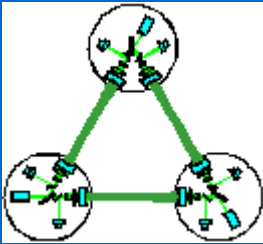

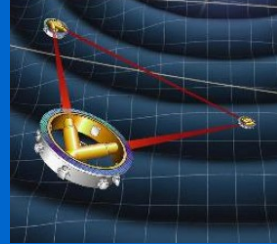


宇宙実験における安定化レーザーの現状と可能性

長野 重夫

情報通信研究機構 (NICT)
光・時空標準グループ
次世代時刻周波数標準プロジェクト

DECIGO/DPF用レーザーへの要求性能

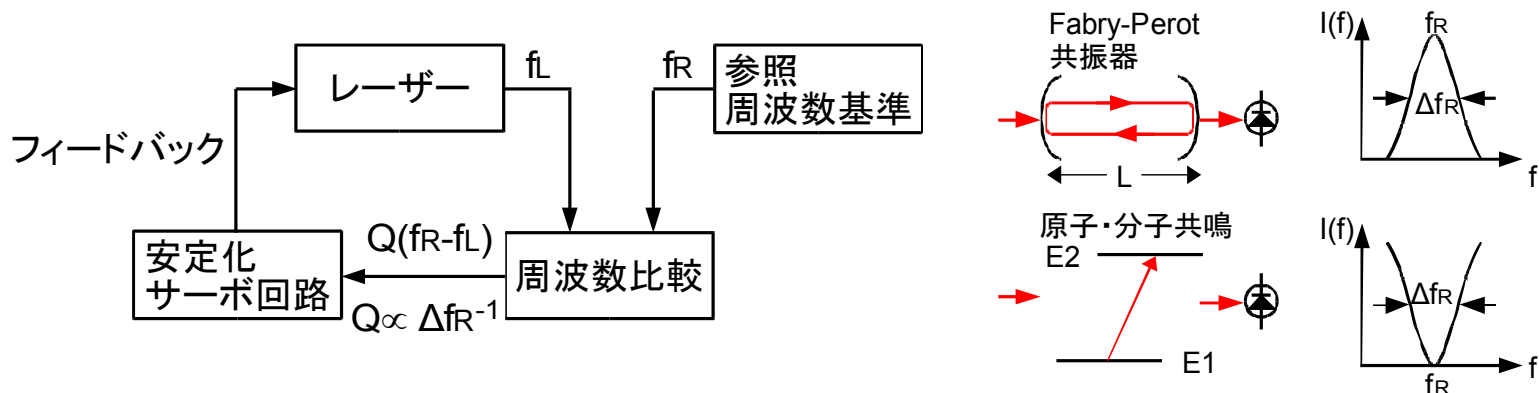
	DECIGO	DPF	LISA
			
波長	0.5 μm	1030 nm	1064 nm
出力	10 W	≥ 25 mW	≥ 1 W
周波数安定度	≤ 1 Hz/Hz ^{1/2}	≤ 0.5 Hz/Hz ^{1/2} @0.1~1 Hz	≤ 30 Hz/Hz ^{1/2} @1 mHz~1Hz
強度安定度		$\leq 10^{-6}$ /Hz ^{1/2} @0.1~1 Hz	$\leq 2 \times 10^{-4}$ /Hz ^{1/2} @10 ⁻⁴ ~10 Hz
ビーム品質等	単一周波数発振, TEM ₀₀ 横モード, 直線偏光		
その他	小型・軽量, 高効率, 機械的安定, 長寿命, 高信頼性		

非制御時の周波数ノイズの大きい順に、半導体レーザー(~1 MHz/Hz^{1/2} @1Hz), 外部共振器型LD(ECDL)とファイバーレーザー(~10 kHz/Hz^{1/2}), LD励起半導体レーザー(~1 kHz/Hz^{1/2})となっている。

→ 要求安定度を達成するためには、周波数ノイズの制御が必要となる。

●今回は、特に制限の厳しいレーザー周波数安定化に関してレビューする。

レーザー周波数安定化の原理



参照周波数基準は、Fabry-Perot光共振器と原子・分子の共鳴の2つに大別できる。

●Fabry-Perot共振器

共振周波数 f_R は共振器長 L に依存している： $f_R = n(c/2L)$

L を変動させる原因：地面振動、熱膨張、ブラウン運動、屈折率揺らぎetc

キャビティー線幅 $\Delta f_R = (f_R/n) / \text{Finesse}$ で表される。

1Hz付近では、量子限界(ショットノイズ)は十分小さく、安定度向上は L を変化させる摂動の抑圧にかかっている。

●原子・分子の共鳴

共鳴周波数 f_R は2つのエネルギー準位の差 $\Delta E (= E_2 - E_1)$ に依存している： $f_R = \Delta E/h$

ΔE を変動させる原因：外部電磁場、圧力、温度、重力etc

共鳴線幅 Δf_R は、自然幅(E_2 の自然寿命)、ドップラー幅、圧力拡がり、飽和拡がり等に依存する。

1Hz付近では、量子限界(量子射影ノイズ)が安定度を決めており、狭線幅と高いSN比(原子数)を得ることが重要となる。 $(\because \sigma_{\text{QPN}} \propto \Delta f_R (\text{原子数})^{-1/2})$

