

Projektleiter : H. Abele, D. Dubbers

Förderkennzeichen : 06 HD 153I

Vorhaben : Grundlegende Wechselwirkungen freier Neutronen

Wissenschaftlicher Bericht BMBF 01. April 2003-31. März 2006

Die Hauptergebnisse aus der vergangenen Förderperiode sind:

A. Wissenschaftliche Ergebnisse

Nicht-Unitarität der Quarkmischungsmatrix:

In der vorausgegangenen Förderperiode 2000-2003 hatten wir aus unseren Neutronenzerfallsdaten einen neuen Wert für das Matrixelement V_{ud} der CKM-Quarkmischungsmatrix bestimmt. Der mit diesem Wert durchgeführte Unitaritätstest der CKM-Matrix ergab eine Diskrepanz, die 3 Sigma betrug.

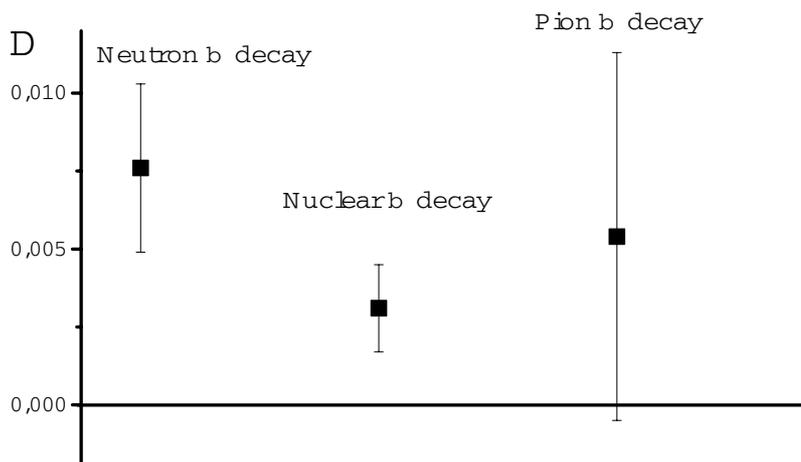


Fig. 1: Abweichung von der Unitaritätseins nach Neutron-, Kern- und Pion- β -Zerfallsmessungen.

Die Abbildung stellt die Situation aus dem Jahr 2004 dar, wobei die Unitaritätslinie mit $\Delta = 0$ auf dem $|V_{us}|$ -Wert der Particle-Data-Group basiert. Man findet die Abweichung bei β -Zerfallsmessungen sowohl in der Kernphysik als auch in unseren Daten der Neutronenphysik sowie im Pionzerfall. Das Defizit Δ beträgt bei Kern- β -Zerfallsmessungen 2.3 Sigma, jedoch wird das Ergebnis von Korrekturen zur Kernstruktur dominiert, die schwer zu berechnen sind und in der Vergangenheit umstritten waren. Das Neutron ist das einfachere System und die Neutronzerfallsmessungen kommen im Wesentlichen ohne diese störenden Korrekturen aus und sind deshalb sehr zuverlässig. Da der größte Fehler die von uns gemessene β -Zerfallsasymmetrie A des Neutrons beisteuert,

haben wir die Messung der β -Asymmetrie im Zerfall freier Neutronen wiederholt. Dabei konnten mit dem PERKEO-Experiment noch einmal deutliche Fortschritte erzielt werden. Wie in Tab. 1 zu sehen ist, konnten sämtliche Unsicherheiten auf 0.1% reduziert werden, so dass der Gesamtfehler 0.33% beträgt. Der neue A -Wert, der noch unveröffentlicht ist und der Doktorarbeit von D. Mund entnommen ist, bestätigt unsere früheren Messungen und der Messfehler kann halbiert werden. Auch die Gesamtkorrektur wurde von 2% im Jahr 2002 auf 0.4% reduziert. Aus dem neuen Asymmetriewert A lässt sich das Verhältnis des Axialvektor zur Vektorkopplung $\lambda = -1.2739 \pm 0.0009$ berechnen.

