

# 时空与物质

—— 物理学的基本概念和基本规律

陈方培 著



科学出版社

# 时空与物质

——物理学的基本概念和基本规律

陈方培 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍了在物理学的理论中时空与物质的基本概念和基本规律是如何建立和发展的。全书共 12 章, 内容涉及牛顿力学、狭义相对论、广义相对论、有挠引力理论、量子力学与量子场论、超弦理论和 M 理论、规范场理论、圈量子引力理论、暗物质、暗能量等。

本书适合于: 学过普通物理课并略为知道相对论和量子理论的各专业大学生, 以供进一步了解当今物理学理论关于时空与物质的基本概念和基本规律的进展; 大学物理教师、中学物理教师, 以供在备课时作为参考书; 对时间、空间以及对物质的基本概念和基本规律感兴趣的其他读者。

### 图书在版编目(CIP)数据

时空与物质: 物理学的基本概念和基本规律 / 陈方培著. —北京: 科学出版社, 2014.6

ISBN 978-7-03-040712-2

I. ①时… II. ①陈… III. ①物理学 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 106738 号

责任编辑: 胡 凯 孙天任 崔慧娟 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中华美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2014 年 6 月第一次印刷 印张: 12

字数: 241 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



## 前 言

时间、空间是什么？物质是什么？这两个问题是人们普遍关心和感兴趣的问题。要正确理解这两个问题，需要具备一些物理知识。本书在读者具备普通物理知识的基础上，进一步讲解物理学上关于时间、空间与物质的基本概念和基本规律。本书对这些基本概念和基本规律进行较为深入和全面的讨论，着重分析和探讨其物理本质，并力求深入浅出，做到内容正确易懂；既介绍比较成熟的物理理论中关于时空与物质的基本概念和基本规律，也介绍正在发展中的物理理论中关于时空与物质的基本概念和基本规律；还对某些物理概念和物理规律的通常叙述和传统观点作了一些改进，并发表了笔者自己的一些研究成果以及有关时空与物质的某些见解和看法。

本书共 12 章，内容涉及牛顿力学、狭义相对论、广义相对论、有挠引力理论、量子力学与量子场论、超弦理论和 M 理论、规范场理论、圈量子引力理论、暗物质、暗能量等，基本上按照物理学的发展顺序来撰写，可以看出在物理学中，时间、空间与物质的基本概念和基本规律是如何建立和发展的。由于目前在物理学中，关于时空与物质理论还存在一些疑难和有争论的问题，本书对这些问题作了一些讨论外，还在第 12 章中特别地把这些疑难和有争论的问题归集在一起，进行更深入的讨论，以使读者更好地了解物理学关于时空与物质理论的现状及可能的发展方向。对这些疑难和有争论的问题，笔者发表了自己的一些看法和观点，但这并不表示反对其他看法和观点，因为这些疑难和有争论的问题还未最终解决，尚待进一步深入研究。

本书的写作目的是为具备一定普通物理学知识并对相对论和量子理论略有接触的各专业大学生提供一本进一步学习当今物理学理论中有关时空与物质的一些基本概念和基本规律的参考书。本书也可供大学和中学物理教师在备课时参考。此外，本书也可供对此感兴趣的其他读者参考。如果读者对时间、空间以及物质的基本概念和基本规律感兴趣，且具备一定的数学、物理基础，那么这将是一本较为适合的普及读物。

要正确和深入地了解物理概念和规律，需要具备一些数学知识。对本书的读者来讲，除了需要具备大学理工科低年级所学的高等数学和微积分知识外，还需要懂得一些微分几何和群论的知识。对于那些没有学过微分几何和群论的读者，可在学习本书时，暂时承认文中的有关公式，以后再补学相关内容。

本书在写作过程中,得到了大连理工大学物理与光电工程学院 2008 级几位同学的帮助,他们不仅用轮椅推我去图书馆查找文献资料,而且在我的电脑发生故障时,帮我修理。正是有了他们的帮助,本书才得以顺利完成。自 1992 年退休后,我虽然一直在继续从事引力理论的科学研究,但因缺乏科学研究经费支持,往往影响科研和写作工作的进展。最近几年大连理工大学科学技术研究院设立了离退休教师科研专项基金,虽然经费不多,但能部分解决一些继续从事科学研究的离退休教师的困难,本书部分出版经费也得益于该专项基金的资助。本书在出版过程中,得到了科学出版社南京分社胡凯社长和杨锐、周丹、孙天任等编辑的大力帮助和支持。谨对上述各项帮助和支持表示感谢!

