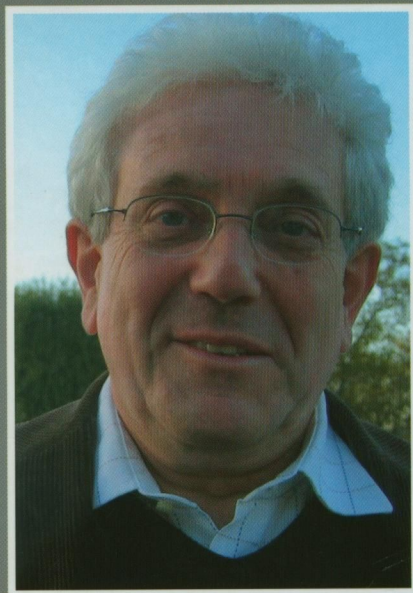




Zachodniopomorski
Uniwersytet Techniczny
w Szczecinie



Mieczysław Lisak

HONORIS CAUSA
DOCTORIS



Wydział
Inżynierii Mechanicznej
i Mechatroniki

Szczecin 2013

Uroczystość
nadania tytułu
doktora honoris causa
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie

Mieczysławowi Lisakowi

Szczecin 2013

Projekt okładki
Aneta Zierke

@ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
Szczecin 2013

ISBN 978-83-7663-147-9

Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl

Opracowanie graficzne, łamanie, druk i oprawa:
PPH Zapol Dmochowski, Sobczyk Spółka Jawna
al. Piastów 42, 71-062 Szczecin, tel. 91 435 19 30, e-mail: zarzad@zapol.com.pl

Słowo wstępne Jego Magnificencji Rektora Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie prof. dr. hab. inż. Włodzimierza Kiernożyckiego	5
Laudacja prof. dr hab. inż. Ireny Kruk Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny	7
Uchwała Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie	13
Nota biograficzna Doktora Honoris Causa profesora Mieczysława Lisaka	17
Wykład Doktora Honorowego profesora Mieczysława Lisaka „Fuzja – energia gwiazd”	19
Opinia prof. dr. hab. inż. Yuryego Kravtsova	43
Uchwała Senatu Akademii Morskiej w Szczecinie	48
Opinia prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Peradzyńskiego	49
Uchwała Senatu Uniwersytetu Warszawskiego	53
Opinia prof. zw. dr. hab. Eryka Infelda	54
Uchwała Rady Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych	56
Doktorzy honoris causa Akademii Rolniczej w Szczecinie	57

Doktorzy honoris causa Politechniki Szczecińskiej	60
--	----

Doktorzy honoris causa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie	62
--	----

Słowo wstępne Jego Magnificencji Rektora
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie
prof. dr. hab. inż.
Włodzimierza Kiernożyckiego

Uzyskiwanie kolejnych stopni i tytułów naukowych wymaga dużo pracy, zdolności i przymiotów charakteru. Nauka to pasja, wybór drogi życiowej, z której trudno zawrócić. Profesor Mieczysław Lisak wybrał tę drogę i jest jej wierny nieprzerwanie od przeszło 40 lat – od czasu ukończeniu studiów w Chalmers University of Technology w Göteborgu. Ale korzenie profesora Mieczysława Lisaka tkwią bliżej nas, bo tu w Szczecinie. Tutaj w 1965 roku, po uzyskaniu świadectwa dojrzałości, jako absolwent Liceum Ogólnokształcącego nr 6 w Szczecinie, podjął studia na Wydziale Elektrycznym byłej Politechniki Szczecińskiej. W 1969 roku studia zostały przerwane z powodu wyjazdu do Szwecji, na pobyt stały. Tam uzyskiwał kolejne stopnie naukowe – tytuł profesora w zakresie fizyki plazmy oraz stanowisko profesora zwyczajnego.

Zainteresowania badawcze Profesora Mieczysława Lisaka obejmują szerokie spektrum fizyki, takie jak: teorię fizyki plazmy w warunkach fuzji termojądrowej, efekty nieliniowe dotyczące propagacji impulsów i wiązek świetlnych, teorię wyładowań mikrofalowych w gazach oraz oddziaływanie laserów o dużej mocy z plazmą. Zajmuje się opisem plazmy zarówno w języku klasycznym, jak i kwantowym.

Profesor Mieczysław Lisak jest wybitnym uczonym o rzadko spotykanej aktywności w dziedzinie nauki, jak i jej organizacji. Wniósł wielki wkład w rozwój badań w obszarze fizyki plazmy, jest światowej klasy autorytetem w uprawianej dyscyplinie nauki.

Miarą autorytetu naukowego Profesora jest powołanie Go do licznych gremiów opiniotwórczych i instytucji naukowych. Profesor Mieczysław Lisak był szefem Szwedzkiej Asocjacji Euratom – VR, kierował szwedzkim programem badań termonuklearnych na czterech uniwersytetach i instytutach naukowych. W latach 1999–2005 reprezentował Szwecję w naczelnym komitecie Unii Europejskiej oraz koordynował prace prowadzone na szwedzkich

uniwersytetach w ramach współpracy z przemysłem w zakresie fuzji. Pełnił także funkcję eksperta naukowego dla wielu państwowych i prywatnych instytucji.

Profesor Mieczysław Lisak nie zapomniał jednak nigdy o swoim mieście. Tutaj rozpoczął studia wyższe i swoją przygodę z nauką. Chętnie wracał do Szczecina, dzieląc się z nami swoją wiedzą i doświadczeniem. Był inicjatorem wielu wspólnych przedsięwzięć naukowych, promując rozwój młodej kadry.

Wybitny uczony, profesor o międzynarodowym autorytecie w zakresie fizyki plazmy w zastosowaniach do kontrolowanej syntezy termojądrowej, optyki nieliniowej, zjawisk wyładowań mikrofalowych, twórca szkoły w tych obszarach nauki. Wniósł istotny i szczególny wkład w rozwój Politechniki Szczecińskiej oraz Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w zakresie współpracy naukowej i kształcenia młodej kadry.

Przypadł mi w udziale zaszczyt poprowadzenia dzisiejszego uroczystego posiedzenia Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, w czasie którego Profesor Mieczysław Lisak zostanie uhonorowany najwyższym wyróżnieniem, jakie uczelnia akademicka może przyznać – tytułem doktora honoris causa.

Senat Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, nadając godność doktora honoris causa Profesorowi Mieczysławowi Lisakowi, wyraża uznanie, szacunek i podziękowanie, przede wszystkim za Jego pracę, trud włożony w kreowanie postępu oraz otwarcie na współpracę międzynarodową.

Laudacja
prof. dr hab. Ireny Kruk
Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie

Magnificencjo Rektorze!

Wysoki Senacie!

Czcigodny Doktorze Honorowy!

Wysoka Rado Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki!

Szanowni Goście!

Jest dla mnie wielkim zaszczytem i przyjemnością pełnić rolę promotora w uroczystości nadania godności i tytułu doktora honoris causa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie wybitnemu uczonemu, osobie cieszącej się wysokim prestiżem i uznaniem w międzynarodowym środowisku naukowym, Panu Profesorowi Mieczysławowi Lisakowi.

Lata młodości Profesora Mieczysława Lisaka związane są ze Szczecinem. Tu się urodził, uczęszczał do szkoły średniej, a także przez trzy lata studiował na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej. Rozpoczęte studia kontynuował na Chalmers University of Technology w Göteborgu, gdzie w 1972 roku otrzymał dyplom magistra fizyki. W 1976 roku uzyskał stopień naukowy doktora nauk fizycznych, w 2001 roku tytuł profesora w zakresie fizyki plazmy.

Losy zawodowe Profesora Mieczysława Lisaka związane są z Chalmers University of Technology, na którym pracuje od 1976 roku. W 1979 roku uzyskał stanowisko docenta, w 1996 roku stanowisko profesora zwyczajnego. Jednocześnie od 1982 roku pełni funkcję konsultanta naukowego dla Ericsson Radar Electronics, ASEA Switchgear, Bofors Electronics, Saab Space (obecnie Ruag Space) oraz CNES w Toulouse (Francja).

Działalność naukowa Profesora Mieczysława Lisaka jest niezwykle aktywna i owocna. Przedmiotem Jego głównych zainteresowań jest szeroko pojmowana fizyka plazmy oraz optyka nieliniowa w szczególności:

- fizyka plazmy w zastosowaniach do kontrolowanej fuzji termojądrowej oraz efekty fizyczne wywoływane przez wysokoenergetyczne cząstki powstające w reaktorach termojądrowych;
- efekty nieliniowe dotyczące propagacji impulsów i wiązek świetlnych;
- oddziaływanie światła generowanego przez lasery o dużej mocy z plazmą;
- teoretyczno-eksperymentalne badania zjawiska wyładowania mikrofalowego w gazach.

Badania te mają pionierski i światowy wymiar, zawierają wiele nowych, oryginalnych koncepcji i rozwiązań teoretycznych. Profesor wniósł istotny wkład w zrozumienie mechanizmów powstawania niestabilności, powodowanych przez oddziaływanie szybkich cząstek z falami w plazmie, nieliniowej dynamiki fal elektromagnetycznych w tokamakach, ogrzewania plazmy metodą ICRH, warunków i stabilności termicznej zapłonu plazmy w reaktorach termojądrowych, dynamiki oscylacji typu „sawtooth” w tokamakach oraz intrygującego zjawiska, tzw. jonowej emisji cyklotronowej, obserwowanej w wielu eksperymentach na dużych tokamakach.

Do osiągnięć Profesora mających duże znaczenie w optyce nieliniowej należą między innymi badania związane z propagacją solitonów i impulsów gaussowskich w ośrodkach słabo nieliniowych. Profesor Mieczysław Lisak i Jego zespół stanowią jedną z wiodących na świecie grup teoretycznych w tym obszarze badań. Niektóre wyniki badań oraz opracowane metody badawcze są już klasyczne, trafiły do podręczników, i są często cytowane. Mają również charakter aplikacyjny: jako przykład może służyć rozwinięcie metody wariacyjnej do znajdowania przybliżonych rozwiązań dla liniowej i nieliniowej propagacji fal elektromagnetycznych czy opracowanie nowego formalizmu do opisu dynamiki wysokoenergetycznych wiązek cząstek naładowanych w akceleratorach. Profesor Mieczysław Lisak kierował kilkudziesięcioma projektami badawczymi zarówno w Szwecji, jak i poza granicą, w tym również w ramach współpracy z przemysłem, np.: Ericsson Microwave System (Göteborg, Szwecja), FOA, ASEA, Philips (Szwecja), Centre National d'Etudes Spatiales (Francja), Saab Space AB (obecnie Ruag Aerospace – Szwecja), European Space Agency (Holandia), z firmami FOA i Ericsson Saab Avionics w Linköping. Badania te zaowocowały wieloma oryginalnymi koncepcjami oraz rozwiązaniami teoretycznymi z zakresu analizy zjawiska wyładowania mikrofalowego w gazach, które stanowi ważny problem w mikrofalowych systemach radarowych, w komunikacji stacji naziemnych z przestrzenią kosmiczną czy w rezonatorach i filtrach mikrofalowych używanych w stacjach bazowych telefonii komórkowej. Wyniki tych ostatnich badań opublikowano

w IEEE MTT oraz nagrodzono „jako najbardziej znaczący wkład w tej dziedzinie w 1999 roku”.

Dorobek publikacyjny Profesora Mieczysława Lisaka to 13 monografii i raportów, ponad 270 artykułów, opublikowanych w renomowanych międzynarodowych czasopismach i 180 artykułów, opublikowanych w materiałach światowych kongresów i prestiżowych konferencji naukowych. Należy podkreślić, że działalność naukową Profesora wyróżnia nowoczesna tematyka badań, jasno określony zakres tematyczny, wysoki poziom teoretyczny i duża przydatność wyników badań w technice.

O uznaniu Profesora Mieczysława Lisaka, jako autorytetu naukowego, świadczy pełnienie licznych funkcji w organizacjach, komitetach i programach naukowych. Nie będę tu wymieniała wszystkich licznych zasług w organizacji nauki, podam tylko kilka:

- w latach 1999–2005 kierownik szwedzkiego programu badań termojądrowych, obejmującego około stu naukowców z czterech uniwersytetów i jednego instytutu naukowego; oraz reprezentacja Szwecji w naczelnych komitetach Unii Europejskiej w tym obszarze;
- od 1991 roku członek komitetu programowego i organizacyjnego IAEA Technical Meetings and US-Japan Joint Workshops on the Alpha Particles in Fusion Research;
- członek Naukowego Komitetu European Fusion Theory Conference;
- krajowy koordynator grup badawczych szwedzkich uniwersytetów do współpracy z przemysłem w zakresie fuzji EURATOM w latach 1999–2005;
- członek Komitetu Badań Fuzji przy Swedish Research Council w latach 1996–2004;
- ekspert naukowy przy Swedish Research Council w latach 1999–2005;
- eksperta naukowy przy Royal Swedish Academy of Science, włączając Nobel Committee od 1999 roku;
- członek Consultative Committee for EURATOM Fusion Research Programme (CCE-FU) w latach 1999–2005.

Senat Politechniki Szczecińskiej, doceniając zaangażowanie Profesora Lisaka w proces włączenia szczecińskich uczelni do projektu EURATOM, przyznał Mu w 2008 roku medal Za Zasługi dla Politechniki Szczecińskiej.

Profesor jest członkiem kilku towarzystw naukowych i recenzentem najbardziej renomowanych czasopism międzynarodowych, jak: *Physical Review Letters*, *Physical Review*, *Physics of Fluids*, *Nuclear Fusion*, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, *Optics Letters*, *Journal of Optical Society of America*, *Optics Communications*, *Physica Scripta*.

Bogata i twórcza działalność Profesora Mieczysława Lisaka była wielokrotnie nagradzana i wyróżniana. Na szczególną uwagę zasługują:

- wyróżnienie Szwedzkiego Komitetu Naukowego za najbardziej kreatywną twórczość naukową w zakresie fizyki plazmy termojądrowej (1999 rok);
- nagroda IEEE Microwave and Technology, przyznana w 2001 roku za najbardziej fundamentalny artykuł naukowy;
- wyróżnienie w Europhysics News w 2010 roku za wkład w obszarze „Electrical Breakdown in Space-Borne Microwave Equipment”.

Godne uznania są osiągnięcia Profesora Mieczysława Lisaka w zakresie międzynarodowej współpracy naukowej, gdzie występuje jako formalny bądź nieformalny kierownik tworzonych zespołów. Owocną współpracę naukową z Politechniką Szczecińską Profesor nawiązał w 2003 roku, przyjmując na czteromiesięczny staż magistra inżyniera Pawła Berczyńskiego. Współpracę formalną między Politechniką Szczecińską a Chalmers University of Technology w Göteborgu nawiązano w 2005 roku w związku z uczestnictwem Instytutu Fizyki w europejskim projekcie EURATOM.

W ramach realizowanego projektu Profesor dwa razy w roku uczestniczy w seminariach organizowanych przez Instytut Fizyki oraz chętnie przyjmuje na Chalmers University naszych nauczycieli akademickich w ramach programu Mobility.

Podkreślić należy aktywność w kształceniu młodej kadry naukowej. Profesor wypromował 24 doktorów, był opiekunem 28 zbiorów prac realizowanych na studiach doktoranckich i 44 prac magisterskich. Wielu wychowanków Profesora rozwija dziedzinę Jego zainteresowań w różnych międzynarodowych ośrodkach naukowych lub pełni ważne funkcje w przemyśle szwedzkim.

Profesor Mieczysław Lisak jest cenionym nauczycielem akademickim. Jego wykłady są atrakcyjne w formach przekazu, a tematyka pokrywa się w przybliżeniu z obszarami badań. Profesor jest autorem bądź współautorem 14 podręczników i kompendiów dla studentów studiów magisterskich.

Wyznaję z pokorą, że jako autorowi tej laudacji trudno mi ją było napisać, aby nie powtarzać zdań zawartych w recenzjach wyrażających uznanie dla wszystkich dziedzin działalności Profesora Lisaka jako wybitnego Uczzonego.

Na koniec laudacji nie mogę pominąć cech osobowościowych Profesora. Jest to człowiek wspaiały, skromny, otwarty, życzliwy, bardzo chętny do pomocy, o dużej wrażliwości, przyjaciel.

