

秦荣先 阎永廉 著

广义相对论与引力理论

实验检验



广义相对论与引力理论 实验检验

秦荣先 闫永康 著

上海科学技术文献出版社

广义相对论与引力理论实验检验

秦荣先 吕永廉 著

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路2号)

新华书店经销 商务印书馆上海印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 字数 241,000

1987年4月第1版 1987年4月第1次印刷

印数: 1—3,400

书号: 13192·89 定价: 2.25 元

《科技新书目》121—179

序

周培源

秦荣先和吕永廉两同志合编的《广义相对论与引力理论实验检验》一书的出版，一方面，可用作学习引力理论与进行引力实验的参考书；另一方面，人们从此书提供的引力实验的大量文献可以得到启发，以进一步开展实验工作，来检验各种引力理论中，哪一种符合客观实际。

从本书可以看到，除 Einstein 的引力论外，已有他种理论发表。因此，用实验来检验各种引力理论很有必要。即使对已比较熟悉的 Einstein 引力论，也有不同的看法。对此，也必须用实验来澄清。

物理学界对 Newton 的力学体系——包括他的引力理论在内——的看法是一致的。但是，为什么对 Einstein 的引力论会有不同的看法呢？我认为有下列三种原因：

第一，在 Einstein 与 Newton 的引力论中，二者的出发点虽然很不相同，但由它们分别推导出的结论的差别却比较小，亦即对有关引力现象要用极为精密的天文观察或物理实验才能识别这两种理论所预见到的这些现象的差异。在实验室中用物理实验来观测 Einstein 引力论的一些效应——这些效应在 Newton 引力论中并不存在——也要用极高精密度的实验方法与设备才能观察到。

第二，在解 Einstein 引力场方程中，存在着数学上的困难。Einstein 的引力度规张量 $g_{\mu\nu}$ 所满足的场方程是一组十个二阶非线性偏微分方程。除了个别例子外，这种非线性偏微分方程的解在满足初始或边界条件之后的唯一性在数学上还没有得到证明。这同在 Newton 引力论中线性的 Laplace 方程的解在满足了边界条件之后具有唯一性根本不同。因此在物理学中遇到一些非

线性偏微分方程只能用实验来检验解的正确性。

第三,在 Einstein 场方程解中存在着解的不确定性。Einstein 的度规张量 $g_{\mu\nu}$ 共有十个分量,满足上面提到的十个分量场方程。但在这十个偏微分方程中存在着 Bianchi 恒等式的四个偏微分关系。也就是说, $g_{\mu\nu}$ 的十个分量只满足六个独立的方程,因此它们的解是不确定的。

由于上述原因,对场方程必须引进其他独立的与足够的数学条件,才能获得度规张量的确定解。但是,对引进什么条件,甚至要否引进条件,这些都属于上面提到的对 Einstein 引力论有不同观点的具体内容。

很明显,对场方程加上不同的条件,一定会导得不同的解。比如,大家所熟悉的具有球对称的静态引力场的 Schwarzschild 解。这个解是把球极坐标系中的径向坐标作了一个坐标变换使场方程——在这个特例中场方程退化为常微分方程——简化得来的。为此,这一解可以说是用了在数学方法上简化场方程的条件下的结果。另外,我们也有 Lanczos 在 1923 年发表的用谐和条件求得的球对称的静态引力场的解。这两种解小有差别。在 Schwarzschild 解中与球面垂直和球面平行的两种光速不一样;在谐和条件下的解中这两种光速严格地说也不相同,但在一级近似下二者是相等的。在地球的引力场中这两种解的差别是在 10^{-9} 与 10^{-10} 之间。在本世纪的二十年代,这样小的差别不可能用实验来证明,但在近代比较先进的实验条件下,这个差别则可以观测到。

在数学方法上简化场方程求解也有其他的例子。Weyl 在 1918 年就是用坐标变换简化了具有轴对称的静态引力场方程,从而取得了场方程的普通解。

但是,由于 Weyl 用的是数学原则上的而不是具体的坐标变换,所以物体在原有坐标系中的体形、质量分布和与此相应的场方程的边界条件在 Weyl 的坐标系中都成为未知数,而没有明确的边界条件的偏微分方程是不可能有的确定的解的。因此,即使有了场方程的普通解,但对一个具体的轴对称引力场的问题无法从

