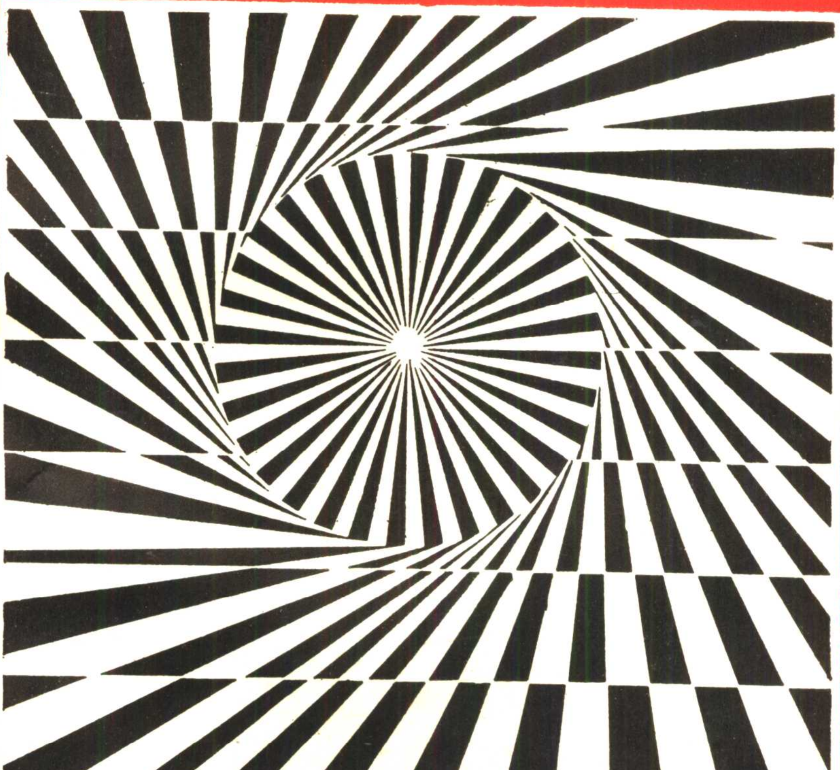
陌生的时空理论和运动定律

葛旭初等 著



科学技术文献出版社

内 容 简 介

相对论（狭义相对论和广义相对论）不仅大大地促进了物理学的发展，而且对其他科学领域也产生了极其深远的影响，并获得了广泛的应用。

本书以相对论发展中的重大事件为中心，对每一事件的发生发展和逐步解决的过程进行由浅入深的论述，使不同层次的读者都能在不同程度上对相对论这一十分重要的理论有一个比较系统而深刻的了解。本书共有11节51个问题，既突出重点，又照顾一般；既突出了伟大科学家的功绩，又不忽视一般科学家的作用。语言浅显，道理深刻。

本书对从事物理学、物理学史、哲学、哲学史研究工作者，特别是大、中学物理教师和学生，都有一定的参考价值。

陌生的时空理论和运动定律

葛旭初　汪曙光　著

科学技术文献出版社出版

（北京复兴路15号）

北京昌平百善印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行　各地新华书店经售

*

787×1092毫米　32开本　5.75印张　120千字

1991年2月第1版　1991年2月第1次印刷

印数：1—1800册

科技新书目：233—110

ISBN 7-5023-1336-2/O·82

定价：3.00元

前　　言

人们长期生活在地球上，所接触的运动速度都远小于光速(每秒钟30万公里)，经受到的引力（称为弱引力），也都远小于太阳表面的引力，所以人们对由低速（地球上物体运动的速度）、中速（行星运动的速度）以及弱引力基础上总结出来的运动规律（时空概念和运动定律等）并不陌生，但对高速（接近于光速）运动和强引力作用下的运动规律，由于缺乏经验，所以必然感到陌生或离奇，因而不好接受。

狭义相对论是高速运动的理论，广义相对论则是强引力理论，它们都是近代物理学的伟大革命理论。这一理论不仅大大地促进了物理学的发展，而且对哲学也产生了极其深刻的影响，同时还在现代科学技术的各个领域中都得到广泛的应用。

