等效原理空间实验检验*

高 芬　周泽兵†

（华中科技大学物理学院　武汉　430074）

摘　要　等效原理地面实验检验已经达到了 10^{-13}，为了进一步提高实验精度，寻找新的相互作用和检验引力理论，人们提出了一系列更高精度等效原理检验的卫星计划. 文章主要概述了等效原理空间检验的原理、发展历史和发展现状，并对进一步空间等效原理检验进行了简要展望.

关键词　引力与相对论，等效原理检验，综述，空间实验

Experimental tests of the equivalence principle in space

GAO　Fen　　ZHOU Ze-Bing†

(*School of Physics*, *Huazhong University of Science and Technology*, *Wuhan* 430074, *China*)

Abstract　The equivalence principle has been tested on ground at the level of 10^{-13}. To improve the precision, some missions to test the equivalence principle in space have been proposed, which aim to search for new interactions or to test theories of gravitation. The principle of the tests in space, their past development and the status of recently proposed missions are summarized. Future prospects are reviewed.

Keywords　gravitation and relativity, test of equivalence principle, review, experiment in space

1　引言

等效原理分为弱等效原理、强等效原理和甚强等效原理[1]. 弱等效原理可以表述为：在引力场中自由降落的物体，其运动与结构和组成无关. 它可以由惯性质量 m_i 与引力质量 m_g 相等推演出来. 惯性质量是在牛顿第二定律中引入的，其大小表征了物体保持原来状态不变的能力. 引力质量是在牛顿万有引力定律中引入的，其大小表征了物体吸引或被吸引的能力. 1907 年，爱因斯坦对弱等效原理进行推广，提出了强等效原理，也称为爱因斯坦等效原理，作为广义相对论的基本假设之一[2]. 强等效原理可以表述为：在引力场中的任何位置和任何时间都能建立一个局部惯性系，在其中一切物理定律与没有引力场时的惯性系中的形式相同. 它包含弱等效原理，局部洛伦兹不变性和局部位置不变性. 局部洛伦兹不变性是指局部自由降落坐标系中的任何非引力实验的结果与坐标系的降落速度无关. 局部位置不变性是指上述实验的结果与在空间中的位置无关. 甚强等效原理在强等效原理的基础上把引力相互作用也包含在其中，即引力也不会造成等效原理的破坏.

等效原理检验的起源可以追溯到伽利略比萨斜塔实验，两个重量相差悬殊的物体从塔顶同时自由下落后同时达到地面（空气阻力相对物体的重量忽略不计）. 此实验现象是弱等效原理的直接表现. 牛顿第一个洞察到这种等效性的内在含义，他意识到物体组分及重量的不同可能会破坏它. 为了检验这种等效性，1680 年牛顿用单摆进行了实验：两个摆长相同的单摆，其末端悬一个木盒，其中一个木盒每次放入不同材料的物质，使这两个单摆同时开始摆

*　国家自然科学基金（批准号：10675047）资助项目
2009－01－17 收到

†　通讯联系人. Email：zhouzb@mail.hust.edu.cn

动，观测它们的摆动周期. 在 10^{-3} 的精度上没有观测到周期的不同，这说明在此精度范围内没有检测到弱等效原理的破坏.

19 世纪末和 20 世纪初，Eötvös 及其助手利用精密扭秤对等效原理进行了实验检验，检验精度达到了 10^{-10}. 其原理为：把两个不同材料的物体悬挂在扭秤的两端，两个物体都会受到地球引力和地球自转产生的惯性力；如果引力质量与惯性质量之比不是一个常数，那么在扭秤平面内就会有一个力矩作用在扭臂上，使扭秤发生偏转；通过测量扭秤偏转的角度即可以给出实验检验精度. 后来，Dicke，Braginsky，Adelberger 等人进一步发展了该方法，将等效原理检验精度提高到目前的 10^{-13}[3]. 除自由落体、单摆和扭秤实验外，人们还利用激光月地测距的方法来检验等效原理. 如果地球和月球在太阳引力场中的自由落体的加速度不同，月球与地球之间的距离会有相应的扰动. Williams 等人对月地测距的数据进行了分析，在 10^{-13} 的精度上也没有发现等效原理破坏[4].

