

Исследование возможностей создания нового поколения высокоточных компактных гироскопов на базе современных технологий лазерного охлаждения атомов и атомной интерферометрии

По результатам выполнения аванпроекта

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

ИЛФ СО РАН, ИФП СО РАН, ИСАН, ВНИИФТРИ, ТИСНУМ, МФТИ, НГУ

Основные задачи

- Оценка основных характеристик гироскопов на основе атомных интерферометров: чувствительность, стабильность, динамический диапазон
- Оценка перспектив развития данной области

Классификация гироскопов

Уровень гироскопии	Точность удержания нулевого смещения (BS)	Применение
Потребительские гироскопы		
Потребительские	10 deg/s	Датчики движения
Автомобильные	1 deg/s	ESP
Высокоточные гироскопы		
Индустриальные	10 deg/h	Военная амуниция
Тактические	1 deg/h	Стабилизация платформ
Для кратковременной навигации	0,1 deg/h	Навигация ракет
Навигационные	0,01 deg/h	Авиационная навигация
Стратегические	0,001 deg/h	Подводная навигация, геофизика, Тесты общей теории относительности

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.

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

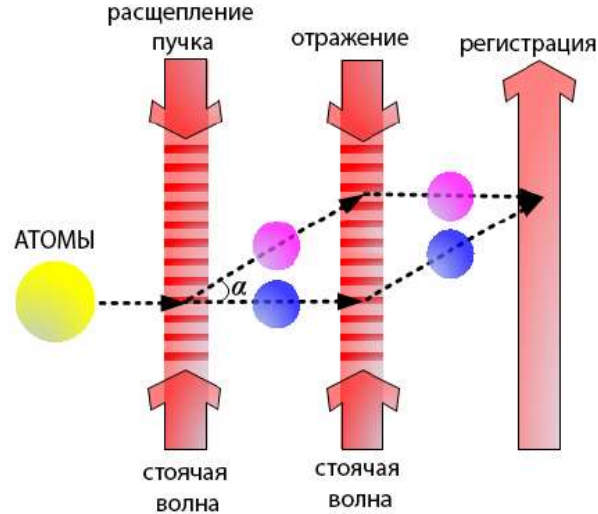
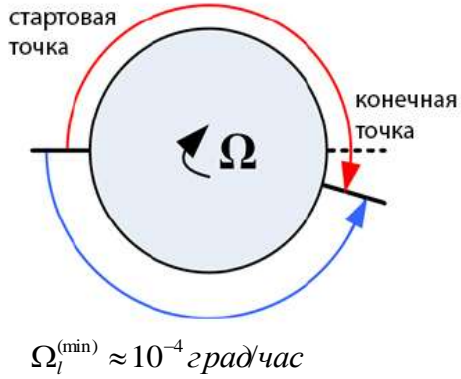
Communicated by J.P. Vigié

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

Гироскопы на основе атомных интерферометров

Управление пакетами волн де Бройля

АТОМНЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ГИРОСКОП



Чувствительность интерферометра

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

\mathbf{A} – вектор площади интерферометра,

E – энергия частицы:

$E = h\nu = hc/\lambda$ для фотона,

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

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

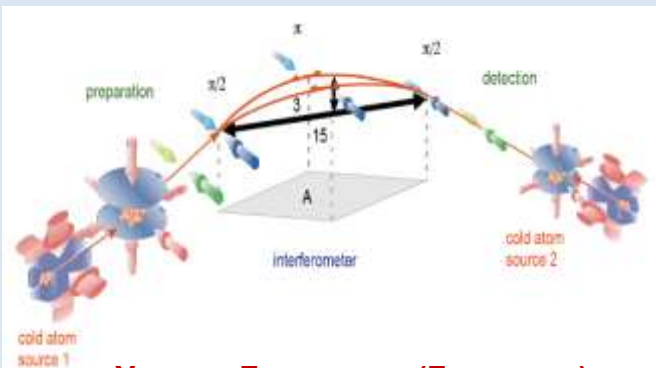
$\langle N_l \rangle \approx 10^{17}, N_{\text{at}} \approx 10^{12}$