本书系由张锡鑫教授主编的《物理学发展事件集系列丛书》中的一本，它以相对论发展中的重大事件为中心，按照辩证唯物主义观点，着重物理概念分析，尽量少用数学，对每一事件的发生发展和逐步解决的过程，进行了由浅入深的论述，从而使不同层次的读者都能在不同程度上对相对论这一十分重要的理论有一个比较系统而深刻的了解。正由于以事件为中心，所以既注意突出重点，又照顾了一般，既突出了少数伟大科学家的功绩，又不忽视一般有关科学家的作用，相信它对有关研究人员，特别是对大、中学物理教师会有一定的参考价值；对干部和学生以及科学爱好者有较大的启发和普及作用，使他们对这一陌生的时空理论和运动定律能够有一定的了解。

编者

1990年9月

目　　录

一、徘徊在经典物理学中的以太幽灵

翻开物理学发展史，就会发现一个在经典物理学中徘徊了三百多年的幽灵——以太。“以太”这个词，首先是由笛卡儿引入科学的。它是一种充满了一切透明物体和全部真空的媒质。它无重量无色无臭，不可捉摸。但在经典力学、光学和电磁学中却长期扮演着重要角色。它对物理学的发展起过积极作用，但同时又给物理学制造了不少的矛盾和困难。直到1905年爱因斯坦创立了狭义相对论，这种以太幽灵才最后得到了清算并让位给真空。

1. 牛顿力学中的以太

牛顿力学是经典物理学的基础，它在经典物理学中一直占有特殊的重要地位。为建立完整的力学体系，牛顿提出了绝对空间和绝对时间概念。牛顿运动第一定律中所说的动者恒动和静者恒静，从本质上讲都是相对于绝对空间说的。如果把牛顿的绝对空间和笛卡儿引进的以太结合起来考虑，人们就会很自然地提出绝对空间，也就是为以太所充满的空间，或者说以太应该是绝对空间的物质基础。在绝对空间里，以太应该静而不动。以以太为参照体建立的参考系，可称为绝对参考系。物体对绝对参考系的运动，可看成是绝对运动。绝对运动经历的时间，可称为绝对时间。大家知道，太阳、地球和其它星球都是沿着各自的不同轨道在以太中作绝对运

动的物体。而每个作绝对运动的星球或其它运动体按说也都可以视需要选为参考系。例如生长在地球上的人往往选取教室、实验室和运动场为参考系比较方便，这一类的参考系可称为地面参考系。又如乘坐火车或轮船外出旅行的人，往往选取火车或轮船来研究物体的运动比较方便。因上述这些参考系都对以太作绝对运动，故通常称它们为相对参考系。物体对相对参考系的运动，可称为相对运动。按照牛顿的观点，空间间隔和时间的长短都是不变量，就是说它们对绝对参考系是多少，对各种相对参考系也是多少。牛顿运动定律，首先对绝对参考系成立。至于对相对参考系能否成立，最终只能由实验来判定。凡牛顿运动定律能够成立的参考系，都称为惯性系；反之，则称为非惯性系。绝对参考系当然是标准的惯性系了。由实验知牛顿定律对地面参考系也能够较好地成立，所以地面参考系是一种较好的惯性系。又当火车或轮船对地面作匀速直线运动时，由实验知牛顿运动定律对火车或轮船参考系也基本上能成立。因此，对地面作匀速直线运动的火车和轮船参考系，也都是较好的惯性系。伽里略在《关于托勒玫和哥白尼两大世界体系的对话》一书中曾这样写道："把你和你的一些朋友关在一条大船甲板下的主舱里，……船停着不动时，你留神观察，……你把任何东西扔给你的朋友时，只要距离相等，向这一方向不比向另一方向用的力更大，你双脚齐跳，无论向哪个方向跳过的距离都相等。……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，所有上述现象都丝毫没有变化，你也无法从其中任何一个现象来确定，船是在运动还是静止不动"。在这里，船是相对于地面参考系静止或作匀速

