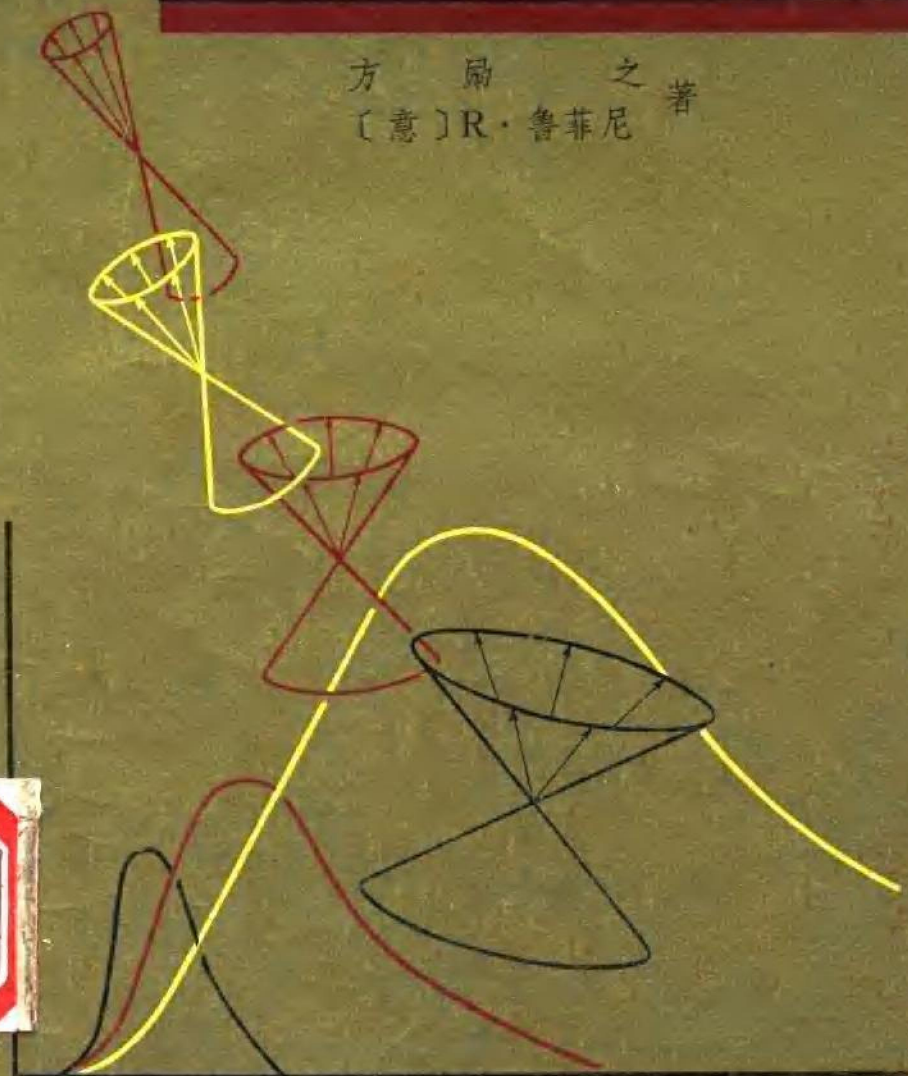


相对论天体物理的基本概念

方 扁 之 著
〔意〕R·鲁菲尼



1
(8)

上海科学技术出版社

相对论天体物理的 基本概念

方 励 之 著
〔意〕R.鲁菲尼

上海科学技术出版社

一九八三年五月六日

内 容 提 要

本书是一本导论性的著作,内容包括相对论的基本概念、弱场中的效应、致密星理论、黑洞、引力波和宇宙学。

本书是一本很好的入门书,可作为综合性大学物理系、天文系有关专业的高年级学生和研究生参考用书,也可供有关专业的研究工作者参考。

相对论天体物理的 基本概念

方励之 著

[意]R.鲁菲尼

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

总发行所上海发行所发行 江苏扬中印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 6 字数 146,000