陈方培

2014 年 3 月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 牛顿力学关于时空的基本概念和基本规律</b> .....	1
1.1 牛顿对时间与空间的观点.....	1
1.2 参照系与坐标系.....	3
1.2.1 空间位置的确定与坐标系.....	3
1.2.2 时间瞬时的确定与时计.....	5
1.2.3 参照系.....	6
1.3 伽利略变换.....	8
参考文献.....	10
<b>第 2 章 牛顿力学关于物质的基本概念和基本规律</b> .....	11
2.1 物理学中的物质.....	11
2.1.1 物理学中的物质指的是什么.....	11
2.1.2 物理学中物质的共性.....	13
2.2 牛顿力学中的物质.....	14
2.2.1 与牛顿力学中的物质有关的一些问题.....	14
2.2.2 牛顿力学中描述物质质点特性的一些主要物理量.....	15
2.3 牛顿力学的基本规律——牛顿运动三定律.....	15
2.3.1 牛顿运动三定律.....	15
2.3.2 牛顿对一些物理量的定义.....	16
2.3.3 牛顿运动定律原有表述上的缺点和问题.....	17
2.4 对牛顿运动定律的修改.....	18
2.5 在宇宙中寻找惯性参照系.....	20
2.6 质点系.....	21
2.7 牛顿万有引力定律.....	23
2.8 牛顿力学中的(动量、能量、质量)守恒定律.....	25
2.8.1 质量可变的牛顿第二运动定律.....	25
2.8.2 质点系的动量守恒定律.....	26
2.8.3 质点系的质量守恒定律.....	27
2.8.4 能量是什么 两质点的相互作用势能.....	28

2.8.5 质点系的能量守恒定律 .....	32
2.9 从牛顿力学理论到哈密顿原理 .....	33
2.9.1 时空平移不变性与动量、能量守恒定律 .....	35
参考文献 .....	37
<b>第3章 狭义相对论关于时空的基本概念和基本规律</b> .....	<b>38</b>
3.1 狭义相对论对时间与空间的基本看法 .....	38
3.2 狭义相对论中参照系和坐标系的特点 时空度规 .....	39
3.2.1 狭义相对论中参照系和坐标系的特点 .....	39
3.2.2 狭义相对论的时空度规 .....	40
3.2.3 狭义相对论的时空图 .....	42
3.3 “运动钟慢”和“运动尺缩”效应及其解释 .....	43
3.3.1 光钟 .....	43
3.3.2 “运动钟慢”与“运动尺缩”效应及其解释 .....	44
3.4 洛伦兹变换 .....	46
3.5 “同时”的相对性 .....	49
3.6 因果律与狭义相对论 .....	50
3.6.1 狭义相对论也遵守因果律 .....	50
3.6.2 时空间隔取值对因果关系的影响 .....	51
3.6.3 光速与信号传播最大速度的区别 .....	52
3.7 狭义相对论中的质点速度 .....	53
3.8 包含两个坐标系的时空图 .....	55
3.9 波动的相位不变性与多普勒效应 .....	58
3.9.1 波动最广泛的定义和最普遍的特性 .....	58
3.9.2 坐标变换与相位不变性 .....	61
3.9.3 由相位不变性导出多普勒效应 .....	62
参考文献 .....	63
<b>第4章 狭义相对论关于物质的基本概念和基本规律</b> .....	<b>64</b>
4.1 狭义相对论中的物质 .....	64
4.2 狭义相对论对牛顿运动三定律的修改 .....	66
4.2.1 质点速度 $v$ 、惯性质量 $m$ 、动量 $mv$ 、力 $F$ 如何修改 .....	66
4.2.2 牛顿运动三定律如何修改 .....	68
4.3 狭义相对论力学的一些特点 .....	71
4.3.1 不存在所谓“质速关系”、“质能关系” .....	73
4.4 狭义相对论中的能量、动量守恒定律 .....	75
4.4.1 惯性质量可变的动力学 .....	75

