

Das Neutron in Kern-, Teilchen - und Astrophysik

K. Schreckenbach

Physik Department E21 und FRM-II
TU München

Was ich Ihnen erzählen möchte:

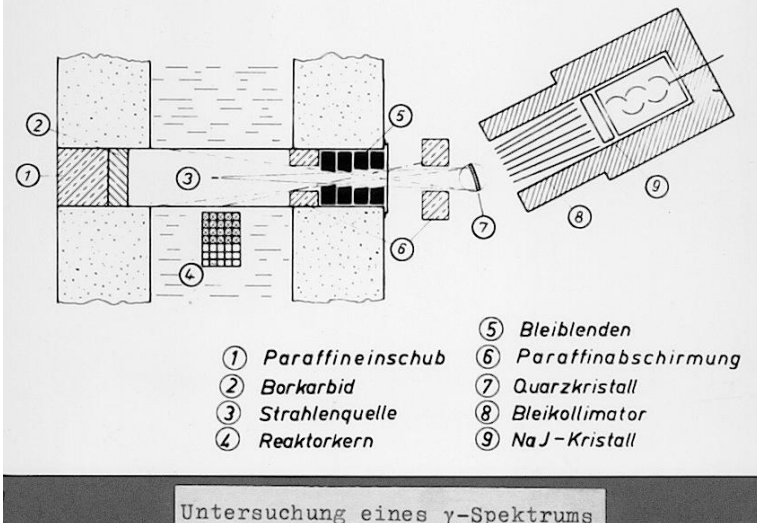
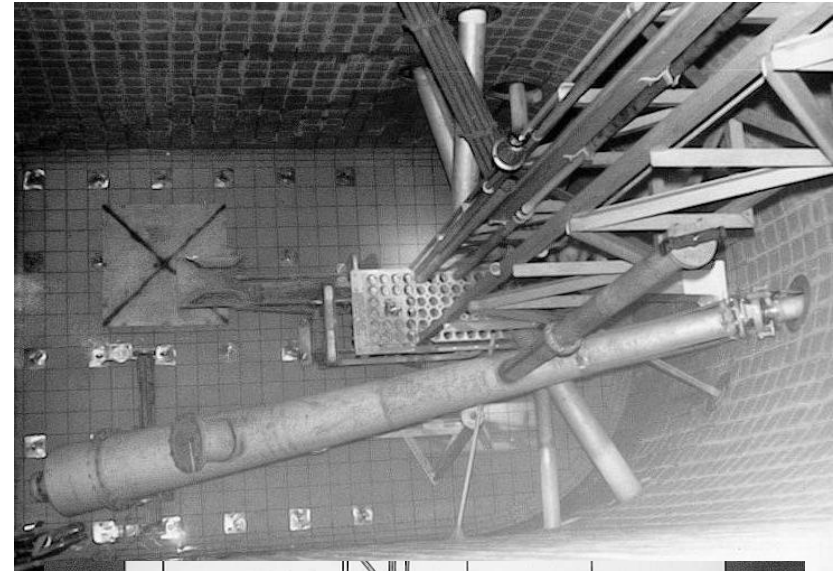
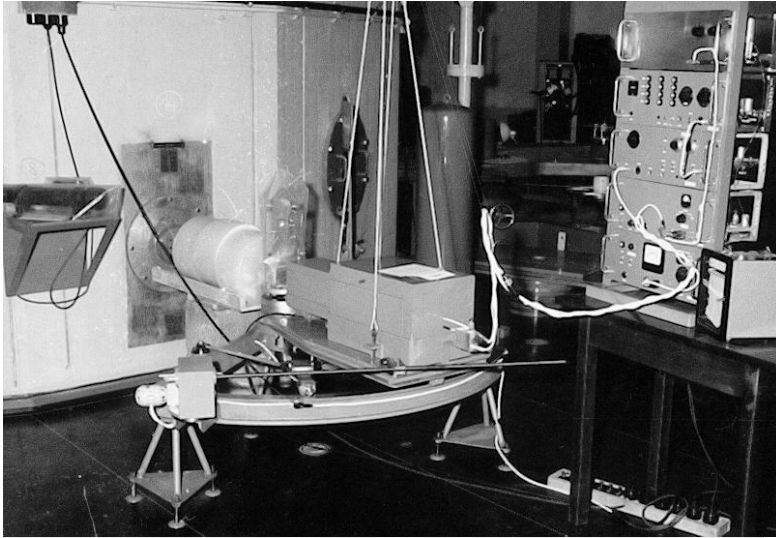
- Ideenquelle FRM
mit Bezug auf Experimente am FRM II
- Experimente zur Physik des Atomkernes damals und heute
- Astrophysik und das Teilchen Neutron -> aktuelle Messungen am Neutron
- Nicht zu vergessen: Spin-offs und praktische Anwendungen am FRM II



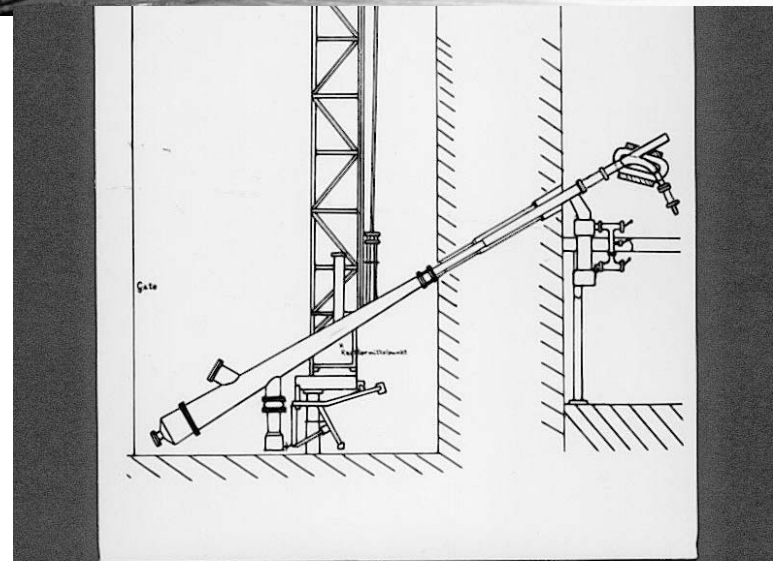
1961

'In-Pile Anordnungen' von Experimenten am FRM: Einfang von Neutronen im Atomkern

In-Pile Quellen: Eine Spezialität der Heinz Maier-Leibnitz Schule

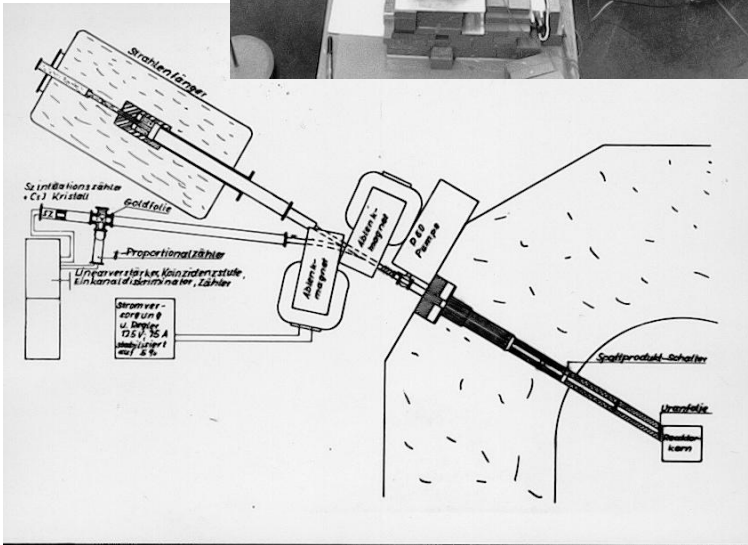
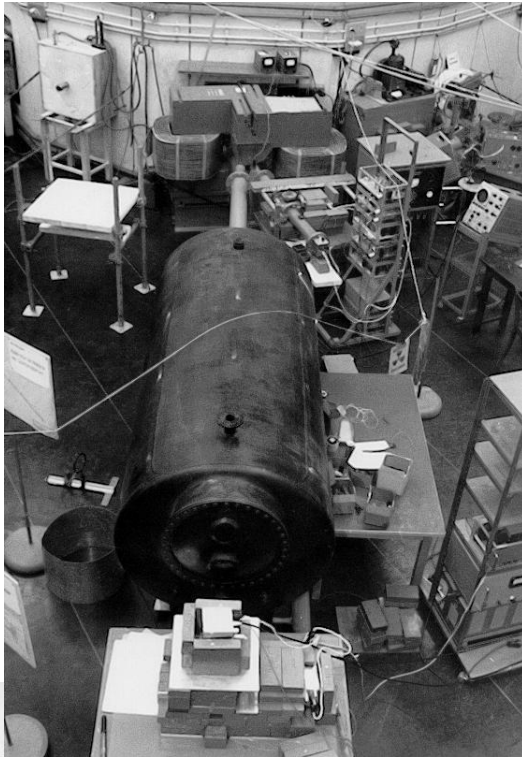


Gammastrahlung aus A (n,γ) ($A+1$)