1981年3月第1版 1982年6月第2次印刷

印数 4,601—8,900

书号: 13119·907 定价: (科五) 0.99 元

前 言

今年是爱因斯坦诞生一百周年，写这本小书，就是作为我们共同的纪念。

爱因斯坦不仅仅是一位伟大的物理学家，而且是人类的良知。他不仅相信科学能揭示出世界的和谐，而且相信科学有助于形成一个和谐的世界。

的确，在科学的发展中，凝聚着不同时代，不同民族的智者的心血。科学是没有国界的。科学从来也不冷遇任何人，对任何求助于科学的人，它总是敞开着大门。

由爱因斯坦奠基的相对论天体物理学，或许是最能体现爱因斯坦的上述信念的领域之一。只要看一下下面的一些历史事实，就清楚了：

中国古代天文学家关于公元 1054 年超新星的忠实而详尽的记录；

二十年代意大利物理学家费密等建立的简并态量子统计理论；

三十年代关于中子星理论的发展；

二十年代到五十年代关于蟹状星云的观测研究；

六十年代射电脉冲星的发现。

在这一系列最终导致中子星发现的科学进展中，古代与现代的文明之间，东方与西方的科学之间居然达到了那样紧密而协调的程度，在科学史上是罕见的。

这本书本身，也是东方与西方交流的产物。去年五月，作者之一的 R. 鲁菲尼应邀访问中国，当我们初次同登万里长城的时候，

逐渐发现我们之间竟有四项十分相近而又完全独立的工作。我们分别用不同的方法得到的中子星临界质量，一为 $3.2M_{\odot}$ ，一为 $3.18M_{\odot}$ 。当时，R. 鲁菲尼即提议合写一本书来表述东西方之间的文化对应的这又一个小小的事例。随后，在去苏州、杭州、广州的旅途中讨论了书的提纲。今年三、四月间，作者之一（方）应意大利林琴科学院之邀去罗马讲学。我们在罗马大学伽利略雕像旁的办公室里开始动手，并在同游比萨斜塔、古城佛罗棱萨、马哥孛罗的故乡威尼斯的旅途中，完成了初稿。

如果这本小册子，能在东方和西方这两种独立发展而又有密切交流的文化之间，再增添一点点新的联系，那我们的愿望就达到了。

在整理中文稿过程中，承褚耀泉同志协助，谨致谢意！

方 励 之

R. 鲁菲尼

1979. 9

目 录

前 言

第一章 广义相对论的基本概念	1
§ 1.1 天体物理问题的特点	1
§ 1.2 牛顿力学与绝对空间	3
§ 1.3 牛顿引力理论的困难	6
§ 1.4 狭义相对论与引力问题	10
§ 1.5 马赫原理	12
§ 1.6 等效原理	13
§ 1.7 局部惯性系	16
§ 1.8 时空度规	18
§ 1.9 测地线	21
§ 1.10 弯曲空间	24
§ 1.11 曲率和物质的关系	30
第二章 弱场中的效应	35
§ 2.1 引力红移	35
§ 2.2 Schwarzschild 度规	38
§ 2.3 绕地球运动的钟	39
§ 2.4 近日点的进动	42
§ 2.5 光线偏折	48
§ 2.6 雷达回波实验	52
§ 2.7 自转轴的进动	56
第三章 致密的星体	62
§ 3.1 历史的记录	62
§ 3.2 蟹状星云	66
§ 3.3 冷星的理论	72
§ 3.4 中子星	78
§ 3.5 脉冲星的发现	82
§ 3.6 脉冲星的基本性质	87

第四章 黑洞	93
§ 4.1 临界质量	93
§ 4.2 坍缩中的现象	96
§ 4.3 黑洞的类型	102
§ 4.4 黑洞的视界与黑洞的发射	104
§ 4.5 黑洞的证认	109
§ 4.6 脉冲双星 X 射线源	114
§ 4.7 涨落式 X 射线双星	118
§ 4.8 吸积盘的光谱特征	120
第五章 引力波	125
§ 5.1 $1/r$ 型的引力场	125
§ 5.2 偏离方程	127
§ 5.3 引力波的基本性质	128
§ 5.4 引力波的发射	132
§ 5.5 双星的引力辐射	133
§ 5.6 引力辐射阻尼的观测证实	136
第六章 相对论宇宙学	142
§ 6.1 无限宇宙与牛顿理论两者之间的困难	142
§ 6.2 均匀各向同性宇宙的时空	143
§ 6.3 视星等红移关系	146
§ 6.4 夜黑问题	153
§ 6.5 计数	155
§ 6.6 $R(t)$ 的动力学方程	157
§ 6.7 宇宙的年龄	161
§ 6.8 背景黑体辐射	166
§ 6.9 氦丰度	173
§ 6.10 星系的形成	175
§ 6.11 极早期宇宙	181