为了统一四种基本相互作用力，人们提出了引力规范理论、超弦理论以及其他高维引力理论等，这些理论预言了新的相互作用力，其中包含了使等效原理在 10^{-13} 到 10^{-24} 精度上破坏的相互作用力[5]. 因此，物理学的发展要求在更高精度上检验等效原理的正确性. 地面检验等效原理的实验精度受到了地球引力梯度和地球地脉振动噪声的限制. 因此，人们将更高精度等效原理的检验方向瞄准在利用航天器来开展实验检验.

2 空间等效原理检验的原理和优点

对于空间检验等效原理而言，通常用两个检验质量在引力场中的加速度差的相对变化率来量度等效原理破坏的程度. 空间等效原理的检验原理如图 1 所示，两个同心检验质量位于航天器中心（航天器没有画出），航天器在无拖曳控制下跟随检验质量一起运动. 实验初始时刻，两个检验质量位于轨道上的同一个位置，并具有相同的速度，在地球引力作用下作自由落体运动. 如果等效原理成立，两个检验质量保持相对静止并具有相同的运动轨道，否则存在相对加速度，运动轨道不再相同. 因此测量两个物体的相对运动便可以判断等效原理是否破坏或者测量其破坏的程度.

一些理论模型指出[6]，等效原理破坏程度与材料的重子数、轻子数、原子内部相互作用能参数有关. 为了检验等效原理和寻找这些模型预计可能的相互作用，在选择检验质量的材料时，尽可能选择重子数、轻子数、原子内部相互作用能差异越大的检验质量，同时考虑其加工特性、热稳定性、磁特性等. 综合考虑后，空间检验等效原理实验中检验质量材料往往选用铂、钛和铍.

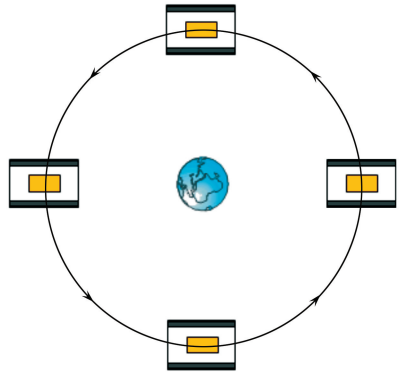

图 1 空间检验等效原理的实验原理示意图

在地面检验等效原理实验中，地球的地脉振动噪声和引力梯度效应是主要的噪声干扰项. 而在空间检验等效原理实验中，避免了地脉振动噪声，尽管地球的引力梯度效应减小了，但仍然还是主要的噪声干扰项. 因此在实验中，首先，两个检验质量的质心尽量保持重合，一般需要控制在纳米水平；其次，当两个检验质量不能当质点处理时，必须考虑其形状和尺寸的影响，要求其受到的引力差要尽可能的小. 理论上，检验质量最好设计为球形，但考虑到实际实验中的测量和控制需求，其形状大多设计为圆筒形.

如果两个作为质点考虑的检验质量完全不加以控制，只对它们的相对加速度进行测量，一旦它们有相对运动，在地球引力场中的位置不再重合，引力梯度效应会使它们继续分离，导致引力梯度影响进一步增加. 为了抑制引力梯度的影响，空间等效原理检验往往采用控制模式，即通过施加反馈控制力将两个检验质量维持在各自平衡位置，保持二者的相对位置不动，且尽可能使得二者质心重合. 此时，如果两个检验质量落向引力场的加速度不一样，则施加在两个检验质量上的反馈控制力大小也不一样. 因此，对于空间等效原理检验而言，通常是比较施加在两个检验质量上的控制力之差来量度等效原理破坏的程度. 当航天器保持恒星指向时，如图 1 所示，检验质量相对惯性空间指向不变，此时等效原理破坏

信号以轨道频率周期性地变化，一般约为 0.2mHz. 为了区分轨道频率处的信号与噪声，人们进一步提出调整航天器的姿态，使其在轨道平面内以一定的频率自转，从而改变等效原理破坏信号的频率，此时等效原理破坏信号的频率为轨道频率与自转频率之和. 因此，当航天器的轨道高度和姿态参数确定后，等效原理破坏信号的频率和相位也确定，这样有利于信号提取.

概括而言，利用航天器开展等效原理空间检验的优点有：(1)信号大，对于地球轨道航天器而言，检验质量落向地球重力场的加速度与在地球表面自由落体的引力加速度相差不大；(2)环境扰动小，避免了地脉振动的影响；(3)实验时间长，便于信号累积；(4)已知信号频率和相位，便于信号提取.