Weyl 解的普通表达式中确定它的特殊解。Schwarzschild 解是轴对称静态场解的一个特例。我们虽然可以把它变换到在 Weyl 坐标系中的解，但无法把它从 Weyl 的普通解中作为一个特例挑选出来。

从五十年代开始广义相对论引力论工作者用不同的条件和数学方法发表了数以百计篇的场方程准确解的论文。但是，作者们自己也不得不承认这些解的绝大多数和物理现象没有关系。因此，我认为要获得一个物体的 Einstein 引力场方程准确解的中心问题，是对引力场方程引进什么附加物理条件。从几十年的经验看来，Einstein 自己在 1918 年发表的弱平面引力波理论中所采用的谐和条件有很大可能符合客观实际的这个物理条件。这个条件有四个非线性的偏微分方程，正好补足上面所提到的所需补充的四个方程。当然，如用线性化的场方程一样，Einstein 在 1918 年用的也是线性化的谐和条件。这个条件的严格数学表达式是由 de Donder 在 1921 年提出的，因此也被称作 de Donder 条件。此外，在 1938 年 Einstein 和 Infeld 与 Hoffmann 一道发表的运动理论也用了谐和条件。在其他引力问题上用了谐和条件已发表的论文也不算少。所以可以说，在 Einstein 引力论中谐和条件是使场方程有确定解的补充物理条件。

但是，由于 Einstein 在物理学发展史上是第一位物理学家，明确地提出用张量方程的数学形式来表达引力规律，也就是说，他要求物理规律在数学上的坐标变换下应当是协变的。从而在广义相对论引力论的学者中流行一种“坐标无关论”的观点。他们认为，虽然物理规律也必须用坐标来表达，但是坐标与坐标系，如同物理学中所用的长度与时间的单位一样，可以任意选择。

诚然，Einstein 首先提出的物理规律的协变性，是对发展物理学一个极为重要的贡献。在广义相对论发表之后，人们也看到在物理学史上所发现的规律如 Newton 力学与引力规律和 Maxwell 的电磁理论等等也都可以用张量方程来表达。因此在广义相对论发表之后，张量分析不胫而走，在数学、物理、工程等方面得到了广

泛的应用。Newton 力学与相对论力学的空间与时间的根本区别在于：在前者中空间与时间是分开的；而后者则提出空间与时间形成一个空时的整体。两种力学规律都满足协变性的要求。在前者的范围内，坐标变换是在三度空间内进行的，时间只是一个参数，而后者则除了空间坐标变换之外，时间与空间的坐标可一同变换，如狭义相对论中的 Lorentz 坐标变换一样。对四度空时的坐标系的选择有它的几何与物理意义，决不能和在物理学中对空间和时间的度量可采用任意度量单位等同看待。以上提到的已发表的许多个 Einstein 场方程的严格解至今还没有物理的说明，是和“坐标无关论”的观点不无关系。

但是，也有可能把上述尚未和物理问题联系上的场方程的严格解用来说明某种物质分布与运动的引力场。其办法是用谐和条件来求坐标变换，把这些解变换到能够说明的具有一定的质量分布与运动的物体的坐标系中去。

由于上述场方程解的不确定性，广义相对论引力论学者中也流行一种“坐标条件”的看法，亦即采用某种坐标系来求得场方程的确定解。这种“坐标条件”实质上等于引进对引力张量 $g_{\mu\nu}$ 除了满足场方程之外还需要满足额外的数学条件。比如，我们说“谐和条件”，他们说“谐和坐标”这两种条件的提法虽异，但实际上推导出的数学结果是一致的。可是，这样两种提法具有概念上的区别。“谐和坐标”只是坐标的一种，也就是说，可以用它也可以用其它坐标。因此，“坐标条件”的提法是属于“坐标无关论”的范畴。与此相反，“谐和条件”的提法强调它是个物理条件，应该被用到解所有的引力问题中去。

