

微重力环境下冷原子物理及其应用*

徐震 魏荣 王育竹[†]

(中国科学院上海光学精密机械研究所 中国科学院量子光学重点实验室 上海 201800)

摘要 文章介绍了国际上微重力环境下冷原子物理及其应用的研究工作:空间原子钟、原子干涉仪、超冷原子物理和建议中的广义相对论的探索.文中简要介绍了中国科学院上海光学精密机械研究所在微重力环境下所进行的空间原子钟、玻色-爱因斯坦凝聚和原子芯片等研究工作.

关键词 微重力 激光冷却 原子钟 原子干涉仪 玻色-爱因斯坦凝聚 原子芯片

Cold atom physics and its applications in a microgravity environment

XU Zhen WEI Rong WANG Yu-Zhu[†]

(Shanghai Institution of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences Key Laboratory for Quantum Optics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract We review the field of cold atom physics and its applications in a microgravity environment, including atomic clocks in space, atomic interferometers, ultra-cold atom physics, and the proposed investigation of general relativity. A brief introduction is presented of the research in the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics on atomic clocks in space, Bose-Einstein condensation and atom chips in a microgravity environment.

Keywords microgravity, laser cooling, atomic clock, atom interferometer, Bose-Einstein condensate, atom chip

1 冷原子物理及其应用研究从微重力环境中获益

激光冷却气体原子及其在科学技术中的应用是现代物理学发展十分迅速的国际前沿领域.1997, 2001 和 2004 年度的三届诺贝尔物理奖分别颁发给这一领域的 3 项成果:激光冷却气体原子、玻色-爱因斯坦凝聚和相干态与光频梳,以奖励他们做出的重要贡献.三届诺贝尔物理奖授予了同一领域的 3 项成果,说明这个领域是一个极具活力的研究领域,更重要的是,这些研究成果为发展物理学和高新技术建立了坚实的基础,并将产生极为深远的影响.超冷原子物理的发展为原子钟和原子干涉仪性能的提高、广义相对论时-空特性的探索、玻色-爱因斯坦凝聚体和费米简并气体量子相变的精密测量等开辟了新的途径.虽然人们已经利用超冷原子物理和量

子光学的新成果实现了高精确度的原子钟、原子干涉仪,观察到玻色子与费米子的量子相变等新现象,但是进一步提高物理量的测量精确度,却受到了实验条件的限制.例如:原子钟的准确度(不确定度)和稳定度的改善需要更长的探测时间,原子干涉仪精确度的提高需要更长的相干长度,玻色子或费米子的量子相变的探测需要更低的气体温度,广义相对论时空关系的探索需要极高精度比对两地时钟的偏差等等.在重力存在的条件下很难满足提高物理量测量精度的要求.例如,由于重力限制了探测原子的时间,因而限制了探测的能力和准确度.微重力环境为冷原子物理及其应用研究提供了极佳的实验条件,以原子钟的研究为例可充分说明微重力环境对

* 中国科学院知识创新重大方向性项目(批准号:KGCX3-SYW)、国家自然科学基金重点项目(批准号:10334050)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB921202)资助项目

2008-08-06 收到

[†] Email: yzwang@mail.shcnc.ac.cn

物理量精密测量的重要性. 原子钟实际上是利用电磁波(微波或光波)来精密测量原子(分子和离子)两个能级间隔的能量差 E , 测量的不确定度为 ΔE (也可表示为频率误差 Δf)^[1]. 根据测不准关系式知道, 测量越准确需要越长的测量时间. 在原子钟系统中, 探测原子的微波场占有一定的空间, 由于重力的存在, 原子不可能长时间停留在微波场中. 因此, 微波与原子相互作用的时间有限, 探测的精确度也就有限. 为了能够实现较长的原子与微波场相互作用的时间, 人们利用辐射压力将冷原子团上抛, 然后在重力作用下原子团自由下落, 原子团在上升和下落的时间间隔中与微波场作用, 获得了较长的相互作用时间, 因而提高了测量的精确性. 冷原子喷泉钟就是利用 Ramsey 干涉方法, 获得的最长作用时间仅为 0.5 s 左右, 谱线的宽度约为 1 Hz, 频率测量的不确定度为 10^{-16} 量级. 这就是地面冷原子喷泉钟提高测量精确度的方法^[2]. 但在微重力环境下, 原子处于近于无外力作用的悬浮状态, 利用激光冷却技术或其他冷却技术(如蒸发冷却技术等)可将原子气体的温度降低到 pK—fK 量级. 这样就可选用极慢运动的原子与微波场作用, 大幅度地增长了相互作用的时间, 使原子谱线的均匀加宽可小于 30 mHz, 大大提高了物理量测量的准确度. 由于微重力环境可获得极低温度的气体原子, 原子的热运动速度极小, 与原子热运动速度相关的影响原子钟频率不确定性和不稳定性物理因素都将被抑制几个数量级, 如原子的吸收谱线的均匀加宽、一次多普勒效应、二次多普勒效应、碰撞效应等. 另外, 对于 nK—fK 温度的气体, 无须用强磁场梯度或光场梯度囚禁原子和平衡重力, 因此磁场或光场梯度引起的非均匀谱线加宽很小, 仅为 $\Delta f \sim 0.001$ Hz, 可基本消除非均匀谱线的加宽效应. 另外, 空间环境的静磁场(小于 10 μ G)和电磁干扰较地面干扰为小, 易于屏蔽. 卫星和轨道试验平台的振动噪声也很小, 因此光学和电子学引入的相位噪声和附加噪声可忽略.