	2002 correction	2002 uncertainty	2006 correction	2006 uncertainty
polarization	1.1 %	0.3 %	0.3 %	0.1 %
flipper efficiency	0.3 %	0.1 %	0.0 %	0.1 %
Statistical error		0.45 %		0.26 %
background	0.5 %	0.25 %	0.1 %	0.1 %
detector function		0.26 %		0.1 %
edge effect	-0.24 %	0.1 %	-0.22 %	0.05 %
time resolution		0.25 %		
mirror effect	0.09 %	0.02 %	0.11 %	0.01 %
backscattering	0.2 %	0.17%	0.003 %	0.001 %
rad. corrections	0.09 %	0.05 %	0.09 %	0.05 %
Sum	2.04 %	0.66 %	0.38 %	0.33 %

Tab. 1: Korrekturen und Fehler der β -Asymmetriemessung mit Instrument PERKEO II.

Mit λ und der Neutronenlebensdauer τ aus der Particle data Group 2005 lässt sich nun V_{ud} aus dem Neutron-Zerfall berechnen:

$$|V_{ud}| = \frac{(4908.7 \pm 1.9)s}{\tau(1 + 3\lambda^2)} = 0.9711 \pm 0.0007. \quad (4)$$

Seit 2005 kann jedoch der Particle Data Group Wert für die Neutronenlebensdauer nicht mehr bedenkenlos verwendet werden, da bei der Mittelung eine Messung von Serebrov und Mitarbeitern mit $\tau = 878.5 \pm 0.8s$ nicht berücksichtigt wird. Der Wert dieser Messung aus dem Jahr 2005 weicht 6.5σ vom Particle Data Group Wert ab, und eine so große Verschiebung in der Lebensdauer ändert auch V_{ud} signifikant. Um die Neutronenlebensdauer zuverlässig neu zu vermessen, werden neue Neutronenlebensdauer-messungen unter anderem von der TU München vorbereitet, und in Zukunft wird die Lebensdauer genauer bekannt sein.

Zum Unitaritätstest nach Gl. 2 gehört neben V_{ud} auch V_{us} aus der zweiten Teilchengeneration. Neue Messwerte zum K -Zerfall der Experimente E865, KTeV, NA48,

ISTRA+ und KLOE, die semileptonische Verzweigungsverhältnisse, Formfaktoren oder die K_L Lebensdauer neu bestimmt haben, weichen deutlich von den Angaben aus der Particle Data Group ab. Auch ein Formfaktor, der eine V_{us} -Bestimmung nötige Extrapolation des Impulstransfers vornimmt, ist inzwischen umstritten. Je nach Formfaktor erhält man entweder einen neuen Wert $|V_{us}| = 0.2261 \pm 0.0021$, oder einen Wert $|V_{us}| = 0.2208 \pm 0.0027$, der mit der alten Angabe im wesentlichen übereinstimmt.

Das Gebiet ist also in Bewegung gekommen, und wir befinden uns in einer Phase der Konsolidierung. In der Neutronenphysik gehören zu den Fortschritten unsere Halbierung der Fehler in der β -Asymmetrie A und entsprechend eine Halbierung des Fehlers in V_{ud} .

Neubestimmung von λ :

Die Größe λ ist selbst eine wichtige Größe bei der Berechnung semileptonischer Prozesse und verdient deshalb der gesonderten Betrachtung. Aus der Größe λ werden nämlich die in den Urknallrechnungen zur Nukleosynthese benötigten schwachen Wirkungsquerschnitte, wie z.B. die Neutrino-Querschnitte, berechnet. Neben kosmologischen Fragestellungen wird λ bei Rechnungen zur Neutronensternbildung oder zur Eichung von Neutrinodetektoren herangezogen. Auch die bei Bestimmung des solaren Neutrinoflusses oder die bei der Berechnung der Energieerzeugung in der Sonne herangezogenen schwachen Wirkungsquerschnitte benötigen λ . λ kann man im Prinzip auch aus Gittereichtheorierechnungen der Quantenchromodynamik berechnen. Die Rechnungen haben noch Ungenauigkeiten von ca. 30% und weichen auch um diese Größenordnung vom Wert aus der Neutronenphysik ab.

