ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

СОТРУДНИЧЕСТВО ОИЯИ С ИНСТИТУТАМИ И УНИВЕРСИТЕТАМИ ПОЛЬШИ

Материалы круглого стола и Координационного совещания «Польша в ОИЯИ» 18 и 20 января 2001 г.

Под общей редакцией В.Г.Кадышевского, А.Н.Сисакяна, А.Хрынкевича

Дубна 2001

Составители
В.М.Жабицкий, Т.Я.Жабицкая, Н.И.Сисакян,
Б.М.Старченко, В.Хмельовский

Редакторы *Е.В.Калинникова, Е.К.Аксенова, Э.В.Ивашкевич*
Фото *Ю.А.Туманова, П.Е.Колесова,*
а также фото из архива ОИЯИ

Сотрудничество ОИЯИ с институтами и университетами Польши: Мате-
С67 риалы круглого стола и Координационного совещания «Польша в ОИЯИ» 18 и 20 января 2001 г. / Под общ. ред. В.Г.Кадышевского, А.Н.Сисакяна, А.Хрынкевича. — Дубна: ОИЯИ, 2001. — 196 с., 54 с. фото.

ISBN 5-85165-668-9

В сборник включены выступления на заседании круглого стола, состоявшемся 18 января 2001 г. в ходе работы 89-й сессии Ученого совета ОИЯИ, и на Координационном совещании 20 января 2001 г., в работе которых приняли участие как ученые ОИЯИ, так и представители польских научных центров и университетов, сотрудничающих с Объединенным институтом ядерных исследований.

Книга широко иллюстрирована фотографиями, которые были представлены на фотовыставке «Польша в ОИЯИ», приуроченной к этим заседаниям, а также снимками, сделанными 18 и 20 января 2001 г.

ISBN 5-85165-668-9

© Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, 2001

OPENING ADDRESS

V.G.Kadyshevsky

Director of the Joint Institute for Nuclear Research

Dear Members of the Scientific Council, Honorary guests, Colleagues,
Ladies and Gentlemen,

Let me open the round-table discussion dedicated to different aspects of cooperation of JINR with scientific centres, universities and organizations of Poland.

The present meeting is included into the agenda of the 89th session of the Scientific Council of the Joint Institute for Nuclear Research in accordance with your recommendation made a year ago after the results of the round-table discussion dedicated to the JINR cooperation with Russian institutions. Academician Hrynkiewicz suggested a round-table discussion «Poland–JINR», and today the idea is being realized. The exhibition, which we opened today in the morning with Professor Niewodniczanski, can be regarded as a prologue to the present round-table discussion. In the exhibited pictures we could gladly see a lot of our Polish colleagues.

I think it is natural that Poland became the first Member State about whom we start our discussion in the new century and new millennium.

Poland has played a great role in the foundation of JINR. Poland has been a Member State of the Joint Institute for Nuclear Research from 1956. Since the very first days of JINR's existence Poland has been taking the most active part in the Institute activities and in its governing bodies. A prominent Polish scientist Corresponding Member of the Academy of Sciences of Poland Marian Danysz was a member of the first JINR Directorate.

Poland forwarded outstanding scientists to the governing bodies of the Institute. First Scientific Councils of JINR included Professor M. Danysz, Professor A. Soltan, Academician H. Niewodniczanski, and Academician L. Infeld.

Today the names of many of these scientists are kept in the alleys on the JINR's sites. You may find the alleys after M. Danysz and L. Infeld on the territory of the High Energy Laboratory, and H. Niewodniczanski's alley at the Laboratory of Nuclear Problems' site.

Two Polish physicists were elected on the alternative basis to the first international Scientific Council, which was established at the session of the Committee of Plenipotentiaries in March 1993. The present Scientific Council represents Polish scientists on a wider scale. These are Academicians A. Hrynkiewicz, R. Sosnowski, J. Janik and A. Budzanowski. I would like to stress the fact that the number of Polish members of the present Scientific Council is on the second place, after that of Russia. Poland was among the initiators of the 90s changes and reforms in the Joint Institute. The

role of Academician A. Hrynkiewicz, who was the Plenipotentiary of Poland to JINR, is immense.

The Institute Directorate is grateful to Academician A. Hrynkiewicz for his constant attention to the needs of the Joint Institute, for his great efforts in the development of our cooperation with Polish scientific centres and universities.

Dubna physicists have wide contacts with Polish scientists. Today we keep close ties with 35 scientific organizations in Poland (including 7 universities) on 28 scientific topics in all directions of the JINR activities. The geography of this cooperation is all Poland.

Many forums may be mentioned here where the cooperation of Dubna and Polish physicists was the topic of discussions and presentations. I would like to say a few words about the exhibition «People near the atom», which took place in the Warsaw Museum of Science and Technology from 25 November to 8 December 1996.

The exhibition reflected the history of the cooperation of the Joint Institute with Polish centres since the moment of the Institute's establishment.

At the opening of the exhibition I heard the remarkable words addressed to JINR and pronounced by the President of the National Atomic Energy Agency of Poland Professor J. Niewodniczanski: «Our common Joint Institute on the Volga bank».

I think these words may become the motto of our present round-table discussion.

In conclusion I would like to mark the following: we expect the today's discussion will promote further successful development of the cooperation of JINR with Polish scientists, physicists from other Member States, with all partners of the Joint Institute from different corners of the world.

ПОЛЬША В ОБЪЕДИНЕННОМ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.Хрынкевич

Полномочный Представитель правительства РП в ОИЯИ

Уважаемый господин председатель, уважаемые коллеги!

В моем вступительном слове хочу в сжатой форме представить вам участие польских научных центров и польских сотрудников в деятельности Объединенного института ядерных исследований.

В 1956 г. Польша была одной из 11 стран-создателей Объединенного института (Албания, Болгария, Венгрия, ГДР, Китай, КНДР, Монголия, Польша, Румыния, СССР, Чехословакия).

В составе первой дирекции Объединенного института пост вице-директора занимал знаменитый польский ученый Мариан Даныш (1956–1958 гг.). В последующие годы вице-директорами ОИЯИ от Польши были:

- Анджей Хрынкевич (1966–1968),
- Мечислав Совинский (1977–1981).

Польские ученые занимали также посты заместителей директоров лабораторий ОИЯИ:

- Збигнев Стругальский (ЛВЭ),
- Ежи Бартке (ЛВЭ),
- Славомир Хойнацкий (ЛЯР),
- Генрих Лизурей (ЛЯП),
- Эдвард Капусцик (ЛТФ),
- Иренеуш Натканец (ЛНФ),
- Александер Полянский (ЛИТ),

и были председателями научных комитетов:

- Анджей Хрынкевич,
- Ежи Яник,
- Кшиштоф Рыбицкий,
- Пшемыслав Зелинский,
- Ян Жилич.

Первым председателем Программно-консультативного комитета (ПКК) по ядерной физике был избран Анджей Будзановский.

В состав Ученого совета ОИЯИ входили известные польские ученые: Мариан Даныш, Леопольд Инфельд, Генрих Неводничанский и Анджей Солтан.

В настоящее время членами Ученого совета ОИЯИ являются:

• Анджей Будзановский,
• Анджей Хрынкевич,
• Ежи Яник,
• Рышард Сосновский.

В научной и технической деятельности Объединенного института ядерных исследований принимают участие:

• 10 польских вузов,
• 5 институтов Государственного агентства по атомной энергии РП,
• 3 института Польской академии наук.

В течение 1956–2000 гг. на долгосрочную работу в ОИЯИ (более шести месяцев) были направлены 470 польских сотрудников. На основании результатов, полученных в Дубне, 104 из них защитили в Польше кандидатские диссертации, а 47 — докторские диссертации.

Кроме долгосрочных командировок, польские сотрудники приезжали в ОИЯИ для проведения экспериментов, обсуждения итогов совместных работ, для участия в конференциях и совещаниях, организованных в Дубне.

В последнее время в течение года с такими краткими визитами в Дубну в среднем приезжало около 60 научных сотрудников общим количеством 800 человеко-дней в год. Более подробно эти данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. **Краткосрочные командировки**

Год	Количество ученых	Человеко-дни
1998	52	764
1999	58	783
2000	63	839

Главные научные направления, реализованные в лабораториях ОИЯИ, участием в которых заинтересованы польские научные центры, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Научное направление	Заинтересованность
• Физика тяжелых ионов	32 %
• Физика конденсированных сред	31 %
• Вычислительная физика и техника	14 %
• Теоретическая физика	10 %
• Релятивистская ядерная физика	6 %
• Радиология и радиомедицина	4 %
• Нейтронная ядерная физика	3 %

Вопросами сотрудничества с Объединенным институтом ядерных иссле- дований в Польше занимается комиссия Совета по атомной энергии, в работах которой принимают участие представители польских научных центров. Комиссия обсуждает направления сотрудничества, утверждает долгосрочные командировки польских научных сотрудников в ОИЯИ и оценивает итоги их научной деятельности. Комиссия занимается также распределением средств по финансированию грантов Полномочного Представителя и совместных программ, осуществляемых польско-дубненскими научными группами и коллаборациями.

Комиссия по сотрудничеству с ОИЯИ выработала стратегию сотрудничества польских научных центров с Объединенным институтом, которая сводится к тому, что количество постоянно работающих польских сотрудников в Дубне не должно превышать 15–20 человек. Это так называемые «резиденты», которые занимаются совершенствованием измерительной аппаратуры, наблюдают за ее состоянием и подготавливают эксперименты. В согласованное время из Польши в лаборатории ОИЯИ в краткосрочные командировки на 10–15 дней приезжают специалисты для проведения экспериментов. Обработка полученных результатов и подготовка публикаций в ОИЯИ и в Польше выполняются с использованием компьютерной связи.

Различные аспекты сотрудничества Польши с ОИЯИ иллюстрируют табл. 3,4.

В первой из них показаны данные за период 1995–2000 гг. по:

- взносу Польши в бюджет ОИЯИ,
- количеству научных сотрудников из Польши, направленных на долгосрочную работу,
- количеству научных публикаций в международных журналах,
- количеству докладов на международных конференциях.

Таблица 3. **Данные об участии Польши в ОИЯИ**

Год	Взнос, тыс. долл.	Количество научных сотрудников	Количество публикаций	Количество докладов
1995	1310	19	45	6
1996	1472	19	53	13
1997	1590	19	46	6
1998	1811	20	57	14
1999	1838	19	58	12
2000	1799	18	—	—

Польский взнос в ОИЯИ распределяется следующим образом:

- заработная плата польских сотрудников — 15%,
- научная деятельность в Дубне — 35%,
- международное сотрудничество ОИЯИ — 20%,

• гранты Полномочного Представителя — 10%,
• совместные научные программы — 20%.

В табл. 4 представлено финансирование грантов и программ за 1997–2000 гг.

Таблица 4. **Гранты и совместные проекты**

Год	Гранты		Проекты	
	Количество	Выделенное финансирование, тыс. долл.	Количество	Выделенное финансирование, тыс. долл.
1997	14	240	—	—
1998	14	125	11	325
1999	15	120	10	210
2000	13	140	16	300
Всего		625		835

Сегодня, после выступления профессора Ежи Неводничанского — председателя Государственного агентства по атомной энергии, согласно повестке дня Ученого совета его участники заслушают десять докладов приглашенных в Дубну участников совместных программ, которые выполняются сотрудниками ОИЯИ и польских научных центров.

SPEECH OF WELCOME

J.Niewodniczanski

President of the National Atomic Energy Agency, Poland

Mr. Chairman — Academician Kadyshevsky,
Ladies and Gentlemen,

First of all I would like to express my appreciation for inviting me to this meeting of the JINR Scientific Council. This is the second time I have the opportunity to participate at the deliberations of this Body; for me — having also been a regular member of the CERN Council since 1992 — to be here today is really a very interesting experience.

For such a country like Poland it is practically impossible to perform any frontal experiments in physics using only our own facilities. Therefore, it is so essential for our scientists to participate in international research programmes, using facilities not available in Poland. The best form of such a participation is a membership of international scientific organizations, like CERN in Geneva or JINR in Dubna. We are very happy to be members of those two institutions and to be able through that to use their unique installations and to collaborate with their staff members.

I try to avoid a word «cooperation» in case of Polish involvement in the programmes of JINR or CERN; being the member of a family you cannot cooperate with this family, but you try to be present in all its activities. So I believe that instead of the expression «cooperation» in the title of our discussions dealing with relations between Poland and JINR, the word «presence» (of Polish groups in the JINR laboratories and programmes) should be rather used.

Being the members of JINR and CERN costs quite big amount of money. We do whatever we can to fulfil our financial obligations and so far we have paid all our contributions in full. Since both contributions come from the same part of our budget and both are connected with the research in «subatomic» physics, we would like to justify our presence in these institutions by the opportunity to apply their unique installations to study different in both cases scientific topics. Therefore, we are not very happy when either the programmes or research teams overlap and our contributions paid to CERN and JINR are partly used to cover costs of the same scientific tasks. We feel that here in Dubna there are such interesting facilities, research topics and — especially — people to work with that our financial obligations have to be devoted entirely to the programmes which cannot be performed at CERN.

Today we have opened an exhibition on Poles present here in JINR laboratories and on Polish institutes and universities cooperating with Dubna. At this exhibition we could see pictures of people and their working places. Now at the next part of our meeting we

are going to listen to the presentations on their programmes and on the results obtained. So it will be a natural extension of that exhibition, from faces to brains, from laboratories to scientific results. I am quite convinced that an outcome of that meeting will demonstrate benefits of Polish science from our presence in JINR and of the Institute from our contribution to its programmes.

THE MEDICAL CYCLOTRON AIC-144 AT THE HENRYK NIEWODNICZANSKI INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

A.Budzanowski

Institute of Nuclear Physics, Cracow, Poland

The proton isochronous cyclotron with the diameter of the main magnet pole pieces of 144 cm was conceived during early 70s in the Accelerator Division of the Dzelepov Laboratory for Nuclear Problems of JINR. Although it is almost impossible to trace back all the story of this cyclotron until the very beginning, we should mention that its main parameters were designed so that it could be constructed using the SP-44W electromagnet of the U-120 classical cyclotron which has been in operation in the Institute since 1958. The authors of the first idea and first design were Drs J.Schwabe, V.P.Dmitrievsky, A.A.Glazov, V.V.Kolga, and N.L.Zaplatin.

At the end of 70s it became clear that the Institute of Nuclear Physics in Cracow will not get money to buy a commercial isochronous cyclotron of the new generation so the decision was taken to start the construction of the proton cyclotron using the existing at DLNP project. This defined the basic parameters of the new machine: diameter of the pole pieces of 144 cm, one dee, the shape of the spiral magnetic field structure and the range of values of the K factor $37 < K < 60$. It was also decided to build a new yoke, to keep continuous exploitation of the U-120 cyclotron for fast neutron tumour therapy and radioactive isotope production. Consequently the prototype of the new cyclotron was assembled and tested on a provisional experimental stand located outside the radiation shield of the U-120 cyclotron. The process of manufacturing and testing of the prototype of the new cyclotron was performed under the guidance of Dr J.Schwabe. It started in 1981 and ended up in 1992 with the extraction of the 19 MeV deuteron and 36 MeV alpha particle beams.

Radiative hazard precluded further tests of the beam extraction system and the decision was to pass the AIC-144 cyclotron to the exploitation team. This team consisted mostly of the former operators of the U-120 cyclotron as well as members of Dr J.Schwabe's group. Working under the leadership of M.Sc. Eng. E.Bakewicz it had to perform the following tasks: dismantling the U-120 cyclotron, dismantling the prototype of the AIC-144 cyclotron, reinstalling the AIC-144 cyclotron on the working stand inside the radiation shielding, installing and putting into operation a new RF variable frequency generator bought from the TIRA factory in St.Petersburg, constructing, manufacturing and installing the new beam extraction system including two electrostatic

deflectors, 3 magnetic channels and additional harmonic coils. It should be mentioned at this point that the reinstallation operation allowed one to modernize several parts of the AIC-144 including the water cooling system as well as removal of some faults like, e.g., some irregularities found in the internal parts of spirals which were due to lack of the strict control of the shape by the manufacturer. The extraction system was based on the principle of induced beam orbits, precession was designed by Dr S.B.Vorojtsov from the Accelerator Division of the DLNP. In June 2000, a beam of protons with the energy of 35 MeV was extracted. The transmission of the main electrostatic deflector of 50 % was achieved. This value can be considered as a remarkable one taking into account a small distance between last subsequent proton orbits about 0.5mm. The important contribution of the specialists from the Accelerator Division of DNLP, namely Drs N.A.Morozov, E.V.Samsonov and N.G.Shakun to the job of putting into operation the whole beam extraction system is noted. The main parameters of the AIC-144 cyclotron are listed in Table 1.

Table 1. **Main parameters of the AIC-144 cyclotron**

1.	Pole diameter	144 cm
2.	Magnetic structure	4 spirals with angles from 45 to 54°
3.	Average magnetic field	8.5–18 kGs
4.	Main magnet current	0–700 A
5.	Number of concentric coils	20
6.	Number of valley coils	4
7.	Range of the concentric coils current	±400 A
8.	Number of dees	1 ($\alpha = 180°$)
9.	Range of the RF generator	10–27 MHz
10.	Output power of the RF generator	120 kW
11.	Dee voltage (amplitude)	max. 50 kV
12.	Extraction system (the precession method)	2 electrostatic deflectors, 2 magnetic channels (passive), 1 electromagnetic channel, 4 harmonic coils
13.	Efficiency of extraction	up to 70%
14.	Ion source	internal, PIG type
15.	Acceleration factor	K = 60
16.	Energy ranges	protons: 20–60 MeV, deuterons: 15–30 MeV, α-particles: 30–60 MeV

The radioisotopes obtained so far by using proton and alpha beams from AIC-144 are listed in Table 2.

Table 2. **Radioisotopes produced by the AIC-144 cyclotron (1998–2000)**

Nuclear reaction	Beam	Current	Irradiation time
$^{99\text{-}102}$Ru (p, n) $^{99\text{-}102}$Rh	p 12 MeV	3 μA	20 h
$^{58\text{-}64}$Ni (p,xn) ^{57}Co	p 30 MeV	2 μA	1 h
^{11}B (p, n) ^{11}C	p 10 MeV	3 μA	1 h
$^{158\text{-}176}$Yb (α, xn) $^{173\text{-}175}$Hf	α 28 MeV	5 μA	24 h
^{109}Ag (α, 2n) ^{111}In	α 28 MeV	1 μA	10 h
^{109}Ag (α, 2n) ^{111}In	α 28 MeV	1 μA	10 h
^{11}B (p, n) ^{11}C	p 10 MeV	3 μA	0.5 h

The nearest future of AIC-144 looks as follows. By June 2001 the proton beam at the energy of 45 MeV should be extracted. The beam will be then guided by a system of dipole magnets and quadrupole lenses to the position where the proton eye therapy should take place. The increase of the beam energy to the top value of 60 MeV is planned by the end of 2001. The beginning of the proton eye therapy is expected at the end of 2002.

The plans for the far future are to install the post-accelerator of the linear booster type (LIBO) a prototype of which is being tested by Ugo Amaldi's group at the Catania Cyclotrone facility. This will allow one to increase the proton energy from 60 to 200 MeV what will open the way to the full-body proton therapy of malignant tumors.

In Fig.1 the general view of the AIC-144 cyclotron is shown. The scheme of the beam extraction system is presented in Fig.2. General outlook of the beam distribution system is given in Fig. 3.

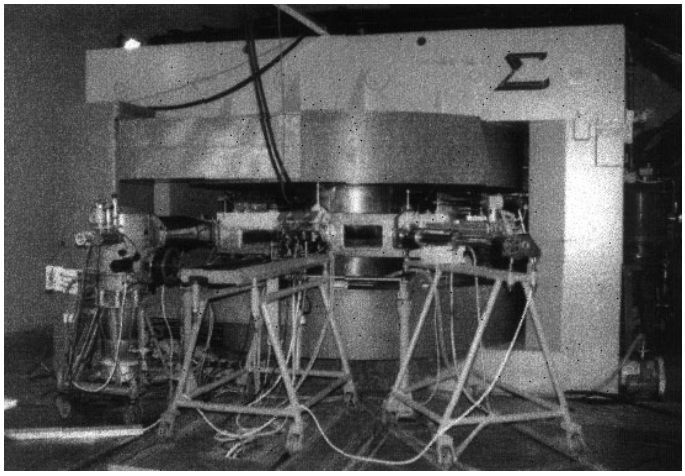


Fig. 1. Cyclotron AIC-144

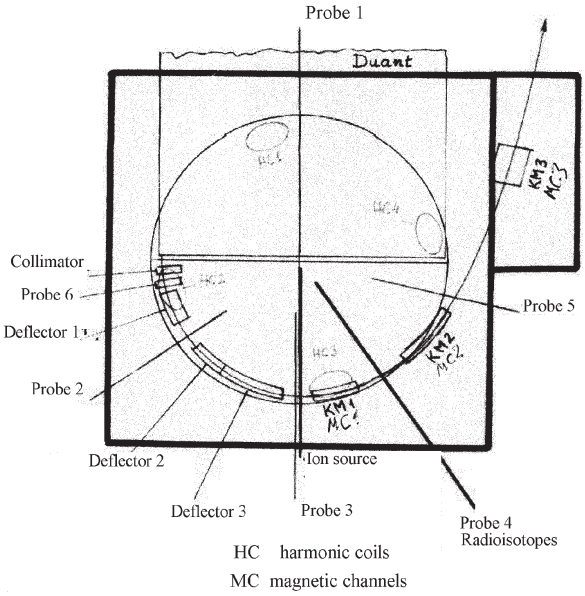


Fig. 2. Beam extraction system (with beam diagnostic elements)

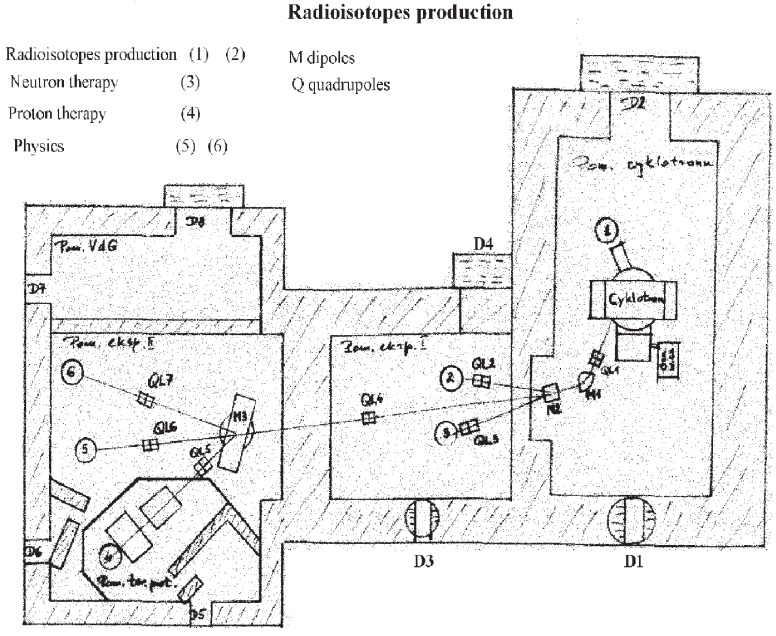


Fig. 3. Layout of the beam distribution system

Finally it should be mentioned that since 1992 the AIC-144 cyclotron project was financially supported by special investment grants from State Committee for Scientific Research and National Atomic Energy Agency. As can be seen the Medical Cyclotron Project perfectly fits into the scheme of financing of the so-called Hrynkiewicz's programmes. I should acknowledge the support obtained so far on this way and express my wish to extend for the coming years the cooperation with JINR laboratories particularly with DLNP and FLNP.

References

1. *Schwabe J.A. et al.* The Automatic Isochronous Cyclotron AIC-144 // Proc. of the Intern. Seminar on Isochronous Cyclotron Technique, Cracow, Nov. 13–18, 1978. Raport IFJ No. 1069/PL. 1978. P.197.
2. *Schwabe J.A.* AIC-144 Automatic Isochronous Cyclotron, Main Parameters, Status // Nukleonika. 1997. V.42. P.727.
3. *Bakewicz E. et al.* The First Extracted Beam from the Upgraded AIC-144 Cyclotron // Nukleonika. 2001. (in print).

THREE-PARTIES COOPERATION: INP (CRACOW), IFE (KJELLER, NORWAY) AND JINR (DUBNA), ON NEUTRON SCATTERING IN MOLECULAR MATERIALS

J.A.Janik

Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Cracow, Poland

After the IBR-1 pulsed reactor was started, the Institute of Nuclear Physics (INP) in Cracow contributed to its instrumentation by constructing a spectrometer for measuring the neutron spectra, which informed about the phonon dynamics in hydrogen containing materials. Later on these studies were extended on neutron diffraction performed by the time-of-flight method well suited for the pulse source. In this way the instrumental basis was created. Further achievements of this basis were the spectrometers KD-SOG and NERA.

The three-parties cooperation is functioning with the following division of tasks: IPN is responsible for samples and knowledge of their basic properties concerning phases and phase transitions, which may be obtained from the scanning calorimetry, adiabatic calorimetry, polarization microscopy, and IR Fourier spectroscopy. Institute for Energiteknikk (IFE) provides the possibilities of neutron scattering measurements via the time-of-flight spectrometer (TOF) operating in the «direct» geometry. The Joint Institute for Nuclear Research (JINR) provides the possibilities of neutron scattering measurements via the time-of-flight spectrometer NERA operating in the «inverted» geometry.

The strategy of these joint efforts is the following: After a basic information concerning sample has been obtained at INP, we carry out neutron scattering measurements at IFE, where we have at our disposal a practically unlimited time, but low neutron intensity and a «wide» line of incoming neutron wavelength (HWHM equals 130 μeV). Selected aspects (as the most important) — temperatures, momentum transfers, etc. — are then being measured at JINR, in frame of users policy, i.e., via applying for time on the NERA spectrometer. Time of measurements is of course limited to ca. 2 weeks per year. Here we have at our disposal the simultaneous phase control (via diffraction) and a high neutron intensity plus a «narrow» line of neutron wavelength (HWHM may be as 30 μeV).

Financing of the project from the Polish contribution to JINR makes it possible to cover part of travel costs and per diem of persons involved in the cooperation.

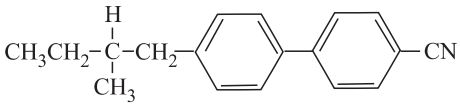


Fig. 1. Schematic view of the 5*CB molecule

As an example of research carried out in frame of this project let me briefly present the study of low energy part of the atomic dynamics in glasses — as compared with the crystal phase [1]. The substance chosen for this example is the co-called 5*CB (Fig. 1) which exhibits the cholesteric phase. On cooling below 210 K one obtains the «cholesteric» glass. On heating then one obtains two crystalline forms: a metastable (I) and a stable (II) one. This information was obtained at INP via the scanning and adiabatic calorimetry.

At IFE (Norway) we obtained an evidence of the so-called «boson peak» characteristic for the glass. Figure 2 shows this result for six temperatures scaled via the «Bose scaling» to 100 K. We may say that the scaling is satisfactory, but there is a great scatter of points due to a low neutron intensity at the Norwegian reactor.

At JINR it was possible to get results of a much better quality which made it possible to express them in the form of density of excited states for the glass, crystal I and crystal II (Fig. 3). After subtracting the results of crystal I, from those of glass we obtained the «boson peak» which in this case is composed of two maxima (Fig. 4). It was impossible to obtain this interesting feature via the neutron measurements in Norway.

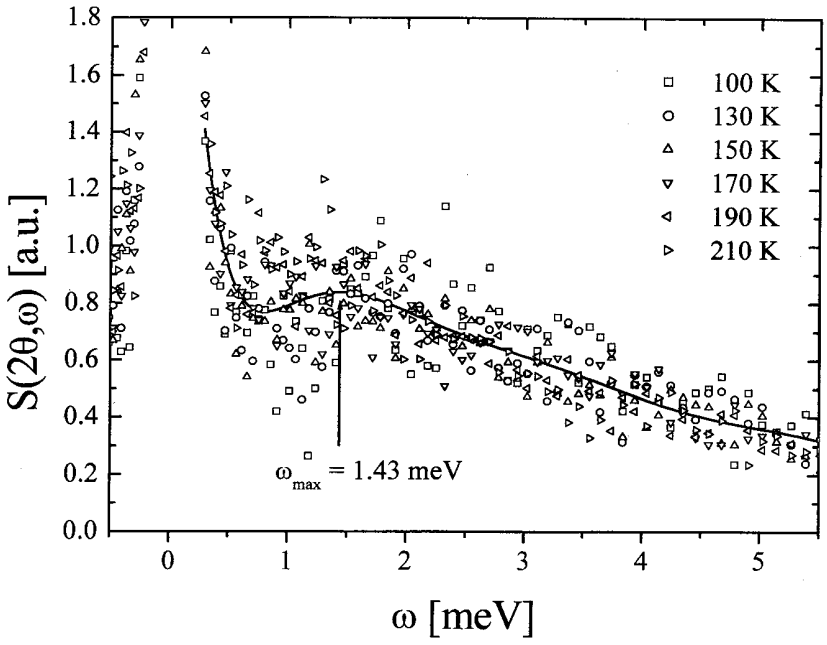


Fig. 2. «Bose scaling» of neutron scattering data obtained at IFE (Norway)

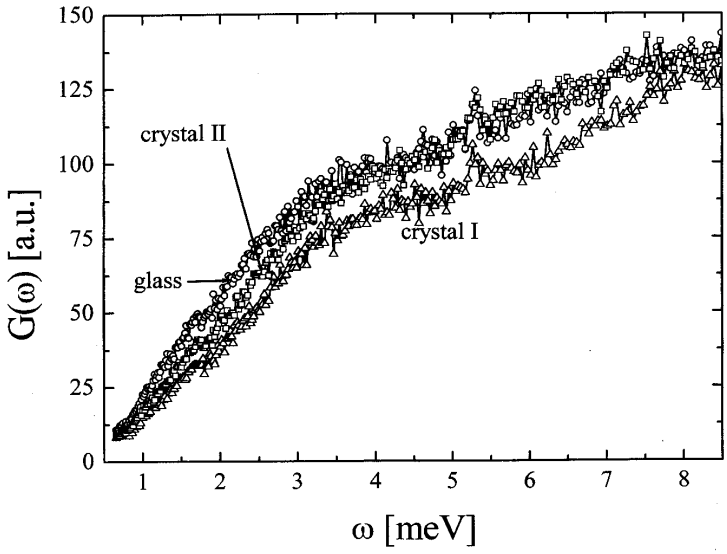


Fig. 3. Low energy parts of the density of states for glass and two solid phases. JINR (Dubna)

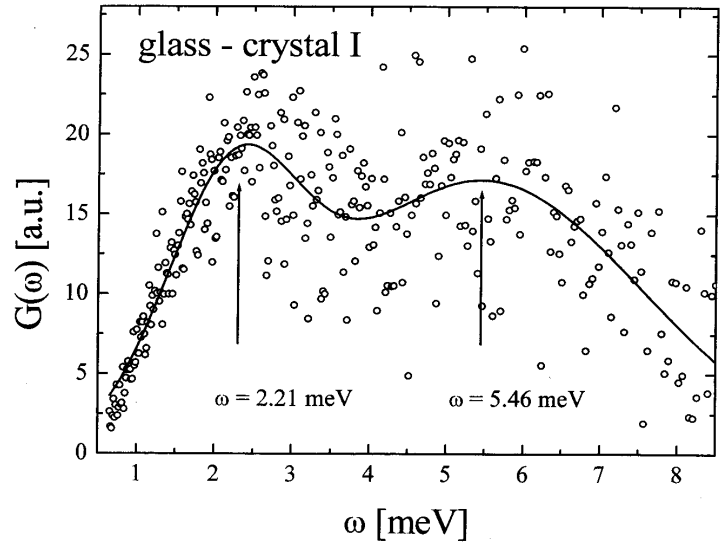


Fig. 4. Difference between densities of states for glass and crystal I. JINR (Dubna)

Reference

1. *Mayer J. et al.* // Submitted to «Physica B».

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON ACCELERATOR-DRIVEN SYSTEMS FOR TRANSMUTATION OF NUCLEAR WASTE (Cooperation JINR, Dubna–UMM, Cracow)

S.Taczanowski

University of Mining & Metallurgy, Faculty
of Physics and Nuclear Techniques, Cracow, Poland

Introduction

The title of the present contribution to the round table «Poland in JINR» is at the same time the title and thus the subject of the cooperation agreement between the JINR, Dubna and the University of Mining & Metallurgy (UMM), Cracow. More precisely, the Department of Energy Problems at the Faculty of Physics and Nuclear Techniques of UMM is the group carrying out the respective studies. This direction of research deserves a still stronger support whereas simultaneously some misinterpretations regarding it can be felt, thus giving rise to a need of some clarification. The content of the paper tries to meet these demands, while providing a comprehensive substantiation and explanation of the research in question.

Premises of the Research Subject

The global inventory of civilian spent nuclear fuel (including the reprocessed fraction) amounts to over 200 000 tn [1] that contain nearly 4 000 tn of fissile nuclides. The amount of actinide waste of military origin (mainly either depleted or weakly burned-up uranium from dedicated reactors supplying weapons-grade Pu) may even triple this quantity [2]. Here, the energy content of actinides (200 MeV/1 atom) equal to a striking number of $2 \cdot 10^{22}$ J contained in the global (civilian only) inventory. This quantity is equal to the consumption of energy (at present rate) in all forms by the whole humankind during 50 years. To bury such enormous amount of energy would be really deplorable. Much more rational and responsible in regard to present and future generations is to work out a technology that will assure safe utilization of this waste.

Simultaneously, it should be reminded that only fissioning is a definitive way of getting rid of radiotoxic actinides, since the fission products are stable (major part) whereas the rest in general — much shorter lived. Thus, the transmutation (or incineration) of spent nuclear fuel is **inseparable** from energy release, at the rate $\approx$ 1 tn/2500 MW_t yr. These numbers show the scale of the problem and the size of needed devices.

In addition one may hope that a possibility of definitive destruction of nuclear waste may positively influence the public attitude towards nuclear energy thus adding an important social value to this research.

Explanations

In connection with this subject of studies a series of questions may appear. This form of questions and answers will be maintained.

How is the actinide waste generated?

The answer is given in Fig. 1.

It is worth to notice that in result of neutron absorptions, parallel to fissioning some nuclides are transmuted into heavier Minor Actinides (MA), namely into highly radiotoxic transplutonics Am and Cm. Therefore, a completely closed fuel cycle, i.e., permanent recycling, is a very difficult task.

What does a transmutation system consist of?

The main parts of such a system are sketched in Fig. 2.

It can be noticed that a complete transmutation system in addition to accelerator in general requires the fundamental units of power production (subcritical assembly) and of the fuel cycle (radiochemical reprocessing).

Why is a subcritical system needed?

Let us assume the proton beam: 10 mA, 1 GeV 10 mA $\rightarrow \sim 6 \cdot 10^{16}$ p/s $\rightarrow \sim 2 \cdot 10^{24}$ p/a $\Rightarrow \sim 0.8$ kg/a*(fissions/proton). In view of the needs of actinide destruction expressed in thousands of tonnes, the effect of beam alone is absolutely insufficient and a necessity of utilization not only of secondary or tertiary processes, but also of a whole multiplication chain arises.

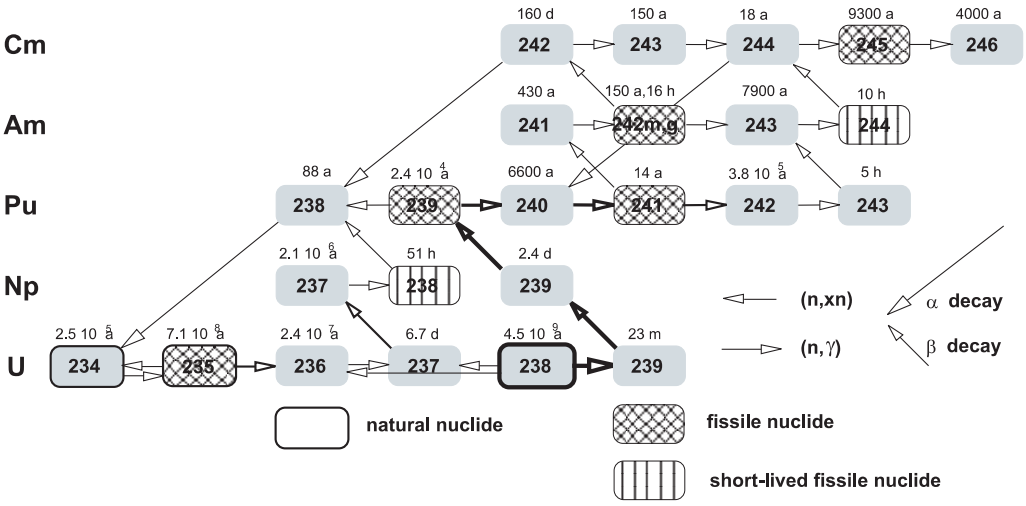


Fig. 1. Main trajectories of nuclear transformations in the U-Pu nuclear fuel cycle

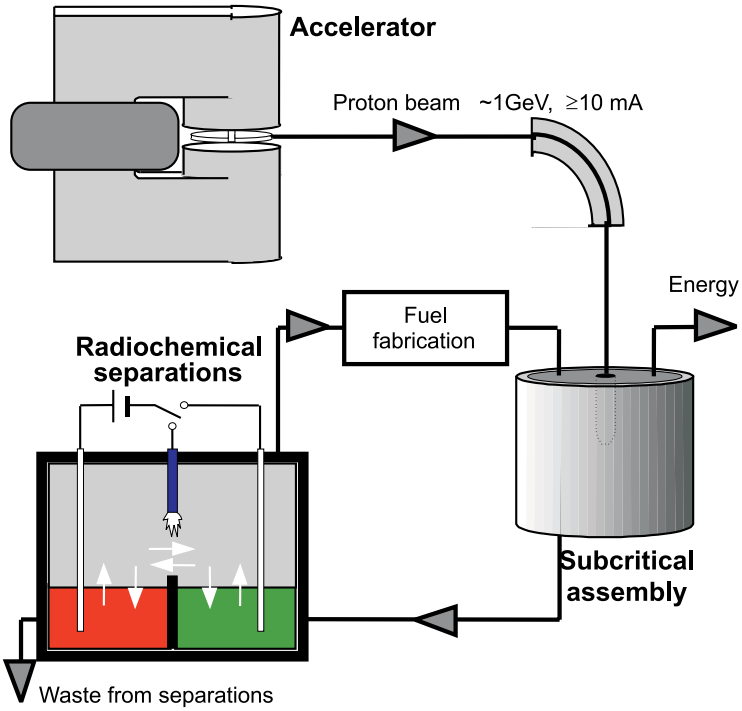


Fig.2. A basic scheme of accelerator-driven system for transmutations

Thus, why is it prefered not to incinerate the waste simply in a critical system?

Subcritical systems have the advantage of operating in conditions farther (than critical systems) from superprompt criticality, which is the state inadmissible in any power reactors. This distance signifies a larger safety margin, thus hopefully making subcritical systems easier accepted by the public.

Why must the respective research be performed in Dubna?

The reasons can be listed as follows:

- The idea of experiment was born in Dubna.
- The key device — the accelerator — is available (the Phasotron 660 MeV).
- Competent staff .
- Subcritical assembly can be built soon.
- Meantime, experiments on bare targets are carried out.

Why is it necessary to do it right now?

The present circumstances are unique. No experiments on such subcritical devices at the kW scale have been performed yet. But very competitive projects have already begun (see the Table).

Examples of accelerator-driven transmutation related research projects

Name	Country	Period	Budget	Power	Prot. energy
AAA	USA	2000–2010	68M$/FY01*	20–100 MW	~600 MeV
MYRRHA	Belgium	1997–2008	100M€	10–20 MW	350 MeV
JAERI + KEK	Japan	1999–2020	$9 \cdot 10^{10}$ Y*	2–5 MW(b)	600 MeV
TRASCO	Italy	2000–?	n.a.	80 MW	600 MeV
MEGAPIE	EU + CH	1999–2006	n.a.	2 MW(b)	590 MeV

*Scope of the project is much larger.

The content of the Table indicating the scale of other projects signifies that the time is rather urgent if the experiment in Dubna has to maintain its great value.

Why is it necessary to cooperate just with the Polish partners?

- Computing facilities and codes are available at Cracow.
- Experience in respective calculations and experiments.
- Th-Pb assembly at Cracow for testing low energy neutronic codes and data.
- Cracow team participates in the 5th FP of the EU.
- The subject enjoys a support of Polish authorities.

The experience in respective calculations is shown below by a sample of calculations, whereas the measurements performed up to now are presented in an accompanied paper [3]. First, however, is shown a sketch of subcritical assembly proposed earlier (Fig.3).

The results of neutron transport calculations of this SAD model (Fig. 4) performed with the MCNP code are shown in Fig. 5.

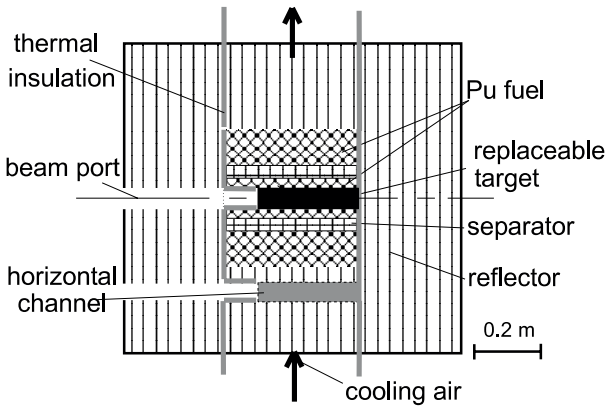


Fig. 3. A sketch of the subcritical assembly

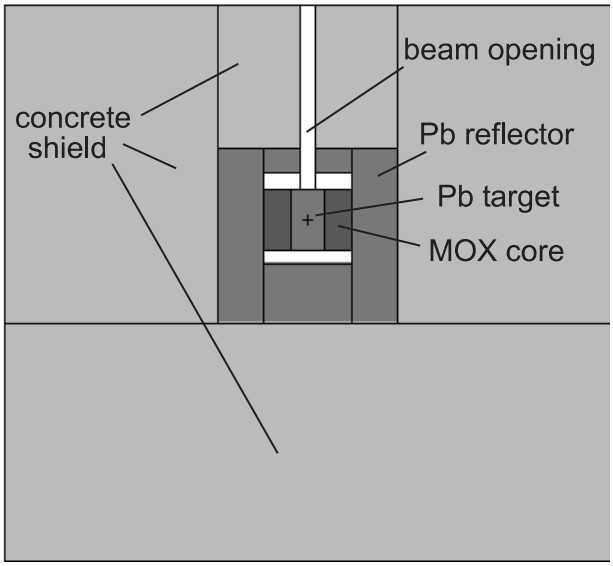


Fig. 4. Simplified calculation model of Subcritical Assembly in Dubna (SAD)

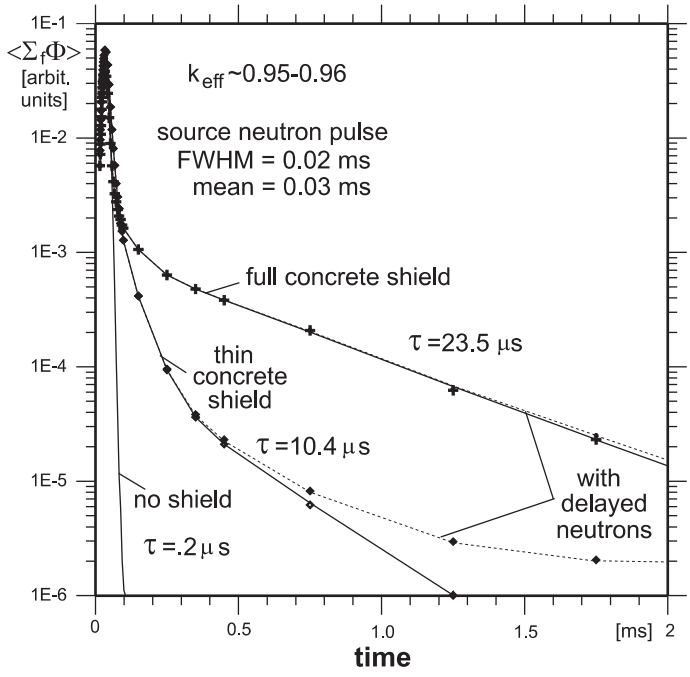


Fig. 5. Distribution of fissioning in subcritical assembly vs. time

The picture in Fig. 5 illustrates the importance of the shield for small assemblies. Its influence manifests itself by means of the neutron lifetime in the system strictly dependent on the properties of the shield. Moreover, it affects the possibilities and conditions of planned measurements of the system parameters on the basis of the slope of neutron pulse decay. The delayed neutrons in certain cases can hinder it effectively (both curves with lower values of τ).

The programme of planned research is to be only sketched here.

Research Programme

Its fundamental premise is the known truth that: *The reliability and accuracy of information a future industrial design is to be based upon must be perfect.* It is the responsibility the financial engagement draws behind that makes the requirements so high. Thus the general objective of the research is a comparison of the theory with the experiment, namely:

- Validation of computation tools — codes and nuclear data related to accelerator-driven subcritical systems, in particular:

— Nuclide production & energy release (the above items seem to be most important, there is still lack of nuclear data in the energy range 20–650 MeV; thus experiment includes, e.g., measurements of the hadron, i.e., mainly neutron distributions and spectra);

— Shielding (first of all against high energy neutrons);

— Neutronics of subcritical systems.

References

1. *Braet J. et al.* Perspectives on the Use of Civil Plutonium. // Transactions of American Nuclear Society. 1998. V.78. P.57-58;
   Briesmeister J.F. MCNP — A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code. LANL report LA-12625-M, Version 4B (March 1997).
2. *Baumgartel G. et al.* Brennstoff aus der Asche. Verlag Girardet, 1984.
3. *Janczyszyn J. et al.* Experimental Validation of Calculations of Radionuclide Production in Vicinity of a Spallation Neutron Source // Proc. of the round table — «Poland in JINR». Dubna, Jan. 2001 (in press).
   Taczanowski S., Janczyszyn J. Experimental Testing of Accelerator-Driven System for Nonproliferating Transmutation of Radwaste and W-Pu. // On the Selected Problems of Accelerator-Driven Systems for Transmutation / Ed. S.Taczanowski. Fac. Phys. & Nucl. Tech., Univ. Min.& Metal. Cracow, 1999.

EXPERIMENTAL VALIDATION OF CALCULATIONS OF RADIONUCLIDE PRODUCTION IN THE VICINITY OF A SPALLATION NEUTRON SOURCE

J.Janczyszyn, W.Pohorecki, S.Taczanowski, V.Shvetsov[1], G.Gerbish[1], G.Domanska

University of Mining and Metallurgy, Faculty of Physics
and Nuclear Techniques, Cracow, Poland,
[1]Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR

1. Introduction

Plentiful and multidirectional research conducted to alleviate public reservations towards nuclear power has brought, among others, a revival of systems consisting of a subcritical multiplying core linked to an accelerator driven spallation neutron source, the so-called Accelerator Driven Systems (ADS). The proposed options of such systems, in principle, can radically reduce the probability of uncontrolled supercriticality, minimize the threat to people's life and health in case of serious system failures, and limit the amount of waste from the nuclear power industry as a whole. It can also allow for most efficient use of the energy contained in nuclear fuels (U and Th). Very important feature of ADS is its capacity to effectively burn Pu with simultaneous production of electricity [1, 2].

Majority of ADS projects consists of: a proton accelerator (~ 1 GeV, 10–100 mA), heavy metal target (i.e., W, Pb, Pb-Bi) for the production of neutrons [3] and a blanket surrounding the target, containing fissile (^{235}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu), breeding (^{238}U, ^{232}Th), and waste (transuranic nuclides: ^{237}Np, ^{240}Pu, ^{242}Pu, ^{241}Am and others) materials, the last to be destroyed by fissioning. Moreover, a radiochemical factory is included to complete the fuel cycle, which is necessary for separation of fission products, breeding material, unused fissiles and wastes, for further transmutations.

The designing of ADS systems needs numerous precise neutron transport calculations. The existing codes and data bases applied in this calculations should be verified experimentally and improved to warrant credible results. Necessarily such experimental verification must be done on a small scale compared to the real nuclear power system. The below presented experiment is thought as a part of such verification, especially for the calculation of construction materials transmutation and induced radioactivity. It is carried on within the frame of a larger project called SAD (from Subcritical Assembly in Dubna) [4]. In this report are presented some of the results

obtained during the first experimental session of the SAD project, which took place on June 22–26, 2000. The plan of these measurements was as follows:

1. Irradiate single element samples of Mg, Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Nb, W, Bi, Pb mainly with protons; this was realized by placing samples directly in the proton beam, in front of the target.

2. Irradiate samples of the above-mentioned elements with neutrons by placing them in the neutron field behind the target.

3. Measure gamma spectra of irradiated samples with the use of semiconductor detectors.

4. Analyze the spectra to identify produced radionuclides and determine their specific activities.

5. Compare these activities with respective values obtained from calculations with the use of LAHET and MCNP codes.

2. Experimental Conditions

The experimental installation for conducting the experiment included:

— 660 MeV proton accelerator called the Phasotrone,

— beam transport channel,

— heavy metallic target (Pb),

— protective, control and supervising systems,

— two types of HPGe gamma spectrometers: a bulk one for energy range 100 keV–3 MeV and a LEPS for energy range 20–100 keV.

The most important parameters of JINR Phasotron from the point of view of the present experiment are the following:

— the maximum beam power 2.1 kW

— the maximum proton energy 659 ± 0.6 MeV

— proton energy dispersion 3.1 ± 0.8 MeV

— intensity of the extracted proton beam: $3.2\ \mu$A ($2 \cdot 10^{13}$ protons/s).

Values of the parameters applied in the presented experiment were:

— proton energy 650 ± 4 MeV

— max. proton yield $I_{p,max} = 3 \cdot 10^{10}$ p/s

— irradiation time t_i = 10 m – 3 h

— min. decay time $t_{d,\,min}$ = 2 h.

The target for producing spallation neutrons was made of natural lead and consisted of four cylindrical parts (Fig. 1), 82 mm in diameter, coated on the side with 1.5 mm thick stainless steel layer. The total outside diameter was 85 mm.

Samples and individual Al monitors were mounted in a special sample holder suitable for fitting either to the front or to the end of the target. The holder with samples is presented on Fig. 2.

Irradiated samples were counted in a typical counting geometry (see Fig. 3). Since the induced activities were rather small, in most of cases samples were placed for counting directly on the detector surface. Only in few cases they were placed 5 cm above it.

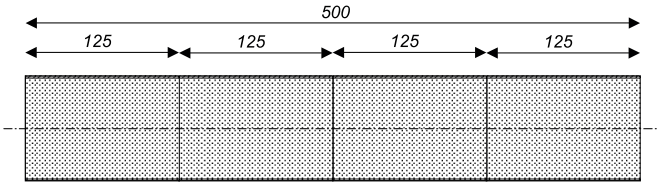


Fig. 1. The spallation Pb target used in the first experimental session of the SAD project

Fig. 2. The polyethylene sample holder with mounted samples (numbered). Behind each sample is placed an individual Al monitor

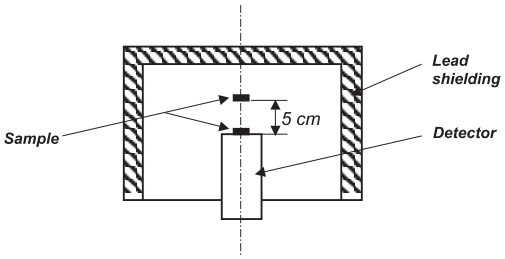


Fig. 3. The typical counting geometry applied. The samples were placed either directly on the detector surface or 5 cm above it

3. Measurements and Results of Monitoring

Four sets of samples were irradiated. In each case slightly different geometry was applied, as can be seen in Fig. 4. The characteristic of each irradiation is given in Table 1.

Table 1. **Irradiation conditions applied in the experiment**

Irradiation number	Target	Sample holder position/ irradiation time	Integral number of protons	Irradiated samples
1	Dummy*	Front / 12 m	$1.96 \cdot 10^{13}$	Al, Fe, Cu, Nb, Pb
2	Pb	Front & back / 21 m	$2.20 \cdot 10^{13}$	Mg, Cr, Mn, Ta, W (front) Bi (back)
3	Pb	Back / 277 m	$3.85 \cdot 10^{13}$	Mg, Al, Cr, Mn, Fe, Cu, Nb, Ta, W, Pb
4	Pb	Front / 75 m	$1.45 \cdot 10^{13}$	Ni, Bi

* Tube made of duralumin Φ70/80, L500

Aluminium monitors were applied for the sake of monitoring the absolute number of protons and/or neutrons, both for the whole beam and for each irradiated sample. For protons the use was made of $^{27}Al(p, x)^{22}Na$ and $^{27}Al(p, x)^{24}Na$ reactions. Circular monitors 85 mm in diameter for monitoring the whole beam were made of Al foil (8.41 mg/cm^2). They were used in all irradiations, except of the first, either in front of the target or behind it. Individual monitors for samples were made of 0.5 mm thick Al sheet and had the same shape as respective samples (either square 1×1 cm^2 or circle 1.8 cm in diameter). During irradiation also a proton counter was applied for monitoring integral proton number in the beam, over the whole irradiation time. This counter was calibrated using carbon monitors and cross section of the reaction $^{12}C(p, x)^{11}C$.

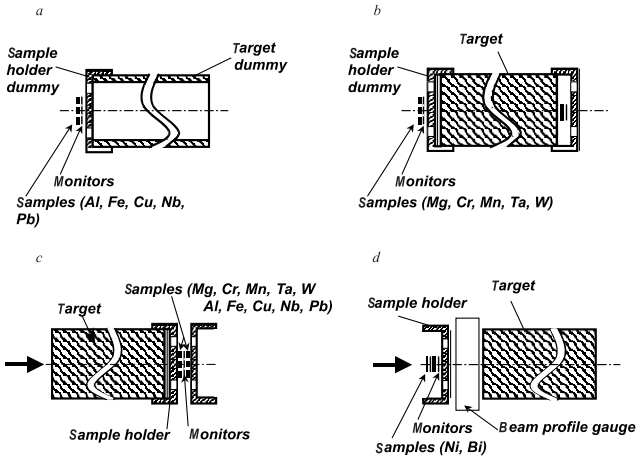
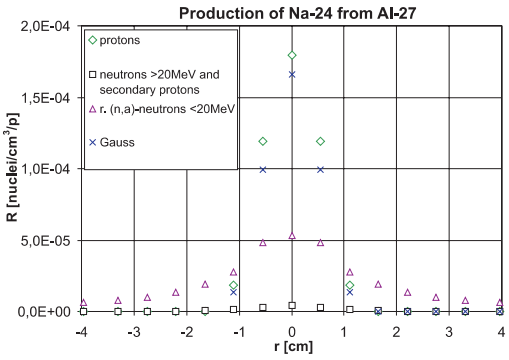


Fig. 4 Diagrams of different irradiation settings applied



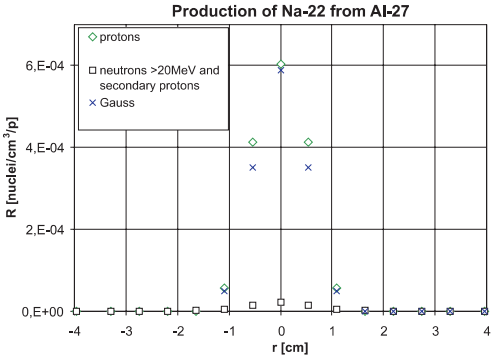


Fig. 5. Calculated radial distributions of proton and neutron production of ^{22}Na and ^{24}Na in front of the lead target at the distance of 5 mm from its surface. Assumed two-dimensional Gaussian distribution (shown) of protons in the beam, with σ = 4.24 mm

Application of the reaction leading to ^{22}Na seems to be straightforward because the thresholds of neutron induced reactions leading to the same nuclide, i.e., ^{27}Al(*n, x*)^{22}Na, are too high (> 23.4 MeV) for most of the neutrons crossing samples and monitors in front of the target. Nevertheless, a correction for secondary particles (among them > 20 MeV neutrons) ranging from 0.922 to 0.965, calculated with the LAHET code, has been introduced. The situation in case of ^{24}Na is different, since it can be efficiently produced by neutrons with energies above 7 MeV (the ^{27}Al(n, α)^{24}Na reaction theoretical threshold is 3.25 MeV), which are numerous in the target surrounding. In order to be able to use this nuclide for monitoring both neutrons and protons, the ratio of respective production yields was calculated for each monitor with the use of LAHET and MCNP-B codes (Fig. 5). Results of the whole beam monitoring are presented in Table 2.

Table 2. **Results of absolute beam monitoring**

Irradiation No.	Number of protons [10^{13} p]			
	Proton counter	Al foil ^{22}Na activity		Al foil ^{24}Na activity
		Reaction cross section [5]	LAHET simulation	Reaction cross section [5,6] + computer simulation*
1	1.96	—	—	—
2	2.20	2.12 ± 0.24	2.16 ± 0.24	2.00 ± 0.08
3	3.85	—	—	—
4	1.45	1.93 ± 0.41	1.90 ± 0.40	1.06 ± 0.03

* LAHET and MCNP-B calculation of the ^{22}Na and ^{24}Na secondary particles and proton production ratio

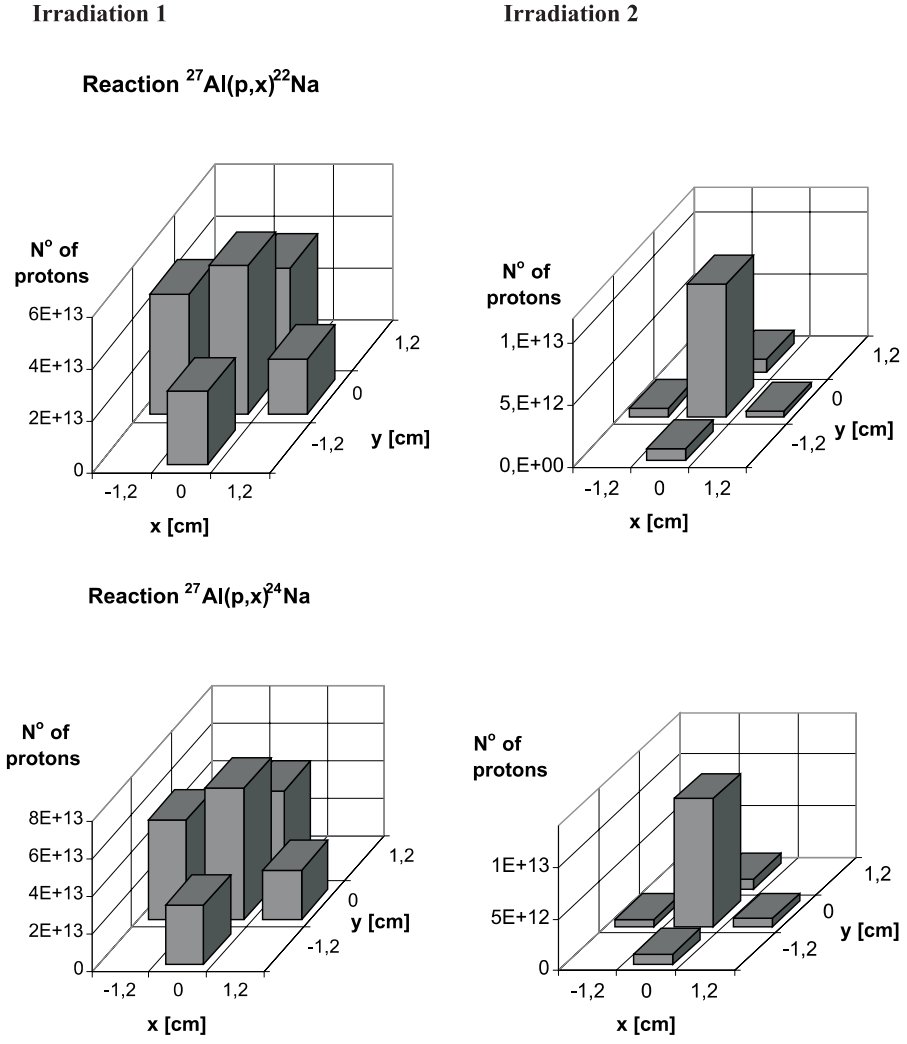


Fig. 6. Proton beam distribution at the target front surface from Al monitors

The knowledge of proton beam distribution at the target front surface is very important for the determination of the number of protons irradiating each individual sample. From measurements done with the use of TLD matrix [7] it was found that this distribution has the shape near to a two-dimensional Gauss-surface. However, not exactly symmetric, since the beam spread in *x* and *y* directions is slightly different and

according to evaluations the standard deviations amount to: $\sigma_x = 4.0$ mm and $\sigma_y = 4.3$ mm.

A very rough approximation of the distribution could be obtained from the ^{22}Na and ^{24}Na activity of individual Al monitors. Such distributions are presented in Fig. 6. From these results one can observe that the beam spread is not stable and the differences between irradiations are considerable.

The situation is similar in case of the measurements made with the use of beam

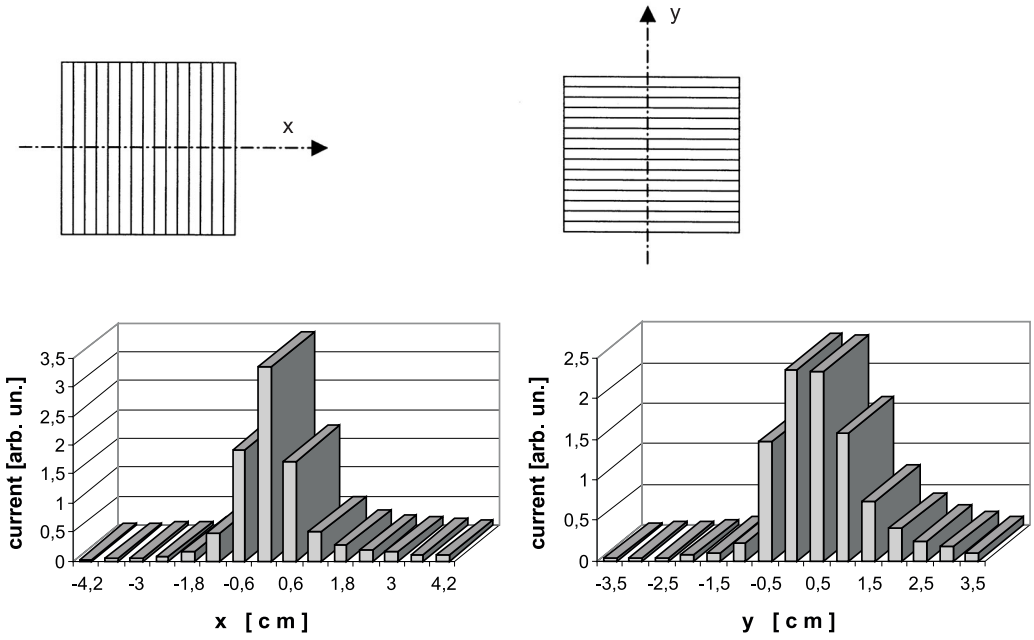


Fig. 7. Lateral distributions of the beam measured with strips of the profile gauge

profile gauge. The gauge is made of two layers of conducting strips 5 and 6 mm wide and 7–8 cm long, arranged perpendicularly. The obtained results are presented in Fig 7.

4. Qualitative Results

After the irradiation, gamma spectra of the irradiated samples were collected several times with the use of semiconductor HPGe detectors. The spectra were analysed and many radionuclides were identified (see Table 3). However, the results shown in Table 3

are not yet complete because of two reasons: measurements are not finished yet and not all of the collected spectra have been analysed.

Table 3. **Nuclides identified in samples irradiated in front of the Pb target**

Irradiated element	Nuclides ($T_{1/2}$)
Mg	^{22}Na(2.0602y), ^{24}Na(15.02h)
Al	^{7}Be(53.29 d), ^{22}Na, ^{24}Na
Cr	^{24}Na, ^{38}Cl(37.24m), ^{39}Cl(55.6m), ^{41}Ar(1.827h), ^{42}K(12.36h), ^{43}K(22.3h), ^{43}Sc(3.891h), ^{44}Sc(3.927h), ^{44m}Sc(58.6h), ^{46}Sc(83.79d), ^{47}Sc(3.349d), ^{48}Sc(43.7h), ^{48}V(15.97d), ^{48}Cr(21.56h), ^{49}Cr(42.09m), ^{51}Cr(27.7d), ^{52}Mn(5.591d)
Mn	^{24}Na, ^{41}Ar, ^{42}K, ^{43}K, ^{43}Sc, $^{44+44m}$Sc, ^{46}Sc, ^{47}Sc, ^{48}Sc, ^{48}V, ^{48}Cr, ^{49}Cr, ^{51}Cr, $^{52+52m}$Mn, ^{54}Mn(312.3d), ^{56}Mn(2.578h), ^{52}Fe(8.275h)
Fe	^{24}Na, ^{34m}Cl(32.00m), ^{38}S(2.84h)?, ^{38}Cl, ^{39}Cl, ^{41}Ar, ^{42}K, ^{43}K, ^{43}Sc, $^{44+44m}$Sc, ^{46}Sc, ^{47}Sc, ^{48}Sc, ^{48}V, ^{48}Cr, ^{49}Cr, ^{51}Cr, $^{52+52m}$Mn, ^{52}Fe, ^{54}Mn, ^{55}Co(17.53h)?, ^{56}Mn, ^{56}Co(77.27d)
Ni	^{24}Na, ^{38}Cl, ^{41}Ar, ^{42}K, ^{43}K, ^{43}Sc, $^{44+44m}$Sc, ^{46}Sc, ^{47}Sc, ^{48}Sc, ^{48}V, ^{51}Cr, ^{52}Mn, ^{52}Fe, ^{54}Mn, ^{55}Co, ^{56}Mn, ^{56}Co, ^{57}Ni(36.08h), ^{58}Co(70.916d)?, ^{61}Cu(3.408h)
Cu	^{24}Na, ^{38}Cl, ^{39}Cl, ^{41}Ar, ^{42}K, ^{43}K, ^{43}Sc, $^{44+44m}$Sc, ^{46}Sc, ^{47}Sc, ^{48}Sc, ^{48}V, ^{48}Cr, ^{49}Cr, ^{51}Cr, $^{52+52m}$Mn, ^{52}Fe, ^{55}Co, ^{56}Mn, ^{56}Co, ^{57}Co(270.9d), ^{57}Ni, ^{58}Co, ^{60}Cu(23.2m), ^{61}Cu, ^{62Z}n(9.26h), ^{64}Cu(12.70h), ^{65}Ni(2.520h)
Nb	^{67}Ga(3.261d), ^{71}As(62h), ^{72}Zn(46.5h), ^{73}Se(7.15h), ^{74}As(17.78d), ^{74}mBr(41.5m), ^{75}Se(119.77d), ^{75}Br(97m), ^{76}As(1.0778d), ^{76}Br(16.2h), ^{77}Br(57.04h), ^{77}Kr(74.4m), ^{79}Kr(35.04h), ^{81}Rb(4.58h), ^{82}Br(35.30h), ^{85m}Kr(4.480h), ^{85m}Sr(67.66m), ^{82m}Rb(6.2h), ^{83}Rb(86.2d), ^{83}Sr(32.41h), ^{84}Rb(32.87d), ^{84m}Y(39.5m), ^{85}Y(2.68h), ^{85m}Y(4.86h), ^{86}Rb(18.63d), ^{86}Y(14.74h), ^{86m}Y(48m), ^{86}Zr(16.5h), ^{87m}Sr(2.81h), ^{87}Y(80.3h), ^{87}mY(12.9h), ^{87}Zr(1.73h), ^{88}Y(106.64d), ^{88}Zr(83.4d), ^{89m}Y(16.06s), ^{89}Zr(78.41h), ^{89}Nb(1.9h), ^{89m}Nb(1.18h), ^{90m}Y(3.19h), ^{90}Nb(14.60h), ^{90}Mo(5.67h)
Ta	^{146}Eu(4.61d), ^{146}Gd(48.3d), ^{151}Gd(120d), ^{151}Tb(17.6h), ^{154}Tb(22.7h), ^{155}Dy(9.9h), ^{160m}Ho(5h), ^{161}Er(3.21h), ^{163}Tm(1.81h), ^{164}Yb(75.8m), ^{165}Tm(30.1h), ^{166}Tm(7.7h), ^{169}Lu(1.42d), ^{169}Yb(32d), ^{170}Hf(16.0h), ^{170}Lu(2.0d), ^{171}Hf(12.1h), ^{171}Lu(8.24d), ^{172}Lu(6.7d), ^{173}Hf(23.6h), ^{173}Lu(1.37y)?, ^{175}Ta(10.5h), ^{175}Hf(70d), ^{176}Ta(8.1h), ^{178m}Ta(2.36h), ^{178m}2Hf(31y), ^{182}Ta(114.43d)
W	^{110}Ag(249.79d), ^{121m}Te(154d), ^{139}Ce(137.64d), ^{149}Tb(4.13h), ^{151}Tb, ^{152}Tb(17.5h), ^{153}Tb(2.34d), ^{153}Dy(6.29h), ^{158}Ho(11.3m), ^{158}Er(2.25h), ^{160m}Ho, ^{161}Er, ^{163}Tm, ^{165}Tm, ^{166}Tm, ^{169}Lu, ^{170}Lu, ^{170}Hf, ^{171}Hf, ^{171}Lu, ^{173}Hf, ^{175}Ta, ^{176}Ta, ^{177}Lu(6.71d), ^{177m}Lu(160.9d), ^{177}Ta(56.6h), ^{178m}2Hf, ^{177}W(135m), ^{178}Ta(9.31m), ^{178m}Ta, ^{178m2}Hf, ^{184}Ta(8.7h)

Pb	^{75}Se(119.77d), ^{83}Rb(86.2d), ^{85}Sr(64.84d), ^{86}Rb, ^{88}Y(106.64d), ^{95}Nb(34.97d), ^{95}Zr(64.02d), ^{102m}Rh(2.9y), ^{103}Ru(39.35d), ^{121}Te(16.78d), ^{171}Lu, ^{172}Lu, ^{173}Lu(1.37y), ^{175}Hf, ^{182}Ta, ^{183}Re(70.0d), ^{185}Os(94d), ^{188}Pt(10.2d), ^{188}Ir(41.5h), ^{189}Ir(13.3d), ^{195}Au(183d), ^{202}Tl(12.23d), ^{203}Hg(46.60d), ^{203}Pb(51.88h), ^{205}Bi(15.31d), ^{206}Bi(6.24d)
Bi	^{182}Ta, ^{194}Au(39.5h), ^{203}Hg(46.60d), ^{203}Pb, ^{205}Bi(15.31d)?, ^{206}Po(8.8d)?, ^{206}Bi(6.243d)

5. Example of Quantitative Results

For the first quantitative analysis a series of nuclides with atomic number A = 175 detected in the irradiated Ta sample (99.988 % of ^{181}Ta) was selected (Table 4).