总之, 微重力环境对冷原子物理及其应用研究提供了极好的实验环境, 它不仅对冷原子钟的研究, 而且对原子干涉仪的研究、玻色-爱因斯坦凝聚和量子简并气体的研究以及广义相对论的验证提供了极佳的实验条件. 表 1 给出了地面实验环境以及落塔、抛物线飞行和飞行轨道平台的微重力环境实验得到的各参数的对比^[3].

表 1 地面环境和微重力环境的参数比较

参数	地面实验	微重力环境实验
自由演化时间	时间 10ms < t < 100ms 自由落体	5s < t < 100s(落塔、抛物线飞行和飞行轨道平台)
测量时间	时间 10ms < t < 100ms	可达 100s
温度	典型值 1nK 记录值 500pK	pK—fK(落塔、抛物线飞行和飞行轨道平台)
动力学性质	囚禁频率 $f > 1$ Hz	0.01Hz(飞行轨道平台) < f < 1Hz(落塔)
囚禁凝聚体的尺度	L 可大到 100 μ m	100 μ m < L < 10mm

2 原子干涉仪及其应用研究

干涉现象是波动性的一种表现形式, 与光波相似, 实物粒子的物质波也会产生干涉现象. 1988 年, 美国 MIT 的小组第一次在原子束装置上观测到了原子束的衍射现象. 1991 年, 德国和美国的两个小组几乎同时报道了在高准直原子束上采用微结构光栅观测到了原子干涉现象. 1991 年, 美国斯坦福大学的朱棣文小组提出利用冷原子的光学原子干涉仪, 在这种干涉仪中用双光子受激拉曼跃迁的方法来实现原子干涉仪^[4], 并很快在这个基础上实现了第一台原子重力仪^[5], 见图 1, 这是目前应用最广泛和最成功的原子干涉仪. 1997 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学实验室报道了一种新型的多普勒原子干涉仪^[6]. 1999 年, 美国耶鲁大学的 Kasevich 小组实现了第一台原子陀螺仪^[7], 见图 2. 用原子干涉仪可以测量重力加速度、重力梯度和转动角速度^[8], 还可以测量精细结构常数和万有引力常数, 在导航、勘探和物理学基础研究等方面有重大的应用价值.

原子干涉仪在精密测量上具有许多内禀的优越性, 在类似的条件下, 原子陀螺仪的灵敏度比光学陀螺仪要高 11 个数量级. 目前在地基实验室里, 原子重力仪的测量精度为 3×10^{-9} g, 原子重力梯度仪的测量精度为 4×10^{-9} g/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 原子陀螺仪的测量精度为 6×10^{-10} rad/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 或 8×10^{-6} Ω_E , Ω_E 为地球自转角速度. 然而目前的测量精度还远远不是原子干涉仪的物理极限, 测量精度的提高主要受限于重力的影响, 例如限制了原子的自由飞行时间和相干波长等.

空间的微重力环境对于提高原子干涉仪的测量精度有很大的帮助. 首先, 微重力环境可以将原子的自由飞行时间提高到秒以上, 从而获得更高的测量精度. 其次, 缺少了重力作用, 可以用激光冷却获得

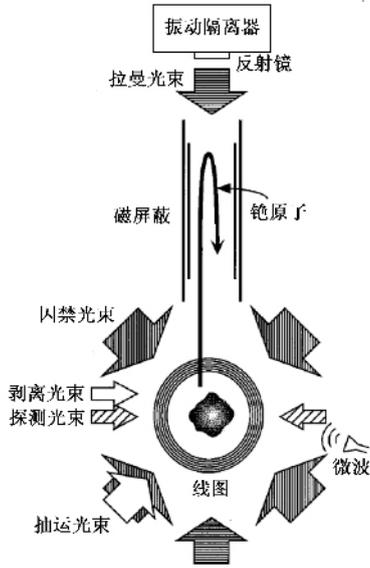


图1 超高测量精度的原子重力仪示意图

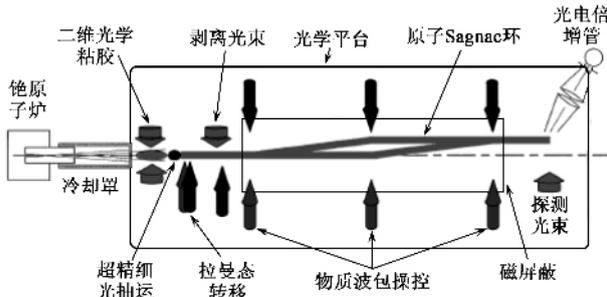


图2 第一台原子陀螺仪的结构示意图

更低的原子系综温度,即原子系综的弥散速率更低,在相同的光束作用下,可以大幅度增加相互作用时间并大幅度增加相干长度。在地面实验室环境下,重力仪和重力梯度仪的相互作用时间最多只能在秒的量级,原子陀螺仪则只有几十毫秒相互作用时间,作用长度往往要达到1m以上;而在空间微重力环境下,原子的相互作用时间可以提高到几秒到十几秒,作用长度缩短到几十厘米。因此微重力环境条件不仅有利于缩短有效作用区的真空腔长度,又能大大提高干涉仪的分辨率。欧空局的HYPER卫星项目^[9]中就包含一套高精度原子干涉仪用来测量转动和加速度,预期测量精度可以达到 $2 \times 10^{-12} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ 和 $4 \times 10^{-14} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$,比地面实验室环境提高了3—5个数量级。

