

Краткие итоги участия сотрудников ОФВЭ в физической программе эксперимента ANKE

В 1995-2015 гг. группа сотрудников Лаборатории мезонной физики конденсированных сред Отделения физики высоких энергий ПИЯФ под руководством **В.П. Коптева** принимала участие в создании магнитного спектрометра ANKE, установленного на внутреннем накопительном кольце ускорителя COSY (FZ-Jülich, Германия). Синхротрон с длиной кольца 184 метра обеспечивал ускорение протонов до энергии 2,83 ГэВ. Ускоритель был оснащен двумя системами охлаждения пучка: электронной и стохастической. Первая позволяла улучшить параметры пучка при инжекции, а вторая в широком диапазоне импульсов пучка вплоть до 3 ГэВ/с.

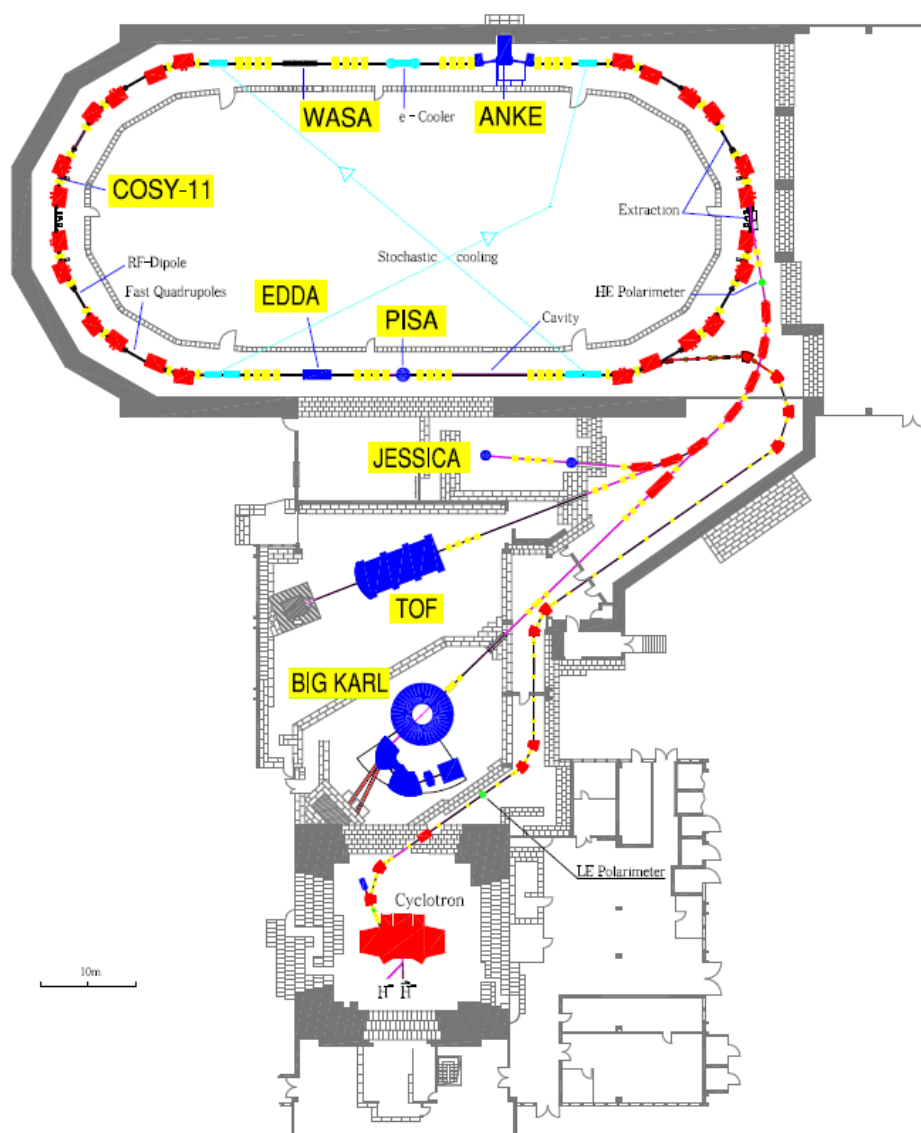


Рис. 1 Ускоритель COSY

Спектрометр состоял из трёх магнитов, два из которых (D1 и D3 на рисунке 2) обеспечивали проводку пучка ускорителя, а один (D2) являлся собственно спектрометрическим, обладающим фокусирующими свойствами в широком импульсном диапазоне. Различные типы мишеней: пленочные, кластерные, ячейка с поляризованным газом, устанавливались перед спектрометрическим магнитом. Продукты реакций регистрировались четырьмя основными детекторными системами установки ANKE:

- детектором положительно заряженных частиц (PD), предназначенным для работы в диапазоне импульсов 125 – 1000 МэВ/с;
- детектора высокоимпульсных частиц (FD);
- детектором отрицательно заряженных частиц (ND);
- кремниевыми детекторами низкоимпульсных частиц, установленными в мишенной камере (STT).

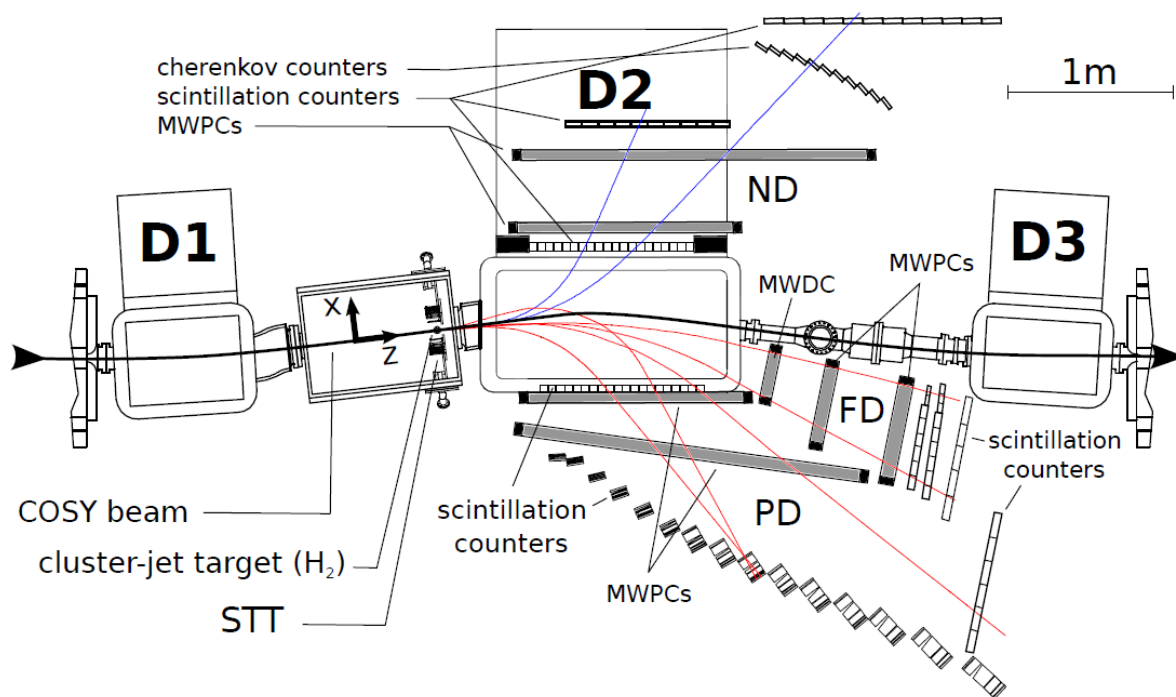


Рис. 2 Спектрометр ANKE

Главной особенностью эксперимента стал предложенный физиками ПИЯФ метод регистрации задержанного сигнала от распада K^+ мезонов, позволивший улучшить соотношение сигнал-фон в 10^5 раз. Принцип предложенного метода представлен на рисунке 3. Низкоимпульсная часть PD-системы находилась в фокальной плоскости спектрометрического магнита и состояла из сборки сцинтилляционных счётчиков, счётчиков излучения Вавилова-Черенкова и медных поглотителей. Считывание осуществлялась с торцов сборки при помощи ФЭУ. Из-за расположения телескопов в фокальной плоскости магнита, на его вход приходили заряженные частицы (протоны, каоны, пионы и дейтроны) с одним и тем же импульсом. Из-за различия в массах этих частиц они по-разному теряли энергию в элементах телескопа. Толщины элементов были подобраны так, чтобы пионы пролетали сбору насквозь, протоны останавливались и не давали сигнала в последнем счетчике сборки, а каоны останавливались прямо перед ним. Остановившийся K^+ мезон не поглощается ядрами и распадается (в соответствии с законом

радиоактивного распада). Таким образом в спектре разницы времен прихода сигналов между первым и последним счетчиками в сборке появляется экспоненциально спадающий вклад. Выбирая события-кандидаты, соответствующие этой части спектра можно надежно выделять события с K^+ мезонами.

