

ランチミーティング(論文紹介)

2012年11月7日 担当:鳥井

PRL 106, 038501 (2011)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
21 JANUARY 2011

Precision Measurement of Gravity with Cold Atoms in an Optical Lattice and Comparison with a Classical Gravimeter

N. Poli, F.-Y. Wang,* M. G. Tarallo, A. Alberti,† M. Prevedelli,‡ and G. M. Tino§

*Dipartimento di Fisica e Astronomia and LENS, Università di Firenze
INFN Sezione di Firenze, Via Sansone 1, 50019 Sesto Fiorentino, Italy*

(Received 1 October 2010; published 18 January 2011)

We report on a precision measurement of gravitational acceleration using ultracold strontium atoms confined in an amplitude-modulated vertical optical lattice. An uncertainty $\Delta g/g \approx 10^{-7}$ is reached by measuring at the 5th harmonic of the Bloch frequency. The value obtained with this microscopic quantum system is consistent with the one measured with a classical gravimeter. Using lattice modulation to prepare the atomic sample, we also achieve high visibility of Bloch oscillations for ~ 20 s. These results can be of relevance for testing gravitational redshift and Newtonian law at micrometer scale.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.038501

PACS numbers: 91.10.Pp, 03.75.Dg, 37.10.Jk, 37.25.+k



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

ENGLISH

UCR Proposal

東京大学産学連携プロポーザル



提案テーマ内容

検索

表示件数 20



問い合わせる

新着情報

テーマカテゴリ

- 全カテゴリ
- バイオテクノロジー
- 農林水産・食品
- 素材
- 情報・通信
- 航空・海洋
- 土木・建築
- 医学・薬学
- 環境・エネルギー
- 機械
- エレクトロニクス
- 経済・経営・政策・法律
- 社会・文化・教育

ごあいさつ

整理番号 2530 (公開日 2004年12月22日) (カテゴリ 機械/エレクトロニクス)
超高性能重力測定計の開発

●内容

この研究室では、光、原子両方のレーザーを駆使し量子力学の基礎に関する実験から原子レーザーの産業化に向けた実験にまで取り組んでいる。レーザーを用いて、気体原子を冷却する「レーザー冷却」により、ボース・アインシュタイン凝縮(BE凝縮)を実現することができ、高密度の干渉性原子集団が得られる。この原子波干渉計を用いることにより、超高精度の重力分布測定計開発が可能となり、例えば、油田の位置を特定できる可能性が考えられる。BE凝縮に関する知見と経験を有するこの研究室と協力して超高性能重力測定計開発を進める企業のコンタクトを待つ。

●研究者

准教授 鳥井 寿夫
大学院総合文化研究科 広域科学専攻



問い合わせる

TABLE II. Published values of scattering lengths given in units of $a_0=0.053$ nm.

Isotopes	2-phot. PAS (this study) a	Fourier- transform [45] a	1-phot. PAS [22] a	1-phot. PAS [43] a	Thermal- ization [48] $ a $
88-88	-1.4(6)	0(5)	10^{+3}_{-11}	-40^{+40}_{-100}	21^{+3}_{-4}
87-87	96.2(1)	97(2)			
86-86	823(24)	1050(380)	1000^{+1300}_{-400}		430^{+80}_{-90}
84-84	122.7(3)	124(3)			
88-87	55.0(2)	56(2)			
88-86	97.4(1)	99(2)			110^{+10}_{-20}
88-84	1790(130)	>1170 or <-1900			
87-86	162.5(5)	165.5(5.5)			
87-84	-56(1)	-55(10)			
86-84	31.9(3)	33(3)			

It is difficult to assess the uncertainties in a related to these coefficients. The most conservative assessment encompasses the full range of values quoted here; $a=-1.4(6)$ and $C_6=3130(20)$ a.u. The uncertainties in C_6 and C_8 quoted in Ref. [46] are quite small, however, and no uncertainty is quoted for C_{10} . So that might give more credence to the results for C_6 and C_8 from Ref. [46] and the resulting fit $C_{10}=7.488 \times 10^7$ a.u., which corresponds to the higher ends of the ranges of values for a in Table II. Mass-scaling can be

