

Современное состояние и научно-практические проблемы создания атомных интерферометров как прецизионных датчиков угловых скоростей и ускорений

О.Н.Прудников, Д.В.Бражников, А.Е.Афанасьев, С.Н.Багаев, В.И.Балыкин, М.Ю.Басалаев, А.Н.Гончаров, В.Н.Задков, В.Г.Пальчиков, И.И.Рябцев, А.В.Тайченачев, В.И.Юдин

Институт Лазерной Физики,

Институт Физики Полупроводников

Институт спектроскопии РАН, Московский физико-технический институт,

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Контролируемое уменьшение скоростей атомов с сотен м/с до единиц см/с
=>

увеличение времени пролета; снижение ширин скоростных распределений; использование лазерных лучей в качестве «зеркал».



Владилен Степанович Летохов

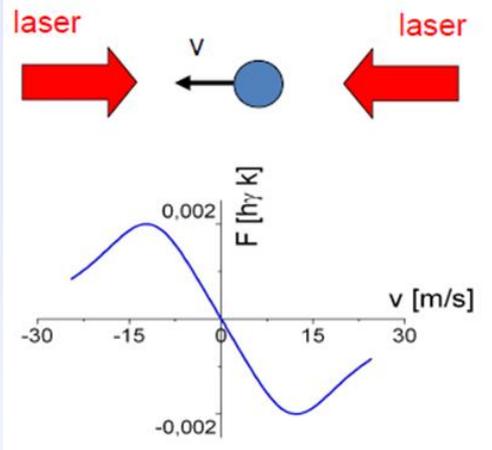
Владимир Георгиевич Миногин

Steven Chu

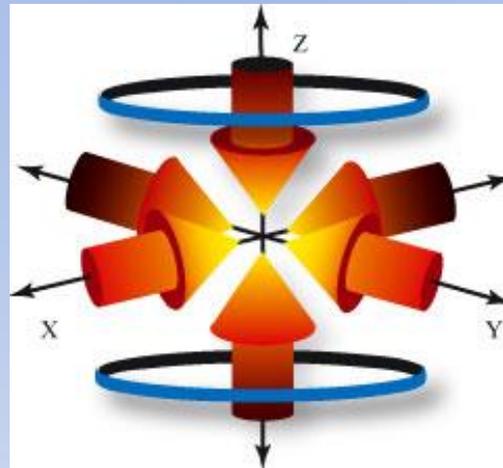
Claude Cohen-Tannoudji

William D. Phillips

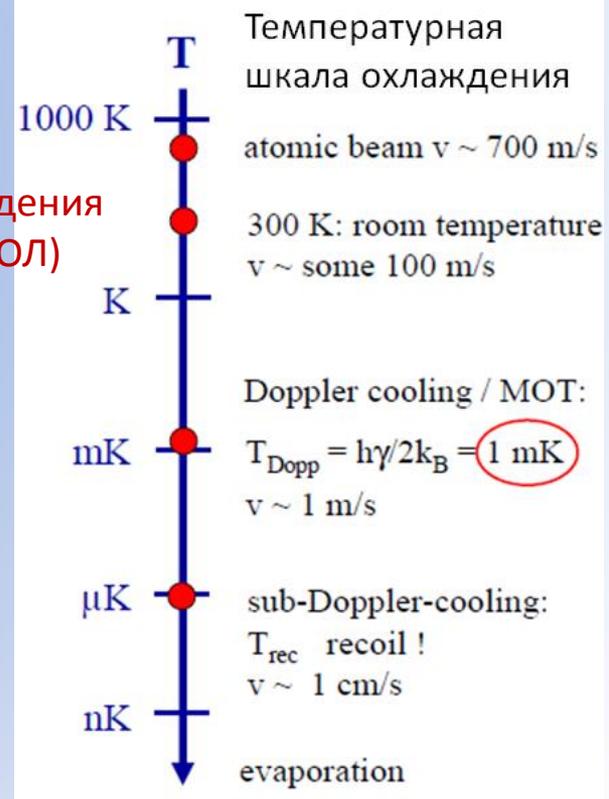
Доплеровское охлаждение («патока» - molasses): взаимодействие отстроенных к красной стороне спектра лучей с сильным атомным переходом



Основной инструмент лазерного охлаждения – магнито-оптическая ловушка (МОТ, МОЛ)

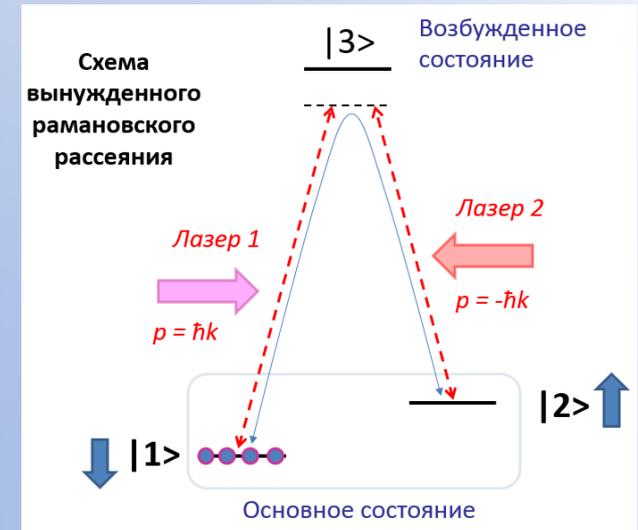
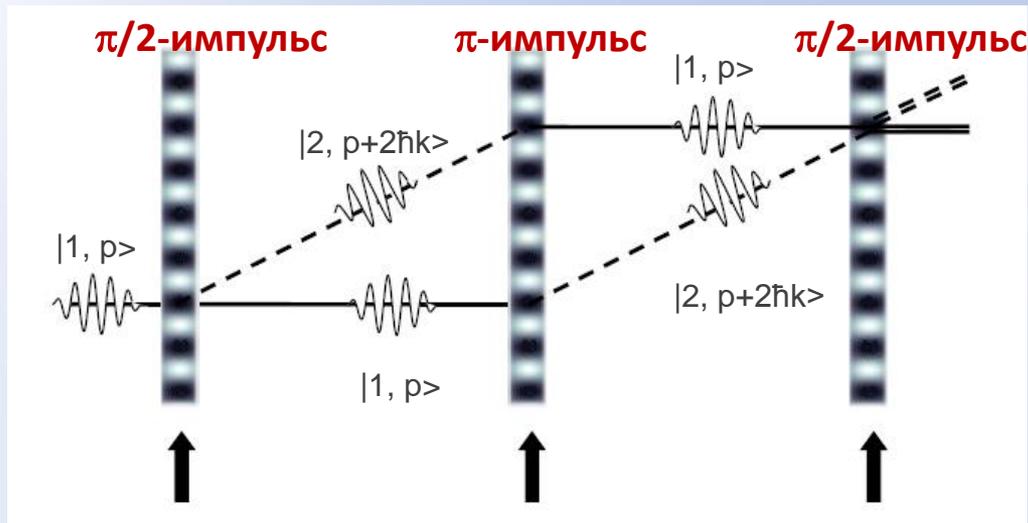


«патока» (molasses) + градиент магнитного поля



Миногин В.Г. Летохов В.С. – «Давление лазерного излучения на атомы», М., Наука (1986)

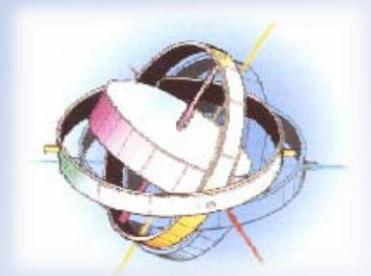
Атомные интерферометры



Состояния 1 и 2 – это, как правило, сверхтонкие уровни основного состояния щелочного атома, в случае ^{87}Rb , K, Na - это $|F=1\rangle$ и $|F=2\rangle$, в случае Cs - это $|F=3\rangle$ и $|F=4\rangle$.

Сигнал в области интерференции атомных пучков чувствителен ко внешним воздействиям, что позволяет создавать на их основе прецизионных датчиков:

- **угловых скоростей**
- **ускорений**
- **гравиметров и градиентов поля тяготения**



STUDY ON
Technology and Innovation Enablers for
Superiority in 2030

OCTOBER 2013



Office of the Under Secretary of Defense
for Acquisition, Technology, and Logistics
Washington, D.C. 20301-3140

KEY INVESTMENT OPPORTUNITIES TO COPE WITH GLOBAL PARITY

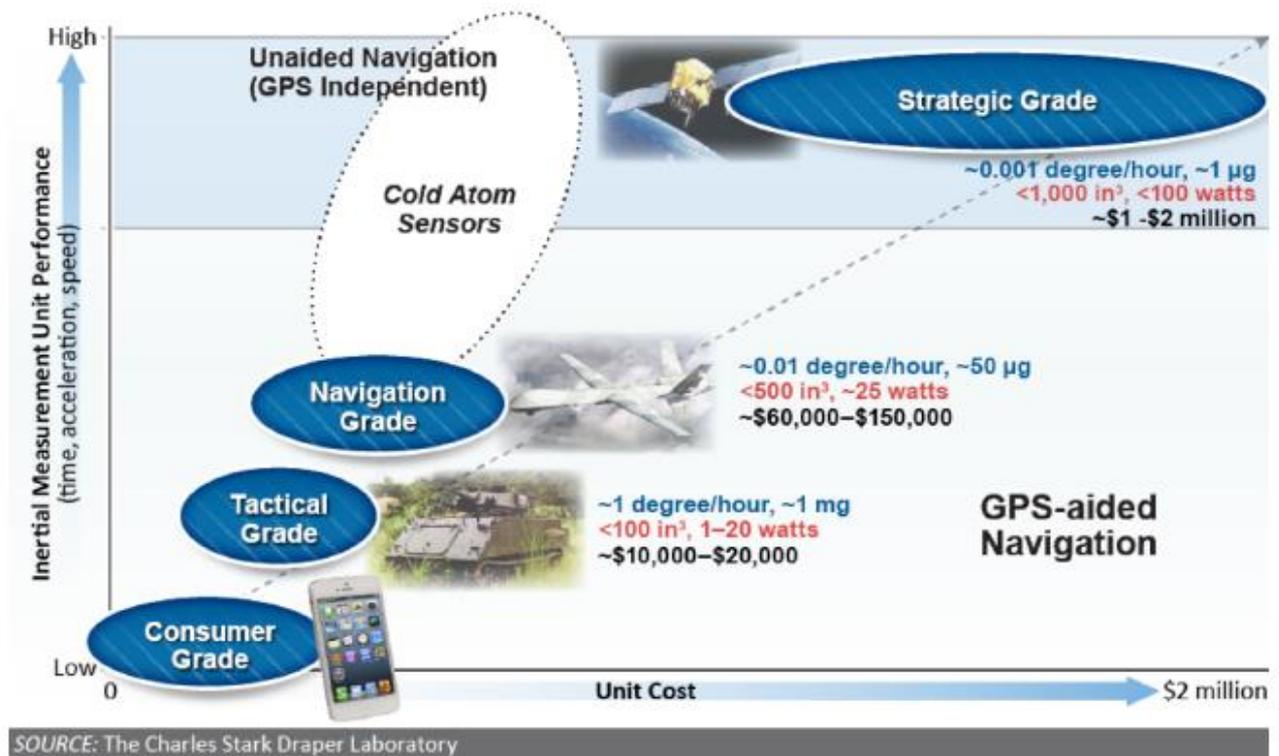


Figure 3 Current Performance and Cost Landscape for Inertial Measurement Units.