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

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

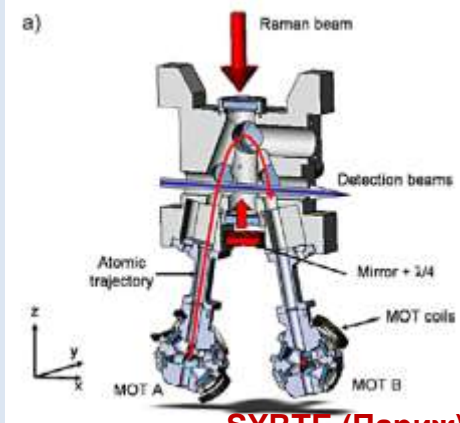
$$A_{\text{at}} / A_l > 10^{-3}$$

Варианты реализации: атомные пучки



Унив. г. Ганновера (Германия)

атомный фонтан



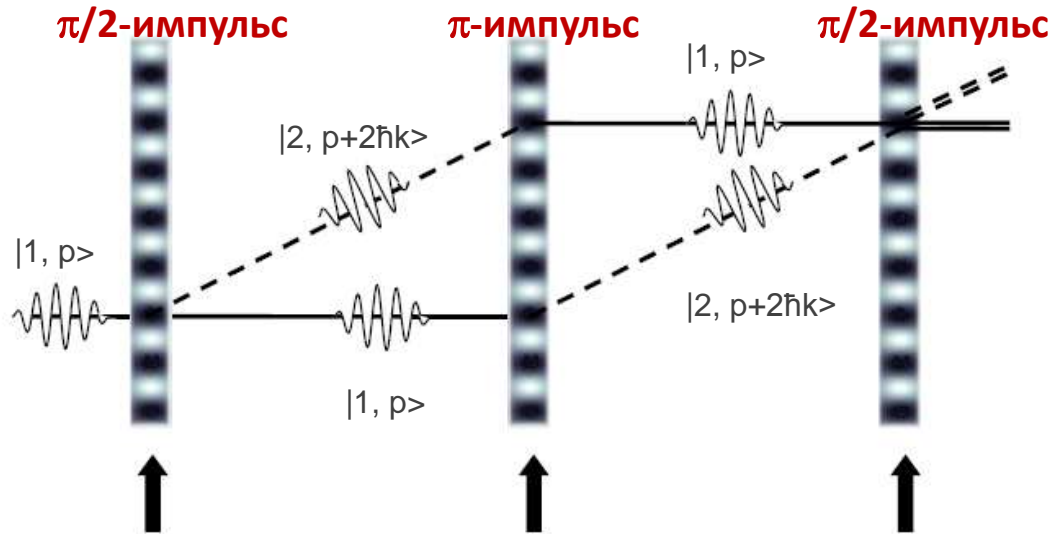
SYRTE (Париж)

ВЕС на чипе

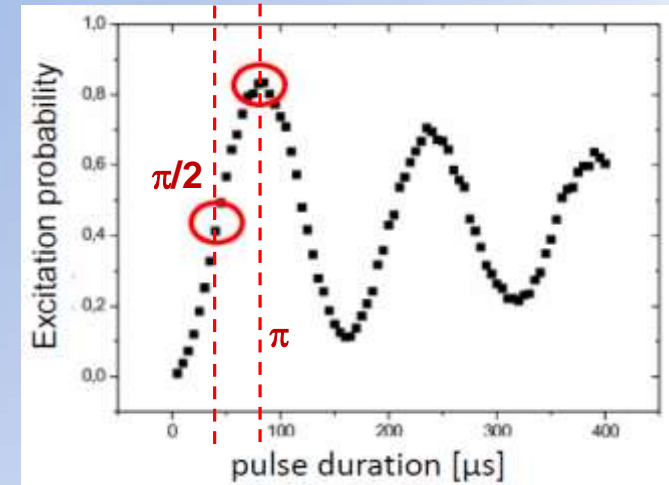


ИСАН

Использование лазерных лучей в качестве непрозрачных и полупрозрачных зеркал



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 $|F=4\rangle$.