Te wyjątkowe dokonania naukowe i zawodowe Profesora sprawiły, że Senat Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, na wniosek Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, przy pełnym

poparciu senatów Uniwersytetu Warszawskiego i Akademii Morskiej w Szczecinie oraz Rady Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku, nadał uchwałą z 26 marca 2012 roku, Profesorowi Mieczysławowi Lisakowi godność doktora honoris causa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Uchwała Senatu
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie

Uchwała nr 20
Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie
z dnia 26 marca 2012 r.

w sprawie nadania tytułu doktora honoris causa
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
Profesorowi Mieczysławowi Lisakowi

Na podstawie § 3 ust. 1 i 6 Statutu ZUT oraz opinii Rady Naukowej Instytutu Problemów Jądrowych, Senatu Uniwersytetu Warszawskiego oraz Senatu Akademii Morskiej w Szczecinie, popierających wniosek Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT, Senat Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie nadaje

Profesorowi Mieczysławowi Lisakowi

wybitnemu uczonemu o rozległych horyzontach i dużej kreatywności, uznanemu światowej klasy autorytetowi w zakresie fizyki plazmy w zastosowaniach do kontrolowanej syntezy termojądrowej, optyki nieliniowej, zjawiska wyładowań mikrofalowych, twórcy szkoły w tych obszarach nauki, koordynatorowi wielu międzynarodowych projektów badawczych, laureatowi międzynarodowych nagród i wyróżnień, w uznaniu Jego wybitnych zasług dla nauki światowej, nieprzeciętnych osiągnięć naukowych i organizacyjnych, ogromnego wkładu w rozwój badań nad fizyką plazmy, w szczególności Jego zasług dla Politechniki Szczecińskiej oraz Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie w zakresie współpracy naukowej i kształcenia młodej kadry

tytuł doktora honoris causa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie

Przewodniczący Senatu
Rektor

prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kiernożycki



EX SUMMA LICENTIA SENATUS ACADEMICI
NOS, RECTOR
POMERANIAE OCCIDENTALIS UNIVERSITATIS TECHNOLOGICAE
STETINI
ET
DECANUS FACULTATIS ARTIS INGENIARIAE ET MECHATRONICAE
ATQUE
PROMOTOR RITU OBLIGATORIO CONSTITUTUS

COMPROBANTIBUS IUNCTIM SENATIBUS:
ACADEMIAE SCIENTIARUM MARINARIUM STETINI,
UNIVERSITATIS VARSOVIENSIS

ATQUE
CONSILII IN ARTIBUS VERSANTIS PATRII CENTRI NUCLEARIIUM EXPLORATIONUM

RENUNTIAMUS

Mieczisław LISAK

INSIGNEM TITULUM

DOCTORIS HONORIS CAUSA

ET IURA PRIVILEGIAQUE AD ILLAM DIGNITATEM SPECTANTIA
ACCIPERE

ILLUSTRIS VIR STUDIOsus, PROFESSOR, VIR MAGNA AUCTORITATE MUNDANAE CLASSIS PRAEDITUS
IN RATIONE PHYSICAE PLASMATIS EXPLORANDAE SYNTHESI THERMONUCLEARI APTAE, ILLINEARIS
ARTIS OPTICAE, PHAENOMENI MICROUNDALIIUM PROFUSIONUM, CREATOR SCHOLAE IN HIS DISCIPLINIS,
ORDINATOR MULTORUM INTERNATIONALIUM PROPOSITORUM EXPLORATORIORUM, INTERNATIONALIBUS
PRAEMIIS LAUDIBUSQUE LAUREATUS, AESTIMATIS EMINENTIBUS MERITIS DOCTRINAE MUNDANAE
CAUSA, EXIMIIS IN ARTIBUS VERSANTIBUS ET ORDINATIONEM ATTINENTIBUS EFFECTIBUS, PERMAGNO
IMPOSITO IN PROGRESSUM EXPLORATIONUM PHYSICAE PLASMATIS, PRAECIPUE AESTIMATIS EIUS MERITIS
POLYTECHNICAE STETINENSIS CAUSA IN RATIONE MUTUAE OPERAE INVESTIGATIONI RERUM DANDAE ATQUE
IN RATIONE CONFORMATIONIS STUDIOsorUM.

IN CUIUS ILLUSTRIS FACTI FIDEM
HOC DIPLOMA

POMERANIAE OCCIDENTALIS UNIVERSITATIS TECHNOLOGICAE STETINI SIGILLO MAIORE MUNITUM
A NOBIS EDITUM EST.

PROMOTOR

Irena Kruk

IRENA KRUK

DECANUS

Stephanus Berczyński

STEPHANUS BERCZYŃSKI

RECTOR

Władimir Kiernożycki

WŁADIMIRUS KIERNOŻYCKI

DATUM EST STETINI, DIE VICESIMO SEXTO MENSIS MARTII, ANNO MMXII



Z NAJWYŻSZEGO UPOWAŻNIENIA SENATU AKADEMICKIEGO
MY, REKTOR
ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIwersYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE
I
DZIEKAN WYDZIAŁU INŻYNIERII MECHANICZNEJ I MECHATRONIKI
ORAZ
PODŁUG OBOWIĄZUJĄCEGO OBYCZAJU USTANOWIONY PROMOTOR

ZA
POWSZECHNĄ ZGODĄ SENATÓW:
AKADEMII MORSKIEJ W SZCZECINIE
UNIwersYTETU WARSZAWSKIEGO
ORAZ
RADY NAUKOWEJ NARODOWEGO CENTRUM BADAŃ JĄDROWYCH

OŚWIAADCZAMY, ŻE ZASZCZYTNY TYTUŁ
DOKTORA HONORIS CAUSA
ORAZ PRAWA I PRZYWILEJE Z NIM ZWIĄZANE
OTRZYMUJE

Mieczysław LISAK

WYBITNY UCZONY, PROFESOR, ŚWIATOWEJ KLASY AUTORYTET W ZAKRESIE FIZYKI PLAZMY
W ZASTOSOWANIACH DO KONTROLOWANEJ SYNTEZY TERMOJĄDROWEJ, OPTYKI NIELINIOWEJ, ZJAWISKA
WYŁADOWAŃ MIKROFALOWYCH, TWÓRCA SZKOŁY W TYCH OBSZARACH NAUKI, KOORDYNATOR WIELU
MIĘDZYNARODOWYCH PROJEKTÓW BADAWCZYCH, LAUREAT MIĘDZYNARODOWYCH NAGRÓD I WYRÓŻNIEŃ,
W UZNANIU WYBITNYCH ZASŁUG DLA NAUKI ŚWIATOWEJ, NIEPRZECIĘTNYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH
I ORGANIZACYJNYCH, OGROMNEGO WKŁADU W ROZWÓJ BADAŃ NAD FIZYKĄ PLAZMY, W SZCZEGÓLNOŚCI
JEGO ZASŁUG DLA POLITECHNIKI SZCZECIŃSKIEJ ORAZ ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIwersYTETU
TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE W ZAKRESIE WSPÓŁPRACY NAUKOWEJ I KSZTAŁCENIA MŁODEJ KADRY

W DOWÓD WIARYGODNOŚCI TEGO DONIOSŁEGO WYDARZENIA
NINIEJSZY DYPLÓM OPATRZONY PIECZĘCIĄ
ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIwersYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE
WYSTAWILIŚMY

PROMOTOR
Irena Kruk
IRENA KRUK

DZIEKAN
Stefan Berczyński
STEFAN BERCZYŃSKI

REKTOR
Włodzimierz Kiernożycki
WŁODZIMIERZ KIERNOŻYCKI

NADANO W SZCZECINIE, 26 MARCA ROKU 2012

Nota biograficzna Doktora Honoris Causa Profesora Mieczysława Lisaka

Profesor Mieczysław Lisak urodził się w Szczecinie 20 czerwca 1947 roku. W 1965 roku, po uzyskaniu świadectwa dojrzałości, jako absolwent Liceum Ogólnokształcącego nr 6 w Szczecinie, podjął studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej.

W roku 1969 studia przerwał z powodu wyjazdu do Szwecji na pobyt stały. Edukację kontynuował na Chalmers University of Technology w Göteborgu, gdzie w 1972 roku uzyskał dyplom magistra fizyki. W latach 1972–1976 odbył studia doktoranckie w Institute for Electron Physics na Chalmers University of Technology w Göteborgu, uzyskując w 1976 roku stopień naukowy doktora nauk fizycznych. W 1979 roku uzyskał stanowisko docenta, w 1996 roku, stanowisko profesora nadzwyczajnego, a w 2001 roku, po uzyskaniu tytułu profesora w zakresie fizyki plazmy, został mianowany na stanowisko profesora zwyczajnego w Department of Electromagnetics, a od 2007 roku w Department for Earth and Space Science na Chalmers University of Technology, na którym jest w dalszym ciągu zatrudniony. Jednocześnie w 1982 roku pełnił funkcję konsultanta naukowego oraz prowadził projekty naukowe dla Ericsson Radar Electronics, ASEA Switchgear, Bofors Electronics, Saab Space (obecnie Ruag Space) oraz CNES w Toulouse (Francja).

Zainteresowania badawcze Profesora Mieczysława Lisaka obejmują szerokie spektrum fizyki, jak: teorię fizyki plazmy w warunkach fuzji termojądrowej, efekty nieliniowe dotyczące propagacji impulsów i wiązek świetlnych, teorię wyładowania mikrofalowego w gazach oraz oddziaływanie laserów o dużej mocy z plazmą. Zajmuje się opisem plazmy zarówno w języku klasycznym, jak i kwantowym.

Dorobek naukowy Profesora Mieczysława Lisaka obejmuje ponad 270 artykułów w renomowanych czasopismach naukowych, takich jak: *Physical Review Letters*, *Physical Review*, *Physics of Fluids*, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, *Physica of Plasmas*, *Nuclear Fusion*, *Physica Scripta*, *Journal of Optical Society America*, *Optics Communications* oraz ponad 180

artykułów w materiałach światowych kongresów i prestiżowych konferencji naukowych. Jest autorem lub współautorem 13 monografii naukowych i raportów, a także kilku prac o charakterze popularno-naukowym.

Profesor Mieczysław Lisak jest wybitnym uczonym o rzadko spotykanej aktywności zarówno w dziedzinie nauki, jak i jej organizacji. Wniósł wielki wkład w rozwój badań w obszarze fizyki plazmy; jest światowej klasy autorytetem w uprawianej dyscyplinie nauki. Był promotorem 25 prac doktorskich, 28 zbiorów prac naukowych, realizowanych na studiach doktoranckich, autorem/współautorem 14 podręczników akademickich oraz autorem licznych recenzji artykułów naukowych, rozpraw doktorskich i wniosków profesorskich.

W latach 1999–2005 Mieczysław Lisak był szefem szwedzkiej Asocjacji EURATOM-VR i kierował szwedzkim programem badań termonuklearnych na czterech uniwersytetach i instytutach naukowych. Reprezentował Szwecję w naczelnym komitecie Unii Europejskiej oraz koordynował prace prowadzone na szwedzkich uniwersytetach w ramach współpracy z przemysłem w zakresie fuzji. Pełnił także funkcję eksperta naukowego dla wielu państwowych i prywatnych instytucji, między innymi: Swedish Research Council, Royal Swedish Academy of Sciences, Nobel Committee. Kierował kilkudziesięcioma projektami badawczymi zarówno szwedzkimi, jak i zagranicznymi, w tym także związanymi z przemysłem. Był organizatorem trzech międzynarodowych sympozjów, International IAEA Symposium on Energetic Particles In Magnetic Confined Systems. Profesor Mieczysław Lisak jest laureatem wielu nagród i wyróżnień. W 1999 roku otrzymał wyróżnienie Szwedzkiego Komitetu Naukowego za najbardziej kreatywną twórczość naukową w zakresie fizyki plazmy termojądrowej, w 2001 roku został laureatem nagrody IEEE Microwave and Technology za najbardziej fundamentalny artykuł naukowy, w 2010 roku otrzymał wyróżnienie w Europhysics News za wkład w obszarze Electrical Breakdown in Space-Borne Microwave Equipment.

FUZJA – ENERGIA GWIAZD



Every time you look up at the sky, every one of those points of light is a reminder that fusion power is extractable from hydrogen and other light elements, and it is an everyday reality throughout the Milky Way Galaxy.

Carl Sagan, Spitzer Lecture, October 1991

Wewnętrzny obszar zbioru M100 I Virgo
– zdjęcie z kamery teleskopu Hubble Space

Streszczenie

Fuzja termojądrowa jest źródłem energii Słońca i gwiazd. Wykorzystanie reakcji termojądrowych, jako pożytecznego źródła energii na Ziemi, jest wyzwaniem dla naukowców i inżynierów od wielu lat. Jesteśmy obecnie świadkami narodzin tej nowej technologii, zdolnej dostarczyć praktycznie nieograniczonego i bezpiecznego źródła energii dla zaspokojenia potrzeb energetycznych ludzkości.

1. Wstęp

W procesach syntezy termojądrowej, zachodzącej we wnętrzu gwiazd, uwalniane są ogromne ilości energii. Energia wytwarzana we wnętrzu naszej gwiazdy – Słońca, dociera do Ziemi w postaci promieniowania od miliardów lat. Tutaj uległa przetworzeniu w wyniku skomplikowanych procesów fizycznych,

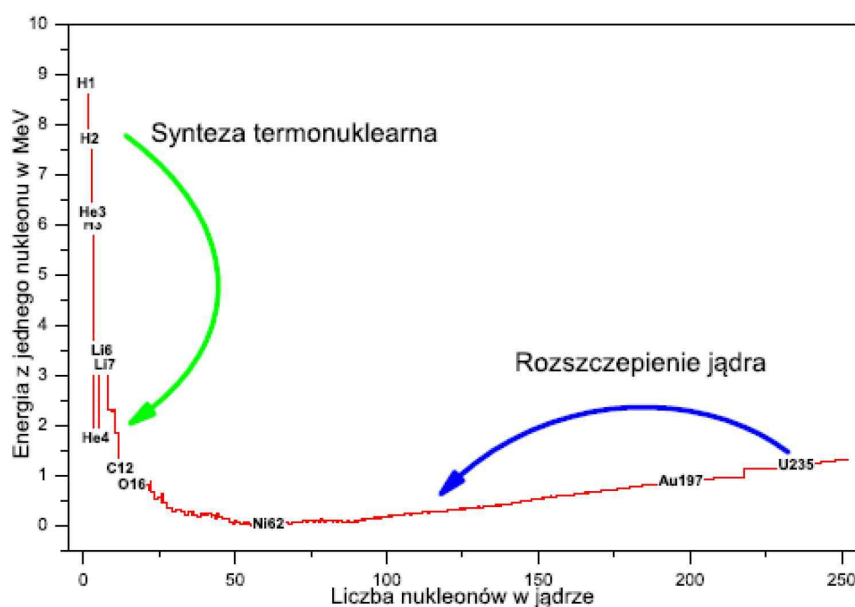
chemicznych i geologicznych w inne formy energii. Od czasów, gdy na Ziemi powstało życie, w przetwarzanie słonecznej energii włączyły się także procesy biologiczne. Przetworzona energia słoneczna kumulowała się m.in. w postaci paliw kopalnych, bez których nie może dziś funkcjonować nasza cywilizacja. Wlewając benzynę do baku samochodu, raczej nie zaprzątamy sobie głowy myślą, że choć pośrednio, to korzystamy w istocie z termojądrowej energii Słońca. Paliwa kopalne wykorzystujemy jednak w tempie nieporównanie szybszym, niż one powstawały. W przyszłości, prawdopodobnie już nie tak odległej (szacowanej na kilkadziesiąt lat), nastąpi moment, gdy paliwa kopalne wyczerpią się. Jaki będzie więc świat naszych dzieci i wnuków? Czy będzie to świat kryzysu energetycznego i koniec cywilizacji w formie jaką obecnie znamy? Zależy to w dużej mierze od tego, czy do tego krytycznego momentu my, jako ludzkość, opanujemy proces kontrolowanej syntezy termojądrowej. Elektrownia termojądrowa stanowiłaby malutki „kawałek Słońca na Ziemi”, uwalniając nas od zależności od paliw kopalnych. Podkreślić też trzeba, że w przeciwieństwie do większości obecnych technologii pozyskiwania energii, technologie energetyki termojądrowej będą „czyste”, tzn. bezpieczne dla człowieka i jego naturalnego środowiska. Wynika to po prostu z fizyki procesów zachodzących w tokamakach i stellaratorach – urządzeniach do otrzymywania energii termojądrowej w sposób kontrolowany. (Międzynarodowe już słowo tokamak jest akronimem pochodzącym z języka rosyjskiego od słów „toroidalna komora magnetyczna”, zaś słowo stellarator utworzono od łacińskiego słowa stella – gwiazda. Poniżej często podajemy angielską wersję danego terminu, gdyż język ten stał się obecnie językiem nauki.) Fuzja termojądrowa, reakcja termojądrowa, synteza termojądrowa, fuzja jądrowa (nazwy te często używane są zamiennie) – polega na tym, że jądra atomowe lżejszych pierwiastków (np. wodoru lub izotopów wodoru) łączą się (stąd słowo – fuzja, ang. *fusion*) tworząc cięższe jądra atomowe (np. jądra helu, ang. *Helium*). We wnętrzu Słońca proces ten zachodzi w ekstremalnie wysokiej temperaturze i pod ogromnym ciśnieniem (właśnie dzięki tej wysokiej temperaturze w nazwie syntezy pojawia się często przedrostek termo). Paliwem w reaktorach termojądrowych są izotopy wodoru, które można względnie łatwo i w praktycznie nieograniczony sposób pozyskiwać, np. z wody morskiej. Użycie jako paliwa deuteru (ang. *Deuterium*) (jednego z izotopów wodoru) łącznie z pewną ilością innego pierwiastka – litu (ang. *Lithium*) w celu pozyskiwania – trytu (ang. *Tritium*) (innego ciężkiego izotopu wodoru) mogłoby dostarczyć ilości energii wystarczającej na tysiące lat. Fuzja termojądrowa jest więc zasadniczo odmiennym procesem fizycznym niż reakcje rozszczepiania ciężkich jąder, wykorzystywane do uzyskiwania energii