第一章 广义相对论的基本概念

§ 1.1 天体物理问题的特点

天体物理的特点之一,是它经常要讨论大的时空尺度。比如,遥远的星系发射光,我们接收光,这是天体物理最常遇到的事件。天体物理所要讨论的常常就是这些相距很远的事件之间的关系。

为了描写事件,我们要用一定的参考系。在给定的参考系中,取定坐标之后,每个事件就可以用四个数来加以标志:三个空间坐标 \boldsymbol{r} 表示事件发生的位置;一个时间坐标 t 表示事件发生的时间。

为了描写我们接收到光这个事件,最方便的参考系是取相对于我们自己为静止的参考系,或者取相对于银河系、相对于本星系群为静止的参考系。

但是,另一方面,对于遥远的星系 G 的发射光这件事来说,最好取相对于 G 为静止的参考系。或者,取相对于 G 所在的星系团为静止的参考系。在这个参考系中,发光事件的坐标是 \boldsymbol{r}_G, t_G 。显然,一个必须解决的问题是:我们如何将一个事件在某一参考系中的坐标变换成另一参考系中的坐标?只有这样,我们才能知道,在我们的坐标系中,发光事件的坐标 \boldsymbol{r} 及 t 应当是什么。

适用于牛顿力学的坐标变换是伽利略变换,这就是如下熟知的一组公式:

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \right\}$$

其中 (t, x, y, z) 表示在惯性坐标系 K 中一个事件的坐标, 而 (t', x', y', z') 表示同一事件在另一惯性系 K' 中的坐标. K' 相对于 K 以速度 v 沿 x 轴运动.

但是, 在天体物理中一般不能再用伽利略变换. 原因有两方面.

其一, 在天体物理中经常要遇到高速情况. 比如, 刚才讨论的星系 G 发射光和我们接收光这一问题, 如果星系 G 与我们的距离足够远, 一般地说, 星系相对于我们是有很大的速度的. 这样, 我们不能使用仅适用于低速情况的变换.

其二, 银河系和星系 G 之间往往还存在着加速度, 这种加速度是由引力引起的. 因此, 我们还必须寻求适用于有引力作用情况的坐标变换.

这后一点, 是天体物理的又一个特点: 只有在天体物理问题中, 引力才起主导作用. 反之, 在地面实验室范围中的物理学, 引力的作用一般是次要的.

在几种基本的相互作用中引力是最弱的一个. 一个电子和一个质子之间的静电作用要比它的引力作用约大 $e^2/Gm_em_p \approx 10^{39}$ 倍, 因此, 在原子物理中, 我们完全忽略了引力的影响. 类似地, 在核物理中, 也可以忽略核子之间的引力作用.

在大尺度上, 则相反, 引力占据了主导的地位. 因为引力是长程力, 在大范围上核子之间的短程相互作用是完全可以忽略的. 原子、分子之间的范德瓦尔斯力, 按 $1/r^7$ 规律下降, 当原子之间大于 10^{-7} 厘米时, 这种力也就很小, 可以略去了. 所以, 对于分布在真空中, 相距很远的体系来说, 强的短程力都不再起作用.

静电力虽然也是一种长程力,但是静电力是可以屏蔽的,宇宙间有正电荷,也有负电荷.而且,天体平均地说,是电中性的,即正电荷等于负电荷,以致长程的静电力全都被屏蔽掉了.引力却是不可屏蔽的,因为万物皆相互吸引,这与静电力是十分不同的.

总之,对于大尺度时空上的问题,不可避免地要遇到引力.为了弄清楚天体尺度上的事件,首先就需要有正确的引力理论.牛顿引力理论在弱场、低速的问题中,是十分正确的.然而,相对论天体物理所要讨论的往往是强场,或是高速,或者是二者兼而有之的情况.这就是天体物理的特点所提出的特有的问题.

