

生活与科学文库

引力之谜

[美] P. G. 柏格曼 著
张镇九 涂成焱 译

生活与科学
文库

引力的范围

牛顿物理学和狭义相对论

广义相对论

引力坍缩

空间-时间的今天和明天

科学出版社

生活与科学文库

引 力 之 谜

〔美〕P. G. 柏格曼 著

张镇九 ~~涂成森~~ 译

科 学 出 版 社

图字:01-1999-1760 号

THE RIDDLE OF GRAVITATION
REVISED AND UPDATED EDITION

By Peter G. Bergmann

Copyright © 1968, 1987, 1992 by Peter G. Bergmann.

All rights reserved under Pan American and International
Copyright Conventions.

引 力 之 谜

〔美〕P.G. 柏格曼 著

张镇九 涂成焱 译

责任编辑 王 军 牛海卫

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院武汉分院科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

定价: 12.00 元

谨以本书
献给我尊敬的导师
爱因斯坦

中文版前言

我非常感谢张镇九教授使我的《引力之谜》一书的中文译本得以面世。我在这本书中尽力向非理论物理学专业的读者介绍爱因斯坦的广义相对论。根据广义相对论,引力确定时间和空间的结构,因此影响着整个物理学,并潜在地影响着整个科学。

爱因斯坦的引力理论对一些长期存在的问题作出了回答。其中,首先一个令人迷惑不解的问题是:为什么所有受引力作用的物体都以相同的变率改变着它们的速度?接着,新理论正确地预言:当人们的视线通过太阳附近去观察远处的天体时,与太阳不在那里时所作的同样的观察比较,这个天体的位置看起来会发生移动。每当广义相对论的预言与相对论以前的预言不同的时候,观测的结果和实验室的结果都证实爱因斯坦的理论是对的。

这是否意味着我们有了广义相对论就逐步接近了一种所谓的“万物的理论”?坦率地说,我不相信会存在这种“万物的理论”。自然界如此巨大而复杂,在任何有限的时间内,人类不可能洞察其一切奥秘。我确信,我们有望理解自然的有限部分;但是,通常一个领域的进展会显示出其他领域的未曾预料的复杂性和问题。

人类面对无限复杂的宇宙所感到的谦卑,并不妨碍自己对解答具体问题的探索。例如,原子和分子的实

在性,在 20 世纪初期只被看作是推测性的,曾经热烈地争论过,而现在已是不成问题的事实。对自然界进行认识和探索已成为国际性的事业,不仅对专家,即使对非专业人员,都是一种挑战。

最后,我希望张镇九教授翻译的《引力之谜》一书会受到读者喜爱。

P. G. 柏格曼

1996 年 9 月 28 日

多佛尔版前言

本书最早由小查尔斯先生私人资助,于1968年出版。

类星体的发现促使出版者和著者打算出一本书,向不具有理论物理学或数学专业背景知识的爱好者介绍迄今为止对宇宙、宇宙的历史以及它的动力学的理论和观测方面的知识。

本书的第一版问世后不久,天文学家发现了一类全新的天体——脉冲星,这是一些以极其稳定的周期发出辐射的天体。脉冲星中有的是双星的伴星,这类脉冲星的存在使人们有可能精确地测定由引力辐射所造成的能量损失率,首次定量地证实了广义相对论所预言的引力辐射。

1987年发现,在我们所在星系的旁边,离我们15万光年远的大麦哲伦星云中爆发了一颗超新星。近百年来曾发现过几次超新星爆发,1987年的这次是首次用现代天文学仪器观测到的超新星爆发。遗憾的是,那些现代最好的引力波探测器——低温韦伯棒——在那关键的时刻都没有工作;而进行探测的两个探测器的读数却都是在室温下取得的,因而难以确认。在对本书多佛尔版所作的补充中,我从几个方面介绍了迄今人们所进行的探索的故事:新一代引力辐射探测器的发展;当前宇宙学中的几个问题;引力场中奇点的意义;以及对引力场进行量子化的研究状况。

在上一个修订版的前言中,我曾对科学家们在揭露自然界的秘密和开始理解我们所居住的宇宙的结构方面所取得的进展表示自豪和钦佩;当我们面对许多基本问题无法得到解答而感到谦卑时应与(这种)自豪和钦佩适当地平衡。事实上,我相信:尚未得到解答的问题的领域会比我们认为已懂得的问题的领域增加得快得多。科学家和业余科技工作者两者都能学会:不是去傲慢地宣称我们对自然界的探索正接近完成,而是对我们所取得的成就感到满意。

