



中国科学院上海光学精密机械研究所
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS

深空探测冷原子钟研究

成华东



中科院上海光机所量子光学重点实验室

2020. 12. 21



目录

- 基本原理和概念
- 研究背景
- 积分球冷原子钟研制
- 深空导航应用



一、基本原理和概念

➤ 时钟的发展

从一天差**1000s**到现在
在**100亿年**不差**1s**

Wynands, R.: *Atomic Clocks*.

Lect. Notes Phys. **789**, 363–418 (2009)

Clock uncertainty

10^{-18}

10^{-17}

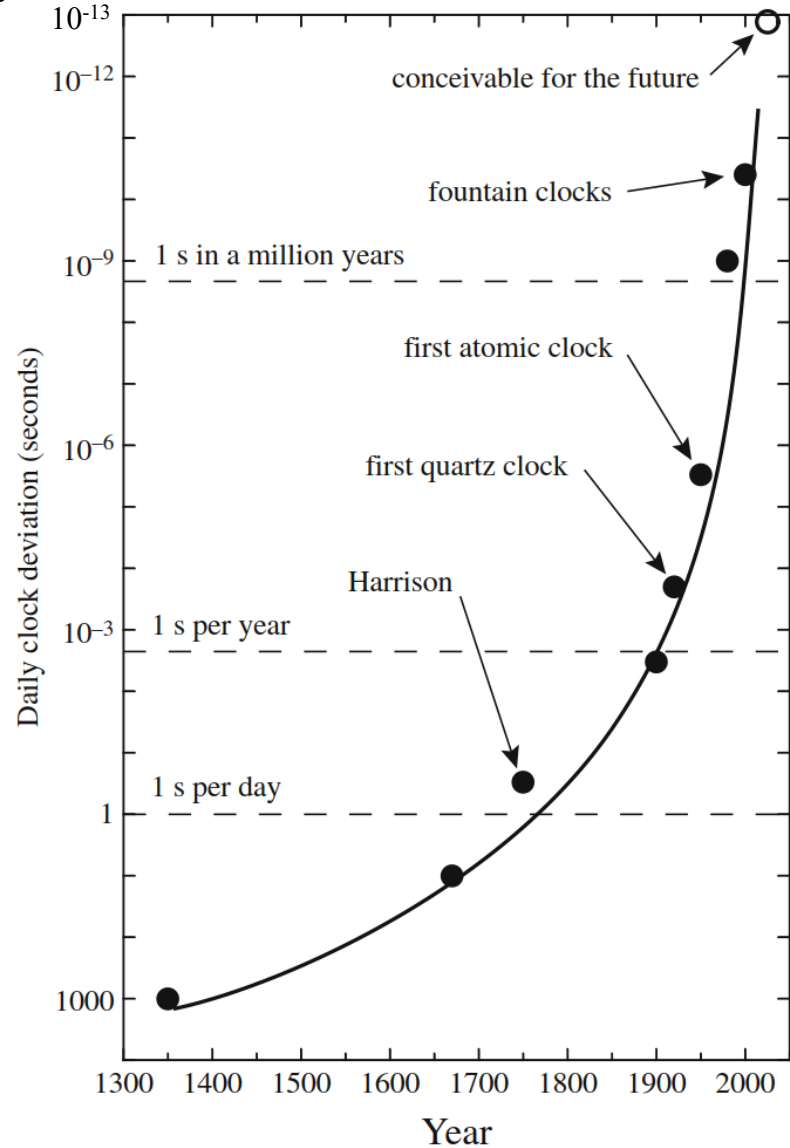
10^{-14}

10^{-11}

10^{-8}

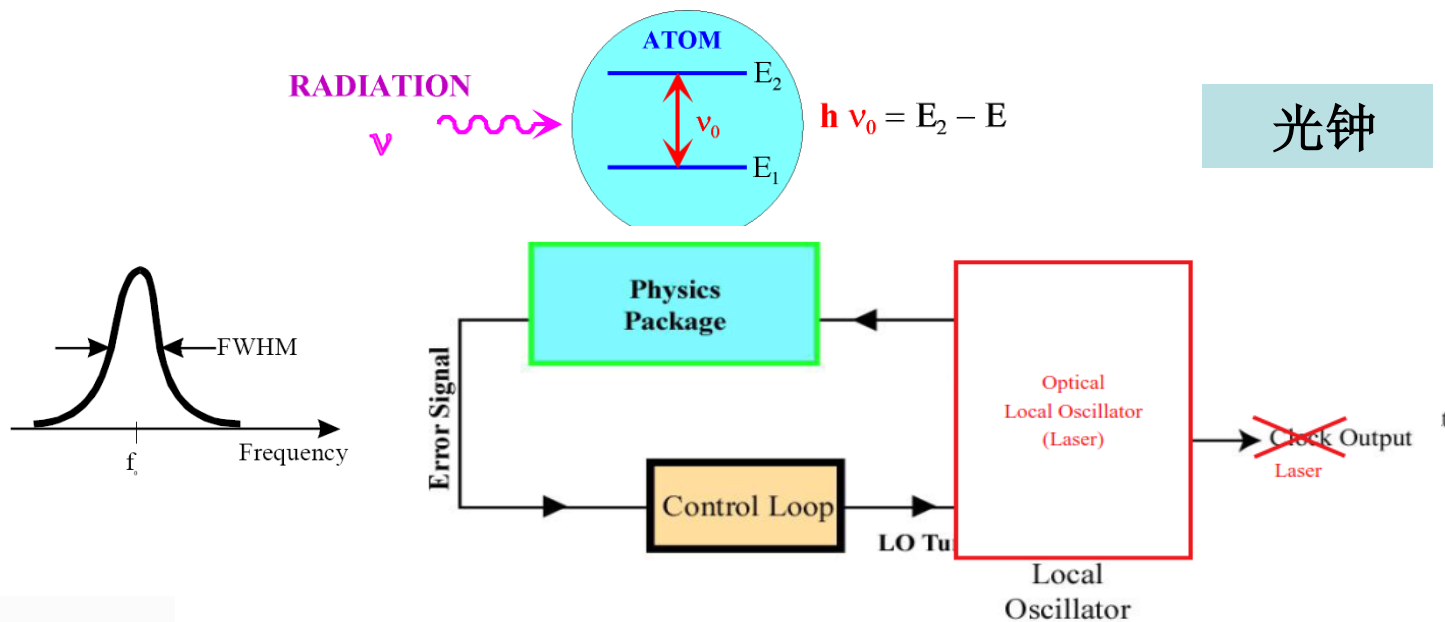
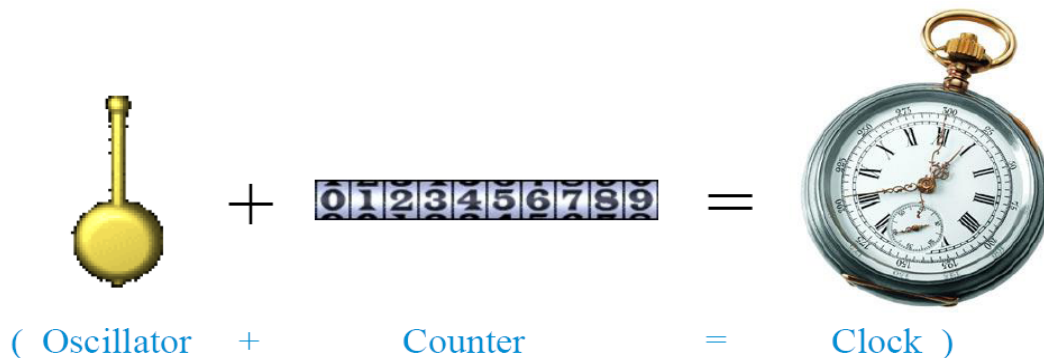
10^{-5}

