

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中学物理教师  
备课资料手册



## 编者的话

本书是为方便中学物理教师教学而编写的。书中汇集了教师在备课过程中所需的有关资料。

根据中学物理教学大纲的要求，针对当前中学物理教学的实际，本书着重介绍物理学家，中学物理教育理论与教学方法，新科学与新技术，中学物理的概念、规律、实验和评估。

本手册共分四编。

第一编物理学发展札记。介绍物理学家及其在物理学发展过程中的作用，供教师在教学过程中进行辩证唯物主义教育、爱国主义教育 and 科学研究思维方法教育时参考。

第二编教育理论、教学方法。教育理论部分包括国外有影响的教育论思想，心理学主要流派，教育心理学的基本理论与要点；教学方法部分介绍国内当前中学物理教学实践中行之有效的一些方法，便于教师了解国内、外的各种教学论、教学法，并根据自己的实际，选择、形成自己独特的教学方法。

第三编现代物理学、新科学技术。以文字和彩色插页的形式介绍与中学物理有关的新兴科学及其在生产、生活中的实际应用，便于教师了解最新信息，接受最新知识。第四编中学物理教学。着重分析中学物理知识的重点、难点和容易混淆的问题；介绍基本仪器的使用方法和指导测定性、验证性和探索性等各类实验；阐述物理教学的各种评价，有利于教师开展中学物理教学研究，提高教学质量。

参加本书编写的有：第一编张瑞琨，徐文柳；第二编乔际平；第三编钱振华，李寿生，许兆新，张治国，葛长根，杨运列，周嘉源；第四编吴瑞芳，徐又琦，庄起黎，矫瑜，耿海成，徐淀芳。由于编者水平有限，加上编写时间仓促，缺点错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

## 编者的话

本书是为方便中学物理教师教学而编写的。书中汇集了教师在备课过程中所需的有关资料。

根据中学物理教学大纲的要求，针对当前中学物理教学的实际，本书着重介绍物理学家，中学物理教育理论与教学方法，新科学与新技术，中学物理的概念、规律、实验和评估。

本手册共分四编。

第一编物理学发展札记。介绍物理学家及其在物理学发展过程中的作用，供教师在教学过程中进行辩证唯物主义教育、爱国主义教育 and 科学研究思维方法教育时参考。

第二编教育理论、教学方法。教育理论部分包括国外有影响的教育论思想，心理学主要流派，教育心理学的基本理论与要点；教学方法部分介绍国内当前中学物理教学实践中行之有效的一些方法，便于教师了解国内、外的各种教学论、教学法，并根据自己的实际，选择、形成自己独特的教学方法。

第三编现代物理学、新科学技术。以文字和彩色插页的形式介绍与中学物理有关的新兴科学及其在生产、生活中的实际应用，便于教师了解最新信息，接受最新知识。第四编中学物理教学。着重分析中学物理知识的重点、难点和容易混淆的问题；介绍基本仪器的使用方法和指导测定性、验证性和探索性等各类实验；阐述物理教学的各种评价，有利于教师开展中学物理教学研究，提高教学质量。

参加本书编写的有：第一编张瑞琨，徐文柳；第二编乔际平；第三编钱振华，李寿生，许兆新，张治国，葛长根，杨运列，周嘉源；第四编吴瑞芳，徐又琦，庄起黎，矫瑜，耿海成，徐淀芳。由于编者水平有限，加上编写时间仓促，缺点错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

# 目 录

## 物理学发展札记

(一) 力学部分 .....	1
我国古代力学知识 .....	1
亚里士多德和他的运动原理 .....	3
阿基米德和浮力原理 .....	3
奥托·格里克和马德堡半球实验 .....	4
托里拆利和大气压实验 .....	4
伽利略和运动理论 .....	4
牛顿和《自然哲学的数学原理》 .....	6
牛顿力学的验证和传播 .....	8
笛卡儿与莱布尼茨的运动量度之争 .....	9
卡文迪许和引力恒量的测定 .....	11
海王星的发现和火神星之谜 .....	11
(二) 热学部分 .....	13
我国古代的热学知识 .....	13
德谟克利特和古代原子论 .....	15
阿佛伽德罗和阿佛伽德罗假说 .....	15
布朗和布朗运动 .....	15
焦耳和热功当量的测定 .....	16
热质说与热之唯动说之争 .....	17
能量守恒与转化定律的建立 .....	18
开尔文和热力学温标 .....	19
瓦特和热机的发展 .....	20
帕斯卡和帕斯卡定律 .....	20
玻意耳和马略特 .....	21
查理和盖·吕萨克 .....	21
伯努利和伯努利方程 .....	21
昂尼斯和低温 .....	22
(三) 电学和磁学部分 .....	23
我国古代的电学和磁学知识 .....	23
吉尔伯特和《磁学》 .....	24
富兰克林和风筝实验 .....	25
诺雷脱和莱顿瓶 .....	25
库仑和扭秤实验 .....	25
从鱼生电到电流的发现 .....	26

欧姆和欧姆定律的建立	27
奥斯特和电流磁效应发现的前前后后	27
法拉第和电磁感应	29
楞次和楞次定律	30
狄拉克和磁单极子	30
麦克斯韦和电磁理论	30
赫兹和电磁波的存在	32
洛仑兹和洛仑兹力	32
亨利和自感现象	32
J. 汤姆孙和电子的发现	33
伦琴和 X 射线	33
(四) 光学部分	35
我国古代的光学知识	35
牛顿对光学的研究	36
光的本性之争	38
光的理论和望远镜的建造	40
光的波动说的复兴——托马斯·杨和菲涅耳	40
光速测定方法的发展——斐索和傅科	43
普朗克和黑体辐射	44
爱因斯坦和光子说、相对论	45
激光的发现	48
(五) 原子物理学和原子核	
物理学部分	48
世纪之交的物理学革命	48
迈克耳逊和干涉实验	49
贝克勒尔和放射性辐射	50
居里夫妇和放射性元素的发现	51
原子结构的探索	51
卢瑟福和原子有核模型的提出	52
玻尔和原子模型	53
德布罗意和物质波思想	53
查德威克和中子的发现	54
基本粒子结构的复合粒子模型	54
盖尔曼的夸克模型和中国的层子模型	56

(一) 教育理论知识简介	59
一、国外有影响的教育论思想	59
夸美纽斯的教育理论	59
赫尔巴特的教育理论	60
杜威的教育理论	61
凯洛夫的教学论思想	62
巴班斯基的教学论思想	63
赞可夫的教学思想	64
布鲁纳的课程结构论与发现教学法	65
根舍因的“范例教学”理论	66
二、心理学主要流派	67
构造主义心理学	67
行为主义心理学	68
新行为主义心理学	69
格式塔心理学	69
现代认知心理学	70
三、教育心理学的基本理论与要点	71
教育心理学	71
教育与心理发展	71
学习的理论	72
四、学科教学法学科教学论与	
学科教育学	72
物理教学法	72
物理教学论	72
物理教育学	72
五、教学测量与标准化考试	73
成功的教学测量必须具备的条件	73
标准化考试	75
(二) 教学方法	77
讲授法	77
谈话法	78
讨论法	78
研究法	78
练习法	79
复习法	79
演示法	80
实验法	80
实验学导法	80

参观法	81
单元教学法	81
自学辅导教学法	81
启发式综合教学法	82
读读、议议、讲讲、练练教学法	82
六课型单元教学法	83
有序启动式教学法	83
纲要信号图示教学法	83
发现教学法	84
启发发现法	84
掌握学习教学法	85
四段论教学法	85
程序教学法	86
暗示教学法	86
问题教学法	87
个别教学法	87

## 现代物理学 · 新科学技术

(一) 粒子物理	89
质子	89
中微子	90
夸克	91
宇宙线	93
探测器	94
粒子加速器	95
真空	97
四种相互作用	99
对称性和守恒律	100
- 疑难	101
弱电统一模型	102
(二) 相对论宇宙学	105
狭义相对论	105
时钟佯谬	106
高速运动物体的视觉形象	107
广义相对论	108
黑洞	109
新星和超新星	111

脉冲星 .....	112
膨胀的宇宙 .....	114
大爆炸宇宙学 .....	116
宇宙微波背景辐射 .....	118
宇宙的未来 .....	120
(三) 电磁学光学 .....	123
电磁能的守恒及输送 .....	123
导体与非导体 .....	124
光子静质量的现代观点 .....	125
光子静质量的测量 .....	125
电荷量子化和狄拉克的磁单极理论 .....	128
有关磁单极的现代观点 .....	128
寻找磁单极 .....	129
信息光学 .....	130
全息照相 .....	130
激光的特性 .....	132
全息显微技术 .....	133
全息存贮 .....	133
激光原理及激光的发展 .....	134
(四) 凝聚态物理等离子体物理及	
超导 .....	136
能带结构理论 .....	136
X 射线及其衍射 .....	137
液晶及其应用 .....	139
相变和临界现象 .....	140
向绝对零度趋近 .....	142
耗散结构理论 .....	144
高压和超高压物理 .....	145
量子霍尔效应 .....	147
等离子体的温度 .....	151
受控核聚变 .....	152
超导电性 .....	153
约瑟夫森效应的应用 .....	155
超导应用新技术 .....	157
高温超导材料 .....	159
超流动性 .....	161
(五) 空间物理 .....	164
空间物理学 .....	164



空间技术 .....	165
火箭技术 .....	166
新一代火箭 .....	167
航天器 .....	168
航天飞机 .....	169
空间站 .....	170
(六) 声学 and 声技术 .....	172
超声及超声效应 .....	172
声成像 .....	173
声全息技术 .....	174
超声显微镜 .....	175
光声显微镜 .....	175
电声换能器 .....	176
噪声 .....	177
声纳技术 .....	178
超声应用 .....	179
(七) 计算机技术和其他新技术 .....	181
人工智能 .....	181
机器人 .....	182
第五代计算机 .....	183
计算机的未来 .....	185
电视新技术及新进展 .....	187
新材料 .....	188
新能源 .....	190
遥感技术 .....	192
微波技术 .....	193
微波炉 .....	194
红外技术 .....	195
热成像 .....	196
夜视仪 .....	197
核磁共振技术 .....	198
穆斯堡尔效应及其应用 .....	199

## 中学物理教学

(一) 中学物理知识分析 .....	201
一、初中部分 .....	201
测量 .....	201

力	202
运动和力	202
密度	203
压强	204
浮力	204
简单机械	205
功和能	206
光的初步知识	206
热膨胀热传递	207
热量	208
物态变化	209
分子热运动热能	210
热机	210
简单的电现象	211
电流的定律	212
电功电功率	213
电磁现象	214
用电常识	215
二、高中部分	216
力物体的平衡	216
直线运动	218
运动和力	220
物体的相互作用	223
曲线运动万有引力	225
机械能	226
机械振动和机械波	229
分子运动论热和功	230
固体和液体的性质	231
电场	233
稳恒电流	235
磁场	239
电磁感应	239
交流电	241
电磁振荡和电磁波	242
电子技术初步知识	243
光的反射和折射	243
光的本性	245
原子和原子核	245

(二) 中学物理实验教学指导 .....	248
一、中学物理实验教学的作用 .....	248
二、中学物理实验的分类 .....	248
1. 演示实验 .....	248
2. 学生实验 .....	248
3. 课外小实验 .....	249
三、中学物理学生实验指导 .....	250
1. 基本练习性实验指导 .....	251
2. 测定性实验指导 .....	254
3. 验证性实验指导 .....	256
4. 探索性实验指导 .....	258
5. 设计性实验 .....	259
(三) 中学物理教学评价 .....	260
一、物理教学评价概述 .....	260
二、物理教学过程及其评价 .....	260
三、物理课堂教学评价 .....	262
四、物理教师教学能力评价 .....	264
五、教学成果评价 .....	265
六、情感领域的评价 .....	269
七、技能行为的评价 .....	271

## 物理学发展札记

### (一) 力学部分

#### 【我国古代力学知识】

##### 对时间、空间的认识

《管子》的“宙合”篇中，指出：“宙合之意上通于天之上，下泉于地之下，外出于四海之外，合络天地以为一裹。”明确表示天“上”、地“下”和海“外”，还有广阔的世界、天地、万物，无不处于“宙合”之中（“宙”即指时间，“合”即指空间）。

《墨经》中指出，“宇，弥异所也。”“久，弥异时也。”（久同“宙”）《经说上》解释是：“宇，蒙东、南、西、北。”“久，合古、今、旦、莫。”（莫就是“暮”。）

《墨经》中指出：“宇或（域）徙，说在长宇久。”《经说下》解释是：“长：宇徙而有（又）处，宇：宇南北在旦有（又）在莫。宇徙久。”表明事物的运动（徙）必定经历一定的空间和时间（宇和久），而时间的流逝和空间的变迁是结合在一起的，故称“宇徙久”。

战国时期惠施（公元前约 370—前约 310）曾说：“至大无外，谓之大一；至小无内，谓之小一。”“大一”正是无限宇宙的朴素观念。唐代柳宗元（773—819）在《天对》中写道：“无中无旁，乌际乎天则？”意思是说，天没有中心也没有边沿，哪儿是天的边际呢？战国庆子在《逍遥游》中指出时间是无限的。东汉张衡（78—139）也曾明确指出：“宇之表无极，宙之端无穷。”表示作为时间的起点和终点正如空间一样是没有穷尽的。

##### 对运动的认识

《墨经》定义“动，或（域）徙也。”“止，或（域）久也。”表明运动是位置的变化，静止是物体在一位置上处有一段时间。东汉《尚书纬·考灵曜》中精彩记载着：“地恒动不止而人不知，譬如人在大舟中，闭牖而坐，舟行而不觉也。”说明运动的相对性，这比伽利略的思想要早 1500 年左右。东汉王充（27—约 97）《论衡》中的《说日篇》指出：“天行已疾，去人高远，视之若迟，盖望远物者，动若不动，行若不行。何以验之？乘船江海之中，顺风而驱，近岸则行疾，远岸则行迟，船行一实也，或疾或迟，远近之视，使之然也。”表明物体真实运动与视运动的快慢有很大的差别。并提出了类似于“速率”的概念，当时用“舒疾”表示。《论衡》中的“状留篇”中记载了：“是故湍濑之流，沙石转而大石不移。何者？大石重而沙石轻也。”“是故车行于陆，船行于沟，其满而重者行迟，空而轻者行疾。”“任重，其取进疾速，难矣！”表明物体运动快慢与物体本身重量的关系。

《考工记》中记载了：“马力已竭，（zh u，指车辕）犹能一取焉。”意思说，马拉车时，马已停下来，不再对车施拉力，但车辕还能继续前进

一段路。表明当时对惯性已有认识。

### 对力的认识

墨家最早指出，“力，刑之所以奋也。”“刑”同形，表示物体；“奋”在古籍中可表为由静到动、动之愈烈、由下上升等等，表示了力对物体运动的影响。

王充在《论衡》中也记载了力的作用问题。经观察，他提出，外来的力能使物体产生运动，但内力不能使物体运动，认为“力重不能自称”，并举例说，古代传说中的大力士，手能断牛角，能拉直铜钩，力气很大，但就不能把自己举起来离开地面（“使之自举，不能离地”），表明内力与外力的差别。

### 对简单机械的认识

墨家通过简单机械的利用，对力的平衡问题作了较详尽的观察和分析，借用桔槔和秤论述杠杆平衡的知识，提出了“重”（重物）、“权”（秤锤或砝码）、“本”（杠杆支点靠“重”一边的杠长）、“标”（杠杆支点靠“权”一边的杠长）四个概念，并用它来解释。在《经说》中写道：“衡，加重于其一旁，必捶。权、重相若也相衡，则本短标长。两加焉，重相若，则标必下。标得权也。”除此以外，墨家还研究杠杆平衡的用途，如用杠杆制成鼓风箱等。

墨家还研究了斜面，并利用斜面来提重物。他们设计了一种装有滑轮的前低后高的斜面车，称为“车梯”。这样随着车梯的前进，重物不断地升高，节省了人力。

尖劈也是一种简单机械，我国周口店第13地点发现的石器，有 $60^{\circ}$ ~ $70^{\circ}$ 的刃角。到了春秋时期，由于冶铁手工业的发展，采用铁制的尖劈，并在生产、生活中加以应用。

公元132年，张衡创制了候风地动仪（左图），它装有8个曲杠杆，对地震有预测作用。公元138年3月1日，地动仪朝西边的那个铜球突然下落到铜蛤蟆的嘴中，但当时洛阳城并没有地震的感觉。过了好几天，送信人到当时洛阳城并没有地震的感觉。过了好几天，送信人到洛阳，报告了甘肃发生了大地震，证明了地动仪的科学价值。类似的仪器，在欧洲到公元1703年才试制成功。

### 其他力学知识

春秋时期以前，人们已认识了物体的重心及其应用。中华人民共和国成立后，在西安半坡村出土的属于仰韶文化期的尖底提水陶壶结构就说明了这一点。这种提水壶，底尖、腹大、口小，系绳的耳环设在壶腹靠下的部位。当空壶悬挂时，壶身略有倾斜；当壶中注入约60~70%的水时，水壶的重心下降至耳环这一支点以下，壶就正立；继续注水，当水壶的重心高至支点以上时，壶就自动倾倒。这样的安排，何等巧妙。到先秦时期，

这种提水壶经过修饰，变成一种宫廷玩物——“欹器”，它也是一种利用重心来调节平衡的器物。

春秋末年，人们利用水的浮力来测定箭杆材料和木制轮子的均匀性，提出“平沈必均”的见解，表示浮沉程度一样（“平沈”），各处的质量必然均匀（“必均”）。广为流传的曹冲称象的故事，也是一例。相传蒲州附近，潼关以北黄河上曾架有一浮桥，用8只铁牛系住，这些铁牛各重数万斤，立于两岸。1064年因洪水暴涨，浮桥冲坏，铁牛也沉没在河中。僧怀丙知道后，便用两只大船装满泥土，同时派人潜入水中用铁索把水底的铁牛系在大船上，然后卸去大船中的泥土，结果“舟浮水出”。

### 对声学知识的认识

我们祖先对声学知识的认识，是从乐器制造开始的，在实践中初步掌握了多种发音原理、多种材料发声与传声的性能、乐器形状对发声的关系等等。如在春秋战国时期，已明确指出“薄厚之所震动，清浊之所由出”，表明薄钟和厚钟的振动是钟声清浊的来源。同时还记载着不同形状的钟体对声音的产生和传播会产生不同的影响。当时也知道了共振现象，如《庄子》一书中就记载了调瑟时发生的共振现象。与此同时，也能想办法来消除声音，如战国时期的空心砖就是一种隔音技术。东汉王充的《论衡》中第一次讲到人声是因喉舌鼓动空气而发生的，箫笙之声也是空气振动的结果。北宋的沈括（1031—1095）在《梦溪笔谈》一书中记载了关于乐律、古琴的制作和传声、古乐钟的发声、共鸣现象等声学知识，并记载了声的共振实验。我国古代还出现了不少具有声学特性的建筑，名扬天下，如明代建成的北京天坛，其中的回音壁、三音石和圜丘就具有良好的声学特性的建筑物。

### 【亚里士多德和他的运动原理】

亚里士多德（Aristotle，公元前384—前322）是古希腊时期在科学界、哲学界影响最大的人物，是一位伟大的思想家，也是一位最博学的人物。曾学过医，也当过教师，在雅典创办了自己的学院和学派。他也和当时的哲学家们一样，力求提出一个完整的世界体系来解释各种自然现象。同时他又是首先从经验出发来考察和研究具体问题的人。他对天文学、物理学、生物学等方面都有研究，并提出了自己的见解。他也是形式逻辑的创始人。

他著有《物理学》一书，这是一部关于自然哲学的著作。书中提出了比较系统的运动理论，认为运动是事物从潜能变为现实，运动与物体不可分，运动是永恒的，但是他又认为永恒的运动必定有永恒的原因，将“第一推动者”作为整个宇宙永恒运动的根源。他反对原子论，不承认存在真空，并提出了两条物体的运动原理。第一，他认为物体只有在一个外来的推动者不断作用下，才能保持运动。如果推动者停止作用，那么物体就会立刻停下来。这就是动者不断作用下，才能保持运动。如果推动者停止作

用，那么物体就会立刻停下来。这就是我们后来所说的“力是产生运动的原因”。第二，他认为轻、重两个物体同时降落的话，重的物体比轻的物体下坠得快。这两个错误观点流传达 2000 年之久，后被伽利略纠正。

#### 【阿基米德和浮力原理】

阿基米德（Archimedes，公元前 287—前 212）是古希腊数学家、物理学家、发明家。他提出了比重的概念，发现了后来命名的阿基米德定律，研究了杠杆原理，制造了很多机械。

关于阿基米德定律的发现，流传着一个有趣的故事。相传叙拉古国王亥厄洛用黄金请工匠做了一顶非常精致、漂亮的王冠，但是他怀疑工匠用银子偷换了部分黄金。于是阿基米德在不损坏王冠的前提下，查验王冠是否是纯金制成的。阿基米德整天捧着王冠苦苦思索，总是不得要领。但是他并不气馁，继续研究。一次，阿基米德洗澡，他跨入盛满着水的浴桶，随着身子浸入浴桶，一方面感到水对身子有一股向上的托力，另一方面一部分水从桶边溢出。阿基米德发现这个现象，立刻领悟到可以用测定固体在水中排水量的办法来测定该固体的比重。这时，阿基米德异常兴奋，忘了自己是裸露着身子，从浴桶中一跃而起，奔了出去，狂呼“攸勒加，攸勒加”（意思是我找到了）。阿基米德继续做实验，拿一块黄金和一块重量与之相等的白银，由于比重不同，两者体积就不同。如把两者分别放入盛满水的容器中，则银块排出的水比金块多得多。于是阿基米德来到王宫，把王冠和同等重量的纯金块放进盛满水的容器里，分别测出它们排出的水量，一比较，问题就解决了。根据各种历史记载，我们不必花精力去追究工匠是否偷盗了黄金，但是从这个实验中却得出了一个重要的物理定律，即阿基米德定律。阿基米德在《论浮体》中表述了这一定律的重要内容：放在水中的物体所失去的重量，等于其排开的水的重量。

#### 【奥托·格里克和马德堡半球实验】

奥托·格里克（Otto von Guericke，1602.11.20—1686.5.11）是德国物理学家、工程师。他最享盛名的是发明了抽气机，并用抽气机获得真空，做了著名的马德堡半球实验，证明了大气压的存在。

格里克首先用酒桶或啤酒桶装满水，并把桶上所有空隙堵塞，以阻止桶外空气的流入。桶的下方装上一个金属管，利用水本身重量下沉，借以抽去桶内的水，使桶内留下一个没有空气的空间。但是实验并未能成功。第二次，用铜球代替酒桶或啤酒桶，除了底下装有一个抽水和抽气的抽机以外，顶端还装有一个龙头。最初，抽机的活塞容易移动，但很快就越来越难移动了。当大家认为球内空气快要抽空时，突然一声巨响，铜球瘪了下去，经研究，认为是铜球不圆，致使较平坦的部分无力承受周围的压力。当尽力把铜球做成十分圆的时候，试验成功了，获得了真空。当开启顶端的龙头时，空气立即涌入铜球，其力大得几乎要把站在它前面的人拉进铜球。在这样的基础上，于 1654 年做了马德堡半球实验。马德堡半球实验是

用两个直径约 3/4 爱尔兰（旧时量市的尺度，各国算法不一，英国 1 爱尔兰等于 45 英寸）的铜的半球，每个半球上装有铜环，使其紧压在一起，通过抽机把其间的空气抽去。然后两边各用 8 匹马对拉，尽管马夫卖力地驱赶马匹，但仍不能把铜球拉开。如果打开抽机的开关，只要轻轻一拉，铜球就可以分成两半。这是历史上第一次演示表明我们周围存在着大气压。

#### 【托里拆利和大气压实验】

托里拆利（Evangelista Torricelli，1608.10.15 - 1647.10.25）是意大利物理学家。最出名的贡献是发明气压计，以他姓名命名的托里拆利实验也是和气压计分不开的。

1644 年 6 月 11 日托里拆利在致罗马市李奇的信中，宣称发明了气压计，并对自己所做的实验作了解释。信中写道：“我们是生活在由空气组成的海洋底部。实验证明，空气确有重量。地面附近最稠密的空气的重量大约等于水的重量的四百分之一。”并描述了测量大气压的实验装置和过程，还用水代替水银做同样的实验，由于水银比水重，水柱就比水银柱高，并测得水柱的高度。最后他用两根管子同时做实验，看到两根管子内水银柱上升的高度相同。由此，托里拆利肯定了作用不是来自内部，而是外界的大气所造成的。在这些实验的基础上，说明了大气压可以用水银柱的高度来量度。托里拆利还利用大气压正确地解释了真空形成的原因。

#### 【伽利略和运动理论】

伽利略（Galileo Galilei，1564.2.15—1642.1.8）是意大利物理学家、天文学家。在物理学上，伽利略提出了运动相对性原理、加速度概念、落体定律、动量概念、惯性原理、单摆的摆动周期与振幅无关等，与此同时，在天文学上也有很多贡献。

1638 年，伽利略发表了《关于两门新科学的对话》一书，书中精彩描述了在作匀速直线运动的船舱里作力学实验的情景，并得出了一个重要的原理。伽利略描述说，在一只作匀速直线运动的密封的船舱里，一切力学现象都和船在静止时一样：小瓶里的水照样一滴一滴地垂直掉下来；盆里的鱼照样自由地游动；小虫子照样向各个方向自由地飞翔；人在船上用同样的力气往各个方向跳，都会跳得同样远。总之，伽利略归纳地认为，我们无法找到任何力学现象能够使我们判断船是在作匀速直线运动，还是静止。换句话说，我们没有办法用任何力学实验，来判断和确定船的状态。如果力学定律在某个参考系（也称惯性参考系）中是成立的，那么相对于该参考系作匀速直线运动的参考系中，它也同样成立。也就是说，在描述力学过程方面，各个惯性参考系都是等效的。这就是著名的伽利略相对性原理。

伽利略在实验的基础上，把运动分成匀速运动和变速运动，从而引进一个重要的概念——加速度。把速度和加速度分开，就可以澄清亚里士多德运动观念中的模糊之处。伽利略首先定义了匀速运动，认为“我们称运