直线运动的。因此，伽里略的上述引语可概括为：“一切力学过程，在任何惯性系中都是完全相同的，而且用任何力学实验都无法将两个惯性系区别开来”。此称为伽里略的相对性原理。作匀速直线运动的火车和轮船是较好的惯性系，作变速运动的火车和轮船又怎么样呢？只要考虑一下突然刹车时车中人向前倾倒的现象，就会知道牛顿运动定律对加速参考系就不再成立了。因此，对惯性系作加速运动的参考系就一定是一种牛顿定律不再成立的非惯性系。为说明牛顿定律对一切惯性系都同样成立，我们设想在惯性系K中立一直角坐标系$oxyz$。这样任意点P的位置，就都可以用坐标(x,y,z)表示。设另一惯性系K'对K系以速度u沿x轴作正向运动，且在K'系中也立一直角坐标系$o'x'y'z'$，令K'和K的x轴重合，y和z轴则分别平行，并假定时间$t=0$时两坐标系的原点重合如图1-1所示。

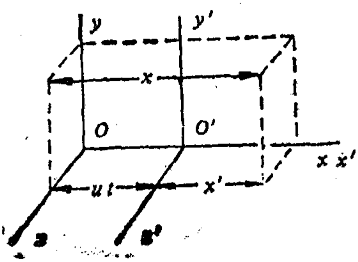


图1-1

由图1-1知任意点P在K系中的坐标x，y，z和在K'系中的坐标x'，y'，z'具有如下变换关系

$$x'=x-ut,\ y'=y,\ z'=z \qquad (1.1)$$

其中引用了牛顿的时间间隔和空间距离都是不变量的观点。（1.1）式称为伽里略变换。

速度是表述运动快慢和运动方向的物理量，一般用单位时间的位移来量度。设质点在一无限小时间间隔内对K系发

生的位移为$\overrightarrow{ds}$，则质点速度$\vec{v}=\frac{\overrightarrow{ds}}{dx}$，$\overrightarrow{ds}$在三个坐标轴方向上的分量为$\overrightarrow{dx}$，$\overrightarrow{dy}$，$\overrightarrow{dz}$，则$\vec{v}=\frac{\overrightarrow{dx}}{dt}+\frac{\overrightarrow{dy}}{dt}+\frac{\overrightarrow{dz}}{dt}$，$v_x=\frac{dx}{dt}$，$v_y=\frac{dy}{dt}$和$v_z=\frac{dz}{dt}$称为速度的三分量。对$K'$系的速度三分量同样为$v'_x=\frac{dx'}{dt'}$，$v'_y=\frac{dy'}{dt'}$，$v'_z=\frac{dz'}{dt}$。由(1.1)式知$dx'=dx-u\,dt$，$dy'=dy$，$dz'=dz$。代入上式得伽里略的速度变换或速度相加定理如下：

$$v'_x=v_x-u,\quad v'_y=v_y,\quad v'_z=v_z \tag{1.2}$$

又在惯性系K和K'中，质点P在三坐标轴方向的加速度分别为$a_x=\frac{dv_x}{dt}$，$a_y=\frac{dv_y}{dt}$，$a_z=\frac{dv_z}{dt}$和$a'_x=\frac{dv'_x}{dt}$，$a'_y=\frac{dv'_y}{dt}$，$a'_z=\frac{dv'_z}{dt}$。因（1.2）式中速度u是常量$du=0$，故由（1.2）式得$dv'_x=dv_x$，$dv'_y=dv_y$，$dv'_z=dv_z$，代入上式得加速度交换

$$a'_x=a_x,\quad a'_y=a_y,\quad a'_z=a_z \tag{1.3}$$

加速度的三分量是不变量，加速度当然是不变量，即质点对K'系的加速度$\vec{a'}$必等于其对K系的加速度$\vec{a}$，即

$$\vec{a'}=\vec{a} \tag{1.3$'$}$$

因在牛顿力学中，质量m也是不变量，故$m\vec{a'}=m\vec{a}$。但$m\vec{a}=\vec{F}$是质点所受之外力，所以牛顿第二定律$\vec{F}=m\vec{a}$对惯性系K和K'能够同样成立。由第二运动定律对不同惯性系普遍成立，能够证明第一和第二运动定律对不同惯性系也普遍