10^{-2}



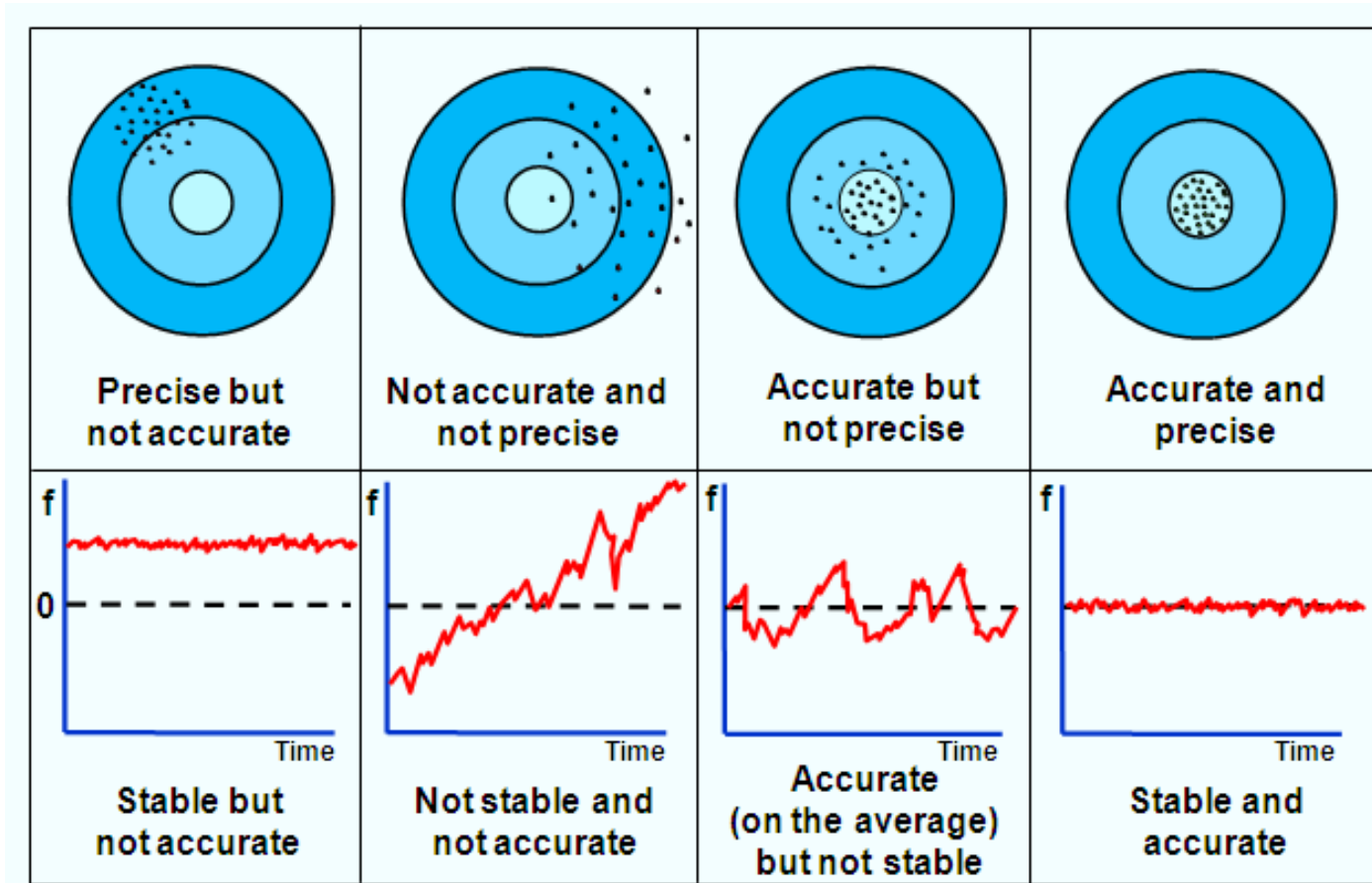
一、基本原理和概念

➤ 什么是原子钟？



一、基本原理和概念

➤ 原子钟的稳定度和准确度

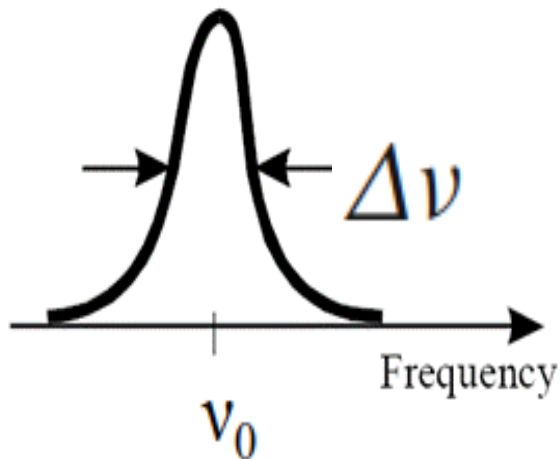


From Gaetano Mileti's PPT



一、基本原理和概念

➤ 原子钟的稳定度



$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{S/N} \sqrt{\frac{T_{\text{cycle}}}{\tau}} .$$

ν_0 : 钟跃迁信号中心频率

$\Delta\nu$: 钟跃迁信号线宽

S/N : 钟跃迁信号信噪比 (1Hz带宽)