动是均匀的，是指在任何相等的时间间隔内通过相等的距离。”这就表明匀速运动的速度与时间无关，速度是一个常数。但是，变速运动的速度却与时间有关。如何定义匀加速运动呢？伽利略曾提出用瞬时速度的概念来描述变速运动，也曾考虑用物体经过的距离  $s$  来定义速度的增量，经过实验和思考，自己又加以否定，后来他正确地利用速度的增量  $v$  与用去的时间  $t$  成正比的运动作为匀加速运动的定义，同时也提出了加速度的概念。

自由落体定律的发现，是伽利略对力学发展的又一个重要的贡献。伽利略在比萨期间（1589—1591）的工作，仅仅是他研究落体运动的开始。在帕多瓦任教期间（1592—1610），他对落体运动有了比较深刻的认识。1609年前后，伽利略才在自己的笔记中得出“坠落速度与时间成正比”的正确结论。所以一般认为伽利略是在1609年提出落体定律的。至于伽利略是否做过比萨斜塔的落体实验，我们不去论证，但有一点必须说明，第一个做落体实验的不是伽利略，而是出生于比利时的史特芬（S. Stevin, 1548—1620）。他和他的朋友格鲁特（de Groot, 1554—1640）在荷兰的德尔夫特曾做过落体实验。从30英尺高处，同时丢下2只铅球，其中一只的重量是另一只的10倍，根据它们落在木板上的声音，来判断是否同时落地。实验结果是同时落地。这一实验在1586年出版的史特芬撰写的《水重原理》中介绍过。伽利略研究落体运动时，首先证明了斜面上滚下的球的运动，与自由下落的球的运动相同。伽利略研究落体运动时，首先证明了斜面上滚下的球的运动，与自由下落的球的运动有相同的运动性质。他要研究的落体问题，并不是研究为什么下落，而要研究怎样下落，所以必须做定量的实验。于是伽利略做了一个著名的实验——斜面实验。斜面的木板长12码（相当于11米），中间有一条笔直的沟槽，木板的斜度保持在5度左右。让一只小黄铜球从斜板上滚下，测量小球沿斜面滚下的距离与它相应的时间。当时是用“水钟”来测量时间间隔的。实验结果，伽利略发现在连续的各个时间间隔内，小球滚下的距离与奇数1、3、5、7……成正比。发现在各个连续时间内，小球滚下的总距离与1、1+3、1+3+5、1+3+5+7、……成正比，即与整数1、2、3、4、……的平方成正比。伽利略用不同重量的小球，在不同的倾斜度的条件下，重复很多次实验，都得到了同样的结果，即小球所通过的路程与所经历的时间的平方成正比，即  $s \propto t^2$  或  $s/t^2 = \text{常数}$ 。利用外推法即可得出，当斜面的倾斜角为  $90^\circ$  时，这一结论也应该成立。于是得出自由落体也是匀加速运动，由此建立了自由落体定律。这样，便推翻了亚里士多德的关于重物比轻物先落地的错误观念。

伽利略在斜面实验的基础上，又做了第二斜面的实验，即在斜面的对面再放置一个斜面，下端相连。小球沿高度为  $H$  的斜面滚下，并沿第二斜面滚上，如果摩擦小的话，小球基本上可以达到同样的高度  $H$ 。如果第二

斜面的倾斜度减小，则小球不管实际路程的延长，还要滚到高度  $H$ 。随着倾斜度不断减小，小球滚过的路程将越来越长。如果第二斜面是水平面，那么小球将以不变的速度值沿平面永远运动下去。于是，他得出结论：“当一个物体在一个水平面上运动，没有碰到任何阻碍时，……它的运动就将是匀速的并将无限地继续进行下去，假若平面是在空间中无限延伸的话。”这就是“惯性原理”。这清楚地表明亚里士多德的运动观念是不对的，力不是产生运动的原因，而是改变运动的原因，这样便把动力学的研究引上了正确的道路。

发现单摆的摆动周期与振幅无关，也是伽利略的一个贡献。相传在 1583 年，当他在比萨教堂祈祷时，他的注意力被点亮以后还在摆动的大油灯的运动所吸引。伽利略以他仅有的“表”——自己脉搏的跳动——来计算油灯摆动的时间，他发现即使大油灯的运动已大大减弱，但摆动的时间还是相等的。由此伽利略发现了摆的等时性。当时他正在研究医学，就用这种摆来测量病人的脉搏。这一成果，包括后来做的实验，在《关于两门新科学的对话》中也有记载。

伽利略还规定了动量的确切定义，他强调动量是动力学中的一个基本量，并以速度和重量的乘积来度量。就单摆的摆动而言，他认为“沿着一个弧降落时所得到的每一个动量等于能促进同一个运动体通过同样的弧上升所需的动量。”这实质上已涉及到机械能守恒定律。

伽利略在天文学上也有不少贡献。根据光学原理，他自制了一架天文望远镜（左图），利用这架天文望远镜观察，能使物体移近 30 多倍。1610 年 1 月 7 日开始，他利用望远镜观察天空，获得了几项重大的发现：月球的表面也是凹凸不平的，有洼地、平原和山脉；太阳上有黑子，并根据黑子的移动推测太阳有自转；金星有位相变化，木星有 4 个卫星绕它旋转。这些都证明了哥白尼(N.Copernicus, 1473—1543)的日心系是正确的。

#### 【牛顿和《自然哲学的数学原理》】

牛顿(Isaac Newton, 1643.1.4—1727.3.31)是英国科学家。他积前人的科学理论之大成，在物理学、天文学、数学方面都作出了卓越的成果，所建立的经典力学体系，囊括了这一时代的主要科学成就，统一说明了大约横跨 40 个数量级的质量的运动，在以后 200 多年间始终被奉为经典，至今还是物理学理论中最基本的、最有效的和最优美的部分。而他的思想影响，波及了 18 世纪几乎所有的科学学科，制约了以后两个世纪自然科学的发展。为了颂扬这位伟大的学者，当时英国著名的诗人波普(A.Pope, 1688—1744)曾写道：

Nature and Nature's laws lay hid in night,

God said "let Newton be" and all was light. [注]

这两句铭文后来被铸在铁板上，镶嵌在牛顿诞生的屋子的墙上。

牛顿科学创造的顶峰是《自然哲学的数学原理》(以下简称为《原理》,右图),该书于1687年发表。在《原理》中,牛顿概括了他的前人伽利略、开普勒(J.Kepler,1571—1630)、笛卡儿(R.Descartes,1590—1650)、惠更斯(C.Huygens,1629—1695)、胡克(R.Hooke,1635—1703)、哈雷(E.Halley,1656—1742)等的成果以及他自己的研究,站在巨人的肩上,首次创立了一个地面力学和天体力学统一的严密体系,成为[注]译文为自然和自然规律,都隐藏在黑暗的夜晚;上帝说:“让牛顿诞生”,于是一切变得光明。整个经典力学的基础,实现了物理学发展史上的第一次大综合。

牛顿在《原理》一书中,提出了不少基本概念,阐述了运动的基本定理或定律。在该书的第一编中,就提出了“定义和注释”,其中包括8个定义和4个注释。

定义1.物质是用它的密度和体积一起来量度的。

由此可见,牛顿把质量定义为“物质的量”,并用密度和体积来量度,对密度是理解为物体的单位体积被原始物质填满的程度。

定义2.运动的量是用它的速度和质量一起来量度的。

这里牛顿定义的“运动的量”就是动量,并认为“整个物体的运动是其各部分运动的总和”,指明了动量是一个相加量。

定义3.所谓vis insita,或物质固有的力,是每个物体按其一定的量而存在于其中的一种抵抗能力,在这种力的作用下物体保持其原来的静止状态或者在一直线上等速运动的状态。

在解释这一定义时,牛顿认为“这种力总是同具有这种力的物质的量成正比的。它和物质的惰性没有什么差异,只是说法上不同而已。一个物体,由于其物质的惰性,要改变它的静止或运动状态就极其不易。因此,这种固有的力可以用一个最确切的名称‘惯性’或‘惰性力’来称它。”这就引入了质量作为物质惯性量度的这一物理涵义。

定义4.外加力是一种为了改变一个物体的静止或等速直线运动状态而加于其上的作用力。

在解释这一定义时,牛顿指出:“这种力只存在于作用的过程中,当作用过去以后,它就不再留在物体之中。因为物体只需要用它的惯性来维持它所得到的每一个新的状态。”这就不再留在物体之中。因为物体只需要用它的惯性来维持它所得到的每一个新的状态。”这就表明了力是改变运动状态的原因。

从定义5到定义8是关于向心力的论述:

定义5.向心力是一种使物体被拉向或推向、或以任何方式趋向作为中心的一点的力。牛顿在解释这一定义后指出:“任何一个向心力的量可以看作有三种:绝对的、加速的和运动的。”

定义6.向心力的绝对量,正比于把它从中心传到周围空间中的那个

根源的效力。

定义 7 . 向心力的加速量，正比于其在一定时间内所产生的速度。

定义 8 . 向心力的运动量，正比于其在一定时间内所产生的运动。

在 4 个“注释”中，牛顿阐述了自己的绝对时空观和绝对运动、相对运动的观念。在“注释 1”中，牛顿明确提出“绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而在均匀地、与任何其他外界事物无关地流逝着，它又可以名曰‘延续性’。”并且认为“相对的、表观的和通常的时间是延续性的一种可感觉的、外部的通过运动来进行的量度，我们通常就用诸如小时、日、月、年等这种量度以代替真正的时间。”在“注释 2”中，牛顿对空间的观念下了定义，认为“绝对的空间，就其本性而言是与外界任何事物无关的而永远是相同的和不动的。”并认为“相对空间是绝对空间的可动部分或者量度”。因此牛顿得出“绝对空间和相对空间，在形状上和大小上都相同，但在数学上并不总是保持一样的。”在“注释 4”中，牛顿对绝对运动和相对运动下了一个断言，认为“绝对运动是一个物体从某一绝对的处所向另一绝对的处所的移动；相对运动是从某一相对的处所向另一相对的处所的移动。”并认为“真正的、绝对的静止，是指这一物体继续保持在不动的空间中的同一个部分而不动，而在这不动的空间中，船本身和它的空隙以及船中所含的一切都在运动。”他进而指出“可以根据其特性、原因和效果来区别静止和运动，绝对和相对。真正静止的物体彼此间也都是静止的，这是静止的一个特性。”

从上述的定义和注释中，可以看出，牛顿在建立经典力学体系的过程中，提出了 5 个物理学基本概念：质量、动量、力、时间、空间。这些概念在物理学的发展中，甚至在自然科学发展都起了重要的作用。

在《原理》的第一编中记载着对机械运动的 3 个基本定律的描述，当时是冠以“公理，或运动定律”这样一个标题。“定律 1. 每个物体继续保持其静止或沿一直线作等速运动的状态，除非有力加于其上迫使它改变这种状态。”这就是惯性定律的原始表述法。“定律 2. 运动的改变和所加的动力成正比，并且发生在所加力的那个直线方向上。”应该指出，在这一表述中，牛顿是把力的作用和运动（动量）的变化联系起来的。“定律 3. 每一个作用总是有一相等的反作用和它相对抗；或者说，两物体彼此之间的相互作用永远相等，并且各自指向对方。”这就是作用和反作用定律的原始表述法。

在《原理》中，紧接着运动定律后面的是以“物体的运动”为标题的 5 个推论，前两个推论论述了力的合成与分解以及运动的叠加原理，后两个推论阐述了伽利略的相对性原理，中间一个推论是由运动定律导出动量守恒定律：“两个或两个以上的物体的共同重心，不会因物体本身之间的作用而改变其运动或静止的状态；因此，所有相互作用着的物体（如无外来作用和阻碍），其共同重心将或者静止，或者等速沿一直线运动。”

《原理》同时也记下了牛顿对万有引力定律的原始表述形式。在该书的命题 LXXVI、定理 XXXVI 就是关于这个问题的描述：“如果一些球体，不论它们（就其物质密度和吸引定理 XXXVI 就是关于这个问题的描述：“如果一些球体，不论它们（就其物质密度和吸引力而言）按相同比例从中心到球面是如何的不相似，但在离中心一定距离地方绕中心四周则不论何处都相似，并且每一点的吸引力随着其与被吸引的物体的距离平方而减小，那么我说其中一个球体用以吸引另一个球体的整个力将与两中心间距离的平方成反比。”在“推论”中又认为：“引起运动的吸引力，或者一个球体对另一个球体的重量，在两中心间的距离相等的情况下，将与吸引和被吸引的球体联合起来成正比，也就是说，与一个球体和另一个球体相乘而得出的乘积成正比。”“在中心间的距离不相等的情况下，与这乘积成正比而与这距离的平方成反比。”

#### 【牛顿力学的验证和传播】

完成于 17 世纪的牛顿力学是如此辉煌，它为以后一个半世纪，能够建立力学的宏观结构，奠定了物理学基础。

1758 年 12 月，天文学家哈雷，将近半个世纪以前根据牛顿力学理论预言的彗星，准确地回归到近日点。这颗后来被称为哈雷彗星的庞然大物，尾巴扫过了半边天，戏剧性地再次证明了牛顿理论不仅适用于地上物体的运动，而且也适用于天体的运动。哈雷彗星的轨道计算、预言和验证，是 18 世纪最引人注目的力学成就之一。

对牛顿力学理论的另一方面的实验研究是对于万有引力常数的测定。最先考察这个问题的是英国人马斯基林（Maskelyne, 1732—1811），他用的方法是测量大山两侧的铅垂线的偏离。显然，大山的质量与整个地球的质量相比是微不足道的，所以这种偏离也是微乎其微的，很难据此作出任何数值上可以信赖的精密测量。最先作出这一数字的精密测量的人是英国的卡文迪许（参阅本书第 11 页）。由此，卡文迪许有时被称为“第一个称量地球的人”。

和实验研究相并行的是关于牛顿力学的理论上的某些发展，但这种发展只具有力学完备性的特征，而且大多数出自数学家之手。18 世纪中后期，牛顿的思想首先在法国得到了广泛传播。

1733 年，瑞士数学家和物理学家 D. 伯努利（D. Bernoulli, 1700—1782）出版了《流体动力学》，提出了流体运动的定律，后人称之为伯努利方程（参阅本书第 21 页）。他还用分子运动论的观点来论证玻意耳定律。另一位瑞士科学家欧拉（L. Euler, 1707—1783）发展了动力学的分析概念，在《运动理论》一书中，分析了刚体运动问题，在流体力学中提出了欧拉方程。法国数学家达兰贝尔（J. d' Alembert, 1717—1783）于 1743 年发表了《动力学论》，提出了由他的名字命名的“达兰贝尔原理”。他引进了“惯性力”的概念，把动力学问题化作静力学问题来处理，把牛顿第二

定律表示的运动方程，看成是在一瞬间处于平衡状态的力系，即

$$F - ma = F + F_{\text{惯}} = 0。$$

这一原理的引入，对于分析力学的建立，力学理论的具体应用，都有重要的意义。

拉格朗日 (J.L.Langrange, 1736—1813) 是 18 世纪最主要的数学家之一，他并不是以物理学家身份，而是以数学家的身份发展了牛顿理论的。他提出的三体问题的解在当时并无物理对应物，只是在 100 多年以后的 1906 年，才观察到太阳系内第一例——三个天体相互吸引并一起运动的情形。在对万有引力的研究中，1777 年他就引进了与万有引力定律有关的“势”的概念，其梯度即为力。这一概念的创立，有利于清晰地描述引力场，对以后分析力学的建立，有重要的作用。

18 世纪关于牛顿理论的研究，是以确立陨石的运动也能用牛顿定律处理这一结论而结束的。法国人克拉尼 (E.L.F.Chladni, 1756—1827) 在 1794 年指出，陨石的运动与牛顿定律是相容的，从而进一步确立了牛顿定律作为基础的、从天体到地面上的石块、尘埃的普遍定律的地位。

#### 【笛卡儿与莱布尼茨的运动量度之争】

笛卡儿 (BeneDescartes, 1596.3.31—1650.2.11) 是法国哲学家、西方近代哲学的创始人之一，二元论者、唯理论者，也是一位物理学家、数学家。莱布尼茨 (GottfriedWilhelmvonLeibniz, 1646.7—1716.11.14) 是德国近代哲学家、客观唯心主义者、唯理论者，也是一位数学家、自然科学家，数理逻辑的创世人之一。

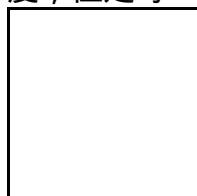
对于物体运动量的问题，不论是自然科学家还是哲学家，都认为是一个重要的问题。自然科学家为了从量的方面去研究和比较各种机械运动的大小，试图找出一个普适的物理量来作为运动的量度；哲学家为了阐明物质运动不灭原理，也需要从量的方面说明物质运动的永恒性。历史上，在对运动量这一概念作出理论概括时，通过不同的途径、不同的实验方式，得出了不同的看法，从而出现了关于机械运动两种量度的长期争论，也可简称为笛卡儿与莱布尼茨的争论。

笛卡儿认为，运动物体的质量  $m$  和速度  $v$  的乘积就是物体的运动的量度，称为运动量。笛卡儿的运动量概念是现成地从伽利略那里取来的。伽利略当时曾提出过“动量”的概念，并用它来表示物体运动的强度。笛卡儿对物体碰撞问题的研究极为重视，通过研究提出了“运动量守恒”的思想，这就是对伽利略动量概念的发展。笛卡儿还把“运动量守恒”的思想推广到整个宇宙，作出了宇宙的“运动量”守恒的哲学结论。1644 年，笛卡儿在《哲学原理》第二部中，明确提出了运动不灭原理：“物质有一定的量的运动，这个量是从来不增加也从来不减少的，虽然在物质的某些部分中有时有所增减。……每当一部分的运动减少时，另一部分的运动就相应地增加。”十分明显，笛卡儿的“运动不灭原理”是建立在机械运动

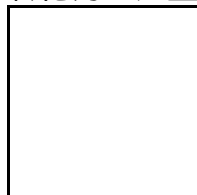
守恒的基础上的，他所说的“运动”仅仅是指机械运动，因此，还存在着不少问题。但是，这种坚持从自然界本身来说明世界的观点，对哲学上关于物质运动永恒不灭思想的论证，仍然具有更大的意义。此后，牛顿赞成用动量  $mv$  作为物体运动的量度，并从物理学上更确切地确定了动量的概念。由于牛顿力学在当时占绝对统治的地位，17 世纪的前期，自然科学界就普遍承认动量  $mv$  运动的量度。

莱布尼茨通过研究自由落体运动，揭示了笛卡儿运动量与运动量守恒的矛盾。1686 年，莱布尼茨在他发表的“关于笛卡儿和其他人在自然定律方面所犯的显著错误的简短证明，按照这个定律，他们认为上帝使运动量守恒；这是他们把力学歪曲地利用了”的论文中，指出用  $mv$  去量度落体运动，运动量并不守恒，而用  $mv^2$  去量度运动，运动量是守恒的。于是，他接受了荷兰物理学家惠更斯在 1669 年提出的以  $mv^2$  作为运动量的主张。但是，莱布尼茨也承认动量  $mv$  在一定场合（如碰撞、杠杆、轮轴等简单机械装置中）用来量度运动是有效的。进而主张把动力分成“死力” $mv$ （压力、拉力）和“活力” $mv$ （动能）两种，这样，运动便可以分别用死力和活力来量度，但强调只有活力  $mv$  才是“物体的真正的运动”的量度。必须指出，实质上莱布尼茨并不了解他自己提出的运动量  $mv^2$  的本质意义，也不了解  $mv^2$  和  $mv$  之间的根本区别。他还不能摆脱当时机械论的桎梏，片面地认为  $mv^2$  才是物体真正运动的量度，不认识  $mv$  对运动的量度在一定的条件下同样是正确的。同时他用“力”来表示运动量，有很大的局限性。

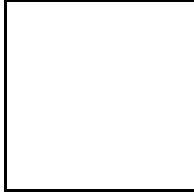
笛卡儿派和莱布尼茨关于运动量问题的争论，使欧洲的数学家和物理学家分成了两大营垒，两派各执己见，论战达半个多世纪之久。实质上，这场争论是很有意义的。要搞清这个问题的关键在于弄清楚为什么运动会有两种量度。要弄清这个关键问题，必须坚持辩证唯物主义的运动观，认识到物质运动形式是多种多样的，不单是机械运动；运动形式又是多样的统一，不同的运动形式之间是可以相互转化的；运动不灭不能归结为机械运动的不灭，必须揭示机械运动向其他运动形式转化过程中的守恒性。根据这种观点，便能得出两种运动量度的正确结论。机械运动确实有两种量度，但是每一种量度适用于某个界限十分明确的范围之内的一系列现象。



转化为一定量的其他形式的运动的能力来量度的机械运动。也就是说， $mv$



“持续的机械运动”，就是运动的变化只局限于机械运动的范围中，不发生运动形式的变化；所谓“消失了的机械运动”，即指机械运动不再保持原来的运动形式进行传递，它作为机械运动的形式消失了，而以相当的其他运动形式的能量（如热能、光能、电能等）出现。也即表示有运动形式



机械运动。

#### 【卡文迪许和引力恒量的测定】

卡文迪许(HenryCavendish,1731.10.10—1810.2.24)是英国化学家、物理学家。在物理学上的一大贡献即是在他的晚年做了扭秤实验，由此测出引力的大小，并推算出地球的密度。

扭秤实验的仪器是简单的，但卡文迪许的考虑是很周密的。他采用一根分量轻而强度高、长为6英尺的木棒作为臂，用一根40英寸长的细金属丝将该木臂水平悬挂起来，木臂两端各悬一个直径大约为2英寸的铅球。为了避风，全部仪器放在一个窄小的木箱内。在实验过程中，除了扭转悬丝所需要的力以外，不应该有其他的作用力使木臂沿其中心转动，这样就保证实验的精确性。他还采用两个直径为8英寸的铅球，分别与悬挂在木臂两端的小铅球尽可能的接近。铅球之间的引力作用使悬丝扭转。从悬丝的扭转角度，可测出这些球之间的相互吸引力。根据万有引力定律，便可以算出引力恒量G。再由此推算出地球密度。卡文迪许做了很多次实验，几十次的测量、计算，其平均结果表明地球的密度比水的密度大5.48倍，其误差约为14%，这一结果与现代测得的数值5.518很接近。

#### 【海王星的发现和火神星之谜】

1781年，英国天文学家威廉·赫歇耳(WilliamFrederickHerschel,1738—1822)发现了天王星，其实这颗星体很早已在当时天文学家的观测、研究之中，只是过去认为它是一颗恒星。1821年，法国经度局要编制木星、土星和天王星的星历表。编制者利用建立在万有引力定律基础上的大行星摄动理论来计算这3颗行星的位置和轨道。发现木星与土星的理论计算结果与实际观测符合得很好，而天王星则很不理想。按1781年以前的观测资料计算的轨道与按1781年以后观测资料计算的轨道完全是两个不同的椭圆轨道。是1781年以前的观测资料不准确，还是存在一个大行星的摄动，使天王星改变了运动的轨道呢？时过不久，1830年以后天王星星历表上计算出来的位置又与观测实际误差达20'，并且误差越来越大，到1845年，误差竟达到2'之多。当时大多数天文学家并不怀疑观测资料的准确性，而认为存在一颗行星，它影响着天王星的运行轨道。但也有一些天文学家，则怀疑大行星摄动理论的正确性，这一理论的基础是万有引力定律。然而，



有两位年轻的天文学家则坚信万有引力定律是正确的，一位是英国的亚当斯(J.C.Adams, 1819—1892)，另一位是法国的勒威耶(U.J.J.Leverrier, 1811—1877)，他们各自独立地用大行星摄动理论来预测天王星轨道外面的那颗未知行星的位置。

1844年，年仅25岁的亚当斯便开始思考这个问题，试图根据摄动理论反推未知行星的位置、轨道和质量。这一反推的理论计算是非常困难的，过去从来没有人做过这样的计算工作。亚当斯于1845年第一个算出这颗未知行星的轨道和质量，并将结果分别报告了剑桥大学天文台台长和格林威治天文台台长，但没有能引起他们的重视，报告也被压着没能发表，更没能用天文观测来加以证实。1846年，勒威耶35岁，也开始研究这个问题，他是在巴黎天文台台长的请求下开始寻找这颗未知行星的。他根据理论值和观测值，进一步推算出这颗未知行星的质量、位置以及它的轨道，并于当年的6月1日、8月31日公布了研究的结果，后在9月18日将推算结果寄给了柏林天文台的伽勒(J.G.Galle, 1812—1910)。伽勒收到信后立即进行观测，按勒威耶的推算结果，在相距不到 $1^\circ$ 的地方找到了这颗行星。巴黎天文台台长知道这一消息后，非常高兴，并建议把这颗行星命名为勒威耶星。后来还是按照传统的方式命名为海王星。这一消息传到英国后，才引起天文学家对亚当斯一年前发现的重视，但为时已晚。经过好几年的争论，最后天文学界承认海王星是两位天文学家各自独立地发现的。

海王星发现15年之后，1859年，勒威耶首先观测到水星绕太阳每公转一周，近日点的位置就有微小的改变，这种现象称为“进动”。按照牛顿力学理论，水星绕太阳作椭圆运动的轨道应该是重复的，现在发现了近日点的进动现象，同时每百年进动5600弧秒。考虑到金星对水星的吸引及其他各种因素，可以解释5557弧秒，余下的43弧秒就无法解释。当时有不少天文学家仿照海王星发现的“经验”，假设在水星与太阳之间还有一颗行星，由于它对水星的吸引而造成这一进动。这颗行星虽然还未找到，但已经命名为“火神星”。经过一段时间的观测，没能找到这颗行星，就形成了“火神星之谜”，困惑了不少天文学家。1916年，爱因斯坦(A.Einstein, 1879—1955)建立了广义相对论，这一理论可以解释水星近日点进动现象，理论计算值为43.03弧秒。这一结果，一方面解释了水星近日点的进动，另一方面水星近日点进动43弧秒的结论，成为广义相对论的第一个验证。