当前，在全世界的很多国家——包括我国在内——的不少物理学实验室中正在进行对引力波的观察，引力波的实验的理论依据是 Einstein 的场方程和他提出的谐和条件。因此，引力波的发现将不仅证明他的场方程而且也将证明谐和条件的正确性。本书的发行也可以鼓励实验物理学工作者除了进行引力波实验之外，也可以开展其他引力实验，来进一步验证并丰富 Einstein 的

引力理论。

最后,我们可以提这样一个问题:引力实验既属于基础研究的领域,它对生产与发展国民经济能否起些作用?我们可以这样答复:当代的引力实验,需要极高的精确度才能区别已发表的各种引力理论的预见。以观测 Einstein 引力论中的引力波(在 Newton 引力论中不存在引力波)为例,实验技术需要的精确度高达 10^{-16} 到 10^{-22} ,而观测一般地震的精确度只需要 10^{-6} ;观测地下核试验对精确度的要求和观测地震波的要求相仿。这说明掌握了引力实验技术的物理学工作者完全有科技准备来从事发展国民经济和国防方面的实际工作。

我希望《广义相对论与引力理论实验检验》这本书的出版发行,能引起科技界的领导和从事实验与理论科学技术工作者的重视,把我国欣欣向荣的科技事业不断推向前进。

前 言

长时间以来，我们发现许多广义相对论的初学者对于它的实验检验缺乏必要的了解，这有碍于他们对这门学科的学习和深入了解。这种情况促使我们萌生了一种想法，写一本较为系统的介绍广义相对论实验检验的小册子，这对于初学者学习和研究广义相对论大概是会有所帮助的。

在收集和整理资料的过程中，我们逐渐感到，这么丰富的资料，要是把它整理出来，即使是对于那些广义相对论和引力理论的专门研究者，也是有参考价值的。这些人对于理论有广博的了解，但却不一定有时间大量去查阅有关广义相对论和引力理论实验检验的资料。如果这一工作能为他们多少提供一些方便的话，我们会感到不胜荣幸。

引力实验，特别是现代引力实验，都是以高级技术和先进方法为保证的。我国从事引力实验工作的人数不多，队伍也较年轻。我们想，他们从国内外同行的工作中定可获得许多教益和借鉴。

我们在安排本书的内容时遵循这样的原则：假定读者对于广义相对论和引力理论已经有了一般的了解，因此除非必要，我们不去专门介绍理论方面的问题，但是力求讲清楚各项实验检验和理论发展的关系。对于实验，则着重介绍实验的原理和方法。对于一些技术上有特点和有代表性的实验，也介绍了实验技术方面的问题。对于同一项检验，我们注意比较不同实验方法的优缺点，注意说明随着科学技术的发展实验技术的改进。

我们在材料的选取中还尽量反映出历史发展的过程，并且注意反映对一些实验和一些问题的不同看法，以便读者自己进行判断。

除了介绍已经完成的实验以外,我们还介绍了一些重要的、正在准备之中但尚未进行的实验。同时,还特别注重了对于那些正在进行之中但尚未得到结果,或者虽有一些结果但还不能得出明确结论的重要实验的介绍。引力波探测和 Newton 反平方定律的检验就是这样的实验。这两个实验堪称当今引力实验研究的两大潮流,我们不惜专列两章来介绍这方面的情况。除此之外,我们还适当介绍了在今后一个时期可能成为引力实验研究的新领域的那些实验。

需要指出的是,我们介绍的内容只涉及对经典的引力理论的检验,至于量子引力论,引力规范理论等现代理论则完全不涉及。例如关于是否存在与这些理论有关的“旋量”张量的问题就没有涉及。又例如对于与这些理论有紧密联系的 Newton 反平方定律的检验,我们也主要是从经典理论的角度来加以讨论。

在我们开始着手进行这项工作之后不久,见到了 C. M. Will 所著的《Theory and Experiment in Gravitational Physics》。Will 是对于引力理论实验检验的理论框架的研究卓有贡献的人物。本书的第二、第三章主要采取了 Will 的著作中提供的理论框架。读者可以从 Will 的著作中找到更多的对实验的理论解释的论述。