P. G. 柏格曼

对多佛尔版的补充

引力波的探测

在过去几年中,大多数有使用共振棒探测器经验的实验室都建造了放置共振棒的低温容器,使棒探测器能在液氮温度(开尔文4度,或4K)或更低温度下工作;人们相信现在的棒探测器可显示的信号的振幅可达到 10^{-18} 的量级。遗憾的是,1987年在我们所在星系的旁边,离我们15万光年(光年是天文学中的长度单位,1光年等于光在1年中所走的距离)远的大麦哲伦星云中的超新星爆发时,只有两个引力波探测器有读数,但却都是在室温下取得的。它们所显示的情况是否真实,是否与在其他几个大陆所观测到的中微子爆发相关联,这一直是复杂的统计分析课题,其结果仍然是有争议的。

利用激光干涉仪的原理建造引力波探测器的工作在缓慢地进行。这种仪器与激光(其单色性和稳定性都超过现在——1992年——的水平)、光的延迟性或类似的具有特别性能的器件相关。尽管预计激光干涉仪以及相应的、必须的支撑设备所需的费用远远低于超导超级对撞机所需的费用,但是要比至今花费在引力实验方面的费用多得多。在美国,这个激光干涉仪计划简称为LIGO。

宇宙学中的问题

哈勃发现远处星系的光谱线向红端方向移动,移

动量的多少粗略地与星系离我们的距离成正比。这一发现使大多数天文学家相信我们的宇宙确实是以一定的速率在膨胀,而且按照这个速率反推,宇宙诞生于150 亿年以前。通常将宇宙诞生的这个时刻称为“大爆炸”。

如果上述关于我们宇宙的历史的概括确实正确,那么我们必须认为,初始的能量密度是如此之高,以致自然界中可以存在我们现在于高能粒子加速器中所看到的许多奇异粒子;同样,周围的电磁辐射谱必须与极高温度时的黑体辐射谱类似。尽管在初始的时候,充满宇宙的物质非常密,电磁辐射是不透明的(也就是说,吸收、发射以及散射过程必定影响到它们在比宇宙尺度小得多的距离上的传播),但是哈勃膨胀极其迅速地减小了物质的密度,最终使辐射与物质的耦合解除(简称解耦),使电磁辐射不受扰动地传播开去。如书中171 页解释的那样,随着宇宙的膨胀,辐射就从解耦那时开始冷却下来,以致我们现在所看到的辐射就是温度为2.73K 的无线电频率的背景辐射。

近年来,对于这种辐射谱,不仅从地面而且从地球大气以上均作了进一步的考察,精确到 10^{-3} 的观测发现,这些光谱是黑体辐射谱,而且在所有方向上都是相同的。另一方面,物质在宇宙中的分布,即使人们对星系或星系团取平均值,也远非均匀。现在,如果人们用最强大的望远镜去观察最远的可看得见的星系,那么所看到星系的高度集中和巨大“空洞”可达到宇宙的“哈勃半径”的 10^{-1} 到 10^{-2} 。毫无疑问,对于宇宙大尺度结构的考察在今后几年还会扩展。

无线电频率的背景辐射的均匀性^①与物质的大尺度分布的非均匀性之间的矛盾由一种假设来调和。这种假设认为：在宇宙中存在大量看不见的暗物质。对我们这个星系以及其他星系、甚至星系团中的各个星系中的恒星所进行的一连串分析表明，看得见的物质的聚集不足以说明所观察到的宇宙结构的稳定性。为了解释所观察到的这些看得见的物质如恒星、气体和尘埃星云的行为，人们相信存在着看不见的暗物质，也许其数量比看得见的物质多得多。

最后，宇宙学的模型应该考虑较小的原子——主要是氢和氦原子——的数目所占的比例，这些原子在宇宙中占有最大的丰度。人们想弄明白，为什么观察到的星系分布不均匀，而天文学对象的平均温度却显示出相当均匀。

现在许多宇宙学家对宇宙的历史感兴趣。在宇宙历史的早期阶段的某个时候，宇宙尺度有一个极迅速、极巨大的增加。在这个急剧增加的过程中，首先出现星系。人们猜测，这种“暴胀”改变了时间、空间和物质力场的基本结构，这些改变具有可与通常物质相变相比较的特性。正如晶体由液相形成时会出现缺陷一样，宇宙的暴胀也可能解释我们宇宙中的“泡泡”和气体的不规则性。

① 1992年4月，美国国家航空航天局的宇宙背景探测卫星COBE所获得的数据分析表明，在不同方向无线电频率的背景辐射的强度有微小的变化，非均匀性不大于 10^{-5} ，这就是说，只有靠精确的统计过程才能将这种非均匀性从仪器的正常随机噪声中分辨出来。这一发现如果能够得到确认，对宇宙的早期历史进行研究的其它小组将毫无疑问地去重复和扩展这个发现。