## (二) 热学部分

### 【我国古代的热学知识】

#### 对于冷和热的认识

温度是热学中极为重要的一个概念，通常表示物体冷热的程度。我国古代就已经认识到较冷的物体和较热的物体之间的区别，开始掌握了降温术和高温术。在烧制陶器和冶炼过程中，工匠凭“火候”、火的颜色，来定性地判断温度的高低。《淮南子》中曾记载“见瓶中之冰而知天下的寒暑”，表明已能从水的物态变化来判断气温的高低。西周初期，古人已经将冬季的天然冰，在春夏时，用来冷藏食物和保存尸体。由于冶炼业的发展，古人已经掌握了获得高温（摄氏千度以上）和利用高温的技术。

宋代，已有制造保温器的记载，其中最精彩的当推“伊阳古瓶”。南宋洪迈（1123—1202）的《夷坚甲志》中写道：“张虞卿者文定公齐贤裔孙，居西京伊阳县小水镇，得古瓦瓶于土中，色甚黑，颇爱之。置书室养花，方冬极寒，一夕忘去水，意为冻裂，明日视之，凡他物有水者皆冻，独此瓶不然。异之，试之以汤，终日不冷。张或为客出郊，置瓶于筐，倾水沏（yuè）茗，皆如新沸者。自是始知秘，惜后为醉仆触碎。视其中，与常陶器等，但夹底厚二寸。有鬼热火以燎，刻画甚精。无人能识其为何时物也。”这实际上是最早的保温瓶，其原因是夹底，防止了热传导。

#### 对水的物态变化的认识

露、霜、雨、雪与生活、农业生产息息相关，所以我国古代对此早有认识。在周代的《诗经》里，就有“白露为霜”的诗句，表明古人已认识到霜是白色的固态的露。对雨、雪的形成问题在古籍中也有记载，如战国时期的《庄子》一书中就有“积水上腾”的提法，表示水受热蒸发成水气而上升，指出了降雨的前提条件。

对露、霜、雨、雪和温度的关系，王充在《论衡》的《说日篇》中已有记载：“云雾，雨之微也，夏则为露，冬则为霜，温则为雨，寒则为雪。雨露冻凝者，皆由地发，不从天降也。”并在《感虚篇》中还进一步说明：“夫云出于丘山，降散则为雨矣。人见其上而坠，则谓之天雨水也。夏日则雨水，冬日天寒则雨凝而为雪，皆由云气发于丘山，不从天上降集于地，明矣。”并认为“寒不累时则霜不降，温不兼日则冰不释。”由此可见，王充对露、霜、雨、雪的认识，比较正确地反映了自然界中的热现象和物态变化，并认为物态变化与热量的积蓄有关。

关于露、霜的成因，东汉蔡邕曾明白地指出：“露，阴液也。释为露，凝为霜。”这里的“阴液”就是水液的意思。在《五经通义》中也认为，霜是“寒气凝结”出来的，是在地面上形成的，并非从天空中降下来的。了解了霜的成因后，人们就想办法来对付它。农业生产中如何防霜在古籍中也早有记载，如北魏时期的贾思勰撰写的《齐民要术》中就有记载：“天

雨新晴，北风寒冽，其夜必有霜。此时放火作（y n），少得烟气，则免于霜矣。”这是很合乎物态变化道理的。表明为了防霜，烧些柴草，使之成为没有火焰的烟堆（“ ”），其作用之一是提高地面附近的气温，作用之二是使地面蒙上一层薄薄的烟尘，起到隔热作用，这样就可以防止霜冻了。

### 对热的本性的认识

热是什么？殷商时期形成的“五行说”中，就把火看成是构成宇宙万物的基本元素之一。在古代，人们往往把火和热等同起来。墨家则认为，火是包含在木里面的，“火”元素离开木，木便燃烧起来（“火离，然。”），这种观点很像18世纪初流行于西方的燃素说观点。

除此以外，也有用运动的观点来解释冷热的，如唐代柳宗元在《天对》中曾提到“吁炎吹冷”的观点，认为元气缓慢地吹动时，便造成炎热的天气，元气迅疾地吹动时，则造成寒冷的天气。把冷、热和元气运动的快慢联系起来，已有了把冷、热与物质运动关联的萌芽。

### 对热能的利用

我国古代人们通过周密的观察，发现水总要往低处流，热气总是向上升，就产生了利用热气向上的力量使物体上天的设想。相传在公元前140年至前88年期间，汉武帝时淮南王刘安（公元前179—前122）等写的《淮南万毕术》中就有“取鸡子，去其汁，然（即燃）艾火纳空卵中，疾风因举之飞”的记载，这可称之为“热气球”。当然根据实践和计算结果，这东西是飞不起来的，但它表明我国古代人们对利用火所产生的热空气举起重物已有了可贵的设想，并进行过试验。到了五代，热能还应用在军事通信方面，即利用热空气浮升原理制作信号灯。相传莘七娘在某次作战时，曾用竹篾扎成架子，糊上纸，做成灯笼形，下面用松脂点燃，利用热空气上升的力量，使灯飞上高空，作为军事信号，当时称“松脂灯”。到南宋时期，在范成大的《石湖居士诗集》中曾写道：“掷烛腾空稳”，并注曰：“小球灯时掷空中”。这种小球灯，即为民间传说的“孔明灯”。至于走马灯的制作和描绘，在不少古籍中均有记载。

由于我国古代火药发明得早，对火药的利用也就比较早，从目前所掌握的资料来看，唐末宋初时期，就把火药用到武器制造上，已能制造火药炮。火药炮就是把火药包成容易发射的形状，把火药包点燃后，放在抛石机上抛出去，其威力比石炮要大得多。北宋的曾公亮（999—1078）编著的《武经总要》中，不仅描述了各种火药武器，还记下了世界上最早的3种火药配方。

唐末宋初时期，已经有利用火药喷射来推进的火箭。至于利用在箭头上附着油脂、松香、硫磺之类易燃物质，点燃后发射出去以引起对方燃烧的带火的箭，则在三国时期就已经有了。在明代，茅元仪所著的《武备志》中记载了一种“火龙出水”火箭：“水战，可离水三四尺燃火，即飞水面

二三里去远，如火龙出于江面，筒药将完，腹内火箭飞出，人船俱焚。”从这个记载来看，其原理和现代的二级火箭基本相同。在《武备志》中还记载着大量关于火箭方面的内容，如箭头除普通形状外，还有刀形、枪形、剑形、燕尾形等等；它同时发出去的箭数可达几十支甚至上百支，称为“火弩流星箭”（同时发箭 10 支）、“一窝蜂”（同时发箭 32 支）、“四十九矢飞镰箭”、“百矢弧箭”、“百虎齐奔箭”等。

随着火箭的发射和热能的进一步利用，出现了雏型的喷气装置。科学史家席姆（Zim）所写的《火箭与喷射》一书中有这样的记载：“约当 14 世纪之末，有一位中国官吏万户，他在一个坐椅的背后，背上四十七个当时他可能买到的最大的火箭，他把自己捆在椅子的前边。两只手各拿着一个大风筝，然后叫他的仆人用火同时把四十七个大火箭点着。他的目的是想借助火箭推进的力量加上风筝上升的力量飞向前方。”从历史记载来看，这个试验没能成功，但这种想象力和探索精神令人惊叹，所以席姆称他为“第一个企图使用火箭作运输工具的人”，“第一次企图利用火箭作飞行的人”。

综上所述，我国热动力方面的发明，由火药到火箭，进而发展到雏型喷气装置，当时在世界上是先进的，对世界的科学技术和社会经济发展起着巨大的影响。

#### 【德谟克利特和古代原子论】

德谟克利特（Demokritos，约公元前 460—前 370）是古希腊哲学家，古代原子论的创立者之一。他继承古希腊原子唯物论的奠基人之一的留基伯（Leukippos，约公元前 500—前 400）的哲学思想，提出了自己的古代原子论的思想。

德谟克利特认为万物由原子和虚空组成。原子是一种最小的、不可见的、不能再分的物质微粒，虚空则是原子运动的场所，是空无一物的地方。原子的大小、形状和位置各不相同，原子在虚空中又作剧烈的、零乱的直线运动，在运动中彼此碰撞而构成世界万物。德谟克利特利用原子和虚空的观念解释了自然界中许多现象，反对当时流传的宗教神话的观念。

#### 【阿佛伽德罗和阿佛伽德罗假说】

阿佛伽德罗（Ameldeo Arogadro，1776.8.9—1856.7.9）是意大利科学家，毕生致力于原子论的研究。

在盖·吕萨克（Gay - Lussac）工作的基础上，于 1811 年提出了一个对近代科学有相当影响的假说，后人称之为阿佛伽德罗假说。假说认为，在相同的温度和相同的压力的条件下，相同体积中的任何气体总具有相同的分子个数。这个假说在相当时间内不为科学家所接受，主要原因是当时还无法区别分子和原子。经过半个世纪以后，才被普遍接受，同时也改称为阿佛伽德罗定律。这一定律还可以有另一种表述，即在相同的温度和相同的压力下，1 摩尔任何气体所占的容积都相同。在标准状态下，1 摩尔理

想气体所占的容积已被实验准确地测定为  $22.41383 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{mol}$ 。与此同时，1 摩尔任何气体所含的分子数都等于  $6.022045 \times 10^{23}$ 。这一结论与上面的两种表述是等价的，而这一数字（常用  $N_A$  表示）称之为阿佛伽德罗常数。

#### 【布朗和布朗运动】

布朗 (Robert Brown, 1773.12.21—1858.6.10) 是英国植物学家。他对物理学的贡献是发现了悬浮于水中的花粉颗粒不停地作无规则的运动，后人称之为布朗运动。

布朗是从 1827 年 6 月开始这项研究的。开始时，他采用一种名叫山字草的植物的花粉晶粒，这种晶粒形状在圆柱形与椭圆形之间。当布朗检查这些晶粒浸在水中的形状时，发现许多花粉晶粒在运动。它们的运动不仅在流体中改变场所（是由其相对位置的调换而表现出来），而且经常变更它们本身的形状。经过反复实验、观察，布朗认为这种运动是花粉粒子本身的运动。布朗采用其他活体植物的花粉粒子，也发现同样的运动。

接着，布朗思考着，植物死后，这种特征是否仍然继续存在，能持续多长时间？他采用干枯的植物或用酒精浸过几天再晾干的植物，取出它们的花粉粒子，放在水中，结果发现这些花粉粒子也与活体植物的花粉粒子一样明显地在运动着。甚至他采用干蜡保存 20 年以上或超过 100 年的植物标本，发现仍有很大数量的粒子作明显的运动。

植物死去这么长久以后，还能保留生命力的这种出乎意料的事实，促使布朗做了第三步的实验。他把一小片玻璃捣烂，获得大量微粒，将这些微粒飘浮在水面上，它们同样作明显的运动。接着他用泥土、矿物、金属，凡是能设法研成粉末、而且细得可以暂时在水面上飘浮的微粒，都利用它来做试验，所得的结论是一致的。

经过 3 个月的试验、研究，布朗发表了自己的实验结果，书名为《简述 1827 年 6、7、8 月所作的关于植物花粉所含粒子的显微镜观察，和有机、无机物体中活动分子的一般存在问题》。这一成果也收入到 1866 年出版的《罗·布朗先生植物论丛》第一册中。这类运动的分子运动论解释曾由爱因斯坦提出，并由皮兰 (Perrin) 的实验所证实。

#### 【焦耳和热功当量的测定】

焦耳 (James Prescott Joule, 1818.12.24—1889.10.11) 是英国物理学家。开始时，他研究电学和磁学的问题，研究了电流生热等方面的课题，后来集中精力研究、测量热和机械功之间的关系，热功当量数值的测定是焦耳在物理学上的一大贡献。

18 世纪末，在热的本性的争论中，热是运动的观点暂占上风（参阅本书第 17 页），但是没能找到机械运动转化为热运动的定量关系，所以不足以击破热质说的观念。直到 1842 年，在实验中寻找和测量热功当量，情况才开始转变。

热功当量就是机械能转化为热能时，功  $W$  和热量  $Q$  之间的比值，用公式表示为  $W=JQ$ ，或  $J=W/Q$ 。热功当量的概念，最先是由德国生理学家、物理学家迈尔（J.R.von Mayer，1814—1878）在 1842 年提出的。而对这一比值的测量工作，则是焦耳做的。

焦耳关于热功当量实验的第一次量度结果，是在 1843 年发表的。他最初用以测定热功当量的方法，是用磁电机产生的电流通入导体以产生热量，比较在通路时转动磁电机所作的功，和在断路时所作的功之差，与所得的热量来决定热功当量的数值。采用这种方法所得的结果是：“能够将 1 磅水的温度升高 1 华氏度的热量等于并可以变换成能将 838 磅的重物竖直提升 1 英尺高的机械力。”把英制单位换算成现在通用的单位，可得热功当量数值  $J=4.432$  焦耳/卡。焦耳这里所讲的“机械力”，就是我们现在讲的对物体所作的机械功。

焦耳第二种测量的办法，是将压缩某定量的空气所需要做的功与压缩所产生的热量作比较。经过多次实验，于 1845 年发表论文，指出实验结果为：“每 1 磅水温度升高 1 度的热量是能将 795 磅重物升高 1 英尺所作的功。”即可表为  $J=4.281$  焦耳/卡。

接着，焦耳又采用新的办法做实验，即将水通过细管运动而放出热量，由此来测定热功当量，结果  $J=4.167$  焦耳/卡。

之后，焦耳采用了划水轮推动流体摩擦来测定热功当量的新办法，这就是我们现在常用的测量办法。焦耳自己描述了仪器装置和实验结果：这个实验“是一个在水罐中水平操作的铜制划水轮，运动可以通过重物、滑轮等工具传到罐中的桨。”“桨在水罐中转动时，遇到的阻力很大，所以重物（各 4 磅）下落的速率很慢，大约每秒 1 英尺，滑轮离地的高度是 12 码，结果在重物落到这 12 码的尽头时，滑索须重新绕起，以使桨可以再行转动。这样操作 16 次以后，就用一个灵敏度很高的、很准确的温度计来测定水所提高的温度。”焦耳对此实验连续做了 9 次，实验过程中都排除大气的冷效应和热效应，将结果折合成每 1 磅水的热容量后，焦耳发现“在水中由于摩擦而放出的每 1 度的热量，相当于耗用了提高 890 磅重物到 1 英尺高的机械力”，即是  $J=4.792$  焦耳/卡。

又过了一段时间，焦耳利用同样的实验设备，不仅对水进行测定，同时又用鲸脑油进行实验。做了大量的实验后，得到的平均值为  $J=4.203$  焦耳/卡。

焦耳测定热功当量数值的重要的实验论文，是在 1849 年 6 月 21 日提交给皇家学会的，并于 1850 年刊登于《哲学学报》第 140 卷。在论文的最后一部分，焦耳总结了本论文所述的实验，证明了下述两点：

“第一，不论固体或液体，摩擦所生的热量，总是与所耗的力的量成比例的。”

“第二，要产生 1 磅水（在真空中称量，其温度在 50 度和 60 度之间）

增加 1 华氏度的热量，需要耗用 772 磅重物下降 1 英尺的机械力。”（注：即表示  $J = 4.1574$  焦耳/卡）。”

尽管做了这么多的工作，焦耳并没有停止对这一问题的研究和测量，直到 1878 年，前后工作了三四十年，先后用各种方法进行了 400 多次实验，为科学的发展作出了贡献。这一历史告诉我们，对待科学研究应该发扬这种严谨的治学态度，一丝不苟地对待每一项研究工作，才能在工作中取得成绩。

### 【热质说与热之唯动说之争】

热是一种极为平常的自然现象，但是，“热”是什么？热的本性是什么？对此长期以来人们是有不同看法的。在古代，就有人将热（或火）看成是自然界的基本原素之一，也有人猜测热是一种粒子。17 世纪以后，多数人根据摩擦生热的现象，认为热是一种特殊的运动。在近代史上，第一个对热进行系统的科学探索的是英国的弗·培根（F. Bacon, 1561—1626）。他认为热的本质、精髓只是运动，热是一种在其斗争中作用于物体的较小分子之上的运动。随后，法国的笛卡儿（R. Descartes, 1596—1650）、俄国的罗蒙诺索夫（M. B. Lomonosov, 1711—1765）把热看作为物质粒子的一种旋转运动。当时在英国，培根的学说受到极大的反响，化学家玻意耳（R. Boyle, 1627—1691）、物理学家胡克（R. Hooke, 1635—1703）以及牛顿等都相信热是一种运动。玻意耳认为热是在物质内部产生的一种强烈的混乱运动；胡克认为热是由微粒的运动而产生的；牛顿认为物体各部分的振动是热的活动性质的由来。这种热之唯动说的观点流传得相当广，但是却缺乏精确的实验依据，所以它不能形成科学的学说。

18 世纪后，热是一种特殊的物质的观点——热质说（或称热来说）重新抬头，并逐渐取得了统治地位。热质说认为，热是一种特殊的、没有重量的、充满着整个物体的一种流质——热质（或称热素），热质不生不灭，存在于一切物体之中，又能从物体中流出或流进。物体的冷热，表示它所包含热质的多少；物体之间的热传导，就是热质的流动。人们往往把“热量”与“流体”相类比，由此来理解一些热现象。由于热质说能比较直观地解释一些物理现象和实验结果，同时与热质说有联系的量热学在当时也大大地发展起来，热质说就压倒了热之唯动说的观点。所以 1738 年法国科学院曾悬赏关于热本性的论文，获奖的 3 个人都是热质说的拥护者。1783 年著名的法国化学家拉瓦锡（A. L. Lavoisier, 1743—1794）提出氧化说，抛弃了“燃素”的观念，但 1789 年他对元素进行分类时，却把“热”包括在自己的化学元素表中，以字母“T”表示，归入气体元素一类里。

热质说可以解释许多热现象，引入了一些新的正确的概念（如比热、潜热等），并且首先对热进行了定量的分析。除此以外，热质说还确定以物质不灭、质量守恒为自己的出发点，这无疑给自己加上一个正确的前提。但是，热质说也有一个致命的弱点，就是无法解释摩擦生热的现象。在 18

世纪的最后几年里，一些实验结果使热质说陷于破产的深渊之中。

1798年，美国的伦福德（Count Rumford，1753—1814）伯爵在制造枪炮的过程中，把炮筒固定在水中，用马拉动很钝的钻头，使之转动，在炮筒内钻孔加工。结果发现，加工出来的铁屑很少，但是炮筒周围的水却不断地变热而沸腾。随着加工过程的不断进行，热几乎可以无穷无尽地产生出来。伦福德又设计了一系列钻孔的实验，设法将仪器与外界隔热，然后测量钻孔前后的金属的热容量有没有变化。实验结果表明，金属炮筒和切削出来的碎片的热容量完全一样。这个有名的实验否定了热质说，支持了热是一种运动的学说。

事过一年，1799年，英国化学家戴维（H. Davy，1778—1829）做了个实验：在不受外界温度的影响下，两块冰互相摩擦而熔解。用热质说也无法解释该现象。这个实验结果，同样支持了热是运动的看法。

根据现在的观点，这两个实验都证明了热之唯动说的观念是正确的。但是这两个实验还比较粗糙，那时还没有找到机械运动转化为热运动的定量关系，所以还不足以击破人们头脑中的根深蒂固的热质说的概念，以致于伦福德宣布其实验结果时，人们嗤之一笑，认为是违反“常理”的。甚至到19世纪50年代，在有些化学教科书中，仍然把“热”列为元素中的一种。直到1842年，实验中精确地测定了热功当量的数值后（参阅本书第16页），热质说才宣告破产。

热质说与热之唯动说之争，是物理学史上几个著名争论中的一个，争论的时间延续了几个世纪。但这场争论可以给我们一些启示。首先，在学术争论过程中，正确的东西要取得公认，必须付出艰巨的劳动。伦福德的炮筒实验、焦耳的实验、能量守恒原理的发现等等，都没有一下子被人们所公认，都经过了实践的检验。其次，错误的观念会影响科学理论的诞生。在物理学史上，卡诺（S. Carnot，1796—1832）相信热质说，尽管他已经跑到了热与功联系的大门前，提出了卡诺循环、卡诺原理，但却未能再跨一步进入大门，进一步提出热力学第二定律，丧失了觅寻真理的能力。即使他后期开始意识到热质说是不对的，但是由于他过早地离开人间，而对历史的进程没有起到应有的影响。这些告诉我们：要使自己具有旺盛的科学创造力，必须要求自己具有正确的哲学思维的能力，具有明辨理论和假说真伪的能力，在实践的基础上，才能使自己不断地有所发明、创造。

#### 【能量守恒与转化定律的建立】

能量守恒与转化定律的建立是19世纪物理学发展的重大成果之一，不仅是物理学史上，也是整个自然科学史上的重大事件。因此，恩格斯把它和细胞学说、达尔文进化论一起列为19世纪的三大发现。

关于运动不灭的观点，早在古希腊时就已产生，到了17世纪后，不少物理学家接受这种观点，并想在这个基础上建立有关的物理学定律。但由于两种运动量度的长期争论（参阅本书第9页），力的概念和能量（当时



叫活力)的概念也长期混淆不清,虽然杨氏(Thomas Young, 1773—1829)于1807年把莱布尼茨的具有做机械功本领的“活力”改称为“能”,以表示与“力”的区别,但这一观点却仍然没有被科学界所理解、所接受。这样,就无法研究自然界各种运动形式之间转化的规律性的问题。

第一个发表论文讨论运动形式转化规律、提出能量守恒的是德国医生迈尔(Robert Mayer, 1814.11.25—1878.3.20)。在行医过程中,迈尔发现病人的静脉血在热带要比在欧洲的更红,进而解释为血内氧气较多的缘故。迈尔认为人体消化食物的过程和无机界的燃烧过程一样,都要消耗氧气,都能增加能量。在热带,气温较高,为保持人体体热,所需要的热量相应就少一些,氧气消耗也就较少,这样人体静脉中剩余的氧气就较多,血就更红一些。由此,迈尔认为对人体来说,输入的力和输出的力应该是平衡的。(迈尔所称的力,其涵义就是现在的能量。为了有所区别,这里用“力”来表示。)在这种思想指导下,迈尔于1842年发表了题为“论无机性质的‘力’”的论文。在这篇论文中,他给出了更普遍的“力”的转化和守恒的概念。迈尔把自然“力”分成运动“力”、降落“力”、化学“力”(实际上是动能、势能、化学能),根据有果必有因、有因必有果的“因等于果”的思想,认为上述各类自然“力”均可互为因果。例如降落“力”可使物体下落,是因;而物体下落产生运动“力”,是果。反之,运动“力”又可举起物体而产生降落“力”。进而认为“力”是不会消失的,只是改变形式。迈尔还确定了“热”和机械“力”转化的数量关系(即热功当量),并进行了计算。迈尔将论文寄给德国著名的《物理学年鉴》编辑部,但遭到编辑部的拒绝,理由是缺乏实验依据。后来,该论文发表在《化学和药物年鉴》上。论文发表后20年,也只受到少数科学家的注意。

第一个用实验来验证能量守恒与转化的是英国物理学家焦耳,因为他用实验测量了热功当量的数值(参阅本书第16页)。

差不多在同一时期,德国的生理学家亥姆霍兹(H. L. F. von Helmholtz, 1821.8.31—1894.9.8)从生理学的角度研究了自然界各种“力”之间的关系。当时,生理学界普遍存在一种生命力的观点,并认为它是非物质的。亥姆霍兹反对这种观点,认为人和动物机体内的各种现象都与物质的运动有关,并研究了各种自然“力”之间的关系,指出各种“力”在转化过程中是守恒的。在不知道迈尔、焦耳工作的情况下,于1847年写就了题为《论活力的守恒》的小册子,并寄往《物理学年鉴》编辑部,但也遭到编辑部的拒绝。亥姆霍兹在论文中引入了中心“力”(即势能)的概念,以此来解释各种形式“力”的转化。

综上所述,能量守恒与转化定律建立的过程中,迈尔、焦耳、亥姆霍兹作出了不小的贡献,但是还有不少物理学家对此也作出了不同程度的贡献,如J.伯努利(Johann Bernoulli, 1667—1748)一再提到“活力守恒”,

另外，还有卡诺、伦福德伯爵、戴维、柯尔丁(L.A.Cold- ing ,1815—1888)等。所以这一发现也是一个国际性的发现。

能量守恒与转化定律的建立，把人们认为互不相干的各种物理现象联系在一起，统一于一个自然规律之中。物理学的任务就是要去发现普遍的自然规律，以规律性的最简单的形式表示某种物理量的不变性。所以对物理学来说，对这种守恒量的寻求不仅是合理的，而且也是一个极为重要的研究方向。但是，由于人们的传统观念的作怪，能量守恒与转化定律并没有被科学界所理解和接受，直到1860年左右，它才被普遍承认，同时它很快地成为全部自然科学的基石。从此以后，特别是在物理学中，每一种新理论的诞生，首先要检查它是否与能量守恒原理相符合。同时，能的理论决不会由于承认守恒定律而告终，相反，直到现在仍然总是由于新的发展而日益成熟。100多年的历史，证明了能量守恒与转化定律是一个普遍的自然规律。

#### 【开尔文和热力学温标】

开尔文原名威廉·汤姆孙(William Thomson, 1824.6.26—1907.12.17)，是英国物理学家。他对物理学的主要贡献是发现了热力学第二定律，成为热力学的奠基人之一，同时他又是承装第一条大西洋海底电缆的公司的工程顾问。1866年他获得爵士衔，于1892年晋升为开尔文(Lord Kelvin)勋爵。

W·汤姆孙在热学方面的一个贡献，就是创立了绝对温标，也称热力学温标。绝对温标T是热力学中一个重要的物理量，它是在1848年W·汤姆孙的一篇短文“基于卡诺的热的动力论和雷诺观察的计算所得的绝对温标”中被提出来的。温度概念的形成，是热学发展中的第一个进步，而温度的测定，长期以来被认为是物理学(甚至是自然科学)中最重要的问题之一，因此也就成为人们瞩目的研究课题。到了19世纪，这一课题的研究进入到了精巧细致地进行实验研究的阶段。W·汤姆孙对当时的温标不满意，他想建立一个与物质的性质无关的绝对温标。他在上述短文的最后提出：“我所建议的标尺的特点是，任何一度都具有相同的值；这就是说，当一单位的热从这个标尺上温度为 $T^{\circ}$ 的物体A传给温度为 $(T-1)^{\circ}$ 的物体B，则不论T的数目是什么，都将给出同样的机械效果。这正好可以用‘绝对温标’这个名称，因为它的特点是和任何特殊物质的物理性质完全无关的。”为了纪念他的功绩，后人将这一温标称为“开氏温标”，也称为“热力学温标”。在1927年，第七届国际计量大会上，将这一温标定为最基本的温标，1960年第十一届国际计量大会规定用单一固定点(水的三相点273.16K)来定义，其符号是T，单位为开尔文K。同时，摄氏温度t定义为 $T-T_0$ ， $T_0=273.15K$ 。由这一定义知道，热力学温度相差一度，摄氏温度也相差一度。绝对温标的零度为绝对零度(0K)。

