

激光干涉仪引力波探测器

陈丽清 (华东师范大学物理与电子科学学院 上海 200241)

摘 要 本文简要介绍引力波特性和其实验验证的重要性,并从量子力学原理出发介绍了激光干涉仪测量引力波的原理、测量灵敏度极限、实验参数计算和探测器装置设计以及采用量子技术提升测量极限,最后对引力波探测器未来发展进行了展望。

关键词 引力波 激光干涉 相位测量极限 量子增强

文章编号 1002-0748(2022)11-0002

中图分类号 G633·7

文献标识码 B

1 引力波

1916 年,爱因斯坦基于广义相对论预言了引力波^[1],认为引力是一种因质量存在而导致的时空弯曲效应,时空曲率与物体质量直接相关,质量越大,时空曲率越大。进一步,当物体在时空中运动时,曲率会随着发生变化,曲率变化直接对应物体的位置变化。在某些特定环境之下,当物体做加速运动时,产生的时空曲率变化能够以波的形式向外以光速传播,这种传播的波被称之为引力波。换句话说,引力波是物质和能量的剧烈运动和变化所产生的波。例如相互绕转的双中子星系统,当它们绕转合并时会产生强烈的时空弯曲涟漪,通过引力波的形式从辐射源(双中子星系统)向外传输能量。

从物理学研究的角度,爱因斯坦的广义相对论引入了物体相互作用的传播速度有限,提出引力波的概念。而牛顿的经典引力理论中假设物质的相互作用传播速度是无限的,不存在引力波,所以引力波实验测量是对爱因斯坦和牛顿关于引力物理起源的直接验证。从宇宙天文学发展的角度,引力波能够穿透电磁波不能穿透的地方,所以引力波的测量和分析能够提供遥远宇宙中黑洞和其他奇异天体的信息,甚至是极早期宇宙的信息,这些信息大多无法被光学望远镜和射电望远镜所观测到,所以引力波测量将给我们带来宇宙运转的新认识。

2 引力波探测器

如何在地球上对引力波进行测量?首先我们需要了解到地球的引力波特性和,然后才能有针对性

地设计引力波探测器,继而实现对引力波的捕捉。根据理论计算,当天体系统向外辐射引力波,引力波所到之处,物体的长度或者两个物体之间距离会周期性伸缩,即发生应变效应(strain),应变效应的频率就是引力波频率,应变效应幅度用长度变化量 ΔL 与平均长度 L_0 的比值($h_g = \Delta L / L_0$)来表征,应变效应幅度与物体离引力波源的距离成反比。因此,在引力波源附近,时空曲率非常大,物体长度扭曲能直接被观测到,而通常引力波源离地球非常远,当引力波传播到地球并穿过地球时,引力波造成的物体长度变化非常小, $\Delta L / L_0$ 小于 1.0×10^{-21} 。以实物为例,一个一千米长的物体,引力波所造成的长度变化为 1.0×10^{-18} ,比原子尺寸小亿倍、比原子核尺寸小万倍。这对引力波探测器灵敏度提出了极高的要求。

为了测量引力波,科学家相继提出多种引力波探测器方案,实际搭建出来用于测量的有两大类,分别为美国物理学家韦伯主导的共振棒引力波探测器^[2]和以 LIGO 为典型代表的激光干涉引力波探测器^[3]。两者相比较,激光干涉引力波探测器的探测频率更宽、探测灵敏度更高。21 世纪初,共振棒引力波探测器陆续关闭,而激光干涉引力波探测器蓬勃发展,正在运行的位于地球表面的激光干涉引力波探测器有美国建造的臂长为 4 km 的 LIGO^[4]、意大利和法国联合建造的臂长为 3 km 的 VIRGO^[5]、德国和英国联合建造的臂长为 600 m 的 GEO600^[6]、日本国家天文台建造的臂长为 300 m 的 TAMA300^[7] 等,最佳测量频段为百赫兹量级,还有正在筹划建设的天基引力波探测器^[8],如欧洲航天局的 eLISA 计划^[9],中国科学院的太极计划和中山大学的天琴计