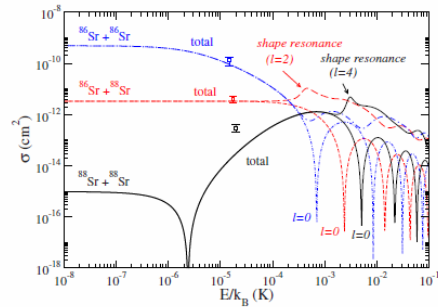


FIG. 9. (Color online) Dependence of elastic-scattering cross sections on collision energy (E) for selected Sr isotopes. The thick lines are cross sections including partial waves up to $l=4$. Shape resonances are indicated. Thin lines indicate cross section contributions from $l=0$ only. For the plot, a potential is used that gives $a_{88-88}=-1.2a_0$ at $E=0$. The cross sections are given by the usual expressions $\sigma=(8\pi/k^2)\sum_{l=0,2,\dots}^{k-0}(2l+1)\sin^2\delta_l(k) \rightarrow 8\pi a^2$ for identical bosons and $\sigma=(4\pi/k^2)\sum_{l=0}^{k-0}(2l+1)\sin^2\delta_l(k) \rightarrow 4\pi a^2$ for distinguishable atoms. The phase shift, $\delta_{l=0}(k)$, depends on $k=\sqrt{2\mu E}/\hbar$ and is related to the scattering length a and effective range r_e at low k by $k \cot \delta_{l=0}(k)=-\frac{1}{a}+\frac{1}{2}r_e k^2$. The data symbols are cross section measurements from thermalization experiments [48], and the respective collision energies are set to $E=k_B T$, where T is the sample temperature.

イントロダクション

- 冷却原子を用いた原子(量子)干渉計は、重力の物理に用いられてきている
 - ラマン干渉計による重力加速度、重力定数測定
 - kgの再定義
 - 地球物理学
 - post-Newtonian重力の検証
 - 量子重力や重力の赤方偏移の検証
 - 弱い等価原理の検証
 - 重力波検出

スタンダードな重力加速度測定

PRL 100, 031101 (2008)

cf. BECのMach-Zehnder干渉計by鳥井

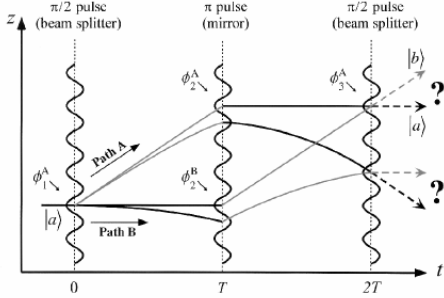


Figure 2. Basic Mach-Zehnder-type atom interferometer with (curved lines) and without (straight lines) gravity. The atom can either be in the internal state $|a\rangle$ (dark) or $|b\rangle$ (light). The lines represent the classical trajectories originating from one of the space-time points comprising the initial wave packet.

$$\Delta\Phi = kgT^2$$

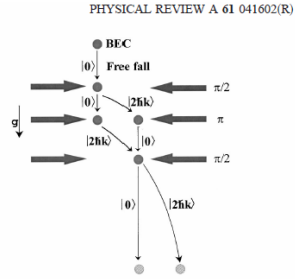
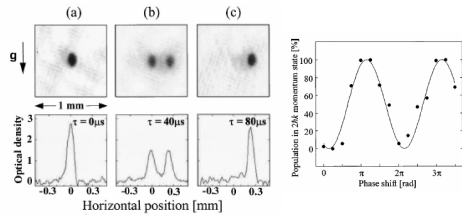


FIG. 1. Experimental schematic of the $\pi/2$ - π - $\pi/2$ Mach-Zehnder Bragg interferometer.



