

# МЕТРОЛОГІЯ ТА ПРИЛАДИ

METROLOGY AND INSTRUMENTS

4|2020

НАЦІОНАЛЬНА ЕТАЛОННА БАЗА

МЕТРОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ

ВИСОКОТОЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

НАНОМЕТРОЛОГІЯ

ПОВІРКА ТА КАЛІБРУВАННЯ

ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ

ЯКІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ

ТЕХНІЧНА НАДІЙНІСТЬ



Вимірруйте  
усе доступне вимірюванню  
й робіть недоступне вимірюванню  
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

# Метрологія



# Та прилади

## METROLOGY AND INSTRUMENTS

№ 4(84), 2020

Науково-виробничий журнал  
Scientific and production journal

### Засновники:

Академія метрології України,  
Харківський національний  
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),  
Державне підприємство  
«Всеукраїнський державний  
науково-виробничий центр  
стандартизації, метрології, сертифікації  
та захисту прав споживачів»  
(ДП «Укрметртестстандарт»),  
ТОВ Виробничо-комерційна  
фірма (ВКФ) «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року  
Рік випуску п'ятнадцятий  
Передплатний індекс 92386

### Головний редактор

Володарський Є. Т., д. т. н., проф.

### Редакційна колегія:

Захаров І.П., д. т. н., проф.  
Коломієц Л.В., д. т. н., проф.  
Косач Н.І., д. т. н., проф.  
Кошева Л.О., д. т. н., проф.  
Кошовий М.Д., д. т. н., проф.  
Кучерук В.Ю., д. т. н., проф.  
Кухарчук В.В., д. т. н., проф.  
Назаренко Л.А., д. т. н., проф.  
Пістун Є.П., д. т. н., проф.  
Семенець В.В., д. т. н., проф.  
Середюк О.Є., д. т. н., проф.  
Туз Ю.М., д. т. н., проф.

### Іноземні члени редакції:

Tadeusz Skubis, dr hab. inż., prof.  
(Польща)  
Zygmunt Warsza, doc., dr inż. (Польща)  
Михалченко В.М., к. т. н. (Казахстан)

### Експертна рада:

Большаков В.Б., д. т. н., с. н. с.,  
заступник головного редактора  
Кузьменко Ю.В., к. т. н., с. н. с.  
Петришин І.С., д. т. н., проф.  
Рожнов М.С., к. х. н., с. н. с.  
Сурду М.М., д. т. н., проф.

### Редакційна група:

Фісун В.П., заступник головного  
редактора  
Винокуров Л.І., науковий редактор —  
відповідальний секретар  
Проненко М.П., модератор сайту,  
дизайнер  
Зайцев Ю.О., дизайнер-верстальник

### Адреса редакції:

61001, Харків, вул. Рижівська, 11, к. 2;  
Тел.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665  
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net  
<http://www.amu.in.ua/journal1>  
<https://mmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

### Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»  
61140, Харків, пр-т Гагаріна, 94-А, кв. 35;  
Свідцтво про внесення  
до Держреєстру видавців,  
виготовників і розповсюджувачів  
видавничої продукції  
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 05.09.2020.

Формат 60×84/8. Папір крейдований.  
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.  
Друк офсетний. Тираж 400 прим.  
Замовлення № 37.

© «Метрологія та прилади», 2020

### Журнал зареєстровано

у Міністерстві юстиції України,  
свідоцтвсерія КВ № 22796-12696ПР  
від 03.07.2017;

включено до Переліку наукових  
фахових видань України, в яких  
можуть публікуватися результати  
дисертаційних робіт на здобуття наукових  
ступенів доктора наук, кандидата наук  
та ступеня доктора філософії (категорія Б),  
затвердженого Наказом Міністерства освіти  
і науки України № 409 від 17.03.2020  
Журнал включено до Міжнародної  
наукометричної бази даних  
Index Copernicus, лист від 08.03.2013  
ICV 2018 = 56,77

The Journal is Registered  
in Ministry of Justice of Ukraine,  
Certificate series KB № 22796-12696PR  
dated 03.07.2017;

is included to the List of scientific  
professional publications of Ukraine,  
in which the results of dissertations  
for the degree of doctor of sciences,  
candidate of sciences and the degree  
of doctor of philosophy (category B),  
may be published, approved by the order  
of the Ministry of Education and Science  
of Ukraine No. 409 dated 17.03.2020  
The journal is included in the International  
Scientific Databases Index Copernicus, Letter  
dated 08.03.2013  
ICV 2018 = 56,77

### Co-founders:

Kharkiv National University  
of Radio Electronics (KNURE);  
Public Organization  
«Academy of Metrology of Ukraine»;  
State Enterprise «Ukrainian State  
Research and Production Centre  
for Standardisation, Metrology,  
Certification and Consumers  
Rights Protection»  
(SE «Ukrmetrtteststandart»);  
LLC Production and Commercial Firm  
(PCF) «FAVOR, LTD»

Published since march 2006.

Release year fifteenth  
Subscription index 92386.

### Chief editor:

Volodarskiy Ye.T., D.Sc. (Eng.), prof.

### Editorial board:

Kolomyiets L.V., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kosach N.I., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kosheva L.O., D.Sc. (Eng.), prof.  
Koshoviy M.D., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kucheruk V.Yu., D.Sc. (Eng.), prof.  
Kukharchuk V.V., D.Sc. (Eng.), prof.  
Nazarenko L.A., D.Sc. (Eng.), prof.  
Pistun Ye.P., D.Sc. (Eng.), prof.  
Semenets V.V., D.Sc. (Eng.), prof.  
Serediuk O.Ye., D.Sc. (Eng.), prof.  
Tuz Yu.M., D.Sc. (Eng.), prof.  
Zakharov I.P., D.Sc. (Eng.), prof.