§ 1.2 牛顿力学与绝对空间

牛顿第二定律是整个牛顿力学体系的核心.它的最基本的表述是:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}, \quad (1.1)$$

其中 m 是物体的质量, \mathbf{a} 是它相对于某一参考系的加速度, \mathbf{F} 是所有其他物体对这个物体的作用力.

从物理上看,牛顿第二定律并不对任何参考系都适用.因为,力 \mathbf{F} 是描写宇宙间所有其他物体对该物体的作用的,这个定义不涉及坐标系,它应当是一个不随坐标系变化而变化的量.然而,另一方面, \mathbf{a} 则是相对于某一坐标系的加速度.这样,当我们变换参考系时,一般说 \mathbf{a} 是变化的,而 \mathbf{F} 则不变.所以,如果在某个参考系中 \mathbf{F} 与 $m\mathbf{a}$ 相等,则在新的坐标系中一般就不相等.比如,我们选择一个新的参考系,它相对于原来的参考系具有加速度 \mathbf{A} ,那么,在新参考系中,物体加速度为 $\mathbf{a}' = \mathbf{a} - \mathbf{A}$,所以,在新参考系中 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}'$ 不再成立,而应当是 $\mathbf{F} = m(\mathbf{a}' + \mathbf{A})$,而这并不是牛顿第二定律.

牛顿力学所适用的一类参考系是所谓惯性系.惯性系之间作

相对的匀速运动。可见惯性系在牛顿力学体系中占据着极为特殊的地位。

不过，我们要探讨更为深一层的问题：为什么自然界单单挑出这一类参考系是“优越”的？如何确定一个参考系是不是惯性的？有一种常见的看法，认为惯性系本身是不作加速运动的、也没有转动。果然如此的话，我们不禁又要问：这个加速或旋转又是相对于什么来说的呢？

牛顿答复了所有的问题，其关键是引入了绝对空间概念。相对于绝对空间的无转动无加速的参考系才是惯性系。这个绝对空间是一个“与外界任何事物无关的，总保持着同样情况的不变的”空间。按照牛顿的观点，我们可以用简单的实验来确定相对于绝对空间的加速度或转动运动。

例如，如果我们向前加速，则我们看到房屋向后加速，然而，此时并没有发现向后的力作用到房屋上。所以，按照牛顿的说法，观测到的房屋加速并不是牛顿第二定律的结果，而是由于观察者相对于绝对空间的加速运动引起的。

再如，一桶水在转动，我们如何来判断它的转动是绝对的（即相对于绝对空间有转动），抑或是相对的（即由观测者本身的转动而引起的视效应）？牛顿的判据是：如果我们看到桶中的水面是凹的，它就有绝对转动，相反，若水面是平的，它的转动就仅仅是一种视效应，即由观察者本身的绝对转动引起的。

然而，尽管牛顿给出了绝对加速以及绝对转动的判据，但是他未能给出绝对速度的判据。实际上，远在牛顿之前，早已有人意识到我们是找不到“绝对静止”的基准的。远在两千年前，中国的古籍《尚书纬·考灵曜》一书中就有这样一段话：“地恒动不止，而人不觉，譬如人于舟中，闭窗而坐，舟行而人不觉也”。伽利略在论述这个问题时，用了完全相同的比喻，他在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》一书中写道：

“把你和一些朋友关在一条大船的甲板下的主舱里，让你们带着几只苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫，舱内放一只大碗，其中有几条鱼，然后，挂上一个水瓶，让水一滴一滴地滴到下面的一个宽口罐里。船停着不动时，你留神观察，小虫都以等速向舱内各方向飞行，鱼向各个方向随便游动，水滴滴进下面的罐中，你把任何东西扔给你的朋友时，只要距离相等，向这一方向也不必比另一方向用更多的力，你双脚齐跳，无论向哪个方向跳过的距离都相等。当你仔细地观察这些事情之后，再使船以任何速度前进，只要运动是匀速的，也不忽左忽右地摆动，你将发现，所有上述现象丝毫没变化。你也无法从其中任何一个现象来确定，船是在运动还是在停着不动。即使船运动得相当快，在跳跃时，你将和以前一样，在船底板上跳过相同的距离，你跳向船尾也不会比跳向船头来得远。虽然，当你跳到空中时，脚下的船底板向着你跳的相反方向移动。你把不论什么东西扔给你的同伴时，不论他是在船头还是在船尾，只要你自己站在对面，你也并不需要用更多的力。水滴将象先前一样，滴进下面的罐子里，一滴也不会滴向船尾。虽然水滴在空中时，船已行驶了许多柞*。鱼在水中游向水碗前部所用的力并不比游向水碗后部来得大，它们一样悠闲地游向放在水碗边缘任何地方的食饵。最后，蝴蝶和苍蝇继续随便地到处飞行，它们也决不会向船尾集中，并不因为它们可能长时间留在空中，脱离开了船的运动，为赶上船的运动而显出累的样子。”