T_{cycle} : 原子钟周期

τ : 测量时间





一、基本原理和概念

➤ 原子钟的应用

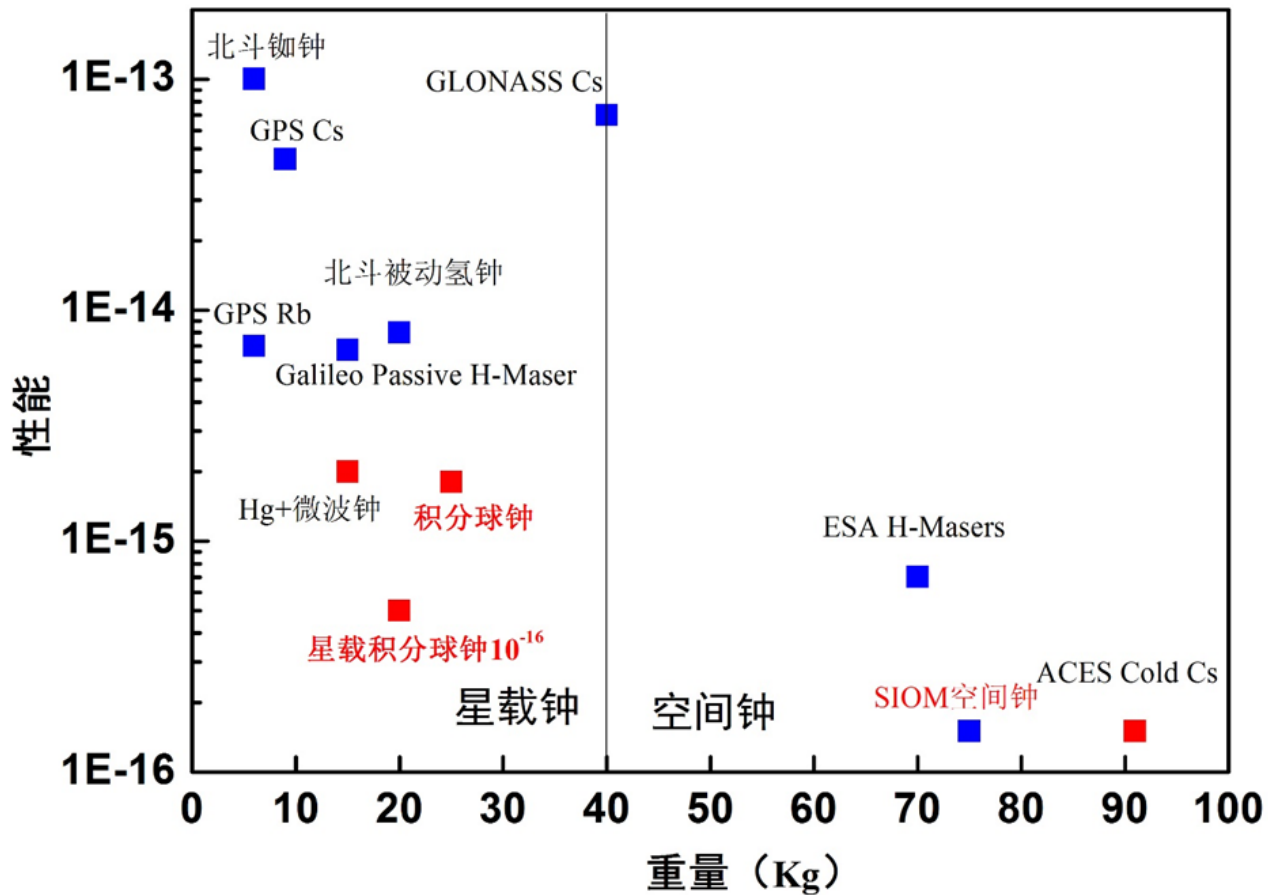
- 秒的定义：The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of cesium133 (1967)
- 导航定位：北斗、GPS、GLONASS、GALILEO：
- 大地测量：在地球表面，频移 $1.1 \times 10^{-18} / \text{cm}$,
- 基础科学实验：广义相对论、引力红移、检验精细结构常数变化、寻找暗物质
- 深空探测：空间引力波探测（需要 10^{-13}s 的计时误差），火星探测以及未来的太阳系外行星探测等



二、研究背景和意义

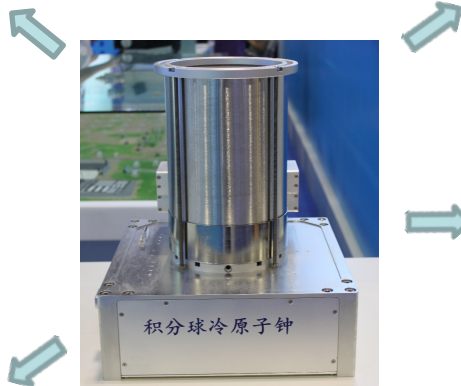
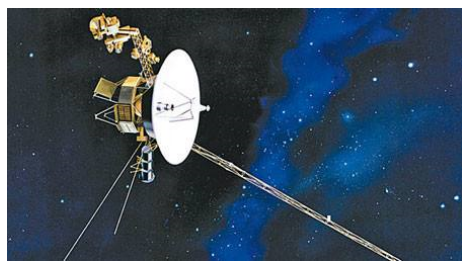
➤ 高精度星载原子钟

漂移小，准确度高



二、研究背景和意义

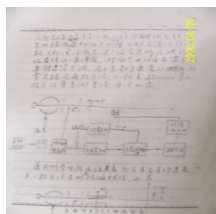
➤ **积分球冷原子钟**：星载、深空探测、车载、船载、潜艇、守时



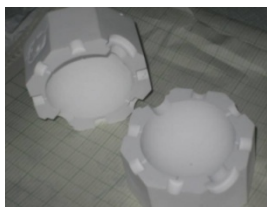
三、积分球冷原子钟研制

➤ 积分球冷原子钟研制历程

王育竹院士
国际上率先
提出积分球
冷却的思想



1979年



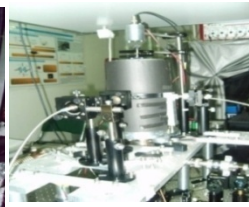
2005-2008年

冷却原子



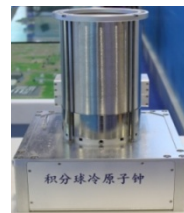
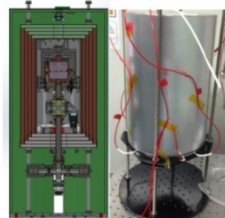
2010-2012年

实验系统



2014年

原理样机



2016年

工程样机



2021年

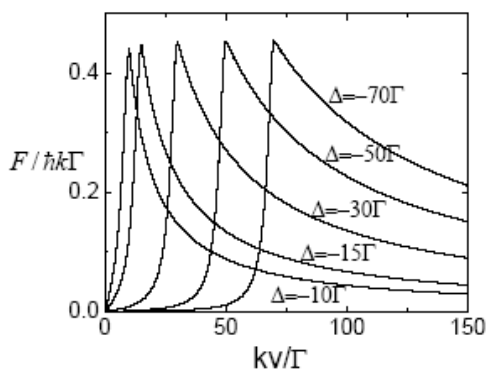
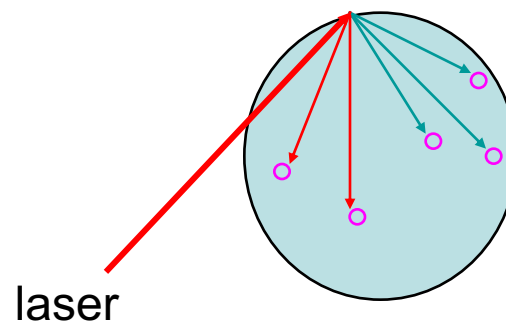
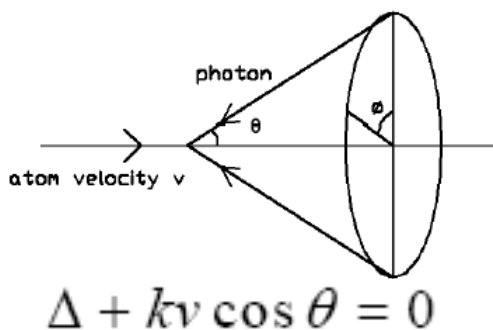
搭载实验