w obecnych elektrowniach atomowych (reakcja rozszczepiania po angielsku zwie się *fission*). Elektrownie atomowe często określa się też mianem elektrowni jądrowych. Należy podkreślić, że mimo podobnych nazw elektrownie jądrowe i elektrownie termojądrowe to zasadniczo różne technologie oparte na całkowicie różnych procesach fizycznych. Od około 50 lat naukowcy trują się nad metodami opanowania kontrolowanego procesu syntezy termojądrowej w warunkach ziemskich. Intensywne prace rozpoczęły się w końcu lat 60. Przyświeca im wizja otrzymywania taniej i bezpiecznej energii. Okazało się to jednak trudnym i długodystansowym zadaniem. Niezaprzeczalne korzyści, jakie jednak mogą być osiągnięte w przypadku opanowania fuzji, takie jak: uzyskanie bezpiecznego dla środowiska naturalnego i praktycznie „wiecznego” źródła energii, zlikwidowanie widma kryzysu energetycznego, uniezależnienie się od dostawców paliw kopalnych, a zatem wzrost energetycznego bezpieczeństwa narodowego, powodują, że program rozwoju badań i technologii w celu opanowania fuzji termojądrowej jest ważnym, choć o długofalowej perspektywie, składnikiem strategii energetycznej wielu państw oraz Unii Europejskiej. Zakończone sukcesem pozyskiwanie energii z fuzji termojądrowej na skalę przemysłową (bardzo prawdopodobne w połowie bieżącego stulecia) zmieni zasadniczo sposób zaopatrywania społeczeństw w energię elektryczną. Elektrownie termojądrowe zastąpią obecne elektrownie jądrowe oparte na rozszczepianiu jąder ciężkich pierwiastków (takich jak np. uran) oraz elektrownie oparte na spalaniu paliw kopalnych. Bezpieczeństwo elektrowni opartych na fuzji wynika m.in. stąd, że jednorazowo znajduje się w nich bardzo mała ilość paliwa termojądrowego. Eliminuje to możliwość zajścia procesów prowadzących do katastrof. Podczas procesu syntezy uwalniane są wprawdzie neutrony, które mogą powodować aktywację materiałów użytych do budowy reaktora. Nie jest to jednak problem tego samego rzędu co kłopoty z odpadami promieniotwórczymi w elektrowniach opartych na rozszczepieniu i można go zminimalizować poprzez właściwy dobór materiałów do budowy reaktora termojądrowego.

2. Podstawy fuzji

W procesie fuzji dwa lżejsze jądra atomowe „zlewają się” w jedno cięższe jądro atomowe. Okazuje się przy tym, że suma mas lżejszych jąder przed reakcją jest większa niż końcowa masa utworzonego cięższego jądra, [1–8]. Ten „defekt masy” (różnica masy końcowej i sumy mas początkowych) odpowiedzialny jest za „powstawanie” energii w procesie fuzji termojądrowej.

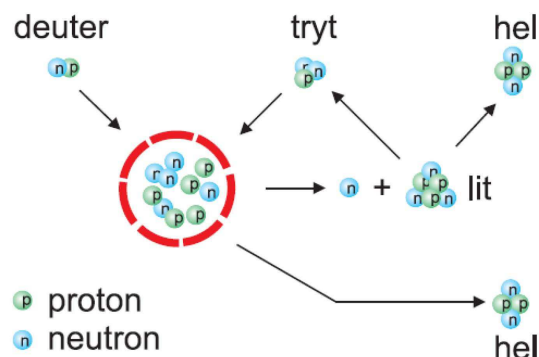
Następuje „zamiana masy na energię”. Mówiąc dokładniej, defektowi masy m odpowiada wydzielenie się energii E w ilości opisanej sławnym wzorem Einsteina $E = mc^2$, gdzie c jest prędkością światła w próżni. Ze względu na olbrzymią wartość c równą $3 \cdot 10^8$ m/s nawet małe defekty masy prowadzą do uzyskania dużych ilości energii. Defekt masy wynika z uwzględnienia energii wiązania (ang. *binding energy*) lżejszych jąder w nowo utworzonym cięższym jądrze. Zależność energii wiązania od liczby nukleonów (protonów lub neutronów) w jądrze przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Energia wiązania nukleonu w różnych jądrach atomowych. Na osi pionowej podano energię wiązania nukleonu; na osi poziomej liczbę nukleonów w jądrze

Reakcją zachodzącą najbardziej wydajnie jest reakcja pomiędzy deuterem D (1 proton i 1 neutron) oraz trytem T (1 proton i 2 neutrony) – dwoma izotopami wodoru (1 proton) – patrz rysunek 2. Zasadniczym produktem reakcji jest jądro helu. Oprócz niego powstają również neutrony oraz duże ilości pożytecznej energii. Jeden gram paliwa trytowo-deuterowego w elektrowni termojądrowej mógłby dostarczyć 90 tysięcy kilowatogodzin energii co odpowiada spalaniu 11 ton węgla w klasycznej elektrowni. Paliwo dla fuzji jest tanie i jednorodnie rozmieszczone na Ziemi. Woda morska zawiera deuter w praktycznie niewyczerpalnych ilościach. Tryt, który jest radioaktywnym gazem o krótkim czasie połowicznego rozpadu 12,3 roku, nie występuje w naturze na Ziemi. Może jednak być wytwarzany w elektrowni fuzyjnej z litu, który obficie występuje na Ziemi w ilościach wystarczających dla zapewnienia pracy elektrowni na setki lat. Innymi możliwościami rozpatrywanymi do wyko-

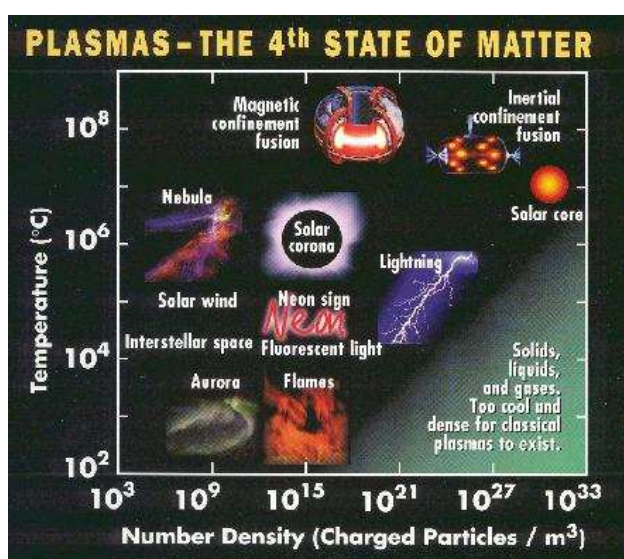
rzystania w elektrowniach opartych na syntezie termojądrowej są reakcje deuteru z deuterem D–D oraz deuteru z izotopem helu D–³He.



Rys. 2. Reakcja syntezy jądrowej deuteru z trytem

Większość energii uwolnionej w reakcjach fuzji unoszona jest przez szybkie neutrony, pozostała przez cząstki alfa (tzn. jądra helu 4He). Płaszcz otaczający reaktor fuzyjny spowolni neutrony, zamieniając ich energię na ciepło. Uzyskane ciepło może być użyte do generacji elektryczności w konwencjonalny sposób, np. w turbinie parowej. Fuzja (łączenie się jąder atomowych) może zajść tylko wówczas, gdy jądra znajdują się blisko siebie. Jądra atomowe mają jednak elektryczny ładunek dodatni i dlatego odpychają się siłami elektrycznymi. Konieczne jest więc podgrzanie gazowego paliwa do tak wysokiej temperatury, aby podczas zderzeń jądra miały wystarczającą energię kinetyczną, by przezwyciężyć elektryczne odpychanie i zbliżyć się na odległość umożliwiającą łączenie się lżejszych jąder w cięższe jądra atomowe. Podczas ogrzewania paliwa atomy gazu jonizują się, tzn. tracą elektrony otaczające jądra atomowe. Powstaje mieszanina dodatnio naładowanych jąder i ujemnie naładowanych elektronów zwana – dla odróżnienia od niezjonizowanego gazu – plazmą. Plazma, choć makroskopowo obojętna elektrycznie, bo zawiera równe ilości ładunków dodatnich i ujemnych, to zachowuje się bardzo odmiennie od zwykłego gazu. Plazma nazywana jest czasem czwartym stanem materii – patrz rysunek 3, [1–3, 8]. To określenie pochodzi stąd, że jak wiadomo, wzrost temperatury powoduje przechodzenie substancji ze stanu stałego najpierw w ciecz, potem w gaz, a następnie w plazmę. Reakcje syntezy termojądrowej zachodzą w plazmie. Plazmę charakteryzuje długozasięgowe elektryczne (tzw. kulombowskie) oddziaływanie tworzących ją cząstek, co jest przyczyną wielu zjawisk kolektywnych, niespotykanych w niezjonizowanym gazie. Mimo że

w ziemskich warunkach plazma jest raczej wyjątkowym stanem materii (błyskawice, świetlówki, ekrany telewizorów plazmowych), to według niektórych szacunków aż 99 proc. obserwowanej materii we wszechświecie występuje w postaci plazmy (nie uwzględnia się w tych szacunkach tajemniczej „ciemnej materii”, dającej znać o swoim istnieniu tylko przez grawitację, ani jeszcze bardziej tajemniczej „ciemnej energii” – jak na razie potrzebnej tylko kosmologom). Zachowanie się plazmy jest tak ciekawe, różnorodne, pełne „efektów nieliniowych”, czasem nieoczekiwane (zwłaszcza w obecności pól magnetycznych), że fizyka plazmy wyodrębniła się w samodzielny kierunek badań o znaczeniu zarówno użytkowym, jak i podstawowym.



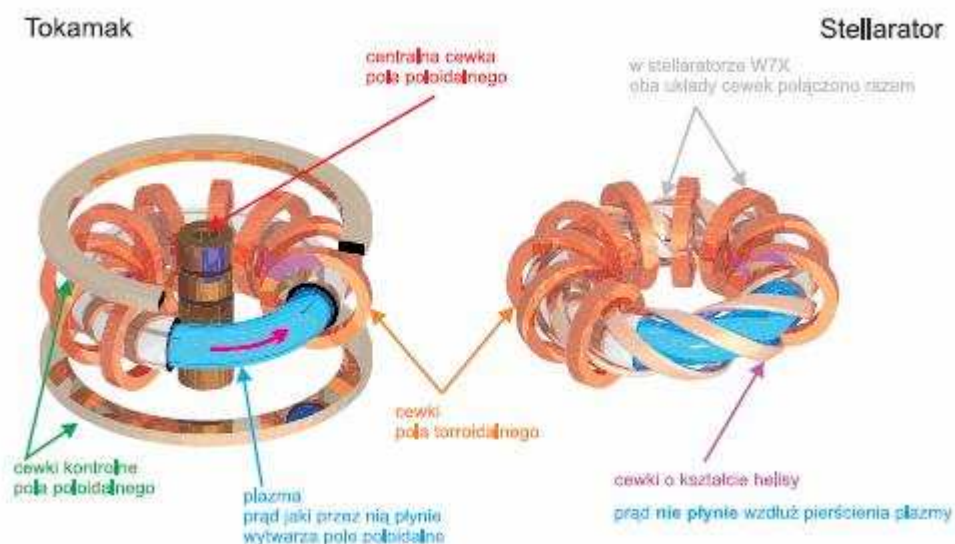
Rys. 3. Plazma – czwarty stan materii

3. Magnetyczne uwięzienie plazmy

Aby proces syntezy termojądrowej zachodził wystarczająco efektywnie, należy podgrzać plazmę do temperatury ponad 100 milionów stopni i utrzymywać ją w tym stanie na tyle długo by, znacząca liczba jąder izotopów wodoru uczestniczyła w reakcjach. Oczywiście w przypadku tak gorącej plazmy „naczynie” utrzymujące plazmę musi być niezwykle. Żadne materiały nie wytrzymałyby takiej temperatury, gdyż same zamieniłyby się w plazmę. Plazma jest jednak mieszaniną elektrycznie naładowanych cząstek, a takie cząstki podlegają wpływowi pola magnetycznego. Pole magnetyczne można zatem wykorzystać do kontrolowania i ograniczania ich ruchu. Naładowana cząstka porusza się po krzywej śrubowej nawijającej się wzdłuż kierunku linii pola

magnetycznego. Aby więc utrzymać cząstki w ograniczonym obszarze przestrzeni, linie pola magnetycznego muszą tworzyć zamknięte pętle. Pożądaną konfigurację pola magnetycznego można otrzymać, zestawiając cewki wytwarzające pole magnetyczne w okrąg tak, by utworzyły torus – powierzchnię podobną do nadmuchanej opony. Linie pola magnetycznego zamknięte są wewnątrz torusa. W takim prostym toroidalnym polu wiele cząstek jest jednak traconych na skutek występowania tzw. zjawiska dryfu (dodatkowej składowej prędkości cząstek prostopadłej do linii pola magnetycznego) spowodowanego gradientem i krzywizną pola. Rozwiązaniem kompensującym dryf cząstek jest zastosowanie dodatkowego tzw. poloidalnego pola magnetycznego, [3, 5]. W tokamakach poloidalną składową pola generuje wzbudzany w plazmie przepływ prądu. W stellaratorach toroidalne i poloidalne pole uzyskuje się przez zastosowanie w specjalny sposób ukształtowanych cewek (ang. *helical coils*), rysunek 4. W stellaratorach nie ma więc makroskopowego przepływu prądu elektrycznego w plazmie. W obecnie rozwijanych planach dotyczących rozwoju energetyki termojądrowej, zdecydowano się na rozwiązania oparte głównie na tokamakach. Największym już istniejącym tokamakiem jest JET (ang. *Joint European Torus*). Większy promień jego komory plazmowej wynosi 2,96 m, mniejszy – 1,25 m. Toroidalne pole magnetyczne ma wartość 3,5 T, a wzbudzany w plazmie prąd 7 MA. W tokamakach i stellaratorach mamy do czynienia z największym znanym nam gradientem temperatury we wszechświecie. Od przeszło 100 milionów stopni, w centralnej części komory, do kilkuset stopni, przy ściankach. Patrząc od centrum ku ścianom komory, do pierwszego kontaktu plazmy ze stałym materiałem dochodzi na tzw. limiterze (ang. *Limiter* – ogranicznik). Limiter wykonany jest przeważnie z węgla. Musi on wytrzymać bombardowanie wysokoenergetycznymi cząstkami plazmy (jonów, neutronów, elektronów a także promieniowania elektromagnetycznego). Wszystkie te czynniki rozgrzewają jego powierzchnię, niszczą ją (erodują), zanieczyszczając tym samym plazmę. W celu oczyszczania plazmy stosuje się specjalną konfigurację pola magnetycznego, zwaną dywertorem (ang. *divertor* – „odwracający kierunek”). W konfiguracji tej wewnętrzny obszar plazmy uwięziony jest przez pole magnetyczne, którego linie pola są zamknięte. Natomiast w obszarze zewnętrznym (bliższym ściankom) linie pola magnetycznego są otwarte. Granicę między tymi dwoma obszarami stanowi tzw. separatory (ang. *separatrix* – utworzone od słowa *separate* – rozdzielać) – ostatnia powierzchnia utworzona z zamkniętych linii pola magnetycznego. Cząstki plazmy, przekraczające w wyniku dryfu separatory, kierowane są na tzw. płyty dywertora. Są one zazwyczaj odsunięte od plazmy dalej niż limiter. Plazma

podczas podążania ku płytom – początkowo bardzo gorąca i o małej gęstości – wypromieniowuje część energii zanim osiągnie płyty dywertora. Dzięki temu ochładza się i zagęszcza. W ten sposób minimalizowana jest energia przekazywana płytom dywertora, co w efekcie daje również mniejszą erozję płyt. Po neutralizacji cząstek plazmy na płytach dywertora powstały już neutralny gaz oraz zanieczyszczenia zostają wypompowane z komory tokamaka.

