

**Beam Splitter, Lens and Interferometer  
for Metastable Helium Atoms by Diffraction from  
Microfabricated Transmission Structures**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

OLIVIER CARNAL  
Dipl.-Phys. ETH  
born May 30, 1964  
from Souboz (BE)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Melchior, examiner  
Prof. Dr. J. Mlynek, co-examiner

1992



# ABSTRACT

*Olivier Carnal*

## **Beam Splitter, Lens and Interferometer for Metastable Helium Atoms by Diffraction from Microfabricated Transmission Structures**

The description of wave propagation in atom optics is very similar to that in classical optics as a result of the formal analogy between the time-independent Schrödinger equation in quantum mechanics and the scalar Helmholtz equation in classical optics. Diffraction phenomena can therefore occur when atoms are sent through microscopic mechanical structures. The observation of these effects, however, is considerably more difficult in atom optics since the particle wavelength is many orders of magnitude smaller than in classical optics and the coherence properties and intensities are still very poor in standard atomic beams.

In this work, experiments are presented in which optical elements, such as a coherent beam splitter and a lens, as well as an interferometer have been realized for atoms by means of atomic diffraction from microfabricated transmission structures. In order to carry out the experiments on atom optics, an apparatus producing a high intensity beam of metastable noble gas atoms with good coherence properties has been built.

The first part of this work deals with the development of the atomic beam system appropriate for atom optics. We have used a supersonic beam expansion of helium atoms followed by a region in which the atoms are excited by inelastic electron collisions. This setup enables an easy variation of the atomic wavelength over quite a wide range ( $0.5 \text{ \AA} - 2.5 \text{ \AA}$ ). The influence of both the adiabatic expansion in the supersonic nozzle and the electron beam excitation on the beam quality is discussed.

In the second part, the experiments on optical elements for atoms are presented. As a first application of the intense and coherent atomic beam, the diffraction of metastable helium atoms by a transmission gold grating with a periodicity of  $0.5 \mu\text{m}$  has been investigated. The diffraction patterns at two different de Broglie wavelengths were compared with the results of a simple model for the grating structure and showed good agreement with the theory. The high transmission of this grating for metastable atoms makes this device an ideal beamsplitter not only for ground state atoms but also for atoms in long-lived excited states.

The atomic diffraction by a free-standing spherical Fresnel zone plate has been exploited to build a lens for atoms. The focussing of and imaging with metastable helium atoms have been demonstrated for the one-dimensional case. The experimental results showed a very good correspondence with calculations performed on the basis of classical Fresnel-Kirchhoff diffraction theory. The zone plate with a diameter of 210  $\mu\text{m}$  and an innermost zone diameter of 18.76  $\mu\text{m}$  allowed to focus an atomic beam down to a size of less than 18  $\mu\text{m}$ .

Finally, the first experimental realization of an interferometer for atoms is presented. The principle is similar to that in Young's double slit interferometer in classical optics. The two slits defining the two possible paths from the entrance to the detector slit were 8  $\mu\text{m}$  apart and 1  $\mu\text{m}$  wide. The observed fringe visibility in the atomic intensity distribution and the stability of the device should make it possible to measure phase shifts between the two paths to an accuracy of  $1/3$  radian in less than 10 minutes. First potential applications of this interferometer are discussed at the end of this work.

The experiments described here indicate that metastable helium atoms, in combination with microfabricated transmission structures, are ideal candidates to investigate optical elements for atoms.

# KURZFASSUNG

*Olivier Carnal*

## **Strahlteiler, Linse und Interferometer für metastabile Heliumatome mittels Beugung an mikrofabrizierten Transmissionsstrukturen**

Die Beschreibung der Wellenausbreitung in der Atomoptik ist stark verwandt mit derjenigen in der klassischen Optik infolge der formalen Analogie zwischen der zeitunabhängigen Schrödinger-Gleichung in der Quantenmechanik und der skalaren Helmholtz-Gleichung in der klassischen Optik. Beugungseffekte können deshalb auftreten, wenn Atome durch mikroskopisch kleine, mechanische Strukturen geschickt werden. Die Beobachtung dieser Effekte ist jedoch ungleich schwieriger in der Atomoptik, da die Wellenlänge der verwendeten Teilchen um viele Größenordnungen kleiner ist als in der klassischen Optik, und sowohl die Kohärenzeigenschaften als auch die Intensitäten in heutigen Atomstrahlen immer noch sehr bescheiden sind.