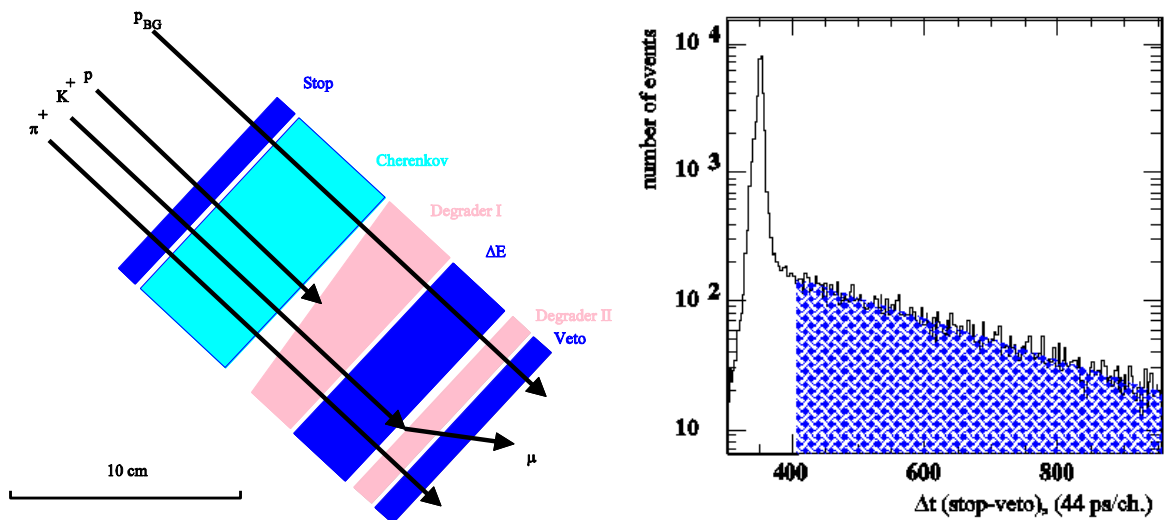


Рис. 3 Устройство и принцип действия детектора K^+ мезонов.

В ходе выполнения экспериментальной программы международного сотрудничества ANKE было проведено комплексное исследование рождение странных мезонов и барионов в нуклон-нуклонных и нуклон-ядерных взаимодействиях, которое позволило выявить особенности взаимодействия странных частиц с обычной материей.

Техника задержанного сигнала позволила измерить сечения рождения K^+ мезонов на ядрах как вблизи порога свободного рождения этих частиц на нуклоне, так и существенно ниже порога. Во втором случае процесс может протекать как за счет фермиевского движения нуклонов в ядре, так и за счет других механизмов: формирования внутри ядра нуклонных кластеров или через двухступенчатый процесс, в котором в промежуточном состоянии возникает π мезон. Например, на рисунке 4 приведены дважды дифференциальные сечения рождения K^+ мезонов на ядре углерода-12 при различных энергиях пучка. Отметим, что абсолютный порог рождения K^+ мезонов на нуклоне составляет 1.582 ГэВ. Исследование отношений сечений рождения K^+ мезонов на лёгких и тяжелых ядрах позволило извлечь величину каон-ядерного потенциала с погрешностью порядка 3 МэВ. Результаты исследований рождения K^+ мезонов на ядрах легли в основу кандидатской диссертации **М.Е. Некипелова**.