АИГ на холодных атомах

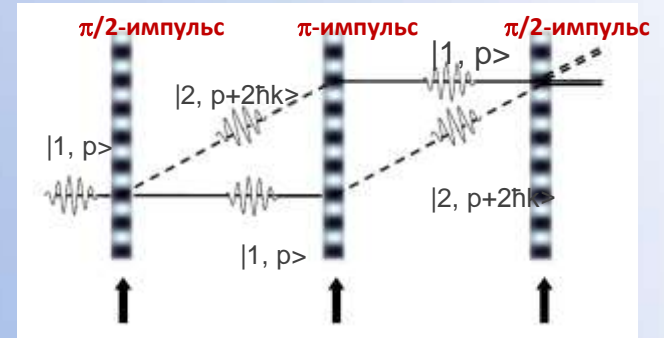
$$\Phi = \frac{2m}{\hbar} \vec{\Omega} \cdot \vec{A} + \vec{k} \cdot \vec{g} T^2 - \vec{k} \cdot (\vec{\Omega} \times \vec{g}) T^3$$

Вращение Ускорение Перекрестный

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

(встречные пучки)

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



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

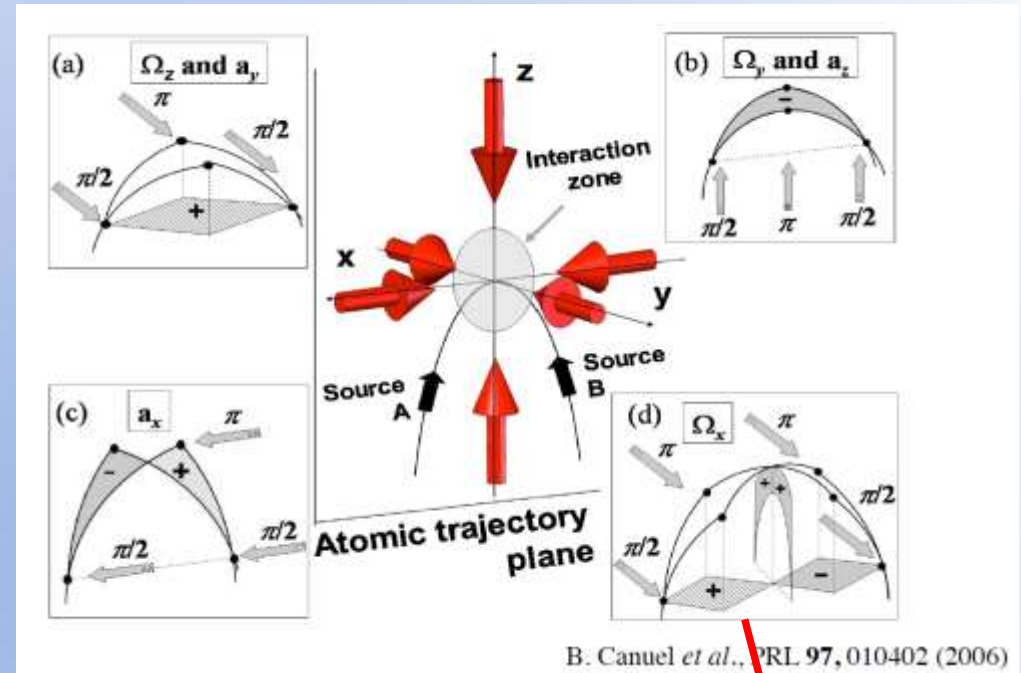
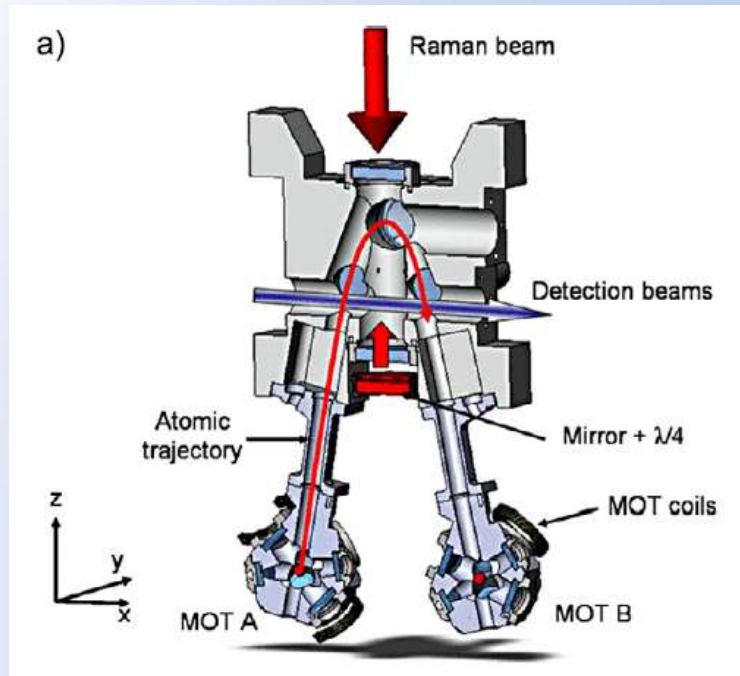
Увеличение длины интерферометра L:

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

Уменьшение продольной скорости v_{\parallel} :

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

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

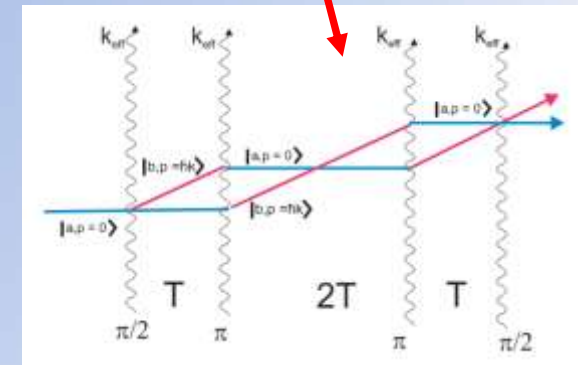
$$A = 4 \text{ mm}^2$$

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

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

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

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

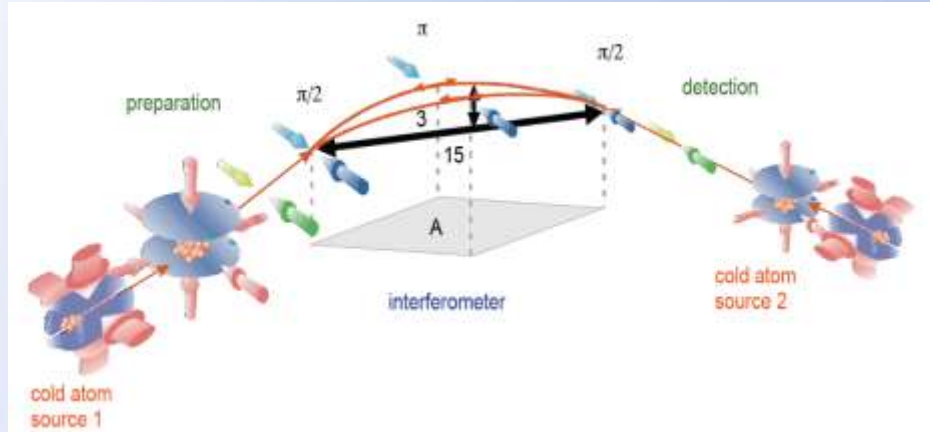


$$\Delta\Phi = \frac{1}{2} [\mathbf{k} \times (\mathbf{g} + \mathbf{a})] \Omega T^3$$

PRL 97, 010402 (2006)

АИГ на атомных пучках - Ганновер

^{87}Rb



flux 2.2×10^7 atoms/s

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

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

$\text{ARW} = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ/\sqrt{\text{час}} \text{ (} 10^{-8} \text{ rad/s}\sqrt{\text{Hz}} \text{)}$

Преимущества:

Большой поток атомов \rightarrow лучше BS и ARW

T.Müller, M.Gilowski, M.Zaiser, P.Berg, Ch.Schlübert, T.Wendrich, W.Ertmer, E.M.Rasel,
"A compact dual atom interferometer gyroscope based on laser-cooled rubidium", Eur.
Phys. J. D, v.53, p.273-281 (2009)