原子干涉仪的高精度测量在空间导航上有许多应用,比如空间惯性导航、卫星轨道姿态控制等。对时间频率、加速度和角动量的高精密测量可以用来确定绝对惯性参考系,使得卫星、空间站以及深太空探测器等可以在没有GPS导航系统的条件下长时

间定位导航,并进行卫星的姿态调整。高精度的原子干涉仪还能用来进行地学测量。由于空间微重力环境下的原子干涉仪具有前所未有的精确度,科学家们更期望用高精度的原子干涉仪来验证广义相对论,并对一些基本物理常数进行更高精度的测量以验证一些基本物理学原理。

欧空局的HYPER卫星项目是目前为止唯一利用原子干涉仪来研究基础物理问题的空间项目。该项目计划用超高精度的原子陀螺仪测量近地轨道的Lense-Thirring效应,用高精度的原子引力仪和引力梯度仪测量精细结构常数、重力磁性和量子引力波引起的物质波消相干,以及在更高精度上验证等效原理。HYPER项目的核心装置是两套正交方向对射的Mach-Zender型原子干涉仪和一套Ramsey-Bordé型的原子干涉仪。两套对射的Mach-Zender型原子干涉仪称作Atomic Sagnac Unit, ASU。其原理如图3所示,它是利用Sagnac效应来测量惯性参考系转动和加速度引入的相位差,来测量惯性系的转动和加速度,改变原子速度分别能实现灵敏度为 $1 \times 10^{-9} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ 和 $2 \times 10^{-12} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ 的陀螺仪以及 $1 \times 10^{-10} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $4 \times 10^{-14} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的加速度仪。超高精度的转动测量可以验证近地轨道的Lense-Thirring效应,这对于验证广义相对论相当有意义。Ramsey-Bordé型的原子干涉仪对频率敏感,可以用来精密测量精细结构常数,预计比地面测量精度要高2个数量级。

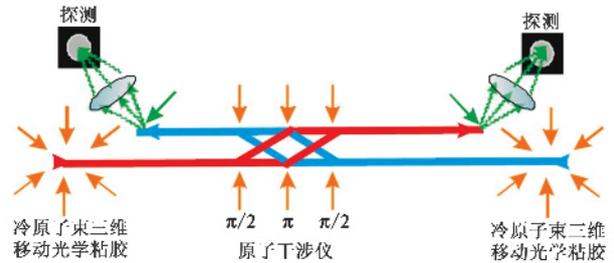


图3 HYPER卫星项目的原子干涉仪ASU装置示意图

3 冷原子钟及其应用研究

原子钟—原子时间频率标准在不知不觉中已深入到人类生活中的各个方面,时间尺度是人类一切生产活动和科技活动的基本条件。原子钟的基本原理如图4所示,以原子(分子、离子)的特定的受外部环境影响小的能级间跃迁频率作为参考频率,检测原子与微波作用后的跃迁几率,将微波频率(或

光频率)锁定在原子谱线上.在国际计量单位制中,时间单位秒即被定义为“ ^{133}Cs 原子基态超精细能级跃迁周期的 9 192 631 770 倍.”原子钟近期的发展得益于近年来相关技术的突破和对原子钟精度要求的不断提升.激光冷却原子技术的发展促使了原子喷泉钟的诞生,目前喷泉钟的准确度进入 10^{-16} 量级,是目前世界上实际运行的准确度最高的原子钟.光频梳及相关技术的发展使光频标的实现成为可能,它是目前最活跃的研究领域之一,光频标已经非常接近实用,预期的准确度在 10^{-17} 到 10^{-18} 量级.

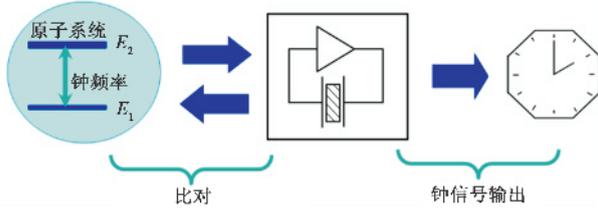


图4 原子钟的基本原理

微重力环境为空间钟研究提供了优异的工作环境,由于克服了重力的影响,冷原子与微波相互作用时间可大幅度增长.考虑到其他一些因素,原子与微波的相互作用时间选在 10s 量级,则谱线宽度在 0.1 Hz 量级,预期准确度达到或优于 10^{-16} 量级.表 2 给出传统钟、喷泉钟、空间钟的性能比较,可以看出,空间冷原子钟的性能将超过地面冷原子钟.