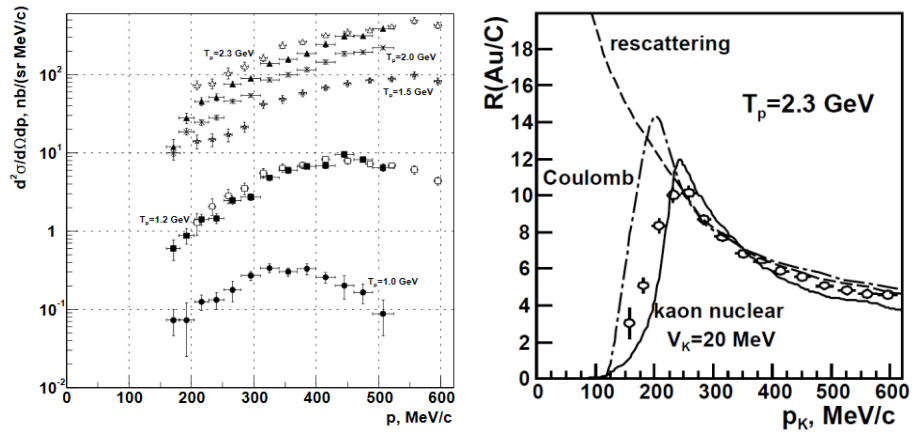


Рис. 4 Слева: дважды дифференциальные сечения рождения K^+ на ядрах ^{12}C . Справа: отношение сечений рождения на золоте и углероде и его теоретическое описание.

Другим направлением исследований, проводимой группой ОФВЭ ПИЯФ в рамках эксперимента АНКЕ, стало измерение сечений рождения Λ и Σ гиперонов в различных нуклон-нуклонных реакциях. Данные измерения были основаны на технике одновременного детектирования K^+ мезоны и протона. Декомпозиция спектров недостающей массы (см. рисунок 5) позволила выделить не только реакции типа $pp \rightarrow pK^+Y$ (где $Y = \Lambda, \Sigma$), но и процессы с образованием гиперонов, где в конечном состоянии, есть больше, чем одна нерегистрируемая частица (например, реакция $pp \rightarrow nK^+\Sigma^+$). Рождение гиперонов вблизи порога позволили провести пионерские исследования нуклон-гиперонного взаимодействия, используя влияние эффектов взаимодействия в конечном состоянии. Так, энергетическая зависимость полного сечения реакций типа $pp \rightarrow pK^+Y$ свидетельствует о том, что p - Λ взаимодействие намного более интенсивно чем p - Σ . Такие исследования очень важны для понимания свойств таких объектов как нейтронные звезды. В настоящее время исследования взаимодействия гиперонов с протонами проводятся экспериментом ALICE на большом адронном коллайдере. Результаты исследования рождения гиперонов в различных реакциях легли в основу диссертационной работы Ю. Вальдау.

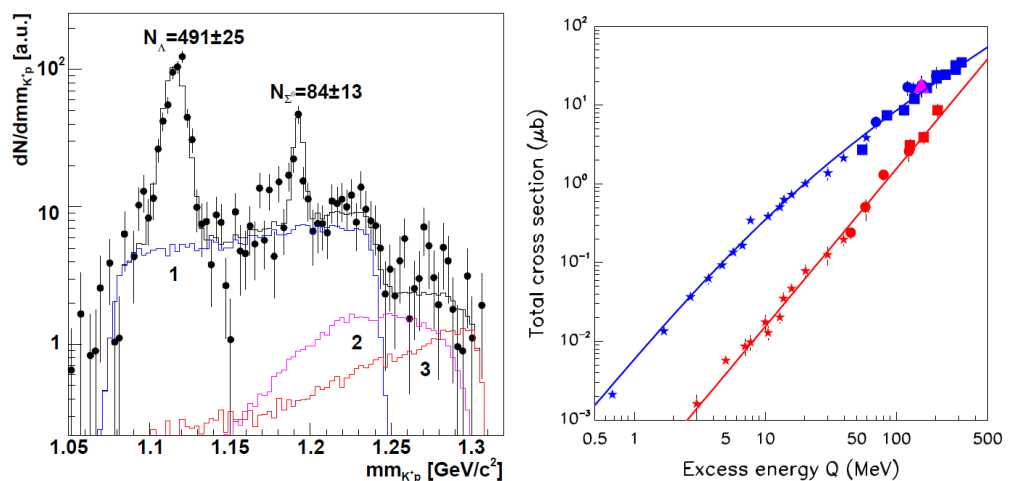


Рис. 5 Слева: описание спектра недостающей массы для зарегистрированных K^+p корреляций. Справа: полные сечения рождения гиперонов Λ (показаны синим) и Σ^0 (красным) в протон-протонных взаимодействиях. Кружками показаны экспериментальные точки, полученные сотрудничеством АНКЕ.