划^[10]等,最佳测量频段为赫兹以下。根据理论预期可能的引力波源包括致密双星系统、白矮星、中子星和黑洞等,这些天体发出的引力波幅度和频率都各不相同。上述的多个探测器将形成引力波测量网络,对各个频段引力波进行测量,为天文学家提供一个全新的观察宇宙现象的窗口。

3 激光干涉引力波探测装置

用激光干涉仪测量引力波的想法是苏联科学家(M. Gertsenshtein 和 V. Pustovoit)和美国科学家(R. Weiss)于 1963 年和 1970 年先后提出,并且 R. Weiss 进行了初步实验装置设计。随后,基于理论方案,R. Deever 在美国国家基金委和加州理工学院的支持下,搭建了激光干涉引力波探测的实验样机(臂长 40 m),并引进法布里—珀罗腔来改进干涉测量精度,20 世纪 90 年代样机灵敏度达到 10^{-18} m,但是依然达不到引力波测量要求。目前最灵敏的引力波探测器是美国麻省理工学院和加州理工学院联合研发的 LIGO,由两个探测器组成,一个在华盛顿州汉福德(如图 1 所示),另一个在路易斯安那州利文斯顿,均于 1999 年完成建造,其探测精度可以达到 $h_g = 1.0 \times 10^{-22}$ 。经过近二十年的仪器优化和调试^[11],终于在 2015 年 9 月 14 日,首次探测到了来自于双黑洞合并的引力波信号,证实了爱因斯坦的引力波预言^[13]。根据理论推算,辐射引力波的双黑洞分别比太阳的质量大 29 倍和 36 倍,辐射发生在近 13 亿年前。一年后,加州理工学院的天体物理学家 Kip Thorne 和 Barry Barish 以及麻省理工学院的 Rainer Weiss 共同获得了诺贝尔物理学奖,以表彰他们在引力波检测领域的开拓性工作。随后 LIGO 多次探测到引力波信号,2020 年 1 月,探测到了第二次中子星粉碎信号,辐射引力波波源的天体质量为太阳的 3.4 倍。随后又发现两个黑洞合并的信号,黑洞质量分别是太阳的 66 倍和 85 倍。

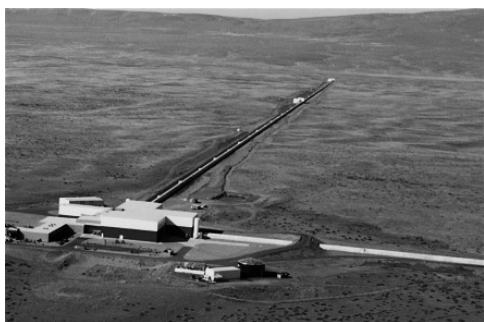


图 1 华盛顿州汉福德的 LIGO

激光干涉引力波探测器基本原理如图 2 所示,激光器发出一束单色的、频率稳定、相干时间长的激光,在光学分束器上分为两束强度相等的激光,构成干涉仪的两条干涉臂,相互垂直向两侧延伸传播,干涉臂的末端各悬挂一面反射镜。两束激光被各自的反射镜反射,并沿原路回到光学分束器。如果没有引力波影响,理想情况下,两条干涉臂激光所走的路程均为 L_0 。当引力波通过干涉仪时,会改变其中一面或两面镜子的位置,继而影响激光回到光学分束器的路程长度。最终两个激光干涉臂回到光学分束器时,引力波带来光程差 ΔL ,其对应的相位差 $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L$ (λ 为激光波长)。返回的两束激光在光学分束器上发生干涉现象,最后干涉光场到达光电探测器,其输出强度正比于干涉光场强度,而干涉光场强度取决于相位差 $I = I_0(1 - \cos \Delta\varphi)$ 。当没有引力波造成的 $\Delta\varphi$,光电探测器上光强近乎为零,当引力波来临造成两个干涉臂之间有光程差以及相位差时,光电探测器感受到相应的光强变化,通过干涉光场的强度变化,我们就能够得到引力波引起的相位差和路程差,继而推测出引力波信号频率和强度。

引力波到达地球时已经极其微弱,一公里长的距离产生的位移大小仅仅为 10^{-18} m,为原子核直径的万分之一。激光干涉仪要达到什么样的参数才能测量到这样微弱的长度变化呢?