成立。因此，惯性系是牛顿定律能够成立的参考系便有了证明。

除运动三定律外，牛顿力学中还有一条万有引力定律。这条定律说明任何两物体之间都普遍存在着一种正比于两物体质量之乘积、反比于其间距离平方的相互吸引力。有了这条定律，则所有行星和卫星的运动以及地球表面外的自由落体运动，就有了统一的解释。因一物体的万有引力可以超过一定的距离而作用于另一物体，所以有人称这种力为超距作用力。但也有人不同意这种说法。他们认为任何作用都是直接作用，否则就要通过某种媒质来传递。如果后一种看法正确，那么传递万有引力的媒质究竟是什么呢？当然还是那个以太。大家知道，笛卡儿就是用以太的旋涡运动解释引力现象的。其后人们又仿照电磁场的概念引进了引力场。引力场可看成是以太的某种应变。

总之，以太不仅是绝对空间的物质基础，而且还是传递万有引力的媒质。

前面说过，太阳、地球以及星体都是相对于以太作绝对运动的物体。由这种绝对运动长期不衰可知，这些物体应不受以太的任何阻止作用。假如以太对运动体真的不起任何作用，那么运动体对以太当然也不起任何作用。如果真是这样，那么以太也就是一种永远静止的媒质了。

2. 光学和电磁学中的以太

以太不仅在牛顿力学中占有重要地位，而且在光学和电磁学中也都扮演了重要角色。

牛顿认为光是由发光体发射出来的微粒，此称为光的微

粒说。而胡克和惠更斯则认为光是一种波动，此称为光的波动说。开始微粒说占优势，但到了19世纪初，因杨和菲涅耳先后发现了光的干涉和衍射，所以波动说一举占据了统治地位。当然光波应该和其它的波例如声波一样，也是一种振动的传播。但声波相应于空气的振动，而光波又相应于什么物质的振动呢？这还只能是那个充满整个宇宙的透明媒质以太，或叫作光以太。后来由于又发现光波是横波而不是纵波，所以传递横波的介质还必须具有切变性质。因此，如果说光波真是以太波，那么传光以太就必须是一种类弹性固体。而这种弹性体对在其中作绝对运动的太阳、地球等竟不发生任何阻止作用，这就令人十分费解了。就牛顿力学来说，以太不阻碍任何物体的运动，但从光学现象来说，由于光波不仅能通过真空，而且还能通过玻璃和水等透明的物质（只是光在玻璃和水中的速度减慢了），所以玻璃和水等透明的物质对以太又显然是有作用的。在光学现象中以太与物质有相互作用，而在力学现象中却没有。这显然是互相矛盾的。

对于电磁现象，法拉第认为电力和磁力也都不是超距作用力，而是通过充满了空间的某种媒质传递的。但法拉第称这种媒质为“力场”。他还引进了力线和力管的概念。麦克斯韦由于受到法拉第力线概念和光的以太弹性波理论的启发，他以力学模型为基础，把电磁力场用数学表示了出来。他认为全部空间都充满了磁力管，而各磁力管具有横向排斥和纵向收缩的性质，和旋转的流体相似。麦克斯韦还设想每个磁力管内都充满了以太，而以太都作旋转运动。各旋涡之间还夹有类似滚珠轴承那样的粒子。在这种模型中，磁场相