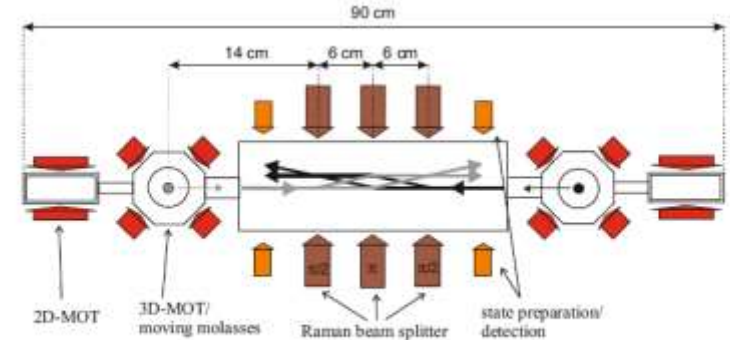
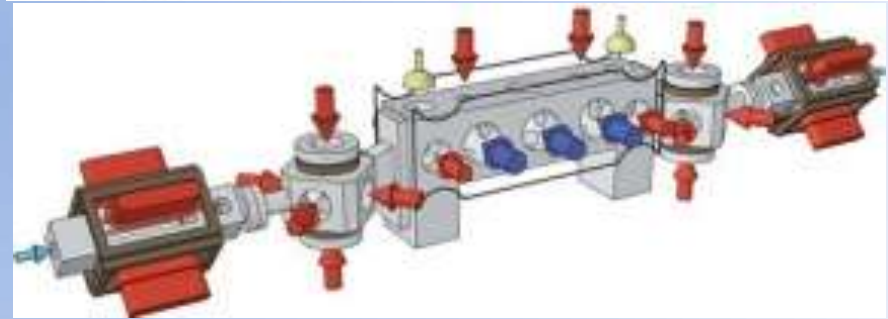
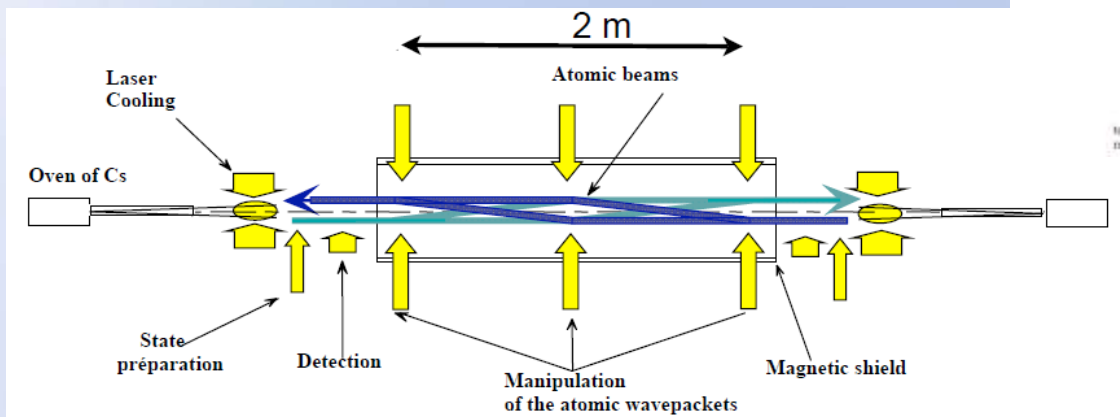


Fig. 1. (Color online) Schematic of the dual atom interferometer in top view. The central part shows the interferometry chamber with three spatially separated atom-light interaction zones. Dual stage atom sources for the preparation of the cold atomic ensembles are mounted on both sides of this chamber.



Atomic beam gyroscope (laboratoire Stanford/Yale)

^{133}Cs



flux 10^{11} at/s
 $V_{\parallel} \approx 220$ m/s
 $A \approx 30$ mm²

ARW = $3 \cdot 10^{-6}$ °/√час
BS = $0.7 \cdot 10^{-4}$ °/час

Noise level is roughly 1000 times better than that associated with ring laser gyroscopes or fiber optic gyroscopes

Преимущества:

Большой поток атомов → лучше BS и ARW

PRL 97, 240801 (2006)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
15 DECEMBER 2006