実験室におけるレーザー周波数安定化の現状1

- Fabry-Perot共振器(rigid型)を参照基準にした実験

目的: 重力波検出器用レーザーのプレ安定化、原子・分子の精密分光用レーザー

帯域: 1 Hz ~ 1 kHz

共振器長: \leq 数10cm

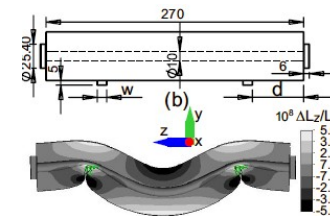
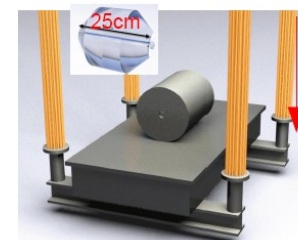
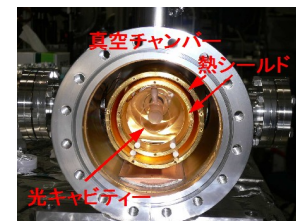
熱膨張対策: 超低膨張(ULE)ガラス材の利用、断熱シールド、超高真空($\leq 10^{-4}$ Pa)

地面振動対策: 振り子による防振、振動に鈍感な形状と支持法

これまでに、安定度向上のための様々な対策が講じられたが、

現在はブラウン運動で安定度はリミットされていると考えられている。

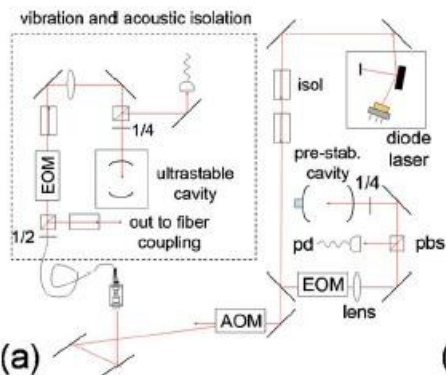
K.Numata et al., Phys.Rev.Lett., v93, p250602, y2004



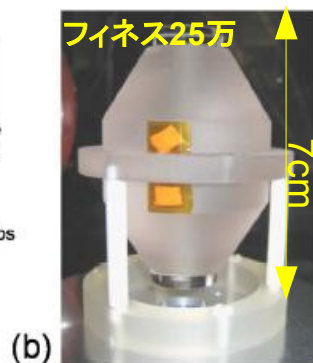
Young et al., Phys. Rev. Lett. v82, p3799 (1999)