4.4.2 狭义相对论中粒子(质点)系的动量-能量守恒定律	77
4.4.3 狭义相对论中不存在质量守恒定律	79
4.5 光速粒子的一些特性	80
4.5.1 微观光速粒子的波粒二象性	81
4.6 相对性原理	82
4.7 狭义相对论中的拉格朗日函数	84
4.7.1 狭义相对论中一个质点的拉格朗日函数	85
4.7.2 一群荷电质点及其电磁场的拉格朗日函数	86
4.7.3 狭义相对论中时空平移与物质场能动张量守恒定律	88
4.7.4 Poincare'群整体变换下的 Noether 定理	89
参考文献	92
<b>第 5 章 广义相对论关于时空的基本概念和基本规律</b>	<b>93</b>
5.1 广义相对论对时间与空间的基本看法	93
5.2 广义相对论中的时空度规与光速不变原理	95
5.2.1 广义相对论中的时空度规	95
5.2.2 坐标时与固有时	96
5.2.3 广义相对论中的局部光速不变原理	98
5.3 广义相对论中的时间与空间	99
5.3.1 广义相对论中的时间间隔与空间间隔	99
5.3.2 同时性定义	101
5.4 时空联络系数的浅显解释及其物理意义	103
5.5 协变导数	105
5.5.1 弯曲时空中向量之协变导数	106
5.5.2 时空的自由度数	107
5.6 有挠时空与有挠引力理论	108
5.7 曲率张量	110
5.7.1 有挠时空中的曲率张量	110
5.7.2 无挠时空中的曲率张量	111
参考文献	112
<b>第 6 章 广义相对论关于物质的基本概念和基本规律</b>	<b>113</b>
6.1 广义相对论对物质的认识	113
6.2 物质与引力场的拉氏量	114
6.3 场的运动方程	117
6.3.1 引力理论中引力场的运动方程	117
6.3.2 推广的爱因斯坦场方程	118



6.4 引力场的能动张量 引力理论中的能动张量守恒定律 .....	119
6.4.1 引力场的能动张量 .....	120
6.4.2 引力理论中的能动张量守恒定律 .....	121
参考文献 .....	124
<b>第 7 章 量子力学与量子场论关于时空、物质的基本概念和基本规律 .....</b>	<b>125</b>
7.1 量子化和经典化 .....	125
7.1.1 量子化 波粒二象性 .....	125
7.1.2 经典化 .....	127
7.2 量子理论中的物质是否也处于时空之内 .....	129
7.2.1 量子理论中的物质存在何处 .....	129
7.2.2 量子理论中的物理现象和物质既存在于时空也存在于希尔伯特空间 .....	130
7.3 量子场论中的量子化 .....	131
7.4 量子理论关于时空的基本概念和基本规律 .....	132
7.4.1 若引力可忽略, 量子化和经典化不影响时空属性 .....	132
7.4.2 若引力可忽略, 坐标变换不影响时空属性 .....	133
7.5 弯曲时空量子场论 .....	134
7.6 量子纠缠现象 非局域作用 .....	134
参考文献 .....	136
<b>第 8 章 超弦理论和 M 理论关于时空、物质的基本概念和基本规律 .....</b>	<b>138</b>
8.1 超弦理论和 M 理论的初步简介 .....	138
8.1.1 什么是超弦理论 .....	138
8.1.2 弦 膜 M 理论 .....	139
8.2 M 理论 (包括超弦理论) 中时空的主要特点 .....	139
8.3 M 理论 (包括超弦理论) 中物质的主要特点 .....	140
8.4 M 理论对时空与物质起源的看法 .....	141
参考文献 .....	142
<b>第 9 章 规范场理论关于时空、物质的基本概念和基本规律 .....</b>	<b>143</b>
9.1 规范场论简介 .....	143
9.2 标架场与标架联络场 .....	146
9.2.1 局部时空标架 .....	146
9.2.2 标架场与标架联络场 .....	147
9.3 引力规范场理论 .....	149
9.3.1 Kibble 引力规范场理论中的拉氏量 .....	149
9.3.2 物质场的能动张量和自旋张量均是引力场之源 .....	150
9.3.3 Kibble 引力规范场理论中的引力场方程 .....	151