Table 4. **Chain of nuclides generated in Ta sample**

Lp	Isotope	$T_{1/2}$	Decay	Nuclide production in sample per one proton (calculated by LAHET)
1	^{175}Re	4.6 m	β^+	5E-7 ± 100%
2	^{175}W	34 m	β^+	2.6E-5 ± 14%
3	^{175}Ta	10.5 h	β^+	1.4E-4± 6%
4	^{175}Hf	70 d	β^+	7.2E-5± 8%
5	^{175}Lu	—	stable	2.4E-5± 14%

These nuclides could be produced from Ta not only in proton induced reactions but also in the neutron ones, the last for neutron energies exceeding 20 MeV. Therefore it was assumed that their production (per proton) can be properly calculated with the LAHET code, without the following use of the MCNP code. The values obtained from LAHET, multiplied by proton current crossing the Ta sample during irradiation, yielded the respective reaction rates. It was assumed that these rates were constant during the irradiation. Using these rates the growth of activity during proton exposure (equations (1)) and its further evolution after the end of irradiation (equations (2)) were calculated numerically.

$$
\begin{aligned}
N_1(t) &= N_1(t-\Delta t)\cdot(1-\lambda_1) + c_1 \cdot \Delta t, \\
N_i(t) &= N_i(t-\Delta t)\cdot(1-\lambda i) + c_i \cdot \Delta t + N_{i-1}(t-\Delta t)\cdot\lambda_{i-1}, \\
N_{\text{stab}}(t) &= N_{\text{stab}}(t-\Delta t) + c_{\text{stab}} \cdot \Delta t + N_{\text{stab}-1}(t-\Delta t)\cdot\lambda_{\text{stab}-1}.
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

$$
\begin{aligned}
N_1(t) &= N_1(t-\Delta t)\cdot(1-\lambda_1), \\
N_i(t) &= N_i(t-\Delta t)\cdot(1-\lambda i) + N_{i-1}(t-\Delta t)\cdot\lambda_{i-1}, \\
N_{\text{stab}}(t) &= N_{\text{stab}}(t-\Delta t) + N_{\text{stab}-1}(t-\Delta t)\cdot\lambda_{\text{stab}-1},
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

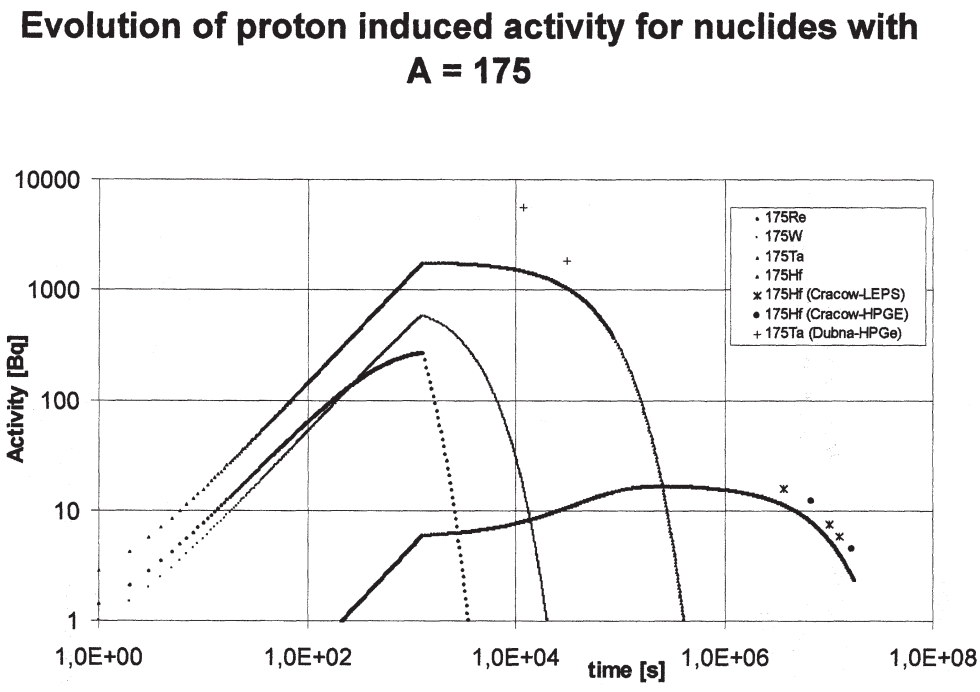


Fig. 8. Curves presenting calculated evolution of activity of A=175 isotopes in Ta sample irradiated in front of the Pb target and respective results of experiment

where: N — number of nuclei in sample, c — production rate per proton, λ — decay constant, Δt — time step equal to 1ms for exposure time and 1s after the end of irradiation.

Results of these calculations are presented in Fig. 8 together with experimentally obtained activities.

6. Conclusions

1. Activities generated in the samples irradiated in front of the target are significant, even for small samples.

2. Behind the target the activities are 3 orders of magnitude lower and too small for a reliable measurement. It is necessary to use shorter targets to obtain there a sufficient neutron flux.

3. It is important to have a reliable evaluation of the number of protons crossing each sample (individual monitors, known beam shape).

4. Aluminium monitors have some drawbacks (low activity of ^{22}Na, production of ^{24}Na also by neutrons). In future experiments also other monitors should be used, e.g., carbon ones.

Acknowledgements

The presented work has been partially funded by the Polish State Committee for Scientific Research.

References

1. *Jensen R.J. et al.* Proc. of Global-93 Intern. Conf. and Technology Exhibition «Accelerated-Based Conversion (ABC) of Reactor and Weapon Plutonium». The American Nuclear Society. Seattle, Washington, Sept. 12–17, 1993.
2. *Rubbia C. et al.* A Realistic Plutonium Elimination Scheme with Fast Energy Amplifiers and Thorium-Plutonium Fuel. CERN/AT/95-53(ET), 1995.
3. *Hussein M.O.* Nuclear Spallation Reaction — an Intensive Source of Neutrons. // Nukleonika. 1996. V.41. No 1. P.11–20.
4. *Shvetsov V.* Project SAD. 1999. (in Russian).
5. *Tadeucci T.N. et al.* // Phys. Rev. C. 1997. V.55. P.1551.
6. *Aleksandrov Yu.V. et al*. Conf. Moscow. 1996. P.223.
7. *Shvetsov V.* Private commun. 2000.

TECHNICAL AND RESEARCH ACTIVITY ASPECTS OF HIL COLLABORATION WITH THE JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

J.Kownacki

Heavy Ion Laboratory of the Warsaw University, Warsaw

1. Status of HIL and Cyclotron Operation

- General introduction,
- Basic cyclotron parameters,
- Beam characteristics,
- Statistics of operation — 1999/2000.

Several major upgrades of the facility were undertaken to improve the quality of the beam offered to the users.

The PIG ion source has been replaced by the home made ECR ion source which covers the scope of available beams from B to Kr. This task was accompanied by the construction and installation of the axial injection line. Simultaneously with the

The total beam time in the period from May 1999 to June 2000 was 1975 hours delivered to various experiments (see also Sec. 2). Altogether 14 different ion beams were accelerated during this time. Now the demand for beam time is much higher than technically achievable

external ECR ion source the new vacuum system based on cryopumps was installed what improved the beam transmission. Another major undertaking was the improvement of the electric structure eliminating most of the discharges as well as the installation of the new, more flexible centre of the machine. The new power amplifiers for the RF generator system were also installed. In parallel the changes in the cooling of the dees and the pressurized air systems were implemented, the latter allowing for the remote control of the state of the vacuum valves throughout the beamlines. In the continued effort to build up home made stock of typical NIM modules, an octal fast discriminator, a 32 channel Multiplexer and a few others were designed and tested to fulfill mainly requirements of GDR, COULEX,OSIRIS and IGISOL experiments. After all those modifications and improvements, the regular running of the K=160 U-200P cyclotron has started in April 1999 and its operation was continued until now with relatively high reliability.

2. Machine and Technical Studies

- Beam transmission,
- Buncher development,
- New ECR operating at 10 GHz and 20 kV producing ions from solid materials with relatively high charge distributions.

3. Selected On-Line Experiments

Nuclear structure far from stability. IGISOL and He-jet systems (beam line: C1).

Aim: to test and develope an isotope separator with He-jet transport on-line. Decay studies of the short-lived Z ~ N nuclei around A ~ 40.

Equipment available:

- Magnetic Separator with He-jet transport system,
- Nuclear spectroscopy tools (HPGe's, Si-det., electronics).

Collaboration: Inst. of Exp. Phys. (Warsaw University) — coordination, GSI (Darmstadt), Univ. of Leuven, Univ. of Jyväskylä, JLL (Grenoble), Orsay, Lyon, Isolde, SINS (Świerk), HIL (UW).

Investigation of the nuclear structure at sub-barrier energies. — Coulomb Excitation (beam line: C2).

Aim: Multiple Coulomb excitation.Verification of nuclear models. Cooperation with radioactive beam projects. Experiments on electromagnetic nuclear structure, e.g., shape coexistence, octupole deformation, validity of K quantum number, etc.

Equipment available:

- 32 PIN-diode particle (CUDAC),
- HPGe's ~ 8,
- C.E. analysis code «GOSIA».

Collaboration:

HIL — coordination, Univ. of Liverpool, Univ. of Jyväskylä, Ludvig-Maxim. Univ. (Münich), Univ. of Rochester, IAERI (Tokai), Kiev, St.Petersburg, CEA (Saclay).

In-beam spectroscopy — «OSIRIS-bis» (beam line: C3).

Aim: study of poorly known (or unknown) isotopes and isomers in the vicinity of the proton drip line — in particular complementary investigation of the nuclei in the region from Ni through Sn to Gd.

Equipment available:

- 10 HPGe with ACS,
- 4-sector HPGe polarimeter,
- 50 BGO det. mult. filter,
- SiBall — 28 elements,
- electronics,
- e^--conversion transporter.

Collaboration: HIL — coordination, Inst. of Exp. Phys. (UW), KFA (Jülich), SINS (Świerk), Inst. of Nucl. Phys. (Kraków).

High energy γ-ray emission studies in heavy ion collisions at 4–12 MeV/n (GDR — «Janosik» — beam line: C4).

Aim: Investigation of the nuclear structure by the statistical Giant Dipole Resonance decay. Studies of γ-ray emission mechanisms in heavy ion reactions at 4–12 MeV. Development of the experimental set-up installed at the Warsaw cyclotron.

Equipment available:

- 25 × 29cm NaI detector with plastic LiH and Pb shields,
- multiplicity filter — 32 scint. det.: BaF2 and NaI(Tl).

Collaboration:

Inst of Exp. Phys. (UW) — coordination, HIL (UW), Inst. of Exp. Phys. (Cracow), SINS (Świerk), Chalmers Techn. Univ. (Goetenburg),Univ. Oslo.

Short time Experiments (beam lines: B, D). Tests of the detectors developements, multiple ionization, cross section measurements, etc.

Activations (beam line: A), e.g., solid state physics, material properties, laser spectroscopy

Off-line activity — selected examples

- Laser spectroscopy,
- Low background measurements,
- ECR for ion-surface interaction,
- Solid state physics applications of HI beams,
- Vacuum drying of the flooded papers — salvaging the cultural heritage using the accelerator infrastructure.

THE BOGOLIUBOV–INFELD PROGRAMME

W.Nawrocik

University of Poznan, Poland

1. General Remarks on the Bogoliubov–Infeld (B–I) Programme

The B–I Programme on scientific exchange and cooperation between Polish scientific centres and the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna, Russia, was launched in 1998 and covers two fields: theoretical physics and education.

The cooperation in theoretical physics is coordinated by Prof. Wladyslawa Nawrocka from the University of Wroclaw and Prof. Aleksandr Filippov — the head of BLTP at JINR.

The cooperation in the field of education is coordinated by Prof. Wojciech Nawrocik from Adam Mickiewicz University, Poznan and Prof. Svietlana Ivanova — the head of the University Centre at JINR in Dubna.

The financial support of the B–I Programme, similarly as of the other programmes, could start only from autumn 1998. Hitherto the cooperation of the theoreticians has been supported with USD 83000, while that in the education field with USD 52000.

2. Cooperation in the Field of Theoretical Physics

After a long period of intense cooperation between Polish theoretical physicists and the Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics at JINR in the years 1956–1980, this cooperation gradually declined. The economical and political changes in Poland and Russia, increasing possibilities of cooperation with leading research centres in Western Europe and USA, have contributed to decreasing attractiveness of the cooperation with Dubna centre. As a remedy for this situation the Bogoliubov–Infeld Programme was initiated. The main purpose of the programme was to ensure attractive conditions of cooperation for both sides. The already noted effect of the launching of the programme has been a recent increase in mutual contacts and research projects in the areas of quantum field theory, theory of atomic nucleus and theory of solid state.

After 1998, so since the launching of the programme, the number of visits has increased 3- or 4-fold. Unfortunately, there is no symmetry in the exchange, Poland is more attractive to research workers from Dubna than otherwise. This means that the scientific potential of Dubna is still underestimated by the Polish side.

In view of this situation much effort should be made to spread the comprehensive information on the possibilities and conditions of work in Dubna (annual plans of

conferences). Much attention should be directed to encourage students working towards Master's or Doctor's degrees to make use of the Dubna centre offer.

3. Cooperation in the field of education

The main objective of the cooperation in this field was encouragement of exchange of students between Polish universities and Dubna University Centre. The offer of the Dubna centre covers short-time group visits of up to 10 students for 7 days and longer, 3-month visits of individual students realizing a specific project.

The 7-day visits. The aim of such visits is to show the possibilities offered by the Dubna centre. A group of students arrive at Dubna on Friday, they stay at a hotel or at guest rooms of the Polish group, on the same day they get the pocket money and in the evening meet the representatives of the centre and are given some information on the centre. On Saturday the students are taken to Moscow and on Sunday to Sergijew Pasad. From Monday to Friday next week they visit the Institute and particular laboratories, meet graduate students and Ph.D. students, participate in lectures and talk to the students and scientific staff about specific problems of interest. On Friday they go back to Poland. Such short visits are an opportunity to recognize the offer of the Dubna centre, in particular in the areas the centre specializes in, to get acquainted with unique equipment of the centre unavailable in Poland, to break the psychological barriers of contacts with Russians and Russian students in particular and to compare development of our countries. The students do not pay for the accommodation, get a day diet of USD 8 (after taxation) and they can apply to have 50 % of the cost of travel covered.

The 3-month visits. Individual students can come for a period of 3 months once or twice a year to carry out specific programme of research within the Master's or Doctor's thesis. The students get free accommodation, a grant of USD 240 and have the cost of travel covered in the range approved by the coordinator of this part of the B–I Programme — Prof. W. Nawrocik from AMU.

Examples of cooperation within the exchange programme: A student from AMU, Poznan, after a short-time visit in a group of students came to FLNP twice for 3 months and under the supervision of Prof. Marina Frontasieva carried out the research part of his Master's thesis, within the cooperation with the Institute of Biology, Polish Academy of Sciences, Cracow.

Two students from the Faculty of Chemistry, Warsaw Technical University, came to the Dubna centre with the samples of the material they were interested in and studied the samples by the small-angle neutron scattering under the supervision of Dr Aldona Rajewska. The results were part of the Master's thesis of one of them.

In the end of May 1999, the centre in Dubna invited the vice-deans responsible for education representing some Polish universities. The meeting with the Dubna centre staff and detailed presentation of the Dubna centre offer resulted in signing a special resolution in support of the cooperation.

In this year an international school for students and Ph.D. students of medical physics is planned to take place in Dubna. The effort made so far to encourage the interest in the Dubna centre offer has increased the number of students wishing to make use of the unique opportunities offered by this centre. At present the number of such students is greater than before and a selection of students is proposed taking into regards the specializations and age of students.

A possibility of including visits to Dubna in syllabuses of Physics at our universities is considered.

4. Institute of Physics AMU – FLNP JINR Cooperation

The cooperation between the Institute of Physics, Adam Mickiewicz University and the Joint Institute for Nuclear Research dates back to 1970, when a group of AMU workers was invited to Dubna by Prof. Jerzy Janik from the Institute of Nuclear Physics in Cracow.

The cooperation was particularly intense with BLTP, FLNR and FLNP.

Since that time over 30 staff members of the Institute of Physics AMU paid long-term visits to the JINR in Dubna. Many of them used the results obtained in Dubna in the Ph.D. theses, 3 in the habilitation theses.

A result of cooperation between FLNP and the Institute of Physics AMU was publication of over 50 research reports.

Our studies at FLNP have concerned mainly the structure and dynamics of condensed phase, in particular phase transitions, by the neutron scattering method. The pulsed neutron source — the IBR-2 reactor, a number of spectrometers, great experience of the workers from the FLNP helps achieve interesting and significant results.

AMU group has been working mainly with the groups of Dr Ireneusz Natkaniec and Prof. Anatoliy Balagurov on the properties of different kind of molecular crystals — from plastic to ferroelectric crystals. Often we use high pressure as an important parameter for better explanation of the behaviour of our crystals.

In Poznan complementary studies are performed using the NMR spectrometers, dielectric spectrometers and systems for investigation of thermal properties.

Increasing use at JINR of the user system implemented in other European centres has been noted.

We wish to thank the Directorate of the Institute for the hitherto cooperation in the frame of Bogoliubov–Infeld Programme and we wish to thank the Directorate of the Frank Laboratory for long time cooperation.

ЛОДЗИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ – ОИЯИ: СОТРУДНИЧЕСТВО ФИЗИКОВ

Ю.Анджеевский

Институт физики Лодзинского университета, Польша

Сотрудничество физиков Лодзинского университета с коллегами из ОИЯИ в Дубне началось примерно в 1960 г. и продолжается до сих пор. С перспективы времени оцениваем наше сотрудничество очень положительно. Оно во многих случаях превратилось в прочную дружбу, что повлияло на его большую эффективность.

В течение этого длительного периода лодзинские физики совместно с коллегами, главным образом из Лаборатории нейтронной физики, опубликовали много работ. Их трудно сейчас перечислить, зато легко подытожить другие измеримые эффекты совместных исследований, какими являются полученные научные степени. Итак, четыре сотрудника Лодзинского университета получили научную степень доктора наук (Г.Малецкий, М.Пшитула, М.Стэмпиньский и Ю.Анджеевский), две очередные докторские диссертации находятся в подготовке. Результаты совместных исследований явились также основой защищенных 13 кандидатских диссертаций в Лодзинском университете. Все эти физики составили и составляют до сих пор стержень кафедры ядерной физики и радиационной безопасности Лодзинского университета.

Пользуясь возможностью, хочу перечислить фамилии ученых из ЛНФ, которые особенно много сделали для сотрудничества с Лодзинским университетом. Это И.М.Франк, Л.Б.Пикельнер, Ю.П.Попов, В.И.Фурман, Ю.М.Гледенов, А.Б.Попов. Стоит напомнить, что в 1975 г. степень почетного доктора Лодзинского университета получил лауреат Нобелевской премии академик И.М.Франк.

Сотрудники Лодзинского университета принимают участие во многих очень важных экспериментах на пучках нейтронов Лаборатории нейтронной физики. Надо подчеркнуть исследования:

— ядерных реакций, индуцированных резонансными нейтронами с вылетом заряженных частиц;

— магнитных моментов ядер в резонансных состояниях;

— спиновой зависимости усредненных сечений;

— несохранения четности в процессе деления, вызванного резонансными нейтронами;

— несохранения пространственной четности в ядерных реакциях, индуцированных нейтронами;

— определения спинов нейтронных резонансов по гамма-спектрам.

Как наиболее эффективную тематику надо выделить первую из вышеупомянутых, особенно исследования реакции (n,α), начатые в Дубне профессором Ю.П.Поповым. Два года тому назад мы вышли на «новый круг» в исследовании этой реакции. Оказывается, что для моделей взрывного нуклеосинтеза в так называемом *p*-процессе очень важное значение играют реакции с участием α-частиц, особенно реакции (γ,α) и (α, p). Эти реакции экспериментально определить чрезвычайно трудно или совсем невозможно. В свою очередь, теоретические сечения оценены с погрешностью, достигающей одного порядка величины, что пропорционально переносится на неопределенность расчетного процентного содержания так называемых *p*-изотопов. Данная проблема связана, главным образом, с неопределенностью оптического потенциала альфа-частица – атомное ядро в области энергии, соответствующей звездным процессам. Для лучшего определения этого потенциала нами вместе с американскими коллегами запланировано проведение серии исследований реакции (n,α) на ядрах в большом диапазоне атомных масс и для большого диапазона энергии нейтронов. Первые совместные эксперименты мы провели в Ок-Ридже, а результаты опубликовали в «Phys. Rev. C» (vol.62, 042801(R)).

Мы рассчитываем на проведение в будущем в Дубне такого рода экспериментов, очень нужных ядерной астрофизике, а также других интересных и важных экспериментов на пучке импульсного источника нейтронов ИРЕН. С этим источником связываем большие надежды на дальнейшую плодотворную работу в Дубне. Без запуска этого источника наша заинтересованность в проведении исследований в ОИЯИ сильно ограничится (это связано с нашей многолетней специализацией).

Надо подчеркнуть, что будущий спектрометр нейтронов ИРЕН является комплементарным к существующим в мире спектрометрам, таким как ORELA в Ок-Ридже, GELINA в Geel или n_TOF в ЦЕРН. Его запуск откроет возможности широкого международного сотрудничества в исследованиях взаимодействия нейтронов с ядрами.

Мы также заинтересованы в исследованиях на поляризованных пучках ИБР-2. Считаем важным развитие некоторых экспериментальных установок, например, «Поляны». Особенно интересным для моих коллег в Лодзинском университете является изучение прецессии нейтронов в широком диапазоне их энергии.

В Лодзинском университете получает образование около 30 тыс. студентов. Наша кафедра — одна из пяти кафедр Института физики.

PERSPECTIVES OF COOPERATION BETWEEN THE JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH AND THE FACULTY OF CHEMISTRY, UNIVERSITY OF WROCLAW

L.Sobczyk

Faculty of Chemistry, University of Wroclaw, Poland

The experience based on the cooperation between Polish colleagues assembled at the Faculty of Chemistry, University of Wroclaw and Dr I.Natkaniec and Dr A.Pawlukojc from the Frank Laboratory at Dubna show that the INS technique can be particularly fruitful in studies of molecular interactions reflected in low frequency vibrations.

The objects of studies were among others so-called proton sponges — derivatives of 1.8-diaminonaphthalene — showing unusual proton affinity. In a number of cases protonation leads to a cation with symmetrically located proton between the two nitrogen atoms as shown in the case of 1.8-bis(dimethylamino)–2.7-dichloronaphthalene (DMAN-Cl_2).

In the crystalline lattice, as demonstrated, the bromide anion is surrounded by H-atoms originating from dimethylamino group and naphthalene ring.

We have shown that interactions classified as weak hydrogen bonds lead to considerable changes in dynamics of cation. To visualize such changes we performed

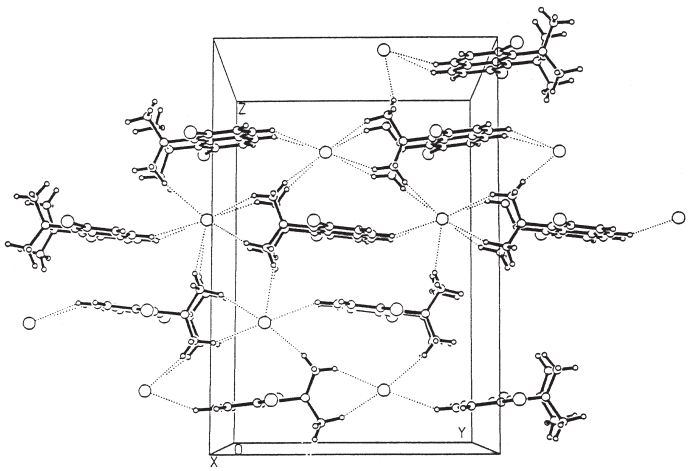


Fig 1. Structure of DMAN-Cl_2

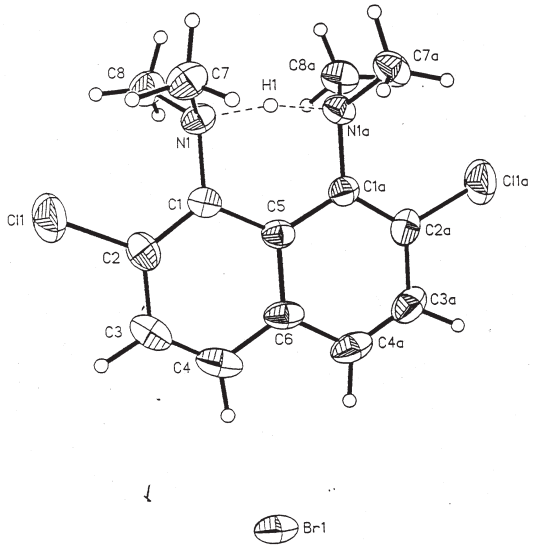


Fig 2. Structure of DMAN-Cl_2-HBr

the DFT calculations of frequencies and R and IR intensities for isolated DMAN-H^+ cation and in the presence of Cl^--ions. The analysis of data in the Table shows that: 1) substantial changes in frequencies appear in the range below 300 cm^{-1} and 2) majority of transitions are nonactive in IR and R spectra, while in INS spectra, where the selection rules do not obey, all those transitions are active because in respective vibrations participate hydrogen atoms with large amplitude.

Table of frequencies and intensities

DMAN-H^+			DMAN-H^+-Cl^-		
v	IR	R	*v*	IR	R
28	0	3	37	0	4
86	0	0	61	11	1
122	0	5	92	0	4
			93	30	0
132	0	1	102	10	0
151	12	0	143	0	1
171	5	0	160	0	0
183	0	0	178	9	1
204	1	0	183	21	0
207	0	0	192	2	0
219	0	0	221	18	4

Table (cont.)

225	0	0	238	4	0
229	7	3	242	1	0
247	0	0	250	0	0
			255	5	1
288	2	3	267	2	0
303	0	3	302	7	4
			303	0	2
357	17	1	357	12	1
391	25	0	387	20	0
402	0	2	401	1	4
460	1	0	462	0	0
462	19	9	462	16	10

Taking into account our experience gathered up-to-date it seems justified the continuation of joint studies in the following area. Firstly an attractive object of studies could be the crystals of charge-transfer (EDA) complexes in which the electron donor would be hexamethylobenzene and electron acceptors such like trinitrobenzene, hexacyanobenzene, tetracyanoquinodimethane and many other strong acceptors. The interaction should be reflected among others in torsional vibrations of methyl groups. The acceptor effect should arise not only from the direct interaction with methyl groups but also from the partial flow of electron density.

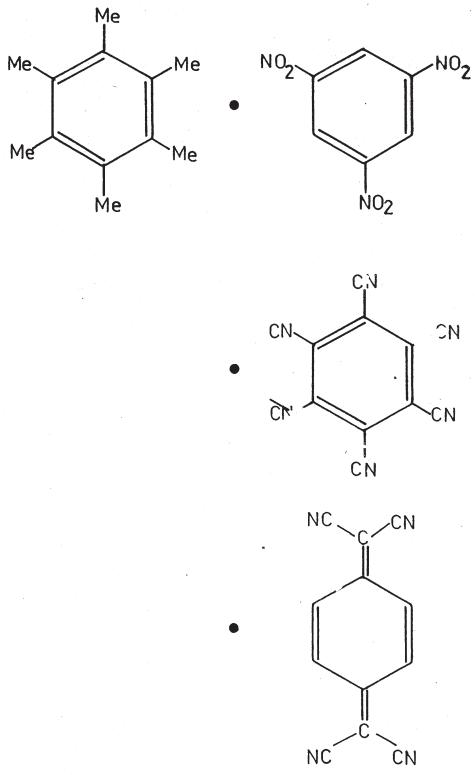


Fig 3. Structures of hexamethylbenzene and acceptors

Another topic to be offered for joint studies is related to crystals of dichloromaleates (DCM).

The detachment of the proton can lead to either simple anion with very short (2.38 Å) intramolecular hydrogen bond or polianions being an example of one-dimensional hydrogen bonded crystals. In the last case the hydrogen bonds are markedly longer, 2.45 Å.

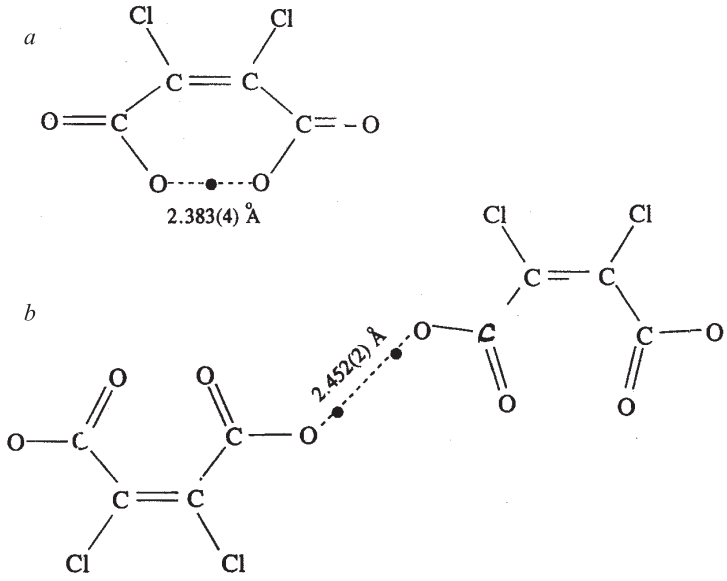


Fig 4. Structures of DCM

They can be treated as critical ones in a sense of the proton ordering and formation of polar phases. It seems that recognition of dynamics of dichloromaleate polyanions modified by various counter cations can yield a substantial contribution to understanding of phase transitions related to the proton ordering.

STRONG INTERACTIONS BETWEEN LIGHT NUCLEI AT LOW ENERGIES (Collaboration: JINR, Dubna – FPNT, Cracow)

J.Wozniak

Faculty of Physics and Nuclear Techniques, University of Mining and Metallurgy, Cracow, Poland

Our collaboration with the Laboratory of Nuclear Problems at JINR has started about 20 years ago. In the past, there was an activity in the field of muonic physics, especially in the experimental and theoretical aspects of muon catalyzed fusion. The number of common publications in the mentioned two decades exceeds 80 papers. The actual works in the frame of Cracow–Dubna collaboration are focused on:

- nuclear fusion in $d\mu^3$He muonic complex (R-98-02; collaboration with SIN and Fribourg University);
- scattering of muonic atoms in hydrogen (E-742; collaboration with TRIUMF and Fribourg University);
- measuring cross sections of nuclear fusion reactions at low collision energies using Z-pinch technique (JINR-05-2-1039-2001//2003; collaboration with HCEI, Tomsk).

Below I present shortly the last topic which idea was born here in Dubna and its realization is strongly supported by the Polish part of the collaboration.

The Team

V.M.Bystritsky (spokesman), Vit.M.Bystritskii, S.A.Chaikovsky, G.N.Dudkin, M.Filipowicz, A.Gula, E.Gula, V.M.Grebenyuk, A.V.Luchinsky, E.Lacki, G.A.Mesyats, V.I.Makhrin, B.A.Nechaev, V.N.Padalko, S.S. Parzhitsky, F.M. Pen'kov, N.A. Ratakhin, V.A.Sinebryukhov, S.A.Sorokin, A. Stolupin, A.Toor, E.N.Volkov, J. Wozniak.

Collaboration

The collaboration between the JINR and the Faculty of Physics and Nuclear Techniques UMM in the project LESI has started in 1994 (protocol no. 2786-2-94/96; June 21, 1994) and is continued actually in the research JINR programme no. 05-2-1039-2001/2003.

The other collaboration members:

High-Current Electronics Institute, Tomsk, Russia;

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;

Institute of Electrophysics, Ekaterinburg, Russia;
University of California, Irvine, USA;
Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA;
Institute of Nuclear Physics, Cracow, Poland.

History, Scientific Background

At the Cracow's international workshop «Exotic Muonic Complexes: Experiment, Theory» the new approach to the measurements of nuclear reaction cross sections between light nuclei ($p,d,t,^3$He) for low energies ($< \sim$ keV) has been presented[1]. The novel idea was based on using high intensity, radially converging ion beams generated during a plasma linear implosion (Z-pinch). For this purposes high power (high-current, high-voltage) nanosecond pulse generators are used.

Up to now, there were no experimental data on the cross sections of light nuclei fusion reactions at low collision energies[2].

The classical accelerators cannot be used for the study of nuclear reactions at very low energies ($E \approx 1$ keV – 100 eV) because the cross sections for such energies lie in the range $\sigma \approx 10^{-33} - 10^{-45}$ cm^2 and the intensities of the accelerated beams are too low. From the other part the importance of such studies is evident for the physics of few nucleon systems and for solving some astrophysical problems.

Experiments

Experiments are performed using nanosecond high-current accelerators in the High-Current Electronics Institute in Tomsk. High intensity ion beams are produced when a short, high-current pulse (~ MA, ~ 70 ns) passes along the liner (hollow-cylinder gas jet produced by a special load unit). The type of gas (deuterium, protium, etc.) depends on the requested reaction. The plasma liner is radially accelerated towards a target placed on the liner axis by the self magnetic field of the current. The intensity of the accelerated ion flow reaches 10^{20}–10^{21} particles per pulse. The target can either be the second inner gas jet injected by the load unit or a solid material (as CD_2 or CH_2 deposited on a metallic rod placed along the liner axis). Schematic layout of the apparatus is presented in Fig. 1.

Different conditions of experiments have been tried. At the first stage we study the *dd* fusion reaction

$$d + d \rightarrow {}^3\mathrm{He} + n \quad (2.5\,\mathrm{MeV}).$$

[1] V.B.Belyaev et al., «New proposals for the investigation of strong interaction between light nuclei at super-low energies», Proc. Int. Workshop «Exotic Muonic Complexes: Experiment, Theory», Sept. 27 – Oct. 10, 1993, Cracow; Nukleonika, 4, 2 (1995) 85.

[2] The lowest collision energies, for which the measurements have been performed using classical accelerator technique, are: 3, 5, 16.7, 17.1, 5.9 keV for (*d,d*), (*d,t*), (*p,d*), (*t,t*) and (*d*,^{3}He) reactions, respectively.

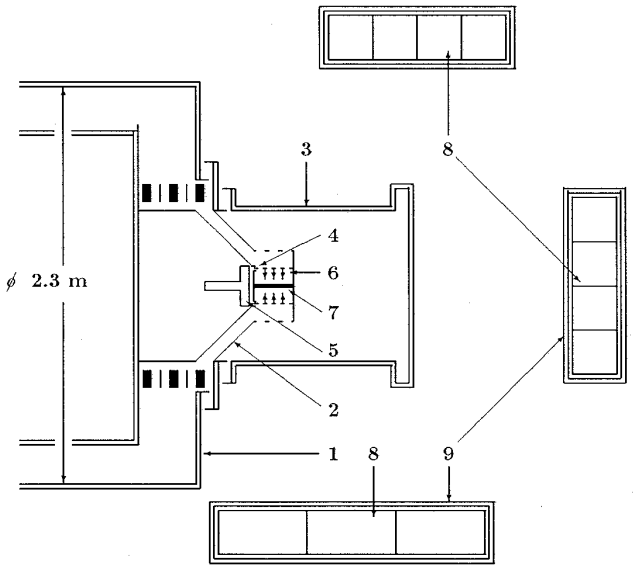


Fig. 1. Experimental set-up. 1 — high-current generator, 2 — load unit, 3 — measuring chamber, 4 — supersonic nozzle, 5 — electromagnetic valve, 6 — liner, 7 — target, 8 — scintillation spectrometer (8 pcs) and thermal neutron detector (3 pcs), 9 — lead shield

The cross section σ_{dd}^{n} can be traditionally obtained by measuring the yield of neutrons from *dd* reaction produced in the interaction of a highly intense beam of deuterons formed during the implosion of the linear plasma with the deuterium target, according to the equation:

$$\sigma_{dd}^{n} = \frac{N_n}{N_d n_t l \varepsilon_n},$$

where N_n is the number of detected neutrons, N_d is the total number of accelerated deuterons of the liner plasma, n_t is the target density, l is the deuteron range in the target and σ_n is the neutron detection efficiency. In fact, the analysis is more refined and takes into account the energy spread of deuterons within one pulse, the Coulomb deceleration of deuterons in the target, the dispersion of average deuteron energies for different accelerator pulses (shots).

The strong suppression of σ_{dd}^{n} when collision energy becomes small (see Fig. 2) makes the measurements of the cross sections difficult. In such a case it is better to focus the attention on the measuring the astrophysical S-factor.The formula which describes the energy-dependent cross section can be rewritten as a product of the barrier factor responsible for the Coulomb repulsion and the astrophysical S-factor:

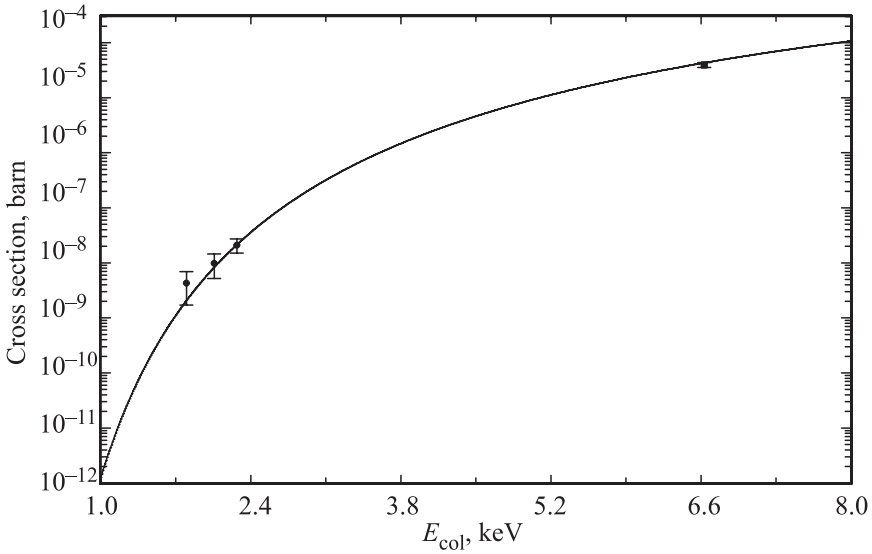


Fig. 2. Cross sections for *dd* reaction versus collision energy. Three points with error bars near 2 keV — this work. The point near 6.6 keV — experimental point for the channel $d(d,^3\mathrm{He})n$ received for the lowest collision energy by using the traditional technique (A.Krauss et al., Nucl. Phys. A. 1987. V. 465. P.150). Solid line — theoretical prediction

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-2\pi\eta(E)},$$

where $\eta(E)$ is the so-called Sommerfeld parameter.

The S-factor is weekly energy-dependent (see Fig. 3). It is obtained by measuring the neutron yield from the *dd* reaction and by using the following formula:

$$S(E) = \frac{N_n^{\exp}}{N_d n_t \varepsilon_n \int_0^\infty f(E)dE \int_0^\infty S(E'(E,x')) \frac{e^{-2\pi\eta'}}{E'(E,x')} dx'},$$

where $N_n^{\exp}$ is the total number of detected neutrons, $f(E)$ is the energy distribution of deuterons hitting the target and E is the deuterons collision energy. In the typical measurement we use deuterium gas as the liner and a solid CD_2 deposited on a copper rod as the target. Neutrons from *dd* fusion are detected by two types of detectors: time of flight scintillation spectrometers and thermal neutron detectors (BF_3 counters placed in a polyethylene moderator).

More details of the methodics of measurements and the experimental set-up used in the studies as well as the physical results can be found in our publications (see below).

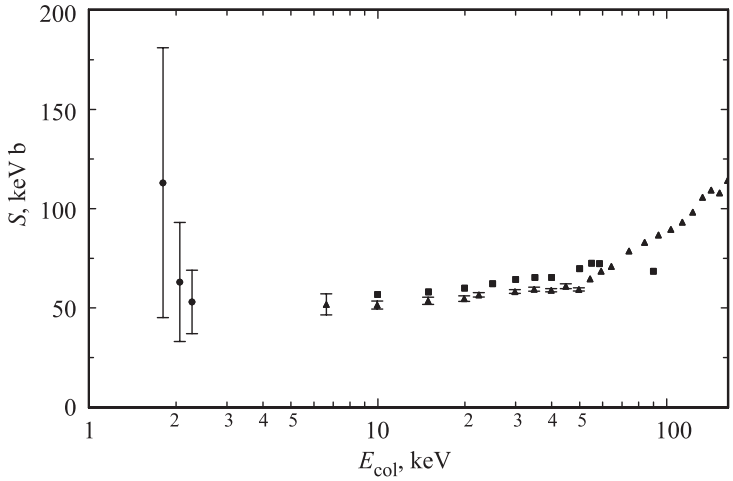


Fig. 3. Astrophysical S-factor for *dd* reaction versus collision energy. Experimental points: • — this work; triangles and squares — old existing data

Scientific results

In 1995–1996, when the first phase of the set-up was finished, the cross section for the *dd* reaction at the mean energy of the accelerated liner plasma deuterons $\overline{E}_d = 440$ eV has been measured. At the beginning of 1997 the second phase of the set-up for studying the *dd* reaction and the first phase of the set-up for investigation of the *pd* reaction ($pd \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma$) were completed. Then the cross section for the *dd* reaction was measured for deuterons collision energies in the range 0.1 – 1.46 keV. In 1998–1999, we measured the astrophysical S-factor for the *dd* reaction at deuteron collision energies $E = 1.8$, 2.06, 2.27 keV.

In 1999, we started to study an alternative approach in which plasma is electrodynamically accelerated radially away from the axis (the inverse Z-pinch). With such method, not exploited up to now, one can solve some experimental difficulties connected mainly with plasma instabilities and improve the accuracy of measurements.

Measured experimental cross sections and S-factors of *dd* nuclear reaction

Collision energy (keV)	Cross section (cm^2)	S-factor (b·keV)
0.11	$< 3.1 \cdot 10^{-32}$	
0.34	$< 1.6 \cdot 10^{-33}$	
0.37	$< 1.1 \cdot 10^{-33}$	
1.46	$< 1.5 \cdot 10^{-34}$	
1.8	$4.3(\pm 2.6) \cdot 10^{-33}$	53 ± 16
2.06	$9.8(\pm 4.6) \cdot 10^{-33}$	64 ± 30
2.27	$2.1(\pm 0.6) \cdot 10^{-32}$	114 ± 68

Our main results are published in the papers:

- *Bystritsky V.M. et al.* Experimental Investigation of *dd* Reaction in the Range of Ultra-Low Energies Using Z-Pinch // Laser and Particle Beams. 2000. V.18. P.1.
- *Bystritsky V.M. et al.* The Astrophysical S-Factor for the *dd* Reaction at Ultra-Low Energies // Journal of Physics of Atomic Nuclei. 2001. V.5 (in press).
- *Bulgakov T.L. et al.* Measurements of the Cross Sections for the Reaction $d + d \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + n$ at Ultra-Low Collisions Energies by Z-Pinch Technique // Yadernaya Fizika. 1997. V.60. No.8. P.1349; Physics of Atomic Nuclei. 1997. V.60. No.8. P.1217 (English transl.) .
- *Bystritsky V.M. et al.* Inverse Z-Pinch in Fundamental Investigations // Nucl. Instr. and Meth. A. 2000. V. 455. P.706.

and in conference presentations:

- *Bulgakov T. et al.* Nuclear Reactions Cross Section Measurement Using Z-Pinch Technology. // Proc. of the Intern. 11th Conf. on High Power Particle Beams «Beams'96», Prague, Czech Rep., June 10–14, 1996. V.2. P.917.
- *Bystritsky V.M. et al.* Investigation of Strong Interactions Between Light Nuclei at Super-Low Energies Using Z-Pinch Plasma Flow. // 10th IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Albuqerque, NM, July 10–13, 1995, USA: Abstract Book.

Methodics of experiments is presented in:

- *Belyaev V.B. et al.* Investigation of Strong Interactions at Very Low Energies (50–1000 eV). JINR Commun. D15-92-324. Dubna, 1992.
- *Belyaev V.B. et al.* New Proposals for the Investigation of Strong Interaction of Light Nuclei at Super-Low Energies. // Nukleonika. 1995. V.40. No.2. P.85.
- *Belyaev V.B. et al.* Investigation of Interactions between Light Nuclei at Ultra-Low Energies of 100–2000 eV (project LESI). // JINR Commun. D15-95-378, Dubna, 1995 (in Russian).
- *Bystritsky V.M. et al.* A New Approach in the Experimental Studies of Nuclear Reactions at Ultra-Low Energies. // Nukleonika. 1997. V.42. No.4. P.775.
- *Bystritsky V.M. et al.* Set-up to Investigate Rare Neutron Producing Processes. // Nucl. Instr. and Meth. 1996. V.374. P.73.

Figures 2 and 3 show the main results of *dd*-reaction cross sections and astrophysical S-factor measurements.

It is worth to note that most of the results, namely:

— cross sections and astrophysical S-factors of *dd* reaction at collision energies 1.8–2.3 keV,

— upper limits for cross sections of *dd* reactions for energy range 100–1.5 keV have been measured for the first time;

— actually tried and examined new technique of inverse Z-pinch seems very promising for obtaining higher precision of measurements.

Support

The work is continuously supported by the Joint Institute for Nuclear Research and by Polish Agency of Atomic Energy in the form of annual grants of Polish Plenipotentiary at JINR.

A part of investigations was supported by the International Science Foundation (grant RGN000) and the Russian Foundation for Basic Research (grants 95-02-05689, 00-02-17203). We are grateful J.Niewodniczanski, A.Hrynkiewicz and V.B.Brudanin for help and permanent interest in our studies.

Plans for Years 2001–2005

2001:

1. Development of techniques for measuring the energy distribution of accelerated ions in a liner.

2. Study of the inverse Z-pinch formation dynamics for research of the *dd* reaction in the range of deuteron collision energies from 0.5 to 3.0 keV and the characteristic of the process of the direct and inverse Z-pinch formation.

3. Investigation of the dependence of the *dd* reaction effective cross section on the deuteron collision energies in the range 0.53 keV and measurement of the astrophysical S-factor in the above range.

2002:

1. Study of the inverse Z-pinch formation process for research of the *pd* reaction in the range of deuteron collision energies from 0.5 to 3.0 keV.

2. Final analysis of the experimental results for *dd* reaction.

2003:

1. Research of the *pd* reaction in the range of collision energies from 0.5 to 3.0 keV.

2. Measurement of the astrophysical S-factor in the above range.

2004:

1. Study of the inverse Z-pinch formation dynamics for research of the d^3He reaction in the range of collision energies $3 \div 10$ keV.

2. Analysis of the results of the *pd* experiment.

2005:

1. Investigation of the dependence of the d^3He reaction effective cross section in the collision energy range $3 \div 10$ keV.

2. Measurement of the astrophysical S-factor in the d^3He interaction in the collision energy range $3 \div 10$ keV.

3. Analysis of the data of the d^3He experiment.

35 YEARS OF THE JINR–LUBLIN UNIVERSITY COLLABORATION

D.Mączka
Maria Curie-Sklodowska University, Lublin, Poland

The cooperation of physicists of the Lublin research centre with the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna started in the 60's, and from the very beginning concerned nuclear physics in a wide range of aspects. On the turn of the 70's and 80's this cooperation was broadened by studies on the nature and dynamics of the condensed phase, using methods of nuclear physics. The cooperation undertaken with JINR was not accidental. On the one hand, it contributed to the development of studies on nuclear spectroscopy carried out in Lublin, and on the other it was connected with parallel investigations of electromagnetic isotope separation. Both research lines were initiated and directed by the late Prof. Wlodzimierz Zuk, a renowned specialist in the field of studies on isotopes, mass spectrometry and electromagnetic separation of isotopes. At the beginning of the 60's he formed in Lublin a group of nuclear spectroscopy and a team which in 1963 built the first electromagnetic isotope separator in Poland. That team, working on nuclear spectroscopy, at the beginning used isotopes obtained in proton synchrocyclotron at Dubna. However, after several years of those studies in Lublin their further continuations became impossible because of necessary investigations of nuclides of shorter and shorter lifetimes. In that condition closer contacts were established with the Laboratory of Nuclear Problems of JINR, but strictly speaking with the Spectroscopy and Radiochemistry Department headed in those day-times by Prof. K.Ya.Gromov. As a result of those contacts it was possible for the Lublin nuclear physicists (T.Goworek, J.Wawryszczuk, J.Szarzynski, M.Budzynski, E.Krupa) to go to the Dubna Institute and work there using their own apparatuses. Together with the Russian physicists they initiated a number of complex studies concerning determination of values of spins of excited states, energy of levels, times of life, multiple order and the mixing ratios of the γ transitions in over 50 nuclei from the area of rare earths. On the initiative of the Lublin physicists (M.Budzynski, J.Wawryszczuk, E.Krupa) studies of perturbed angular $\gamma\gamma$ correlations were started for the first time in the Laboratory of Nuclear Problems of the Dubna Institute, to obtain data about magnetic moments and the internal magnetic fields acting on nuclei implanted in ferromagnetic targets. The latter subject was then shortly associated with studies on solids carried out in Lublin. The Lublin apparatuses brought to JINR consisted of: spectrometers γ, β and α, coincidence spectrometers and systems for measurements of angular $\gamma\gamma$ and $e\gamma$ correlations. It should be stressed that a large part of the apparatuses constituted original and valuable construction inventions of the

Lublin physicists contributing significantly to the research facilities of the Laboratory of Nuclear Problems.

The cooperation with JINR involved also a group of Lublin physicists dealing with electromagnetic separation of isotopes, to which belonged among others J.Pomorski, A.Latuszynski, K.Kiszczak, A.Wasiak. From the very beginning of its cooperation with Dubna, this group worked actively on application of the techniques of electromagnetic isotope separation in studies of nuclides lying far from the β stability line. The effects obtained in separation of radioactive isotopes depend on the separator itself. They are however determined largely by the construction of the ion source and its operating conditions. Taking this into consideration the Lublin physicists gave much attention to ion generation, ionization efficiency and optimization of the separation process in off-line system, and above all in on -line one. The complexity of the latter technique can be accounted for by the fact that it must warrant simultaneous proceeding of the following processes:

1. irradiation of properly chosen target with a high-energy beam of protons, neutrons or heavy ions to induce nuclear reactions,

2. extraction of the nuclear reactions products formed in the target and extraction (most often chemically) of the needed element,

3. transport of the studied element to the ion source of the separator and separation of its isotopes,

4. transport of the isotopes gathered on the separator collector to the spectrometric systems,

5. measurement of the nuclear parameters of the reaction products with nuclear spectrometers.

Thence, only a few world laboratories have at their disposal technical possibilities of using the on-line separation method. The Spectroscopy and Radiochemistry Department headed at present by Prof. V.G.Kalinnikov, is just one of them in which such a project (JASNAPP-2) was developed. JASNAPP-2 facility utilizes a proton beam from proton synchrocyclotron of 680 MeV energy for production of studied nuclides.

It was that system for which a group consisting of physicists, mostly from Lublin and Cracow, developed the method of the so-called «hot tantalum», which appeared especially useful and efficient. Its applications resulted in obtaining a number of valuable pieces of information about the properties of short-lived isotopes of rare earths, particularly of nuclei from the transient area about the life-period in seconds. It is worthy of noting that many of those data serve as reference for studies carried out at present.

The collaboration in the field of nuclear physics was joined by Lublin theoretical physicists on the turn of the 70's and 80's. That period was marked by a large progress in experimental studies on collision of heavy ions. As regards JINR, such investigations were carried out largely in the Laboratory of Nuclear Reactions and their purpose was the synthesis of new elements. In collisions of heavy nuclei the formed nucleus is characterized by enormous rotational speed with angular momentum of the order of

several dozen of Planck's units and a strong shape deformation. They are those problems, actual not only in that time, which were subjects of studies of B.Nerlo-Pomorska, K.Pomorski, A.Baran and Z.Lojewski. They were especially interested in observing metastable states of fast rotating nuclei of relatively high excitation energy to estimate the influence of the rotation speed of nuclei on their symmetry and disintegration. It appeared that the features of that states (e.g., energy, spin) are very sensitive to details of the theoretical models.

The cooperation between the Maria Curie-Sklodowska University, Lublin and JINR was intensified in the 80's, which consisted in joint studies in the field of physics of solids with methods of nuclear physics. The involvement with them resulted from extension of electromagnetic separation of isotopes, traditionally dealt with in Lublin, to ion implantation. Installation of an ion 330 keV implantator at the Lublin University in the 70's initiated studies on interaction of middle energy ions with solid as well as postimplantation defects. Due to that it was also possible to conduct investigations on changes of physicochemical properties of solids in consequence of ion implantation; both semiconductors and metals were studied, the latter in cooperation with a group of researchers from the Technical University of Lublin (P.Tarkowski, P.Budzynski, B.Kamienska). As regards metals, the studies concerned a considerable number of phenomena responsible for changes of tribological properties, while in the case of semiconductors — electric and optical properties. Many experimental methods are used for studies of implanted semiconductors and metals. In Lublin, largely SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry), elipsometry, PIPE (Particle Induced Photon Emission) and modulated reflection spectroscopy are used. A considerable increase of our research possibilities was attained owing to the undertaken cooperation with a group of Dr A.A.Kobzev and Prof. A.M.Balagurov from the Neutron Physics Laboratory. This group enabled us using such nuclear methods as: RBS (Rutherford Back Scatering), PIXE (Particle Induced X Emission), NR (Nuclear Reactions), and ERD (Elastic Recoil Detection), channeling, that is, methods, which were to a high degree complementary to ours. Due to this cooperation we obtained a number of interesting and valuable results about the distribution of admixtures implanted to targets, admixture diffusions, radiation enhanced diffusion, gettering, preimplantation and recoil implantation. We hope that this cooperation will be further developing, the more so as it has been supported by a mutually signed protocol of studies (07-4-1031-99/2003). It is however to be mentioned that because of a considerable distance between Lublin and Dubna many troubles of technical character hinder effective exploitation of this cooperation. Therefore, we hold out a great hope of the research complex cyclotron — ion implantator being installed in Lublin owing to the grant of Dubna Institute (05-2-0986-1992/2000). This complex consists of an ion implantator WID and a small cyclotron obtained from the Nuclear Physics Institute in Cracow thanks to Prof. A.Hrynkiewicz's friendly support. This apparatus being installed is expected to form unique research conditions, among other

things, due to the possibility of ion implantation of samples with their simultaneous bombarding with a cyclotron beam.

Solid state physics was also an objective of the cooperation of our theoretical physicists. Especially R.Taranko and E.Taranko carried out studies on phenomena, which occur on solid surface. As a result of these studies the theory of chemisorption on metals at finite coverages has been developed. In their calculation the electron correlation effects have been considered. The influence of the disorder and electron–photon interactions on the superconductivity effect has also been investigated (K.Wysokinski).

In conclusion of the discussion of our more important researches, we cannot omit mentioning 3 habilitation and 10 doctor's theses as well as about 300 publications resulting from the cooperation between the Lublin physical research centre and the Joint Institute for Nuclear Research.