表 2 传统钟、喷泉钟、空间钟各种参数的比较

	限制	作用时间	谱线宽度	准确度
传统铯束管	原子热运动	100ms 量级	10—100Hz	最高 10^{-14}
喷泉钟	重力	1s 量级	1Hz 左右	10^{-15} 量级
空间冷原子钟	残余重力冷原子的热运动	10s 量级	0.1Hz 量级	预期达到 10^{-16} 量级

微重力环境下可发展两种类型的原子钟:一类为一级时间频率的基准钟(空间原子钟),追求最高的准确度,用于定义时间单位“秒”.另一类为二级星上原子钟(星上钟),追求高频率稳定度,用于定位导航和通信等各种高科技应用领域.

空间原子钟研究具有重要的科学价值,空间原子钟由于超高的频率准确度(不确定度),可重新定义时间单位“秒”.目前的时间计量系统为国际原子时(TAI)系统,它借助 GPS 卫星传递时频信号,与全世界各一级频标比对,将加权平均的结果作为世界时.由于大气扰动对其比对结果影响很大,目前 TAI 的比对精度也只能达到 10^{-13} 量级,如果借助于 10^{-16} 量级的空间原子钟平台,大气扰动对 TAI 比对的影响将显著降低,TAI 的时钟同步精度也将大幅度提高,也将提高国际原子时的比对精度.空间原子

钟还将用于验证广义相对论,这是科学界广泛关注的重大基础科学问题.

空间原子钟具有十分重要的实际应用价值,如用于导航定位、通信和众多应用技术领域.超高精度的空间原子钟可用于提高卫星定位系统钟的同步精度.以 GPS 为例,目前 GPS 星上钟属于二级频标,它需要一级频标校准.实际做法是,GPS 钟每次飞过地面基站时校准一次,从而实现其时钟同步.这种校准过程具有下列缺点:GPS 钟只有特定的时间窗口(飞跃基站上空)可以校准;GPS 钟的校准是天-地校准,由于受到大气的影晌,时钟同步精度不可能很高,在 10^{-13} 量级.如果用空间钟校准 GPS 钟,将克服上述缺点.由于基准钟和星上钟都在空间飞行,时间窗口大大延长,甚至可以实现准连续校准;其次空间钟与 GPS 钟的相互比对基本可以消除大气对同步信号的扰动,可以获得更高的 GPS 时钟同步精度(10^{-14} — 10^{-15}).时间同步精度的提高无疑将从根本上改变应用技术的面貌,因此具有非常重要的军事价值和商业价值.

由于空间钟的重要意义,美欧竞相展开了空间冷原子钟的研究,巴黎天文台 Salomon 小组主持研制的 PHARAO 计划(Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite)^[10],美国 NIST 的 Sullivan 小组主持研制的 PARCS 计划(Primary Atomic Reference Clock in Space)^[11],宾州大学 Gibble 小组主持研制的 RACE 计划(Rubidium Atomic Clock Experiment)^[12],见图 5,他们都立足于作为国际空间站(ISS)的载荷.其中 Salomon 小组一直走在该项研究的前列,他们在 1993 年就提出了研制空间冷原子钟 PHARAO 的设想,1994 年开始研制空间钟原理性样机,该样机于 1997 年在作抛物线飞行的飞机上成功完成了失重实验.同年,欧空局提出了 ACES(Atomic Clock Ensemble in Space)计划,它以 PHARAO 为基础,配合一台氢钟和一套时频传输链,计划在国际空间站上实现原子钟及信号传输.其最初计划是 2003 年发射,由于 ISS 种种变更,最近该项目调整到 2013 年.

目前欧空局支持的 PHARAO 原子钟已经研制成功^[13],正进行各种测试并等待发射.其主要技术指标为:质量 91 kg,体积 200 L,功耗 88 kW,秒稳 10^{-13} ,日稳 3×10^{-16} ,准确度 10^{-16} .图 6 为 PHARAO 的关键装置样品.

国内也已经开展空间原子钟的相关研究,在中国科学院方向性项目的支持下进行了用于空间的

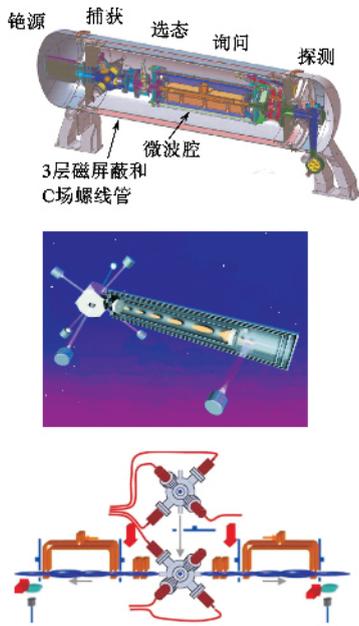


图5 国际空间站最初计划中的3台冷原子钟:PHARAO(上)、PARCS(中)、RACE(下)