三、积分球冷原子钟研制

➤ 积分球冷原子钟关键技术

- 积分球漫反射光冷却



$$F = -\hbar k \Gamma \rho_{ee} \cos \theta =$$

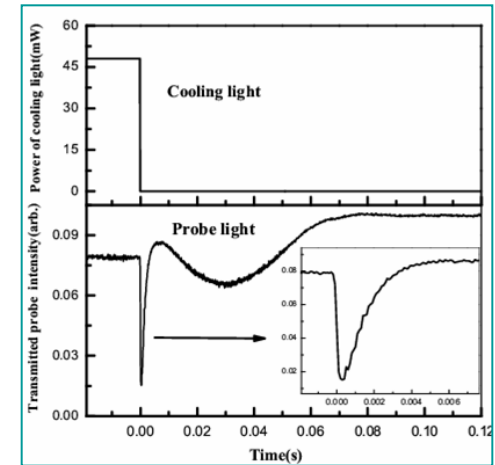
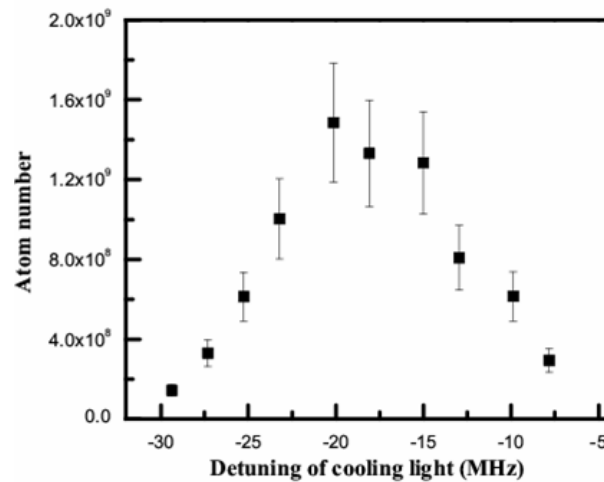
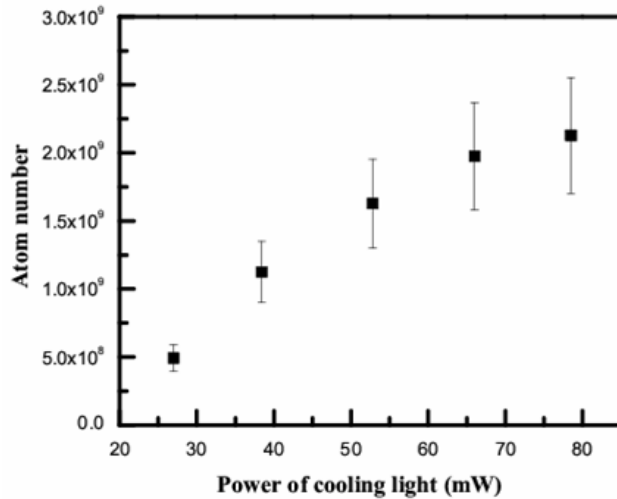
$$-\hbar k \Gamma \frac{s_0 / 2}{1 + s_0 + [2(\Delta + kv \cos \theta) / \Gamma]^2} \cos \theta,$$

各向同性光场辐射压力



三、积分球冷原子钟研制

- 积分球漫反射光冷却

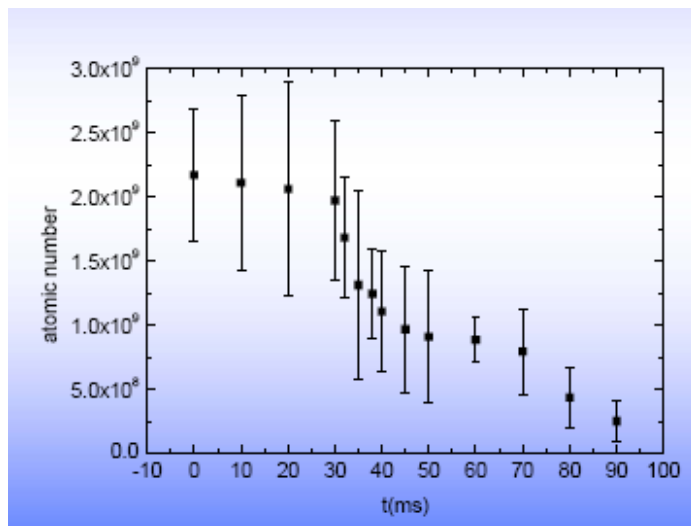


Num $\sim 10^8$, Temp $\sim 30 \mu\text{K}$, density $\sim 10^7 / \text{cm}^3$

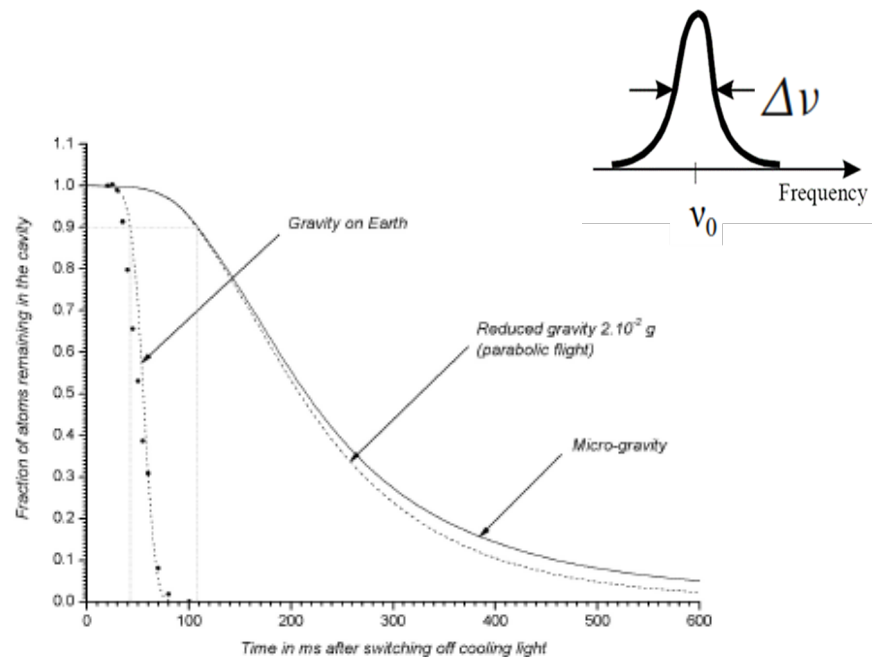


三、积分球冷原子钟研制

- 积分球内冷原子寿命



地面：30ms，受重力影响



空间：200ms，原子温度

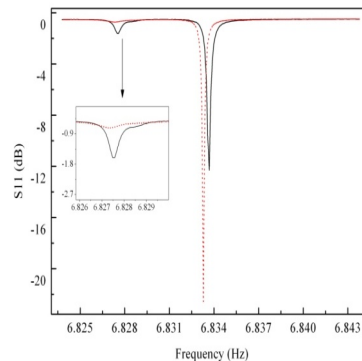
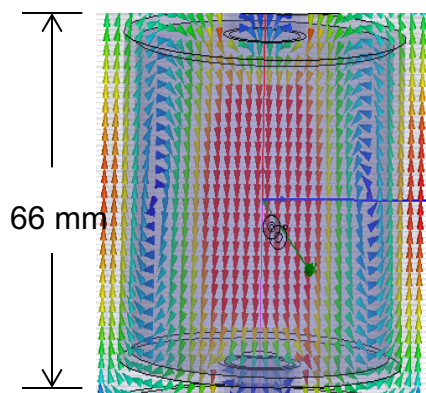
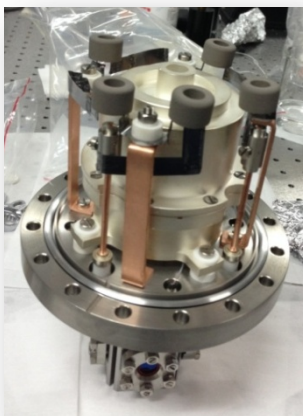
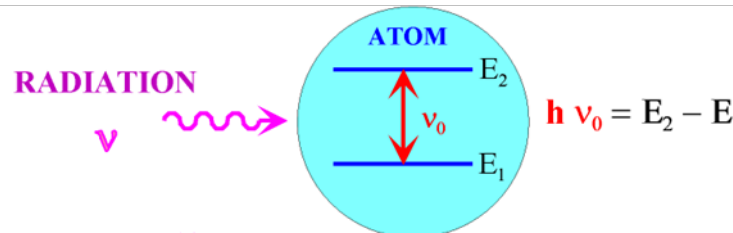