Дубна, 1956 г. Первая дирекция Объединенного института ядерных исследований (слева направо): вице-директор профессор М. Даныш (ПНР), директор Института профессор Д. И. Блохинцев (СССР), вице-директор профессор В. Вотруба (ЧССР)



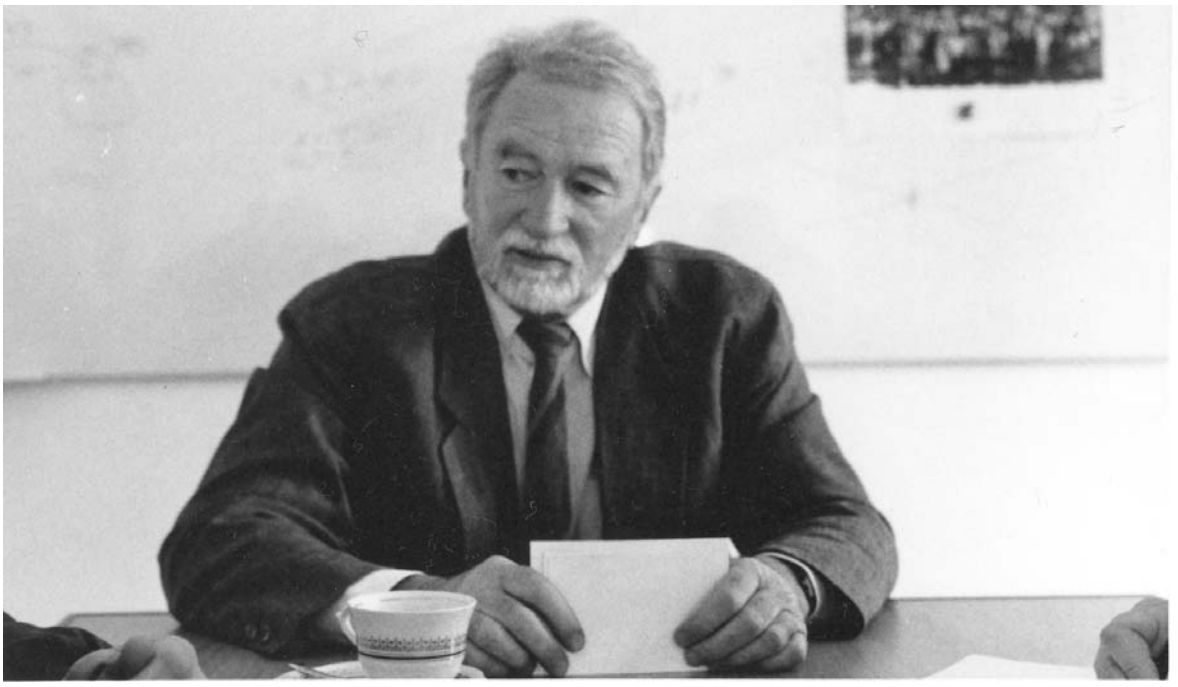
Дубна, 1959 г. Польская делегация на 5-й сессии Ученого совета ОИЯИ (слева направо):
Г. Неводничанский, Л. Инфельд, А. Солтан



Заседание комиссии по научному сотрудничеству Польша–ОИЯИ



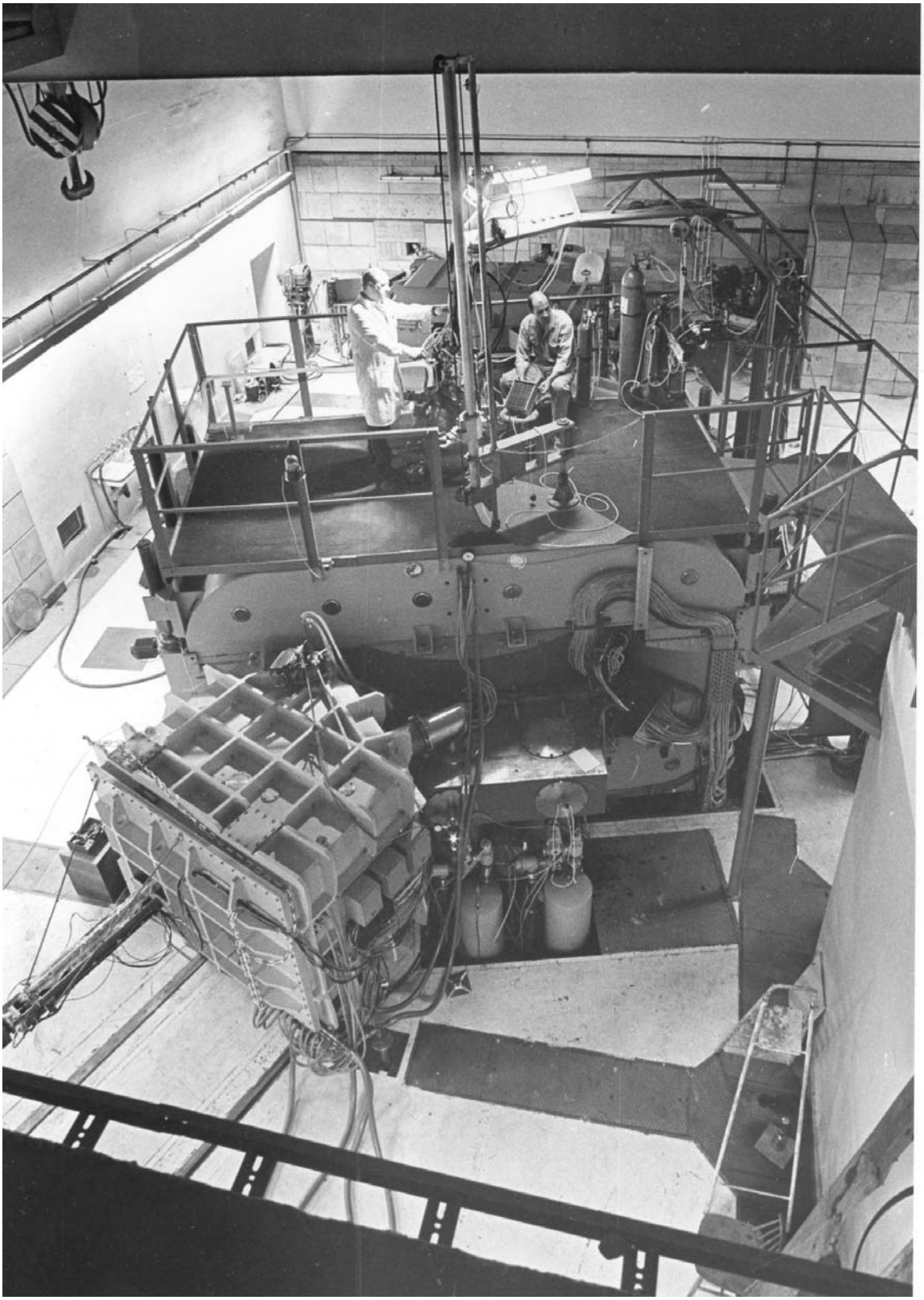
Председатель Государственного агентства по атомной энергии
Республики Польша профессор Е. Неводничанский



Варшавский университет. Лаборатория тяжелых ионов.
Директор лаборатории профессор Я. Ковнацкий



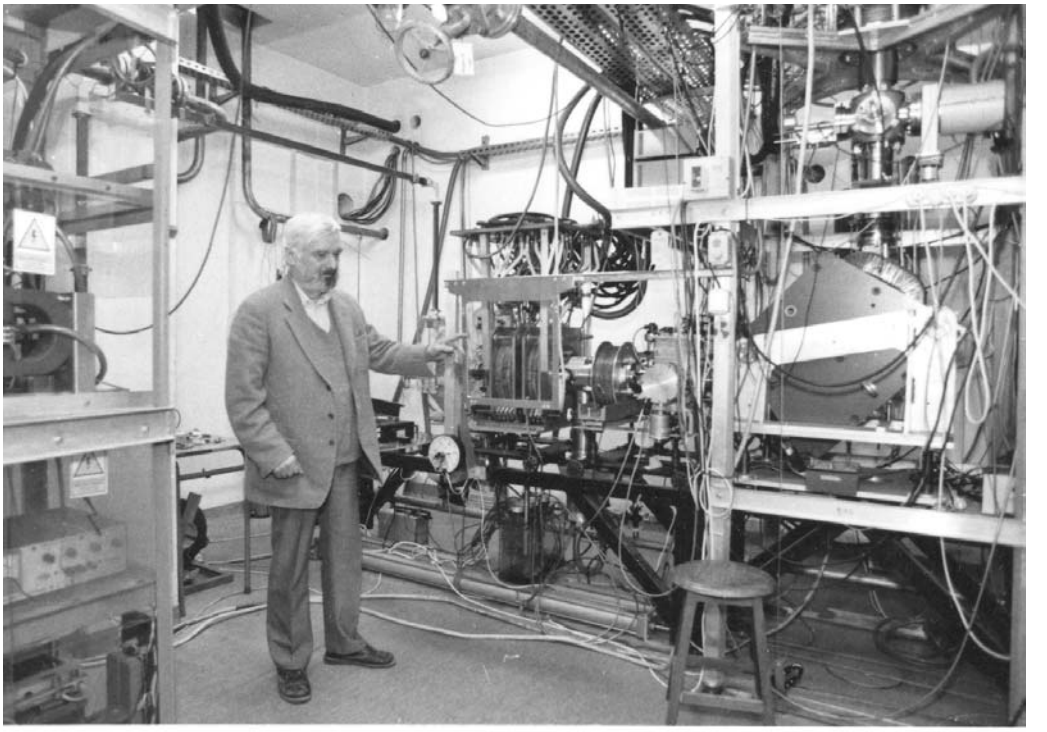
Варшавский университет.
Лаборатория тяжелых ионов.
Профессор И. Сура



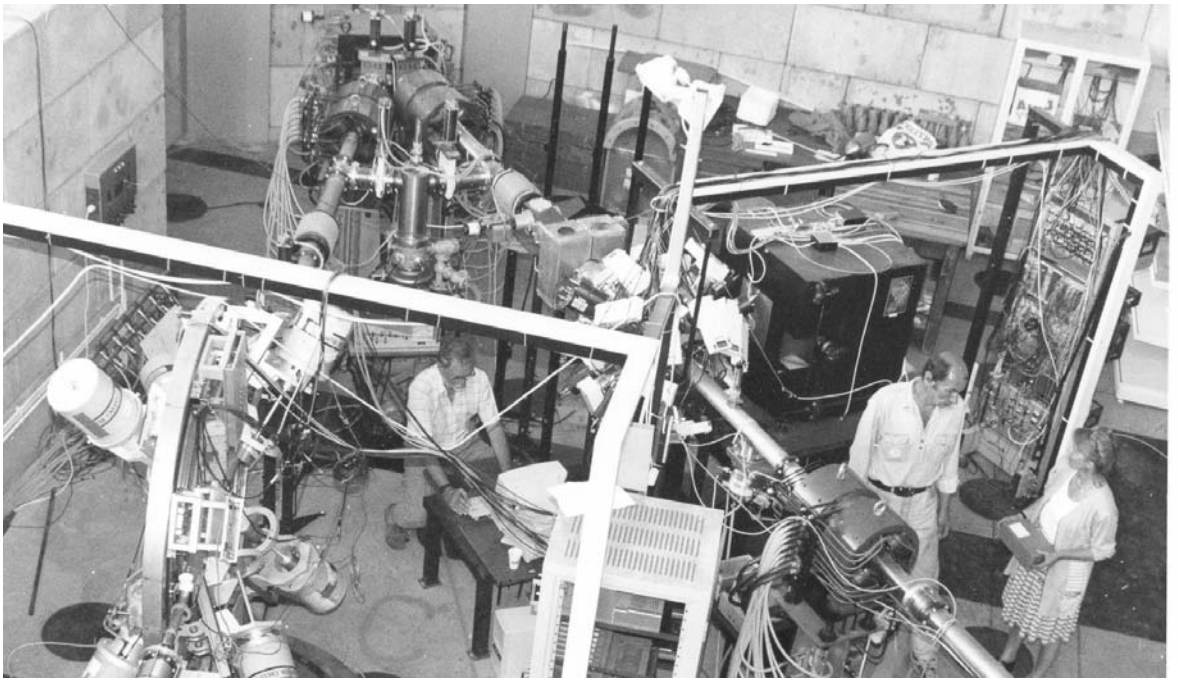
Варшавский университет.
Лаборатория тяжелых ионов. Циклотрон К-160



Варшавский университет. Лаборатория тяжелых ионов. Пульт управления циклотроном К-160. На снимке (справа налево): профессор И. Сура, Т. Браха, З. Морозович



Варшавский университет. Лаборатория тяжелых ионов. За настройкой ЭЦР-источника К. Судлитц



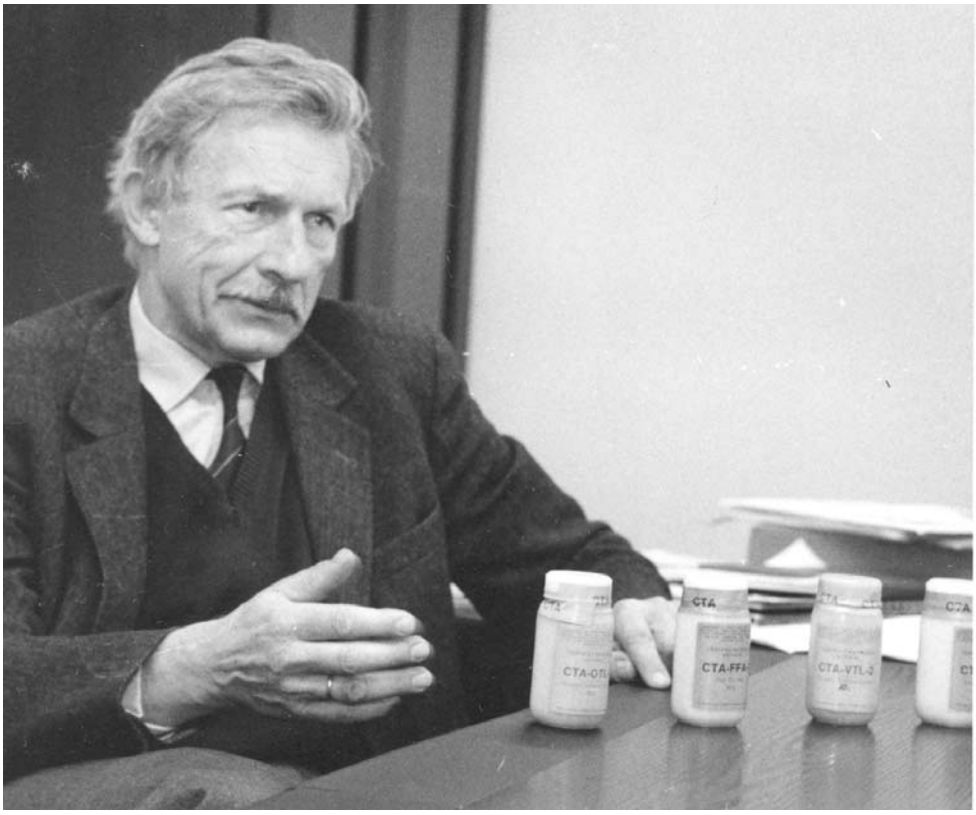
Варшавский университет. Лаборатория тяжелых ионов. Каналы выведенных пучков заряженных частиц в измерительном павильоне лаборатории



Варшавский университет. Лаборатория тяжелых ионов. На установке для лазерной спектроскопии Т. Иномура, П. Сидор, О. Глужицкая, А. Капустинская



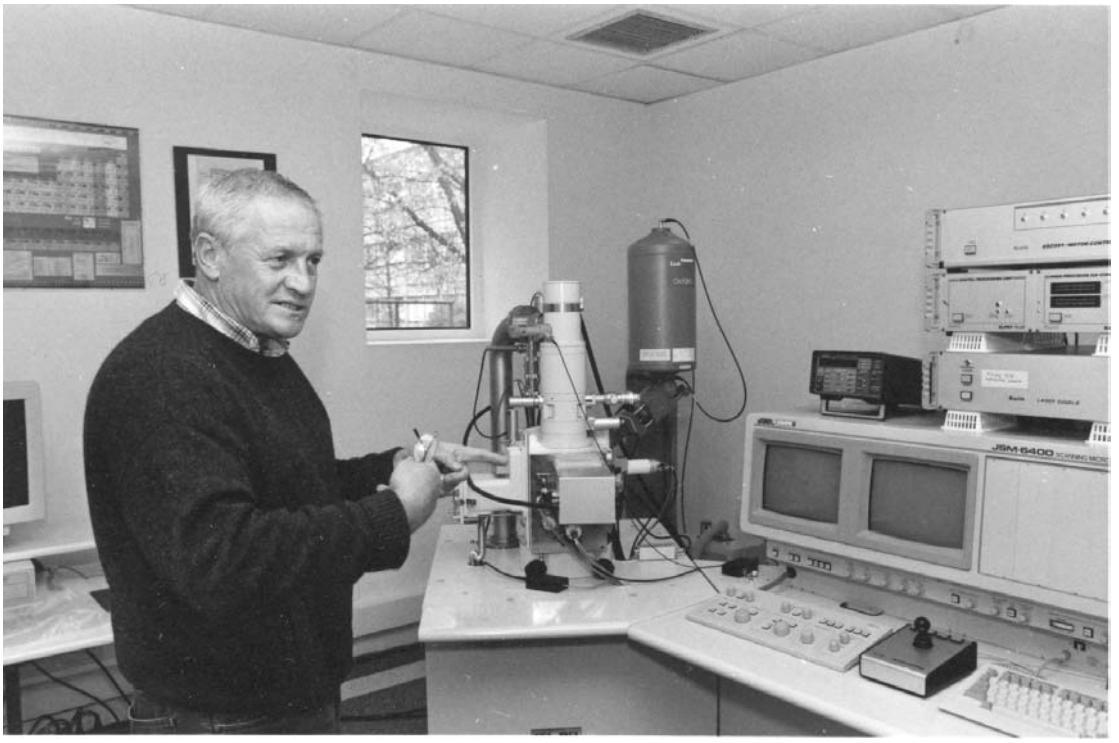
Варшава. Институт ядерной химии и технологии. Лаборатория структурных исследований. Начальник лаборатории В. Староста (слева) обсуждает с сотрудниками свойства материалов для трековых мембран



Варшава. Институт ядерной химии и технологии.
Лаборатория аналитической химии. Начальник лаборатории
профессор Р. Дыбчинский с эталонами образцов для неорганического анализа



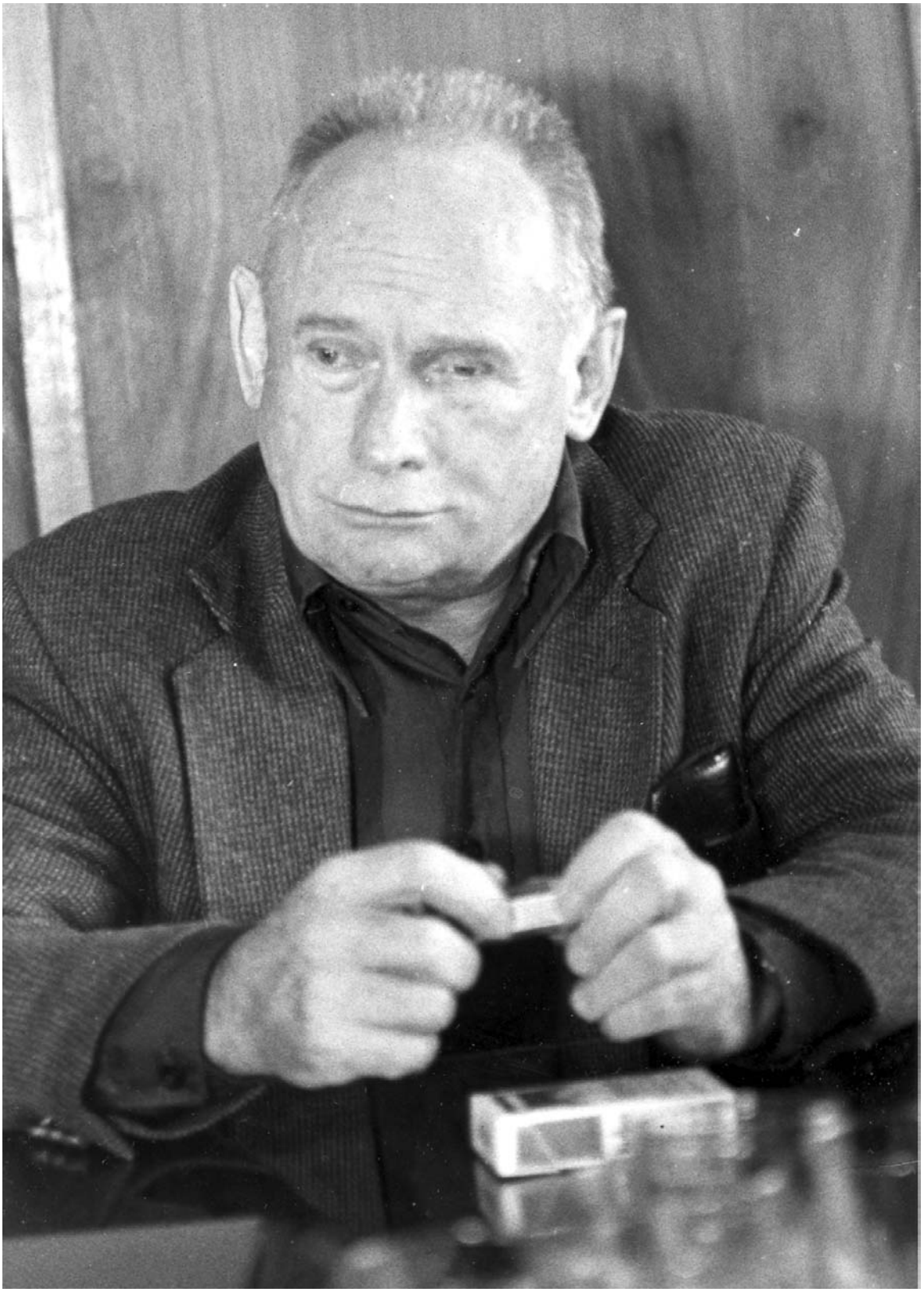
Варшава. Институт ядерной химии и технологии.
Генеральный директор института профессор Л. Валищ



Варшава. Институт физики Польской академии наук. Лаборатория нанолитографии.
О функциональных возможностях аппаратуры рассказывает профессор Т. Скощкевич



Варшава. Институт физики Польской академии наук.
Лазерная установка «MBF» для получения молекулярных пучков.
Пояснения дает Я. Кшивинский



Варшава. Институт физики Польской академии наук.
Директор института профессор Р. Галонска



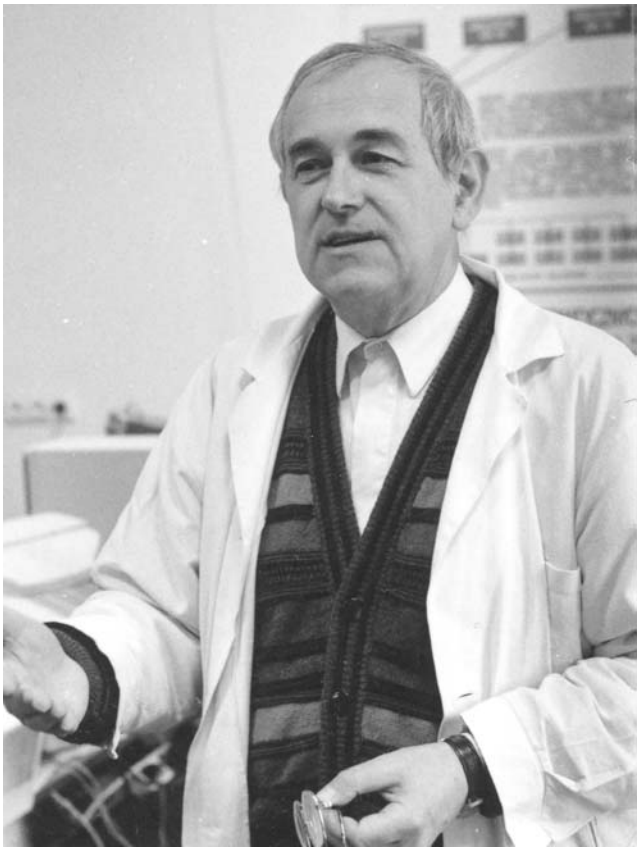
Варшава. Институт ядерных проблем. Отдел теоретической физики.
На снимке: профессор А. Собичевский, Р. Смоляньчук и профессор С. Выцех



Варшава.
Институт ядерных проблем.
В экспериментальном зале
начальник отдела К. Русек
и аспирантка Р. Ратайчак



Варшава. Институт математических машин.
На снимке: Т. Сенкевич, Д. Славинский и Л. Розбицкий



Варшава.
Институт математических машин.
О работе устройств распознавания образов рассказывает А. Коемский



Сверк. Институт ядерных проблем им. А. Солтана. Профессор Ст. Кулинский, директор института профессор З. Суйковский и профессор М. Мошинский



Сверк. Институт ядерных проблем им. А. Солтана. Центр обучения и консультаций. Начальник центра Л. Добжинский

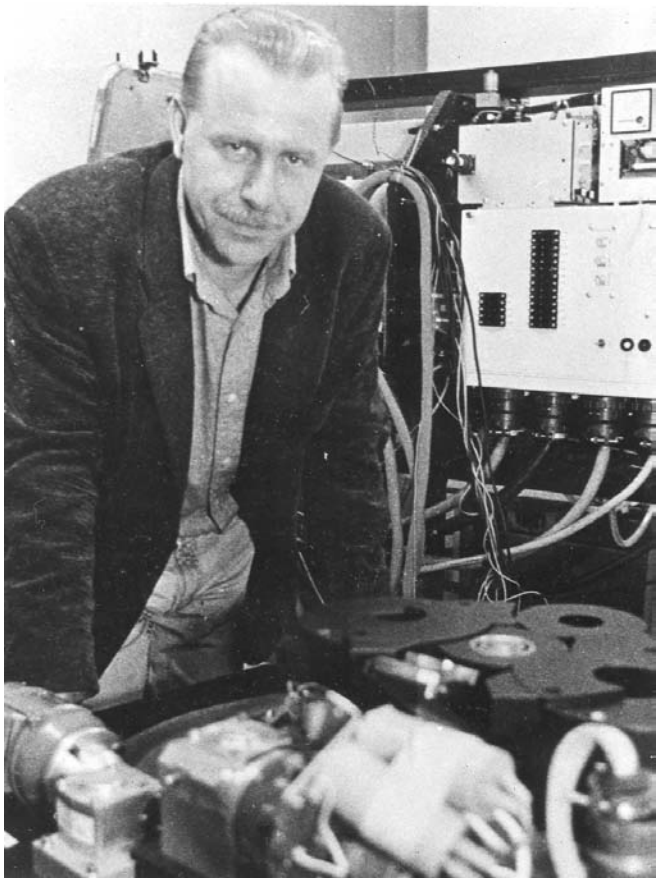


Сверк. Институт ядерных проблем им. А. Солтана.
Ветераны отдела ускорителей: начальник отдела
М. Пахан (сидит), Е. Павловский, Д. Биголас и Ст. Кулинский



Сверк. На территории Института ядерных проблем им. А. Солтана

Сверк. Институт ядерных проблем им. А. Солтана. Отдел технической продукции. На участке монтажа электронных ускорителей для медицинских целей начальник отдела А. Хилгер





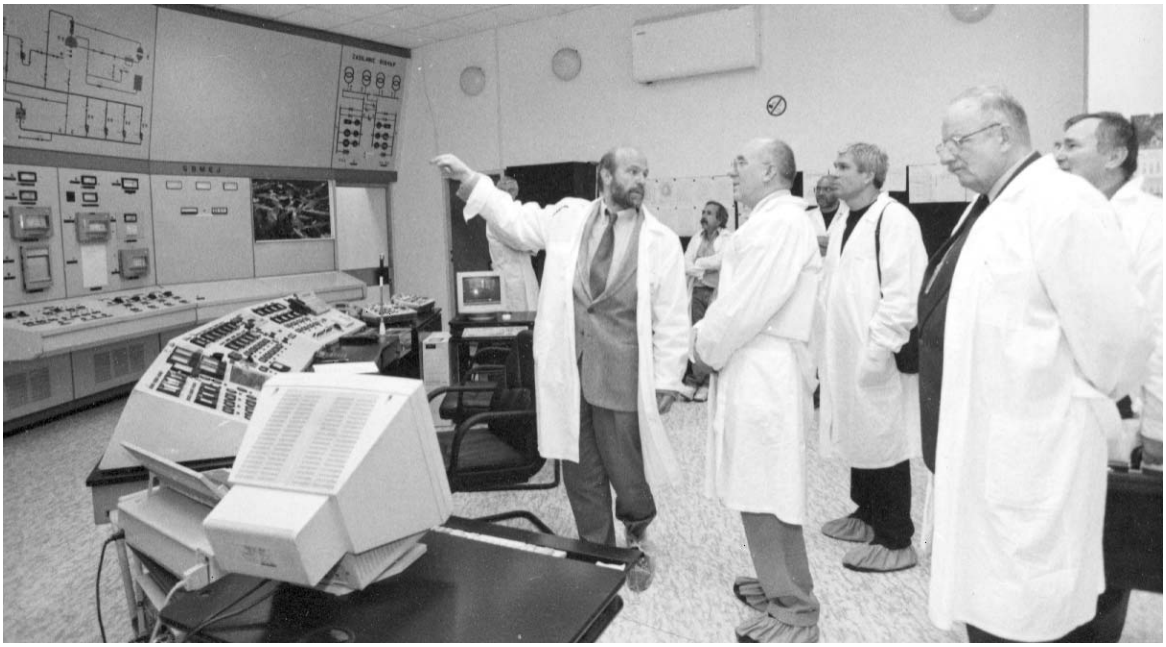
Сверк. Институт ядерных проблем им. А. Солтана. Отдел физики плазмы. Вакуумная камера IBISEK для исследования водородной и азотной плазмы. На снимке: Э. Складник-Садовская и начальник отдела Д. Барановский



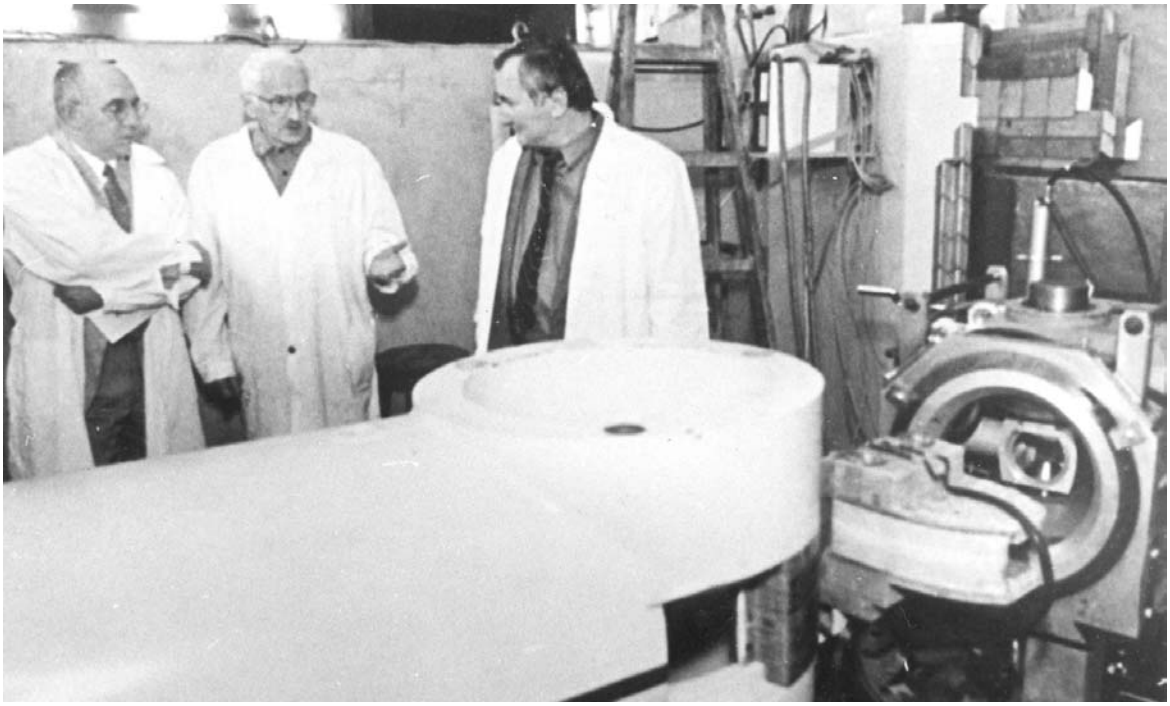
Сверк. Институт атомной энергии.
Директор института профессор К. Ветеска



Сверк. Институт атомной энергии. Начальник лаборатории
для исследования радиационных материалов Т. Вагнер



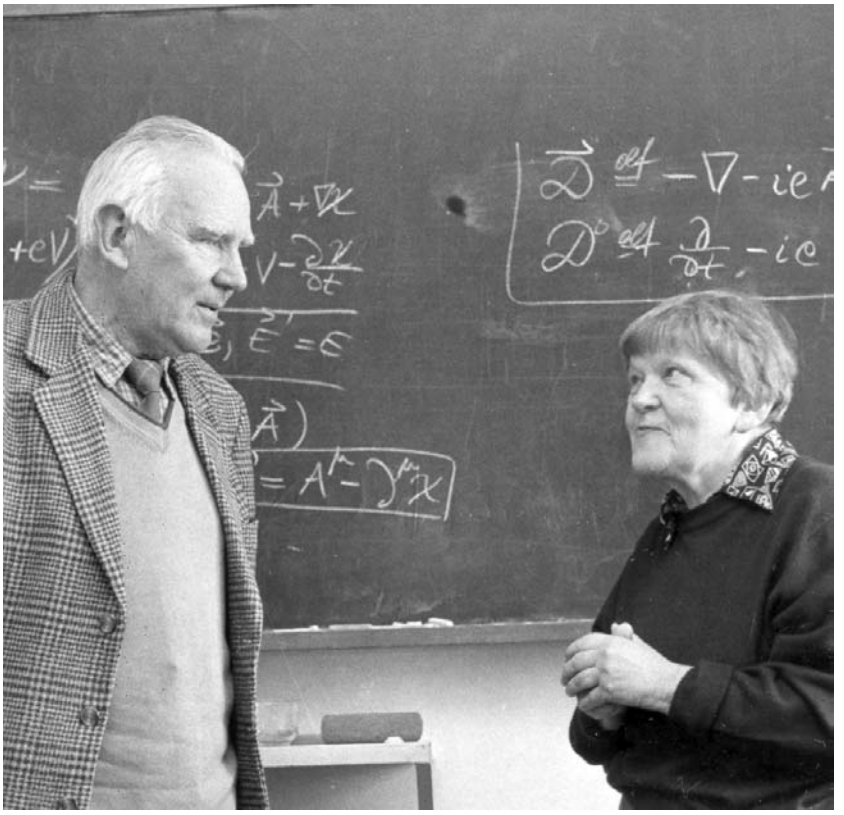
Сверк. Институт атомной энергии. Центр управления реактором «Мария».
Пояснения дает начальник реактора Г. Кшиштошек (слева)



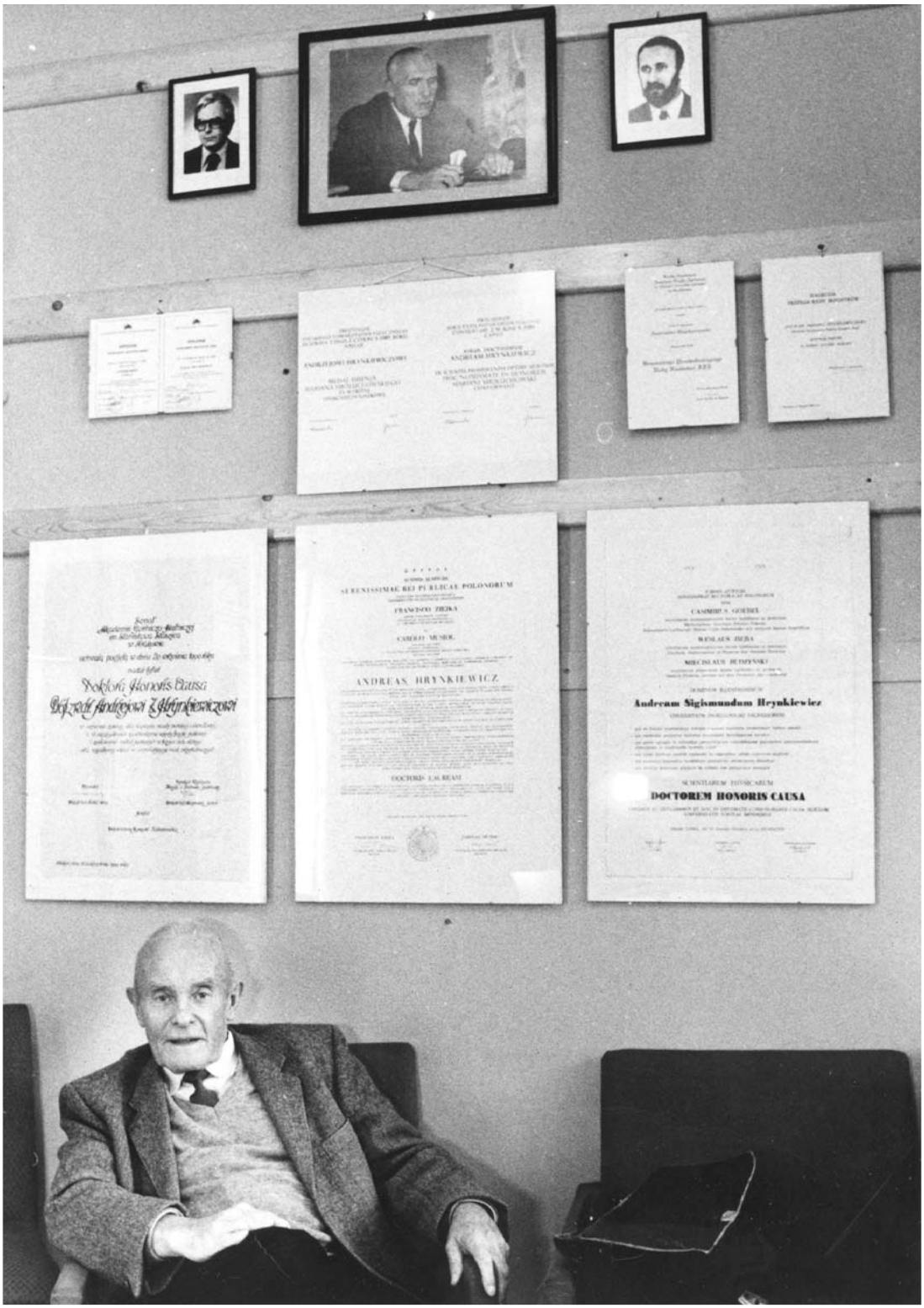
Сверк. Институт атомной энергии. На установке по изучению свойств
поляризованных нейтронов В. Хмельовский, К. Блиновский и К. Михалик



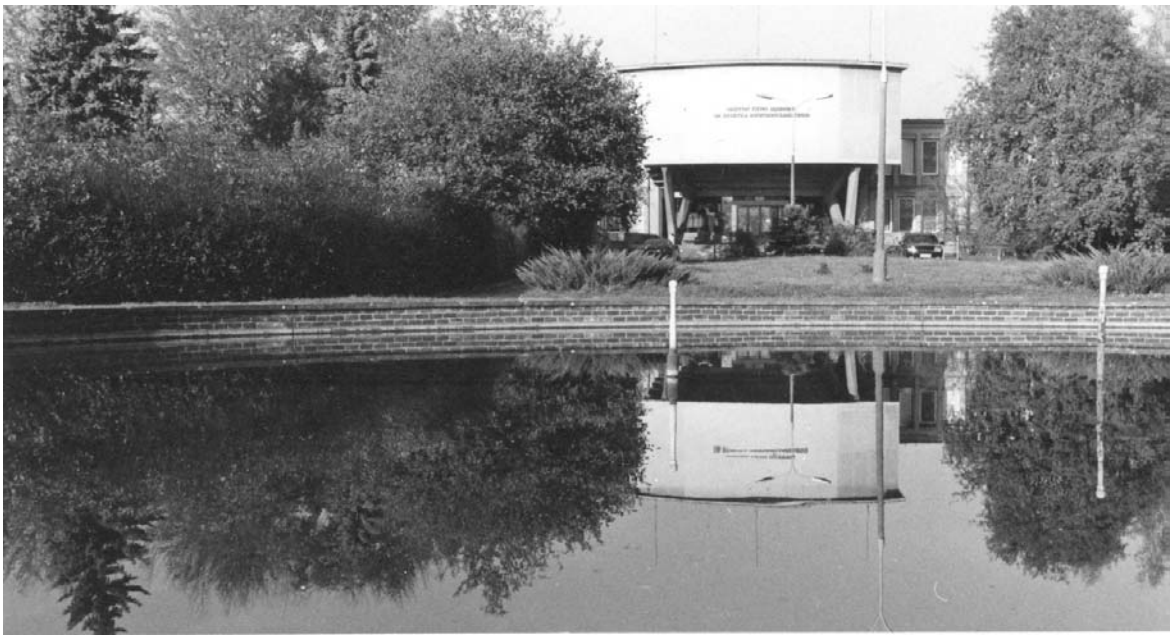
Краков.
Институт ядерной физики
им. Г. Неводничанского.
Директор института
академик А. Будзановский



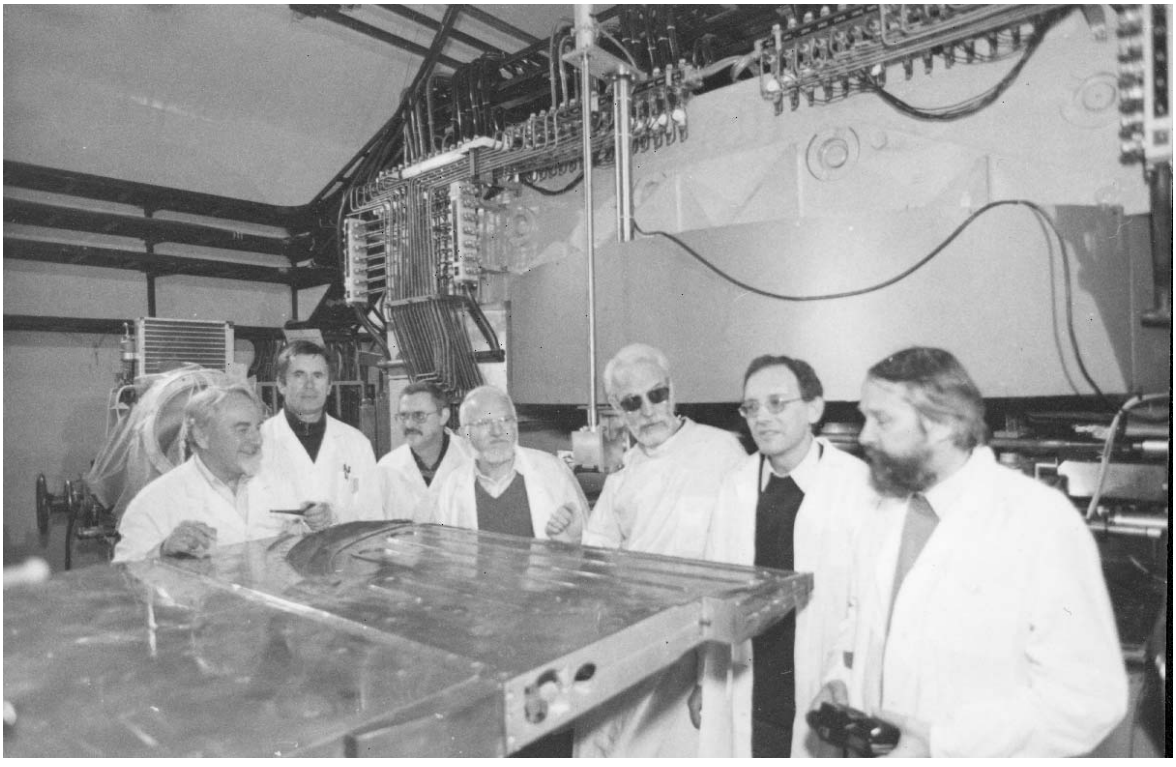
Краков.
Институт ядерной физики
им. Г. Неводничанского.
Академик Е. Яник и
А. Ковальская обсуждают
совместную научную работу



Краков. Институт ядерной физики им. Г. Неводничанского.
Полномочный Представитель Республики Польша в ОИЯИ
академик А. Хрынкевич в своем кабинете



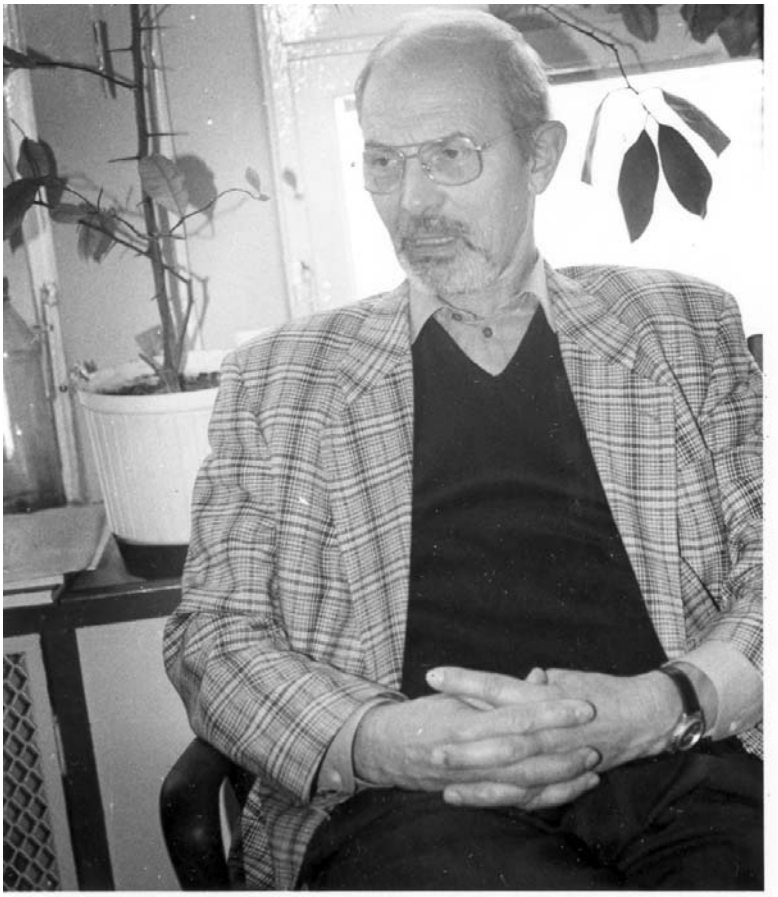
Краков. Институт ядерной физики им. Г. Неводничанского



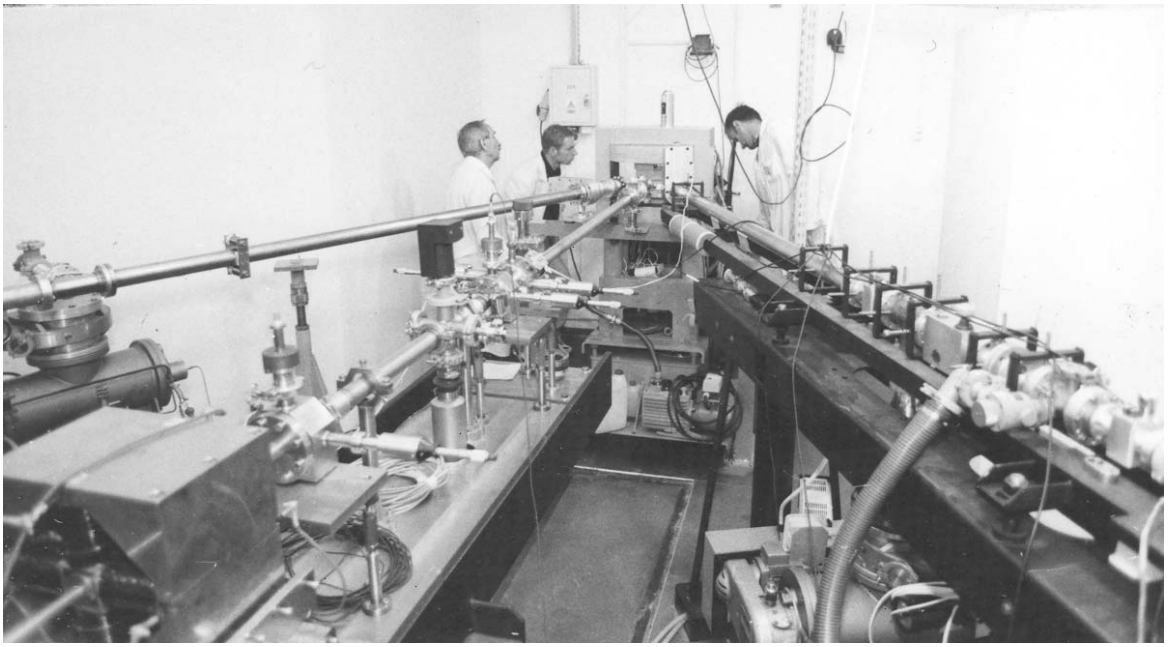
Краков. Институт ядерной физики им. Г. Неводничанского. У дуантов циклотрона АИЦ-144
Э. Бакевич, В. Пыжел, Г. Норис, Я. Лагиш, Р. Тарашкевич, К. Даниэль, Х. Дорух



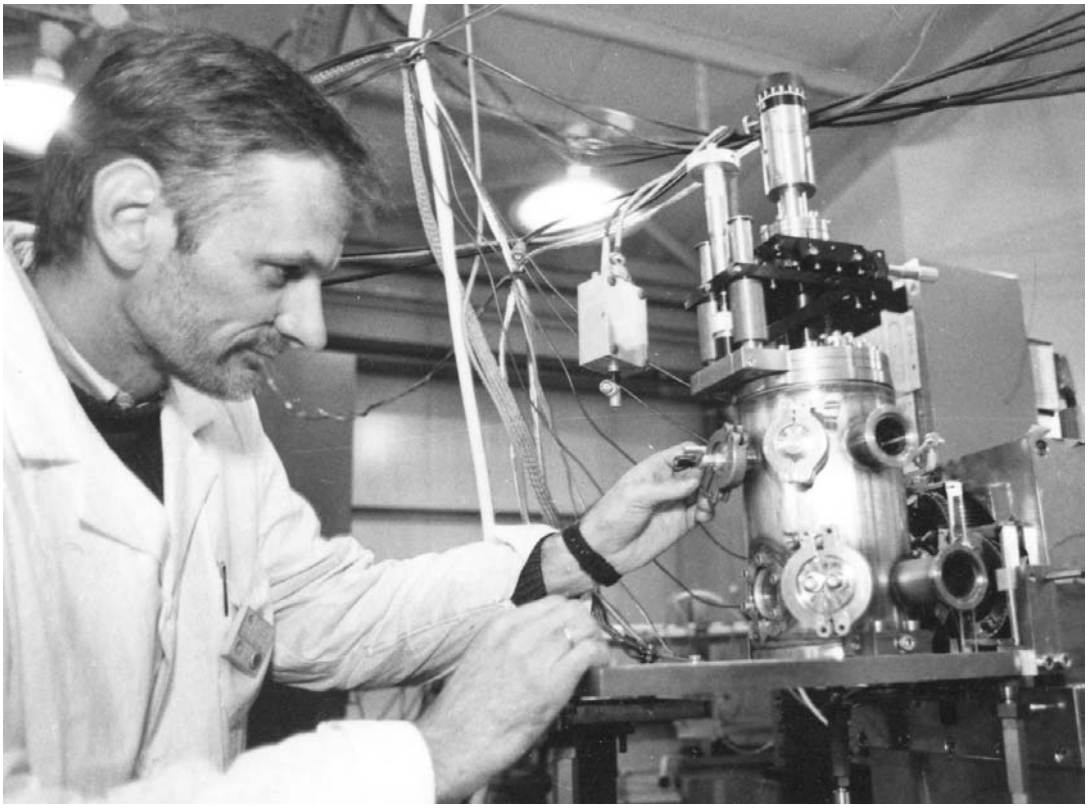
Краков. Институт ядерной физики им. Г. Неводничанского.
Профессор Э. Капусцик



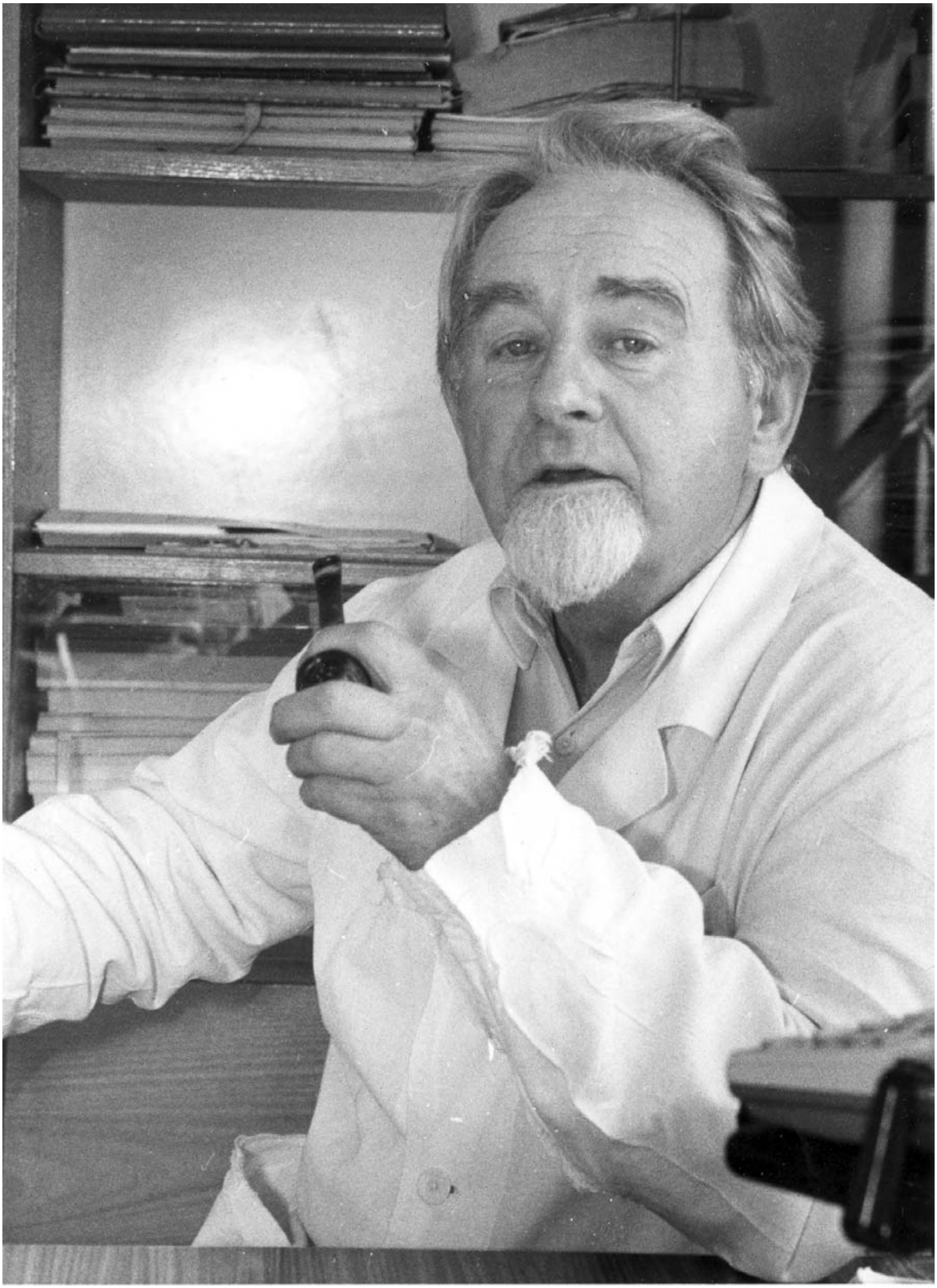
Краков.
Институт ядерной физики
им. Г. Неводничанского.
Профессор Я. Стычень



Краков. Институт ядерной физики им. Г. Неводничанского.
Система каналов выведенных пучков из электростатического ускорителя Ван де Граафа



Краков. Институт ядерной физики им. Г. Неводничанского.
На медицинском пучке протонов ускорителя Ван де Граафа З. Шкляж



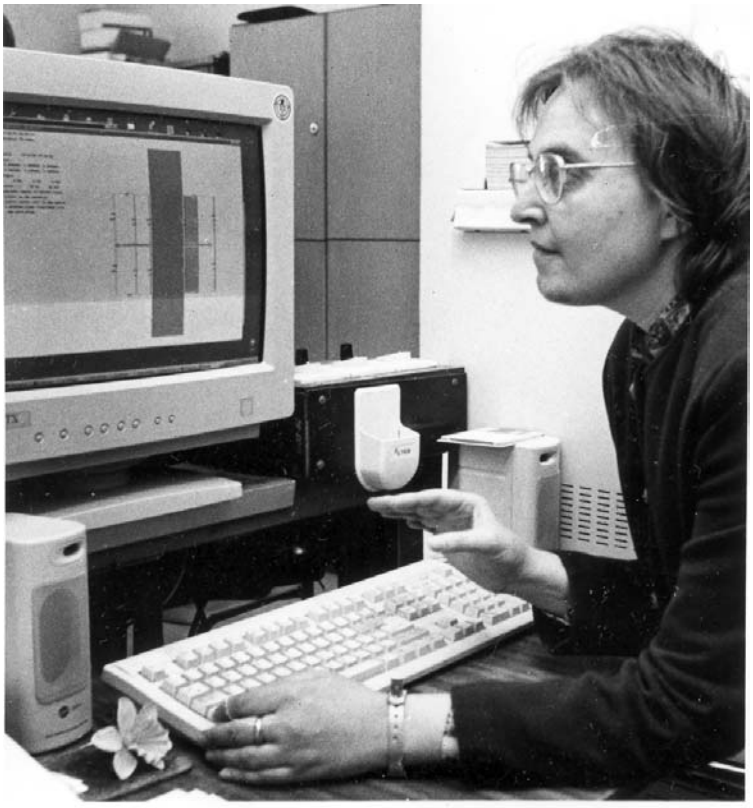
Краков. Институт ядерной физики им. Г. Неводничанского.
Начальник отдела ускорителей Э. Бакевич



Краков. Горно-металлургическая академия.
Декан факультета физики и ядерной техники
профессор К. Елень



Краков. Горно-металлургическая академия. Профессор С. Тачановский, П. Гронек
и профессор Е. Янчишин в вычислительном центре академии



Краков. Горно-металлургическая академия. Обработка результатов эксперимента, проведенного на синхрофазотроне ОИЯИ. У монитора Г. Доманьская



Краков. Горно-металлургическая академия. Свинцово-ториевая сборка для измерения характеристик нейтронных полей. На снимке: В. Похорецкий



Краков. Вид на Вислу и Вавель



Краков. Институт ботаники Польской академии наук. Профессор К. Гродзинская и директор института профессор З. Мирек в научной библиотеке института



Здание Вроцлавского университета



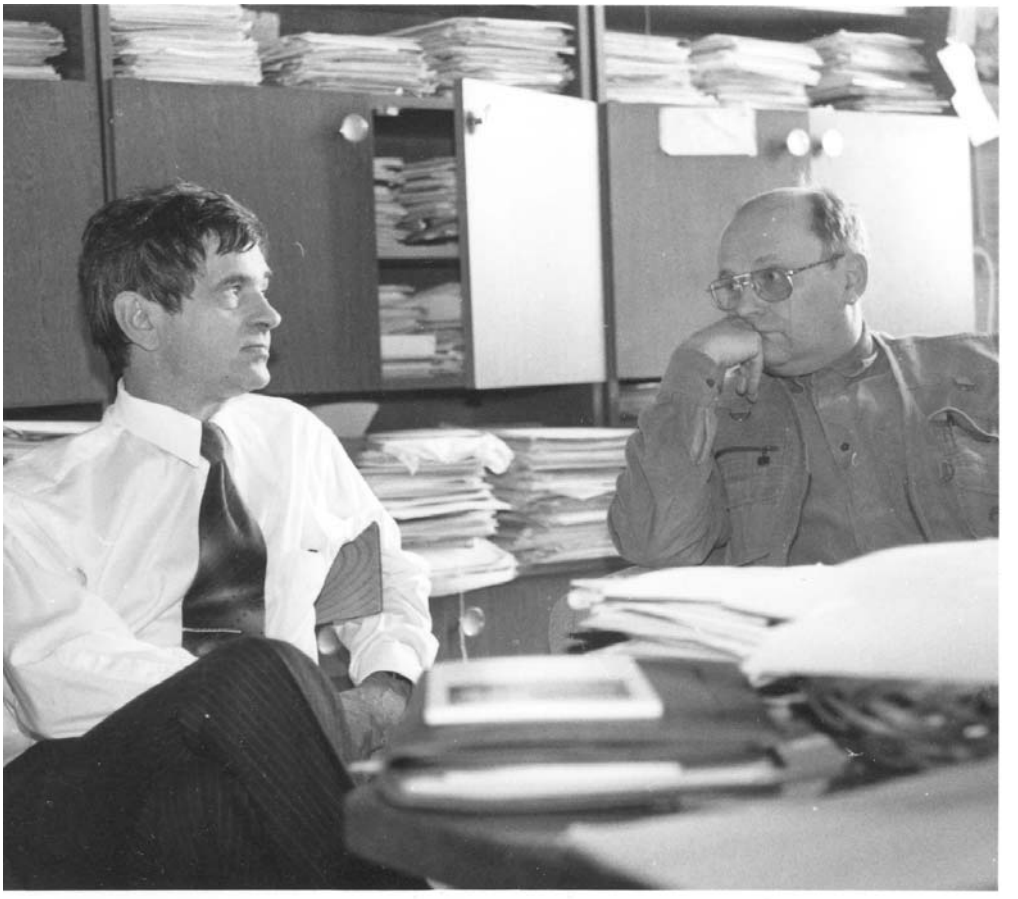
Вроцлавский университет. Парадный актовый зал

Вроцлавский университет.
Проректор университета
профессор И. Зюлковский





Вроцлавский университет.
Химический факультет.
Академик Л. Собчик



Институт теоретической физики Вроцлавского университета.
Физики-теоретики З. Попович и С. Чехановский



Вроцлавский университет.
Химический факультет.
Химик И. Маеж



Вроцлавский университет. Сотрудники Института теоретической физики со студентами



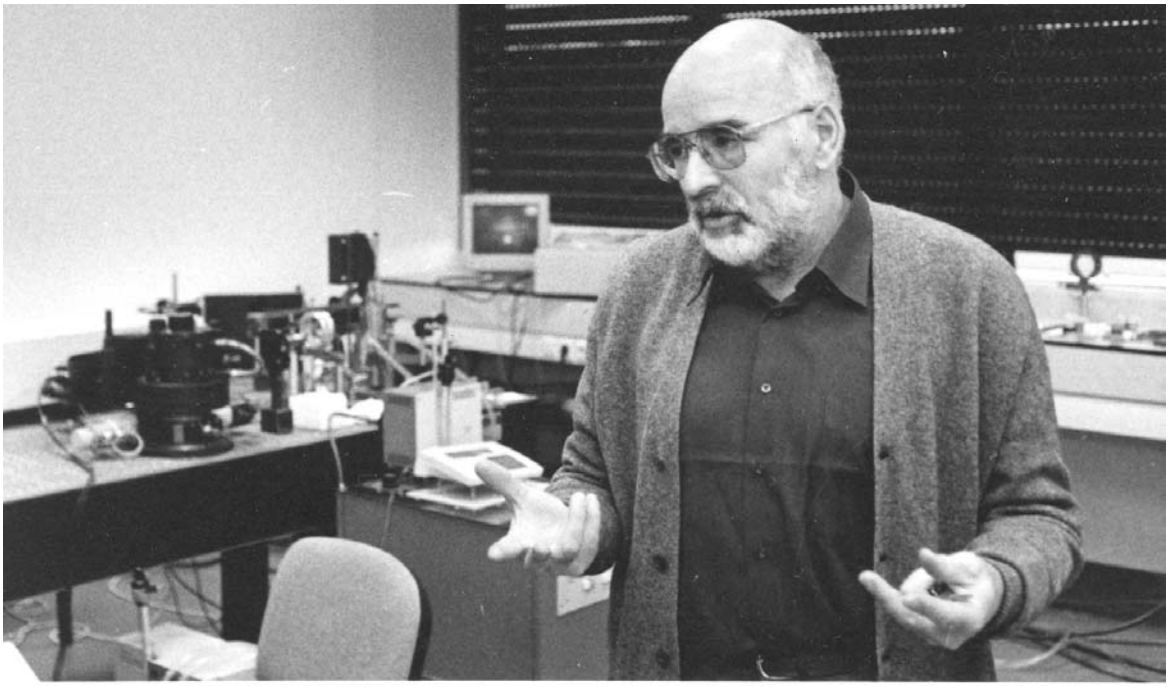
Институт теоретической физики Вроцлавского университета. Директор института профессор Е. Лукерский



Познань. Университет им. А. Мицкевича.
Декан физического факультета в 1993–1999 гг.
Профессор В. Навроцик



Познань. Университет им. А. Мицкевича. Физический факультет.
Отдел нелинейной оптики. Лауреат премии ОИЯИ 1992 года
профессор Р. Танащ



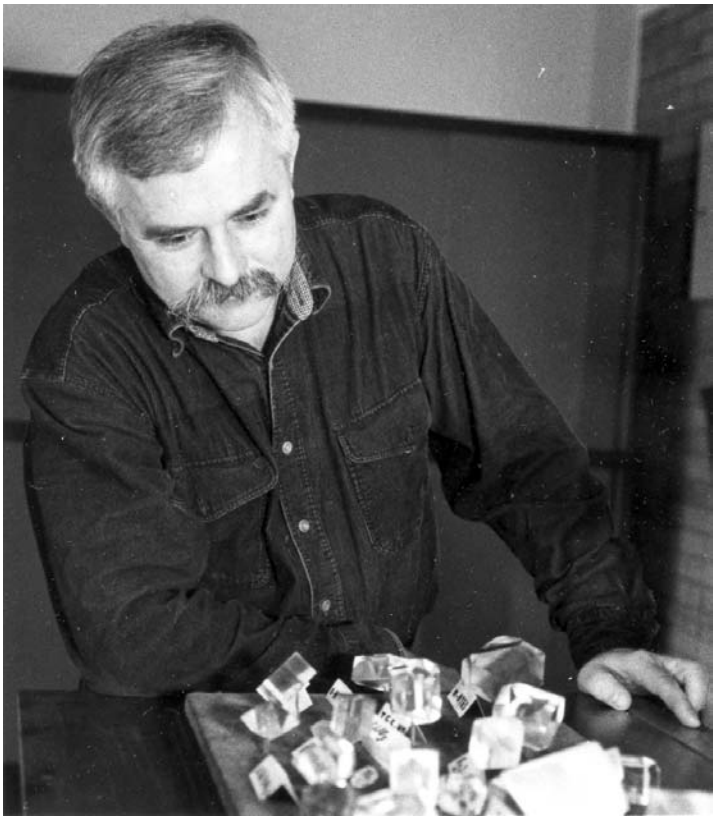
Познань. Университет им. А. Мицкевича.
Декан физического факультета профессор А. Добек



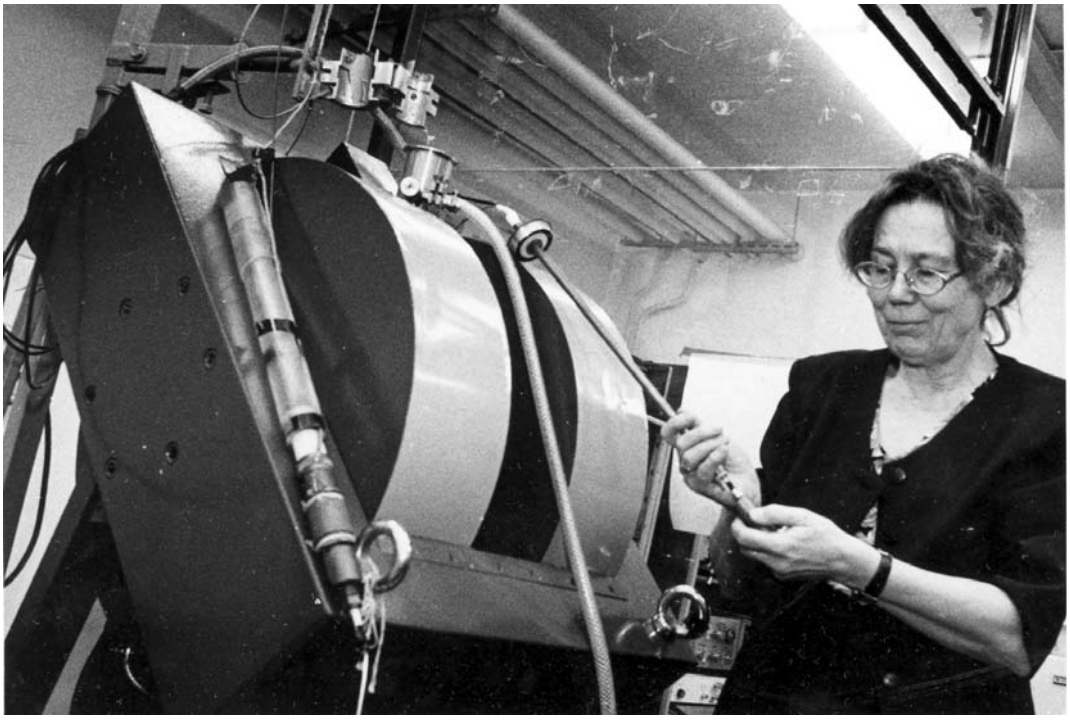
Познань. Университет им. А. Мицкевича.
Физический факультет.
Лаборатория квантовой электроники.
На установке для лазерной спектроскопии
аспирант М. Жулек



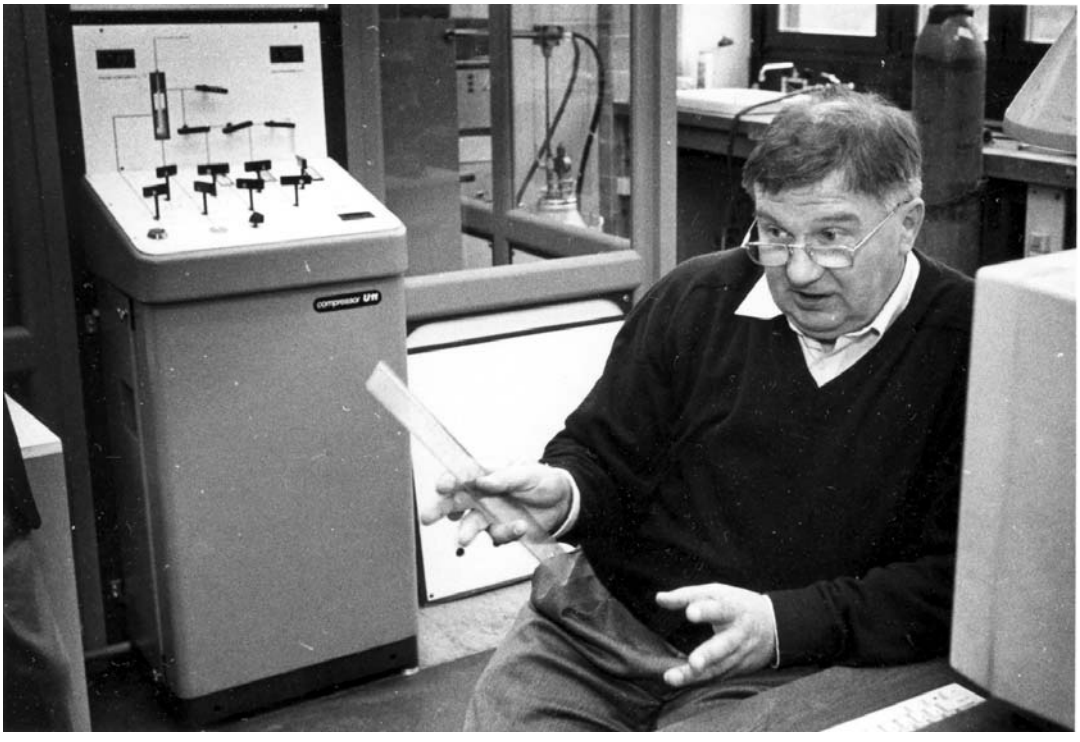
Познань. Университет им. А. Мицкевича.
Физический факультет.
Профессор Г. Шидловский



Познань. Университет им. А. Мицкевича.
Физический факультет.
Доктор С. Мельцарек с «продукцией»
лаборатории физики кристаллов



Познань. Университет им. А. Мицкевича. Физический факультет.
В лаборатории физики высоких давлений К. Холдерна-Натканец



Познань. Университет им. А. Мицкевича. Физический факультет.
Лаборатория радиоспектроскопии. О работе спектрометра на основе
ядерно-магнитного резонанса рассказывает С. Левицкий



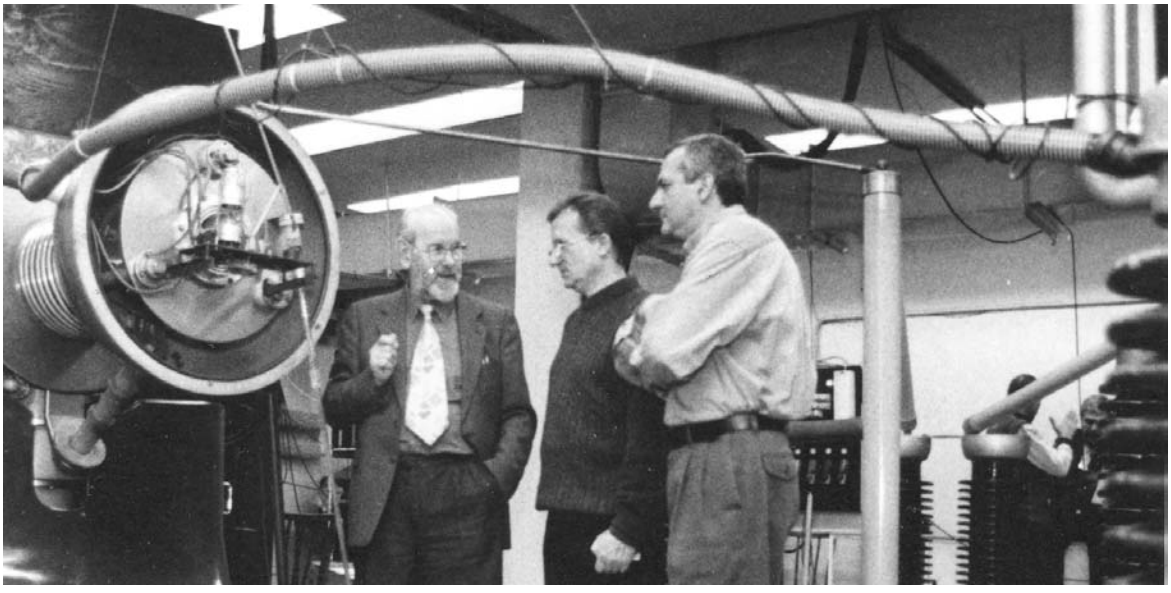
Лодзинский университет. Факультет физики и химии.
Группа физиков, сотрудничающих с учеными ОИЯИ



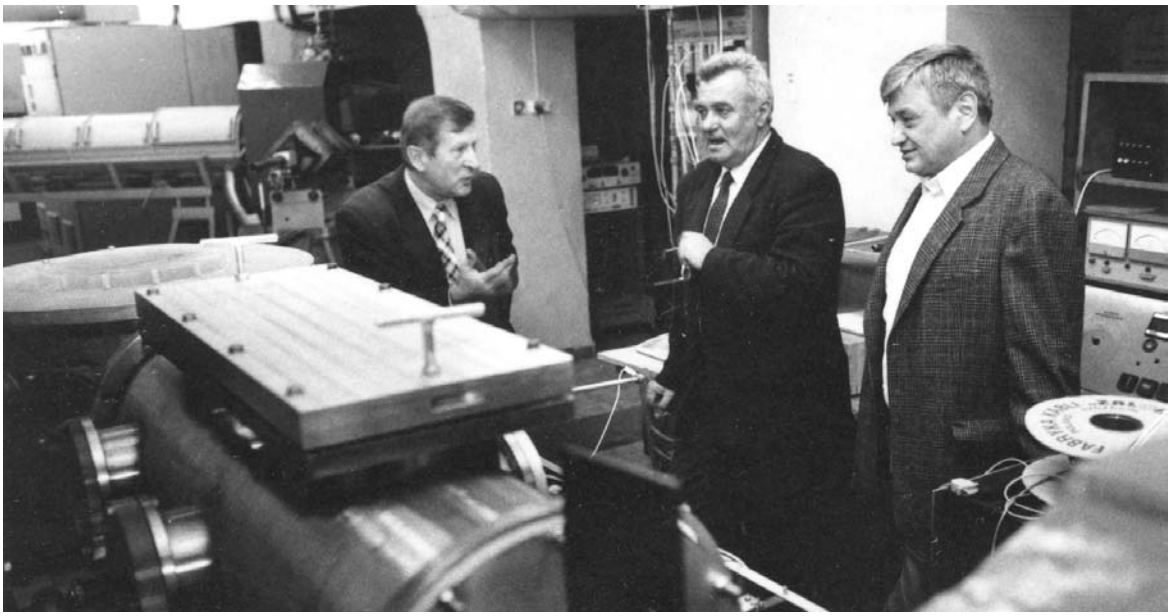
Лодзинский университет.
Факультет физики и химии.
Профессор М. Стемпинский
и П. Шаланьский ведут наладку
детектора для спектрометра
заряженных частиц
и осколков деления



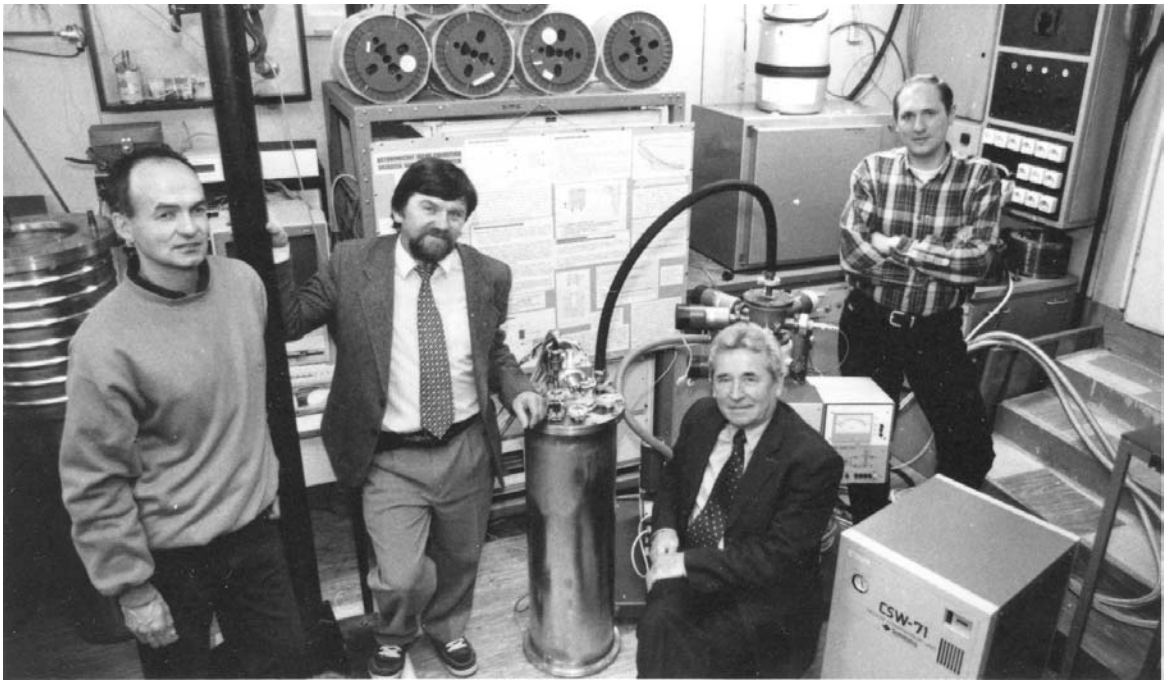
Лодзинский университет. Факультет физики и химии.
Выступает директор Института физики профессор Я. Рэмбелиньский



Лодзинский университет. Факультет физики и химии. В лаборатории
нейтронной спектрометрии профессор М. Пшитула, К. Микульский и И. Анджеевский



Люблин. Институт физики Университета им. М. Склодовской-Кюри.
В лаборатории ионной имплантации декан факультета математики и физики
профессор М. Будзинский, профессор Д. Мончка и А. Лятушиньский



Люблин. Политехнический институт. Отдел высокотемпературной сверхпроводимости.
На установке по получению высокосильных магнитных полей с применением сверхпроводимости
С. Козак, Г. Малиновский, Т. Янковский и Г. Войташевич



Люблин. Институт физики
Университета им. М. Склодовской-Кюри.
Директор института профессор М. Залужный



Люблин. Институт физики
Университета им. М. Склодовской-Кюри.
На установке для позитронной аннигиляции
профессор Т. Говорек, работавший
в Дубне в 1957 году



Люблин. Институт
физики Университета
им. М. Склодовской-Кюри.
Физики-теоретики супруги
Кшиштоф и Божена Поморские



Люблин. Институт физики Университета им. М. Склодовской-Кюри.
Памятник Марии Склодовской-Кюри

ПОЛЬША–ОИЯИ: ВЕХИ СОТРУДНИЧЕСТВА*

А.Н.Сисакян

вице-директор ОИЯИ

Глубокоуважаемые коллеги!

