



РАЗВИТИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПУЧКАХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР В ОИЯИ

А.И.Малахов

Рабочее совещание «Перспективы метода ядерной эмульсии»
10-11 июня 2013 г., Дубна.

Basic Research

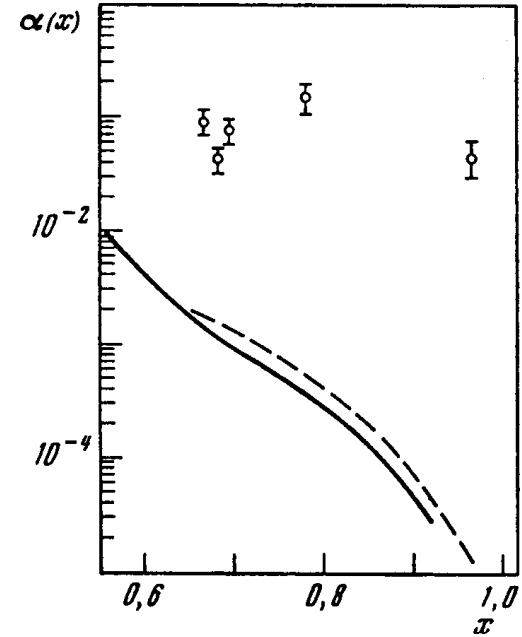
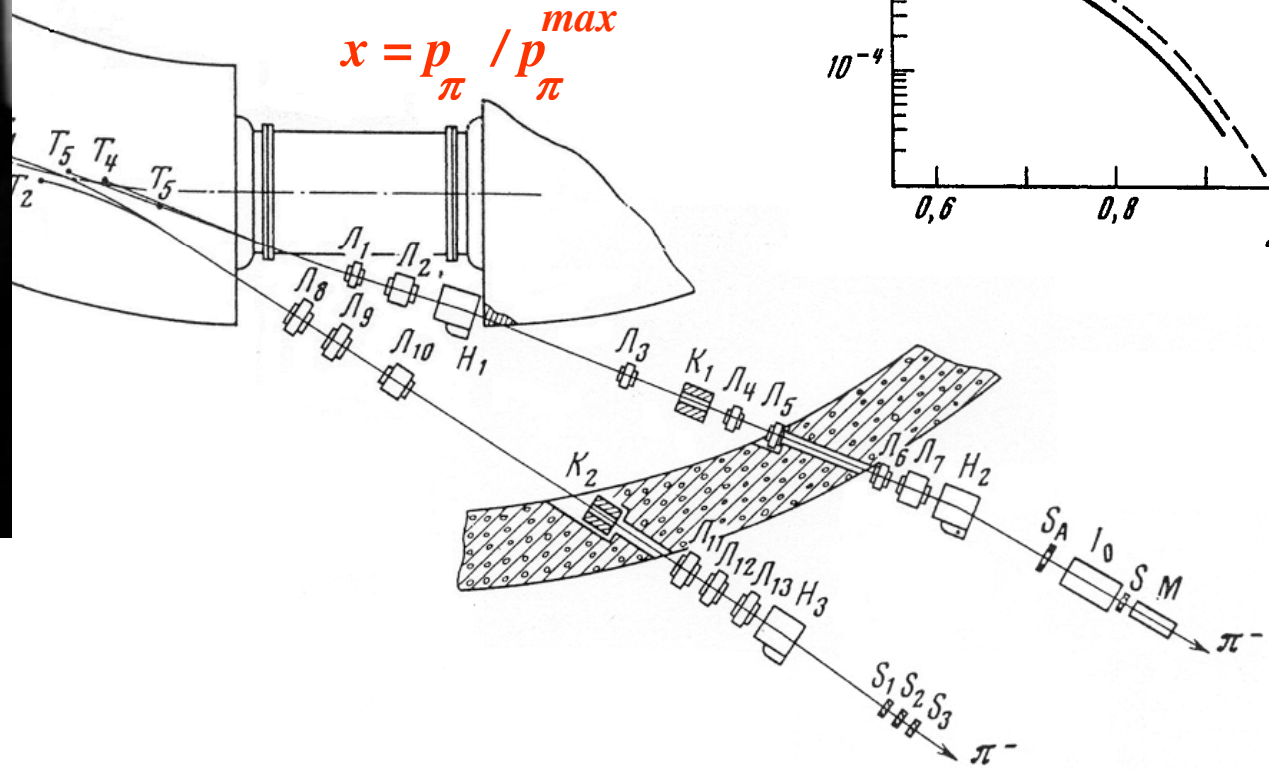
Relativistic Nuclear Physics





$$\alpha(x) = \frac{d\sigma(d + Cu \rightarrow \pi^- + \dots)}{d\sigma(p + Cu \rightarrow \pi^- + \dots)}$$

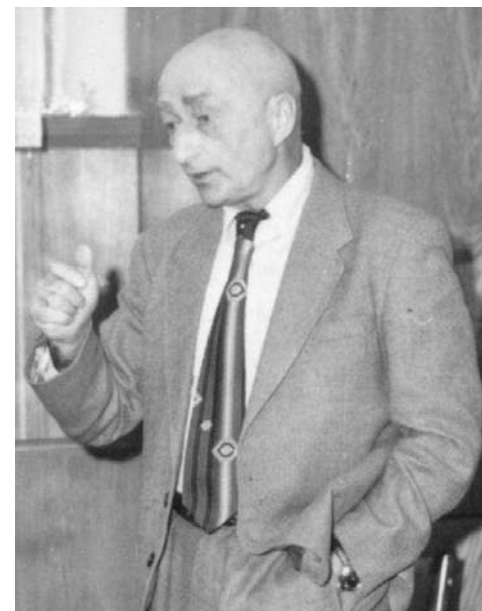
$$x = p_{\pi} / p_{\pi}^{\max}$$



Main results at the Synchrophasotron

Observation full destruction of nuclei

The new effect of full destruction of nuclei of Ar and Br in nuclear emulsion irradiated by protons and light nuclei in energy region of from several GeV up to several hundreds GeV was observed under guidance of **K.D.Tolstov** in 1970-1980.



Main results at the Synchrotron

Observation full destruction of nuclei

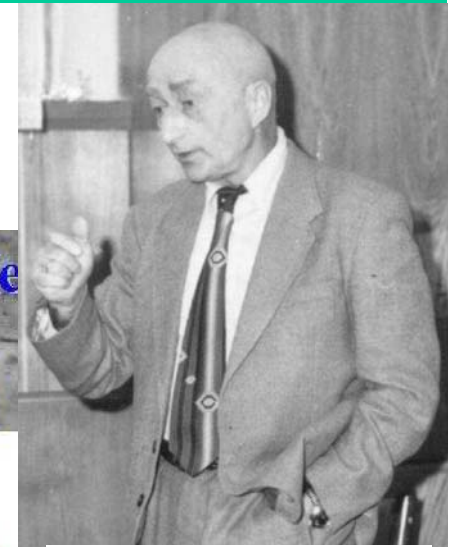
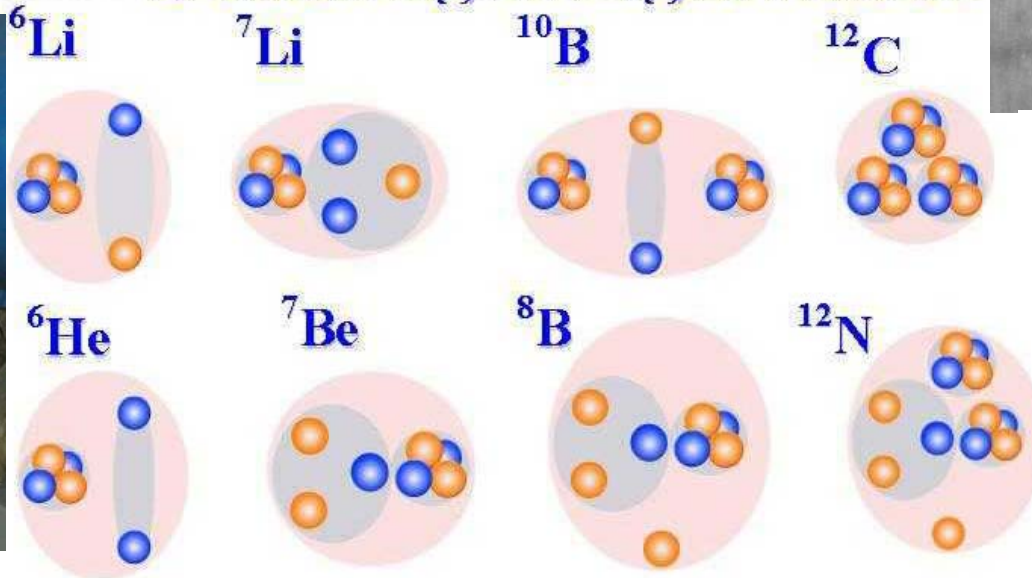
Projectile	Momentum, A·Gev	Target	Probability of full destruction, %
P	10 - 400	Ag, Br	$3 \pm 0,3$
P	70	Pb	$6 \pm 1,5$
^4He	4,5	Pb	10 ± 2
^4He	4,5	Ag, Br	7 ± 1
^{12}C	4,5	Ag, Br	18 ± 2
^{22}Ne	4,5	Ag, Br	20 ± 2
^{28}Si	4,5	Ag, Br	26 ± 4

BECQUEREL

Dr. P. Zarubin



Clustering in Light Nuclei



Prof. K. Tolstov

BECQUEREL





С Днем рождения!



Денис Артеменков



Надежда Корнегруца



Татьяна Щедрина



Ралица Станоева



Дмитрий Кривенков

ковым проведено исследование фрагментации изотопа бериллия-9 как системы из двух альфа-частиц и нейтрона. Благодаря простоте изучаемой системы получены результаты, замечательные по достигнутой ясности и статистической обеспеченности. Сделан вывод о доминирующем вкладе в спектры фрагментации распадов нестабильного ядра бериллия-8 из основного и первого возбужденного состояния. Это ядро рассматривается как альфа-конденсатное ядро и как возможный «кирпичик» более сложных и протяженных систем. В этом отношении полученный для ядра бериллия-9 результат служит физическим и методическим обоснованием предстоящего поиска альфа-частичного Бозе-конденсата в релятивистской диссоциации все более сложных ядер.

Можно сказать: тот, кто видит бериллий-8, – видит «все» в физике ядерных кластеров. В настоящее время под руководством Дениса выполняет магистерскую работу студентка Томского политехнического университета **Надежда Корнегруца**. В продолжение накопления данных по бериллию-9 ей поручен анализ гораздо более редких событий диссоциации на ядрах водорода из состава эмульсии.

Татьяной Щедриной были получены сведения о кластерных особенностях ядра азота-14 во всем многообразии каналов фрагментации. Было выявлено лидирование яркого четырехтельного канала диссоциации ($3\text{He} + \text{H}$) и исследована роль дейтронов как кластеров. Впервые для этого ядра идентифицированы редкие процессы диссоциации, для которых характерны глубокая перегруппировка альфа-частичной структуры и преодоление высоких энергетических порогов. Стоит отметить прикладное значение выполненного исследования. При бомбардировке протонами галактического происхождения ядер азота в земной атмосфере могла происходить наработка дейтерия и изотопов лития, бериллия и бора с последующим накоплением их на земной поверхности. Дальнейшие исследования фрагментации азота-14 в специализированном эксперименте могут привести к выводам о соотношении и накоплении этих редких изотопов в земной коре за время существования атмосферы.

Использование ядерной эмульсии для изучения релятивистской фрагментации радиоактивных ядер с протонным избытком имеет осо-

бые преимущества из-за возрастающей полноты наблюдения фрагментов. Одно из таких ядер – бор-8 играет ключевую роль в ядерной астрофизике. Оно и стало объектом детального исследования, проведенного **Ралицей Станоевой**. К началу этой работы она уже защитила в ОИЯИ магистерскую работу по нашему проекту. На этот раз предстояло выполнить сложный анализ облучения во вторичном пучке (или «пучковом коктейле»), что потребовало от Ралицы нового уровня понимания проблемы, тщательности и глубины анализа.