### Foreign members of the editorial board:

Tadeusz Skubis, prof. dr hab. inż.  
(Poland)  
Zygmunt Warsza, doc., dr inż. (Poland)  
Mykhalchenko V.M., Ph.D.  
in Engineering Science (Kazakhstan)

### Advisory Board:

Boishakov V.B., D.Sc. (Eng.), S.Sc.Off.  
Deputy Chief Editor  
Kuzmenko Yu.V., Ph.D. (Eng.), S.Sc.Off.,  
Petryshyn I.S., D.Sc. (Eng.), prof.  
Rozhnov M.S., Ph.D. (Chem.), S.Sc.Off.  
Surdu M.M., D.Sc. (Eng.), prof.

### Editorial Team:

Fisun V.P., Deputy Chief Editor  
Vynokurov L.I., Scientific Editor,  
Executive Secretary  
Pronenko M.P., site moderator, designer  
Zaitsev Yu.O., maker-up designer

### Editorial Address:

61001, Kharkiv, st. Ryzhivska, 11, r. 2;  
tel.: (057) 703-23-28; (095) 00-68-665  
e-mail: metrolog-prylady@ukr.net  
<https://www.amu.in.ua/journal1>  
<https://mmi-journal.org/index.php/journal/issue/view/1>

### Publisher and manufacturer:

PCF «Favor LTD»  
61140, Kharkiv,  
pr-t. Gagarin, 94-A, sq. 35;  
Certificate of inclusion in the State  
Register of Publishers, Manufacturers  
and Distributors of Publishing Products,  
series XK № 90 dated 17.12.2003.

Signed for printing dated 05.09.2020  
Format 60 × 84/8. Paper is coated.  
Conditional printed sheets 8.43.  
Accounting and publishing sheets 7.13.  
Offset printing. Circulation 400 copies  
Order number 37.

ISSN (print) 2307-2180

ISSN (online) 2663-9564

DOI: 10.33955/2307-2180

© «Metrology and Instruments», 2020

## НАЦІОНАЛЬНА ЕТАЛОННА БАЗА

Бас О. А.

Методологія оцінювання рівня еквівалентності національних еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ..... 3

## МЕТРОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Яцук В.О., Микийчук М.М., Яцук Ю.В., Здеб В.Б.

Аналіз метрологічних властивостей високоомних багатозначних мір-калібраторів опору ..... 12

## ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ

Сурду Д. М., Сурду М. М.

Низкоомные мосты переменного тока с фазовым уравниванием ..... 20

## ВИСОКОТОЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

Неофитный М.В., Мачехин Ю.П., Гнатенко А. С.

Применение атомных интерферометров (АИ). Актуальные задачи (обзор) ..... 29

## НАНОМЕТРОЛОГІЯ

Шевченко О. І., Бондаренко М. О.

Особенности изготовления тест-объектов, как эталонных средств калибровки та повірки зондів атомно-силової мікроскопії ..... 36

## ПОВІРКА ТА КАЛІБРУВАННЯ

Яцишин С. П., Лазаренко С. Л., Лазаренко Н. С.

Калібрування дозиметричних засобів іонізуючого випромінювання ..... 40

## ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ

Ляшенко О. М., Тимофеев Е. П., Васильева Ю. О., Діденко О. М.

Підвищення достовірності визначення освітленості для зовнішнього освітлення ..... 44

## ЯКІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Лісовець С. М., Зенкін М. А., Ківа І. Л., Недлінський Я. Т.

Підвищення якості керування технологічними процесами шляхом забезпечення максимальної їхньої аперіодичності ..... 50

## МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

І. О. Костюков

Оцінювання амплітуд синусоїдальних сигналів за допомогою методу найменших квадратів: порівняльний аналіз точності алгоритмів апроксимації еліпса ..... 56

## СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ

Тараненко Ю. К., Олійник О. Ю.

Комп'ютеризована система контролю та управління динамікою газової фази технологічного апарата з барботажем ..... 63

## ТЕХНІЧНА НАДІЙНІСТЬ

Габрук Р. А.

Кількісна імовірнісна оцінка надійності функціонування комплексу зв'язку рухомого об'єкта водного транспорту ..... 68

## ІНФОРМАЦІЯ

..... 11

## NATIONAL METROLOGICAL STANDARDS BASE

Bas O. A.

Evaluation Methodology the Equivalence Level National Standards Gas Volume and Volume Flow Rate

## METROLOGICAL PROPERTIES

Yatsuk V.O., Mykyjchuk M.M., Yatsuk Yu. V., Zdeb V. B.

Analysis of Metrological Properties of High-Resistance Mufty Valued Measure Calibrators

## MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Surdu D. M., Surdu M. M.

Low-impedance Phase-balanced AC Bridges

## HIGH-PRECISION MEASUREMENTS

Neofitny M.V., Machekhin Yu. P., Gnatenko A. S.

Application of Atomic Interferometers (AI). Current Tasks (review)

## NANOMETROLOGY

Shevchenko O. I., Bondarenko M. O.

Features of the Manufacture of Test Objects as Reference Means of Calibration and Verification of Atomic Force Microscopy Probes

## VERIFICATION AND CALIBRATION

Yatsyshyn S. P., Lazarenko S. L., Lazarenko N. S.

Calibration of Ionizing Radiation Dosimetric Means

## ACCURACY AND RELIABILITY

Liaschenko O. M., Tymofeiev E. P., Vasilyeva Yu. O., Didenko O. M.

Improving the reliability of the definition of illumination for outdoor lighting

## QUALITY AND EFFICIENCY

Lisovets S. M., Zenkin M. A., Kiva I. L., Nedlinskyi Ya. T.

Improving the Quality of Management of Technological Processes by Ensuring Their Maximum Periodicity

## METHODS AND PROCEDURES

I.O. Kostjukov

Estimation of Sine Signals Amplitude By the Least Squares Method: A Comparative Analysis of Accuracy of Ellipse Fitting Algorithms

## CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEMS

Taranenko Yu. K., Oliynyk O. Yu.