平成 22 年度修士課程入学試験問題 関連基礎科学系 専門科目

第 5 問 物理学 (4)

光格子 原子

結晶中の 1 格子子エネルギー固有状態はブロッホ状態と呼ばれ、波動関数が $\psi_{\vec{k}}(\vec{r}, t) = e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega_{\vec{k}} t)} u(\vec{r})$ の形であらわされる。ただし、 $u(\vec{r})$ は結晶格子の周期を持つ関数であり、 $\omega_{\vec{k}}$ はエネルギー固有値 $\epsilon_{\vec{k}}$ によって $\hbar\omega_{\vec{k}} = \epsilon_{\vec{k}}$ で与えられる。

ブロッホ状態は、結晶運動量 $\hbar\vec{k}$ が厳密に定まり、空間的には結晶全体に広がった電子の波を表しているが、現実の電子は多くの場合、ある結晶運動量 $\hbar\vec{k}$ のまわりに $\hbar\Delta\vec{k}$ の小さな不確定さをもち、同時に位置 \vec{r} のまわりに $\Delta\vec{r}$ の不確定さを持つ波束として存在する。

- (1) 波束の速度が $\vec{v}_{\vec{k}} = (1/\hbar)\vec{\nabla}_{\vec{k}}\epsilon_{\vec{k}}$ で与えられることを示したい。簡単のために 1 次元で考えることにし、 $g(k)$ を狭い区間 ($|k| < \Delta k$) でのみ有意の大きさを持つ正の偶関数として

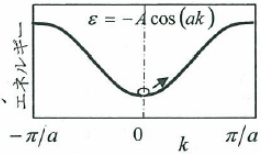
$\psi_W(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(k)\psi_{k_0+k}(x, t) dk$ を考える。 $\omega_{k_0+k} = \omega_{k_0} + (\partial\omega_k/\partial k)_{k_0} k$ と近似することにより、この関数が $\psi_W(x, t) = F(X)\psi_{k_0}(x, t)$ の形 (ただし $X = x - (\partial\omega_k/\partial k)_{k_0} t$) で表されることを導け。このことにより、この関数が $\Delta x = 2\pi/\Delta k$ 程度の広がりを持って速度 $v = (1/\hbar)(\partial\epsilon_k/\partial k)_{k_0}$ で移動する波束を表すことを示せ。

重力

- (2) ~~電場 E~~ による波束の自由加速が $\hbar(d\vec{k}/dt) = \vec{F}$ (~~$e\vec{E}$~~) で与えられることを、~~電場の~~ **重力** $-mg$ のなす仕事を考慮することにより示せ。ただし波束の速度は $\vec{v}_{\vec{k}} = (1/\hbar)\vec{\nabla}_{\vec{k}}\epsilon_{\vec{k}}$ で与えられるとしてよい。

λ/2 光格子

右図のように格子定数 a の絶縁体結晶において、 x 方向の波数 k によるエネルギーの分散が $\varepsilon = -A \cos(ak)$ ($A > 0, -\pi/a \leq k \leq \pi/a$) で与えられる伝導帯を考える。バンドギャップに等しいエネルギーの励起光により、伝導帯の底に電子を一つ励起した。



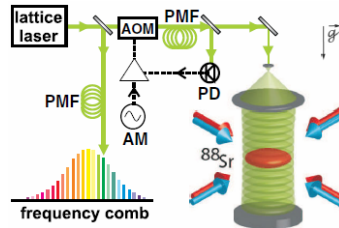
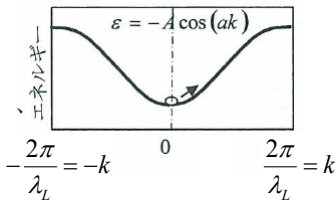
- (3) 光を結晶に照射する際、焦点を絞って直径 $d = 1 \mu\text{m}$ の領域に広がる波束として電子を励起した。その波束が持つ波数の不確定さは、ブリルアン・ゾーン ($-\pi/a \leq k \leq \pi/a$) の大きさに比べてどの程度か？ ただし、 $a = 0.1 \text{ nm}$ とする。