Die genaueste Bestimmung von λ erfolgt aus unseren β -Zerfallsmessungen zur Korrelation A , wobei folgender Zusammenhang zwischen A und λ besteht:

$$A = -2l(l+1)/(1+3l^2).$$

Der neue, oben genannte Wert beträgt $\lambda = -1.2739 \pm 0.0009$. Dieser Wert ist das kombinierte Ergebnis der PERKEO-Messungen ab 1997. Er weicht von früheren Werten der Particle Data Group ab, aber wir sind der Meinung, dass unser Wert sehr zuverlässig ist. Wie man aus der Abb. 2 erkennen kann, wurden bei der Messung der β -Korrelation A die bis 1997 üblichen Korrekturen von bis zu 30 % um einen Faktor 90 und die Messfehler um einen Faktor 5 reduziert. Der neueste Wert der PERKEO-Kollaboration für die β -Asymmetrie ist $A = -0.1194 \pm 0.0004$. Die in diesem Experiment größte Korrektur von 0.3% liegt in der Bestimmung des Polarisationsgrades der Neutronen.

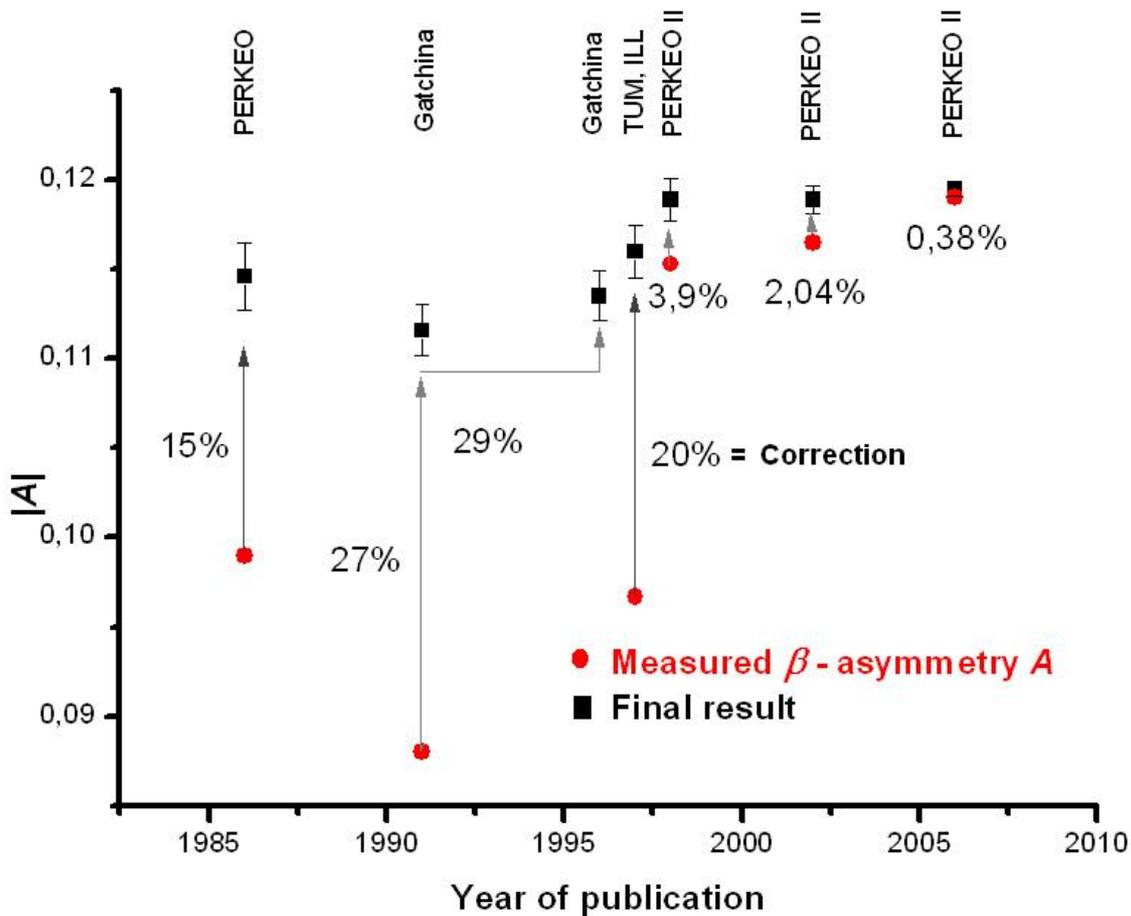


Abb. 2: Gemessene β -Asymmetrie A und Endergebnis. In früheren Experimenten waren große Korrekturen nötig.