Computerized System for Monitoring and Controlling the Dynamics of the Gas Phase of the Technological Apparatus with Bubbling

## TECHNICAL RELIABILITY

Gabruk R.A.

Quantitative Probabilistic Assessment of the Communication Complex Reliability on the Mobile Water Transport Object

## INFORMATION

..... 11

DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.29-35

УДК 531.715.1:541.2

# ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ (АИ). АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ (ОБЗОР)

## Application of Atomic Interferometers (AI). Current Tasks (review)

**М. В. Неофитный**, кандидат физико-математических наук, проректор,

**Ю. П. Мачехин**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой фотоники и лазерной инженерии,

**А. С. Гнатенко**, старший преподаватель кафедры физических основ электронной техники, заместитель декана по научной работе факультета, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина, e-mail: yurii.machekhin@nure.ua

**M.V. Neofitny**, candidate of physical and mathematical sciences, vice-rector,

**Yu. P. Machekhin**, doctor of technical science, professor, head of photonics and laser engineering department,

**A. S. Gnatenko**, senior lecturer of the department of physical foundations of electronic engineering, deputy dean for scientific work of the faculty, Kharkov National University of Radioelectronics, Ukraine, e-mail: yurii.machekhin@nure.ua

Проведен анализ основных теоретических вопросов состояния и применения атомных интерферометров (АИ) во всевозможных технических проектах. Приведены теоретические основы охлаждения атомов для использования этих атомов в разработанных интерферометрах. Конструкции АИ основаны на применении охлажденных облаков нейтральных атомов.

Проведено аналіз основних теоретичних питань стану і застосування атомних інтерферометрів (АІ) у всіляких технічних проектах. Наведено теоретичні основи охолодження атомів для використання цих атомів в розроблених інтерферометрах. Конструкції АІ засновані на застосуванні охолоджених хмар нейтральних атомів.

Явище конденсації ідеального бозе-газу, передбачене теоретично в 1924 році Ш. Бозе й А. Ейнштейном, експериментально реалізовано зовсім недавно (у 1995 році) для розріджених атомних газів з лужних металів завдяки застосуванню достатньо витонченої експериментальної техніки магнітних пасток, лазерного і потім випарного охолодження [1]. Атоми у стані бозе-ейнштейнівської конденсації утворюють новий тип когерентної речовини з потенційно новими термодинамічними й оптичними властивостями. У фізиці з'явилося нове поле діяльності — атомна оптика, в якій за-

мість звичайного світлового випромінювання (фотонів) передбачається використовувати як інструмент досліджень пучок атомів, що перебувають у стані конденсату, так званий атомний лазер, який є в деякому сенсі аналогом когерентного випромінювання звичайних лазерів і мазерів.

The paper analyzes the main theoretical issues of the state and application of atomic interferometers in all kinds of technical projects. The theoretical foundations of atomic cooling for the use of these atoms in the developed interferometers are presented. AI designs are based on the use of cooled clouds of neutral atoms.

The phenomenon of condensation of an ideal Bose gas, predicted theoretically in 1924 by Sh. Bose and A. Einstein, was experimentally realized quite recently (1995) for rarefied atomic gases from alkali metals due to the use of a very sophisticated experimental technique of magnetic traps, laser and then evaporative cooling [1]. Atoms in a state of Bose-Einstein condensation form a new type of coherent matter with potentially new thermodynamic and optical properties. A new field of activity has appeared in physics-atomic optics, in which, instead of ordinary light radiation (photons), it is proposed to use as a research tool a beam of atoms in a condensate state, the so-called atomic laser, which is, in a sense, an analogue of the coherent radiation of ordinary lasers and masers.

**Ключевые слова:** атомные интерферометры, гироскопы, акселерометры

**Ключові слова:** атомні інтерферометри, гіроскопи, акселерометри

**Keywords:** atomic interferometers, gyroscopes, accelerometers



М. С. Неофитный



Ю. П. Мачехин



А. С. Гнатенко

## ВВЕДЕНИЕ

Первые атомные интерферометры были продемонстрированы в начале 1990-х во Франции, Германии и США [1—4]. Затем, началось активное развитие квантовых технологий АИ, а именно, в основу работы АИ были положены процессы охлаждения атомов методом Бозе-Эйнштейна, с помощью которых формируются базовые облака флуктуирующих атомов.

С конца 90-х годов начали появляться проекты по созданию и применению различных чувствительных приборов на основе АИ (гироскопов, акселерометров, гравиметров, часов, магнетометров). За последние 10 лет резко возросло количество научных и исследовательских групп по всему миру, занимающихся разработкой приборов на АИ под конкретные проекты, в том числе для космических и морских применений. Разрабатываются коммерческие образцы приборов, развиваются проекты по миниатюризации АИ и их подсистем. За многообразием приборов на основе АИ, следует отметить, что основные составляющие этих приборов на стадии исследований.

#### ПОДГОТОВЛЕННЫЕ ПРОЕКТЫ С ХОЛОДНЫМИ АТОМАМИ И АТОМНЫМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРАМИ

С 1997 года Европейское космическое агентство (ЕКА) и Национальный центр космических исследований Франции развивают проект *ACES-PHARAO* [5]. Платформа *ACES* — это название модуля для Международной космической станции (МКС), *PHARAO* — часы на холодных атомах в составе платформы *ACES*. Космический аппарат должен быть выведен на орбиту в 2017 году [6]. Стабильность частоты часов должна составить  $10^{-13} \text{ с}^{-1/2}$ , а точность  $10^{-16}$  [7].

