:

- IBB PAS Scholarship Fund (Fundusz Stypendialny IBB PAN)

25. Tagi (Tags): (English; up to 5): phosphorylation, acetylation, zinc, copper, protein