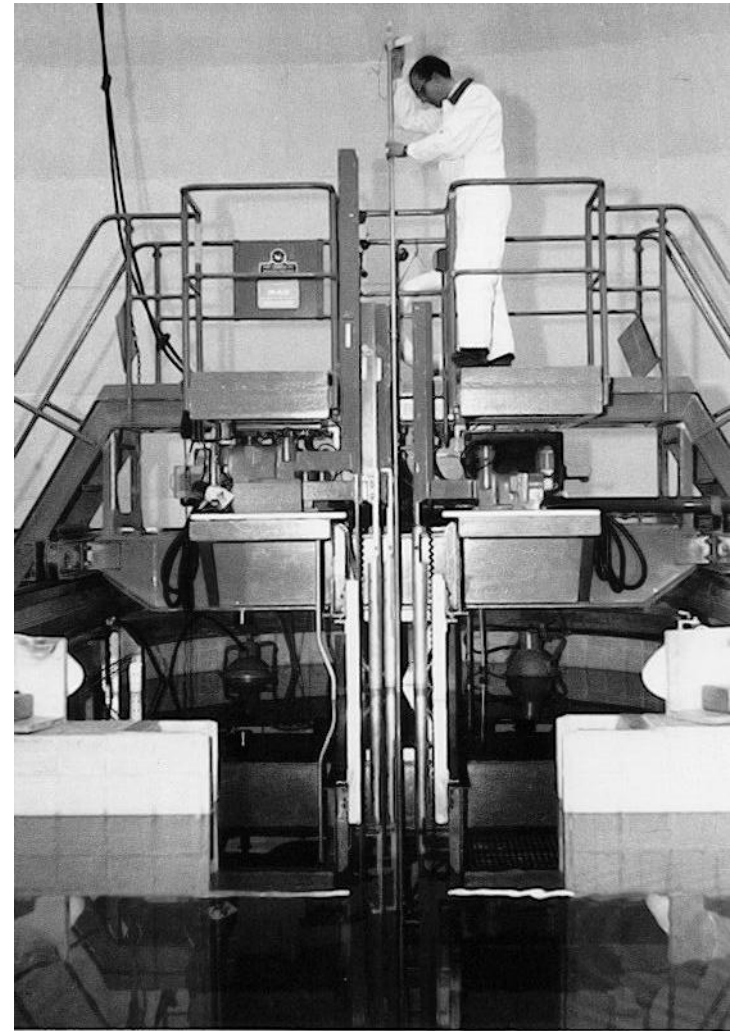
Elektronen aus A (n,e^-) ($A+1$)

FRM 1965



Anordnung zur Untersuchung von Spaltprodukten (Schema)

Spaltprodukte aus ^{235}U (n,f)



Einsetzen der Bestrahlungszelle
in den Reaktor

Neutroneneinfang zur
Isotopenproduktion und Elementanalyse

Neutronen-Einfangreaktionen werden am FRM II für vielfältige Anwendungen genutzt:

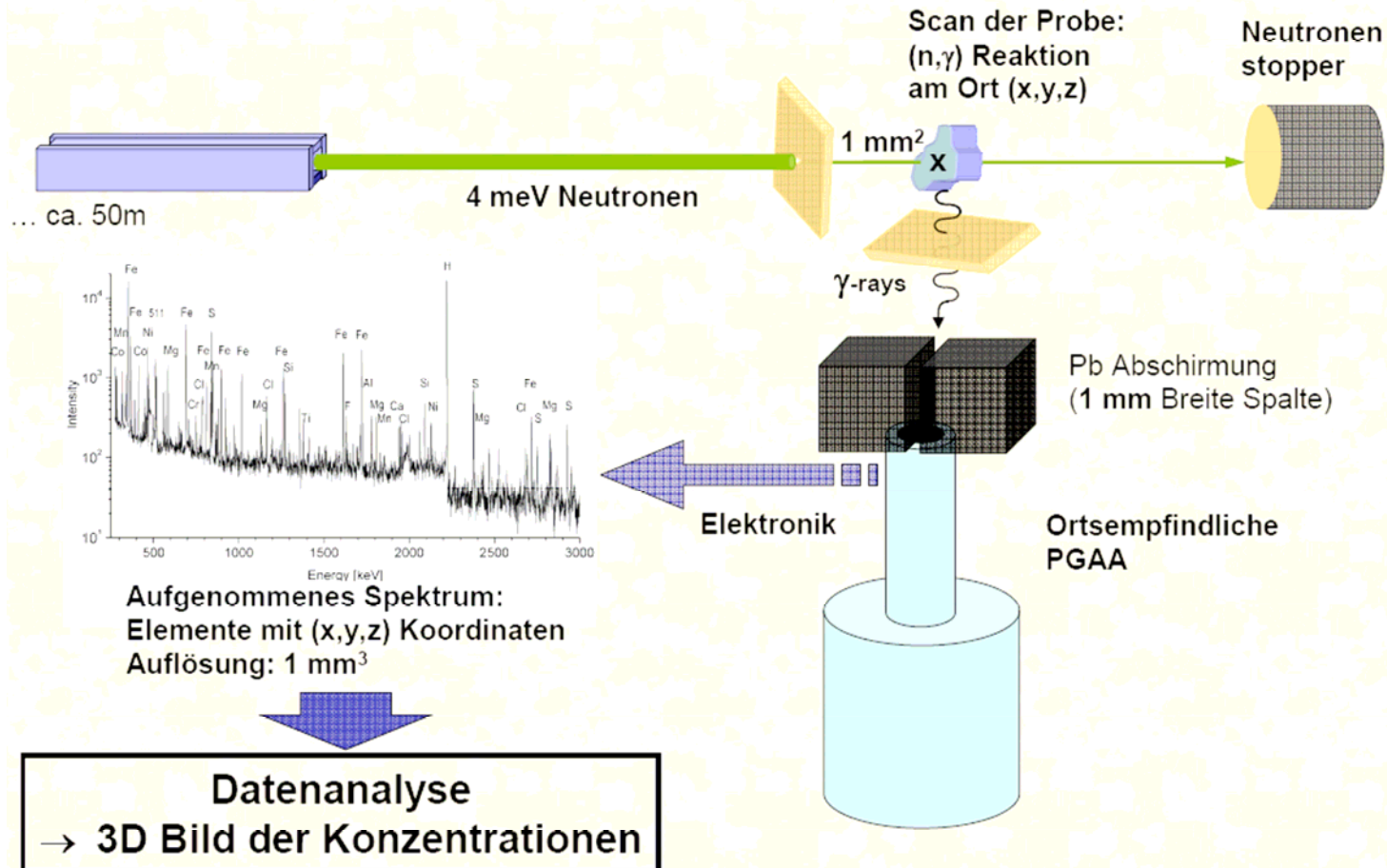
Beispiele:

- Zerstörungsfreie Analyse auf (Spuren)Elemente:
A + n -> (A+1) + Gamma (prompt) PGAA Prompt Gamma Aktivierungs-Analyse
-> (A+1) -> Betazerfall + Gamma NAA Neutronen Aktivierungs-Analyse
Empfindlichkeit: Anteile von % herab bis 10^{-15} (Rekord für NAA)
- Produktion von Radiopharmaka (Beispiel: Rhenium 188)
- Transmutation von Silizium in Phosphor für die Halbleiterindustrie
-



PGAA Anlage am FRM II (**P**rompt **G**amma **A**ktivierungs-**A**nalyse)
P. Kudejova et al, IKP Uni Köln, RCM der TUM, Inst. of Isotopes Budapest

PGAI Imaging: Ortsempfindliche Elementare-Konzentrationen



Anwendungen (PGAA, PGAI):

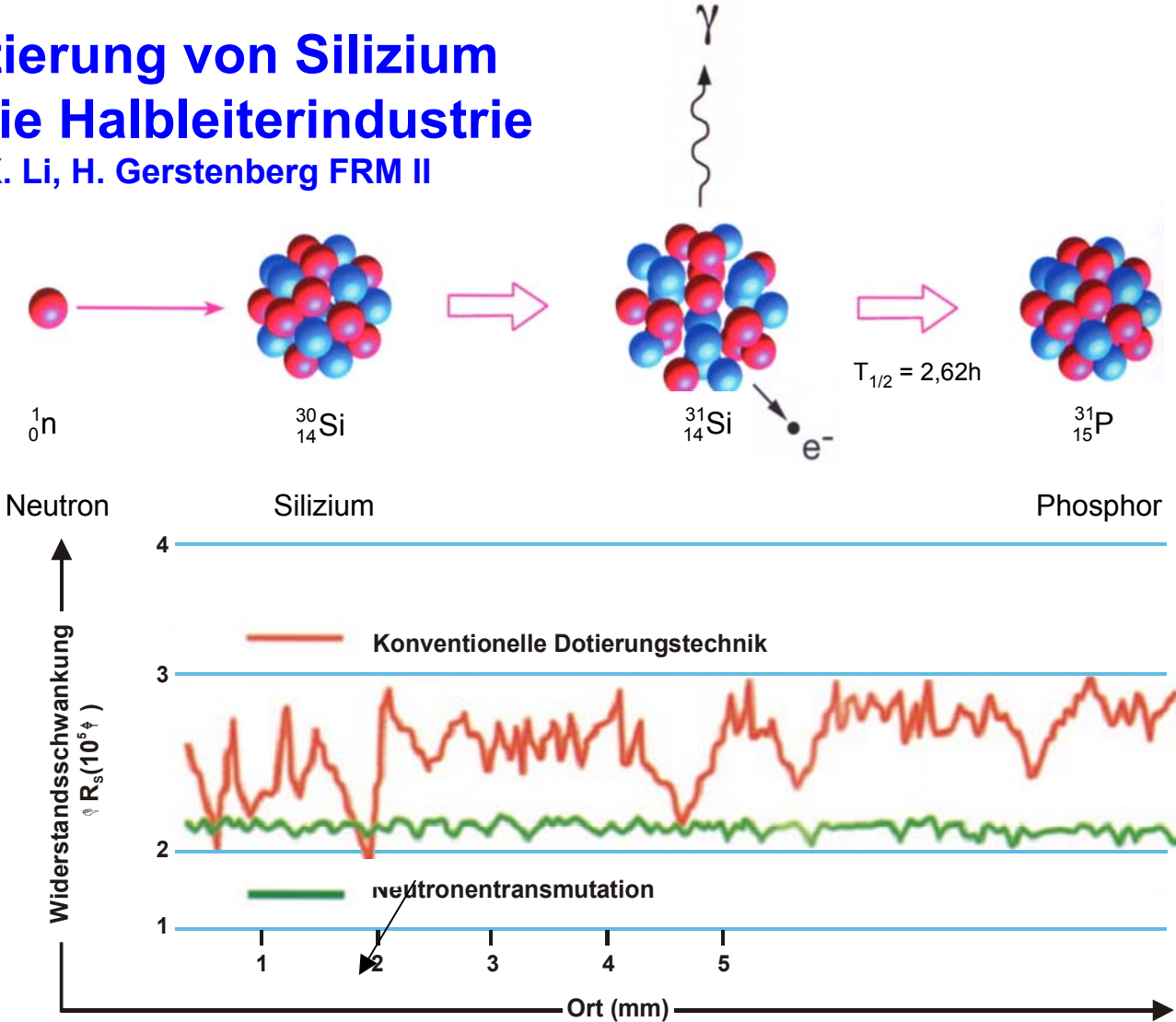
• chem. Zusammensetzung von Proben im % - ppb (ng/g) Bereich: Archäologie, Geochemie, Kosmochemie, Industrie, Kernindustrie, Biologie, Medizin, ...