当于以太涡旋的角速度，电场相当于涡旋的位移，电流则相当于滚珠轴承的粒子流动。麦克斯韦就利用这种模型导出他的电磁场方程组。但他在以后的著作中却没有再使用这种模型，而是直接应用电流生磁和电磁感应定律推出了同样的磁场方程组。解麦克斯韦方程组，得知电磁场能够脱离场源，并以波的形式在真空中传播，且传播的速度和光在真空中传播的速度相等。这一重要结论，后来果然为赫兹所作的实验所证实，从而统一了光和电磁现象，建立了光的电磁理论。这样，法拉第“力场”和光以太也就实质上得到统一。因此，以太学说在力学现象和光学现象中表现出来的矛盾，在力学现象和电磁现象也同样存在。

3. 以太似乎相对于太阳静止

在地球上观察任何恒星，发现望远镜的倾角 α 在一年之内总是呈周期变化的，而且任一恒星都在天球上画一椭圆轨道。此称为光行差现象。

为便于解释光行差现象，可设恒星之光是沿垂直于地球轨道面的方向以速度c进行传播的，且令c指y轴的负向。实践证明，地球参考系是一个比较好的惯性系。这说明地球自转的速度较其绝对速度v一定很小，因此，可以完全略去不计。同时其公转速度或绝对速度v也可以在很大程度上看成方向不变。为计算方便，我们也可以令绝对速度v指x轴正向。这样光对以太的速度分量为 $v_x=0$，$v_y=-c$。代入（1.2）式得光对地球参考系的速度分量

$$v'_x=0-v=-v,\quad v'_y=v_y=-c$$

由图 1.2 知光对地球的合速 $\overrightarrow{v'}$ 与 y 轴负向所作之角α由下式

决定：

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{v}{c} \qquad (1.4)$$

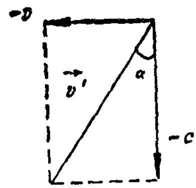


图1-2

因为要观察到恒星，就必须使望远镜和$\vec{v}'$的方向一致，故（1.4）式中的α也就是望远镜的倾角。如将地球绕太阳公转的速度$v=3\times10^{4}$米/秒和光速$c=3\times10^{8}$米/秒代入（1.4）式，则算得的α约为10^{-4}弧度，和直接观察得到的α符合得很好，为光行差现象提供了简单的解释。这种解释意味着地球对以太的速度也就是地球绕太阳公转的速度。果真如此，则以太和太阳系之间就应该没有相对运动，或者说以太似乎相对于太阳静止。

从表面上看，上述解释好象非常合理。但当我们注意到太阳只不过是普通恒星当中的一个，如果以太对太阳静止，那么它对其它恒星也应该静止。但各恒星又都在银河系中运动，如太阳就以2.5×10^{5}米/秒的速度绕银河系的轴转动，而且每二亿五千万年转一周。因此，就银河系而言，以太也应该相对于银河系静止，而不应该只相对于银河系的某一恒星如太阳静止。因此，说以太相对于太阳静止未必可信。

4. 以太又似乎相对于地球静止

假如地球真的在以太中以速度v作无阻的绝对运动，则以太对地球就应该以速度$-v$而流动。因此，生活在地球上的物理学家就应该有办法能够观测到"以太风"的存在。且一旦测得了"以太风"的风速，也就等于知道了地球在以太中运动的绝对速度。为测量"以太风"速，迈克耳孙和莫雷两

人设计了一个实验。这实验是1876和1887年之间做的，是物理学史上几个少有的著名实验之一。实验原理可用图 1.3 表示。单色光从光源 S 发出，经半镀银玻璃片M分成两束，一束透过M向右至反射镜 M_1，经反射折回 M 并被 M 反射进入望远镜 T；另一束为M反射向上传播至反射镜 M_2，经反射折回并透过M也进入望远镜T。整个装置浮在水银槽内，可在水平面上平稳地转动。