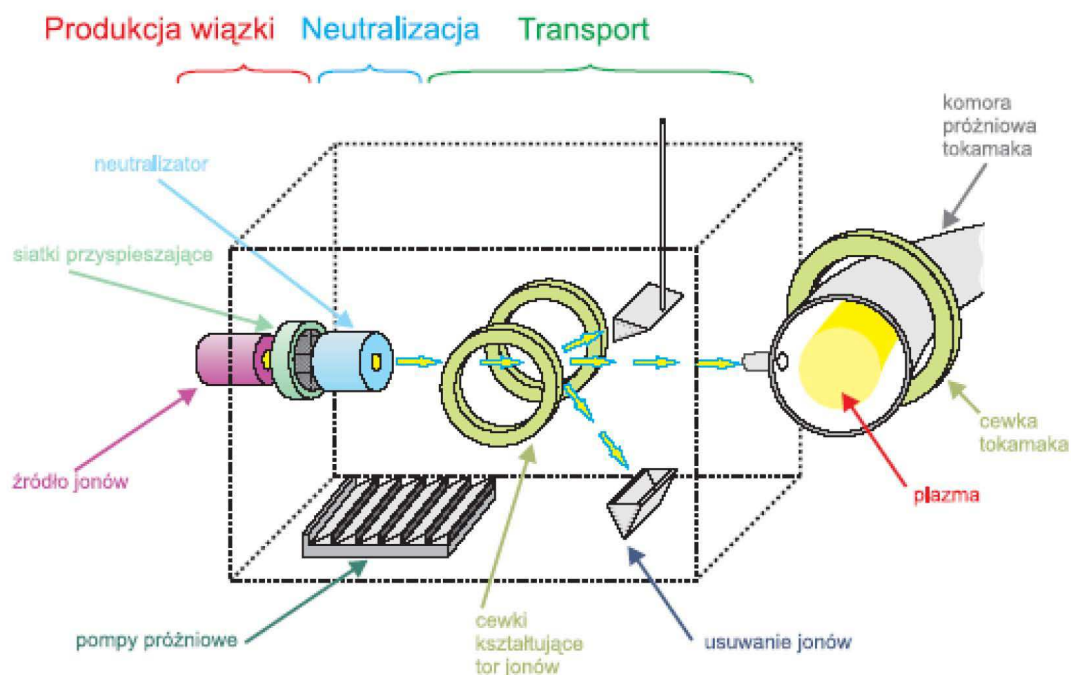


Rys. 4. Konfiguracje pola magnetycznego w tokamaku i stellaratorze

4. Grzanie plazmy

Niezbędnym warunkiem do przeprowadzenia syntezy jądrowej jest bardzo wysoka temperatura jonów. Wysoka temperatura oznacza dużą energię kinetyczną jonów [1–8]. Energia ta musi być na tyle duża, aby podczas zderzeń jony znalazły się na tyle blisko siebie, aby mimo wzajemnego elektrycznego odpychania mogło dojść do fuzji (gdy odległość między jonami jest mała wzrasta prawdopodobieństwo „złania się” jąder w wyniku tzw. efektu tunelowego). Używa się kilku sposobów (technik) podgrzewania plazmy. Jedną z możliwości, typową w przypadku tokamaków, jest wykorzystanie prądów wytwarzanych w plazmie. Niedostatkami tej metody jest to, że opór elektryczny plazmy drastycznie spada podczas tego jak, plazma staje się coraz bardziej gorąca. Dlatego metoda ta ograniczona jest tylko do uzyskiwania temperatur rzędu 10 milionów stopni. Jest to jednak o rząd wielkości za mało, by uzyskać warunki odpowiednie dla fuzji. Inną możliwością jest użycie bardzo szybkich cząstek neutralnych, które zostają wstrzyknięte do plazmy. W plazmie cząstki te

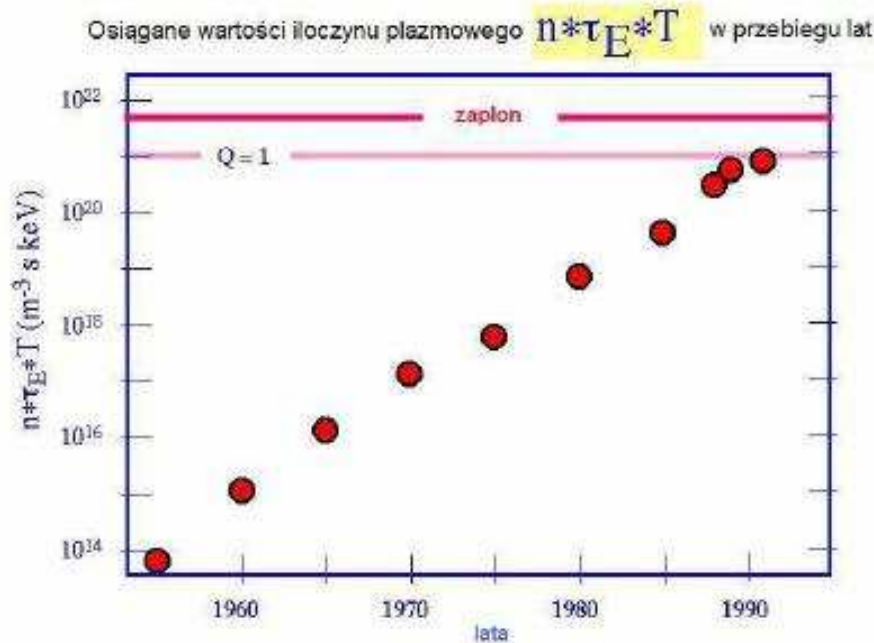
jonizują się i krążą setki razy dookoła torusa, spowalniane stopniowo w wyniku kolizji z cząstkami plazmy. Energia przekazana podczas tych kolizji rozgrzewa plazmę. Technika ta nazywa się z angielska NBI (ang. *Neutral Beam Injection*) i schematycznie przedstawiona na rysunku 4. Trzecią metodą jest podgrzewanie plazmy za pomocą fal elektromagnetycznych. Fale elektromagnetyczne o pewnych dopasowanych częstościach są absorbowane przez cząstki plazmy, a przekazana im energia rozpraszana jest dalej wśród innych cząstek plazmy przez zderzenia. Warunkiem pochłaniania energii fali elektromagnetycznej przez cząstki plazmy jest zgodność częstości fali z periodycznością ruchu kołowego jonów i elektronów w polu magnetycznym.



Rys. 4. Grzanie plazmy techniką NBI

W tokamakach częstości ruchu kołowego jonów wynoszą od 10 do 100 MHz, a dużo lżejszych od nich elektronów od 60 do 150 GHz. Technikę tę określa się jako ECRH/ICRH (ang. *Electron/Ion Cyclotron Resonance Heating*). Najwyższą na świecie temperaturę plazmy wynoszącą 520 milionów °K osiągnięto w tokamaku JT60 w Japonii w roku 1996, [9], rysunek 5.

Warunek ten jest spełniony np. dla gęstości jonów rzędu $2-3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, czasu uwięzienia rzędu 1–2 s oraz temperatury jonów rzędu 20 keV (równoważnie około 200 milionów stopni). Każda z tych wartości z osobna została już osiągnięta eksperymentalnie. Niestety, nie wszystkie jednocześnie. Dlatego ich iloczyn nie przekroczył jeszcze kryterium Lawsona. W ciągu ostatnich czterdziestu latach iloczyn $n\tau_E T$ wzrósł jednak około 10 000 razy! Najbardziej zbliżono się do kryterium Lawsona na tokamaku JET, wykorzystywanym w ramach Unii Europejskiej. Iloczyn gęstości, czasu i temperatury był tylko o czynnik 5 mniejszy od kryterium Lawsona. Postęp, jaki osiągnięto podczas 40 lat jest uwidoczniiony na wykresie obrazującym zależność iloczynu $n\tau_E T$ od czasu, rysunek 6. Wartość iloczynu wzrosła już na tyle, że przekroczone próg użyteczności (współczynnik wzmocnienia $Q = 1$, tzn. moc wytworzona w reaktorze przekroczyła moc dostarczoną z zewnątrz). W reakcji deuteru z trytem (D-T) powstają naładowane elektrycznie cząstki alfa o energii 3, 5 MeV. Są one „uwięzione” przez pole magnetyczne w tokamaku. Te wysokoenergetyczne (szybkie) cząstki alfa przez kolizje z pozostałymi cząstkami plazmy dodatkowo rozgrzewają plazmę.



Rys. 6. Ewolucja czasowa iloczynu $n\tau_E T$

Wprowadzając wielkość β , która jest stosunkiem ciśnienia plazmy pp do ciśnienia pola magnetycznego pm, tzn. $\beta = p_p/p_m = 4\mu_0(nT)/B^2$, warunek zapłonu (1) dla fuzji magnetycznej można wyrazić w postaci [11]:

$$\beta\tau_E B^2 > 4 \text{ T}^2 \quad (2)$$

Z powyższej nierówności jasno wynika że istnieją trzy główne drogi dla realizacji fuzji magnetycznej: (i) zwiększenie pola magnetycznego B , (ii) zwiększenie czasu uwięzienia plazmy τ_E , lub (iii) zwiększenie wielkości β :

(i) Zwiększenie pola magnetycznego B do wartości $B > 5$ T jest realną możliwością, lecz wymaga postępu technologicznego w celu uzyskania nowych materiałów nadprzewodzących w wysokich temperaturach.

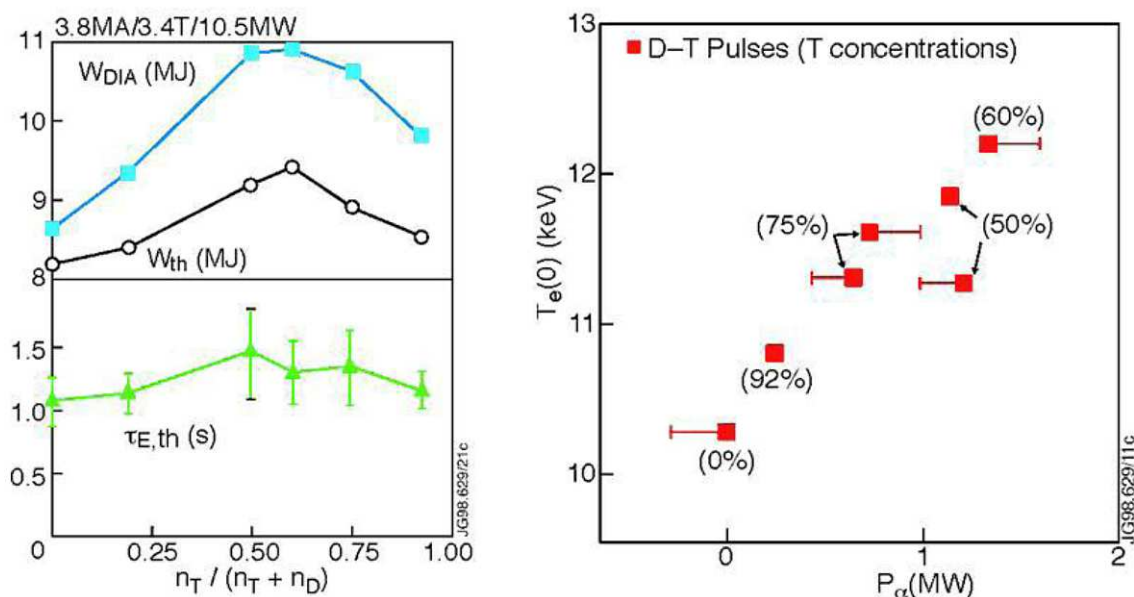
(ii) Zwiększenie czasu uwięzienia plazmy τ_E jest związane ze zwiększeniem wymiarów reaktora termionuklearnego, ponieważ równowaga energetyczna plazmy w stanie stacjonarnym jest bezpośrednio zależna od mocy niesionej przez cząstki alfa P_α :

$$P_\alpha = 0.2 P_{\text{fus}} = W/\tau_E = VnT/\tau_E \quad (3)$$

gdzie: P_{fus} oznacza moc wyzwoloną w reakcjach deuteru i trytu, W energię plazmy i V objętość plazmy. Zatem przy zadanej mocy P_{fus} zwiększenie τ_E wymaga zwiększenia objętości V . Na przykład zapłon plazmy dla mocy $P_{\text{fus}} = 1$ GW objętość plazmy powinna wynosić $V = 1000 \text{ m}^3$. Wśród istniejących obecnie tokamaków największą objętość, $V = 500 \text{ m}^3$, ma JET, natomiast będący w trakcie budowy tokamak ITER będzie miał $V = 1000 \text{ m}^3$.

(iii) Zwiększenie wielkości β jest ograniczone naturalnymi niestabilnościami magnetohydrodynamicznymi plazmy w polu magnetycznym, które zachodzą w konwencjonalnych tokamakach przy wartościach β rzędu kilku procent. Znacznie większe wartości β ($\beta \approx 40\%$) uzyskuje się w konfiguracjach tokamaków sferycznych, takich jak MAST w Wielkiej Brytanii lub NSTX w USA, gdzie stosunek małego promienia a do dużego promienia R w torusie wynosi $a/R \approx 1$.

Grzanie spowodowane cząstkami alfa prawdopodobnie umożliwi utrzymanie plazmy w stanie stacjonarnym, jak tylko próg zapłonu zostanie osiągnięty i zewnętrzne źródła energii zostaną odłączone. Rekord w ogrzewaniu plazmy przez cząstki alfa został uzyskany w eksperymentach z plazmą D-T w tokamaku JET w 1997 roku, rysunek 7, kiedy to dostarczając do plazmy 20 MW mocy wygenerowano w ciągu jednej sekundy moc fuzyjną wielkości 16,1 MW.

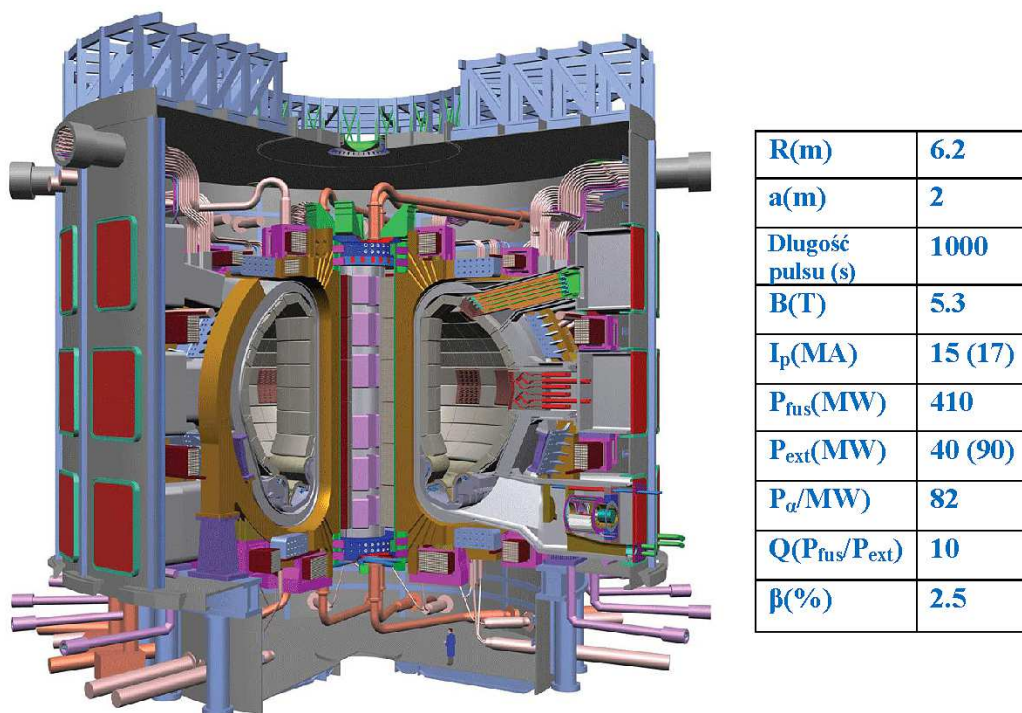


Rys. 7. Grzanie spowodowane cząstkami alfa zademonstrowane w tokamaku JET w 1997 roku

Odpowiada to współczynnikowi wzmocnienia $Q = 0.8$. W reakcji D-T wraz z cząstkami alfa wytwarzane są również obojętne elektrycznie neutrony o energii 14,1 MeV. W przeciwieństwie do obdarzonych ładunkiem elektrycznym cząstek alfa, neutrony natychmiast opuszczają komorę tokamaka, gdyż nie mogą być uwięzione w polu magnetycznym. Neutrony te nie są jednak tracone. Są one w dwojaki sposób wykorzystywane w reaktorze. Po pierwsze, w reakcji z litem zawartym w osłonie reaktora wytwarzają tryt. Tryt ten (wraz z dueterem uzyskanym np. z wody morskiej) może być następnie użyty jako paliwo w reaktorze. Po drugie, spowalniane w osłonie reaktora neutrony oddają swą energię, wytwarzając ciepło, które jest następnie transportowane na zewnątrz reaktora przez odpowiednie systemy chłodzenia i może być wykorzystane do napędzania klasycznych turbin wytwarzających prąd elektryczny.