最后要谈一下单位制的问题。现代文献中通常采用所谓“几何化”单位制,为了便于读者查阅参考文献,我们也采用这种单位制。但在列举实验参数值和给出计数结果时,为了方便和直观起见,我们都使用普通单位制。普通单位制和几何化单位制的换算以及本书在使用几何化单位制时的其它问题请参阅附注。

作 者

1985 年 4 月

附注：几何化单位制

在我们采用的几何化单位制里，光速 c 和 Newton 引力常数 G 都取作单位 1。在这种单位制里，各种力学量的单位都是长度单位的幂次。由以上的规定我们有

$$1 = G = 6.673 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$1 = c = 2.997930 \cdots \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 = Gc^{-3} = 0.7425 \times 10^{-18} \text{cm} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$1 = Gc^{-4} = 0.826 \times 10^{-49} \text{cm} \cdot \text{erg}^{-1} \\ = 0.826 \times 10^{-49} \text{dyn}^{-1}$$

由此可以得到从普通单位制变化到几何化单位制时各种力学量的单位换算。例如：

长度： $1 \text{cm} = 1 \text{cm}$

时间： $1 \text{s} = 2.997930 \cdots \times 10^{10} \text{cm}$

速度： $1 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} = (2.997930 \cdots \times 10^{10})^{-1}$

质量： $1 \text{g} = 0.7425 \times 10^{-18} \text{cm}$

力： $1 \text{dyn} = 0.826 \times 10^{-49}$

功率： $1 \text{erg} = 0.826 \times 10^{-49} \text{cm}$

需要强调的是，几何化单位制中对于 G 和 c 的规定只不过是规定了几何化单位制和普通单位制之间的单位转换因子，没有任何物理意义。例如规定 $G=1$ ，只不过是说明了在普通单位制里 $6.673 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 G 值在几何化单位制里被规定为单位 1，并不意味着 G 是一个肯定不变的量。例如在第三章讨论优越位置效应和优越坐标系效应以及第五章和第六章讨论 G 随时间和随作用距离变化的问题时，我们就分别用 G_z 、 $G(t)$ 和 $G(r)$ 在几何化单位制中表示可能异于单位 1 的 G 值。

目 录

第一章 检验广义相对论及引力理论的逻辑框架

1.1 引言	1
1.2 广义相对论的理论体系	3
1.3 引力理论的分类	5
1.4 广义相对论和引力理论实验检验的结构体系	8
参考文献	13

第二章 强等效原理的检验

2.1 Dicke 框架	14
2.2 $TH_{\delta\mu}$ 形式体系	16
2.3 检验强等效原理的实验之间的逻辑联系	17
2.4 弱等效原理的检验	23
2.4-1 引力质量与惯性质量等价性的早期检验	23
2.4-2 Eötvös-Dicke 实验	23
2.4-3 改进 ED 实验的努力——流体悬浮扭秤实验	32
2.4-4 Stanford 的空间等效原理实验	34
2.4-5 ED 实验的理论意义	37
2.4-6 单个粒子的自由落体实验	42
2.4-7 COW 实验	47
2.5 万有引力红移的检验	52
2.5-1 星体谱线引力红移的观测	53
2.5-2 地面 γ 射线红移实验	57
2.5-3 环球时钟引力红移实验	60
2.5-4 轨道时钟引力红移实验	62
2.5-5 万有引力红移的零实验	68
2.6 Turner-Hill 实验	68
2.7 Hughes-Drever 实验	72
2.8 对基本耦合常数的时间不变性的检验	79
2.8-1 遥远星系谱线的观测	80