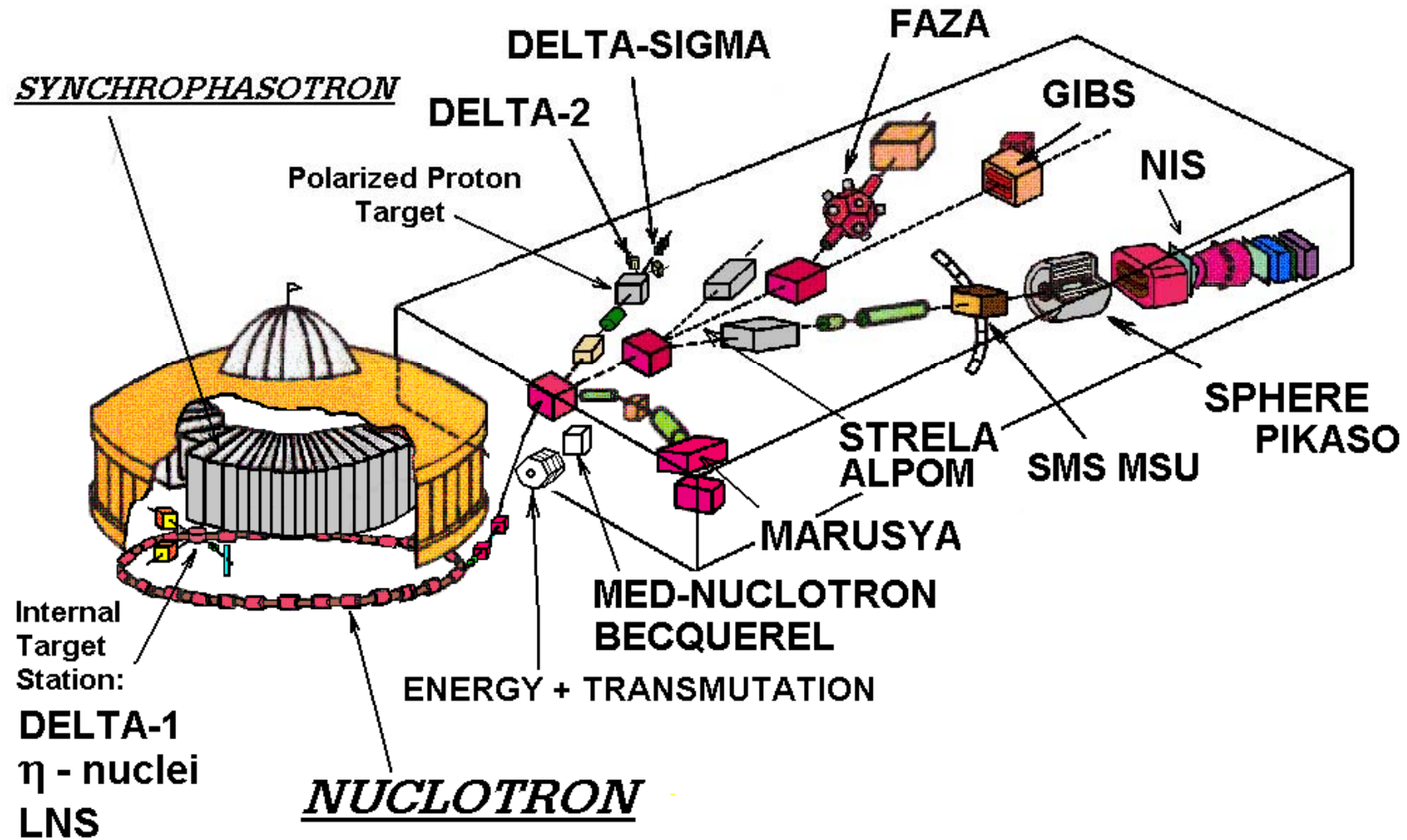
Ядро бора-8 – наиболее чувствительный пробник для электромагнитных взаимодействий с тяжелыми ядрами благодаря рекордно малой энергии связи протона. В этом случае процесс кулоновской диссоциации становится особенно простым и в то же время ценным механизмом реакции, так как воздействие поля ядра-мишени известно достаточно точно. В очень сильных полях тяжелых ядер могут происходить такие яркие и интересные эффекты, как полные развалы ускоренного ядра бора-8 на ядра водорода и гелия. Для ядер из состава эмульсии – серебра и брома – предстояло выявить события именно электромагнитной природы.

Прежде всего, найдены необходимые доказательства того, что облучение было выполнено в пучке с доминированием именно изотопа бора-8. Главный аргумент – лидирование событий диссоциации по каналу бериллий-7 + протон среди наиболее периферических соударений, ставшее «автографом» именно ядра бора-8. Эта группа событий позволила выявить характерные особенности процесса электромагнитной диссоциации. Ценным заданием на перспективу стало описание множественных каналов диссоциации бора-8.

Во всех трех работах облученная эмульсия была проанализирована с исчерпывающей полнотой. Ответственное отношение к уникальному материалу заслуживает особой похвалы. Сделаны ясные выводы о диссоциации ядер, практически недостижимые в других методах. Материалы диссертаций содержат детальные сведения, которые могут быть весьма полезны для обоснования последующих экспериментов на основе электронных методов регистрации. Возможно, что в них будут достигнуты новые уровни статистики, однако полнота

(Окончание на 10-й стр.)

