



前沿零距离

# 时空的乐章

## 引力波百年漫谈

卢昌海 著

引力波究竟是什么？

引力波探测的意义何在？

什么样的物理过程会发射引力波？

爱因斯坦在引力波研究上栽过哪些跟斗？

宇宙中最「亮」的爆炸为什么是「黑暗」的？

中子星双星的合并为什么是黄金的最可能来源？

LIGO之前

我们如何

在本书中，

从理论和探

以及许许多

为什么不成功？LIGO又为什么成功？

经还小的扰动中推知出一对黑洞的合并？

悠久的历史足迹，用文字和数学两种语言，

来讲引力波的故事，并对上述问题——

——进行探究。

高等教育出版社

# 时空的乐章

引力波百年漫谈

卢昌海 著

高等教育出版社·北京

| 离

### 图书在版编目(CIP)数据

时空的乐章:引力波百年漫谈/卢昌海编著. -- 北京:高等教育出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-04-050988-5

I. ①时… II. ①卢… III. ①引力波-普及读物  
IV. ①P142.8-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第258359号

策划编辑 王丽萍  
插图绘制 于博

责任编辑 和静  
责任校对 张薇

封面设计 王凌波  
责任印制 尤静

版式设计 于婕

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 北京佳信达欣艺术印刷有限公司  
开本 787 mm×1092 mm 1/16  
印张 17.5  
字数 200千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepial.com.cn>  
<http://www.hepmall.com.cn>  
<http://lib.ahu.edu.cn>

版 次 2019年1月第1版  
印 次 2019年1月第1次印刷  
定 价 59.00元

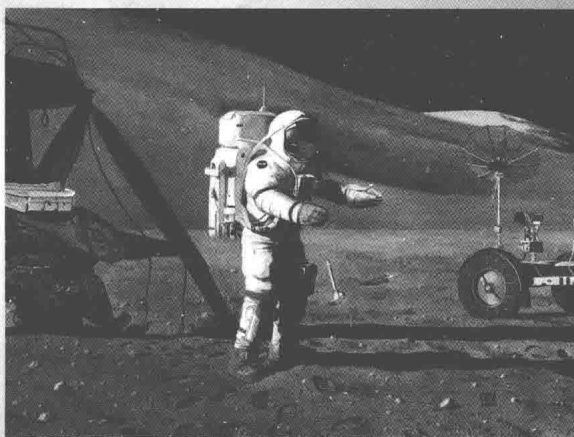
本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 50988-00

# 目 录

---

一. 称不上源头的源头	1
二. 从牛顿引力到爱因斯坦时空	13
三. 算不上先驱的先驱	27
四. 广义相对论的弱场近似	33
五. 单极、偶极和四极辐射	41
六. 从难以置信的弱到不可思议的强	55
七. 拯救大兵爱因斯坦	67
八. 引力波探测的基本思路	81
九. 迈克耳逊干涉仪与共振质量探测器	89
十. 韦伯的“大棒”	95

十一. 风动, 幡动, 还是心动? . . . . .	107
十二. 脉冲星圆舞曲 . . . . .	121
十三. LIGO 那些人儿 . . . . .	139
十四. 实验之美 . . . . .	157
十五. 源的分析 . . . . .	165
十六. 致密双星的“死亡率” . . . . .	173
十七. 致密双星的“死亡序曲” . . . . .	185
十八. 致密双星的“死亡终曲” —— 真空篇 . . . . .	195
十九. 致密双星的“死亡终曲” —— 物质篇 . . . . .	207
二十. GW150914 —— 黑洞双星合并的发现 . . . . .	213
二十一. 比全部星星更“亮”的“黑暗” . . . . .	225
二十二. 更小、更远、更准 . . . . .	233
二十三. GW170817 —— 中子星双星合并的发现 . . . . .	239
二十四. 未来的乐章 . . . . .	253
后记 . . . . .	259
参考文献 . . . . .	263
名词索引 . . . . .	269
人名索引 . . . . .	274



— .