2.8-2 从对放射性核衰变的研究确定耦合常数的时间变化率	82
2.8-3 从对核反应共振特性的研究确定耦合常数的时间变化率	85
参考文献	87

第三章 后 Newton 检验

3.1 PPN 形式体系	91
3.2 度规理论简介	95
3.3 太阳引力场中的光线偏折	105
3.4 雷达回波时延	116
3.5 优越位置效应和优越坐标系效应	122
3.6 PPN 潮的实验检验	127
3.7 地球日潮的年变化	132
3.8 Nordtvedt 效应的实验检验	134
3.9 行星近日点进动	137
3.10 利用双星系统检验后 Newton 守恒定律	146
3.11 Kreuzer 实验——主动引力质量和被动引力质量等价性的检验	148
3.12 轨道陀螺自转轴进动实验	153
3.13 后 Newton 实验检验的总结	158
3.14 实验室后 Newton 实验	159
3.15 太阳系的二阶后 Newton 检验	171
参考文献	175

第四章 对引力作用的时间不变性的检验

4.1 理论结果简介	179
4.2 $\dot{G}$ 的实验观测	183
4.3 由对月球绕地运动的观测确定 $\dot{G}$	187
4.4 星际雷达测量确定 $\dot{G}$	193
4.5 $\dot{G}$ 的实验室测量	195
参考文献	201

第五章 引力波的探测及对引力辐射性质的实验研究

5.1 引力辐射观测——对度规理论的进一步检验	203
-------------------------------	-----

5.1-1 引力波的偏振态	204
5.1-2 引力波的多极辐射特性	209
5.1-3 引力波的传播速度	211
5.2 天体引力辐射源	212
5.2-1 连续引力波源	212
5.2-2 爆发引力波源	216
5.2-3 随机背景辐射	218
5.3 引力波探测的实验进展	220
5.3-1 机械谐振子天线引力波探测器	222
5.3-2 准自由质量激光干涉仪引力波探测器	228
5.3-3 宇宙飞船 Doppler 跟踪探测引力波	233
5.4 脉冲星 PSR 1913+16 引力辐射阻尼的观测	236
参考文献	239
第六章 对于 Newton 极限的检验	
6.1 理论简介	242
6.2 大尺度 $G(r)$ 的检验	248
6.3 实验室尺度 $G(r)$ 的检验	251
6.4 中间尺度 $G(r)$ 的检验	261
6.5 对检验结果的讨论	263
参考文献	266

第一章 检验广义相对论及 引力理论的逻辑框架

1.1 引言

本世纪初叶,年轻的Einstein发表的崭新的时空观猛烈地冲击了世人的旧观念。几十年来,他的理论深刻地影响着人们对自然的认识。在研究Einstein和他的广义相对论的过程中,科学史研究者和物理学家们经常赞美广义相对论理论体系的简洁和美妙。他们对于广义相对论产生过程中思辨所起的作用,以及Einstein非凡的思辨能力留下了极深的印象。这样的—个理论,其产生和发展的过程是否也像其他理论—样,符合“实践—理论—实验”这样一个认识论的规律呢?我们首先看看Einstein本人是怎样看待这个问题的。

众所周知,广义相对论产生的初期,提出了三项检验:水星近日点的进动,光线在引力场中的偏转,以及光谱线的红移。水星近日点的进动是在广义相对论产生以前的几十年间,—直困扰人们的问题,广义相对论则很好地解决了这—问题。这成为支持广义相对论的—个证据。广义相对论所预言的光线在引力场中的偏折也很快得到了观测的证实。从分赴南美和西非的两个日蚀观测队传来的关于太阳引起的星光偏折的观测报告,使得整个欧洲科学界为之兴奋。而光谱线引力红移的观测却在前后数年间得不到明晰的结论。正当此时(1920年),Einstein在谈到广义相对论的实验证实时说到^[1]。

从系统的理论观点来看,我们可以设想经验科学的进化过程是一个连续的归纳过程。理论发展起来并以经验定律的形式简洁地综合概括了大量的个别观察的结果,再从这些经验定律,通过比较推敲,确定普遍定律。…

…—门科学—经走出它的初始阶段,理论的发展就不再仅仅依靠—个排列的过程来实现,而是研究人员受到经验根据的启发而建立起—

个思想体系；一般来说，这个思想体系在逻辑上是用少数的基本假定，即所谓公理，建立起来的。我们将这样的思想体系称为理论。…

与同一个经验数据的符合相对应的可能会有好几个彼此不相同的理论，但就从这些理论得出的，能够加以检验的推论而言，这几种理论可能是十分一致的，以致难以发现两种理论有任何不一致的推论。