В 2004 году стартовал проект *QUANTUS*, выполняемый 7-ю университетами из Германии и финансируемый Германским центром авиации и космонавтики [10]. Проект нацелен на изучение ультрахолодных квантовых газов в условиях микрогравитации [11]. В рамках этого проекта созданы аппараты: *QUANTUS-I* (эксперимент по созданию БЭК в условиях микрогравитации); *QUANTUS-II* (миниатюризация экспериментальной установки *QUANTUS-I* и проверка новых разработок атомной оптики в микрогравитации); *QUANTUS-III* (дальнейшее улучшение); *MAIUS-I* (условия микрогравитации на ракете); *KALEXUS*. Проект *Space Atom Interferometer (SAI)* ЕКА по программе *ELIPS-2*. Задача проекта — демонстрация возможности применения АИ для будущих космических миссий [12]. Был создан атомный ак-

селерометр на атомах рубидия, который мог работать в условиях микрогравитации и при нормальной гравитации.

С компанией *AOSense Inc.* (США) с 2006 по 2015 г. были заключены контракты более чем на 40 млн. долл.

Для решения проблемы миниатюризации разрабатываются технологии микросистем на холодных атомах (*CAMS*) с МЭМС и фотонными решениями для практической реализации датчиков на АИ [25].

#### КОНДЕНСАТ БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АТОМНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ

Конструкции АИ основаны на применении охлажденных облаков нейтральных атомов. К настоящему времени уже сотни работ написаны в связи с анализом реальных ситуаций по получению конденсата БЭ в поле лазерного излучения. Кроме этой задачи, решена задача оптических ловушек и лазерных пинцетов, которые позволяют с помощью лазерного излучения, специальным образом сформированного, управлять движением атомов и ионов. Сравнительно недавно, удалось создать чисто оптические ловушки, где атом удерживается вблизи максимума интенсивности светового пучка. Конденсат в такой ловушке имеет сильно вытянутую сигарообразную форму. Ученые удостоены Нобелевской премии за получение конденсата Бозе-Эйнштейна в разреженных газах из атомов щелочных металлов и за исследование свойств этого конденсата. Главная проблема заключалась в том, чтобы добиться глубокого охлаждения вещества. Температуру газа следовало довести до уровня, всего на несколько стомиллионных долей градуса превышающего абсолютный нуль.

Для достижения таких температур обычные холодильники, конечно, не годятся. И даже турбодетандеры, сжижающие гелий, азот и другие газы, не помогут. В своих опытах ученые решили использовать комбинации двух методов глубокого охлаждения, разработанных относительно недавно: лазерного охлаждения и охлаждения испарением.

Экспериментаторы тормозили атомы газа магнитными ловушками, затем замедляли их движение, заставляя продираться сквозь густое сплетение множества лазерных лучей. А далее, опять же лазерным лучом, отгоняли самые быстрые горячие атомы, пока не осталось сколько-то окончательно замерзших, обездвиженных. Полученный таким образом конденсат представлял собой висящее в магнитно-оптической ловушке газовое облачко, состоящее из 2000 атомов рубидия. Причем облачко это имело

температуру, лишь на две стомиллионных доли градуса превышавшую абсолютный нуль. Главная особенность данного конденсата, как установили, состоит в том, что образующие его атомы при таких температурах переходят на самый низкий энергетический уровень из всех возможных. Все они теряют свою самостоятельность и начинают вести себя, словно один гигантский атом. Образуется совершенно необычное вещество, являющееся в то же время волной, как любая элементарная частица.

Первыми достигли необходимого результата американцы. Немец Кеттерле был разочарован, узнав, что Корнелл и Вейман его опередили. Однако решил продолжать собственные эксперименты. На то были, впрочем, особые причины. Во-первых, он шел своим путем. Во-вторых, в своих опытах он использовал атомы натрия, а не рубидия. И спустя три месяца он тоже добился желаемого результата. Причем ему удалось получить в 100 раз больше конденсата, чем конкурентам. Кроме того, на основе конденсата Бозе-Эйнштейна он решил построить атомный лазер. И создал его в 1996 году. В отличие от света, испускаемого обычной лампочкой, лазер, как известно, испускает когерентное излучение. То есть все испускаемые им фотоны имеют одну и ту же энергию, длину и фазу волны. Если вместо света использовать синхронизированные атомы — как раз такие, что составляют конденсат Бозе-Эйнштейна, — можно говорить об атомном лазере, обладающем большей эффективностью, нежели обычный.

Явление конденсации идеального бозе-газа, предсказанное теоретически в 1924 году Ш. Бозе и А. Эйнштейном, экспериментально реализовано сравнительно недавно (1995 год) для разреженных атомных газов из щелочных металлов благодаря применению весьма изощренной экспериментальной техники магнитных ловушек, лазерного и затем испарительного охлаждения [1]. Атомы в состоянии бозе-эйнштейновской конденсации образуют новый тип когерентного вещества с потенциально новыми термодинамическими и оптическими свойствами. В физике появилось новое поле деятельности — атомная оптика, в которой вместо обычного светового излучения (фотонов) предполагается использовать в качестве инструмента исследований пучок атомов, находящихся в состоянии конденсата, так называемый атомный лазер, являющийся в некотором смысле аналогом когерентного излучения обычных лазеров и мазеров.

Первые атомные конденсаты были получены в 1995 году несколькими группами американских физиков сначала для паров очень разреженных ще-

лочных металлов (рубидия, натрия и лития), а затем (в 1997) году и для атомарного водорода. Если в самых первых экспериментах число атомов в конденсате было около 1500, то позднее в экспериментах с атомами натрия число атомов в конденсате достигало  $5 \times 10^6$ . Конденсат из простейших атомов — атомов водорода, полученный в МТИ (МТИ — Массачусетский технологический институт), содержал 100 млн частиц при температуре около 40 мК. Наиболее любопытным является реализация конденсата с литием, поскольку здесь потенциал меж-атомного взаимодействия Ван-дер-Ваальса проявляется в притяжении соседних атомов, а не в их отталкивании, как, например, для рубидия. Притяжение между атомами ведет к тому, что такой конденсат не может быть устойчивым, если число атомов велико, поэтому расчеты показывают, что здесь число атомов не превосходит 1300, что и наблюдалось.