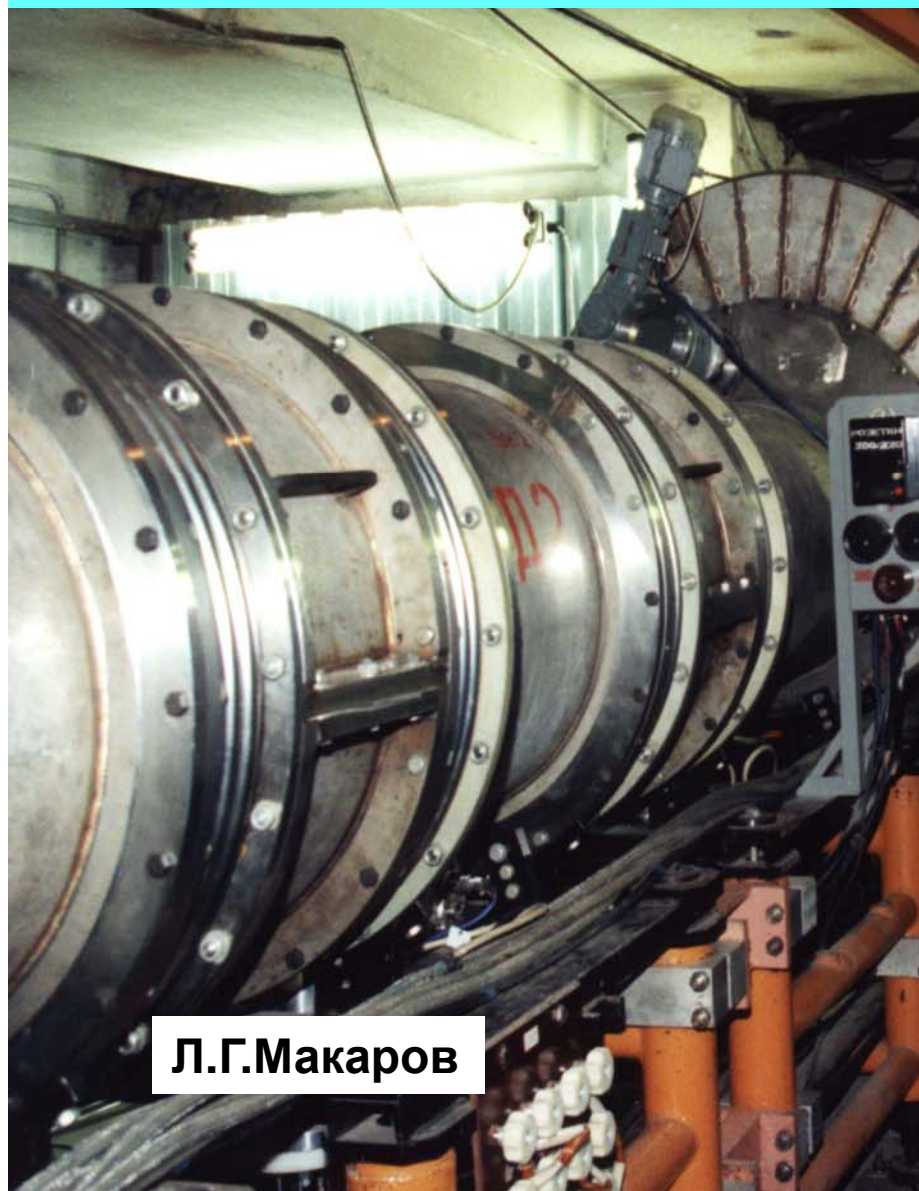
LHE Accelerator Complex



NUCLOTRON



NUCLOTRON



Л.Г.Макаров



Beam Slow Extraction System

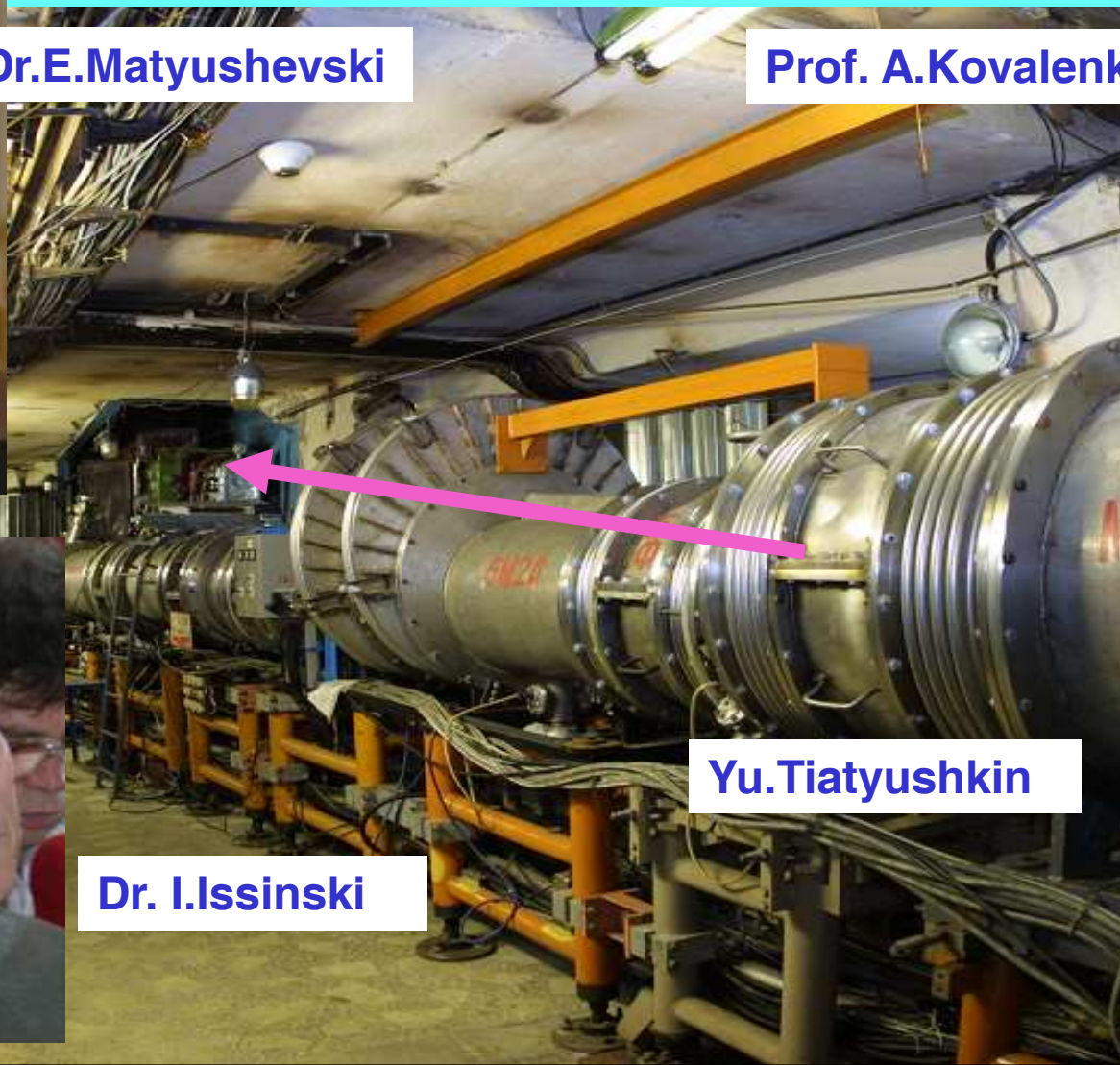
Dr.E.Matyushevski

Prof. A.Kovalenko



Dr. I.Issinski

Yu.Tiatyushkin



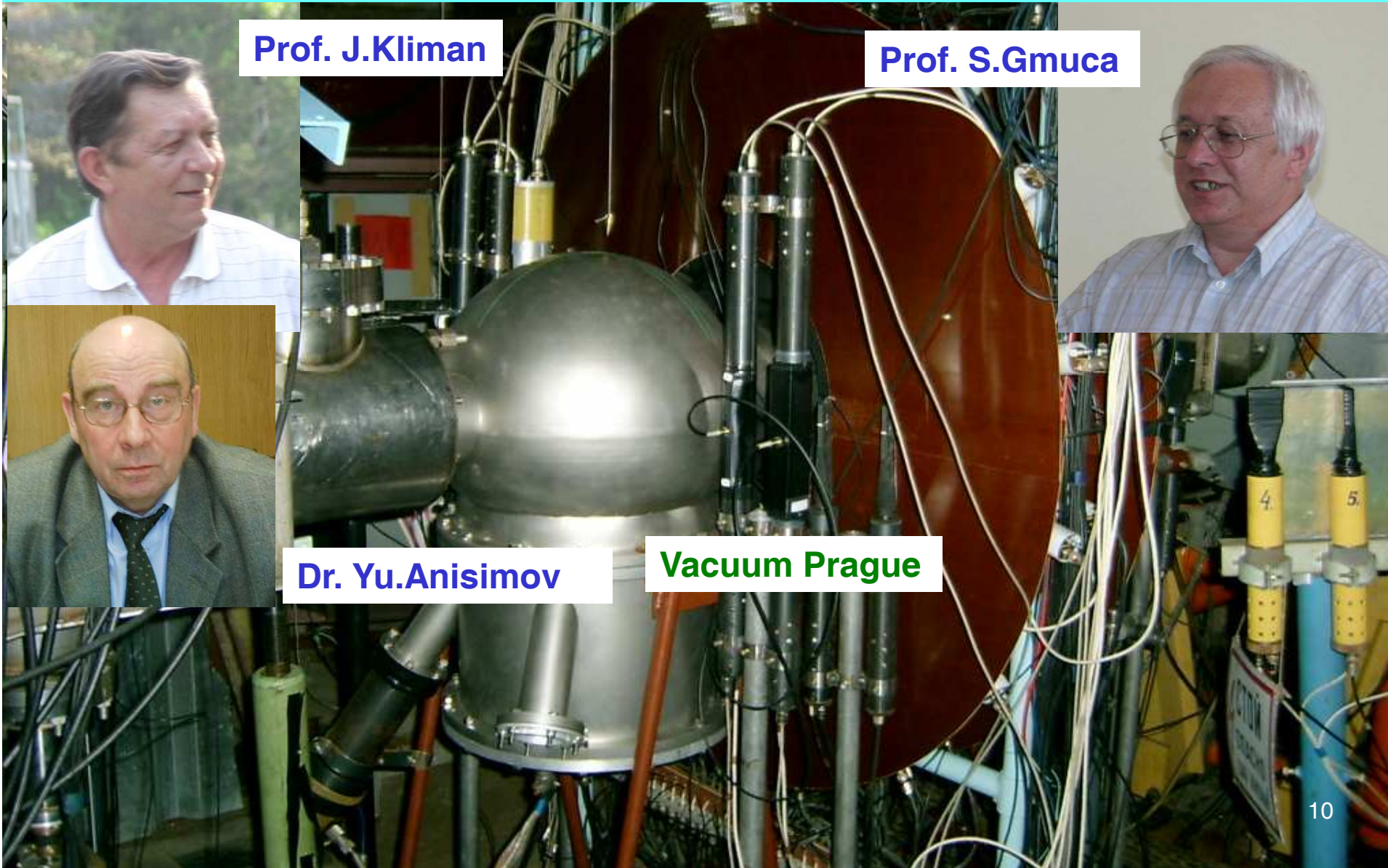
Internal Target Station

Prof. J.Kliman

Prof. S.Gmuca

Dr. Yu.Anisimov

Vacuum Prague



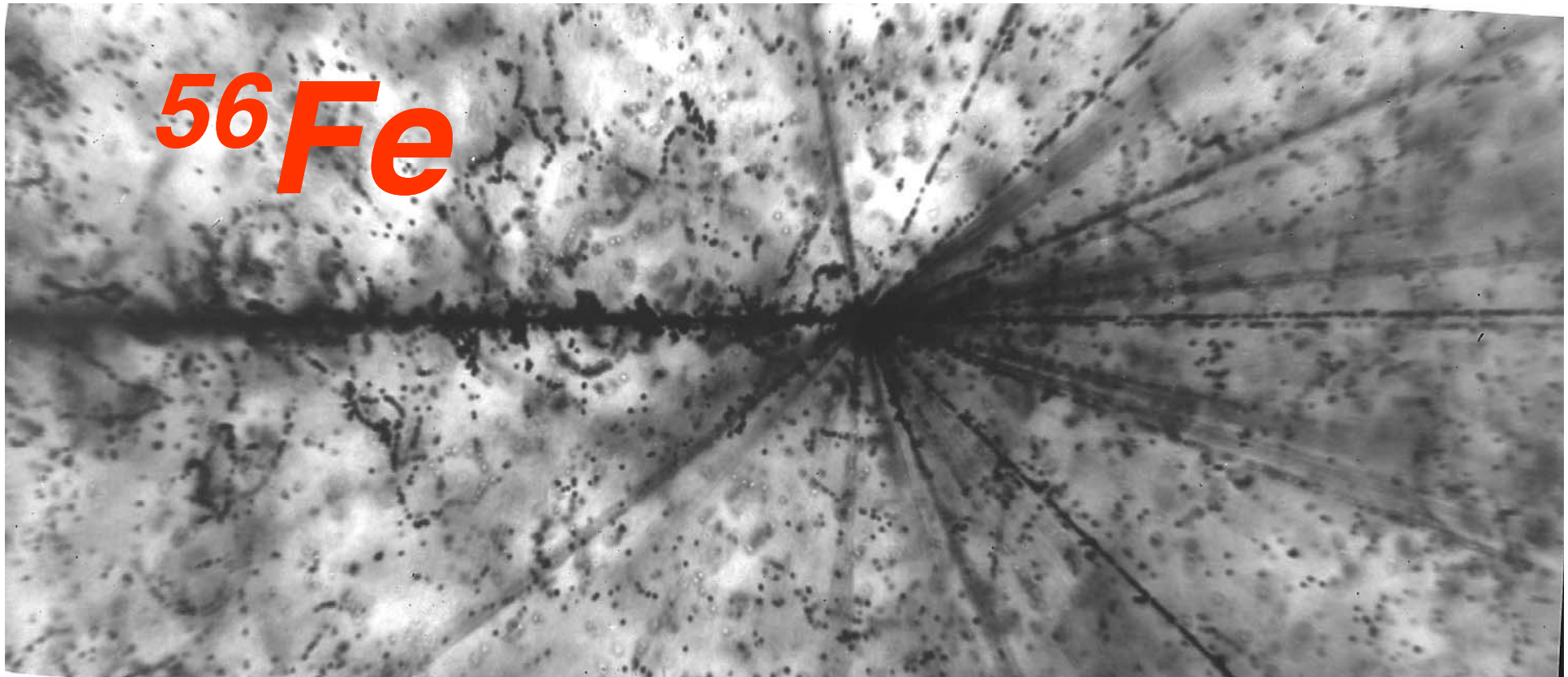
Heavy Ion Source KRION



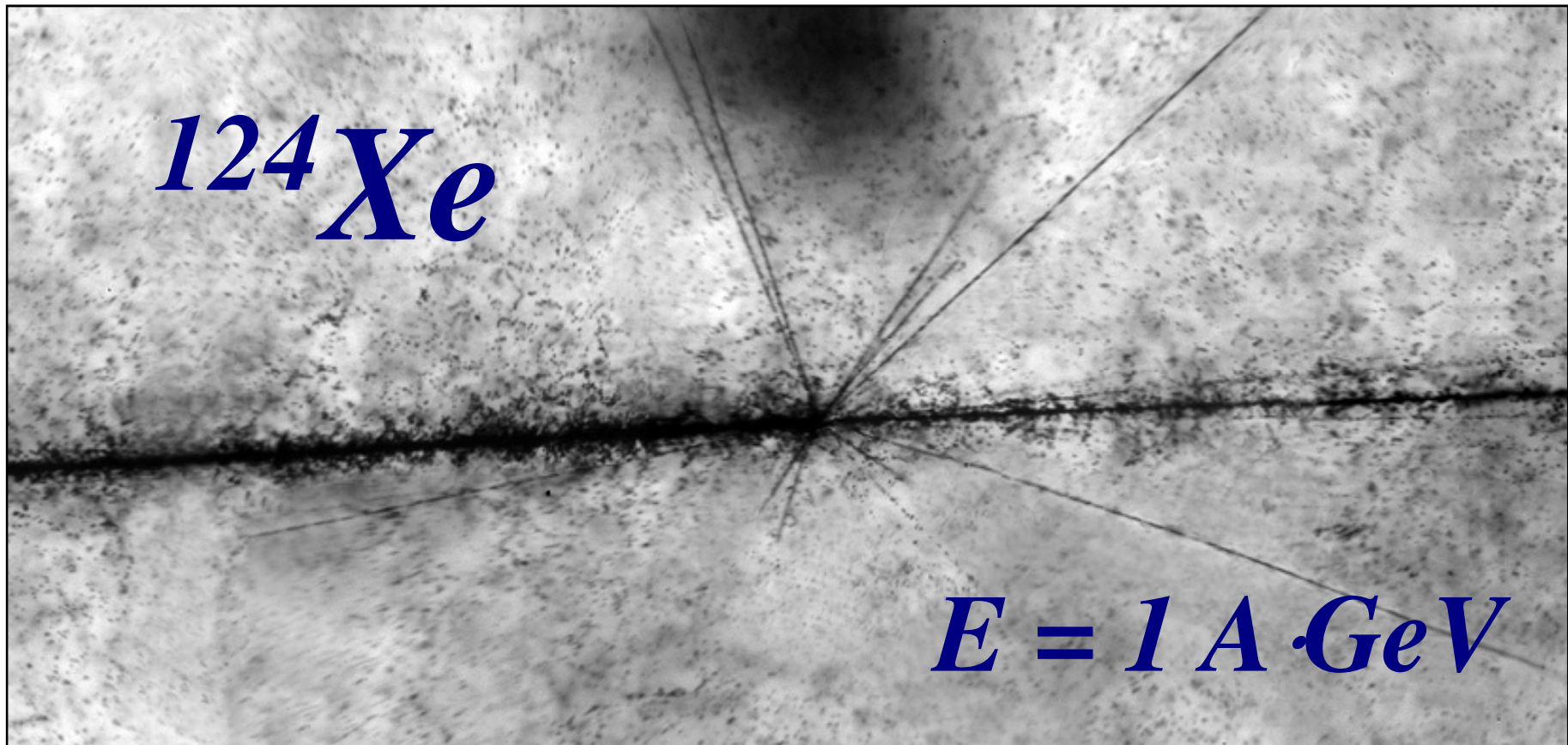
NUCLOTRON BEAM INTENSITIES (particles per cycle)

BEAM	INTENSITY	BEAM	INTENSITY
p	$5 \cdot 10^{10}$	^{16}O	$7 \cdot 10^8$
d	$5 \cdot 10^{10}$	^{24}Mg	$1 \cdot 10^8$
^4He	$3 \cdot 10^9$	^{40}Ar	$3 \cdot 10^7$
^7Li	$1 \cdot 10^9$	^{56}Fe	$1.2 \cdot 10^6$
^{10}B	$2 \cdot 10^8$	^{84}Kr	$1 \cdot 10^3$
^{12}C	$2 \cdot 10^9$	^{124}Xe	$1 \cdot 10^3$
^{14}N	$1 \cdot 10^7$	d↑	$3 \cdot 10^8$

Interaction of ^{56}Fe ion with $E_{kin} = 1 \text{ A}\cdot\text{GeV}$ from
Nuclotron with an emulsion nucleus



Nuclotron



NUCLOTRON Users



Bulgaria: Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy of BAS, University of Chemical Technology and Metallurgy (UCTM) (Sofia) ...

Belarus: The Institute of Radiative Physical-Chemical Problems of NASB, The Academy of Scientific and Engineering Complex 'SOSNY', (Minsk) ...

Czech Republic: Nuclear Physics Institute (Řež), Charles University, Czech Technical University (Prague) ...

Greece: Aristotle University of Thessaloniki (Thessaloniki)

Italy: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Sezione di Firenze (Florence) ...

Germany: Technische Hochschule Darmstadt – Institut für Kernphysik (Darmstadt), Universität (Siegen, Karlsruhe), Philipps-Universität Marburg (Marburg), Forschungszentrum Jülich GmbH (Jülich) ...