Die Neutrino-Asymmetrie im Neutronenzerfall:

Die Ergebnisse der Messung des Neutronenzerfalls-Korrelationskoeffizienten B aus der letzten Förderperiode haben wir in der Zeitschrift *Physics Letters B* veröffentlicht [Ref. #16]. Da wir mit dieser Messung den Welt-Mittelwert für B nicht unterbieten konnten, haben wir die Messung am ILL in Grenoble wiederholt. Die Messungen sind noch nicht vollständig ausgewertet. Koeffizient B ist vor allem empfindlich auf die Masse eines möglichen rechtshändigen W -Boson.

Dagegen haben wir die Messung des Koeffizienten a nicht aufgegriffen. Diese Größe wird von der Münchner und Mainzer Arbeitsgruppe mit dem Spektrometer a SPECT vermessen.

Quantisierung von Teilchen im Schwerfeld der Erde:

Nach dem Nachweis der Quantisierung von Neutronen im Schwerfeld der Erde mit Hilfe von Transmissionsmessungen bei variabler Absorberhöhe in der letzten Förderperiode, haben wir nun die Dichteverteilung der Neutronen oberhalb des Spiegels mit hochauflösenden Neutronendetektoren vermessen. Der Nachweis der Neutronen erfolgt durch Spurenbildung in Spurenplatten vom Typ CR39 nach Neutronenspaltung in einer dünnen Uranschicht oder nach Neutroneneinfang in einer Borschicht. Die Beschichtung mit isotonenreinem ^{10}B ist 100 nm dick, und die Technik dazu wurde in unserem Projekt „schneller hochauflösender Neutronendetektor“ entwickelt. Wir können inzwischen den Verlauf der Spuren in CR39 verfolgen und den Wechselwirkungsort mit dem Neutron auf ca. 1 μm genau angeben. Die Spuren der Alphateilchen sind ca. 6 μm und der Spaltfragmente ca. 20 μm lang. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Zu sehen ist die quantenmechanische Dichteverteilung der erlaubten Zustände. Die quantenmechanische Dichteverteilung beschreibt mit $\chi^2 = 138/(124\text{DoF})$ die Daten wesentlich besser als die klassische Theorie ($\chi^2 = 215/125\text{DoF}$), die von Neutronen als Massepunkte ausgeht. Der Anstieg der Dichteverteilung oberhalb 80 μm zeigt die gute Ortsauflösung des Detektors.