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. Shih

Department of Physics, Yale University, New Haven, Connecticut 06520-8720, USA

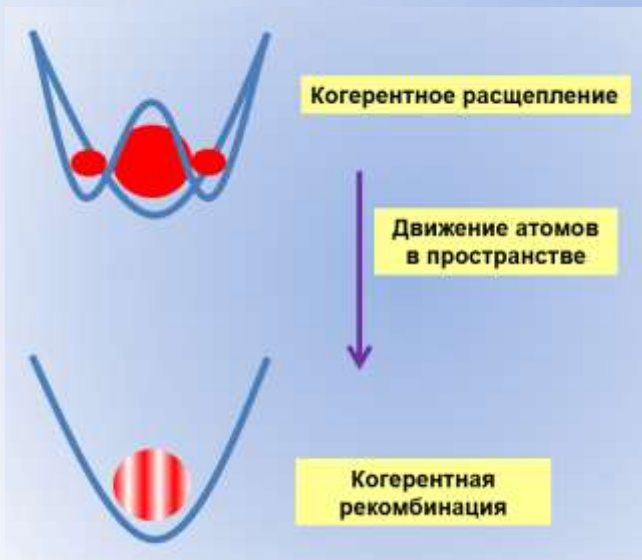
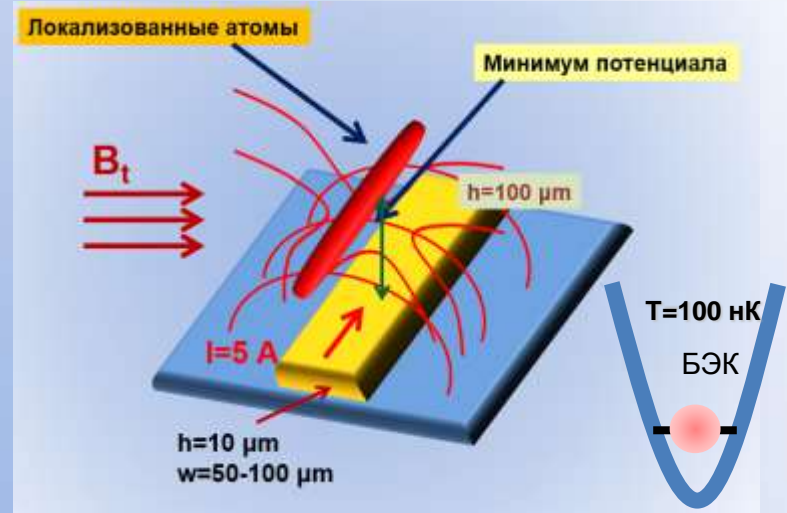
M. A. Kasevich

Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305-0660, USA

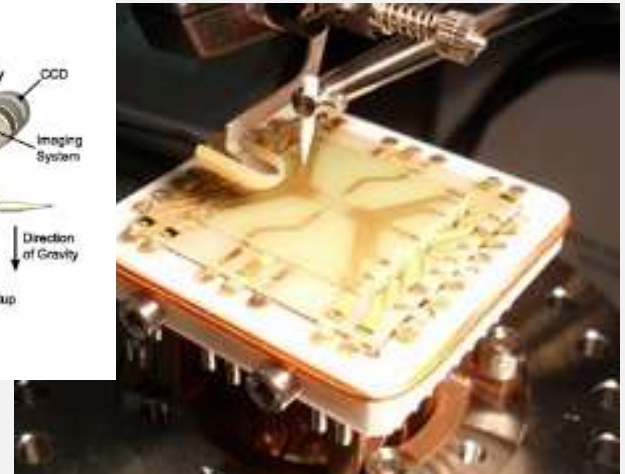
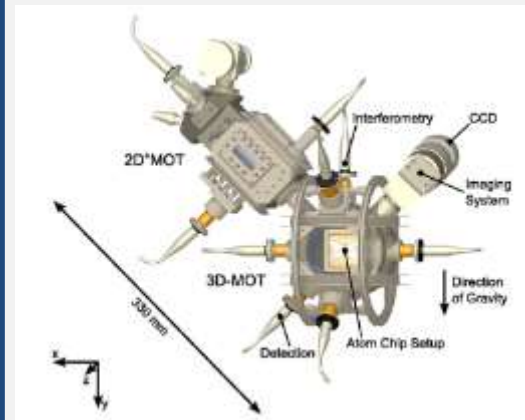
(Received 27 October 2005; published 15 December 2006)

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.

Принцип гироскопа на атомном чипе



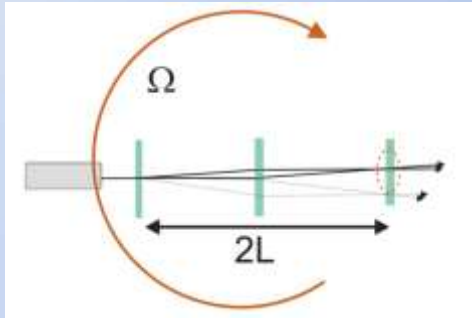
Источник ВЕС



Большие электрические токи (1-5 А) в высоком вакууме ($P=10^{-11}$ Торр)

