

## NextPi

Neutron Experiments on Quantum States at Pico Scale

<b>Programm / Ausschreibung</b>	Quantum Austria 1. Ausschreibung (2022)	<b>Status</b>	laufend
<b>Projektstart</b>	01.01.2023	<b>Projektende</b>	31.10.2026
<b>Zeitraum</b>	2023 - 2026	<b>Projektlaufzeit</b>	46 Monate
<b>Keywords</b>	Neutron Interferometry, Gravity Resonance Spectroscopy, Quantum Interference		

### Projektbeschreibung

Seit dem 19. Jahrhundert entwickelte sich Interferometrie zu einer Schlüsseltechnologie in Wissenschaft und Industrie und fand dabei ein breites Anwendungsspektrum: von der Untersuchung fundamentaler Welleneigenschaften des Lichts bis hin zur Waver Positionierung in der Halbleiterindustrie, der Nutzung als Gravitationssensoren bis hin zur Entdeckung von Gravitationswellen. Im Jahr 1974 wurde Interferometrie mit Materiewellen durch H. Rauch und Mitarbeitern am Atominstitut der TU Wien eingeführt. Die Wellenfunktion jedes einzelnen Teilchens wird geteilt und mit sich selbst überlagert, was zu einem einzigartigen Instrument für die Untersuchung der Quantennatur der Materie und der Quantenmechanik im Allgemeinen führte.

Wir schlagen als erste Säule im Rahmen der Quantum Austria Initiative die simultane Kombination optischer, Roentgen- und Neutroneninterferometrie vor. Wir möchten die unterschiedliche Sensitivität aller drei Wellenformen komplementieren, um die Sensitivität für Quantenphänomene von Materiewellen zu steigern. Die Grundidee besteht im Aufbau einer Infrastruktur für „externe“ Interferometrie mit optischem Licht, während „innere“ Freiheitsgrade mit Roentgen- und Neutronenstrahlung sondiert werden. Durch die gleichzeitige Präsenz der drei Interferometer ist es möglich, Neutroneninterferometer mit getrennten Kristallen zu realisieren, wobei die separierten Komponenten mit Picometer-Präzision kontrolliert bleiben. Die gesamte Infrastruktur erlaubt neuartige Experimente mit verbesserter Sensitivität für Quantenphänomene wie Kausalität und Kontextualität. Durch den gewonnenen Raum zwischen den Interferometerkomponenten wird es möglich, das Gerät als Quantensensor für die Suche nach dunkler Materie oder Gravitationswechselwirkung von Fermionen zu nutzen.

Interferometrie mit sehr kalten Neutronen (VCN) war bisher weniger erfolgreich. Einkristalle können nicht als optische Elemente genutzt werden. Mechanische Diffraktionsgitter führten nur zu sehr kleiner Strahlteilung, Präsenz mehrerer Diffraktionsordnungen und dem Verlust von Zählrate. Wir schlagen daher als zweite Säule den Aufbau einer modernen Infrastruktur für VCN-Interferometrie vor. Kernelement ist die erstmalige Nutzung holographischer Diffraktionsgitter basierend auf Nanodiamant-Materialien. Dieses wird begleitet durch den Aufbau eines modernen Strahlplatzes mit den motorisierten optischen Elementen zur Strahlmanipulation und ortsauflösender VCN-Detektion.

Im Bereich sehr niedriger Energien gibt es ultrakalte Neutronen (UCN) mit makroskopischen Wellenlängen, welche als

Quantenproben für die Untersuchung von Gravitation auf Micro- bis Millimeterbereich Längenskalen eingesetzt werden können. Hierfür hat die qbounce-Kollaboration unter Nutzung der UCN-Quantenzustände im Gravitationsfeld der Erde die Technik der Gravitations-Resonanz-Spektroskopie entwickelt. Als dritte Säule schlagen wir ein neuartiges Design vor, das die Wechselwirkungszeit der UCN und damit die Sensitivität der Messungen um drei Größenordnungen verbessern wird. Dies wird durch die nahezu verlustfreie Speicherung von UCN in radialen Quantenzustände eines Mikrospeicherrings erreicht. Dieser Aufbau erlaubt verschiedene Konfigurationen zur Untersuchung hypothetischer Wechselwirkungen oder der Gravitation auf Quantenobjekte.