9.4 Poincare'群局部变换下的 Noether 定理 .....	152
参考文献 .....	155
<b>第 10 章 圈量子引力理论关于时空、物质的基本概念和基本规律 .....</b>	<b>156</b>
10.1 对圈量子引力理论的初步简介 .....	156
10.2 向量联络与旋量联络 .....	156
10.3 广义相对论的时空也可全由联络来描述 .....	157
10.4 $chG$ 自然单位制 .....	158
10.5 圈量子引力理论的时空特点 .....	159
10.6 各门物理理论中的时空存在可统一性 .....	160
10.7 各门物理理论中的物质也存在可统一性 .....	161
参考文献 .....	162
<b>第 11 章 4 维非超对称广义时空及其分类 .....</b>	<b>163</b>
11.1 4 维非超对称广义时空 .....	163
11.2 4 维时空如何随自由度而变化 .....	164
11.3 4 维非超对称广义时空的动力学理论 .....	166
参考文献 .....	167
<b>第 12 章 物理学关于时空与物质之概念及规律中的一些疑难与争论 .....</b>	<b>168</b>
12.1 时空连续还是不连续 .....	168
12.2 时间存在还是不存在 .....	170
12.3 时空、物质、引力场三者的区别 .....	172
12.4 粒子存在或不存在是否与参照系有关 .....	173
12.5 关于能动张量的定义和能动张量的守恒定律 物质起源问题 .....	174
参考文献 .....	177
<b>索引 .....</b>	<b>178</b>

# 第 1 章 牛顿力学关于时空的基本概念和基本规律

## 1.1 牛顿对时间与空间的观点

时间与空间是什么？这一问题不仅是物理学仍在继续深入研究的问题，也是哲学经常讨论的热门问题。本书不讨论哲学对时间与空间的看法，只是指出，哲学对时间和空间的理解同物理学对时间和空间的理解存在着一些差异。在物理学上，与时间和空间有关的一些概念，或者直接建立在实验事实的基础上，或者虽然出自假设，但要求其推论必须通过实验验证；而在哲学上，与时间和空间有关的一些概念，其建立往往是不强调实验验证的。

宇宙中的任何物体，大至星系，小至一个基本粒子，都存在于空间之内，宇宙中的任何现象和变化都发生于时间之中。那么如何理解空间和时间呢？日常经验告诉我们，每个物体都要占据空间某处或某些处的位置并具有线度和体积（质点只是极限情况，其体积和线度很小，以至可忽略不计）。当物体运动或变化（如受力运动、受热膨胀等）时，其位置、线度和体积往往发生改变，即由旧位置变至新位置，由旧线度变至新线度，由旧体积变至新体积。此外，两个物体之间往往相隔一段距离，当其中任一物体运动时，它们之间的距离可能发生改变。把客观世界中的一切物体的位置、线度、体积、距离（这些就是所谓“物质的广延性和伸张性”）加以最广泛地概括、抽象，用一个概念来表达，就形成“空间”概念。日常经验也告诉我们，任何（物体的）运动或变化的某一状态（如足球刚踢入球门，又如一杯水全部刚刚结成冰）必发生在某一时刻，一个运动或一个变化往往要经历一段时间间隔（如足球从球员脚部踢入至球门有一段时间间隔，一杯水从开始结冰至全部结成冰也有一段时间间隔）；此外，一些运动或变化还有先后顺序的关系。把客观世界中的一切运动和变化的时刻、间隔、先后顺序（这些就是所谓“物质运动的间隔性和顺序性”）加以最广泛地概括、抽象，用一个概念来表达，就形成“时间”概念。

后面我们将逐步讲到，经典力学（即牛顿力学）、狭义相对论、广义相对论、有挠引力理论等各门理论中，其时间、空间概念既有相同之处，也有不同之处。本章主要介绍牛顿力学关于时、空的基本概念和基本规律，首先讨论牛顿对时间与空间的学术观点。

牛顿对时间看法的基本学术观点是：“绝对的、真实的、数学的……时间由其

本身的特性所决定，它均匀地流逝着，与外在的所有事物没有任何关系，……而相对的、表象的和普通的时间是外在的并能被感知的，它是对运动的延续的度量，通常可用它来代替真实的时间。例如，我们日常所说的一小时、一天、一月或一年……。”<sup>[1]</sup>用钟表和其他计时装置所测定的时间都是相对的时间。牛顿对空间看法的基本观点是：“绝对空间始终保持着一种不变和静止的状态，它也与一切外在事物无关。而相对空间则是对绝对空间的度量，我们往往是通过它和物体的相对位置来感知它……。”<sup>[1]</sup>牛顿还认为，物体的运动可分为绝对运动和相对运动。他把物体在绝对空间的运动叫做绝对运动，把物体在相对空间的运动叫做相对运动。