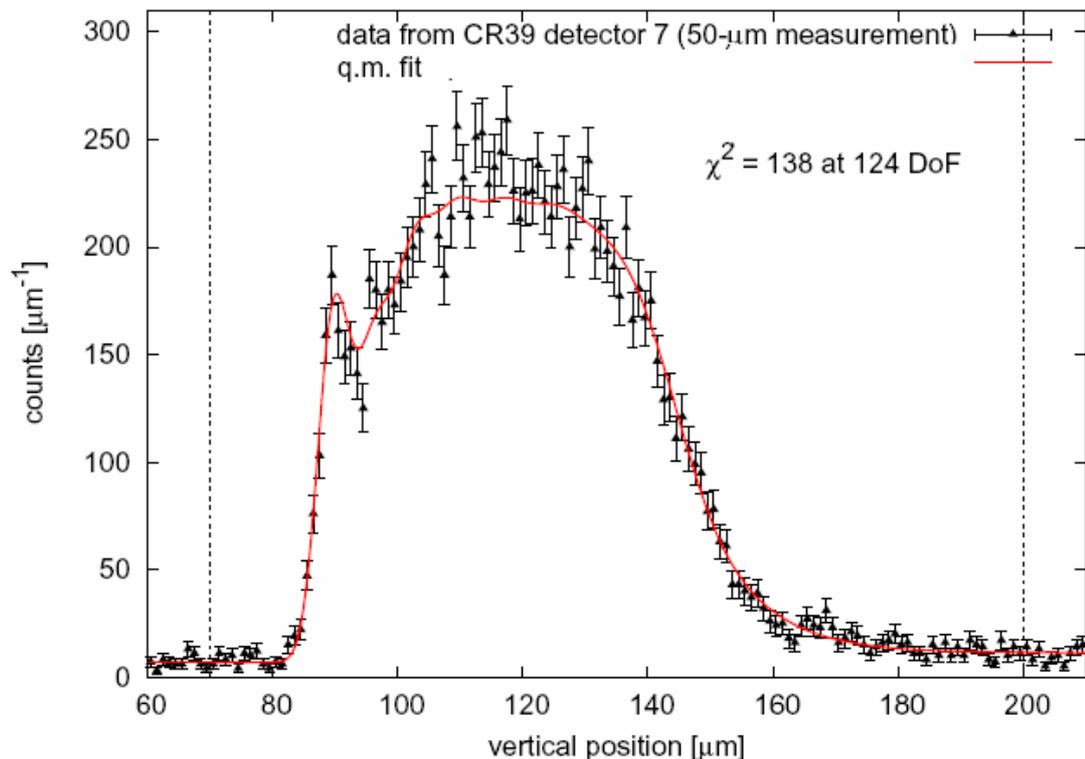


Abb. 3: quantenmechanische Neutrondichteverteilung, gemessen mit unserem ortsauflösendem Neutronendetektor mit Ortsauflösung von 1,5 μm (Diplomarbeit C. Krantz, Heidelberg 2006).

Forschritte wurden auch bei der Beschreibung des Neutronabsorbers erzielt und in einer gemeinsamen Veröffentlichung in der Zeitschrift *Phy. Rev. D* [Ref. #18] dargelegt.

B. Technische Neuentwicklungen

Entwicklung eines neuen Neutronen- β -Zerfallsspektrometers.

Mit dem Instrument PERKEO II sind wir inzwischen an die technischen Grenzen gestoßen. Die systematischen Fehler zur β -Asymmetrie A liegen nach Tab. 1 (Polarisationsgrad, zur Spinfliprate, Detektorauflösungsfunktion und Untergrund) bei 0.1%. Die Messung ist mit einem Beitrag von 0.26% statistisch limitiert. Deshalb haben wir ein neues Spektrometer entwickelt, das die obengenannten Fehlerquellen des alten Spektrometers PERKEO sowohl in statistischer als auch in systematischer Hinsicht vermeidet.