Другим интересным процессом, доступным для изучения на экспериментальной установке ANKE стало рождение каон-антикаонных пар вблизи порога нуклон-нуклонного взаимодействия. Эти исследования легли в основу диссертации А.А. Дзюбы. В ходе исследований были измерены полные и дифференциальные сечения реакций: $pp \rightarrow pp\phi$, $pn \rightarrow d\phi$, $pp \rightarrow pp\{K^+K^-\}_{non-\phi}$ и $pp \rightarrow dK^+K\text{-bar}^0$ при малых (до 110 МэВ), ранее не исследованных относительных энергиях. Исследование отношения сечений рождения ϕ и ω мезонов около порога их образования в нуклон-нуклонных взаимодействиях показало нарушение правила Окубо-Цвейга-Изуки для таких реакций. Исследования позволили измерить эффект K^-p -взаимодействия в конечном состоянии, которое проявляется в дифференциальных и полных сечениях реакций образования каон-антикаонных пар (см. рисунок 6). Также был обнаружен и описан эффект $K^+K^- \rightarrow K^0K\text{-bar}^0$ перераспределения в конечном состоянии (соответствующий фактор приведен на рисунке 6).

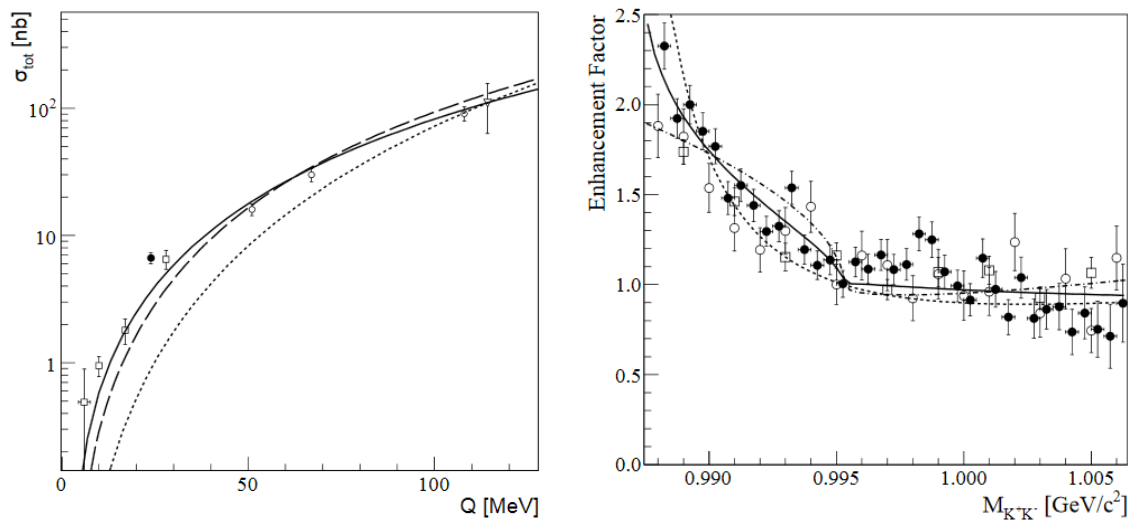


Рис. 6 Слева: полные сечения реакции $pp \rightarrow pp\{K^+K^-\}_{non-\phi}$. Справа: обнаруженный эффект перераспределения каонов вблизи открытия порога нейтрального канала

Более детально о результатах, полученных сотрудничеством ANKE, можно узнать из [обзорной статьи](#), подготовленной после завершения физической программы ускорителя COSY.