正是由于牛顿把时间看成是“均匀地流逝着，与外在的所有事物没有任何关系”，牛顿力学便认为位于空间任意两个位置的不同物体，虽然它们的运动状态不同，而所经历的时间却总是彼此相等的，也就是说，它们经历着共同的时间。但由此决不能得出，在任何情况下，普遍存在“绝对时间”的结论。学过狭义相对论后可知，总的来说，在物理学上绝对时间是不存在的，但在一定的条件下，主要是当物体运动的速度远小于光速时，实验和观测事实告诉我们，才有可能近似地把时间认为是像“绝对时间”的概念所主张的那样，在均匀地流逝着。只有在牛顿力学中，上述牛顿对时间的基本观点才近似成立。这是因为，一般来说，在牛顿力学中所研究的物体运动速度总是远小于光速。因此，牛顿力学所运用的时间概念实际上是有条件的，即物体运动的速度必须远小于光速。

实验和观测事实还告诉我们，在物理学上绝对空间也是不存在的，因而绝对运动也不存在，只存在相对空间和相对运动。狭义相对论赖以建立的一些实验和观测事实中的很大部分就是否定绝对时间、绝对空间、绝对运动的存在。对此感兴趣的读者可参考文献[2]。

或许有人要说，如果用于否定绝对时间、绝对空间、绝对运动不存在的实验和观测事实不准确、解释有错误，还能相信绝对时间、绝对空间、绝对运动不存在吗？某个实验不准确、解释出错误是有可能的，若有这种情况，可以重做该实验或另设计进行其他新实验，也可以对实验结果进行重新解释。从整个物理学的发展历史来看，作为近代物理重要基础的相对论是建立在否认绝对时间、绝对空间、绝对运动的存在，只承认相对时间、相对空间、相对运动的存在认识之上的，因此，若相信绝对时间、绝对空间、绝对运动的存在，就要否定现有的相对论和近代物理理论。这必须有充分和完善的理论论证和实验根据。可是，这些理论论证和实验根据并不存在。而且，如果绝对空间存在，就必定存在绝对参照系。如何找出这个绝对参照系？下面我们将谈到，对这一简单的问题，难以找到答案。找不到绝对参照系，就意味着绝对参照系不存在。

## 1.2 参照系与坐标系

### 1.2.1 空间位置的确定与坐标系

在数学中为了确定空间几何点的位置，需要采用坐标系；有了坐标系，就可以利用一组数字来表示一个几何点的位置。比较广泛采用的坐标系是直角坐标系，它由一组相交于一点的有向直线所组成，这些有向直线称为坐标轴。直角坐标系中任意两条坐标轴都彼此垂直，可令彼此独立的坐标轴相交于一点并称之为坐标原点。在3维空间中，描述空间几何点的位置需要三个独立变量，这就要有三条不都在同一平面内的坐标轴。如图1.1所示， $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 为3维直角坐标系的坐标轴， $O$ 为坐标原点；坐标面 $XOY$ 、 $YOZ$ 、 $ZOX$ 分别与图中正六面体的三个界面相重合；点 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 分别位于 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴上，且各是正六面体的一个顶角；点 $P$ 也是正六面体的一个顶角，它位于 $OP$ 连线上； $(x, 0, 0)$ 、 $(0, y, 0)$ 、 $(0, 0, z)$ 、 $(x, y, z)$ 分别为点 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $P$ 的坐标。

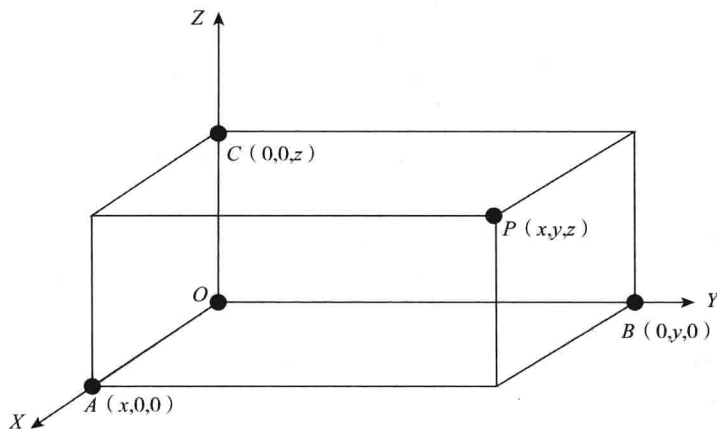


图 1.1

如果坐标轴不互相垂直，直角坐标系就变成斜坐标系。在3维直角坐标系中，坐标原点 $O(0, 0, 0)$ 至任意点 $P(x, y, z)$ 的距离 $r$ 满足关系 $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ ，但在斜坐标系中，这个关系不成立。