Столетие завершилось появлением новых перспектив по исследованию свойств когерентного вещества — атомных конденсатов (работа до сих пор существует как для экспериментаторов, так и для теоретиков). Конечно, сейчас трудно предугадать все возможные приложения для АЛ. Однако некоторые фундаментальные работы ближайшего будущего уже ясны. Применение АЛ позволит сконструировать атомные часы, идущие с фантастической точностью. Можно также надеяться на прогресс в экспериментах по прямой проверке в земных условиях выводов общей теории относительности. Кроме того, АЛ имеют неоспоримые преимущества по применениям в так называемых нанотехнологиях. С помощью пучка АЛ можно размещать атомы на поверхностях с недостижимой ранее точностью, позволяющей исследователям создавать принципиально новые структуры, что может привести к новому технологическому прорыву в микро- (а точнее, нано) электронике.

#### КОНСТРУКЦИЯ АТОМНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Команда физиков из нескольких университетов США продолжает совершенствовать свой миниатюрный атомный интерферометр. Точность измерений возросла в сотню раз по сравнению с результатами двухлетней давности и впервые позволила измерить гравитационное притяжение атомов к грузу массой всего 190 грамм. Проводился также новый поиск сил, еще более слабых, чем гравитация.

Эти гипотетические силы исследователи окрестили «субгравитационными». Результат оказался отрицательным, что позволило существенно усилить ограничения на параметры некоторых теоретических

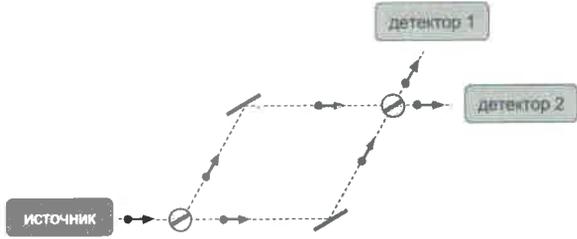


Рис. 1. В інтерферометрі кожна частинка йде сразу по двом шляхам, а після воссоединення двох своїх «частей» продовжує рухатися як єдине ціле в одному з двох напрямків. Сравнивая показання двох детекторів, можна вирахувати різницю фаз, набравши по двом шляхам

Fig. 1. In the interferometer, each particle goes along two paths at once, and after the reunification of its two «parts» continues to move as a whole in one of the two directions. By comparing the readings of the two detectors, you can calculate the phase difference that came along two paths

моделей, претендуючих на пояснення темної енергії во Всесвітній.

**АТОМНА ІНТЕРФЕРОМЕТРІЯ**

В списку самих багатообіцяючих технологій ближнього майбутнього — хто б такий список ні складав — обов'язково знайдеться місце сверхточним вимірюванням, опираючись на хвильову природу речовини. Інтуїтивно цю зв'язь можна представляти собі так. В квантовому світі атоми, молекули, навіть цілі атомні конденсати можуть знаходитися в делокалізованому стані, або, ще більш загально, в стані суперпозиції (вспоминімо пресловутого кота Шредингера). Така суперпозиція — дуже тонко налаштоване стан матерії, і його поведінка дуже чутливо до зовнішніх умов. Тому, якщо ми цим поведінкою навчимося керувати і відслідковувати результат, то зможемо відчувати дуже слабкі ефекти, недоступні звичайним класическим пристроям порівнянних розмірів.

На самому справі, щось подібне, але тільки з фотонами, використовується вже давно-давно в інтерферометрах. Наприклад, в двохлучевому інтерферометрі Маха-Цендера (рис. 1) кожен влітаючий фотон спочатку розщеплюється на дві «іпостасі», які летять по різних плечах інтерферометра. Підкреслимо: це не два фотони, а один делокалізований фотон; через напівпрозорого розщепителя він знаходиться тепер в стані суперпозиції — там і тут одночасно. Після цього ці дві «іпостасі» фотона відбиваються від двох дзеркал, падають на друге напівпрозорі дзеркало і в ньому з'єднуються знову.

Происходит интерференция между двумя путями — отсюда и название установки. Далее фотон может полететь в одном из двух направлений и будет пойман соответствующим детектором, но вероятность этого выбора зависит от разницы фаз световой волны в обоих плечах. И если в одном из плеч чуть-чуть изменятся условия, эта настройка собьется, появится добавочная разность фаз. Установка резко почувствует результат: баланс между показаниями детекторов изменится. Отслеживая показания двух детекторов, можно изучать то, что происходит в одном из плеч.

В атомном интерферометре происходит нечто очень похожее, но только с атомами (рис. 2). Атомы помещают в магнитооптическую световую решетку, возникающую в пространстве на пересечении лазерных лучей, и охлаждают облачко до температур меньше одного микрокельвина. Плавно ведя решетку вверх, экспериментаторы подкидывают облачко с начальной скоростью примерно полметра в секунду. Оно подлетает на несколько сантиметров, падает назад — и его ловят в ту же самую решетку-ловушку. Такой вот своеобразный эксперимент с подбрасыванием атомов.