H, B, Si, S, P, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cd, Sm, Gd, Hg...

Einige In-Pile Anordnungen am FRM II

Dotierung von Silizium für die Halbleiterindustrie

X. Li, H. Gerstenberg FRM II

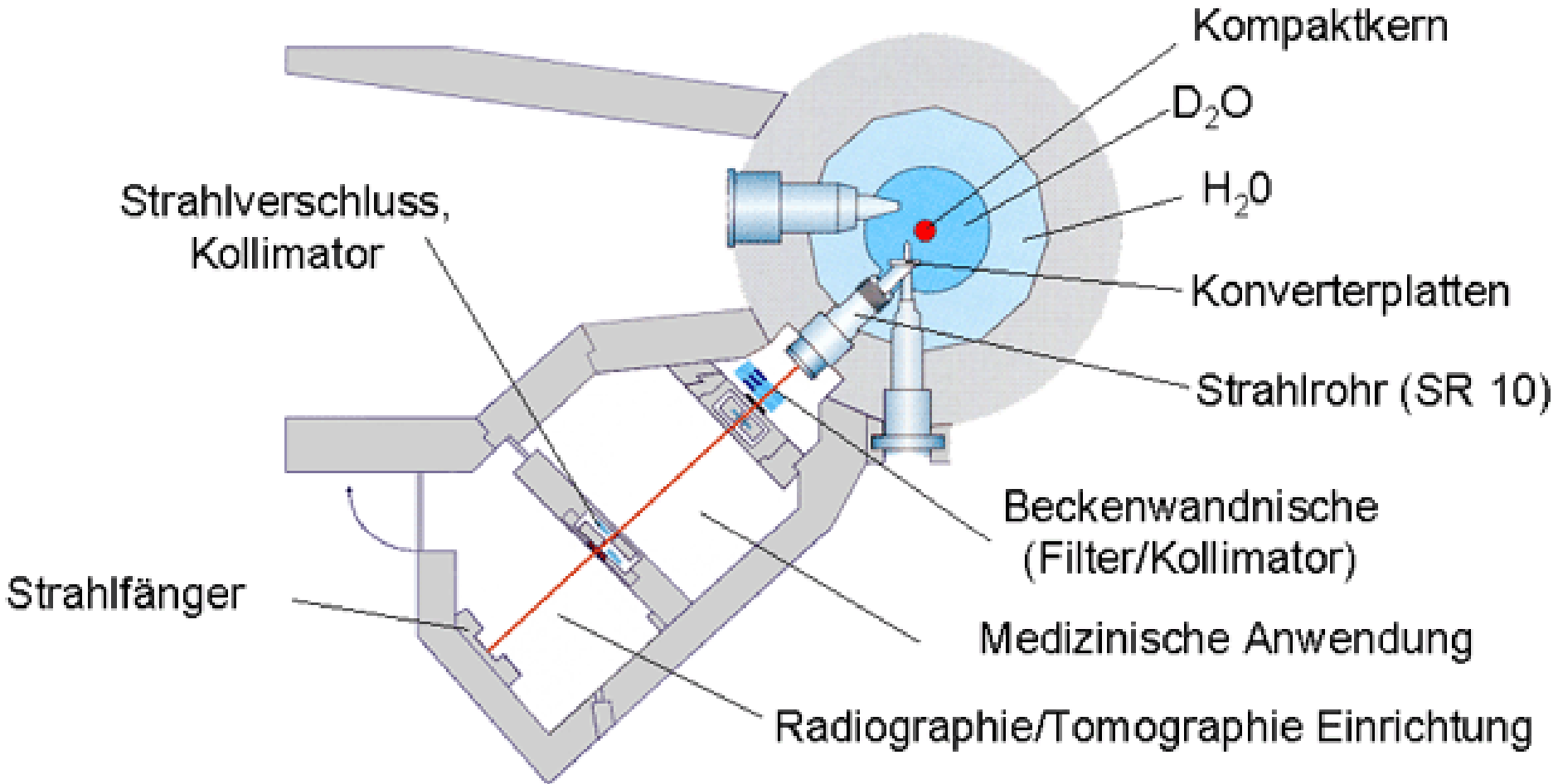


**In-Pile Dotierungsanlage FRM II: Bis zu 8 inch (20 cm) Siliziumkristalle
Typische Bestrahlungszeit 8 h; Kapazität am FRM II ca 10 t/Jahr
Homogenität des Phosphors besser als 5%**

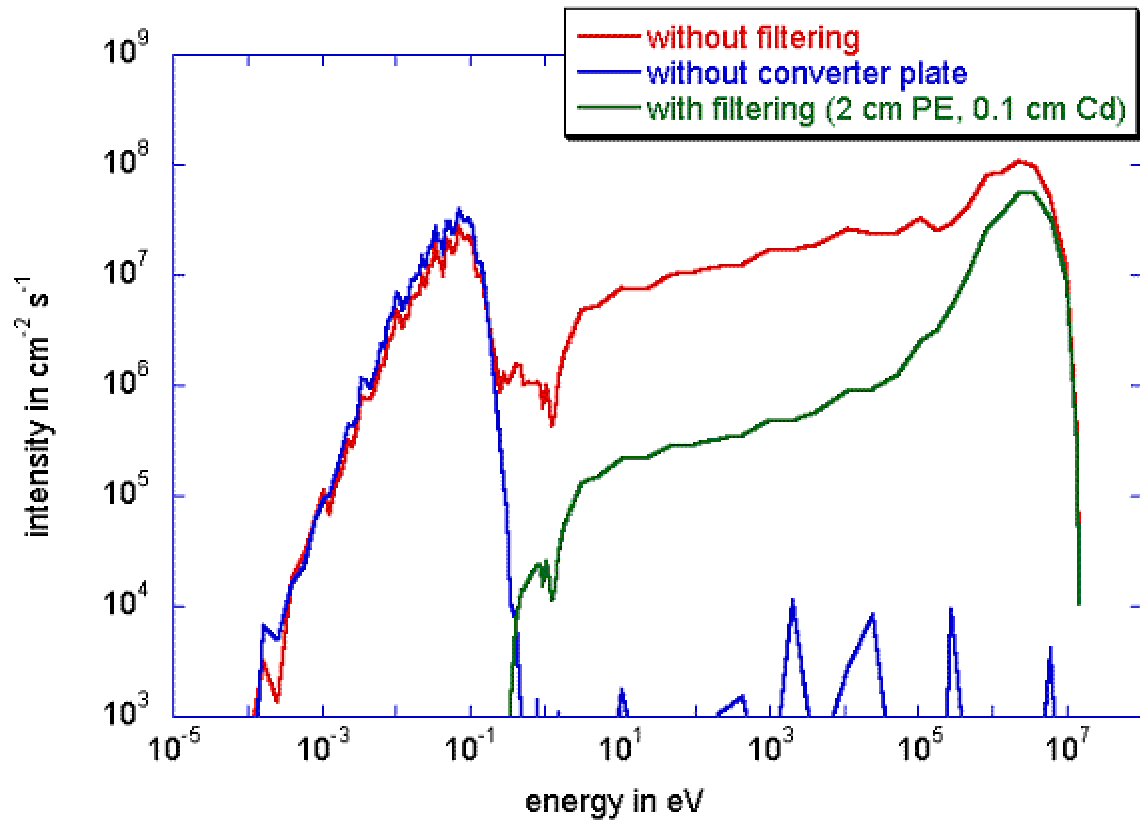
MEDAPP - Eine Fortentwicklung der RENT Anlage des FRM

für die Tumorthherapie mit schnellen Neutronen (indirekte Protonentherapie)

F.M. Wagner, W. Waschkowski (FRM II), B. Loeper, M. Molls (Klinikum.r.der Isar)