Table 3 Increased Requirements to Achieve 20-meter Accuracy for 60-minute Missions

	20 minute mission ^a	60 minute mission ^b
Accelerometer bias	3 μg	0.3 μg
Accelerometer velocity random walk	50 $\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$	10 $\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$
Gyroscope bias	1,460 $\mu\text{deg}/\text{hr}$	55 $\mu\text{deg}/\text{hr}$
Gyroscope angle random walk	630 $\mu\text{deg}/\text{hr}^{1/2}$	40 $\mu\text{deg}/\text{hr}^{1/2}$

^a Target for the Chip-Scale Combinatorial Atomic Navigator (C-SCAN) program

^b Requirement for a typical anti-access, area denial mission

Гироскопы на основе атомных интерферометров

Физические основы интерферометра на основе резонансного взаимодействия света с атомами в разнесенных оптических полях были впервые исследованы в работах

Письма в ЖЭТФ, том 39, вып. 11, стр. 531 – 533

10 июня 1984 г.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ АТОМОВ И ПОЛУЧЕНИЕ АТОМНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РЕШЕТОК В СВЕТОВЫХ ПОЛЯХ

Б.Я.Дубецкий, А.П.Казанцев, В.П.Чеботаев,
В.П.Яковлев

Предложен способ наблюдения интерференции атомов с помощью слабокогерентного атомного пучка, рассеивающегося на двух стоячих волнах. Показано, что атомы могут переносить пространственную когерентность на весьма большие расстояния.

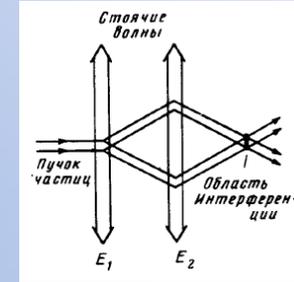


Схема атомного интерферометра

Volume 140, number 1,2

PHYSICS LETTERS A

4 September 1989

ATOMIC INTERFEROMETRY WITH INTERNAL STATE LABELLING

Ch.J. BORDÉ

Laboratoire de Physique Théorique, Gravitation et Cosmologie Relativistes, CNRS/URA 769, Université Pierre et Marie Curie, Institut Henri Poincaré, 11, rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris Cedex 05, France

Received 30 May 1989; accepted for publication 6 June 1989

Communicated by J.P. Viozier

It is shown that the interaction geometry comprising four travelling laser waves which is used to obtain optical Ramsey fringes in atomic spectroscopy, is also well suited to build an atom interferometer based on the atomic recoil. Since two different internal states are associated with the two arms of the interferometer, the de Broglie phase, induced by rotation or acceleration, manifests itself as a frequency shift of the Ramsey fringes.

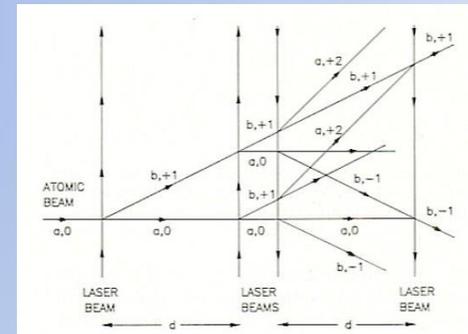


Fig. 1. Interaction geometry of the four travelling laser beams ($\omega, \pm k\hat{z}$) with the atomic beam (E_a, p_0). Each ray is labelled by its energy and momentum state $|\alpha, m_\alpha\rangle \equiv |E_\alpha, p_0 + m_\alpha \hbar k\rangle$ ($\alpha = a$ or b).

$$H_R = -\Omega \cdot (r \times p),$$

$$\exp\left(-\frac{iM}{\hbar} \oint g \cdot r(t') dt'\right)$$

Первая демонстрационная экспериментальная реализация гироскопа на основе атомного интерферометра Riehle et.al PRL 67,177(1991)

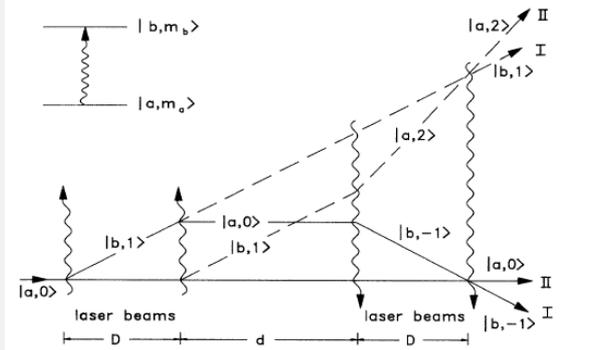
Преимущества (к электронным, нейтронным инт.)

- доступность
- низкая чувствительность к внешним эл. полям

Физические основы интерферометра на основе резонансного взаимодействия света с атомами в разнесенных оптических полях были впервые исследованы в работах

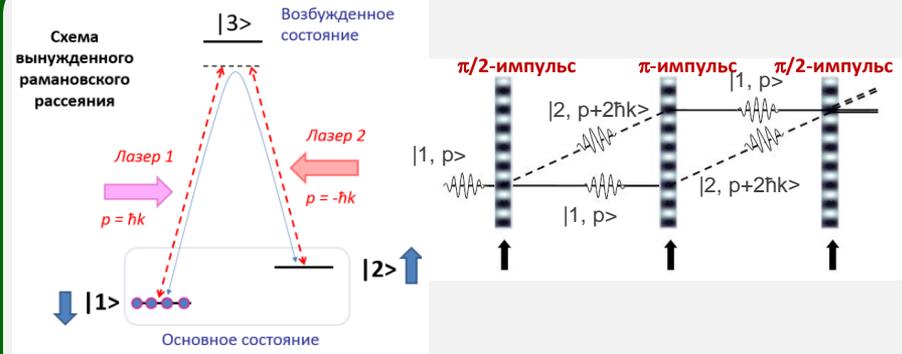
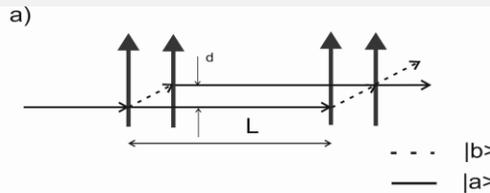
Riehle et.al PRL 67,177(1991)

Интеркомбинационный переход
 $^3P_1 \rightarrow ^1S_0$ в Ca (657.46 nm)



Атомный интерферометр
 Mg (ИЛФ СО РАН)

S.N. Bagayev, V.I. Baraulia, A.E. Bonert, A.N. Goncharov, M.R. Seydaliyev, A.S. Tychkov, "Atom interferometry with Mg beams", Laser Phys., vol. 11, no. 11, p. 1178 (2001)



Appl. Phys. B 54, 321–332 (1992)

Applied
 Physics B
 Photo-
 physics
 and Laser
 Chemistry
 © Springer-Verlag 1992

Measurement of the Gravitational Acceleration of an Atom with a Light-Pulse Atom Interferometer

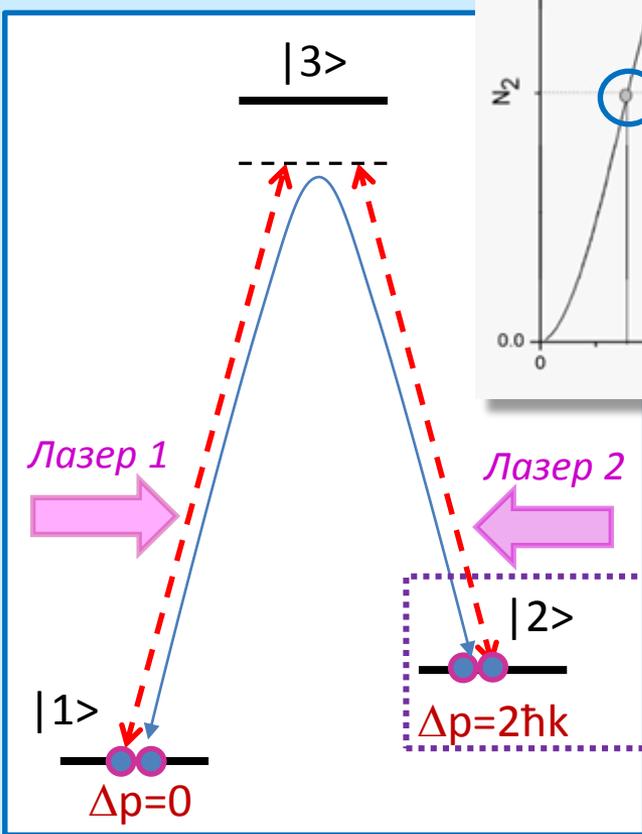
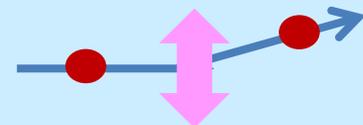
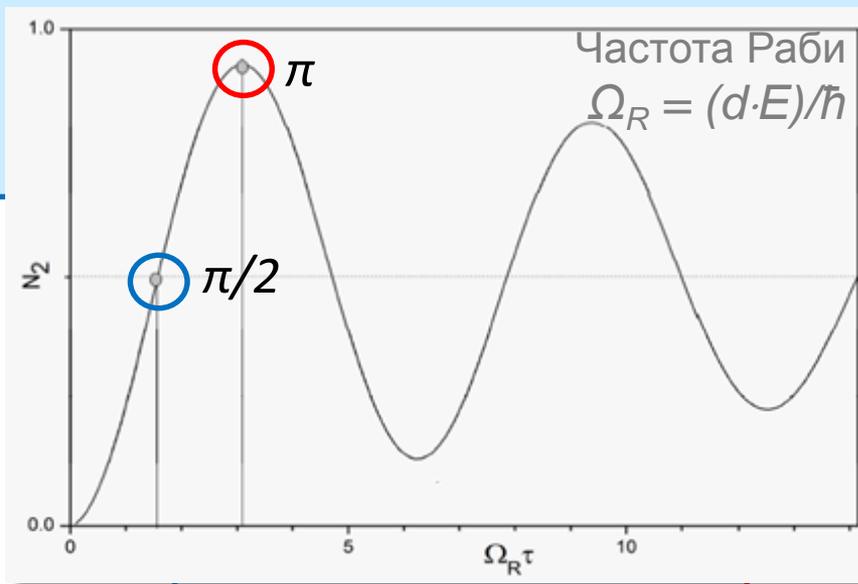
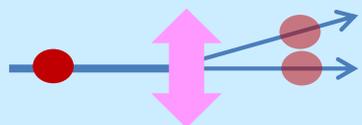
M. Kasevich and S. Chu