Публикации эксперимента ANKE, соавторами которых являются сотрудники ОФВЭ

1. Total and differential cross sections of the $dp \rightarrow \text{He} \eta$ reaction at excess energies between 1 and 15 MeV, C. Fritzsche et al., PRC 102, 044004
2. Measurement of the analyzing powers in (pol)pd elastic and (pol)pn quasi-elastic scattering at small angles, S. Barsov et al., Eur. Phys. J. A 54, 225
3. Experimental and theoretical study of deuteron-proton elastic scattering for proton kinetic energies between $T_p=882.2$ MeV and $T_p=918.3$ MeV, C. Fritzsche et al., Phys. Lett. B 784, 277 (2018)
4. Deuteron analysing powers in deuteron-proton elastic scattering at 1.2 and 2.27 GeV, D. Mchedlishvili et al., Nuclear Physics A 977, 14-22 (2018)

5. Resonance-like coherent production of a pion pair in the reaction $pd \rightarrow pd \pi\pi$ in the GeV region, V. Komarov et al., *Eur. Phys. J. A* 54, 206 (2018)
6. Coherent pion production in proton-proton collisions, S. Dymov et al., *Phys. Lett. B* 762, 102 (2016)
7. Evidence for excitation of two resonance states in the isovector two-baryon system with a mass of $2.2 \text{ GeV}/c^2$, V. Komarov et al., *Phys. Rev C* 93, 065206 (2016)
8. Measurement of the absolute differential cross section of pp elastic scattering at small angles, D. Mchedlishvili et al., (pdf file, 406 kB) *Phys. Lett. B* 755, 92-96, (2016)
9. Kaon pair production in proton-nucleus collisions, Yu. Kiselev et al., (pdf file, 194 kB) *Phys. Rev. C* 92, 065201 (2015)
10. rs and spin correlations in deuteron-proton charge exchange at 726 MeV, S.Dymov et al., *Phys. Lett. B* 744, 391 (2015)
11. Study of the $pd(\text{pol}) \rightarrow n\{pp\}$ charge-exchange reaction using a polarised deuterium target, B.Gou et al., *Phys. Lett. B* 741, 305 (2015)
12. Measurement of the analyzing power in proton-proton elastic scattering at small angles, Z.Bagdasarian et al., *Phys. Lett. B* 739, 152 (2014)
13. Absence of spin dependence in the final state interaction of the $d(\text{pol})p \rightarrow \text{He}^3 \eta$ reaction, M.Papenbrock et al., *Phys. Lett. B* 734, 333 (2014)
14. Isospin effects in the exclusive $d(\text{pol})p \rightarrow \text{He}^3 \pi^+ \pi^-$ reaction, M.Mielke et al., *Eur. Phys. J. A* 50, 102 (2014)
15. First measurements of spin correlations in the $\text{pol}\{n\}\text{pol}\{p\} \rightarrow d\pi^0$ reaction, V.Shmakova et al., (pdf file, 157 kB) *Phys. Lett. B* 726, 634 (2013)
16. Excitation of the Delta (1232) isobar in deuteron charge exchange on hydrogen at 1.6, 1.8, and 2.3 GeV, D.Mchedlishvili et al., *Phys. Lett. B* 726, 145 (2013)
17. Measurement of spin observables in the quasi-free $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ reaction at 353 MeV, S.Dymov et al., *Phys. Rev. C* 88, 014001 (2013)
18. The production of K^+K^- pairs in proton-proton collisions below the phi-meson threshold, Qiu Jian Ye et al., *Phys. Rev. C* 87, 065203 (2013)
19. The neutron-proton charge-exchange amplitudes measured in the $dp \rightarrow ppn$ reaction D.Mchedlishvili et al., *Eur. Phys. J. A* 49 (2013), 49;
20. The polarised H and D atomic beam source for ANKE at COSY-Juelich, M.Mikirtychyants et al., (*Nucl. Instr. Meth. A* 721, p. 83-89, (2013)
21. A new determination of the mass of the eta meson at COSY-ANKE, P.Goslowski et al., (*Phys. Rev. D* 85, 112011 (2012).
22. The production of K^+K^- pairs in proton-proton collisions at 2.83 GeV, Qiu Jian Ye et al., *Phys. Rev. C* 85, 035211 (2012).
23. Momentum dependence of the phi-meson nuclear transparency, M.Hartmann, Yu.Kiselev, A.Polyanskiy, E.Paryev et al., *Phys. Rev. C* 85, 035206 (2012).
24. Differential cross section and analysing power of of the $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at 353 MeV, D.Tsirkov et al., *PLB* 712, 370-374 (2012)
25. Differential cross section and analysing power of of the quasi-free $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ reaction at 353 MeV, S.Dymov et al., *PLB* 712, 375-380 (2012)
26. Comparison of inclusive K^+ production in proton-proton and proton-neutron collisions, Yu.Valdau et al., *Phys. Rev. C* 84, 055207 (2011).
27. The measuerement of the $pp \rightarrow K+n \Sigma^+$ reaction near threshold, Yu.Valdau and C.Wilkin, *Phys. Lett. B*: 696, 23-25 (2011).
28. Measurement of the in-medium Phi-meson width in proton-nucleus collisions, A.Polyanskiy et al., *Phys. Lett. B*: 695, 74-77 (2011).