Mongolia: Institute of Physics and Technology of MAS, National University of Mongolia (Ulaanbaatar)

Slovak Republic: Institute of Experimental Physics, P.J. Šafárik University (Košice), Institute of Physics SAS, Comenius University (Bratislava) ...

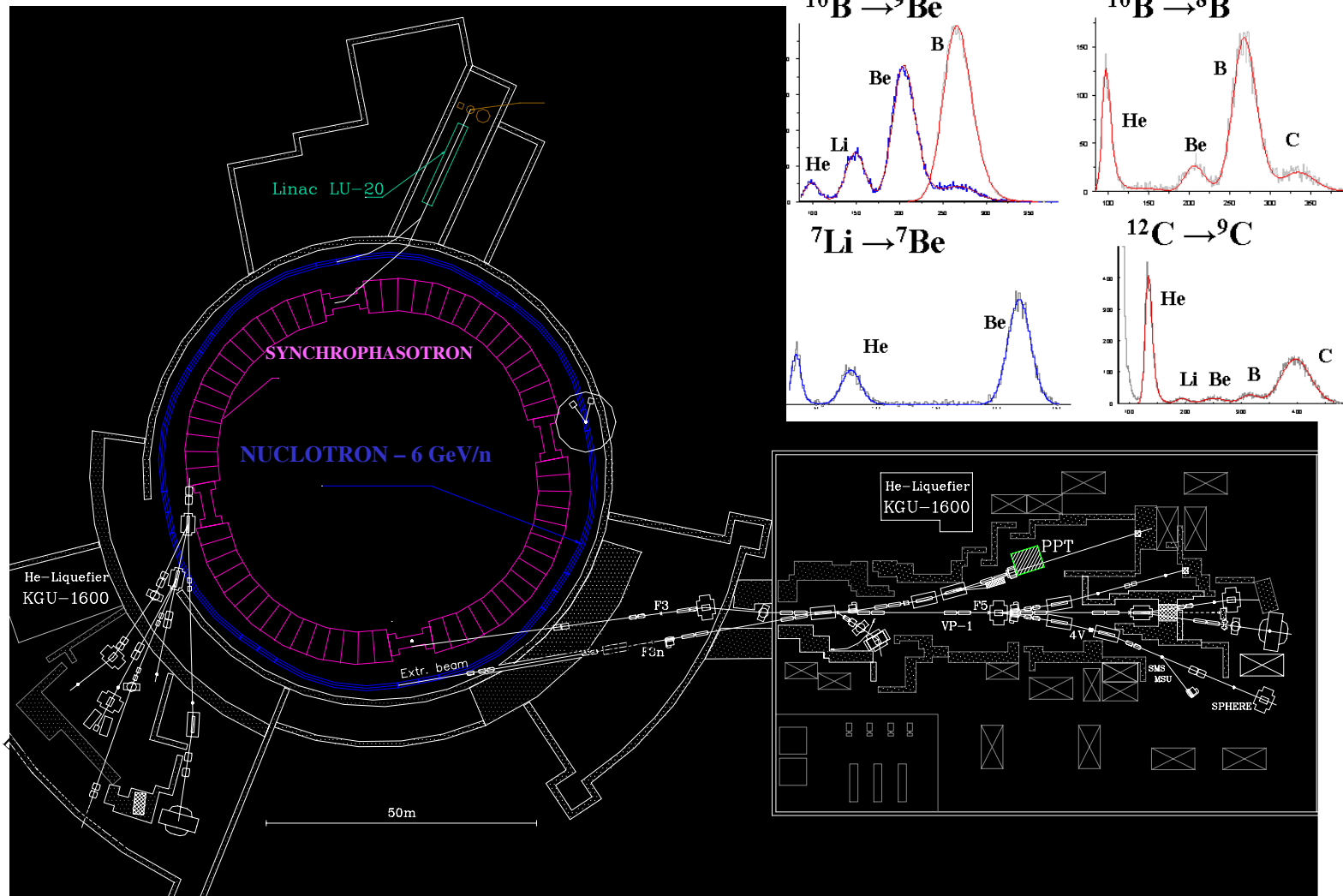
Poland: Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics (Cracow), The Andrzej Soltan Institute for Nuclear Studies (Otwock, Warsaw) ...

Russia: Institute for Nuclear Research of RAS (Troitsk), Lebedev Physical Institute of RAS (FIAN), Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics at the Moscow State University, Russian Nuclear Research Institute of Experimental Physics (Sarov), Institute of Atomic Energy (Obninsk) ...

And the Scientific Centers in Armenia, Georgia, Egypt, Kazakhstan, Romania, USA, Uzbekistan, Ukraine, France, Japan

Australia: The University of Sidney

At the JINR Nuclotron in 2002, the newly formed BECQUEREL collaboration launched a program of irradiation of the nuclear track emulsion (NTE) stacks in the beams of relativistic isotopes of beryllium, boron, carbon and nitrogen, including radioactive ones.



BECQUEREL

Coinciding with the name of the famous scientist, the project acronym indicates its key tasks - **BE**ryllium (Boron) **C**lustering **QUE**st in **Rel**ativistic Multifragmentation

Our study is aimed at exploring the coherent dissociation of neutron deficient nuclei, adjacent to the beginning of the table of isotopes, since the NTE technique offers special advantages for this.

The following issues were raised:

1. How does relativistic dissociation reflect the α -cluster structure of light nuclei?
2. How does ${}^2,{}^3\text{H}$ and ${}^3\text{He}$ clustering manifest itself in relativistic dissociation?
3. Is the population of cluster ensembles requiring nucleon rearrangement beyond α -clustering is possible in relativistic dissociation?
4. What is the proportion of nuclear diffractive and electromagnetic mechanisms of dissociation on heavy nuclei of NTE composition?

Within the **BECQUEREL** project the peripheral interactions were analyzed in NTE exposed to the following set of nuclei: **^6He** [1], **^{10}B** [2], **^7Be** [3], **^{14}N** [4], **^9Be** [5, 6], **^{11}B** [7], **^8B** [8], **^9C** [9], **^{10}C** , and **^{12}N** [10-12].

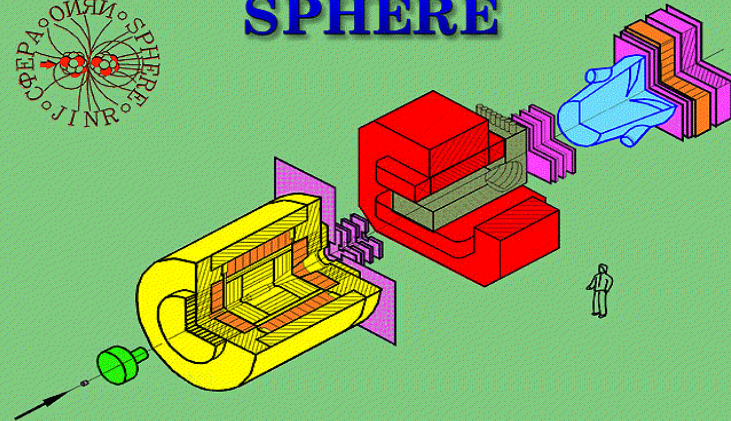
- [1] M. I. Adamovich et al., Phys. Atom. Nucl. 62, 1378 (1999)
- [2] M. I. Adamovich et al., Phys. Atom. Nucl. 67, 514 (2004)
- [3] N. G. Peresadko et al., Phys. Atom. Nucl. 70, 1266 (2007)
- [4] T. V. Shchedrina et al., Phys. Atom. Nucl. 70, 1230 (2007)
- [5] D. A. Artemenkov et al., Phys. Atom. Nucl. 70, 1226 (2007)
- [6] D. A. Artemenkov et al., Few Body Syst. 44, 273 (2008)
- [7] M. Karabova et al., Phys. Atom. Nucl. 72, 300(2009)
- [8] R. Stanoeva et al., Phys. Atom. Nucl. 72, 690 (2009)
- [9] D. O. Krivenkov et al., Phys. Atom. Nucl. 73, 2103 (2010)
- [10] D. A. Artemenkov et al., Few Body Syst. 50, 259 (2011)
- [11] D. A. Artemenkov et al., Int. J. Mod. Phys. E 20, 993 (2011)
- [12] R. R. Kattabekov, et al., Phys. Atom. Nucl. 73, 2110 (2010)

Nucleus	New results	Momentum A·GeV/c
^8B	$^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + \text{p}$ (50%)	2.0
^{10}B	Channel $^{10}\text{B} \rightarrow 2\alpha + \text{p/d}$ (~75%), enhanced d yield is observed	1.8
^{11}B	Channel $^{11}\text{B} \rightarrow 2\alpha + \text{p}$ (~75%)	2.75
^7Be	$^7\text{Be} \rightarrow \alpha + ^3\text{He}$ (50%)	2.0
^9Be	$^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ (80% superposition of the 0^+ и 2^+ states)	2.0
^9C	$^9\text{C} \rightarrow 3^3\text{He}$ (14%), 2^3He possibility for the existence of a resonant state (“dihelion”)	2.0
^{10}C	$^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2\text{p}$ (80%), including ^9B (30%)	2.0
^{12}N	no obviously leading channels	2.0