#### 【瓦特和热机的发展】

瓦特 (James Watt, 1736.1.19—1819.8.25) 是英国发明家。经过瓦特的改进, 蒸汽机大大提高了实用价值, 同时也为英国的产业革命铺平了道路。

蒸汽机并非是瓦特发明的。如果追溯历史, 则可以一直追溯到公元初期。古希腊的发明家希罗 (Hero of Alexandria, 约公元 62—约 150) 曾发明过希罗球。希罗球是支承在两根垂直导管上的空心球体, 当加热下面容器内的水时, 蒸汽便沿着两根导管分别进入球内, 从球上两根相反方向的弯管喷出, 由于喷气的反作用, 球便沿着与喷气流动相反的方向旋转( 上图)。这是历史上最早记载的喷气动力装置, 当然它只能供欣赏, 无法实用。第一个制造能用的蒸汽机的是法国物理学家、发明家巴本 (D.Papin, 1647—约 1714)。他用一个铁圆筒中间装上一个塞子, 塞子下面盛有少量的水。对筒底加热, 筒内的水变成蒸汽, 推动塞子向上运动。然后将火移开, 铁筒冷却, 大气压便将塞子压下来。这样的蒸汽机太原始了, 实用价值不大。后来经过英国工程师塞维利 (T.Savery, 1650—1715) 和英国发明家纽可门 (T.Newcomen, 1663—1729) 的改进, 特别是后者, 蒸汽机的实用价值就提高了一步。1705 年纽可门制造了一台蒸汽机, 被利用来抽矿内的积水, 但因这一机器的汽缸仍是不断地加热和不断地用外加喷射水来冷却的, 就无法连续地工作。

1763 年, 瓦特在格拉斯哥大学工作, 修理教学仪器, 其中也包括修理损坏了的纽可门蒸汽机。瓦特在修理过程中, 弄清楚了工作原理, 找到了消耗大量燃料的症结所在, 于 1765 年改进了原有的蒸汽机。首先, 他设计了一个与汽缸分离的冷凝器, 汽缸外面装上绝热套子, 使它一直保持高温, 这样便提高了效率。其次, 于 1781 年又制造了从汽缸两边推动活塞的双向动作蒸汽机, 同时采用曲柄机构, 使活塞的往复式的直线运动转变为旋转运动。再次, 他又设计了离心节速器来控制蒸汽机的转速。经过这一系列的改进, 蒸汽机便大大提高了实用价值, 广泛地被工业部门所采用。

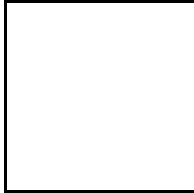
#### 【帕斯卡和帕斯卡定律】

帕斯卡 (Blaise Pascal, 1623.6.19—1662.8.19) 是法国数学家、物理学家。他对物理学的主要贡献是在流体静力学方面。

帕斯卡在 1663 年出版的《液体平衡论》一书中详细讨论了液体压强问题。在该书的第一章中叙述了几种实验, 它们的结果表明, 任何水柱, 不论直立或倾斜, 也不论其截面的大小, 只要竖高相同, 则施加于水柱底部的某一已知面积的活塞上的力也相同。这一个力实际上是液体所受的重力。第二章详细叙述了密封容器中的流体能传递压强, 讨论了连通器原理。帕斯卡利用一个充水的容器, 它有两个圆筒形的出口, 除此之外, 其他部分都封闭。两个出口的截面积相差 100 倍, 在每一个出口的圆筒中放入一个大小刚好适合的活塞, 则小活塞上一人施加的推力等于大活塞上 100 人

所施加的推力，因而可以胜过大活塞上 99 个人施加的推力。帕斯卡继续认为，不管这两个出口大小的比例如何，只要施加于两个活塞上的力和两个出口的大小成比例，则水的平衡就可以实现。帕斯卡在书中一一叙述了密封液体、压强不变、向各方向传递等帕斯卡定律的基本点。

除此以外，帕斯卡重新用水银气压计来计算空气的压力。他发现高度



种利用气压计测量高低不同的地方的压强差的实验，为以后的流体静力学、流体动力学的研究开拓了道路。

#### 【玻意耳和马略特】

玻意耳 (Robert Boyle, 1627.1.25—1691.12.30) 是英国化学家、物理学家。他在化学方面的主要贡献是将炼金术和化学分开，并且给化学元素下了明确的定义。他在物理学方面的主要贡献是研究空气的压强与体积的关系。

1662 年，玻意耳用弯曲的 U 形玻璃管，一端封闭，另一端开口，根据灌入水银柱的高度和封闭的空气柱体积，测量出空气的压强和体积的关系。

马略特 (Edme Mariotte, 1620—1684.5.12) 是法国物理学家。他非常注重实验的观察和研究，系统研究了空气的压强和体积的关系。

1676 年，马略特发表了关于空气性质的论文，指出气体体积的变化和它所受到的压强成反比，明确指出，只有在温度不变的情况下，此反比关系才成立。

马略特的发现与玻意耳的发现相同，而且是各自独立地发现的，何况玻意耳发表还早些，但是玻意耳发表结果时，并没有引起人们的注意。所以，现在英、美等国常把这一规律称为玻意耳定律，而在法国则称为马略特定律，有时就合称为玻意耳-马略特定律。

#### 【查理和盖·吕萨克】

查理 (Jacques Alexandre César Charles, 1746.11.12—1823.4.7) 是法国物理学家。他通过实验，研究了气体在体积不变情况下，压强与温度之间的关系，并于 1787 年发表论著，阐明了当体积不变时，一切气体的压强系数都相等。这就是现在称之为的查理定律。

盖·吕萨克 (Louis-Joseph Gay-Lussac, 1778.12.6—1850.5.9) 是法国化学家、物理学家。在物理学上，他主要根据查理研究的结果，着手研究气体在压强不变情况下，体积与温度之间的关系。经过系统的实验研究，于 1801 年发表论著，阐明了当压强不变时，一切气体的体膨胀系数都相等。这就是现在称之为的盖·吕萨克定律。

### 【伯努利和伯努利方程】

伯努利(Daniel Bernoulli, 1700.2.9—1782.3.17) 是瑞士物理学家、数学家。他对物理学的贡献以流体动力学为最突出。

1738年伯努利出版了共有13章的《流体动力学》一书,该书用活力守恒原理(就是能量守恒原理的早期提法)来解决流体动力学的问题。他用流体的压强、密度和流速作为描写流体运动的基本物理量,列出了流体动力学的基本方程,后人称之为伯努利方程。同时提出了“流速增加、压强降低”的伯努利原理。除此以外,他还认为气压是气体分子对容器壁撞击而产生的效应,建立了气体分子运动论的某些概念。

### 【昂尼斯和低温】

开默林-昂尼斯(Heike Kamerlingh-Onnes, 1853.9.21—1926.2.21) 是荷兰物理学家。他在低温物理领域有一系列的重要贡献。

19世纪末期,开默林-昂尼斯创建了莱顿实验室,它是世界著名的低温研究中心之一。1906年,他液化氢气获得成功。1908年,他将最后一个被认为是永久气体的氦气也液化了,从而使气体、液体之间的绝对界线消失了。1911年,他发现了纯的水银样品在低温 $4.22 \sim 4.27\text{K}$ 时,电阻消失了。接着又发现了其他一些金属也有类似的现象,他把这类现象称为超导电性。这一发现,开辟了一个崭新的物理学领域。

开默林-昂尼斯十分重视实验物理学中的定量测量,提出每个物理实验室应以“测量出真知”作为自己的座右铭。

由于对低温物理学发展所作的杰出贡献,开默林-昂尼斯荣获1913年诺贝尔物理学奖。

### (三) 电学和磁学部分

#### 【我国古代的电学和磁学知识】

##### 对雷电的认识

我们的祖先对大自然中的雷电现象早已十分注意，并细致地观察。远在公元前 1500 年的殷商时期留存下来的甲骨文中，就有“雷”字；西周时期的青铜器上也出现了“电”字，显然这里的“电”是指闪电。

关于雷电的成因和本质，我国古代的学者也进行了探讨，有不少独特的见解。西汉时的《淮南子·坠训形》中就有“阴阳相薄为雷，激扬为电”的记载，表示阴阳两气彼此相迫产生雷，相互急剧作用产生电。王充在《论衡·雷虚篇》中对雷电成因也作了解释，认为“盛夏之时，太阳用事，阴气乘之。阴阳分争，则相校轸。校轸则激射。”表明夏天阳气占支配地位，阴气与之相争，发生碰撞、摩擦、爆炸和激射，从而形成雷电。唐代《左传》“疏”中明确指出：“电是雷光”。宋代更有人认为，阴阳相激，“其光为电，其声为雷。”

与此相联系，早在三国和南北朝时，我国古籍上就有“避雷室”的记载，表明当时我国已有了避雷的措施。直至唐代，建筑物上都装有各种形状的避雷装置。表明当时人们对尖端放电现象也有了认识。

##### 对静电的认识

对静电现象的发现和认识，和西方一样，我国也是很早的。西汉末年的《春秋纬·考异邮》中就有“（玳）瑁吸”的记载。王充的《论衡·乱龙篇》中有进一步的记载：“顿牟（即玳瑁）掇芥，磁石引针，皆以其真是，不假他类。他类肖似，不能掇取者，何也？气性异殊，不能相感动也。”意思是说，经过摩擦了的玳瑁（琥珀）能吸引芥籽，磁石能吸引钢针，这是因为它们之间的“气性”相同，能相互感动；其他看起来与芥籽、钢针相似的东西，但因与玳瑁、磁石的“气性”不同，所以不能相互感动。东晋的《山海经图赞》中也有类似的记载，即“慈石吸铁，瑁取芥，气有潜感，数有冥会。”也把静电和静磁并列，同时认为是某种“数”在起作用。西晋时张华（232—300）撰写的《博物志》中有这样的记载：“今人梳头、脱着衣时，有随梳、解结有光者，也有咤声。”意思是说梳头、穿脱衣服时，常发生摩擦起电，有时还能看到小火星和听到微弱的响声。

##### 对静磁的认识

在我国，对静磁现象的认识，比对静电现象的认识还要早。公元前 3 世纪的《吕氏春秋·精通》中记载着“慈石召铁，或引之也。”东汉的《吕氏春秋注》中写道：“石，铁之母也。以有慈石，故能引其子。石之不慈者，亦不能引也。”明确提出慈（即磁）石能吸铁。

磁石吸铁的应用，在古籍中也有记载，如秦始皇为了防备刺客暗杀，用磁石建造阿房宫的北阙门。天然磁石在医疗中也有应用，如《史记·扁

《鹤仓古列传》中就有“齐王侍医遂病，自炼五石服之”的记载，“五石”中就包含磁石。

### 司南和指南针的发明

司南是我国指南针的最初形式，它是我国古代人民四大发明之一（左图）。最早的记载是在公元前3世纪战国末年《韩非子·有度》中，记有：“故先王立司南，以端朝夕。”“司南”就是指南器，“端朝夕”就是正四方的意思。《鬼谷子·谋篇》里也有“郑子取玉，必载司南，为其不惑也”的记载。“为其不惑”即是为了不迷失方向的意思。东汉的王充在著作中作了较具体的描述：“司南之杓，投之于地，其柢指南。”文中的“杓”是勺子，“地”是中央光滑的地盘，“柢”是勺的长柄。我国科学史家王振铎根据古籍的记载，发掘古墓的结果，复原出古代司南的原型。它是用天然磁石琢制成勺形的指南仪器，其形状像家用的汤匙，底部呈球形；地盘是用青铜制成的，中央光滑，由磁石琢成的司南在光滑的地盘上可以比较自由地转动；地盘的四周刻着“八干”（甲、乙、丙、丁、庚、辛、壬、癸）、“十二支”（子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥）和“四维”（乾、坤、巽、艮），共24向。

实际上，司南和地盘接触时，摩擦较大，效果不佳，应用受到影响。后来便发明了指南鱼。在曾公亮主编的《武经总要》前集卷十五中就记载有指南鱼的制作方法及其应用。根据记述，可以发现指南鱼是用人工磁铁做成的，而人工磁铁是利用地磁场进行人工磁化的，指南鱼放在水面上，转动时的摩擦比司南与青铜地盘之间的摩擦要小得多。

北宋时期的沈括（1031—1095）在《梦溪笔谈》中就有不少关于静磁现象和指南针的记载。该书卷二十四《杂志一》中记有：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。水浮多荡摇，指爪及碗唇上皆可为之，运转尤速，但坚滑易坠，不若缕悬为最善。其法取新纆中独茧缕，以芥子许蜡，缀于针腰，无风处悬之，则针常指南。”这段记载首先指出存在着地磁偏角（“常微偏东，不全南”），也就是说发现并测定了地磁子午线和地理子午线之间的夹角。接着讲了指南针的4种装置方法，即浮在水面、放在指甲上或碗唇沿上，同时指出这3种方法的不足之处，接着详细记述了第4种用蚕丝悬挂的办法，并认为这是一种最好的装置方法。

### 【吉尔伯特和《磁学》】

吉尔伯特（William Gilbert，1544.5.24—1603.12.10）是英国物理学家，也是一位医生。在物理学上的贡献主要是研究磁的性质，并提出地球的作用好像是一个大磁体的理论。

1600年，吉尔伯特发表了题为《磁体、磁性物质和地球大磁体的新科学》的著作，详细地叙述了磁石的吸引和排斥、指向南北的性质、磁偏角和磁倾角等。明确指出，磁石具有天然的两极，一个北极，一个南极，它

们是磁石中的两个确定点，是一切运动和效应的发端。同时又指出，磁石的力不是从数学上所谓的点发出的，而是从磁石各部分本身发出的。这些部分靠极越近，则所具的力越强，而施加于其他物体的力也越大。吉尔伯特认为，磁石指向南北的原因是地球本身，地球就是一个大磁石。为了证明这一思想，他用天然磁石加工成球形，模拟地球，并将许多小磁针放在上面，它们的指向与在地面上不同位置的指南针的指向相仿。他又提出，如果把磁针排列的方向用粉笔画在球形磁石上，就会形成一些子午圈，它们会聚到磁石上两个相反的端点，这就是“磁极”。

吉尔伯特还研究了天然磁石的吸引力与琥珀吸引力的区别，并首先提出“电”、“电力”、“电吸引”等概念，并对电力和磁力作了比较。他认为，磁石总能吸引磁体（或铁），而琥珀要摩擦后才能吸引物体；磁石有两个区域吸引磁体（或铁），而琥珀摩擦后吸引物体时总是朝着一个中心区域。

#### 【富兰克林和风筝实验】

富兰克林（Benjamin Franklin，1706.1.17—1790.4.17）是美国的科学家，他对电学研究很感兴趣，提出了电的单流体学说，为我们留下了正电、负电这两个名称。而影响更大的还是他做的风筝实验。

1752年10月16日富兰克林给伦敦友人柯林先生的信中描述了这一著名的实验。信中这样写道：“用两根轻便的杉木条做一个十字架，架的四支杆须能伸到一张铺开的大而薄的丝绸手帕的四角，将手帕各角扎在枝杆端上，形成一个风筝本体，再加上尾巴、环和线，就可以飞向天空，如同纸质风筝一样，不过因为这一风筝是用绸做成的，所以它能经受住雷雨的风吹雨打，而不致于被撕裂。在上枝杆末端安装一根伸出木杆之外约一英尺的尖端金属丝，在手与麻绳之间系上一根丝带，再在绳与带连接处安装一个栓。这种绸风筝应该在雷雨将来临时升上天空，牵线的人必须站在门内或窗内，或者在有遮蔽的地方，以免丝带受湿。还需注意，不能让麻绳触及门框或窗框。一旦丝绸风筝的上空出现雷雨，那根尖端金属丝就会从那里取得电火，于是这一风筝连同麻绳都带电了，麻绳上未捆紧的纤维都向各方突出，用手指接近时，它们就受到吸引。当风筝和麻绳全被淋湿时，它便能自由传导电火，倘若你将手指接近它，电火将从栓子大量涌出。你可以在栓上安放一个小玻璃瓶来充电。这样获得的电火可以点燃酒精，可以用来进行所有其他的电实验，这些实验也可以用摩擦过的玻璃球或玻璃管来做。带着闪电的物体和带电的物体之间相同之处完全显示出来了。”这一实验充分证明，“天电”与摩擦产生的电之间没有区别，是同一种物理现象。

#### 【诺雷脱和莱顿瓶】

诺雷脱（Jean Antoine Nollet，1700.11.19—1770.4.24）是法国物理学家，主要研究静电现象。



1746年，诺雷脱发表了论文“某些新的电现象的观察”，其中就叙述了莱顿瓶的发明经过。文章中引了莱顿大学物理学教授莫兴布罗克(Pieter van Musschenbroek, 1692—1761)的一封信，信中描述了实验情况：用两根兰色的丝线吊起一个枪筒，一端附近放一个玻璃球，并使其绕轴转动，同时用手在它上面摩擦，并使所起的电传到整个枪筒。在枪筒的另一端随便吊着一根铜丝，铜丝末端插入一个盛有一部分水的长颈玻璃瓶。用右手摸该瓶，用左手吸引来自带电枪筒的火花。忽然间，右手遭到了猛击，全身好像触了电击一样。玻璃瓶虽然很薄，可是没有破裂，手也没有因此而移位，但是手膀和全身都有一种说不出苦的感觉。这一实验结果，引起了很多人的兴趣，轰动了3个月。诺雷脱重复了这样的实验，他发现任何玻璃仪器，只要是很干燥的，都可以获得这样的实验结果。

#### 【库仑和扭秤实验】

库仑(Charles-AugustindeCoulomb, 1736.6.14—1806.8.23)是法国工程师、物理学家。对物理学的主要贡献是测定电力，建立库仑定律。

库仑在1785年给法国科学院的“电力定律”论文中写道：“根据金属丝扭力的反作用与其扭角成正比的性质而制成的扭秤，用该秤对同性带电体相斥定律的实验进行测定。”同时表示“将根据同一原理制造的电秤奉呈科学院，无论物体带电如何微弱，该秤都能非常精确地量度一物体的状态和电力。”库仑制造的电秤的构造是：在一个直径和高度均为12英寸的玻璃圆筒上，盖一块直径为13英寸的玻璃板，板的正中钻有一孔，并装上高为24英寸的玻璃管，管子上端装有扭转测微计。端部中间有一只夹子，夹持一根极细的银丝，银丝连着一根浸过西班牙蜡的麦杆，杆的一端有一小木髓球，另一端贴一小纸片与之平衡，使麦杆呈水平位置，这一部分都装在玻璃筒内。在玻璃盖板上另开有侧孔，孔内放入另一只小木髓球，它可以与麦杆上的小木髓球接触。这样，只要使侧孔处的小木髓球带电，然后与麦杆上的另一只小木髓球接触，两只小球就带同种电荷，相互排斥而分开，银丝就呈现扭转。多次实验结果表明，扭转角的大小与扭力成正比，由实验数据可知，斥力的大小与距离的平方成反比。为了测量异种电荷间的引力，库仑借鉴力学实验，设计了一种电摆来加以解决。实验结果表明，吸力同样与距离的平方成反比。

#### 【从鱼生电到电流的发现】

在19世纪以前，对电学的研究，尽管已出现了某些定量的定律(如库仑定律)，也开始研究“动态”的问题，但基本上是以定性研究为主，以“静态”现象的研究为主。电流的发现，使电学的研究进入了一个新的阶段。

从很早时候起，人们已经知道几种水生动物有引起电击的能力。当莱顿瓶发明以后，人们就开始考虑莱顿瓶的放电和这些水生动物的电击是否有什么类似性或内在联系。18世纪中叶，有一条英国船上的人们带了几条

具有电击能力的鱼回伦敦，于是生物学家、生理学家对它们进行研究。结果发现，只有当你用双手同时去接触鱼的头部和下部时，才会受到电击，人们称这种鱼为电妖鱼或电鳗。后来又证明这种鱼能用来给莱顿瓶充电。这时，人们才相信这种电击也是一种放电现象。

鱼生电的现象，引起了意大利生物学家伽伐尼（Luigi Galvani，1737.9.9—1798.12.4）的极大兴趣和注意，因为他当时正在研究青蛙腿的肌肉收缩现象。有一次，他偶然发现，用铜钩子挂在他家阳台铁栏杆上的几只蛙腿，碰到栏杆的铁条时，突然会跳动起来，仿佛活的一样。为此，伽伐尼加强了控制条件，于1786年9月20日又做了一个实验：用一把叉子（一个叉尖是铜的，另一个是铁的）去碰蛙腿的神经和肌肉，每碰一次，蛙腿都立即收缩一次。此时，伽伐尼相信，这个现象与电鳗的电击是类似的。进一步的实验，使他感到神经中有电源存在。于是他撰写了题为“肌肉运动中的电力”的论文，阐述了自己的见解。1792年，伽伐尼又简单地应用两种不同金属组成的环和蛙腿接触，蛙腿也引起痉挛。这便是第一个伽伐尼电池。由于这一观点是论述生物体中的问题，对物理学家们没有什么大的影响，所以对物理学也没有引起什么大的变化。但是，有一个物理学家注意了这个工作，那就是意大利物理学家伏打。

伏打（Alessandro Volta，1745.2.18—1827.3.5）是一位实验物理学家，对电学的发展作出了贡献，主要是研究金属接触起电的问题。1792年，伏打接受了伽伐尼的观点，但是长时期的一系列的实验，他渐渐感到，蛙腿的收缩只具有次要的意义。1796年，他放弃了伽伐尼的观点，并且很快地证明，引起蛙腿收缩的电流，纯粹是一种无机现象，把两种金属线焊接起来成为一根导线，并将其两端浸入盐水时，总能观察到这种电流。由此，伏打得出结论，金属是真正的电流的激发者，而神经是被动的。这就是伏打提出的接触电的观点。为了纪念他的朋友，伏打还是把这种电流称为伽伐尼电流。

在上述工作的基础上，伏打还用了大量铜圆片和铁或镀锌的圆片交替放置，中间再用一层层浸过盐水的纸片或布片隔开，制成了一种后人称之为“伏打电堆”的装置，用其产生电流。这种电堆是我们今天用于照明和许多其他设备上的现代电池的雏形。1800年3月20日，伏打写信给英国伦敦皇家学会会长，宣布了自己的发现。信中写道：“……是的，我向各位报告的这种仪器，无疑会使你们感到惊奇，它只是许多良导体按一定顺序排列起来的集合，有30片、40片、60片或更多的铜片，用银片则更好，每一片上都镀上锡，或者最好是镀上锌，片与片之间隔以一层水，或者其他比普通水导电性更好的液体，例如盐水、碱水等。也可以使用在这些液体中充分浸泡过的硬纸板或皮革等等。这些夹层插在一对对或一组组不同的金属对之间，交替放置的顺序总是保持不变，这就是我的新仪器的全部结构。我说过，这是模仿莱顿瓶或电池的效用而制成的，可以产生和它们

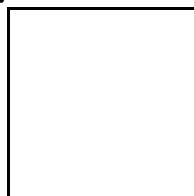
同样的电击。诚然，它比上述电池高度充电时的能力差得多，就放电时所能产生的力、爆炸的声响、火花的大小和放电的距离来说，它只相当于一个容量很大的而只充电到很低程度的电池；但是除此以外，它的优点和效果是这些电池无法与之相比的，因为它不必像这些电池那样要靠外界的电来预先充电，只要我们一碰它，它就能发出电击，而不管碰它的次数是多么频繁。”

伏打的研究工作，引起了科学界的一场辩论。生物学家、解剖学家支持伽伐尼的观点，认为是动物电、生物电，物理学家、化学家支持伏打的观点，认为是金属接触电。这场国际性争论持续了很长一段时间，直到20世纪现代化学理论产生后，才最终解决了这个争论问题。1801年，拿破仑请伏打到巴黎，在学会上表演他的电堆实验，并授于他金质奖章。电流的发现、产生电流的实验装置的研究成功，使电学的发展进入了一个新阶段。后人为纪念伏打的这一贡献，除了用“伏打电堆”这一专门名词外，还用“伏特”作为电势的单位。电流的发现为研究电和磁之间的联系提供了条件，也为化学研究开辟了新领域。

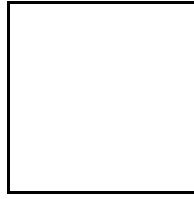
#### 【欧姆和欧姆定律的建立】

欧姆(George Simon Ohm, 1789.3.16—1854.7.6)是德国物理学家，对物理学的主要贡献是发现了欧姆定律。

1826年，欧姆发表了“论金属传导接触电的定律及伏打仪器和西费格尔倍加器的理论”一文，文中提出了欧姆定律的实验证明。欧姆在做实验时，起初是用伏打电池作为电源，因性能不稳定，改用温差电池。欧姆使铋-铜组成的温差电池的两端保持着不同的温度，一端插入盛有沸水的容器中，另一端插入盛有碎冰（或雪）的容器中，两个盛水银的杯子当作电池的两极，外电路就连接在水银槽中。温差电池的上半部是电流扭秤，用来测量电路中的电流强度。扭秤的指针是一根磁针，用金丝悬挂起来。当电流通过导线时，磁针会偏转，金丝便扭转。由于金丝的扭转角度与导线中的电流强度成正比，读出扭转角的大小，就能知道电流强度。欧姆选用了一组截面积相同、长度各不相同的铜导线作为外电路进行实验。根据实验数据，欧姆得出如下的关系式



式中  $X$  为不同导线接入时的扭转角度， $x$  为导线的长度， $a$ 、 $b$  是两个常数。这一欧姆所确定的公式原型中，如果  $X$  对应于现代所用的电流强度  $I$ ， $x$  对应于外电路的电阻  $R$ ，常数  $a$ 、 $b$  分别对应于电源的电动势  $E$  和电源内电阻  $r$ ，则上式即为全电路欧姆定律的表示式