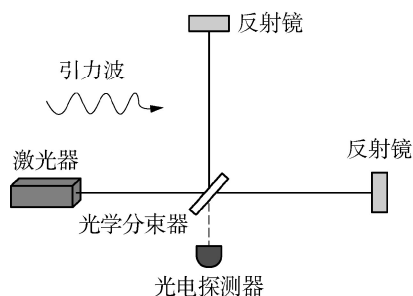


图 2 激光干涉仪结构简图

4 激光干涉仪测量极限

首先可以通过增加分束器和镜子之间的距离长度,例如将距离长度增加到一万千米,那引力波造成的位移大小就增加为 10^{-14} m。但是地球地貌不允许非常长的直线传播,限制了通过增长距离提升测量精度的极限,为了解决这一困境,R. Weiss 提出在干涉臂上加入法布里—珀罗腔,其基本思想是把激光干涉臂折叠起来,而折叠后的长度可以在地球上建造,且又能最大化保持激光干涉精度。法布里—

珀罗腔由两面反射镜组成,激光可以在腔内来回往返,实现在有限的长度内大幅度增加激光传播距离。LIGO 借鉴了这一方法,如图 3 所示,法布里-珀罗光学腔长为 4 km,激光在光学腔中来回反射 250 次,实现 1 000 km 的传播距离,这样 $h_g = 10^{-21}$ 的引力波造成的位移 ΔL 累积为 1×10^{-15} m。

其次,采用什么样的光源来构建光干涉仪来实现尽可能高的测量灵敏度? 根据量子力学基本原理,无论哪种光源,都是由大量能量为 $h\nu$ 的光子组成(ν 为光子频率, h 为普朗克常数)。光干涉仪相位测量灵敏度受限于海森堡不确定关系,即干涉输出强度不确定度 ΔN 和相位不确定度 $\Delta\theta$ 的乘积大于等于 1。激光是最接近量子光源的经典光源,原理上,一束平均光子数为 N 的激光,其光子数随时间有一定的波动,波动大小(也就是光强不确定度)为 \sqrt{N} (也称为散粒噪声),这束激光构成干涉仪,其相位测量灵敏度极限为 $\Delta\theta = \frac{1}{\sqrt{N}}$ ^[14], 这对激光

光强提出了最低的要求。举例说明:当激光波长为 1 微米时,在 LIGO 干涉仪结构下,应变度为 10^{-21} 的引力波引起两个干涉臂之间有光程差 $\Delta L = 1.0 \times 10^{-15}$ m,对应的干涉臂之间的相位差为 $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L = 6.3 \times 10^{-9}$ 弧度,当引力波引起的相位差大

于系统相位测量极限时,即 $\Delta\varphi \geq \Delta\theta = \frac{1}{\sqrt{N}}$, 我们

才能够观察到引力波信号。这要求测量时间(引力波振荡周期的 1/4, LIGO 为 ~ 1 毫秒)内的光子数 N 大于 2.5×10^{16} 个,对应激光器至少需要输出 5 W 功率的激光,再考虑到分束器损耗、反射损耗、传输损耗,探测损耗等等,最终激光器要求输出功率几十瓦的连续激光。

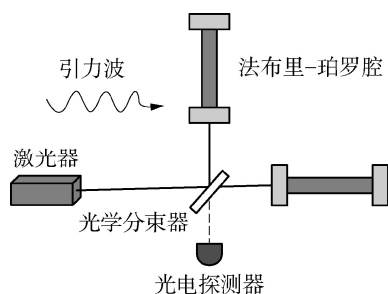


图 3 激光干涉仪引力波探测器的结构示意图

这样强的相干激光,如果直接在空气中传播,会与空气分子发生散射,激光能量随着传播距离急剧

下降且光子数波动远高于 \sqrt{N} , 导致激光干涉相位测量精度快速下降,因此 LIGO 建造了 4 km 长的真空腔体,激光在真空环境下传播,减小传播损耗和传播噪声。当然,4 km 长的真空腔大大增加了引力波探测器搭建的工程难度。