实验的噪声来源于两部分：一部分是检验质量受到的残余扰动力差；另一部分来自于检验质量相对位移的测量噪声. 为了保证空间等效原理的检验精度，要求：(1)检验质量受到的残余扰动力之差尽可能小；(2)检验质量相对位移传感的噪声尽可能小. 为了获得低残余扰动力，必须采取无拖曳航天器，为检验质量提供安静低噪声的平台. 另外，对航天器温度、磁场、气压等提出相应要求，人们甚至考虑让实验装置在低温条件下工作，以降低环境温度的影响. 无拖曳控制技术是指用微推进器来补偿航天器受到的非保守力，使航天器跟随检验质量一起运动，提供一个能让检验质量成为完全自由落体的实验环境. 为了满足空间等效原理实验检验对位移传感的要求，人们已经发展了一些高精度位移传感技术，例如超导量子干涉技术、电容位移传感技术和光学测量技术.

3 空间等效原理检验的发展历史和现状

由于空间检验等效原理的潜在灵敏度，国际上一些研究机构提出了一系列的空间计划，如表 1 所示，目标是在更高精度上检验等效原理. 其中，STEP(satellite test of the equivalence principle)[7]计划的合作范围最广，提出的时间最早；MICROSCOPE(MICRO satellite with drag control for the observation of principle of equivalence)[8]计划可能最早实现.

表 1 检验等效原理的空间实验计划*

计划	提出时间	预期检验精度	提出机构
STEP	1972	10^{-18}	斯坦福大学
Mini-STEP[9]	1995	10^{-18}	斯坦福大学/JPL
MICROSCOPE	1999	10^{-15}	CNES/ONERA
GG(GALILEO GALILEI)[10]	1993	10^{-17}	意大利比萨大学
Eötvös[11]	1994	10^{-17}	欧洲/美国

* CNES 为法国空间局；ONERA 为法国宇航研究院；JPL 为美国喷气式推进系统实验室

STEP 计划(如图 2 所示)最先是由斯坦福大学的 P. W. Worden 等人于 1971 开始研究，直到 1989 年 11 月才作为美国国家航空航天局(NASA)和欧洲航天局(ESA)的合作项目提交给 ESA 参与地平线计划第二期中型航天器项目的竞选. 整个计划科学目标包括六部分：等效原理检验、地球重力场测量、超高层大气层研究、寻找自旋－自旋相互作用、检验反平方定律和测量万有引力常数 G. 其中前三项是由 NASA 提出的，后三项是由 ESA 补充加入的. 其中等效原理检验实验是主要的，另外五项实验是附带的. 检验等效原理的实验中共包含六对检验质量，其基本形状为圆筒形；每对检验质量组成一个差分加速度计，NASA 和 ESA 各提供三对. 实验的关键技术包括超导量子干涉仪、超导磁悬浮、电容位移传感、静电控制、紫外放电和无拖曳控制. 检验质量表面镀了超导层，其两端和侧面都有线圈；当检验质量偏离平衡位置后，相应方向上的线圈产生感应电流，其大小与检验质量的位移量成正比；通过超导量子干涉仪测量感应电流的大小，从而得到检验质量的位移量. 同时利用超导磁悬浮技术，即利用检验质量与线圈之间的电磁力，对检验质量进行控制，使其保持在平衡位置. 除采用上面的传感和控制方式外，STEP 计划中还采用了电容位移传感和静电控制技术对检验质量进行初步的传感和控制. 紫外放电技术用来管理检验质量上的电荷，以减小环境电磁场对检验质量的扰动力. STEP 计划中最重要的一点是采用低温技术，因为实现超导和降低环境噪声都需要低温条件，为此整个实验的核心载荷都安装在一个大的液氦容器中，温度预计为 2K 左右.