除直角坐标系和斜坐标系外，还有许多不同的其他坐标系，它们确定一个几何点的位置的方法各不相同。例如，球坐标系也是一种常采用的坐标系，它可看成由直角坐标系演化而成。如图1.2所示， $OXYZ$ 为一直角坐标系， $P$ 为待定坐标的任意点。作一直线段连接 $O$ 、 $P$ 两点，分别量出 $OP$ 线段的长度 $r$ 、直线段 $OP$ 与 $Z$ 轴的夹角 $\theta$ 以及平面 $POZ$ 与坐标面 $XOZ$ 的夹角 $\phi$ ，则 $(r, \theta, \phi)$ 就是 $P$ 点在球坐标系

中的坐标。

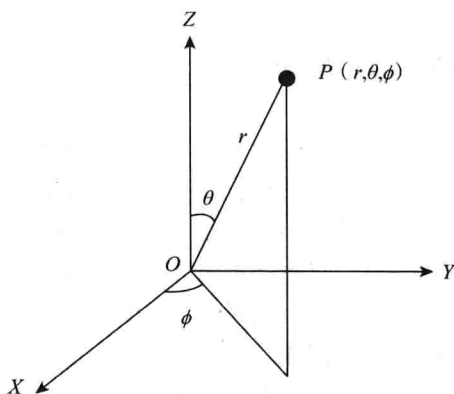


图 1.2

在物理学上常根据物理问题的特点和求解的方便来选用各种不同的坐标系，其实质全是以各种坐标来表示几何点的位置。对于同一个几何点，各种坐标系的坐标之间存在一定的关系。例如，同一点  $P$ ，在直角坐标系中的坐标是  $P(x, y, z)$ ，在球坐标系中的坐标是  $P(r, \theta, \phi)$ ，这两组坐标之间存在下述关系

$$z = r \cos \theta, \quad x = r \sin \theta \cos \phi, \quad y = r \sin \theta \sin \phi$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$$

直角坐标系也可以不用坐标轴而用坐标面  $XOY$ 、 $YOZ$ 、 $ZOX$  来定义。直角坐标系的坐标面是平面。坐标面还可以是曲面，因此可得到曲面（或曲线）坐标系。在广义相对论中，时空是弯曲的，只能采用曲面（或曲线）坐标系。

以上谈的只是确定几何点位置的数学方法，还没有与物理学联系起来。物理学所研究的位置是具体物体的位置，物理学认为一个物体（或质点）的位置只能相对于其他物体来确定。此外，从物理学的角度来看，不仅几何点是从点状物体抽象得出的概念，并且坐标系也不能脱离物体凭空存在。具体地说，坐标系（即坐标轴和坐标面）必须固定在一个特定的物体或一群特定的质点之上。这就需要引入空间标架的概念，下面将比较详细地说明这个问题。

运动具有相对性，一个物体相对于不同物体所表现出的运动状态是不相同的。因此，在描述运动物体（或质点）的位置及其变化时，必须指明是相对于哪一个物体而言的。我们把这个被指明的物体称为空间参照物体，它的作用就是用来供观察者在其上安置坐标系。必须指出，只有刚体（即其中任意两质点之间的距离保持不变的物体）才可选为空间参照物体。这是由于非刚体的形状和线度易于改变，安置在非刚体上的坐标系的坐标轴和坐标面易于扭曲，因此就难以确切地定

出一个质点的位置。

研究发生在地球上的力学现象时,我们很自然地选用地球作为空间参照物体,这时需要把地球近似看成刚体,实际上在很多情况下,这样看待的误差也不算太大。在做力学习题,将地球近似看成刚体时,通常把坐标原点和直角坐标系的两条坐标轴安置在地面上或实验台上。

在刚体中画出的一条直线可以将其物化为一条刚性杆子。实际上,这条直线必穿过刚体中的一些质点,这些质点之间的距离可视为固定不变,将它们连接在一起就可抽象成为一条刚性杆子。这样便可把三维直角坐标轴(或斜坐标轴)物化为三条相交于一点的刚性标杆,我们把它称为三维空间标架。这个标架也是刚体,当然可用它代替原来的刚体作为空间参照物体。