L.Chen et al., Phys.Rev.A, v74,p053801,y2006

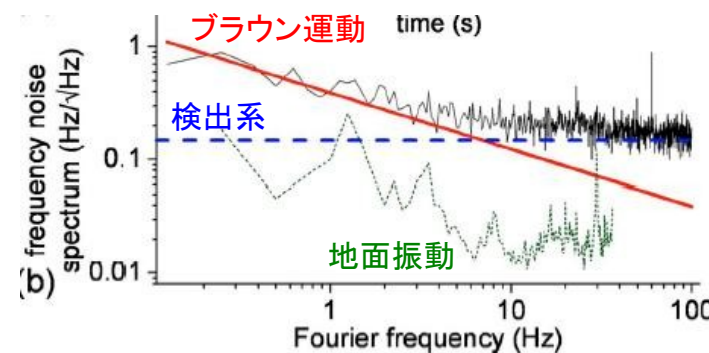
- ^{87}Sr 光格子時計用698nmレーザーの例



A.D.Ludlow et al., Opt.Lett., v32, p641, y2007



FP共振器の防振装置
共振周波数0.5Hz



到達安定度: $\leq 1 \text{ Hz/Hz}^{1/2} (@0.1\sim 1\text{Hz})$

<http://www.minusk.com/content/home.html>

実験室におけるレーザー周波数安定化の現状2

- 原子・分子の共鳴(ガスセル型)を利用した周波数安定化の研究

目的: 周波数標準、長さ標準

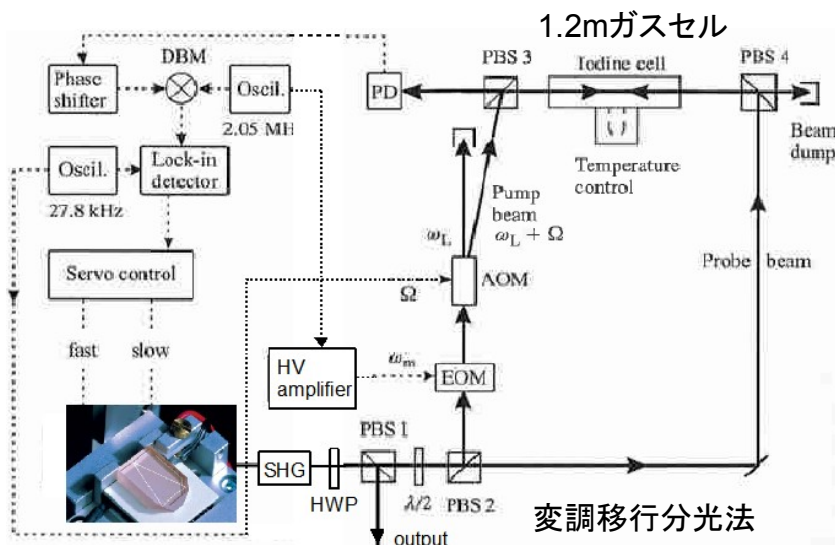
帯域: DC

原子・分子: ^1H (243nm), $^{127}\text{I}_2$ (532nm, Nd:YAG), $^{127}\text{I}_2$ (543nm, He-Ne), $^{127}\text{I}_2$ (633nm, He-Ne), $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ (1.5um), CH_4 (3.39um, He-Ne), OsO_4 (10.3um, CO_2) etc

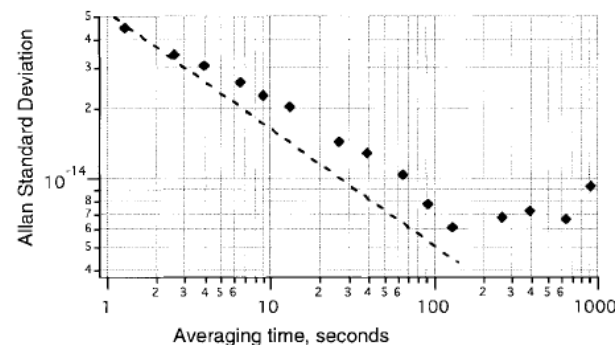
狭線幅化対策: 禁制遷移の利用、飽和吸収分光、ビーム径の拡大 etc

SN比の向上: 原子数の増加(→圧力拡がり)、光路長の増大、レーザー光量の増加(→飽和拡がり) etc

- I2 沃素安定化Nd:YAGレーザーの例



Ld励起モノリシック型
Nd:YAGレーザー(NPRO)