In der vorliegenden Arbeit werden Experimente vorgestellt, in denen sowohl optische Elemente, wie zum Beispiel ein Strahlteiler und eine Linse, als auch ein Interferometer für Atome mittels Beugung an mikrofabrizierten Transmissionsstrukturen realisiert wurden. Um die Experimente zur Atomoptik durchführen zu können, wurde eine Anlage aufgebaut, in der ein intensiver Strahl metastabiler Edelgasatome mit guten Kohärenzeigenschaften erzeugt wird.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird die Entwicklung dieser für die Atomoptik geeigneten Atomstrahlanlage behandelt. Es wurde eine Überschallstrahlexpansion von Heliumatomen verwendet, an die sich ein Bereich anschliesst, in dem die Atome mit Hilfe inelastischer Elektronenstöße angeregt werden. Dieser Aufbau ermöglicht eine einfache Wellenlängenvariation über einen relativ weiten Bereich ( $0.5 \text{ \AA} - 2.5 \text{ \AA}$ ). Der Einfluss sowohl der adiabatischen Expansion in der Überschalldüse als auch der Elektronenstossanregung auf die Strahlqualität wird diskutiert.

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden die Experimente zu optischen Elementen für Atome vorgestellt. Als Erstes wurde die Beugung an einem Transmissionsgitter aus Gold mit einer Periode von  $0.5 \text{ \mu m}$  untersucht. Die Beugungsmuster bei zwei verschiedenen de Broglie-Wellenlängen wurden mit den Resultaten eines einfachen Modells für die Gitterstruktur verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung mit

der Theorie. Die hohe Transmission dieses Gitters für metastabile Atome machen dieses Gerät zu einem idealen Strahlteiler nicht nur für Atome im Grundzustand sondern auch für Atome in langlebigen angeregten Zuständen.

Die Atombeugung an einer freitragenden, sphärischen Fresnelschen Zonenplatte wurde ausgenutzt um eine Atomlinse herzustellen. Die Fokussierung von und die Abbildung mit metastabilen Heliumatomen wurden für den eindimensionalen Fall demonstriert. Die experimentellen Ergebnisse zeigten dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit numerischen Simulationen, die auf der klassischen Fresnel-Kirchhoffschen Beugungstheorie basieren. Die Zonenplatte, mit einem Durchmesser von  $210 \mu\text{m}$  und einem innersten Zonendurchmesser von  $18.76 \mu\text{m}$ , erlaubte die Fokussierung eines Atomstrahles auf eine Grösse von kleiner als  $18 \mu\text{m}$ .

Zum Schluss wird die erstmalige Realisierung eines Atominterferometers vorgestellt. Das Prinzip ist angelehnt an das Youngsche Doppelspaltinterferometer in der klassischen Optik. Die beiden Spalte, welche die zwei möglichen Wege vom Eintritts- zum Detektorspalt festlegen, lagen  $8 \mu\text{m}$  auseinander und waren je  $1 \mu\text{m}$  breit. Die beobachtete Sichtbarkeit der Interferenzstruktur in der atomaren Intensitätsverteilung und die Stabilität der Anordnung sollten Messungen ermöglichen, bei denen Phasenverschiebungen zwischen den beiden Wegen mit einer Genauigkeit von  $1/3$  Radian in weniger als 10 Minuten nachgewiesen werden. Erste mögliche Anwendungen dieses Interferometers werden am Ende dieser Arbeit diskutiert.

Die hier beschriebenen Experimente zeigen, dass metastabile Heliumatome, in Verbindung mit mikrofabrizierten Transmissionsstrukturen, ausgezeichnet für das Studium optischer Elemente für Atome geeignet sind.