Physics Department, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

Received 26 December 1991/Accepted 10 January 1992

Abstract. Velocity sensitive stimulated Raman transitions have been used to measure the gravitational acceleration, g , of laser cooled sodium atoms in an atomic fountain geometry. By using an improved scheme to drive the Raman transitions, we have demonstrated a resolution of $3 \times 10^{-8} g$ after 2×10^3 seconds of integration time. In addition to presenting recent experimental results, we review the theory of stimulated Raman transitions as it applies to atom interferometers and discuss the prospects of an atom interferometer-based gravimeter with better than $10^{-10} g$ absolute accuracy.

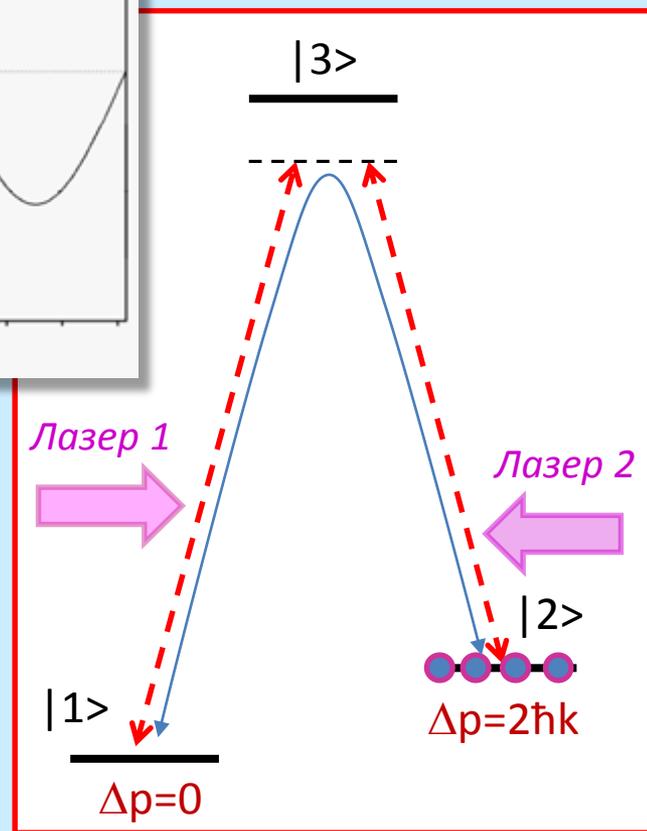
использование лазерных лучей в качестве непрозрачных и полупрозрачных зеркал



«Маркировка» состояний:

определенному импульсу атома соответствует его определенное внутреннее состояние ($|1\rangle$ или $|2\rangle$)

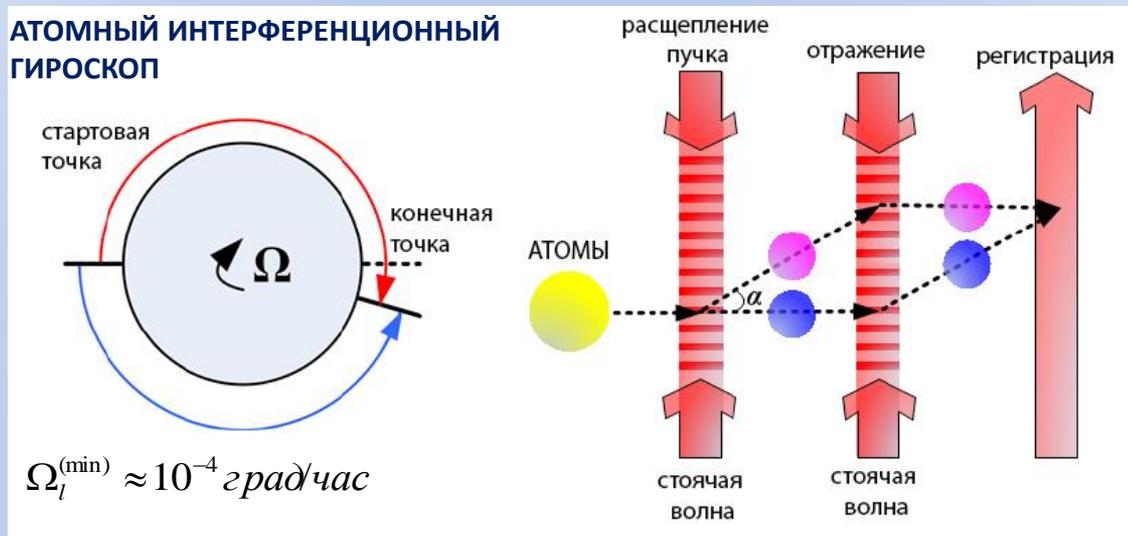
Полупрозрачное зеркало



Непрозрачное зеркало

Лазерные VS атомных интерферометров

Управление пакетами волн де Бройля



Чувствительность интерферометра

$$\Phi_{\text{Sagnac}} = \frac{4\pi E}{hc^2} \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\Omega}$$

$$\frac{\Omega_{at}^{(min)}}{\Omega_l^{(min)}} = k \frac{A_l}{A_{at}} \left(\frac{\langle N_l \rangle}{N_{at}} \right)^{1/2}, \quad k = (10^{-9} \div 10^{-11})$$

$$\langle N_l \rangle \approx 10^{17}, \quad N_{at} \approx 10^{12}$$

A – вектор площади интерферометра,

E – энергия частицы:

$E = h\nu = hc/\lambda$ для фотона,

$E = m_{at}c^2 = hc/\lambda_{DB}$ для атома.

$m_{at}c^2 / h\nu \approx 10^9 - 10^{11}$

$$\Omega_{at}^{(min)} \leq 10^{-8} \div 10^{-10} \text{ град/час},$$

$$A_{at} / A_l > 10^{-3}$$

АИГ на холодных атомах

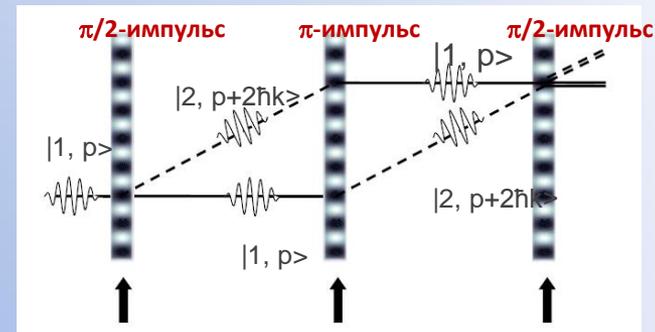
$$\Phi = \frac{2m}{\hbar} \vec{\Omega} \cdot \vec{A} + \vec{k} \cdot \vec{g} T^2 - \vec{k} \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{g}) T^3$$

Вращение Ускорение Перекрестный

- сигналы от ускорений на 5-6 порядков
превышают сигналы от вращения!

(встречные пучки)

- перекрестный член,
равен нулю только при $\Omega \parallel g$.



$$A = L^2 \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} \quad v_{\perp} = N_{ph} \frac{\hbar k}{m}$$

Увеличение длины интерферометра L:

- + Увеличение чувствительности $\sim L^2$;
- Возможно уменьшение стабильности.
- Увеличение размера

Уменьшение продольной скорости v_{\parallel} :

- + Увеличение чувствительности $\sim 1/v_{\parallel}$;
- + Уменьшение размера;

Atomic beam gyroscope (laboratory Stanford/Yale)

Long-Term Stability of an Area-Reversible Atom-Interferometer Sagnac Gyroscope

D. S. Durfee

Department of Physics and Astronomy, Brigham Young University, Provo, Utah 84602, USA

Y. K. Shaham

Department of Physics, Yale University, New Haven, Connecticut 06520-8120, USA

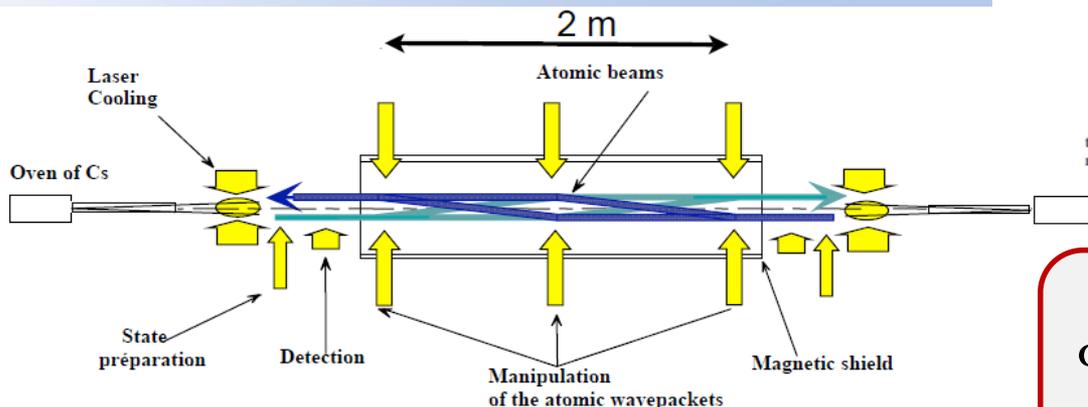
M. A. Kasevich

Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305-4060, USA

(Received 27 October 2005; published 15 December 2006)

We report the first demonstration of a matter-wave interference gyroscope that meets both the short-term noise and long-term stability requirements for high accuracy navigation. This performance level resulted from implementation of a novel technique to precisely reverse the input axis of the gyroscope.