**PIKASO, LNS, pHe3,
BECQUEREL, DELTA,
GIBS, ETA-NUCLEI,
FAZA, NA49, PHENIX**

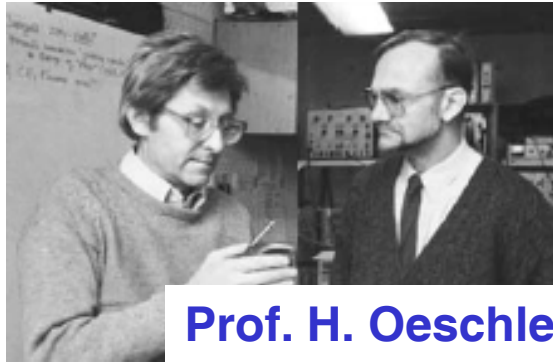


SPHERE



FAZA

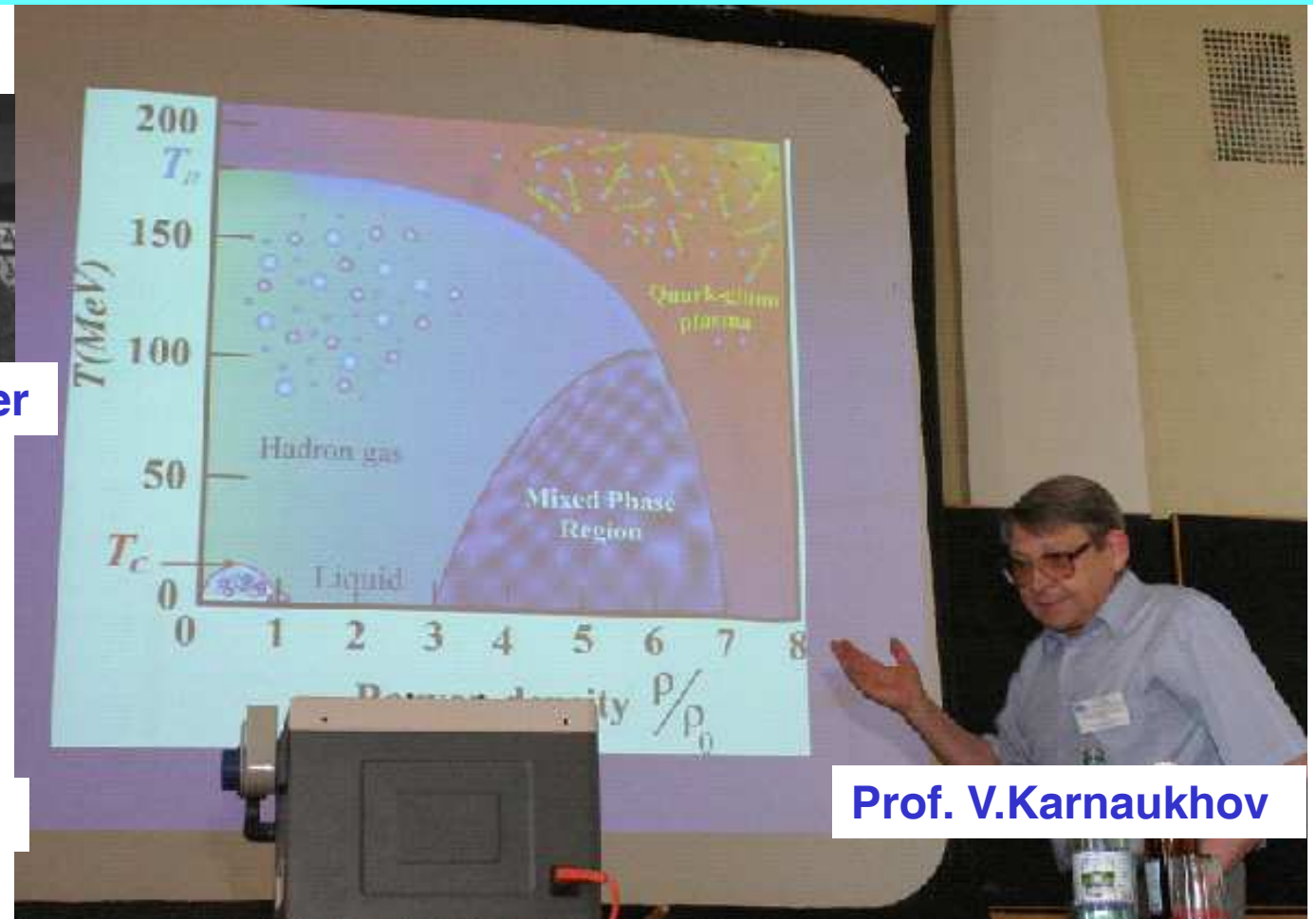
Prof. W. Karcz



Prof. H. Oeschler

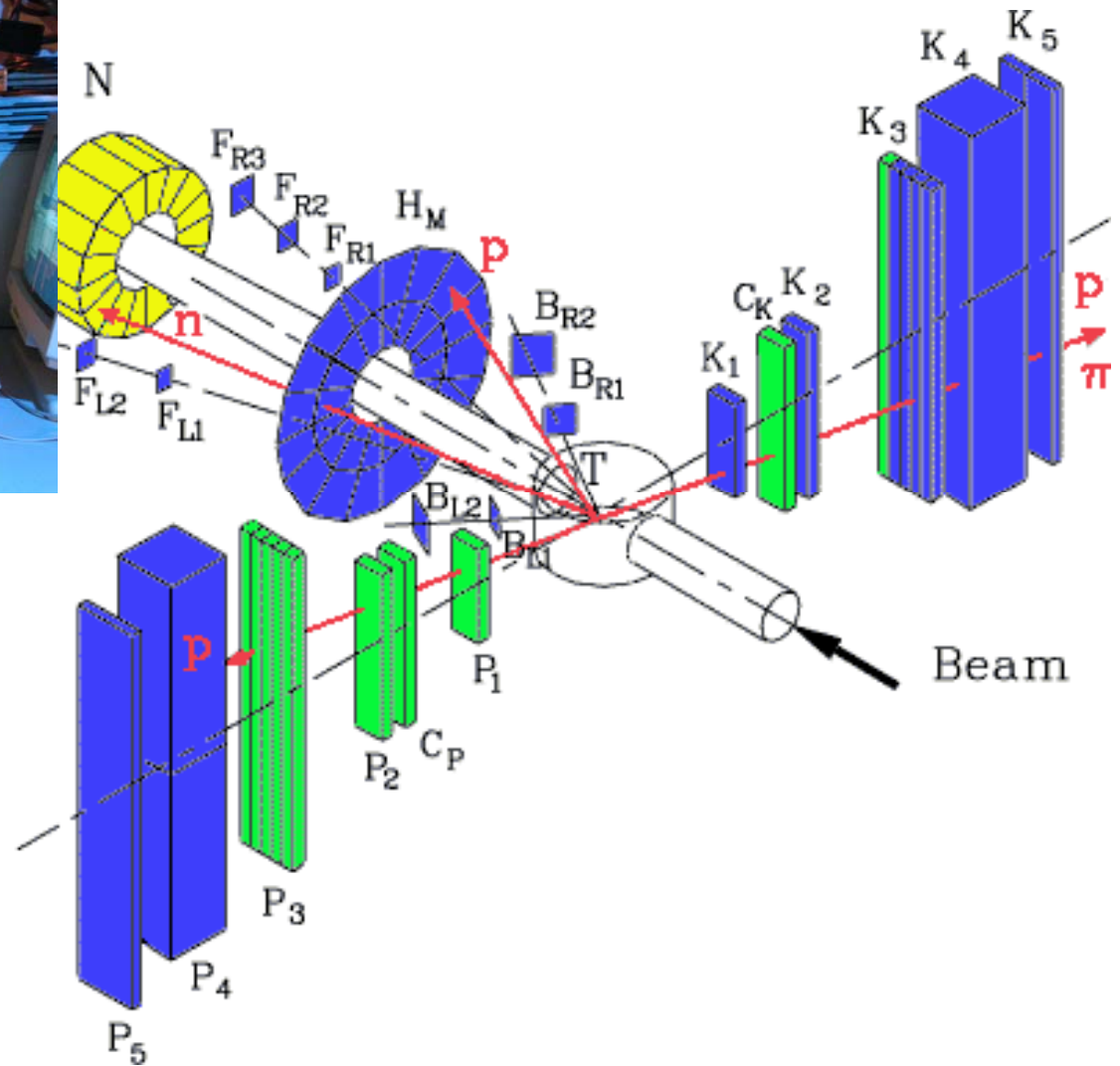


Prof. A. Budzanowski

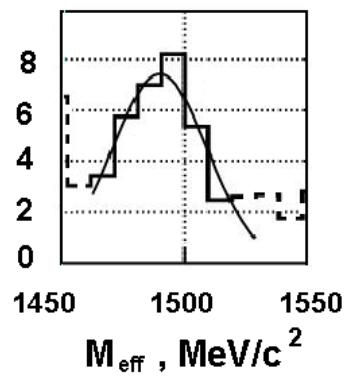


Prof. V. Karnaukhov

ETA-NUCLEI



$E_{\text{kin}} = 1.5 \text{ A} \cdot \text{GeV}$ $\theta = 180^\circ$



DELTA

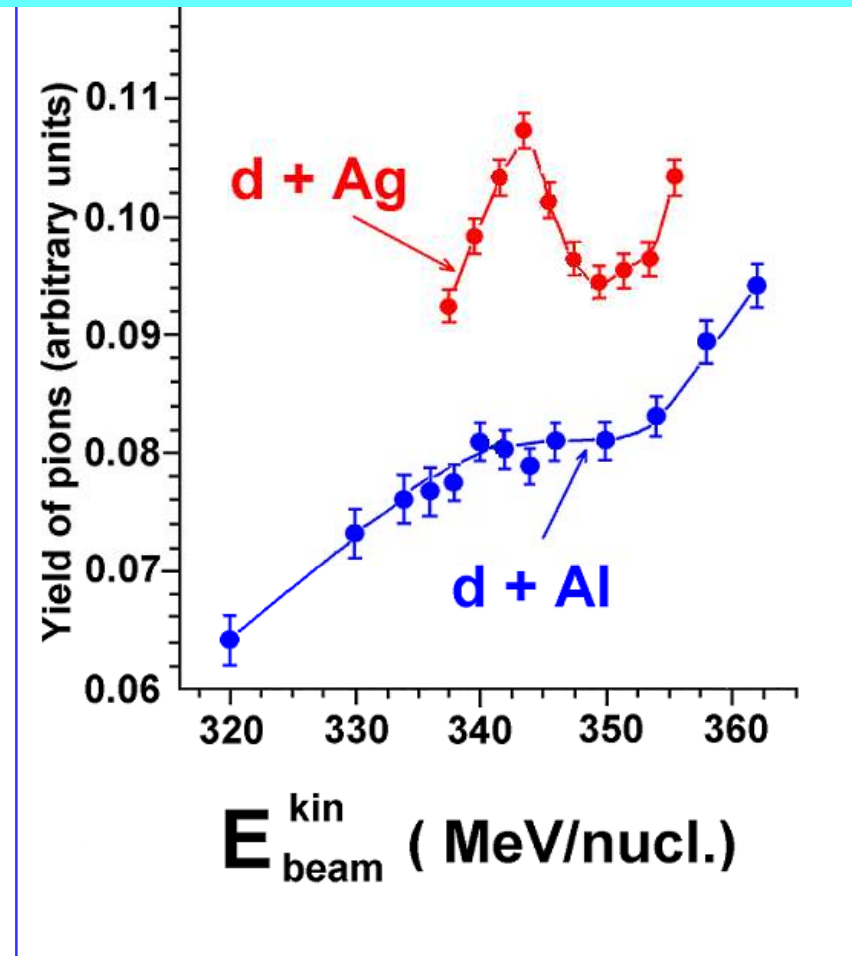
Prof. A.Kurepin



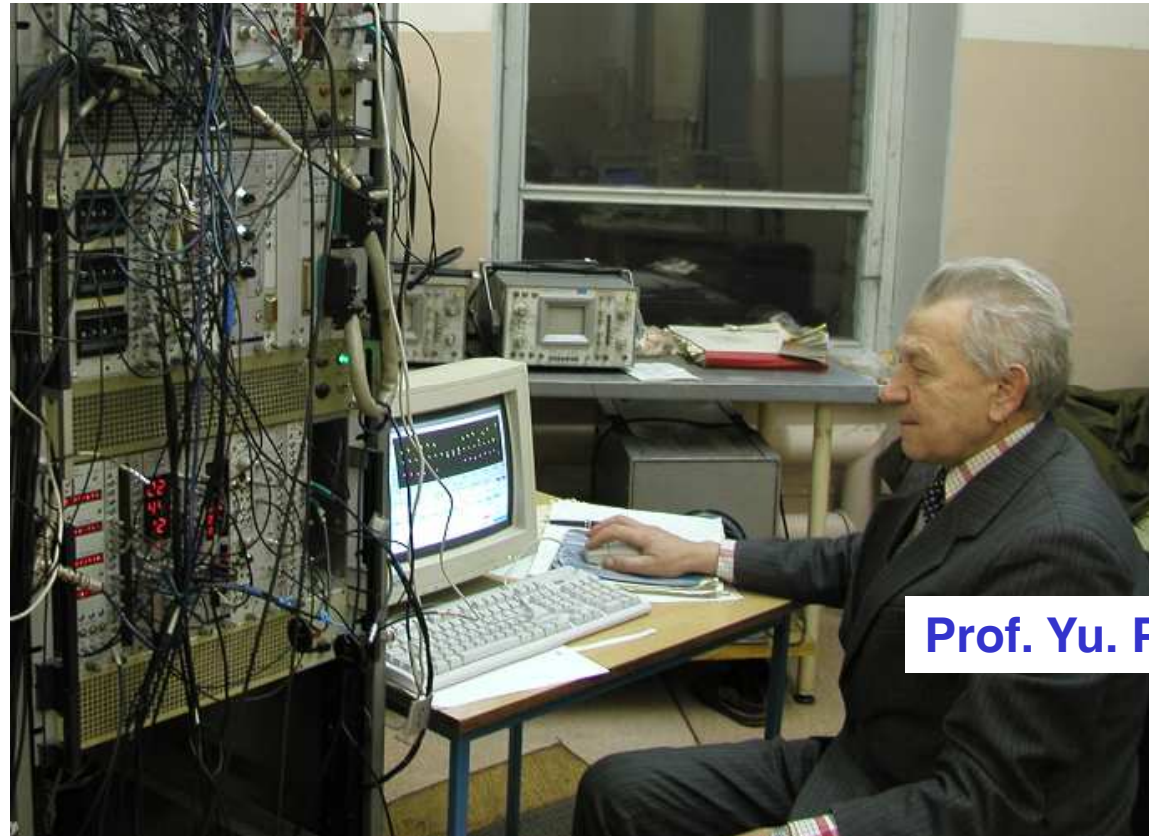
Dr. V.Krasnov



Dr. A. Livanov



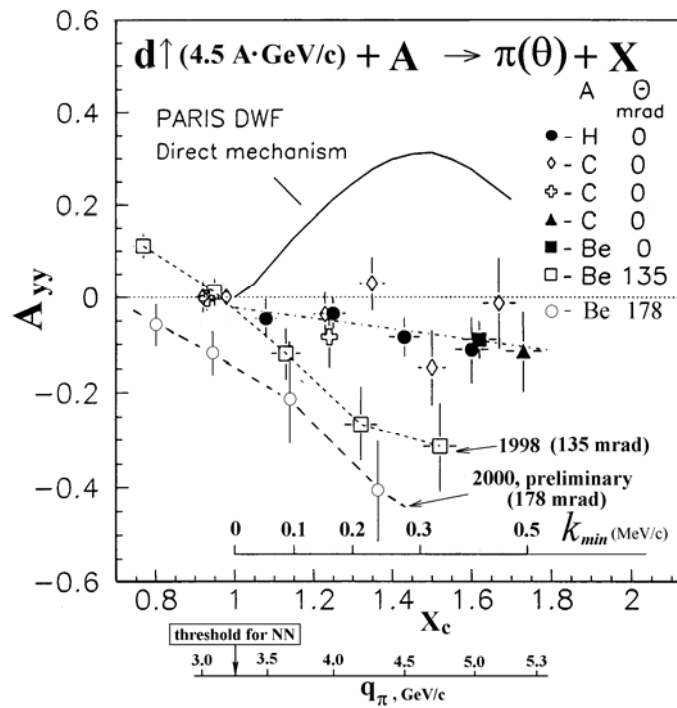
Polarized Physics



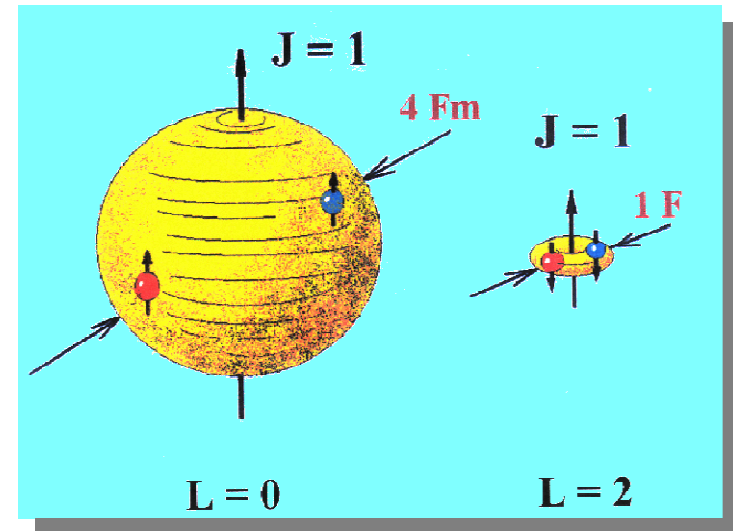
Prof. Yu. Pilipenko

PIKASO

$$\sigma \uparrow(\Theta) = \sigma(\Theta) \left[1 + \frac{3}{2} p_z A_y(\Theta) + \frac{1}{2} p_{zz} A_{yy}(\Theta) \right]$$



Prof. L. Zolin