总结这些话就会得到这样的结论：绝对速度是不可测量的。这是第一个否定绝对空间概念的有力的论据。

再有，在牛顿的体系中，绝对空间是一个物理实在，即一个有物理作用的客体，因为它会影响到物体的动力学性质。比如，只有相对于它来说，惯性定律才是成立的，这是一种十分强的影响。但是，物质的运动反过来却不能对绝对空间有任何影响，因为它“与外界任何情况无关”。这种没有反作用的单向关系，在物理上是不能令人满意的。

第三个反对绝对空间的理由，来自观测上的经验。我们知道，

* 一柞大体是从拇指尖到小指尖伸开之长，它是古代的一种长度单位。

地球是一个相当好的近似的惯性系，我们在观察实验室中的现象时，都是以这个惯性系为基准的。但是，在研究行星的运动时，我们必须选择以太阳及其近邻星平均静止的参考系，而不选择地球参考系，因为在行星的动力学中已经表现出太阳参考系比之地球参考系是一个更好的惯性系。进一步在研究星系动力学时，我们又发现，银河及近邻星系平均静止的参考系更好，它比太阳参考系更加接近理想的惯性系。根据这种经验，我们可以逐步发现越来越理想的惯性系。这就是说，只要我们取更大尺度的天体系统的平均静止参考系，它就接近理想的惯性系。由此可见，从实际选取参考系来说，最理想的惯性系应当是相对于整个宇宙中的物质为平均静止的参考系。由于宇宙在膨胀运动着，因此，只有选择宇宙膨胀表现出各向同性的参考系，似乎才是最理想的参考系。这个经验性的推测表明，所谓牛顿的绝对空间，即最理想的最优越的惯性系，并不是“与外界任何情况无关的”，而是与大尺度上的天体的分布及运动有极密切的关系。

§1.3 牛顿引力理论的困难

再回到牛顿第二定律 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ ，其中 m 是物体的质量，是惯性的一种度量，即物体反抗加速的能力，它叫做惯性质量。一般的作用力，是与物体的惯性质量没有关系的。例如，电磁力只决定于电荷、磁矩等等。

然而，在牛顿的引力理论中，力 \mathbf{F} 的大小也与 m 有关。若 \mathbf{F} 是由 N 个质量分别为 m_1, m_2, \dots, m_N 的物体作用到 m 上的引力，则力 \mathbf{F} 可以写成

$$\mathbf{F} = - \sum_{i=1}^N \frac{Gmm_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3}, \quad (1.2)$$

其中 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N$ 为各物体的位置矢量， $\mathbf{r}(t)$ 为物体 m 的位置

矢量(见图 1.1)。这样,质量 m 既是物体的惯性度量,同时又决定引力的大小,即决定该物体对其他物体产生的引力场的响应,所以它又可以称为响应引力质量。

质量 m 的这种双重作用导致一个很奇特的结果。当我们将 (1.2) 代入 (1.1) 后,得到

$$\mathbf{a} = -G \sum_{i=1}^N \frac{m_i (\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3}. \quad (1.3)$$

这个方程中没有描写物体 m 的内在物理性质的物理量。换言之,如果只有引力相互作用,则不论物体 m 的本身性质如何,只要初速相同,任何物体的运动轨道都是一样的。这一点伽利略已经认识到了,他相信,当不同的物体以同样的初速从同样的高度落下时,将耗费同样的时间。为了精确地检验这种观点,他利用光滑的斜面来观测