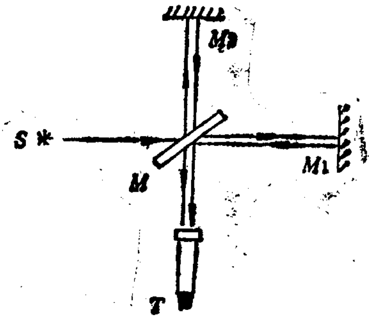


图1-3

先令干涉仪的一臂$MM_1=l_1$沿地球的公转方向放置。假如以太不为地球所带动，且地球的绝对速度为v，或以太对地球的速度为$-v$，则因第一光束对以太的速度为c，故由（1.2）式知光对地球或仪器的速度为（$c-v$）。设光由 M 传至M_1经过的时间为t_1，则由（$c-v$）$t_1=l_1$得

$$t_1=\frac{l_1}{c-v}$$

又因光由M_1反射回M时相对于仪器的速度为$v+c$，故光由M_1反射回到M经过的时间

$$t_2=\frac{l_1}{c+v}$$

因此，第一光束从M至M_1经过反射再回到M总共经过的时间为

$$t=t_1+t_2=\frac{l_1}{c-v}+\frac{l_1}{c+v}=\frac{2l}{c\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)} \quad (1.5)$$

对于第二光束，要使光能恰好传至M_2，则光对以太的速度c就必须有一x分量v_x恰好等于地球对以太的速度v，即$v_x=v$。设光速c与x轴所作之角为θ，则c的x和y分量为$v_x=c\cos\theta$，$v_y=c\sin\theta$。代入（1.2）式得光对地球或仪器的速度分量为

$$v'_x=v_x-v=c\cos\theta-v=0,\quad v'_y=v_y=c\sin\theta$$

由于$v'_x=0$，保证了第二光束沿$MM_2=l_2$方向 传 播，解此方程得

$$\cos\theta=\frac{v}{c},\quad v_y'=c\sin\theta=c\sqrt{1-\sin^2\theta}=c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

由此便可算出第二光束由M至M_2，经M_2反射再回到M经过的时间

$$t'=\frac{2l_2}{v_y'}=\frac{2l_2}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.6)$$

由（1.5）（1.6）两式得两束光的时间差

$$\Delta t=t'-t=\frac{2l_2}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}-\frac{2l_1}{c\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)} \quad (1.7)$$

将整个仪器绕竖直轴转90°，则l_1和l_2对换，两束光的时间差为

$$\Delta t'=\frac{2l_1}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}-\frac{2l_2}{c\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)} \quad (1.8)$$

因转动引起的时间差变化

$$\delta=\Delta t'-\Delta t=\frac{2}{c}\left(l_2+l_1\right)\left(\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}-\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)$$

（1.9）

假定以太对太阳系 静 止，则$v=3\times10^4$ 米/秒。因 $v\ll c$，故由二项式定理展开得

$$\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}=1+\frac{v^2}{c^2}+\frac{v^4}{c^4}+\cdots\simeq1+\frac{v^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=1+\frac{v^2}{2c^2}+\frac{3}{8}\frac{v^4}{c^4}+\cdots=1+\frac{v^2}{2c^2}$$

代入（1.9）式得

$$\delta=\frac{(l_1+l_2)}{c}\frac{v^2}{c^2} \qquad (1.10)$$

设T为光的振动周期，则$\delta=\frac{T}{2}$相当于干涉条纹由亮变暗或由暗变亮，$\delta=T$，相当于干涉条纹由亮经暗再重新回到亮，或由暗经亮再重新回到暗。总之，$\delta=T$相当于恰好移动一个干涉条纹。因此，因仪器转90°移动的干涉条纹数

$$\Delta N=\frac{\delta}{T}=\frac{(l_1+l_2)}{cT}\frac{v^2}{c^2}=\frac{(l_1+l_2)}{\lambda}\frac{v^2}{c^2} \qquad (1.11)$$

式中$\lambda=cT$为光在真空中传播的波长。在麦克耳孙-莫雷1887年的实验中所用的钠光，其波长$\lambda=5.9\times10^{-7}$米，而 l_1+l_2则为22米。将λ和l_1+l_2的数值以及 $v=3\times10^4$米/秒 和 $c=3$