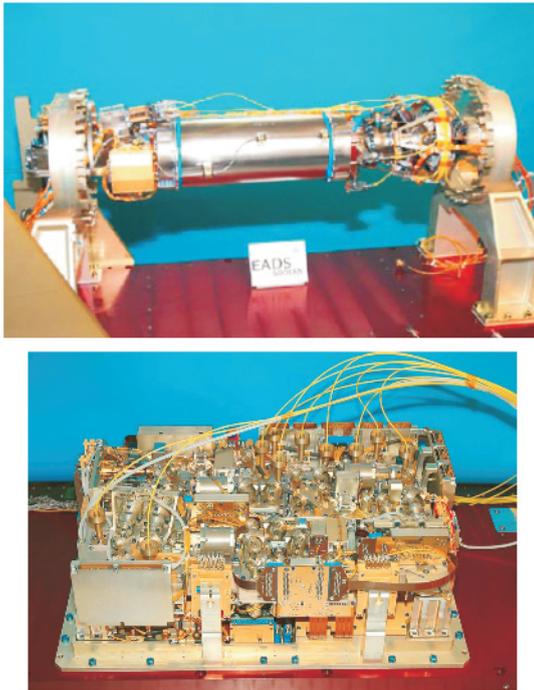


图6 空间钟 PHARAO 的物理系统(上)与光学系统(下)

^{87}Rb 原子钟的地面实验,建成了地面 ^{87}Rb 原子喷泉钟装置,观察到 Ramsey 干涉条纹.目前正进行空间原子钟实验模型的研制.

国际上星上原子钟的发展也十分迅速,一种利用相干粒子数囚禁的原子钟——相干微波激射器(CPT-Maser)有望用做星上原子钟^[14].CPT-Maser 利用两束等强度的频率为 ω_1 和 ω_2 激光束激发放置

在微波谐振腔内的 ^{87}Rb 原子气体,将原子的两个基态超精细能级 $F_m = 0$ 态与同一个激发态相耦合,形成 Λ 型结构.当 ω_1 和 ω_2 的频率差等于两个基态超精细能级 $F_m = 0$ 态的跃迁频率时,介质对光束透明,同时光束激发起一个宏观磁矩,并以超精细能级跃迁频率振动.原子的宏观磁矩与微波腔内的电磁场相互作用时,原子将发射频率稳定的电磁辐射,形成微波激射器(Maser).由于两激光束等强度,诱发两个基态的能级移动相等,故两能级的跃迁频率基本不变,因而无一阶光频移效应.目前,意大利 IEN 研究所研制的 CPT-Maser 达到 2×10^{-12} /秒和 2×10^{-14} /日的稳定度^[14].最近,他们又发展了脉冲光抽运原子钟(POP-原子钟),利用 Ramsey 干涉的方法探测 $0-0$ 跃迁的微波感生的自由弛豫振荡,获得了很好的结果^[15].这种原子钟应用于空间科学的潜力极大,除性能优异外,还具有体积小、重量轻的优点,适用于空间的各种应用.中国科学院上海光学精密机械研究所在院方向性项目的支持下,提出了相干存储原子钟方案,获得可喜的研究结果.同时开展了星上 POP 原子钟研究,已观察到 Ramsey 干涉条纹,POP 实验室装置的短期稳定度测试结果与国外报道的结果相当.

4 验证广义相对论的探索

爱因斯坦广义相对论是当今人们认识和解释物理世界的基石.它描述了自然界物体运动的规律:小到原子的运动,大到银河系天体的运动.它揭示了引力条件下电磁波传播的规律和描述整体宇宙的动力学.广义相对论和其他相关的更为普遍的理论均发展十分顺利,但这些理论都是经典的和不完善的理论,因为这些理论不包含量子效应^[16,18].尽管为了寻求隐藏在引力中的量子力学效应已做出了巨大的努力,实际上这些理论尚不可能以适当的方式包含量子力学效应,正确的理论应反映自然界基本力的统一.为了寻求一个完全解释引力的理论,能够描写引力与量子世界的关系,能够反应自然界五种基本力的统一,需要通过相对论的实验验证和探索,追求认识自然界,达到认识物理世界的目标.为此,实验验证广义相对论的研究是非常重要的基础性科研任务^[16].

一般条件下相对论效应十分微弱,很难精确测量,我们常是以低的测量精确度来了解大多数的效应.但是也有些相对论预言的效应是以相当高的精

度认识的. 例如 通过双星无线电波的发射证实引力波的存在(1993 诺贝尔奖), 测量精确度达 20 ppm 的水平确定了这个效应的存在. 1976 年利用火箭携带氢钟进行过引力时间膨胀的实验, 比较地面钟与火箭氢原子钟的时间差, 曾获得测量精确度为 70 ppm 的时间膨胀的效应. 但是, 为了达到验证广义相对论的目标, 需要更高的测量精确度. 因此, 高精度探测广义相对论效应是对科研人员的挑战. 欧空局计划于 2014 年发射飞行的冷原子钟(PHARAO) 和氢钟计划将改善引力红移测量的准确度 25 倍, 将基本物理常数随时间变化率的测量灵敏度提高 100 倍^[17].