Теперь самое важное. Пока облачко находится в свободном полете, в него выстреливают тремя импульсами четко выверенной длительности от двух встречных лазеров (рис. 2, справа). Первый «выстрел» подталкивает атомы, придает им дополнительный

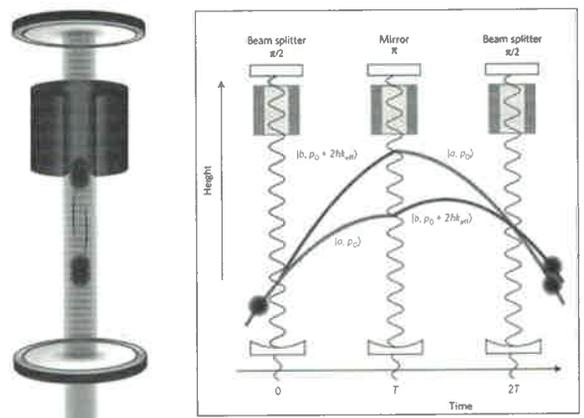


Рис. 2. Общій вид атомного інтерферометра і його принцип дії, на якому, за рахунок додаткового набігу фаз, вимірюється сила гравітаційного тяжіння до масивного циліндру в верхній частині установки. Рисунок з обговорюваної статті в Nature Physics

Fig. 2. General view of the atomic interferometer and its operating principle, on which, due to the additional phase incursion, the force of gravitational attraction to the massive cylinder in the upper part of the installation is measured. Drawing from the discussed article in Nature Physics

импульс вверх. Однако это происходит не со стопроцентной, а с 50-процентной вероятностью. В реальности облачко после этого воздействия переходит в состояние суперпозиции: оно одновременно летит и как раньше, и с дополнительным импульсом. Это аналог полупрозрачного зеркала-расщепителя, которое запускает входящую частицу сразу по двум плечам атомного интерферометра. Только в световом интерферометре эти два пути были разнесены в стороны друг от друга, а здесь — по высоте.

Две «ипостаси» облачка расходятся в пространстве и подлетают на разную высоту. В нужный момент по ним наносят второй удар — и их импульсы меняются. Та часть, что летела вверх, останавливается и начинает падать вниз; та, что только что остановилась, получает дополнительный толчок вверх. Это воздействие — аналог зеркал из рис. 1. Обе «ипостаси» облачка летят дальше и в какой-то момент снова перекрываются. И тогда по ним наносят третий удар, заставляющий их интерферировать. В результате облачко с какой-то вероятностью окажется в состоянии с тем или другим импульсом, и соотношение между ними — а оно тоже измеряется датчиками — зависит от разности фаз, набравших на двух траекториях. Эта разность фаз, в свою очередь, линейно зависит от ускорения, которое чувствовали атомы в полете. В отсутствие посторонних воздействий оно равно ускорению свободного падения  $g$  в данной точке пространства. Таким образом, измеряя соотношение между показаниями датчиков, можно вычислить локальное ускорение свободного падения в точке проведения эксперимента.

Выходит, что атомный интерферометр может работать как квантовый гравиметр и даже как гравитационный градиометр (см. *Gravity gradiometry*) — прибор, измеряющий пространственные изменения поля земного притяжения. Первый атомно-интерференционный гравитационный градиометр был продемонстрирован еще в 1998 году. Его современные аналоги способны измерять ускорение свободного падения с относительной точностью в несколько триллионных.

Если же установка находится в неинерциальной системе отсчета, например, вращается или ускоряется, то измеренная интерферометром разность фаз зависит от параметров вращения и ускорения. А это значит, что на основе атомных интерферометров можно сконструировать сверхточные гироскопы и акселерометры. Так, в 2006 году был создан атомно-интерферометрический полный шестиосевой инерциальный сенсор, то есть устройство, способное зарегистрировать вращение по всем осям и ускорение в любом направлении. С тех пор точ-



Рис. 3. Портативный квантовый гравиметр, производимый компанией Muquans.

Фото с сайта muquans.com

Fig. 3. A portable quantum gravimeter manufactured by Muquans. Photo from muquans.com

ность измерений росла, технологии оттачивались и упрощались. Недавно стартовали разработки портативного атомно-интерферометрического гироскопа для инерциальной навигации и портативного атомного гравиметра для задач геодезии и геологии; некоторые приборы уже есть в продаже (рис. 3).

### МИНИАТЮРНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В этой части, однако, нас будут интересовать не прикладные применения, а задачи из фундаментальной физики, и здесь у атомных интерферометров тоже есть большой потенциал.

Если в описанную выше схему добавить новое тело, то оно будет влиять на полет атомов: реально измеренное ускорение  $a$  будет слегка отличаться от номинального  $g$ . Самый главный эффект здесь — это гравитационное притяжение атомов к новому телу. Заметьте: не притяжение двух макроскопических грузиков друг к другу, как в классическом эксперименте Кавендиша с крутильными весами, а микроскопических атомов — к телу. Сила эта исключительно мала, но, благодаря высокой точности измерений, ее удастся почувствовать.

Гравитационное притяжение атомов к многокилограммовым грузам уже было измерено довольно давно (гравитационная постоянная измерена новыми методами). Ожидается, что через несколько лет, когда атомно-интерференционный метод достигнет нужной точности, он поможет разобраться в этой загадке.

Но можно пойти и по пути миниатюризации гравитирующего тела. В журнале *Nature Physics* была опубликована статья исследователей из нескольких университетов США, в которой гравитирующим

телом был вольфрамовый цилиндр диаметром и высотой в 1 дюйм и массой всего 190 грамм (рис. 2). У цилиндра была прорезь сбоку — это сделано для того, чтобы его можно было легко убирать и снова возвращать на место, не трогая самую чувствительную часть установки.

Тут надо уточнить, что этот атомный интерферометр был собран и запущен еще несколько лет назад. Но точность тогда была намного хуже, и об измерении гравитации такого мелкого объекта речи не шло. С тех пор авторы привнесли несколько усовершенствований, а также провели более длинную серию экспериментов, и это позволило поднять точность на целых два порядка.