**Produktion von MeV Neutronen am FRM II
(Spaltneutronen aus U-235 ohne Moderation)**

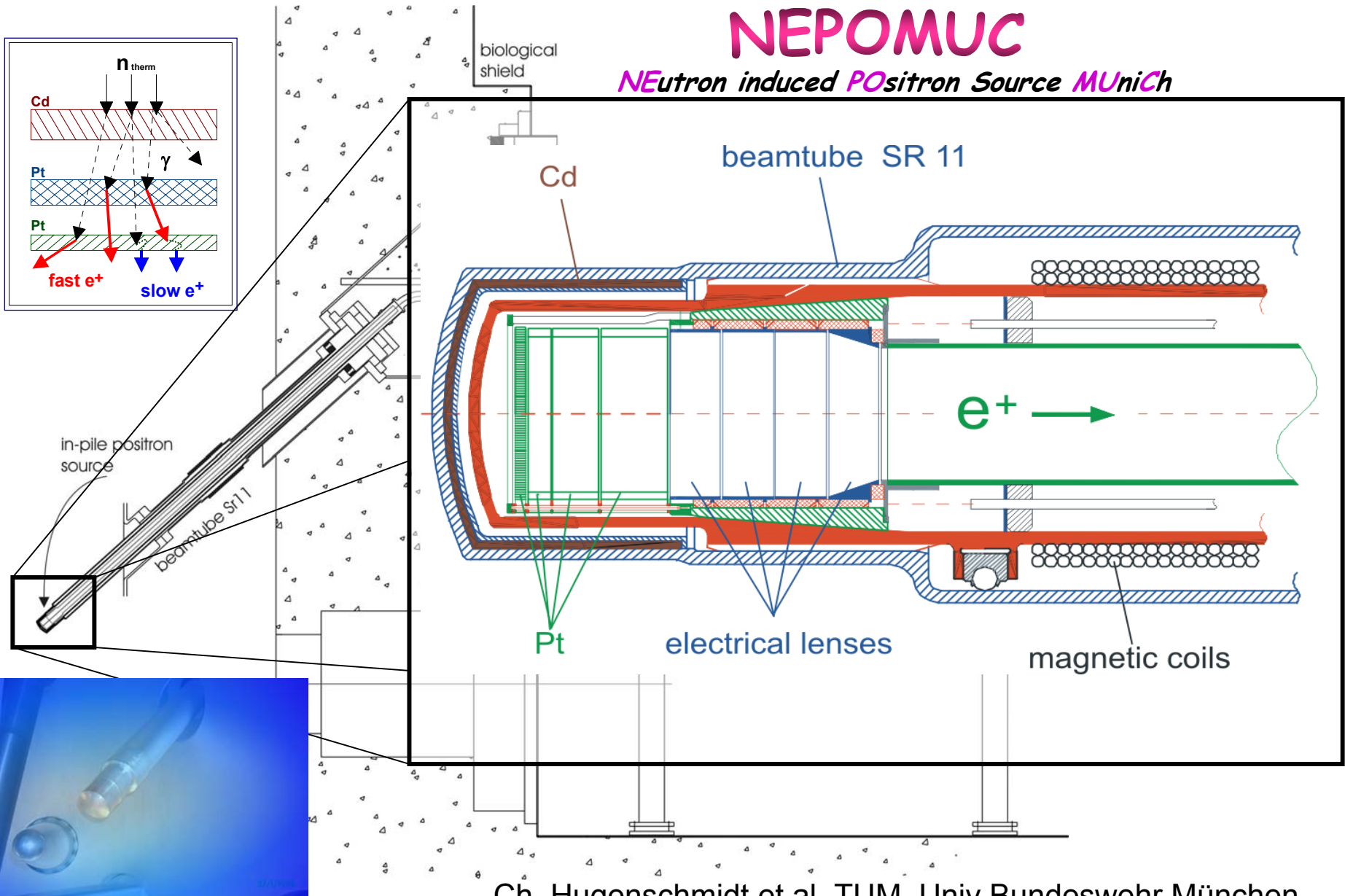
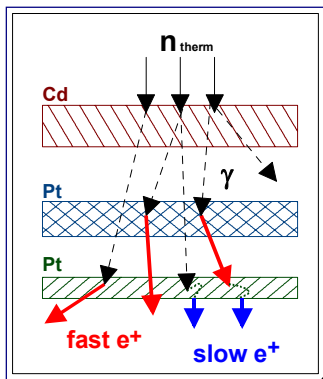


MEDAPP, FRM II Neutronenspektrum am Bestrahlungsort

Antimaterie Positron am FRM II

NEPOMUC

Neutron induced Positron Source MUnich





Experimentierplattform am NEPOMUC in der FRM II Experimentierhalle

MPI Heidelberg Apparatur zur Lebensdauer des ps^-

MPI Heidelberg 2005; seit 2007 am NEPOPMUC FRM II

theo. see e.g. A.M.Frolov, Phys.Rev.60(1999)2834

exp.: A.P. Mills et al $\Gamma=2.09\pm 0.09 \text{ ns}^{-1}$

PRL 46 (1981) 717; PRL 50 (1983) 671

F. Fleischer et al $\Gamma=2.089\pm 0.0015 \text{ ns}^{-1}$

PRL 96 (2006) 063401 (MPI Heidelberg)

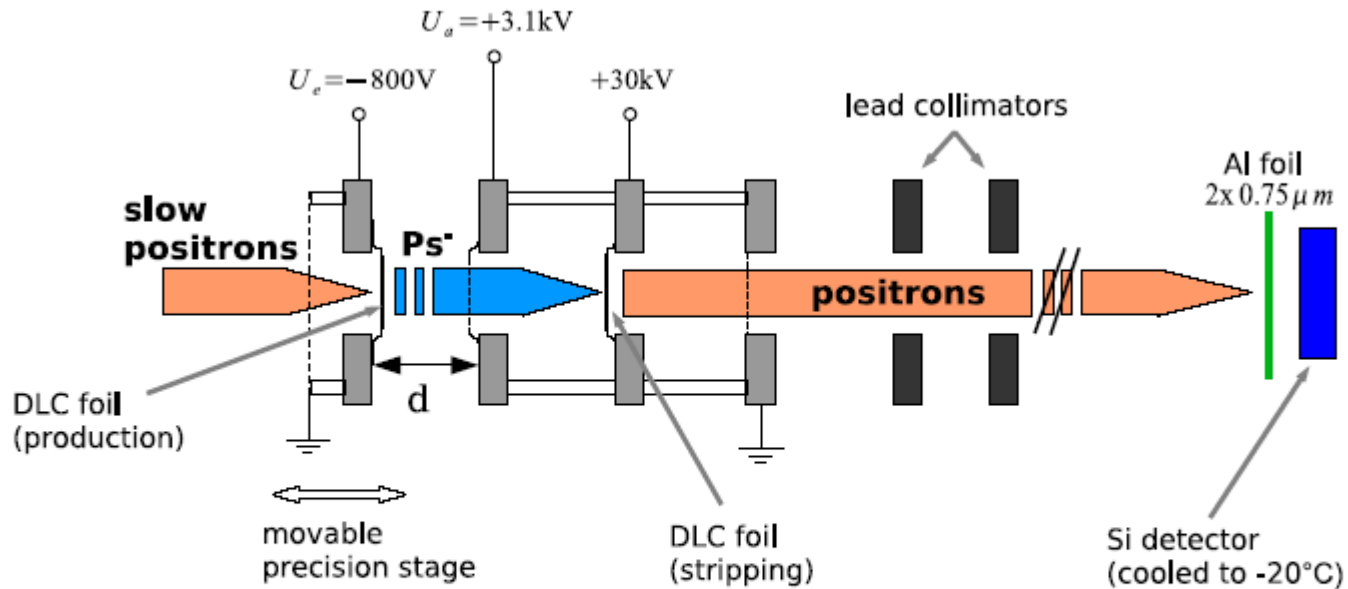
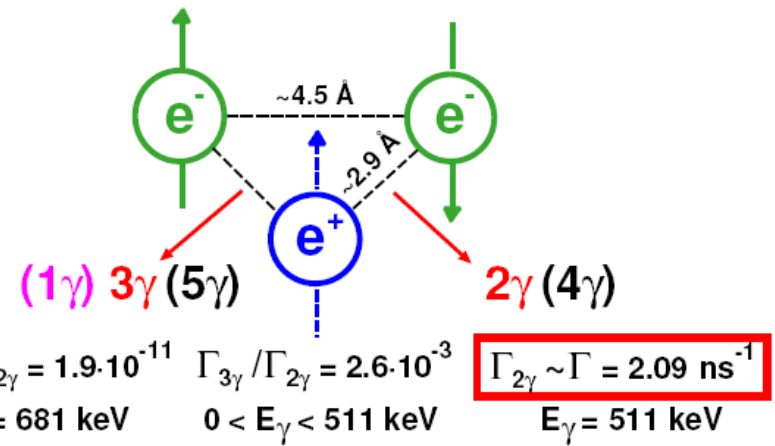
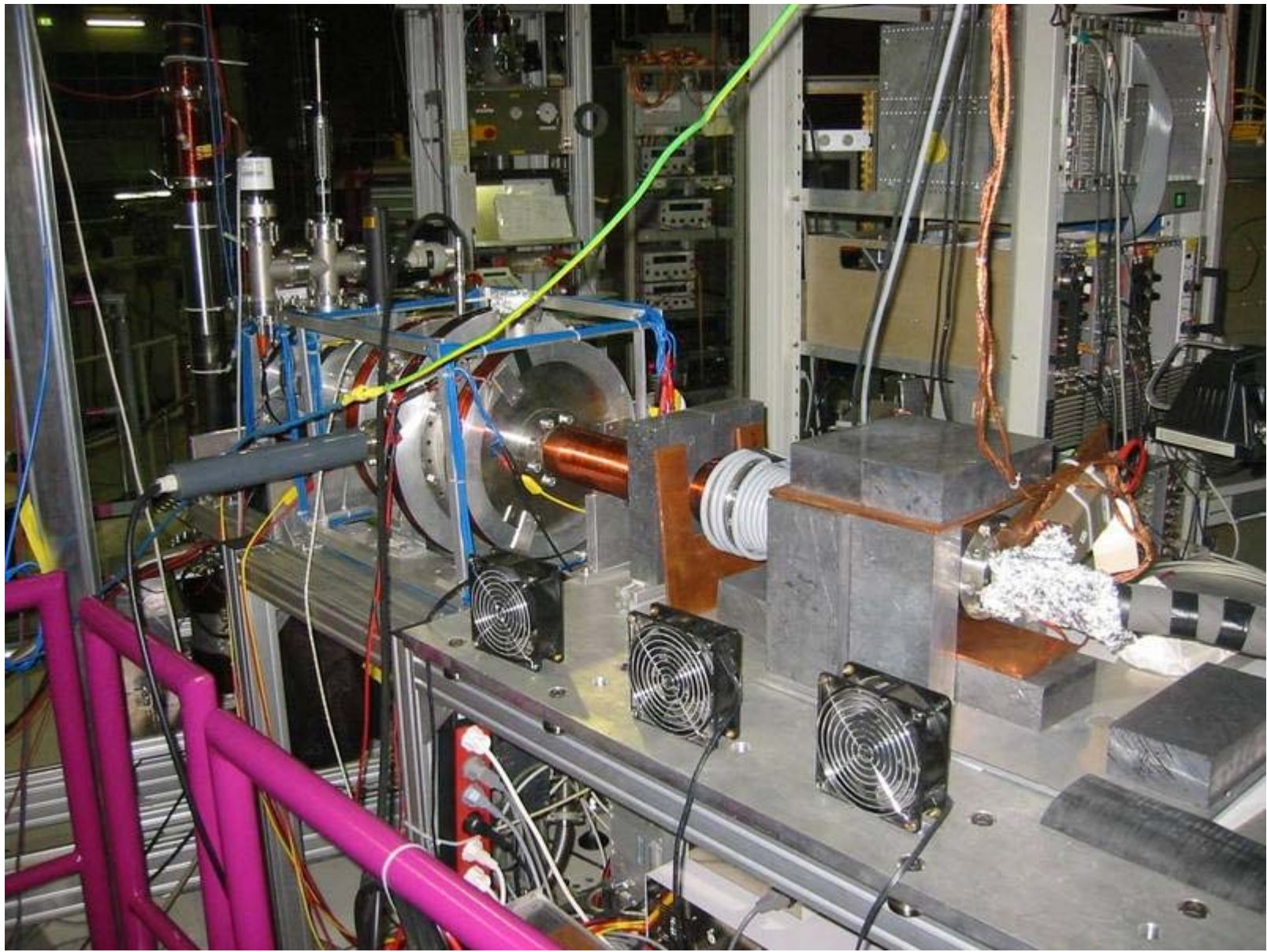