### 【奥斯特和电流磁效应发现的前前后后】

奥斯特 (Hans Christian Oersted, 1777.8.14—1851.3.9) 是丹麦物理学家，对物理学的主要贡献是发现了电流的磁效应，把电和磁统一起来。

在 19 世纪前，人们普遍认为电和磁之间是没有什么关联的。但是，当时德国的自然哲学家们，则从另一个角度对电和磁发生了兴趣，即对极化现象感到兴趣，因为这一例子好像表明他们所假定的两个对立极之间的辩证张力或者使杂乱变为有序的力的存在。自然哲学家谢林 (F. Schelling, 1775—1854) 就有这种主张，进而认为宇宙间具有普遍的自然力的统一。谢林的思想对他的挚友奥斯特具有深刻的影响，导致奥斯特去研究电和磁之间的联系。

1803 年，奥斯特主张，物理学将不再是关于运动、热、空气、光、电、磁以及大家所知道的任何其他现象的零散的汇总，它将把整个宇宙纳在一个体系之中。

1807 年，奥斯特宣称正在研究电和磁的关系。因为富兰克林曾在 1751 年证明，用莱顿瓶中的电可以使磁针磁化或退磁，莱顿瓶只能供给瞬间电流，所以没能继续研究下去。伏打电堆的发明，为连续电流提供了电源，奥斯特才能对此问题继续研究下去。

1812 年，奥斯特用德文写成题为“关于化学力和电力的等价性的研究”的论文，次年译成法文在巴黎出版。在论文中，他提出应该检验电是否以其最隐蔽的方式对磁体有所影响。

1818—1819 年，据与奥斯特共事过的人回忆，奥斯特一直在寻找这两大自然力（指电力和磁力）之间的联系，为发现这种联系，奥斯特经常苦苦思索并进行各种试验。

1820 年 4 月的一天，奥斯特在去哥本哈根大学讲课的路上，产生了一个念头：如果静电对磁石毫无影响，那么若用一根导线把伏打电池的两极联系起来，让电荷在其中运动，这样会发生什么现象呢？事情是否会有所不同？他带着这些问题走进了教室。教室里坐满了青年学生。奥斯特把自己带去的伏打电堆放在讲台上，然后用一根白金丝把电堆的两极连起来，并将一枚小磁针放在它附近。这时，奇怪的现象出现了：磁针本该指南北的，现在却转动了，并在垂直于导线的方向停下来。听众无动于衷，而演示者却激动万分。课后他继续留在教室里，核对了 he 刚刚发现的这个不寻常的现象。起初，他想磁针的转动也许因为电流通过导线，导线发热产生空气流引起的。为此，他把一块硬纸放在导线与磁针之间，以阻挡气流，但是实验结果依然如此。然后，奥斯特把伏打电堆转了 180 度，使导线中

的电流朝反向流动，结果磁针的朝向也转了 180 度。这就表明，磁针的指向与电流在导线中的流动方向有关。接着，奥斯特在磁针和带电导线之间放上各种介质，如玻璃、木板、水、树脂、陶器、石头等等，结果表明，它们之间的作用并不减弱。开始时用白金丝连结电堆的两极，后来又用大电堆，并用粗铜导线连接，先后共做了 60 多个实验，得到的结果是一样的。这样，奥斯特便把观察所得的结果，如实地写成题为“关于磁体周围电冲突的实验”的论文，送交法国杂志《化学与物理学年鉴》发表。这就是我们通常所讲的 1820 年 7 月 21 日的那篇论文。杂志在刊登时，编者加了一个不平常的说明：“《年鉴》的读者都知道，本刊从不轻易支持宣称有惊人发现的报告（也许因为其中多数都是一些怪人所写的东西），至今我们都因为能坚持这一方针而自豪。但是，至于说到奥斯特先生之文章，则其所得之结果无论显得多么奇特，都有极详细的记录为证，以致无任何怀疑其谬误之余地。”

在论文中，奥斯特自己写道：“我们将在导体中和其周围空间中所发生的这种效应称之为电冲突。看来所有非磁性体都能为这种电冲突透过，但磁性体则抗拒它通过，因此它们就能在冲突力量的推动下运动。……从上述事实，我们还可以推出这种冲突呈现为圆形的，否则就不可能发生这样的情形：将闭合导线的一段放在磁极下面时，磁极被推向东方，而放在磁极上面时，就被推向西方。其原因是，只有圆才具有这样的性质，其相反部分的运动方向相反。”

1820 年，奥斯特称之为“电磁学”的新学科诞生了，电转化为磁成为现实，表明电和磁是可以统一的，使“自然力统一的思想”得到了一个例证。其次，电流磁效应的发现，表明作用力是一种旋转力，它和力学中力表现出来的形式是不同的，人们认识到一种新的相互作用形式。第三，这一发现为制造灵敏电流指示器创造了条件，同时，它本身就包含了未来的电力技术应用的内容。

奥斯特的发现一经传播，到处都在重复这一实验。1820 年 9 月 11 日，在法国科学院举办的每周的科学例会上，法国物理学家安培（André Marie Ampère, 1775.1.20—1836.10.6）听到了两个月前在哥本哈根发现的这个重要的实验事例，并且看到电流磁效应的演示实验后，对此极感兴趣，立即对它进行研究，仅仅几个星期，便在科学院举办的科学例会连续发表报告，进一步揭示电和磁之间的内在联系。

通过实验和研究，安培发现，不仅电流对磁针有作用，而且两个电流之间彼此也有作用。两根平行的载流导线中，如果通过的电流方向相同，导体之间呈现出互相吸引；如果通过的电流方向相反，导线之间呈现出互相排斥。同时又发现，两根载流导线之间的力的大小，是与两根导线中各自通过的电流  $I_1$  和  $I_2$  的乘积成正比，与导线的长度成正比，与两根导线之间的距离平方成反比。由此，安培提出了电流磁效应的定量规律，后来称

之为的安培公式。这一公式作为他的“电动力学”基本定律的起点。“电动力学”这一名词是在安培的著作中第一次出现的，他常用“电动力”来表示电压。所以我们说，安培是电动力学的先创者。在上述研究的基础上，安培又提出了一个关于电流使磁体偏斜方向的法则，也就是确定电流的磁场方向的法则，即“安培法则”。为了表彰安培的功绩，电流的单位就用他的名字来命名。除此以外，安培还提出了“分子电流”的概念，用它来解释物体为什么具有磁性。安培的这一观念，为现代物理学所证实。现代物理学认为，物体内部的原子或分子的磁性，是由于电子在原子核周围转动或绕着自身轴急速旋转而产生的。

#### 【法拉第和电磁感应】

法拉第(Michael Faraday, 1791.9.22—1867.8.25)是英国物理学家、化学家，在自然科学上的重大贡献是发现了电磁感应现象，建立了电解定律，提出了力线和场的概念。

1820年，奥斯特发现了电流磁效应(参阅本书第28页)以后，1821年，法拉第就重复进行类似的实验，都获得了肯定的结果。这时，法拉第就有一个想法，既然电可以转化为磁，磁是否也能转化为电呢？于是他在日记本的扉页上写下“转磁为电”，并开始苦苦地思索，踏踏实实地设计了各种实验，但却一次又一次地失败。直到1831年8月，法拉第用7/8英寸粗的软铁条，焊接成一个外径为6英寸的圆环(右图)，圆环上绕有两组线圈A和B。A线圈由3个小线圈组成，每个小线圈由1/20英寸粗、24英尺长的铜线组成，它们可以分开，也可以联合使用。B线圈由两根共60英尺长的同样粗的铜线组成。A与B在圆环上的绕法和方向相同，它们的末端由一个大约1.5英寸长的不予包扎的铁片隔开。A线圈与伏打电池连接，B线圈与3英尺以外的电流计连接。当法拉第把A线圈与伏打电池一接通，电流计上的指针突然偏转，但是指针晃动一下后就停止了。当他把电池拆掉时，电流计的指针又突然偏转，偏转的方向与前面的相反，晃动一下后也停止了。这种往往不被他人注意的现象，却紧紧地吸引着法拉第，他好像悟出了什么道理。他继续做实验，结果都相同。他把电流计接到A线圈中的一个小线圈上，当另外两个小线圈连起来接到伏打电池上时，电流计的指针偏转得更大。当把伏打电池的两极对换时，发现电流计的指针反向偏转。法拉第称这种现象为“伏打电感应”。同时他也深深地懂得，当电转化为磁时，呈现出来的是个稳态现象，电流周围的磁场是稳定地存在着；而磁转化为电时，则是瞬态现象，一现即逝。为了进一步验证，几个星期后，法拉第再做实验。这次，他抛开电池，在一个纸做的空心圆筒上，用220英尺铜线分层绕了8个线圈，它们之间再互相连起来成为一个大线圈，并把它与电流计相接。当一条形磁铁插进空心圆筒时，电流计的指针摆动；抽出时，指针也作相反方向的摆动，法拉第称这种现象为“磁电感应”。

上述这些实验说明磁可以转化为电，而法拉第的“转磁为电”的理想终于实现了。

法拉第受电磁感应的启示，他直觉地揣测到在磁铁周围有一个充满力线的场，感生电流的形成是由于导体切割力线的结果。所以在他的 1832 年 3 月 12 日的文稿中写道：“……使我相信，磁的作用是渐进的，是需要时间的”，“有理由假设，电（压）的感应也是以类似的渐进方式进行的。”这是在物理学史上第一次有力地向超距作用观念提出挑战。

法拉第的另一个重要贡献，是在 1833—1834 年提出了两条电解定律，这是电化学的开创性工作，同时有力地证明了基本电荷的存在。

#### 【楞次和楞次定律】

楞次（Heinrich Friedrich Emil Lenz，1804.2.12—1865.2.10）是俄国物理学家。对物理学的主要贡献是确定电磁感应中的感生电流的方向。

楞次从青年时代起就开始研究电磁感应问题。1831 年法拉第发现了电磁感应现象（参阅本书第 29 页），但是没有确定感生电流的方向。楞次研究了这一问题，并于 1834 年发表了题为“论电动力公布所产生的伽伐尼电流方向的决定”的论文。论文指出：当闭合电路通过磁场或者闭合电路中的磁通量发生变化时，在电路中都会产生感生电流。感生电流的方向总是使感生电流所引起的磁场阻碍闭合电路的磁场的增加，或者阻碍磁通量的变化。这一定律后来就称为楞次定律。

除此以外，楞次还研究了电流通过导体时的热效应规律，与焦耳（J.P.Joule，1818—1889）研究结果相同，称之为焦耳-楞次定律。

#### 【狄拉克和磁单极子】

狄拉克（Paul Adrien Maurice Dirac，1902.8.8—1984.10.20）是英国理论物理学家。由于对量子力学发展所作的贡献，他于 1933 年获诺贝尔物理学奖。

1933 年，狄拉克根据最小的带电单位——电子的电荷量子化的性质，依据对称性的思维原则，提出了有可能存在“磁单极子”的假说，表明磁极不一定是两个极同存于一体之中。这一假说到现在为止，还没有能在实验上得到最后的证实，但它仍是当代物理学上引人注目的基本理论研究和实验研究的课题之一。

#### 【麦克斯韦和电磁理论】

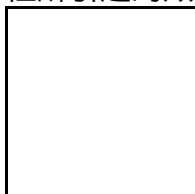
麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831.8.13—1879.11.5）是英国物理学家。他深受法拉第的影响，信服法拉第的物理思想，决心为法拉第的力线、场的概念提供数学方法的基础。

就电和磁的研究，麦克斯韦发表了 4 篇著名的论著：

1855 年，他发表了题为“论法拉第的力线”的论文。在这篇论文中，麦克斯韦采用了类比的方法（即把处理电场的问题与流体的问题类比），

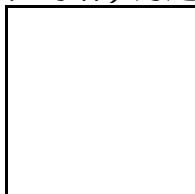
运用他人的研究成果，推导出电流四周的磁力线的通量和磁作用力之间的关系式，引入新的矢量函数，由该函数的各种微分运算导出一组矢量微分方程，以表示描述电流和磁力线的一些物理量之间的定量关系，由此得出定量公式。从法拉第给麦克斯韦的信中就可以看出这一成果的重要性。法拉第在信中说：“当我知道你要构造一种数学形式来针对这样的主题，起初我几乎是吓坏了；然后我才惊讶地看到，这个主题居然处理得如此之好。”

1861—1862年，麦克斯韦发表了题为“论物理的力线”的论文。这篇论文进一步提出了关于力线的机械模型，即电磁以太模型。在论文中引进了“位移电流”的概念，这是一个新的贡献。他应用数学方法，类比了磁场变化、磁力线通量改变会产生感应电流的思想，肯定地指出，存在着变化的电场的电介质中也会产生一种磁效应的特殊“电流”——位移电流。这一概念的提出，是建立电磁场理论的关节点。他又提出“由于媒质的弹性所引起的效应的改正”，既要考虑传导电流，也应考虑位移电流的作用。



介质中引入的，但后来又把它推广到没有具体物体的空间，因为麦克斯韦认为空间中充满着以太。

1864—1865年，麦克斯韦发表了题为“电磁场的动力学理论”的论文。该论文是电磁场理论的一个总结。他认为：“我提出的这个学说所以能叫做电磁场的学说，因为它关系到带电体或磁体周围的空间，并且它可以叫做动力学理论。因为它假定在这个空间中，有物质在运动，由此而产生了观察到的电磁现象。”特别是本文的第五部分——光的电磁学说中，他由电磁场方程推出波动方程，证明了电磁波是一种横波，并求出电磁波的传播速度等于真空中的光速，由此他得出结论：“这一速度与光速如此接近，看来我们有强烈的理由断定，光本身（包括辐射热以及其他辐射，如果存在的话）乃是波的形式在电磁场中按电磁规律传播的一种电磁振



即为电磁波传递的能流密度，而  $S = Wv$ ， $v$  就是电磁波的传播速度。这就表示电磁场具有能量，而电磁波就是能量的流动过程，实际上说明了电磁场和电磁波的物质性。

1873年，麦克斯韦的重要著作《论电和磁》问世。这部著作凝聚了电磁学的全部精华，它包含了创新的物理概念，严密的逻辑体系，简洁的数



学形式，正确的科学推广。著作中证实了方程组的解是唯一的解，这就从理论上使人们确信，麦克斯韦方程组能够完整地反映电磁场的运动规律，而由它推得的一系列结论为尔后的实验所证实。这个理论是第一个经典场论，用现代术语来说，电磁场是最简单的规范场。当然作为规范场，它仅仅是个先导，现在还在发展之中。

由此可见，从法拉第到麦克斯韦，实际上是从对物理图象的研究发展到数学抽象的研究，从实验探索发展到理论规范的建立。

#### 【赫兹和电磁波的存在】

赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz, 1857.2.22—1894.1.1) 是德国物理学家。他在物理学上的主要贡献是证实了电磁波的存在。

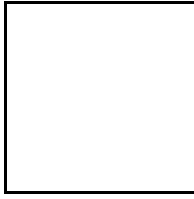
赫兹早期就已经熟悉法拉第和麦克斯韦的研究工作，从 1884 年开始，他便研究麦克斯韦理论的证明问题。1886 年，赫兹在做放电实验时，发现附近未闭合的线圈也出现火花，从此时开始一直到 1888 年，他持续地进行这方面的实验。实验是利用一个与感应线圈连接的未闭合电路产生电振荡的发生器，再用一个简单的未闭合线圈作为探测器，两者相距 10 米。赫兹坐在暗室里，当发生器通电后，立即就能看到探测器气隙中的微弱电火花。反复试验，均能得到同样的结果，由此证实了电磁波的存在。与此同时，他把探测器移到不同的位置，便可测得电磁波的波长。根据波长和计算得到的振荡器频率，便可计算电磁波传播的速率，它等于光速，这就证明了所假设的效应是以有限的速度传播的。赫兹在 1887 年 11 月 10 日向德国科学院提交了报告，证明了电磁波的存在。从 1888 年开始，赫兹又做了一系列的关于电磁波和光波类比的实验，表明电磁波也具有折射、衍射、干涉、偏振等一系列物理现象，证明了电磁波具有光波的一切性质。

#### 【洛伦兹和洛伦兹力】

洛伦兹 (Hendrik Antoon Lorentz, 1853.7.18—1928.2.4) 是荷兰物理学家。对物理学的最重要的贡献是他的电子论。

1892 年，洛伦兹开始发表有关电子论的文章。他认为一切物质的分子都包含有电子（尽管当时在实验中还没有确认电子的存在），阴极射线的粒子就是电子；并认为电子是质量很小的刚体，电子对以太是完全透明的；同时认为以太与物质的相互作用，实质上是以太与物质中的电子的相互作用。在此基础上，洛伦兹于 1895 年提出了著名的洛伦兹力公式，表示运动点电荷在磁场中所受到的作用力的大小和方向。该公式不仅对于宏观点电荷成立，对于微观元电荷也同样成立。

为了解释迈克耳逊-莫雷实验（参阅本书第 49 页）的结果，洛伦兹曾提出运动物体在运动方向上长度收缩的假说，并于 1895 年发表了长度收缩



1896年，荷兰物理学家塞曼（P. Zeeman，1865—1943）发现磁场能使光谱线分裂（即塞曼效应），而洛仑兹用电子论对这一现象进行了解释。由于这一贡献，洛仑兹与塞曼同获1902年诺贝尔物理学奖。

#### 【亨利和自感现象】

亨利（Joseph Henry，1797.12.17—1878.5.13）是美国物理学家。致力于电学的研究，以研究自感现象而著名。

1832年，亨利首先发现了自感应现象，到1835年3月，在《弗兰克林研究所学报》上发表论文，对自己发现的自感现象进行解释。为了纪念他的这一功绩，电感的实用单位被命名为“亨利”。

除此以外，亨利从1827年开始就研究电磁现象，他曾改进了当时的电磁铁的制作，采用绝缘导线代替裸铜线绕在U形铁棒上，克服了裸铜线不能紧密地绕在U形铁棒上的弊端，从而大大增强了电磁铁的磁性。这样便可制成一个体积不大的电磁铁，它能吸起很重的铁块。这一成果为电机的发展打下了基础。

#### 【J.汤姆孙和电子的发现】

J.汤姆孙（Joseph John Thomson，1856.12.18—1940.8.30）是英国物理学家。他对物理学的最杰出的贡献是发现了电子。

1895年，德国物理学家伦琴（W.K.Röntgen，1845—1923）发现了X射线后（参阅本书第33页），J.汤姆孙对阴极射线管内的气体放电现象，进行了更深入的研究。因为阴极射线发现以后，其本质是以太振动还是粒子流，科学家一直争论不休。为了搞清这一问题，J.汤姆孙作了进一步的实验。首先，他在阴极射线管内射线经过的路上，放上一块涂有硫化锌的小玻璃片。当气体放电时，发现硫化锌会发出闪光，由此表明阴极射线能使硫化锌发光，并且是直线行进的。接着，J.汤姆孙又把一个马蹄形磁铁跨放在射线管的外面，发现射线会偏向一边，根据偏转的情况，说明射线是一种带负电的粒子。当时，还不知道有比原子更小的粒子，所以J.汤姆孙认为可能是一种电离了的原子，打算测量这种电离了的原子的质量。他在涂有硫化锌的小屏上画上刻度，以便了解这种带电粒子在磁场中偏转的程度。如果知道外加磁场的强度，便可以知道带电粒子所受力的的大小。在带同样电荷的情况下，粒子的质量越大，越不容易被磁场偏转。反之亦然。利用这一方法，J.汤姆孙测出了阴极射线粒子的电荷与质量之比（即荷质比）。所得结果，大大出乎人们的意料，阴极射线粒子的荷质比的数值比最轻的氢原子的荷质比大1800多倍，说明这种粒子的质量比氢原子质量小得多。1897年4月30日，J.汤姆孙正式宣布了这一发现，并称之为“微

粒”，从而结束了人们对阴极射线本质的争论。后来，人们把这种微粒命名为“电子”。由于气体导电方面的理论和实验的研究成果，J. 汤姆孙获得了 1906 年的诺贝尔物理学奖。

### 【伦琴和 X 射线】

伦琴 (Wilhelm Konrad Röntgen, 1845.3.27—1923.2.10) 是德国物理学家。他对物理学的最主要的贡献是在维尔茨堡大学任教期间偶然发现了 X 射线 (也称伦琴射线)。

1895 年，伦琴在实验室进行阴极射线实验。该年的 11 月 8 日，伦琴在暗室中做放电实验时，偶然发现了一个新的现象：在一段距离以外，涂有一种荧光材料 (铂氰酸钡  $\text{BaPt}(\text{CN})_6$ ) 的屏上竟发出微弱的荧光。对此伦琴极为重视，马上进行仔细观察，并肯定激发这种荧光的東西来自阴极射线管，同时又肯定这种東西不可能是阴极射线，因为后者是透不过阴极射线管的玻璃壁的。伦琴认真地对待这个偶然的发现，一面继续进行实验，一面在理论上进行思考。他推论着，当阴极射线 (后来才知道是电子流) 撞击管子的玻璃壁时，是否会形成一种不知道的射线，而这种射线可以透过玻璃，撞击在化学药品上时会激发出荧光。伦琴在实验过程中又发现，当金属的厚片放在管子与涂有铂氰酸钡的屏之间时，便会产生投射阴影，表明这种射线穿透不过去；而平时不透光的、轻的物质 (如铝片、木片、纸张等) 放置在这两者之间时，投射阴影几乎看不见，表明它可以穿过这类物质。同时也发现，所吸收的射线的数量似乎大致与吸收体的厚度和密度成正比。管内气体愈少，射线的贯穿性愈高。人的肌肉和骨骼对这种射线的吸收情况不一样 (肌肉对它的吸收比骨骼弱得多)，当受到具有相当“硬度”的这种射线照射时，在屏上只留下骨骼的阴影。伦琴拍摄了世界上第一张 X 光片——他夫人手掌的 X 光片。这对外科手术来说，具有无上的价值。同时，伦琴又发现，这种射线并没有明显的普通光的特性 (如反射、折射、衍射等)，所以他误认为所发现的射线与光无关。考虑到它的不确定的本性，伦琴把该射线称为 X 射线。

经过几个星期紧张的实验和研究，1895 年 12 月 28 日在维尔茨堡举行的医学物理学学会会议上，伦琴宣读了第一篇学术报告《论新的射线》，接着又发表了第二、第三篇学术报告。在这些报告中，伦琴分析了 X 射线的性质、产生的原因和在各种物质中的透射率。他发现，阴极射线打在固体上会产生各种强度的 X 射线，固体元素愈重，产生的 X 射线愈强；X 射线既不受磁场的作用而偏转，也不能用玻璃透镜来聚焦或发散。同期，伦琴又制造出世界上第一个 X 射线管，后人称之为伦琴射线管，简称伦琴管。

伦琴发现 X 射线的踪迹是偶然的，正如他自己所说的：“我是偶然发现射线穿过黑纸的。”这在科学思想和科学研究方法上给了我们一个启示，就是在科学实验和观察过程中，如何正确对待偶然的发现，或者称之为机遇事件。伟大的发现之出于偶然性，常常较一般人所想象的为少，同时又

常常会被人所忽视。所以不少科学家认为，“留意意外之事”是科研工作者的座右铭之一。当然，观察、实验中的机遇只是提供一个线索，要真正解决问题，最终获得成功，还要善于抓住它追根究底。据记载，在伦琴发现这种射线之前，至少有一位物理学家曾发现过这种现象，但他只是气恼，认为它是一种干扰，并想方设法排除它，而伦琴则完全不一样。所以在观察、实验的领域中，机遇只偏爱那种有准备的头脑。

X射线的发现以及X射线管的研制成功，为自然科学的发展，特别是为微观领域物理规律的探索、研究，提供了有力的工具。为此，伦琴第一个获得了诺贝尔物理学奖（即1901年的奖），因为诺贝尔奖是从1901年开始颁发的。

## （四）光学部分

### 【我国古代的光学知识】

#### 取火的方法和对火的认识

我国古代取火的工具称为“燧”，有金燧、木燧之分。金燧取火于日，木燧取火于木。根据我国古籍的记载，古时常用“夫燧”、“阳燧”（实际上是一种凹面镜，因用金属制成，所以统称为“金燧”）来取火。《周礼·秋官司寇》中就有“司氏，掌以夫燧，取明火于日”的记载。《庄子》中写道：“阳燧见日，则燃而为火。”王充的《论衡·乱龙篇》中明确指出：“今使道之家，铸阳燧取飞火于日。”古时人们在行军或打猎时，总是随身带有取火器，《礼记》中就有“左佩金燧”、“右佩木燧”的记载，表明晴天时用金燧取火，阴天时用木燧钻木取火。阳燧取火是人类利用光学仪器会聚太阳能的一个先驱。

讲到取火，古代还用自制的古透镜来取火的。公元前2世纪，就有人用冰作透镜，会聚太阳光取火。《问经堂丛书》、《淮南万毕术》中就有这样的记载：“削冰令圆，举以向日，以艾承其影，则火生。”我们常说，水火不相容，但制成冰透镜来取火，真是一个奇妙的创造。用冰制成透镜是无法长期保存的，于是便出现用琉璃或玻璃来制造透镜。

#### 对针孔成像和影的认识

公元前4世纪，墨家就做过针孔成像的实验，并给予分析和解释。《墨经》中明确地写道：“景到（倒），在午有端，与景长，说在端。”这里的“午”即小孔所在处。这段文字表明小孔成的是倒像，其原因是在小孔处光线交叉的地方有一点（“端”），成像的大小，与这交点的位置有关。从这里也可以清楚地看到，古人已经认识到光是直线行进的，所以常用“射”来描述光线径直向前。

北宋的沈括在《梦溪笔谈》中也记述了光的直线传播和小孔成像的实验。他首先直接观察鸢在空中飞动，地面上的影子也跟着移动，移动的方向与鸢飞的方向一致。然后在纸窗上开一小孔，使窗外飞鸢的影子呈现在室内的纸屏上，沈括用光的直进的道理来解释所观察到的结果：“鸢东则影西，鸢西则影东。”

墨家利用光的直线传播这一性质，讨论了光源、物体、投影三者的关系。《墨经》中写道：“景不徙，说在改为。”“光至，景亡。若在，尽古息。”说明影是不动的（“景不徙”），如果影移，那是光源或物体发生移动，使原影不断消逝，新影不断生成的缘故（“说在改为”）。投影的地方，如果光一照，影子就会消失（“光至，景亡”），如果影子存在（“若在”），表明物体不动，只要物体不动，影子就始终存在于原处（“尽古息”）。