称不上源头的源头



2016年2月11日,美国激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory,简称LIGO)宣布探测到了引力波.这是在经过近半个世纪的不成功尝试之后,人类首次探测到了这种曾被爱因斯坦(Albert Einstein)预言过的现象.LIGO探测到引力波的消息激起了媒体和公众的极大兴趣,甚至一度使LIGO网站因访客过多而瘫痪.LIGO探测到的引力波来自距我们约13亿光年的一对黑洞的合并,那对黑洞的质量均数十倍<sup>①</sup>于太阳质量,其中数倍<sup>②</sup>于太阳质量的巨大部分在合并过程中转变成了能量,以引力波的形式辐射了出去.这种引力波的最大功率——单位时间内辐射出的能量的最大值——甚至超过了可观测宇宙中所有星星辐射功率的总和,实在是壮丽到了极致,而它被LIGO探测到的扰动幅度却比原子核的线度还小得多,又实在是精微到了难以想象.

这种壮丽而又精微的现象背后有一连串引人入胜的问题,比如:引力波究竟是什么?什么样的物理过程会发射引力波?LIGO之前的引力波探测为什么不成功?LIGO又为什么能成功?我们如何从LIGO探测到的比原子核的线度还小得多的扰动中推知出一对黑洞的合并,甚至还推算出黑洞的质量及合并过程中辐射出的能量?……最后但并非最不重要的是:观测引力波的意义何在?这一领域的前景何在?在本书中,我们将沿着长长的历史足迹,用文字和数学两种语言,从理论和探测两个方面,来讲述引力波的故事,并对上述问题——以及许许多多其他问题——进行探究.

往历史足迹中看,引力波的基础是引力理论,引力理论的源头则在一个几乎称不上源头的地方.

让我们就从那个称不上源头的源头开始讲述引力波的故事吧.形容一个孩子出生,乃至形容一个新生事物的诞生,有一个很

---

① 具体地说是分别约36倍和29倍.

② 约3倍.



俗套的词语,叫做“呱呱坠地”.我们撇开“呱呱”不论,且说说“坠地”:重物会“坠地”是人类最原始的经验之一,它的幕后推手则是引力.因此从某种意义上讲,引力理论的诞生是真正的“呱呱坠地”——不只是形容,而真正是源自对重物“坠地”的观察.

在这类观察中,最著名、影响最大的论述出自公元前4世纪的古希腊哲学家亚里士多德(Aristotle).在他的《论天》(On the Heavens)一书中,亚里士多德对物体的运动进行了详细分析,其中针对单一质地的重物的下落运动(即“坠地”),他给出了这样的论述:

金、铅,或任何其他有重物体的下落运动的快慢正比于它的大小.

这一论述中下落运动的“快慢”指的是——或者说接近于——后世所说的速度还是加速度?亚里士多德未作直接说明,不过从他的其他论述中可推测那是指速度<sup>③</sup>.类似地,这一论述中重物的“大小”指的是后世所说的体积、质量还是重量?他也未明说,不过由于对单一质地的重物来说,这几者是互成正比的,故无须区分.借助这些词义上的澄清,我们可用现代符号将亚里士多德的重物下落规律表示为:

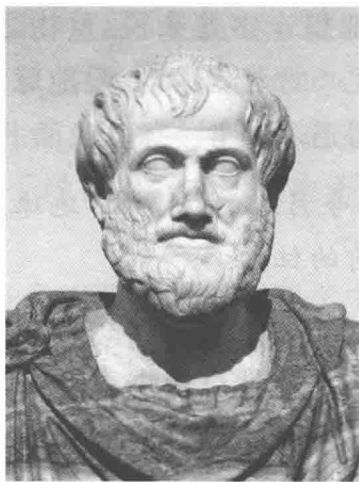
$$v \propto m \quad (1.1)$$

其中  $v$  是重物的下落速度,  $m$  是重物的质量.