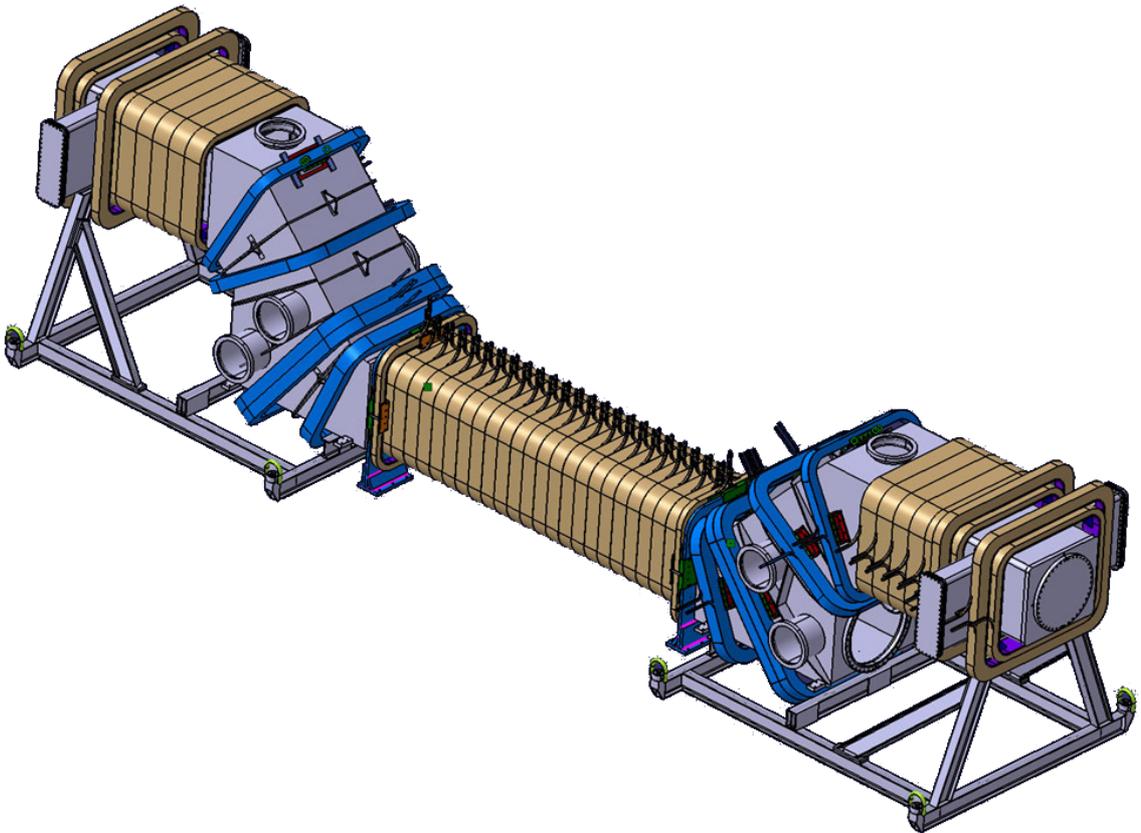


Abb. 4: Zentralbereich des neuentwickelten PERKEO III-Instruments

Abb. 4 zeigt die Spulenanordnung des neuen Instruments, das aus einem 3m langen Solenoid besteht, und es erlaubt, das Zerfallsvolumen um fast einen Faktor 10 zu vergrößern. Allerdings haben wir auf eine supraleitende Zentralspule verzichtet. Die Neutronenquelle des ILL war von August 2005 bis Juni 2006 wegen Umbauarbeiten geschlossen. Doch das Instrument ist fertiggestellt, am Physikalischen Institut der Universität Heidelberg aufgebaut und wird ab Oktober 2006 zur Messung der Neutronzerfallparameter am ILL in Grenoble eingesetzt.

Insgesamt ist die Arbeitsgruppe mit ihren Projekten innerhalb des vorgesehenen Zeit- und Geldrahmens wie geplant voran gekommen.

Publikationen 2003-2006

1. Combination of neutron spin echo with resonance spin echo using longitudinal magnetic field geometry Wolfgang Häussler, Ulrich Schmidt, Georg Ehlers, Ferenc Mezei J. Chem. Phys. (2003).
2. H. Abele et al., Quantum States of Neutrons in the Gravitational Field and Limits for Non-Newtonian Interaction in the Range between 1 μm and 10 μm , in “*Quantum Gravity – from Theory to Experimental Search*”, Lecture Notes in Physics 631, ed. C. Lämmerzahl, (Springer, Berlin Heidelberg, 2003).
3. H. Abele, Neutron β -decay and the quark-mixing CKM-matrix, ”*INTERACTIONS AND UNIFIED THEORIES*”, Proc. XXXVIIth Rencontres de Moriond, Les Arcs March 9th to 16th, 2002, J. T. Vân, C. Barthelemy (eds.), (The Gioi Publishers, Vietnam 2003), also hep-ex/0206058.
4. H. Abele, feature article, Gravitation at a Micron and Mixing of Quarks, Nuclear Physics News International (NPNI), 13 24 (2003).
5. H. Abele, L. Corradi, P. Herczeg, I. Khriplovich, O. Naviliat, N. Severijns, L. Simons, C. Weinheimer, H.W. Wilshut, Fundamental Interactions, NuPECC Long Range Plan Working Group, 2003.
6. H. Abele, The Unitarity problem of the CKM matrix, In: *proceedings of workshop “QUARK MIXING, CKM UNITARITY*”, ed. by H. Abele and D. Mund, Heidelberg, September 19 – 20, 2002, (Mattes-Verlag, Heidelberg, 2003).
7. Limits on non-Newtonian gravity in the range between 1 micron and 10 microns, H. Abele, ”*GRAVITATIONAL WAVES AND EXPERIMENTAL GRAVITY*”, Proc. XXXVIIth Rencontres de Moriond, Les Arcs March 22nd to 29th, 2003, J. T. Vân, J. Dumarchez (eds.), The GIOI Publishers, Vietnam, 2004
8. H. Abele, Neutron β -decay and the Standard Model, Nuclear Physics A 721 182c (2003).
9. V. Nesvizhevsky, H. Börner, A. Gagarski, A. Petukhov, G. Petrov, H. Abele, S. Baeßler, G. Divkovic, F. Rueß, T. Stoferle, A. Westphal, A. Strelkov, K. Protasov, A. Voronin, Measurement of quantum states of neutrons in the Earth’s gravitational field, Phys. Rev. D 67 102002 (2003).
10. H. Abele, Schwerkraft, Quantenzustände und “hüpfende” Neutronen, Ruperto Carola, Forschungsmagazin der Universität Heidelberg, 2/2003, (Universitätsverlag Winter GmbH, Heidelberg, 2003).