近几年来, 冷原子物理、光学技术和量子光学的极为迅速的发展, 微波铯钟的准确度已达 2×10^{-16} , 光钟的准确度预计可达 10^{-18} . 因此, 在引力物理实验中可能以前所未有的 10^{-18} 准确度的水平验证广义相对论(引力红移测量), 比 PHARAO 计划要改善 104 倍^[18].

广义相对论验证就是测量广义相对论的重要预言: 引力场中的时间膨胀效应, 即测量由于引力产生的时间尺度的改变, 它表现为决定时间的独立运行的钟频率相对于远距离时钟频率的改变. 简单地说, 时钟离开物体越近, 走得越慢. 为了测量两个时钟的时差, 科学家建议发射高纬度椭圆轨道卫星, 因为高纬度的椭圆轨道卫星可提供近地点和远地点最大引力差的精确测量^[18]. 在星上携带高精度的 Cs 原子钟和光钟, 并和高精确度的微波地面 - 空间时间信号传递系统组成精确比对系统(包括星上原子钟之间、星上与地面原子钟之间和地面原子钟之间的精确比对系统), 高精度地比对各种状态下原子钟的时间差. 通过分析各种时钟间的长期精密测量的结果, 可用来解释和检验广义相对论, 寻找可能违反等效性原理的实验结果. 即在仪器的精度范围内确认和检验广义相对论, 并确认其他相关理论的正确性, 或检验理论与实验的偏差. 在能确认偏差的情况下, 将提供经典引力理论的适用边界和为寻求建立统一力的理论铺路^[18, 12].

国内学术界十分重视广义相对论的验证探索, 但尚无实际启动的用于验证相对论的科研项目. 在 2005 年纪念爱因斯坦 100 周年的香山会议上, 与会代表提出了很多各种建议. 中国科学院上海光学精密机械研究所提出利用移动微波腔、光梳和光频标组成的原子钟实验系统精密测量引力红移设想. 建议的基本物理思想是: 利用激光冷却获得 μK — pK

的在空间近于不动的超冷原子气体与移动的微波场相互作用, 测量两个坐标系的时钟频率差, 即测量不动坐标系和移动坐标系时钟的频率差. 由于光频标的频率准确度为 10^{-18} , 光频梳的频率传递精确度 10^{-19} , 因此, 可高精度地测量两个系统的频率红移效应^[19].

5 微重力环境下的玻色 - 爱因斯坦凝聚研究

玻色 - 爱因斯坦凝聚体(Bose-Einstein condensate, 以下缩写为 BEC) 是一种新的物态, 表征了宏观量的原子处于单一量子态. 1925 年, 爱因斯坦推广了玻色子全同粒子量子统计理论的物理图像, 指出当化学势接近零时, 宏观数量的原子处于单个量子态上, 已无法区分单个原子, 可用单一波函数来描述凝聚原子的量子态. 因此 BEC 是一个具有高度相干性的原子系综, 是一个独一无二的新介质^[20, 21]. 理论上, 实现 BEC 相变的临界条件是 $\rho = n(\lambda_{\text{dB}})^3 \geq 2.612$, 其中 ρ 为原子的相密度, n 为原子数密度, λ_{dB} 为德布罗意波长. 这个条件要求原子气体的温度极低, 而原子的密度必须很高, 因此是一个难度很高的物理学实验. 经过原子的激光冷却和囚禁技术的研究和发展, 1995 年美国科罗拉多大学首次在实验上获得了碱金属元素铷原子气体的玻色 - 爱因斯坦凝聚体^[22]. 现在, 玻色 - 爱因斯坦凝聚体已经被许多实验室作为一种模型系统来进行原子光学(如原子干涉、原子激光、非线性原子光学等), 多体问题(如超流、涡旋态、量子跃迁等) 和模拟凝聚态物理(光晶格、量子隧穿、Bloch 振荡等) 等研究, 已经取得了丰硕的研究成果. BEC 的研究还带动了费米简并气体、分子凝聚体和玻色 - 费米混合气体等研究方向.

那么, 既然在地基实验室里能获得 BEC 并进行量子简并气体的研究, 为什么还要在微重力环境下进行 BEC 的研究呢? 因为对于冷的量子气体的基础研究, 有以下几个理由表明无重力状态是非常重要的. 首先, 在微重力环境下不需要附加提升场来补偿重力, 因此实质上为绝热的降低囚禁势提供了可能性. 与此相关的是制备 fK 温度范围的原子系综成为可能. 相比较而言, 地基实验室里因重力导致的下垂限制了可能获得的最低温度. 进一步来讲, 在这些凝聚体里面, 超弱的长程力效应变得相当重要, 这种

效应保证了新型低能相变的发现. 其次, 微重力环境中的自由飞行时间和无干扰演化时间远远大于地基实验室, 原子在无重力状态下几乎不移动位置, 因此对冷原子的探测基本上都是在原位探测, 不需要移动探测器的位置. 无重力状态对于量子简并气体的混合体研究的另一个主要优点是, 不同质量的原子并没有处在不同的势场中, 因此可以在势阱中实现十分完美的重合.