以时间之早、知名度之高及影响力之大综合而论,亚里士多德

---

<sup>③</sup> 亚里士多德的很多著作是由授课或听课笔记拼合而成的,有些甚至是在他去世多年之后才成文的(因此严格讲,所谓亚里士多德的观点其实有一部分乃是署名为亚里士多德的观点),故结构相当松散,重复累赘、主题分拆之处比比皆是,常需相互比照理解或诠释.另外要说明的是,不能将亚里士多德未对“快慢”的含义作直接说明视为他的疏漏,因为我们这里所做的乃是用后世的概念去套他的论述,以便于现代读者理解,在亚里士多德自己的时代是不存在这些概念的,从而未作直接说明是很正常的.对后文的其他类似分析亦当作如是理解.



亚里士多德 (384 BC—322 BC)

的重物下落规律称得上是引力理论的源头. 当然, 这一源头与现代引力理论之间横亘了 2300 多年的岁月, 两者无论从明晰性还是正确性上讲, 都差得很远. 事实上, 尽管澄清了词义, 亚里士多德的重物下落规律依然问题多多. 比如一般的重物下落哪怕在近似意义上也不是匀速的, 却被当成了匀速, 这些就不站在后世的高度上细究了<sup>④</sup>.

但有一点仍值得说明, 那就是我们虽将亚里士多德的重物下落规律视为引力理论的源头, 但在亚里士多德时代是不存在“引力”一词所包含的“万有引力” (universal gravity) 概念的. 不仅如此, 亚里士多德的重物下落规律甚至连地球引力场这一特例下的引力效

---

<sup>④</sup> 若一定要细究的话, 则亚里士多德的重物下落规律在一种特定情形下是近似成立的, 那就是将规律中的速度理解为重物在特定流体中下落时的终端速度 (terminal velocity)——也就是重力与流体阻力平衡时的速度. 但即便作这样的理解, 仍需进一步要求重物的下落运动是所谓的低雷诺数 (low Reynolds number) 运动, 因为这时流体的阻力正比于重物的下落速度, 而重力正比于重物的质量, 故两者的平衡意味着终端速度正比于质量. 不过低雷诺数这一条件对普通物体在空气中从普通高度的下落往往是不成立的.

应都算不上, 因为对亚里士多德来说, 重物之所以下落, 乃是因为它们有趋向“宇宙中心”的天然运动, 跟地球无关. 在《论天》一书中, 亚里士多德这样写道:

若将地球移到如今月球的位置上, 地球上的东西将不再落向它, 而是会落向它目前的位置.

这句话清楚地显示出, 亚里士多德心目中的重物下落并不是落向地球, 而是落向碰巧被地球占据着的当时所谓的“宇宙中心”, 若将地球移走, 重物是不会被地球吸引走的. 从这个意义上讲, 亚里士多德的重物下落规律以现象而论虽是对引力效应的一种描述, 就本意而言, 却跟后世所说的引力理论有着显著区别, 因此我们称这一源头为“称不上源头的源头”.

虽然用后世的标准来衡量, 亚里士多德的重物下落规律无论从明晰性还是正确性上讲都问题多多, 但在 2300 多年前, 这样的论述较之普通人的日常观察, 乃至普通哲学家的定性论述仍有一个突出的优点, 那就是涉及了数量关系——这也是我们之所以将它视为引力理论源头的原由. 在人类探索自然的历史上, 从定性的观察和论述过渡到数量关系是一种重大进展, 因为数量关系的出现不仅意味着定量表述的开始, 而且也开启了定量检验的大门<sup>⑤</sup>.

不过亚里士多德本人并没有迈进那扇大门, 因为他注重的乃是自然现象, 对在后世科学中扮演重要作用的实验却颇为轻视, 视之为人为现象.

由于只注重自然现象, 亚里士多德的重物下落规律虽涉及了定量表述, 实际上却连定性观察的基础都很薄弱, 而基本是纯粹思辨的结果. 这也并不奇怪, 因为自然现象——尤其是像重物下落那

---

<sup>⑤</sup> 当然, 亚里士多德的重物下落规律并非那个时代对自然现象的唯一量表述, 古代的天文观测也具有令人瞩目的定量性, 不过对于日常现象, 定量表述在当时还不多见.