6. Współpraca międzynarodowa – projekt ITER

Wysiłek całego środowiska zajmującego się fuzją termojądrową skupił się obecnie na międzynarodowym projekcie nazywanym w skrócie ITER od angielskiej nazwy projektu International Thermonuclear Experimental Reactor. ITER jest projektem wybudowania największego tokamaka na świecie (rys. 8).

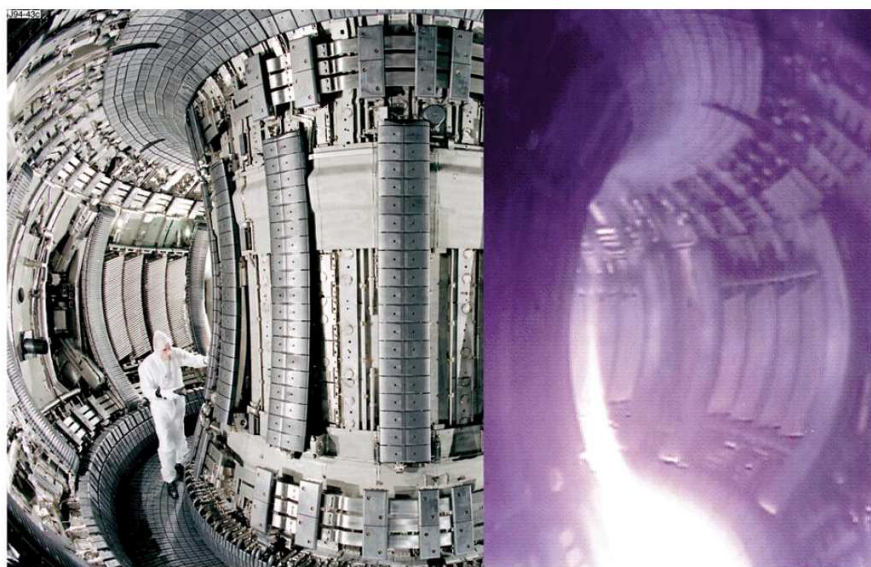


Rys. 8. Tokamak ITER. Sylwetka człowieka na dole demonstruje skalę maszyny

Zadaniem ITER-a jest „wykazanie naukowej i technicznej wykonalności pozyskiwania energii z fuzji dla celów pokojowych” (ang. *to demonstrate the scientific and technological feasibility of fusion energy for peaceful purposes*), [12]. W szczególności ma być osiągnięty próg zapłonu (spełnienie kryterium Lawsona) i utrzymanie „zapalanej” trytowo-deuterowej plazmy w stanie stacjonarnym. Przetestowane mają zostać materiały i technologie związane z budową przyszłej elektrowni termojądrowej (sam ITER elektrownią jeszcze nie będzie). ITER będzie kolejnym wielkim krokiem na drodze do zbudowania takiej elektrowni. Będzie wytwarzał moc 500 MW. Początkowo ma to być czas około 10 minut, następnie planowane jest uzyskanie stacjonarnego stanu pracy reaktora. Gotowy projekt ITER jest już sam w sobie godnym uwagi osiągnięciem. Powstał on w wyniku intensywnej międzynarodowej współpracy naukowej. Projekt został zaaprobowany i zatwierdzony przez uczestników ITER w czerwcu 2001 roku 21 listopada 2006 roku w Paryżu podpisano dalsze porozumienie dotyczące przedsięwzięcia ITER – budowy i eksploatacji eksperymentalnego reaktora termojądrowego kolejnej generacji. Udziałowcami tego projektu są: Unia Europejska, Japonia, Stany Zjednoczone, Rosja, Chiny, Indie i Korea Płd. (planowany jest udział Brazylii). Tych siedmiu partnerów zdecydowało, że ITER będzie budowany w Cadarache, małej miejscowości na południu Francji, w pobliżu Aix-en-Provence.

7. Fuzja w Europie

Europejski program w zakresie kontrolowanej syntezy termojądrowej koordynowany jest przez Komisję Europejską pod auspicjami Europejskiej Wspólnoty do Spraw Energii Atomowej (ang. *European Atomic Energy Community* – w skrócie EURATOM). Program realizowany jest przez różne laboratoria na mocy zawarcia kontraktu asocjacyjnego. Celem programu jest współpraca w zakresie budowy prototypu bezpiecznego dla człowieka i środowiska reaktora termojądrowego. Obecnie realizowana w ramach programu strategia, to przejście w trzech etapach od dotychczas wykonywanych eksperymentów do budowy elektrowni termojądrowej: (i) skupienie się na najbardziej rozwiniętych systemach do przeprowadzania kontrolowanej syntezy termojądrowej – tokamakach; (ii) działalność badawcza dotycząca rozwijania atrakcyjnych koncepcji mogących przyczynić się do ulepszeń tokamaka i jego pracy; (iii) rozwijanie technologii potrzebnych do budowy przyszłej elektrowni termojądrowej. Prawie 2000 naukowców i inżynierów w 20 europejskich laboratoriach pracuje obecnie w ramach projektu EURATOM.



Rys. 9. Tokamak JET (*Joint European Torus*) w Culham, UK. Objętość = 100 m^3 ; $B_{\text{max}} = 4 \text{ T}$; $I_{\text{max}} = 7 \text{ MA}$; $P_{\text{fus}} = 16 \text{ MW}$. Prawa strona jest zdjęciem plazmy

JET – największy obecnie tokamak na świecie (rys. 9) – znajdujący się w Culham (niedaleko Oxfordu) jest obecnie sztandarowym eksperymentem w programie EURATOMU, [5]. Od 2000 roku JET zarządzany jest przez EFDA (ang. *European Fusion Development Agreement*). Naukowcy brytyjscy utrzymują urządzenie w gotowości do pracy i obsługują je, natomiast eksperymenty są

planowane i wykonywane przez wizytujących JET naukowców z całej Europy. Europa jest jednym z głównych partnerów uczestniczących w budowie przyszłego reaktora ITER. Szeroko zakrojony program i jego koordynacja w ramach EURATOM zapewniły Europie wiodące miejsce w zakresie badań nad kontrolowaną syntezą termojądrową. Od 2005 roku w projekcie EURATOM uczestniczy również Polska. Krajowy Punkt Kontaktowy EURATOM mieści się w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) w Warszawie.

8. Fizyka szybkich jonów w plazmie termojądrowej

Zrozumienie zjawisk zachodzących w wysokotemperaturowej plazmie powyżej granicy zapłonu, tzn. takiej w której zachodzi samopodtrzymująca się reakcja termojądrowa, jest nadzwyczaj istotne dla opanowania kontrolowanej syntezy termojądrowej. Głębokie zrozumienie fizyki plazmy konieczne jest w szczególności dla realizowanego obecnie wielkiego międzynarodowego eksperymentu ITER. Celem projektu jest budowa największego na świecie tokamaka i wykazanie możliwości przeprowadzenia kontrolowanej reakcji termojądrowej. ITER jest kolejnym krokiem przybliżającym osiągnięcie ostatecznego celu jakim jest wykorzystania fuzji jako użytecznego źródła energii, [12]. Wewnętrznym źródłem energii w ITER będą termojądrowe reakcje syntezy w plazmie deuterowo-trytowej (D-T), podczas których uwalniane są cząstki alfa o energiach około 3,5 MeV. Stanowią one będą główne źródło grzania plazmy konieczne dla podtrzymywania reakcji termojądrowej. Energia podtrzymująca temperaturę plazmy może też być dostarczona przez grzanie plazmy za pomocą wysokoenergetycznych (tzw. szybkich) jonów o energiach rzędu MeV za pomocą tzw. jonowego rezonansu cyklotronowego (ICRH) oraz wstrzykiwanie wiązek neutralnych atomów (NBI). Metody te są szczególnie ważne dla optymalnego kontrolowania reakcją termojądrową. Odpowiednio długie utrzymanie w plazmie cząstek alfa oraz zrozumienie procesów, w których one oraz inne wysokoenergetyczne jony uczestniczą jest kluczowe dla osiągnięcia zapłonu plazmy i podtrzymania kontrolowanej reakcji termojądrowej – zasadniczego celu projektu ITER.

Podczas impulsowego trybu pracy w ITER wydzielona moc, przypadająca na cząstki alfa (około 100 MW podczas rozładowania), stanowi istotną część mocy całkowitej. Nawet względnie niewielkie straty cząstek alfa mają istotny wpływ na procesy transportu w plazmie i działanie tokamaka w ogólności [12–14]. Niedostateczne uwięzienie cząstek alfa może np. doprowadzić do uszkodzenia tzw. przedniej ściany tokamaka. Takim procesom należy zapobiec.

Z drugiej strony, nadmiar stermalizowanych cząstek alfa w centralnej części reaktora, stanowiących tzw. popiół helowy, utrudnia przebieg reakcji termojądrowej – również jest niepożądany. Uwięzienie cząstek alfa w plazmie mogą utrudniać straty spowodowane nieidealnie toroidalnym kształtem pola magnetycznego (tzw. straty wynikające ze „zmarszczek” pola – ang. *ripple losses*) oraz zjawiska kolektywne w plazmie, prowadzące do różnego typu niestabilności. To samo odnosi się również do szybkich cząstek uzyskiwanych w procesach grzania plazmy metodami ICRH, NBI i podobnymi. W przeciwieństwie jednak do uwalnianych w procesie termosyntezy cząstek alfa, w procesach grzania mamy do czynienia z silną anizotropią w rozkładzie prędkości. I tak jony wytwarzane w NBI poruszają się głównie wzdłuż pola magnetycznego, podczas gdy w ICRH jest to ruch w płaszczyźnie prostopadłej do pola magnetycznego, a cząstki uwięzione są w zamkniętych orbitach. Rezonansowe oddziaływanie cząstek alfa z falami w plazmie może prowadzić do zjawisk niestabilności falowych, które wpływają na redystrybucje i ewentualnie straty w populacji cząstek alfa. Przewidywany jest również wpływ cząstek alfa na makroskopową stabilność plazmy. Turbulencja plazmy może z kolei wpływać na zjawiska transportu w populacji cząstek alfa. Wysokotemperaturowa plazma w tokamaku jest złożonym samoorganizującym się układem fizycznym, zdominowanym przez różnego typu zjawiska kolektywne. Stanowi zatem szczególne wyzwanie zarówno dla teoretyków, jak eksperymentatorów. Uzyskiwane wyniki są równie ważne zarówno dla badań podstawowych jak i zastosowań.

Projekt ITER jest przedsięwzięciem skupiającym działalność fizyków i inżynierów różnych specjalności. W wysokotemperaturowej plazmie powyżej progu zapłonu, która jest celem ITER, szybkie jony będą miały znaczny udział w całkowitej energii układu. Na razie jednak nasze zrozumienie przewidywanych zjawisk w ITER opiera się na doświadczeniach związanych z wysokotemperaturową plazmą poniżej progu zapłonu, a także produkcją szybkich jonów w procesach NBI, ICRH i podobnych. Nasze rozumienie fizyki szybkich cząstek w plazmie wynika z dokładnej analizy i porównywania różnego typu dostępnych eksperymentalnych danych, rozwijania wyrafinowanych modeli teoretycznych zjawisk (np. rozwoju nieliniowych teorii oddziaływania cząstek z falami w plazmie) oraz użycia metod i symulacji numerycznych.

Liniowa analiza stabilności modów oddziałujących z szybkimi jonami

Liniowa analiza stabilności modów falowych, oddziałujących rezonansowo z szybkimi jonami, uzupełniona o dane eksperymentalne z tokamaków ma za

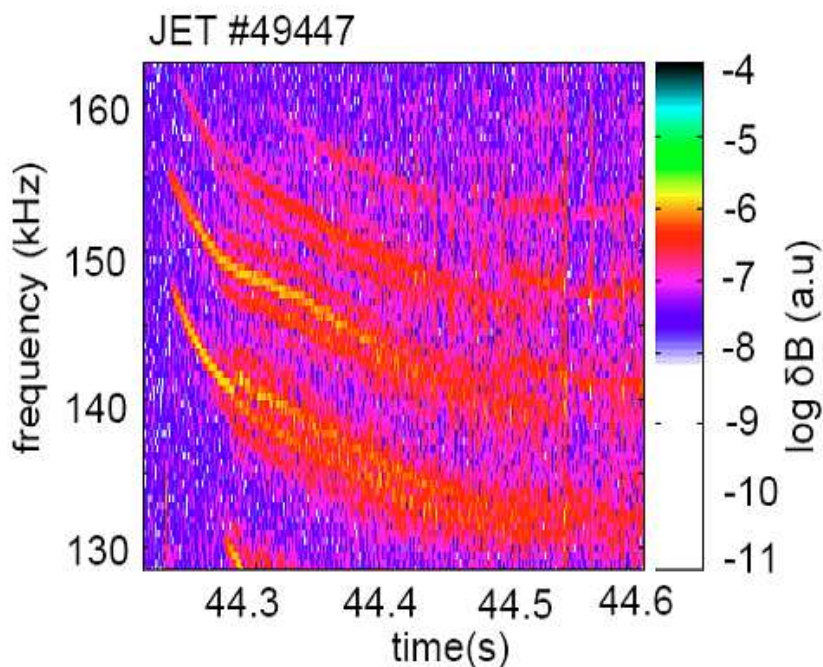
zadanie określić własności dyspersyjne modów oraz wyjaśnić podstawowe mechanizmy prowadzące do tłumienia lub powstawania niestabilności modów. Wiedza ta może być użyta do określenia reżimów działania tokamaka, w których mody są stabilne lub jedynie słabo niestabilne i tym samym nie zmieniają istotnie warunków uwięzienia cząstek alfa. Obecność populacji szybkich jonów może prowadzić do wzbudzania rozmaitych niestabilności falowych o częstościach z zakresu od prawie zero do wyższych harmonicznych jonowej częstości cyklotronowej, [13, 14, 17]. Niestabilności wzbudzone przy częstościach odpowiadających modom alfvénowskim napędzane są przez gradienty ciśnienia szybkich jonów, co przeważnie doprowadza do przestrzennej redystrybucji i strat w populacji szybkich jonów. Niestabilności o wyższych częstościach, rzędu jonowej częstości cyklotronowej i wyższych harmonicznych, są napędzane gradientami w przestrzeni prędkości. W obu przypadkach obserwacja i badanie niestabilności dostarcza bardzo pożytecznej informacji diagnostycznej dotyczącej rozkładu szybkich cząstek, w szczególności cząstek alfa, w tokamakowej plazmie.

