

尘埃落定：B型引力探测器 50 年探索总结

——B型引力探测器作为一个概念简单的实验，
验证了广义相对论的两个预言，但是精度未达到预期目标

译者点评：

GP-B 原始数据目前已经被 NSSDC (national space science data center) 存档,包括实验数据和卫星/载荷状态数据,同时存档的还有相关文档、图片、照片和其他一些关于 GP-B 的信息.目前,实验数据为 2s 平滑的数据,大小为 80GB,有兴趣的科研人员可以申请得到这些数据.我国的科研工作者可以借此进一步研究处理大型数据的方法以及有效算法的开发.

译者在 2008 年底成功地申请到数据并对 1 号陀螺的数据初步处理了一下,得到了短程线效应 4% 的精度,并对每天的数据进行频谱分析,发现除了卫星自转频率分量外,还存在当时无法解释的 5/8 倍卫星自转频率,通过本文的参考文献[1],现在知道这就是本译文中所说的“表面电荷引起的一个戏剧性表现”.

1962 年,Francis Everitt 来到斯坦福大学,受命成为 B 型引力探测器(GP-B)的首位全职雇员.历经半个世纪,耗资 7.6 亿美元之后,Everitt 在 GP-B 发射升空 7 年之后宣布,GP-B 完成了数据分析,分析结果表明,爱因斯坦的巨著又一次顺利地经受住了考验.

按照实验设定的参数,GP-B 将以前所未有的精度来测量爱因斯坦广义相对论的两个预言:所谓的短程线效应和坐标系拖曳效应,这两个效应会令毫无外力矩作用的绕轨飞行的陀螺仪发生进动. Everitt 和他的同事最终给出了短程线效应的测量精度为 0.3%,而更小的坐标系拖曳效应测量精度为 20%.在 GP-B 历时半个世纪的实验过程中,他们制造了荣膺最完美球体吉尼斯世界记录的乒乓球大小的陀螺转子,并用 5 年的时间坚持不懈地对陀螺仪干扰力矩进行建模和数据处理等,堪称是一个不同凡响的艰难历程.

实验要点

爱因斯坦的广义相对论认为,能量和动量会影响时空的弯曲,而这种弯曲会决定物体的运动方式.

由于地球周围的引力相对较弱,可以直观地同电磁场进行类比就可以理解短程线效应.短程线效应部分地可以用原子物理的概念理解为自旋-轨道耦合:在质子形成的库仑场中,公转的自旋电子会感受到磁场从而受到力矩作用.类似地,绕地球旋转的轨道陀螺会感受到类磁场从而受到力矩作用.上述(与电磁场的)类比解释了短程线进动的 1/3.其余 2/3 与空间曲率有关.

搭载于卫星上的在极地轨道旋转的 4 只 GP-B 陀螺,不仅受到由轨道运动引起的类磁场力矩,还要受到由地球自身旋转引起的类磁场力矩.后者产生了坐标系拖曳效应.此效应的最终结果是,地球外的一个做自由落体运动的物体会随地球一同旋转.地球旋转相对较慢,因此 GP-B 卫星位置处的坐标系拖曳效应非常微小.

短程线效应和坐标系拖曳效应对不同轨道上的陀螺的作用也是不同的.GP-B 项目组发现,在极地轨道上,这两个效应引起的陀螺自转轴的偏转方向互相垂直,如图 1 所示,因此,有可能独立分离出这两个效应.

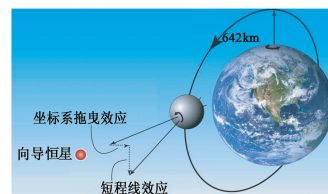


图 1 B型引力探测器(GP-B)卫星在地球 642km 极地轨道绕飞图.卫星和陀螺旋转向量指向向导恒星 IM Pegasi.短程线效应和坐标系拖曳效应将分别引起陀螺在轨道平面和垂直于轨道的平面内缓慢进动,由于陀螺进动平面互相垂直,因此,GP-B 能独立评估这两个效应(引自参考文献[1])

四只球

GP-B 卫星于 2004 年 4 月升空.次年 8 月开始为期一年的实验数据采集.在 NASA 新闻发布会上,Everitt 宣布短程线进动速率为 $6602 \pm 18 \text{ mas/yr}$ (毫角秒/年),坐标系拖曳效应的进动速率为 $37.2 \pm 7.2 \text{ mas/yr}$.而广义相对论预测值分别为 6602 mas/yr 和 39.2 mas/yr .图 2 是 GP-B 的 4 只陀螺仪分别得到的结果以及 4 只陀螺仪的综合结果图示.