29. Energy dependence of hard bremsstrahlung production in proton-proton collisions in the Delta(1232) region, D. Tsirkov et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 37 (2010) 105005.
30. The Energy dependence of the $pp \rightarrow K+n$ $\Sigma(+)$ reaction close to threshold, Yu. Valdau et al., Phys. Rev. C 81, 045208 (2010)
31. Deuteron breakup $pd \rightarrow \{pp\}sn$ with forward emission of a fast 1S0 diproton, S. Dymov et al., (pdf file, 1217 kB); Phys. Rev. C 81, 044001 (2010)
32. High precision beam momentum determination in a synchrotron using a spin-resonance method, P.Goslawski et al., Phys. Rev. ST-AB, 13, 022803 (2010)
33. Precision study of the $dp \rightarrow {}^3\text{He}$ η reaction for excess energies between 20 and 60 MeV, T.Rausmann et al., Phys. Rev. C 80, 017001 (2009)
34. Measurement of the isospin-filtering $dd \rightarrow \text{He}4$ $K+K^-$ reaction at $Q=39$ MeV, X.Yuan et al., Eur. Phys. J. A42, 1-6 (2009)
35. Polarizing a stored proton beam by spin flip?, D.Oellers et al., PLB 674, 269-275 (2009)
36. Observation of an ABC effect in proton-proton collisions, S.Dymov et al., PRL 102, 192301 (2009)
37. Measurement of the $pn \rightarrow dK+K^-$ total cross section close to threshold, Y.Maeda et al., Phys. Rev. C79, 018201 (2009)
38. The $dp \rightarrow ppn$ reaction as a method to study neutron-proton charge-exchange amplitudes, D.Chiladze et al., Eur. Phys. J. A40, 23 (2009)
39. Machine studies for the development of storage cells at the ANKE facility of COSY, K.Grigoryev et al., NIM A 599, 130 (2009)
40. Coupled-channel effects in the $pp \rightarrow pp$ $K+K^-$ reaction, A.Dzyuba et al., PLB 668, 315-318 (2008)
41. Observation of inverse diproton photodisintegration at intermediate energies, V.Komarov et al., PRL 101, 102501 (2008)
42. Interpretation of $KK\bar{K}$ pair production in pp collisions, A.Dzyuba et al., Eur. Phys. J A38,1 (2008)
43. Energy dependence of forward 1S0 diproton production in the $pp \rightarrow pp$ π^0 reaction, V.Kurbatov et al., PLB 661, 22-27 (2008)
44. Lineshape of the $\Lambda(1405)$ hyperon measured through its $\Sigma(0)\pi^0$ decay, I. Zychor et al., PLB 660, 167-171 (2008)
45. Kaon pair production in proton-proton collisions, Y.Maeda et al., Phys. Rev. C77, 015204 (2008)
46. Is there an η - ${}^3\text{He}$ quasi-bound state, C.Wilkin et al., PLB 654, 92-96 (2007)
47. Energy dependence of the $pp \rightarrow K+n$ $\Sigma(+)$ reaction near threshold, Yu.Valdau et al., PLB 652, 245-249 (2007)
48. Precision study of the η - ${}^3\text{He}$ system using $dp \rightarrow {}^3\text{He}$ η reaction, T.Mersmann et al., PRL 98, 242301 (2007)
49. Investigation of the reaction $pp \rightarrow pK^0\pi+\Lambda$ in search of the pentaquark, M.Nekipelov et al., J.Phys.G, 34, 627 (2007)
50. Study of omega-meson production in pp collisions at ANKE, S.Barsov et al., Eur. Phys. J. A31, 95 (2007)
51. Precision measurement of the quasi-free $pn \rightarrow d$ ϕ reaction close to threshold, Y.Maeda et al., PRL 97, 142301 (2006)
52. Scalar-isovector $KK(\bar{K})$ production close to threshold, A.Dzyuba et al., Eur. Phys. J. A29, 245 (2006)
53. The Near-Threshold Production of ϕ Mesons in pp Collisions, M.Hartmann et al., PRL 96, 242301 (2006)