Od czasu publikacji raportu „ITER Physics Basis” [12], badania skupiają się na zakresie częstości odpowiadającym modom alfvénowskim ($\omega = v_A/qR$). Różne typy alfvénowskich modów własnych (AE) mogą oddziaływać rezonansowo z szybkimi jonami poruszającymi się z prędkością fazową, zbliżoną do prędkości modów Alfvéna (v_A). Zainteresowanie tego typu modami spowodowane jest tym, że obecnie przeprowadzane eksperymenty wskazują, że niestabilności typu Alfvéna, takie jak np. Toroidalne Mody Alfvéna (TAE) mogą być bardzo efektywnie wzbudzone w obecności szybkich jonów [15–20]. Aby zaszły warunki dogodne do powstawania niestabilności, siła narastania modu musi przewyższać tłumienie zarówno od sternalizowanej części plazmy, jak i tłumienie pojawiające się w populacji samych szybkich cząstek. Narastanie modu proporcjonalne jest do gradientu ciśnienia szybkich jonów. Liniowy współczynnik wzrostu modu określony jest jako [15]:

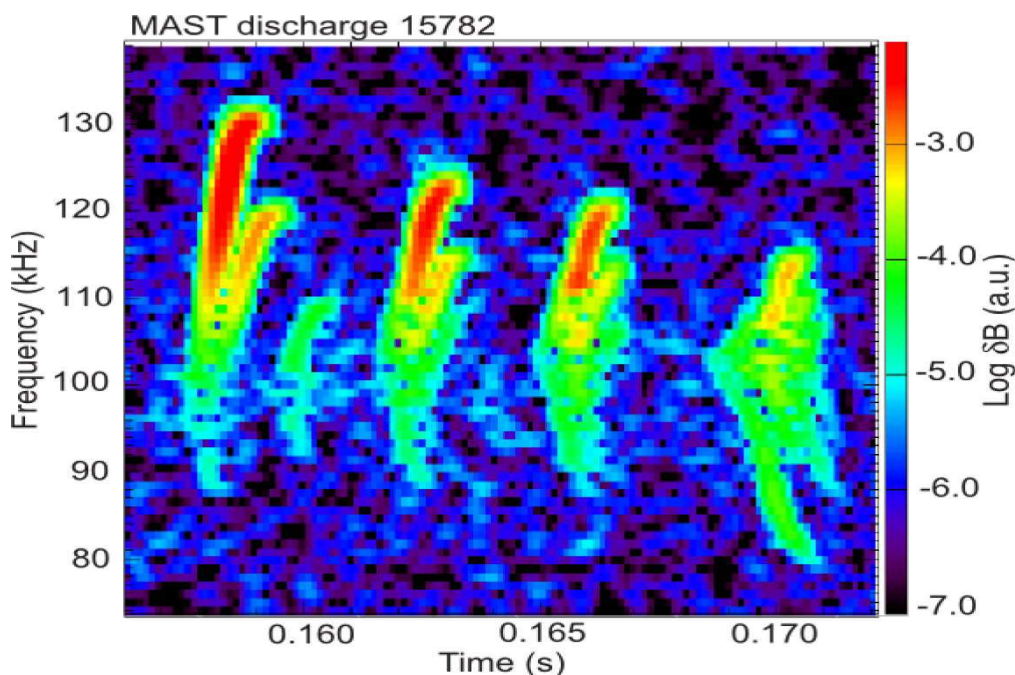
$$\gamma = \beta_f (\omega^* - \omega) F (v_f/v_A) \quad (4)$$

gdzie: β_f – wielkość beta dla szybkich jonów, v_f – prędkość szybkich jonów, ω^* – część dryfu. F jest funkcją zależną od rozkładu szybkich cząstek. Stabilność modu określa balans między współczynnikiem wzrostu a współczynnikami tłumienia. Do pełnego określenia liniowej stabilności modu potrzebujemy jednak informacji z eksperymentu o tłumieniu i sile narastania modów. Informacje te uzyskamy jednak dopiero po wykonaniu eksperymentów z plazmą

powyżej progu zapłonu, które planowane są w ITER. Rysunki 10 i 11 przedstawiają pomiary częstotliwości modów TAE w tokamaku JET, wzbudzone podczas ogrzewania metodą ICRH (rys. 10) [17], oraz w tokamaku MAST, wzbudzone podczas ogrzewania NBI (rys. 11), [18].



Rys. 10. Mody TAE wzbudzone w tokamaku JET podczas ogrzewania metodą ICRH



Rys. 11. Mody TAE wzbudzone w tokamaku MAST podczas ogrzewania metodą NBI

Kolektywne zjawiska i nieliniowa dynamika szybkich jonów

Nieliniowe oddziaływania szybkich jonów dotyczą głównie oddziaływania z szerokim spektrum modów falowych wzbudzanych w plazmie. Mody napędzane oddziaływaniem z szybkimi jonami mogą z kolei wpływać istotnie na funkcję rozkładu i straty w populacji szybkich jonów. Decydujące dla stabilności plazmy magnetohydrodynamiczne (MHD) mody o niskich częstościach również mają wpływ na populację wysokoenergetycznych jonów. Szybkie jony mogą destabilizować niektóre grupy tych modów, przez rezonans związany z precesją, a przy dostatecznie dużej mocy wzbudzać nowy typ modów, nazwanych modami fishbone. W zakresie wyższych częstości oddziaływanie dotyczy całej gamy poprzecznych modów Alfvéna, gdyż propagacja tych modów odbywa się wzdłuż linii pola magnetycznego. Rezonans dotyczy szybkich jonów o energiach rzędu MeV poruszających się z prędkością $v_{\parallel} \approx v_A$. Mechanizm wzbudzania dla tych modów wynika z rezonansu typu *transit and precession-bounce*. W zależności od gęstości energii niesionej przez szybkie jony fala zmienia swój charakter od modu typowo alfvénowskiego, dla małych gęstości, do typu modu rezonansowego dla dużych gęstości energii szybkich cząstek. TAEs stanowią najbardziej istotny przykład tych pierwszych, zaś EPMs (lub rezonansowe TAEs, jeśli leżą w zakresie częstości TAE) – tych drugich. Jakościowe różnice między strukturą i częstościami modów AE i EPM w podejściu liniowym rzutują na ich różne zachowanie w zakresie nieliniowym. Dynamika modów AE wynika z oddziaływania fala – cząstki i uwięzienie cząstek w fali. EPMs mają natomiast typowo rezonansowy charakter i ich nieliniowe zachowanie powiązane jest z redystrybucją populacji szybkich jonów.

Badanie dynamiki szybkich jonów w plazmie wysokotemperaturowej prowadzi do problemu zachowania się układu znajdującego się na granicy stabilności. Możliwość nieliniowego zachowania typu wybuchowego, nawet przy umiarkowanych współczynnikach liniowego wzrostu, może zapobiegać formowaniu się mocno niestabilnych rozkładów w populacji szybkich cząstek, wymaganych na przykład dla tworzenia się EPM. Z drugiej strony, obserwowane w eksperymentach długo żyjące struktury nieliniowych AE i makroskopowe przegrupowania szybkich cząstek związane z wielkimi (wybuchowego typu) fluktuacjami sugerują, że siła niestabilności zależna jest od specyfiki źródła szybkich jonów. Cząstki alfa powstające w procesie termosyntezy oraz jony powstające podczas grzania plazmy metodą NBI generowane są z energiami rzędu MeV. Dlatego też rozkład ich ewoluje inaczej niż jonów generowanych metodą ICRH, które swoje duże energie osiągają stopniowo, poczynając od energii termicznych dzięki rezonansowemu oddziaływaniu z falą.

Ewolucja rozkładów szybkich cząstek uwzględniająca w pełny sposób ich kolektywne oddziaływania z falami w wysokotemperaturowej plazmie powyżej progu zapłonu, przy uwzględnieniu coulombowskich kolizji i w alfvénowskich skalach czasowych, pozostaje nadal nierozwiązanym problemem w fizyce plazmy. Analiza dynamiki modów AE w pobliżu progu stabilności układu, jak również scenariusze nieliniowej odpowiedzi, w przypadku modów EPM, dostarczają jednakże użytecznej (np. do celów diagnostycznych) informacji o skomplikowanej nieliniowej dynamice szybkich jonów.

W pobliżu progu stabilności najbardziej efektywnym mechanizmem, prowadzącym do stabilizacji amplitudy fali dla fal AE, jest oddziaływanie z falą uwięzionych w fali cząstek, (*wave-particle trapping*) opisywane przez nieliniowości w przestrzeni fazowej i potwierdzone przez numeryczne symulacje. Dysponujemy analitycznym opisem wczesnego, ale już nieliniowego etapu ewolucji modu w pobliżu progu stabilności układu [21–24]. W tym przypadku mody są modami własnymi plazmy i istnieją nawet w nieobecności szybkich cząstek. Niestabilność powstaje, gdy liniowy współczynnik wzrostu przewyższa liniowe, współczynniki tłumienia wynikające z istnienia w plazmie procesów dyssypatywnych. Teoria przewiduje stabilizację amplitudy, oscylacje lub przejście do chaosu. Została ona z powodzeniem zastosowana do interpretacji danych eksperymentalnych z JET. W późniejszym etapie ewolucji modu możliwe jest też formowanie się pewnych struktur w przestrzeni fazowej. Ich formowanie i istnienie zależne jest mocno od rodzaju procesów dysypacyjnych w populacji szybkich jonów. „Świergotanie” (przesunięcie) częstości świadczące o istnieniu tego typu mechanizmów zostało zaobserwowane w kilku tokamakach, np. w danych z MAST.

9. Fuzja a środowisko

Dążenie do opanowania kontrolowanej syntezy termojądrowej nie wynika jedynie z technologicznych i ekonomicznych przyczyn. Przetworzenie energii z paliw kopalnych i obecnych elektrowni jądrowych na energię termojądrową może istotnie przyczynić się do złagodzenia zagrożeń dla naturalnego środowiska człowieka. Fuzja jest bowiem bardzo bezpiecznym i czystym źródłem energii. Zanim jednak realnie zaistnieje energetyka termojądrowa na skalę komercyjną, sporo problemów związanych z wytwarzaniem energii termojądrowej musi zostać jeszcze rozstrzygniętych. W reakcjach termojądrowych oprócz cząstek alfa (czyli jąder helu) powstają również wysokoenergetyczne neutrony. Ściany komory zawierającej plazmę są stale

bombardowane i penetrowane przez neutrony. Prowadzi to do mechanicznej degradacji wewnętrznych ścian tokamaka i do promieniotwórczej aktywacji materiału, z którego są wykonane. Aktywacja wynika z reakcji jąder atomów ściany (żelazo, chrom i inne) z neutronami. Neutrony są wyłapywane, tworząc radioaktywne izotopy. Dlatego wymaga się aby materiały, z których tworzone są ściany komory reaktora, były takie aby po reakcji z neutronami ich radioaktywność w czasie około stu lat spadała poniżej naturalnego promieniotwórczego tła. Wybór właściwych materiałów jest więc bardzo ważny. Uwzględniać należy również pewne specyficzne domieszki (zanieczyszczenia) w użytych materiałach. Zanik aktywności zależy bowiem bardzo silnie od zastosowanego składu, np. srebro występujące powszechnie jako domieszka w prawie wszystkich stalach nierdzewnych ma bardzo długi czas zaniku aktywności promieniotwórczej. Innym przykładem jest molibden, który wykazuje dość szybki spadek początkowej aktywności. Aktywność jego stabilizuje się jednak na wysokim poziomie i trwa około miliona lat. Bardzo szybkimi zanikami aktywności (około 100 lat) wykazują się natomiast takie materiały jak wanad, chrom i żelazo. Projekty dotyczące reaktorów termojądrowych muszą przewidywać użycie materiałów, które charakteryzują się krótkimi czasami zaniku aktywności promieniotwórczej. Takie materiały są obecnie projektowane i badane. Wymagają one oczywiście testów przeprowadzanych z neutronami w warunkach symulujących środowisko reaktora, zanim będą użyte w realnym urządzeniu. Innym z bardzo wielu problemów do rozwiązania, zanim pierwszy prąd popłynie z elektrowni termojądrowej, jest np. efektywne wytwarzanie i odzyskiwanie trytu oraz użycie go jako paliwa w reaktorze. Pracy dla naukowców i inżynierów z pewnością nie zabraknie.

Podziękowania

Autor składa serdeczne podziękowania profesorowi Stefanowi Berczyńskiemu, profesor Irenie Kruk, doktorowi Jarosławowi Zaleśnemu oraz doktorowi Pawłowi Berczyńskiemu za stymulującą i owocną współpracę.

Literatura

1. J. Reader, et al., *Controlled Nuclear Fusion – Fundamentals of its Utilization for Energy Supply*, John Wiley & Sons, Chichester, (1986).
2. R.W. Conn, et al., *Scientific American*, **266**, 75 (1992).
3. J. Ongena, G. Van Oost, Ph. Mertens, C. Weinheimer, *Controlled Thermonuclear Fusion – A True Challenge for an Immense Reward*, Trilateral Euregio Cluster (TEC). (2001).
4. M. Rosenbluth, *Comments on Plasma Physics and Controlled Fusion, Special Issue: Fusion at the Crossroads*, CPCFBJ C1, C125-C138 (2000).
5. J. Wesson, *Tokamaks*, 3rd edition, Clarendon Press, Oxford (2004).
6. C.M. Braams, P.E. Stott, *Nuclear fusion. Half a century of magnetic confinement fusion research*, Institute of Physics, Bristol, UK (2002).
7. A.A. Harms, D.R. Kingdon, K.F. Schoepf, G.H. Miley, *Principles of fusion energy. An introduction to fusion energy for students of science and engineering*, World Scientific (2002).
8. R.J. Goldston, P.H. Rutherford, *Introduction to plasma physics*, Institute of Physics, Bristol (1995).
9. M. Kikuchi and JT60 Team, AIP Conf. proc. 1150, s.161–167, *Frontiers in Physics: 3rd International Meeting*, Kuala Lumpur (Malaysia) January 2009.
10. J.D. Lawson, *Proceedings of the Physical Society B*, **70**, 6 (1957).
11. S.E. Sharapov, *Transactions of Fusion Science and Technology* **57**, 156 (2010).
12. ITER Physics Basis, *Nucl. Fusion* **39**, 2137–664 (1999). Summary of the ITER Final Design Report IAEA/ITER EDA/DS/22 (Vienna:IAEA) 2 (2001).
13. D. Anderson, H. Hamnén, M. Lisak, *Thermonuclear tokamak plasmas in the presence of fusion alpha particles*, JET Report CTH-IEFT/PP-1983-03 (1983).
14. W.W. Heidbrink, G.J. Sadler, *Nucl. Fusion* **34**, 535 (1994).
15. G.Y. Fu, J.W. Van Dam, *Phys. Fluids* **B1**, 1949 (1989)
16. M.N. Rosenbluth, H.L. Berk, J.W. Van Dam, D.M. Lindberg, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 596 (1992),
17. A. Fasoli et.al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5564 (1998).
18. S. Pinches et.al., *Plasma Physics and Controlled Fusion* **46**, S47 (2004)
19. A. Fasoli, D. Borba, B.N. Breizman, et al., *Phys. Plasmas* **7**, 1816 (2000)
20. S.E. Sharapov et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 165001 (2004).
21. H.L. Berk, B.N. Breizman, M.S. Pekker, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1256 (1996).
22. B.N. Breizman, H.L. Berk, M.S. Pekker, et al., *Phys. Plasmas* **4**, 1559 (1997).
23. M. Lilley, B.N. Breizman, S.E. Sharapov, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 195003 (2009).
24. J. Zalský et al., *Physics of Plasmas* **18**, 062109 (2011).

Opinia
prof. dr. hab. inż. Juryego Kravtsova
Akademia Morska w Szczecinie

Przypadł mi w udziale zaszczyt napisania recenzji związanej z wnioskiem o nadanie Profesorowi Mieczysławowi Lisakowi tytułu doktora honoris causa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Profesor Mieczysław Lisak urodził się w 20 czerwca 1947 roku w Szczecinie. W tym mieście rozpoczął swoją edukację i w 1965 roku uzyskał świadectwo dojrzałości jako absolwent Liceum Ogólnokształcącego nr 6. W latach 1965–1969 studiował na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej. Ze względu na perturbacje polityczno-społeczne jakie dotknęły Polskę w latach 60., zdecydował się opuścić kraj i wyjechać na stałe do Szwecji. Tam Profesor kontynuował studia na Chalmers University of Technology w Göteborgu, gdzie w 1972 roku otrzymał dyplom magistra fizyki. W latach 1972–1976 Profesor odbył studia doktoranckie w Institute for Electron Physics na tej uczelni, uzyskując w 1976 roku stopień naukowy doktora nauk fizycznych. Kilka miesięcy później został zatrudniony w Institute for Electromagnetic Field Theory and Plasma Physics. W 1979 roku uzyskał stanowisko docenta, w 1996 roku stanowisko profesora nadzwyczajnego, a w 2001 roku tytuł profesora w zakresie fizyki plazmy i stanowisko profesora zwyczajnego w Department for Earth and Space Science. Jednocześnie od 1982 roku pełni funkcję konsultanta naukowego dla Ericsson Radar Electronics, ASEA Switchgear, Bofors Electronics i Saab Space (obecnie Ruag Space).