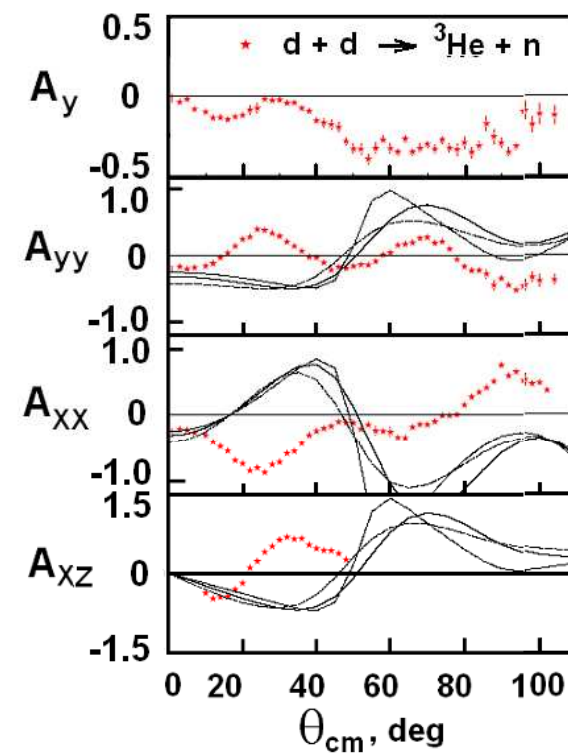
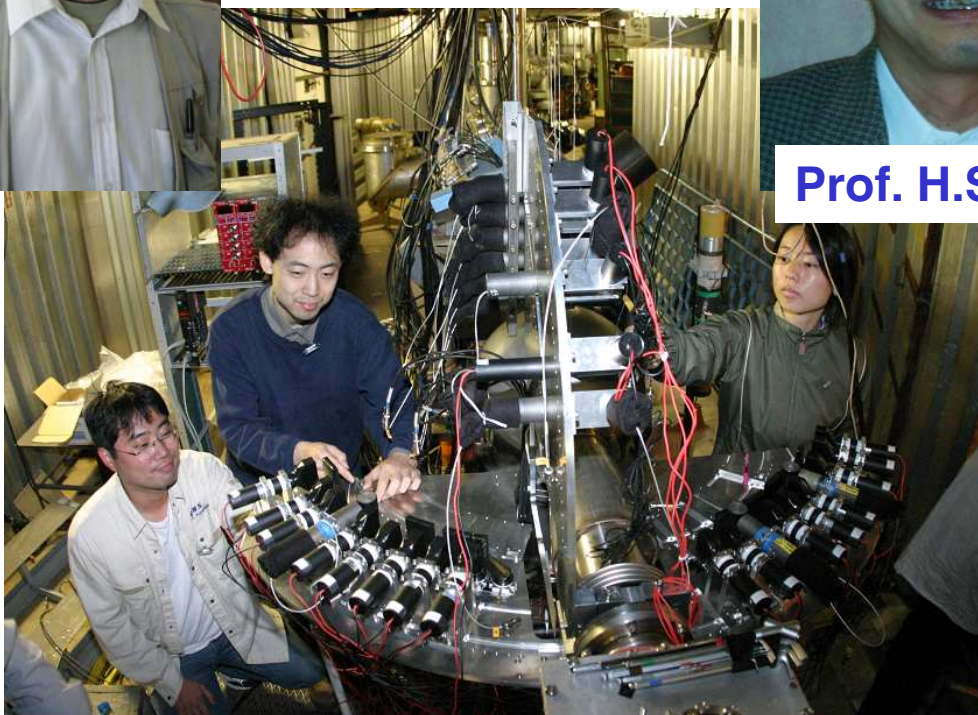
LNS



Dr. V. Ladygin



Prof. H. Sakai

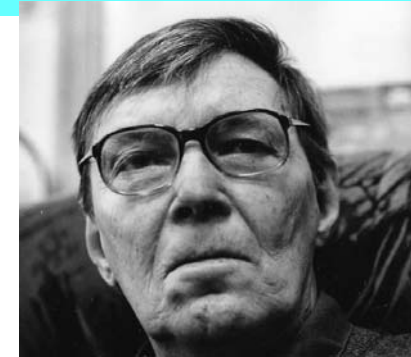


Spin structure of the np forward scattering amplitude

DELTA-SIGMA project



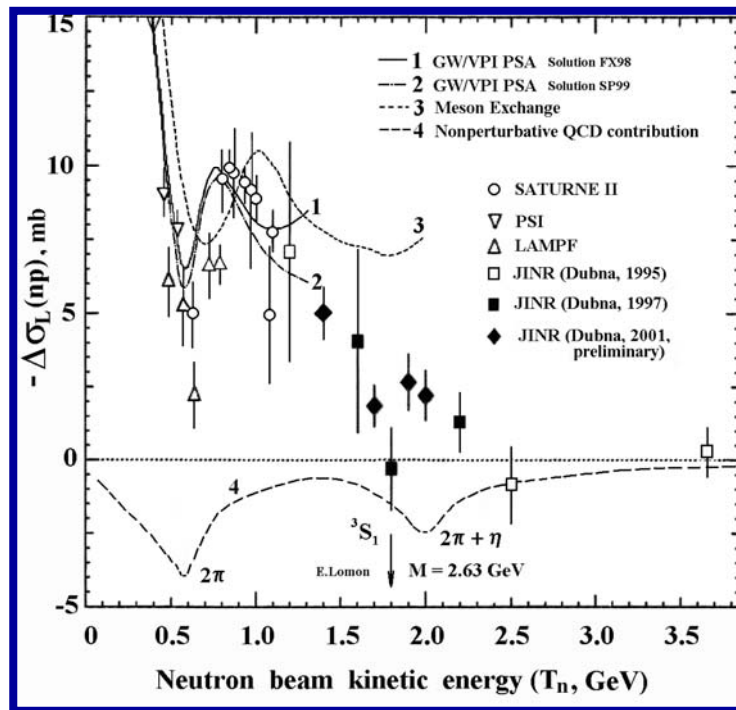
Prof. L. Strunov



Prof. V. Sharov



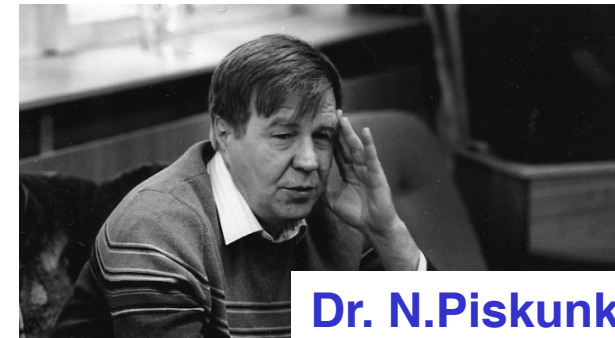
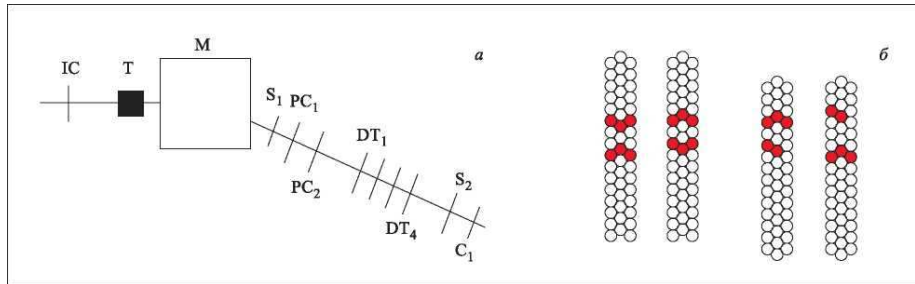
Prof. F. Lehar



$$- \Delta\sigma_L = \sigma_{\text{tot}}(\Rightarrow) - \sigma_{\text{tot}}(\Leftarrow)$$

$$- \Delta\sigma_T = \sigma_{\text{tot}}(\Uparrow\Uparrow) - \sigma_{\text{tot}}(\Uparrow\Downarrow)$$

STRELA & ALPOM



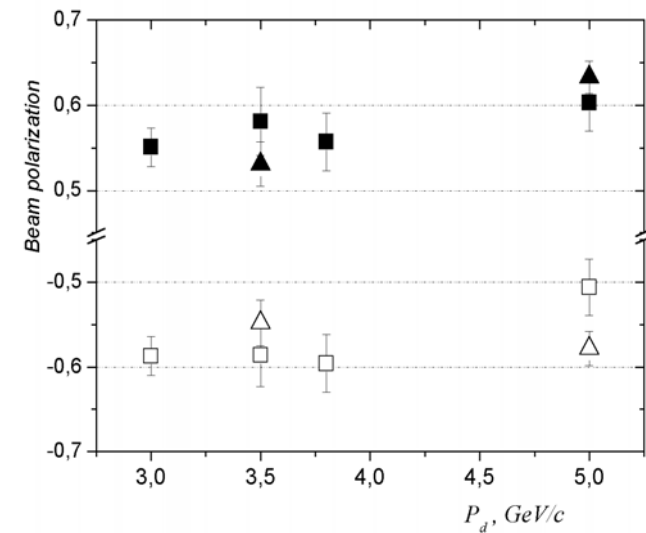
Dr. N. Piskunov



Prof. V. Glagolev



Prof. G. Martinska



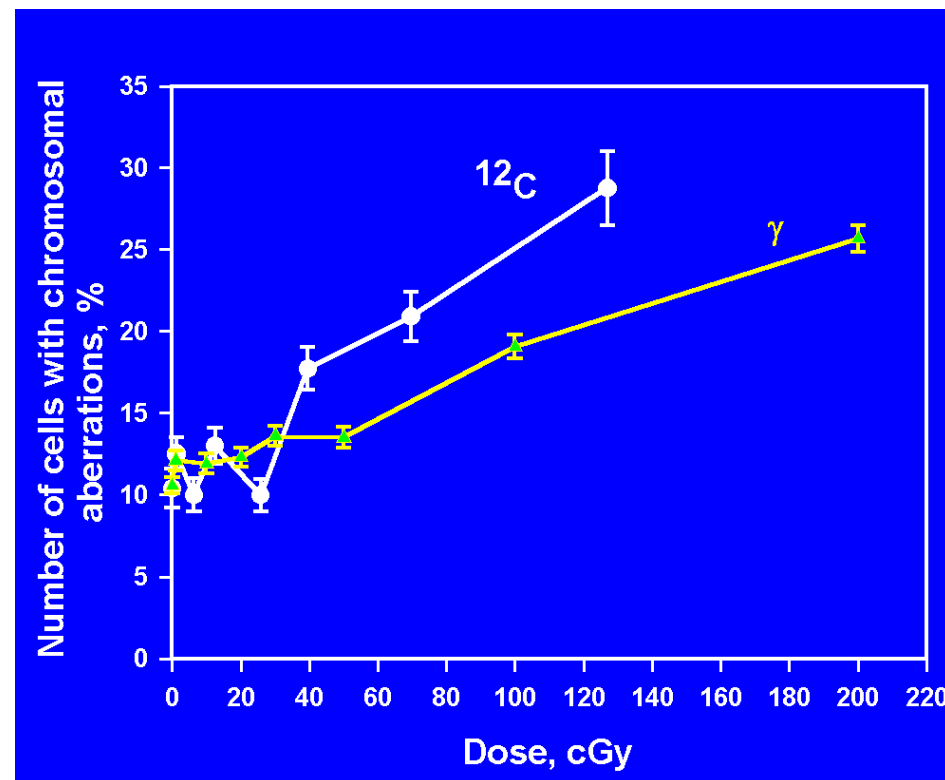
Deuteron beam polarization measured by internal (■) and external (ALPOM) (▲) polarimeters.