Fig. 1. Schematic view of the experimental arrangement to produce and detect Ps^- ions. The setup is surrounded by a solenoidal magnetic field of 100 – 130 G.

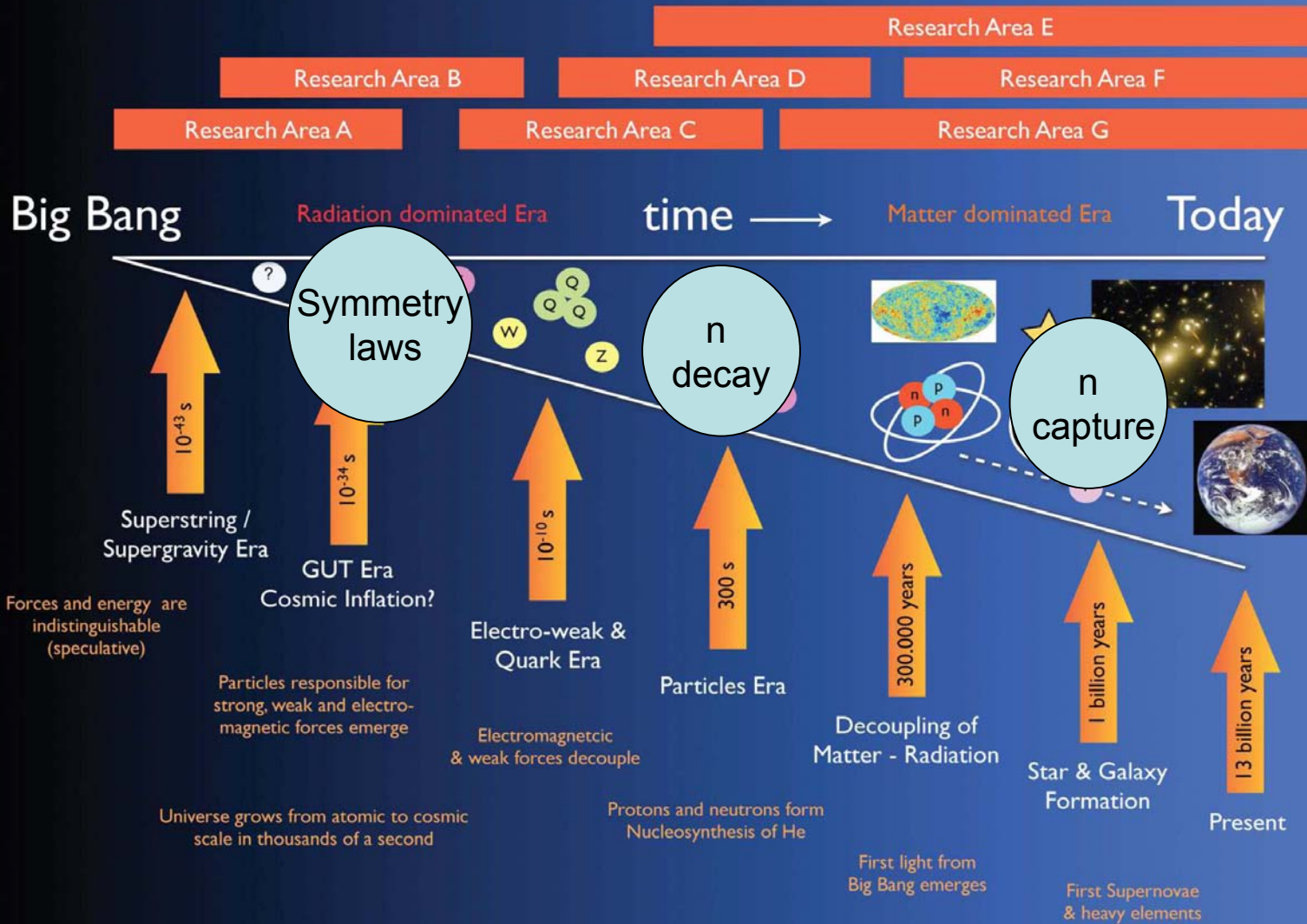


Heidelberger ps^- Apparatur am NEPOMUC

Zählrate 25x höher als beim Experiment in Heidelberg; Kollaboration Heidelberg, TUM, LMU , 2007

Teilchen- und Astrophysik mit Neutronen

The History of the Universe



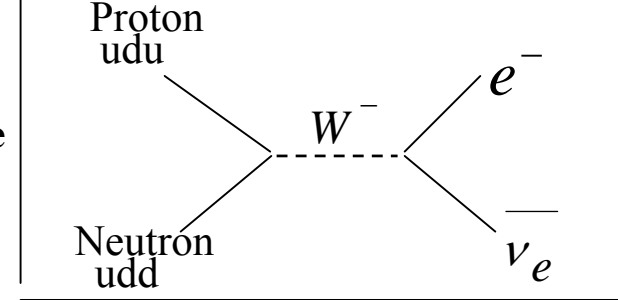
© Cluster of Excellence - Origin and Structure of the Universe

Aus Exzellenz Cluster „Origin and Structure of the Universe“
TUM/LMU 2006 (Sprecher S.Paul und A. Burkert)

Zerfall des freien Neutrons

Test fundamentaler Symmetrien
mit Neutronen

Zerfall des freien Neutrons : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
 Reaktionen lassen sich aus dem Kenntnis des
 Neutronenzerfalls berechnen (Feynmandiagramm!):



Energieerzeugung der Sonne: $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$
 $p + p + e^- \rightarrow d + \nu_e$

Nachweis von Sonnenneutrinos: $p + \nu_e \rightarrow n + e^+$
 $p + e^- \leftrightarrow n + \bar{\nu}_e$

erste Kernbausteine nach dem Urknall: $n + e^+ \leftrightarrow p + \bar{\nu}_e$
 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

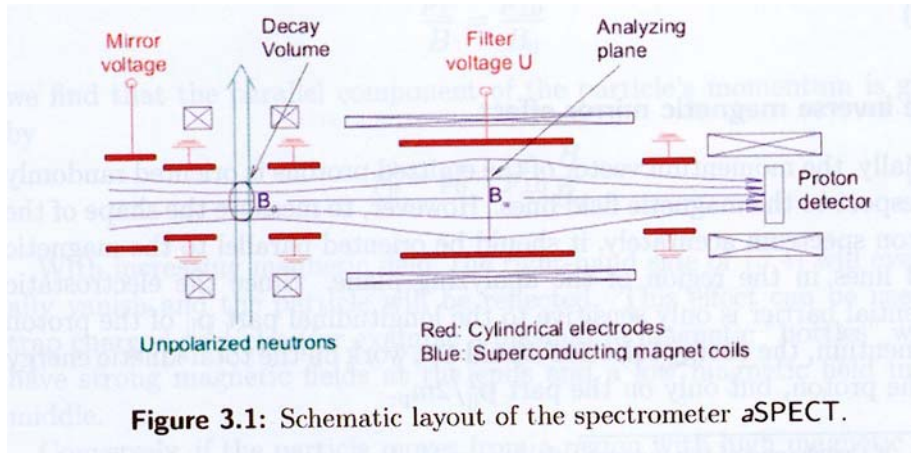
Bildung eines Neutronensterns $p + e^- \rightarrow n + \bar{\nu}_e$

Erzeugung des W Bosons an Protonenkollidern: $W \rightarrow e^- + \nu_e$

Tests zur schwachen WW

Symmetrien

Frage nach der **Zeitumkehrverletzung**, welche für die Erzeugung von Materie im Überschuss zur Antimaterie kurz nach dem Big-Bang wirksam sein musste (Symmetrie!).