除了上面介绍的方法和技术,要测量到微弱位移,还需要解决一些工程技术问题,如高质量的激光光源要满足高功率+长相位相干时间+纯 TEM00 空间单模+线偏振特性+相干水平的光子数波动 $= \sqrt{N}$ 等要求;另外,当强激光打在反射镜上,会造成反射镜面的热化,使得镜面厚度无规则变化,给位移测量带来与引力波无关的随机晃动;人走动、车子开动造成的地面震动给镜面带来与引力波无关的位置晃动等等问题。针对这些问题,LIGO 采用多种措施,包括加入环型腔清模器将激光噪声保持在散粒噪声水平;不同地点多台设备协同工作的方式去除某一台设备的随机噪声、将反射镜悬吊在钟摆系统上减少振动、加大反射镜面积帮助消除镜面热噪声;增加镜子质量减小光辐射压力噪声等等。通过近二十年的努力,多种噪声来源均已得到有效压制,LIGO 测量精度已经达到经典物理系统极限,其噪声主要来源是真空场噪声。LIGO 在 2016 年第一次测量到引力波信号,位于华盛顿州汉福德的探测器信号和路易斯安那州李文斯顿的探测器信号几乎完全一致(如图 4 所示),排除了环境随机震动干扰。

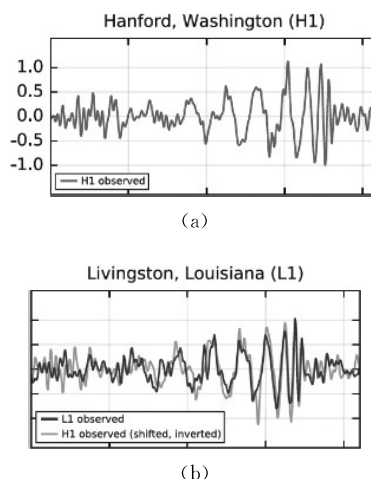


图 4 LIGO 两台探测器测量到的引力波信号((a)图为华盛顿州汉福德的探测器信号,(b)图为路易斯安那州李文斯顿的探测器信号)^[12]

5 量子引力波探测器

激光测量系统达到经典物理极限意味着想要进

一步提升测量灵敏度,对更微弱的引力波信号($h_g < 10^{-21}$)进行测量,需要采用非经典的技术——量子技术。我们从量子力学原理出发来分析,LIGO 激光干涉仪结构如图 3 所示,构成激光干涉仪的核心器件是光学分束器。如图 5 所示,光学分束器有两个输入口 1 和 2,两个输出口 3 和 4,当一束激光从输入口 1 入射,在分束器一分为二,从输出口 3 和 4 出射,输入口 2 没有人入射电磁场,经典物理认为输入口 2 没有输入场,能量为零,而量子力学认为输入口 2 天然有真空场输入。真空场无处不在,且极其微弱,约为单个光子量级,其振幅随时间随机波动。当 LIGO 试图探测更微弱的信号时,信号会淹没在真空场随机波动(也称为真空场噪声)中,真空场噪声为系统灵敏度提升主要限制因素。

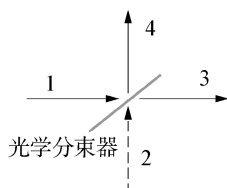


图 5 光学分束器

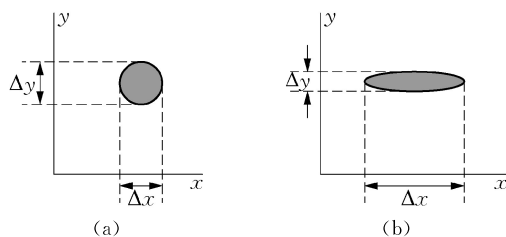


图 6 真空场振幅-相位正交量[(a)图]、量子压缩真空场振幅-相位正交量[(b)图]