Applied reseasrch

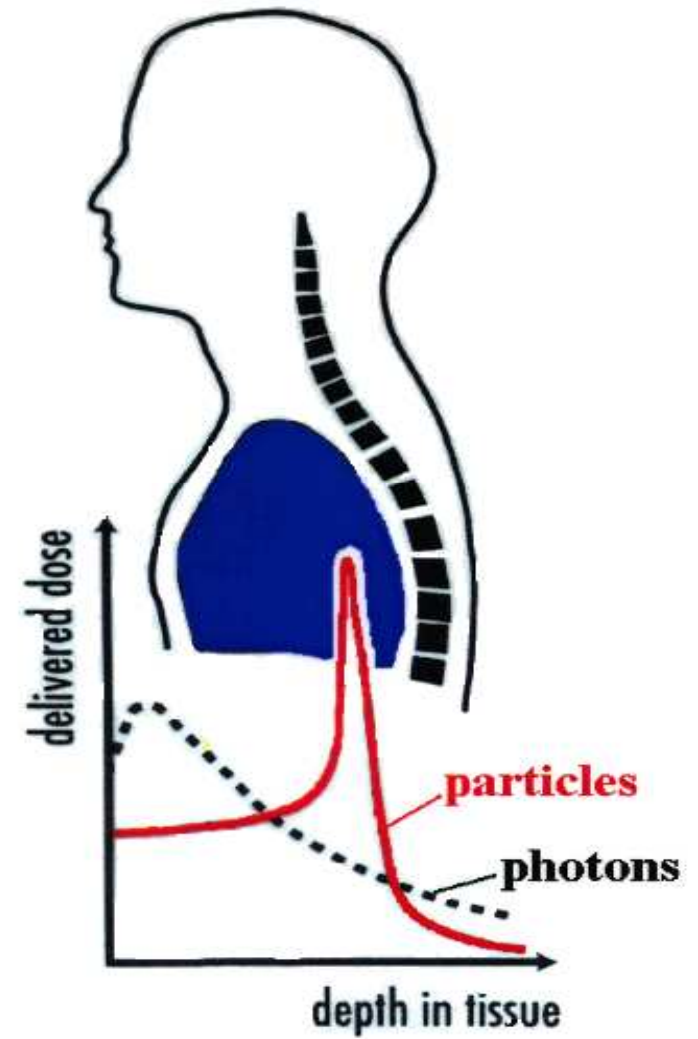
Applied research

- **Radiobiology and space biomedicine**

Leader: Krasavin E.A.



MED-NUCLOTRON



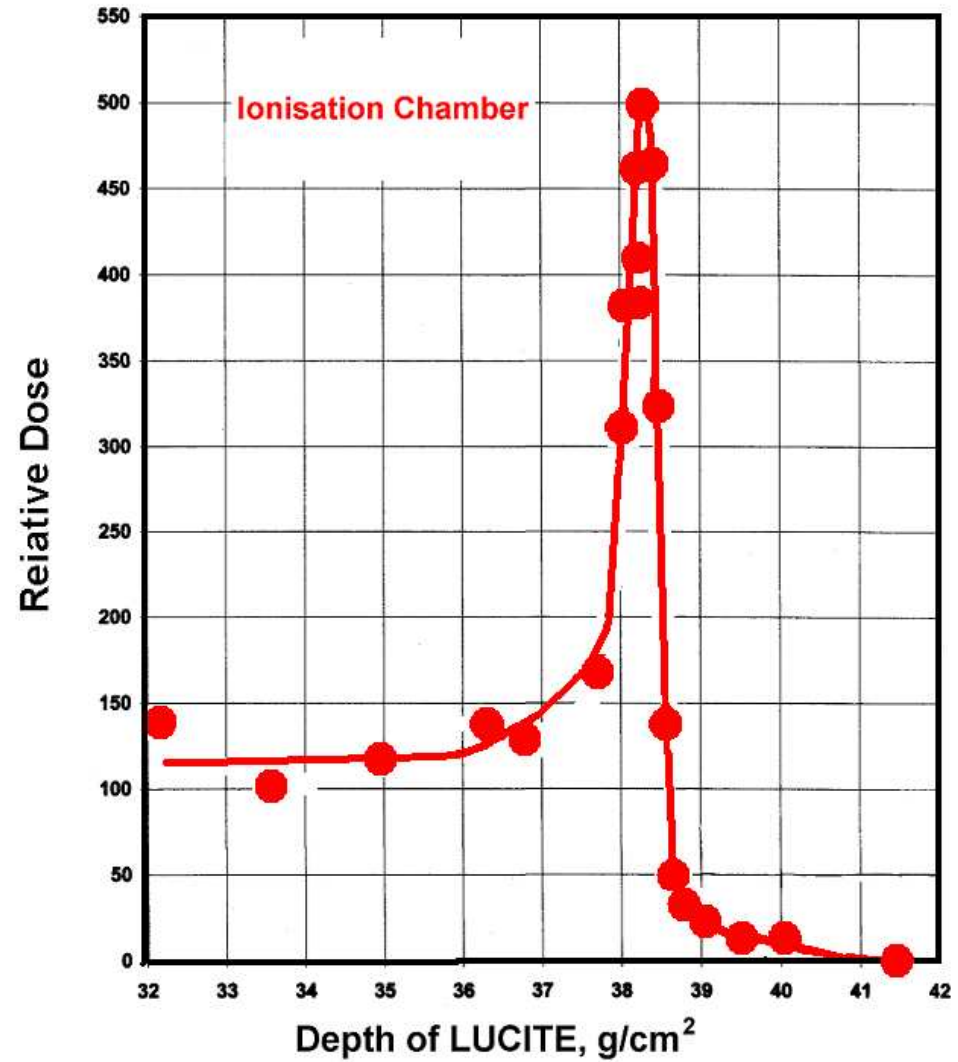
MED-NUCLOTRON

The Bragg peak of ^{12}C ions

JINR NUCLOTRON

500 A·MeV

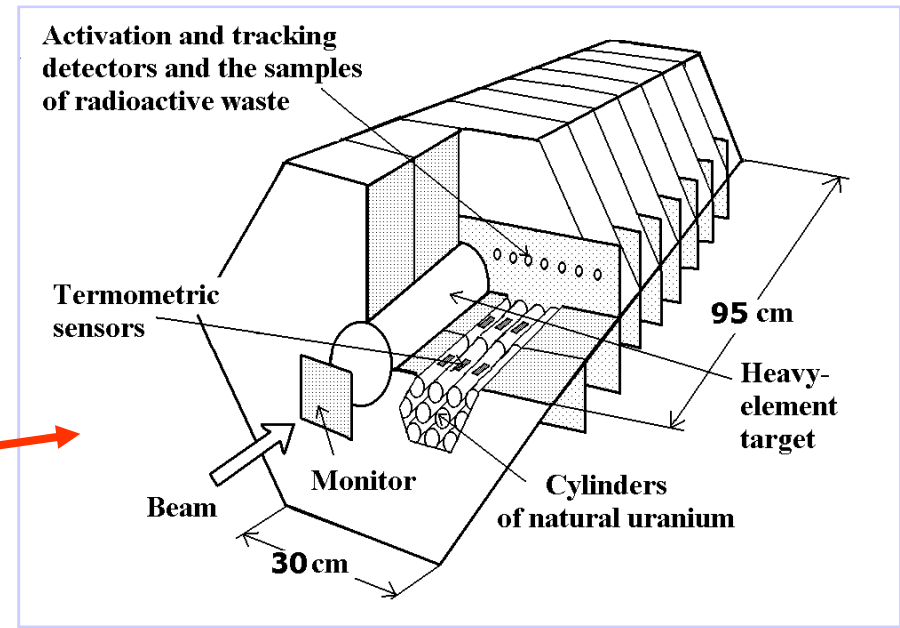
20.03.2004



Applied research

- The transmutation of radioactive waste
- Accelerator driven energy production

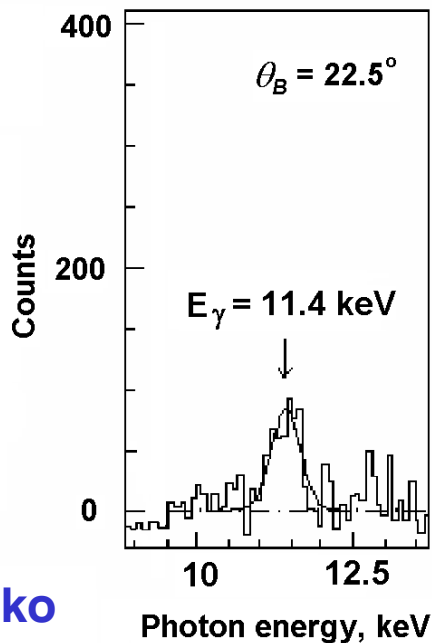
Energy + Transmutation project
Leader: Krivopustov M.I.



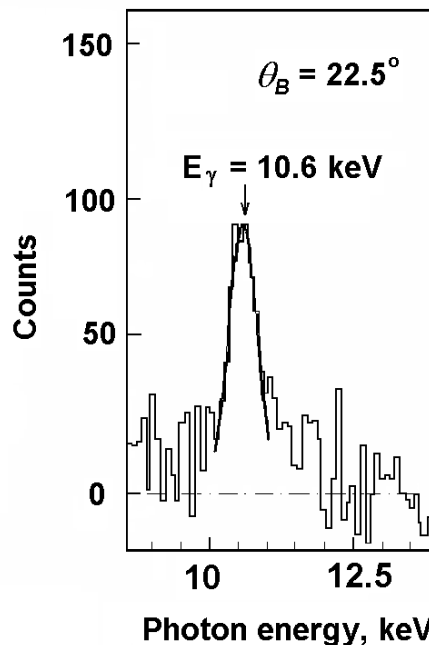
First Observation of Parametric X-Ray Radiation from Relativistic Nuclei in Crystals