世界上第一个在微重力环境下的 BEC 研究项目是欧洲的 QUANTUS 计划, 全称为 QUANTen Gase Unter Schwerelosigkeit^[31]. QUANTUS 的目标是在微重力环境下进行 BEC 和简并混合气体的研究, 是由德国的汉诺威大学量子光学研究所和不来梅大学应用空间技术和微重力中心(缩写为 ZARM)联合发起, 德国宇航中心资助的, 参与合作的单位还有汉堡大学激光物理研究所、柏林大学物理研究所、马普学会量子光学研究所和乌尔姆大学量子物理研究所. 如图 7 所示, QUANTUS 项目用来模拟微重力环境是不来梅落塔, 塔高 110 m, 自由落体时间为 4.7 s, 弹射器模式下可以延长至 9 s, 整个过程中微重力水平

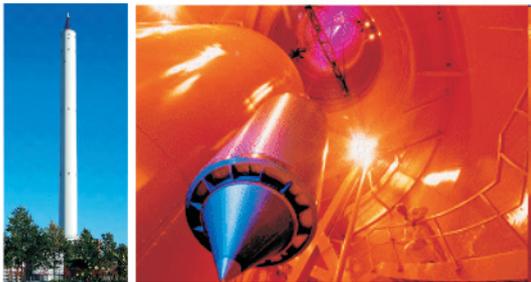


图 7 不来梅落塔外观和内部

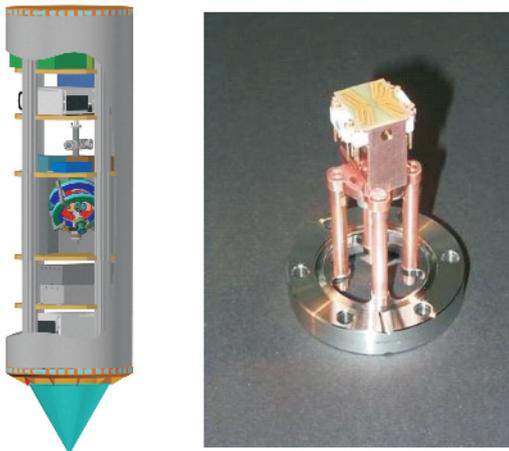


图 8 QUANTUS 装置示意图和原子芯片

达到 $10^{-6}g$ g 为重力加速度. 落塔实验对整个实验装置提出了高度机械稳定性、小型化和低功耗的要求, 此外还要求装置能经受 20—30g 的发射加速度和 40—50g 的落地冲击. QUANTUS 装置为圆柱形, 直径 60cm, 高 215cm, 载荷重量小于 230 kg, 功耗小于 1120 W. QUANTUS 装置选用了原子芯片的方案来获得 BEC, 见图 8. 原子芯片除了具有体积小、重

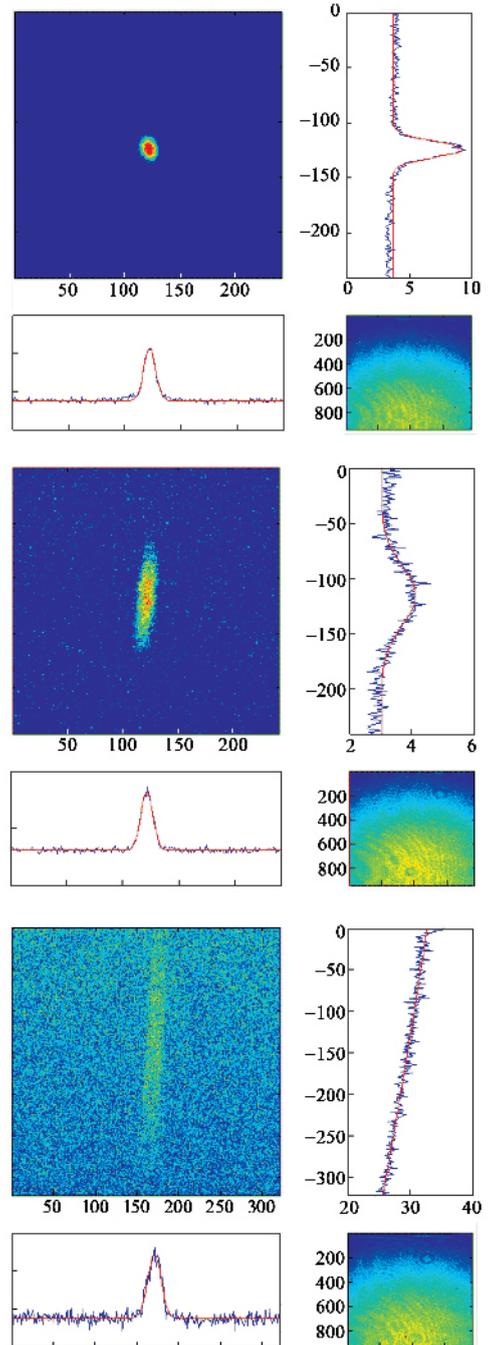


图 9 微重力环境下的超长自由飞行时间的玻色 - 爱因斯坦凝聚体, 由上到下的 BEC 自由飞行时间依次为 100 ms、500 ms 和 1000 ms

量轻、功耗小和高度稳定性的特点以外,一个更重要的优势是它的磁势阱频率可以达到几千赫兹到几十千赫兹,可以将最耗时的蒸发冷却过程从几十秒压缩到一秒,保证了在极短的微重力时间内能快速获得 BEC.