STEP 计划参与地平线计划第二期中型航天器项目竞选失败后，1993 年又被提交给 ESA 参与地平线计划第三期中型航天器项目的竞选. 但这次仅作为欧洲的项目，NASA 不参与，其科学目标是，在地平线计划第二期中型航天器项目的基础上，去掉

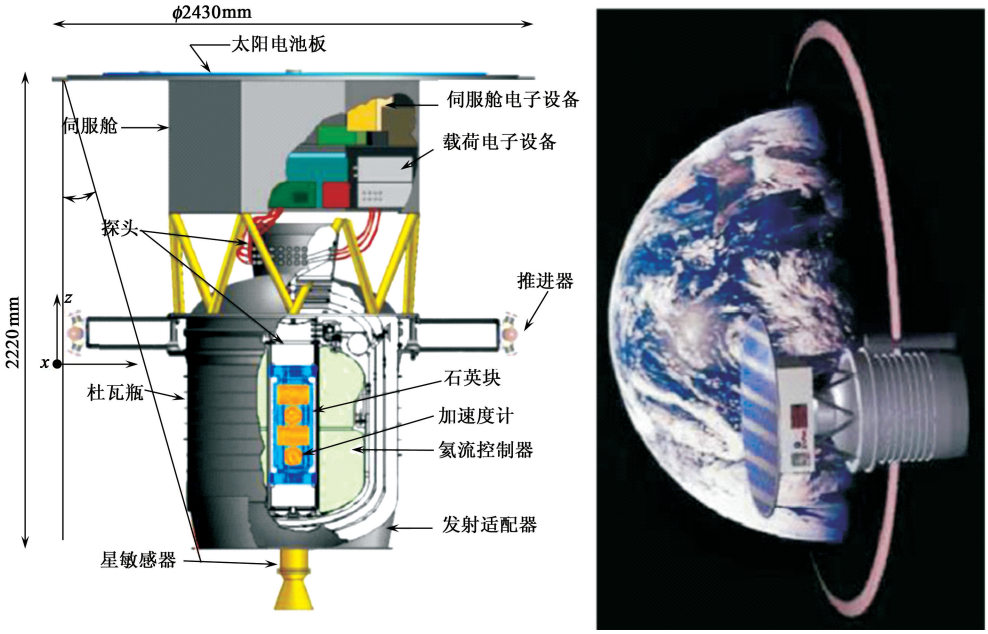

图 2　STEP 计划的航天器及其关键载荷示意图(图片来源文献[7])

了检验反平方定律和测量万有引力常数 G. ESA 在对 STEP 计划进行地平线第三期中型航天器项目评选的同时,NASA 和 CNES 同时也对 STEP 进行了研究,分别提出了各自的 STEP 缩减版. NASA 首先提出了 QuickSTEP 计划,后因为经费问题放弃,改为耗资最小的 Mini-STEP 计划. QuickSTEP 计划包含等效原理检验和地球重力场测量. Mini-STEP 计划则只包含等效原理检验实验. Mini-STEP 计划中有四对检验质量,由四种不同的材料做成. 外部检验质量的材料选为钛、钡、硅和铍,内部检验质量为铂－铱合金. 实验原理与所采用的关键技术与 STEP 计划一样. 为了达到预期检验精度,超导量子干涉仪的测量精度必须在四个轨道积分时间内达到 10^{-15} m,无拖曳控制水平预期需要在全测量频带内达到 3×10^{-14} m/s^2. CNES 先提出 GeoSTEP (geodesy experiment in orbit and satellite test of the equivalence principle)计划,后缩减为MidiSTEP 计划,最后改为 GEOSTEP(gravitation experiment in Earth－Orbiting Satellite to test the equivalence principle)计划. GeoSTEP 计划包含等效原理检验和地球重力场测量. MidiSTEP 计划则取消了地球重力场测量,且等效原理检验也改在室温环境下进行. GEOSTEP 计划只改变了 MidiSTEP 计划中的实验温度,从室温改回到低温. GEOSTEP 计划的预期精度为 10^{-17},检验质量共有四对,其材料选为铍、钛和铂. 关键技术主要包括低温、电容位移传感、静电控制和无拖曳控制.

NASA 和 CNES 都在 1996 年 4 月底完成了各自计划的研究. 同时,STEP 没能被地平线第三期中型航天器计划选中. ESA 的空间科学顾问委员会最终选择 Mini-STEP 计划作为 NASA/ESA 的合作项目,现在此计划还在研究中.