Prof. A. Kovalenko



5 GeV protons
 2.25×10^{-6} photon/(proton·sr)

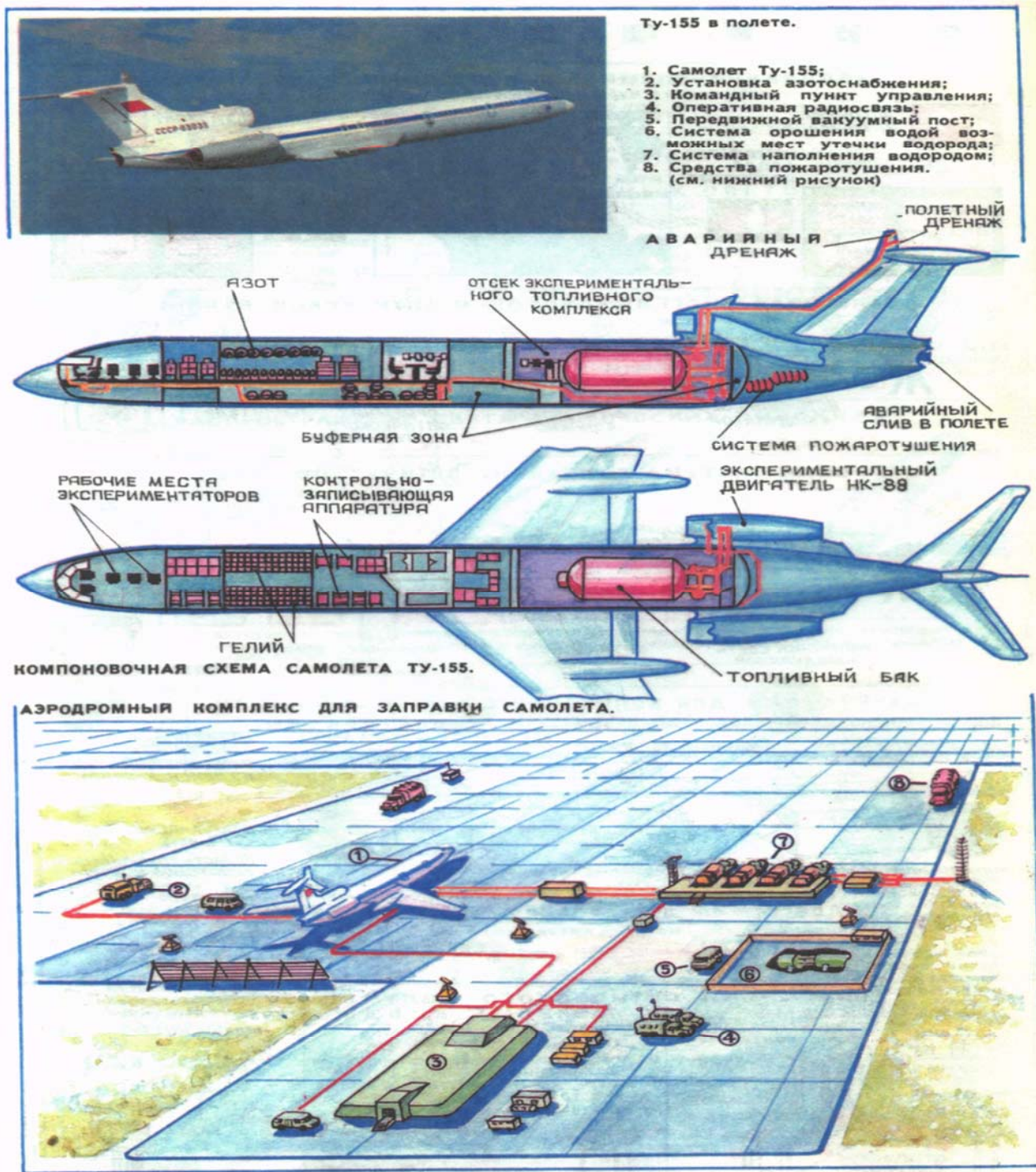


2.2 A-GeV C^{12} nuclei
 9.76×10^{-5} photon/(nuclei·sr)



Prof. A. Taratin

Первый в мире самолет на жидком водороде

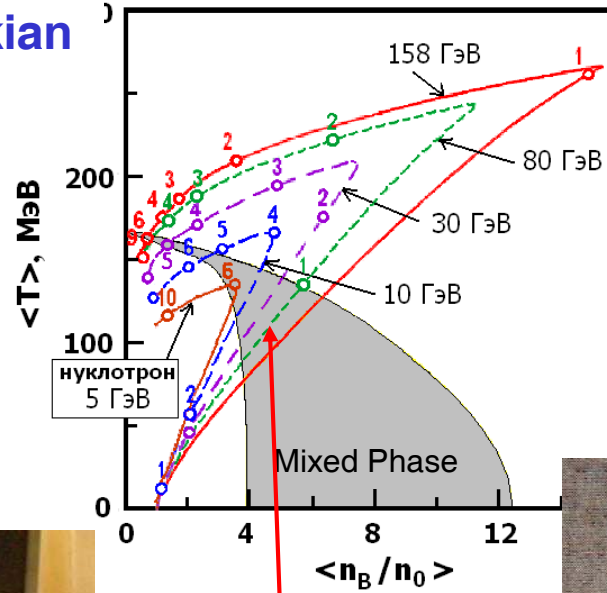


NICA

Nuclotron based Ion Collider Facility

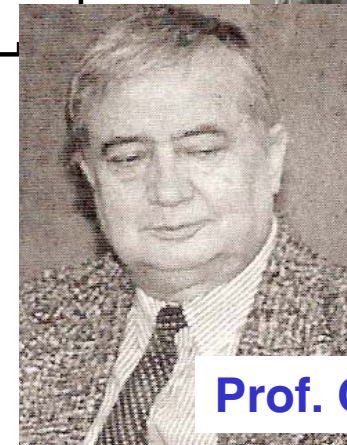
MIXED PHASE

Prof. A.Sissakian



Prof. A.Sorin

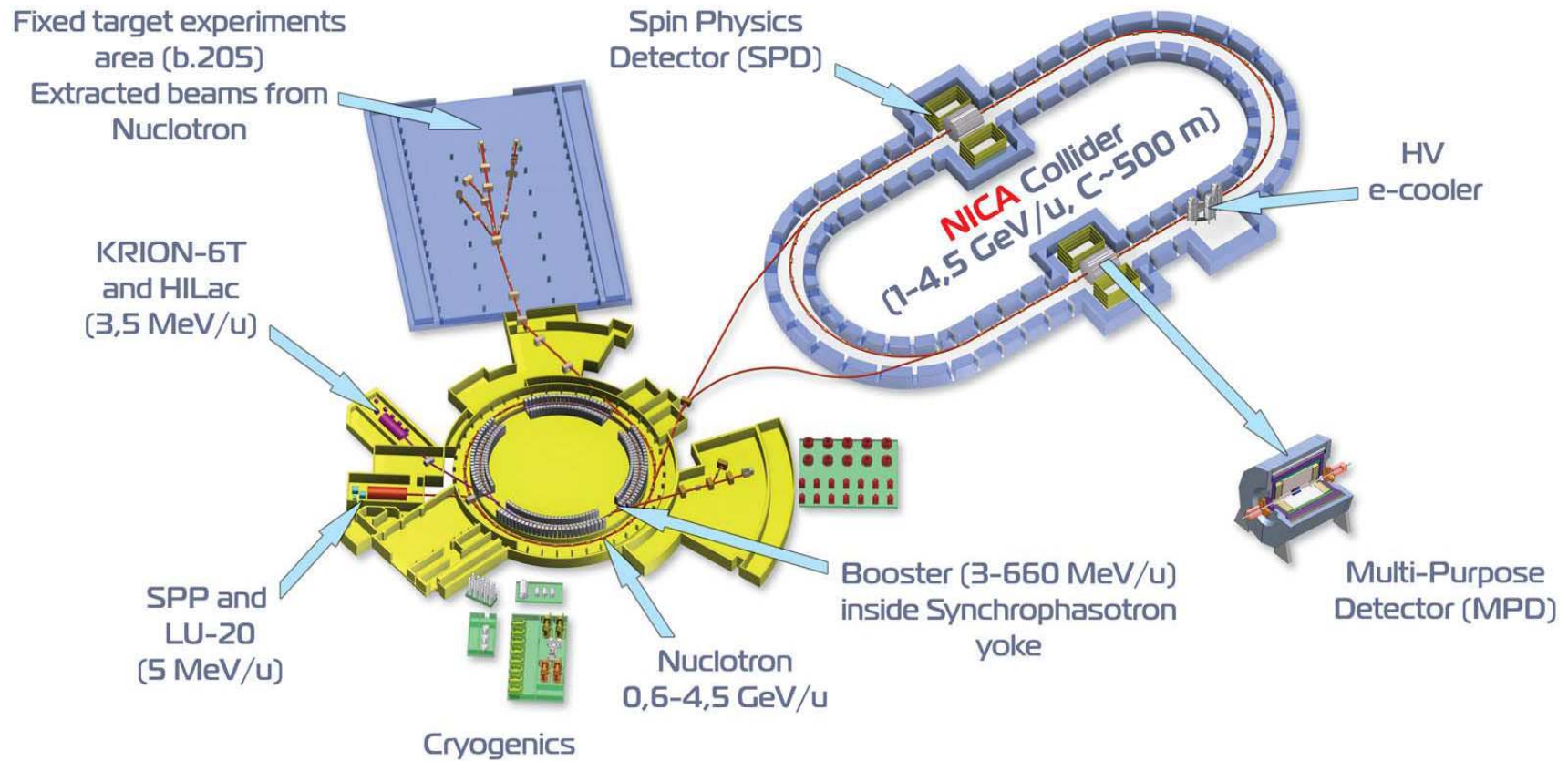
Prof. V.Toneev

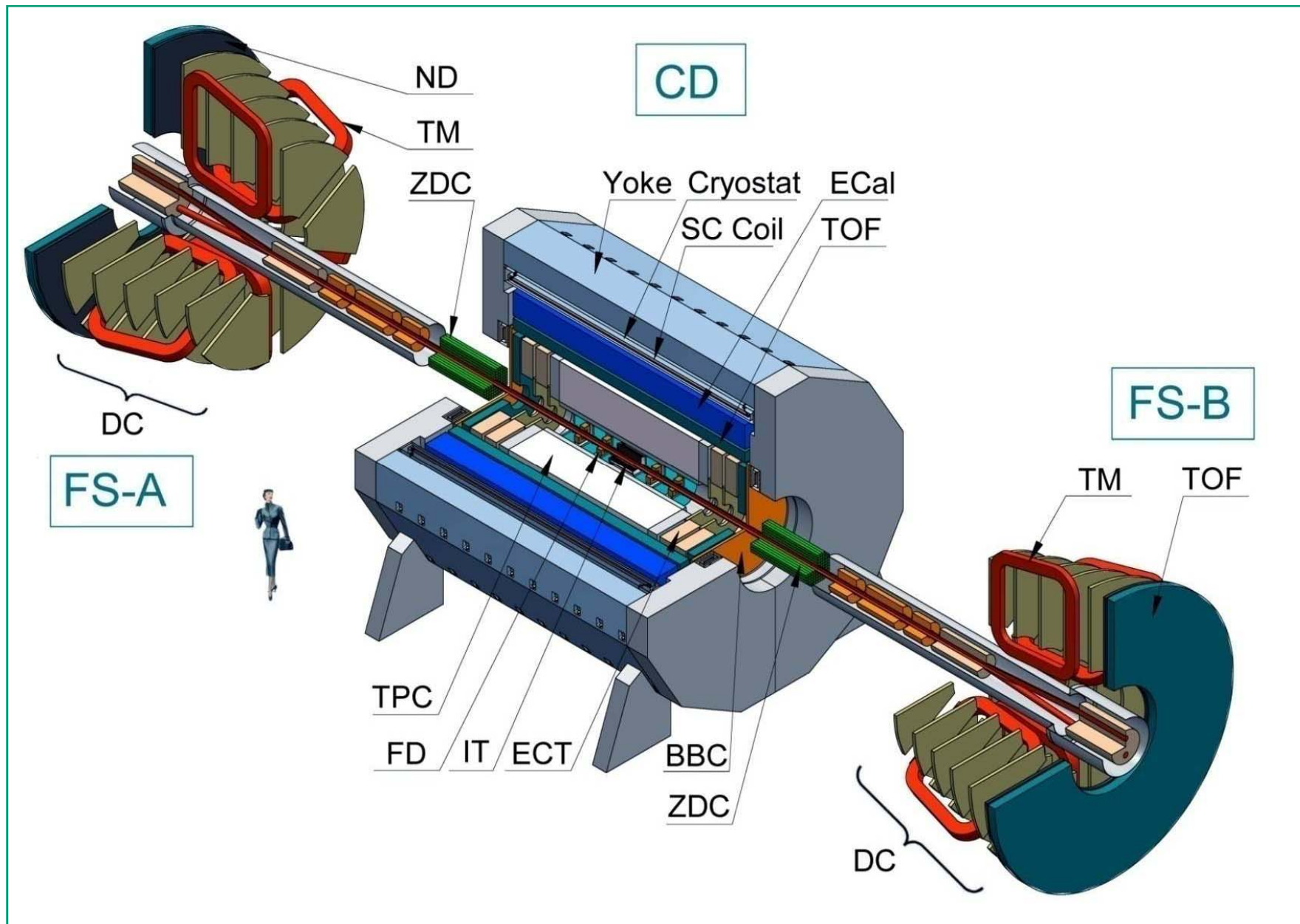


Prof. G. Zinovjev

5 A-GeV

Superconducting accelerator complex **NICA** (**N**uclotron based **I**on **C**ollider **f**Acility)







Conclusions

- **Ядерные эмульсии позволили получить большое количество новых физических результатов**
- **Ядерные эмульсии до сих пор являются удобным инструментом для поисковых задач**
- **Дальнейшее развитие технологии производства ядерных эмульсий даст новый толчок в их применении в поисковых экспериментах**

Thank you for your attention!