2007 年 11 月, QUANTUS 装置第一次在不来梅落塔上实现了⁸⁷Rb 原子气体的 BEC. 纯 BEC 的原子数为 8000 到 10000 个,从图 9 中可以看到, BEC 的自由飞行时间可以达到 1 s (对应于从垂直零速度自由落体 5 m). 还没有哪个地基实验室的 BEC 可以达到这么长的自由飞行时间,即使设计的实验装置可以让 BEC 自由飞行 5 m,恐怕也无法保证每次都探测到 BEC. 可预见的是,在空间微重力环境下,将允许更长的自由飞行时间,进而研究在地基实验室无法观察的自由演化过程.

QUANTUS 项目的进一步计划分别是进行 BEC 演化到零磁子能级态上的绝热过程研究、序列射频耦合输出的 BEC 干涉分析以及芯片表面的 BEC 量子反射研究等研究工作. QUANTUS 二代装置也已经在设计之中,其中除了用二维/三维磁光阱技术来增加磁光阱的装载率和用弹射器模式来增加无重力环境下的自由飞行时间外,还计划进行铷和钾双元素混合以及芯片上更多原子数的研究.

中国科学院上海光学精密机械研究所于 2002 年 3 月获得了⁸⁷Rb 稀薄气体中的玻色-爱因斯坦凝聚体^[23]后,即开始了原子芯片研究. 与浙江大学光学研究所合作研制成功了国内第一片 H 型原子芯片,于 2006 年在芯片磁阱中捕获到冷原子^[24]. 利用芯片双 U 型阱进行了超冷原子团的参量冷却、导引和分束^[25, 26]. 研究了 Z 型阱中的蒸发冷却,为微重力条件下进行量子相变研究做好了准备.

参 考 文 献

- [1] Vanier J, Audoin C. *The quantum Physics of Atomic Frequency Standards*. Bristol, England: Adam - Hilger, 1989
- [2] Bize S, Luiten A, Salomon C *et al.* *J. Phys. B*, 2005, 38 : S449
- [3] <http://www.iqo.uni-hannover.de/quantus/>
- [4] Kasevich M, Chu S. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67 : 181
- [5] Kasevich M, Chu S. *Appl. Phys. B*, 1992, 54 : 321
- [6] Wang Y Z, Xu X X, Wang W B *et al.* A Doppler atomic interferometer. In: *Laser Spectroscopy XIII International Conference*. Singapore: World Scientific, 1997. 242
- [7] Gustavson T L, Landragin A, Kasevich M A. *Classical and Quantum Gravity*, 2000, 17 : 2385
- [8] Berman P. *Atom Interferometry*. New York: Academic Press, 1997
- [9] <http://sci.esa.int/home/hyper/index.cfm>
- [10] Bize S, Laurent P, Abgrall M *et al.* *C. R. Physique*, 2004, 5 : 829
- [11] Sullivan D B, Ashby N, Donley E A *et al.* *Advances in Space Research*, 2005, 36 : 107
- [12] Lämmerzahl C, Ahlers G, Ashby N *et al.* *General Relativity and Gravitation*, 2004, 36 : 615
- [13] Laurent P, Abgrall M, Jentsch C *et al.* *Appl. Phys. B*, 2006, 84 : 683
- [14] Godone A, Levi F, Micalizio S. *Phys. Rev. A*, 2002, 65 : 033802
- [15] Godone A, Micalizio S, Levi F. *Phys. Rev. A*, 2004, 70 : 023409
- [16] Will C M. *Living Rev. Relativity*, 2006, 9 : 3
- [17] Wolf P, Chapelet F, Bize S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96 : 060801
- [18] Schiller S, Tino G, Gill P, Salomon C. Proposal of "Einstein Gravity Explorer", 2007, website: www.exphy.uni-duesseldorf.de/optical_clock/EGE%20Proposal.pdf
- [19] 王育竹. 利用高精度原子钟测量引力红移. 纪念爱因斯坦 100 周年 2005 年香山会议, 北京 [Wang Y Z. Gravitational redshift measurement by high precision atomic clocks. one hundred anniversary of A. Einstein on meeting of Xiangshan, Beijing. 2005 (in Chinese)]
- [20] Einstein A. *Sitzber Kgl Preuss Akad Wiss*, 1924 : 261
- [21] Einstein A. *Sitzber Kgl Preuss Akad Wiss*, 1925 : 3
- [22] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R *et al.* *Science*, 1995, 269 : 198
- [23] Wang Y Z, Zhou S Y, Long Q *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2003, 20 : 799
- [24] Li X L, Ke M, Tang J Y *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2005, 22 : 2526.
- [25] Yan B, Li X L, Ke M *et al.* *Chinese Physics*, 2008, 17 : 1674
- [26] Ke M, Yan B, Li X L *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2008, 25 : 907