三、积分球冷原子钟研制

➤ 积分球微波腔一体化技术

全金属结构

大均匀场区



微波腔测试内容	测试结果	难点
微波腔Q值	20000	同时满足高的光漫反射率和高的微波反射率
微波均匀场区大小	50mm	
微波腔模式	TE011	

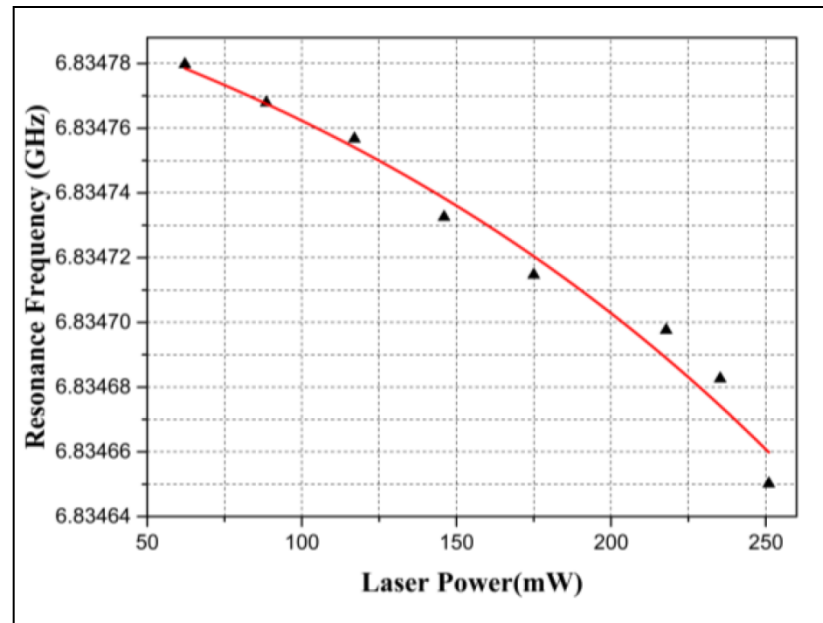
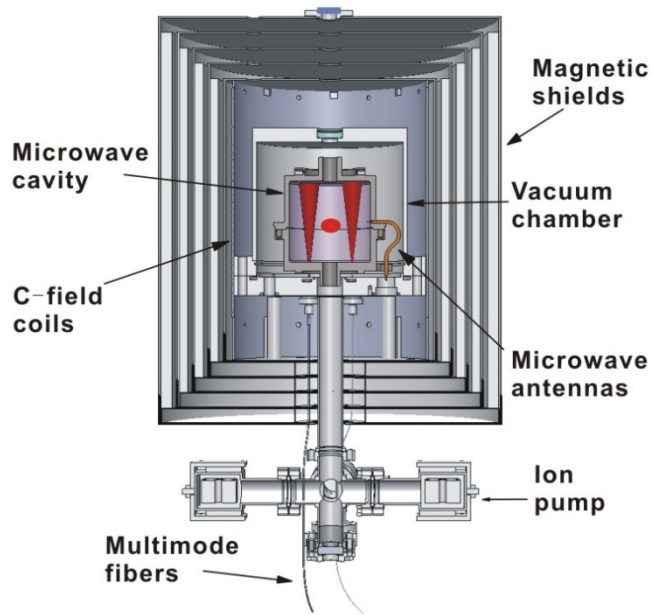
专利 (201410307065.0)



三、积分球冷原子钟研制

➤ 积分球腔牵引效应抑制技术

测量发现激光微扰微波腔效应，将腔牵引效应从小至E-16量级



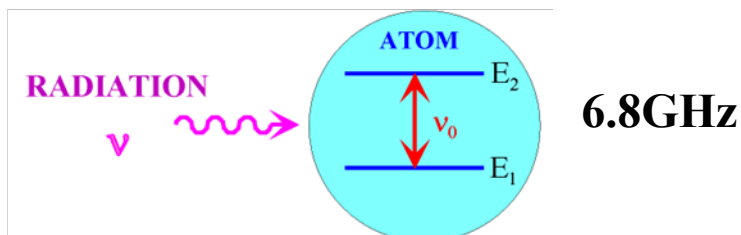
P Liu, HD Cheng* et. al. J. Phys. Conf. 723, 0120071 (2016)

8th SFSM, 2015.10, Potsdam, Germany

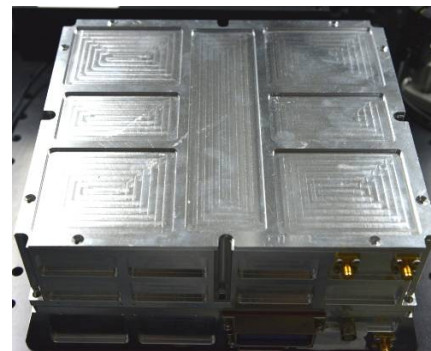


三、积分球冷原子钟研制

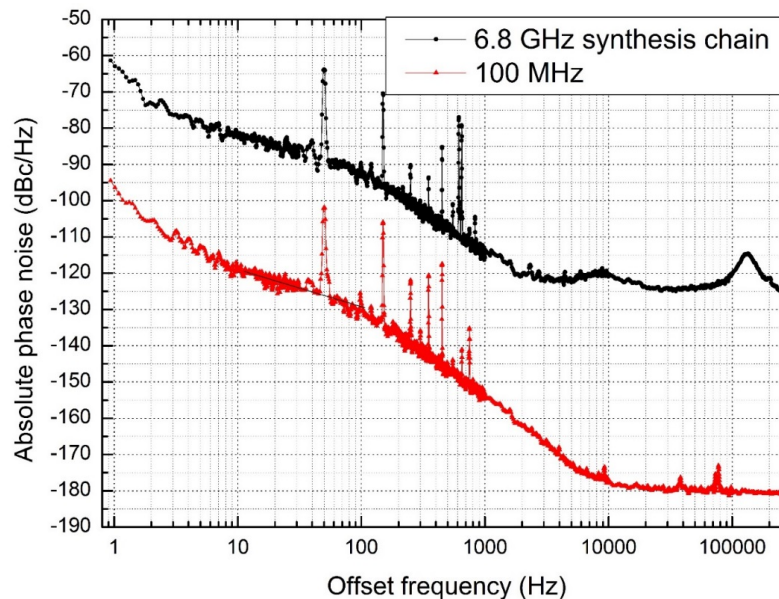
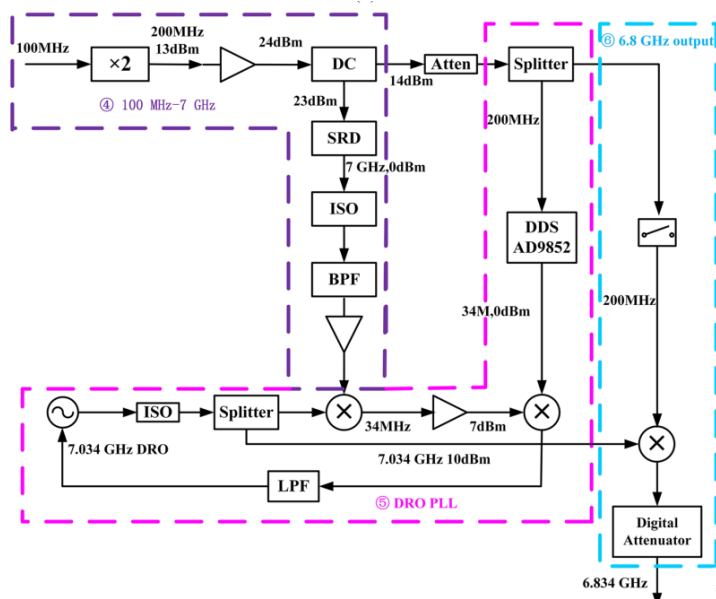
➤ 低相噪微波频率综合器技术