当时，其他相对性的引力理论还没有发展起来，Einstein 只能将 Newton 力学和广义相对论加以比较：

…这两种理论是这样的一致，以致从广义相对论导出的能够加以检验的推论而为相对论创立以前的物理学所未能导出的，到目前为止我们只能找到少数几个，尽管这两种理论的基本假定有着深刻的差别。…

这里所说的“少数几个”推论，就是前面提到的三项检验。

在这里我们之所以大段地引用 Einstein 的论述，是因为他在这些论述里所阐明的观点，正是我们在讨论对他的理论的检验时所要遵循的思想。Einstein 非常准确地描述了一般理论，同样也是广义相对论的产生和发展的过程。我们把它归纳为：

已有的经验 $\longrightarrow$ $\begin{matrix} \text{假定} \\ \text{公理} \end{matrix}$ $\longrightarrow$ 完整的理论 $\longrightarrow$ $\begin{matrix} \text{推论} \\ \text{预言} \end{matrix}$

从已有的经验提出假定或公理是一个综合和归纳的过程。这是一种高度抽象思维的过程，它需要对各种有关的理论的深刻的理解，需要敏锐的、创造性的直觉。从经验导致假定和公理是不可证明的，但必须是自然的，符合逻辑的。有了必要的假定和公理就可以用严格推理的方式建立起整个理论。因此理论正确与否，首先在于其出发点——已有的经验是否可靠。对这个问题的考察构成了检验理论的一个方面。

理论正确与否还在于提出的假定和公理是否正确。如前所述，假定和公理是不可证明的，而且它们的内容不是都能直接加以检验的。但是假定和公理的许多直接推论却是可以用实验检验的，这构成了检验理论的又一个方面。

对理论用于各个领域所导出的结果，即预言或推论加以验证，此其为对理论正确与否的最终检验。这里的“最终”之谓，是相对于前面两方面的检验而言的，没有绝对的意义。这种验证具有判

决的性质,它在那些“与同一个经验数据的复合相对应”的众多可能的理论中,判决出哪些理论是错误的,哪一种理论又是正确的。例如,前面提到的广义相对论的三大经典实验验证,最初都被看作广义相对论和 Newton 理论之间的判决性实验。后来还发现了一些可加检验的推论,可以作为两者之间的新的判决性检验。另一方面,在以后的几十年间又出现了一些别的引力理论,对以上三项验证它们都有相同的预言。在这些理论和广义相对论之间进行判决,就需要寻求别的一些可加检验的预言。

最后我们还要强调这样一个观点:我们甚至只用一实验就可以否定一种理论,但是却不能用有限数量的实验最终证明一种理论;我们用精度很差的实验就可以否定一种理论,但是却不能用有限精度的实验最终证明一种理论。时至今日,对广义相对论的实验检验虽然比起半个世纪以前的三大经典验证已经大大地前进了一步,但是关于理论的正确与否,我们始终只能小心翼翼地有限地作出我们的结论。

上面的一通议论也许显得空洞和乏味,以下各节中,我们将逐步将其具体化,勾勒出一个广义相对论及引力理论实验检验的结构体系。

1.2 广义相对论的理论体系

我们已经假定了读者对于广义相对论的基本内容是熟悉的,因此不准备花大量的篇幅去介绍它。但是为了说明检验广义相对

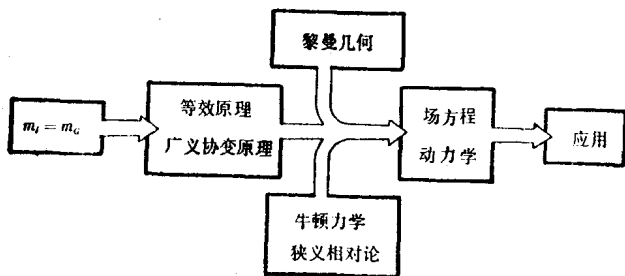


图 1.1 广义相对论的结构体系