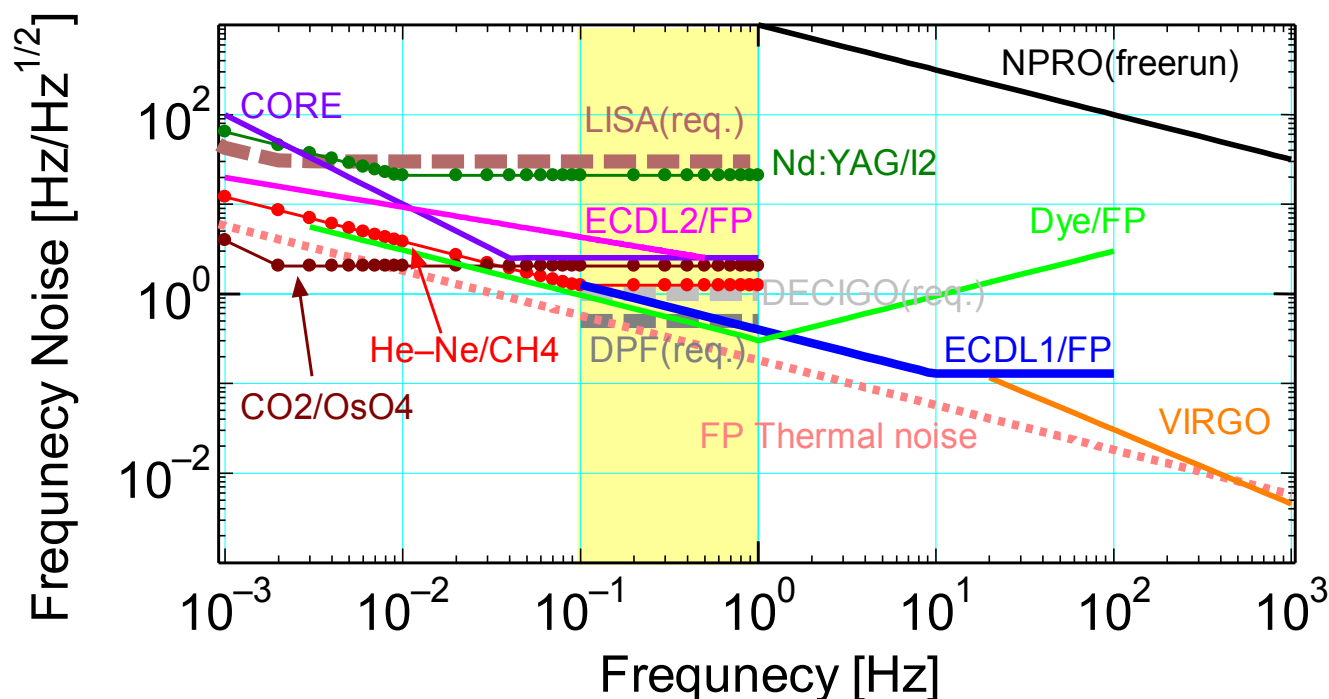


J.L. Hall *et al.*, IEEE Trans. Instrum. Meas. v48, p583, y1999

アラン分散 $\sim 5 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau}$
 \Leftrightarrow 周波数安定度 $\sim 20 \text{ Hz/Hz}^{1/2} @ 10^{-2} \sim 1 \text{ Hz}$

- 532nm付近にkHz線幅の多数の沃素吸収線

実験室におけるレーザー周波数安定化の現状3



- Nd:YAG/I2 (532nm)
J.L. Hall *et al.*, IEEE Trans. Instrum. Meas. v48, p583, y1999
- He-Ne/CH4 (3.39um)
S.N.Bagayev *et al.*, Proceedings of the Fifth Symp. On Frequency Standards and Metrology, p289, y1996
- CO2/OsO4 (10.3um)
O.Acef, Opt. Commun., v134, p479, y1997
- Dye/FP (282nm)
B.C.Young *et al.*, Phys.Rev.Lett. v82, p3799, y1999
- ECDL1/FP (698nm)
A.D.Young *et al.*, Opt. Lett. v32, p641, y2007
- ECDL2/FP (729nm)
Y. Li *et al.*, JJAP. v47, p6327, y2008
- CORE (1064nm)
S. Seel *et al.*, Phys. Rev Lett. v78, p4741, y1997

- 到達安定度は、もはやレーザーの構造や波長によらず、参照周波数基準の安定度に依存している。
- フーリエ周波数0.1~1Hzは、FP共振器も原子・分子の共鳴もちょうど苦手としている領域と言える。
- 安定度1Hz/Hz^{1/2}(@0.1~1Hz)は、光共振器の熱雑音で制限されるレベルであり、温調や防振、残留AM変調などに細心の注意を払うことで、実験室でようやく達成された。
- 原子・分子の共鳴では量子限界に到達しており、これ以上の安定度向上には、新しい手法による吸収信号のSN比の改善が必須となる。

衛星搭載に向けた光技術と展望

- ・衛星搭載仕様が実現している重要な要素技術
 - シングルモード半導体レーザー (PHARAO)
 - 冷却原子/イオントラップによるマイクロ波標準信号源 (PHARAO, JPL)
 - 光-電気/電気-光デバイス
 - LD励起固体レーザーと光増幅器 (TESAT Spacecom)
 - 光共振器 (TESAT Spacecom)
 - 沃素ガスセル、セシウムガスセル (TESAT Spacecom, PHARAO)
 - レーザー位相同期 (TESAT Spacecom, Contraves Space)
 - 光ファイバー技術 (PHARAO, LISA)
 - 非線形光学SHG, THG結晶 V. Leonhardt *et al.*, Appl. Opt., v45, p4142, y2006
- ・宇宙仕様光周波数コムがDRL(独)とESAで研究中
 - ファイバーモード同期レーザー光コム
- ・衛星搭載時計と地上の時計の高精度時刻比較がACESミッション(ISS)とT2L2(JASON2)で検証予定

宇宙実験における安定化レーザーの現状

これまでの衛星搭載用レーザーの用途は、強度変調-直接受信方式の宇宙光通信や計測精度の低い分光などで、レーザー周波数ノイズへの要求は高くなかった。

ex1. ARTEMIS-OICETS光衛星間通信(2005): 0.8 μ m帯LD 城野 他, 信学技法, SANE2000-27

ex2. 地球観測プラットフォーム技術衛星ADEOS/温室効果気体センサIMG(1996): Zerodureガラス一体成型He-Neレーザー, $\sigma_y < 3 \times 10^{-7}$ (@4days) H.Kobayashi et al., Appl. Opt. v38, p6801, y1999

2008年に低軌道衛星TerraSAR-X(独)-NFIRE(米)間の距離5000kmのコヒーレント方式宇宙通信(5.5Gbit/s, BPSK)が成功したことにより、衛星搭載レーザーでもコヒーレンスが重要となりつつある。

光源: フリーランの1064nm Nd;YAGレーザー(NPRO), $\delta\nu \sim 10^4/f \text{ Hz/Hz}^{1/2}$

周波数安定化レーザーを搭載したミッションとしては、ADM-Aeolus, ACES/PHARAO 等が、近々打ち上げ予定となっている。

ADM-Aeolus

<http://www.esa.int/esaLP/LPadmaeolus.html>

Earth Explorer Atmospheric Dynamics Mission (ADM-Aeolus), 2010年打ち上げ予定
目的:レーザドップラー風速計(ALADIN)により、地球全域の風力分布を高精度に観測し、
天気予報の精度の向上と気候研究をより高度化する。