Позвольте мне открыть заседание Координационного комитета «Польша в ОИЯИ» и в качестве вступительного слова дать краткую справку в цифрах о сотрудничестве ОИЯИ с научными центрами Республики Польша.

Республика Польша всегда играла значительную роль в научной и организационной деятельности Объединенного института ядерных исследований. Многие польские физики старшего поколения плодотворно работали в Институте и способствовали становлению его научных направлений. В первые годы существования ОИЯИ в состав Ученого совета Института входили такие крупные польские ученые, как М.Даныш, Л.Инфельд, Г.Неводничанский, А.Солтан. В разное время руководящие посты в ОИЯИ и его лабораториях занимали известные ученые и организаторы науки М.Даныш, А.Хрынкевич, А.Будзановский, Е.Бартке, М.Совинский, Э.Капусцик, З.Стругальский, И.Натканец и др. Большое влияние на формирование научных программ ОИЯИ также оказали Р.Сосновский, Е.Яник, К.Рыбицкий, П.Зелинский и др.

И сегодня польские ученые активно участвуют в научной программе ОИЯИ. В табл.1 приведены данные о количестве польских сотрудников, работающих в Институте на контрактной основе, за последние 7 лет.

Таблица 1

Лаборатория	Годы						
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
ЛВЭ	3	3	3	3	5	3	1
ЛЯП	2	2	2	2	3	4	3
ЛНФ	6	7	8	10	10	9	8
ЛЯР	4	6	6	6	5	6	6
ЛИТ					2	1	1
ЛТФ							1
Управление			1	1	1	1	1
ВСЕГО	15	18	20	22	26	24	21

*Вступительное слово на Координационном совещании по сотрудничеству ОИЯИ с научными центрами Республики Польша 20 января 2001 г. Все последующие доклады сделаны на данном заседании.

В целях дальнейшего развития, поиска новых форм сотрудничества польских научных центров с ОИЯИ по инициативе дирекции Института, председателя ГКАЭ РП профессора Е. Неводничанского и Полномочного Представителя правительства Польши академика А. Хрынкевича была образована соответствующая комиссия, которая очень эффективно работала в последние годы.

Увеличивается количество взаимных краткосрочных командировок, данные по которым приведены в табл.2.

Таблица 2

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Прием в ОИЯИ	62	73	53	90	85	70	98	108	137
Командировки в Польшу	45	113	129	133	162	105	105	143	124

В 70–80-е годы как ведущие, так и молодые специалисты ОИЯИ регулярно принимали участие в качестве лекторов и слушателей в популярных тогда школах по физике в Миколайках и Закопане. И в настоящее время международные школы и конференции, проводимые в Польше, привлекают внимание сотрудников ОИЯИ. Традиционным стало участие дубненских ученых в международных школах по физике во Вроцлаве, семинарах по исследованию нейтронного рассеяния в конденсированных средах в Познани. В 2000 г. 18 специалистов ОИЯИ приняли участие в 15 конференциях, школах, совещаниях, проходивших в Польше. В Польше не раз проводились совещания ОИЯИ. Так, в 1990 г. в Варшаве был проведен XIV Международный симпозиум по ядерной электронике, а в 1997 и 1999 г. в Познани — рабочие совещания по лазерной спектроскопии на пучках радиоактивных ядер (следующее совещание в этой серии также планируется провести в Познани в 2001 г.). В 1993 г. в Закопане состоялась традиционная Европейская (ЦЕРН–ОИЯИ) школа по физике высоких энергий.

Научно-техническое сотрудничество

ОИЯИ тесно сотрудничает со многими польскими научными центрами. Сегодня это свыше 35 научных организаций, а также образовательных центров и университетов Польши.

Сотрудничество ведется по 28 научным темам, охватывающим все научные направления деятельности ОИЯИ:

Теоретическая физика	по 3 темам
Физика элементарных частиц	по 4 темам
Релятивистская ядерная физика	по 7 темам
Физика тяжелых ионов	по 2 темам
Физика низких и промежуточных энергий	по 3 темам
Нейтронная ядерная физика	по 1 теме
Физика конденсированных сред	по 4 темам
Радиационные и радиобиологические исследования	по 2 темам
Сети, компьютинг, вычислительная физика	по 2 темам
Образовательная программа	по 1 теме

Наиболее активны научные контакты с Институтом ядерной физики имени Г. Неводничанского и Институтом физики Ягеллонского университета в Кракове, Варшавским университетом, Институтом ядерных проблем в Варшаве, Институтом атомной энергии и Институтом проблем ядра имени А. Солтана в Сверке, Лодзинским университетом. Наиболее активные партнеры представлены в табл.3.

Таблица 3

ИЯФ (Краков) — Институт ядерной физики им. Г. Неводничанского	По 15 темам
ИЯП (Варшава) — Институт ядерных проблем им. А. Солтана	По 8 темам
ВУ (Варшава) — Варшавский университет	По 5 темам
ВрУ (Вроцлав) — Вроцлавский университет	По 5 темам
ИФ ЯУ (Краков) — Институт физики Ягеллонского университета	По 5 темам
ИЭФ ВУ (Варшава) — Институт экспериментальной физики ВУ	По 4 темам
ИЯХиТ (Варшава) — Институт ядерной химии и техники	По 4 темам
ИЯП (Сверк) — Институт ядерных проблем им. А. Солтана	По 4 темам

Протоколы о выполнении совместных научно-исследовательских работ

В настоящее время действуют 45 протоколов, которые заключены с 5 лабораториями ОИЯИ (ЛВЭ, ЛНФ, ЛЯП, ЛТФ, ЛЯР) и охватывают 8 направлений научных исследований, проводимых в ОИЯИ.

Таблица 4

Направления исследований	Количество протоколов
Теоретическая физика	2
Физика элементарных частиц	2
Релятивистская ядерная физика	5
Физика тяжелых ионов	9
Физика низких и промежуточных энергий	9
Нейтронная ядерная физика	5
Физика конденсированных сред	11
Радиационные и радиобиологические исследования	2

В целом, как вы видите, наше сотрудничество развивается позитивно и плодотворно. Мы надеемся, что прошедшее заседание круглого стола и сегодняшнее заседание Координационной комиссии дадут новый импульс дальнейшему сотрудничеству ОИЯИ с научными и образовательными центрами Республики Польша.

Благодарю вас.

НУКЛОТРОН: СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

А.Д.Коваленко

Лаборатория высоких энергий ОИЯИ

1. Вводные замечания, состояние дел

Нуклотрон — сверхпроводящий синхротрон, основанный на уникальной технологии быстроциклирующих СП-магнитов. Создание нуклотрона как базовой установки для исследований в области релятивистской ядерной физики инициировано академиком А.М.Балдиным, и до настоящего времени работы ведутся под его научным руководством. Коллективом специалистов ЛВЭ выполнены уникальные разработки, решен комплекс проблем, связанных с созданием сверхпроводящих магнитных систем нового типа. Основные узлы и элементы нуклотрона (фрагмент его кольца показан на рис. 1) изготовлены в ОП ОИЯИ и ЛВЭ. Опыт разработки быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов и магнитных систем синхротронов, накопленный в ЛВЭ ОИЯИ, востребован: в прошедшем году начаты совместные с GSI работы по быстроциклирующим сверхпроводящим магнитам для будущего синхро- трона SIS200 в Дармштадте.

За период с марта 1993 по январь 2001 г. состоялись 18 сеансов работы нуклотрона суммарной продолжительностью 4920 часов. При этом на охлаждение кольца затрачено 1580 ч, на отладку систем ускорителя и настройку с пучком — 2430 ч, на физические эксперименты — 910 ч. Главным фактором, определяющим суммарную годовую продолжительность сеансов на ускорителе, было и остается финансирование.

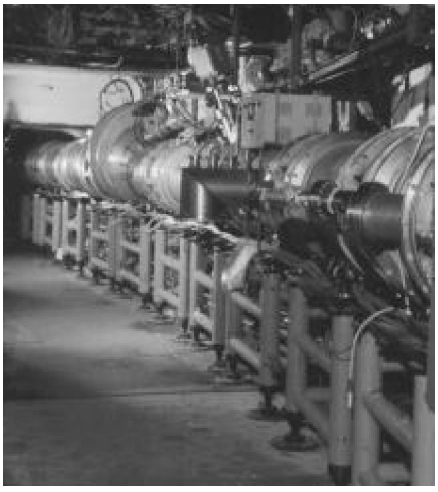


Рис. 1.

Целевое выделение средств на базовые установки дирекцией ОИЯИ в 1999–2000 гг. позволило завершить в прошедшем году принципиальные этапы работ по вводу в действие системы медленного вывода пучка и реализации «безазотного» режима работы гелиевого рефрижератора системы охлаждения. Таким образом, обеспечены новые возможности для использования

пучков нуклотрона и совершенствования его параметров. Это создает также благоприятную основу и для развития научно-технического сотрудничества с институтами Польши, возможные направления которого представлены в данном сообщении. Основные параметры нуклотрона (проектные и достигнутые) приведены в таблице.

Параметры	Проектные	Достигнутые
Ускоряемые частицы	p,...,U	$p, d, \alpha, {}^{12}C, {}^{84}Kr$
Максимальная энергия, ГэВ/нуклон	$6(A/Z=2)$	4,1
Магнитное поле, Тл	2,0	1,5
Интенсивности пучков (част./цикл)		
p	$2\cdot10^{11}$	$2{,}4\cdot10^{10}$
d	$2\cdot10^{11}$	$2\cdot10^{10}$
α	$5\cdot10^{9}$	$8\cdot10^{8}$
C	$1\cdot10^{10}$	$6{,}5\cdot10^{8}$
Эффективность вывода частиц, %	95	60–70
Длительность стола магнитного поля, с	10	$10(W=0{,}2$ ГэВ/нукл.) $5(W=2{,}2$ ГэВ/нукл.)
Частота циклов, Гц	0,5	0,2

Программа совершенствования и развития нуклотрона включает в себя полный перечень работ, планируемый на ближайшие 2–3 года. Однако регламент данного сообщения позволяет только прокомментировать отдельные вопросы.

2. Ближайшие перспективы

Первоприоритетной задачей по совершенствованию нуклотрона в 2001 г. будет повышение интенсивности ускоренных пучков за счет уменьшения потерь частиц на всех этапах от инжекции до вывода. Для решения этой задачи выделено необходимое время в предстоящих сеансах, разработаны и будут введены в действие новые средства диагностики пучков, локализации (пространственной и временной) потерь частиц в кольце ускорителя и др. Ожидаемый результат — уменьшение потерь частиц в 5–10 раз. Отметим, что это имеет принципиальное значение для получения на нуклотроне пучков поляризованных дейтронов с необходимой для ряда физических экспериментов интенсивностью.

Практическая возможность предоставления большего времени для исследований по программе совершенствования параметров нуклотрона появилась в связи с проведенной в 2000 г. модернизацией криогенных гелиевых установок КГУ-1600/4,5, осуществляющих охлаждение его магнитной системы до рабочей температуры 4,5 К. В результате достигнуто снижение уровня потребления

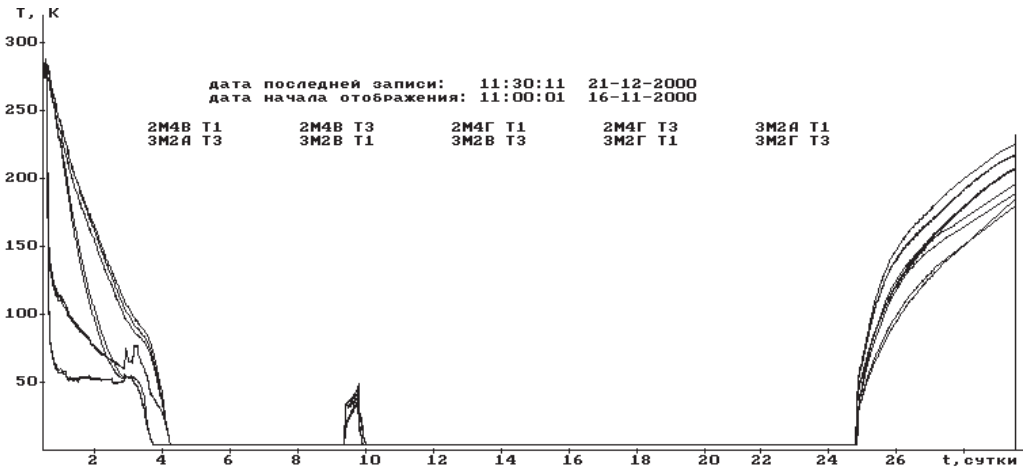


Рис. 2. Температура кольца нуклотрона в 18-м сеансе

жидкого азота с 14 до 8,3 тонн в сутки, что обеспечивается имеющимися мощностями Института по производству жидкого азота с учетом потребностей других пользователей. Тем самым снято имевшее место на протяжении всего предшествовавшего периода технико-экономическое ограничение на продолжительность сеансов работы нуклотрона.

Работы по повышению экономичности системы охлаждения нуклотрона продолжаются, и мы планируем уже в предстоящем сеансе снизить уровень потребления жидкого азота еще не менее чем в 2 раза. После проведения этих работ будет экономически целесообразно реже отеплять магнитную систему нуклотрона до 300 К, а поддерживать ее в случае коротких промежутков между сеансами при температуре жидкого азота — 80 К. Представленный на рис. 2 график изменения температуры кольца нуклотрона демонстрирует опытную проверку такого режима.

Охлаждение нуклотрона, имеющего «холодную массу» около 80 тонн, от температуры окружающей среды до 4,5 К производится в среднем за 90–100 часов, и при этом расходуется 80–90 тонн жидкого азота. Как видно из рис. 2, выход нуклотрона на рабочий режим в случае старта с $T = 50–80$ К осуществлен за 14 часов, и при этом дополнительного расхода жидкого азота не требуется. Таким образом, поддержание кольца нуклотрона при $T = 80$ К в течение трех недель будет экономически более выгодным, чем цикл его охлаждения от $T = 300$ К. Такие паузы в сеансах целесообразны также и с точки зрения отдыха эксплуатационного персонала, дефицит которого мы испытываем, и подготовки новых физических экспериментов, требующих перестановки оборудования на

каналах пучков и перестройки инжекционного комплекса при переходе на другой сорт частиц.

3. Развитие технологии СП-магнитов, бустер нуклотрона

ЛВЭ ОИЯИ является лидером в разработке и создании миниатюрных экономичных сверхпроводящих магнитов. Технологическая база для производства сверхпроводящего кабеля различных конфигураций, обмоток СП-магнитов, опыт разработки систем криостатирования, источников питания, магнитных, температурных и криофизических измерений позволяют эффективно решать задачи разработки и испытаний криогенно-магнитных систем для новых ускорителей различного назначения. Особо следует отметить имеющуюся в лаборатории базу для производства жидкого гелия и холода на уровне 4,5 К.

Одна из проблем, решаемых в настоящее время, — это создание быстроциклирующих СП-магнитов, более эффективных и экономичных по сравнению с магнитами нуклотрона для синхротрона-бустера нуклотрона на энергию ядер 250–500 МэВ/нуклон и проектируемого в GSI (Дармштадт) высокоинтенсивного сверхпроводящего синхротрона SIS 50/200 ($BR = 50 \div 200$). Создание бустера позволит повысить импульсную интенсивность пучков в нуклотроне в 10–50 раз. Особо необходимо подчеркнуть значение бустера для повышения интенсивности пучков поляризованных дейтронов.

Проработаны несколько вариантов размещения новой установки в существующих зданиях ускорительного комплекса ЛВЭ. Один из наиболее приемлемых показан на рис. 3. В рассматриваемом варианте периметр кольца ускорителя равен 83 м, что составляет одну треть периметра нуклотрона. Магнитная структура состоит из 32 дипольных и 24 квадрупольных сверхпроводящих быстроциклирующих магнитов ($f_n = 1$ Гц). Максимальная величина индукции магнитного поля в апертуре диполей, имеющей размеры 100×160 мм, вертикальный и горизонтальный соответственно, — 1,8 Тл. При этом энергия ускоренных ядер с отношением заряда к массе $Z/A = 0{,}5$ составит 500 МэВ/нуклон. Отметим, что несмотря на достаточно большую апертуру магнита, выбор которой обусловлен необходимостью осуществления многооборотной инжекции частиц, наружный диаметр криостата не увеличивается по сравнению с нуклотроном. Кроме того, использование идеи тепловой развязки сверхпроводящей обмотки от стального ярма, формирующего магнитное поле, снижает тепловые нагрузки на температурном уровне $T = 4{,}5$ К более чем в 2 раза. Это уже подтверждено первыми стендовыми испытаниями. Для охлаждения бустера не требуется дополнительно создавать криогенное обеспечение — достаточно имеющихся возможностей нуклотрона.

Использование имеющейся в лаборатории и Институте базы, а также ряда новых подходов и практического опыта, полученного при эксплуатации нуклотрона, гарантирует возможность реализации проекта в короткие сроки при мини-

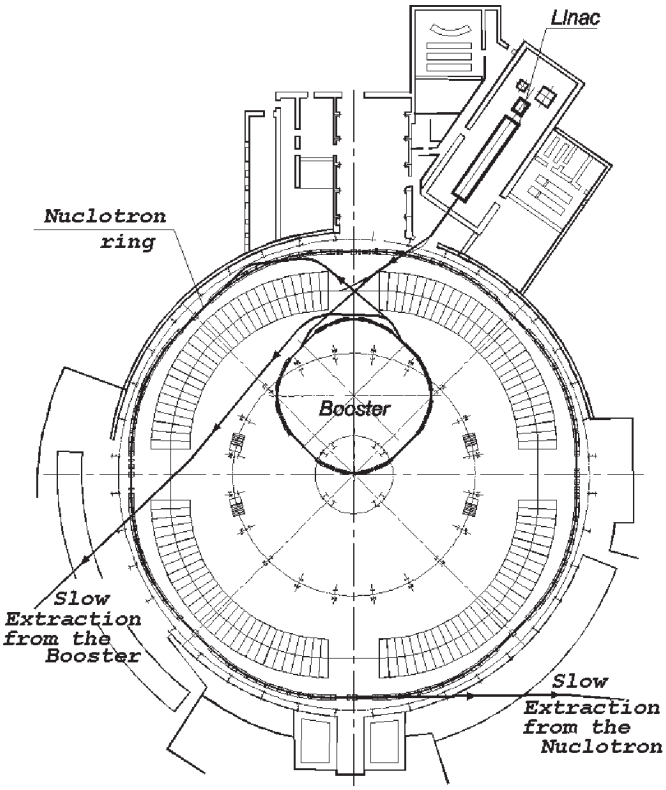


Рис. 3. Размещение бустера в здании синхрофазотрона

мальных затратах и на уровне, превышающем мировые достижения в этой области.

4. Возможные направления развития сотрудничества с институтами Польши

Нам представляется, что сотрудничество польских физиков и специалистов с ЛВЭ может успешно развиваться по следующим направлениям:

— подготовка и проведение экспериментов на пучках нуклотрона;

— совершенствование и развитие ускорительного комплекса нуклотрона;

— разработка вопросов создания сверхпроводящего быстроциклирующего бустера нуклотрона и развитие технологии экономичных сверхпроводящих магнитов.

В рамках каждого из этих направлений существует программа конкретных работ, экспериментов, исследований. В частности, совершенствование ускоритель-

ного комплекса нуклотрона включает в себя не только уменьшение потерь частиц в ускорителе, но и:

— развитие источников многозарядных ионов (лазерный, электронно-лучевой, поляризованных дейтронов);

— совершенствование аппаратуры управления, диагностики пучков и контроля параметров систем;

— создание прецизионных программируемых источников питания СП-магнитов, систем защиты СП-магнитных систем и эвакуации энергии;

— развитие методов и систем вывода пучков из сверхпроводящих синхротронов, в том числе с использованием изогнутых монокристаллов вольфрама;

— повышение эффективности и надежности криогенного обеспечения и др.;

— исследование динамики пучков в нуклотроне;

— источники многозарядных ионов (лазерный, электронно-лучевой, поляризованных дейтронов);

— аппаратура управления, диагностики пучков и контроля параметров систем;

— прецизионные, управляемые от ЭВМ источники питания СП-магнитов, системы защиты и эвакуации энергии;

— повышение эффективности криогенного обеспечения.

Естественно, и этот перечень далеко не исчерпывает все имеющиеся постановки задач для совместных работ.

УСКОРИТЕЛЬ И РЕАКТОР

И.А.Шелаев, А.М.Балдин, А.И.Малахов, Э.-Й.Лангрок

Лаборатория высоких энергий ОИЯИ

1. Введение

Исследования, нацеленные на использование искусственно генерируемых нейтронных пучков для ядерных энергетических реакторов, имеют долгую историю [1,2]. В последнее время предложение об использовании тория вместо урана [3] оживило научный интерес к этой задаче. В частности, в последние годы прошла серия научных конференций по этой проблематике. Двумя группами ученых были опубликованы первые экспериментальные результаты [5–8]. В дополнение стоит отметить работу [9], содержащую прогноз по развитию этого направления.

Концепция подкритичного реактора, управляемого ускорителем (ADR), с электронной управляющей системой представляется наиболее надежным и гибким устройством для генерации электроэнергии при использовании урана и тория при подавленном шлейфе радиоактивных отходов [10]. Такое устройство превращает часть энергии электросети в мощность ускоренного протонного пучка, трансформируемого в поток нейтронов на мишени. Этот поток дает множество актов деления в топливе и освобождает дополнительную тепловую энергию. Коэффициент усиления k зависит от степени подкритичности реактора, и различные оценки показывают, что его значение находится в пределах 25–30 при энергии протонов 0,3–1 ГэВ [11,12]. Главная трудность при практическом создании такого энергетического усилителя состоит в отсутствии ускорителя, способного эффективно создавать пучки желаемой мощности (100–120 МВт) при приемлемой стоимости. Существует достаточно много предложений, которые предусматривают для этой цели линейный ускоритель — теплый или сверхпроводящий (СП). Ускоритель такого типа может обеспечить пучки требуемой интенсивности, но только в импульсной моде. Более того, линейный ускоритель функционирует в диапазоне очень высоких частот (300–500 МГц), для которых соответствующее оборудование слишком дорого, а его размеры очень велики (около 1 км).

Циклотрон с разделенными орбитами [13] с магнитом на основе сверхпроводимости и теплыми высокочастотными резонаторами представляется наиболее привлекательным. В таком ускорителе может быть осуществлено десять пучков. Это обстоятельство существенно уменьшает проблемы ограничения

интенсивности пучка из-за объемного заряда в ускорителе. Дополнительное расщепление каждого из десяти ускоренных пучков позволяет решить проблему охлаждения мишени при полной мощности в 100 МВт и в то же время получить достаточно однородное поле нейтронов в реакторе. Включение ускорителя в промышленный ядерный реактор рассматривается на примере российского реактора РМБК-100. Одновременно существует возможность раздельного использования быстрых нейтронов, сформированных в мишени, и тепловых, рожденных после охлаждения в активной зоне реактора. Итак, обсуждается новая концепция «два в одном» для реактора на быстрых и медленных нейтронах на единой установке.

2. Энергетический баланс

Упрощенная схема ADR представлена на рис.1 с указанием основных потоков энергии в нем. Предположим, что пучки протонов, имеющие мощность P_b, дают тепловую мощность P_h благодаря энергии деления ядерного топлива в активной зоне реактора после попадания на мишень:

$$P_h = kP_b, \tag{1}$$

где k — определенный выше коэффициент усиления энергии.Тепловая мощность трансформируется в электрическую P_e энергетической установкой реактора с эффективностью η_e. Следовательно,

$$P_e = k\eta_e P_b. \tag{2}$$

Часть электрической энергии возвращается в ускоритель, другая направляется потребителю:

$$P_e = P_a + P_u. \tag{3}$$

Энергия, потребляемая ускорителем, может быть разделена на две части: мощность P_s для ускорителя без пучка (вакуумная система, охлаждаемые магниты и резонаторы, управляющая система и т.п.) и мощность P_g, требуемая для питания высокочастотного генератора. Здесь мощность промышленной сети должна быть преобразована в высокочастотную мощность P_f. Получаем

$$P_a = P_b + P_s = \frac{P_f}{\eta_g} + P_s \tag{4}$$

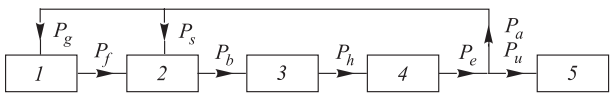


Рис. 1. Схема ADR: *1* — высокочастотный генератор, *2* — ускоритель, *3* — реактор, *4* — электростанция, *5* — потребитель

при эффективности преобразования η_g.

Высокочастотная мощность направляется в резонаторы для возбуждения ускоряющего электрического поля и ускорения пучка, и тогда справедливо следующее выражение:

$$P_f = P_b \eta_b, \tag{5}$$

где η_b — эффективность передачи энергии от высокочастотного генератора пучку. Объединяя выражения (1)–(5), получаем

$$P_u + P_s = (k\eta_e - 1 / \eta_g \eta_b) P_b. \tag{6}$$

Очевидно, что последнее выражение имеет смысл, если выражение в скобках положительно, т.е. при условии, что

$$k\eta_e \eta_g \eta_b > 1. \tag{7}$$

Неравенство (7) определяет условие работы реактора, управляемого ускорителем, без какого-либо энергопотребления из внешних источников.

В неравенстве (7) экспериментально определены значения двух эффективностей η_e и η_g, а именно: $\eta_e = 0,3$ и значение η_g находится в пределах 0,65–0,7, если высокочастотный генератор, работающий на частоте 30–40 МГц, построен на современных мощных тетродах. Значит, можно варьировать только два параметра в уравнении (7) — k и η_b.

Значение k зависит от подкритичности реактора. Следовательно, тип ускорителя определяет только η_b в неравенстве (7). Эффективность η_b может быть представлена как

$$\eta_b = \frac{P_b}{P_f} = \frac{P_b}{P_b + P_c}, \tag{8}$$

где P_c — мощность, рассеиваемая в резонаторах при отсутствующем пучке и при возбуждении на нем ускоряющего напряжения.

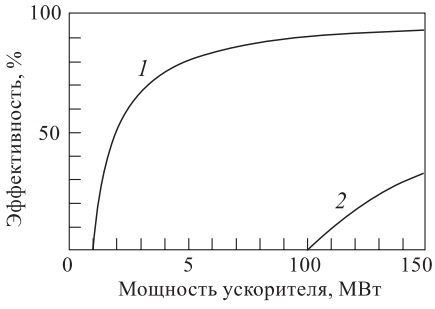


Рис. 2

На рис.2 показаны эффективности η_b для двух ускорителей: кривая *1* — для циклотрона, имеющего 5 МВт мощности для возбуждения 56 высокочастотных резонаторов до 0,5 МВ каждый, как принято в настоящем проекте, и кривая *2* — для линейного ускорителя мощностью 100 МВт. Как видно, в циклотроне η_b больше 0,95 при 100-МВт пучке, в то время как в линейном ускорителе значения η_b достигают 0,75 при

мощности пучка 400 МВт. Эта разница объясняется многократным пересечением пучком ускоряющих промежутков или высокочастотных резонаторов.

3. Ускоритель

3.1. Выбор схемы и связанные с ним проблемы. Принимая во внимание все вышеотмеченные условия, можем сформулировать главные требования к ускорителю для управления реактором:

а) он должен обеспечивать протонные пучки с током 100 мА или выше при энергии 1 ГэВ в режиме непрерывного или квазинепрерывного тока;

б) он должен иметь наивысшую эффективность η_b передачи высокочастотной мощности к пучку;

в) он должен иметь наивысшую эффективность преобразования мощности сети в высокочастотную;

г) он должен иметь наименьшую стоимость высокочастотного оборудования и его работы;

д) он должен быть компактным, надежным, гибким в управлении и эксплуатации.

Всем этим требованиям удовлетворяет циклотрон с разделенными орбитами (ЦРО) на основе сверхпроводящей магнитной системы. Система, оборудованная миниатюрными сверхпроводящими магнитами с ярмом из железа, была разработана в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Полная схема ADR показана на рис.3. Ускоритель имеет три ступени. На первой протоны ускоряются до 30 МэВ на теплом многодуантном инжекторе ЦРО. Используется 10 машин такого типа, каждая обеспечивает ток 10 мА. Затем эти 10 пучков, инжектированных в бустерный ЦРО со сверхпроводящей

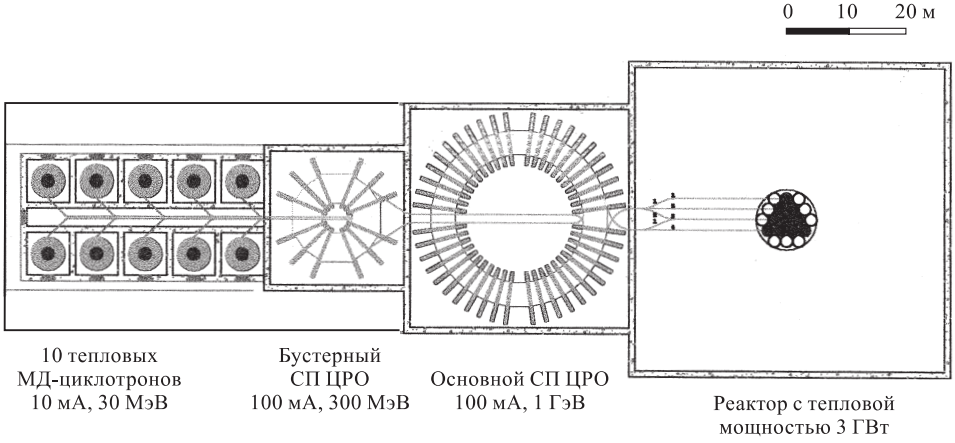


Рис. 3

магнитной системой, ускоряются 12 теплыми высокочастотными резонаторами до 300 МэВ. Траектория пучка заворачивается сверхпроводящими дипольными магнитами и фокусируется сверхпроводящими квадрупольными линзами. Вместе они формируют незамкнутую плоскую спиральную синхротронную магнитную дорожку, а радиальные шаги на дорожке определяются ускоряющим напряжением. Пучок встречает это ускоряющее напряжение, пересекая ускоряющие промежутки в резонаторах. Миниатюрные магниты позволяют поместить несколько дорожек друг над другом, и, таким образом, магнитная структура бустерного ЦРО имеет 10 этажей.

Та же десятиэтажная магнитная структура используется в главном ЦРО, в котором 44 теплых резонатора дают прирост радиуса в 5 см на оборот на последнем радиусе. Высокочастотные структуры всех трех ускорителей работают на одинаковой частоте 3,766 МГц, что решает проблему временного согласования пучков.

После вывода из главного ЦРО 10 пучков расщепляются на 20 отдельных пучков и направляются к активной зоне реактора по сверхпроводящим транспортным линиям. Гигантская мощность ускоренного пучка создает немало проблем и среди них две взаимосвязанные: как получить необходимую мощность пучка и как использовать его на мишени.

Число частиц в интенсивном пучке ограничено эффектом объемного заряда. На практике стабильное и надежное ускорение на циклотронах осуществляется при токе, равном 3–5 мА [15]. Поэтому решение проблемы состоит в разбиении пучка требуемой интенсивности на несколько пучков меньшей интенсивности, как и делается в нашем случае. Однако такое решение слишком дорого, так как означает, что требуется построить несколько схожих ускорителей. Для уменьшения стоимости ADR некоторые системы должны быть объединены. Две из них в обсуждаемой схеме одинаковы: ускоряющие резонаторы и криостаты с жидким гелием. Потребление энергии обеими системами является наивысшим.

Вторая проблема использования пучка имеет то же решение: мощность пучка, попадающего на мишень, должна быть меньше величины, ведущей к разрушению мишени. Поэтому каждый пучок после ускорения дополнительно расщепляется на два отдельных пучка, направляемых на разные мишени. В то же время такая работа позволяет получить более однородное поле нейтронов внутри реактора и улучшить его функционирование.

Эффективность ADR определяется, в первую очередь, высокочастотным преобразователем и его эффективностью. Многоступенчатый высокочастотный усилитель на жестких лампах с внешним возбуждением при мощности 2–2,5 МВт последнего каскада усиления выглядит наиболее приемлемо для работы в непрерывном или квазинепрерывном режиме. Тетроды фирмы «Thompson Tube Electronique» типа TH 518 (1,2 МВт) и TH 525 (1,7 МВт) подходят для этой цели.

Наивысшая эффективность означает следующее: последняя ступень высокочастотного усилителя помещается вблизи возбуждаемого им резонатора, что практически избавляет схему от потерь энергии. Все это приводит к тому, что полное число резонаторов и высокочастотных усилителей может быть не менее 50 для ускорения пучка мощностью 100 МВт. В нашем случае мы выбрали 56 в бустерном и основном ЦРО.

Размеры сечения сверхпроводящих магнитов обоих ЦРО одинаковы. Они отличаются только по длине. Это позволяет организовать массовое производство магнитов и снизить их стоимость.

3.2. Инжекторный ЦРО. Инжекторный ЦРО является теплым изохронным циклотроном, так как трудно избежать потерь пучка на нескольких первых оборотах, на которых формируется фазовая структура пучка. Схема этой машины приведена на рис.4, а ее главные параметры — в табл.1. Циклотрон работает на шестой гармонике частоты протонов и имеет шесть дуантов, удерживаемых одним вертикальным штоком, который является внутренней линией четвертьволнового коаксиального резонатора. Диаметр резонатора достаточно велик (внутренний — 2,4, внешний — 4,6 м). Как следствие, он обладает очень высокой добротностью — около 20000, как показали предварительные расчеты и измерения на модели. Благодаря своей добротности он требует 15 кВт мощности, чтобы возбудить напряжение с амплитудой 125 кВ на всех шести дуантах. При таком ускоряющем напряжении синхронные протоны получают приращение энергии 1,5 МэВ за оборот и достигают конечной энергии в 30 МэВ за 20 оборотов.

Магнитная система такого многодуантного циклотрона включает шесть секторных магнитов с радиальной вариацией расстояния между полюсами, обеспечивающими поле 0,78 Тл на траектории частиц и в шесть раз меньшее значение вне траектории. Такая радиальная вариация снижает обратный поток магнитной индукции приблизительно в четыре раза. Это позволяет существенно уменьшить железное ярмо магнитов и разместить их внутри вакуумной камеры циклотрона.

Пучок инжектируется в магниты с энергией 0,92 МэВ после 7-зазорного «линейного ускорителя», использующего

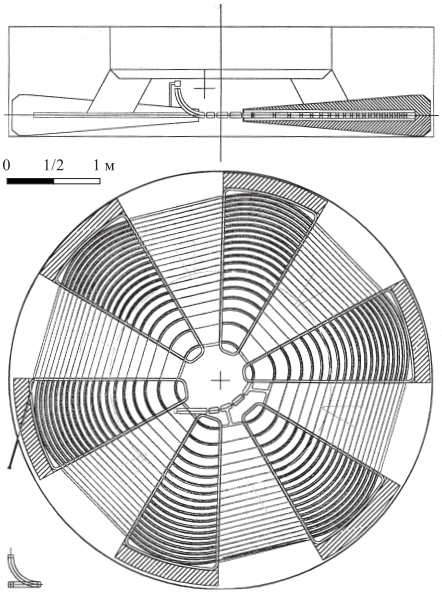


Рис. 4

высокочастотное напряжение дуантной системы. Энергия инжекции дает достаточно места в центре циклотрона, чтобы разместить магниты и дуанты и сохранить зазор между электродами 2,5 см и более и таким образом минимизировать искрение дуантов.

Ионный источник типа дуоплазмотро- на размещен внутри штока высокочастотного резонатора при постоянном потенциале +45 кВ. Атомарные ионы H_1^{+1} (как правило, источник дает 30 % молекулярных ионов водорода) отбираются магнитным масс-сепаратором и направляются в высокочастотный банчер. Ионные импульсы с фазовой длительностью в 5–6° формируются банчером, и фокусировка пучка в дрейфовом промежутке банчера обеспечивается с помощью квадрупольных электростатических линз.

Таблица 1. **Основные параметры инжекторного ЦРО**

Пучок	
Энергия инжекции, МэВ	0,92
Конечная энергия протонов, МэВ	30,10
Интенсивность внешнего пучка, мА	10,00
Конечный радиальный шаг за оборот, см	4,95
Бетатронная частота, радиальная	1,043
вертикальная	1,055
Нормированный эмиттанс, мкм	0,6 π
Магнит	
Радиус инжекции, м	0,343
Конечный радиус, м	2,020
Секторный угол, градус	28,8
Число секторов	6
Магнитное поле, Тл	0,783
Зазор на/вне магнитной дорожке, см	1,0/6,0
Число витков обмотки	8
Ток обмотки, А	815
Сечение проводника, мм	11,5× 13,5
Сопротивление проводника, Ом	0,0928
Масса меди, т	0,240
Масса железного ярма, т	24
Высокочастотная система	
Число дуантов	6
Частота, МГц	34,766
Напряжение на дуантах, кВ	125
Высокочастотная мощность без пучка, кВт	15
Внешний размер высокочастотного резонатора, м	4,6
Масса высокочастотного резонатора, т	2,5

Сбанчерованный пучок, вертикально инжектированный в ЦРО в момент, когда шток находится при максимальном высокочастотном напряжении, встре-

чает первый заземленный электрод, получая энергию, равную амплитуде напряжения на дуантах. Длина этого электрода равна 6 см, и пучок покидает его, когда напряжение на дуантах меняется по фазе на π и ускоряет пучок еще раз. Энергия пучка равна 0,295 МэВ после этих двух ускорений. При этой энергии пучок поворачивается в горизонтальную плоскость ЦРО при помощи электростатического дефлектора. Пять дополнительных ускоряющих промежутков увеличивают энергию пучка до 0,920 МэВ перед инжекцией на магнитную дорожку.

Как показано на рис.4, пучок на этом участке траектории фокусируется и поворачивается квадрупольными электростатическими дефлекторами, размещенными в высокочастотных электродах. Канал динамической инжекции согласован по фокусировке с магнитной системой, в которой вертикальные и горизонтальные бетатронные частоты больше единицы. Радиальный шаг пучка на последнем радиусе (201 см) равен 5 см. Это обеспечивает автоматический вывод пучка с эффективностью 100 % при радиальной ширине магнитной дорожки 2,4 см.

Поля в инжекторном циклотроне линейны на большей части траектории. Поэтому движение частиц сохраняет свой нормированный эмиттанс, равный 7π мкм.

3.3. Инжекторный ЦРО и несколько мишеней. Большой радиальный шаг пучка в многодуантном ЦРО позволяет разместить дополнительные импульсные электростатические дефлекторы в каждом из пяти дуантов. Это позволит использовать машину в качестве нового и весьма эффективного устройства для прикладных целей, например, для производства радиоактивных изотопов для медицины.

В нашем случае имеется возможность вывести из ЦРО одновременно шесть пучков изменяемой интенсивности на шесть различных направлений, с тем чтобы использовать пучки на различных мишенях (рис.5). Мишени функционируют совершенно независимо. Предположим, что ионный источник и высокочастотная система ускорителя работают в квазинепрерывном режиме, т.е. в пульсирующем, с частотой следования 500 Гц, при которой пучок ускоряется периодически в течение 1,5 мс при паузах в 0,5 мс. Это обычный режим работы циклотронов, при котором резко улучшается их стабильность.

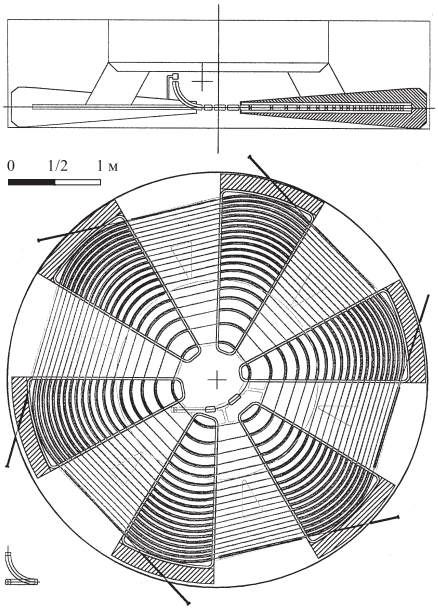


Рис. 5

В этом режиме имеется достаточно времени (0,5 мс), чтобы включить и выключить на- пряжение на дефлекторах без возмущения соседних орбит. Детальные вычисления показывают, что пара отклоняющих электродов под напряжением ± 18 кВ отклоняет пучок на 13 мм. Это выше, чем полуширина магнитной дорожки, и пучок выходит из циклотрона. Затем, изменяя время возбуждения каждого из дефлекторов, можно изменять и время облучения каждой из мишеней. Если мишень содержит разные стабильные изотопы, то быстрые протоны рождают одновременно разные радиоактивные изотопы.

Режим работы на нескольких мишенях уменьшает «мертвое» время использования циклотрона при смене мишеней и снижает в шесть раз расход электроэнергии, потребляемой при работе на одну мишень.

Таким образом, инжекторный ЦРО для работы на нескольких мишенях представляется наиболее эффективным решением для получения пучков протонов низких энергий.

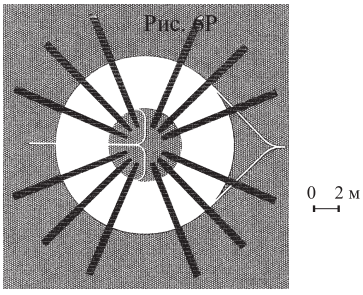


Рис.6

3.4. Бустерный сверхпроводящий ЦРО. После инжекторного циклотрона пучки транспортируются в бустерный ЦРО (рис.6) по каналам транспортировки. Здесь они ускоряются на 8-протонной частотной гармонике до 300 МэВ.

Основные параметры бустерного ЦРО приведены в табл.2. Каждый многодуантный циклотрон находится на разном расстоянии от первого высокочастотного резонатора-бустера. Поэтому пучок согласуется путем установки фазового сдвига между резонатором и высокочастотной системой соответствующей машины.

Бустерный ЦРО имеет 12 высокочастотных резонаторов. Резонаторы выбраны теплыми по двум обстоятельствам: во-первых, создание сверхпроводящей петли связи на 2 МВт представляется проблематичным; во-вторых, высокочастотный усилитель, нагруженный сверхпроводящим резонатором, должен иметь исключительно широкий динамический диапазон выходной мощности для возбуждения резонатора с пучком и без него. Чтобы уменьшить мгновенную загрузку резонаторов в бустерном ЦРО короткими импульсами банчерованного пучка (вычисления показали, что высокочастотная фазовая длина пучка после инжекторного циклотрона равна 5–6°), для пяти пучков выбрано вращение по часовой стрелке, а для других пяти — против нее.

Магнитная система бустера состоит из 16 ФОДО-периодов на оборот пучка. В каждом периоде имеются два сверхпроводящих магнита и две квадрупольные фокусирующие линзы. Два отклоняющих магнита на ФОДО-период выбраны для того, чтобы уменьшить влияние сагитты на горизонтальную апертуру магнита.

Магнит имеет простейшую форму. Все магниты имеют одинаковое значение магнитного поля, равное 1,45 Тл. Поле формируется однослойной сверхпроводящей обмоткой с малой радиальной шириной, равной 2,5 мм, и высоким значением критического тока. В случае массового производства стоимость магнита и линз будет весьма низкой.

Таблица 2. **Основные параметры бустерного сверхпроводящего ЦРО**

Пучок	
Энергия инжекции, МэВ	30,10
Конечная энергия протонов, МэВ	298,22
Число оборотов	42
Общее число пучков	10
Число пучков, вращающихся по часовой стрелке	5
Бетатронная частота, радиальная	3,542
вертикальная	3,561
Полная интенсивность пучка, мА	100
Магнитная система	
Число периодов на оборот	16
Магнитное поле при инжекции, Тл	0,2947
на выходе, Тл	0,3769
Средний радиус при инжекции, м	2,709
на выходе, м	7,147
Число дипольных магнитов на ячейку	2
Поле в дипольном магните, Тл	1,450
Длина дипольного магнита при инжекции, см	10,82
на выходе, см	36,32
Апертура дипольного магнита, мм	25× 25
Размер диполя в поперечном сечении, мм	40× 48
Средняя масса дипольного магнита, кг	2,104
Ампер-витки сверхпроводящей обмотки, кА	28,847
Число витков сверхпроводящей обмотки	26
Ток обмотки, А	1030
Градиент в квадрупольных линзах, Тл/м	65,50
Средняя длина квадрупольных линз, см	2,988
на выводе, см	3,782
Апертура линз, мм	25× 25
Размер линзы в поперечном сечении, мм	40× 40
Средняя масса квадрупольной линзы, кг	0,257
Полная масса магнитной системы, т	32
Высокочастотная система	
Частота обращения протонов, МГц	4,3458
Номер гармоники	8
Число высокочастотных резонаторов	12
Начальный радиус резонатора, м	1,25
Максимальное напряжение на резонаторе, кВ	600
Набор энергии за оборот при инжекции, МэВ	3,675
на выходе, МэВ	6,070

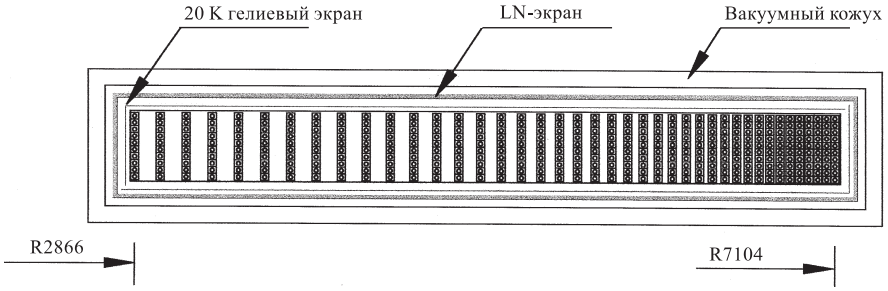


Рис. 7

Радиальный шаг за оборот при инжекции, см	15,29
на выходе, см	4,82
Размер резонатора, м	8,6× 5,0
Ширина резонатора, м	0,58
Мощность возбуждения одного резонатора, кВт	150
Масса резонатора, т	5,23

Угол отклонения в магните и высокочастотная синхронность пучка задаются длиной дорожки в каждом периоде. Эта длина может быть легко и аккуратно найдена путем компьютерного моделирования процесса ускорения. Для этого необходимо знать распределение поля в резонаторах.

Типичным является размещение двух магнитов и двух линз в одной половине периода, формирующей холодную часть. Другая, теплая, часть периода занята ускоряющим промежутком резонатора. Резонаторы отсутствуют в каждой четвертой ячейке, и это место используется для размещения оборудования инжекции пучка, отклонения, управления орбитой и диагностики.

Все сверхпроводящие элементы размещаются в одном криостате (рис.7), охлаждаемом жидким гелием. Каждый четвертый и пятый криостат связываются в единый узел. Оборудование 10-этажной магнитной системы для бустерного ЦРО размещается в общем криостате, и снаружи бустер выглядит как 12 жидко-гелиевых криостатов, разделенных 12 высокочастотными резонаторами, формирующими замкнутое кольцо.

Оценки тепловых потерь криостата показывают, что большинство их приходится на краевые части, в которых холодная вакуумная камера ускорителя смотрит на теплые стенки ускоряющих резонаторов. Тем не менее детальные вычисления показывают, что потери тепла на криостат равны 26 Вт. Это означает примерно 310 Вт на сверхпроводящую систему бустерного ЦРО при температуре жидкого гелия. Значит, нагрузка сети равна 240 кВт, что допустимо по сравнению с полным потреблением энергии в 45 МВт.

Анализ бетатронного движения показал, что горизонтальные и вертикальные бетатронные частоты равны примерно 3,5, а поперечные размеры пучка не превышают 7 мм при любой энергии, кроме сагитты, которая добавляет еще 8 мм.

Проблемы, связанные с высокочастотной системой бустерного ЦРО, такие же, как и для основного ЦРО, и они будут обсуждаться ниже.

3.5. Основной сверхпроводящий ЦРО. В основном сверхпроводящем ЦРО (рис.8) пучок протонов получает дальнейшее ускорение до 1 ГэВ на 12-й гармонике, при этом частота высокочастотного генератора остается той же. Основные параметры этого каскада ускорения приведены в табл.3.

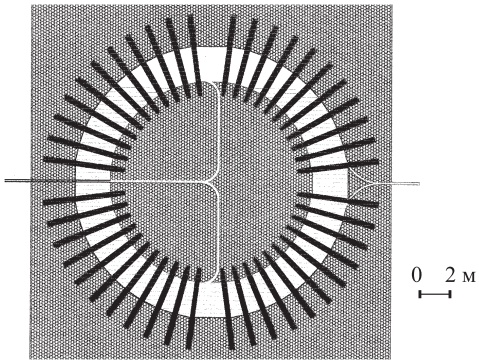


Рис. 8

Как отмечалось выше, высокочастотный резонатор основного ЦРО такой же, как в бустере. Он имеет форму параллелепипеда, как объемный резонатор (рис.9) с простейшей возбуждаемой модой колебаний ТМ-110. Для этой моды необходимо соблюдать следующее условие в так называемом гладком приближении:

$$\frac{4}{\lambda^2} = \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}, \tag{9}$$

где λ — длина волны колебания, a и b — наибольшие стороны параллелепипеда.

Электрическое поле в резонаторе имеет следующие компоненты:

$$E_x = E_0 \sin\frac{\pi x}{a} \sin\frac{\pi y}{b}, \quad E_y = E_z = 0. \tag{10}$$

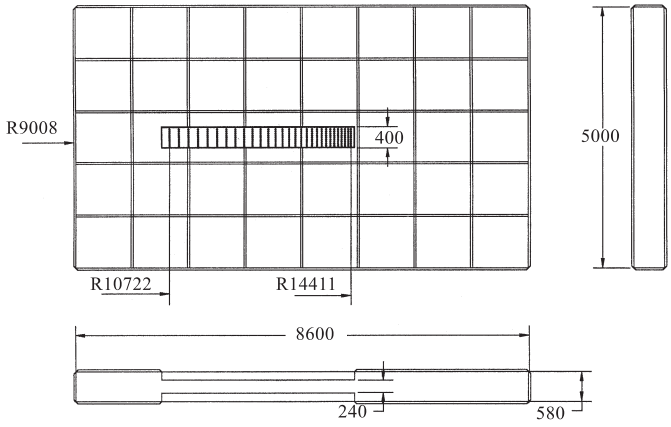


Рис.9

Параметры резонатора приведены в табл.3, и из уравнения (10) можно установить, что компонента E_x остается постоянной с точностью $\pm 3 \cdot 10^{-3}$, в то время как координата y изменяется от 0 до ± 20 см при 10-этажной геометрии.

Чтобы получить в основном ЦРО радиальный шаг в 5 см на оборот на конечном радиусе, по окружности машины почти равномерно размещается 44 резонатора. Для выполнения этого условия магнитная структура главного ЦРО составлена из 24 периодов ФОДО на оборот.

Таблица 3. **Основные параметры бустерного сверхпроводящего ЦРО**

Пучок	
Энергия инжекции, МэВ	298,22
Конечная энергия протонов, МэВ	1000,12
Число оборотов	30
Полное число пучков	10
Число пучков, вращающихся по часовой стрелке	5
Бетатронная частота, радиальная	5,3342
вертикальная	5,3277
Полная интенсивность пучка, мА	100
Магнитная система	
Число ФОДО-периодов на оборот	24
Магнитное поле при инжекции, Тл	0,2512
на выходе, Тл	0,3933
Средний радиус при инжекции, м	10,726
на выходе, м	14,411
Число дипольных магнитов на период	2
Поле в дипольном магните, Тл	1,450
Длина дипольного магнита при инжекции, см	24,23
на выходе, см	51,04
Апертура дипольного магнита, мм	25× 25
Размер диполя в поперечном сечении, мм	40× 48
Средняя масса дипольного магнита, кг	3,360
Ампер-витки сверхпроводящей обмотки, кА	28,847
Число витков сверхпроводящей обмотки	28
Ток обмотки, А	1030
Градиент в квадрупольных линзах, Тл/м	65,50
Длина квадрупольной линзы при инжекции, см	3,80
на выходе, см	5,94
Апертура линз, мм	25× 25
Размер линзы в поперечном сечении, мм	40× 40
Средняя масса квадрупольной линзы, кг	0,370
Полная масса магнитной системы, т	55,33
Высокочастотная система	
Протонная частота, МГц	2,8972
Номер гармоники	12
Число ВЧ-резонаторов	44
Начальный радиус полости резонатора, м	9,008

Максимальное напряжение на резонаторе, кВ	584
Набор энергии за оборот при инжекции, МэВ	15,103
на выходе, МэВ	23,838
Радиальный шаг за оборот при инжекции, см	17,32
на выходе, см	5,54
Размер продольного сечения резонатора, мм	8,6× 5,0
Ширина резонатора, м	0,58
Мощность возбуждения одного резонатора, кВт	140
Масса резонатора, т	5,23

Каждая половина периода включает фокусирующие (или дефокусирующие) линзы, два поворотных диполя того же типа, что и в бустерном ЦРО, а также большой теплый прямой участок, содержащий резонатор. Поэтому можно разместить 48 резонаторов, при этом четыре из них должны быть пропущены для того, чтобы оставить место для установки в кольцо инжекционного и другого дополнительного оборудования.

Протоны движутся от одного резонатора к соседнему в течение четверти высокочастотного цикла. Таким образом, выбирается 90-градусный фазовый сдвиг между соседними резонаторами. Сдвиг выдерживается соответствующим возбуждением высокочастотных усилителей, управляемых развитой системой фазовой и амплитудной настройки.

Из-за недостатка места мы пропустим детальное описание вакуумной системы ускорителя, однако из нашего опыта следует, что давление в вакуумной камере сверхпроводящего ЦРО будет 10^{-8} мм рт.ст. или ниже. Это означает, что потери пучка вследствие рассеяния протонов на атомах остаточного газа будут пренебрежимо малы. То же утверждение справедливо и для потерь другого типа. Более того, потери имеют место в синхротронах при многооборотной инжекции, где пучки ускоряются в течение нескольких секунд и затем исчезают. В обсуждаемом варианте ЦРО для частицы требуется 25 мкс, чтобы пройти от ионного источника до выхода. Этот процесс должен быть назван скорее транспортировкой. Итак, пессимистические оценки потерь пучка дают значение 10^{-9} –10^{-8}. Эти потери могут быть локализованы так называемым методом «бритья пучка», когда гало пучка перехватывается специальным скребком.

После ускорения десять пучков автоматически достигают транспортных линий, связывающих ускоритель и реактор, где каждая линия завершается сверхпроводящим магнитом, заворачивающим пучок на 90° в вертикальной плоскости. Линии дополнены 10 бамп-магнитами, которые расщепляют каждый из пучков на два. Выключение бамп-магнитов происходит тогда, когда пучок полностью отсутствует в канале и, соответственно, не вызывает потери, когда машина работает в квазинепрерывном режиме (см. выше). Расщепление снижает вдвое тепловую нагрузку на мишень.

4. Промышленный энергетический реактор

Ниже, как пример, рассмотрен реактор РМБК-1000 [16]. Конечно, можно рассмотреть и реактор типа ПВР. Предположим, что топливо имеет подкритический массовый состав и само по себе не сгорает. Активная зона реактора показана на рис.10. Она включает в себя примерно 1693 сборки или стержня, вставленных в графитовую колонну размером 250×250 мм. Сборка — это трубка размером 88×4 мм в диаметре. Трубка из нержавеющей стали содержит 13 топливных стержней размером 13,6×0,4 мм в диаметре и длиной 3,5 м. Они заполнены оксидом урана. Две кассеты стержней помещены одна над другой в сборке. Охлаждающая вода идет по свободному пространству сборки под давлением 74 атм и при температуре 284 °С. Начальная загрузка реактора топливом составляет 204 т урана с обогащением 1,8.

Вся активная зона (11,6 м в диаметре и 7 м в высоту) окружена системой биологической защиты. Кроме того, имеется 169 графитовых стержней для управления работой реактора. Начальное обогащение топлива уменьшается при работе реактора. При достижении обогащения, близкого к естественному значению (0,7 %), топливо должно быть заменено из-за затухания цепной реакции. Выгруженное топливо содержит 1,1 % трансурановых элементов и около 4,4 % продуктов деления в смеси с 95 % оксида урана в топливных стержнях. Трансурановая компонента радиоактивных отходов, рожденная в ядерном топливном цикле, сохраняет долговременную радиотоксичность, в то время как продукты деления, которых в четыре раза больше по массе, представляют короткоживущую компоненту радиотоксичности [17].

Общую проблему безопасной энергетики составляет разрушение обеих компонент отходов при сохранении специфики обращения с каждой.

4.1. Охлаждение мишени. Предположим, что представленный выше реактор подвергся модернизации, а именно 19 технологических сборок удалены и вместо них 19 трубок с жидким свинцом или эвтектикой Pb–Bi помещены в активную зону реактора. Каждая трубка, имеющая вакуум в верхней части и жидкий металл в нижней, служит мишенью для пучков протонов. Давление паров металла пренебрежимо мало, если температура не превышает 500 °С (при такой температуре давление паров Bi или Pb менее $1 \cdot 10^{-10}$ мм рт.ст.) и поверхность металла открыта для пучка. Вариант решения так называемой проблемы «первой стенки» поднимает новую проблему управления уровнем поверхности металла в вакууме и в то же время получения соответствующей

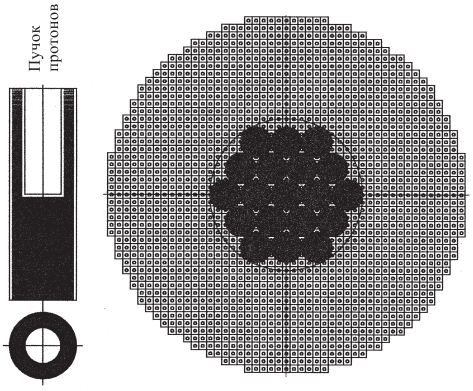


Рис.10

скорости перемещения металла в трубке для удаления тепла, производимого в мишени пучком протонов. Если такая гидравлическая проблема решена, то, как показывают приближенные оценки, скорость жидкого свинца будет 2,5 м/с в трубке диаметром 88 мм (такой же, как и в предыдущем случае) или 0,6 м/с при вдвое большем диаметре. При этой скорости масса переносимого металла равна 100 кг/с, что позволяет вывести 5 ГВт мощности тепла, созданного ионизационными потерями протонов.

4.2. Поля и спектры нейтронов. Каждая мишень может рассматриваться как точечный источник нейтронов, при этом поток нейтронов снижается как r^{-2}, где r — расстояние от мишени [18]. Если описанные выше мишени равномерно распределены по горизонтальному сечению реактора, значит, плотность нейтронов формируется 19 точечными источниками, имеющими малые различия.

Первичные нейтроны, сформированные на мишенях, имеют широкий энергетический спектр, достигающий 20 МэВ, однако они достаточно быстро замедляются из-за рассеяния на легких ядрах реактора (углерод, вода). Реакции деления трансурановых элементов на тепловых нейтронах имеют сильный эффект по четности-нечетности ядер вероятности деления. Такие изотопы, как ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pb, имеют высокую вероятность деления ($\geq$60 %). Напротив, изотопы ^{236}U, ^{238}U, ^{240}Pb и т.п. имеют низкую вероятность деления ($\leq$10 %), а некоторые из них не делятся вовсе. Конечно, модернизированный реактор будет работать как очиститель, но весьма неэффективный, для главной части радиоактивных отходов. Заметно более привлекательной выглядит схема, в которой первичные нейтроны используются перед замедлением. Схема, обозначенная как концепция «два в одном», обсуждается ниже.

4.3. Концепция «два в одном». Предположим, что 19 нейтронных мишеней размещены в центральной части реактора диаметром 5 м и высотой 2 м, а графит заменен тяжелой металлической конструкцией. При этом охлаждающая вода в технологических сборках заменена жидким свинцом или эвтектикой Pb–Bi, а плотность топливных сборок увеличена в 3–4 раза, что означает 64 сборки на квадратный метр вместо 16. Тогда первичные нейтроны делят все изотопы отходов во внутренней части реактора с достаточно высокой эффективностью, мгновенные нейтроны деления сохраняют свою энергию. Средняя энергия — 2 МэВ и выше, а среднее число нейтронов деления ν увеличивается с энергией нейтронов E_n, включая последующее деление:

$$\nu(En) = \nu_0 + aE_n, \tag{11}$$

где ν_0 — среднее число нейтронов деления и a — константа, слабо меняющаяся с E_n [19]. Например, значение ν_0 для ^{238}U равно 2,65 для 1,5 МэВ, или для энергии нейтронов деления, и достигает 4,55 для 14,2 МэВ, или для энергии значительной части первичных нейтронов. В то же время сечение деления ^{238}U при энергии нейтронов 2 МэВ равно 1 б. Это означает, что свободный пробег нейтронов в

изотопах урана составляет около 30 см [20]. Тем не менее часть быстрых нейтронов покидает центральную зону реактора и замедляется во внешней области. Она может рассматриваться как бланкет, формирующий тепловые нейтроны. Поэтому схема названа «два в одном».

Коэффициент размножения нейтронов в чистом ^{238}U не превышает $k \leq 0{,}0435$ [20]. Ядерные отходы включают в себя множество других изотопов. Тогда подкритичность смеси может измениться. Ситуация может быть улучшена при квазинепрерывном режиме работы ускорителя, при котором появляется возможность стабилизировать мощность реактора на заданном уровне. Очевидно, это предложение [20] требует дополнительных исследований и компьютерного моделирования, однако выглядит обещающим.

5. Заключение

В работе описан ускоритель, пригодный для управления энергетическим ядерным реактором. Хотя такой ускоритель пока не существует, его проект базируется на узлах и технологии, которые хорошо известны практически и широко используются в работающих машинах. Таким образом, проект обсуждаемого ускорителя готов к реализации.

Удобное разделение интенсивного пучка на 20 с меньшей мощностью снимает множество проблем ускорения и дальнейшего использования пучка в реакторе. В то же время он позволяет интегрировать ускоритель в существующий промышленный реактор после недорогой модернизации и без строительства нового. Более глубокая модернизация обещает появление новой технологии производства энергии с ^{238}U, накопленным сейчас.

Список литературы

1. *Bartolomeev G.A.* // Intense Neutron Source. Santa Fe Conf., CONF-660. 1963. P.925.
2. *Толстов К.Д.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1993. №5[62]-93. С.5.
3. *Carminati F., Klapish R., Revol J.P., Roche C.H., Rubio J.A., Rubbia C.* CERN/AT/93-74 (ET), 1993.
4. *See E.G.* // Proc. of the 3rd Int. Conf. «Accel. Driven Transmutation Tech. and Applic.», 7–11 June, 1999, Prague.
5. The TARC Collaboration. Neutron-Driven Nuclear Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing. Final Rep. to European Com. CERN 99–11, 15 December, 1999.
6. *Arnold H. et al.* // Phys. Lett. 1999. V.B458. P.167.
7. *Wan J.-S. et al.* // Kerntechnik. 1998. V.63. P.167.
8. *Krivopustov M.I. et al.* // J. of Radioanalitic and Nuclear Chemistry. 1997. V.222. P.267.