需要指出,空间标架的各条标杆并不一定要固结在同一个刚体之上。在研究天体运动时,往往采用如下的三维空间标架:标架的原点(即坐标原点)固定在太阳中心,三条标杆(即坐标轴)分别指向三个遥远的恒星,这个三维空间标架被称为日心空间标架。必须强调,日心空间标架与固结在太阳(近似看为刚体)之上的空间标架是两类不同的空间标架;固结在太阳之上的空间标架将随着太阳自转而转动,而日心空间标架本身并不跟随太阳的自转而转动,但日心空间标架相对于固结在太阳之上的空间标架将发生另一转动。

### 1.2.2 时间瞬时的确定与时计

大家知道,确定时间瞬时可用时计(即计时装置);时计的指针处于某一位置对应着某一瞬时。自然界的周期运动(如地球绕日运动等)和人造机械的周期运动(如钟表中的指针运动等)都可用作时计,这是由于周期不断地反复可对应着时间不断地流逝。

人们的日常经验和物理实验事实告诉我们,描述空间几何点的位置需要三个独立变量 $(x, y, z)$ ,称为空间独立坐标;描述时间瞬时需要一个独立变量 $t$ ,称为时间独立坐标。在物理学上,把任一瞬时发生在位于空间任意一点的现象都称为一个事件(如火箭发射时离开起飞架的瞬间,炸弹击中目标时爆炸的瞬间等),一个事件可用它的时空独立坐标 $(t, x, y, z)$ 或 $(ct, x, y, z)$ 来表示。独立坐标(常简称坐标)的个数称为维数,目前公认的空间独立坐标为3,我们便说空间为3维;时间独立坐标为1,我们便说时间为1维。因而,时空为4维。基于超弦和M理论的研究,提出了空间高于3维的可能性。但是,高于3维的空间是否存在,在物理学上还没有证实。

时间坐标可用一条有向直线上的点来表示。有向直线是有方向的,时间的流逝也有方向,它总是由“过去”指向“未来”。因此,在物理学中,常用有向直线

的方向来表示时间流逝的方向。该有向直线称为时轴。在时轴上，点的坐标可以由负无限大连续地变到正无限大，这意味着时间有可能从负无限大连续地变到正无限大，但也不能排除时间存在着始点和终点的可能性。如果时间有始点，在该始点之前便不存在物理时间，这是因为在时轴上于始点之前，不存在代表时间的数学点（否则就不能叫始点）；根据同样的理由，如果时间有终点，在该终点之后便不存在物理时间（否则就不能叫终点）。到底时间是从负无限大变到正无限大，还是存在始点（如宇宙大爆炸）和终点（如宇宙大塌缩）？目前，宇宙学仍在研究和争论这些问题（附注：有人认为宇宙大塌缩后还可以再大爆炸，或者认为我们的宇宙之外还另有其他宇宙，并以此来说明时间是无始无终。可是，必须强调的是，大爆炸前后的物理时间是没有联系的，同样，大塌缩前后的物理时间也是没有联系的，不同宇宙的物理时间也是没有联系的。作者认为，要说明时间无始无终，需要另找理由）。

为了确定空间坐标，需要先定出空间原点  $(0, 0, 0)$ ，同样为了确定时间坐标，也需要先定出时间原点  $t=0$ 。在 4 维时空中，我们把空间原点  $(0, 0, 0)$  与时间原点  $t=0$  结合在一起，形成时空原点  $(0, 0, 0, 0)$ ；时空原点所表示的事件称为原点事件。必须注意，时空原点的选定具有任意性，而上述时间的“起点”和“终点”则是绝对的。一个任意质点，在空间可沿每一空间坐标轴向前或向后移动，而一个质点所经历的事件只能沿时轴向前而不可能沿时轴向后，这表明时间具有与空间不相同的特性。

以上关于时间的讨论是一般性的讨论，既适用于牛顿力学，也适用于狭义相对论和其他物理学部门。牛顿力学与狭义相对论的区别在于：牛顿力学承认时间可具有绝对性，而狭义相对论否认时间的绝对性。关于这些问题，将在后续章节中详细讨论。