К слову о длинной серии экспериментов. Нелишним будет подчеркнуть, что высокая итоговая чувствительность определяется тонкими квантовыми эффектами, умноженными на большую статистику однотипных измерений. Это проиллюстрировано в деталях на рис. 4. Эксперимент с подбрасыванием проводился не один и не два раза, а почти полмиллиона раз — на это ушло 170 часов рабочего времени. Сначала проводилась серия измерений с цилиндром, измерялось ускорение  $a$  (красные точки на рис. 4, вверху). Потом — еще одна серия экспериментов, но уже с удаленным цилиндром (синие точки). Для удобства на этом рисунке показано не само ускорение  $a$ , а его отличие от ускорения свободного падения  $g$ . Разность между двумя ускорениями — это и есть результат воздействия цилиндра  $as_{U1}$ . Эта разность показана на рис. 4 посередине. Видно, что

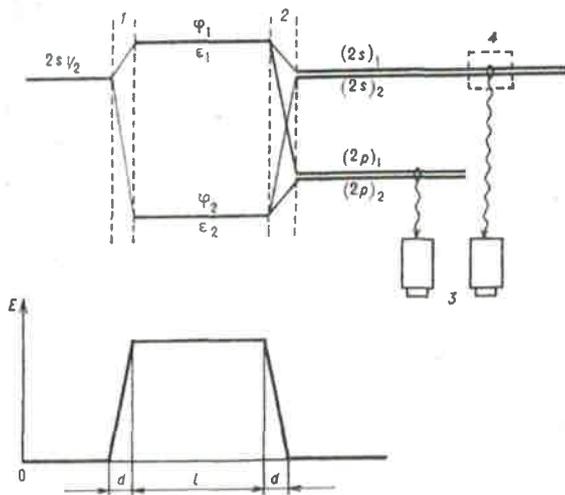


Рис. 4. Схема атомного интерферометра: 1 и 2 — входная и выходная электродные системы, 3 — детекторы  $La$ -излучения, 4 — область действия дополнительного электрич. поля.

Fig. 4. Diagram of an atomic interferometer: 1 and 2 — input and output electrode systems, 3 —  $La$ -radiation detectors, 4 — the area of action of additional electric. fields.

типичные погрешности в каждом отдельном измерении составляют примерно  $1 \text{ мкм/с}^2$ . Это, к слову сказать, большой прогресс: в прошлой работе этой же группы погрешности были в десятки раз больше. Но  $1 \text{ мкм/с}^2$  — это всё равно очень много, это в десяток раз больше ожидаемого эффекта. Однако физики повторяли эксперимент снова и снова, а затем проверили, что вся накопленная статистика согласуется с нормальным распределением. Это продемонстрировано на рис. 4, внизу, где точки — это, фактически, те же данные, что и выше, но перегруппированные по возрастанию, а черная кривая — наилучшее приближение. Высота черной кривой ровно посередине графика и дает среднее значение.

На глаз может показаться, что черная кривая проходит в середине графика ровно через нуль. На самом деле она идет чуть выше (сравните горизонтальный пунктир и нулевую отметку). Измеренное значение  $as_{U1}$  составило  $(74 \pm 19 \pm 15) \text{ нм/с}^2$  (первая погрешность тут статистическая, вторая — систематическая). Это вполне согласуется с теоретически предсказанным ускорением  $(65 \pm 5) \text{ нм/с}^2$  за счет гравитационного притяжения к цилиндру. Это первое измерение гравитационного притяжения атомов к такому небольшому гравитирующему телу.

### АТОМНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

**Атомный интерферометр — прибор, позволяющий наблюдать стационарную картину интерференции двух сдвинутых по фазе компонент к-л. состояния атома. В принципе такое устройство аналогично обычному двухлучевому оптическому интерферометру.**

Принцип действия атомного интерферометра может быть пояснен следующим примером. Пучок атомов водорода в метастабильном состоянии  $2S_{1/2}$  последовательно проходит через две пространственно разделённые зоны 1 и 2, внутри которых атомы подвергаются воздействию неадиабатического возмущения, вследствие чего становятся возможными их переходы в другие состояния. Возмущающим фактором является электрическое поле, локализованное в пространстве между зонами (рис. 4), которое резко изменяется на границах, т. е. в пределах каждой зоны ширины  $d$ .

Наблюдение картины интерференции можно осуществить измерением потока короткоживущих  $2P$ -атомов. Детектор, расположенный за второй границей, будет регистрировать фотоны, отвечающие переходу  $2P-1S$ , т. е. головную линию серии Лаймана. Можно также наблюдать происходящую в противофазе интерференцию  $2S$ -компонент,

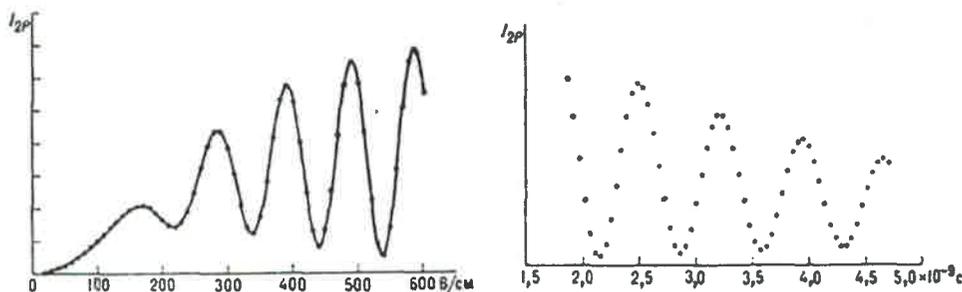


Рис. 5 Показаны кривые интерференции компонент 2P-состояния атома водорода  
Fig. 5 Shown are the curves of interference of the components of the 2P state of the hydrogen atom

для чего необходимо пропустить пучок 2S-атомов через дополнительное электрическое поле, переменяющее состояния 2S и 2P (рис. 5).