5/10/100MHz — 6.8GHz

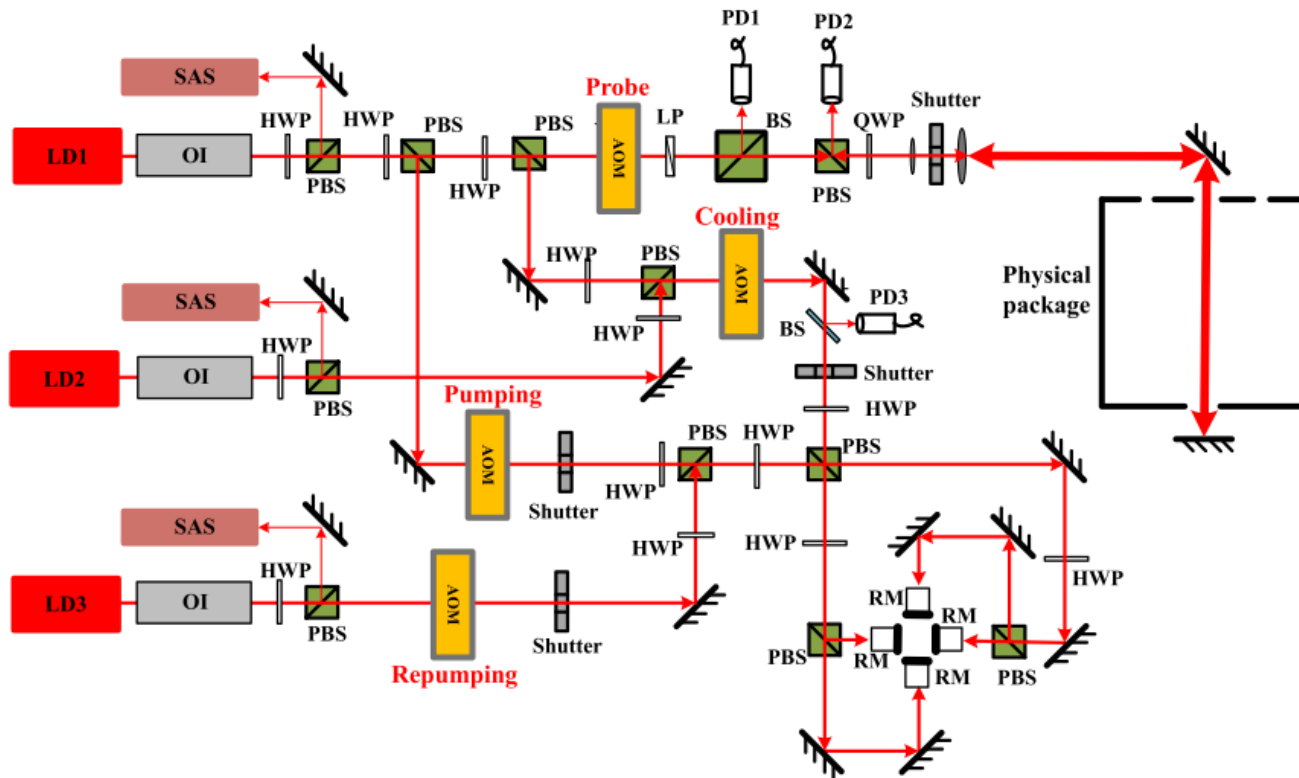


相位噪声 -60dBc/Hz@1Hz



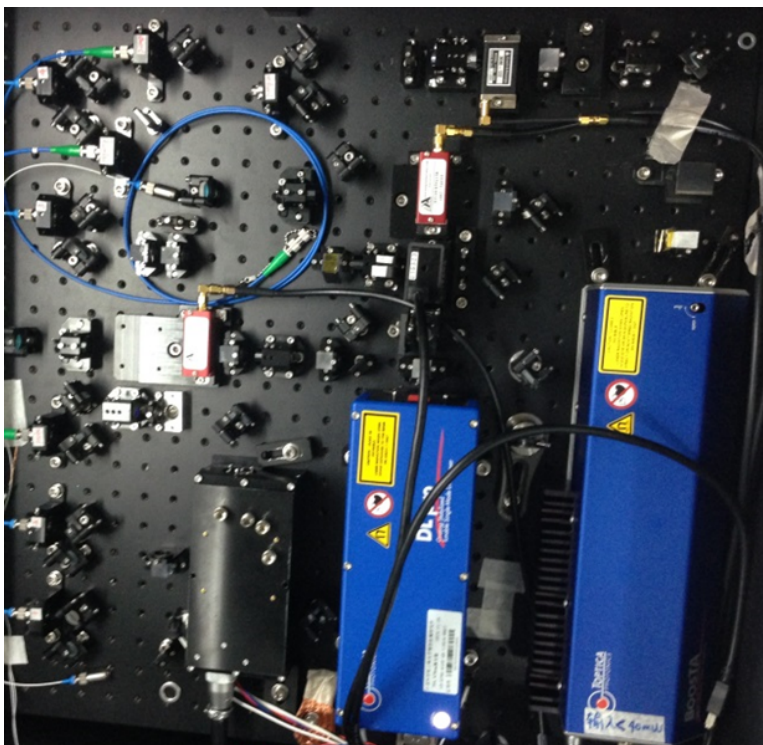
三、积分球冷原子钟研制

➤ 光学系统集成技术

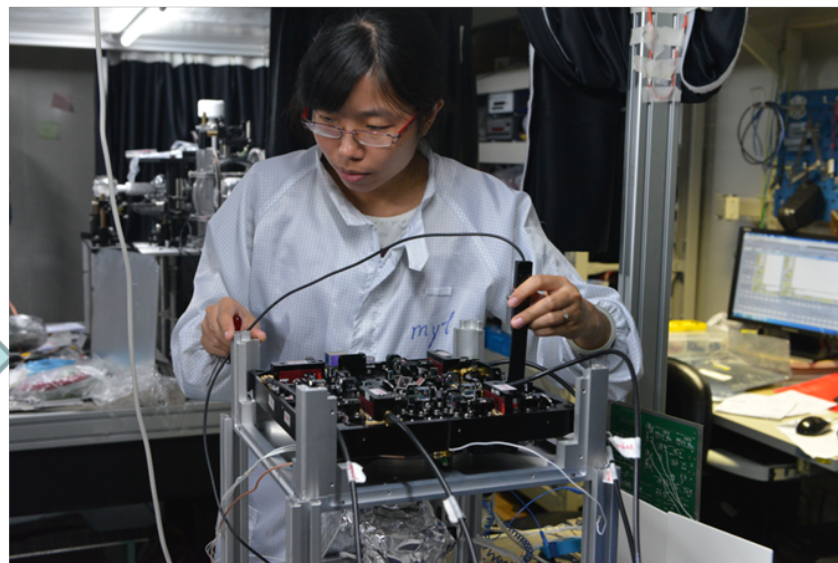


三、积分球冷原子钟研制

➤ 光学系统集成技术



650*650 mm

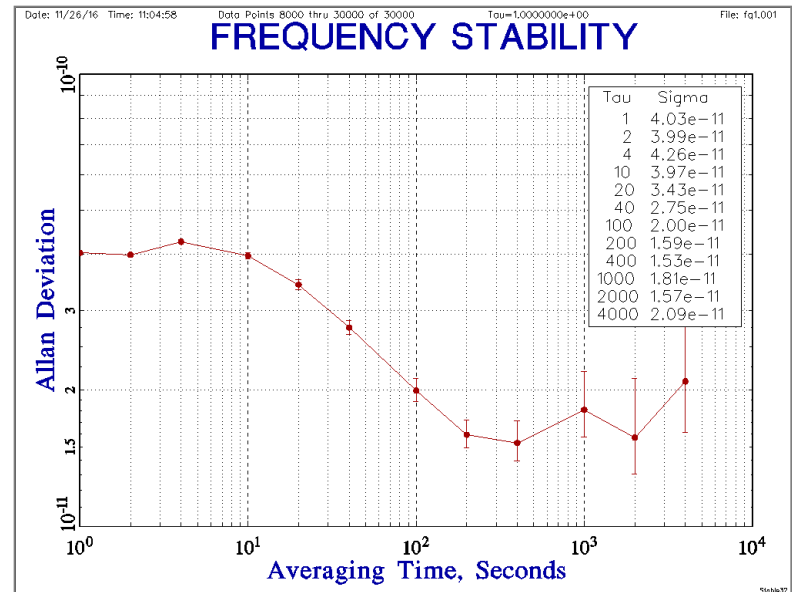
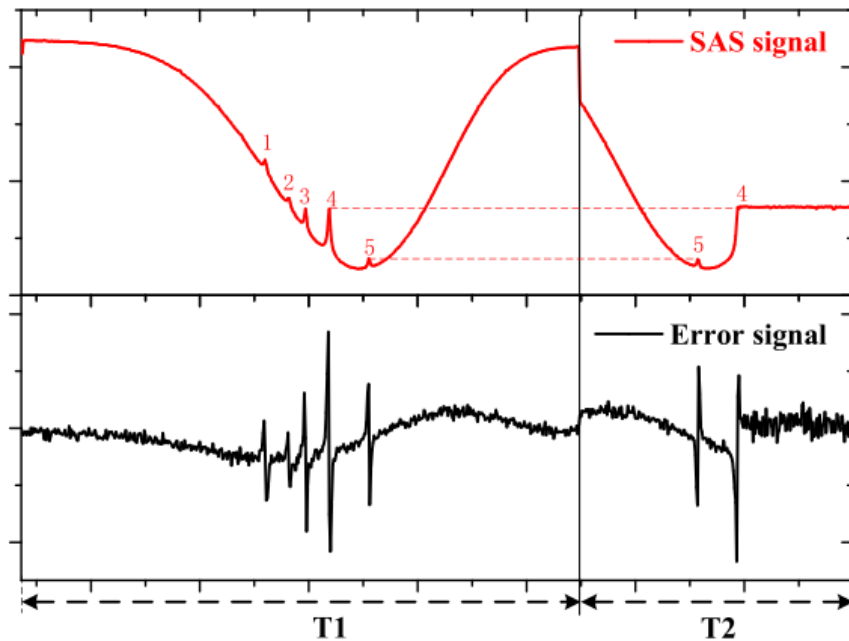


300*300 mm

三、积分球冷原子钟研制