9. *Armbruster P.* // Phys. 1999. V.B155. No.2. P.33.
10. *Субботин В.И.* // ЭЧАЯ. 1998. Т.29. Вып.2. С.333.
11. *Fietier N., Mandrillon P.* CERN/AT/95-03 (ET), 1995.
12. *Barashenkov V.S., Shelaev I.A.* JINR Preprint E2-98-137, Dubna, 1998.
13. *Шелаев И.А.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1993. №5[62]-93. С.16.
14. *Шелаев И.А.* // Тр. Междунар. конф. по ускорителям высоких энергий. Новосибирск, 7–11 августа, 1986. Т.2. С.24.
15. *Jongen Y.* // Proc. EPAC, 2–6 May, 1994.
16. *Казновский С.П.* Проектирование ядерных реакторов. М.: Энергоиздат, 1974. С.23.
17. *Revol J.-P.* CERN-PPE/97-142, 31 October, 1997.
18. *Andramonje S. et al.* CERN/AT/94-45 (ET), 1994.
19. *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976. С.931.
20. *Дмитриевский В.П., Сергеева Н.В.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1999. №5,6 [97]-99. С.85.

НОВЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИПЕРЯДЕР НА НУКЛОТРОНЕ

Ю.Лукстиньш

Лаборатория высоких энергий ОИЯИ

В настоящее время, в связи с первыми успешными попытками вывода пучка на новом ускорителе нуклотроне, вполне уместно обсудить программу исследований гиперядер, особенно ту часть, которую в последнее время предложили польские и чешские физики.

Мы предполагаем, что в первых гиперядерных экспериментах на нуклотроне [1–4] целесообразно продолжить те простейшие исследования, в которых хороший результат был достигнут благодаря отработанной методике, например, за счет отсутствия систематических ошибок при измерении времени жизни гиперядер [5]. Эта часть программы исследований гиперядер является продолжением наших предыдущих экспериментов.

На синхрофазотроне в пучках ионов (^{3}He, ^{4}He, ^{6}Li) исследовались сечения рождения и времена жизни гиперядер ${}^{4}_{\Lambda}$H и ${}^{3}_{\Lambda}$H при облучении стримерной камеры ГИБС [5,6]. Как преимущество этих экспериментов следует отметить безукоризненную идентификацию гиперядер, незначительный фон и хорошую эффективность триггера. Однако эти эксперименты были приостановлены из-за малой скорости набора данных в пучках синхрофазотрона.

Планируемая большая длительность времени вывода пучка на нуклотроне (более 10 с) и использование пропорциональных камер позволяют увеличить скорость набора данных в 200–300 раз и решать качественно более сложные задачи. Например, измерить время жизни легких гиперядер с точностью в 2–3 %, что в несколько раз точнее измерений в других лабораториях.

Другое направление исследований для первых экспериментов — принципиально новый метод определения энергии связи слабосвязанных гиперядер (${}^{3}_{\Lambda}$H), основанный на измерении сечений кулоновской диссоциации гиперядер (при этом впервые будет исследовано взаимодействие гиперядер с веществом).

Одной из важнейших характеристик гиперядер является B_Λ-энергия связи лямбда-частицы в ядре. Измерение этой величины для гипертритона особенно ценно, поскольку это легчайшее и для теории наиболее однозначно рассчитываемое гиперядро (см. [7]). Теперь для определения B_Λ предлагается метод, основанный на измерении сечения электромагнитной диссоциации гипертритона. В работе В.Любошица [8] показано, что сечение электромагнитной диссоциации слабосвязанных ядерных систем обратно пропорционально энергии связи и прямо

пропорционально квадрату заряда ядер мишени. Аналогичный результат получен в расчетах, проведенных для нашего эксперимента М.Евлановым с сотрудниками [9]. Сделанные нами оценки [2] показывают, что измерение сечения диссоциации гипертритона с точностью около 10 % является вполне реальным и такой точности достаточно для определения значения энергии связи.

Одновременно в этих экспериментах на порядок будет увеличена точность определения сечения рождения гиперядер, что позволит проверить расчеты, проведенные по модели коалесценции японскими теоретиками [10,11], как для самой величины, так и для энергетической зависимости.

В последнее время польскими и чешскими физиками было предложено [12,13] использовать пучки нуклотрона для более сложных, но и более информативных экспериментов с гиперядрами промежуточных атомных чисел ($A = 10$ или более), для которых наиболее характерны безмезонные распады. В наших первых экспериментах, в которых наблюдались распады с испусканием отрицательного пиона (для легких ядер очень интенсивный канал распада), триггер выделял относительно просто и надежно измеряемую разницу заряда ядра до и после распада. Для безмезонных распадов создание триггера намного сложнее. А для попытки регистрировать распады с ^{8}Be в промежуточном состоянии [13] требуется также трековый детектор с высоким разрешением, чтобы разделить две близко летящие альфа-частицы. Если бы удалось регистрировать четыре гиперядра, которые распадаются через ^{8}Be — $^{8}_{\Lambda}\mathrm{Li} \to \pi^{-} + {}^{8}\mathrm{Be}$, $^{9}_{\Lambda}\mathrm{Be} \to \pi^{-} + p + {}^{8}\mathrm{Be}$, $^{10}_{\Lambda}\mathrm{Be} \to n + n + {}^{8}\mathrm{Be}$, $^{10}_{\Lambda}\mathrm{B} \to n + p + {}^{8}\mathrm{Be}$, то появилась бы возможность весьма точно определить соотношение вероятности каналов, стимулированных протонами и нейтронами. Эта величина интенсивно обсуждается теоретиками, поскольку расхождение имеющихся не очень богатых экспериментальных данных и теоретических расчетов велико и трудно объяснимо.

Грубые оценки заставляют думать, что такие эксперименты невозможны. Однако детальное моделирование показало, что реалистично создать трековые детекторы с фибровыми сцинтилляторами в качестве центральной части, имеющей достаточно высокое разрешение и эффективность регистрации упомянутых гиперядер.

Надеюсь, что сотрудничество с польскими физиками в подготовке и проведении гиперядерных экспериментов на нуклотроне продолжится. Это позволит значительно ускорить получение уникальных экспериментальных данных.

Список литературы

1. Avramenko S.A. et al. // JINR Rapid Comm. 5[68] (1994) 14–20.
2. Avramenko S.A. et al. // Nucl. Phys. A 585 (1995) 91c.
3. Lukstins J. // Proc. 7th Conf. «Mesons and Light Nuclei-98», Prague–Pruhonice, Czech Republic, 1998, WS Singapore, 1999. P.198.

4. Lukstins J. // Proc. III Workshop «Physics and Detectors for DAΦNE», Frascati, 1999. INFN Frascati, 1999. P.719.
5. Avramenko S. et al. // XXIII Yamada Conf., Osaka, 1989. World Scientific, Singapore, 1989. P.468.
6. Avramenko S. et al. // Nucl. Phys. A 547 (1992) 95c.
7. Miyagawa K., Glockle W. // Nucl. Phys. A 585 (1995) 169.
8. Любошиц В.Л. // ЯФ, 51 (1990) 1013.
9. Evlanov M.V. et al. // Nucl. Phys. A 632 (1998) 624.
10. Bando H. et al. // Int. J. Mod. Phys., A21 (1990) 4021.
11. Wakai M. // Nucl. Phys. A547 (1992) 89c.
12. Bartke J. et al. // J. Phys. G25 (1999) 429.
13. Batusov Y., Majling L. // Phys. Atom. Nucl. (2001) (in press).

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭКОНОМИЧНЫХ УСТАНОВОК С СИЛЬНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ

Г.Малиновский

Институт электротехники Польской АН, Варшава

1. Магнитные поля для ядерной физики. Современные детекторные установки обладают уникальными параметрами магнитов с полями 3–7 Тл и более. Это оказалось возможным при использовании компактных сверхпроводящих магнитных систем. Развитие этих систем происходило на базе так называемых жестких сверхпроводников, охлаждаемых методом погружения в жидком гелии — единственном хладагенте, с помощью которого можно достичь температуры сверхпроводимости этих материалов. Но даже для маломасштабных экспериментов с СП-магнитами требовалось громадное оснащение, позволяющее на время опыта сохранить гелий жидким: теплоизоляционные сосуды и трубы, система сбора газового гелия и мн. др.

Обслуживание всей системы требует высококвалифицированных сотрудников и больших затрат. Только крупные проекты могут профинансировать создание современных детекторных установок с СП-магнитами.

2. Прогресс в криогенной технологии. В последнее время в связи с изучением уникальных тепловых свойств редких земель идет развитие так называемой безгелиевой технологии достижения криогенных температур. Эти безгелиевые микромашины вырабатывают мощность около 1 Вт при 4,2 К и 35 Вт при 40 К. (Мощность 1 Вт при 4,2 К отвечает испарению 1,4 л жидкого гелия в час.)

Примером может служить криокуллер фирмы «Sumimoto».

С такой «холодной» мощностью реально обслуживать большие СП-магниты весом до нескольких сот килограмм. Но это достигается за счет создания высокоэкономичных криостатов с использованием новейших технологий и материалов и требует дальнейших исследований и развития.

3. Преимущества новой криогенной технологии. Освоение промышленностью домашних (home) рефрижераторов небольшой мощности повлекло за собой широкое освоение сверхпроводящих магнитов в различных областях науки и техники, особенно там, где они ранее не применялись. Разрабатывается система с так называемыми сухими магнитами (раньше назывались «с косвенным криостатированием» — «индирект куллер») диаметром до 1 м, индукцией до 12–15 Тл.

Благодаря простоте управления и надежности такие системы могут быть использованы не только в больших лабораториях, но и в университетах и небольших фирмах. Прежде всего они резко сократят капитальные и эксплуатационные затраты и чрезвычайно упростят обслуживание СП-магнитных систем.

Например, средних размеров СП-магнит на 6 Тл за год непрерывной работы при обслуживании по новой технологии позволяет сэкономить около 4–5 тыс. долларов по сравнению с использованием обычной технологии с жидким гелием, и за 3–4 года полностью окупается стоимость гелиевой микромашины.

Новая система обладает следующими преимуществами:

— практическая возможность непрерывного охлаждения СП-магнитов в течение нескольких месяцев и вплоть до 5–7 лет при эпизодической проверке установки специалистом средней квалификации;

— минимальное время подготовки системы к пуску порядка несколько часов;

— компактность и универсальность (работа в любом положении);

— возможность полной и дешевой автоматизации СП-магнитной системы с использованием дистанционного управления.

Конечно, как и все устройства, криокуллер тоже имеет недостатки — прежде всего небольшую мощность: 1 Вт при 4,2 К. Но надо подчеркнуть, что уже существует простой метод увеличения скорости охлаждения СП-магнитов с помощью криокуллеров в 1,5–2 раза.

4. Задачи исследования новых магнитных систем в ОИЯИ. Вышеизложенные преимущества новых криогенных и магнитных технологий создают новые перспективы в создании и использовании высоких магнитных полей в ядерной физике. Примером конструкции магнитных систем с криокуллером в системе охлаждения могут быть следующие установки.

Одна из них была построена в 1977 г. для фокусировки тяжелых ионов на ускорителе RIKEN. Установленный сверхпроводящий соленоид был охлажден криокуллером, указанным выше. Максимальная индукция достигала 6,2 Тл, а интеграл поля — 6,8 Тл·м при длине магнита 1,1 м. Вес обмотки магнита — 300 кг.

В использовании систем, которые обладают такими хорошими параметрами магнитного поля, заинтересованы и другие отрасли науки — экология, медицина. С ОИЯИ в области применения новой технологии охлаждения СП-магнитов сотрудничают Институт электротехники в Варшаве, Политехнический институт в Люблине и Горно-металлургическая академия в Кракове. Есть уже положительные элементы в разработке некоторых узлов системы: в Польше в Институте электротехники (Варшава) разрабатывается магнит охлаждения криокуллером, весом 50 кг с индукцией 6,5 Тл, который предназначен для очистки промышленных вод и сепарации металлов. В Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова разрабатывается магнит для источника ионов DECRIS, который путем

повышения магнитной индукции на оси пучка до 3 Тл даст новое качественное его использование. Магнит будет охлаждаться как магнит для очистки воды.

Но все это возможно только в результате исследования и освоения качественно новой технологии и материалов.

Исследования включают следующие основные аспекты:

- исследование и создание элементов СП-магнита с применением HTS-материалов;
- создание СП-магнита с высокой теплопроводностью;
- создание и исследование экономичного криостата;
- приобретение и освоение гелиевой микромашины.

ГОРЯЧИЕ ЯДРА И ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ЖИДКОСТЬ–ГАЗ В ЯДЕРНОМ ВЕЩЕСТВЕ

В.А.Карнаухов

Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ,
от имени коллаборации ФАЗА

Коллаборация ФАЗА:

- *С.П.Авдеев, В.А.Карнаухов, В.В.Киракосян, Л.А.Петров, В.К.Родионов, В.Д.Тонеев — Объединенный институт ядерных исследований;*
- *А.Будзановский, В.Карч, М.Яницкий — Институт ядерной физики им. Г.Неводничанского, Краков;*
- *Х.Ойшлер — Технический университет, Дармштадт;*
- *О.В.Бочкарев, Е.А.Кузьмин, Л.В.Чулков — РНЦ «Курчатовский институт», Москва;*
- *А.С.Ботвина — Институт ядерных исследований, Москва;*
- *Э.Норбек — Университет штата Айова, Айова-сити*

В докладе приводятся наиболее значительные результаты, полученные коллаборацией ФАЗА за десять лет ее существования. Весьма существенный вклад в реализацию проекта ФАЗА внесло сотрудничество с Институтом ядерной физики им. Г.Неводничанского.

Введение

Исследование свойств очень горячих ядер — одна из интереснейших задач современной ядерной физики. Энергия возбуждения таких ядер (400–600 МэВ) сравнима с полной энергией связи ядра. Как мы теперь знаем, для столь горячих ядер испарение частиц сменяется процессом взрывного типа — тепловой ядерной мультифрагментацией. Это новый, многотельный тип распада возбужденных ядер, при котором происходит множественная эмиссия фрагментов промежуточной массы (ФПМ). Они тяжелее α-частиц, но легче осколков деления. Тепловая мультифрагментация является проявлением фазового перехода жидкость–газ в ядерном веществе. Под действием теплового давления горячее ядро расширяется и попадает в область фазовой неустойчивости (спинодальная область). Флуктуации плотности приводят к тому, что однородная система практически мгновенно превращается в смесь двух фаз — капельки жидкости (фрагменты), окруженные газом (нуклоны). Нейтроны устремляются в свободное пространство с энергией, отвечающей температуре системы в момент развала (5–6 МэВ), а заряженные частицы разлетаются под действием кулоновских сил. Такая картина распада очень горячих ядер предсказывалась статистической моделью и была доказана экспериментально в работах коллаборации ФАЗА. Остановимся на этом подробнее.

Как приготавливать горячие ядра

Для этой цели широко используются ядерные реакции, вызванные тяжелыми ионами с энергиями в десятки и сотни МэВ на нуклон. Однако в этом случае нагрев сопровождается значительным сжатием, сильным вращением и деформацией системы. Возбуждение коллективных степеней свободы существенно сказывается на распаде горячего ядра и затрудняет получение информации о его термодинамических характеристиках. Картина упрощается, если в качестве бомбардирующей частицы использовать легкое ядро (протон, гелий) с релятивистской энергией. Проходя через ядро-мишень (например, Au), оно испытывает серию соударений с нуклонами, вызывая внутриядерный каскад. Быстрые каскадные частицы вылетают наружу, а более медленные застревают в ядре-остатке (спектаторе), нагревая его. Использование релятивистских легких ионов — уникальный способ получения горячих ядер, энергия возбуждения которых практически целиком тепловая. Рис. 1 иллюстрирует картину соударения быстрого протона с тяжелым ядром, в результате чего вперед вылетают «каскадные» частицы, а разогретое и расширившееся ядро-остаток разваливается, испуская в разные стороны нуклоны и фрагменты.

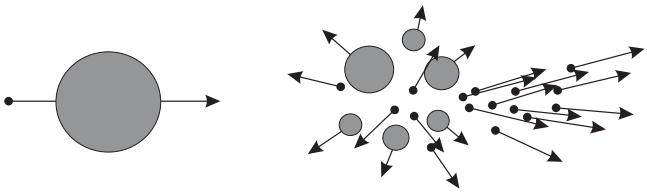


Рис. 1. Картина соударения быстрого протона с тяжелым ядром

Установка ФАЗА

Для изучения процесса мультифрагментации была создана многодетекторная установка ФАЗА, имеющая 4π-геометрию. Установка размещена на пучке синхро- фазотрона ОИЯИ. В настоящее время используется уже установка ФАЗА-2, число детекторов в которой увеличено в 1,5 раза за счет введения системы из 25 $\Delta E - E$-телескопов. Теперь в установке 30 телескопов заряженных частиц, которые служат также триггерами системы регистрации, и 64 сцинтилляционных счетчика CsI(Tl), составляющих детектор множественности фрагментов (см. рис. 2). Полное число каналов электроники около 200.

Какова плотность ядра, испускающего фрагменты?

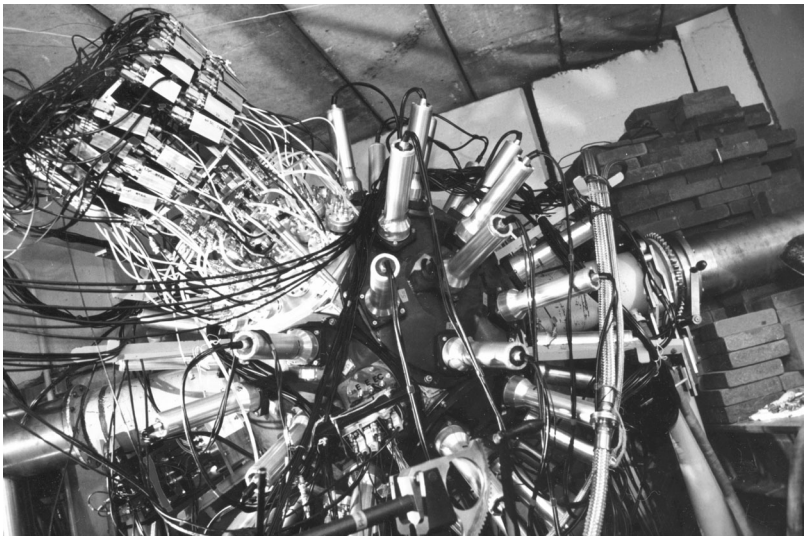


Рис. 2. Установка ФАЗА-2

Действительно ли горячее ядро расширяется под действием теплового давления и только после этого распадается? Положительный ответ на этот вопрос можно рассматривать как доказательство попадания ядерной системы в спинодальную область фазовой неустойчивости. Чтобы ответить на этот вопрос, измерялось распределение совпадающих (из одного события) фрагментов по относительной скорости $V_{\text{rel}} = V_1 - V_2$. При этом регистрировались ФПМ, летящие в противоположные стороны. Чем определяется эта скорость? Расчеты показывают, что на 80 % энергия фрагментов определяется их ускорением в кулоновском поле и только 20 % связано с тепловым движением. Поэтому V_{rel} чувствительна к конфигурации системы в момент развала: чем меньше плотность (т.е. чем больше размер системы), тем меньше каждая из скоростей. В верхней части рис. 3 представлены два возможных варианта эмиссии ФПМ: испарение с поверхности ядра с нормальной плотностью (справа) и объемный развал расширенной системы. В случае первого варианта ожидается распределение, показанное штриховой линией. Измеренное распределение смещено от ожидаемого для поверхностной эмиссии в сторону меньших значений скорости, отвечая развалу ядра с пониженной плотностью. Количественный анализ потребовал развития комбинированной модели взаимодействия INC + α + SMM.

Первая ступень реакции описывается в приближении внутриядерного каскада (INC). На стадии теплового расширения горячее ядро-остаток теряет часть энергии возбуждения за счет эмиссии нуклонов. Этот процесс учитывается введением эмпирического параметра «α». Развал остаточного ядра описывается статистической моделью мультифрагментации (SMM), которая включает многотельный рас-

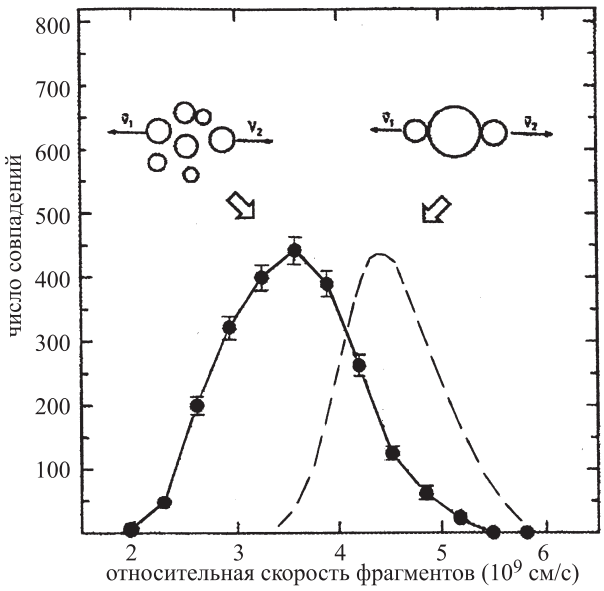


Рис. 3. Распределение числа совпадающих фрагментов по относительной скорости для соударений ^{4}He (14,6 ГэВ) + Au

чет кулоновских траекторий всех заряженных частиц. В результате получаются скорости, энергии и углы разлета фрагментов, что уже можно сравнивать с экспериментом. Плотность ядра в момент развала является параметром расчета, который и определяется из такого сравнения.

Найдено, что эмиссия фрагментов происходит после того, как горячее ядро расширяется в 3–4 раза, что отвечает попаданию в спинодальную область. Аналогичный вывод получается и из анализа формы энергетического спектра фрагментов.

Тепловая мультифрагментация — новый тип распада горячих ядер

Какова временная шкала процесса множественной эмиссии фрагментов? Это ключевой вопрос. Испускаются ли фрагменты независимо и последовательно (тогда это просто еще одно проявление уже известного испарения частиц из ядра) или это совершенно новый, взрывоподобный процесс — многотельный распад, когда фрагменты возникают практически одновременно? Ответ получен в результате тонкого анализа распределения совпадающих фрагментов (возникающих в одном событии) по относительному углу (см. рис. 4). Если два фрагмента вылетают в одном и том же направлении независимо, т.е. с существенной сдвижкой во времени,

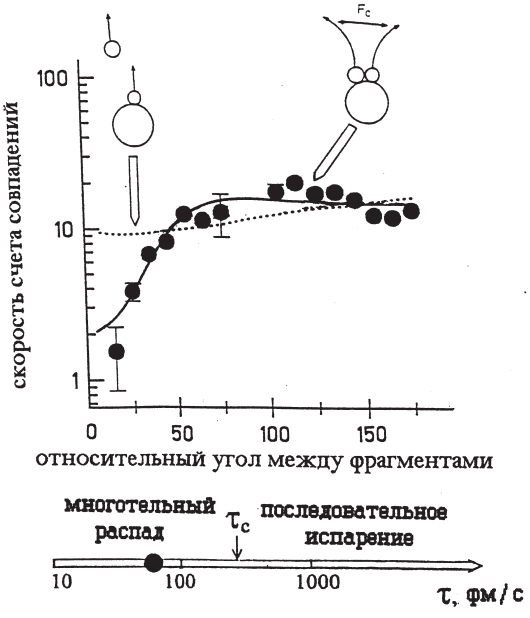


Рис. 4. Распределение совпадающих фрагментов по относительному углу для соударений ^{4}He (14,6 ГэВ) + Au. Шкала времени дана в единицах фм/с $=3\cdot10^{-24}$ с, жирная «точка» на ней показывает среднее время эмиссии фрагментов

их траектории не будут искажены взаимным кулоновским отталкиванием. Это случай последовательного испарения фрагментов, при этом среднее время эмиссии τ превышает характерное время ускорения в кулоновском поле $\tau_c \approx 10^{-21}$ с. Если же эмиссия будет происходить с $\tau < \tau_c$, траектории разойдутся за счет кулоновского отталкивания и малые относительные углы будут наблюдаться редко. Степень подавления выхода пар с малым относительным углом зависит от τ: чем меньше среднее время эмиссии, тем больше эффект подавления. Таким образом, мы имеем своеобразные часы для измерения очень коротких временных интервалов. На рис. 4 показан результат такого измерения для мультифрагментации в соударениях ^{4}He (14,6 ГэВ) + Au. Глубокий минимум в области малых углов — качественное свидетельство в пользу «одновременности» эмиссии фрагментов. Временная шкала, показанная в нижней части рис. 4, разделена на две части характеристическим временем τ_c: меньшим временам эмиссии отвечает многотельный распад системы, большим — последовательное испарение. Количественный анализ приводит к величине среднего времени эмиссии $\tau \le 2\cdot10^{-22}$ с, что существенно меньше τ_c. Таким образом, доказано, что тепловая мультифрагментация — новый, многотельный тип распада возбужденных ядер. Близкие значения времен эмиссии фрагментов получены и для соударений p (8,1 ГэВ) и ^{12}C (22,4 ГэВ) с ядрами золота.

Эволюция механизма тепловой мультифрагментации с ростом массы бомбардирующей частицы

Известно, что на пучках очень тяжелых ионов мультифрагментация не описывается статистической моделью и, по-видимому, является динамическим процессом. Нами проведено сравнительное исследование мультифрагментации мишени из золота на пучках p (8,1 ГэВ), ^{4}He (4 и 14,6 ГэВ) и ^{12}C (22,4 ГэВ). Во всех этих

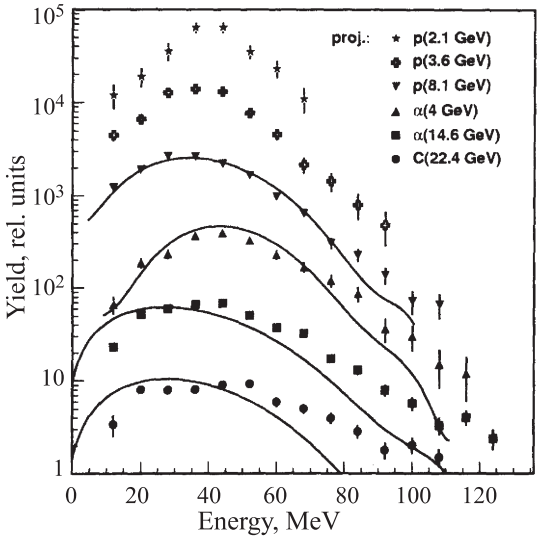


Рис. 5. Энергетические спектры углерода из соударений протонов ^{4}He и ^{12}C с мишенью из золота. Расхождение эксперимента и расчета (линии) в случае пучков ^{4}He (14,6 ГэВ) и ^{12}C указывает на вклад коллективного потока

случаях можно говорить о тепловой мультифрагментации. В рамках комбинированной модели INC + α + SMM, в которой развал горячего ядра-остатка рассматривается как равновесный статистический процесс, удается описать распределение фрагментов по множественности, массам, углу вылета. Спектры кинетических энергий имеют типичную максвелловскую форму, однако с увеличением массы бомбардирующей частицы они становятся более «жесткими». Это видно из рис. 5, где показаны спектры углерода, полученные в соударениях релятивистских протонов, ^{4} He и ^{12} C с Au. Расчеты по модели INC + α + SMM прекрасно описывают форму спектра для случая p (8,1 ГэВ) + Au и заметно расходятся с данными, полученными на пучках ^{4} He (14,6 ГэВ) и ^{12} C (22,4 ГэВ). Это связано с появлением коллективного потока на более тяжелых пучках (отметим, что в статистической модели коллективное движение не учитывается). Величина потока находится из разности измеренной и расчетной энергий фрагментов. Полученная средняя коллективная скорость фрагментов в функции их атомного номера Z показана на рис. 6 для соударений ^{12} C + Au. В этом случае полная энергия потока 100–120 МэВ. Это радиальный поток, который возникает за счет

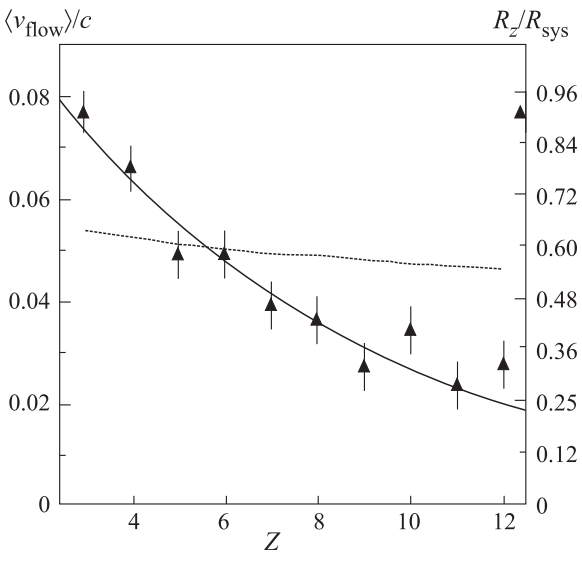


Рис. 6. Скорости коллективного потока, измеренные для фрагментов с различными Z. Шкала справа показывает соответствующие им средние радиальные координаты фрагментов, пунктир — предсказание модели SMM

теплового давления в разогретом ядре. Анализ зависимости коллективной скорости от Z дает неожиданную информацию о распределении фрагментов в объеме системы, которая не согласуется с предсказаниями копенгагенской модели мультифрагментации: более тяжелые фрагменты образуются преимущественно в центральной части объема системы, что указывает на неоднородное распределение плотности в горячем ядре. (В этом анализе используется линейная зависимость скорости потока V_{flow} от радиальной координаты частицы R_Z: $V_{\text{flow}} \sim R_Z$.

Проект ФАЗА в 2001–2003 г.

Методическое развитие установки ФАЗА связано в первую очередь с введением в строй в полном объеме новой системы триггеров из 25 $\Delta E - E$-телескопов (в настоящее время оснащено электроникой только 16 из них). Эта система позволит проводить корреляционные измерения с лучшей точностью, чем ранее, и поднимет эффективность триггерования в 6 раз. В качестве следующего этапа мы рассматриваем возможность введения еще одного «слоя детекторов» на основе пластических сцинтилляторов для регистрации легких заряженных частиц. Это позволит измерять их множественность и сортировать события по энергии возбуждения фрагментирующих ядер.

Научная программа направлена на дальнейшее исследование механизма тепловой ядерной мультифрагментации на выведенном пучке нуклотрона.

— Будут получены новые данные о времени жизни горячих ядер (в диапазоне $10^{-22} - 10^{-20}$ с), образующихся в различных соударениях.

— Анализ энергетических спектров даст информацию о пространственной конфигурации системы в момент развала.

— Будут сделаны выводы об эволюции механизма процесса от чисто «теплового» (статистического) к более сложному (за счет влияния динамических эффектов) при увеличении массы ядра-снаряда.

— Будут установлены пределы применимости статистической интерпретации процесса мультифрагментации.

Список публикаций

1. JINR Preprint P7-89-29, Dubna, 1989.
2. Prib. & Techn. Exp., 1 (1993) 65.
3. Prib. & Techn. Exp., 3 (1993) 74.
4. Nucl. Instr. Meth., A332 (1993) 149.
5. Proc. Int. School on Heavy Ion Phys., Dubna, Vol.2 (1993) 305.
6. Prib. & Techn. Exp., 3 (1993) 104.
7. Proc. Int. Workshop XXII, Hirschegg, GSI, (1994) 21.
8. Phys. Lett., B335 (1994) 1.
9. Phys. Lett., B338 (1994) 141.

10. Nucl. Phys., A583 (1995) 585.
11. Yad. Fiz., No. 10, 58 (1995) 1735.
12. Proc. XV Nucl. Phys. Div. Conf. St.Petersburg, (1995) 423.
13. Prib. & Techn. Exp., No.2, 39 (1996) 7.
14. JINR Preprint E1-96-50, Dubna, 1996.
15. JINR Preprint P1-96-397, Dubna, 1996.
16. Yad. Fiz. 60 (1997) 1780.
17. JINR Rapid Comm., No.2 [82]-97 (1997)71.
18. Europ. Phys. J., A3 (1998) 75.
19. Report TUD – IKDA 98/23, Darmstadt, 1998.
20. Acta Phys. Polonica, 30 (1999) 429.
21. Report INP, Cracow, 1779/PL.
22. Yad. Fiz., 62 (1999) 272.
23. Proc. Int. Workshop XXVII, Hirschegg, GSI, (1999) 116.
24. Phys. Lett., B460 (1999) 31.
25. Priroda, No.2 (2000) 5.
26. Part. & Nucl. Lett., No.2[99] (2000) 62.
27. Part. & Nucl. Lett., No.2[99] (2000) 70.
28. JINR Preprint E1-2000-152, Dubna, 2000. Submitted to «Yad. Fiz.».
29. Proc. IX Int. Conf. Nucl. Reaction Mech. Varenna, 2000, p. 537.
31. JINR Preprint P13-2001-9, submitted to «Prib. & Tech. Exp.».

Результаты исследований коллаборации ФАЗА были представлены на 23 международных конференциях.

Гранты

РФФИ № 93-02-3755; РФФИ № 96-02-18952; РФФИ № 00-02-16608; RFK-000 и RFK-300 (Дж.Сорос); INTAS 94-2249; грант NATO PST.CLG.976861.

Грант польского Госкомитета № P30B 09509.

«Грант Хрынкевича» (1993 г. — 35 k$, 1994 г. — 30 k$, 1995 г. — 25 k$, 1996 г. — 60 k$, 1997 г. — 40 k$, 1998 г. — 18 k$, 1999 г. — 25 k$, 2000 г. — 34 k$ (всего 267 k$).

В этом списке наиболее значителен грант Полномочного Представителя Польши академика А.Хрынкевича. Он позволил оснастить установку ФАЗА современной электроникой, компьютерной техникой и провести существенную модернизацию установки. Для иллюстрации приводим фотографию установки ФАЗА (рис. 2), на которой виден триггерный модуль (в левом верхнем углу). Этот модуль спроектирован и изготовлен в ИЯФ им. Г.Неводничанского и оснащен электроникой на средства этого гранта. Стоимость модуля около 120 k$.

Премии ОИЯИ

1. Поощрительная премия ОИЯИ за 1994 г.
2. Первая премия ОИЯИ за 1998 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ В ОБЛАСТИ УЛЬТРАНИЗКИХ ЭНЕРГИЙ (эВ–кэВ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЙНЕРНОЙ ПЛАЗМЫ (ПРОЕКТ «LESI»)

В.М.Быстрицкий

Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ

- *Вяч.М.Быстрицкий, В.М.Гребенюк, С.С.Паржицкий, Ф.М.Пеньков, В.А.Столупин — Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна;*
- *Г.А.Месяц — Институт электрофизики Сибирского отделения РАН (ИЭ СО РАН), Екатеринбург, Россия;*
- *Е.А.Волков, А.В.Лучинский, В.И.Махрин, Н.А.Ратахин, В.А.Синебрюхов, С.А.Сорокин, С.А.Чайковский — Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (ИСЭ СО РАН), Томск, Россия;*
- *А.Туур — Лоуренсовская национальная лаборатория (LLNL), Ливермор, США;*
- *Вит.М.Быстрицкий — Калифорнийский университет (UCI), Ирвайн, США;*
- *Я.Возняк, А.Гула, Е.Лонцки, М.Филипович, В.Чаплинский — факультет физики и ядерной техники Горно-металлургической академии (ФФЯТ ГМА), Краков, Польша;*
- *Е.Гула — Институт ядерной физики им. Г.Неводничанского (ИЯФ), Краков, Польша;*
- *Г.Монхорст — Университет Флориды (UF), Гейнсвилл, США.*

Проект «LESI» посвящен изучению реакций между легкими ядрами (*dd*-, *pd*-, d^3He-реакций) в области ультранизких энергий (~ кэВ).

Интерес к изучению сильных взаимодействий в указанной области энергий обусловлен не только возможностью проверки фундаментальных симметрий (зарядовой, изотопической инвариантности) [1,2], но и необходимостью разрешения ряда проблем, существующих в астрофизике [3,4]. Кроме того, появляется реальная возможность получения информации о вкладе во взаимодействие обменных мезонных токов [5], о величине эффекта экранировки ядер [6], о характере нуклон-нуклонного потенциала [1,2], а также о масштабе эффекта Оппенгеймера–Филлипса [7].

Экспериментальное исследование ядерных реакций (*dd*, *pd* и d^3He) в области ультранизких энергий столкновения (~ кэВ) с использованием классических ускорителей весьма проблематично, так как интенсивность пучков заряженных частиц и сечения изучаемых процессов ($\sigma \approx 10^{-32} - 10^{-43}$ см^2) крайне малы.

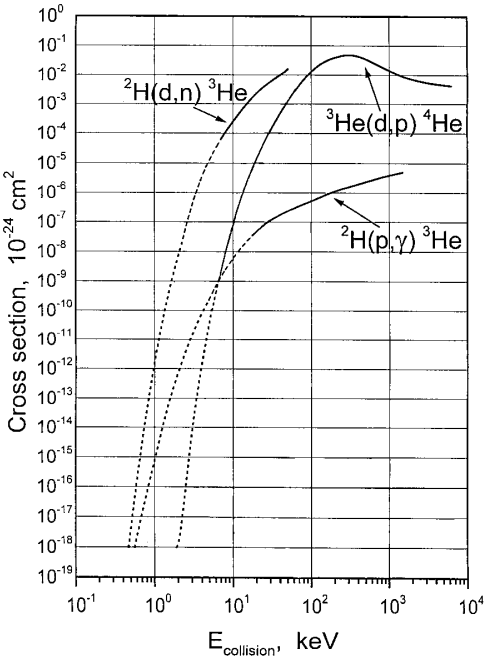


Рис. 1. Зависимость сечений *dd*-, *pd*- и d^3He-реакций от энергий столкновения

На рис. 1 приведены зависимости сечений *dd*-, *pd*- и d^3 He-реакций от энергии столкновения, отражающие реальную ситуацию, существующую в литературе до начала проведения наших исследований. Пунктиром отражены расчетные зависимости сечений, соответствующие области ультранизких энергий столкновения (эВ–кэВ).

Для получения необходимой информации о характеристиках данных реакций в указанной выше области энергий нами был предложен новый метод измерения сечений, основанный на использовании высокоинтенсивных радиально конвергируемых ионных потоков, генерируемых в течение имплозии лайнерной плазмы [4,8,9]. При этом интенсивность потоков ускоренных ионов составляет $10^{20} - 10^{21}$ частиц в импульсе в указанной области энергий. Суть метода получения высокоинтенсивных импульсных пучков ионов заключается в следующем. По лайнеру (полая цилиндрическая газовая струя дейтерия, водорода или гелия; сборка диэлектрических нитей из CD_2 или CH_2, расположенных по образующей цилиндра) пропускается мощный импульс тока ($I = 1-2$ МА), который взрывает его, и образовавшаяся плазма под действием собственного магнитного поля ускоряется в радиальном направлении к мишени. В качестве мишени используется струя газа (H_2, D_2), формируемая соплом Ловаля и имеющая направление вдоль оси лайнера, либо стержень из CD_2 (CH_2), установленный вдоль оси лайнера.

Выполнение намеченной экспериментальной программы запланировано нами на мощных ионных импульсных ускорителях ИСЭ СО РАН (Томск). Программа включает в себя три этапа:

— исследование *dd*-реакции в интервале энергий столкновений 0,1–3,0 кэВ;
— изучение *pd*-реакции в интервале 0,1–3,0 кэВ;
— измерение сечений d^3 He-реакции в диапазоне энергий 3–10 кэВ.

Работы по созданию экспериментальной установки 1-й очереди для изучения *dd*-реакции были начаты в 1995 г. при финансовой поддержке Международного научного фонда Сороса и фонда Полномочного Представителя Польши в ОИЯИ в коллаборации ОИЯИ–ИЭФ СО РАН (Екатеринбург)–ИСЭ СО РАН (Томск)–UCI (Ирвайн, США)–ФФЯТ ГМА (Краков, Польша).

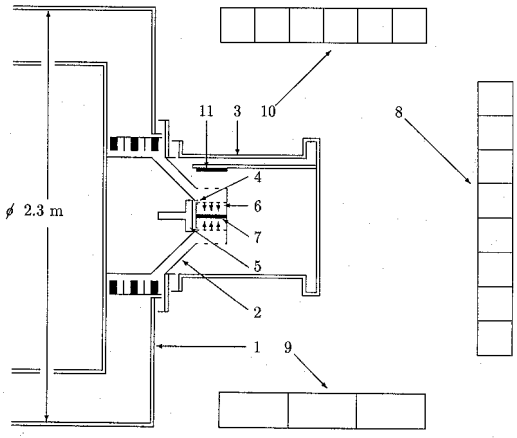


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: *1* — сильноточный импульсный ускоритель; *2* — нагрузочный модуль ускорителя; *3* — камера диагностики; *4* — сверхзвуковое сопло; *5* — быстродействующий электромагнитный клапан; *6* — газовый лайнер; *7* — мишень; *8* — сцинтилляционные времяпролетные спектрометры (8 спектрометров); *9* — детекторы тепловых нейтронов (3 детектора); *10* — спектрометры на основе кристаллов NaI(Tl) (6 спектрометров); *11* — трековые детекторы заряженных частиц на основе CR-39 (PM-355)

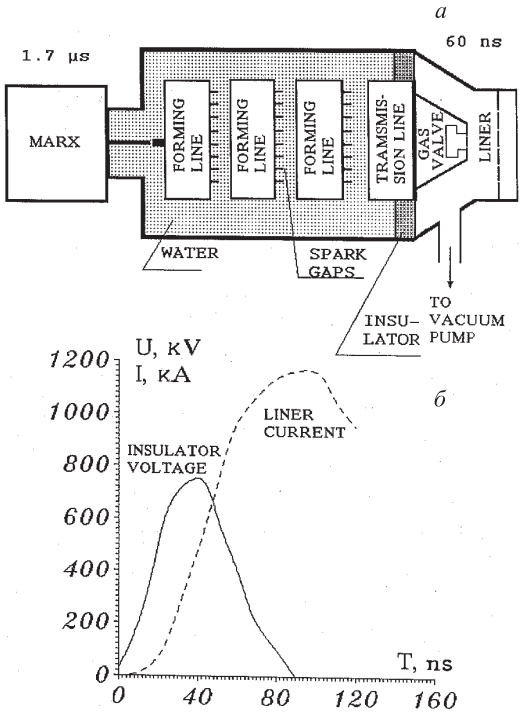
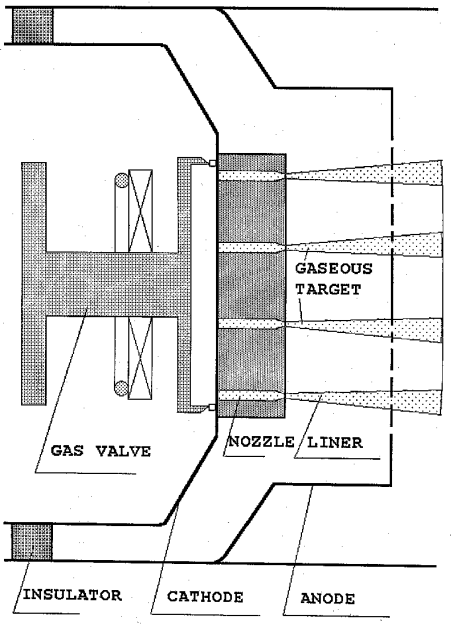


Рис. 3. *а*) Схема сильноточного ускорителя. *б*) Зависимости напряжения на изоляторе и тока через лайнер от времени (время отсчитывается от момента появления высоковольтного импульса на нагрузочном модуле)

Экспериментальная установка [8–11] включает в себя (см. рис. 2): сильноточный генератор (напряжение 750 кВ, амплитуда тока 950 кА, время нарастания тока 60–80 нс) (см. рис. 3), блок нагрузки (лайнер и мишень) (рис. 4), детекторы продуктов ядерных реакций, регистрирующую электронику, диагностическую аппаратуру динамики имплозии лайнера. Регистрация нейтронов *dd*-синтеза осуществляется двумя типами детекторов: сцинтилляционными спектрометрами с использованием методики по времени пролета и детекторами тепловых нейтронов [8–11]. Регистрация γ-квантов из реакций $pd \rightarrow {}^3\mathrm{He}+\gamma$ (5,5 МэВ) и $dd \rightarrow {}^4\mathrm{He}+\gamma$ (22,4 МэВ) осуществляется шестью сцинтилляционными детекторами на основе кристаллов NaI(Tl), а заряженной компоненты из реакций $dd \rightarrow p+t$, $dd \rightarrow {}^3\mathrm{He}+n$ и $d^3\mathrm{He} \rightarrow p+\alpha$ — с помощью твердотельных трековых детекторов CR-39, PM-355 [4,8–11].

Рис. 4. Схема нагрузочного модуля в режиме прямого *Z*-пинча



Первые эксперименты по исследованию *dd*-реакции с использованием данной методики, выполненные в 1995–1996 гг. [10,11] на сильноточном ускорителе Института сильноточной электроники СО РАН (Томск), свидетельствовали о том, что предложенный подход заслуживает внимания и может быть эффективно применен для реализации программы исследования сильных взаимодействий в области ультранизких энергий. На 90 %-м уровне достоверности получено верхнее граничное значение эффективного сечения *dd*-реакции с образованием нейтрона при средней энергии дейтронов 440 эВ:

$$\sigma_{dd}^{n} < 2 \cdot 10^{-34} \text{ см}^2.$$

В начале 1997 г. было завершено создание 2-й очереди установки для исследования *dd*-реакции. Проведены измерения сечений *dd*-реакции [12] при трех значениях средней энергии дейтронов: $E_d = 0{,}1$; 0,38; 2,07 кэВ. На 90 %-м уровне достоверности найдены верхние граничные значения эффективных сечений *dd*-реакции:

$$\sigma_{dd}^{n} < 3{,}1 \cdot 10^{-32} \text{ см}^2 \ (E_d = 100 \text{ эВ});$$

$$\sigma_{dd}^{n} < 1{,}6 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2 \ (E_d = 0{,}38 \text{ кэВ});$$

$$\sigma_{dd}^{n} < 1{,}5 \cdot 10^{-34} \text{ см}^2 \ (E_d = 2{,}07 \text{ кэВ}).$$

Полученные экспериментальные оценки эффективных сечений *dd*-реакции находятся в согласии с результатами вычислений соответствующей величины.

В 1998–1999 гг. нами выполнены измерения значений астрофизического *S*-фактора для *dd*-реакции при энергиях столкновения дейтронов $E = 1{,}8$; 2,06; 2,27 кэВ [13].

Впервые получены экспериментальные значения астрофизического *S*-фактора *dd*-реакции при ультранизких энергиях столкновения дейтронов 1,8; 2,06 и 2,27 кэВ:

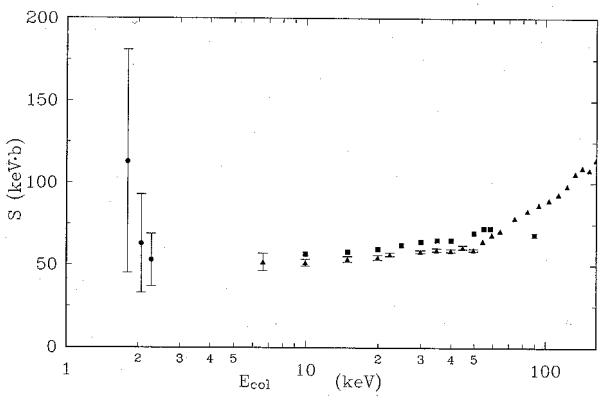


Рис. 5. Зависимость астрофизического S-фактора в dd-взаимодействии от энергии столкновения дейтронов: ■, ▲ — данные работ [15] и [16] соответственно; • — результат настоящей работы

$$S(E=1,8\ \text{кэВ})=(114\pm 68)\ \text{б}\cdot\text{кэВ};$$

$$S(E=2,06\ \text{кэВ})=(64\pm 30)\ \text{б}\cdot\text{кэВ};$$

$$S(E=2,27\ \text{кэВ})=(53\pm 16)\ \text{б}\cdot\text{кэВ}.$$

На рис. 5 приведены найденные нами экспериментальные значения астрофизического S-фактора для dd-реакции, а также значения S-фактора для низкоэнергетической области энергий столкновения дейтронов, существующие в литературе к настоящему времени. Как видно, найденные нами значения S-фактора в пределах статистических погрешностей согласуются со значениями данной величины, измеренными в интервале энергий столкновения дейтронов 7–45 кэВ.

Что касается сечений dd-реакции, то нами были выполнены вычисления данной величины для указанных выше энергий столкновения дейтронов с использованием экспериментально найденных значений

$$\sigma_{dd}^{n}\ (E_{\text{col}}=1,8\ \text{кэВ})=(4,3\pm 2,6)\cdot 10^{-33}\ \text{см}^2;$$

$$\sigma_{dd}^{n}\ (E_{\text{col}}=2,06\ \text{кэВ})=(9,8\pm 4,6)\cdot 10^{-33}\ \text{см}^2;$$

$$\sigma_{dd}^{n}\ (E_{\text{col}}=2,27\ \text{кэВ})=(2,1\pm 0,6)\cdot 10^{-32}\ \text{см}^2.$$

Полученные таким образом значения сечения dd-реакции приведены на рис. 6. В пределах статистических погрешностей наблюдается согласие расчетных значений сечения dd-реакции с экспериментальными.

На основании полученных результатов можно сформулировать следующие выводы.

1. Предложен новый метод исследования сильных взаимодействий между легкими ядрами в области ультранизких энергий столкновения (~ кэВ), базирующийся на использовании лайнерной плазмы.

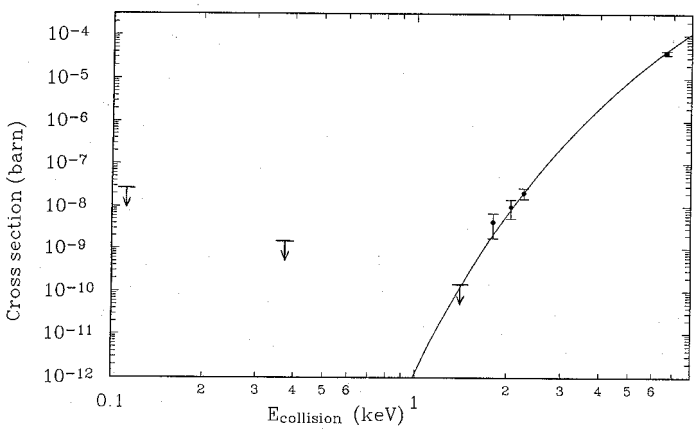


Рис. 6. Зависимость сечения *dd*-реакции от энергии столкновения дейтронов: сплошная кривая — расчетная зависимость, – — эксперимент [15]; результаты настоящих исследований: • — значения сечения *dd*-реакции, найденные при энергиях столкновения дейтронов 1,8; 2,06; 2,27 кэВ; ↓ — экспериментально найденные верхние оценки эффективных сечений *dd*-реакций на 90 %-м уровне

2. Впервые экспериментально получены значения астрофизического *S*-фактора для *dd*-реакции при энергиях столкновения дейтронов 1,8, 2,06 и 2,27 кэВ.

3. Впервые экспериментально определены верхние граничные значения эффективных сечений столкновения дейтронов 0,05–2,3 кэВ.

Несомненно, представляет большой интерес проведение исследований *dd*-реакции при энергиях столкновения дейтронов 3–5 кэВ. Данные исследования позволят впервые измерить сечения *dd*-реакции в указанном диапазоне энергий столкновения дейтронов, а также произвести корректное сравнение их как с результатами экстраполяции соответствующих значений данной величины из «высокоэнергетической» области в изучаемую, так и с результатами, полученными с использованием классических ускорителей. Для реализации данной программы исследования ядерных реакций в области энергий 3–5 кэВ нами, в качестве альтернативы, была высказана гипотеза [12] о возможности использования инверсного *Z*-пинча. В схеме инверсного *Z*-пинча лайнерная плазма ускоряется радиально от оси (до этого мы проводили исследования *dd*-реакции с использованием прямого *Z*-пинча: плазма ускорялась в направлении к оси лайнера), что позволяет дискриминировать по времени процессы электродинамического ускорения плазмы и ее взаимодействия с мишенью. В литературе к моменту реализации этой идеи отсутствовала какая-либо информация о применении инверсного *Z*-пинча в физических исследованиях.

В 1999 г. нами были выполнены работы [14], посвященные изучению динамики формирования инверсного дейтериевого *Z*-пинча применительно

к исследованию *dd*-реакции в области ультранизких энергий столкновения дейтронов. Впервые измерены характеристики дейтериевого лайнера, ускоренного в схеме инверсного *Z*-пинча до скоростей $(2{,}8 \div 7{,}2) \cdot 10^7$ см/с, а также исследованы характер и уровень нейтронного и γ-излучений, сопровождающих процесс ускорения лайнера. Показано, что применение методики инверсного *Z*-пинча позволяет достаточно надежно дискриминировать по времени «полезные» и фоновые события. Отметим, что методика инверсного *Z*-пинча применима также для проведения экспериментов по измерению характеристик *pd*- и *d*He-реакций в области ультранизких энергий.

Вся совокупность полученных результатов свидетельствует о том, что применение предложенной нами методики исследования сильных взаимодействий в области ультранизких энергий столкновения с использованием прямого и «инверсного» *Z*-пинча является перспективным направлением, позволяющим осуществить изучение ядерных реакций между легкими ядрами в области энергий, недоступной для классических ускорителей.

С момента начала выполнения экспериментальной программы по проекту «LESI» нами опубликовано 14 работ:

1. *V.B.Belyaev, V.M.Bystritsky et al.* Investigation of strong interactions at very low energies (50 eV ÷ 1000 eV). JINR Communication D15-92-324, Dubna, 1992.
2. *V.B.Belyaev, V.M.Bystritsky et al.* New proposals for the investigation of strong interaction of light nuclei at superlow energies // Nucleonica, 40 (1995) 85.
3. *Vit.M.Bystritskii, Vyach.M.Bystritsky et al.* Investigation of interactions between light nuclei at ultralow energies 100 ÷ 2000 eV. JINR Preprint D15-95-378, Dubna, 1995.
4. *V.M.Bystritsky et al.* Investigation of strong interactions between light nuclei at superlow energies using *Z*-pinch plasma flow // 10th IEEE Intern. Pulse Power Conf., NM, Jule 10–3, 1995, USA; IEEE, v.2 (1995) 1215.
5. *V.M.Bystritsky et al.* Nuclear reactions cross section measurement using *Z*-pinch technology // Proceed. of the 11th Intern. Conf. High. Power Particle Beams «Beams 96», Prague, June 10–14, 1996, v.2, p.917.
6. *V.M.Bystritsky et al.* A new approach in the experimental studies of nuclear reactions at ultralow energies // Nukleonika, 42 (1997) 775.
7. *V.M.Bystritsky et al.* Setup to investigate rare neutron producing processes. // NIM, 374 (1996) 73.
8. *V.M.Bystritsky et al.* On the registration ability of solid state CR-39 track detectors. // NIM (Russia), 4 (1997) 12.
9. *V.M.Bystritsky et al.* Measurement of $d + d \rightarrow {}^3\mathrm{He} + n$ cross section at ultralow energies using *Z*-pinch. JINR Preprint D15-96-11, Dubna, 1996.
10. *V.M.Bystritsky et al.* Measurements of the cross section of the reaction $d + d \rightarrow {}^3\mathrm{He} + n$ at ultralow collisions energies by *Z*-pinch technique // Physics of Atomic Nuclei, 60 (1997) 1349.

11. *V.M.Bystritsky et al.* Experimental Investigation of *dd* Reaction in Range of Ultralow Energies Using *Z*-Pinch // Laser and Particle Beams, v.18 (2000) 1.
12. *V.M.Bystritsky et al.* The Astrophysical *S*-Factor for the *dd*-Reaction at Ultralow Energy // Phys. of Atomic Nucl. 5 (2001).
13. *V.M.Bystritsky et al.* Invesrse *Z*-Pinch in Fundamental Investigations // NIM, A455 (2000) 706.
14. *Vyach.M.Bystritsky and F.M.Pen'kov.* Analitical estimates of the nuclear reaction yields in the ultralow energy range. JINR Preprint D15-2000-293, Dubna, 2001.

Программа исследований на 2001–2003 гг.

2001 г.

1. Исследование зависимости эффективного сечения *dd*-реакции в диапазоне энергий столкновения дейтронов 0,1–3 кэВ.

2. Измерение астрофизического *S*-фактора в вышеуказанном диапазоне энергий дейтронов.

2002 г.

1. Исследование процесса образования инверсного *Z*-пинча для изучения *pd*-реакции в диапазоне энергий столкновения дейтронов 0,1–3 кэВ.

2. Интерпретация и анализ данных экспериментов по исследованию *dd*-реакции.

2003 г.

1. Исследование *pd*-реакции в диапазоне энергий столкновения 0,1–3,0 кэВ.

2. Измерение астрофизического *S*-фактора для вышеуказанного диапазона энергий.

Гранты

В настоящее время проект «LESI» имеет финансовую поддержку:
1) гранта Российского фонда фундаментальных исследований (№ 00-02-17203);
2) гранта Полномочного Представителя Республики Польша в Объединенном институте ядерных исследований.

В заключение хочется выразить искреннюю благодарность директору ОИЯИ академику РАН В.Г.Кадышевскому, вице-директору ОИЯИ проф. А.Н.Сисакяну, проф. Е.Неводничанскому и проф. А.Хрынкевичу за постоянный интерес к представленной программе исследований и финансовую поддержку.

Список литературы

1. *Merkuriev S.P. et al.* // Proc. Int. Conf. on the theory of Few Body and Quark Hadronic Systems, Dubna, 1987, p.6.

2. *Friar J.L.* // Proc. Intern. Conf. on the Theory of Few Body and Quark–Hadronic Systems, Dubna, 1987, p.70.
3. *Rolfs C.* // Proc. Intern. School of Phys. «Enrico Fermi», Course C.3, Villa Monastero, 23 June – 3 July 1987, edited by P.Kienle, R.A.Ricci and A.Rubbino, North Holland, 1989, p.417;

   Bachall J.N. and Pinsonneault M.H. // Rev. Mod. Phys., 64 (1992) 885;

   Arnould M. and Forestini J. // Nuclear Astrophysics, Proc. of the Third Intern. Summer School, La Rabida, Huelve, Spain, June 1988, Springer-Verlag, Research Reports in Physics, p.48.
4. *Belyaev V.B. et al.* // Nucleonika 40 (1995) 85.
5. *Харченко В.Ф. и др.* // Ядерная физика 55 (1992) 86.
6. *Angulo C. et al.* // Z. Phys. A513 (1990) 316.
7. *Greife U. et al.* // Z. Phys. A351 (1995) 107.
8. *Belyaev V.B. et al.* JINR Preprint D15-92-324, Dubna, 1992.
9. *Belyaev V.B. et al.* JINR Preprint D15-95-375, Dubna, 1995.
10. *Быстрицкий Вит.М. и др.* // Ядерная физика 60 (1997) 1349.
11. *Быстрицкий Вит.М. и др.* Препринт ОИЯИ Д15-96-11, Дубна, 1996.
12. *Bystritsky V.M. et al.* // Laser and Particle Beams 18 (2000) 1.
13. *Bystritsky V.M. et al.* // Phys. of Atomic Nucl. 5 (2001).
14. *Bystritsky V.M. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A 455 (2000) 706.
15. *Krauss A. et al.* // Nucl. Phys. A465 (1987) 150.
16. *Jarmie N. et al.* // Phys. Rev. C29 (1984) 2031.

МНОГОКРИСТАЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ФИЗИКИ НИЗКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

В.Г.Сандуковский

Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ

Сотрудничество ЛЯП ОИЯИ — ИЯФ им. Г.Неводничанского (Краков) в области совершенствования методики создания нестандартных типов германиевых детекторов частиц:

- **широкоапертурных планарных HPGe-детекторов;**
- **секционированных коаксиальных HPGe-детекторов;**
- **HPGe-детекторов для сверхнизких температур**

Сотрудничество Лаборатории ядерных проблем с научными центрами Республики Польша в области технологии изготовления полупроводниковых детекторов ядерных излучений и создания различных спектрометров на их основе имеет давние традиции. Более тридцати лет ведутся разработки различных типов спектрометрических систем и отдельных детекторов частиц из кремния и германия совместно со специалистами из Сверка, Люблина, Кракова, Вроцлава.

В последние 5–7 лет наиболее результативно развивается сотрудничество с ИЯФ (Краков) по созданию специальных HPGe-детекторов. Эти работы нашли свое отражение в следующих экспериментальных программах, базирующихся на многокристальной концепции спектрометров.

1. Многокристальный спектрометр TGV (Telescope Germanium Vertical) предназначен для поиска очень редкого процесса — двойного бета-распада. Схема 16-детекторной конфигурации спектрометра, который расположен в подземной лаборатории Модан (Франция), показана на рис. 1. Активная площадь отдельного HPGe-детектора 12 см^2. В настоящее время идет подготовка к запуску следующей модификации спектрометра — TGV-2, в состав которого войдут 32 планарных HPGe-детектора с активной площадью 20 см^2 каждый. Детекторы были изготовлены в ИЯФ (Краков) по контракту в счет взносов Польши в ОИЯИ. Работа по созданию детекторов и их тестированию заняла четыре года.

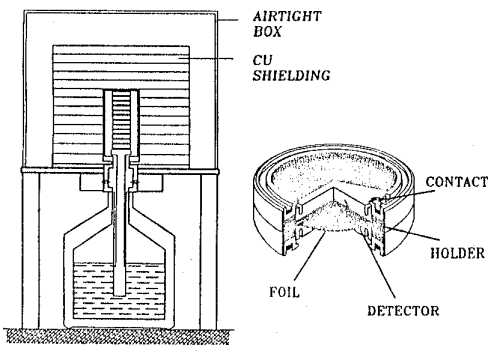


Рис.1.

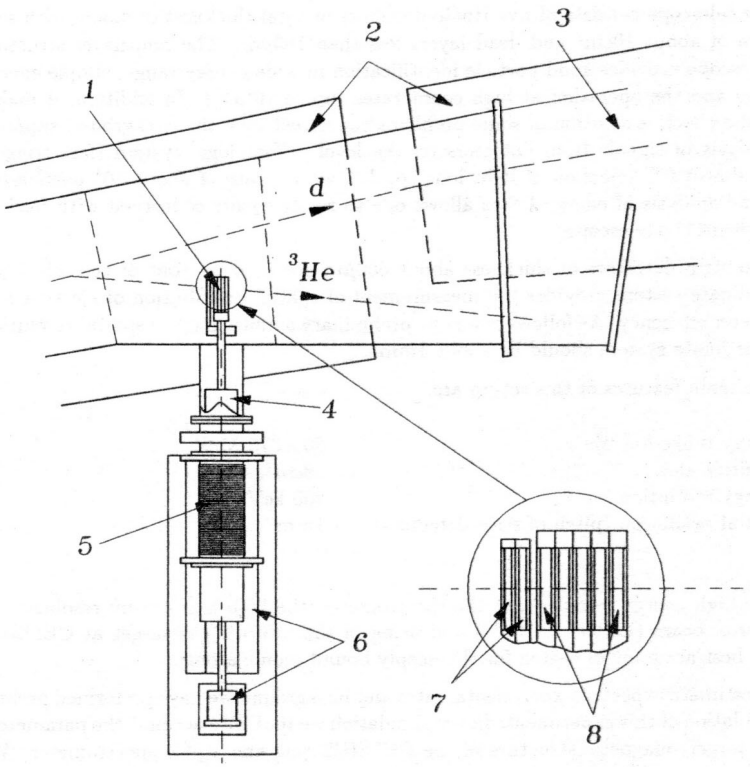


Рис.2. Малоугловой спектрометр комплекса CELSIUS–WASA (Уппсала, Швеция): *1* — полупроводниковый телескоп, *2* — поворотные магниты, *3* — ионопровод, *4* — криостат, *5* — сильфон, *6* — система перемещения, *7* — Si стриповые детекторы, *8* — HPGe-детекторы

2. Малоугловой спектрометр измерительного комплекса CELSIUS–WASA (Уппсала, Швеция), созданный на основе детекторов из германия, предназначен для исследований двухчастичных ядерных реакций на внутренних мишенях накопительного кольца CELSIUS. Сочетание многослойного полупроводникового телескопа и магнитной системы накопительного кольца обеспечивает хорошие возможности для исследования процессов с вылетом частиц под малыми углами (мечение реакций π, η-рождения в экспериментах по изучению мод распадов мезонов, поиск глубоколежащих состояний пионных атомов тяжелых элементов в (*d*, He)-реакции и т.п.). Схема спектрометра показана на рис. 2. Польские специалисты оказали помощь в создании тонких передних входных окон на HPGe-детекторах.

3. Программа EDELWEISS. Сотрудничество ЛЯП ОИЯИ с рядом научных центров Франции по программе EDELWEISS направлено на создание низкофонового полупроводникового болометра, работающего в двойной моде (тепловой и ионизационной). Назначение установки EDELWEISS — поиск гипотетических тяжелых нейтральных частиц (WIMPs), возможно ответственных за дефицит материи во Вселенной. Установка расположена в подземной лаборатории в Модане. В рамках этого сотрудничества в ЛЯП проведено исследование поведения характеристик различных детекторов из кремния и германия в условиях сверхнизких температур. Детекторы из HPGe показали, в частности, способность не терять спектрометрические свойства вплоть до температуры 1 К.

4. Проект MAJORANA. Год назад большая коллаборация, возглавляемая Университетом Дюка (Северная Каролина, США), предложила проект MAJORANA, направленный на поиск безнейтринного бета-распада с помощью 500-кг сегментированных детекторов из обогащенного Ge-76. Предполагается, что проект MAJORANA будет иметь в 100 раз большую чувствительность по сравнению с существующими в настоящее время экспериментами и сможет ответить на вопрос о природе нейтрино (майорановская или дираковская частица). На первой стадии предполагается иметь один сегментированный кристалл Ge-76, окруженный 13 коаксиальными детекторами из обычного HPGe. На этой стадии будет вестись поиск $2\nu\beta\beta$-распада. В окончательной стадии установка будет включать в себя 210 сегментированных детекторов из Ge-76. В рамках этого сотрудничества мы планируем создание совместно с коллегами из ИЯФ (Краков) прототипа сегментированного детектора из обычного германия для детального исследования его спектрометрических характеристик.

ПРОГРАММА «БОГОЛЮБОВ–ИНФЕЛЬД» (Программа сотрудничества с научными центрами Польши в области теоретической физики)

В.В.Воронов, В.И.Журавлев

Лаборатория теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова ОИЯИ

Начнем с краткой информации о лаборатории. Сегодня Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова — международный многопрофильный центр теоретической физики. Научный персонал лаборатории — около 160 человек, примерно половина из которых работает по контракту. Помимо российских ученых в ЛТФ работают представители Армении (3), Аргентины (1), Белоруссии (2), Болгарии (3), Германии (4), Грузии (3), Казахстана (2), Мексики (1), Молдавии (3), Монголии (2), Польши (2), Словакии (2), Узбекистана (1), Украины (2). Исследования ведутся по трем направлениям (темам):

1. Поля и частицы (руководители темы А.Т.Филиппов, Д.И.Казаков, А.П.Исаев):

- квантовые симметрии, интегрируемые модели, суперсимметрии с приложениями к струнам, гравитации и космологии;
- непертурбативные подходы в калибровочных теориях;
- стандартная модель и ее расширения;
- квантовая хромодинамика: спиновые эффекты, правила сумм, структура вакуума;
- кварковые модели адронов.