Факторы ограничивающие динамический диапазон

- уменьшением числа атомов в зоне детектирования

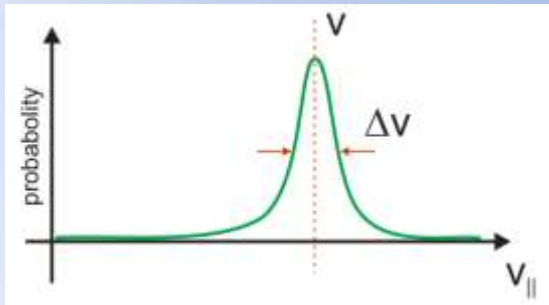


$$\Omega_{\max} < \frac{D v_{\parallel}}{(2L)^2}$$

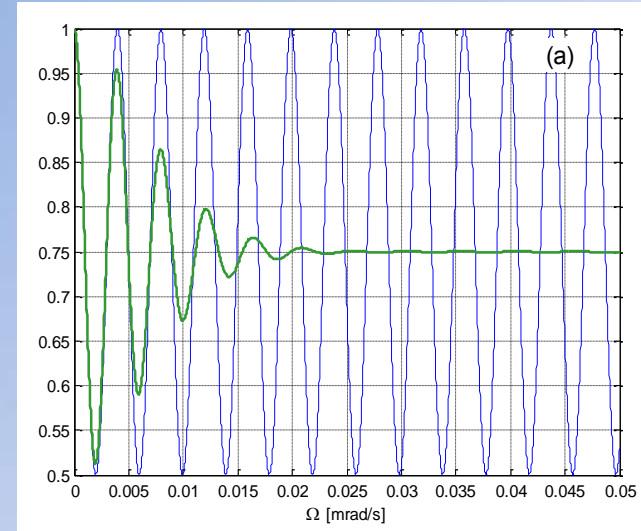
для $D = 0.5$ см, $v_{\parallel} = 20$ м/с, $L = 0,5$ м

$$\Omega_{\max} \approx 0.1 \text{ рад/с.}$$

- Немонохроматичность атомного пучка



$$\Phi = 2k_{\text{eff}} v \Omega T^2$$



Сигнал интерференции от угловой скорости АИГ на основе пучка атомов Rb с $L = 5$ см, $v = 10$ см/с, ($\Delta v = 1$ см/с – зеленая линия, $\Delta v = 0$ см/с – синяя линия)

Оценка ARW и BS (перспективные характеристики АИГ)

Оценка **BS** (на основе оценки предела квантовой точности гироскопов)

$$\Omega_{\min} = \frac{\hbar}{2mA} \frac{1}{\sqrt{N}}$$

N – число атомов дающих вклад в измерение

[M. O. Scully, PRA 48, 3186(1993)]

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

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

ст. девиация Аллана

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

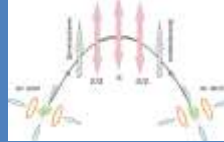
$$ARW = \frac{\pi \hbar}{2mA} \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{T_c}$$

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

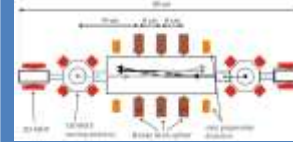
T_c^{-1} – полоса измерений
 τ – время усреднения

Параметр

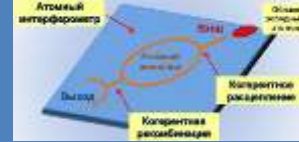
АИГ фонтанного типа



АИГ пучкового типа



АИГ (ВЕС на чипе)



Параметр	АИГ фонтанного типа	АИГ пучкового типа	АИГ (ВЕС на чипе)
ARW (гр/час ^{1/2})	1.2×10^{-8}	3×10^{-9}	$10^{-5} - 3 \times 10^{-8}$ [A = 10cm ² , N = 10 ⁵ at/s] $10^{-6} - 3 \times 10^{-9}$ [A = 10cm ² , N = 10 ⁶ at/s]
BS (стабильность, целевая), гр/час	2.3×10^{-7} град./час	9×10^{-8} град./час	$10^{-4} - 0.7 \times 10^{-7}$ 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	$1.2 \times 10^{-5} / 0.003$	$5 \times 10^{-5} / 0.01$	-
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)].

Заключение

Sensitivity to rotation:

short term: quantum projection noise (limited flux)

long term: wave front imperfections and fluctuations of the sources

Нет фундаментальных ограничений для повышения точности !

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 систем BS порядка 10^{-7} – 10^{-8} гр/час
- в условиях неограниченных размерами BS порядка 10^{-8} – 10^{-9} гр/час

Спасибо за внимание!