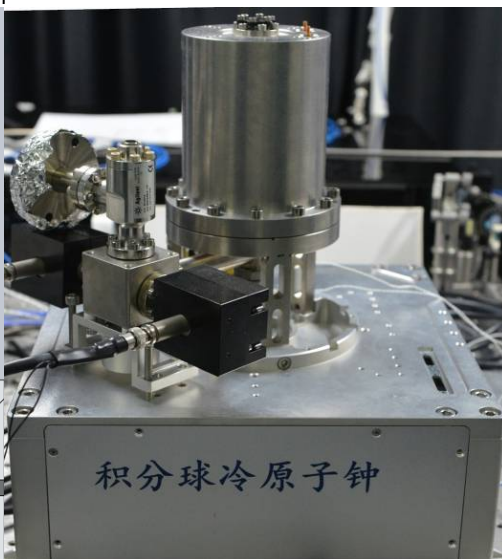
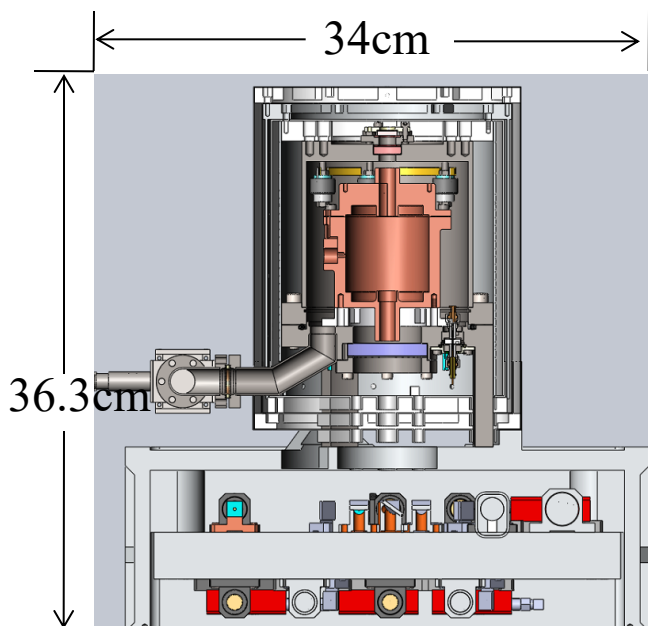
➤ 激光器自动稳频技术

长期自动稳频 (频率稳定度 10^{-11})

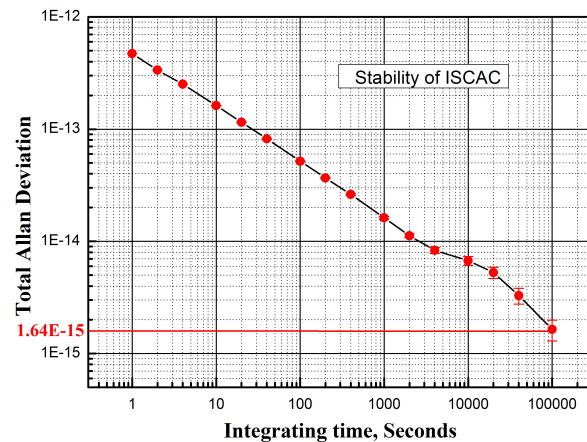


三、积分球冷原子钟研制

◆实现了积分球冷原子钟的工程化



积分球冷原子钟工程样机



工程样机稳定度

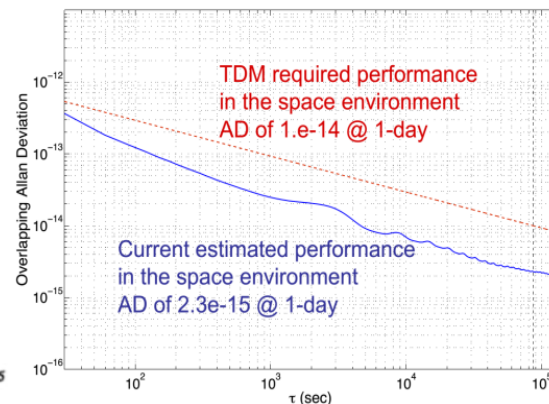
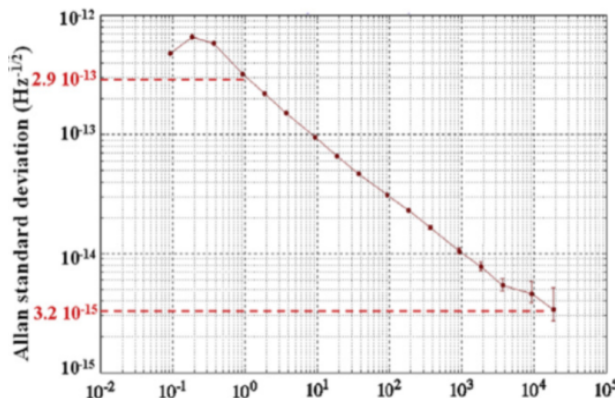
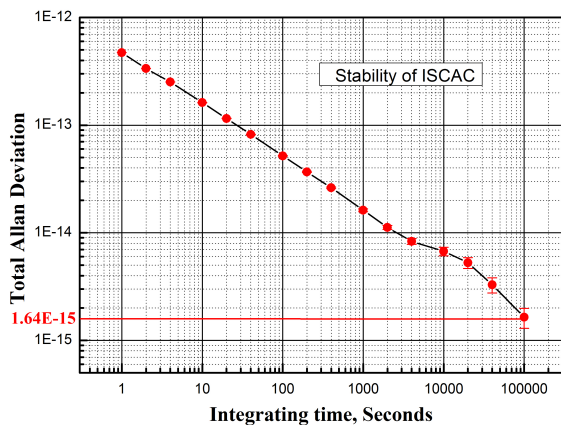