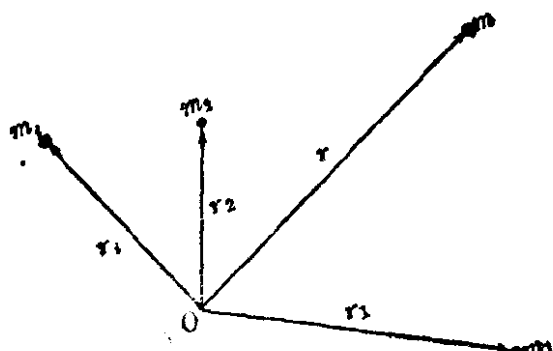


图 1.1

物体沿斜面下滑的运动,由于下滑的速度比垂直下落的速度小,便于进行测量。他发现,当不同的球从斜面上滑下时,运动时间是一样的,的确与物体的种类并无关系。

现在,我们来更仔细地区分一下质量的各种含义。我们用 m_I 表示惯性质量,它是牛顿第二定律中的质量;用 m_G^P 表示响应引力质量,它出现在 (1.2) 中。(1.2) 中的 m_i 是表示物体 i 对其他物体的引力作用的大小,这种意义的质量可以称做作用引力质量,用 m_G^A 来表示。

伽利略的斜面实验证明了,对同一物体,

$$m_I = m_G^P,$$

或者更确切地说,证明了对于任何物体,

$$\left(\frac{m_I}{m_G^P}\right) = \text{普适常数.} \quad (1.4)$$

1889年,厄缶(R. V. Eötvös)更精密地证实了这个关系. 他的实验表明,对于木头及铂两种质料构成的物体来说, $\left(\frac{m_I}{m_G^P}\right)$ 值在 10^{-9} 的精度内是相等的. 1964年,迪克(R. H. Dicke)等人得到,太阳对铝和金产生的加速度在 10^{-11} 的精度上是相等的. 因此,我们可以把(1.4)看作是一条自然界的物理规律.

至于响应引力质量与作用引力质量二者的相等,并不是一条独立的规律,它可以由牛顿第三定律证明出来. 如图1.2,考虑两个物体1及2,它们的响应及作用引力质量分别是 $m_{G_1}^P$, $m_{G_1}^A$ 及 $m_{G_2}^P$, $m_{G_2}^A$. 按(1.2), 2对1的作用力是:

$$\mathbf{F}_{2 \rightarrow 1} = -G m_{G_1}^P m_{G_2}^A \frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^3};$$

1对2的作用是:

$$\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = -G m_{G_2}^P m_{G_1}^A \frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^3}.$$

如果要求这一对力满足牛顿第三定律,即作用等于反作用 $\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = -\mathbf{F}_{2 \rightarrow 1}$, 则应当有

$$m_{G_1}^P m_{G_2}^A = m_{G_2}^P m_{G_1}^A,$$

亦即
$$\frac{m_{G_1}^P}{m_{G_1}^A} = \frac{m_{G_2}^P}{m_{G_2}^A}.$$

这表示响应引力质量与作用引力质量之比也是个普适的常数. 取定常数为1, 即有 $m_{G_1}^P = m_{G_1}^A$.

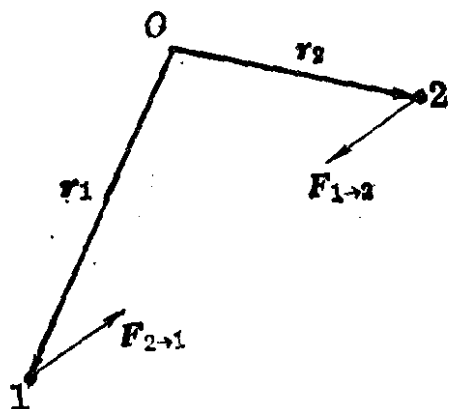


图 1.2

总之,在纯引力的情况,物体的动力学方程中是没有 m_I 及 m_G^P 的. 对于非引力情况的动力学方程,只有 m_I 出现.

这样,在牛顿的体系中,就会引起人们提出这样一个问题: 质

量 m_I 本来是作为重要的动力学量引进的, 但是在讨论引力场中的动力学问题时, 却偏偏又抛掉了它, 这是为什么? 或者说, 在牛顿的引力理论体系中, 不仅有(1.1)和(1.2)两条规律, 实质上隐含着(1.4)这条外在的规律. 为什么会有(1.4)? 这些都是理论上的疑问.