样偶然发生的自然现象——不受观察者控制,从而往往出现在观察者未作准备的情形下,并且常常转瞬即逝,观察者只能作粗略而片面的观察.粗略而片面的观察,加上闭门造车式的纯粹思辨,用这种重思辨轻实证的手段得出既不明晰也不正确的结论是不足为奇的<sup>⑥</sup>.

遗憾的是,在实证意识薄弱的早期科学中,从权威的影响中走出来是不容易的,因此历史用了很长的时间才完全摆脱亚里士多德的重物下落规律.

当然,在完全摆脱之前,零星的异议也是有的.比如公元前1世纪的罗马诗人兼哲学家卢克莱修(Titus Lucretius Carus)在其著名长诗《物性论》(On the Nature of Things)中就曾写道<sup>⑦</sup>:

物体在水和稀薄空气中下落时,它们的下落速度必然正比于重量,因为水和空气不能以同样的程度阻碍它们,而是更容易在重物面前退让;另一方面,真空在任何时候、任何方向上都不能对任何物体构成阻碍,而是按其本性持续退让,由于这个缘故,任何物体哪怕重量不同,在真空中都必然以相同的速度下落.

严格讲,卢克莱修这段文字算不上是对亚里士多德重物下落理论的直接异议,而只不过是在认可后者的同时,在后者所考虑的情形之外提出了真空中物体的下落速度与质量无关的附加观点.而且就连这附加观点也并非卢克莱修的独创.事实上,亚里士多德自己在《物理学》(Physics)一书中就曾提出过同样的观点,只不过他

---

<sup>⑥</sup> 重思辨轻实证并非亚里士多德的个人特色,事实上,思辨直到17世纪的法国哲学家笛卡儿(René Descartes)乃至某些更晚近的哲学家那里,仍被视为是知识的可靠来源.

<sup>⑦</sup> 《物性论》是用所谓“抑扬六步格”(dactylic hexameter)的韵律撰写的,翻译版本众多,有诗歌型的,也有非诗歌型的,这里是从非诗歌型的英文版转译的,只译含义,不管韵律.

以这一观点跟自己的重物下落规律相矛盾为由, 得出了真空不能存在的结论, 而不像卢克莱修那样给予了认同.

用现代符号来表示, 被亚里士多德提出过, 又被卢克莱修所认同的这一真空中的重物下落规律可以写成:

$$v = \text{常数} \quad (1.2)$$

不过这一规律虽在一定程度上往后世的重物下落理论又靠近了一步——因为具备了重物的下落规律与质量无关的重要特征, 却跟亚里士多德的重物下落理论一样是纯思辨的, 而且同样是针对速度而非加速度的.

随着时间的推移, 开始有人从经验乃至实验的角度对亚里士多德的重物下落理论提出了直接并且更细致的异议. 比如公元6世纪的神学家兼学者菲罗波努斯 (Joannes Philoponus) 在注释亚里士多德著作时曾经指出:

如果你让一个比另一个重好多倍的两个重物从同样的高度落下, 你会看到运动所需的时间并不依赖于重量之比, 而是相差很小.

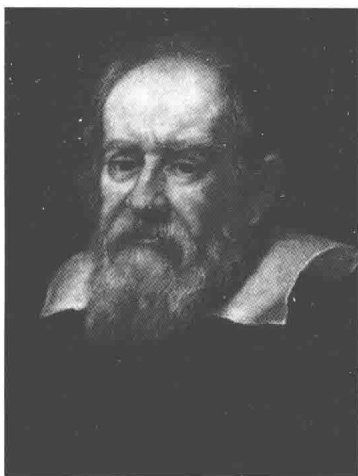
菲罗波努斯的这一异议跟晚了1000多年的伽利略 (Galileo Galilei) 对亚里士多德重物下落理论的质疑是相当接近的, 后者在1638年出版的名著《关于两门新科学的对话》(Dialogues Concerning the Two New Sciences) 中对亚里士多德是否用实验检验过自己的重物下落规律表示了“高度怀疑”, 并且以代表伽利略本人的萨耳维亚蒂 (Salviati) 与代表亚里士多德学说诠释者的辛普里修 (Simplicio) 对话的形式写道<sup>⑧</sup>:

亚里士多德说“一个从一百肘尺高处下落的一百磅铁球在一

---

<sup>⑧</sup> 引文中的肘尺 (cubit) 是一种粗糙的古代长度单位, 定义为人的前臂长度. 一般认为, 古希腊的肘尺约相当于 0.46 米.