三、积分球冷原子钟研制

上海光机所
1.64E-15

巴黎天文台
3.2E-15

美国JPL
2.3E-15



8th SFSM, 2015.10, Potsdam, Germany

P Liu, HD Cheng* et. al.

J. Phys. Conf.

723, 0120071 (2016)



► Stability¹

1s
10s
100s
1000s
Floor

Muquans
2015

7.0 10⁻¹⁵
< 4.0 10⁻¹⁵ (@ 5 000 s)

AIAA SpaceOps 2014 Conference



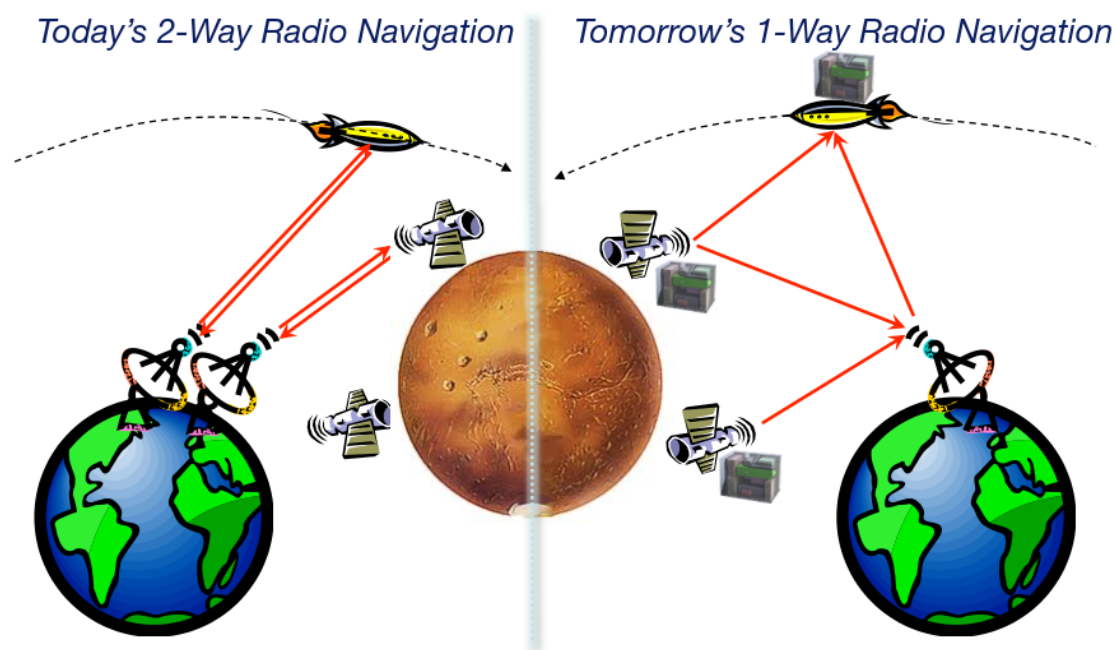
四、深空导航应用

- 积分球冷原子钟：**深空探测**—太极计划、天琴计划、火星探测、**觅音计划**。

在深空提供精确度的独立的频率标准

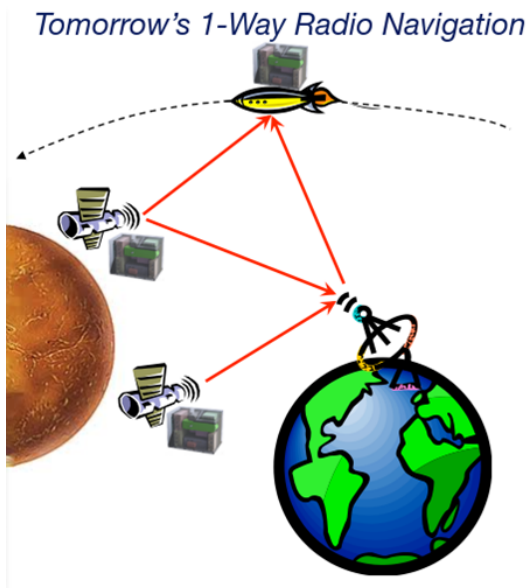
单向射频导航的优点：

- 节省时间
- 大数据量
- 信噪比高
- 不受天气影响
- 需要小的信号功率



四、深空导航应用

➤ 积分球冷原子钟：深空自主导航

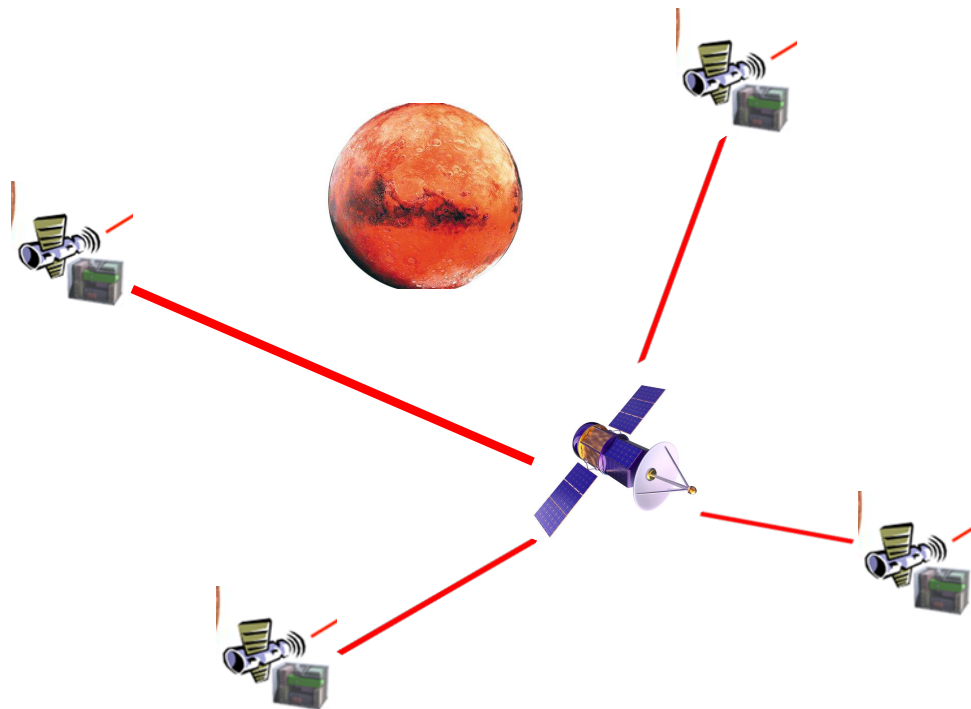


**Optical
Navigation**



四、深空导航应用

➤ 积分球冷原子钟：建造**深空GPS系统**





敬请指导！