对真空场的测量和特性研究始于 20 世纪 60 年代。真空场能量极小,无法直接用光电探测器对其变化进行测量,物理学家采用平衡零拍技术对真空场的振幅和相位进行实验测量,两者都具有一定的起伏。以振幅和相位为 x 和 y 轴,对真空场振幅和相位做多次测量,每次测量得到的结果以点的方式画在振幅-相位图中,多次测量后,振幅-相位呈圆形分布,圆形在 x 和 y 轴上的投影大小对应振幅和相位不确定度 Δx 和 Δy ,满足海森堡不确定关系。通过激光与晶体或者原子相互作用,能够对真空场分布进行调控,可以沿某个方向像捏压力球一样挤压这个圆形,如果是沿着振幅方向挤压, Δx 减小,则有效压缩真空中振幅不确定性,因为 Δx 和 Δy 要满足海森堡不确定关系, Δx 减小,相位状态的不确定性 Δy 增加,整个振幅-相位分布为椭圆。反之亦然。由于相位不确定性是限制 LIGO 测量灵敏度的主要原因,减小相位不确定性就可以使探测器对引力波信号更加敏感。20 世纪 80 年代物理学家提

出^[13]将图 6(b)中的压缩真空场替代真空场,从输入口 2 入射,能够打破真空场噪声对干涉测量性能的限制,理论上测量灵敏度能突破散粒噪声极限,使引力波探测器能够捕捉更微弱的引力波信号。LIGO 汉福德基地进行了相关测试,成功提高了 LIGO 测量灵敏度。没有压缩真空场,LIGO 每月大约只能探测到一次引力波。有压缩真空场注入,LIGO 几乎每周都能探测到时空涟漪。

6 展 望

目前搭建在地球上的引力波探测器已经有多台运行正常,对频率为百赫兹量级引力波进行测量,更低频的引力波测量需要更长的干涉臂,这在地面已无法搭建,所以欧洲和中国相继提出多个天基激光干涉仪引力波探测器计划,将激光和反射镜等放在卫星上,通过三颗卫星构建激光干涉仪,卫星之间距离很远,且太空为真空环境,激光的传播噪声和震动问题能够得到很好的解决。当然事情总是具有两面性,天基激光干涉引力波探测器会遇到地面引力波探测器所没有的问题,如巨大的激光传播损耗,零件的维修的难度,零件的重量等等,都需要从物理原理和工程技术上寻找解决方法和技术。

引力波探测是当代物理学最重要的前沿研究领域之一,为天文学研究提供了一种全新的方法,让我们能更深入地认识宇宙。从物理学发展历史可以看出,新的测量精度会带来新的实验结果,新的实验结果会带来物理原理的突破,引力波测量技术是当前测量精度极致的代表之一,我们相信也许在不久的将来天体物理和宇宙学会迎来飞速发展。

参 考 文 献

- [1] Ginzton, S. R., Hough, J.. Gravitational Wave Detection by Interferometry (Ground and Space)[J]. Living Reviews in Relativity, 2000, volume 3(3).
- [2] Odylio Denys Aguiar. Past, present and future of the Resonant—Mass gravitational wave detectors[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2011(11):1.
- [3] P. R. Saulson. Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors[M]. World Scientific, 1994.
- [4] Alex Abramovici, et al.. LIGO: The Laser Interferometer Gravitational—Wave Observatory[J]. SCIENCE, 256(5055), 1992:325.
- [5] C. Bradaschia et al, The VIRGO Project: A wide band antenna for gravitational wave detection, Nuclear Instruments and Methods in [J]. Physics Research Section A: Accelerators, (下转第 23 页)

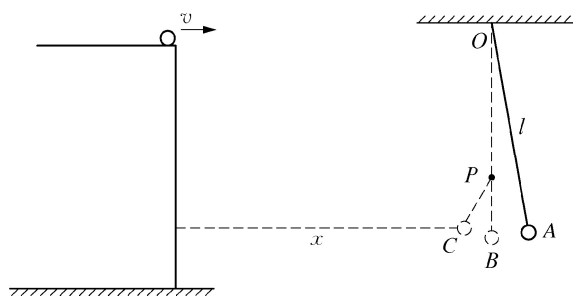


图 6 例题 5 配图

通过实践,学生作业情况如图 7 所示,横坐标为题号,纵坐标为正确率。可见,两个班矫正训练的正确率整体高于前一次作业,分析具体的作答情况可知,在矫正训练中前一次作业存在的问题明显得到改善。以例题 5 为例,71.4%的 A 班学生和 96%的 B 班的学生均考虑到了单摆运动的周期性,显著多于第一次作业,说明经过讲评和矫正训练,可有效解决学生学习中存在的问题。