ALADIN(Atmospheric Laser Doppler Instrument)

光源:波長 355nm(YAG 3倍波)、パルス繰り返し 100Hz, パルスエネルギー 130mJ

参照用安定化レーザー(NPRO):波長 1064nm, 出力 25mW, 重量 2kg, 体積 2L

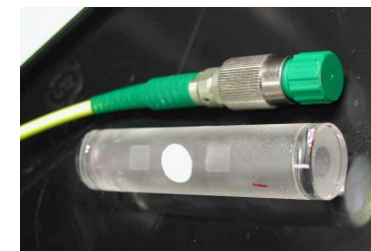
周波数安定化:フィネス1500, 長さ5cm、温度揺らぎ10mKのFP共振器にフリンジロック

周波数ドリフト ~ 4 Hz/s (req. 17 Hz/s)

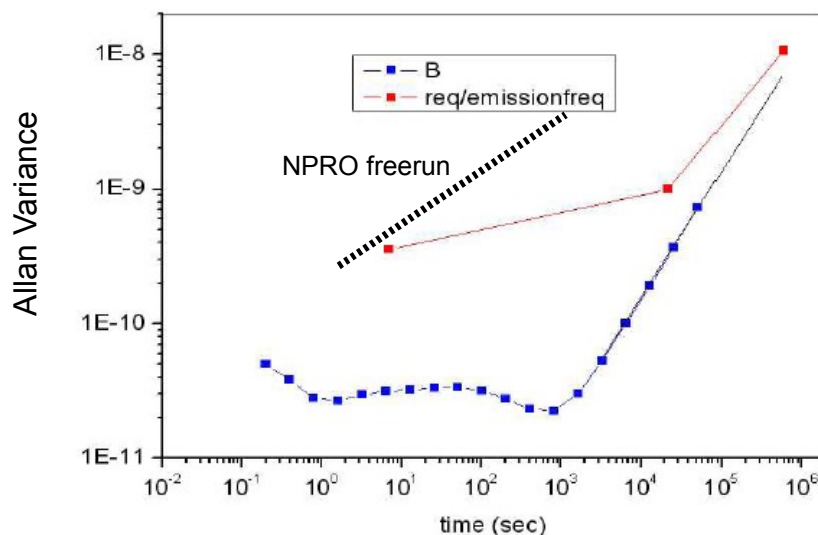
アラン分散 $\sigma_y \sim 3 \cdot 10^{-11} \Leftrightarrow \delta\nu \sim 25\text{kHz}/\text{Hz}^{1/2}$ (@0.1~1Hz)



参照用レーザーNPRO(TESAT)



ALADIN参照用FP共振器(TESAT)



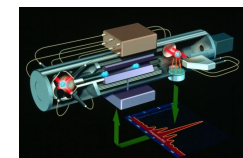
F. Heine et al., "Coherent Seed Laser for the AEOLUS Mission",
Coherent Laser Radar Conference 2007.

目的: 原子泉型一次周波数標準器(PHARAO)と水素レーザーを国際宇宙ステーションで運用し、微小重力下において非常に長い原子と光の相互作用時間を得ることで超高安定なマイクロ波標準器を作り、地上との高精度なマイクロ波リンク実験や基礎物理定数の時間変化観測等を行う。

2013年打ち上げ予定

cf. PARCS (Primary Atomic Reference Clock in Space)

D.B. Sullivan et al., Advances in Space Research, v36, p107, y2005



PHARAO(Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite)

光源: 外部共振器型半導体レーザー(ECLD), 波長852nm

周波数安定化: 飽和吸収分光法で、セシウムD2線(ガスセル)にロック。

制御帯域30 kHz, $\delta\nu = 100 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (@100 Hz).

(cf. $\delta P/P \sim 10^{-5} / \text{Hz}^{1/2}$ @100Hz)

●新しいECLDデザイン

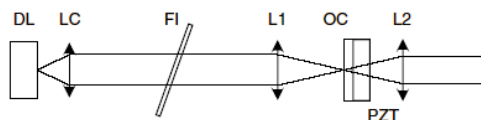
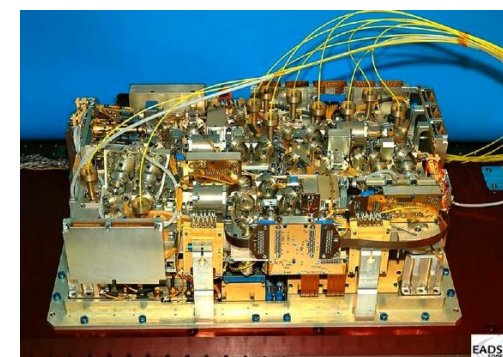
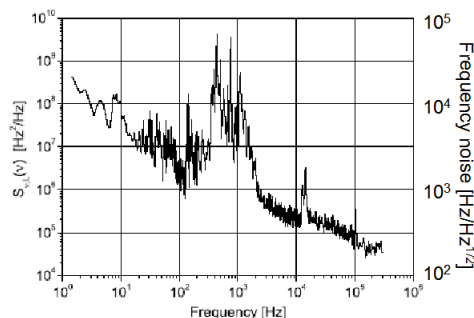


Fig. 1. Schematic of the external cavity laser using an interference filter (FI) for wavelength selection: (DL) laser diode, (LC) collimating lens, (OC) partially reflective out-coupler, (PZT) piezo-electric transducer actuating OC, (L1) lens forming a "cat's eye" with OC and (L2) lens providing a collimated output beam.