Przeglądając imponujący – ponad 270 artykułów w renomowanych międzynarodowych czasopismach i obejmujący szerokie spektrum podstawowych dla fizyki zagadnień – dorobek naukowy Profesora Lisaka można dostrzec, że Jego zainteresowania badawcze koncentrują się generalnie wokół następujących problemów:

- fizyka plazmy w warunkach fuzji termojądrowej,
- efekty wywoływane przez wysokoenergetyczne cząstki powstające w reaktorach termojądrowych,
- wyładowania mikrofalowe,
- oddziaływania laserów o dużej mocy z plazmą.

Jest to bardzo szeroki zakres badań, dla których wspólnym mianownikiem oprócz ich elektromagnetycznego charakteru, jest z reguły ich nieliniowość

wynikająca z faktu, że optyczne własności ośrodka zależą od natężenia padającej fali elektromagnetycznej. Z tego względu są to efekty bardzo subtelne i niezmiernie trudne do matematycznego opisu.

Już w pierwszych publikacjach dotyczących optyki, aby uwzględnić zmiany w czasie impulsu generowanego w długich światłowodach, Profesor wprowadził nieliniowe poprawki do konwencjonalnego równania Schrödingera. Tłumaczyło to obserwowany w wielu eksperymentach zjawisko, że początkowo symetryczny impuls staje się z czasem asymetryczny. Innym przewidzianym i analizowanym zjawiskiem była modulacyjna niestabilność wiązki świetlnej, która jest jednym z ważniejszych czynników ograniczających jej spójność podczas propagacji w światłowodzie. Prace Profesora Lisaka w tym zakresie znalazły szerokie uznanie w środowisku ekspertów, tak że niektóre z rezultatów i wypracowanych metod badawczych stały się niemalże kanonami, trafiając do podręczników akademickich, a także znalazły różnorodne zastosowania jak np. metoda wariacyjna, którą Profesor wraz ze swoim długoletnim współpracownikiem Danem Andersonem rozwinęli do znajdowania przybliżonych rozwiązań w wypadku liniowej i nieliniowej propagacji fali elektromagnetycznych.

Bazując na swej wiedzy w dziedzinie nieliniowych problemów falowych Profesor potrafił zastosować ją w pokrewnych działach fizyki. Dwa zastosowania okazały się szczególnie owocne – wkład do rozwoju teorii kondensatu Bosego-Einsteina oraz do teorii przyspieszania wysokoenergetycznych wiązek naładowanych cząstek. W tym obszarze opracował nowy formalizm do opisu dynamiki wiązki w akceleratorach.

Od kilku lat aktywność naukowa Profesora Lisaka i jego zespołu badawczego w dziedzinie optyki koncentruje się wokół zagadnień dynamiki impulsów i wiązek światła częściowo spójnego. Została opracowana ścisła procedura oparta na transformacji Wignera do opisu ewolucji funkcji korelacji – kluczowej charakterystyki opisującej statystyczne własności światła częściowo spójnego. Zostały ponadto stworzone matematyczne podstawy do opisu propagacji światła częściowo spójnego w ośrodkach z nieliniowością typu Kerra i opóźnioną odpowiedzią. Teoria ta unifikuje istniejące podejścia, jak również umożliwia analizę bardziej skomplikowanych pól falowych niż dotychczas rozpatrywane. Zastosowana metoda posłużyła do rozpatrywania zagadnień związanych z oddziaływaniem dwóch częściowo spójnych fal, wywołanych przez nieliniowe efekty występujące w ośrodku – tak zwanych solitonów.

Profesor Mieczysław Lisak przyczynił się również do rozwoju teorii zjawisk w tokamakach określanych jako „electron runaway phenomenon” oraz „plasma edge transport”. Wysokie międzynarodowe uznanie dla wyników działalności naukowej i pozycji zespołu kierowanego przez Profesora Lisaka w środowisku międzynarodowym potwierdzono przez przyznaniem zespołowi

prawa organizacji trzech międzynarodowych sympozjów IAEA w latach 1986, 1991 oraz 2001 (International IAEA Symposium on Energetic Particles in Magnetic Confined Systems) poświęconych wysokoenergetycznym cząstkom i ich oddziaływaniu z wysokotemperaturową plazmą, a także wyborem Profesora na szefa szwedzkiej Asocjacji EURATOM, którą kierował w latach 1999–2005.

To właśnie z Jego inicjatywy 23 marca 2005 roku w Instytucie Fizyki Politechniki Szczecińskiej zorganizowano seminarium z udziałem komisarza Unii Europejskiej dr Barry Greena. Zaprezentowano wówczas tematy badawcze dotyczące plazmy, które zamierzano wspólnie realizować w ramach projektu EURATOM.

Na tym seminarium miałem okazję poznać Profesora Lisaka osobiście, gdyż przedstawiałem wówczas projekt zastosowania nowych rozwiązań w polarymetrycznej diagnostyce plazmy i byłem pod wrażeniem Jego głębokiej wiedzy w tym zakresie. Jestem przekonany, że to Jego życzliwość i poparcie zdecydowały, że większość tematów proponowanych zarówno przez Politechnikę Szczecińską, jak również Akademię Morską, którą ja reprezentowałem uzyskała akceptację Komisarza Unii Europejskiej i w konsekwencji obie uczelnie zostały włączone do projektu EURATOM.

Osobiste zaangażowanie Profesora Lisaka w proces włączenia szczecińskich uczelni do projektu EURATOM pokazuje jak istotną częścią działalności Profesora jest ogromne zaangażowanie w organizację współpracy naukowej oraz formalne i nieformalne kierowanie zespołami naukowymi w obszarze fizyki plazmy w kontekście fuzji, nieliniowej optyki oraz fizyki wyładowań mikrofalowych. W skład zespołów wchodzi naukowcy z wielu światowych ośrodków badawczych i uniwersytetów, częściowo wymienionych powyżej.

Miarą uznania działalności Profesora w międzynarodowym środowisku naukowym są pełnione przez niego liczne funkcje w komitetach naukowych oraz koordynowanie krajowych i międzynarodowych projektów badawczych. Nie sposób wymienić ich wszystkich, ale warto podać chociaż kilka przykładów:

- w latach 1999–2005 pełnił funkcję kierownika szwedzkiego programu badań termonuklearnych obejmującego około stu naukowców z czterech uniwersytetów i jednego instytutu naukowego; był w tej dziedzinie reprezentantem Szwecji w naczelnych komitetach Unii Europejskiej;

- od 1991 roku uczestniczy w Komitecie programowym i organizacyjnym IAEA. Technical Meetings and US-Japan Joint Workshops on the Alpha Particles in Fusion

Kolejnym, bardzo istotnym obszarem aktywności Profesora Lisaka mającym duże znaczenie w optyce były zagadnienia związane z propagacją solitonów i impulsów gaussowskich w ośrodkach słabo nieliniowych z małym współczynnikiem tłumienia, poszerzenie dyspersyjne, kompresja, pojemność

informacyjna impulsów, oddziaływanie solitonów we włóknie optycznym, dynamika oddziaływania między impulsem Stokesa a impulsem pompującym w stymulowanym rozpraszaniu Ramana, zjawiska "załamania fal", zachodzące gdy impulsy o dużej mocy propagują się w nieliniowych włóknach optycznych o normalnej dyspersji oraz propagacja impulsów w materiałach z dużą „kwadratową” nieliniowością.

Zjawiska nieliniowe są charakterystyczne dla wiązek laserowych o wielkiej mocy.

Przy obecnie stosowanych laserach oddziaływanie światła z materią staje się praktycznie oddziaływaniem światła z plazmą, gdzie elektrony w powstającej plazmie przyspieszane są do prędkości relatywistycznych. Takie zjawiska mogą mieć techniczne zastosowania jako np. źródła promieniowania rentgenowskiego o niewielkich rozmiarach czy akceleratory cząstek. Wymaga to jednak dogłębnego zrozumienia zachodzących zjawisk fizycznych. Prof. Mieczysław Lisak wraz ze swą grupą uczestniczy w badaniach dotyczących problemów relatywistycznego oddziaływania światła laserowego z plazmą. Badania prowadzone są we współpracy z Institute of Applied Physics w Niżnym Nowgorodzie (Rosja) i z tego co się orientuję są wszelkie dane aby traktować je w kategoriach kolejnego sukcesu.

Właśnie badania plazmy, jako potencjalnego źródła energii termojądrowej, były punktem Wyjścia w całej pracy naukowej Profesora Lisaka i do tej pory, pomimo prowadzenia badań w tak różnych obszarach fizyki, pozostają w centrum Jego zainteresowań.

Profesor Mieczysław Lisak, wraz ze swoim zespołem badawczym, prowadzi teoretyczne badania dotyczące fizyki plazmy w warunkach fuzji termojądrowej oraz efektów wywoływanych przez wysokoenergetyczne cząstki, powstające w reaktorach termojądrowych. Badania te mają na celu zrozumienie zjawisk zachodzących w wysokotemperaturowej plazmie, ze szczególnym naciskiem na zjawiska istotne w eksperymentach prowadzonych na modelowym tokamaku JET oraz przewidywane w plazmie deuterowo-trytowej na budowanym w ramach międzynarodowego projektu ITER w Cadarache we Francji. Prowadzone badania są ściśle zintegrowane z projektem EURATOM. Istotny wkład został wniesiony w zrozumienie mechanizmów powstawania niestabilności powodowanych przez oddziaływanie szybkich cząstek z falami w plazmie, fizykę grzania plazmy metodą ICRH, warunków i stabilności zapłonu plazmy w reaktorach termojądrowych, dynamiki oscylacji typu „sawtooth” w tokamakach oraz intrygującemu zjawisku tzw. jonowej emisji cyklotronowej (*ion cyclotron emission*), obserwowanej w wielu eksperymentach na dużych tokamakach.

Research

- członek Naukowego Komitetu European Fusion Theory Conference;
- 1999–2005 krajowy koordynator grup badawczych szwedzkich uniwersytetów do współpracy z przemysłem w zakresie fuzji;
- w latach 1996–2004, członek Komitetu Badań Fuzji przy Swedish Research Council;
- od 1999 roku ekspert naukowy przy Swedish Research Council (1999–2005) i Royal Swedish Academy of Science –Nobel Committee;
- w latach 1999–2005 członek Consultative Committee for EURATOM Fusion Research Programme (CCE-FU).

Ponadto Profesor jest członkiem kilku towarzystw naukowych i recenzentem najbardziej renomowanych czasopism międzynarodowych, jak: *Physical Review*, *Physics of Fluids*, *Nuclear Fusion*, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, *Optics Letters*, *Journal of Optical Society of America*, *Optics Communications*, *Physica Scripta*.

Profesor Lisak i Jego grupa są laureatami wielu nagród i wyróżnień, wśród których zwracają uwagę:

- wyróżnienie Szwedzkiego Komitetu Naukowego za najbardziej kreatywną twórczość naukową w zakresie fizyki plazmy termojądrowej (1999);
- nagroda IEEE Microwave and Technology, przyznana w 2001 roku za najbardziej fundamentalny artykuł naukowy;
- wyróżnienie w Europhysics News w 2010 roku za wkład w dziedzinie „Electrical Breakdown in Space-Borne Microwave Equipment”.

Trudno wymienić je wszystkie, ale warto podkreślić, że wśród nich jest również medal Za Zasługi dla Politechniki Szczecińskiej, przyznany przez Senat Politechniki, uchwałą z 29.09.2008 roku.

Dorobek naukowy i organizacyjny Profesora Lisaka jest wybitny w skali światowej i bez wątpienia stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej przez Niego reprezentowanej. Dlatego na zakończenie gorąco i z pełnym przekonaniem formułuję pozytywny wniosek o nadanie Profesorowi Mieczysławowi Lisakowi tytułu doktora honoris causa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.





Uchwały nr 4 /2012
Senatu Akademii Morskiej w Szczecinie
z dnia 11 stycznia 2012 r.

w sprawie: poparcia inicjatywy Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
o nadanie prof. Mieczysławowi Lisakowi tytułu doktora honoris causa ZUT w Szczecinie

§ 1.

Na wniosek Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego (ZUT) w Szczecinie (uchwała Nr 42 Senatu ZUT w Szczecinie z dnia 26.09.2011 r. w sprawie wszczęcia postępowania o nadanie tytułu doktora honoris causa ZUT w Szczecinie prof. Mieczysławowi Lisakowi) Senat Akademii Morskiej w Szczecinie na posiedzeniu w dniu 11.01.2012 r., po zapoznaniu się z opinią wyznaczonego przez siebie recenzenta profesora dra hab. inż. Yuryego A. Kravtsova, jednogłośnie popiera inicjatywę ZUT w Szczecinie o nadanie prof. Mieczysławowi Lisakowi tytułu doktora honoris causa ZUT w Szczecinie.

§ 2.

Uchwała senatu wchodzi w życie z dniem jej podjęcia.

Przewodniczący Senatu AM w Szczecinie
Rektor

prof. dr hab. inż. kpt. ż. w. Stanisław Gućma

Za zgodność z oryginałem
KIEROWNIK BIURA
Sekretarz Rektora
mgr Sylwia Szpytalskiewicz

Kariera Profesora Mieczysława Lisaka zaczęła się w Szczecinie, gdzie przyszedł na świat, skończył szkołę podstawową i średnią, a następnie zaczął studia na Politechnice Szczecińskiej. Niestety, nie było mu dane skończyć pomyślnie studiów, gdyż po wydarzeniach 1968 roku zmuszony był (1969) emigrować do Szwecji. Tam ukończył studia w Chalmers University of Technology w Göteborgu i zaczął pracę naukową. Doktorat nauk fizycznych otrzymał w 1976 roku. Od 1979 roku pracował na stanowisku docenta a od 1996 roku na stanowisku profesora nadzwyczajnego Chalmers University. W 2001 roku uzyskał tytuł profesora i stanowisko profesora zwyczajnego. W tym samym czasie wznowia kontakty z Politechniką Szczecińską, które od 2005 roku stały się bardzo intensywne i oparte na współpracy w ramach programu EURO-ATOM, do którego Politechnika Szczecińska została włączona w 2006 roku, w dużej mierze dzięki zabiegom Profesora Lisaka. Konstytuuje się wówczas grupa ściśle współpracująca z Profesorem Lisakiem, która dzięki jego wsparciu uczestniczy w programach międzynarodowych dotyczących badań nad plazmą. W ramach współpracy z Chalmers University of Technology w Göteborgu każdego roku kilku pracowników Instytutu Fizyki Politechniki Szczecińskiej odbyło tam staże naukowe. Wyniki tej współpracy zaowocowały materiałami do dwóch habilitacji oraz doktoratu. Oprócz współpracy z Chalmers University of Technology, Profesora Lisak zainicjował współpracę, Politechniki Szczecińskiej z Instytutem Maxa Plancka w Greifswaldzie (Institut für Plasmaphysik). Współpraca ta odbywa się również w ramach programu EUROATOM.

Zasługi dla Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie oraz daleko nieprzeciętne osiągnięcia naukowe i organizacyjne Profesora Mieczysława Lisaka skłoniły władze tej uczelni do wystąpienia o nadanie Profesorowi Mieczysławowi Lisakowi doktoratu honoris causa. Analiza jego działalności naukowej, organizacyjnej, a w szczególności tej, która przyczyniła się do rozwoju badań nad fizyką plazmy w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technicznym sprawiła, że wniosek ten gorąco popieram i uważam za w pełni uzasadniony.