墨家对本影、半影也作了解释。《墨经》中有这样的记载：“景二，

说在重。”“景二，光夹。一，光一。光者，景也。”意思是一物有两种投影（本影、半影），说明它同时受到两个光源重复照射的结果（“说在重”，“光夹”）。一种投影，说明它只受一个光源照射，并且强调了光源与投影的联系（“光者，景也”）。与此相连，墨家还根据物和光源相对位置的变化，以及物与光源本身大小的不同来讨论影的大小及其变化。

### 对面镜的认识

墨家对凹面镜作了深入的观察和研究，并在《墨经》中作了明确、详细的记载。“鉴低，景一小而易，一大而正，说在中之外、内。”“低”表示深、凹之意，“鉴低”就是指凹面镜；“中”是指球心到焦点这一段。说明物体放在“中之外”，得到的像是比物体小而倒立的；放在“中之内”，得到的像是比物体大而正立的。北宋沈括对凹面镜的焦距作了测定。他用手指置于凹面镜前，观察成像情况，发现随着手指与镜面距离的远近变化，像也发生相应的变化。在《梦溪笔谈》中作了记载：“阳燧面洼，以一指迫而照之则正，渐远则无所见，过此遂倒。”说明手指靠近凹面镜时，像是正立的，渐渐远移至某一处（在焦点附近），则“无所见”，表示没有像（像成在无穷远处）；移过这段距离，像就倒立了。这一实验，既表述了凹面镜成像原理，同时也是测定凹面镜焦距的一种粗略方法。

墨家对凸透镜也进行了研究。《墨经》中写道：“鉴团，景一。说在刑之大。”“鉴团”即凸面镜，也称团镜。“景一”表明凸面镜成像只有一种。“刑”同形字，指物体，它总比像大。

我们的祖先，利用平面镜能反射光线的特性，将多个平面镜组合起来，取得了有趣的结果。如《庄子·天下篇》的有关注解《庄子补正》中对此作了记载：“鉴以鉴影，而鉴以有影，两鉴相鉴，则重影无穷。”这样的装置，收到了“照花前后镜，花花交相映”的效果。《间经堂丛书》、《淮南万毕术》中记有“取大镜高悬，置水盆于其下，则见四邻矣。”表明很早就有人制作了最早的开管式“潜望镜”，能够隔墙观望户外的景物。

### 对虹的认识

虹是一种大气光学现象，从公元6世纪开始，我国古代对虹就有了比较正确的认识。唐初的孔颖达（574—648）曾概括了虹的成因，他认为“若云薄漏日，日照雨滴则虹生。”明确指出产生虹的3个条件，即云、日、“日照雨滴”。沈括对此也作过细致的研究，并作实地考察。在《梦溪笔谈选注》中写道：“是时新雨霁，见虹下帐前涧中。予与同职扣涧观之，虹两头皆垂涧中。使人过涧，隔虹对立，相去数丈，中间如隔绡，自西望东则见；盖夕虹也。立涧之东西望，则为日所铄，都无所睹。”指出虹和太阳的位置正好是相对的，傍晚的虹见于东方，而对着太阳是看不见虹的。

对虹有了认识之后，便可以人工造虹。8世纪中叶，唐代曾有过这样的试验：“背日喷呼水成虹霓之状”，表示背向太阳喷出小水珠，便能看

到类似虹霓的情景。宋代的《毛诗名物解》中说过：“以水 日，自侧视之，则晕为虹霓。”强调必需从侧面观察，才能见到虹霓。

#### 【牛顿对光学的研究】

牛顿在光学上的杰出成就，就可以使他成为科学界的头等人，跻身于科学伟人的行列。当牛顿只有 21 岁的时候，他已开始了自己的研究工作，对光学问题的研究，又是牛顿全部科学研究、创造生活的开端。1666 年牛顿得到了用三棱镜把白光分成七种颜色的光的实验结果，并于 1672 年发表论文描述了这一色散实验；1704 年出版了《光学》一书，为光学的发展作出了贡献。这本书和《自然哲学的数学原理》一书（参阅本书第 6 页）是牛顿的两部基本著作。

1666 年，牛顿正在磨制一些非球面形的光学透镜，同时做了一块三角形的玻璃棱镜，以便重复观察包括意大利物理学家格里马耳迪

(F.M.Grimaldi, 1618—1663) 在内的所做的那些著名实验。牛顿想办法把自己的房间弄暗，在窗板上开了一个小孔，让适度的太阳光进入室内，然后把他自己磨制的棱镜放在光的入口处，使光线由此折射到对面的墙上。起初牛顿对墙上产生的那些鲜艳、浓烈的颜色，很感兴趣。但是经过周密考虑后，他惊异地发现它们是长条形的，而根据公认的折射定律，它们的形状应该是圆形的。为什么会这样？经过反复思考与实验，牛顿悟出了一个道理，并决心做一个判决性的实验。

牛顿取两块板，把其中的一块放在靠近窗户的棱镜的后面，板上开有一个小孔，光线可以通过这个小孔并落到另一块板上。他把另一块板放在相距约 12 英尺的地方，板上也开有一个小孔，并使光线的一部分通过它，然后再把第二块棱镜放在第二块板的后面。当第一块棱镜绕它的轴转动时，落在第二块板上的像也跟着移动，同时使全部光线都相继通过板上的小孔，射到它后面的棱镜上，记下光线落在墙上的位置。牛顿发现，在第一块棱镜上被折射得最厉害的蓝光，在第二个棱镜上受到的折射也最大，而红光在这两个棱镜上都被折射得很少。牛顿便领悟到长条形的像形成的真正原因：光不是同类的和均匀的，它是由不同类型的光线组成的，其中一些比另一些更能被折射。

1672 年 2 月 6 日，牛顿向英国皇家学会提交了题为“关于光和色的新理论”的论文，详细地描述了上述实验，并提出了对颜色的新见解。他认为，应该“有两类颜色。一类是原始的、单纯的，另一类是由这些原始颜色组成的。原始的或本原的颜色为红、黄、绿、蓝和紫绀，橙黄、靛青等等只是一大堆不确定的中间层颜色。”并且指出：“和这些原始颜色同属一类的那些颜色，也可以用组合的方法使之产生，因为黄和蓝混合成绿；红和黄混合成橙；橙和黄绿混合成黄。一般地说，如果在棱镜所产生的颜色系列中，两种彼此相距不太远的颜色混合成一种颜色，它在上述系列中处于这两种颜色之间。但是那些相距太远的颜色并不如此。橙黄和靛青不

会产生其间的绿色，深红和绿也得不出其间的黄色。”牛顿又明确指出，“最突出和最奇异的组合是白色，没有一种光线能够单独显示这种颜色。它永远是组合成的，而且要组成它就必须用所有前面提到的原始颜色按一定比例混合起来。”从而否定了过去认为白色和黑色是两种基本颜色的观念。因此牛顿认为，以这些作为根据，就可以很清楚地说明下落的雨滴中会出现彩虹的原因。

1704年，牛顿发表了《光学》（副标题为：关于光的反射、折射、弯曲和颜色的论文）一书，汇总了大部分很早以前完成的研究工作，但是为什么发表得这么晚呢？是有其历史原因的，对此，我们将在下一节中阐明。

《光学》一书的开头，牛顿就指出：“在这本书中我的意图不是用假说来解释光的性质，而是用讨论和实验来叙述和证实它们。”为此，他就讲了8个定义和8条原理。按照牛顿的说法，其中包括了“迄今为止，在光学中被谈论过的一切。”但当时人们知道得并不多。在8条原理中，前5条论述了反射和折射的基本规律，后3条描述了光入射到平面、球面和透镜后，反射光或折射光光程的几何原理，并清楚地引入了聚焦这一概念，同时谈了一些眼睛里的光程知识。

“假设”部分包括了一系列假设、定理和习题。定理都用实验证实。在当时的条件下，这些实验是做得很出色的，说明牛顿高超的实验技艺。

假设（定理）的含义是这样的：“不同颜色的光，它们的折射率也不同。”这一思想用了2个实验作验证。

假设（定理）断定：“太阳光是由不同折射率的光所组成。”这个定理用了8个完全不同的实验来验证。

假设（定理）中，证明了“太阳光是由反射率不同的多种光线组成的，而且被折射得越强烈的光束，则被反射得也越多。”在实验的说明中，牛顿叙述了对棱镜内部光的全反射所作的观察结果。这里应该指出，光的全反射现象在较早的时候已被开普勒（J. Kepler, 1571—1630）所发现。

假设IV中，牛顿详细地阐述了怎样把“复杂的非均匀光束——地分开”，用现代语言来说就是怎样用棱镜或透镜来获得单色光束。

假设V（定理IV）中，牛顿证实了“利用非均匀光照射到折射体上，由于不同类的光有不同的折射率，就会产生不清晰的物体图象。”这就是色散像差的发现。为了排除在透镜中的色散像差，牛顿研制了反射式望远镜。

假设VI（定理V）证实，对于不同颜色的光，入射角和折射角正弦的比值不同，但是这一比值仍然与入射角的大小无关。

《光学》一书中还描述和讨论了干涉现象，也就是我们现在所说的牛顿环的实验。对薄膜彩色现象，前人作了不少研究，但牛顿对它做了细致的、定量的解释，并从现象上确定了它们的基本特性。在这里，最重要的



是牛顿发现了“光的周期性”。

在《光学》第三编的末尾总共提出了 31 个“问题”，在这一系列闪耀着启发性光辉的“问题”中，牛顿的思想涉及到各个方面，例如，光的本性，重力和物质，探究自然的正确方法，上帝存在的证明以及关于上帝的可知的一切方面。

《光学》一书的结束语，介绍了许多纯方法论问题，它不但涉及到具体问题，而且创造了建立任何其他科学的普遍原则。牛顿也自认为《光学》一书是他正确的哲学观点的最好证明。而《光学》全书，始终是建立在分析法的基础上，它仅仅是从实验中取得资料，描述大自然的规律，而撇开了引起它们产生的理由。

### 【光的本性之争】

光的本性是什么？对这个问题自古以来就有不同的回答。到 17 世纪，形成了一场关于光的本性的争论，也就是微粒说和波动说之争。这场争论，是科学（特别是光学）发展的产物，同时又成为科学新发展的动力。微粒说是以牛顿为代表，波动说则是以胡克、惠更斯为代表。

1672 年 2 月 6 日，牛顿在送交皇家学会的“关于光 and 色的新理论”一文中表明了自己对光的物质性的见解，认为“光线可能是球形的物体”，这就是我们通常所说的光的微粒说的最早表述。这种观念，很容易解释光的直线传播，同时也能解释光的反射和折射。但是这篇论文一经发表，就引起了激烈的争论，反对光的本性的微粒见解的人就是胡克。

胡克（Robert Hooke，1635.7.18—1703.3.3）是英国物理学家。他对弹性力定律的发现和论证，一直保存到现在，称为胡克定律。对光的本性问题，胡克主张光是一种振动。他举出金刚石受到摩擦、打击或加热时，在黑暗中会发光的例子来证明光必定是一种振动。同时他还以金刚石的坚硬特性，提出这种振动必定是短促的。当讨论光的直线传播和光速有限时，胡克认为，在一种均匀媒质中，这一运动在各个方面都必将成为一个球面。这个球面将不断地扩大，如同把一石块投入水中后，在水面一点周围的环状波膨胀为越来越大的圆圈那样。由此可见，胡克实际上已接触到了波前和波面的概念。

胡克与牛顿争论时，提出了不少问题，特别是微粒说所不能解释的一些事例。为了回答胡克提出的问题，牛顿又进一步研究，想办法完善自己的假设和理论。由于牛顿对振动和波动过程有一个严格的了解并有一个严整的数学原理，在与胡克的争论过程中，便认为自己关于光的粒子结构的理论是正确的，但是他也表明没有绝对肯定这个结论，所以只能用“可能”两个字来表示。进而认为这个结论在极端情况下，仅是自己学说的大概结果，而不是它的基本前提。

1675 年 12 月 9 日，牛顿向皇家学会又提交了一篇题为“涉及光和色的理论的假说”的论文，论文中提出了一个把光的微粒和以太的振动相结

合的新假说。认为“以太的振动在这一假说和那一假说中都是一样有用的和不可缺少的。因为假定光线是从发光物质向各方面发射出去的小的微粒的话，那么当它们碰到任何一种折射或反射表面时，就必然要在以太中引起振动，正如石块被投到水中时要引起振动一样。我还假定，这些振动将按照激发它们的上述颗粒性光线的大小和速度不同而有不同的深度和厚度。”“只有这样，它才能如此普遍而无所不包，以致把其他的假说也都包罗在内，而不需要创造什么新的假说。”

1675年12月21日，牛顿在给皇家学会秘书奥尔登堡(H. Oldenburg)的信中谈到了自己和胡克看法的不同之处，牛顿认为，“除了假定以太是一种能振动的媒质以外，我和他没有什么共同之处。然而我的这个假定有和他很不相同的看法：他认为能振动的以太就是光本身，而我则认为它不是。”与此同时，牛顿在其他论文中又提出并确立了光的周期性。他在研究光在薄板上的干涉和干涉后颜色随薄板的厚度而改变的现象时，发现了光的周期性，并测量出周期性变化的序列，实质上，他已成为第一个测量光波的波长的人。

当牛顿在皇家学会上宣读新的论文、阐述新的假说时，胡克却提出了优先权的要求。于是，牛顿在愤慨之下，决定不发表光学著作。牛顿的多年来的关于光学方面的研究成果，都是在胡克死后的一年——1704年发表在他的《光学》著作中。这就是《光学》为什么这么晚才发表的缘由。这一偶然事件，影响了光学的发展。

综上所述，可以看出，对光的本性的理解，牛顿基本上倾向微粒说，他认为“光线是否是发光物质发射出来的很小的物体？因为这样的一些物体能直线穿过均匀媒质而不会弯到影子区域里去，这正是光线的本性。”“我们并不需要别的，而只要把光线看作是微小的物体，这些微粒用它们的吸引力或某种其他的力在它们对之作用的物质中激起振动，这些振动比光跑得更快，连续不断地赶上光线，并激动它们，乃至轮流地增加或减小它的速度，从而使它们处于这种一阵一阵的猝发状态之中。”但是在牛顿的学说中，后来也加进了以太的振动。

坚持光的波动说，并想法建立理论来解释它们的，则是荷兰物理学家惠更斯(Christian Huygens, 1629.4.14—1695.6.8)。1678年，惠更斯向法国科学院提交了著作——《光论》。在书中，惠更斯把光波假设为一纵波，推导和解释了光的直线传播、反射和折射定律，书中并未提到关于光谱分解为各种颜色的问题。惠更斯的光的波动理论是研究碰撞现象的一个直接结果，他认为光是一种冲量，它类似于球与球之间的冲量的传递，这一研究代表了光学研究中物理观念和数学观念的联合。

《光论》全书正文分成5章，分别为“论光线沿直线的传播”、“论反射”、“论折射”、“论空气中的折射”、“论冰洲石中的奇异折射”。最后再加一章，“论用于折射与反射的透明体的图形”。

《光论》的英译本直到 1912 年 6 月才出版，译者汤普生（Silvanus P. Thompson）认为，惠更斯的著作之所以晚 200 年才有英译本，可能是与牛顿的观点相抵触的所有想法，都被其门徒一概排斥的缘故。译者认为惠更斯的波动理论远远比不上杨氏和菲涅耳的理论（参阅本书第 40 页），惠更斯更多地涉及到几何光学，而不是物理光学。他认为光是纵波，但却没有提出波长、横向振动、干涉原理和波列的概念。

对于光的本性的认识，随着时间的推延，认识也在不断地前进。如果说，17 世纪是牛顿的光的微粒说占优势的话，那么，到 19 世纪初，则是波动说占了统治地位（参阅本书第 41 页），到了 20 世纪初，人的认识又有了新的发展。

#### 【光的理论和望远镜的建造】

与力学发展相反，光的理论在 18 世纪实际上没有什么进展。1704 年牛顿的《光学》出版，然而，18 世纪并没有延续 17 世纪物理学关于光的本性的争论。光到底是一种波动呢还是一种粒子流的问题，似乎由于它的难度，不再引起物理学家们的广泛兴趣。但是，不可否认，在整个 18 世纪，光的微粒说被普遍地接受，而赞成、提倡波动说的人则很少，只有瑞士数学家欧拉（L. Euler，1707—1783）和美国物理学家富兰克林

（B. Franklin 1706—1790），但也只提出理论上的考虑。欧拉于 1750 年出版了他的《致日耳曼公主关于物理学中几个问题的信》，他以振动持续时间的不同来解释颜色的差别。他推测眼睛的不同媒质具有防止色散的性质，并建议用两种不同的物质来制备透镜，以便消除色差，但是他又认为实际上无法制成一个消除色差的透镜。这一见解被以后的实践所否定。光的波动说的观念，到 19 世纪开始时，才进入了复兴时期、“英雄”时期（参阅本书第 41 页）。

关于光的本性的争论对后世的影响，不少学者都加以评论。其中，兰利（S. P. Langley，1834—1906）曾在 1888 年发表过演说，他说：“当时有两个伟人，他们每个人都在自己的灯光照引下在黑暗中察看。对每一个人来说在灯光以外的一切都是偶然的；并且命运注定了牛顿的灯照耀得比他的对手更远，而且牛顿发觉光正好照到足以表明错误道路的入口处。牛顿作出了我们都知道的结论；这个结论不仅对于光是错误的，而且对整个热学理论也产生了有害的结果，因为一旦承认光是物质的，同时如果认为辐射热是光的亲属，那么热必须也看作是物质的；……由此看来，这个不幸的微粒说的影响比我们平常所想象的要深远得多。”所以 18 世纪光学理论没有什么发展，但是在光学仪器的研制方面却获得了不少成就。

18 世纪的光学成就，主要是建造了一系列不同型式的望远镜。由于透镜存在色差，望远镜的制造者深感苦恼，欧拉的观念又引起人们的恐慌，但是也有人因好奇心而去重复牛顿的消色差实验，并得到了不同的结果，增强了制造消色差透镜的信心。18 世纪 40 年代以后，伦敦的光学仪器商

多朗德 (J.Dollond, 1706—1761) 开始研制消色差的透镜, 于 1758 年建造成一台消色差望远镜, 并送交皇家学会, 此事轰动了整个欧洲。1761 年, 其子 P. 多朗德继承父志, 再接再厉, 与人合作, 建成了更高水准的折射望远镜。这一成功, 大大促进了天文学的发展。经过反复试验, 消色差透镜开始被成功地应用到显微镜的制作上。

1723 年, 英国人哈德利 (J.Hadley) 循着牛顿的研究路线, 建造了一台 6 英尺长的反射式望远镜, 它和惠更斯制造的 123 英尺长的折射式望远镜等效, 并将它送给皇家学会。由于反射式望远镜不存在折射式望远镜的令人烦恼的色差问题, 一时便获得了很大的发展。

各种类型望远镜的制造成功, 对于天文学说来, 无疑是极为重要的推动, 但对于物理学来说, 并不能引起理论或实验的大发展。

### 【光的波动说的复兴——托马斯·杨和菲涅耳】

1704 年牛顿的《光学》一书问世, 差不多相隔整整一个世纪, 光学(包括对光的本性的认识)的发展缓慢, 过去把这一切都归罪于牛顿的威望。到了 19 世纪, 光学的发展才有所突破, 特别是物理光学得到了长足的进步, 开始了波动说的“英雄”时期。这一时期, 从 1800 年持续到大约 19 世纪 30 年代, 而这一发展主要发生在英国和法国, 其代表人物是托马斯·杨和菲涅耳。

托马斯·杨 (Thomas Young, 1773.6.13—1829.5.10) 是英国医生和物理学家。对物理学的贡献, 除了提出“能”的概念 (1807 年) 和杨氏弹性系数以外, 最大的成就是在 1801 年提出了光的干涉理论。托马斯·杨最早研究眼睛的构造和光的特性, 从 1801 年到 1804 年, 是他研究光学的第一个时期。干涉理论被人嘲笑, 托马斯·杨便“改行”, 连续 12 年从事语言学的研究, 特别是象形文字的辨读工作。直到法国的菲涅耳进行光学实验, 并且特别突出杨氏的干涉理论时, 托马斯·杨也就重新恢复他早期的研究, 进入了他的光学研究的第二时期。

1801 年, 托马斯·杨在皇家学会宣读了关于薄片颜色的论文, 在论文中详述了实验的内容, 并表达了他的观点——倾向波动说, 提出了干涉理论。实验中, 他用一个屏幕遮住暗房的窗子, 屏上开有两个靠得很近的小孔。当这两个小孔比较大的时候, 穿过它们的阳光就在置于一定距离远的另一屏幕上形成两个光斑。当小孔逐渐缩小达到很小时, 穿过它们的光束在屏幕上所形成的两个光斑就扩展开来, 彼此部分重叠。托马斯·杨仔细观察后发现, 屏幕上可以受到来自两个孔的光束照射的区域, 有一系列暗条隔开的彩虹般的美丽的条纹, 它与牛顿环十分相似。当屏上两小孔间相距 1 毫米时, 相距 1 米远的另一屏幕上就会呈现 0.6 毫米宽的条纹。对这一现象, 托马斯·杨利用光的波动说和光的干涉理论就能很好地解释。如果堵住一个小孔, 就变成了单孔衍射实验。

从历史来看, 做过衍射实验的、第一个证明光是波动的是意大利的格

里马耳迪 (F.M.Grimaldi, 1618—1663)。他曾做过这样的实验：在一束光线通过的路径上，摆上一物，发现该物影子的边缘是模糊的，他称此种现象为“衍射”。如何解释呢？格里马耳迪认为光是传播着的光流体，是一种稀薄的、感觉不到的“液体”，遇到障碍物后，引起“液体”的波动。据记载，他也研究过干涉现象，并把光和水波进行类比。这些研究结果，都是在格里马耳迪死后的第三年（1665年）才公布的。

托马斯·杨利用干涉的观念，成功地解释了牛顿环，同时也成为第一个近似测定光的波长的人。这一重要发现，在他的论文“关于物理光学的实验和计算”中发表，并刊于1803年11月24日出版的《哲学学报》上。根据这一观念，证实了惠更斯对冰洲石晶体中所看到的双折射现象的分析是正确的。虽然托马斯·杨的功绩很大，但却受到了猛烈的抨击。他的文章被称为是“没有值得称之为是实验或是发现的东西”，“没有任何价值”。还有人评论为“它们除了阻碍科学的进展以外不会有别的效果”，指责干涉理论是“荒唐”和“不合逻辑”的，所以“暂时不接受这个作者无能的学究气的作品”。为什么会出现这种怪现象呢？原因之一是牛顿的观点给大家的印象太深刻了，致使有些人不愿意接受建立在实验基础上的新观念。但是托马斯·杨是如何对待牛顿的呢？他认为，尽管仰慕牛顿的大名，但并不因此认为他是万无一失的，他的权威也许有时甚至阻碍了科学的进步。托马斯·杨的观点无疑是正确的，更何况牛顿在他的《光学》著作中，已提出对光的本性可以进一步探究的一些问题。虽然周围环境压抑了托马斯·杨的研究，但是他在1807年出版的《自然哲学和机械工艺讲义》一书的第三十九讲中，还是对光的干涉再次作了解释。

光的波动说在英国的复兴，刺激了法国的牛顿学派，并推动了法国物理学界对光学问题的研究。首先，法国的天文学家、数学家和物理学家拉普拉斯 (P.S.Laplace, 1749—1827) 在对托马斯·杨答辩时，于1808年用光的微粒说分析了双折射现象。1809年，法国物理学家马吕斯 (E.L.Malus, 1775—1812) 发现了光的偏振现象，他本人认为这是对波动说的否定（事实上，这一实验现象只与惠更斯《光论》中的光是纵波的观点相矛盾）。就在这一时期，法国出现了一位杰出的波动说的代表人物——菲涅耳。

菲涅耳 (Augustin Jean Fresnel, 1788.5.10—1827.7.14) 大约从1814年开始研究光学。1814年12月，菲涅耳在一封信中流露出“我不知道光的偏振意味着什么”的彷徨情绪，但是经过将近一年的努力，在1815年10月他就把一篇关于衍射的重要论文寄给了科学院，紧接着很快完成了其他一系列论文。菲涅耳发现，在由点光源发射出的光束中放上一根细线，精确地测定从这光束的轴到所产生的条纹间的距离。他注意到，当通过细线一边的光在它到达屏之前把它挡住时，影内的光带就消失了。菲涅耳不知道托马斯·杨早在13年前就已经取得了这个成就，他正被引向发现干涉

原理。许多物理学家不承认这个现象就是干涉引起的。自从格里马耳迪发现衍射以后，人们已经知道衍射条纹，并且已经用微粒说加以解释。为了消除这些反对派的意见，菲涅耳设计了一个值得纪念的实验：利用两个与小孔或不透明障碍物边缘都无关的小光源，用两块彼此接近  $180^\circ$  角的平面金属镜，避开衍射，由反射光束来产生干涉现象。

法国物理学家阿拉哥 (D.F.J.Arago, 1786—1853) 受命报告了菲涅耳的论文，由此开始，阿拉哥也开始研究这个问题，并接受波动说的观点，成为菲涅耳的好友。由于菲涅耳提出的论文，数学处理不够好，受到了他人的指责。菲涅耳受此激励后，发愤努力，应用大量数学工具进行精密的计算，才使不少人开始相信波动说。由此可见，菲涅耳与托马斯·杨有很大的不同，后者没能用数学计算来证明自己的解释。同时，菲涅耳用波动说解释了影子的存在和光的直线传播，并指出光的干涉现象和声音的干涉现象所以不同，是由于光的波长短得多。这一成功，为光的波动说增添了不少光辉。