现在有好几种“暴胀”模型。我认为,我们必须将现在所有的这些模型都看作是高度推测性的。

奇异性

在第14章,特别是在图58中,我讨论了内部史瓦西解,强调指出内部与外部的区别是双向通信的可能性。将这两个区域分开的所谓史瓦西半径对应于一个视界:外部观察者永远得不到由内部发出的信号。

我们从内部向中心走去,曲率连续增加,中心的曲率为无穷大,时空的度规结构不再有好的定义,结果是:引力场不再遵守广义相对论中所假设的定律。我们说,中心处的引力场是奇异的。

对奇异性的研究在广义相对论的理论发展中起着重要的作用。由于坐标系的选择,度规分量可能成为无穷大。如果这种无穷大可以因坐标系的选择而去掉,我们认为这(奇点)不是真奇点。现在已经发展起来的一些方法可以告诉我们,一个奇点是(不可去掉的)“本性奇点”还是(可去掉的)“坐标奇点”。史瓦西解的中心是“本性奇点”,因为那里的无穷大的曲率不依赖于坐标系的选择。

如果在自然界中存在奇点,这会不会破坏我们关于引力场的那些定律?观察者如何看到这种破坏?走出这个困境的方法之一是彭罗斯提出来的。他假设奇点总是被视界所包围,因而不能被观察到。这个猜想称为宇宙监督原理,理论家对此提出了一些反例,但是如果将彭罗斯猜想作更仔细的表述,就有可能驳回这些反例。总之,整个问题还没有得到解决。

时间-空间和量子物理

有一套相当标准的程序将任何物理理论量子化。

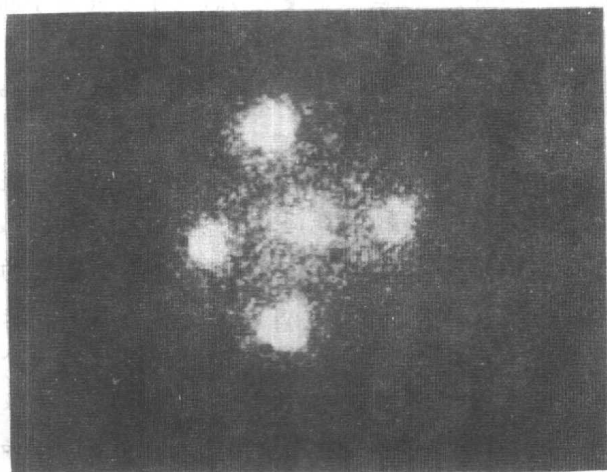
例如,要得到氢原子的(非相对论性的)量子模型,首先要选择那些确定“经典”(非量子)的电子在氢原子核影响下如何运动的变量。这些变量是描写电子在给定时刻的位置的3个坐标和电子的线动量(它的质量和它的速度的乘积)的3个分量。

其次,对于每一对“共轭”变量,即一个坐标和线动量的一个对应的分量,按照海森堡“不确定关系式”,在确定它们的精度上存在一个极限:两个不确定度的乘积不能小于普朗克常数 h 。有一些等效的数学方法可以用来表述海森堡关系。直观地说,突然发出的一个声音有它的声调和声音持续的时间;如果时间是被很好地确定了,则声音的频率就将分布在一个范围内;如果频率被限制在一定的狭窄的范围内,则声音必须持续一个较长的时间。

作为不确定关系的结果,电子的路径就不能限制在一个单一的曲线上,而是散开到一定的区域。由于通过这个区域的路径在时间上是周期性的,所以电子的能量必须是一系列离散值中的一个,这与在一个管子中或一根弦上所发生的声学的共振相类似。

迄今(1992)没有一个完全的引力场的量子理论;但是,狄拉克在1958年证认了一组可能的引力场的“正则共轭”变量。与氢原子中的电子在某时刻的位置相类似的是任意选定的类空三维区域的内部几何;而与线动量相类似的是镶嵌在时间-空间中的这个三维区域的弯曲程度(它的“外部”曲率)。在标准的广义相对论中,这些数据就足以在时间-空间中毫不含糊地传播引力场。在量子化的引力理论中,不确定关系可能使这些数据不能完全精确地确定;结果是,时间-空间

中的引力场不能被完全确定。



爱因斯坦十字(引力透镜 G2237+0305),显示一个类星体的引力透镜(见 79 页图)。照片为 1990 年 9 月由哈勃空间望远镜所摄。感谢麦彻托博士提供此照片。