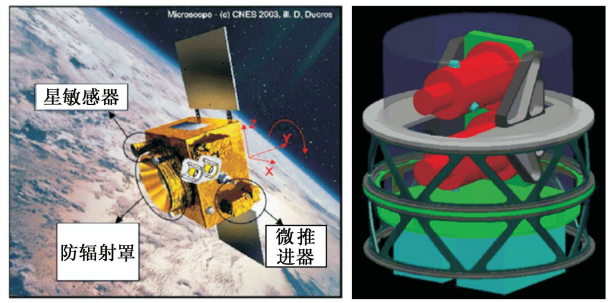

图 3　MICROSCOPE 计划的航天器及其关键载荷示意图(图片来源文献[8])

虽然 STEP 计划提出后被一再推迟和修改,但科学家们对空间检验等效原理的兴趣一直没减. ONERA 于 1999 年提出了 MICROSCOPE 计划(如图 3 所示). 目前此计划已被选为 CNES 的小航天器计划,选用成熟的 Myriad 航天器,发射日期由于各种原因一再被推迟,目前项目网站(http://smsc.cnes.fr/MICROSCOPE/)公布的日期为 2011 或者 2012 年. MICROSCOPE 计划只用来检验等效原理,有两对检验质量,材料分别为铂和钛,铂和铂,形状都为圆筒形. 相同材料的一对检验质量用来区分

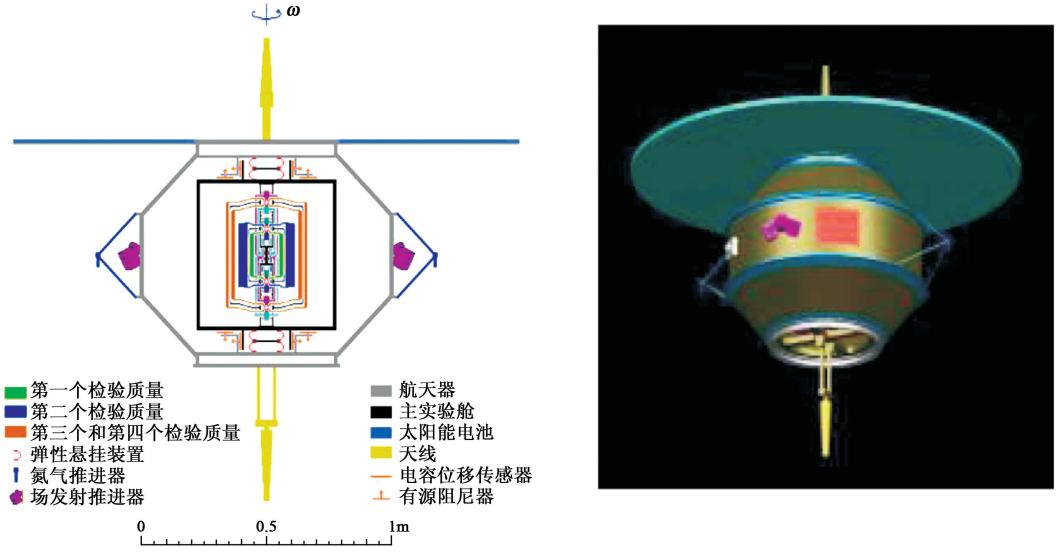

图 4　GG 计划的航天器和关键载荷示意图(图片来源文献[10])

测量信号中的其他非等效原理破坏信号,如系统误差等.实验在室温条件下进行,主要的关键技术是差分静电控制加速度计和无拖曳控制.差分静电控制加速度计包括电容位移传感、静电力控制、电荷管理.电容位移传感技术用来测量检验质量的位移,报道显示已经实现了 $30\mathrm{pm/Hz^{1/2}}$ 的测量水平.静电力控制是指用静电力来控制检验质量,其预期的控制水平达到 $5\times10^{-13}\mathrm{N/Hz^{1/2}}$.为了减少环境电磁场与带电检验质量的相互作用的扰动力,实验中采取 ONERA 成熟的金丝放电来抑制检验质量上电荷的涨落.这些技术已经在 2000 年发射的重力测量卫星 CHAMP(CHAllenging Minisatellite Payload)和 2002 年发射的重力测量卫星 GRACE(gravity recovery and climate experiment)中得到很好检验.不过相对卫星重力测量应用而言,等效原理检验对相应技术的要求更高.MICROSCOPE 计划中,这些关键技术目前已进入地面测试和标定阶段.实验检验精度主要受温度效应、金丝阻尼、金丝寄生刚度和电容位移传感水平的限制,项目预计在 10^{-15} 精度上检验等效原理,测量的信号频率在 $10^{-3}\mathrm{Hz}$ 附近.