^{133}Cs



flux 10^{11} at/s
 $V_{\parallel} \approx 290$ m/s
 $A \approx 30$ mm²

ARW = $3 \cdot 10^{-6}$ град/ $\sqrt{\text{час}}$
BS = $0.7 \cdot 10^{-4}$ град/час

Преимущества:

Большой поток атомов \rightarrow лучше BS и ARW

Недостатки:

Большие размеры

$$\Phi = \frac{2m}{\hbar} \vec{\Omega} \cdot \vec{A} + \vec{k} \cdot \vec{g} T^2 - \vec{k} \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{g}) T^3$$

Вращение Ускорение Перекрестный

Atom-interferometer gyroscope

2393

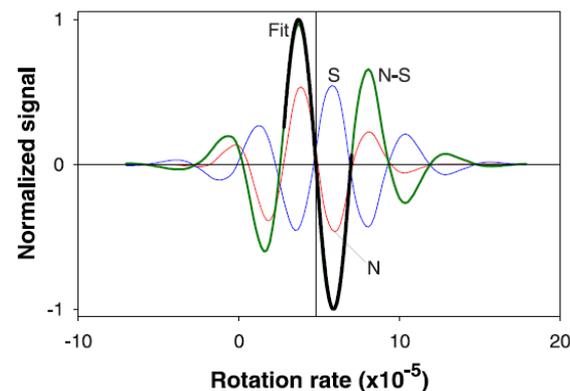
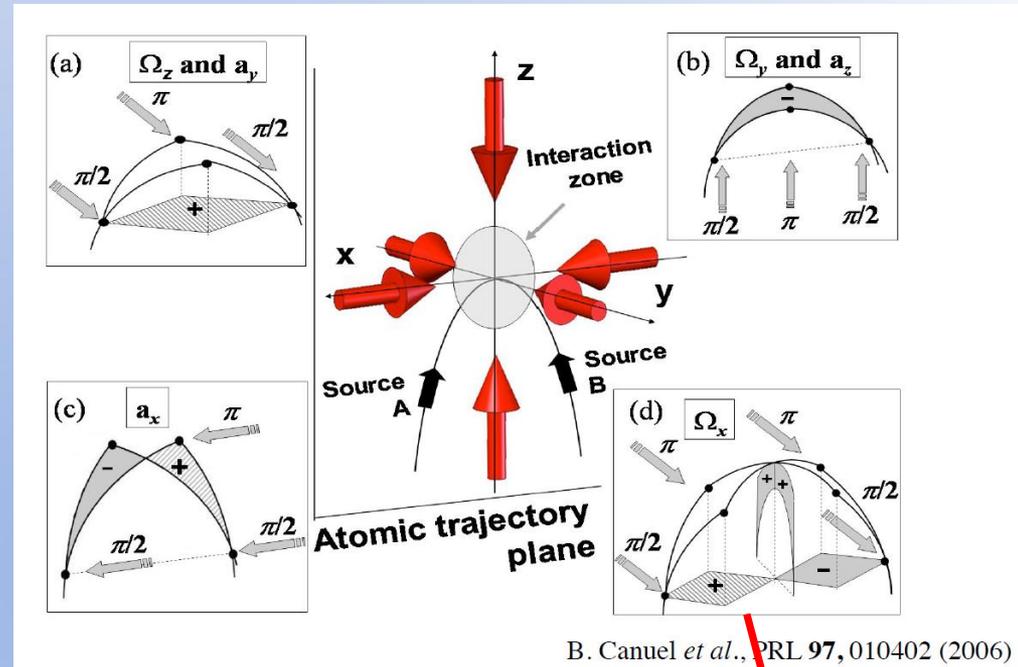
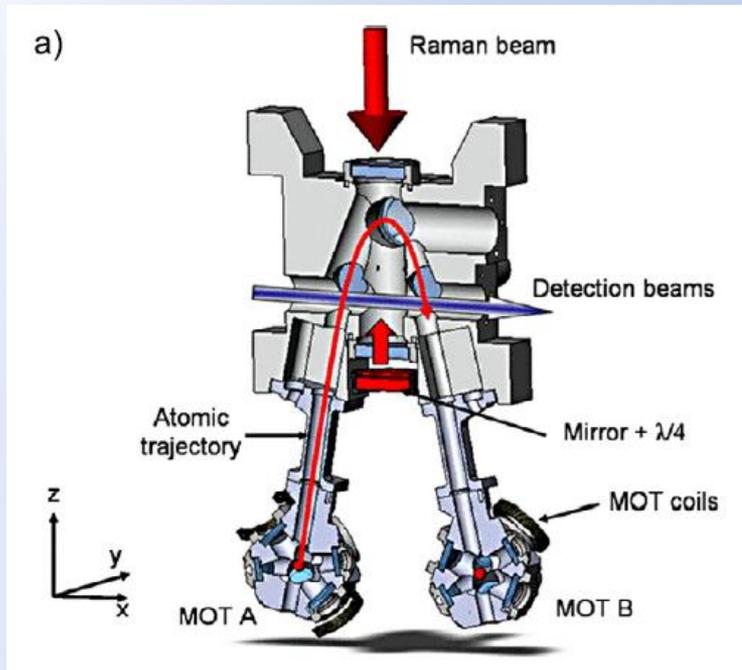


Figure 3. Earth rotation rate measurement (preliminary). The north and south rotation fringes are the symmetric signals shown with thin curves, the difference north – south is labelled N-S, and the fit to the centre of the difference curve is shown with a heavy black curve. The arbitrary phase was chosen so that the north and south signals have opposite sign, maximizing the contrast of the difference signal. From the fit, we determine $\Omega_E = 7.24 \times 10^{-5}$ rad s⁻¹ (after compensating for latitude).

АИГ на холодных атомах - SYRTE (Париж)



2 MOT of Cs

$$T_{\text{atoms}} \sim 1 \mu\text{K}$$

Launch velocity 2,4 m/s

Angle $8^\circ \Rightarrow V_{\parallel} = 0,33 \text{ m/s}$

$$T_c = 0,58 \text{ s}$$

Flux $\sim 10^6 \text{ at/s}$

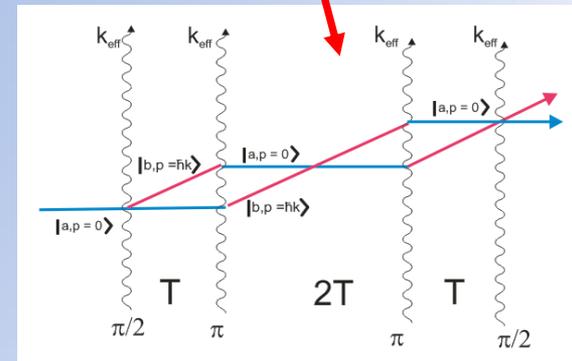
$$A = 4 \text{ mm}^2$$

$$\text{ARW}_{\text{верт.}} = 1.9 \cdot 10^{-4} \text{ град}/\sqrt{\text{час}}$$

$$\text{ARW}_{\text{гор.}} = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ град}/\sqrt{\text{час}}$$

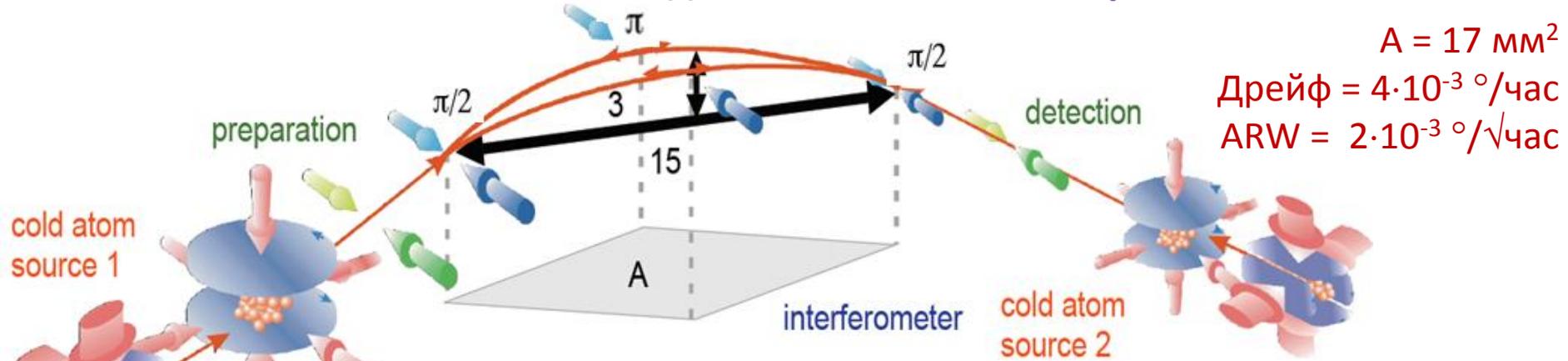
$$\text{BS} = 2.8 \cdot 10^{-2} \text{ град}/\text{час}$$