GP-B 实验的核心是安装有 4 只陀螺仪的熔融石英结构以及一个极好的望远镜.陀螺转子外表面非常圆;如果把它们放大到地球大小,则最高峰仅为 3m 高.这是非常重要的一点,因为这可以避免由不圆度引入的牛顿干扰力矩淹没相对论效应.实验开始时,氦气使陀螺加转,并使其自转轴对准望远镜光轴,望远镜在实验过程中始终指向向导恒星,从而来提供陀螺仪转轴的参考基准¹⁾.同时,为了平均掉杂散牛顿力矩和其他干扰,卫星自身绕望远镜光轴以 80s 的周期自转.

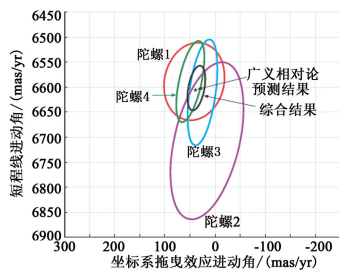


图2 GP-B的4只陀螺各自可独立测量短程线和坐标系拖曳效应引起的陀螺进动.图中是每只陀螺95%置信度的测量结果、4只陀螺综合结果以及广义相对论预测的结果.如文中所述,陀螺旋转轴在一天内偶尔改变几十个毫角秒,2号陀螺尤其不规律,因此它对应更大的椭圆(引自参考文献[1])

每个熔融石英转子的外表面镀了很薄的铱膜,并用超流氦制冷到1.8K.陀螺加转之后,超导体晶格中的正电荷将产生磁偶极场²⁾,此磁偶极场平行于陀螺自转轴,可由超导量子干涉设备(SQUID)测量得到.

杂散电荷和陀螺不规则运动

GP-B实验人员在实验过程中攻克了许多难关:SQUID的标定证明是复杂而难以分析的;向导恒星的真正运动轨迹需要精确测量;超流体氦容易从杜瓦瓶逸出;以及即使在642km的高度上,地球的稀薄空气仍然会对卫星产生干扰.其中,最后一个问题的解决是通过巧妙地利用逸出的氦气和微助推器把地球稀薄空气的干扰补偿掉了.

但是困难的是,陀螺转子以及支承电极上的杂散静电荷碎磷造成了比预计要大得多的转子进动不确定性.尽管陀螺转子很圆,但材质均匀度以及外表面圆度有一定误差,这就造成了陀螺旋转轴与陀螺最大惯量矩轴不对准.这种不对准会使得碎磷电荷对陀螺施加力矩.

问题的严重性直到实验结束后才被意识到.因此,在为期46天的后标定阶段,有意改变卫星自转轴和陀螺仪旋转轴的不对准,即增大碎磷效应引起的力矩,然后再恢复到实验初始状态³⁾.最终发现,不对准力矩比预期要大100倍.

实验数据处理中也发现了表面电荷引起的一个戏剧性表现:在一天内,陀螺仪自转轴时常会随机地漂移几十毫角秒.实际上,这个漂移并不是随机的,当陀螺仪惯量矩轴绕其

旋转轴的缓慢进动周期是卫星自转周期的整数倍时,就会发生这种谐振现象.

在5年数据处理过程中,GP-B的科学家试图对电荷碎磷及其引起的效应进行理解和建模.最后,在他们用复杂的模型修正了这些误差后,4只陀螺仪的数据互相吻合了.这些复杂误差是GP-B结果中的最大误差.

知易行难

Everitt和合作伙伴曾经期望短程线效应的测量精度为0.01%,坐标系拖曳效应的测量精度为1%.如果成功的话,他们就会实现广义相对论效应的迄今最精密的测量了.然而,早在1996年,月球测距数据已经获得了0.7%的短程线效应测量精度,而更精确的月球测距实验正在酝酿中.2004年,GP-B刚开始采集数据之后,Ignazio Ciufolini和Eric Pavlis宣布他们的激光测距实验结果:在短程线效应是正确的前提下,坐标系拖曳效应的测量精度为10%.意大利空间局的LARES卫星策划在今年发射,它可能会把坐标系拖曳效应的精度提高一个数量级.

Fairbank以前曾评论:“没有任何一个实验像GP-B这么简单了,仅有一个向导恒星,一个望远镜和一个旋转的球”.Everitt沉思道:“如果我事先知道这个实验会去50年时间的話,我还会做这个实验吗?大概不会的.但是总会有人孜孜不倦地追求下去.”

参考文献

- [1] Everitt C W F *et al.* *phys. Rev. Lett.*, 2011, 106: 221101

(清华大学贺晓霞编译自Steven K. Blau. *Physics Today*, 2011, (7): 14, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

- 1) 通过测量陀螺转轴相对此参考基准的变化,再减去向导星自身的运动,就得到了实验待测的两个效应——译者注
- 2) London矩——译者注
- 3) 从后标定数据中,就能判断不对准力矩的特性和极限,从而对这个误差项进行建模并剔除——译者注