GG 计划是意大利科学家提出的,只检验等效原理.其测量原理与 STEP 和 MICROSCOPE 有些差别.STEP 和 MICROSCOPE 计划测量的是圆柱型检验质量沿对称轴方向的相对加速度,而 GG 计划测量的是检验质量沿径向的相对加速度.GG 计划中有两对同轴的检验质量,其对称轴的方向垂直轨道平面(如图 4 所示).实验中航天器以一定的角速度绕对称轴旋转,目前旋转的频率预定为 2Hz,两个检验质量之间有弱弹簧连接.如果等效原理破坏,两个检验质量的对称轴不再重合,沿径向有相对位移,此位移由电容位移传感器来测量,以此作为等效原理破坏信号.实验中等效原理破坏信号的频率为航天器旋转频率与轨道频率之和,约为 2Hz.在此高频率处,低频噪声被大大抑制,这也是 GG 计划的最大优点.GG 计划的实验温度为室温,目前此计划处于地面实验研究阶段.

此外,国际上还提出了 Eötvös 等其他空间计划,但目前这些计划还都只是理论研究阶段.Eötvös 计划拟采用的关键技术与 MICROSCOPE 计划相似,不同的是 Eötvös 计划增加了光学测量技术,用来对实验装置与航天器之间的相对位移进行传感测量.

在上面提到的空间计划中,STEP 计划获得了多年预先研究资助,因为经费和技术难度等问题,2005 年,NASA 和 ESA 停止了对其财政资助.MICROSCOPE 卫星计划获得法国空间项目的资助,预期很快能发射,而其他的计划则只得到了小额的理论研究和地面实验资助,飞行计划都还没有得到立项资助.另外,这些空间计划都是对普通的不同成分的宏观物体进行等效原理的检验.除此之外,国内学者提出开展宏观旋转物体等效原理空间检验的想法[1].

4　讨论与展望

利用航天器实验平台开展空间检验是等效原理检验的发展趋势.人们已经提出了很多空间等效原

理计划,大部分计划还处于概念研究和关键技术攻关阶段.目前进展最好的是 MICROSCOPE 计划,主要得益于其主要关键技术静电悬浮加速度计已经在卫星重力计划中得到验证,另外该项目利用成熟的小卫星平台,且投资少,这些优势使得该计划有望成为第一个空间等效原理检验计划.不过,MICROSCOPE 利用金丝来进行检验质量电荷管理,限制了实验检验精度的进一步提高.

在进一步的空间等效原理检验实验中,可以采用已经在引力探测器 B 计划(简称为 GP-B 计划,其目的是检验爱因斯坦广义相对论预言的测地线进动和坐标系拖曳效应,该航天器已于 2004 年发射升空)中应用过的紫外放电来代替金丝进行电荷管理;采用低温、磁屏蔽、电屏蔽等技术进一步减少环境噪声的干扰;采用激光外差干涉技术代替电容位移传感技术,避免电容极板与检验质量之间的静电耦合噪声.此外,对于空间等效原理检验而言,高稳定航天器平台技术尤为关键,基于高精度惯性传感器和微推进器的无拖曳控制技术是必不可少的.毫无疑问,随着关键技术的不断突破,人类会迎来空间等效原理检验以及空间引力波探测的关键时期.

参考文献

[1] 张元仲.物理,2008,37:346[Zhang Y Z, Wuli(Physics), 2008, 37: 346 (in Chinese)]

[2] Einstein A. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, 1907, 4: 411

[3] Schlamminger S, Choi K-Y, Wagner T A *et al*. Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 041101

[4] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H. Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 261101

[5] Fayet P. Advances in Space Research, 2003, 13: 1289

[6] Blaser J P, Damour T. Advances in Space Research, 2003, 32: 1335

[7] Blaser J P. STEP report on the phase a study, SCI (93) 4, 1993; Sumner T J, Anderson J, Blaser J P *et al*. Advances in Space Research, 2007, 39: 254

[8] Touboul P, Rodrigues M. Classical Quantum Grav, 2001, 18:2487; Guiu E, Rodrigued M, Touboul P *et al*. Advances in Space Research, 2007, 39: 315

[9] Swanson P N, Everitt C W F, Lee M C. Advances in Space Research, 2003, 32: 1373

[10] Nobili A A. "Galileo – Galilei"(GG) Phase A Study Report, ASI, 1998; Nobili A M, Bramanti D, Comandi G L *et al*. Phys. Lett. A, 2003, 318: 172

[11] Blaser J P, Lockerbie N, Paik H J *et al*. Classical Quantum Gravity, 1996, 13: A203