Działalność naukowa Profesora Lisaka od samego początku koncentruje się na problemach związanych z szeroko rozumianą teorią plazmy. Plazma jest jedną z bardziej skomplikowanych, trudnych do ujarzmienia materią, która dodatkowo jest bardzo powszechny we wszechświecie. Nadzieje na kontrolowaną fuzję jądrową, tajniki wnętrza gwiazd, ewolucja struktur we wszechświecie, a nawet opis materii jądrowej, wszystko to nieodwołalnie prowadzi do teorii plazmy. Niezliczona ilość fal – jakie mogą się propagować w plazmie, oraz niezliczona ilość niestabilności, które towarzyszą ruchom plazmy, trudności eksperymentalne, niesłychanie szeroki zakres parametrów (gęstości, temperatura, pola magnetyczne mogą się zmieniać o 20–30 rzędów od 10 m^{-3} do 10^{30} m^{-3}), obecność pola magnetycznego i elektrycznego oraz występowanie cząstek o różnych ładunkach elektrycznych powodują, że teoria plazmy stanowi naprawdę duże wyzwanie w nauce o materii. Bardzo rzadko spotyka się specjalistów, którzy byliby w stanie poruszać się swobodnie po całej tej przestrzeni, wnosząc jednocześnie istotny wkład w rozmaite obszary wiedzy. Można powiedzieć, że Profesor Lisak do takich należy. Tak więc, oprócz plazmy pojawiającej się w badaniach nad fuzją termojądrową w związku z programami JET i ITER, a obejmującymi grzanie plazmy różnymi metodami, w szczególności metodą ICHR (ion cyclotron resonance heating), oddziaływaniem ze ściankami, badaniem niestabilności w dynamice plazmy, zajmuje się również optyką nieliniową, propagacją impulsów promieniowania elektromagnetycznego w ośrodkach nieliniowych do jakich plazma niewątpliwie również należy. Impulsy takie, dzięki odpowiedniej nieliniowości ośrodka, oraz dzięki jego własnościom dyspersyjnym, mogą się propagować w postaci tzw. solitonów na duże odległości, nie zmieniając kształtu. Pozwala to na efektywne operowanie bardzo krótkimi femtosekundowymi impulsami. Badanie sytuacji, w których propagacja opisywana jest przez równania „solitonowe”, stanowi istotną część Jego dorobku naukowego. Inny obszar działalności naukowej profesora Lisaka to optyka spójnych wiązek laserowych, oddziaływanie wysoko-energetycznych wiązek laserowych z materią, podczas których powstaje plazma o relatywistycznych parametrach. Badania te mogą mieć istotne znaczenie praktyczne w wytwarzaniu wysokoenergetycznych wiązek cząstek, a także w konstrukcji silnych źródeł promieniowania rentgenowskiego o bardzo małych rozmiarach. Kandydat zajmuje się także wyładowaniami mikrofalowymi i ich wykorzystaniem w technice. Pośród 270 oryginalnych artykułów naukowych można znaleźć nawet tak egzotyczne prace jak generacja i utrzymanie kondensatu Bosgo–Einsteina za pomocą spójnych wiązek laserowych. Profesor Lisak zajmuje się opisem plazmy zarówno w języku klasycznym, jak

i kwantowym. Wiele prac Profesora Lisaka charakteryzuje się wysokim poziomem matematycznym. Po tym bardzo skrótowym przeglądzie działalności naukowej, którego nie sposób uważać za wyczerpujący, wypada zauważyć, że wszystkie te osiągnięcia są udokumentowane rzadko spotykaną liczbą publikacji – przeszło 270 w renomowanych czasopismach naukowych, takich jak: *Physical Review*, *Physics of Fluids*, *Physica Scripta*, *Optics Communications* ... a ponadto 180 publikacji w materiałach prestiżowych konferencji oraz 13 monografii.

Profesor Mieczysław Lisak reprezentuje typ uczonego o rozległych horyzontach, rzadko spotykanej kreatywności i szerokim spektrum działalności zarówno naukowej, jak i organizacyjnej. Za swoją działalność był wielokrotnie nagradzany i wyróżniany. W latach 1999–2005 kierował szwedzkim programem badań termionuklearnych, który zatrudniał około stu uczonych z pięciu placówek naukowych. Pełnił rolę eksperta naukowego dla wielu państwowych i prywatnych instytucji, takich jak np. Swedish Research Council, Royal Swedish Academy of Sciences, Nobel Committee. Kierował kilkudziesięcioma projektami badawczymi zarówno szwedzkimi, jak i zagranicznymi; niektóre z nich były związane z problemami przemysłu, np. współpraca z Ericsson Radar Electronics AB dotyczyła wyładowań plazmowych w przełącznikach. Badania wyładowań mikrofalowych prowadzone dla telefonii komórkowej zostały nagrodzone w 1999 roku jako najbardziej znaczący wkład w tej dziedzinie.

Wypromował 24 prace doktorskie, 44 prace magisterskie oraz prowadził liczne wykłady w ramach swej działalności na Uniwersytecie. Oprócz 13 monografii, jest autorem 13 tomów materiałów szkoleniowych (Lecture notes) dla studentów i doktorantów (od 50 do 300 stron).

Niewątpliwie Profesor Mieczysław Lisak jest światowej klasy autorytetem w dziedzinie badań dotyczących plazmy. Poza wspomnianymi już powyżej osiągnięciami warto podkreślić, że przyczynił się do wyjaśnienia kilku istotnych zjawisk występujących w tokamakach. O niekwestionowanym uznaniu międzynarodowego środowiska naukowego świadczy jego uczestnictwo w bardzo licznych organizacjach, komitetach i programach naukowych oraz przyznaje Mu organizację trzech międzynarodowych sympozjów (International IAEA Symposium on Energetic Particles In Magnetic Confined Systems).

Podsumowując, niech mi raz jeszcze będzie wolno wyrazić opinię, że zasługi dla Politechniki Szczecińskiej, jego wielki dorobek naukowy i organizacyjny, wyrażający się między innymi w organizowaniu współpracy naukowej, kreowaniu grup badawczych, w pełni uzasadniają wniosek o nadanie tytułu doktora honoris causa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technicznego w Szczecinie.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. K.' followed by a stylized flourish.

Warszawa 13.02.2012 r.



**UCHWAŁA NR 481
SENATU UNIWERSYTETU WARSZAWSKIEGO**

z dnia 15 lutego 2012 r.

**w sprawie przyjęcia recenzji prof. Zbigniewa Peradzyńskiego
dorobku kandydata do tytułu doktora honoris causa**

Na podstawie art. 62 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. Nr 164, poz. 1365 z późn. zm.) w związku z wnioskiem w sprawie recenzji prof. Zbigniewa Peradzyńskiego, przedłożonym przez Rektora, Senat Uniwersytetu Warszawskiego postanawia, co następuje:

§ 1

Przyjmuje się recenzję prof. Zbigniewa Peradzyńskiego z Wydziału Matematyki, Informatyki i Mechaniki dorobku prof. Mieczysława Lisaka – kandydata do tytułu doktora honoris causa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.



Przewodnicząca Senatu
Uniwersytetu Warszawskiego
Rektor

prof. dr hab. Katarzyna Chałasińska-Macukow

Opinia
prof. zw. dr. hab. inż. Eryka Infelda
Rada Naukowa
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Profesor Mieczysław Lisak jest wychowankiem Politechniki Szczecińskiej. Studia na Wydziale Elektrycznym przerwał w 1969 roku z powodu wymuszonej emigracji. Tak więc Polska utraciła wybitnie utalentowanego specjalistę, choć jednak nie na zawsze. Profesor Lisak znalazł się w Göteborgu, gdzie w 1972 roku otrzymał tytuł magistra fizyki, a w 1976 roku doktora. Od tego czasu współpracuje z profesorem Danem Andersonem. Niewiele znam przykładów tak owocnej i długotrwałej współpracy. Od 1996 roku Profesor Mieczysław Lisak pracuje na Chalmers University of Technology (Szwecja).

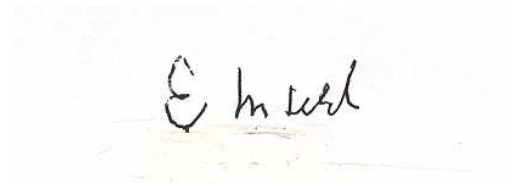
Profesorowie Lisak i Anderson zajmują się wieloma dziedzinami fizyki. Są oni autorytetami w fizyce plazmy, optyce nieliniowej i badaniu wyładowań nieliniowych. Ich prace dotyczące stabilności solitonów opisywanych nieliniowym równaniem Schrödingera są niemal klasykami. Znam sześć prac tych autorów, których liczba cytowań przekracza 50. Profesor Lisak organizuje współpracę z wiodącymi ośrodkami na świecie, na przykład w Niemczech, Szwajcarii i Australii. Rodzinne miasto odwiedza regularnie od 2001 roku, z ogromną korzyścią dla środowiska naukowego Szczecina. Profesor zorganizował regularne wyjazdy młodych fizyków z rodzimej Politechniki do Szwecji. W 2008 roku przyznano Mu medal „Za Zasługi dla Politechniki Szczecińskiej”.

Dorobek naukowy Profesora Lisaka obejmuje 270 artykułów w najlepszych czasopismach fizycznych (w tym siedem w *Physical Review Letters*), nie mówiąc o 180 artykułach konferencyjnych – wszystkie lub prawie wszystkie napisane wspólnie z profesorem Danem Andersonem. Pozostali autorzy to często wiodący specjaliści w danych krajach (np. Yu Kivshar, B. Malomed, L. Stenflo)

Profesor Lisak był członkiem komitetów organizacyjnych wielu konferencji z fizyki plazmy i optyki nieliniowej. Kieruje badaniami plazmowymi w Szwecji w ramach EURATOM-u. Doradzał komitetowi Nagród Nobla z fizyki. Jest

promotorem 24 prac doktorskich i wraz z Danem Andersonem, kieruje wieloma grupami badawczymi, często nieformalnie.

Gorąco popieram inicjatywę nadania Profesorowi Lisakowi tytułu doktora honoris causa Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. Infeld', is centered within a rectangular box. The signature is written in a cursive, somewhat stylized script.

E~Infeld Profesor, NCBJ

Warszawa, 10.06.2011 r.



NARODOWE CENTRUM BADAŃ JĄDROWYCH
National Centre for Nuclear Research
Świerk

www.ncbj.gov.pl

**Rada Naukowa
Narodowego Centrum Badań Jądrowych**

Secret REKTOR
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie
prof. Włodzimierz Kiernożycki
28.10.2011

**Jego Magnificencja
Rektor Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego
Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kiernożycki**

Uprzejmie informuję, że Rada Naukowa Narodowego Centrum Badań Jądrowych na posiedzeniu w dn. 11. października br. po wysłuchaniu informacji o dorobku naukowym i działalności pana prof. Mieczysława Lisaka z Chalmers University of Technology w Gothenburgu przedstawionej w swej recenzji przez pana profesora Eryka Infelda, jednogłośnie wyraziła wysoką ocenę dokonań prof. Mieczysława Lisaka jako badacza, nauczyciela akademickiego, organizatora nauki i współpracy międzynarodowej

Rada Naukowa z głębokim przekonaniem popiera zamiar Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego uhonorowania pana profesora Mieczysława Lisaka tytułem doktora honoris causa.

Warszawa dn. 11 października 2011 r.

informacja
prof. Ryszard Sosnowski
Przewodniczący Rady Naukowej
Narodowego Centrum Badań Jądrowych

Doktorzy honoris causa Akademii Rolniczej

Stefan Aleksandrowicz – 1971 rok
profesor w dziedzinie hodowli trzody chlewnej

Marian Lityński – 1974 rok
profesor w dziedzinie warzywnictwa, nasiennictwa

Walerian Cięglewicz – 1981 rok
profesor w dziedzinie biologii i technologii ryb

Szczepan Pieniążek – 1984 rok
profesor w dziedzinie ogrodnictwa – sadownictwa

Kenneth Sherman – 1989 rok
profesor w dziedzinie rybactwa i akwakultury

Zbigniew Gertych – 1989 rok
profesor w dziedzinie ekonomiki ogrodnictwa

Eugeniusz Grabda – 1989 rok
profesor w dziedzinie chorób ryb, ichtiologii i parazytologii ryb

Andrzej Słaboński – 1989 rok
profesor w dziedzinie biologii, genetyki i hodowli roślin

Robert Devlin – 1990 rok
profesor w dziedzinie fizjologii roślin

Witold Klawe – 1991 rok
specjalista w dziedzinie rybactwa i oceanologii

Józef Popiel – 1991 rok
profesor w dziedzinie rybołówstwa morskiego

Hans Theede – 1991 rok
profesor w dziedzinie ekofizjologii morskiej

Zbigniew Kabata – 1993 rok
specjalista w dziedzinie parazytologii ryb

Leszek Malicki – 1994 rok
profesor w dziedzinie doświadczalnictwa, uprawy roli i roślin

Zdzisław Sikorski – 1997 rok
profesor w dziedzinie chemii i technologii żywności pochodzenia morskiego

Jędrzej de Pelikan Krupiński – 1995 rok
profesor w dziedzinie ochrony zasobów genetycznych zwierząt gospodarskich

Teofil Mazur – 1997 rok
profesor w dziedzinie chemii rolnej, kształtowania i ochrony środowiska

Jan Szczerbowski – 1997 rok
profesor w dziedzinie rybactwa śródlądowego, ichtiologii

Stanisław Woyke – 1998 rok
profesor w dziedzinie pszczelnictwa

Witold Podkówka – 1999 rok
profesor w dziedzinie żywienia zwierząt i gospodarki paszowej

Janusz Gill – 2000 rok
profesor w dziedzinie fizjologii zwierząt

Rudolf Michałek – 2002 rok
profesor w dziedzinie inżynierii rolniczej

Harald Rosenthal – 2003 rok
profesor w dziedzinie rybactwa, akwakultury

Zdzisław Kośmicki – 2003 rok
profesor w dziedzinie inżynierii rolniczej

Marian Różycki – 2004 rok
profesor w dziedzinie trzody chlewnej

Teresa Żebrowska – 2004 rok
profesor w dziedzinie fizjologii żywienia zwierząt

Jan Kucharski – 2005 rok
profesor w dziedzinie agronomii – biochemia gleby i mikrobiologia środowiska

Stanisław Rakusa-Suszczewski – 2005 rok
profesor w dziedzinie biologii mórz polarnych, oceanologii

Andrzej Dubas – 2005 rok
profesor w dziedzinie agronomii, uprawy roli i roślin leczniczych

Janusz Haman – 2007 rok
profesor w dziedzinie mechanizacji rolnictwa, inżynierii rolniczej

Konstanty Lossow – 2007 rok
profesor w dziedzinie limnologii, ochrony i rekultywacji jezior

Doktorzy honoris causa Politechniki Szczecińskiej

Leon Babiński – 1971 rok
profesor prawa międzynarodowego

Tadeusz Aleksander Rosner – 1971 rok
profesor nauk chemicznych

Herman Wagener – 1971 rok
profesor nauk ekonomicznych

Alfred Wielopolski – 1976 rok
profesor historii

Wiesław Olszak – 1996 rok
profesor w dziedzinie technologii mechanicznej

Czesław Cempel – 1996 rok
profesor w dziedzinie dynamiki, wibroakustyki i diagnostyki maszyn i układów mechanicznych

Jerzy Boczar – 1997 rok
profesor w dziedzinie inżynierii środowiska wodnego

Józef Szarawara – 1998 rok
profesor w dziedzinie technologii chemicznej, termodynamiki chemicznej, inżynierii reakcji chemicznych

Fryderyk Stręk – 1998 rok
profesor w dziedzinie inżynierii chemicznej i procesowej

Bolesław Kazimierz Mazurkiewicz – 1999 rok
profesor w dziedzinie inżynierii środowiska morskiego

Zdzisław Bubnicki – 2001 rok
profesor w dziedzinie automatyki i informatyki

Jan Węglarz – 2001 rok
profesor w dziedzinie badań operacyjnych i informatyki

Tadeusz Mieczysław Paryjczak – 2002 rok
profesor w dziedzinie badań nad adsorpcją i katalizą

Jan Koch – 2002 rok
profesor w dziedzinie technologii mechanicznej i inżynierii produkcji

Jerzy Wojciech Doerffer – 2003 rok
profesor w dziedzinie budownictwa okrętowego

Stefan Maciej Wojciechowski – 2004 rok
profesor w dziedzinie nauk o materiałach i inżynierii materiałowej

Ali Hasan Nayeesh – 2004 rok
profesor w dziedzinie mechaniki, matematyki stosowanej oraz teorii i praktyki sterowania

Tadeusz Kaczorek – 2004 rok
profesor w dziedzinie teorii sterowania i systemów, matematyki stosowanej i elektrotechniki

Klaus Wetzig – 2006 rok
profesor w dziedzinie inżynierii materiałowej, fizykochemii i analityki powierzchni ciał stałych

Ryszard Sikora – 2008 rok
profesor w dziedzinie elektrotechniki teoretycznej, bioelektromagnetyzmu i elektromagnetycznych badań nieniszczących

Krzysztof Marchelek – 2008 rok
profesor w dziedzinie dynamiki obrabiarek i procesów obróbkowych

Doktorzy honoris causa
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie

Alvin Wiliam Nienow – 2010 rok
profesor w zakresie inżynierii chemicznej i biochemicznej,
procesów transportu w mieszalnikach, bioreaktorach i fluidyzacji



Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

al. Piastów 17
70-310 Szczecin

ISBN 978-83-7663-147-9