Strategische Partner sind das ILL, INRiM, TU Wien und die Universität Wien. Wir befürworten den Zugang zu allen drei Einrichtungen S18-IFM, VNC-IFM und UCN-IFM für andere Nutzer. Der Zugang wird durch das Strahlzeitvergabesystem des ILL geregelt, Vergabe erfolgt nach wissenschaftlicher Qualität.

## **Abstract**

Since the 19th century, Since the 19th century, interferometry has become a key measurement tool in science as well as applied technologies. Use cases are various: from the investigation of light properties to waver positioning in semiconductor industry, from g-sensors for gravitometry to the most recent discovery of gravitational waves. In 1974 matter wave interferometry was introduced by Rauch et al. at Atominstitut (ATI) of TU Wien. The quantum wave function of each single particle is split and superpositioned forming a unique measurement tool to probe fundamental quantum (wave-) properties of the neutron giving deep insight into the quantum nature of matter and of Quantum Mechanics in general.

Here we propose as a first pillar an innovative approach to thermal neutron interferometry. For the first time we realise within the same device simultaneous interferometry of optical light, X-rays and thermal neutrons. Using the complementary sensitivity of all three waves we obtain enhanced sensitivity for various quantum phenomena of matter waves. We propose an infrastructure with "external" metrology via optical interferences while measuring the "internal" degrees of freedom via X-ray and neutron interferometry. The combination of optical, X-ray and neutron interferometry allows to realise a so-called split crystal neutron interferometer. Beam splitter and -combiner are at large distance while their alignment is controlled with subnano-metre and -radian accuracy. It will allow new types of experiments providing strongly improved sensitivity to quantum phenomena of matter waves such as quantum causality and contextuality. The enlarged spacing between the components allows to use the device as a quantum sensor for research for dark matter or for gravitational interaction of fermions.

Interferometry with very cold neutrons (VCNs) has been less successful in the past. Crystals could not serve as natural optical elements, artificially produced grating structures resulted in very small diffraction angles/or unwanted diffraction orders and neutron loss. As a second pillar we propose to install a new VCN infrastructure with an innovative approach to VCN-interferometry based on holographically formed nanodiamond-composite gratings as optical elements.

Ultracold neutrons (UCNs) with energies less than 300 neV and macroscopic wavefunctions can be used as quantum probes for gravity at micrometre to millimetre scales. Using the respective gravitational eigenstates in the Earth's gravitational field, the qBounce collaboration has developed gravity resonance spectroscopy (GRS). As a third pillar within the project, we propose an innovative design with the aim to extend the interaction time by 3 orders of magnitude, resulting in the same increase in precision. This is achieved by a new setup that stores UCNs quasi loss-less in so-called whispering gallery states

in a micro-machined storage ring. The setup has multiple possible configurations that serve as a facility to apply any electromagnetic, mechanical, or gravitational excitation, thereby enabling measurements of any hypothetical (dark) interactions, gravity effects on extended quantum objects.

Strategic partners are ILL, INRiM, TU Wien, and University of Vienna strengthening Austria as a partner in EU programmes and supporting EU goals. We endorse access to the three proposed facilities S18-IFM, VCN-IFM, and UCN-IFM for other users. The Management of use is provided by ILL's beamtime allocation policy via the official proposal submission system for instruments. The decision is made in a competitive manner, where the proposals are ranked on a scale from 10 (highlight) to 1.

### **Projektkoordinator**

- Technische Universität Wien

### **Projektpartner**

- Institut Max von Laue - Paul Langevin
- Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM)
- Universität Wien