PHARAO光源ユニット
(530 x 350 x 150 mm³, 21 kg, 65 W)

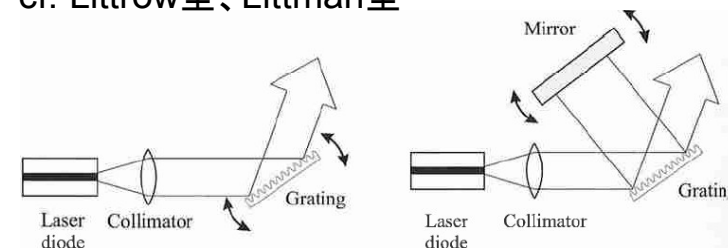
振動テストでは10 urad以下の出射光軸のずれのみ残った。

Littman型と同レベルの非制御時の周波数ノイズを持つ。

F. Allard et al., Rev. Sci. Instrum. v75, p54, y2004

X. Baillard et al., Opt. Commun. v266, p609, y2006

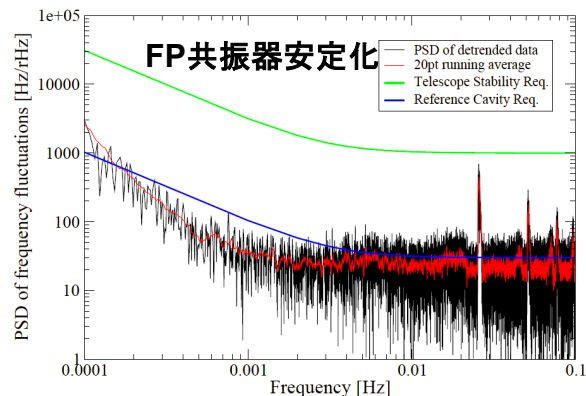
cf. Littrow型、Littman型



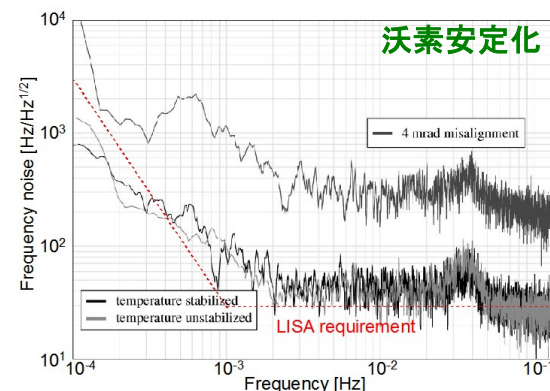
宇宙重力波検出器用安定化レーザーの現状

●LISA

FP共振器とI2酸素分子吸収線(532nm)が進行中。周波数ノイズ $\delta\nu \sim 30 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (@10mHz~0.1Hz)を達成。



5重熱シールド(受動温調)

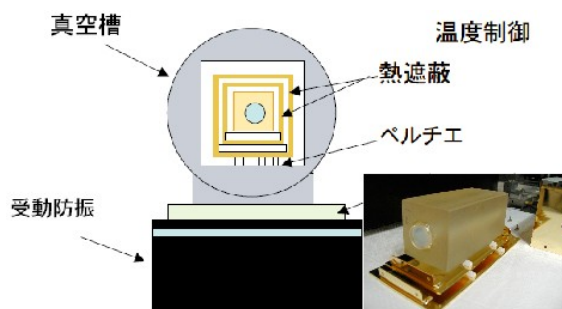


G.Mueller et al., NASA Technical Publication, TP-2005-212790, y2005

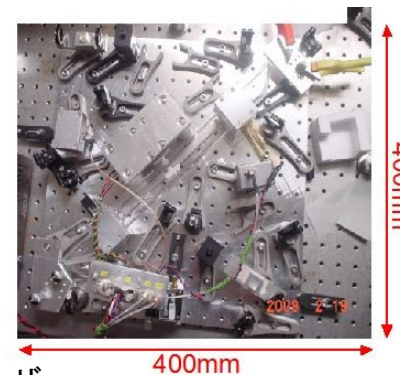
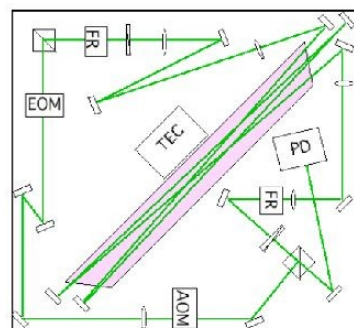
V. Leonhardt et al., Appl. Opt. v45,p4142, y2006