結晶の $-x$ 方向に大きさ mg の一様な電場がかかっている状態で、時刻 $t = 0$ に上記のように伝導帯の底に電子を励起した。

原子を開放した

- (4) 電子はどんな運動をするか。時刻 t における電子の x 方向の速度 $v(t)$ および位置 $x(t)$ を求め、電子のブリルアン・ゾーンの端近傍での振る舞いについて簡潔に説明せよ。
- (5) $k = 0$ を出発した電子がブリルアン・ゾーンの端 ($k = \pi/a$) に達するのに要する時間を求めよ。その値を、 $E = 1 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 、 $a = 0.1 \text{ nm}$ 、 $\hbar = 1 \times 10^{-34} \text{ Js}$ として有効数字 1 桁で求めよ。
- (6) 固体物理学の長い歴史のなかで、上記の運動を実現する試みが繰り返し行われてきたが、天然結晶ではいまだに実現していない。繰り返し試みられてきた理由を、(5) の結果を参考に考えよ。またなぜ実現が難しいのか。考えを記せ。

ブロッホ振動



結晶運動量の時間変化

$$\frac{dp}{dt} = \hbar \frac{dk}{dt} = mg$$

ブロッホ周波数

$$\nu_B = \frac{dk/dt}{2k} = mg\lambda_L / 2h$$

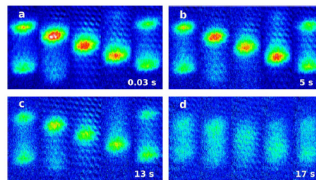


FIG. 4 (color online). Long-lived Bloch oscillations for Sr atoms in the vertical lattice under the influence of gravity. Each picture shows one Bloch cycle in successive time-of-flight absorption images giving the momentum distribution at the time of release from the lattice. Displayed are the first (a), the 2900th (b), the 7500th (c), and the 9800th (d) Bloch cycles.

原子干渉計vsコーナーキューブ

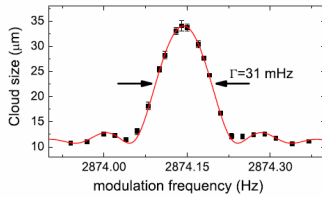
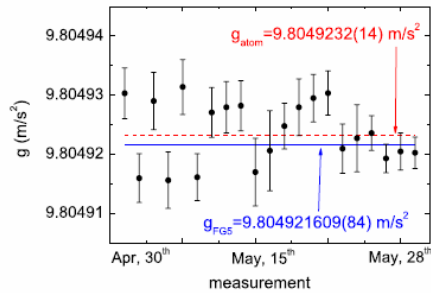
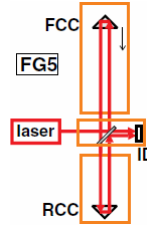


FIG. 2 (color online). Spectrum recorded by modulation of the lattice depth at the 5th harmonic of the Bloch frequency for 10.4 s with a modulation depth of 8%. The red line is a fit of experimental data with a sinc function.

TABLE I. Systematic corrections and their associated uncertainties ($\times 10^{-7}$) for the gravity measurement with ^{88}Sr atoms in the amplitude-modulated optical lattice.

Effect	Correction	Uncertainty
Lattice wavelength	0	2
Lattice beam vertical align.	0	0.2
Stark shift (beam geometry)	14.3–17.3	0.4
Experiment timing	0	0.2
Tides	-1.4–0.9	<0.1
Height difference	4.3	0.2
Refraction index	0	<0.01
Fundamental constants	0	0.7
Systematics total	17.2–22.5	2.2



まとめ

- 140ppbで古典的重力加速度計と一致した
- 感度(sensitivity)で1桁、確度(accuracy)で2桁、以前の同様な実験から改善した
- 重力赤方変位の測定も応用できるだろう
- 周波数安定化された光格子レーザー、そして広いビームウェストまたはblue-detunedレーザーを用いれば、更に改善できるだろう
- Casimir-Polder効果、微小距離のニュートンの法則の実験に利用できるかも知れない