2. Теория атомного ядра и других конечных систем (руководители темы В.В.Воронов, Р.В.Джолос):

- структура ядра в экстремальных условиях;
- динамика и структурные эффекты в ядерных и мезоскопических системах;
- физика малочастичных систем;
- релятивистская ядерная динамика.

3. Теория конденсированных сред (руководители темы Н.М.Плакида, В.Б.Приезжев):

- сильно коррелированные системы;
- динамические системы: хаос, интегрируемость, самоорганизация;
- неупорядоченные структуры: стекла, топологические дефекты, наноструктуры и джозефсоновские контакты;
- мезоскопические и когерентные явления в квантовых системах.

Компьютерный центр лаборатории включает парк серверов и персональных компьютеров, объединенных в локальную сеть. В лаборатории ежегодно проводится около 10 конференций, школ, совещаний.

Важная часть деятельности лаборатории связана с сотрудничеством с научными центрами стран-участниц и других стран. Помимо участия в общеинститутских соглашениях лабораторией заключены следующие специальные соглашения о сотрудничестве в области теоретической физики:

- ЛТФ–ICTP (1988);
- ЛТФ–Германия (1991)
  Программа «Гейзенберг–Ландау»;
- ЛТФ–INFN (1995);
- ЛТФ–CERN TH (1995);
- ЛТФ–Польша (декабрь 1998 г.)
  Программа «Боголюбов–Инфельд»;
- ЛТФ–Чехия (декабрь 1999 г.)
  Программа «Блохинцев–Вотруба».

Польша сыграла большую роль в создании ОИЯИ и Лаборатории теоретической физики. В составе первого Ученого совета ОИЯИ был выдающийся польский теоретик Леопольд Инфельд, а в состав первого Ученого совета ЛТФ, утвержденный 26 сентября 1956 г., вошли польские теоретики Ян Жевуский и Ежи Плебанский. Одними из первых сотрудников лаборатории из стран-участниц были польские теоретики Януш Домбровский, Георгий Савицкий, Ян Жевуский.

Польские теоретики внесли значительный вклад в научную программу лаборатории. Признанием этого было проведение выездной сессии секции Ученого совета ОИЯИ по теоретической физике в Кракове 16–20 мая 1988 г.

В начале 90-х годов трудности, переживаемые нашими странами, привели к заметному сокращению сотрудничества лаборатории со странами-участницами, в том числе и с Польшей. Перелом наступил в конце 1998 г., когда по предложению профессора А. Хрынкевича была утверждена программа целевого использования польского взноса в рамках средств по гранту Полномочного Представителя Республики Польша в ОИЯИ. В области сотрудничества по теоретической физике эта программа получила название «Программа Боголюбов–Инфельд». За последние два года значительно увеличилось число командировок сотрудников ЛТФ в Польшу и польских теоретиков в Дубну.

Командировки	1996	1997	1998	1999	2000
В Польшу	13	11	13	35	21
Из Польши (без конференций)	2	5	3	13	12

В 1999–2000 гг. польские теоретики участвовали в конференциях и рабочих совещаниях, организованных ЛТФ:

- рабочем совещании «Коллективные методы в ядрах и других мезоскопических системах» (14–24 июня 1999 г., Дубна);
- рабочем совещании «Суперсимметрии и квантовые симметрии» (27–31 июля 1999 г., Дубна);
- Боголюбовской конференции «Проблемы теоретической и математической физики» (27 сентября – 6 октября 1999 г., Москва, Дубна, Киев);
- международной конференции «Структура ядра и связанные вопросы» (6–10 июня 2000 г., Дубна);
- рабочем совещании «Аналитические вычисления для современных и будущих коллайдеров» (9–23 июля 2000 г., Дубна);
- XXIII Международном коллоквиуме по теоретико-групповым методам в физике (31 июля – 5 августа 2000 г., Дубна);
- рабочем совещании «Актуальные проблемы в астрофизике» (22–26 августа 2000 г., Дубна).

Сотрудники ЛТФ за последние два года также участвовали в ряде конференций и совещаний, проходивших в Польше:

- XXXV зимней школе по теоретической физике (2–12 февраля 1999 г., Поланица);
- XIV Борновском симпозиуме «Новые симметрии и интегрируемые системы» (21–24 сентября 1999 г., Карпач);
- 7-м Международном семинаре по исследованию конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов (11–13 мая 2000 г., Познань);
- международной конференции «Мезон-2000» (19–23 мая 2000 г., Краков);
- 6-й Международной летней школе по теоретической физике (30 августа – 6 сентября 2000 г., Жешув);
- 2-м рабочем совещании по выходу за рамки квантовых теорий (12–15 октября 2000 г., Краков).

На ежегодном конкурсе ОИЯИ вторая премия за 1999 год в области теоретической физики присуждена циклу исследований «Предсказание существования сверхтяжелого долгоживущего ядра с зарядом $Z = 114$ и острова стабильности», авторы: Ф.А. Гареев (ЛТФ, ОИЯИ), Б.Н. Калинкин (ЛТФ, ОИЯИ), А. Собичевский (ИЯП, Варшава).

За прошедший год с польскими теоретиками опубликовано 10 совместных работ, несколько публикаций готовятся к печати. Отметим большой обзор, опубликованный в журнале ЭЧАЯ (2000, том 31, вып.4): В.И. Навроцка (ИТФ, Университет, Вроцлав), Р.Г. Назмитдинов (ЛТФ, ОИЯИ) «Некоторые аспекты парных корреляций в конечных ферми-системах». В обзоре подведен итог многолетних совместных исследований эффектов парных корреляций сверхпроводящего типа во вращающихся ядрах и металлических зернах.

В течение последних двух лет мы регулярно принимаем польских студентов, и на таких встречах выступают ведущие сотрудники ЛТФ.

В этом году в Польше будет проходить рабочее совещание «Суперсимметрии и квантовые симметрии» (17–22 сентября, Карпач), организуемое совместно ЛТФ и Институтом теоретической физики (Вроцлав). На XXXVII зимнюю школу по теоретической физике (6–15 февраля, Карпач) приглашены в качестве лекторов три сотрудника ЛТФ.

Программа «Боголюбов–Инфельд» действует два года, и нам представляется, что она еще не в полной мере реализовала творческий потенциал ЛТФ и польских ученых. Необходимо больше информировать о программе польских теоретиков. С этой целью в прошлом году с визитом в Польше были директор ЛТФ профессор А.Т. Филиппов и руководитель темы «Теория конденсированных сред» профессор Н.М. Плакида. В организационном плане может быть полезен опыт программы «Гейзенберг–Ландау».

ПРОЕКТ НОВОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ОИЯИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОТРУДНИЧЕСТВА С ПОЛЬСКИМИ НАУЧНЫМИ ЦЕНТРАМИ

В.И.Фурман

Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ

1. Введение

Созданная в ЛНФ научная школа по нейтронной ядерной физике добилась общепризнанных результатов в исследовании свойств нейтрона как элементарной частицы, эффектов нарушения симметрии фундаментальных взаимодействий нейтронов с ядрами, структуры возбужденных компаунд-состояний тяжелых ядер, образованных после захвата резонансных нейтронов, а также механизмов ядерного деления и альфа-, гамма- и протонного распада этих состояний.

Научная программа, реализованная с активным участием специалистов из польских научных центров на существующем источнике ИБР-30, который планируется закрыть в июне 2001 г. в соответствии с планом-графиком создания нового источника резонансных нейтронов (ИРЕН) ОИЯИ, отвечала современному мировому уровню. По результатам работ на ИБР-30 публиковалось по 30–40 статей в год в реферируемых журналах, таких как «Ядерная физика», «Nucl. Phys.», «Phys. Rev.», NIM и др. (См. подробнее годовые отчеты ЛНФ за эти годы.) Ряд результатов был представлен в приглашенных докладах на международных конференциях.

Пользователи из ряда научных центров Польши активно работали на пучках ИБР-30 и по результатам исследований защитили десятки кандидатских и докторских диссертаций. Конкурентоспособные на европейском уровне параметры нового источника должны привлечь молодых и опытных исследователей из стран-участниц и неучастниц ОИЯИ, в том числе, конечно, из Польши.

Концепция нового источника является прямым развитием идеи бустера ЛУЭ-40 + ИБР-30. Установка ИРЕН состоит из современного электронного линейного ускорителя на 200 МэВ с длительностью электронного импульса 250 нс, частотой 150 Гц и мощностью электронного пучка не менее 10 кВт, который инжектирует пучок электронов в центр быстрой подкритической плутониевой сборки оригинальной конструкции с коэффициентом размножения около 30, что

позволяет получить импульс быстрых нейтронов продолжительностью 400 нс со средней интенсивностью 10^{15} $с^{-1}$.

В проект ИРЕН заложено улучшение разрешения нейтронного спектрометра на порядок при увеличении интенсивности в два раза.

Достижение указанных параметров сделает ОИЯИ обладателем современного нейтронного источника для ядерной физики, уступающего из существующих только лучшему в мире источнику LANSCE в Лос-Аламосе (см. таблицу).

Не входя в детали, здесь уместно отметить, что проект ИРЕН был оптимизирован по стоимости сооружения и эксплуатации с реальными возможностями ОИЯИ, а именно: существующие здания установки ЛУЭ-40 + ИБР-30, экспериментального зала и пучковая инфраструктура с измерительными павильонами будут использованы при создании и в работе на эксперимент нового источника. Применение размножающей мишени существенно снижает энергозатраты при эксплуатации источника по сравнению с другими источниками нейтронов с близкой интенсивностью.

Спектрометр	$\langle I_n \rangle, 10^{15}$ $с^{-1}$	$C, 10^7$	τ, нс	Δt (100 эВ), нс
ФАКЕЛ (РНЦ КИ, Россия)	0,003	0,03	50	200
ORELA (Ок-Ридж, США)	0,13	1,5	30	180
GELINA (IRMM, Бельгия)	0,05	0,6	1	160
ЛУЭ-40/ИБР-30 (Дубна)	0,5	6	4300	4500
LANSCE (Лос-Аламос, США)	10	40	150	300
CERN n_TOF	0,4	5	40	200
ИРЕН (Дубна, проект)	0,9	9	400	430

Примечание. Здесь τ — продолжительность нейтронной вспышки по быстрым нейтронам, Δt — реальная длительность нейтронного импульса при $E_n = 100$ эВ после замедления, величина C определена соотношением $\phi(E_n) = C / E_n \cdot L^2$, где $\phi(E_n)$ — поток нейтронов с энергией E_n на образце в 1 $см^2$, расположенном на расстоянии L метров от источника, $\langle I_n \rangle$ — полный выход нейтронов в секунду.

2. Научная программа исследований на ИРЕН

Благодаря высокой интенсивности и рекордному для стран-участниц ОИЯИ энергетическому разрешению установка ИРЕН предоставляет конкурентоспособные возможности для экспериментальных исследований в области фундаментальной и прикладной ядерной физики.

Наличие сложившейся в ОИЯИ научной школы и экспериментальной базы для нейтронной ядерной физики позволяет включить в программу исследований такие трудные задачи, как поиск эффектов, нарушающих временную инвариантность и пространственную четность в реакциях, вызванных нейтронами,

детальное исследование новых, недавно обнаруженных в экспериментах на ИБР-30 явлений в радиационном захвате и делении тяжелых ядер. Создание ИРЕН открывает богатые возможности для получения новых ядерных данных для астрофизики, реакторной техники и трансмутации радиоактивных отходов.

Существующие оригинальные методические наработки позволяют по-новому поставить исследования электромагнитных свойств нейтрона — его электрической поляризуемости (установка УГРА) и нейтрон-электронного взаимодействия. Последняя задача предполагает использование тепловых нейтронов реактора ИБР-2 в дополнение к данным, получаемым на ИРЕН в области резонансных нейтронов.

Прецизионные эксперименты по изучению малых (10^{-3}–10^{-4}) эффектов нарушения симметрий фундаментальных взаимодействий в реакциях, вызванных резонансными нейтронами, требуют использования пучков поляризованных нейтронов и поляризованных ядерных мишеней. Эта экспериментальная техника, традиционно используемая в ЛНФ, находится в настоящее время в стадии активного развития, необходимого для выполнения научной программы на ИРЕН. В сотрудничестве с ФИАН и ИТЭФ создаются и испытываются гелиевые поляризаторы и новые типы поляризованных ядерных мишеней.

По оригинальной, предложенной в ЛНФ методике KATRIN исследуются эффекты нарушения временной инвариантности в пропускании поляризованных нейтронов через поляризованную газовую мишень ^{131}Xe. Новые соединения лантана испытываются в качестве поляризованной мишени на основе сверхпроводящих магнитов.

Модернизированную установку ПОЛЯНА предполагается использовать в коллаборации с ПИЯФ (Гатчина) для исследования *P*-четных и *P*-нечетных угловых корреляций осколков деления ряда актинидов с целью выяснения зависимости от четности внешних барьеров деления и, следовательно, симметрии формы гипердеформированных ядер в точке разрыва.

В коллаборации с ФЭИ (Обнинск) на новом методическом уровне будут продолжены исследования угловой анизотропии осколков деления выстроенных по спину ядер-мишеней. Будет изучаться анизотропия, связанная с отдельными модами деления, что должно улучшить понимание природы переходных состояний делящихся ядер.

Исследование массовых и ТКЕ-распределений для многих компаунд-состояний широкой области актинидов (эксперимент ДЕЛРЕНЕ), которое станет возможным благодаря существенному улучшению разрешения по энергии и увеличению интенсивности нейтронных пучков на ИРЕН, позволит детально изучить барьеры деления для отдельных мод.

Очень перспективным является исследование нестатистических закономерностей в каскадном гамма-распаде компаунд-состояний. Для этого необходимо существенное улучшение эффективности HPGe-детекторов в уста-

новке КАСКАД. Здесь перспективным является сотрудничество с краковским Институтом ядерной физики, обладающим технологией создания необходимых гамма-детекторов. Использование таких детекторов позволит впервые изучить для набора нейтронных резонансов недавно обнаруженные явления типа квазивибрационных полос или скачка в энергетической зависимости плотности уровней при промежуточных энергиях возбуждения и сделать надежное заключение о существовании и свойствах фазового перехода сверхтекучесть — ферми-газ в структуре возбужденных уровней тяжелых ядер.

Развитие совместно с лодзинским Университетом недавно предложенной светосильной методики (установка КОКОС) регистрации мгновенных гамма-квантов из осколков деления дает возможность изучить их циркулярную поляризацию. Это позволит продвинуться в понимании механизма формирования высокого спина продуктов деления, что является одной из актуальных проблем физики деления.

В коллаборации с лодзинским Университетом и ORNL (США) намечена широкая программа по ядерной астрофизике, которая будет выполняться сначала на источнике ORELA (Ок-Ридж), а потом и на ИРЕН.

Задачи по получению необходимых для развития ядерной технологии данных будут решаться в традиционной коллаборации с ФЭИ на основе совместно создаваемых новых методик и использования уникальных изотопных мишеней.

Новые экспериментальные возможности установки ИРЕН и развитая инфраструктура привлекут в ОИЯИ пользователей из стран-участниц и неучастниц ОИЯИ, которые привнесут новые плодотворные идеи в программу научных исследований.

3. Статус проекта ИРЕН

После одобрения проекта ИРЕН на сессии КПП ОИЯИ в марте 1993 г. и после его рассмотрения на 76 сессии Ученого совета ОИЯИ в июне 1994 г. дирекция Института приняла решение о реализации проекта ИРЕН со сроком окончания в декабре 1997 г. Однако по целому ряду объективных причин, главным образом, из-за отсутствия необходимого финансирования, реализация проекта идет с существенным отставанием от первоначального плана-графика. Ситуация с выполнением проекта ИРЕН неоднократно рассматривалась на сессиях КПП, Ученого совета и Программно-консультативного совета по ядерной физики ОИЯИ. Начиная с середины 1999 г. положение стало медленно выправляться, и в марте 2000 г. дирекция ОИЯИ приняла план-график реализации проекта ИРЕН со сроком пуска первой очереди источника в 2003 г. (см. ниже). К началу 2001 г. изготовлены и поставлены в ОИЯИ ускорительные секции линейного ускорителя ЛУЭ-200, в стадии завершения находятся остальные узлы ЛУЭ-200, изготавливаемые в ИЯФ им. Г.И.Будкера (Новосибирск). Создан и начал работать в ЛФЧ новый отдел, основная задача которого — создание ЛУЭ-200. Подключение людских и

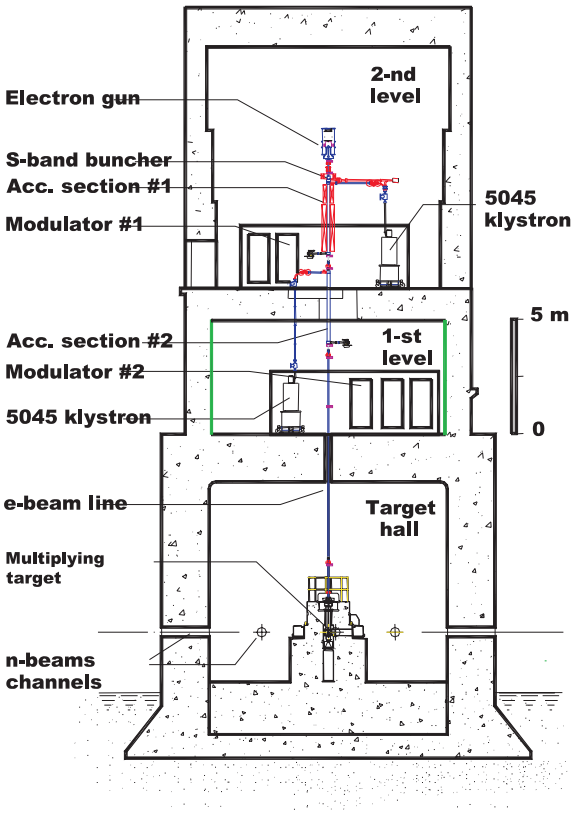


Рис. 1. Общий вид установки ИРЕН

технических ресурсов ЛФЧ к реализации проекта ИРЕН позволит ускорить пуск нового источника. На ПО «Маяк» завершены изготовление и официальная приемка твэлов размножающей мишени ИРЕН, они оставлены там на ответственное хранение. Заканчивается разработка проекта вывода из эксплуатации реактора ИБР-30.

Планы работ по проекту ИРЕН на 2001 г. предусматривают демонтаж существующего ускорителя ЛУЭ-40 и подготовку здания 43 к монтажу ЛУЭ-200. Важнейшей задачей на 2001 г. является завершение подготовки к выводу из эксплуатации реактора ИБР-30 и его демонтажу. Для получения к концу года соответствующей лицензии необходимо спроектировать и изготовить оборудование и оснастку для демонтажа и эвакуации ядерного топлива и активированных конструкционных элементов реактора, построить и аттестовать новое хранилище радиоактивных отходов.

В 2001 г. планируется завершить конструкторские работы по отдельным узлам ЛУЭ-200, изготавливаемым в ОИЯИ, а также общую компоновку

ускорителя в здании 43. Должны быть изготовлены электронный источник, система магнитной фокусировки и спектрометр. Ускорительные секции ЛУЭ-200 должны быть испытаны на полную ВЧ-мощность при частоте 50 Гц. В ИЯФ им. Г.И.Будкера они были испытаны в октябре 2000 г. с пучком электронов при частоте 2,5 Гц, получен проектный темп ускорения 35 МэВ/м.

Таким образом, при наличии необходимого финансирования сохраняются шансы выполнить утвержденный план-график проекта ИРЕН со сроком физического пуска в 2003 г.

План-график выполнения проекта ИРЕН на 2000–2003 гг.

Содержание работ / Кварталы	2000				2001				2002				2003			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Технический проект установки ИРЕН, включая ТОБ, согласование проекта	■	■	■	■	■	■	■	■								
Изготовление ускорительных секций, группирователя и системы SLED, поставка в ОИЯИ	■	■	■	■	■	■										
Изготовление основных систем линака и их испытание на стендах	■	■	■	■	■	■	■	■								
Лицензирование и изготовление твэлов и ТУК, поставка твэлов в ОИЯИ	■	■	■	■												
Рабочий проект размножающей мишени				■	■	■	■	■								
Изготовление размножающей мишени и комплектация оборудования вспомогательных систем						■	■	■	■	■	■					
Лицензирование остановки и демонтажа ИБР-30				■	■	■	■	■								
Демонтаж ЛУЭ-40							■	■								
Изготовление оснастки для демонтажа ИБР-30						■	■	■								
Демонтаж ИБР-30									■	■						
Реконструкция здания 43 и создание инфраструктуры для установки ИРЕН							■	■	■	■	■	■	■			
Монтаж линака ЛУЭ-200									■	■	■	■				
Монтаж размножающей мишени в зд. 43												■	■	■		
Наладка ЛУЭ-200 и пуск установки ИРЕН												■	■	■	■	■
Финансирование (в k$)	306,5				609				1523							

Утвержденная сметная стоимость проекта — 3740 k$.
Инвестировано в 1994–2000 гг. — 1608 k$.
Запрашиваемое финансирование на 2001–2003 гг. — 2132 k$.

ОБЗОР ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ПРОЕКТА SAD

В.Н.Швецов

Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ

Введение

Проект «Создание подкритической сборки с комбинированным спектром нейтронов, управляемой протонным ускорителем с энергией протонов 660 МэВ для проведения экспериментов по трансмутации долгоживущих продуктов деления и минорных актинидов», получивший название SAD (Subcritical Assembly in Dubna), имеет своей целью создание на базе фазотрона ОИЯИ прототипа электроядерной установки с плутониевым МОХ-топливом (металло-оксидным), управляемой пучком протонов. Финансирование проекта планируется в основном за счет средств МНТЦ (Международного научно-технического центра) — международной межправительственной организации при непосредственном участии в финансировании проекта стран Европейского сообщества.

Цели проекта

Проблема утилизации долгоживущих отходов ядерной энергетики является ключевой в определении стратегии дальнейшего развития ядерной отрасли. Для стран с «замкнутым» топливным циклом (Франция, Япония, Россия) существует также проблема оптимального использования плутония, восстановленного из облученного топлива. Эти насущные задачи резко повысили интерес к возможности использования подкритических систем с плутониевым топливом для утилизации плутония и трансмутации минорных актинидов (МА) и долгоживущих продуктов деления (ДПД). Экологически безопасная и экономически выгодная утилизация оружейного и нарабатываемого в больших количествах на АЭС «технического» плутония способствует повышению атомной безопасности и вместе с тем может быть мощным источником энергии. Созданию крупных подкритических сборок с протонными ускорителями (ADS) должны предшествовать экспериментальная проверка теоретических предсказаний и оценка технологических особенностей таких систем. Задачами, требующими своего разрешения, являются: обоснование безопасности работы таких систем — расчет величины энергетического выигрыша; выбор топлива, типа мишени и рефлекторов; конструкция активной зоны, разработка методов надежного мониторирования коэффициента размножения нейтронов k_{eff}; измерение величины энергетического выхода ADS; измерение вклада высокоэнергетической ($E > 10$ МэВ) части

нейтронного спектра, особенно важной для создания надежной радиационной защиты. Для решения этих задач достаточно иметь подкритическую сборку с тепловой мощностью около 15 кВт. Создание прототипа ADS с мощностью 15 ÷ 20 кВт и является основной целью проекта SAD. В ходе выполнения этой задачи будут также решены вопросы экспериментального и теоретического исследования характеристик тяжелых нейтронопроизводящих мишеней из различных материалов, созданы и испытаны методики мониторирования характеристик подкритической сборки, разработано обоснование безопасности.

Научная программа

После реализации проекта на основе установки SAD предполагается выполнение следующей исследовательской программы:

- исследование режимов работы подкритической сборки в сочетании с протонным ускорителем, отработка методик измерения и контроля параметров установки;
- изучение проблем сопряжения мишени и подкритической сборки, включая влияние размера и положения мишеней на основные характеристики SAD;
- измерение абсолютной величины энергетического выхода установки (для решения этой задачи наиболее подходят системы с низким уровнем мощности);
- измерение эффективности защиты (особенно в направлении первичного протонного пучка);
- анализ состояния нейтронопроизводящих мишеней после облучения протонами, анализ специальных образцов (МА, ДПД), облученных в каналах SAD (включая радиохимический анализ);
- измерение скоростей реакций трансмутации МА и ДПД в различных нейтронных спектрах.

Организация проекта

Головной организацией проекта SAD является ОИЯИ, организациями-партнерами ОИЯИ по выполнению проекта — институты и предприятия Министерства РФ по атомной энергии: Научно-исследовательский институт энерготехники (НИКИЭТ), Государственный специализированный проектный институт (ГСПИ), Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов (ВНИИНМ) и производственное объединение «Маяк». В стадии переговоров находится вопрос об участии в реализации проекта концерна ядерного машиностроения «Шкода» из Чешской Республики. Чрезвычайно важным для реализации проекта является участие в его выполнении заинтересованных стран-участниц ОИЯИ. Так, в частности, представляется возможным и желательным участие

польских специализированных организаций, создававших комплекс СУЗ реактора ИБР-2, в создании аналогичной системы на установке SAD.

Текущее состояние проекта

На данный момент завершены переговоры со всеми участниками проекта по уточнению сроков, объемов работ и финансирования. При финансовой поддержке западных партнеров проекта (FZK, Карлсруэ, Германия; RIT, Стокгольм, Швеция; Ciemat, Мадрид, Испания и CEA, Кадараш, Франция) и организационно-технической поддержке со стороны Горно-металлургической академии (Краков, Польша) были разработаны эскизные проекты подкритической сборки (НИКИЭТ, рис. 1), протонного тракта (ЛЯП ОИЯИ, рис. 2, 3 и табл. 1) и общеинженерный

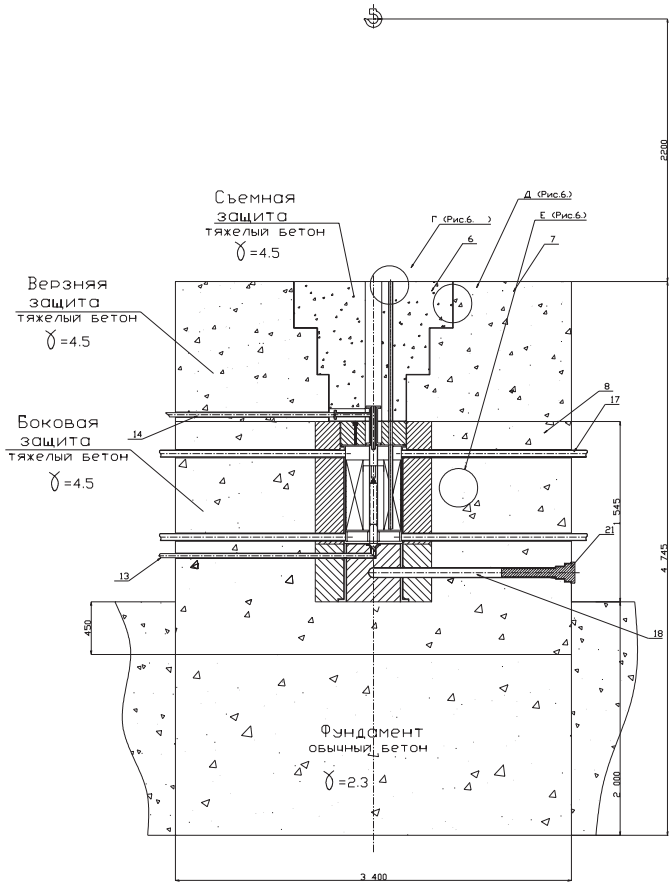


Рис. 1. Общий вид подкритической сборки SAD

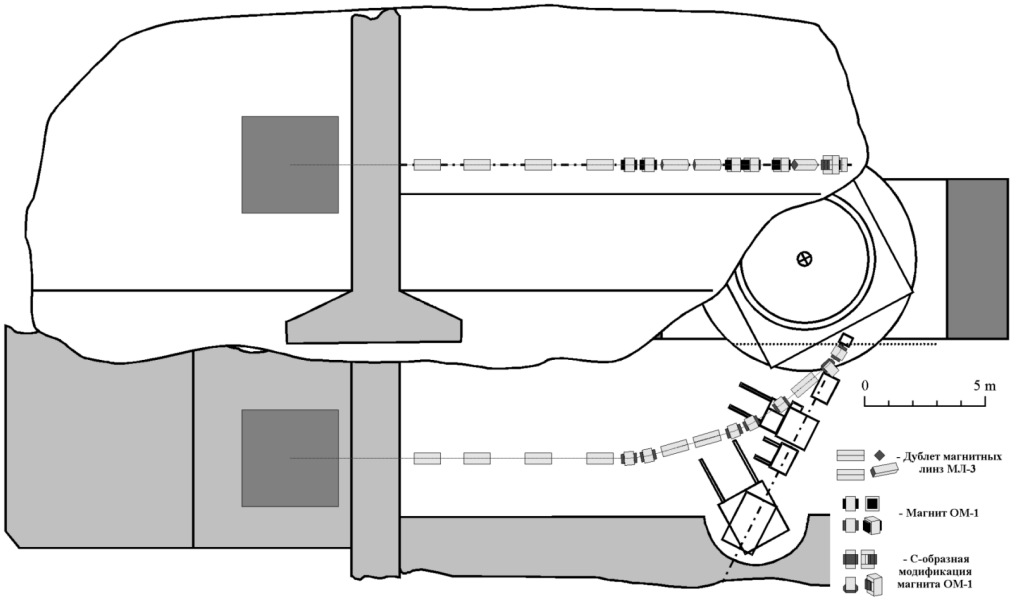


Рис. 2. Схема «чисто» горизонтального канала транспортировки выведенного протонного пучка к подкритической сборке, расположенной между стеной здания фазотрона и зданием установки ЯСНАПП-2

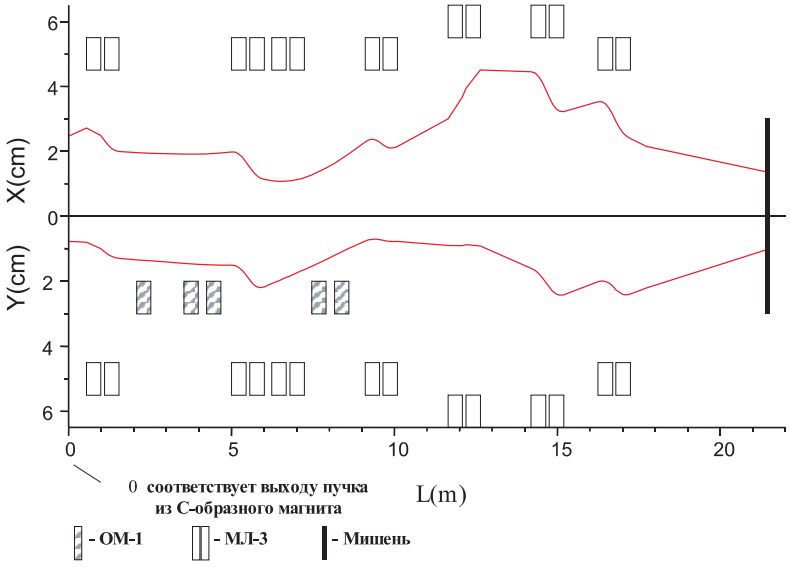


Рис. 3. Огибающие выведенного протонного пучка фазотрона (2σ-уровень)

проект установки. Завершается работа по эскизному проектированию тепловыделяющих элементов установки (твэлов). Работа ведется во ВНИИНМ и на ПО «Маяк». Также на ПО «Маяк» проведена работа по исследованию возможности увеличения процентного содержания оксида плутония в МОХ-топливе до 35 % вместо 27 %. Результаты исследований будут использованы при проектировании и изготовлении твэлов установки SAD.

Таблица 1. **Оценка стоимости различных вариантов канала транспортировки выведенного протонного пучка к подкритической сборке**

Вариант	Число элементов канала	Оценочная стоим. варианта, тыс. $	Полная потребл. мощность, кВт
1	14	140	840
2	36	360	2160
3	22	220	1320
4	47	470	2820
5	37	370	2220
6	55	550	3300
7	29	290	1740

На основе технико-экономического обоснования, представленного в эскизном проекте установки, подготовлена заявка в МНТЦ, которая будет направлена в отраслевую комиссию Министерства РФ по атомной энергии в конце марта 2001 года для экспертизы и дальнейшего направления заявки в МНТЦ.

Экспериментальная деятельность по проекту

В рамках подготовки проекта SAD летом 2000 г. на выведенном пучке протонов фазотрона ЛЯП был проведен эксперимент по изучению спектрально-угловых и пространственных распределений адронов, испускаемых свинцовой мишенью при облучении протонами с энергией 660 МэВ. В результате пятидесятичасового сеанса были измерены угловые и энергетические распределения нейтронов вокруг мишени с использованием многосферного спектрометра Боннера (работа выполнена сотрудниками ОРРИ ОИЯИ). Также двумя группами (ОРРИ ОИЯИ и Горно-металлургическая академия, Краков) были измерены угловые и пространственные распределения адронов вокруг мишени с использованием активационных детекторов. Группами из ЛНФ ОИЯИ и Горно-металлургической академии были измерены выходы продуктов ядерного каскада в свинцовой мишени, в настоящее время ведется совместная работа по определению абсолютных активностей образовавшихся изотопов.

При поддержке Полномочного Представителя Чешской Республики в ОИЯИ в ИЯФ АН (Ржеж, Чехия) были изготовлены два комплекта свинцово-висмутовых мишеней для продолжения экспериментальной программы в 2001 г. Мишени

будут доставлены в ОИЯИ во втором квартале 2001 г., эксперименты на фазотроне запланированы на вторую половину года.

Заключение

В ОИЯИ экспериментальные и теоретические работы по использованию протонных ускорителей в ядерной технологии ведутся с середины 50-х годов. Измерены выходы нейтронов и их спектры в свинцовых и урановых мишенях различных типов, нейтронные сечения для ряда изотопов, важных для оценки эффективности различных режимов трансмутации, создана математическая модель и соответствующее константное и программное обеспечение для расчета электроядерных систем.

В ОИЯИ имеется разрешение на эксплуатацию исследовательских ядерных реакторов с зонами, содержащими металлический плутоний и окись плутония. Эти реакторы надежно и безопасно эксплуатируются в течение более 35 лет. В ОИЯИ также накоплен многолетний опыт эксплуатации протонных ускорителей. Все это является хорошей основой для создания и последующего использования в Дубне экспериментальной электроядерной установки с плутониевым топливом. Международный статус ОИЯИ позволяет использовать для работ по электроядерной проблематике целевые финансовые вклады стран-участниц Института.

Создание в ОИЯИ прототипа электроядерной установки с использованием МОХ-топлива предоставит уникальную экспериментальную базу для решения комплекса задач, связанных с проблемами безопасной эксплуатации подкритических быстрых сборок, управляемых протонным ускорителем, и трансмутации ядерных отходов.

Создание установки SAD — не только весьма интересная научная проблема, но и сложная инженерно-технологическая задача, привлекательная для специалистов ВНИИНМ и ГСПИ. Участие этих институтов и предприятий, являющихся разработчиками и производителями твэлов БН-600, выбранных за основу для установки SAD, позволит им эффективно использовать свой опыт в перспективной мирной области, что соответствует целям МНТС.

Участие в проекте ОИЯИ в качестве головной организации позволит эффективно осуществить интеграцию ученых из стран-участниц ОИЯИ в решении фундаментальных и прикладных задач, связанных с реализацией проекта.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РЕАКТОРЕ ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ

М.В.Фронтасьева

Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ

Что такое аналитика? Это наука о способах идентификации химических соединений, о принципах и методах определения состава вещества и его химической структуры. Термин *аналитика* созвучен таким названиям, как кибернетика и бионика. В Германии, прародительнице аналитической химии, уже давно вместо Analytisch Chemie пишут Analytik. Понимая условность всех классификаций, можно охарактеризовать типы анализа как качественный, количественный, анализ химических форм (speciation), структурный анализ, анализ распределений, анализ кинетики и механизма реакций. Все методы анализа (элементный, молекулярный, фазовый или изотопный) основаны на зависимости между составом вещества и его свойствами. Для ядерно-физических методов — это спин и магнитный момент, масса, возбужденные состояния ядра и их параметры, вероятность ядерных реакций, период полураспада, виды распада ($\alpha - \beta - \gamma$ и др.) и энергии испускаемого излучения в случае радиоактивных ядер. Ниже перечислены основные ядерно-физические методы анализа:

ИНАА — инструментальный нейтронный активационный анализ (INAA);
РНАА — радиохимический нейтронный активационный анализ (RNAA);
РФЛ — рентгенофлуоресцентный анализ (XRF);
РФЛ-ПО — РФЛ с полным отражением (TXRF);
РФЛ-СИ — РФЛ с синхротронным облучением (SXRF);
ИФС — ионно-фотонная спектрометрия (PIXE);
ИСП-ЭС — эмиссионная спектроскопия с ИСП (ICP-ES);
ААС — атомно-абсорбционная спектрометрия (AAS);
ИСП-МС — масс-спектрометрия с ИСП (ICP-MS);
ИСП-ИРМС — ИСП-МС с изотопным разбавлением (ICP-IDMS);
ИМС — искровая масс-спектрометрия (SSMS).

Сравнение этих методов по таким параметрам, как точность, чувствительность (для анализа твердых веществ и жидкостей), распространенность, многоэлементность, размер образца, тип образца, рутинность и продолжительность анализа, доступность, стоимость, дано в табл. 1.

Каждый метод характеризуется своим пределом обнаружения. В начале 40-х гг. примеси в металлах определяли с пределом обнаружения 0,1–0,01 %,

к 1950 г. для большинства чистых металлов эти требования возросли до 10^{-4} %, а для некоторых примесей (бора, гадолиния, кадмия) в уране и других ядерных материалах — даже до $10^{-5} - 10^{-6}$ %. Еще более жесткие требования возникли в период развития полупроводниковой техники. Так, для полупроводниковых материалов германия и кремния недопустимо содержание примеси меди или никеля на уровне $10^{-7} - 10^{-8}$ %. Таким образом, возникла необходимость определять один атом элемента-примеси на 10 миллиардов атомов германия или кремния! В этот период только радиоактивационный метод давал возможность определять примеси на уровне $10^{-6} - 10^{-10}$ %.

Таблица 1. **Сравнение некоторых спектрометрических методов элементного анализа**

Метод	Точность	Чувствительность (т)	Чувствительность (ж)	Распространенность	Многоэлементность	Размер образца	Тип образца	Рутинность	Экспрессность	Доступность	Стоимость (т)	Стоимость (ж)
ИНАА	+	0	0	–	+	м–б	т,ж	+	–	–	0	0
РНАА	+	+	+	–	0	м,с	т,ж	+	–	–	–	–
РФЛ	0	–		–	+	м	т	+	+	+	+	
РФЛ-ПО	0	0	+	–	+	м,с	ж	+	+	+	0	+
РФЛ-СИ	0	+		+	+	м	т	–	–	–	–	
ИФС	–	0		+	+	м	т	+	–	–	–	
ИСП-ЭС	0	0	+	–	+	м,с	ж	+	+	+	0	+
ААС	–	0	+	–		м,с	ж	+	+	+	0	+
ИСП-МС	0	0	+	–	+	м,с	ж	+	+	0	–	0
ИСП-ИРМС	+	0	0	–		м,с	ж	0	+	0	–	–
ИМС	–	0		–	+	м	т	+	+	+	+	

Примечание. Значения: высокое (+); среднее (0); низкое (–). Размер образца: м — малый; с — средний; б — большой. Тип образца: т — твердый; ж — жидкий.

Основателями радиоактивационного метода — нейтронного активационного анализа (НАА) — считаются Джордж фон Хевеши и Линда Леви. В Дании в 1936 г., четыре года спустя после открытия нейтрона, они изучали взаимодействие нейтронов с редкоземельными элементами: «...The usual chemical methods of analysis fail, as is well known, for most of the rare earth elements and have to be replaced by spectroscopic, X-ray, and magnetic methods. The latter methods can be supplemented by the application of neutrons to analytical problems by making use

of artificial radioactivity and of the great absorbing power of some of the rare earth elements for slow neutrons...».

Нейтронный активационный анализ прошел все этапы развития аналитического метода по схеме, принятой на одном из международных коллоквиумов по спектроскопии в США: 1) концепция, идея; 2) проект и создание прибора для проверки принципа; 3) успешная демонстрация идеи; 4) проект и создание инструмента для идентификации экспериментальных параметров с необходимой чувствительностью, селективностью, правильностью и воспроизводимостью; 5) достижение завершенности, разработка стандартных условий и процедур, автоматизация операций, компьютерная обработка данных; 6) углубление понимания научных принципов; 7) старение (mature).

Таблица 2

Годы	Основные этапы	Типичные характеристики	Число публикаций
1936–1944	Период становления	Плотность потока нейтронов $5 \cdot 10^{5}$ см$^{-2} \cdot$с$^{-1}$	10
1944–1950	Ядерные реакторы	Плотность потока нейтронов $5 \cdot 10^{11}$ см$^{-2} \cdot$с$^{-1}$	10
1950–1960	Сцинтилляционные детекторы NaI(Tl)	Разрешение 50 кэВ для линии 1332 кэВ ^{60}Co	100
1960–1970	Полупроводниковые детекторы Ge(Li)	Разрешение 2–3 кэВ	1000
1970–1998	Экстенсивные применения Детекторы из сверхчистого германия; методические усовершенствования	Плотность потока нейтронов 10^{-14} см$^{-2} \cdot$с$^{-1}$ Разрешение 1,7 кэВ	2000

Различают инструментальный (ИНАА) и радиохимический нейтронный активационный анализ. На реакторах, спектры нейтронов которых содержат резонансные (эпитепловые) и быстрые нейтроны, возможно проведение эпитеплового нейтронного анализа (ЭНАА), а если реактор оснащен и быстрой пневмопочтой, то и циклического нейтронного активационного анализа (ЦНАА). Оба эти метода реализуются на импульсном быстром реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ. Активация эпитепловыми нейтронами позволяет оптимизировать условия облучения исследуемых образцов, особенно в тех случаях, когда интересующие изотопы обладают большими резонансными интегралами (ряд тяжелых металлов, большинство редкоземельных элементов).

Аналитический комплекс на базе пневмотранспортной установки (ПТУ) «Регата» на ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ предназначен для проведения многоэлементного инструментального (ИНАА), эпитеплового (ЭНАА) и циклического нейтронного активационного анализа, а также радиационных исследований с использованием

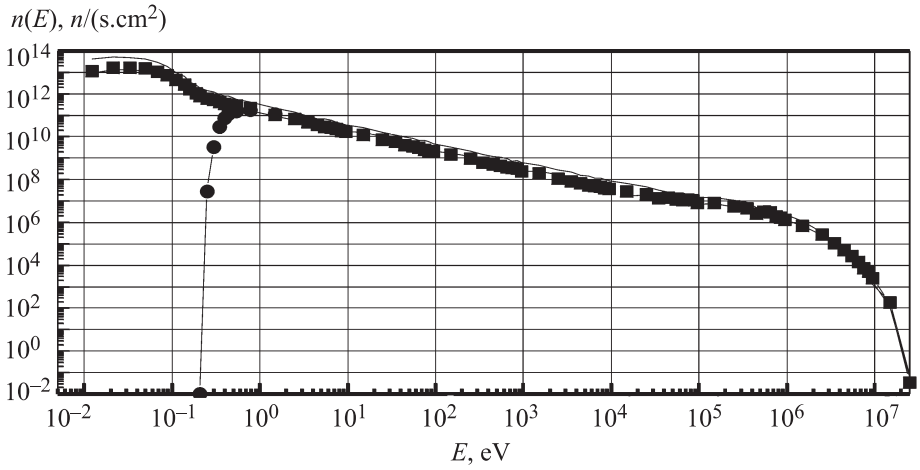


Рис. 1. Энергетические спектры нейтронов в каналах ОК1 и ОК3 реактора ИБР-2. Сплошная кривая — спектр для ОК3, ■ — для ОК1. В интервале E<0,55 эВ — спектры тепловых нейтронов в ОК1 без и с экраном из кадмия

тепловых, резонансных и быстрых нейтронов реактора ИБР-2. Установка «Регата» оснащена «горячими» камерами с дистанционными манипуляторами, герметичным перчаточным боксом для проведения работ с открытыми радиоактивными источниками.

Помещение ПТУ «Регата» на ИБР-2 паспортизовано как «радиохимическая лаборатория III класса». На проведение аналитических работ имеется аккредитация Госстандарта России и международная аккредитация МАГАТЭ.

Образцы облучаются в транспортных контейнерах из полиэтилена, тефлона или алюминия (рис. 2). Время облучения в контейнерах из полиэтилена — до 30 мин для всех каналов облучения при мощности реактора 2 МВт. Алюминиевые контейнеры используются для длительных облучений.

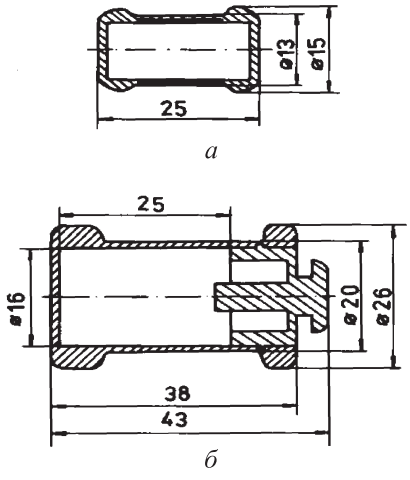


Рис. 2. Полиэтиленовый транспортный контейнер и внутренняя капсула для образца. Размеры указаны в мм. До 7 контейнеров может облучаться в каналах одновременно. Плотность потока нейтронов контролируется мониторами из золота, циркония и др.

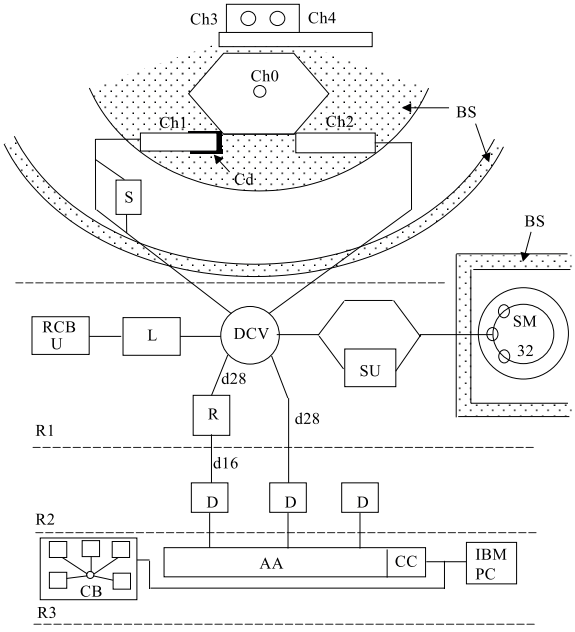


Рис. 3. Схема установки «Регата»: Ch1 ÷ Ch4 — каналы облучения, S — промежуточное хранилище, DCV — устройство разворота контейнеров, L — блок загрузки, RCB — радиохимический перчаточный бокс, U — блок выгрузки, SU — блок сортировки, SM — временное хранилище облученных образцов, R — блок перепаковки, D — Ge(Li)-детекторы, AA — амплитудный анализатор, CB — пульт управления, CC — CAMAC-контроллеры, R1 ÷ R3 — помещения, где располагается установка

Таблица 3. **Основные характристики каналов облучения**

Позиция облучения	Плотность потока нейтронов, $см^{-2} \cdot с^{-1} \cdot 10^{12}$			T, °C	Диаметр канала, мм	Длина канала, мм
	Тепловые	Резонансные	Быстрые			
ОК1	Cd-экран	3,31	4,32	70	28	260
ОК2	1,23	2,96	4,10	60	28	260
ОК3	4,2	7,6	7,7	30–40	30	400

Образцы транспортируются в пневмотранспортной системе сжатым воздухом при давлении 3–6 атм. Все блоки системы находятся на расстоянии 50–60 м от активной зоны реактора. Время транспортировки полиэтиленовых контейнеров к позиции облучения 7–20 с. Алюминиевые контейнеры перемещаются быстрее — 3–7 с. Промежуточное хранилище (S) (емкостью до 15 контейнеров)

используется для выдержки алюминиевых контейнеров после длительных облучений. Это хранилище находится в кольцевом коридоре биологической защиты реактора. Хранилище (SM) содержит 32 ячейки для хранения активных образцов, оно окружено биологической защитой из свинца и бетонных блоков.

Установка контейнеров в позиции облучения контролируется с помощью акустических датчиков.

Обработка результатов измерений ведется с помощью комплекса программ, разработанных специалистами ЛНФ для конкретных условий проведения нейтронного активационного анализа на ИБР-2.

На базе сектора ААиРИ ЛНФ организован практикум и читается спецкурс «Нейтронный активационный анализ как ядерно-физический метод определения элементного состава вещества. Применение в экологии» для студентов Межфакультетского центра МГУ и кафедры экологии университета «Дубна», а также практикум для ежегодной Нейтронной школы ЛНФ, организуемой для студентов и молодых специалистов.

В настоящее время с помощью аналитического комплекса на базе ПТУ «Регата» решаются экологические задачи, связанные с изучением элементного состава объектов окружающей среды, а также задачи материаловедения (новые материалы и технологические процессы, где необходима информация об элементном составе вещества). Результаты этих исследований важны как для прикладных, так и для фундаментальных наук. Ниже перечислены основные направления работ, которые ведутся в настоящее время

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РЕАКТОРЕ ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ, ДУБНА

Инструментальный нейтронный активационный анализ ИНАА	Эпитепловой нейтронный активационный анализ ЭНАА	Циклический нейтронный активационный анализ ЦНАА

Экологические исследования	Материаловедение
• Биомониторинг атмосферных выпадений (мхи, лишайники, кора деревьев). Проект «РЕГАТА».	• Биотехнологии: бактериальное выщелачивание металлов из руд, пород и промышленных отходов; новые медицинские препараты на основе синезеленой водоросли Spirulina Platensis).
• Изучение загрязнений воздуха (аэрозольные фильтры: Сибирь (Байкал), Египет (Великая Каирская долина)).	• Сверхчистые материалы: алюминий, полупроводники на основе германия, кремния и арсенида галлия.

- Оценка экологической ситуации: тепловые электростанции; полигоны бытовых отходов, аварии с разливом нефти, загрязнение водных бассейнов (Московское море, река Ока, озеро Байкал).
- Конструкционные материалы в проблемах прекращения эксплуатации атомных электростанций, остекловывания радиоактивных отходов, утилизации отходов промышленного производства.

Более детальное содержание этих исследований отражено в следующих конкретных проектах (табл. 4).

Таблица 4

No	**ON-GOING INTERNATIONAL PROJECTS**
1	Biomonitoring of heavy metals and radionuclides in Chelyabinsk Region, South Ural, Russia: temporal and spatial trends (Russia, Norway) (IAEA grant 1997–2002)
2	Air Pollution Monitoring Industrial Areas under Strong Anthropogenic Impact (Grant RFBR. Magnitogorsk Technical University–JINR, 2001–2001)
3	Heavy metal atmospheric deposition in Bulgaria (PP* grant, 2000)
4	Atmospheric deposition study in Poland (PP* grant, 1999–2001)
5	Biomonitoring in Slovakia for heavy metals and radionuclides (PP* grant 2000–2003)
6	Biomonitoring in Czech Republic and $\gamma - \gamma$-coincidence installation (PP* grant, 2001)
7	Biomonitoring in Yugoslavia around Belgrade and Novi Sad (Serbia) and mountainous area (Bosnia) (Pilot project, 2000–2001) (Project submitted to UNEP)
8	Heavy metal atmospheric deposition in Romania (1995–2001) (IAEA grant for IFIN and JINR); (Expectations for a PP* grant for 2001–2002)
9	Heavy metal atmospheric deposition in the South Korea (moss, lichens, bark) (Pilot project)
10	Atmospheric deposition study in China (Protocol on collaboration) (1999–2003)
11	Air Pollution Studies in the Greater Cairo Area, Egypt (Agreement with the Atomic Energy Authority of Egypt) (2000–2003)
12	Workplace monitoring and occupational health studies at some selected phosphate fertilizer plans using nuclear and related analytical techniques in Russia, Uzbekistan, Poland, Romania, the Netherlands, Denmark (Grant COPERNICUS) (2001–2002)
13	Workplace monitoring and health related studies at phosphate fertilizer plant in Voskresensk, Russia (IAEA grant) (1998–2001)
14	Workplace monitoring and health related studies at phosphate fertilizer plant in Gdansk, Poland (PP* grant, 2000–2001)
15	Selenium-Containing Blue-Green Algae *Spirulina Platensis* for Preventive Health-Care Investigated by Nuclear Techniques (IAEA grant for «a single project of outstanding importance», JINR–Georgia, 2000–2002)
16	Biotechnology applied to rocks and poor ores in Georgia for extraction of radioactive and rare earth elements (grant ISC) (1999–2000)
17	Development of the Analytical Complex REGATA at IBR-2 (Grant of the Academy of Sciences of Czech Republic) (2000–2001)
	PROJECTS SUBMITTED FOR FINANCING

1	Quality and toxic safety of food products grown in contaminated areas under strong anthropogenic impact of heavy metals and radionuclides (submitted to INTAS-2000)
2	The upgrading of the analytical complex based on pneumatic installation REGATA at IBR-2 reactor, FLNP JINR (submitted to MINNAUKA as a part of JINR project)
3	Investigation of atmospheric heavy metal deposition impact population health in some selected areas of Russia (Central Russia, basins of Ivankovskoe and Rybinsk reservoirs, Tula Region, South Ural Mountains, Lake Baikal) (EPIDEP-RUSSIA) (submitted to RFBR)
	PROJECTS UNDER PREPARATION
1	Identification of freshwater aquatic biomarkers using advanced field and laboratory techniques in Russian freshwater ecosystems (Rybinsk Reservoir) (2001–2003)
2	Assessment of the environmental situation in the deltas of two great rivers of the world: Volga and Nile (European Union Commission on Mediterranean projects)
3	Monitoring of radionuclides and heavy metals in the Northern Kazakhstan, Russia, Mongolia and China affected by Semipalatinsk nuclear test site (World Monetary Bank)

* PP — grant of the Plenipotentiary of JINR member-state.

Достижения сотрудников сектора ААиРИ ЛНФ отмечены первой премией ОИЯИ 1996 г. за цикл из 18 работ «Нейтронный активационный анализ на ИБР-2 в решении задач охраны окружающей среды». В настоящее время сектор ААиРИ участвует в четырех координационных программах МАГАТЭ; на конкурсной основе получен грант «Программы-5» фонда COPERNICUS (European Union) в 2000 г.; а также грант РФФИ на 2001 г. Научная библиография сектора ААиРИ (см. приложение — список наиболее важных работ за последние 5 лет) отражает международное признание работ по использованию НАА в экологических исследованиях, ведущихся в тесном сотрудничестве как с российскими, так и с зарубежными научными центрами. Результаты анализа мхов-биомониторов, полученные в секторе ААиРИ, включаются в Атлас атмосферных выпадений тяжелых металлов в Европе, издаваемый Экологической комиссией ООН (UNEP Commission on Ecology and Hydrology).

Одно из основных направлений исследований в секторе ААиРИ ЛНФ ОИЯИ — биомониторинг атмосферных выпадений тяжелых металлов. Анализируются образцы мхов (или лишайников), которые являются природными аналогами воздушных фильтров с точки зрения сорбции атмосферных выпадений за фиксированный период времени. Эти работы в рамках проекта ОИЯИ первого приоритета «Регата» ведутся в содружестве со специалистами из разных организаций Южного Урала, Тульской, Московской областей, Кольского полуострова, Польши, Болгарии, Румынии, Норвегии. Подписан протокол о сотрудничестве в этой области с Китаем.

Основные цели проекта:

- разработка и создание сети мониторинга атмосферных выпадений на обследуемых территориях в соответствии со стратегией и принципами Европей-

ской программы «Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe — Estimations Based on Moss Analysis»;

- определение уровней загрязнений тяжелыми металлами и другими элементами, включая редкоземельные элементы, на больших географических территориях;
- выявление локальных источников загрязнений и территорий, попадающих под их воздействие;
- создание базы данных для сравнительных, повторяющихся с периодичностью в пять лет, одномоментных сборов мхов-биомониторов (moss-surveys);
- проведение статистического и графического анализа полученных массивов данных с целью выявления характера и происхождения источников загрязнения в пределах исследуемых территорий, а также воздействия дальнего переноса элементов-загрязнителей;
- разработка и создание карт распределений определяемых элементов для обследованных территорий с помощью ГИС-технологий в целях мониторинга окружающей среды.

Такой комплексный подход — от сбора образцов, до построения географических карт распределений элементов — позволяет получать уникальную информацию для большого круга специалистов, вовлеченных в решение задач охраны окружающей среды.

В рамках грантов Международного агентства по атомной энергии и Европейского фонда COPERNICUS в секторе ААиРИ ЛНФ реализуется проект «Мониторинг на рабочих местах и здоровье персонала, занятого в производстве фосфорных удобрений». В него входят представители четырех стран-участниц ОИЯИ: России, Узбекистана, Польши и Румынии, а также Нидерландов и Дании.

Особо следует отметить материаловедческое направление работ с применением всего арсенала средств нейтронного активационного анализа — это анализ сверхчистого алюминия, полупроводников на основе кремния и арсенида галлия, изучение химического состава материалов, используемых при остекловывании радиоактивных отходов, выявление токсичных элементов, которые могут попасть в окружающую среду при утилизации боя кинескопного стекла, мониторов компьютеров и люминесцентных ламп.

Исследования в секторе активационного анализа и радиационных исследований ЛНФ всегда привлекали внимание польских ученых своей разнообразной тематикой. В свое время в секторе работали профессора А.Навроцки и С.Стерлински, Р.Липперт, Э.Гацек, В.Кантор, З.Бобровски, Л.Старостин и многие другие. В настоящее время в рамках двух грантов Полномочного Представителя Республики Польша в ОИЯИ ведутся совместные работы с Институтом ботаники ПАН, возглавляемые с польской стороны профессором К.Гродзинской (см. проект № 4), второй грант поддерживает проект, связанный с двумя кафедрами Технического университета в Гданьске, возглавляемыми профессорами М.Би-

зюком и Я.Намесником (проект № 14). Эти же польские ученые участвуют в большом международном проекте фонда Европейского экологического сообщества COPERNICUS. Поддерживаются традиционные связи с Институтом химической и ядерной технологии в Варшаве. Профессор Р.Дибчиньски пригласил наших специалистов для участия в международной сверке новых эталонных материалов, разработанных в этом институте.

Почти полгода провела в Дубне студентка физического факультета Университета им. А.Мицкевича в Познани Агнешка Кухарска. Ее магистерский диплом — это пример совместного польско-российского руководства научной работой молодежи.

В заключение хотелось бы выразить глубокую признательность Полномочному Представителю Республики Польша в ОИЯИ академику ПАН, профессору А.Хрынкевичу за его постоянное внимание к прикладным аналитическим исследованиям, ведущимся в сотрудничестве с польскими сотрудниками на реакторе ИБР-2. Автор также благодарит доктора В.Хмельовски за доброжелательное отношение и помощь в организационных вопросах.

Список наиболее важных работ, выполненных в секторе активационного анализа и радиационных исследований за последний период.

1. *Gorbunov A.V., Gundorina S.F, Onischenko T.L., Frontasyeva M.V.* Development of a combined method to carry out a multi-element analysis for environment preservation. J. Radioanal .Nucl. Chem., v. 129, No 2, p. 443-451, 1989.

2. *Lavdanskij P.A., Nazarov V.M., Stefanov N.I., Frontasyeva M.V.*: Neutron activation analysis for determination of induced radioactivity in concrete of nuclear reactor shielding. J.Radioanal.Nucl.Chem.,v.131. No 2, p. 261-270, 1989.

3. *Volokh A.A., Gorbunov A.V., Gundorina S.F., Revich B.A., Frontasyeva M.V., Chen Sen Pal*: Phosphorus fertilizer production as a source of rare-earth elements pollution of thee environment. Sci.Total.Environ.,v.95, p.141-148, 1990.

4. *Frontasyeva M.V., Baboshin N.G., et al.*: Activation studies of Concrete Binding Agent Ingredients Used for Nuclear Radiation Shielding. Kernenergie, v. 34, p.7-8, 1991.

5. *Burkovskaya T.E., Frontasyeva M.V., Gundorina S.F.*: Elemental bone composition of the rats flown in «Cosmos-2044» Biosatellite. The Physiologist, v. 35, No 1, S-235-236, 1992.

6. *Gorbunov A.V., Frontasyeva M.V. et al.*: Effect of Agricultural use of phosphogypsum on trace elements in soils and vegetation. Sci. Total. Environ., v. 122, p. 337-346, 1992.

7. *Nazarov V.M., Chinaeva V.P., Frontasyeva M.V. , Parry S.J., Bennet B.A., Chen Sen Pal, Li Chel Zu*: Fine-powder AL2O3 and SiO2 for preparation of multi-element standards for rare-earth elements analysis. J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles, v. 168, No 1, p. 163-168, 1993.
8. *Nazarov V.M., Pavlov S.S., Herrera E., Frontasyeva M.V.*: Recent Developments of radioanalytical methods at IBR-2 pulsed fast reactor. J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles, v. 167, No 1, p. 11-21, 1993.
9. *Nazarov V.M., Frontasyeva M.V., Lavdanskij P.A. et al.*: NAA for optimization of radiation shielding of nuclear power plants. J. Radioanal. Nucl. Chem., v. 180, No 1, p. 83-95, 1994.
10. *Dybczynski R., Danko B., Wasek M., Kulisa K., Frontasyeva M.V., Nazarov V.M.*: Determination of trace amounts of Ni and Co in biological materials by means of non-destructive activation analysis. In «Activation Analysis in Environment Protection», D14-93-325, 1994, p. 376-386, Dubna.
11. *Frontasyeva M.V., Nazarov V.M., Steinnes E.*: Mosses as monitors of heavy metal deposition: comparison of different multi-element analytical techniques. J. Radioanal. Nucl. Chem., Vol. 181, No 2 (1994) 363-371.
12. *Frontasyeva M.V., Nazarov V.M. and Steinnes E.*: Moss as monitor of heavy metal deposition: Comparison of different multi-element analytical techniques. J. Radioanal. Nucl. Chem. v. 181, 363-371, 1994.
13. *Nazarov V.M., Frontasyeva M.V. et al.*: Resonance neutrons for determination of elemental content of moss, lichens and pine needles in atmospheric deposition monitoring. J. Radioanal. Nucl. Chem., v. 192, No 2 (1995) 229-238.
14. *Frontasyeva M.V., Grass F., Nazarov V.M., Ritschel A., Steinnes E.*: Intercomparison of moss reference material by different multi-element techniques. J. Radioanal. Nucl. Chem., v. 192, No 2 (1995) 371-379.
15. *Steinnes E., Frontasyeva M.V.*: Epithermal Neutron Activation Analysis of Mosses Used to Monitor Heavy Metal Deposition around an Iron Smelter Complex. Analyst, May 1995, vol. 120, p. 1437-1440.
16. *Frontasyeva M.V., Gorbunov A.V. et al.*: Nuclear and Related Analytical Techniques Used for Workplace Monitoring and Occupational Health Studies. Preprint of JINR, E14-98-392, Dubna, 1998.
17. *Frontasyeva M.V. and Steinnes E.*: Epithermal NAA for studying the environment. In «Harmonization of Health Related Environmental Mesurements Using Muclear and Isotopic Techniques», IAEA, Vienna, p. 301-311, 1997.
18. *Lucaciu A., Frontasyeva M.V., Steinnes E. et al.*: Atmospheric deposition of heavy metals in Romania studied by the moss technique employing nuclear and related analytical techniques and GIS technology. J. Radioanal. Nucl. Chem., v. 240, No.2 457-458, 1999.

19. *Nikonov V.V., Lukina N.V., Frontasyeva M.V.*: Trace elements in Al-Fe-Humus Podzolic Soils Subjected to Aerial Pollution from Apatite-Nepheline Production Industry. Eurasian Soil Science, 32, 12, p. 1331-1339, 1999.
20. *Frontasyeva M.V., Yermakova Ye.V., Steinnes E.*: Reliability of mosses (Hylocomium splendens, Pleurozium schreberi and Calliergon geganteum) as biomonitors of heavy metal atmospheric deposition in Central Russia. FLNP JINR Annual Report, 2000-81, p. 178-180, 1999.
21. *Frontasyeva M.V., Pavlov S.S.*: REGATA experimental Setup for Air Pollution Studies. In Problems of Modern Physics. (Eds. A.N.Sissakian, D.I.Trubetskov), Dubna: JINR, 1999, p.152-158.
22. *Stan O.A., Lucaciu A., Frontasyeva M.V., Steinnes E.*: New results from air pollution studies in Romania. Preprint of JINR, E14-2000-126, Dubna, 2000.
23. *Frontasyeva M.V, Steinnes E., Lyapunov S.M., Cherchintsev V.D., Smirnov L.I.*: Biomonitoring of heavy metal deposition in South Ural region: Some preliminary obtained by nuclear and related techniques. J. Radioanal. Nucl. Chem., v. 245, No.2, 415-420, 2000.
24. *Mosulishvili L.M., Kirkesali Ye.I., Belokobylsky A.I., Khizanishvili A.I., Frontasyeva M.V., Gundorina S.F., Oprea C.D.*: Epithermal neutron activation analysis of blue-green algae Spirulina Platensis as a matrix for Selenium-containing pharmaceuticals. Preprint of JINR, E14-2000-281, Dubna, 2000. Accepted by J. Radioanal. Nucl. Chem., 2001.

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

А.В.Белушкин

Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ

Сотрудничество между ЛНФ ОИЯИ и научными центрами Польши в области исследований свойств конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов имеет давнюю и богатую историю. Уместно вспомнить, что само это направление родилось в ОИЯИ по предложению выдающегося польского ученого, профессора, академика Ежи Яника. В 1958 г. он сделал предложение о начале работ по данной тематике тогдашнему директору лаборатории Илье Михайловичу Франку, который идею поддержал, и уже в 1959 г. были проведены первые совместные эксперименты с Институтом ядерной физики (Краков). Сегодня сотрудничество включает в себя, помимо упомянутого института, Институт химии и ядерной техники в Варшаве, Ягеллонский университет в Кракове, Институт атомной энергии в Сверке, Университет им. А. Мицкевича в Познани, Технологический университет во Вроцлаве, Университет Марии Склодовской-Кюри в Люблине и Технический университет в Щецине. Тематика совместных исследований также достаточно широка, и с каждым годом возникают все новые направления работ. Таким образом, идея академика Е.Яника оказалась чрезвычайно плодотворной и до сих пор служит фундаментом активного сотрудничества исследователей Польши и Лаборатории нейтронной физики. На одном из самых современных нейтронных источников в мире ИБР-2 подавляющее большинство экспериментальных установок предназначено именно для нейтронных исследований конденсированных сред. Два спектрометра были сделаны по инициативе и при определяющем участии польских физиков, инженеров, техников. В создание целого ряда других установок специалисты Польши внесли существенный вклад.

