

Investigations of the internal and external magnetic fields of the neutron electric dipole moment experiment at the Paul Scherrer Institute

Doctoral Thesis

Author(s):

Franke, Beatrice

Publication date:

2013

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010144564>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NR. 21562

Investigations of the
Internal and External Magnetic Fields
of the Neutron Electric Dipole Moment Experiment
at the Paul Scherrer Institute

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTORIN DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

Beatrice Franke

MSc. Engineering Physics, Technische Universität München

geboren am 17.10.1982

von Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Klaus Kirch

Prof. Kazimierz Bodek

Dr. Bernhard Lauss

2013

Abstract

The search for a neutron electric dipole moment (nedm) is strongly motivated by the search for new sources of CP violation and new physics, and could have an important contribution to the understanding of the asymmetry between matter and antimatter in our universe. Already the limits set on the nedm by experiments constrain the parameter space of many contemporary theoretical models beyond the standard model of particle physics.

A key issue for a sensitive measurement is the monitoring and control of the magnetic field. In this work the magnetic field inside and outside the nedm apparatus, installed at the Paul Scherrer Institute in Villigen, Switzerland, is investigated.

In this apparatus, ultracold neutrons (UCN) of energies below 160 neV are stored and their Larmor precession frequency in parallel and antiparallel magnetic and electric fields are compared. A permanent, non-zero nedm would lead to a difference in the compared Larmor precession frequencies.

To exclude a change of the neutron precession frequency due to a change in the magnetic field, a co-habiting ^{199}Hg magnetometer is used to cancel common noise and drifts. However, there is a crucial difference in how the two species sample the magnetic field due to their different velocities and due to the effect of gravity on UCN. Investigating the ratio R of the precession frequencies of UCN and ^{199}Hg allows us to evaluate properties of the inner magnetic field and thus serves as an important tool to control systematic effects in the measurement of the neutron electric dipole moment.

Furthermore, this ratio serves as a probe to search for a short range spin-dependent force as the ratio of precession frequencies would be affected by such an interaction. Possible mediators could be axions or axion-like particles, which were initially proposed as a solution to the strong CP problem and are nowadays considered as dark matter candidates. Limits on the non-existence of such particles from complementary experiments involving spin precession of ^3He were confirmed and limits from other experiments which also use free neutrons as probes were improved by one to two orders of magnitude in a mass range from 2 meV to 200 meV.

The experiment is shielded from the outside magnetic field via a four-layer cylindrical shield of Mu-metal. The properties of the inside magnetic field depend strongly on the magnetization state of the magnetic shield. A large-scale surrounding field compensation (SFC) system was implemented to reduce and stabilize the outer magnetic field to keep the magnetization of the Mu-metal in a stable state.

Six 6 m \times 8 m rectangular coils constitute three orthogonal pairs. The currents in these coils can be controlled dynamically via a proportional-integral feedback loop. A regularized, pseudoinverse matrix of proportionality factors, which correlate magnetic field changes at given sensor positions to current changes in the SFC coils, is incorporated in the feedback loop. This approach is superior to simpler feedback controls, and the magnetic field can be stabilized by roughly one order of magnitude within a large control volume and not only at single

points. The stabilization of the magnetic field with the system described here was achieved by compensating for environmental noise from arbitrary sources and directions and thus is of general validity.

Zusammenfassung

Die Suche nach dem elektrischen Dipolmoment des Neutrons (nedm) ist motiviert durch die Suche nach neuen Ursachen für CP Verletzung und kann dazu beitragen die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie in unserem Universum zu erklären. Bereits die Limitierung des Werts des nedm s beschränkt den Parameterraum vieler aktueller theoretischer Modelle welche über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausgehen.

Die Überwachung und Kontrolle des Magnetfeldes im nedm Experiment ist von zentraler Bedeutung für die Sensitivität der Messung. In dieser Arbeit wird das Magnetfeld innerhalb und ausserhalb des nedm Spektrometers, welches sich am Paul Scherrer Institut befindet, untersucht.

In diesem Spektrometer werden ultrakalte Neutronen (UCN) mit Energien unterhalb von 160 neV gespeichert und deren Larmor-Präzessionsfrequenzen in parallelen und antiparallelen elektrischen und magnetischen Feldern verglichen. Ein permanentes, von Null verschiedenes, nedm würde zu einer Differenz der beiden Frequenzen führen. Um auszuschliessen dass die Präzessionsfrequenz der Neutronen sich auf Grund eines nicht konstanten Magnetfeldes ändert, wird ein ^{199}Hg Komagnetometer verwendet.

Die Neutronen und die Hg-Atome mitteln das Magnetfeld im Speichervolumen leicht unterschiedlich, was die Präzision des Komagnetometers beschränkt. Dieser Unterschied ist bedingt durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten und durch den Einfluss der Gravitation auf ultrakalte Neutronen. Das Verhältnis der Präzessionsfrequenzen von UCN und ^{199}Hg zu untersuchen ermöglicht es, Eigenschaften des inneren Magnetfeldes zu quantifizieren und dient als wichtiges Werkzeug um systematische Falscheffekte in der Messung des nedm zu kontrollieren.

Des Weiteren kann dieses Verhältnis dazu dienen nach spinabhängigen, kurzreichweitigen Kräften zu suchen welche das Verhältnis der Präzessionsfrequenzen beeinflussen würden. Solch eine Kraft könnte durch Axionen oder axionähnliche Teilchen übertragen werden. Diese wurden ursprünglich vorgeschlagen um das CP Problem der starken Wechselwirkung zu lösen und gelten heutzutage als Kandidaten für Dunkle Materie. Limitierungen für die Existenz solcher Teilchen welche von Spinpräzessions-Experimenten mit ^3He herrühren wurden bestätigt und Limitierungen welche ebenfalls von Messungen mit freien Neutronen als Sonde herrühren wurden im Bereich von 2 meV bis 200 meV um ein bis zwei Grössenordnungen verbessert.

Einflüsse des äusseren Magnetfelds werden im nedm Spektrometer durch eine vierlagige zylindrische Mu-Metall Abschirmung unterdrückt. Die Eigenschaften des inneren Magnetfeldes hängen stark vom Magnetisierungszustand der Abschirmung ab. Um das Mu-Metall in einem stabilen Magnetisierungszustand zu halten, wurde ein grossformatiges Kompensationssystem für das Umgebungsfeld (SFC) in Betrieb genommen welches das äussere Magnetfeld abschwächt und stabilisiert.

Sechs $6\text{ m} \times 8\text{ m}$ rechteckige Spulen bilden drei orthogonale Spulenpaare. Die Ströme in diesen Spulen können über eine proportional-integral Feedbackschleife dynamisch kontrolliert werden. Eine regularisierte pseudoinverse Matrix von Proportionalitätsfaktoren, welche Magnetfeldänderungen mit Stromänderungen korrelieren, ist in die Feedbackschleife eingebettet. Diese Herangehensweise ist schichten Feedbackschleifen überlegen und das Magnetfeld kann an vielen Orten innerhalb eines Kontrollvolumens um ca. eine Größenordnung stabilisiert werden, anstatt nur an einzelnen Punkten. Die hier beschriebene Stabilisierung wurde erreicht indem Umwelteinflüsse und Störungen aus willkürlicher Quellen und Richtungen kompensiert wurden und hat daher eine generelle Gültigkeit.