个一磅铁球下落一肘尺之前就能落地”。我说他们将同时落地。你通过实验发现大的比小的领先两个手指的宽度,也就是说,当大的落地时,小的离它只有两个手指的宽度。我想你该不会将亚里士多德的九十九肘尺藏在这两个手指的背后,或只提我的小误差而对他的错误默不作声吧。



伽利略 (1564—1642)

单纯从对上述结论的陈述上讲,伽利略的质疑跟菲罗波努斯的异议并无太大分别,都是既指出了亚里士多德的错误,也承认了不同的重物往往不会严格地同时落地(因为有空气阻力的影响),从而有基本相同的周详性。但伽利略的质疑比菲罗波努斯的异议著名得多,因为伽利略作为现代实验科学的奠基人,在结论之外所做的“功课”要充分得多,对重物下落的研究也远比前人的系统和深入得多,不仅指出了亚里士多德的错误,而且确立了重物下落的正确规律。

与亚里士多德所推崇的自然现象相比,实验由于是在观察者有准备乃至精心设计的条件下进行的,不仅可以得到精密得多的

观测结果, 而且还能远远超出自然现象的涵盖范围. 比如在伽利略的时代, 研究重物下落规律的一个很大的困难是地球的表面重力加速度太大, 重物很快就获得了太大的速度, 加上当时的计时手段很不精密, 使人们难以对下落方式进行精密测定. 而伽利略通过诸如斜面上的滚球那样的实验“稀释”了重力, 从而确立了重物下落的正确规律为匀加速运动——当然, 假设空气阻力可以忽略. 用现代符号来表示, 伽利略所发现的重物下落规律为 (其中  $a$  为加速度):

$$a = \text{常数} \quad (1.3)$$

伽利略的发现不仅再次确立了重物的下落规律与质量无关的重要特征, 而且将其中的核心物理量由速度改为了加速度. 自那之后, 由于实验科学的崛起, 证据以无法遏制的步伐趋向雄辩, 亚里士多德的重物下落规律很快就被完全摆脱了. 为了纪念伽利略的巨大功绩, 1971 年, 美国登月飞船“阿波罗 15 号” (Apollo 15) 的宇航员斯科特 (David R. Scott) 在月球表面无空气阻力的环境下, 向地球上的亿万电视观众演示了一个铁锤和一片羽毛以相同方式落向月面的情形, 为伽利略的重物下落规律作了极富戏剧性的展示.

不过伽利略对重物下落规律的研究也有一个显著的局限, 那就是只涵盖了运动学——即重物是如何下落的, 而未涉及动力学——即重物为什么会下落, 因为伽利略同样没有万有引力的概念. 不过伽利略的研究虽只涵盖了运动学, 他将核心物理量由速度改为加速度, 却为动力学研究乃至万有引力的发现埋下了伏笔.

万有引力的发现还得再等一个人.

一个“万有”的东西照说该是很容易被发现的, 为何“万有”引力却屡屡躲过人们的视线呢? 这是因为引力在普通物体之间十分微弱, 从而使经验范围内的引力效应分成了重物下落和天体运动

这两个貌似毫无关联的领域. 从这两个领域中洞察出相似性需要第一流的智慧, 而证明这种相似性则需要第一流的数学才能.

在伽利略去世的那一年 —— 1642 年 —— 一位兼具这种智慧和数学才能的科学巨匠诞生了, 他的名字叫做牛顿 (Isaac Newton).