Атомный интерферометр представляет собой помещенную в вакуум систему из 2 электродов (создающих неадиабатически изменяющееся на границах поле), длина которой зависит от скорости атомов пучка и составляет обычно (1—50) см. Особенности

тонкой структуры атомов водорода оптимально проявляются при  $x \sim 1$ , чему соответствует  $E \sim 300$  В/см.

Наблюдение атомных состояний в течение длительного времени при помощи АИ позволяет осуществить качественно новые эксперименты, поскольку картина интерференции, зарегистрированная в широком интервале сдвига фаз, чрезвычайно чувствительна к характеристикам её компонент.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- Carnal O., Mlynek J. Young's double-slit experiment with atoms: A simple atom interferometer // Phys. Rev. Lett. — 1991. — Vol. 66. — P. 2689—2692.
- Keith D.W., et al. An interferometer for atoms // Phys. Rev. Lett. — 1991. — Vol. 66. — P. 2693—2696.
- Riehle F., et al. Optical Ramsey spectroscopy in a rotating frame: Sagnac effect in a matterwave interferometer // Phys. Rev. Lett. — 1991. — Vol. 67. — P. 177—180.
- Kasevich M., Chu S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions // Phys. Rev. Lett. — 1991. — Vol. 67. — P. 181—184.
- ACES — PHARAO. <https://syrtel.obspm.fr/spip/science/theorie/projets-de-recherche/article/aces-pharao?lang=en>.
- PHARAO. <https://pharao.cnes.fr/en/PHARAO/index.htm>.
- PHARAO. Operating principle of the atomic clock. [https://pharao.cnes.fr/en/PHARAO/principe\\_horloge.htm](https://pharao.cnes.fr/en/PHARAO/principe_horloge.htm).
- HYPER. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Hyper\\_overview](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Hyper_overview).
- HYPER. <http://sci.esa.int/science-e/www/object/doc.cfm?objid=35810>.
- QUANTUS. <http://www.iqo.uni-hannover.de/quantus.html>.
- Quantum gases in microgravity. <https://www.qoqi.physik.uni-mainz.de/research-projects/kalexus/>.
- Sorrentino, F., et al. The Space Atom Interferometer project: status and prospects // J. of Phys.: Conf. Ser. — 2011. — Vol. 327. — P. 012050 [13 pages].
- STE-QUEST. <http://sci.esa.int/ste-quest/>.
- STE-QUEST. A class M mission proposal for Cosmic Vision 2015-2025. [http://exphy.uniduesseldorf.de/Publikationen/2010/STE-QUEST\\_final.pdf](http://exphy.uniduesseldorf.de/Publikationen/2010/STE-QUEST_final.pdf).
- ZARM: STE-QUEST. <https://www.zarm.uni-bremen.de/research/space-technologies/metrology-aivt/projects/stequest.html>.
- I.C.E.: Atom Interferometry in Microgravity. <https://sites.google.com/site/coldatomsinspace/>.
- Tino, G.M., et al. Precision Gravity Tests with Atom Interferometry in Space // Nuclear Phys. B. — Proc. Supp. — 2013. — Vol. 243-244. — Pp. 203—217.
- Geiger, R., et al. Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry // Nature Comm. — 2011. — Vol. 2. — P. 474.
- Schuldt, T. Design of a dual atom interferometer for space // Exp. Astron. — 2015. — Vol. 39. — Pp. 167—206.
- AOSENSE, INC. <http://www.governmentcontractswon.com/department/defense/aosense-inc-162344035.asp>.
- SBIR — AOSense. <https://www.sbir.gov/sbc/aosense-inc>.
- At the Pentagon, Carter looks to a bygone era as a way to the future. [https://www.washingtonpost.com/world/national-security/at-the-pentagon-carter-looks-to-a-bygone-era-as-a-way-to-the-future/2015/04/27/77d94e36-e9cd-11e4-9a6a-c1ab95a0600b\\_story.html](https://www.washingtonpost.com/world/national-security/at-the-pentagon-carter-looks-to-a-bygone-era-as-a-way-to-the-future/2015/04/27/77d94e36-e9cd-11e4-9a6a-c1ab95a0600b_story.html).
- Adaptable Navigation Systems (ANS). <http://www.darpa.mil/program/adaptable-navigation-systems>.
- AOSense to develop navigation chip that combines solid-state and atomic inertial sensors. <http://www.militaryaerospace.com/articles/2013/04/AOSense-DARPA-CSCAN.html>.
- Micro-Technology for Positioning, Navigation and Timing (Micro-PNT). <http://www.darpa.mil/program/microtechnology-for-positioning-navigation-and-timing>.
- muQuans. <http://muquans.com>.
- Hu, Z.-K., et al. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom-interferometry absolute gravimeter // Phys. Rev. A. — 2013. — Vol. 88. — Iss. 4. — P. 043610.
- Wuhan Institute of Physics and Mathematics. Research Interests. [http://english.wipm.cas.cn/rh/rd/yzfzsys/yzfz1/yzfz1\\_res/](http://english.wipm.cas.cn/rh/rd/yzfzsys/yzfz1/yzfz1_res/).
- Could a 'quantum compass' replace GPS? British military develops system to navigate WITHOUT using satellites. <http://www.dailymail.co.uk/science-tech/article-2629088/MoD-quantum-compass-GPS-without-satellites.html>.
- Quantum positioning system steps in when GPS fails. <https://www.newscientist.com/article/mg22229694-000-quantum-positioning-system-steps-in-when-gps-fails/>.
- A quantum accelerometer is being built for navy submarines. <http://physicsworld.com/cws/article/news/2014/may/26/quantum-accelerometer-is-being-built-for-navy-submarines>.
- Quantum technology to help submarines find their way. <http://www.theengineer.co.uk/quantum-technology-to-helpsubmarines-find-their-way/>.

Отримано / received: 10.07.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Г. Авруніним (Україна).  
Prof. O.G. Avrunin, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.