通过阿拉哥的介绍，菲涅耳注意到了托马斯·杨的工作，同时把自己的第一篇论文寄给了这位英国医生。令人欣慰的是，在托马斯·杨和菲涅耳之间没有发生优先权的争论。相反，托马斯·杨受到菲涅耳工作的激励，重新恢复了对光学的研究。光的偏振现象发现后，大家都想法来解释它。1817年，托马斯·杨想到，如果光的振动不是像声音那样沿着运动方向作纵向振动，而是像水波或者拉紧的琴弦那样作垂直于运动方向的横向振动的话，这个问题说不定可以得到解释。这是一个绝妙的思想火花。托马斯·杨将这一思想于当年写信告诉了阿拉哥。这一思想和假说，后来又被实验所证实，由此确立了光波是横波的观点。1819年，菲涅耳和阿拉哥合作研究，提供了相互垂直的偏振光不相干涉的证明。这样，光的横向振动理论（即光波是横波）得到了最终的证实。这样，托马斯·杨于1819年10月16日写信给菲涅耳，信中表达了对菲涅耳的敬意：“先生，我为您赠送我令人敬羨的论文表示万分感谢，在对光学进展最有贡献的许多论文中，您的论文确实也是有很高的地位的。”

菲涅耳在收到托马斯·杨1819年的来信之前，参加了一次竞赛，即1817年法国科学院举办的关于光的衍射现象最佳科研成果的竞赛，并于1818年提交了论文。科学院成立了评委会，评委会的成员中有波动说的支持者阿拉哥，有波动说的反对者泊松 (S.D.Poisson, 1781 - 1840)、毕奥 (J.B.Biot, 1774 - 1862) 和拉普拉斯，有中立者盖·吕萨克 (J.L.Gay-Lussac, 1778—1850)。尽管不少成员不相信菲涅耳的观念，但是由于他的计算结果和实验数据相一致，最后还是授予他优胜奖。泊松根据菲涅耳的计算结果，得出在一个圆片的阴影中心应当出现一个亮点，这是令人难以相信的，过去也从没看到过。但是菲涅耳的理论计算表明，当这个圆片的半径很小时，这个亮点才比较明显。经过实验验证，果真如此。

通过托马斯·杨和菲涅耳的工作，比较牢固地确立了光的波动性的正确性，所以惠更斯与牛顿的这场争论，到惠更斯死后 120 年才告一段落。

### 【光速测定方法的发展——斐索和傅科】

从 17 世纪起，科学家们就设想在实验室里用实验的方法来测定光速，但是没能成功。后来利用天体的运动来测量光速，获得了初步成功。19 世纪以后，人们又想用实验的方法来测定光速，这一想法最初是由惠斯通提出的。

1834 年，英国物理学家惠斯通 (C. Wheatstone, 1802—1875) 利用旋转镜来测定电火花持续的时间，当时他就想用此法来测定光速，同时也想确认一下在折射率更大的介质中，光速是否更大。惠斯通的思想方法是正确的，但是他没能完成。这个思想后来被阿拉哥采纳，可是由于他的视力不佳，就把此课题留给了更年轻的人去研究。另一方面，采用这种方法，镜子必须具有 1000 多次每秒的速率，机械要求很高，当时的社会技术条件难以达到。与此同时，人们认为人的眼睛要从以如此巨大的速率转动着的镜子中，捕捉被反射的闪光的瞬时映像也是不可能的。随着时间的推移，采用这种基本的思想方法来测定光速，由斐索和傅科获得了成功。

斐索 (Armand Hippolyte Louis Fizeau, 1819.9.23—1896.9.18) 是法国物理学家，先后研究了光的干涉、热膨胀等，发明了一种干涉仪。他在研究和测量光速问题上作出了贡献，是第一个不用天文常数、不借助天文观察来测量光速的人。他发表了题为“关于光传播速度的一次实验”的论文，刊载在 1849 年出版的《法国科学院周报》第二十九卷上。斐索是采用旋转齿轮的方法来测量光速的。这个实验是在巴黎市郊相距 8633 米的絮伦 (Suresnes) 和蒙马特里 (Montmartre) 之间进行的。经过 28 次的观察和测量，得到光速的平均值为 70948 里格 (“里格”为长度单位，1 里格等于 3 英里，或 4828.032 米。70948 里格相当于 342539.21 千米) 每秒。这个数值与当时天文学家公认的光速值相差甚小。

除此以外，斐索于 1851 年又做了关于以太和物质的相对运动的实验，后人称为斐索实验。这个实验结果表明透明介质内的以太，是被运动着的介质 (当时用的是水) 往前拖曳，但又不是全部被拖曳，其速度比介质的速度小。这一实验在 20 世纪初由爱因斯坦作了重新解释。

傅科 (Jean Bernard Leon Foucault, 1819.9.18 - 1868.2.11) 是法国物理学家。原先研究医学，从 1845 年开始从事物理学的研究，曾与斐索共事。两人分手后，各自进行光速测定的研究工作。在物理学史上，傅科以其“傅科摆”的实验著名于世。他以摆球做实验，发现摆球的摆动面有转动，证明了地球的转动。所以我们说，这个实验验证了地球的自转。实验先后做了 4 次，才得出这一结论。

在光速测定的研究中，傅科是采用旋转平面镜的方法来测量光速的。1850 年 5 月 6 日傅科向科学院报告了自己的实验结果，并发现光速在水中

比在空气中小，证明了波动说的观点是正确的。后来，傅科把它作为科学博士级的论文于 1853 年提出，并刊载在 1862 年出版的《法国科学院周报》第五十五卷上，论文的题目为“光速的实验测定：太阳的视差”。

在论文中，傅科叙述了实验装置的改进和实验的结果。他所用的仪器与以前的仪器没有什么重大的区别，只是装了一套推动圆周屏幕移动的齿轮系统，以便准确量度镜的旋转速度。此外，实验中的距离，采用多次反射的方法，从 4 米扩大到 20 米。由于光通过的距离增大，时间的量度就更为准确，得到的结果也就更精确。傅科指出，光的速度显然比人们想象的速度要小，用旋转镜测得的光速大约为  $29.8 \times 10^7$  米/秒。接着他又分析了实验结果，据他看来，实验误差不可能超过  $5 \times 10^5$  米/秒。这样，傅科认为这一实验数值是正确的。

斐索和傅科之后，不少科学家采用并改进了前人的方法，继续测量光的传播速度。例如，法国的科尔尼 (M.A.Cornu, 1841—1902) 采用斐索的方法，于 1874 年在实验中把反射镜安置在 23 公里远的地方，测出的光速为 298500 千米每秒；1878 年又测得为 300400 千米每秒。1880—1881 年，英国的詹姆斯·杨 (James Young) 和乔治·福布斯 (G.Forbes) 测得的数值为 301382 千米每秒。最值得一提的是迈克耳逊的测量工作。

年轻的美国人迈克耳逊 (A.A.Michelson, 1852—1931) 对测量光速表现出极大的兴趣，他继承了傅科的实验思想，于 1878 年在安纳波利斯海军学院的实验室进行初步实验，测得的数值为 299910 千米每秒。1882 年在俄亥俄州继续进行测量，针对傅科实验中的偏转太小，送回来的像的位移只有 0.7 毫米的弱点进行改进，使送回来的像的位移达到 133 毫米，这样测得结果为 299853 千米每秒。在迈克耳逊的后半生，继续做测定光速的实验。1926 年在威尔逊山做实验，该山与作为远距离测量站的圣安东尼奥山相隔 22 英里，改用八角形的转动镜 (即此转动镜有 8 个反射面)，测得光速为 299796 千米/秒。

#### 【普朗克和黑体辐射】

普朗克 (Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858.4.22—1947.10.3) 是德国物理学家。他在热力学方面有扎实的基础，在研究黑体辐射时，提出了量子假说，为 20 世纪物理学的发展作出了卓越的贡献。

黑体辐射实验是和照相技术中的很多问题联系着的，它是与城市、企业中的人工照明的发展密切相关的。黑体辐射谱 (也称热辐射谱) 中的能量分布问题，也是物理学家们很感兴趣的研究课题之一。1895 年，普朗克就开始研究这一课题。

任何经典理论都无法解释黑体辐射的实验结果。针对这一尖锐的矛盾，普朗克深入地对辐射规律进行了研究。他的研究工作可以分成两个循环，即 1899 年到 1901 年为第一循环，1910 年到 1914 年为第二循环。

第一循环期间，1899 年，普朗克借助于纯粹热力学的考虑而得出方程



式，发表了“关于辐射的不可逆现象”一文，严格地阐述了维恩定律，引进了“正常辐射”的概念，也就是辐射的能量按单独振子的分布完全是无序的。

1900年3月，普朗克发表了“辐射热的熵和温度”一文，试图用经典物理学去解决黑体辐射问题。

理论与实验之间的矛盾和困难一直没能解决。1900年夏天，库尔鲍姆（F.Kurlbaum）和鲁本斯（H.Rubens）在柏林对热辐射光谱作了新的准确的测量。普朗克根据他们两人口头提供的结果，导出了熵 $S$ 与振子能量 $U$ 的二次微商表式，然后又导出了 $E_\nu$ 的表式。这一表式和最新的实验结果达到了令人喜悦的一致性。这就是普朗克的热辐射定律，它的出现标志着物理学发展的新时期的开始。

但是，什么是新表式的物理解释呢？普朗克开始了艰巨的理论研究工作。很快地发现，这一表式表明振子只能包含分立的能量，也就是能量只能是 $h\nu$ 的整数倍， $h$ 是个非常小的常数，称为作用量子，后来称为普朗克常数。 $h\nu$ 为振子的能量的最小单位，称为“能量子”。虽然普朗克自己一开始也难以相信，但是他也知道这是一个无法避免的结论。根据普朗克儿子的回忆：一天晚上，他的父亲曾在柏林近郊的绿林里散步时谈到了他的新观念，他感到自己可能已经完成了一个第一流的发现，或许只有牛顿的发现才能和它相比。由此可见，普朗克那时已经意识到，他的研究工作已经触动了我们描述自然的基础，并且有朝一日，这些基础将从它们现有的传统位置向一个新的、现在还知道的稳定位置转移。尽管普朗克不喜欢这个结论，但他还是在1900年年底发表了他的量子假说。

1900年12月14日，普朗克在德国物理学会上宣读了论文“谈谈正常光谱能量分布定律的理论”，论文中首次抛弃了经典物理学所特有的那种原则：从一个状态过渡到另一个状态必须是连续的，吸收和释放能量必须是连续的，开创了量子物理学的新时期。

1901年起，不少物理学家相继发表文章，从实验上和理论上探讨普朗克辐射定律及其物理内容。而普朗克本人也在1901年发表了内容更为详尽的论文“论正常光谱中的能量分布定律”，对自己原有的工作作了补充。在论文中，普朗克计算得出两个常数：玻耳兹曼常数 $k$ 和作用量子（即普朗克常数 $h$ ），数值分别为 $k = 1.346 \times 10^{-16}$  尔格/度， $h = 6.55 \times 10^{-27}$  尔格·秒（目前的数值分别为 $1.381 \times 10^{-16}$  尔格/度， $6.626 \times 10^{-27}$  尔格·秒）。普朗克声称，前一个常数连玻耳兹曼自己也从未引到过它，从来没有想到可能对此常数作出正确的测定。爱因斯坦1905年发表的论文中的一篇论文就是根据普朗克的这篇论文提出来的（参阅本书第46页）。

普朗克在研究方法上是成功地运用了内插法。对于内插法，普朗克本人是这样描写的：通过直接的实验，对某一函数得到两个简单的极限，在小能量时，函数与能量成比例；在大能量时，函数与能量的平方成比例。

这样，在一般情况下，就选择了此函数的量等于这两项之和——一项是能量的一次方，另一项是能量的二次方，所以对小能量，第一项是主要的，对大能量，第二项是主要的。这样便得出了新的辐射公式。这一方法，普朗克称之为内插法。在很多物理学教科书中，常常讲到普朗克是在维恩定律和瑞利-金斯定律之间使用了内插法，得到了自己的定律，这是不符合历史的。瑞利导出自己的定律是在 1900 年，而普朗克的任何研究工作都没有引证瑞利的结果。

由于普朗克这一研究工作对物理学发展的贡献，他获得了 1918 年的诺贝尔物理学奖。

第二循环期间，从 1910 年开始，普朗克又研究黑体辐射问题，但是这一研究，并不是推动科学的发展，而是想利用经典理论去解释黑体辐射问题，想用电动力学来研究光的吸收，用统计物理来研究光的发射和辐射能的稳定分布，他总想建立一个不要太远离经典理论的理论，这当然是徒劳的。这段历史对我们后来的研究工作者是很有教育意义的，在科学研究的道路上，只有不断地奋发前进，后退是没有出路的。

#### 【爱因斯坦和光子说、相对论】

爱因斯坦 (Albert Einstein, 1879.3.14—1955.4.18) 是 20 世纪著名的物理学家，生于德国的乌耳姆，卒于美国的普林斯顿。对物理学最大的贡献是创立了狭义相对论和广义相对论。

爱因斯坦从 1900 年便开始了科学生涯，1905 年爱因斯坦在科学史上创造了一个史无前例的奇迹，这一年中他写了 6 篇论文，在 3 个领域内作出了 4 个有划时代意义的贡献。有人说，每一项成就都可以获得诺贝尔物理学奖。

首先，1905 年 3 月发表了论文“关于光的产生和转化的一个推测性的观点”，把普朗克 (M. Planck, 1858—1947) 在 1900 年提出的量子观念 (参阅本书第 44 页) 扩充到光在空间中的传播，提出了光量子的假说。他认为，光对于时间平均值 (即统计的平均现象) 来说表现为波动，光对于瞬时值 (即涨落现象) 来说表现为粒子。这是物理学史上第一次揭示微观客体的波动性与粒子性的统一，即波粒二象性。论文的最后，用光量子假说极明白地解释了光电效应。由于光电效应定律的发现，他获得了 1921 年的诺贝尔物理学奖。

其次，1905 年 4 月、5 月、12 月分别发表了 3 篇关于液体悬浮粒子运动理论方面的文章，其目的是要通过观测由分子运动的涨落现象所产生的悬浮粒子的无规则运动，来测定分子的实际大小。三年后，物理学界用实验验证了爱因斯坦的理论预测。

再次，1905 年 6 月，发表了一篇开创物理学新纪元的论文，题目为“论动体的电动力学”，完整地提出了狭义相对论。这是他将近 10 年酝酿、探索的结果。该理论的产生推动了整个物理学理论的革命。他从空间隔开的

两个事件的同时性问题入手，否定了没有经验根据的绝对同时性，进而否定了绝对时间、绝对空间的观念，否定了“以太”的存在，这样便对传统的空间、时间观念进行了必要的修改。从相对性原理、光速不变原理出发，建立了新的时空变换关系式。通过这一研究，力学和电磁学也就在运动学的基础上统一了起来。

第四，1905年9月，发表了一篇短文“物体的惯性同它所含的能量有关吗？”作为狭义相对论的一个推论，揭示了质量与能量的相当性，即 $E = mc^2$ 。这一相当性是原子核物理学和粒子物理学的理论基础之一，它为20世纪40年代实现的核能的释放和利用开辟了道路。

除此以外，爱因斯坦对量子论的进一步发展、广义相对论的建立、引力波的研究、统一场论的探索等都作出了贡献，但也留下了不少后人作继续研究的课题。

### 【激光的发现】

1960年7月7日，《纽约时报》刊登了一篇短讯，报导了美国加州休斯实验室的梅曼（T.E.Maiman，1927—）成功地进行了“激光器发生新的原子辐射光”的实验。仅仅过了几个月，几种不同类型的激光器相继问世，使激光成为一种新型光源。这种光具有亮度高、方向性好、单色性好等特点，立即得到广泛的应用。“激光”就成为20世纪60年代最响亮的名词之一。回顾历史，激光形成的原理在半个世纪之前就已问世。

1900年，普朗克提出了能量子的概念（参阅本书第44页）。1905年，爱因斯坦提出了光量子的假说（参阅本书第46页），1916年他又研究辐射问题，在他的论文“关于辐射的量子理论”中，深刻地阐明了物体与电磁场作用的实质，同时指出，除了吸收和自发辐射之外，还存在着第三种过程——受激辐射。爱因斯坦不仅提出了受激辐射的概念，同时还指出了受激辐射最重要的性质：如果能量为 $h\nu = E_m - E_n$ 、动量为 $h\nu/c$ 的量子与原子相遇，这个原子所处的能态为 $\epsilon_m$ ，那么它可以使原子跃迁到较低能态 $\epsilon_n$ ，放出具有与它一样的能量（频率）和一样的动量（传播方向）的量子。换句话说，爱因斯坦第一次预言了辐射光量子 and 受激光量子的绝对一致性，即相干性。过了一段时间，爱因斯坦还认为这两个光量子具有相同的偏振。

爱因斯坦的这些观点引起物理学界的注意，但是人们的注意力（包括爱因斯坦本人）往往去探讨理论问题，而没有去探索如何实现受激辐射。在探索的道路上，光学家们迈出了第一步，他们从理论上间接证明了它们的存在，并指出了要实现它的必要条件。实际上，要破坏热平衡、实现粒子数的反转是很困难的，所以研究工作进展不大。事过不久，无线电物理学家实现了受激辐射，但它却是在微波波段上，而不是在光波波段上，这就是微波激射器。

微波激射器的出现，表明利用受激辐射的方法，能实现电磁波在微波段上的振荡和放大，如果把这一方法推广到光波段上，便能形成光的振荡

和放大，这就导致了激光器的诞生。激光器的英语为 Laser，它是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的第一个字母组成的缩写，意思是光受激辐射放大。

首先获得成功的是美国休斯研究所的梅曼。早年，梅曼从事原子光谱的研究，1956 年到休斯后，曾致力于红宝石微波激射器的改进工作，他第一个在红宝石中获得了激光。美国物理学家肖洛 (A.L. Schawlow, 1920 - ) 曾经断言红宝石并非是产生激光的合适材料，但梅曼经过仔细分析，尤其是证实了它的量子效应高达 75%，于是确信红宝石是合适的材料。1960 年 6 月，梅曼进行了他的划时代的实验，把长为 1.9 厘米、半径为 1 厘米的红宝石圆柱体的两端磨平，并镀上银，然后置于螺旋形氙灯中心，逐渐增强氙闪光灯的强度，发现荧光增强，谱线宽度变窄，方向性得到改善，由此梅曼确信得到了激光振荡。

梅曼将其实验结果写成题为“红宝石的光激射作用”的论文寄给《物理学评论快报》，但是主编不予发表。梅曼就借记者招待会公布自己实验的结果，这就是前面提到的《纽约时报》上那篇短讯的由来。一位记者把这篇论文寄给英国《自然》杂志，该论文便被刊登在八月号上。肖洛看到后立即重复这一实验，也取得成功，证明梅曼是得到了激光。这样，梅曼就取得了激光发明的优先权。

之后不久，人们一直期待着的气体激光器研制成功，如氦氖激光器就在 12 月试制成功，这是一台连续运行的激光器。

激光问世以后，古老的光学学科又焕发了青春。非线性光学、激光光谱学和全息术的出现，表明光学已发展到了一个崭新的阶段，它们是现代光学的标志，这一切都只能在激光器诞生以后才能出现。

## （五）原子物理学和原子核物理学部分

### 【世纪之交的物理学革命】

自然科学刚跨入 20 世纪，物理学领域内首先掀起了革命的浪潮。19 世纪末，物理学实验上的一系列重大发现，冲击着经典物理学的连续观念、绝对时空观念和原子不可再分的观念，使原有的经典理论显得无能为力。这一冲击，对当时的物理学家们的影响是很大的。因为 19 世纪物理学取得巨大成就时，不少物理学家除了赞叹以外，还流露出满足和无所作为的思想。著名的德国物理学家基尔霍夫（G.R.Kirchhoff, 1824—1887）曾经表示过：“物理学将无所作为了，至少也只能在已知规律的公式的小数点后面加上几个数字罢了。”普朗克的导师也曾经说过，物理学将会很快地具备自己的终极的稳定的形式。并表示，虽然在这个或那个角落里，还可能发现或消除掉一粒尘土或一个小气泡，但作为整体的体系却足够牢固可靠了。理论物理学已明显地接近几何学 100 年来已经具有的那种完善程度。在刚跨入 20 世纪的第一天，世界著名物理学家开尔文（Lord Kelvin，原名为 W.Thomson, 1824—1907）也曾经说过：“在已经建成的科学大厦中，后辈物理学家只能做一些零碎的修补工作了。”但是，他又敏锐地发现，在物理学晴朗的天空里，还有两朵小小的令人不安的乌云。这两朵“乌云”是指什么？为什么这两朵乌云会引起这样著名的物理学家的不安呢？我们还是回顾一下历史吧！

物理学进入到 19 世纪 80 年代以后，物理学的经典理论不断完善，与此同时，物理学实验上却陆续发现一些重大的结果，这些结果使旧有的物理学理论显得无能为力。这些实验中，至少有 7 个重大的发现，不但旧理论无法解释，有的还导致观念上的更新。

第一个实验是 1887 年赫兹（H.R.Hertz, 1857—1894）在验证麦克斯韦（J.C.Maxwell, 1831—1879）预言电磁波存在的实验过程中（参阅本书第 32 页），发现了光电效应。赫兹在研究电磁波发射和接收的实验过程中，发现产生火花的光与接收间隙隔绝时，必须缩短接收间隙，才能使它发生火花；任何其他火花的光射到间隙的端点，也能使间隙之间发生火花。当赫兹进一步研究后，发现这一现象中起作用的是光的紫外部分。当这部分光射到间隙的负极时，作用最强。这就表示紫外光照射负极时，负极更容易放电，即有更多的电子逸出负极的表面。用其他光照射时，就没有这种现象。按照经典理论，从金属表面逸出电子的数目与光的强度有关，而与光的频率无关。这一矛盾，赫兹无法解释，但他仍以“论紫外光对放电现象的效应”为题发表论文，描述了这一现象和结果，向物理学经典理论发起了挑战。

第二个实验是 1887 年的迈克耳逊-莫雷实验（参阅本书第 49 页）。这一结果使持有光是“以太”中的波动这一观点的人大失所望，连迈克耳逊

本人也不了解这一实验结果的重要意义。

第三个实验是 1895 年伦琴 (W.K.Röntgen, 1845—1923) 发现了 X 射线 (参阅本书第 33 页)。这一发现是对“不可入性是物质的固有属性”观念的挑战,也是对建筑在这一观念基础上的经典物理学的有关理论的挑战。

第四个实验是 1896 年贝克勒尔 (A.H.Becquerel, 1852—1908) 发现了放射性辐射 (参阅本书第 50 页)。这一实验结果表明化学元素是能蜕变的,它会变成其他元素,改变了人们一成不变观念。

第五个实验是 1897 年 J.J.汤姆孙 (J.J.Thomson, 1856—1940) 发现了电子 (参阅本书第 33 页)。电子的发现和证实,向建筑在经典物理学基础上的旧观念发起了冲击,它表明比原子小的粒子是存在的,原子并不是最小的客体,指出了经典的物质结构理论的局限性。J.汤姆孙获得了 1906 年的诺贝尔物理学奖,这是表彰他在气体导电方面的理论和实验的研究成果,而只字未提发现电子。这就表明传统观念是比较深的,不少人不容易接受新生事物。

第六个实验是 1898 年居里夫妇发现放射性元素 (参阅本书第 51 页)。这一重要发现,同样证明化学元素是要蜕变的,而原子并不是不可分的,它会放射出更小的粒子而改变自己的性质,再次说明经典理论的局限性。

第七个实验是黑体辐射实验 (参阅本书第 44 页)。普朗克 (M.Planck, 1858 - 1947) 提出了“量子”的概念,抛弃了经典物理学特有的两条原则:从一个状态过渡到另一个状态必须是连续的原则,吸收和释放能量必须是连续的原则,宣布了量子物理学的诞生。

上述 7 个主要实验结果,用经典的物理学理论根本无法加以解释。第三个实验对传统的观念 (即“不可入性是物质的固有属性”) 发起了冲击,说明“不可入性”并不是物质的“固有的”属性。第四、五、六个实验,表明化学元素会蜕变,会变成其他元素:比原子小的微粒——电子的发现,说明原子并不是不可再分的最小的实体,对原子是不可再分的观念也发起了冲击。第七个实验开创了量子物理学,同时应用量子论的观点也能解释第一个实验的结果。第二个实验,只有等待狭义相对论诞生以后,才能很好地加以解释。

前面提到开尔文所说的“两朵乌云”,就是指迈克耳逊-莫雷实验和黑体辐射实验。其实这不是什么“乌云”,而是物理学发展的一个前奏。当物理学进入 20 世纪以后,就诞生了量子论和相对论,开创了现代物理学。实际上还有一朵乌云,就是前面提到的第四、五、六 3 个实验,这朵乌云导致了 20 世纪现代物理学中的关于物质结构理论的发展。这段历史深刻地说明了,终极真理的观念、无所作为的观念都是不对的,都是不符合千万年的自然史和几百年的自然科学史的史实的。

**【迈克耳逊和干涉实验】**

迈克耳逊 (Albert Abraham Michelson, 1852.12.19 - 1931.5.9) 是美国物理学家。他以毕生的精力从事于光速的精密测量。

迈克耳逊为了提高测量地球相对于以太运动的速度的精度,在柏林工作期间,设计了一种干涉仪(即现在称为的迈克耳逊干涉仪)。19世纪初,托马斯·杨(Thomas Young, 1773—1829)和菲涅耳(A.J.Fresnel, 1788—1827)的研究,使光的波动说取得了很大的成功(参阅本书第41页)。但是根据经典力学的观点,波的传播必须存在介质,所以人们想借助“以太”来传播光,并想利用各种方法来检验“以太”的存在,确定它的属性。到了80年代根据天文学和物理学的知识,认为“以太”是充满整个太阳系,地球就在这个“以太”的海洋中运动,但是又认为地球在这个“以太”海洋中运动,不会扰乱“以太”原有的分布。根据这一图象,人们就希望利用实验来测定地球相对于“以太”的运动速度,这就是平时所说的“以太”的漂移速度。从1880年开始,迈克耳逊就利用干涉仪来测量“以太”的漂移,以证实“以太”的存在。那时,他想比较光在直角时的路径,作为发现地球相对“以太”运动的一种方法,也就是地球运动的平行方向和垂直方向之间,光通过同一距离的时间应当不同,这一差异在干涉仪上应该出现干涉条纹的移动。1881年,测量的结果是否定的。后来,他和美国化学家莫雷(E.W.Morley, 1838—1923)合作,改进实验装置,提高精度,继续研究。经过一段时间的努力,于1887年12月发表论文“论地球运动和传光的以太”,宣布得到了否定结论的实验结果,表明测量不出“以太”的漂移速度,由此说明地球和以太之间不存在相对运动。这就是物理学史上有名的“零结果”。这一结果表明过去的这幅图象是不正确的,从而表明以往的观念和理论有片面性。