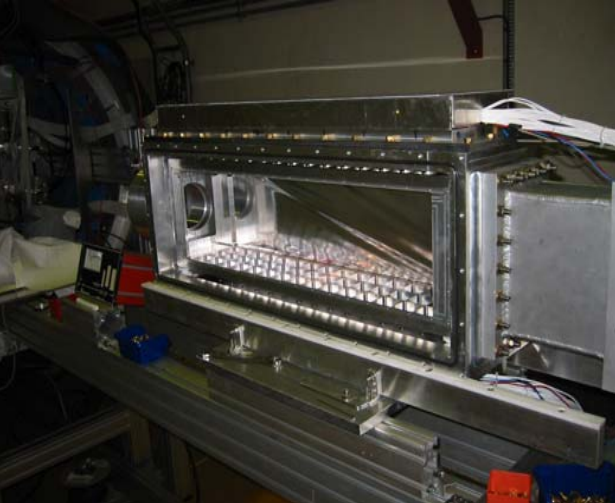


Analyse des Spektrums der Protonen aus dem Neutronenzerfall -> Symmetrien der schwachen Wechselwirkung

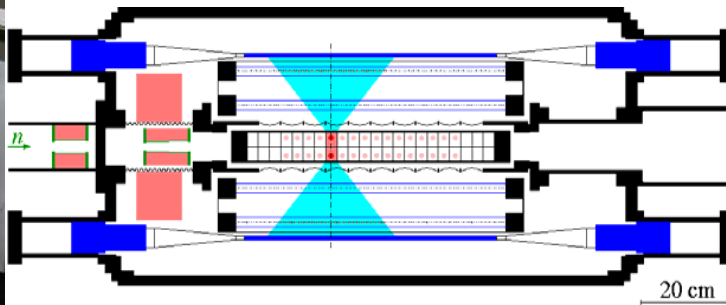
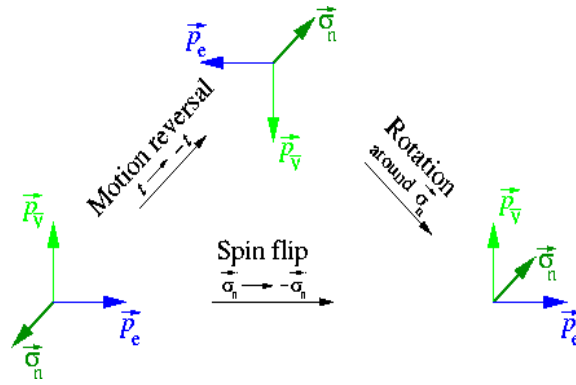
aSPECT am Kalten Neutronenstrahl MEPHISTO

O. Zimmer et al, Uni Mainz, TUM





Test der Zeitumkehrinvarianz im Neutronenzerfall mit TRINE (Winkelverteilung im Neutronenzerfall: Zeitumkehr \equiv Spinflip)



TRINE: Invariant innerhalb

$$D = (2.7 \pm 7.1) \cdot 10^{-4}$$

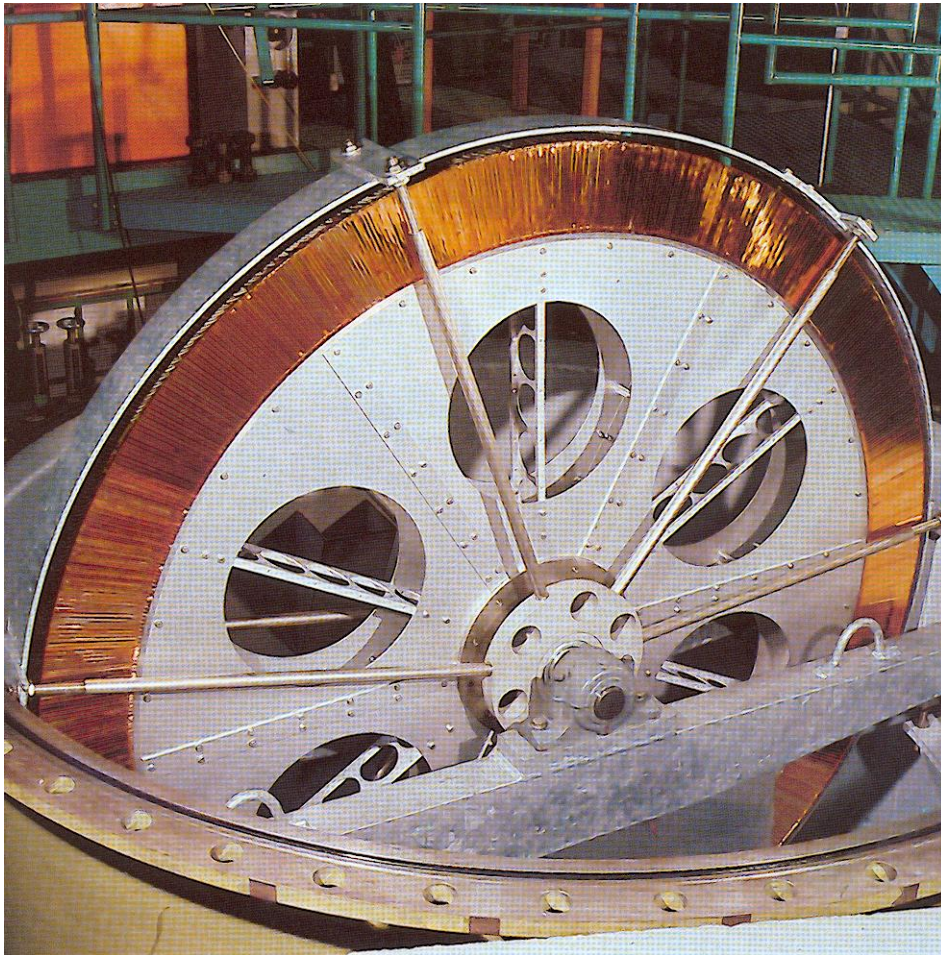
PLB 39(2004)234

TRINE Kollaboration

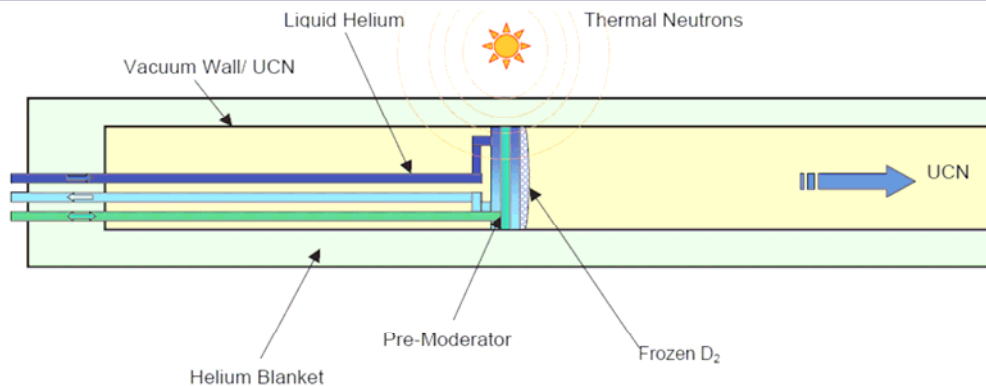
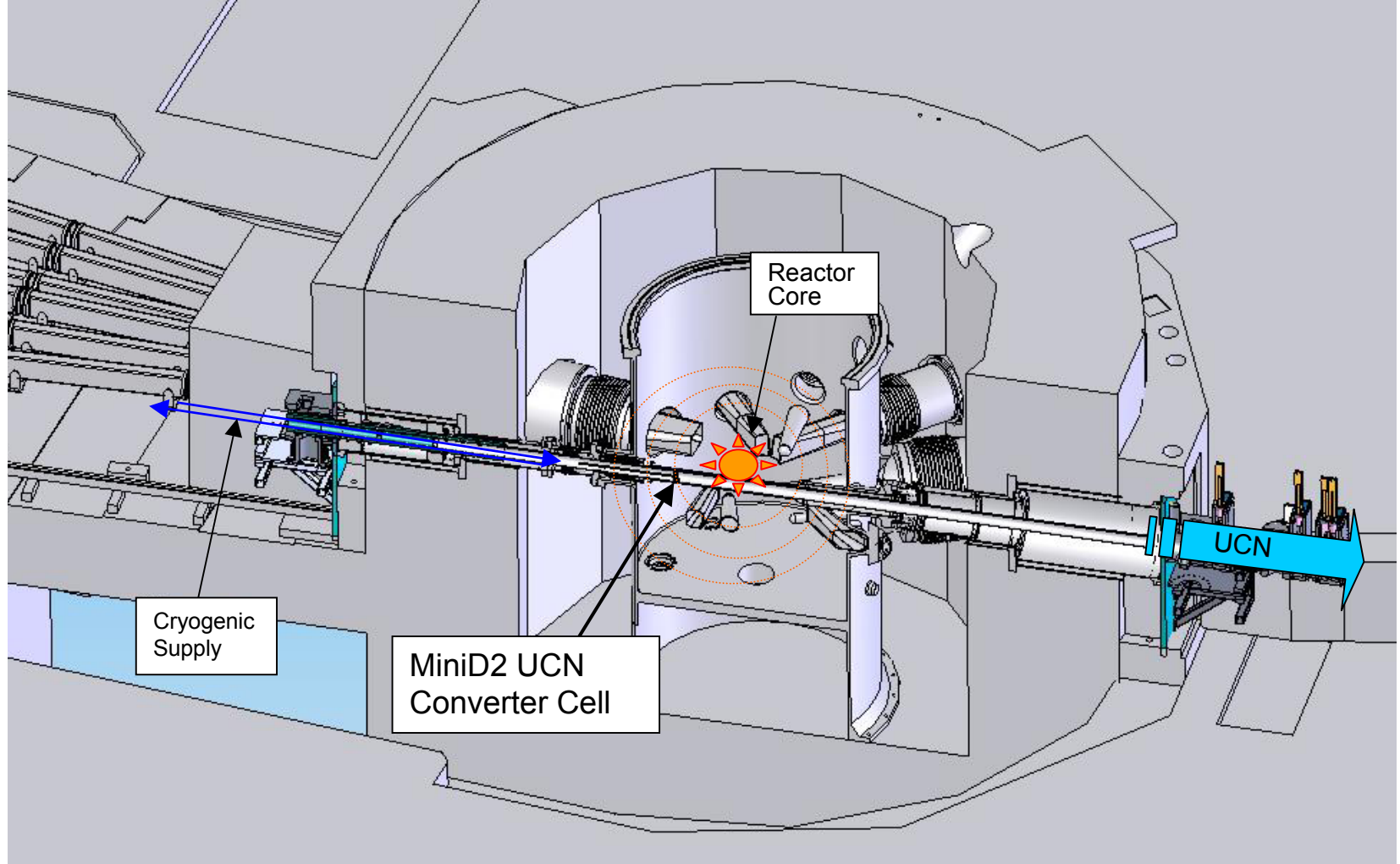
T. Soldner, C. Plonka
 K. Schreckenbach, O. Zimmer
 L. Beck
 P. Liaud
 A. Bussière, R. Kossakowski