$$\Delta a = 6.4 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}^2$$

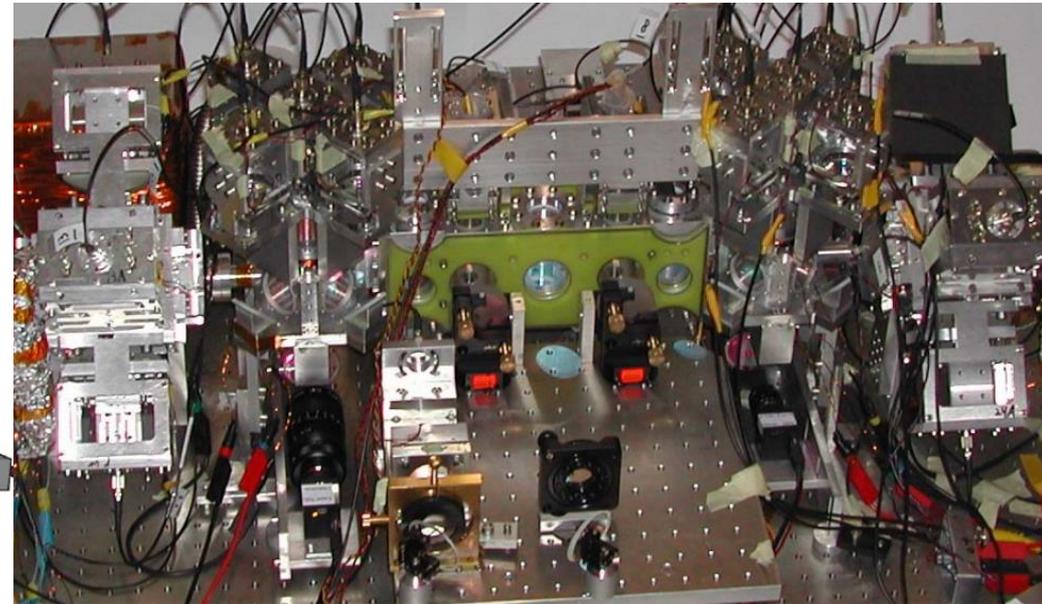
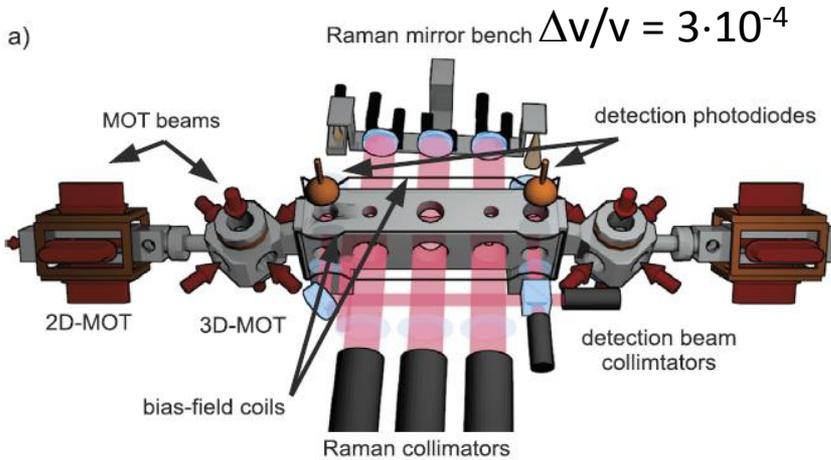


$$\Delta\Phi = \frac{1}{2} [\mathbf{k} \times (\mathbf{g} + \mathbf{a})] \Omega T^3$$

PRL **97**, 010402 (2006)



2D MOT: 10^{10} ат/с, 15 м/с
3D MOT: 10^8 ат за 20 мс
 $v=2.8 \text{ м/с}$ (8 мКК)



G. Tackmann et al. C.R. Physique 15(2014) 884

- малое число атомов.

Количество атомов в магнито-оптической ловушке – $10^6 \div 10^7$.

Частично решается использованием каскадных 2D – 3D ловушек.

LNE-SYRTE гироскоп

PRL 116, 183003 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
6 MAY 2016

Continuous Cold-Atom Inertial Sensor with 1 nrad/sec Rotation Stability

I. Dutta, D. Savoie, B. Fang, B. Venon, C. L. Garrido Alzar, R. Geiger,^{*} and A. Landragin[†]
*LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités,
 UPMC Univ. Paris 06, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France*
 (Received 19 January 2016; published 6 May 2016)

We report the operation of a cold-atom inertial sensor which continuously captures the rotation signal. Using a joint interrogation scheme, where we simultaneously prepare a cold-atom source and operate an atom interferometer (AI), enables us to eliminate the dead times. We show that such continuous operation improves the short-term sensitivity of AIs, and demonstrate a rotation sensitivity of 100 nrad/sec/ $\sqrt{\text{Hz}}$ in a cold-atom gyroscope of 11 cm² Sagnac area. We also demonstrate a rotation stability of 1 nrad/sec at 10⁴ sec of integration time, which represents the state of the art for atomic gyroscopes. The continuous operation of cold-atom inertial sensors will lead to large area AIs at their full sensitivity potential, determined by the quantum noise limit.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.183003

$$1 \text{ nrad/s} \approx 2 \times 10^{-4} \text{ град/час}$$

$$\Phi_{\Omega} = \frac{1}{2} \vec{k}_{\text{eff}} \cdot (\vec{g} \times \vec{\Omega}) T^3,$$

$$\text{Flux} \approx 2 \times 10^7 \text{ Cs atoms/s}$$

$$A = 11 \text{ cm}^2$$

$$T = 0.8 \text{ s}$$

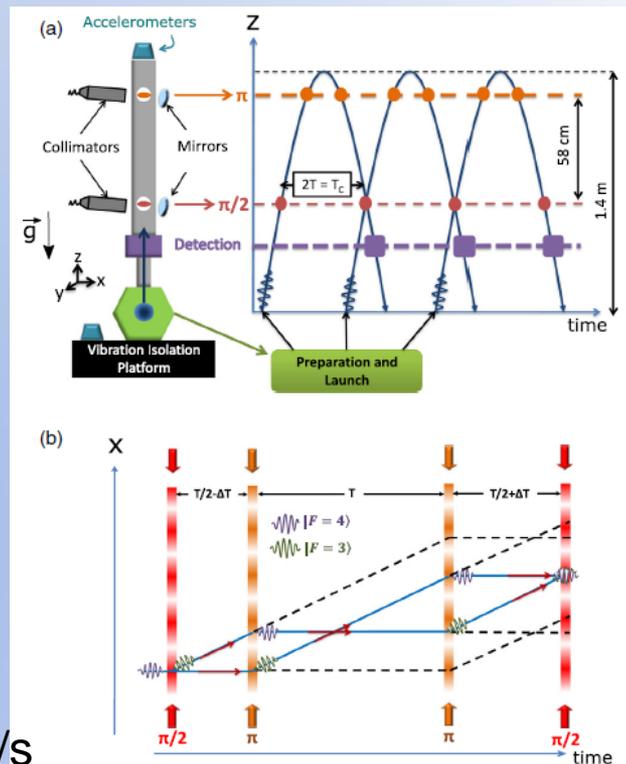
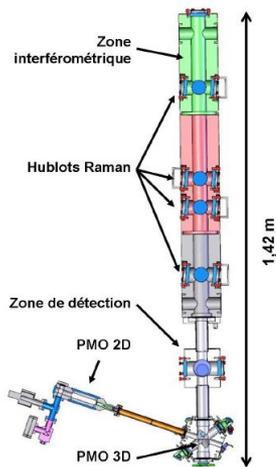


FIG. 1. (a) Schematic and operation principle of the continuous cold-atom gyroscope. Continuous measurement is performed with a joint interrogation sequence where the bottom $\pi/2$ pulse is shared between the clouds entering and exiting the interrogation region. (b) Space-time diagram of the four-pulse AI. We introduce a time asymmetry of ΔT to avoid the recombination of parasitic interferometers resulting from the imperfect π pulses. The gyroscope measures rotation rate along the y direction, i.e., perpendicular to the AI area.

- Повышенная чувствительность к вибрациям по сравнению со схемами на встречных пучках
 - Время свободного пролета атомов составляет десятые доли секунды (атомы усредняют информацию за все время полета).
- Решение** – уменьшение объема, переход к Бозе-Эйнштейновскому конденсату

Фундаментальные факторы ограничивающие чувствительность

Оценка **ARW** (чувствительность, определяемая дробовым шумом)

$$ARW = \sigma(\tau, S/N) \sqrt{\tau}$$

$$ARW = \frac{\pi \hbar}{2m A \sqrt{N}} \sqrt{T_c}$$

ст. девиация Аллана

$$\sigma(\tau) \approx \frac{\delta\Omega}{(S/N)} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}}$$

T_c^{-1} – полоса измерений
 τ – время усреднения

$$\Phi = \frac{2m}{\hbar} \Omega A$$

$$\delta\Omega = \frac{\pi \hbar}{2mA}$$

угловая скорость вращения, которой сопоставляется ширина резонанса Рамси

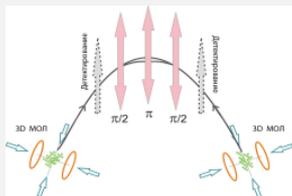
Для увеличения чувствительности требуется создание интенсивных источников холодных атомов:

- источники ВЕС $N \sim 10^4 - 10^5$ ат/с
- атомный фонтан $N \sim 10^7 - 10^8$ ат/с
- коллимированные пучки “горячих” атомов $N \sim 10^{11} - 10^{12}$ ат/с

Основные достижения

Фонтанного типа

SYRTE (Париж)



$$\text{ARW}_{\text{верт.}} = 1.9 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ / \sqrt{\text{час}}$$

$$\text{ARW}_{\text{гор.}} = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ / \sqrt{\text{час}}$$

$$\text{BS} = 2.8 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ / \text{час}$$

$$\Delta a = 6.4 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}^2$$

2 MOT of Cs

$$T_{\text{atoms}} \sim 1 \text{ } \mu\text{K}$$

$$\text{Launch velocity } 2,4 \text{ m/s}$$

$$\text{Angle } 8^\circ \Leftrightarrow V_{\perp} = 0,33 \text{ m/s}$$

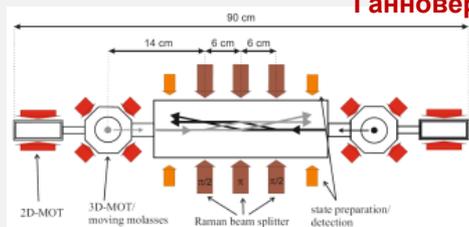
$$T_c = 0,58 \text{ s}$$

$$\text{Flux} \sim 10^6 \text{ at/s}$$

$$A = 4 \text{ mm}^2$$

Пучкового типа (охлажденный пучок)

Ганновер



$$\text{ARW} = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ / \sqrt{\text{час}}$$

$$(10^{-8} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}})$$

2 2D MOT + 2 3D MOT

Rb

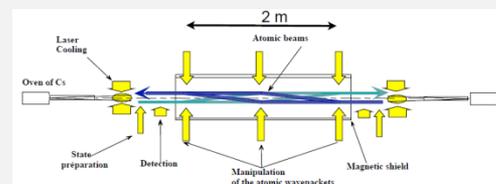
$$\text{flux } 2.2 \times 10^7 \text{ atoms/s}$$

$$V_{\parallel} \approx 2.5\text{--}5 \text{ m/s}$$

$$A \approx 8 \text{ mm}^2$$

Пучкового типа (интенсивный пучок)

Stanford/Yale



$$\text{ARW} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ / \sqrt{\text{час}}$$

$$\text{BS} = 0.7 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ / \text{час}$$