### 1.2.3 参照系

我们讲过，在物理学上确定一个物体（或质点）的空间位置需要 3 维空间标架，为了量度出坐标数值，还需要一根校准过的标准尺，这 3 维空间标架和标准尺可视为 3 维空间坐标的物质基础。我们也讲过，在物理学上确定一个事件的瞬时时需要时计，时计应是校准过的标准时计，该标准时计可视为 1 维时间坐标的物质基础。在物理学上，把作为空间参照物体的 3 维空间标架、标准尺和量度时间的标准时计统称为参照系。在研究物理现象时，事件的位置坐标和事件发生的瞬时就是相对于所选定的参照系来决定的。装备有实验仪器、标准尺和标准时计并可定出坐标系的实验室就可看成一个参照系，如图 1.3 所示。



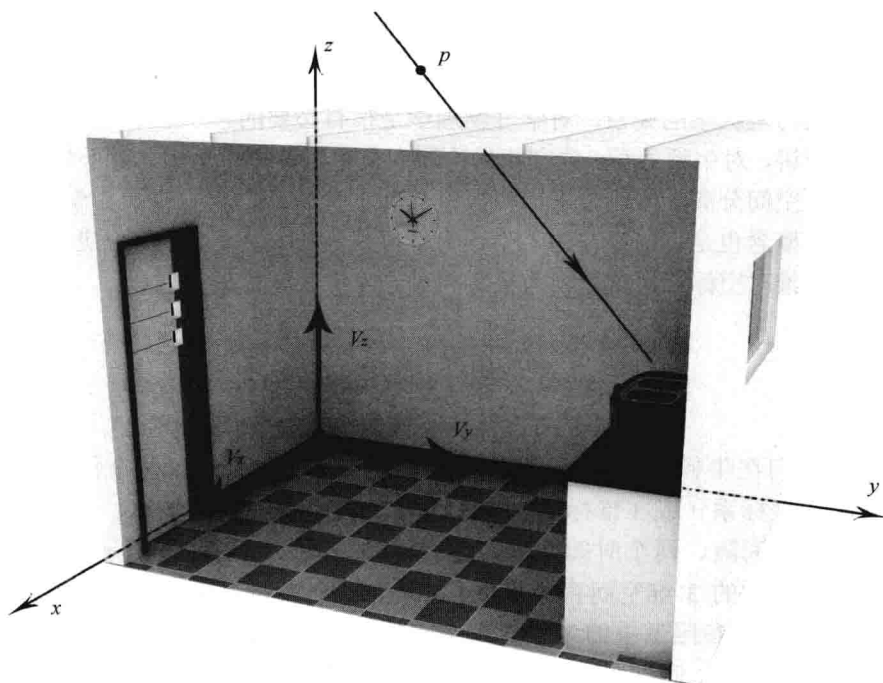


图 1.3

全部时间可由时轴上的全部几何点来表示。3 维空间标架与时轴的结合可称为 4 维时空标架，4 维时空标架可视为 4 维时空坐标系的物质基础。3 维空间标架存在于 3 维空间之中，人们对空间标架易产生直观的印象，而对时轴则缺乏产生直观印象的本能。这是由于时轴是时空的第 4 维，它存在于 3 维空间之外，我们能感觉到的只是存在于 3 维空间之内的东西。但运用数学能够证明，可让时轴垂直于 3 维空间。对这个问题有兴趣的读者可参考文献[3]。如果我们选取 3 维空间标架的三条标杆互相垂直，则可使时轴与 3 维空间标架的每条标杆互相垂直，在这种情况下，4 维时空标架对应着 4 维时空直角坐标系。

实验者常在实验室工作，不妨把实验者包括在参照系内，故可说，某参照系是实验者  $A$  的参照系或实验者  $B$  的参照系。由于实验室中的空间标架、标准尺、标准時計以及实验仪器都是客观的物体，对物理现象所测得的数据当然是客观的结果而不是主观的结果。如果实验仪器是自动化的，在测量阶段实验者不参与也是可以的，故实验结果与实验者的主观意识无关。

在物理学中，参照系、4 维标架、4 维坐标系总是密切联系在一起的，故物理学者常用 4 维时空坐标系来称呼所相应的参照系。例如，若选用 4 维时空直角坐标系  $\{TXYZ\}$ ，则可把相应的参照系称为  $\{TXYZ\}$  参照系。有时甚至只提 4 维坐标系而不明显指明参照系，这是由于每一个 4 维坐标系必定对应有 4 维时空标架，也