ILL, TU München
 TUM
 LMU München
 ISN Grenoble
 LAPP Annecy

Experimente mit ultrakalten Neutronen



„Steyerl Turbine“ am FRM zur Erzeugung von ultra- kalten Neutronen durch Abbremsung von Neutronen bei Reflektion an den Schaufeln (Kopie davon läuft noch als weltweit intensivste UCN Quelle am ILL)

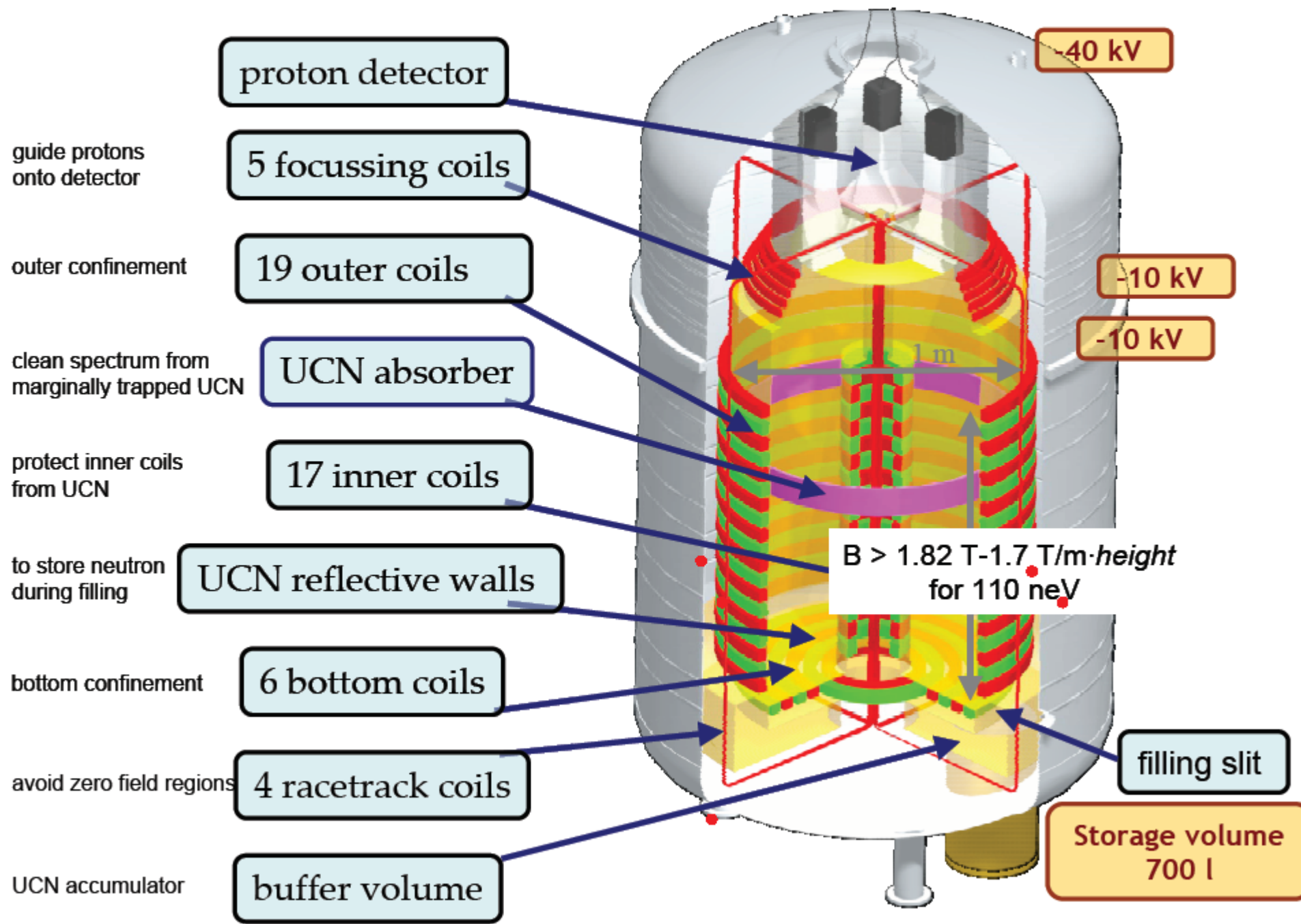


**Geplante MiniD2 UCN Quelle
am FRM II (Inpile!). Teil des
Exzellenz Clusters Origin of
the Universe**

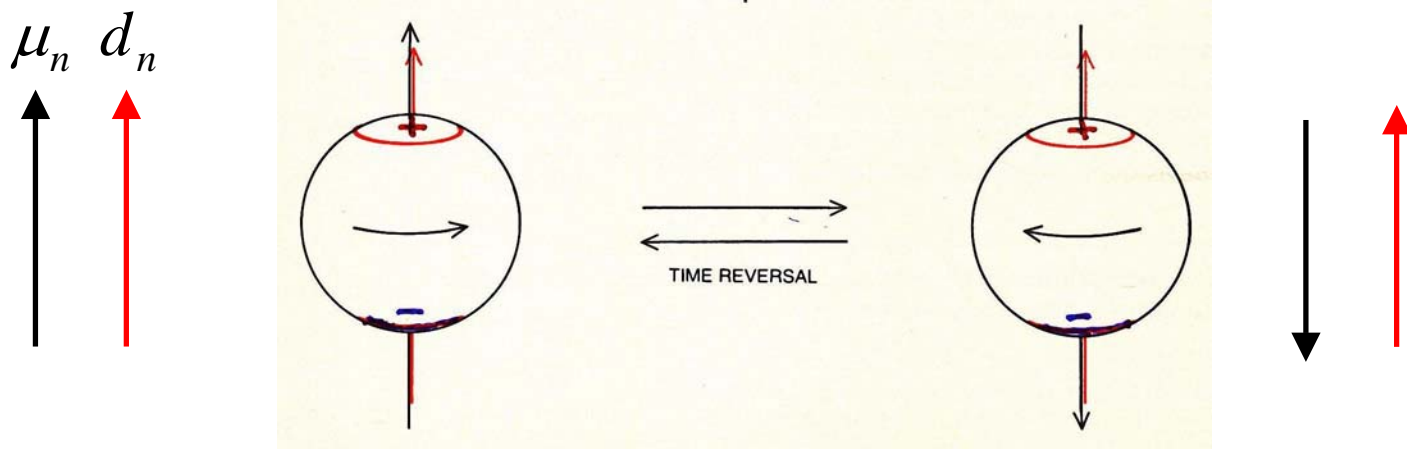
Erwartete UCN Dichte : x100 ILL UCNs

E. Gutmiedl et al, TUM, Uni Mainz

PENeLOPE design (Hartmann et al, TUM, Uni Mainz) → Neutronenlebensdauer

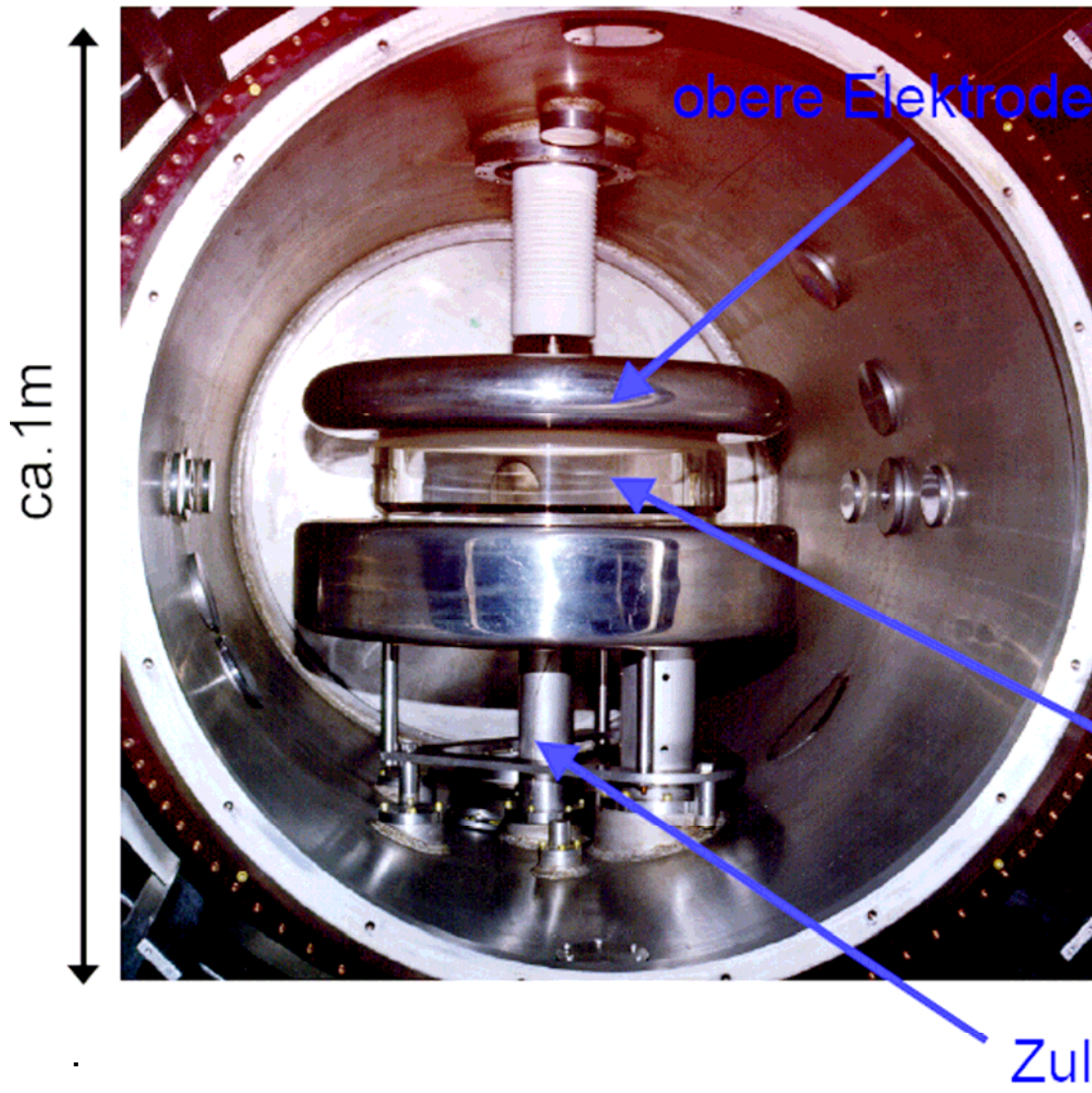


Magnetisches Dipolmoment μ_n und elektrisches Dipolmoment d_n eines Neutrons



Zeitumkehr Operation (hier gleich Bewegungsumkehr) bewirkt, dass die beiden Konfigurationen nicht mehr zur Deckung gebracht werden können

-> **Verständnis der Materiebildung im frühen Universum**



- Speicher für UCN
- Präzession des Neutrons im Magnetfeld und elektrischen Feld, 'innere Uhr'
- Ramsey Resonanz Methode zur Messung der Präzession: 'Uhrenvergleich bei Umkehr des elektr. Feldes'

EDM des Neutron, Experiment ILL

Ergebnis 2006: $d_n < 3 \cdot 10^{-26}$ ecm

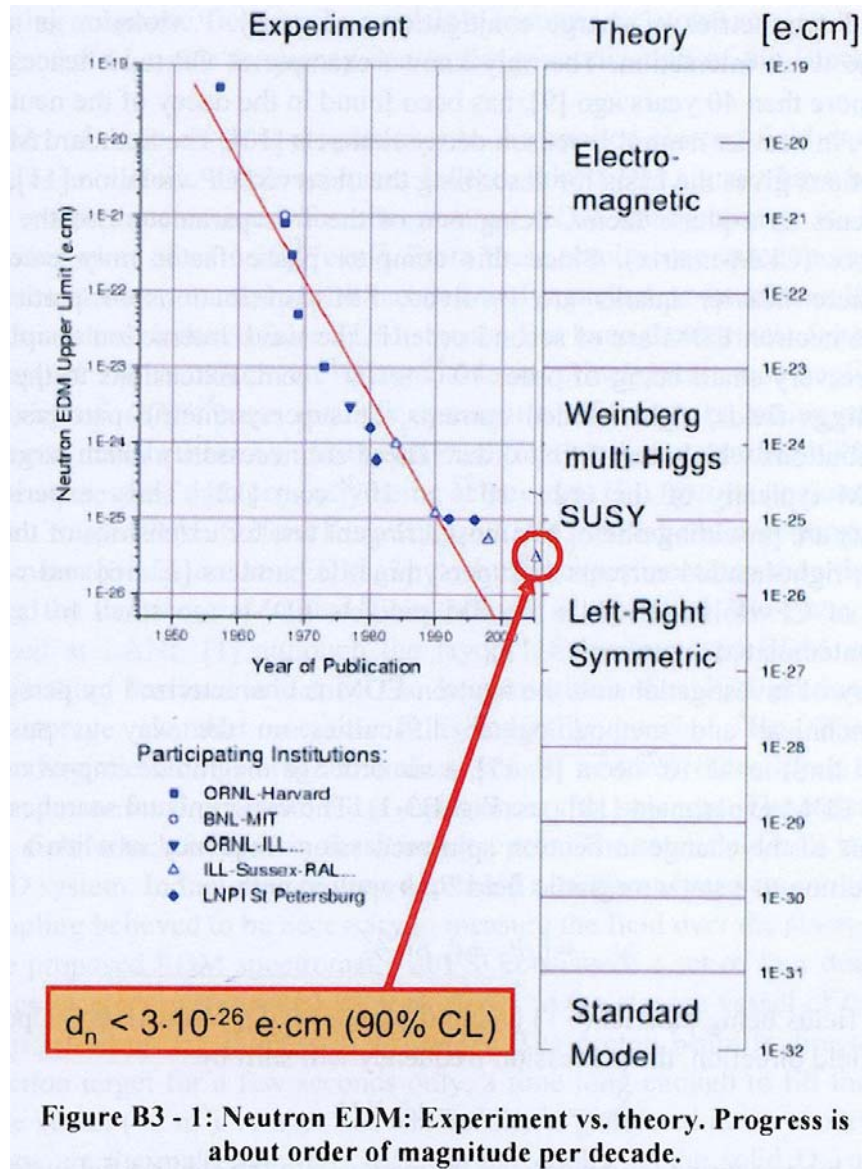


Figure B3 - 1: Neutron EDM: Experiment vs. theory. Progress is about order of magnitude per decade.

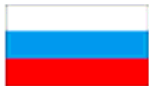
The Neutron EDM Collaboration 2007



G. Ban, Th. Lefort, O. Naviliat-Cuncic
Laboratoire de Physique Corpusculaire, Caen, France



K. Bodek, St. Kistryn, M. Kuzniak², J. Zejma
Institute of Physics, Jagiellonian University, Cracow, Poland



N. Khomytov, B.M. Sabirov
Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia



P. Knowles, M. Rebetez, A. Weis
Departement de Physique, Université de Fribourg, Fribourg, Switzerland



C. Plonka, G. Rogel¹
Institut Laue-Langevin, Grenoble, France



G. Quémener, D. Rebreyend, S. Roccia, M. Tur
Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Grenoble, France



M. Daum, R. Henneck, S. Heule³, M. Kasprzak⁴, K. Kirch, A. Knecht³,
B. Lauss, A. Mchedlishvili, G. Zsigmond
Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland



S. Baessler, K. Eberhardt, G. Hampel, W. Heil, J.V. Kratz, Y. Sobolev, N. Wiehl
Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz, Germany



I. Altarev, E. Gutschiedl, R. Stoepler, S. Paul
Technische Universität, Munich, Germany



N. Severijns
Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium

also at: ¹LPC Caen, ²Paul Scherrer Institut, ³University of Zürich, ⁴SMI Vienna



Resümee:

Vielfalt von Untersuchungen:

Neutronen und Kernphysik: Struktur stabiler und neutronenreicher Kerne
schwache Wechselwirkung in Kernen
reiche Palette an Anwendungen

Teilchenphysik: Symmetrien der schwachen Wechselwirkung
Parameter im Zerfall freier Neutronen
Suche nach exotischen Effekten
viele Anwendungen in Astrophysik, Relevanz zur Hochenergiephysik

Neutronen als Welle: fundamentale Experimente zu Materiewellen

Allgemein: **Spin-offs** in Präzisionsmessmethoden, Medizin, Technik ...

➤ **Experimente verlangen immer mehr internationale Kollaborationen und Zusammenarbeit zwischen verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen!**

➤ **Erfolg am FRM II: Die sehr kompetente FRM II Betriebsgruppe unter I. Neuhaus und die engagierten Wissenschaftler und Techniker an den Experimenten unter W. Petry**