如果这种量子引力论的方案被未来的发展所确
认,则量子引力论与所有其他的量子理论的不同之处
是它与时间-空间结构的关系。在通常的量子理论中,
时间-空间本质上与在以前的经典理论中一样是刚性
的;而在量子引力论中,时间-空间本身的结构是非经
典的和不确定性的。看来,在足够小的尺度上,那些时间
-空间点既不能靠与相邻点的度规关系也不能靠局域
的物理特性来得到证认。这说明,在量子引力论中,局
域性的概念会遭到根本性的修改。

普朗克长度和普朗克时间这两个概念指向同一个
方向。在物理学中,有两个质量和长度之间的关系,这
两个关系既不依赖于任何具体的场,也不依赖于粒子

的具体性质(比如电子的质量和电荷)。这两个关系中的第一个来自于广义相对论——一个点质量的史瓦西半径正比于它的质量;另一个关系来自量子物理——当粒子速度的不确定性在数量上等于光速 c 时,一个给定质量的粒子的康普顿波长定义为其位置不确定性。康普顿波长与质量成反比,也就是说,质量越大,波长越小。当普朗克质量等于史瓦西半径与康普顿波长相等时的那个质量时,其相应的长度就是普朗克长度。

普朗克质量是 2.18×10^{-5} 克,比任何已知的基本粒子的质量大许多个数量级;普朗克长度是 1.6×10^{-33} 厘米,比任何已知的原子核小许多。

从某种意义上说,普朗克长度代表通常的空间概念的极限。将不同事件发生的区域分开来,需要某种仪器(比如显微镜),辨别细节需要光的波长比要观察的细节的尺度小。光子的质量随着波长的减小而增加,由此,观察的方法本身就不可避免地影响着局域几何,而这个局域的细节正是要观察的。

所有这些考虑都表明,在有待发展的量子引力论中,时间-空间连续统需要由不同的结构所代替。现在讨论中的各种方案包括超弦(第 24 章所提到的“超”理论所引申出来的)、圈图空间表示以及因果集,可能要经过一段时间,经过相当的努力,从中挑选,并得出可行的解答。

修订版前言

过去 20 年,天文学家获得的信息增加得超过任何人的预料。观测得益于新技术,这些新技术以前所未有的观测范围和精度大大扩展了人们探索宇宙的能力。在这个空间时代,人们能将望远镜运到太空,克服地球大气所造成的困难;能近距离地观察太阳系内相邻的行星和它们的卫星;新的分析技术借助于计算机使我们能更多地了解远处星系的秘密。不必讳言,我们正生活在观测天文学的黄金时代。

与此同时,理论天文学家在概念方面的发展也没有落后——新理论观点的探索在扩展,而且今天的宇宙学正沿着探索的道路前进。现在产生出来的概念,在我于 1968 年写这本书的初版时连作梦也没想到过。确实,非常重要的创造是那些粒子物理的新进展所支持的富有成果的课题。引力辐射一度是广义相对论的充满希望的预言,现在已成为可探测的甚至是可通过对双脉冲星的研究来进行测量的事了;高灵敏度的人造引力波探测器(的面世)也指日可待。

当本书第一版的出版者要求我出修订版时,我作了积极的回答,因为我知道,可以也应该增加新的内容。我希望修订本能带给读者与我写第一版时所具有的相同的感受——为近年来科学家所取得的成就而自豪的感受以及对未来充满希望的感受。

第一版前言

过去 50 年,爱因斯坦的引力论即广义相对论已经被接受为逻辑推理上最满意的理论,并且是几乎包括所有已知的关于引力的观测结果的最好的理论。科学家和哲学家从人们关于时间-空间的想法以及关于物理世界的本质来讨论广义相对论的含义,对于使这个理论能为普通公众所理解的挑战作出了回应,即使过了 30 年,爱因斯坦和因菲尔特所写的《物理学的进化》一书仍然是为非专业读者写的科学读物的经典。

在本书中,我尽力给广义相对论一个新鲜的表述。天文观测的新技术大大增加了人们探索宇宙深度的能力。古典的天文学家只有通过厚厚的大气层并且借助于望远镜和分光镜在可见光范围内才能观察到地球之外的物体。今天的探索者能将他的仪器送到大气层上面的高处,能利用从天体发来的无线电波、宇宙射线和 X 射线,新天体(如类星体、X 射线源以及许多还没有与可见物体相证认的天体)的发现就是应用这些新技术的成果。除了对这些奇异天体本身的兴趣之外,还存在很大的希望,即对它们的研究可能最终为了解整个宇宙的历史和结构作出贡献。

这些新视野的打开促使我相信,非专业读者需要一本关于广义相对论的新颖入门书,因为广义相对论代表着通向物理世界内在本质的一种真正基本的途径。在这本书中,我将试图让读者领略牛顿的引力理论