Cs atom beams

$$\text{flux } 10^{11} \text{ at/s}$$

$$V_{\parallel} \approx 290 \text{ m/s}$$

$$A \approx 30 \text{ mm}^2$$

Сводная таблица основных характеристик АИГ–1–3

Параметр	АИГ–1	АИГ–2	АИГ–3
ARW (чувствительность, определяемая дробовым шумом), гр/час ^{1/2}	10^{-6}	1.4×10^{-5}	10^{-5}
BS (стабильность, целевая), гр/час	10^{-6}	10^{-5}	10^{-5}
Стандартный рабочий диапазон (соответствует сдвигу фазы интерференционной картины на π), рад/с	2×10^{-4}	3×10^{-5}	10^{-6}
Полный динамический диапазон, ограниченный немонохроматичностью источника/уменьшением числа атомов в зоне детектирования, рад/с	$6 \times 10^{-3}/0.1$	$1.2 \times 10^{-3}/0.2$	$10^{-3}/10$
Устойчивость к внешним воздействиям	Виброизоляция: $a < 10^{-4}$ м/с ² ; Экранировка до остаточного значения и неоднородности не более 100 мГс; Вакуумирование области охлаждения пучка и интерференции на уровне 10^{-7} торр.	Виброизоляция: $a < 10^{-4}$ м/с ² ; Экранировка до остаточного значения и неоднородности не более 10 мГс; Вакуумирование магнитооптической ловушки и области интерференции на уровне 10^{-9} торр.	Виброизоляция: $a < 10^{-5}$ м/с ² ; Экранировка остаточного значения и неоднородности не более 1 мГс; Вакуумирование области атомного чипа на уровне 10^{-11} торр.
Габариты при максимальной миниатюризации электроники, вакуумных и лазерных систем с учетом ограничений по физическим принципам.	100x75x50	$20 \times 20 \times 20$	$10 \times 10 \times 20$
Масса, кг.	100	10	5

Требуемые параметры АИ для достижения заявленных характеристик

1) АИГ1 на основе «пучка» атомов Rb:

$$\lambda = 795 \text{ нм}, v_a = 20 \text{ м/с}, T_c = 500 \text{ мс}, L = 1 \text{ м},$$

- число холодных атомов в пучке формируемым МОЛ порядка 10^9 ат/с

2) АИГ2 на основе фонтана атомов Rb:

$$\lambda = 795 \text{ нм}, v_a = 3 \text{ м/с}, T_c = 500 \text{ мс}, L = 10 \text{ см},$$

- число холодных атомов в пучке формируемым МОЛ порядка 10^8 ат/с

- Положительными чертами АИГ-1 по сравнению с АИГ-2 является: возможность непрерывного снятия данных, большое количество атомов в перспективе до 10^{11} ат/с, большое отношение сигнал/шум ($\sim 10^5$), относительно невысокие требования к вакууму в камере интерферометра, потенциальная возможность получить необходимые целевые параметры по чувствительности и стабильности гироскопа (ARW и BS).
- Недостатками являются сложность создания высокоточного гироскопа ($BS < 10^{-5}$ гр/час) с линейными размерами менее 1 м и массой менее 100 кг, относительно небольшой (например, по сравнению с волоконно-оптическими гироскопами) динамический диапазон, связанный с малой когерентностью атомного пучка $v/\Delta v \sim 10$.
- Наиболее очевидным является применение АИГ -1 в стационарных условиях для точного измерения малых угловых скоростей, а также в качестве лабораторного макета для отработки основных принципов гироскопии с использованием атомно-оптических интерферометров.
- В сочетании с классическими датчиками вибраций, ускорений и вращений возможно применение АИГ-2 в качестве компактного мобильного высокоточного гироскопа, способного поддерживать точность удержания нулевого направления на уровне 10^{-5} гр/час в полевых условиях. На базе АИГ-2 возможно создание демонстратора высокоточного гироскопа на волнах материи.

Оценка ARW и BS (перспективные характеристики АИГ)

Параметр	АИГ фонтанного типа	АИГ «пучкового» типа	АИГ (ВЕС на чипе)
ARW (гр/час ^{1/2})	1.2×10^{-8}	3×10^{-9}	$10^{-5} - 10^{-8}$ [A = 10cm ² , N = 10 ⁵ at/s]
BS (стабильность, целевая), гр/час	2.3×10^{-7} град./час	9×10^{-8} град./час	$10^{-4} - 10^{-7}$ град./час
Ст. рабочий диапазон (сдвигу фазы на π), рад/с	2.5×10^{-7}	0.5×10^{-6}	10^{-6}
Полный дин. диапазон, огр. немонохроматичностью источника/уменьшением числа атомов в зоне детектирования, рад/с	$1.2 \times 10^{-5}/0.03$	$5 \times 10^{-5}/0.1$	$10^{-3}/10$
Габариты (с учетом ограничений по физическим принципам).	40 × 40 × 40 см	220 × 50 × 50 см	10 × 10 × 20
Масса, кг.	10	100	5

Требуемые параметры АИ для достижения перспективных характеристик

1) АИ на основе фонтана атомов Rb:

- скорости атомов в пучках $v = 10 \text{ см/с}$ (температура порядка $10 \text{ } \mu\text{K}$)
- база интерферометра $L = 20 \text{ см}$ ($A = 45.8 \text{ см}^2$)
- число холодных атомов в пучке формируемым МОЛ порядка 10^{10} ат/с (при размерах световых пучков порядка 1 см и более).

2) АИГ на основе коллимированных пучков атомов Rb

- скорости атомов в пучках $v = 10 \text{ м/с}$
- база интерферометра $L = 100 \text{ см}$ ($A = 11.6 \text{ см}^2$)
- число холодных атомов в термальном пучке может достигать 10^{12} ат/с и больше [C. Slowe, et. al. "High flux source of cold rubidium atoms" Review of Scientific Instruments v.76, 130101 (2005)].

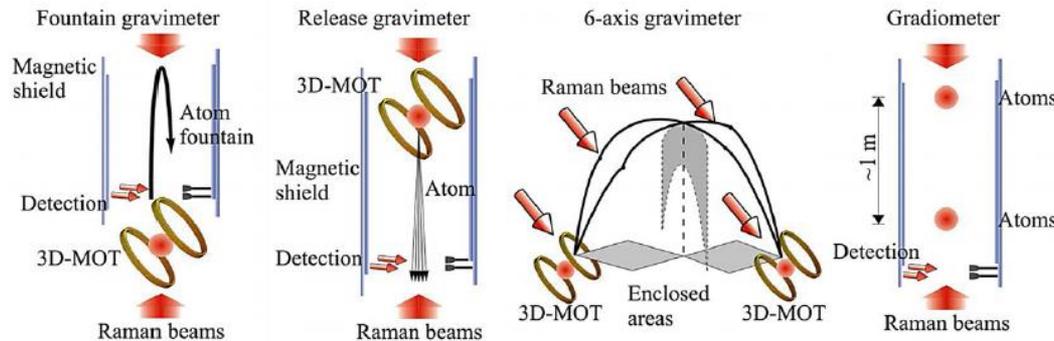
Гравиметры

Гравиметр на основе интерференции волн материи

• Реализация:

Meas. Sci. Technol. 20 (2009) 022001

Topical Review



атомы Cs
T = 400 ms

атомы ⁸⁷Rb
T = 50 ms

атомы Cs
гироскоп и гравиметр
$$\Delta\Phi = \frac{1}{2}[\mathbf{k} \times (\mathbf{g} + \mathbf{a})]\Omega T^3$$

атомы Cs
T ≈ 150 ms
ΔL = 1 м

Table 2. Summary of present sensitivities and accuracy for atom sensor gravimeters and gravity gradiometer of figure 7.

	Fountain [2, 3]	Release [82]	6-Axis sensor [83]	Gradiometer [5, 11]
Sensitivity	$1.1 \times 10^{-8} g/\sqrt{\text{Hz}}$	$1.4 \times 10^{-8} g/\sqrt{\text{Hz}}$	$1.5 \times 10^{-6} g/\sqrt{\text{Hz}}$	$4 \times 10^{-9} (g/m)/\sqrt{\text{Hz}}$
Accuracy	$3 \times 10^{-9} g$	–	–	–

Ссылки:

2. Peters A, Chung K Y and Chu S 1999 Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms *Nature* **400** 849–52

3. Müller H, Chiow S W, Herrmann S, Chu S and Chung K-Y 2008 Atom-interferometry tests of the isotropy of post-Newtonian gravity *Phys. Rev. Lett.* **100** 031101

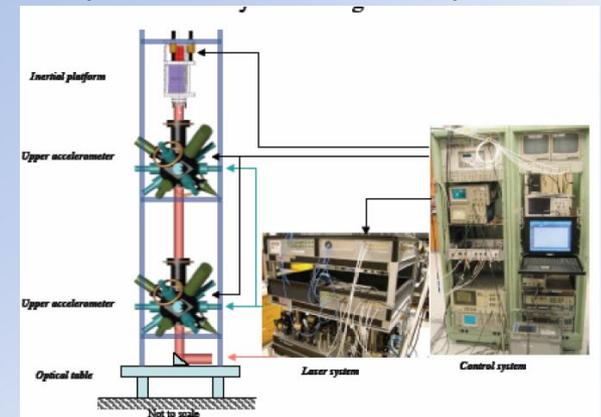
82. Le Gouët J, Mehlstäubler T E, Kim J, Melet S, Clairon A, Landragin A and Pereira Dos Santos F 2008 Limits to the sensitivity of a low noise compact atomic gravimeter *Preprint arXiv:0801.1270*

83. Canuel B *et al* 2006 Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry *Phys. Rev. Lett.* **97** 010402

5. McGuirk J M, Foster G T, Fixler J B, Snadden M J and Kasevich M A 2002 Sensitive absolute-gravity gradiometry using atom interferometry *Phys. Rev. A* **65** 033608

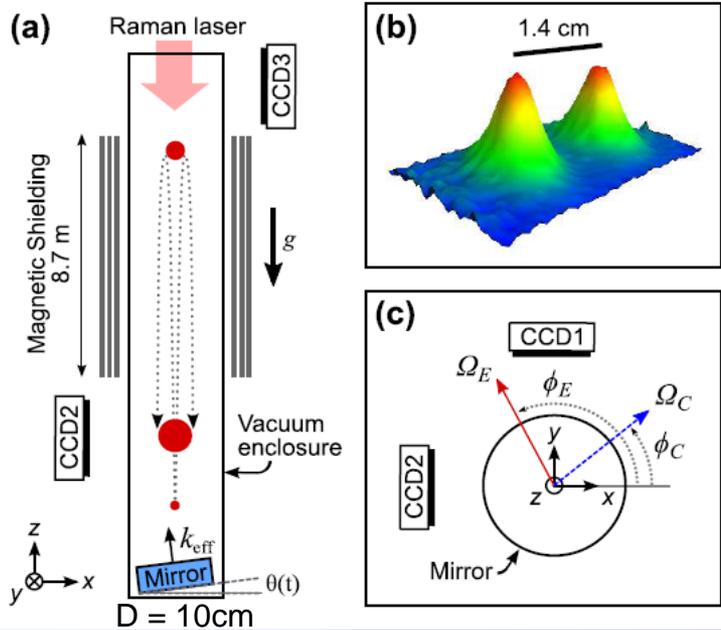
11. Lempore G, Bertoldi A, Cacciapuoti L, Prevedelli M and Tino G M 2008 Determination of the Newtonian gravitational constant using atom interferometry *Phys. Rev. Lett.* **100** 050801

Mobile Atomic Gravity Gradiometer (M. Kasevich Stanford Univ.)