●DPF/DECIGO

FP共振器とI2酸素吸収線(515nm)が進行中。I2安定化レーザーはブレッドボードモデルを構築中。



- 共振器は振動に鈍感な位置で支持
- 能動温調+2重熱シールド



- 1030nm Yb:YAG NPROレーザー
- 飽和吸収分光+マルチパス

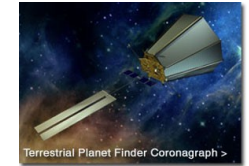
武者氏 第7回DECIGO-WS 資料より

衛星搭載用安定化レーザーの可能性

- Terrestrial Planet Finder (TPF-C, NASA) http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.cfm
TPF-C Technology Plan - March 2005

- 宇宙コロナグラフ望遠鏡で地球型惑星探査を実施する。
- 主鏡と副鏡の間隔(12m)を50 nm以内(24時間)の変動に抑える。

$$\delta v \sim 1 \times 10^5 \text{ Hz/Hz}^{1/2} (@1 \times 10^{-5} \text{ Hz}, \lambda=1 \mu\text{m}, \text{SafetyFactor}=10)$$



- Black Hole Imager (BHI)/Micro-Arcsecond X-Ray Imaging Mission (MAXIM) <http://maxim.gsfc.nasa.gov/index.html>
W.Cash et al., Nature v407, p160, y2000

- 大型宇宙X線望遠鏡でBHの事象の地平線近傍を直接観測する。
- ミラー間隔(~cm)を1nm以下(8時間)の変動に抑圧する。

$$\delta v \sim 3 \times 10^6 \text{ Hz/Hz}^{1/2} (@3 \times 10^{-5} \text{ Hz}, \lambda=1 \mu\text{m}, \text{SafetyFactor}=10)$$

- GRACE follow-on

- 衛星重力ミッションGRACE(2002年打ち上げ)の後継ミッションで、レーザー測距によりジオイド計測精度を向上する計画。
- 衛星間距離50km, 測位感度 $\sim \text{nm/Hz}^{1/2}$ のとき、 $\delta v \sim \text{Hz/Hz}^{1/2}$ レベル(@ $10^{-2} \sim 1 \text{ Hz}$)が要求値。

P.L. Bender et al., Space Sci.Rev. v108, p377, y2003
S. Nagano et al., Meas. Sci. Technol. v15, p2406 y2004
R. Pierce et al., Appl. Opt., v47, p5007, y2008

- Space Optical Clocks (SOC, ESA), Einstein Gravity Explorer (EGE)

- 衛星搭載光時計(光格子時計、イオントラップ型)で
超高精度周波数標準、相対論・統一理論検証を実施。
- 時計レーザーの安定度 $\leq 1 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (@1Hz)

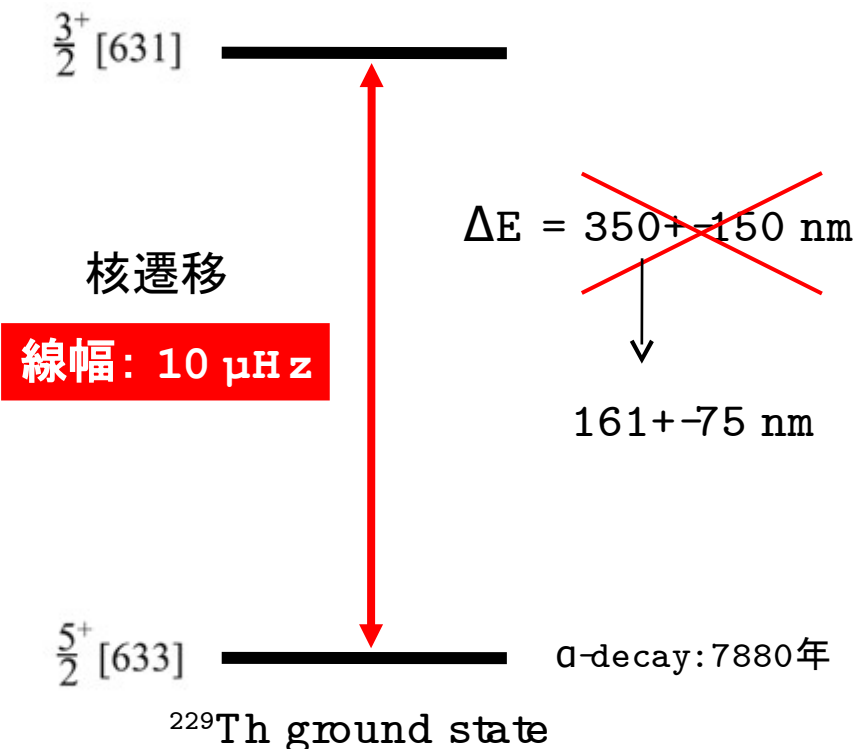
The SOC consortium,
"A Development Roadmap for Neutral Atom Optical Clocks for Space"
http://www.exphy.uni-duesseldorf.de/optical_clock/OCIS.html