54. Vector and tensor analysing powers in deuteron-proton breakup reactions at intermediate energies, D.Chiladze et al., PLB 637, 170-175 (2006)
55. Production of the $1S_0$ diproton in the $pp \rightarrow (pp)\pi^0$ reaction at 0.8 GeV, S.Dymov et al., PLB 635, 270-274 (2006)
56. Determination of Deuteron Beam Polarization at COSY, D.Chiladze et al., Phys. Rev. ST-AB, 9, 050101 (2006)
57. The control system of the polarized internal target of ANKE at COSY, H.Kleines et al., NIM A, 560 503 (2006)
58. Evidence for an Excited Hyperon State in $pp \rightarrow p K^+ Y_0^*$, I.Zychor et al., Phys. Rev. Lett., 96, 0123002 (2006)
59. $a_0^+(980)$ -resonance production in the reaction $pp \rightarrow dp\eta$ close to the $K(\bar{K})$ threshold, P.Fedorets et al., Yad. Fiz. 69, No.2, (2006), 306
60. Near threshold η meson production in the $dd \rightarrow 4\text{He } \eta$ reaction, A.Wronska et al., Eur. Phys. J. A26, 421 (2005)
61. Measurement of the analyzing power in $p(\text{pol})p \rightarrow (pp)n$ with a fast forward $1S_0$ -diproton, S.Yaschenko et al., Phys. Rev. Lett., 94, 072304 (2005)
62. Determination of the $K^0(\bar{K}^0)d$ scattering length from the reaction $pp \rightarrow d K^+ K^0(\bar{K}^0)$, A.Sibirtsev et al., Phys.Lett. B 601, 132 (2004)
63. Inclusive K^+ -meson production proton-nucleus interactions, M.Büscher et al., Eur.Phys.J. A 22, 301 (2004)
64. Spectator Detection for the Measurement of Proton-Neutron Interactions at ANKE, I.Lehmann et al., NIM A, 530 275 (2004)
65. Near-threshold production of ω mesons in the $pn \rightarrow d\omega$ reaction, S.Barsov et al., Eur.Phys.J. A 21, 521 (2004)
66. $a_0^+(980)$ -resonance production in $pp \rightarrow d K^+ K^0(\bar{K}^0)$ reactions close to threshold, V.Kleber et al., Phys.Rev.Lett., 91, 172304 (2003)
67. Observation of K^+d correlations from pA collisions, V.Koptev et al., Eur.Phys.J. A 17, 235 (2003)
68. Evidence of kaon nuclear and Coulomb potential effects on soft K^+ production from nuclei, M.Nekipelov et al., Phys. Lett. B, 540, 207 (2002)
69. Spin-Triplet Final-State Dominance in the $pp \rightarrow pn \pi^+$ reaction at 492 MeV, V.Abaev et al., Phys. Lett. B 521, 158 (2001)
70. Phenomenological analysis of K^+ -meson production in proton-nucleus collisions, M. Büscher et al., Phys. Rev. C, 65, 014603 (2002)
71. Identification of K^+ -Mesons from Subthreshold pA Collisions with ANKE at COSY-Jülich, M. Büscher et al., NIM A 481, 378 (2002)
72. Forward K^+ -Production in Subthreshold pA Collisions at 1.0 GeV, V.Koptev et al., Phys.Rev.Lett. 87, 022301 (2001)
73. ANKE, a New Facility for Medium Energy Hadron Physics at COSY-Jülich, S. Barsov et al., NIM A 462, 364 (2001)
74. Application and methodological improvements to the floating-wire technique to characterize the magnetic properties of a spectrometer dipole, J. Stein et al., Rev. of Scient. Instr. 72, 2003 (2001)
75. 24 Segment High Field Permanent Sextupole Magnets, A. Vassiliev et al., Rev. of Scient. Instr. 71, 3331 (2000)
76. Beam test of Cherenkov Counter Prototypes for the ZDF setup, A.Kacharava et al., NIM A 376, 356 (1996)

77. K⁺-Meson Production in pBe Interactions at T_p=2.9 GeV, M.Büscher, et al., Z.Phys. A 355, 93 (1996)