Гравиметр фонтанного типа - Stanford

^{87}Rb



$$2T = 2.3 \text{ s}$$

flux 4×10^6 atoms at 50nK
 or 10^5 atoms at 3nK
 Magnetic field $< 1\text{mG}$

Multi-axis inertial sensing with long-time point source atom interferometry

Susannah M. Dickerson, Jason M. Hogan, Alex Sugarbaker, David M. S. Johnson, and Mark A. Kasevich
 Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305

(Dated: May 9, 2013)

We show that light-pulse atom interferometry with atomic point sources and spatially resolved detection enables multi-axis (two rotation, one acceleration) precision inertial sensing at long interrogation times. Using this method, we demonstrate a light-pulse atom interferometer for ^{87}Rb with 1.4 cm peak wavepacket separation and a duration of $2T = 2.3$ s. The inferred acceleration sensitivity of each shot is $6.7 \times 10^{-12}g$, which improves on previous limits by more than two orders of magnitude. We also measure the Earth's rotation rate with a precision of 200 nrad/s.

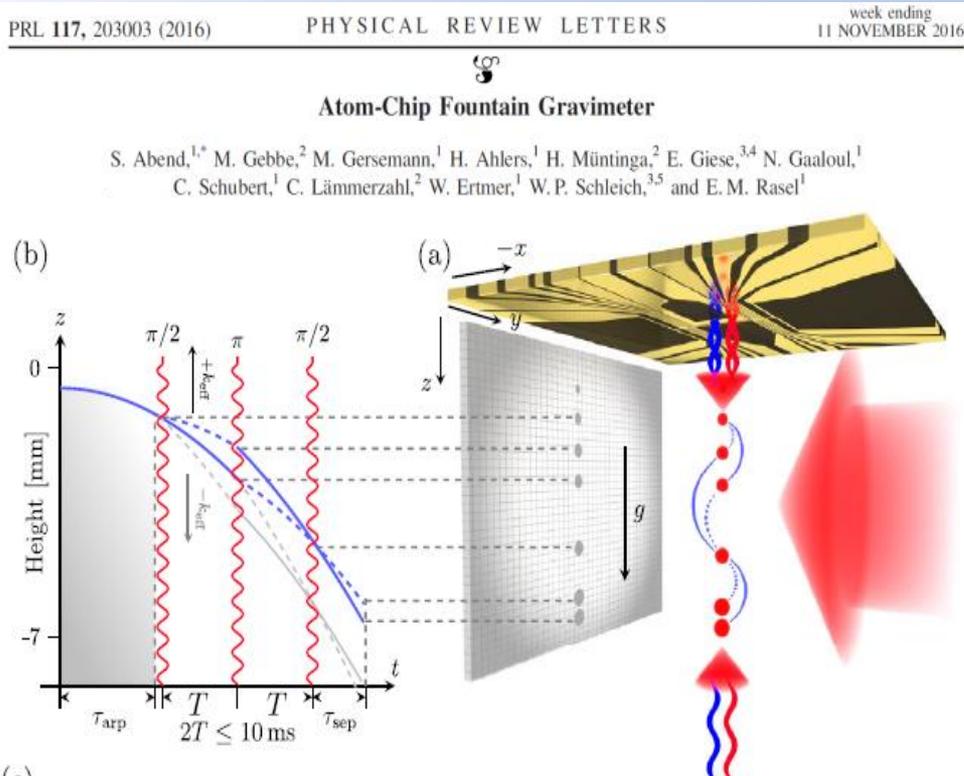
PACS numbers: 03.75.Dg, 37.25.+k, 06.30.Gv

PRL v.111, 083001 (2013)

$$\Delta\Omega = 200 \text{ nrad/s} \approx 1.25 \times 10^{-5} \text{ }^\circ/\text{hour}$$

$$\Delta g \approx 6.7 \times 10^{-12} g$$

Гравиметр на основе интерференции волн материи



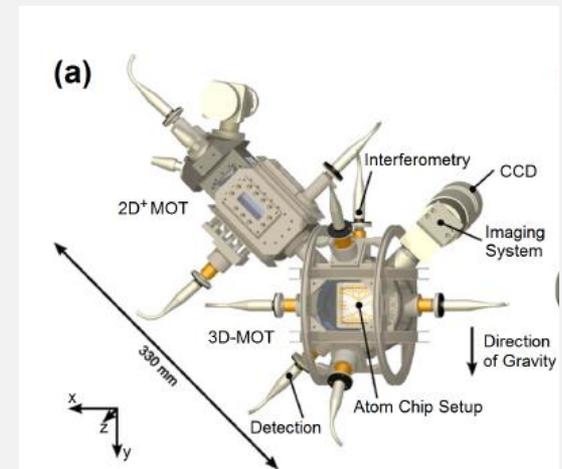
1.5×10^4 atoms at 50nK

g measurements:
 $\Delta g/g \approx 10^{-9}$ after 100 s of integration!

Без виброизоляции $N \approx 10^4 - 10^5$ atoms
 $\Delta a \approx 1.3 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2 \sqrt{\text{Hz}}$ $T \approx 50 \text{ nK}$

- **Высокая чувствительность** → малые времена измерения.
- **Точность данного гравиметра не превосходит точность классического, но большой потенциал для развития!**

Интенсивный источник ВЕС



Сравнение классических лазерных и квантовых гравиметров

баллистические: $\sim 1 - 10 \mu\text{Gal}$

FG-5: Точность: 2 мкГал
Чувствительность: 15 мкГал/ $\sqrt{\text{Гц}}$
Время полного измерения: 10 часов



в РФ - есть

Преимущества:

- высокая точность на уровне 2 мкГал
- простая система
- низкая стоимость

Недостатки:

- Низкая чувствительность на уровне 15 мкГал/ $\sqrt{\text{Гц}}$
- Механические эффекты (трение в процессе перезахвата пробного тела)
- длительное время набора статистики

стационарные квантовые: $\sim 1 - 10 \mu\text{Gal}$

LNE-SYRTE: Точность: 3 микроГал
Чувствительность: 5 микроГал/ $\sqrt{\text{Гц}}$
Время полного измерения: менее 1 часа



LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University

в РФ - нет



<https://www.muquans.com/>

Преимущества:

- высокая точность на уровне 1-10 мкГал
- Высокая чувствительность
- Отсутствие механических эффектов (трения...), что позволяет проводить длительные измерения
- Широкая область применений: геодезия, навигация, фундаментальная физика...

Недостатки:

- высокая стоимость (на данный момент)
- Сложная система

Microgravity experiments



ARTICLE

Received 12 Jun 2016 | Accepted 1 Nov 2016 | Published 12 Dec 2016

DOI: 10.1038/ncomms13786

OPEN

Dual matter-wave inertial sensors in weightlessness

Brynle Barrett¹, Laura Antoni-Micollier¹, Laure Chichet¹, Baptiste Battelier¹, Thomas Lèveque², Arnaud Landragin³ & Philippe Bouyer¹

Quantum technology based on cold-atom interferometers is showing great promise for fields such as inertial sensing and fundamental physics. However, the finite free-fall time of the atoms limits the precision achievable on Earth, while in space interrogation times of many seconds will lead to unprecedented sensitivity. Here we realize simultaneous ^{87}Rb - ^{39}K interferometers capable of operating in the weightless environment produced during parabolic flight. Large vibration levels ($10^{-2} \text{gHz}^{-1/2}$), variations in acceleration (0-1.8g) and rotation rates (5°s^{-1}) onboard the aircraft present significant challenges. We demonstrate the capability of our correlated quantum system by measuring the Eötvös parameter with systematic-limited uncertainties of 1.1×10^{-3} and 3.0×10^{-4} during standard- and microgravity, respectively. This constitutes a fundamental test of the equivalence principle using quantum sensors in a free-falling vehicle. Our results are applicable to inertial navigation, and can be extended to the trajectory of a satellite for future space missions.