尽管如此, 牛顿引力理论是物理学史上第一个最成功的动力学. 最出名的应用是在天体力学方面, 海王星预言的证实成为标志它的力量的顶峰. 然而, 牛顿力学的第一个真正的困难, 甚至是失败, 也恰恰是在天体力学领域中. 这就是关于水星轨道的计算.

从1850年开始, 天文观测已经指出牛顿力学关于水星轨道的计算并不完全符合观测的结果. 我们知道, 如果没有其他行星的影响, 水星绕太阳的轨道应当是一个椭圆(图1.3a). 然而, 由于其他行星的扰动, 使水星的轨道椭圆长轴也发生缓慢的转动, 转动率是每一百年 1.5° . 这叫做水星的进动. 进动使轨道呈花瓣状(图1.3b).

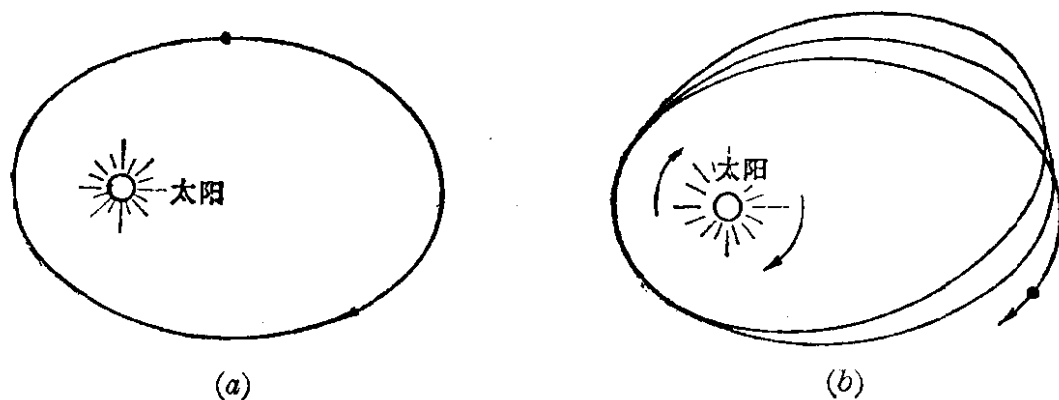


图 1.3 水星轨道近日点的进动

按照牛顿力学的计算, 水星进动值应当是每一百年

$$\Delta\phi_N = 5557''.62 \pm 0''.20,$$

此值中也包括了由于地心坐标系的转动带来的影响, 而观测值是

$$\Delta\phi_0 = 5600''.73 \pm 0''.41,$$

二者之间的差是

$$\Delta\phi \equiv \Delta\phi_0 - \Delta\phi_N = 43''.11 \pm 0''.45.$$

这个差值是很小的，每个世纪不到一角分。它大约相当于一个一毫米的物体在4米远处的张角。

最初认为，可能在太阳和水星之间还有另一个未被观测到的行星，是它引起了水星进动中的偏差。当时甚至已给这个未知的行星命名为火神星 (Vulcan)。许多人相信这个解释，因为有海王星的先例，海王星的存在正是通过天王星运动中的异常而被预知的。但是，历史并没有重演，火神星一直没有被发现，也没有证实存在任何其他的能导致水星进动异常的质量分布。

总之，小小的 $43''$ /百年，是牛顿万有引力体系中的大困难。

§ 1.4 狭义相对论与引力问题

麦克斯韦建立了电动力学后，预言了电磁波的存在。这种波的速度是 c ，它也就是光速。问题是， c 相对于谁来计算。最初认为是相对于以太而言的。所谓以太就是电磁波借以传播的媒质，就象声波是借助空气而传播一样。

以太观念提出后，很自然会想到以太或许就是牛顿体系中的绝对空间，在这个基础上，就可以把电磁学和经典力学两大体系统一起来了。

因此，一度有许多实验企图去发现地球相对于以太的速度，也就是企图用电磁学的方法测定绝对运动的速度，从而规定出绝对空间。如果地球象一条大船，在以太中浮游，那么，在地球上沿着不同方向传播的光，速度大小必定不一样。但是，实验结果却没有发现不同方向的光速有什么差别。结论可能是，在地球附近的以太，完全被地球带着走。因此，在地面的实验中观察不到光速对方向有任何依赖关系。但是，这种观点也站不住脚，因为它与光行差的观测结果相矛盾。