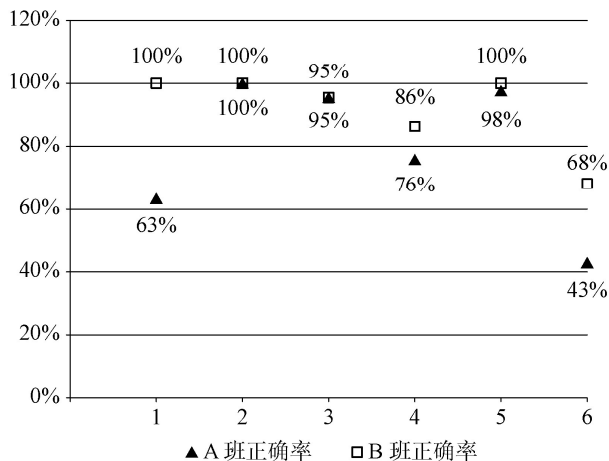


图 7 矫正训练各小题正确率统计图

4 结论与思考

据单摆作业的实践可知,以学习阶段为导向,在 SOLO 分类理论视域下划分习题层次,设计分层作业是可行的、有效的。依此方法,分层作业设计可操作性、标准性更加突出,促使教师深入分析选取的习题;帮助学生巩固知识、逐步走向综合运用,最终指向解决问题和创新实践能力的发展。相比通常的分层作业,本设计可以体现学生自我要求的学习水平和实际达到的学习水平,使师生更深入地反思教学,明确后续练习的方向。由此设计矫正训练,对作业中反映的问题“对症下药”,充分发挥了课后作业和训练的教学效果。

参考文献

- [1] 何善亮. 从意义建构到能力生成——“懂而不会”现象的原因探析、实践应对与理论思考[J]. 教育科学研究, 2008(10): 5—9.
- [2] 才红. 高中物理课后作业的现状调查与改进策略研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [3] 凌瑞初. 重视物理作业设计 提升教师的专业水平[J]. 物理教师, 2013, 34(12): 14—15.
- [4] J. B. Biggs, K. F. Collis. 学习质量评价: SOLO 分类理论——可观察的学习成果结构[M]. 高凌飏, 等译. 北京: 人民教育出版社, 2010: 28—32.
- [5] 黄牧航. 谈 SOLO 分层法在历史科高考命题中的应用[J]. 基础教育课程, 2009(12): 47—51.
- [6] 樊卓琳. 高考物理试卷对科学思维能力的考查研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [7] 高晗蕊. 基于 SOLO 分类理论的高中生物理思维能力评价研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2020.
- [8] 毛金华. 物理长作业: 科学思维能力的催化剂[J]. 物理教学, 2021, 43(07): 44—47.
- [9] 邢红军. 中国基础教育课程改革: 方向迷失的危险之旅[J]. 教育科学研究, 2011(04): 5—21.
- [10] Jun Luo, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(3): 035010.
- [11] Gregory M Harry and (for the LIGO Scientific Collaboration), Advanced LIGO: the next generation of gravitational wave detectors Class[J]. Quantum Grav. 2010, 27: 084006.
- [12] B. P. Abbott, et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries[J]. Physical Review Letters, 2016, 116: 131103.
- [13] Lisa Barsotti, Jan Harms and Roman Schnabe. Squeezed vacuum states of light for gravitational wave detectors[J]. Reports on Progress in Physics, 2018, 82: 016905.

(上接第 5 页)

- Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1990, 289: 518.
- [6] H Lück and the GEO600 Team. The GEO600 project[J]. Classical and Quantum Gravity, 1997, 14(6): 1471.
 - [7] Masaki Ando and the TAMA Collaboration. Current status of the TAMA300 gravitational-wave detector[J]. Class. Quantum Grav, 2005, 22, S881.
 - [8] Jonathan R. Gair, et al. Testing General Relativity with Low-Frequency, Space-Based Gravitational-Wave Detectors[J]. Living Reviews in Relativity, 2013, 16(7).
 - [9] Karsten Danzmann and Albrecht Rüdiger. LISA technology—concept, status, prospects[J]. Classical and Quantum Gravity, 2003, 20(10), S1.