11. V. Nesvizhevsky, A. Petoukhov, H. Börner, A. Voronin, A. Westphal, K. Protasov, S. Baeßler, H. Abele, A. Gagarski, Response to the Comment on “Measurement of quantum states of neutrons in the Earth’s gravitational field”, *Phys. Rev. D*, 68 108702-1-3 (2003).
12. H. Abele, E. Barberio, D. Dubbers, F. Glück, J.C. Hardy, W.J. Marciano, A. Serebrov, N. Severijns, Quark Mixing, CKM Unitarity, *Eur. Phys. J C* 33 1 (2004).
13. B. Schillinger, J. Brunner, G. Frei, R. Gähler, A. Gildemeister, A. Hillenbach, H. Abele, E. Lehmann, P. Vontobel, Detection systems for short-time stroboscopic neutron imaging and measurements on a rotating engine, *Nucl. Instr. & Meth* 542 142 (2005).
14. A. Hillenbach, M. Engelhardt, H. Abele, R. Gähler, High flux neutron imaging for high speed radiography, dynamic tomography and strongly absorbing materials, *Nucl. Instr. & Meth A* 542 116 (2005).
15. V.V. Nesvizhevsky, A.K. Petukhov, H.G. Börner, T.A. Baranova, A.M. Gagarski, G.A. Petrov, K.V. Protasov, A. Yu Voronin, S. Baeßler, H. Abele, A. Westphal, L. Lucovac, Study of neutron quantum states, in the gravity field, *Eur. Phys. J. C* 40 479 (2005).
16. M. Kreuz, T. Soldner, S. Baeßler, B. Brand, F. Glück, U. Mayer, D. Mund, V. Nesvizhevsky, A. Petoukhov, C. Plonka, J. Reich, C. Vogel, H. Abele, A Measurement of the Antineutrino Asymmetry B in Free Neutron Decay, *Phys. Lett. B* 619 263 (2005).
17. H. Abele, S. Baeßler, M. Deissenroth, F. Glück, J. Krempel, M. Kreuz, B. Märkisch, D. Mund, M. Schumann, T. Soldner, The Beta-, Neutrino- and Proton-Asymmetry in Neutron β -Decay, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 110 377 (2005).
18. A. Yu. Voronin, H. Abele, S. Baessler, V.V. Nesvizhevsky, A.K. Petukhov, K.V. Protasov, A. Westphal, Quantum motion of a neutron in a waveguide in the gravitational field, *Phys. Rev. D* 73 44029-1-20 (2006).
19. H. Abele, D. Dubbers, H. Haese, M. Klein, A. Knoepfler, M. Kreuz, T. Lauer, B. Märkisch, D. Mund, V. Nesvizhevsky, A. Petoukhov, C. Schmidt, M. Schumann, T. Soldner, Characterization of a ballistic supermirror neutron guide, arXiv:nucl-ex/0510072, submitted to *Nucl. Inst. & Meth. A* 562 407 (2006).
20. H. Abele, The Neutron. Its Properties and Basic Interactions, submitted to *Progress in Particle and Nuclear Physics*.