Важно отметить, что и в создании самого реактора Польша играла очень важную роль. Электронная аппаратура системы управления и защиты (СУЗ) реактора была разработана и изготовлена в Польше. Созданный комплекс позволяет контролировать большое число параметров реактора, измерять и автоматически поддерживать его мощность, контролировать вибрации и осевые смещения подвижных отражателей. Специалисты из Сверка участвовали в физическом и энергетическом пуске ИБР-2. В результате был накоплен большой практический материал, явившийся основой совместных публикаций и изобретений. Неудивительно, что сейчас, в период модернизации реактора, предложение о разработке новой аппаратуры для СУЗ было направлено в Институт атомной

энергии в Сверке. Благодаря принципиальной договоренности между директором Объединенного института ядерных исследований академиком В.Г.Кадышевским и Полномочным Представителем Польши в ОИЯИ академиком А.Хрынкевичем в 2000 г. началась разработка технических условий на новую аппаратуру за счет средств гранта Полномочного Представителя Польши. Специалисты ЛНФ крайне заинтересованы в скорейшем завершении процедуры согласований и выработке предложений относительно контракта по новой аппаратуре для СУЗ, поскольку ее испытание необходимо провести не позднее 2006 г., в конце которого ИБР-2 будет остановлен для замены основного оборудования.

Тематика совместных научных работ охватывает чрезвычайно широкий круг проблем. Традиционным направлением сотрудничества в течение многих лет является нейтронная спектроскопия. Основу этих исследований заложили и продолжают развивать специалисты Института ядерной физики в Кракове. В последние годы к работам по данной тематике присоединились исследователи из Варшавы, Вроцлава и Щецина. Вследствие особенностей взаимодействия нейтрона с веществом данный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной оптической спектроскопией. В результате нейтронные и оптические методы эффективно дополняют друг друга, позволяя получать наиболее полную картину силовых взаимодействий между атомами и молекулами в

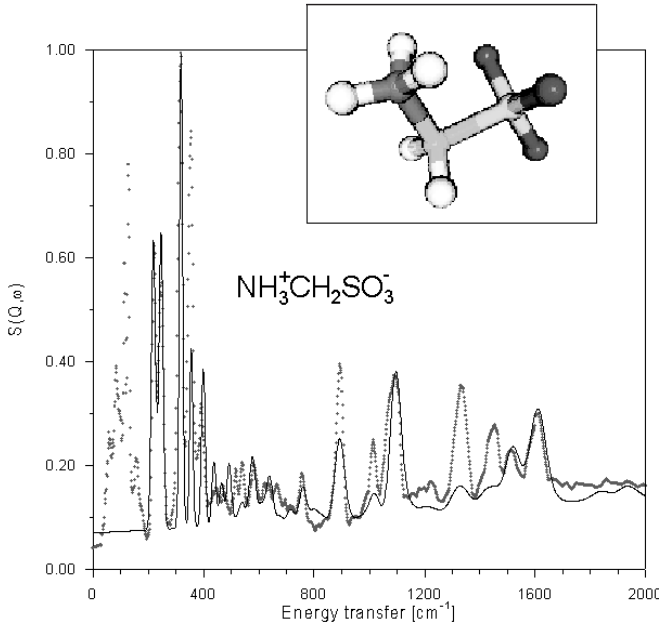


Рис.1. Сравнение экспериментального спектра неупругого некогерентного рассеяния нейтронов (точки) от молекулярного кристалла $NH_3CH_2SO_3$ с модельным расчетом (линия). Эксперимент выполнен на спектрометре НЕРА-ПР на реакторе ИБР-2

кристаллах. В сочетании с современными квантово-химическими расчетами с помощью новых методов обработки и анализа экспериментальных данных удается получать важные результаты для биологических соединений, лекарственных препаратов и т.д. Созданный при определяющем вкладе польских специалистов спектрометр неупругого рассеяния нейтронов НЕРА-ПР позволяет проводить указанные исследования на самом современном мировом уровне.

Очень интересное направление сотрудничества развивается с Университетом им. А. Мицкевича в Познани. На реакторе ИБР-2 в сотрудничестве с Российским научным центром «Курчатовский институт» был создан специализированный спектрометр для исследований структуры и динамики конденсированных сред при высоких давлениях. Используя технику сапфировых или алмазных наковален, на исследуемый образец можно воздействовать давлением свыше ста тысяч атмосфер, при этом в изучаемой системе могут происходить фазовые переходы, возникать новые физические явления. В Университете им. А. Мицкевича изучением подобных эффектов занимаются многие годы с использованием методов диэлектрической спектроскопии и ядерного магнитного резонанса. Давление на образце при этом создается с помощью специального компрессора, сжимающего газообразный гелий. В результате обеспечивается полная гидростатичность, но достижимые давления ограничены величиной в десять–пятнадцать тысяч атмосфер. Совместное использование возможностей, имеющихся в ЛНФ ОИЯИ и в Университете им. А. Мицкевича, позволяет существенно

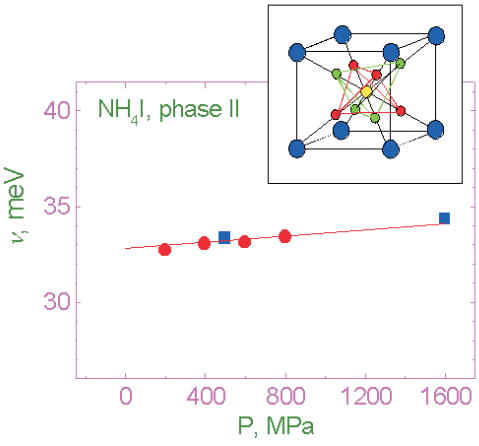


Рис. 2. Один из результатов совместного с Университетом им. А. Мицкевича в Познани исследования влияния высокого давления на структуру и динамику ионно-молекулярных кристаллов. Точки — частоты либрационной моды колебаний иона аммония в фазе II NH_4I, рассчитанные на основе данных ядерного магнитного резонанса. Квадраты — прямые измерения этой частоты при различных давлениях на спектрометре ДН-12 на реакторе ИБР-2

расширить круг исследований, проверить согласованность результатов, получаемых различными методами, за счет этого повысить надежность данных, а зачастую получить и качественно новую информацию.

Новым, но исключительно интересным и перспективным направлением работ является изучение поверхностно-активных веществ. Указанные исследования проводятся совместно с вроцлавским Университетом и Институтом атомной энергии в Сверке. Поверхностно-активные вещества — сурфактанты — образованы из амфифильных молекул, состоящих из гидрофильной полярной головной части и хвостов — одной или двух гидрофобных алкильных цепей. В ряде других растворителей такие молекулы самоорганизуются в глобулярные агрегаты. Такая самоорганизация оказывается энергетически более выгодной, чем раздельное пребывание молекул в растворителе. При малых концентрациях сурфактанта агрегаты имеют форму шариков — мицелл, в которых хвосты спрятаны внутрь, а головы находятся снаружи. С ростом концентрации сурфактанта и в зависимости от типа растворителя и внешних условий (температура, давление и т.п.) агрегаты могут принимать форму цилиндров, полых сферических слоев, плоскостей. Физико-химические свойства таких самоорганизующихся систем представляют исключительный интерес не только с чисто научной точки зрения — это исследование характера межагрегатных взаимодействий, флуктуационные эффекты, фазовые переходы в рассматриваемых системах и т.д. Поверхностно-активные вещества находят широкое практическое применение. Они служат основой моющих средств, используются в косметической промышленности для создания препаратов, легко проникающих сквозь кожу, в медицине для целенаправленного переноса лекарств в организме. Очень перспективно использование слоистых структур в электронной и фотопромышленности. Таким образом, указанное направление совместных исследований, несомненно, вскоре принесет целый ряд новых, интересных и неожиданных результатов.

В заключение хотелось бы отметить, что Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка заинтересована в развитии контактов с польскими научными центрами и по другим направлениям работ. В частности, можно отметить создание новых перспективных детекторов тепловых нейтронов, обладающих позиционной чувствительностью, развитие методов получения многослойных тонкопленочных структур для нейтронных зеркал, в том числе поляризующих. Много совместных работ могло бы проводиться и в области создания электроники и программного обеспечения для нейтронных спектрометров, разработки новых методов обработки и визуализации данных, развития систем передачи и анализа больших массивов данных. По ряду из этих направлений в предыдущие годы сотрудничество существовало, но в силу объективных и субъективных причин практически прекратилось. Возобновление контактов, поиск новых форм взаимовыгодного сотрудничества, несомненно, должно стать одной из приоритетных задач на ближайшую перспективу.

DRIBs. ПЕРСПЕКТИВЫ СОТРУДНИЧЕСТВА

Ю.Ц.Оганесян

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ

Мое краткое выступление будет посвящено новому проекту ОИЯИ — DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams). Эта установка, базирующаяся на ускорителях тяжелых ионов ЛЯР, должна генерировать пучки радиоактивных ионов, отстоящих от линии бета-стабильности в стороны избытка протонов и нейтронов. Несмотря на трудные для Института времена она, решением дирекции ОИЯИ, финансируется по принятому графику ее сооружения, и мне приятно отметить, что адекватно этому графику идет ее сооружение. В создании этого сложного проекта участвуют институты и предприятия наших стран-участниц: Польши, Чехии, Болгарии, Словакии, Румынии, России. Они делают свое дело настолько качественно и оперативно, что мы, по существу, практически полностью отказались от услуг западных фирм. Это показывает, что если у ОИЯИ будет финансовый базис — он может вести научно-экспериментальную деятельность на самом современном уровне.

По своим параметрам DRIBs будет одним из лучших ускорительных комплексов пучков радиоактивных ионов. В 2002 г. на нем начнутся эксперименты с ионами ^{6}He и ^{8}He, ядра которых имеют, как известно, экзотическую структуру. Сейчас ведется подготовка к этим экспериментам.

Теперь я хотел бы затронуть вопрос нашего сотрудничества с физиками, работающими в различных институтах Польши.

В истории ОИЯИ, и ЛЯР в частности, польская наука в лице своих представителей различных поколений играла большую роль. Это объясняется не только глубокими традициями в области ядерной физики в Польше, начиная с момента открытия естественной радиоактивности, но и большим интересом польских ученых к исследованиям, проводимым как в Европе, так и в России.

Не загружая ваше внимание перечислением известных ученых, которые, к нашей гордости, фигурируют в качестве соавторов в работах, выполненных в ОИЯИ, я должен, с большим сожалением, отметить, что количество таких работ становится все меньше. Все делается людьми и все делается для людей.

Если открываются новые возможности для исследований, например, на комплексе DRIBs, который нелегко нам дается, и если к нему приковано внимание национальных центров Франции, Германии, Италии, Японии, США — физики этих стран уже принимают участие в этой программе, то почему этой активности не видно со стороны польского физического сообщества? Старшее поколение

по-прежнему активно, но оно загружено многими обязанностями внутри Польши, а молодое поколение, мне кажется, мало информировано о том, что происходит в ОИЯИ. На наших советах защищают свои диссертации многие молодые физики из разных стран, некоторые из них по результатам своей работы в Дубне. Но давно мы не слушали на этих заседаниях молодых поляков.

Ситуацию надо исправлять. Это наша обязанность и наша ответственность.

Надо, по-видимому, расширить степени свободы с учетом научно-технического и коммуникационного прогресса последнего времени.

Не все могут приехать в Дубну и жить здесь несколько лет, как это было раньше. Но во многих случаях этого и не требуется. Современные возможности участия в экспериментах в масштабе реального времени позволяют людям вести активное сотрудничество на расстоянии, быть полноценными участниками работы, оказывать активное влияние на ход работ и правильно оценивать результаты. Надо дать эту возможность.

С другой стороны, надо выравнивать статус сотрудника, командируемого из Польши в любой европейский институт и в ОИЯИ. Иными словами, необходимо выравнять все прочие условия, оставив для выбора лишь профессиональный интерес. Тогда сразу станет ясно, где молодому физику можно быстрее и качественнее сделать научную карьеру и проявить свои способности. Уверен, что в этом случае ОИЯИ будет иметь определенные преимущества, так как Польша является страной-участницей ОИЯИ и активно участвует в его развитии.

Мы все понимаем, что научные достижения не определяются количеством работников. Даже небольшая группа талантливой молодежи может существенно изменить лицо научного коллектива.

PROPOSALS FOR EXPERIMENTS AT DRIBs FACILITY AT FLNR

R.Wolski[1,2], G.M.Ter-Akopian[2], A.Budzanowski[1]

[1]H. Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Cracow, Poland
[2]Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR

Introduction

The project of Dubna Radioactive Beams (DRIBs) has been developed recently at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (FLNR). The aim of the project is to produce unstable, radioactive ions by ISOL method, transport these ions to the U-400 cyclotron, accelerate and deliver to an experimental area for physical experiments.

In the first stage of the project the beam of ^{6}He ions has to be obtained in fall of 2001. The ions will be produced at U-400M cyclotron by bombarding a thick beryllium target with a 34 MeV/n ^{7}Li primary beam. The ^{6}He ions accelerated in the second cyclotron will have a fixed energy of 16 MeV/n. A task has to be fulfilled to adopt the U-400 cyclotron for providing a beam energy resolution of 0.5 % and the beam emittance on a physical target of 5 π mm mrad. These parameters are rather standard prerequisites of a scattering type experiment. In the advent of commissioning the first beam of DRIBS project we propose here experiments for the ^{6}He beam, which will be available soon. Because of a rather high beam energy, we leave aside any consideration of otherwise very interesting experiments on resonant scattering as well as investigation of ^{6}He interaction with nuclei close to the Coulomb barrier, for example, sub-barrier fusion phenomena. These experiments would need the beam energy in the region of 3.5–10 MeV/n.

Discussed experiments are listed in order according to our comprehension of their scientific importance. They are the continuation of the earlier studies, which have been done or are currently underway at FLNR [1–3].

1. A search for Analog States of ^{5}H and ^{5}He

Ground state properties of the ^{5}H nuclear system are of fundamental importance for a few body physics. Recently a resonance in p (^{6}He, 2p) ^{5}H reaction has been observed at 34 MeV/n ^{6}He beam energy [3]. The experiment has been carried out at separator ACCULINNA in FLNR. The resonance lays at an energy of about 2.0 MeV above the $t + 2n$ decay threshold, and its width is 1.9 MeV broad including the experimental excitation energy resolution which was estimated to be of the order of 1.0 MeV. The obtained width seems to be unexpectedly narrow as compared to the existing model

calculations. However the calculations are heavily dependent on the assumed properties of the ^{4}H subsystem, which is a problem by itself. A new attempt to unambiguously determine quantum characteristics of this level and more precisely measure its width is highly desirable. Moreover the isospin invariance of nuclear forces implies that an analog state, $T = 3/2$, should exist in the ^{5}He nucleus at similar excitation energy counted in respect to the ^{3}He + 2n or $t + (p + n)$ decay thresholds. Such analog state in ^{5}He is unknown so far.

We propose to investigate the d (^{6}He, ^{5}H) ^{3}He and d (^{6}He, ^{5}He) ^{3}H reactions for a simultaneous study of ^{5}H and its analog 5He ($T = 3/2$) systems. These two reactions, in terms of one nucleon transfer mechanism, correspond to the pickups of either proton or neutron from the alpha-particle core of ^{6}He. The kinematics as well as dynamics of both reactions should be very similar, and their relative yields governed by the isospin selection rule. The experiment requires the measurement of energies and scattering angles of recoiled ^{3}He and t particles in the region of 14–25 degrees in laboratory system in coincidence with ^{5}H and ^{5}He ($T = 3/2$) decay products emitted in forward direction, (5–12) degrees in lab. system. It is expected that the two-body decay of the two ejectiles will be forbidden due to the fact that the ground state resonances of corresponding 4-nucleon subsystems are less bound than those of 5-nucleon systems. The ^{5}H nucleus in the three-body decay yields triton and a pair of neutrons. The ^{5}He ($T = 3/2$) decays through the two branches: ^{3}He +2n and $t + (p + n)$. The branching ratio will depend on the Coulomb energy of $t + (p + n)$ configuration. This Coulomb energy of ^{5}He ($T = 3/2$) state is a main physical information to be extracted from the data. The main experimental task would be to provide unambiguous identification and energy and angle measurements of the low energy target-like ^{3}He ions. A thin-window deuteron gas target should be applied and a telescope with a thin position sensitive silicon detector installed.

2. Study of the Structure of ^{6}He by Means of Neutron Transfer Reactions

The ^{6}He nucleus is usually represented as a superposition of a ^{4}He core interacting with two loosely bound neutrons. Assuming that partition of the initial nucleus, 3-body calculation results in 2 main configurations of the total wave function, that is the cigar and di-neutron configurations [4]. 2-neutron transfer reaction is expected to provide information on the existence and relative weight of these two configurations. However this partition is not unique, and recent calculations [5] consider other channel, i.e., the presence of a ^{3}H-^{3}H configuration in the total wave function of ^{6}He. Following Ref. 2, where p (^{6}He,^{4}He)t reaction at 25 MeV/n was reported, this reaction may be considered as a 2n transfer to the proton target, and/or a ^{3}H transfer to form ^{4}He as well. The relative weight of these processes is expected to be strongly dependent on the exact wave function of ^{6}He. The involved Q-values and choice of the projectile energy are known to

be crucial for the final matching of the transfer. Since the cross sections decrease rapidly with the number of transferred particles, the direct 2*n* transfer may be in competition with a sequential 1*n* transfer leading to the same exit channel. In the case of ^{6}He, such a mechanism would involve the resonant ^{5}He state. There are calculations considering the evolution of the two processes with the incident energy [6]. It was shown that the total cross section, which is a coherent sum of the one-step and two-step processes, is dominated by the later at low energy. Above 10 MeV/*n*, it becomes sensitive to the one-step component, still with some destructive interference. In order to disentangle the two processes and to extract relevant spectroscopic factors, it is necessary to perform the experiment on one- and two-nucleon transfer for, at least, two different incident energies. We propose to make the measurement at 16 MeV/*n*, which will be completed by other experiments already done at 25MeV/*n* in Dubna and recently at GANIL. The angular distributions corresponding to 1*n* and 2*n* transfers have to be measured within a maximally wide angular region and a special effort has to be done to cover forward and backward scattering angles.

3. Study of the Elastic and Inelastic Scattering ^{6}He Ions on a Tritium Target and ^{3}H(^{6}He,^{4}He)^{5}H Reaction

The high quality beam of ^{6}He ions combined with a tritium target would offer a unique opportunity to study nuclear interaction between a few body systems with large channel isospin. The most straightforward experiment in this context is to measure elastic scattering in a wide angular region, particularly at backward angles where an enhancement due to exchange processes could be expected. Most likely, the enhancement will be related to the exchange of a triton cluster and in this way dependent on the triton spectroscopic factor of ^{6}He wave function. On this point see proposal 2. In the interaction of ^{6}He with triton one has to consider two isospin channels present — $T = 3/2$ and $T = 1/2$. The elastic scattering angular distribution will be analyzed in terms of theoretical models and compared with existing experimental data on ^{6}Li + ^{3}He scattering at similar CM energy and their interpretation. See [7] and references therein. Assuming isospin independence of nuclear interaction these data could provide a consistent way for the treatment of both isospin channels. It is known that the elastic channel is coupled to inelastic excitations. In order to put some constraints on coupling mechanisms the data for inelastic scattering leading to excitation of 2^{+} resonance in ^{6}He would be highly desirable. The data could be obtained in the same experiment provided that the condition of sufficient angular and energy resolution is fulfilled.

At first glance ^{6}He + *t* system looks also as an attractive tool for alternative way to study the ^{5}H resonance. Indeed 2-neutron transfer reaction should populate favorably 2*n* + *t* configuration. Its presence should be seen as a peak in the energy spectrum of alpha particle ejectiles. However it seems that the inclusive energy spectrum of alpha particles will be heavy contaminated by the same product originated from nuclear

reactions on non-tritium content of a physical target. In the best case the target would be a Titanium foil saturated by tritium with the atomic ratio 1:1. Moreover, one should be aware that the exclusive measurement could be difficult to do due to a low kinetic energy of the recoiled ^{5}H system. Nevertheless, since the detecting system will be flexible enough, an attempt can be undertaken to reveal the manifestation of ^{5}H resonance in the experiment on the elastic scattering.

References

1. *Ter-Akopian G.M. et al*. // Phys. Lett. B. 1998. V.426. P.251.
2. *Wolski R. et al.* // Phys. Lett. B. 1999. V.467. P.8.
3. *Golovkov M.S. et al.* // Intern. Conf. «Nuclear Structure and Related Topics», Dubna, Russia, June 6–10, 2000: book of contributions. P.33.
4. *Danilin B.V. et al.* // Phys. Rev. C. 1991. V.43. P. 2835.0
5. *Arai K. et al.* // Phys. Rev. C. 1999. V.59. P.1432.
6. *Lenske H., Schrieder G.* // Eur. Phys. J. A. 1998. V.2. P.41.
7. *Burtebaev N. et al.* // Yad. Phys. 1996. V.59. No.1. P.33–42.

СОТРУДНИЧЕСТВО ЛЯР С НАУЧНЫМИ ЦЕНТРАМИ ПОЛЬШИ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

М.Г.Иткис

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ

Научная деятельность Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова в области физики тяжелых ионов традиционно развивается по трем главным направлениям. Она включает эксперименты по синтезу тяжелых и экзотических ядер с использованием пучков стабильных и радиоактивных изотопов и изучение механизмов ядерных реакций, развитие ускорительной техники, изучение взаимодействий тяжелых ионов с веществом и прикладные исследования. Практически во всех проектах участвуют наши коллеги из Польши.

Тяжелые элементы

Фундаментальным следствием макро-микроскопической теории явилось предсказание «острова стабильности» сверхтяжелых элементов вблизи $Z = 114$ и $N \approx 184$. Эта интригующая гипотеза, предложенная около 35 лет назад в пионерских работах Ф.Гареева, Б.Калинкина и А.Собичевского и интенсивно развивавшаяся все это время, получила экспериментальное подтверждение в Лаборатории ядерных реакций.

Использование ионов ^{48}Ca в качестве бомбардирующих частиц представляет особый интерес для синтеза тяжелых элементов. Значительный нейтронный избыток этих ядер позволяет получить компаунд-ядра с числом нейтронов, наиболее приближенным к предсказанным магическим числам. Благодаря дважды магической структуре ^{48}Ca ($Z = 20$, $N = 28$) при энергиях вблизи кулоновского барьера могут образовываться относительно холодные компаунд-ядра.

Эксперименты выполнялись на циклотроне тяжелых ионов ЛЯР У-400 и сепараторах ВАСИЛИСА и ГНС в рамках широкого международного сотрудничества. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Первые положительные результаты были получены на сепараторе ВАСИЛИСА весной 1998 г. после облучения мишени ^{238}U ионами ^{48}Ca. В этом эксперименте наблюдались два события спонтанного деления, которые были приписаны распаду нового изотопа элемента 112 (см. рис. 1,*б*). При облучении мишени ^{242}Pu ионами ^{48}Ca наблюдался α-распад родительского ядра ^{287}114 (см. рис. 1,*а*). Обе цепочки распадов заканчивались спонтанным делением уже известного дочернего ядра ^{283}112.

Таблица 1

Дата	Мишень	Энергия возбуждения E^*, МэВ	Доза пучка, 10^{18}	Наблюд. ядро	Сечение, пб
Март 1998 г.	^{238}U	31,0	3,5	^{283}112	5
Нояб.–дек. 1998 г.	^{244}Pu	35,0	5,2	^{289}114	1
Март 1999 г.	^{242}Pu	33,5	7,5	^{287}114	2,5
Июнь–окт. 1999 г.	^{244}Pu	35,3	10	^{288}114	1
Июнь–дек. 2000 г.*	^{248}Cm	33,1	18*	^{292}116	0,5*

*Эксперимент будет продолжен.

В реакциях слияния ^{48}Ca с мишенями ^{244}Pu и ^{48}Cm на газонаполненном сепараторе были синтезированы изотопы элементов 114 и 116, наиболее близкие к вершине «острова стабильности» (рис. 1,*в*, 2,*а*, 2,*б*).

Свойства наиболее тяжелых изотопов Hs — ^{292}116 представлены в табл. 2.

При анализе результатов мы используем предсказания свойств новых элементов, выполненные профессорами А.Собичевским и Ш.Чвоком.

В 2001–2002 гг. эксперименты будут нацелены на синтез ядер с $Z = 110 \div 118$ в реакциях ^{232}Th, ^{236,238}U, ^{237}Np, ^{242,244}Pu, ^{241,243}Am, ^{246,248}Cm, ^{249}Cf + ^{48}Ca. Обсуждается возможность проведения исследований с ионами ^{36}S, ^{50}Ti, ^{58}Fe и радиоактивными пучками.

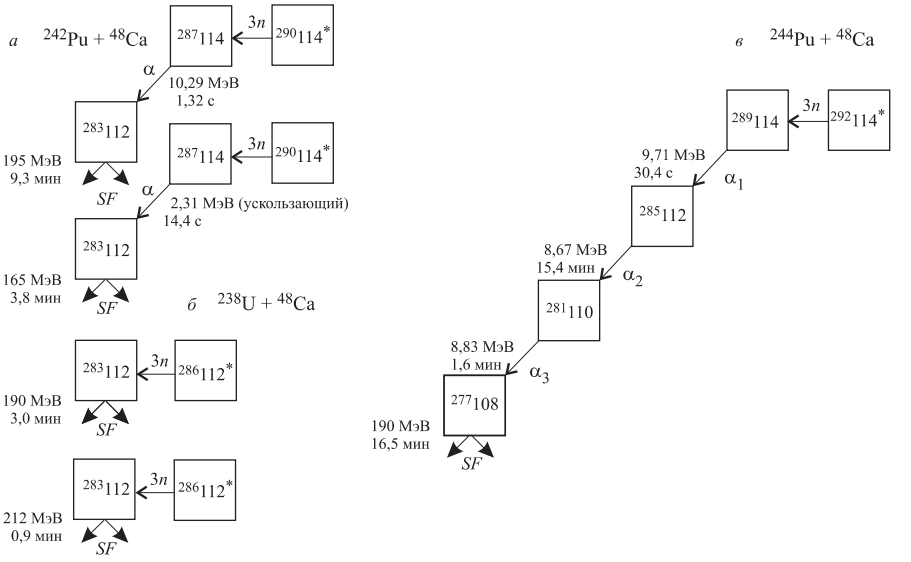


Рис. 1. Позиционно-коррелированные цепочки распадов: *а*) ^{287}114, образующегося в реакции ^{48}Ca+^{242}Pu; *б)* ^{283}112, образующегося в реакции ^{48}Ca+^{238}U и *в*) ^{289}114, образующегося в реакции ^{48}Ca+^{244}Pu

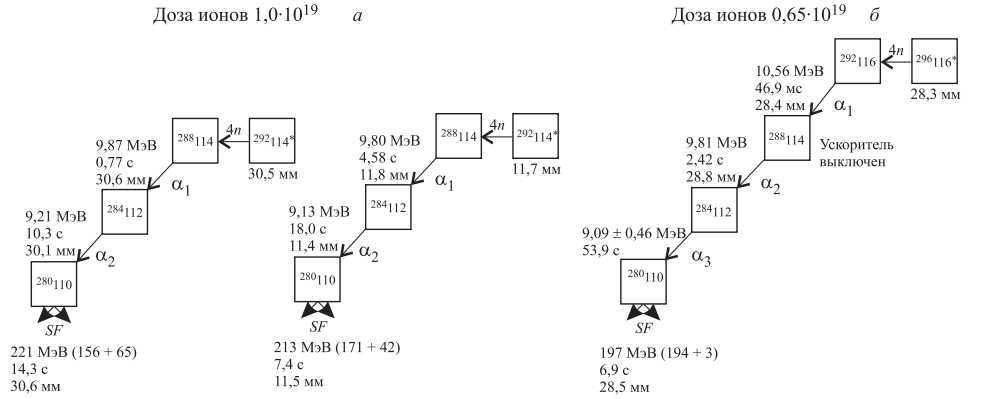


Рис. 2. *а*) Две цепочки распадов $^{288}114$, наблюдавшиеся в реакции $^{244}Pu(^{48}Ca,4n)$; *б*) последовательность событий, наблюдавшаяся в цепочке распада $^{292}116$

Таблица 2

Изотоп	Вид распада	E_α, МэВ	ТКЕ $_{изм}$, МэВ	$T_{1/2}$
^{277}Hs	*SF*		170	11 мин
$^{280}110$	*SF*		210	6,6 с
$^{281}110$	α	8,83		1,1 мин
$^{283}112$	*SF*		190	3 мин
$^{284}112$	α	9,17		19 с
$^{285}112$	α	8,67		11 мин
$^{287}114$	α	10,29		5 с
$^{288}114$	α	9,83		1,8 с
$^{289}114$	α	9,71		21 с
$^{292}116$	α	10,56		33 мс

В 2001 г. будут завершены первые этапы модернизации газонаполненного сепаратора ГНС (электронная и детектирующая системы) и сепаратора ВАСИЛИСА (установка нового отклоняющего магнита, электронная и детектирующая системы). В этих работах также участвуют наши польские коллеги.

Химия трансактинидов

Исследования химических свойств новых элементов традиционно входят в программу исследований ЛЯР. Нашим партнером является Институт ядерной физики в Кракове — группа профессора Щегловского. В результате совместных

работ были получены новые данные о свойствах резерфордия (Rf), дубния (Db) и сиборгия (Sg).

Значительные времена жизни изотопов с $Z = 108 \div 114$, синтезированных в реакциях с ^{48}Ca, позволяют проводить эксперименты по изучению химических свойств этих элементов. Проблема может быть сформулирована следующим образом: являются ли эти элементы гомологами тяжелых металлов Os ÷ Pb. Химические свойства тяжелых элементов определяются релятивистскими эффектами, и их изучение относится к фундаментальным проблемам современной химии.

Подготовлены методики по изучению химии элементов 107, 108, 110, 112 и 114 в водных растворах и выполнены модельные опыты с короткоживущими изотопами Re, Os, Pt, Hg и Pb.

В 2001 г. запланированы эксперименты по химическому выделению и идентификации тяжелого изотопа элемента $Z = 112$, образующегося в реакции ^{238}U(^{48}Ca,3–4n), детектирование его α-распада и спонтанного деления в совпадении с нейтронами. Эти эксперименты будут проводиться в сотрудничестве с научными центрами Швейцарии, Германии и Польши. К ним подключится также группа профессора Билевича из Института ядерной химии и технологии.

Деление ядер

Интерес к изучению деления сверхтяжелых ядер в реакциях с тяжелыми ионами связан в первую очередь с возможностью получения информации, необходимой для синтеза новых элементов и оценки сечения образования компаунд-ядер при энергии возбуждения $\approx 15 \div 30$ МэВ.

Эксперименты выполнялись на выведенном пучке ионов ^{48}Ca и ^{86}Kr циклотрона У-400 с помощью времяпролетного спектрометра CORSET, 24 модулей нейтронного спектрометра DEMON и 4-кристального сцинтилляционного детектора множественности γ-квантов.

В ЛЯР были выполнены эксперименты по делению тяжелых ядер в реакциях ^{208}Pb+^{48}Ca→^{256}No, ^{238}U+^{48}Ca→^{286}112, ^{244}Pu+^{48}Ca→^{292}114, ^{208}Pb+^{86}Kr→^{294}118. Выбор этих реакций был связан с экспериментами по синтезу изотопов ^{283}112, ^{287}114, ^{289}114 в Дубне и изотопа ^{293}118 в Беркли (США).

В табл. 3 представлены результаты изучения реакций с ^{48}Ca и реакции ^{86}Kr+^{208}Pb.

В случае реакции ^{86}Kr+^{208}Pb в области симметричного массового распределения (A/2±30) процесс квазиделения преобладает. В этом заключается коренное отличие реакции ^{86}Kr+^{208}Pb от реакции ^{48}Ca+^{238}U и особенно от ^{48}Ca+^{244}Pu, в которых в той же области масс преобладает вклад деления компаунд-ядра.

При помощи времяпролетного спектрометра CORSET и модулей нейтронного спектрометра DEMON будет продолжено изучение слияния-деления Pb, U, ^{244}Pu, ^{248}Cm + ^{48}Ca, ^{58}Fe, ^{64}Ni, ^{86}Kr. Планируется также продолжить изучение влияния оболочечных эффектов на динамику спонтанного деления ^{252}Cf.

Таблица 3

Реакция	E_{lab}, МэВ	E, МэВ	σ_{fis}	$\sigma_{fis}/\sigma_{cap}$, %	⟨TKE⟩, МэВ
$^{48}Ca+^{208}P$	230	33	350 мб	96	193
$^{48}Ca+^{238}U$	232	33	6 мб	3	215
$^{48}Ca+^{244}Pu$	233,5	33	4 мб	9	220
$^{86}Kr+^{208}Pb$	486	28	~ 6 мб	$\leq 10^{-3}$	260
$^{86}Kr+^{208}Pb$	453	15	≤500 нб	—	260

Сепаратор COMBAS

Польские физики проявляют большой интерес к изучению реакций при промежуточных энергиях. Эти работы проводятся у нас на фрагмент-сепараторе COMBAS (рис. 3) на пучке ускорителя У-400М. В настоящее время сепаратор полностью оснащен комплексом управляющей и контрольной аппаратуры. В качестве детектора используется полупроводниковый ΔE_1, ΔE_2, ΔE_3, ΔE_4 телескоп-спектрометр.

Были выполнены серии экспериментов по изучению нуклон-нуклонных взаимодействий при энергиях 20÷50 МэВ/А и определению интенсивности вторичных радиоактивных пучков ядер.

В реакциях между ^{18}O (35 A МэВ) и ^{9}Be (легкая мишень) и ^{181}Ta (тяжелая мишень) измерялись инклюзивные выходы экзотических изотопов ^{9}Li, ^{11}Li, ^{11}Be, ^{12}Be и ^{14}Be, которые могут использоваться как вторичные радиоактивные пучки ядер, имеющих структуру гало (табл. 4).

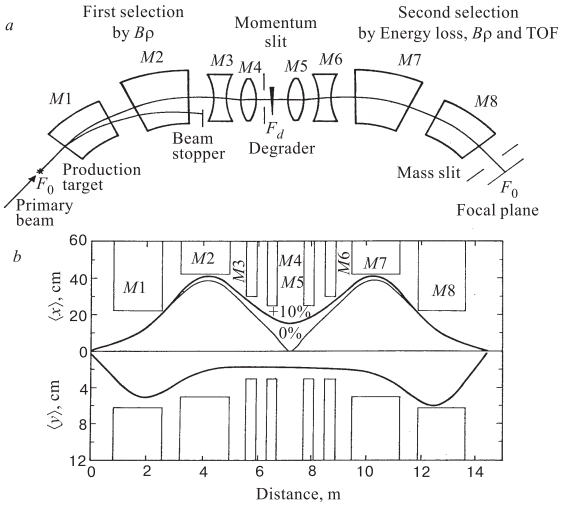


Рис. 3. Ионно-оптическая схема сепаратора COMBAS

Таблица 4

Вторичные пучки (частиц в секунду)				
^{9}Li	^{11}Li	^{11}Be	^{12}Be	^{14}Be
$5\cdot10^{5}$	$6\cdot10^{3}$	$3\cdot10^{5}$	$3\cdot10^{5}$	$5\cdot10^{2}$

В течение 2001–2002 гг. будут выполнены исследования выходов и свойств тяжелых изотопов кислорода в реакциях ^{36}S, ^{40}Ar(20÷60 *A* МэВ)+^{9}Be,Ta. Для этих целей будет использован трековый детектор на базе многослойной пропорциональной камеры.

Реакции с пучками радиоактивных ионов

Эта область ядерной физики является, пожалуй, наиболее динамично развивающейся в мире. Для исследований реакций с радиоактивными пучками был разработан и создан сепаратор АКУЛИНА, который в 2000 г. был существенно модернизирован: линия транспорта пучка была продолжена за двухметровую бетонную стену зала ускорителя к новому экспериментальному павильону, где была смонтирована реакционная камера с криогенной тритиевой мишенью (рис. 4).

Используя выведенные из циклотрона У-400М пучки ионов ^{7}Li и ^{11}B с энергией 32–34 *A* МэВ, удалось получить вторичные пучки ионов ^{6}He и ^{8}He с энергией 20–30 *A* МэВ и интенсивностью соответственно $3\cdot10^{5}$ и $1\cdot10^{4}$ с$^{-1}$ при интенсивности первичного пучка на бериллиевой мишени около $2\cdot10^{13}$ с$^{-1}$. В прошлом году мы получили пучок ионов трития с энергией 51 МэВ на циклотроне У-400М.

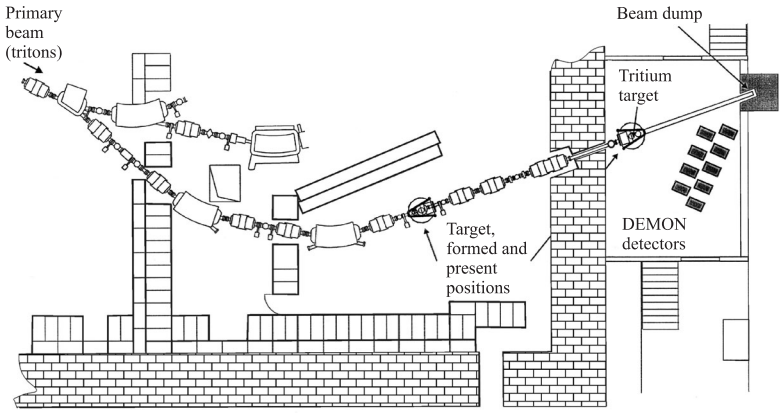


Рис. 4. Сепаратор АКУЛИНА, модернизированный для экспериментов с криогенной тритиевой мишенью

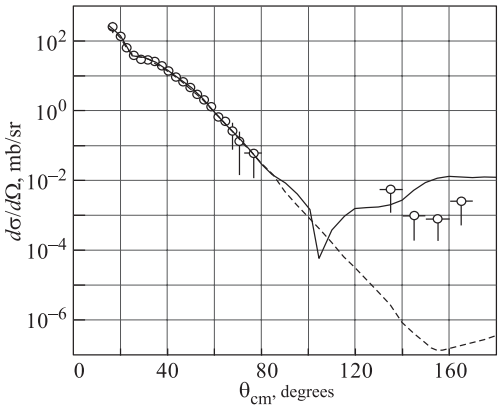


Рис. 5. Дифференциальное сечение упругого рассеяния ^{8}He+^{4}He, энергия ионов ^{8}He 25 МэВ/A

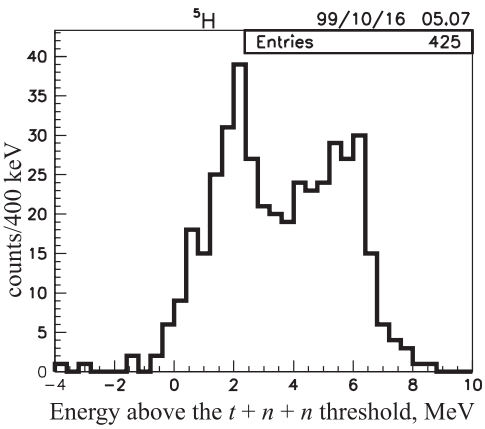


Рис. 6. Резонанс основного состояния в ^{5}H, наблюдавшийся в реакции ^{6}He+p → ^{5}H+2p

Первые эксперименты на установке АКУЛИНА были направлены на изучение реакций передач между налетающими частицами ^{6}He и ^{8}He и ядрами-мишенями водородом и гелием. В случае ядра-мишени ^{4}He могла происходить передача двух или четырех нейтронов для ^{6}He и ^{8}He, т.е. обменный процесс, который можно было бы наблюдать в системе центра масс как упругое рассеяние в обратном направлении. Передача двух нейтронов между ядрами ^{6}He и ^{1}H могла бы быть хорошим тестом теоретических предсказаний, сделанных на базе трехтельной модели ^{6}He (рис. 5).

Успешно завершилась серия экспериментов, направленная на обнаружение резонанса ^{5}H (основного состояния). Резонанс ^{5}H возбуждался в реакции ^{6}He+p→^{5}H+2p. Условия двухчастичной кинематики в этой реакции реализуются благодаря виртуальному взаимодействию двух протонов. Резонансное состояние, которое находится примерно на 2 МэВ выше порога распада t+n+n, было обнаружено в спектре полной энергии коррелированных протонов, испускаемых в выходном канале реакции (рис. 6). С тритиевым пучком этот резонанс будет изучаться в реакции ^{3}H(t,p)^{5}H.

Завершены эксперименты по изучению резонансных состояний в ^{7}He, заселяемых при передаче одного нейтрона на ^{6}He от дейтериевой мишени. В настоящее время данные анализируются с целью извлечь информацию о структуре резонанса p3/2 в основном состоянии ^{7}He и, возможно, о другом резонансе — p1/2.

В серии экспериментов были исследованы прямые реакции, протекающие между ^{8}He и водородом при энергии 26 A МэВ. Сечения упругого рассеяния, передачи одного и двух нейтронов на основное состояние ^{6}He, а также передача

двух нейтронов на 2^+-состояние ^{6}He были измерены в диапазонах углов 35°–142°, 33°–143°, 15°–135° и 13°–138°.

Дальнейшие наши планы в этой области связаны с изучением реакций ионов трития и других экзотических ионов с тритиевой мишенью. Для экспериментов с радиоактивными пучками после запуска первой очереди комплекса DRIBs мы выбрали реакции: ^{8}He+^{3}H→^{10}He+p; ^{9}Li+^{3}H→^{11}Li+p; ^{6}He+^{3}H→^{8}He+p. При этом будет получена информация об образовании нейтроноизбыточных ядер и о наличии в них возбужденных состояний.

Радиационная физика твердого тела и прикладные исследования

В этом направлении исследований у нас существует многолетнее партнерство со многими институтами в Польше: Варшавским университетом, Техническим университетом, Институтом химии и ядерной технологии.

За годы совместных работ были выполнены эксперименты по изучению взаимодействия ускоренных тяжелых ионов с металлами, монокристаллами и полимерными материалами. Разработаны методы производства ультрачистых изотопов (^{235}Np, ^{236}Np, ^{236}Pu).

Эксперименты, упомянутые в представленном докладе, выполнялись при самом активном участии польских коллег и неоднократно отмечались премиями ОИЯИ.

REPORT ON THE PROJECT OF THE REGENERATIVE FEL AMPLIFIER AT THE DESY TESLA TEST FACILITY

J.Krzywinski[1], M.V.Yurkov[2]

[1]Institute of Physics of Polish Academy of Sciences, Warsaw
[2]Laboratory of Particle Physics, JINR

Introduction

The RAFEL project is the result of a collaboration agreement between DESY and JINR (Dubna). The budget of the project is formed by DESY and JINR contributions. Institute of Physics of Polish Academy of Sciences (IP) participates in the RAFEL project in the framework of the grant programme of the special purpose use of the Polish contribution to JINR.

Table. **VUV Regenerative FEL amplifier at DESY**

Electron beam	
Energy	180–260 MeV
Charge per bunch	1 nC
Peak current	500 A
Bunch separation	444 ns
Undulator	
Period	2.73 cm
Peak magnetic field	0.497 T
Feedback system	
Distance between mirrors	66.4 m
Monochromator resolution	5×10^{-5}
Total transmission	5×10^{-4}
Radiation	
Wavelength	80–140 nm
Micropulse duration (RMS)	500 fs
Spectrum bandwidth	0.01 %
Peak output power	300 MW
Average power	up to 25 W

The concept of regenerative FEL amplifier (RAFEL) has been developed in the framework of the JINR participation in the TESLA collaboration. The RAFEL project may be regarded as a milestone towards a short wavelength FEL user facility, since it aims at demonstrating the possibility of seeding an FEL, turning it from a mere amplifier of shot noise into a real VUV/soft *X*-ray laser. The proposed project requires the additional installation of a narrow-band feedback system and is fully compatible with the

present design and the infrastructure developed for the TTF FEL project. It would allow one to construct a tunable VUV laser with a minimum wavelength around 80 nm, a pulse duration of 1 ps, a peak power of about 300 MW and an average power of about 25 W. The output radiation of the regenerative FEL amplifier would possess all the features which are usually associated with laser radiation: full transverse and longitudinal coherence and shot-to-shot stability of the output power. The degeneracy parameter of the output radiation would be about 10^{14} and thus have the same order of magnitude as that of a quantum laser operating in the visible.

RAFEL Layout

The schematic layout of the RAFEL is presented in Fig. 1. The equipment of the RAFEL consists of three main systems:

- the mirror assembly;
- the grating assembly;
- the control system.



Fig. 1. RAFEL layout

The mirror and the grating assembly have similar design (see Fig. 2). Each assembly consists of a vacuum chamber, a set of translators and a rigid support. The optical elements (mirrors and grating) are fixed firmly inside the vacuum chambers. The tuning of the optical elements is provided by means of translation of the whole vacuum chamber. The chambers are installed on the translators having sufficient number of degrees of freedom.

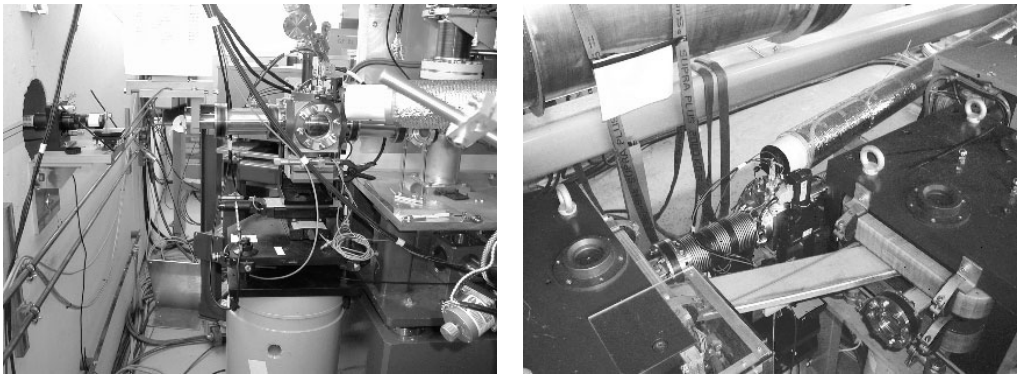


Fig. 2. Mirror (upper photo) and grating (lower photo) assembly mounted at the TTF accelerator

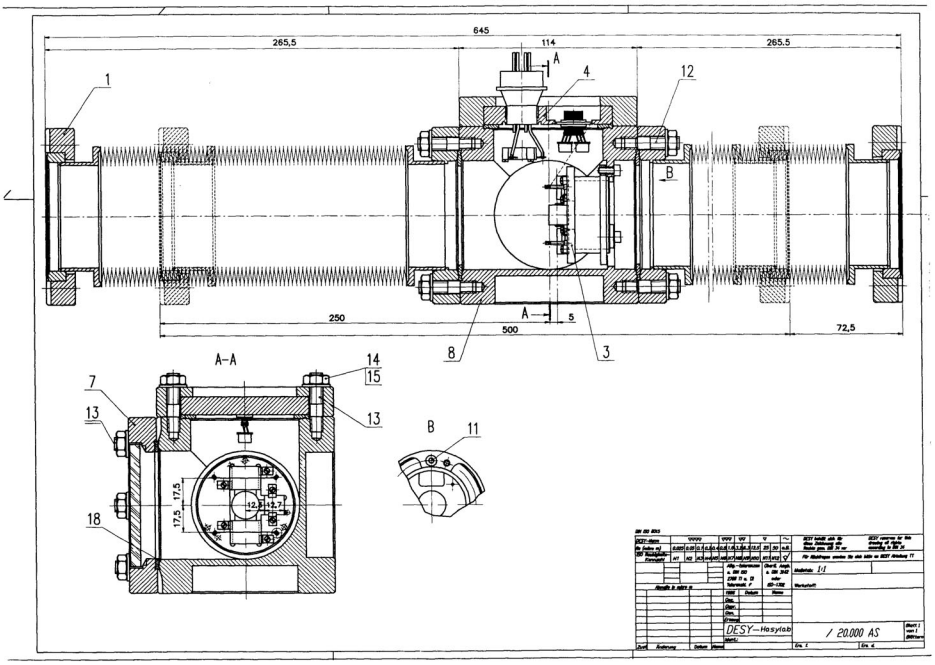


Fig. 3. Design drawing of RAFEL chamber

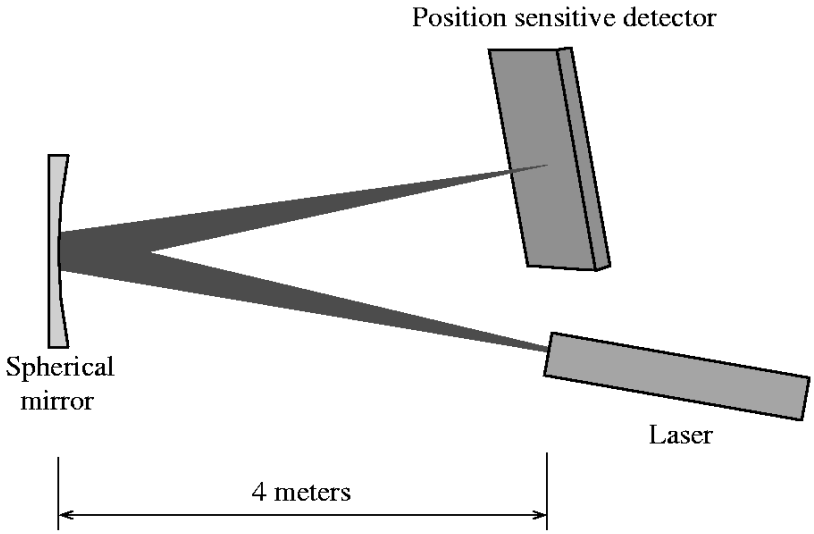


Fig. 4. Scheme of active alignment system

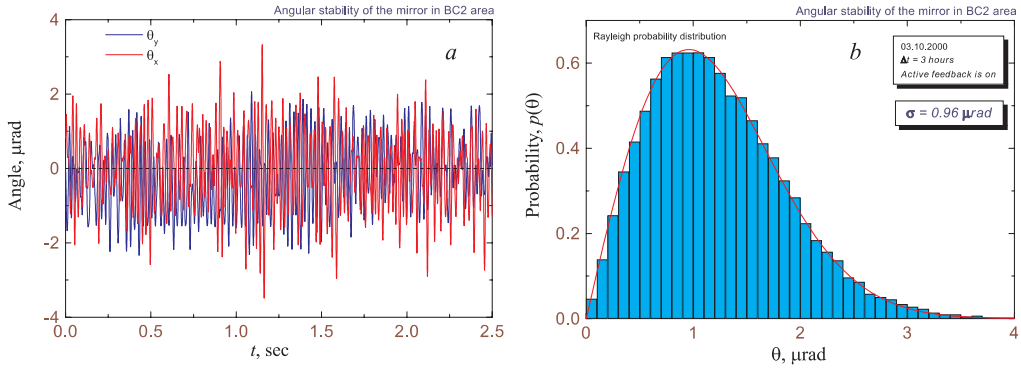


Fig. 5. Angular oscillation of the grating chamber (*a*) and probability distribution of the angle deviation (*b*)

The vacuum chambers have similar design (see Fig. 3). The following elements are mounted inside the vacuum chamber of the mirror assembly: a plane SiC mirror and radiation detectors (micro-channel plate (MCP) and SiPt photodiode). The following elements are mounted inside the vacuum chamber of the grating assembly: a curved SiC mirror, curved grating, an optical prism and radiation detectors (MCP and SiPt Photodiode). Each vacuum chamber has a viewport for laser prealignment of the optical elements. The design of the grating vacuum chamber allows one to move all the elements out of the beam axis, thus providing sufficient aperture for the electron beam transport in the mode of the TTF Linac operation without bunch compressor 2 (BC2).

Each assembly is equipped with an active alignment system for stabilization of angular position of the optical elements with a microradian level accuracy (see Fig. 5). The active alignment system provides accuracy of measurements of angle deviations of a

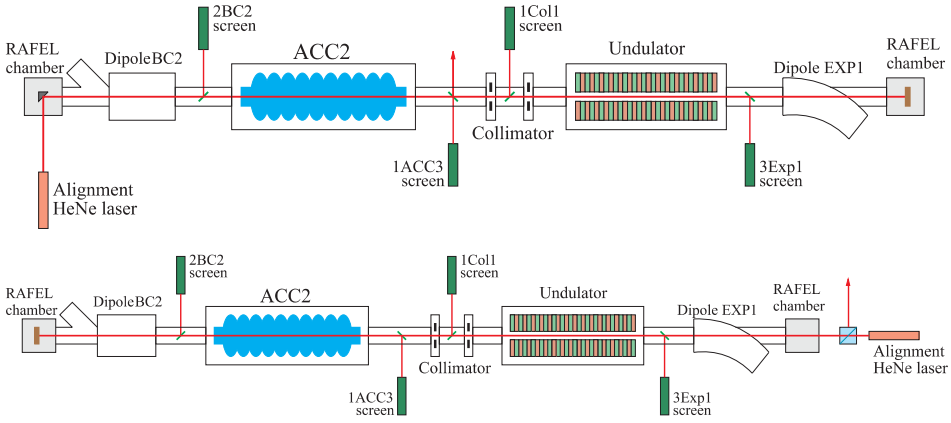


Fig. 6. Scheme of laser pre-alignment of RAFEL mirrors

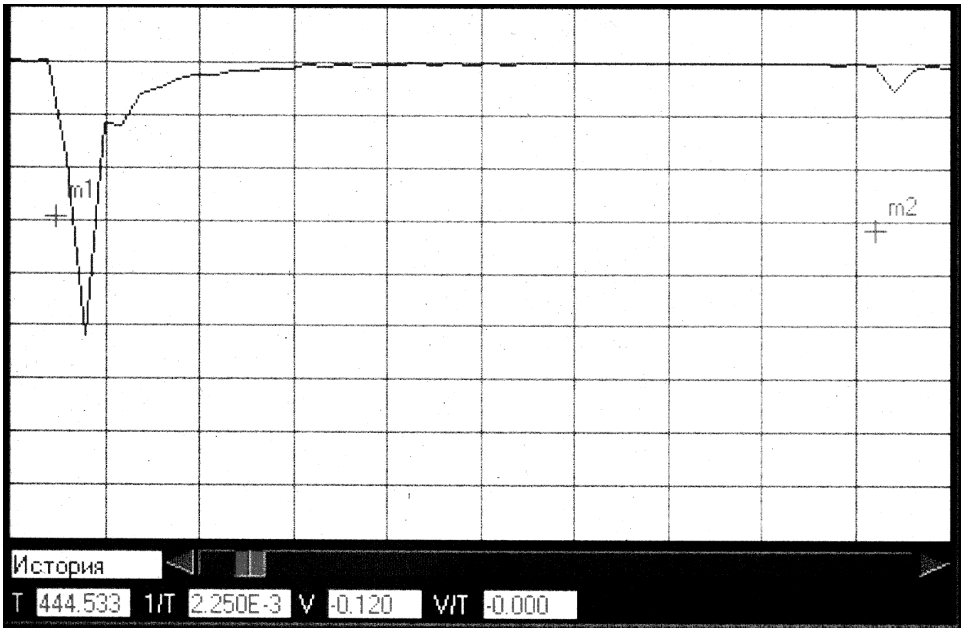


Fig. 7. MCP signal in the mirror chamber. First peak is SASE pulse. Second peak is the same SASE pulse after complete round-trip in the optical feedback system. Pulse separation is 444 ns

fraction of microradians. Special efforts were directed to suppression of mechanical resonances which made possible to keep oscillation amplitudes around one microradian level (see Fig. 4).

The alignment of the optical elements was performed in two stages. At the first stage laser prealignment procedure has been performed (see Fig. 6). Final alignment of the mirrors has been performed with SASE FEL radiation (see Fig. 7).

RAFEL Schedule

RAFEL project has been launched in the middle of 1998 and proceeded as follows:

- June, 1998 — approval of the project by DESY;
- November, 1998 — approval of the project by JINR;
- May, 1999 — finishing the design;
- June, 1999 — purchasing of mechanical equipment, mirrors, gratings, radiation detectors and electronic components for the control system;
- June/December, 1999:
  - — manufacturing of elements, assembling and testing of the RAFEL alignment system at JINR. Design and manufacturing of the RAFEL control system;
  - — manufacturing of the mirror and grating vacuum chambers at DESY;

- January/June, 2000 — assembling and testing of the RAFEL alignment system at DESY. Integration of the control system into the TTF control system;
- May/June, 2000 — assembling of the RAFEL optical feedback and control systems at the TTF site. Upgrade of the photoinjector laser for 2.25 MHZ repetition rate;
- July/September, 2000 — alignment of the optical feedback system;

RAFEL Budget

Budget 1999:

- 60 k$ — the grant program of the special purpose use of the Polish contribution to JINR: design, ordering and delivering components for the RAFEL to DESY — Institute of Physics of the Polish Academy of Sciences;
- 30 kDM — a fraction of the German contribution to JINR: manufacturing, assembling and testing of the RAFEL systems at JINR;
- 170 kDM — DESY budget: ordering components for the RAFEL.

Budget 2000:

- 40 kDM — a fraction of the German contribution to JINR: control electronics;
- 150 kDM — DESY budget: ordering of components, manufacturing of equipment, salary & infrastructure.

The grant from program of the special purpose use of the Polish contribution to JINR, 60 k$, has been received in the year 1999. A fraction of 8 k$ has been spent by JINR for travel expenses and organization of RAFEL components production at JINR. A fraction of 52 k$ has been transferred to the Institute of Physics of the Polish Academy of Sciences and was used for ordering the equipment for the RAFEL.

Future Plans

At present all components of the RAFEL are ready and installed at the TTF accelerator. Dedicated beam time is scheduled for spring 2001. The first stage of the RAFEL experiment will be organization of the optical feedback with mirrors and fixing the longitudinal base of the RAFEL feedback. In the second stage the grating will be installed in the grating chamber and RAFEL will produce fully coherent, tunable VUV radiation. It is foreseen to deliver this radiation for experiments currently under preparation at the TESLA Test Facility.

References

1. *Andruszkow J. et al.* First Observation of Self-Amplified Spontaneous Emission in a Free Electron Laser at 109 nm Wavelength. // Phys. Rev. Lett. 2000. V.85. P.3825.
2. *Faatz B. et al.* Regenerative FEL Amplifier at the TESLA Test Facility at DESY. // Nucl. Instr. and Meth. 1999. V.429. P. 424–428.

3. *Faatz B. et al.* Regenerative FEL Amplifier at the DESY TESLA Test Facility as a Fully Coherent VUV Laser. // DESY Print TESLA-FEL 97-07. Hamburg, 1997.
4. *Feldhaus J. et al.* Seeded SASE Free-Electron Lasers as Fully Coherent VUV and *X*-Ray Sources. // SPIE Proc. V.3451. Time Structure of *X*-Ray Sources and its Applications. P.145–156.
5. *Faatz B. et al.* Regenerative FEL Amplifier at the TESLA Test Facility at DESY. // Contributions to the FEL'98 Conf., Aug. 17–21, Willimsburg, USA. DESY Print September 1998, TESLA-FEL 98-06. Hamburg, 1998. P.5–8.

COOPERATION WITH POLISH INSTITUTES IN THE FIELD OF COMPUTATIONAL PHYSICS

A.Polanski

Laboratory of Information Technologies, JINR

Laboratory of Information Technologies (LIT) cooperates with different scientific research organizations in Poland: Soltan Institute for Nuclear Studies (SINS) in Swierk, University of Mining and Metallurgy (UMM) in Cracow, Institute of Mathematical Machines (IMM) in Warsaw, and H.Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics (NINP) in Cracow.

The well-known internuclear cascade model and Dubna Cascade program complex was developed [1,2] in cooperation with SINS. The intranuclear cascade model describes hadron-nucleus interactions quite exactly, but overestimates the multiplicity of produced mesons in nucleus-nucleus interactions without taking into account the meson and baryon resonance production. Inclusion of the resonances leads to decreasing multiplicity of mesons, neutrons and protons. In order to overcome the problem, it is proposed to modify the FRITIOF code to low energies [3,4]. For these purpose we choose:

- $dW/dM' \sim 1/M'$ $M'_{\min} = 1.1$ GeV;
- Isotropic decay of quark strings with masses less than 1.7 GeV;
- Charge exchange of nucleons during the interactions;
- The Reggeon theory model of nuclear destruction.

Figure 1 shows the proton and pi-meson rapidity distributions in different nucleus-nucleus interactions. They were calculated by the modified FRITIOF code and by the code of the cascade-evaporation model. The cascade model takes into account the trailing effect, Pauli principle, and the dependence of the Fermi momentum on the local nuclear density, the pre-equilibrium emission and the evaporation of the nuclei. Events with at least one inelastic *NN* collision were selected at the simulations. As is seen, for *dd* interactions the models give similar results. Since in this case we can neglect the cascade interactions, the coincidence of the results tells us about the correctness of the *NN* interactions description in CEM (the CEM code used by us does not allow a direct simulation of *NN* interactions). We can mark only a little enhanced baryon production in the central rapidity region in CEM. In alpha-alpha interactions where the influence of the cascade interactions is sufficiently large, we observe a difference of the predicted pi-meson spectra. As expected, taking into account the resonances in the FRITIOF model leads to a decreased meson yield. The enhanced meson production in CEM becomes more pronounced in *CC* interactions.

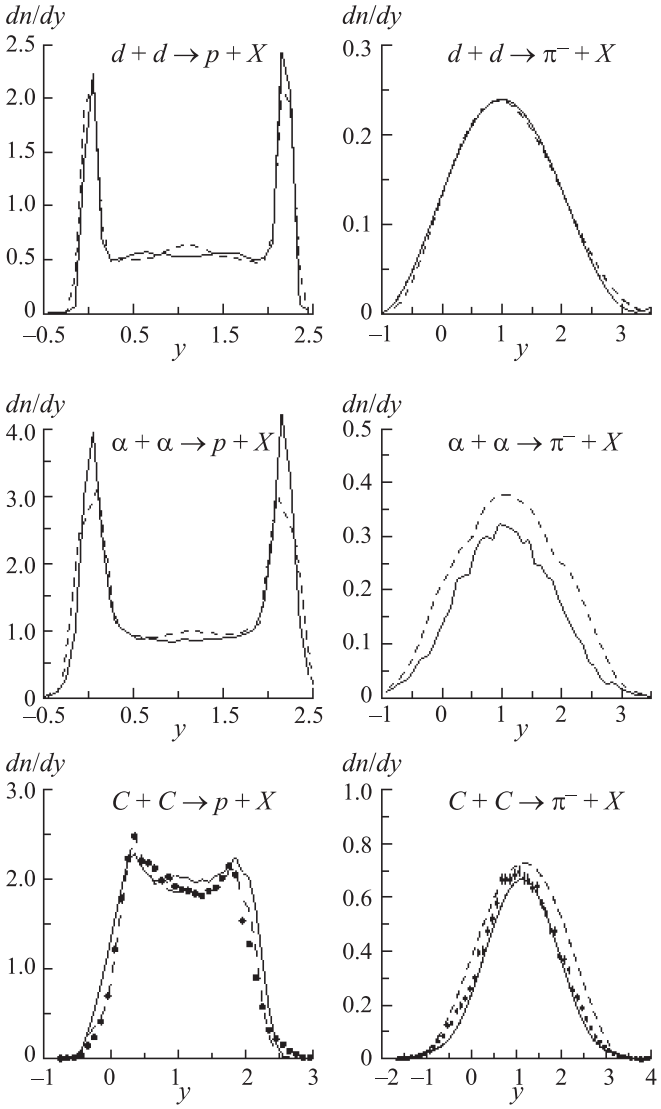


Fig. 1. Proton and pi-meson rapidity distributions in nucleus-nucleus interactions at the energy of 3.3 GeV/nucleon. Points are the experimental data. The solid and dashed curves are the modified FRITIOF and CEM calculations, respectively

To describe the proton production in the nuclear fragmentation regions in the framework of the FRITIOF model, we take into account both the inelastic interactions of the nucleons considered above and the elastic re-scatterings. As seen, we reproduce the baryon yields in the fragmentation regions at $y \sim 0$, 2.2 for the *dd* and alpha-alpha

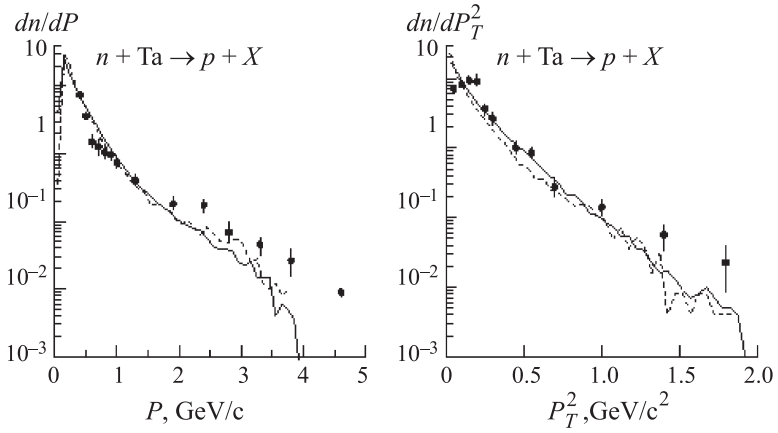


Fig. 2. Proton momentum distributions in *n*-Ta interactions. Points are the experimental data. The solid and dashed curves are the modified FRITIOF and CEM calculations, respectively

interactions. The CEM calculations for *CC* collisions were used for determination of the nuclear destruction model parameters, $C_{nd} = 1$, $r_{nd}^2 = 1.4$ fm^2. Then we introduced the experimental criteria for the proton registration.

The calculations for heavy nuclei look more interesting. Figure 2 gives the proton distributions on total and transverse momentum in n + Ta interactions at $P = 4.2$ GeV/c. As seen, the model predictions are close to each other. The same closeness we observe for C + Ta interactions at $P = 4.2$ GeV/c/nucleon presented in Fig. 2. Though, there is a big difference between the predicted meson spectra. The FRITIOF model calculations are close to the experimental data. At the calculation we use the following values of the parameters: $C_{nd} = 0.2$, $r_{nd}^2 = 1.1$ fm^2 to reproduce the Ta nuclei destruction.

Summing up, we can conclude that we have reached a satisfactory description of the meson and nucleon production in the nucleus-nucleus interactions at the energy of 3 GeV/nucleon in the framework of the sufficiently simple FRITIOF model. The model

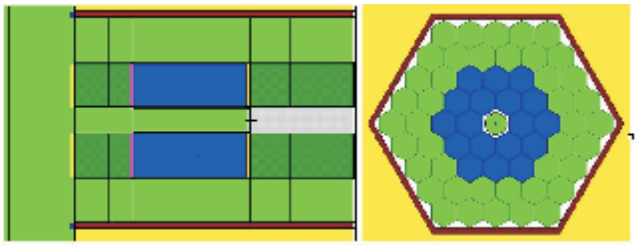


Fig. 3. Geometry of subcritical assembly

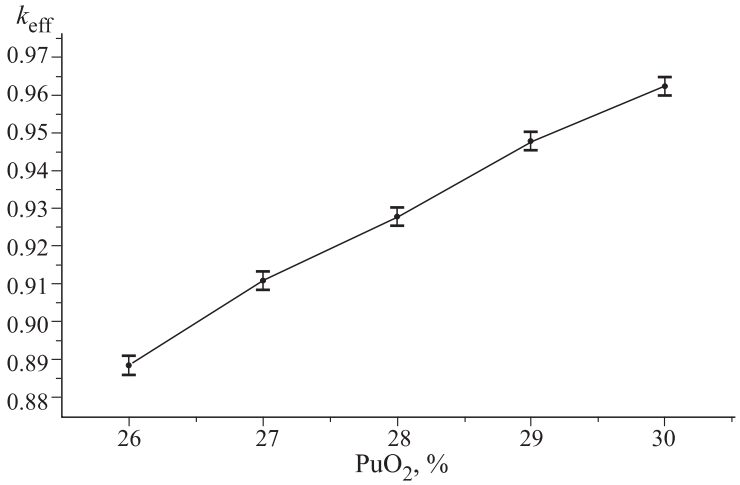


Fig. 4. The dependence of the neutron multiplication coefficient k_{eff} on the percentage of PuO_2 in the MOX fuel for the effective density: 9.0 g/cm^3

can be applied to a practical calculation of the nucleus-nucleus interaction characteristics at high energies.