- 衛星間-, 惑星間光宇宙通信

- データ容量の増大に伴い、高速・高密度通信が要求される。 cf. 光ファイバー通信
- チャンネル間の干渉を防止するために、レーザーの安定度が必要。

^{229}Th の核遷移を使った全固体原子時計

Thorium (Th) 原子番号90



実用面から利点

- ・ 外場(磁場・電場)の影響を非常に受けにくい
- ・ 反跳シフト・衝突シフトをほとんど受けない
- ・ 個体中でよいので、真空チャンバーがいらない
→ 世の中や宇宙空間に広めるには
全固体化は決定的に有利
- ・ 紫外領域のため、確度・安定度の向上が見込める
(そもそも紫外光源の開発自体がチャレンジング。
半導体産業や超長距離宇宙通信への貢献できる)

サイエンスの側面からみた利点

- ・ α の時間変化に対する感度が、現状より
 $10^3 \sim 10^5$ 倍程度上がる
- * 2つのグループが ^{229}Th を使った実験に着手
Kuzmich (@Georgia Tech.) イオントラップ
DeMille (@Yale Univ.) 固体中

E. Peik, et al., Europhys. Lett. 61, 181 (2003)
B. R. Beck, et al., Phys. Rev. Lett. 98, 142501 (2007)
C.J. Campbell, et al., Phys. Rev. Lett. V102, p233004, y2009

Atomic Clocks MO28 Poster Session I: Monday, July 28

Investigation of the optical transition in the ^{229}Th nucleus: Solid-state optical frequency standard and fundamental constant variation

Eric R. Hudson, A. C. Vutha, S. K. Lamoreaux, D. DeMille

Department of Physics, Yale University, 217 Prospect Street, New Haven, CT 06511, USA

まとめ

- ・これまでの衛星搭載用レーザーは、周波数ノイズについて特に要求は課せられて来なかった。
- ・TerraSAR-X – NFIRE間のコヒーレント方式宇宙通信の成功により、衛星搭載レーザーでもコヒーレンスが重要となりつつある。
- ・ADM-Aeolus, ACES/PHARAOミッションではFP共振器やCs吸収線に周波数安定化されたレーザーが搭載される。
安定度は10k~100 kHz/Hz^{1/2}程度。
- ・LISA, DECIGO/DPF用レーザーへの要求は既存のミッションと比較して、非常に挑戦的なものと言える。
安定度は1~30 Hz/Hz^{1/2} (@10⁻⁴~1 Hz)程度。これらは、実験室において最近ようやく達成されたレベルである。
- ・LISA, DECIGO/DPF用レーザーが実用化すれば、地上可搬から宇宙実験まで、様々な応用が期待できる。

限界とそれを超えて

実験室で得られた安定度を達成するために必要となるキーデバイス(今後必要となる開発要素)

- 超高フィネス光共振器 (フィネス ≥ 10 万), 振動に鈍感な形状と支持法, 高性能防振装置
- 長いガスセル、光共振器型ガスセル

要求される環境等

- 実験室レベルの温度・振動環境、EOMの残留強度変調、複雑な周波数比較法(変調移行法etc)

現在の限界の要因

- FP共振器の鏡のブラウン運動、ULEスペーサーの経年変化、熱膨張etc
- 量子射影ノイズ、衝突シフトetc

限界を超えるために

- 共振器長の増加、ミラーコーティングのQ値改善、Cryogenic Optics (\Leftrightarrow ミッション寿命) cf. Gravity ProbeB(GP-B)
- 沃素508nm吸収線(~4kHz線幅)、冷却原子・イオン、核共鳴
- 狭線幅エネルギー準位を使ったレーザー(~mHz線幅、 10^{-12} W)

W.Y. Cheng et al., Opt.Lett., v27 p571, y2002
T. Rosenband et al., Science, v319, p1808, y2008
A.D. Ludlow et al., Science, v319, p1805, y2008

D. Meiser et al., PRL., v102, p163601, y2009

得られるサイエンス

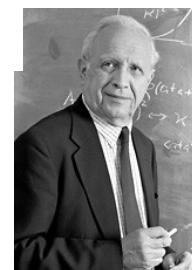
- 相対論・統一理論の超高精度検証
- 宇宙空間での超精密分光
- 宇宙光周波数標準 (マスタークロック)、秒の再定義
- etc

光周波数標準器の構成

Cs一次周波数標準器

光周波数標準器

1. 原子の基準 (単一イオン、光格子)
2. 超高安定レーザー (クロックレーザー)
3. 光周波数カウンタ (fsレーザー光コム)



Roy J. Glauber



John L. Hall



Theodor W. Hänsch

Nobel Prize in Physics 2005
 ``for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique''