Тест в условиях больших
вибраций: $10^{-2} \text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

Диапазон
ускорений: 0-1.8 g
вращений: $<5^\circ/\text{s}$

NATURE COMMUNICATIONS | DOI: 10.1038/ncomms13786

ARTICLE

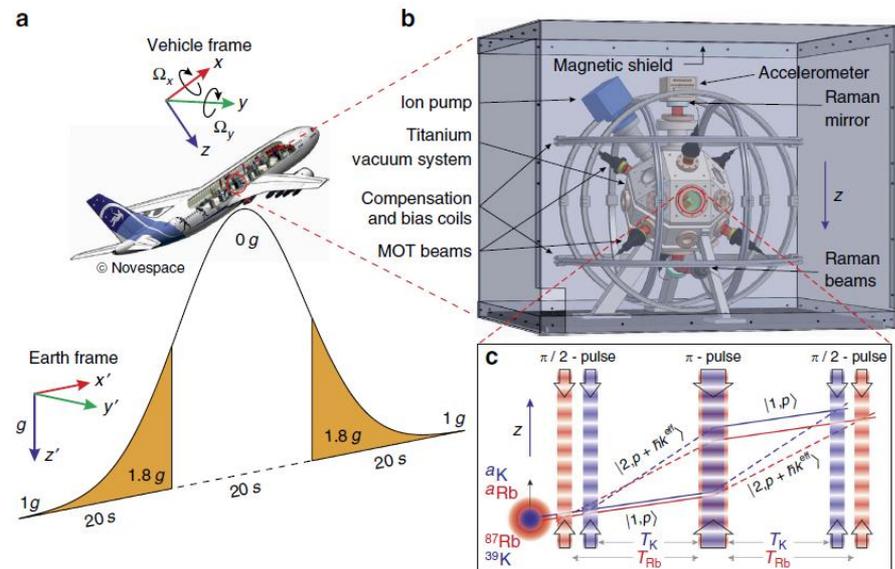
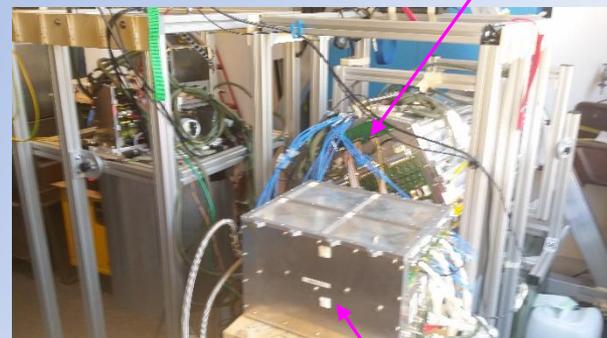
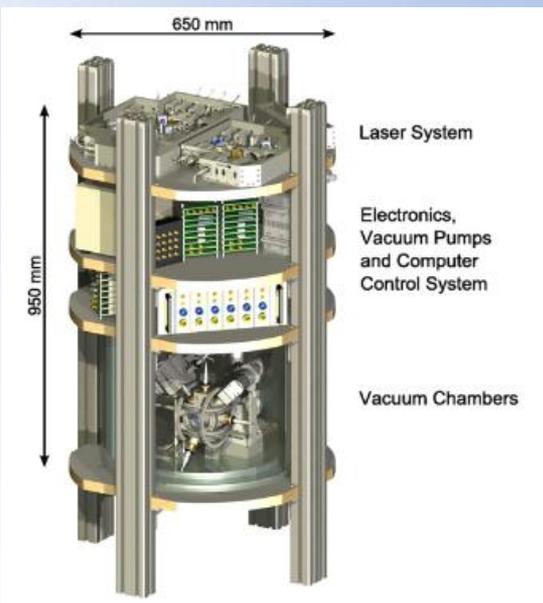
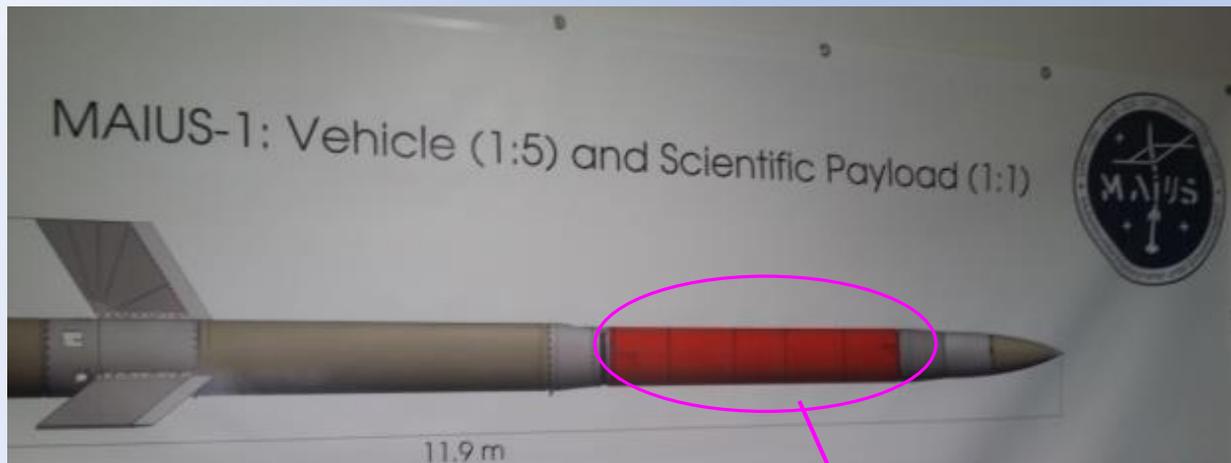


Figure 1 | Dual matter-wave sensors onboard the Novespace Zero-G aircraft. (a) Basic trajectory during parabolic flight, which produces 20 s of weightlessness per manoeuvre. The coordinate systems xyz and $x'y'z'$ correspond to the rotating frame of the vehicle and the frame of the Earth, respectively. (b) The science chamber mounted onboard the aircraft. Samples of ^{87}Rb and ^{39}K are laser-cooled and spatially overlapped in a vapour-loaded magneto-optical trap contained within a titanium vacuum system, which is enclosed by a mu-metal magnetic shield. Raman beams are aligned along the z axis of the aircraft. (c) Schematic of the simultaneous dual-species interferometers. Two Mach-Zehnder-type $\pi/2 - \pi - \pi/2$ -pulse sequences are centred about the π -pulse with interrogation times T_{Rb} and T_{K} , respectively. These free-fall times are adjusted independently to equilibrate the scale factors of each interferometer.

Microgravity experiments

Консорциум под руководством E. Rasel



БОРТОВЫЕ (СПУТНИКОВЫЕ) АИ MAIUS (Matter-wave Interferometry in Microgravity) - 2017

АИ на Бозе-Эйнштейновском конденсате (^{87}Rb , в будущем – $^{87}\text{Rb} | \text{K}$)

Запущен на ракете-зонде **23 января 2017** в Северной Швеции. Участники проекта:
German Aerospace Center (DLR), Leibniz Universität Hannover + еще 10 групп
(Германия)

Лазерный блок:

объем 21 л, вес 27 кг

4 лазера, усилители, 4 АОМ.

Выдерживает ускорение 13 g

2D МОЛ: 100+10 мВт

3D МОЛ: 105+10 мВт

Рамановские лазеры: 8 мВт



DFB лазер
с усилителем 1 Вт

За 6 минут полета

в условиях микрогравитации

атомы были охлаждены до температуры < 1 мК,

был приготовлен Бозе-Эйнштейновский конденсат,

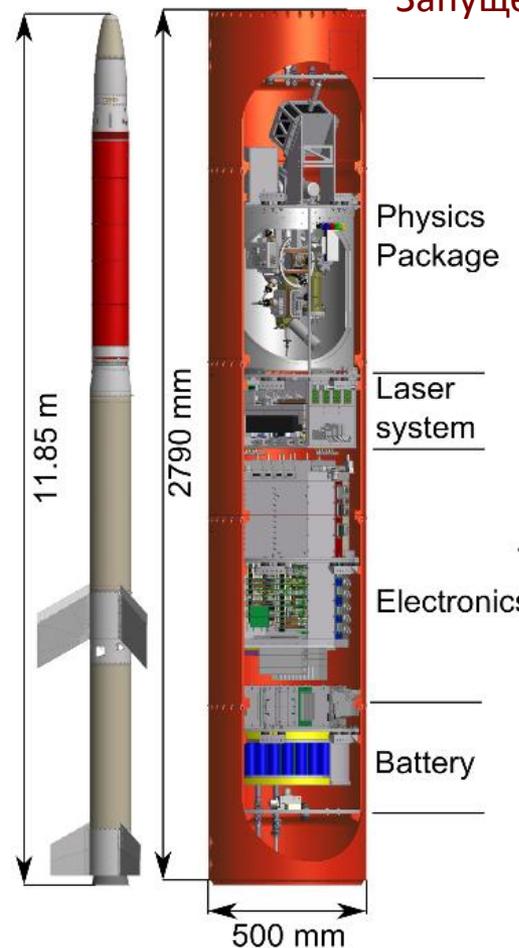
и проведено более 100 измерений на атомном интерферометре.

Условия запуска

Вибрации $5,4g_{\text{rms}}$

Перегрузки $20g$

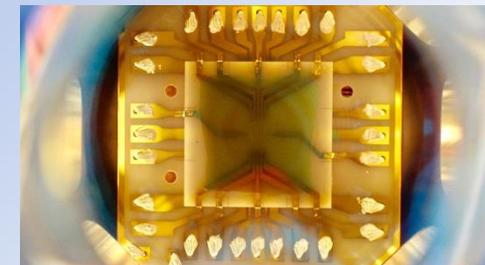
Температура $-10 - +200$ °C



V. Schkolnik et al. A compact and robust diode laser system for atom interferometry on a sounding rocket - *Appl. Phys. B* 2016, 122:217.

S. T. Seidel et al. Atom Interferometry on Sounding Rockets with Bose-Einstein Condensates - APS Division of Atomic and Molecular Physics Meeting 2016, abstract #N5.006. 2016

MAIUS 1 – First Bose-Einstein condensate generated in space, DLR 2017



Проблемные вопросы

- необходимость компактного дизайна противоречит требованию высокой чувствительности, поэтому для каждого конкретного случая следует выбирать компромисс между массогабаритными и точностными параметрами атомных сенсоров;
- необходимость применения оптической патоки для предварительного охлаждения атомов до температуры 1-10 мК, что усложняет конструкцию вакуумной и лазерной систем;
- необходимость использования нескольких высокостабильных лазеров для управления атомами и их детектирования;
- необходимость точной юстировки и стабилизации азимутов лазерных лучей;
- необходимость стабилизации мощностей рамановских лазеров;
- необходимость применения магнитного экрана для подавления шумов, связанных с паразитными электромагнитными полями;
- необходимость хорошей начальной пассивной виброизоляции платформы атомного инерциального сенсора, система активной стабилизации зеркал, виброизоляция, подавление шумов

Заключение

Чувствительность: ограничивается квантовыми шумами (число атомов)

Точность: искажениями волнового фронта, флуктуациями интенсивности, фазы...

В ближайшее время:

- принципиально реализуемы схемы для создания компактных АИГ (менее 20 л) на основе интерференции волн материи с точностью удержания нулевого направления порядка (BS) 10^{-5} – 10^{-6} гр/час
- в условиях неограниченных размерами ($L \sim 1 \div 2$ м) - порядка 10^{-6} – 10^{-8} гр/час

В перспективе:

- для компактных гироскопов BS порядка 10^{-7} – 10^{-8} гр/час
- в условиях неограниченных размерами гироскопов BS порядка 10^{-8} – 10^{-9} гр/час
- создание компактных (переносимых) гравиметров $\Delta g/g \approx 10^{-12}$
- для датчиков градиентов поля тяготения $\Delta g/m \approx 10^{-12}$ g/m

Спасибо за внимание!