It is shown that the combination allows one to satisfactorily reproduce the meson and baryon yields in the nucleus-nucleus collisions at the energy of 3.3 GeV/nucleon.

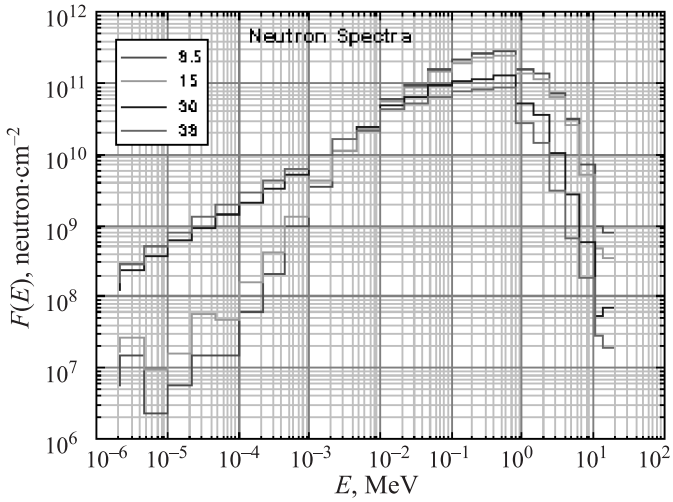


Fig. 5. The neutron spectrum calculated along the radius (r = 8.5, 15, 30 and 38 cm) of the subcritical assembly with k_{eff} = 0.947

The combined model works faster than a typical quantum molecular dynamic model, and allows one to estimate the data needed for creation of an electronuclear amplifier.

In cooperation with UMM, the properties of the experimental facility — a sub-critical assembly in Dubna (SAD) — driven with the existing 660 MeV JINR protons accelerator have been investigated [5–15]. The assembly consists of a central cylindrical lead target surrounded by a mixed-oxide (MOX) fuel (PuO_2 + UO_2) and a leader reflector (Fig. 3).

The calculated quantities were: a neutron multiplication coefficient, a neutron energy distribution for different places inside the subcritical assembly and the dependence of the energetic gain G on the proton energy,

The fuel has been considered with a composition of plutonium dioxide PuO_2 and uranium dioxide UO_2. The content of plutonium isotopes in plutonium was as follow: 95 % ^{239}Pu, 5 % ^{240}Pu. Uranium was natural. Taking into account the split between the fuel element wall and the tablet, the effective density of the fuel is in the range from 9 to 9.5 g/cm^3. Calculations have been done in the MCNP4B code for different percentage of PuO_2 in the MOX fuel and for various density of the fuel fabricated in the Research Institute of Atomic Reactors in Dimitrovgrad in Russia.

According to Fig. 4, we have found that for $k_{\text{eff}} = 0.945$ the percentage of PuO_2 in MOX fuel is about 29 for effective density: 9.0 g/cm^3.

Figure 5 presents neutron spectra averaged over the small volumes calculated along the radius (r = 8.5,15, 30 and 38 cm) of the subcritical assembly with $k_{\text{eff}} = 0.947$.

Neutron flux: $1.54 \cdot 10^{12}$ cm$^{-2} \cdot$s^{-1}, $1.35 \cdot 10^{12}$ cm$^{-2} \cdot$s^{-1}, $0.74 \cdot 10^{12}$ cm$^{-2} \cdot$s^{-1}, and $0.52 \cdot 10^{12}$ cm$^{-2} \cdot$s^{-1}, respectively, was obtained inside the core.

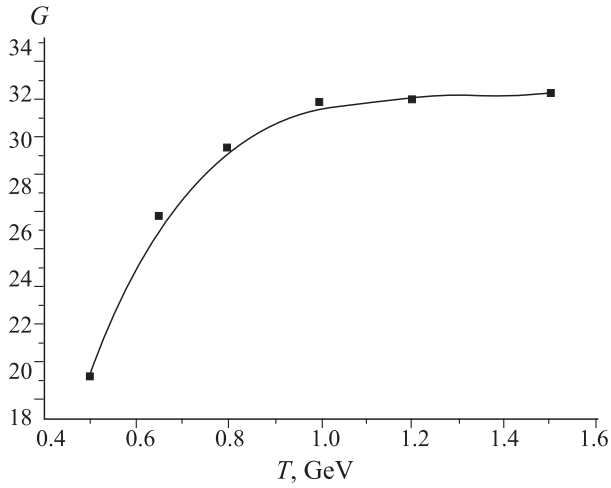


Fig. 6. Energetic gain G vs. incident proton energy T for $k_{\text{eff}} = 0.945$ /0.003/

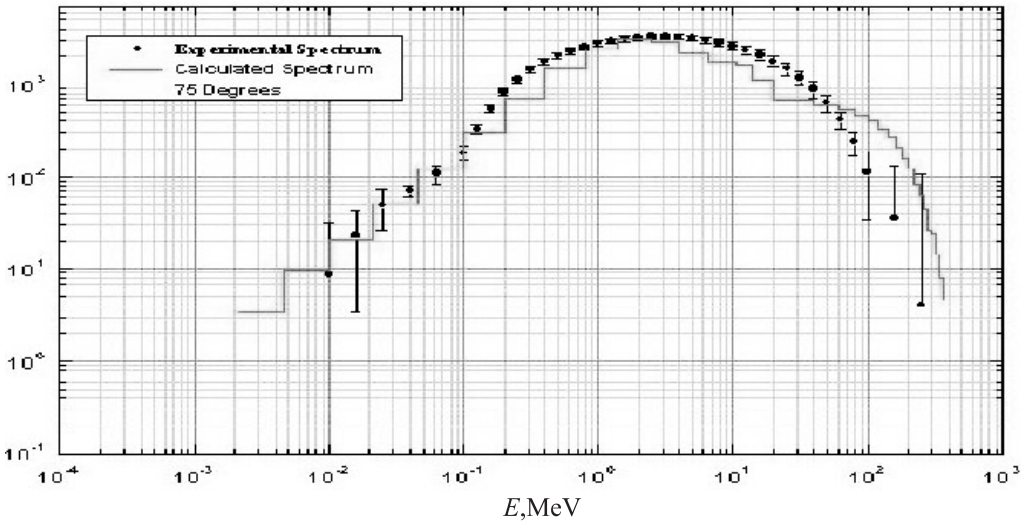


Fig. 7. Comparison of calculated and experimental neutron flux (neutrons/cm^2 per unit lethargy) from the Pb target at 75°

Calculations were performed for the 660 MeV protons and 1 μA current. ALCS computer code was used.

Several conclusions can be made from the presented results: (i) different neutron spectra can be formed inside the assembly — from hard up in the blanket to epithermal ones in the lead reflector; (ii) fast neutron flux is about 10^{12} cm $^{-2} \cdot s^{-1}$.

The energetic gain G is presented in Fig. 6. It was calculated by using a Dubna CASCADE code. The energetic gain G is a ratio of the heat produced in the device to the beam energy. A decrease in the energy gain (see Fig. 6) at low energies range is caused by ionization losses of primary protons. As we can see from Fig. 6 for 660 MeV proton energy, the energetic gain is $G = 27$ and for 1.5 GeV proton energy $G = 32$.

The calculations show that for the subcritical assembly with a mixed-oxide (MOX) BOR-60 fuel (29 %PuO_2 + 71 %UO_2) the multiplication coefficient k_{eff} is equal to 0.947, the energetic gain is equal to 30, the fission power is 20 kW and the neutron flux density is 10^{12} cm$^{-2} \cdot s^{-1}$.

In frames of the project SAD, a first stage of the experimental investigation was carried out at LNP phasotron. [16,17]. The main goal of the experiment was to study the differential characteristics of the secondary radiation field around the thick lead target irradiated by protons. Such experimental data are needed for verification of the calculations of the internuclear cascade of secondary particles generated by primary protons within the target. Figure 7 demonstrates the comparison of the calculated and experimental neutron spectra from Pb target at 75° [16].

In cooperation with IMM, image-processing method [18] was developed. Image processing can be applied to:

- Experimental physics;
- Space photograph recognition;
- Chromosome analyses;
- Face recognition.

A computer code for the face recognition by a new type of neural networks was proposed [19]. They are suitable for a direct handling of digitized images of human faces and need much less time for training than the ordinary multilayer perceptions with the back propagation algorithm. The tolerance ability to various image distortions was tested. Such imaging processing problems as a massive data array, great variations in size, orientations, lightening, background, etc., were solved by:

- Data Compression by Principal Component method,
- Image scaling by Wavelet transforms,
- Classification by a new type of neural networks.

Theoretical investigation on quantum theory with a vector time was performed in cooperation with NINP. The possibility of supraliminal signals and the respective generalization of relativity have been investigated by means of the multitime theory developed at JINR. The results are presented at the International Workshop on Extended Quantum Theory (Cracow, October 2000, to be published in the Proc. of the Workshop). A common (V.Barashenkov, E.Kapuscik) review paper of cosmological theories has been prepared and sent to the Russian journal «Znanie — Sila». The paper will be published in the January issue of the Journal.

Future Plans for the Years 2001–2003

- Development of computer codes for the mathematical modeling of interactions of particles with nuclei and substance. Creation of a modern version of the program DUBNA–CASCADE for Monte-Carlo simulation of transport and interaction of particles with nuclei.
- Creation of methods and numerical algorithms for physics fields calculation and particle beams transport. Introduction and maintenance of modern computer programs for magnetic fields calculations.
- Creation of numerical methods and software for mathematical simulation of complex physics systems. Development of a program library for calculation of the stationary and dynamic models of quantum mechanics and the field theory oriented to vector-parallel computer systems.
- Development of methods, algorithms and software of computer algebra. Introduction and maintenance of modern systems of analytical calculations.
- Development of numerical and analytical methods for a research in nonlinear models of theoretical physics.

• Development of the elastodynamic approach to the continuum mechanics of nuclear matter and its application to physics of nuclear fission and pulsar astrophysics.

• Development of methods for modeling and processing experimental data, including the development and introduction of new methods for data filtering and data compression as well as pattern recognition. Introduction of the results in the software support of experimental investigations.

• Creation of systems for experimental data processing in particle physics, including the development of algorithms, software and architecture of computing clusters. Application of the developed systems for mathematical processing of experimental data.

• Development of the program packages for simulation, processing and visualization of data with the use of systems ROOT, GEANT, LAHET, FRITIOF, HIJING, RQMD for experiments STAR, ALICE, COMPASS, HEND, SPHERE, FAZA HERA-B.

• STAR — Research of the spatial-temporal characteristics of the nuclear substance in the course of nuclear collisions, simulation of spin effects in the experiments with polarized beams.

• COMPASS — Development of a method and algorithms for calculations of the cross sections of diffraction processes in πp, pp, pA, and πA collisions. Creation of a mathematical model to achieve high efficiency pattern recognition when restoring events. Development of algorithms for particle identification on the data from the RICH-detectors.

• HEND — Creation of a mathematical model of the neutron and gamma irradiation of the Mars surface on the basis of the measurements of fast neutrons.

• SPHERE, FAZA — Simulation of the processes of the neutron field's generation; development and maintenance of the programs: event generators for modeling the processes of nuclei fragmentation, processes of complete destruction of nuclei and dynamics of nuclear interactions on the basis of measurements at the installations.

• HERA-B — Increasing the efficiency of the track reconstruction program for the external track detector.

References

1. *Barashenkov V.S., Polanski A.* Integral Nucleon- and Pion-Nucleus Cross-Sections for the Monte Carlo Transport Codes. // Proc. of the Intern. Conf. on Advanced Monte Carlo on Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications, Lisbon, Portugal, Oct. 23–26, 2000. P.313.
2. *Barashenkov V.S., Gudowski W., Polanski A.* Integral High-Energy Nucleon-Nucleus Cross Sections for Mathematical Experiments with Electronuclear Facilities. JINR Preprint E2-99-207. Dubna, 1999. Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha, Czech Republic, June 7-11, 1999.

3. *Galoyan A.S., Polanski A., Uzhinskii V.V.* Simulation of Nucleus-Nucleus Interactions in the Framework of the FRITIOF Model. // Proc. of the Intern. Conf. on Advanced Monte Carlo on Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications, Lisbon, Portugal, Oct. 23–26, 2000. P.382. JINR Preprint E2-2000-306. Dubna, 2000. (Submitted to «Phys. Rev. C», nucl-th/0010083).
4. *Galoyan A.S. et al.* Application of RQMD and FRITIOF Models for Description of Nucleus-Nucleus Interactions at Energy of 3.36 GeV/nucleon. // Proc. of the XV Intern. Seminar on High Energy Physics Problems, Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodinamics, Dubna, Russia, Sept. 25–29, 2000. P.67.
5. *Polanski A. et al.* Monte Carlo Modeling of Fast Sub-Critical Assembly with MOX Fuel for Research of Accelerator Driven Systems. // Proc. of the Intern. Conf. on Advanced Monte Carlo on Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications, Lisbon, Portugal, Oct. 23–26, 2000. P.253.
6. *Krivopustov M.I. et al.* Experimental Studies of Electronuclear Method of Energy Production and Transmutation of Radioactive Wastes Using Relativistic Beams from JINR Synchrophasotron/nuclotron. // Proc. of the XV Intern. Seminar on High Energy Physics Problems, Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodinamics, Dubna, Russia, Sept. 25–29, 2000. P.48.
7. *Barashenkov V.S., Puzynin I.V., Polanski A.* ADS's Based on the 660 MeV Proton Phasotron of JINR for Research on Utilization of Plutonium. // Proc. of the 10th Intern. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems, Petten, The Netherlands, Sept. 24–28, 2000. P.429.
8. *Barashenkov V.S., Polanski A., Puzynin I.V.* Monte Carlo Experiments with Electronuclear Systems. // Proc. of the Second Intern. Conf. Modern Trends in Computational Physics, Dubna, Russia, July 24-29, 2000. P.39.
9. *Barashenkov V.S. et al.* Monte Carlo Modeling of Bireactor Electronuclear Systems. // Proc. of the Second Intern. Conf. Modern Trends in Computational Physics, Dubna, Russia, July 24–29, 2000. P.46.
10. *Barashenkov V.S. et al.* Research Programme for the 660 MeV Proton Accelerator Driven MOX-Plutonium Subcritical Assambly. // Proc. of the Topical Conf. on Plutonium and Actinides, Santa Fe, New Mexico, USA, July 2000. P.194.
11. *Polanski A.* Monte Carlo Modeling of Electronuclear Processes in Experimental Accelerator Driven Systems. // Acta Phys. Polonica . 2000.V.B11. No.1. P.95.
12. *Tumendelger T.S. et al.* Calorimetric of an Electronuclear Target for Uranium-Lead Assembly at Proton Energy 1.5 GeV. JINR Preprint P1-99-247. Dubna, 1999 (submitted to «Kerntechnik»).
13. *Barashenkov V.S. et al.* An Experimental Accelerator Driven System Based on Plutonium Subcritical Assembly and 660 MeV Accelerator. JINR Preprint E2-99-207. Dubna, 1999. // Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha, Czech Republic, June 7-11, 1999. P.93.

14. *Arkhipov V.A. et al.* Research Programme for the 660 MeV Proton Accelerator Driven Plutonium Subcritical Assembly. // Proc. of the Conf. on Experimental Nuclear Physics in Europe (ENPE'99), Seville, Spain, June 21–26, 1999. P.478-481.
15. *Barashenkov V.S. et al.* Plutonium Based Energy Amplifier Testing Concept. // Conf. on Nuclear Energy in Central Europe‘98, Terme Catez, Slovenia, Sept. 7–10, 1998. P.67.
16. *Bamblevski V.P. et al.* The Investigation of the Radiation Field Around the Thick Lead Target Irradiated by the 650 MeV Protons. Part.1. The Neutron Spectra Measurement Around the Target. JINR Preprint E1-2000-307. Dubna, 2000.
17. *Bamblevski V.P. et al.* The Investigation of the Radiation Field Around the Thick Lead Target Irradiated by the 650 MeV Protons. Part.2. The Measurements of the Angular and Spatial Distributions of the Hadron’s Yeld from the Target. JINR Preprint E1-2000-308. Dubna. 2000.
18. *Chernov N., Kolganova E., Ososkov G.* Robust Methods for RICH Ring Recognition and Particle Identification. // Nuclear. Instr. and Meth. in Phys. Research A. 1999. V.433. P.247-278.
19. *Ososkov G., Stadnik A.* Face Recognition by a New Type of Neural Networks. // JINR, Dubna, 2000 (to be published).



89-я сессия Ученого совета ОИЯИ. Участники круглого стола (слева направо):
В. М. Жабицкий, профессор А. Н. Сисакян, академик В. Г. Кадышевский (ОИЯИ),
академик А. Хрынкевич, профессор Е. Неводничанский (Польша)



Выступает академик А. Хрынкевич (Польша)



Председатель Государственного агентства по атомной энергии
Республики Польша профессор Г. Неводничанский



В первом ряду слева направо: академик А. Н. Скринский (Россия), академик Р. Сосновский (Польша), профессор П. Спиллантини (Италия), профессор Ш. Шаро (Словакия), профессор Х. Шоппер (Германия), профессор Н. М. Шумейко (Белоруссия)



В первом ряду: профессора В. Навроцик, Л. Собчик, А. Собичевский, С. Тачановский (Польша)



Академик Р. Сосновский (Польша)

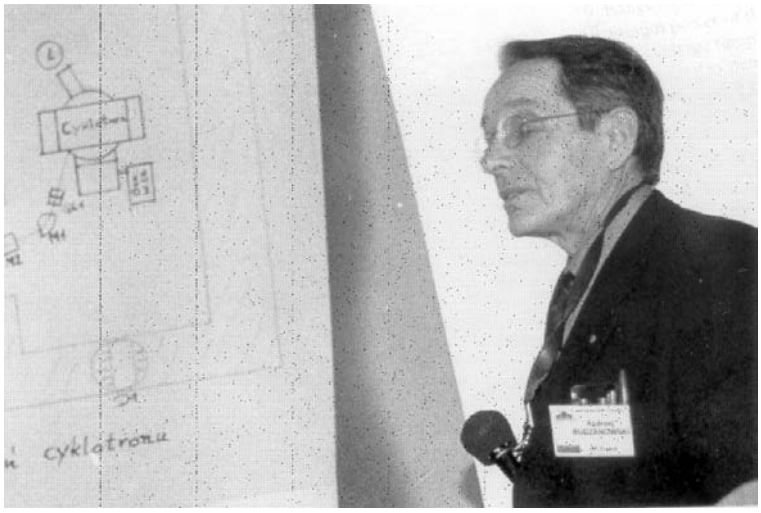


Профессора С. Хойнацкий, Я. Ковнацкий, Я. Возняк (Польша)

Академик А. Хрынкевич (Польша)



Профессор А. Будзановский (Польша)



Академик Е. Яник (Польша)





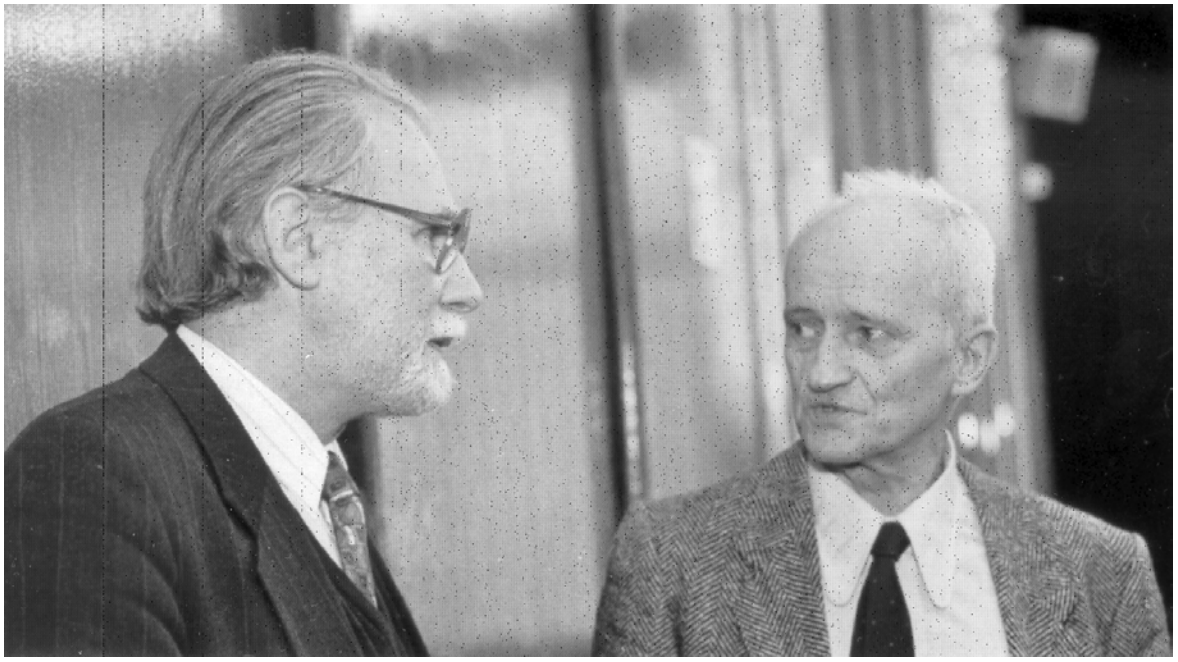
Профессор Е. Неводничанский и академик А Хрынкевич (Польша)



Руководители лабораторий ОИЯИ (слева направо): М. Г. Иткис, Н. А. Русакович, В. Д. Кекелидзе, И. В. Пузынин, А. И. Малахов



В первом ряду: профессор А. В. Белушкин (ОИЯИ), академик Е. Яник, профессор Л. Собчик, профессор С. Хойнацкий (Польша)



Академик В. Г. Кадышевский (ОИЯИ), профессор А. Собичевский (Польша)



Профессор Е. Неводничанский, Э. Дурачинский (Польша), В. Хмельовский (ОИЯИ)



Профессор С. Тачановский (Польша), профессор А. Н. Сисакян (ОИЯИ)



Ю. А. Туманов (ОИЯИ), профессор В. Навроцик (Польша), В. В. Сиколенко (ОИЯИ)



Торжественное открытие фотовыставки «Польша в ОИЯИ»



В выставочном зале



Академики А. Н. Тавхелидзе (Грузия) и А. А. Логунов (Россия)



Профессор Ю. Анджеевский, Э. Суминска, С. Рохозинский (Польша)



Подписание итогового документа Координационной комиссии
по сотрудничеству ОИЯИ с научными центрами Республики Польша

ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОИЯИ И НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ ПОЛЬШИ

В.В.Кореньков

Лаборатория информационных технологий ОИЯИ

Стремительное развитие сетевых, компьютерных и информационных технологий создало базу для глобального объединения вычислений и высокоскоростных сетей связи.

На рубеже веков была сформулирована концепция GRID, которая предполагает создание компьютерной инфраструктуры нового поколения, ориентированной на качественно новый уровень доступа к информационным и вычислительным ресурсам на глобальном уровне. grid — зарождающаяся инфраструктура, способная кардинально изменить привычные представления об организации вычислений. Предполагается, что подобные структуры смогут объединить региональные и национальные вычислительные компьютерные инфраструктуры для создания всеобщего ресурса.

Технологическое основание для создания grid-инфраструктур дают уже существующие волоконно-оптические сети, высокопроизводительные процессоры, параллельные архитектуры, протоколы связи, математическое обеспечение распределенных структур, механизмы обеспечения безопасности. Реализация grid потребует продолжения серьезных исследований во всех перечисленных областях.

Безусловно, усилия по развертыванию grid-инфраструктур имеют смысл только в том случае, если они будут востребованы большим числом пользователей.

Среди основных направлений использования grid на данный момент можно выделить:

- распределенные супервычисления, решение очень крупных задач, требующих огромных процессорных ресурсов, памяти и т.д.;
- «высокопоточные» вычисления (High-Throughput Computing), позволяющие организовать эффективное использование ресурсов для небольших задач, утилизируя временно простаивающие компьютерные ресурсы;
- вычисления «по требованию» (On-Demand Computing), крупные разовые расчеты;

- вычисления с привлечением больших объемов распределенных данных (Data-Intensive Computing), например, в метеорологии, астрономии, физике высоких энергий;
- коллективные вычисления (Collaborative Computing).

Важнейшим компонентом grid-инфраструктуры является промежуточное программное обеспечение (ПО), которое будет обеспечивать безопасный доступ к данным большого объема в универсальном пространстве имен, перемещать и тиражировать данные с высокой скоростью из одного географически удаленного узла на другой и организовывать синхронизацию удаленных копий, а также интерфейс к системам управления массовой памятью.

Вычислительная grid-инфраструктура — распределенная программно-аппаратная компьютерная среда, в которой организован функционально надежный, согласованный, устойчивый и недорогой доступ к конечным вычислительным ресурсам.

Функциональная надежность позволяет предоставить пользователю гарантии получения им длительного предсказуемого доступа к ресурсам всех компонентов grid. Конечный пользователь должен иметь полную информацию о всех характеристиках производительности, включая полосу пропускания канала связи, времена задержек, искажения, производительность компьютеров, программные службы, безопасность и надежность конфигурации.

Согласованность предполагает стандартизацию всех grid-служб, интерфейсов, а также способов работы пользователей.

Работы в области распределенных вычислений в ОИЯИ. В Объединенном институте ядерных исследований вопросами интеграции компьютерных ресурсов и повышением эффективности их использования занимаются уже более 40 лет.

С 1997 г. вычислительные мощности центральных серверов ОИЯИ составили основу суперкомпьютерного центра (СКЦ), ядром которого стала параллельная машина SPP-2000 и автоматизированная ленточная библиотека ATL-2640, допускающая две технологические схемы использования: с помощью программных средств HP OmniBack (автоматическое резервное копирование институтских компьютеров) и HP OmniStorage (управление мигрирующей файловой системой). Как показывает опыт, возможностей стандартного ПО не всегда достаточно для организации высокоэффективной эксплуатации программно-аппаратного комплекса и требуются дополнительные усилия для оптимизации работы центра.

В течение последних десяти лет в ОИЯИ был создан ряд кластеров на различных платформах: от кластеров на базе компьютеров VAX и Sun до Linux-кластеров, собранных из ПК.

За 1999–2000 гг. создано несколько ферм из ПК совокупной производительностью примерно 1,5K SPECint95. На этих фермах используются различные системы пакетной обработки: NQS, PBS, Condor. Установлен набор инструмен-

тальных средств Globus с целью проведения совместных работ с российскими и зарубежными коллегами.

На протяжении ряда лет ОИЯИ является ведущей организацией проекта БАФИЗ по созданию и развитию распределенной сети баз данных и знаний в области ядерно-физических исследований. Этот проект является хорошей основой для создания единого информационного пространства ОИЯИ и институтов стран-участниц.

Участвуя в совместных с рядом физических институтов (НИИЯФ МГУ, ИТЭФ, ИФВЭ) работах по созданию регионального центра для LHC в России, мы вплотную подошли к осознанию необходимости создания локального grid-сегмента в России.

Поскольку информационно-вычислительная инфраструктура ОИЯИ характеризуется наличием оборудования различных архитектур и операционных систем, то использование grid-технологий позволит эффективно интегрировать различные элементы СКЦ , кластеры, вычислительные фермы, дисковые массивы, системы массовой памяти в единый комплекс.

Во многих развитых странах мира (в том числе в России и Польше) появились инициативные работы по созданию национальных сегментов GRID.

На сегодняшний день сложились хорошие предпосылки для активизации работ по созданию единого информационного пространства ОИЯИ и институтов стран-участниц.

Предлагается рассмотреть пилотный проект объединения информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ и научно-образовательных центров Польши.

Основные задачи проекта:

— совместное освоение и обмен опытом в области GRID-технологий и участие в создании национальных сегментов;

— объединение и совместное использование информационных и вычислительных ресурсов, распределенных баз данных, электронных библиотек;

— использование современных систем для организации хранения и обработки больших массивов экспериментальных данных;

— обеспечение возможности удаленного участия физиков Польши в работе установок ОИЯИ;

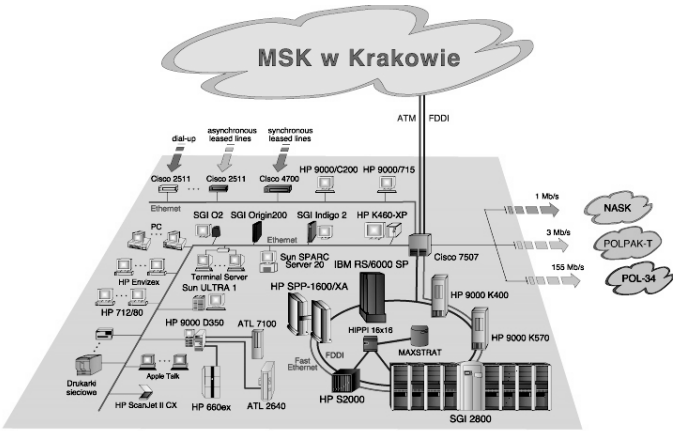
— совместные работы и обмен опытом в управлении крупными сетями, включая вопросы контроля, анализа, защиты сетей, серверов, информации;

— совместные работы и обмен опытом в создании суперкомпьютерных приложений;

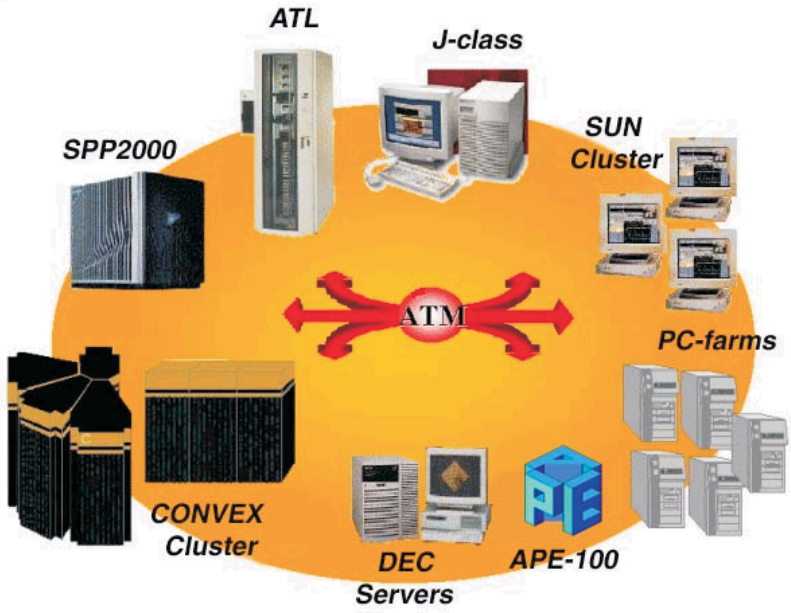
— прямые телеконференции и дистанционное обучение.

В качестве основного партнера ОИЯИ из научных центров Польши для реализации этого пилотного проекта предлагается ЦИФРОНЕТ (Краков). В инфраструктуре ОИЯИ и ЦИФРОНЕТ имеется очень много общего в составе

вычислительных и кластерных решений, систем DATA MANAGEMENT, сетевых технологий и SOFTWARE.



SPRZĘT KOMPUTEROWY W ACK CYFRONET AGH



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ ПРОГРАММЫ «БОГОЛЮБОВ–ИНФЕЛЬД»: СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ

С.П.Иванова

Учебно-научный центр ОИЯИ

Дорогие коллеги!

Прежде чем перейти к обсуждению программы «Боголюбов–Инфельд», я хочу кратко представить вам некоторые направления деятельности УНЦ.

Старшекурсники получают в УНЦ полное высшее образование в следующих областях: ядерная физика, физика элементарных частиц, физика конденсированных сред, теоретическая физика, техническая физика, радиобиология.

Для отдельных студенческих групп УНЦ разрабатывает новые программы специальной подготовки.

В рамках подготовки специалистов для словацкого циклотронного комплекса, строящегося с помощью ОИЯИ, осенью 1998 г. в УНЦ начались занятия у первой группы студентов из Словакии. В 2000 г. они успешно защитили дипломные работы. В январе 2001 г. защитится вторая группа словацких студентов. Обе эти группы состоят из студентов Братиславского технического университета. В сентябре 2000 г. в УНЦ приступила к занятиям третья группа, составленная из студентов Братиславского технического университета и Университета имени Коменского.

УНЦ старается расширить область своей образовательной деятельности. Активное использование медицинских пучков ускорителя в ЛЯП стало основанием для учреждения новой выпускающей кафедры МИФИ — кафедры физических методов в прикладных исследованиях и медицине (№ 45). Возглавляет ее директор ЛЯП проф. Н.А. Русакович.

Особенностью университетского образования является его разносторонность. Студенты могут выбирать лекторов и лекции; для них есть много дополнительных курсов, в том числе факультативных. Среди курсов, преподаваемых в УНЦ, — физика элементарных частиц, релятивистская ядерная физика, теория фундаментальных взаимодействий (квантовая хромодинамика), теория фундаментальных взаимодействий (теория ядерных реакций), структура атомного ядра, введение в теорию ускорителей, экспериментальная ядерная физика, современные методы регистрации ядерных реакций и ядерного излучения, программируемые логические устройства, основы радиотехники, цифровые устройства и

их применение, электронные методы регистрации ионизирующего излучения, радиационная безопасность и защита окружающей среды, математическая статистика, объектно-ориентированное программирование на C++, программирование в UNIX, компьютинг в физике высоких энергий, интернет-технологии, компьютерная техника в ядерной физике (семинар), телекоммуникационные системы и мировые информационные ресурсы, компьютинг (визуализация в научных исследованиях), работа с системой «Mathematica», английский язык (для студентов), английский язык (для аспирантов).

В течение семестров УНЦ предлагает своим студентам и аспирантам короткие курсы лекций по современным достижениям в физике и смежных областях. Эти курсы образуют лекционный цикл «Современные проблемы естествознания».

Для своих студентов и аспирантов УНЦ издает учебные пособия. Например, в 2000 г. выпущено руководство по системе «Mathematica», автор — проф. Р.Краглер (Высшая профессиональная школа, Равенсбург-Вайнгартен; Университет прикладных наук): R. Kragler «*Mathematica* Tutorial Course».

В 2000 г. продолжила работу аспирантура ОИЯИ по 10 специальностям физики и математики.

Выпуск первого набора аспирантов состоялся в 1998 г. К настоящему времени восемь из них защитили кандидатские работы.

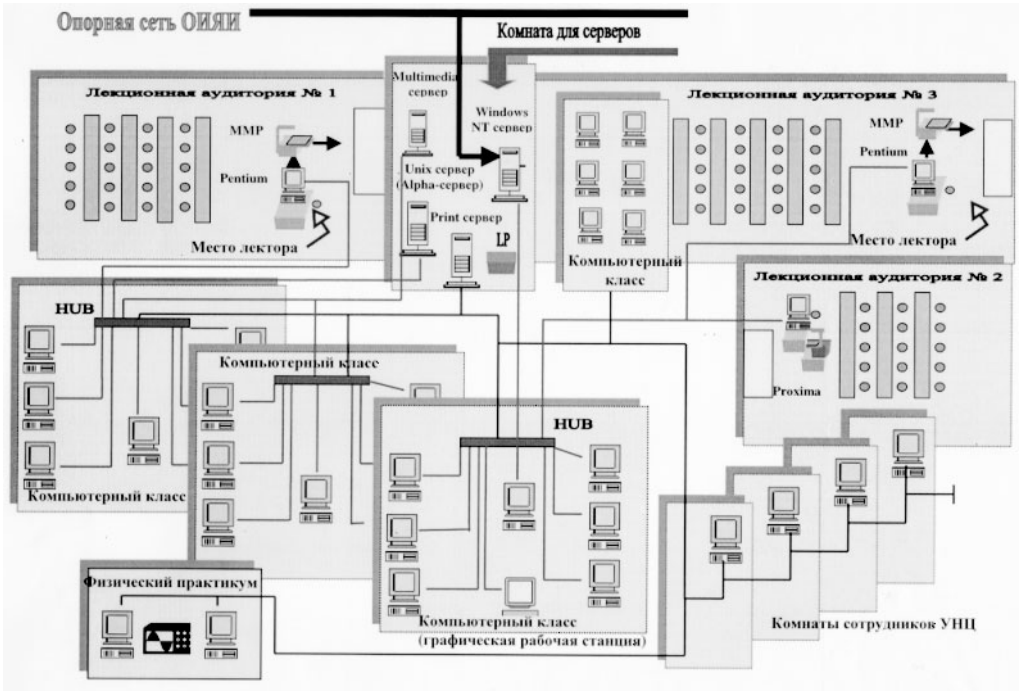
Двое из нынешних аспирантов УНЦ — египтяне.

В связи с международным характером деятельности ОИЯИ УНЦ активно развивает свои связи с зарубежными вузами. В рамках программы Германской службы академических обменов (DAAD) «Стипендии Леонарда Эйлера» на 1999–2000 и 2000–2001 гг. поддержан совместный проект УНЦ и Института теоретической физики Университета г.Гиссен (Германия). Два аспиранта и один студент УНЦ, занимающиеся теоретическими исследованиями в физике тяжелых ионов, получают в этом учебном году дополнительную стипендию; у них будет месячная стажировка в Гиссене.

В июле 2000 г. УНЦ посетила группа из 18 студентов Пражского технического университета. Они побывали в лабораториях ОИЯИ и познакомились с деятельностью УНЦ.

20–28 июня 2000 г. в Познани (Польша) состоялся региональный форум Европейской сети физического образования (EUPEN), где ОИЯИ был представлен Учебно-научным центром. На форуме обсуждались сотрудничество по линии Европейского физического общества, EUPEN и ОИЯИ, проведение в 2001 г. в ОИЯИ международной студенческой школы «Ядерно-физические методы и ускорители в биологии и медицине», а также вопросы, связанные со студенческими обменами.

УНЦ получил грант Европейского физического общества, который позволит пяти студентам УНЦ провести месяц в одном из итальянских университетов.



Вся эта работа требует должного материального обеспечения. На рисунке представлен план учебных помещений и оборудование УНЦ:

- 4 компьютерных класса, один из которых специализирован на визуализации данных;
- 3 аудитории с лекторскими местами, оборудованными мультимедийными средствами;
- серверная комната с e-mail и WWW-сервером (Alpha Server под DecUNIX) и мультимедийным сервером локальной аудиторной сети (под Windows NT);
- студенческая лаборатория, оснащенная за счет гранта дирекции ОИЯИ.

В учебные программы УНЦ введен практикум, состоящий из двух лабораторных работ. В одной из них студенты изучают основные характеристики спектрометра, измеряют гамма-спектр калиброванных источников и определяют энергию и интенсивность характерных линий. Тема другой работы — спектрометрия заряженных частиц.

Регулярно обновляется сайт УНЦ (http://uc.jinr.ru).

Осенью 1998 г. руководством ОИЯИ и Московского института радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) в ОИЯИ учреждена выпускающая кафедра по специальности «Электроника и автоматика физических установок». Теперь в УНЦ с первого курса учатся студенты МИРЭА дневной формы обучения. В

настоящее время в УНЦ обучается в общей сложности 46 студентов МИРЭА. Для них в УНЦ есть две аудитории и компьютерный класс.

С 1999 г. на базе лабораторий и подразделений ОИЯИ УНЦ ведет подготовку и переподготовку персонала Института. УНЦ намерен расширить область обучения технического и инженерного персонала, для чего в настоящее время идет подготовка к получению лицензий на ведение образовательной деятельности в области радиационной безопасности, охраны труда и информационных технологий.

Сотрудничество с польскими университетами

Стали традиционными дружеские связи УНЦ с университетским сообществом Польши.

Студенты и аспиранты УНЦ и польских вузов обмениваются ознакомительными визитами и участвуют в школах и конференциях, проводимых в Дубне и Польше. Для поддержки инициатив польских университетов и ОИЯИ по разработке и выполнению образовательных проектов была учреждена программа «Боголюбов–Инфельд», которая финансируется специальным грантом Полномочного Представителя Польши в ОИЯИ.

В мае 1999 г. в УНЦ было проведено совещание по сотрудничеству в области образования в рамках программы «Боголюбов–Инфельд». Профессора из университетов Белостока, Вроцлава, Гданьска, Кракова, Лодзи, Люблина и Щецинского политехнического института обсуждали с руководством УНЦ возможности и направления Образовательной программы ОИЯИ. Особое внимание было уделено развитию сотрудничества с польскими вузами. Участники совещания познакомились с научными программами всех лабораторий ОИЯИ и посетили основные установки ОИЯИ.

В резолюции совещания отмечена целесообразность обмена студенческими визитами с заранее подготовленной научно-лекционной программой, а также обмена информацией о школах, семинарах и конференциях для студентов, аспирантов и специалистов и участия в них обеих сторон. Особое внимание уделено выполнению дипломных работ в лабораториях ОИЯИ и в УНЦ под совместным руководством специалистов из польских университетов и ОИЯИ.

С каждым годом все больше польских студентов и аспирантов посещают УНЦ и все больше студентов и аспиранов УНЦ наносят ответные визиты в Польшу.

Первый обмен визитами состоялся в 1992 г., когда группа студентов из университета Лодзи проходила в УНЦ двухнедельную практику; затем состоялся ответный визит в Польшу группы студентов УНЦ. В 1996 г. состоялся двухнедельный визит в УНЦ группы студентов Университета им. Марии Склодовской-Кюри (Люблин). В феврале 1997 г. три студента и аспирант УНЦ участвовали в школе по теоретической физике в г. Карпач, которую ежегодно проводит Институт теоретической физики Вроцлавского университета. В мае 1997 г. группа студентов УНЦ посетила университеты Вроцлава, Лодзи и Люблина и Универ-

ситет им. Адама Мицкевича (Познань). В июне 1997 г. состоялся ответный визит в Дубну студентов-физиков из Познани. В сентябре 1997 г. группа студентов Вроцлавского университета посетила лаборатории ОИЯИ и УНЦ.

В нижеследующей таблице приводится статистика посещений ОИЯИ польскими студентами в последние три года (распределение по университетам и годам).

Университет	Число студентов		
	1998	1999	2000
г.Лодзь	—	—	9
г.Вроцлав	15	—	24
им. Адама Мицкевича, Познань	—	12	—
Ягеллонский и Горно-металлургическая академия, Краков	40	19	—
г.Люблин	—	10	—

В 1998 г. студентка физического факультета Университета им. Адама Мицкевича А.Кухарска проходила трехмесячную преддипломную практику в отделе физики ядра Лаборатории нейтронной физики; затем она блестяще защитила свою магистерскую работу.

В июне 1998 г. на базе ОРРИ, УНЦ и дубненского филиала НИИЯФ МГУ для группы студентов Университета им. Адама Мицкевича и физического факультета МГУ была организована учебная практика по медицинской физике.

В феврале 1998 г. восемь студентов и аспирантов УНЦ участвовали в школе по теоретической физике «От квантовой механики к квантовой технологии», проходившей в г. Карпач.

В 1999 г. два аспиранта УНЦ участвовали в 35-й зимней школе по теоретической физике «От космологии к квантовой гравитации»; в 2000 г. шесть студентов УНЦ участвовали в следующей школе.

Дальнейшее развитие сотрудничества с польскими университетами было бы более эффективным, если бы в учебные планы студентов соответствующих факультетов была включена практика в ОИЯИ, а аспиранты могли иметь двойное руководство (один руководитель из ОИЯИ, другой — из польского университета).

Руководство УНЦ придает большое значение развитию международных студенческих обменов. Важность этой деятельности уже отмечена участниками прошлых обменов. Такие связи помогут молодым ученым стран-участниц ОИЯИ легко стать частью международного научного сообщества.

27 июня – 11 июля 2001 г. в Ратмино (окрестности Дубны) состоится международная студенческая школа «Ядерно-физические методы и ускорители в биологии и медицине». Эта школа будет очередной в цикле летних студенческих школ, проводимых ОИЯИ.

Широкое применение в медицине ионизирующего и неионизирующего излучения, радионуклидов, установок гамма-терапии, ускорителей электронов и протонов, компьютерных томографов сделало медицинскую физику «стратегическим оружием» и одной из основ медицины настоящего и будущего. Современная прикладная медицинская физика включает в себя радиационную терапию, ядерную медицину, радиационную диагностику, неионизирующую диагностику и терапию, компьютерную технику и математическое моделирование в диагностике и терапии, радиационную безопасность и радиоэкологию.

Цель школы — познакомить студентов и аспирантов с последними достижениями и актуальными проблемами прикладной медицинской физики.

Школа будет состоять из нескольких тематических сессий и охватит следующие темы:

- медицинская физика;
- радиофармакология;
- сравнение возможностей электронных и протонных ускорителей и гамма-терапии с медицинской точки зрения;
- циклотронные и синхротронные установки: последние результаты;
- ускорительная техника для адронной терапии.

В 2000 г. отчеты о ходе выполнения Образовательной программы ОИЯИ были представлены:

- на региональном форуме Европейской сети физического образования (EUPEN) в Познани, Польша;
- на международном конгрессе «Наука и образование на пороге XXI века» в Минске, Белоруссия.

SUPERHEAVY NUCLEI: POLAND–JINR COOPERATION

A.Sobiczewski

Soltan Institute for Nuclear Studies, Warszawa

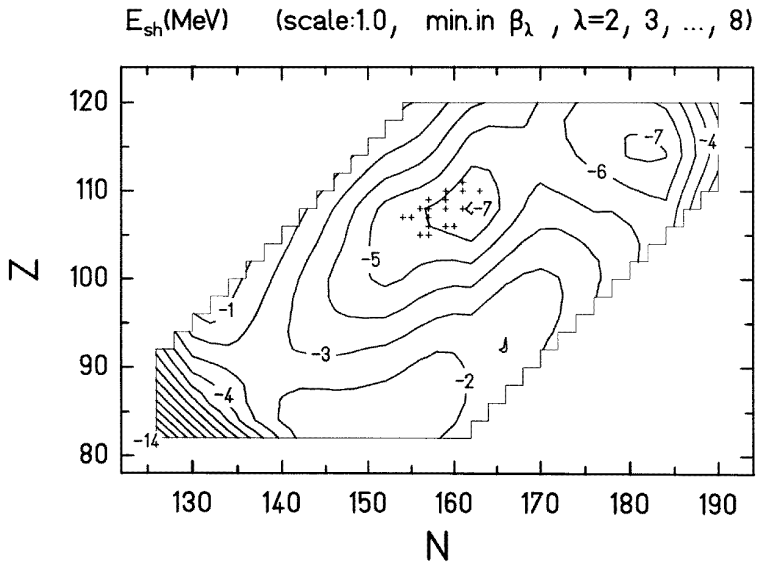
Cooperation of Polish physicists with Dubna physicists started at the very beginning of the appearance of the problem of superheavy nuclei. It began with a theoretical prediction of closed spherical shells next to the last experimentally known shells at the proton number $Z = 82$ and the neutron number $N = 126$. The result was: $Z = 114$ and $N = 184$ [1]. Thus, according to this prediction, the doubly magic nucleus next to ^{208}Pb should be ^{298}114. The prediction was based on a realistic, final-depth Woods–Saxon single-particle potential elaborated [2–4] by Dubna physicists in cooperation with the Polish physicist J.Grabowski.

These early predictions were followed by extensive calculations of the properties of heavy and superheavy nuclei, performed by a large Swedish–Polish–American group (e.g., [5–9]). A close contact of Polish physicists with JINR researchers resulted in a fruitful interaction between theoretical studies of this group and experimental works being done in the JINR Laboratory of Nuclear Reactions (LNR) headed by Prof. G.N.Flerov. This concerns works both on synthesis of the heaviest elements (e.g., [10]) and searches for superheavy elements in nature (cf., e.g., [11]).

Especially close cooperation on the heaviest nuclei, between Polish theoretical physicists and Dubna experimental physicists, has started when studies on deformed superheavy nuclei have been undertaken (e.g., [12–20]). In particular, it has been shown by theoretical physicists [15,16] that the nucleus ^{270}Hs is expected to be a doubly magic deformed nucleus. Thus, in addition to the long expected spherical doubly magic nucleus ^{298}114 [1], a deformed doubly magic nucleus ^{270}Hs has appeared [15,16] in the predictions, with a large region of nuclei with increased stability around it, as shown in Figure taken from [18]. Extensive calculations of the properties of these nuclei have shown that they have relatively long half-lives. Experiments done in Dubna showed that this was really the case (e.g., [21–23]). Recent Dubna experiments on synthesis of neutron-rich isotopes of the heaviest elements (e.g., [24–30]) gave an indication of approaching to the spherical closed shell at $N = 184$.

Besides experiments on superheavy nuclei (SHN) performed by JINR physicists in Dubna, these physicists intensively work on SHN at other laboratories, in particular at GSI-Darmstadt (e.g., [31–33]). Contacts of Polish theoretical physicists with them also extend to these laboratories, within a large international cooperation.

Extensive works of Dubna physicists on synthesis of SHN with the use of stable projectiles (in particular of ^{48}Ca) and intensive preparation to use radioactive projectiles



Contour map of calculated shell correction energy, E_{sh}, showing two expected regions of superheavy nuclei: deformed ones around the nucleus ^{270}Hs and spherical ones around the nucleus ^{298}114 [18]

(the DRIBs project) give very good perspectives for extension of the SHN research in Dubna and also for the continuation of a very fruitful cooperation between Poland and JINR in this field.

One should add that a very good and long-lasting cooperation of Polish theoretical physicists with JINR physicists on superheavy nuclei has certainly profited from a general Polish–JINR cooperation in the theory of nuclear structure. For example, the studies [34,35] have importantly contributed to our understanding of the role of pairing interactions in nuclei and to methods of description of them. The papers [2–4] were helpful in describing the single-particle structure of a nucleus with the use of the final-depth Woods–Saxon potential. The studies [36,37] have predicted new regions of deformed nuclei within approaches including pairing interactions. The papers [38,39] treated the pairing interaction in a nonconventional way, the works [40,41] considered the influence of temperature of a nucleus on its properties and the papers [42,43] studied the fission process. Due to the cooperation, many papers of Polish physicists in the discussed field have been published in various Russian journals (e.g., [17,20,34,35]) and of Russian physicists in the Polish journals (e.g., [2–4,39]). The latter tendency is continued, with an important contribution to it by international conferences and schools organized both in Dubna and in Poland, in which both JINR and Polish physicists participate.

References

1. *Sobiczewski A., Gareev F.A., Kalinkin B.N.* // Phys. Lett. 1966. V.22. P.500.
2. *Kalinkin B.N., Grabowski J., Gareev F.A.* // Acta Phys. Pol. 1966. V.30. P.999.
3. *Grabowski J., Kalinkin B.N.* // Nukleonika. 1967. V.14. P.571.
4. *Gareev F.A., Ivanova S.P., Kalinkin B.N.* // Acta Phys. Pol. 1967. V.32. P.461.
5. *Nilsson S.G. et al.* // Nucl. Phys. 1968. V.A115. P.545.
6. *Nilsson S.G. et al.* // Nucl. Phys. 1969. V.A131. P.1.
7. *Randrup J. et al.* // Phys. Scripta. 1974. V.10A. P.60.
8. *Randrup J. et al.* // Phys. Rev. C. 1976. V.13. P.229.
9. *Baran A. et al.* // Nucl. Phys. 1981. V.A361. P.83.
10. *Flerov G.N. et al.* // Nucl. Phys. 1968. V.A106. P.476.
11. *Flerov G.N., Ter-Akopian G.M.* // Rep. Prog. Phys. 1983. V.46. P.817.
12. *Ćwiok S. et al.* // Nucl. Phys. 1983. V.A410. P.254.
13. *Böning K. et al.* // Z. Phys. 1986. V.A325. P.479.
14. *Patyk Z. et al.* // Nucl. Phys. 1989. V.A502. P.591.
15. *Patyk Z., Sobiczewski A.* // Phys. Lett. 1991. V.B256. P.307.
16. *Patyk Z., Sobiczewski A.* // Nucl. Phys. 1991. V.A533. P.132.
17. *Sobiczewski A.* // Fiz. Elem. Chastits At. Yadra. 1994. V.25. P.295; Phys. Part. Nucl. 1994. V.25. P.119.
18. *Smolańczuk R., Sobiczewski A.* // Proc. XV EPS Conf. on Nuclear Physics: «Low Energy Nuclear Dynamics», St. Petersburg (Russia) 1995 / Eds. Yu.Ts.Oganessian, W. von Oertzen and R.Kalpakchieva . World Scientific: Singapore, 1995. P.313.
19. *Smolańczuk R., Skalski J., Sobiczewski A.* «Spontaneous-Fission Half-Lives of Deformed Superheavy Nuclei». // Phys. Rev. C. 1995. V.52. P.1871.
20. *Sobiczewski A.* // Usp. Fiz. Nauk. 1996. V.166. P.943; Physics – Uspekhi. 1996. V.39. P.885.
21. *Lazarev Yu.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V.73. P.624.
22. *Lazarev Yu.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V.75. P.1903.
23. *Lazarev Yu.A. et al.* // Phys. Rev. C. 1996. V.54. P.620.
24. *Oganessian Yu.Ts. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V.83. P.3154.
25. *Oganessian Yu.Ts. et al.* // Nature. 1999. V.400. P.242.
26. *Oganessian Yu.Ts. et al.* // Eur. Phys. J. 1999. V.A5. P.63.
27. *Oganessian Yu.Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2000. V.62. P.041604(R).
28. *Oganessian Yu.Ts.* // Yad. Fiz. 2000. V.63. P.1391.
29. *Oganessian Yu.Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2000. V.63. P.011301(R).
30. *Oganessian Yu.Ts.* // Proc. Intern. Conf. on Nucleus-Nucleus Interactions, Strasbourg (France) 2000, in press.
31. *Hofmann S. et al.* // Z. Phys. A. 1995. V.350. P.277.

32. *Hofmann S. et al.* // Z. Phys. A. 1996. V.354. P.229.
33. *Hofmann S. et al.* // Submitted to Eur. Phys. J. 2001.
34. *Pawlikowski A., Rybarska W.* // Zh. E. T. F. 1962. V.43. P.543.
35. *Volkov M.K. et al*. // Izv. A. N. SSSR, Ser.Fiz. 1963. V.27. P.878.
36. *Arseniev D.A., Sobiczewski A., Soloviev V.G.* // Nucl. Phys. 1969. V.A126. P.15.
37. *Arseniev D.A., Sobiczewski A., Soloviev V.G.* // Nucl. Phys. 1969. V.A139. P.269.
38. *Bochnacki Z., Holban I.M., Mikhailov I.N.* // Nucl. Phys. 1967. V.A97. P.33.
39. *Balbutsev E.B., Bochnacki Z.* // Acta Phys. Pol. 1972. V.B3. P.287.
40. *Ignatiuk A.V. et al.* // Phys. Lett. 1978. V.76B. P.543.
41. *Ignatiuk A.V. et al.* // Nucl. Phys. 1980. V.A346. P.191.
42. Ł*ojewski Z., Pashkevich V.V.,* Ć*wiok S.* // Nucl. Phys. 1985. V.A436. P.499.
43. Ć*wiok S.,* Ł*ojewski Z., Pashkevich V.V.* // Nucl. Phys. 1985. V.A444. P.1.

РЕЗЮМЕ КООРДИНАЦИОННОЙ КОМИССИИ ПО СОТРУДНИЧЕСТВУ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С НАУЧНЫМИ ЦЕНТРАМИ РЕСПУБЛИКИ ПОЛЬША

20 января 2001 г.

ОИЯИ, Дубна

I. В совещании принимали участие:

- Е.Неводничанский, глава Государственного агентства по атомной энергии Республики Польша,
- А.Хрынкевич, Полномочный Представитель правительства Республики Польша,
- В.Г.Кадышевский, директор ОИЯИ,
- члены Координационного совещания от Республики Польша,
- члены дирекции ОИЯИ, директора лабораторий, руководители крупнейших научных тем и проектов, ведущие сотрудники Объединенного института, в том числе польские сотрудники в ОИЯИ.

II. Координационное совещание утвердило повестку дня.

III. На совещании были заслушаны доклады Полномочного Представителя правительства Республики Польша акад. А.Хрынкевича, вице-директора ОИЯИ А.Н.Сисакяна, дирекций лабораторий, руководителей крупнейших научных тем и проектов, ведущих сотрудников лабораторий Института, а также сообщения членов Координационного совещания от Республики Польша.

Участники совещания были проинформированы:

1. О прошедшем накануне заседании круглого стола по сотрудничеству Польша–ОИЯИ в рамках 89-й сессии Ученого совета ОИЯИ, в резолюции которого, в частности, отмечено: «Со времени учреждения ОИЯИ Польша и польские члены Ученого совета играли важную роль в формировании научной политики ОИЯИ. Их идеи, предложения, критические замечания и позитивный вклад оцениваются очень высоко».

Ученый совет поблагодарил представителей польских научных центров, университетов и институтов за их участие в заседании круглого стола.

Ученый совет также позитивно отметил усилия дирекции ОИЯИ по развитию международного сотрудничества. Интенсивное и плодотворное сотрудничество с польскими научными центрами обсуждалось в дискуссии за круглым столом на 89-й сессии Ученого совета и было освещено на приуроченной к ней фотовыставке.

Ученый совет выразил пожелание, чтобы подобные дискуссии за круглым столом о научном и техническом сотрудничестве ОИЯИ с научными центрами стран-участниц планировались в повестке будущих сессий Ученого совета.

2. Об участии Польши в создании ОИЯИ; в докладе дирекции отмечен огромный вклад Польши — как одной из стран-учредительниц Объединенного института — в создание ОИЯИ, в организацию работы его руководящих органов.

3. О масштабах научно-технического сотрудничества; отмечено, что сегодня партнерами ОИЯИ являются более 20 научных центров и организаций Польши, в том числе 10 университетов.

4. О вкладе польских ученых в результаты исследований, обогативших мировую науку; было подчеркнуто, что работы польских сотрудников отмечены многими премиями Объединенного института.

5. О новых возможностях базовых установок ОИЯИ для выполнения исследований; отмечено, что проводимая в Институте реформа уже привела к конкретным результатам по увеличению числа часов работы базовых установок. Это касается ИБР-2, комплекса ускорителей Лаборатории ядерных реакций; выведенного пучка на нуклотроне. В результате возникают дополнительные возможности для совместных исследований с институтами Польши.

6. О подготовке научных кадров для Польши; за время существования Института по результатам совместных научных исследований польскими учеными защищено более 100 кандидатских и около 50 докторских диссертаций.

7. О совместных усилиях по привлечению научной молодежи к проведению исследований в ОИЯИ, в том числе за счет приглашения студентов для подготовки дипломных работ. Отмечен успешный опыт Учебно-научного центра ОИЯИ по работе со студентами из польских университетов в рамках программы «Боголюбов–Инфельд».

Общие данные о сотрудничестве ОИЯИ с польскими научными центрами приведены в докладах А.Хрынкевича и А.Н.Сисакяна.

IV. В результате проведенных обсуждений участники совещания пришли к следующим выводам:

Совещание подтверждает, что сотрудничество между ОИЯИ и польскими научными центрами, базирующееся на членстве Польши в Объединенном институте, является важным для проведения научных исследований, в особенности в тех направлениях, которые не могли быть реализованы в Польше без участия ОИЯИ.

Существование Объединенного института ядерных исследований на территории России дает польским ученым дополнительные возможности для использования научного потенциала России.

Через ОИЯИ могут быть реализованы важные связи с научными центрами всех государств — членов Объединенного института.

Сотрудничеству ОИЯИ и национальных центров Польши необходимо придать дополнительный импульс с целью участия дубненских специалистов в работах, проводимых в научных центрах Польши, шире и эффективнее использовать целевые совместные научные программы.

Участники совещания считают, что проводимые в ОИЯИ реформы обеспечат большие возможности для проведения исследований.

Участники совещания отмечают необходимость совершенствования форм и методов сотрудничества, в том числе совершенствования подходов по финансированию совместных проектов.

Научные интересы Польши в ОИЯИ, в первую очередь, основываются на плодотворных возможностях уникальных базовых установок Института, используемых для фундаментальных и прикладных исследований.

от Республики Польша		от ОИЯИ	
Е.Неводничанский		*В.Г.Кадышевский*	
А.Хрынкевич		*А.Н.Сисакян*	
В.Хмельовский		*В.М.Жабицкий*	

СПИСОК ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ПОЛЬСКИХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ, УНИВЕРСИТЕТОВ И ГОСУДАРСТВЕННЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ — УЧАСТНИКОВ ЗАСЕДАНИЯ КРУГЛОГО СТОЛА «ПОЛЬША В ОИЯИ»

Неводничанский Ежи	председатель Государственного агентства по атомной энергии (Варшава)
Анджеевский Юзеф	профессор Лодзинского университета
Будзановский Анджей	профессор Института ядерной физики им. Г.Неводничанского (Краков)
Возняк Ян	профессор Горно-металлургической академии (Краков)
Дурачинский Эугенюш	постоянный представитель Польской академии наук в России
Ковнацкий Ян	профессор Лаборатории тяжелых ионов Варшавского университета
Малиновский Хенрик	старший научный сотрудник Института электротехники (Люблин)
Михалик Кшиштоф	старший специалист Института атомной энергии (Сверк)
Мончка Дарюш	профессор Университета им. М.Склодовской-Кюри (Люблин)
Навроцик Войцех	профессор Университета им. А.Мицкевича (Познань)
Рохозинский Станислав	директор Института теоретической физики Варшавского университета
Сандецкий Влодзимеж	советник по науке и культуре посольства Республики Польша в Москве
Собичевский Адам	профессор Института ядерных проблем им. А.Солтана (Варшава)
Собчик Люцян	профессор Вроцлавского университета
Сосновский Рышард	профессор Института ядерных проблем им. А.Солтана (Варшава)

Суминска Эльжбета	сотрудник Государственного агентства по атомной энергии (Варшава)
Тачановский Стефан	профессор Горно-металлургической академии (Краков)
Хващевский Стефан	вице-директор Института атомной энергии (Сверк)
Хойнацкий Славомир	профессор Лаборатории тяжелых ионов Варшавского университета
Хрынкевич Анджей	профессор Института ядерной физики им. Г.Неводничанского (Краков)
Яник Ежи	профессор Института ядерной физики им. Г.Неводничанского (Краков)
Янчишин Ежи	профессор Горно-металлургической академии (Краков)

СОДЕРЖАНИЕ

V.G.Kadyshevsky
Opening Address 3

А.Хрынкевич
Польша в Объединенном институте
ядерных исследований 5

J.Niewodniczanski
Speech of Welcome 9

A.Budzanowski
The Medical Cyclotron AIC-144
at the Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics 11

J.A.Janik
Three-Parties Cooperation: INP (Cracow), IFE (Kjeller, Norway)
and JINR (Dubna), on Neutron Scattering in Molecular Materials 16

S.Taczanowski
Theoretical and Experimental Studies on Accelerator-Driven Systems
for Transmutation of Nuclear Waste
(Cooperation JINR, Dubna–UMM, Cracow) 19

J.Janczyszyn, W.Pohorecki, S.Taczanowski, V.Shvetsov,
G.Gerbish, G.Domanska
Experimental Validation of Calculations of Radionuclide Production
in the Vicinity of a Spallation Neutron Source 25

J.Kownacki
Technical and Research Activity Aspects of HIL Collaboration
with the Joint Institute for Nuclear Research 36

W.Nawrocik
The Bogoliubov–Infeld Programme 39

Ю.Анджеевский
Лодзинский университет – ОИЯИ: сотрудничество физиков 42

L.Sobczyk
Perspectives of Cooperation Between the Joint Institute for Nuclear Research
and the Faculty of Chemistry, University of Wroclaw 44

J.Wozniak
Strong Interactions Between Light Nuclei at Low Energies
(Collaboration: JINR, Dubna – FPNT, Cracow). 48

D.Mączka
35 Years of the JINR–Lublin University Collaboration 55

А.Н.Сисакян
Польша–ОИЯИ: вехи сотрудничества. 59

А.Д.Коваленко
Нуклотрон: состояние дел и ближайшие перспективы 62

И.А.Шелаев, А.М.Балдин, А.И.Малахов, Э.-Й.Лангрок
Ускоритель и реактор 68

Ю.Лукстиньш
Новые предложения для исследования гиперядер на нуклотроне 86

Г.Малиновский
Создание и исследование высокоэкономичных установок
с сильными магнитными полями для ядерной физики и экологии 89

В.А.Карнаухов
Горячие ядра и фазовый переход жидкость–газ в ядерном веществе 92

В.М.Быстрицкий
Исследование взаимодействий между легкими ядрами
в области ультранизких энергий (эВ–кэВ)
с использованием лайнерной плазмы
(Проект «LESI»). 100

В.Г.Сандуковский
Многокристальные полупроводниковые спектрометры
для задач физики низких и промежуточных энергий 109

В.В.Воронов, В.И.Журавлев
Программа «Боголюбов–Инфельд»
(Программа сотрудничества с научными центрами Польши
в области теоретической физики) 112

В.И.Фурман
Проект нового нейтронного источника ОИЯИ для исследований
по фундаментальной и прикладной ядерной физике
и перспективы сотрудничества с польскими научными центрами 116

В.Н.Швецов
Обзор текущего состояния проекта SAD. 122

М.В.Фронтасьева
Аналитические исследования на реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ 128

А.В.Белушкин
Нейтронные исследования конденсированных сред 140

Ю.Ц.Оганесян
DRIBs. Перспективы сотрудничества 144

R.Wolski, G.M.Ter-Akopian, A.Budzanowski
Proposals for Experiments at DRIBs Facility at FLNR 146

М.Г.Иткис
Сотрудничество ЛЯР с научными центрами Польши
в области физики тяжелых ионов 150

J.Krzywinski, M.V.Yurkov
Report on the Project of the Regenerative FEL Amplifier
at the DESY TESLA Test Facility 158

A.Polanski
Cooperation with Polish Institutes in the Field of Computational Physics 165

В.В.Кореньков
Интеграция информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ
и научно-образовательных центров Польши 175

С.И.Иванова
Образовательная часть программы «Боголюбов–Инфельд»:
состояние дел и перспективы 179

A.Sobiczewski
Superheavy Nuclei: Poland–JINR Cooperation 185

Резюме Координационной комиссии по сотрудничеству
Объединенного института ядерных исследований
с научными центрами Республики Польша 189

Список представителей польских научных центров,
университетов и государственных учреждений — участников
заседания круглого стола «Польша в ОИЯИ» 192

СОТРУДНИЧЕСТВО ОИЯИ С ИНСТИТУТАМИ И УНИВЕРСИТЕТАМИ ПОЛЬШИ

Материалы круглого стола и Координационного совещания «Польша в ОИЯИ» 18 и 20 января 2001 г.

Под общей редакцией *В.Г.Кадышевского, А.Н.Сисакяна*, *А.Хрынкевича*

Составители *В.М.Жабицкий, Т.Я.Жабицкая, Н.И.Сисакян, Б.М.Старченко*, *В.Хмельовский*

Редакторы *Е.В.Калинникова, Е.К.Аксенова, Э.В.Ивашкевич*
Обложка *Ю.Г.Мешенкова*

В сборнике использованы фотографии *Ю.А.Туманова, П.Е.Колесова,* а также снимки из фотоархива ОИЯИ.

ЛР № 020579 от 23.06.97
Получено 29.05.2001. Подписано в печать 01.06.2001.
Формат 70 × 100/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная
Усл. печ. л. 19,5. Уч.-изд. л. 22,5. Тираж 300 экз. Заказ № 52640

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, 6