#### 【贝克勒尔和放射性辐射】

贝克勒尔(Antoine Henri Becquerel, 1852.12.15—1908.8.25)是法国物理学家。对物理学的贡献主要是发现了放射性辐射。

伦琴的重大发现(参阅本书第33页)轰动了整个社会,开拓了一个新的科学研究领域。1896年1月下旬,法国科学院举行科学例会,贝克勒尔从会上知道伦琴发现了X射线。同时,法国的彭加勒(H.Poincaré, 1854—1912)认为X射线似乎是从阴极对面的有荧光的部位发出的。由此,贝克勒尔便联想起X射线与荧光之间可能有某种联系。于是他想通过实验来验证荧光物质是否会产出X射线。2月下旬,贝克勒尔选用一种铀盐(硫酸铀酰钾),用黑纸包好,并放在照相底片上,在日光下暴晒一段时间,铀盐便发荧光,然后冲洗照相底片,看看是否像X射线那样使照相底片感光。实验结果与预料的一样,的确照相底片感光了。这个实验结果,使贝克勒尔相信,经日光暴晒后的铀盐发出荧光,然后发出具有贯穿能力的射线,致使照相底片感光。接着,贝克勒尔用反射光、折射光进行实验,都得到相同的结果。这样,他于1896年2月24日向法国科学院提交了题为

“论磷光辐射”的报告，描述了这些实验结果。在贝克勒尔看来，似乎X射线是由铀盐发荧光时发射出来的。

为了证实自己的论点，贝克勒尔准备进一步做实验，以便在下周的科学例会上提出正式报告。但是，碰巧的事情发生了。那几天天气不好，没有太阳光，无法进行实验。他只得把黑纸包好的铀盐和照相底片一起放到抽屉里，等待太阳光出来。隔了几天，天晴了，他想继续做实验。实验之前，贝克勒尔先对底片作了检查，即对上面第一张底片进行冲洗，结果发现底片上非常清晰地呈现出铀盐的影像轮廓。这一结果，使贝克勒尔陷入了深思。他马上想到，这个使照相底片感光的过程是在黑暗的抽屉里进行的，与日晒、荧光根本无关。于是他推论，感光的真正原因，必定是铀盐自身发出的某种还不被人们知道的射线所引起的。第二天刚好召开科学例会，贝克勒尔在会上公布了这一重要的发现。这种射线当时被称为“贝克勒尔射线”。后来，根据居里夫人的建议，凡是具有这种性质的物质统称为放射性物质，其射线也就称为放射性射线。

不久，贝克勒尔发现，这种铀盐所发出的射线，不仅可以使照相底片感光，同时也可以使气体电离成导体。并发现，只要有铀元素存在，就有这种贯穿辐射产生。过了2个月，贝克勒尔又发现，不发磷光的铀盐，也能发出不可见的射线。

贝克勒尔的发现，与伦琴的发现相比，情景大不相同，并没有引起多大反响，也没有引起人们的多大激动。这一发现在报纸上也没有披露，因为人们还在继续谈论和研究X射线。当然，贝克勒尔还在继续研究着。直到2年后，居里夫妇的研究成果（参阅本书第51页）使放射性的研究工作发生了一次大的飞跃。由于贝克勒尔的贡献，他和居里夫妇同获1903年的诺贝尔物理学奖。

#### 【居里夫妇和放射性元素的发现】

皮·居里（Pierre Curie，1859.5.15—1906.4.19）是法国物理学家。居里夫人——玛丽·居里（Marie Sklodowska Curie，1867.11.7—1934.7.4）祖籍波兰，法国物理学家。对物理学的贡献是发现了放射性元素。

贝克勒尔发现了放射性辐射后（参阅本书第50页），科学界对此并不关心，所以研究工作进展不大。正在徘徊不前的时候，居里夫妇对贝克勒尔的研究成果表现出极大的热忱和关注，并引起猜想：放射性辐射既然由铀元素本身的性质所决定的，那么在自然界中是否还存在其他一些像铀那样具有放射性的化学元素呢？经过实验测定，除了铀以外还有钍。通过实验观察和测量，居里夫人发现，铀（或钍）的化合物的放射性强度与化合物中的铀（或钍）的含量成正比。由此，居里夫人得出放射性是原子的一种特性，放射性是从原子内部产生的结论。

居里夫人进而检验各种矿物放射性的强度，意外地发现了有几种矿物



的放射性比铀元素应有的放射性强。由此推想，一定还有放射性很强的新的放射性元素存在。但是这一想法却遭到一些科学家的反对和攻击，可居里夫人并没有动摇，在丈夫皮·居里的支持下，以沥青铀矿为原料，提炼这种新元素。经过艰苦的历程，终于在1898年7月18日向法国科学院报告发现了放射性强度比铀高400倍的新元素。居里夫人将此元素命名为“钋”，以纪念自己的祖国——波兰。

后来又发现，钋元素的放射性还不是很强，为了寻找放射性很强的化学元素，居里夫妇试用钡作载体进行浓缩，得到了极少量能产生放射性的钡化合物。但是钡和它的化合物通常是没有放射性的，而居里夫妇得到的少量氯化物，其放射性比铀大900倍。通过其他科学家的协助，对该物质作光谱分析，发现了一种新的射线，它不属于任何一种已知的元素。居里夫妇在文章中写道：“这种射线在放射性比铀大60倍的氯化物中几乎难以看见，但是在经过分馏而使放射性大于铀900倍的氯化物中，却变得非常鲜明。这种射线的强度随着放射性的增加而增加。”实验表明，这种元素的放射性比钋强，而化学性质与钡类似。该年的圣诞节后的一天，他们又向法国科学院宣布发现了第二个新元素——镭。

在短短的几个月中，接连发现了钋和镭，这是一个了不起的功绩。但是钋和镭是不可直接捉摸的，所以不少化学家还是半信半疑，要求拿出纯镭的实物来。为此，居里夫妇奋斗了3年半，从几吨矿物残渣中提炼出 $1.2 \times 10^{-4}$ 千克的纯氯化镭，并测得镭的原子量是225（现在公认是226），其放射性比铀强千万倍。又花了3年时间，金属纯镭提炼成功，化学家便确信无疑了。

由于这一发现，居里夫妇和贝克勒尔同获1903年的诺贝尔物理学奖。1911年，居里夫人再次获得诺贝尔化学奖。

### 【原子结构的探索】

当1897年J.汤姆孙发现电子以后（参阅本书第33页），不少物理学家就在探索原子的结构。根据实验的结果，凭着丰富的科学想象力，提出了各种假设和模型，推动着物质结构理论的发展。

1901年2月16日，法国物理学家皮兰（J.Perrin, 1870—1942）在巴黎大学的一次讨论会上，提出了“原子的核-行星结构”的设想。

1901年6月，英国剑桥大学的物理学家金斯（J.H.Jeans, 1877—1946）在电子论的基础上，构思了一个“理想原子”。在金斯的观念中，一个普通的化学原子包含上万个电子，要确定这样的原子的平衡状态和在这些位置上的振动显然是不可能的。为了研究辐射问题，金斯考虑理想原子由少数目的电子组成。

1903年7月，德国物理学家勒纳（P.Lenard, 1862—1947）在一份实验报告中指出，虽然原子的一个非常小的部分阻止了快速阴极射线，但其较大的部分却肯定可以为这些射线所穿透。因此，勒纳猜想原子内部几乎

是空的，其中只含有一些微小的被勒纳称之为“动力子”的基本组成部分。他认为每个动力子由一个负的量子和一个紧靠该量子的正电荷组成，同时推测这一动力子的半径约为  $3 \times 10^{-12}$  厘米，或更小。值得一提的是，勒纳没有肯定氢原子只含一个动力子，但他倾向于只含一个。

在英国，讨论和研究原子结构问题较深入的还是 W. 汤姆孙 (William Thomson, 1824 - 1907, 即开尔文) 和 J. 汤姆孙 (J. J. Thomson, 1856—1940)。早在 1897 年 5 月, W. 汤姆孙就设想原子是由一个负电子和一个原子线度的正电球紧靠在一起的配对结构。而 J. 汤姆孙在 1899 年 12 月第一次描述了“布丁原子”(也称原子结构的葡萄干面包模型), 把原子看作一个均匀充斥正电的流体状的球体, 而负电子则散布于球体之中。1904 年 3 月起, J. 汤姆孙讨论了这种原子的力学稳定性。其结论是, 如果电子多于 4 个, 当它们排列成多重的环或壳, 并以一定的速度旋转时, 整个系统是力学稳定的。

1903 年 12 月, 日本物理学家长冈半太郎 (H. Nagaoka, 1865—1950) 提出了土星结构的原子模型。因为他认为在正电球内部, 负电子自由运动而不受阻碍, 是不可想象的。如果把负电子看作是几何学中的点, 那么什么问题也没有了, 但这决不是物理学的观点。长冈描述了一个电子环, 形式上与土星环相似, 电子环的半径构成了原子的线度, 而正电球则缩成一个较小的粒子, 位于环的中心。但是长冈没有说明这个粒子的线度。为了说明这种结构模型的原子具有力学稳定性, 长冈借用 1857 年麦克斯韦解释土星结构稳定的理论来解释, 这当然是欠妥的。后来长冈认为这种土星结构的原子模型具有合理性, 而不具有真实性。

#### 【卢瑟福和原子有核模型的提出】

卢瑟福 (Ernest Rutherford, 1871.8.30—1937.10.19) 是英国物理学家。他对放射性问题很有研究, 1899 年, 他发现铀放射出来的射线是多种多样的, 根据射线的不同性质, 分别命名为  $\alpha$  射线、 $\beta$  射线和  $\gamma$  射线。1902 年, 他和英国的年轻化学家合作发现一些放射性元素在放出射线后, 会逐渐减弱其放射性强度, 最后变成另一种元素。在此基础上, 他们提出了原子的自发蜕变理论。1908 年, 卢瑟福因“在元素蜕变及其放射化学方面的研究”而获诺贝尔化学奖。卢瑟福最著名的贡献是提出了原子有核模型。

1907 年, 卢瑟福去曼彻斯特大学工作, 在那里, 他物色到一位得力的助手——德国人盖革 (H. Geiger, 1882—1945), 他们一起研究  $\alpha$  射线的散射现象, 并一起开创了  $\alpha$  粒子闪烁计数法。由于  $\alpha$  散射和  $\alpha$  粒子被物质吸收的性质是大家共同关心的研究课题, 从 1908 年起盖革就有计划地进行散射现象的定量研究。1909 年 5 月, 盖革和来自新西兰的青年学生马斯顿 (E. Marsden, 1889 - 1970) 在做  $\alpha$  散射实验时, 发现轰击金属箔的  $\alpha$  粒子有一小部分改变了行进的方向, 甚至再度出现在入射面的同侧。这一实验

结果（即现在所说的 $\alpha$ 粒子的大角度散射）引起了很多人的关心。卢瑟福听到这一消息，就像听到一发炮弹从一张薄纸反弹回来那样感到不可思议。根据 J. 汤姆孙模型，利用多重散射理论计算，大角度散射的几率为  $10^{-3500}$  为  $10^{-4}$ ，平均 8000 个 $\alpha$ 粒子中有一个要大角度散射。

根据这一实验结果，卢瑟福意识到原子必定是一个仅通过一次碰撞就可把 $\alpha$ 粒子挡回去的强电场的“座”。这个“座”是什么？至少经过半年时间，卢瑟福终于想到原子中可能有一个核（“核”这个词是以后用的，而不是在 1911 年的论文中提出的）。据盖革回忆，当时卢瑟福激动地声称自己已经知道原子是什么样了，这是在 1911 年元旦的前后。1911 年 3 月，卢瑟福把这一结果摘要报告了曼彻斯特文学哲学学会，而较详细的报告则发表在同年 5 月的《哲学杂志》上。

在这一基础上，卢瑟福进行了理论研究工作，确定了散射角  $\theta$  和  $\alpha$  粒子入射路径与核的距离（即“瞄准距离” $p$ ）之间的关系。这一结果，由盖革和马斯顿在 1913 年通过实验加以验证。

由此建立了卢瑟福的原子有核模型，表明原子中央有一个带正电荷的核，而电子是围绕它运动的。

#### 【玻尔和原子模型】

玻尔（Niels Henrik David Bohr，1885.10.7—1962.11.18）是丹麦物理学家。他对物理学的主要贡献有：提出了氢原子结构和氢光谱理论，奠定了原子物理学的基础；提出了对应原理，对量子论和量子力学的发展起了重要作用；以他为首形成了量子力学的哥本哈根学派，对现代物理学的发展影响甚大。

1911 年，卢瑟福（E. Rutherford，1871—1937）提出了原子有核模型（参阅本书第 52 页）。但是，根据经典物理学理论，按照这一模型建立的原子都是不稳定的，因为电子不停地围绕原子核旋转，不停地向外辐射能量，使电子到原子核的距离不断减小，最后便落到原子核上。这一结论无法说明氢原子的稳定性。同时，氢原子不停地辐射能量，具有连续性，所以氢光谱应该是连续光谱，而不应该是分立的线光谱。这些矛盾困惑了当时不少的物理学家。

玻尔经过 2 年研究，以他独特的智慧解决了这一难题，推动了原子物理学的发展。首先他认为，普朗克（M. Planck，1858—1947）提出的量子概念（参阅本书第 44 页）是正确的，应该用量子概念来解释原子结构理论，普朗克常数  $h$  是一个很重要的常数，应把普朗克常数引入到原子结构的参数中去（例如表明原子半径的公式中包含了普朗克常数  $h$ ）。其次，根据大量实验结果，玻尔提出两大概念——定态和跃迁。他认为，电子在原子中的运动轨道不是任意的，只有当电子运动的动量矩等于  $h/(2\pi)$  的整数倍时，运动轨道才是稳定的，形成了定态。处于稳定轨道上的电子具有一定的能量，这些不连续的能量组成了原子的各个“能级”。他又认为，

电子只有在不同的能级之间的跃迁，才会发射或吸收光谱，可以计算出光的频率，即 $\tau_{nm} = |E_n - E_m| / h$ 。利用这两个假设，结合原子模型，成功地解释了氢原子的稳定性及其来谱线。由于这一贡献，他获得了 1922 年诺贝尔物理学奖。

#### 【德布罗意和物质波思想】

德布罗意 (Louis Victor de Broglie, 1892.8.15 - ) 是法国物理学家。他对物理学的主要贡献是提出了物质的波动概念。

1923 年 9 月 10 日，在法国科学院会议通报上发表了一篇题为“波和量子”的小文章，作者是 L. 德布罗意。文中提出了物质的波动的概念，当时几乎没有引起人们的注意。

20 世纪 20 年代，人们已经普遍认识到光是一种电磁波，但对能量是量子化的，能量的单位是  $h\nu$ ，光具有波粒二象性的特性等新观念，许多学者感到困惑，不解其意。就在这时，年轻的德布罗意却得到启发，将二象性推广到物质客体上去，在“波和量子”文章中阐述了自己的观点。首先，他使用了“简单的周期性现象”来谈论他的波动概念。他很快注意到他自己所谈论的波动具有一个超光速的相速度，并由此进一步断言，只能将他所提议的波，视作一种“与动点运动相缔合的假想的波，它不可能对应于能量的转移”，并且引进了“相”的概念。一年之后的博士论文中，谈及该波的物理意义时，作了保留，“我特意在相波和周期性现象的定义上留下了相当的含混之处，……因而现今的理论便可以视作一种物理内容尚未精密确定的构架，而不是一种已经完全完成、定义明确的教义。”关于波与粒子之间的联系，在“波和量子”一文中，L. 德布罗意先后使用了“相一致”、“相联系”这样的动词，并称粒子是一种内在的周期性现象的“中心”，波和粒子的关系是一种“共存”。至于“物质波”这一术语最初是由薛定谔 (E. Schrödinger, 1887—1961, 奥地利物理学家) 于 1927 年在现今流行意义上使用的。

L. 德布罗意在研究的基础上，提出了著名的公式  $v = \frac{E}{h}$ ， $\lambda = \frac{h}{p}$ ，它

成为建立波动力学的物理学基础。由于这一些研究成果，L. 德布罗意获得了 1929 年诺贝尔物理学奖。

#### 【查德威克和中子的发现】

查德威克 (Sir James Chadwick, 1891.10.20—1974.7.24) 是英国实验物理学家。他对物理学的最大贡献是发现了中子。

1919 年发现质子以后，物理学家们就在议论原子核是由哪些粒子组成的，当时也提出了各种假说，例如原子核是由质子和电子组成的等等，但都无法完善地解释实验的结果。1920 年，卢瑟福 (E. Rutherford, 1871—1937) 在一次通俗讲演中，从各种实验结果提出，是否存在一种轻重与质子差不多、不带电荷呈中性的粒子，由这种粒子和质子组成原子核。该预

言当时也没有被人所注意。

事过 10 年，在德国发现用氦核轰击铍的实验过程中，会产生一种穿透性很强的辐射，称之为铍辐射。法国物理学家约里奥·居里夫妇（F. Joliot-Curie, 1900—1958，法国物理学家皮埃尔·居里夫妇的女婿）知道这一结果后，立即重复了这一实验，得到同样的结果。同时利用铍辐射的射线去轰击石蜡或含氢物质时，能观测到后者放射出一种强质子流的现象。大家思考这种铍辐射到底是什么，当时普遍认为，它是一种  $\alpha$  辐射。但是， $\alpha$  辐射要能打出这样的强质子流，必须具有很高的能量，这在当时是不可思议的。

德国和法国科学家对此问题研究结果的信息传到了英国，引起了查德威克的极大兴趣，因为他也在研究同样的课题，他也重复了约里奥·居里夫妇的实验，得到了同样的结果。这时他敏锐地觉察到这不是  $\alpha$  辐射，同时想起 10 多年前卢瑟福的预言，于是明确提出这种辐射不是  $\alpha$  辐射，应该是中子辐射。通过一系列的实验研究，终于证实了中子的存在。于是，1932 年查德威克在《自然》杂志上发表了专文“中子可能存在”。中子发现以后，德国物理学家海森堡（W.K. Heisenberg, 1901—1976）和前苏联物理学家伊万宁柯（И. В. Иванов, 1904 - ）分别同时提出了原子核是由质子和中子组成的核结构模型，从此原子核物理学研究进入到一个新阶段。

由于发现中子，查德威克获得了 1935 年诺贝尔物理学奖。

#### 【基本粒子结构的复合粒子模型】

90 多年前，即 1897 年，人们发现了第一个基本粒子——电子（参阅本书第 33 页）。从这以后，在宇宙射线中，在加速器的实验中，陆续发现了许多基本粒子，如 1919 年发现质子，1923 年证实了光子的存在，1931 年在宇宙线中发现存在正电子（即电子的反粒子），1932 年在人工核反应中发现中子（参阅本书第 54 页），1936 年首次在宇宙射线中发现了  $\mu$  子，1947 年确认了  $\mu$  子的存在等等。到 40 年代末、50 年代初，随着生产力水平的发展，技术力量的增强，实验设备的充实和完善，实验能力大大地提高，1947 年在宇宙线中发现  $\pi$  介子，同年又发现了第一个超子—— $\Sigma$  超子，1949 年发现了  $K$  介子，1951 年后不断地发现一批超子，如  $\Lambda$  超子， $\Xi$  超子，同时证实了中微子  $\nu$  的存在。由于  $K$  介子和超子的性质相当奇特，特，当时就把它们统称为“奇异粒子”。60 年代、70 年代，人们又发现  $J/\psi$  粒子，重轻子  $\tau$  和  $\chi$  粒子等。到现在为止，人们已经发现了 300 多种基本粒子。这部分粒子中，大部分是平均寿命极短的（约  $10^{-23}$  秒）的“共振态”粒子。参予强相互作用的粒子（统称为“强子”）占了很大一部分，约有 200 多种。对这些粒子的性质、结构和它们的运动规律的研究，正是人们当前探讨的重要前沿课题之一。

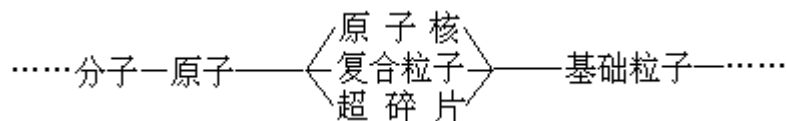
当基本粒子的先驱——电子、质子、中子来到人类知识宝库时，人们

对它们并不理解，而认为它们是组成万物的“基石”，似乎是“始原物质”了，所以称之为“基本粒子”。但是随着时间的流逝，人们的眼界大大扩展，认识到基本粒子并不“基本”，还有其复杂的内部结构。今天，强子具有内部结构，这是绝大多数高能物理学家一致的看法。而轻子（即参与弱相互作用的粒子的统称）是否有内部结构？具有怎样的结构？这些问题也已提到议事日程上来了。人们有这样的认识，是以半个多世纪、特别是近 30 年的历史作为代价换来的。回顾历史，吸取经验教训，是一件很有意义的工作。

40 年代以前，人们普遍认为基本粒子是一个“点”，同时又是一个“数学点”，也就是说，基本粒子是只占空间位置、而没有大小的客体。既然没有大小，哪来的内部结构呢？！以这样的观念出发，建立了一套数学处理方法，这就是量子电动力学和量子场论。从 40 年代末期开始，一些有胆识的科学家，开始怀疑这个观念。先后提出了不少新观念和各种结构模型。

1949 年，费米（E. Fermi，1901—1954，意大利物理学家，20 世纪著名的理论物理学家和实验物理学家）和杨振宁（1922 - ）联合发表了一篇短文，使人们的认识走到了复合粒子观念的阶段，否定了基本粒子是个“点”的观念。短文中指出，介子是由核子（质子和中子的统称）和反核子组成，提出了介子是核子-反核子束缚态的观念。费米曾经说过，基本粒子的“基本的”这个词，并非表示粒子的性质，而是表示人们对它们的认识水平。

事过 6 年，日本的物理学家坂田昌一（Sakata，1911—1970）自觉地运用恩格斯的关于分子、原子不过是物质分割的无限系列中的各个关节点的思想和列宁的“电子和原子一样，也是不可穷尽”的思想，发展了费米和杨振宁的思想，于 1956 年发表论文，进一步阐述了复合粒子的观念，提出了重子-介子复合模型（即坂田模型）。模型的主导思想认为，物质层次应该是



这样，坂田认为质子、中子、超子（和它们的反粒子）是属于一个层次的，称为基础粒子，而其他的重子和介子（不包括后来发现的介子和超子）是复合粒子，由基础粒子复合而成。在此基础上，提出了下列的复合图象：

- $\pi$ 介子： $p\bar{n}$ ， $n\bar{p}$ 与 $p\bar{p}$ ， $n\bar{n}$ ，即 $JNN$
- $k$ 介子： $p\Lambda$ ， $n\Lambda$ ，即 $JNA$
- $\Sigma$ 超子： $p\bar{n}\Lambda$ ， $n\bar{n}\Lambda$ 与 $p\bar{p}\Lambda$ ， $n\bar{p}\Lambda$ ，即 $JNNA$
- $\Xi$ 超子： $\bar{p}\Lambda\Lambda$ ， $\bar{n}\Lambda\Lambda$ ，即 $JN\Lambda\Lambda$

这种模型后来称为坂田模型，或简称为（N）图象。从这一图象可以清楚地看出，它在费米 - 杨振宁思想的基础上又向前发展了，因为它包括 k 介

子和超子。介子是两体的复合体，超子则是三体的复合体。

这一模型的提出，无疑是对基本粒子是个“点”的观念的否定，对当时来说，是认识上的一次飞跃，是一次革命性的进展。这一模型能解释一些实验事实，对一些现象能作出尝试性的理论解释，特别是对奇异粒子的奇异量子数有一个唯象性的解释，即包含超子的数目。

时过不久，日本的一些学者，在坂田模型的基础上，根据

$$\nu \leftrightarrow p, e^- \leftrightarrow n, \mu^- \leftrightarrow \Lambda$$

对称性，提出了名古屋模型，想把结构问题的研究范围从强子扩展出去，找到基础粒子与轻子之间的对应关系。认为  $p$ 、 $n$ 、 $\Lambda$  就是由  $\nu$ 、 $e^-$ 、 $\mu^-$  加上  $B^+$  物质组成，即

$$p = (\nu B^+), n = (e^- B^+), \Lambda = (\mu^- B^+).$$

当时称  $\nu$ 、 $e^-$ 、 $\mu^-$  为基底粒子（当时认为中微子只有一种，第二种中微子的发现是 60 年代的事，第三类中微子的发现是 70 年代的事）， $B^+$  物质的性质有待研究。同时这一模型认为，如果假定弱相互作用的根源是轻子的话，那么强相互作用的根源便由  $B^+$  物质来承担。过不久，日本学者又提出了中微子统一模型，认为存在  $\varepsilon^-$  电荷，因它与中微子结合的方式不同，便组成了  $e^-$  和  $\mu^-$ 。

坂田等人提出的复合粒子模型，当时对西方的影响并不大，但对前苏联的影响却很大。有一批前苏联物理学家对此作了各种研究，也提出过不少模型和图象。从各种图象来看，虽然挑选哪个粒子作基础粒子是不相同的，但有一个普遍的现象，就是挑选一些比较重的粒子作为基础粒子。这就说明，大家预感到组成基本粒子的微观客体之间的结合能是比较大的。这一朴实的思想，现在看来仍然是有些道理的。

#### 【盖尔曼的夸克模型和中国的层子模型】

从坂田模型看来（参阅本书第 55 页），基础粒子之间具有一定的对称性。 $p$  与  $n$  之间，质量几乎没有什么差别（只差 0.13%），所以这两个粒子，在同位旋空间中是对称的。由它们组成的复合粒子，当  $p$  与  $n$  互换时，所得到的复合粒子，其质量和性质也没有什么变化。例如  $\pi^+$  介子由  $p$ 、 $\bar{n}$  组成，当  $p$ 、 $n$  互换后，得  $n\bar{p}$ ，便是  $\pi^-$  介子，这两个介子在质量、自旋、寿命等方面都是相同的，仅是带电性质不同，表明在同位旋空间中是对称的。如果扩大一下，忽略  $p$ 、 $n$  与  $\Lambda$  之间的质量差，按上述方法分析并推广，也可得到一种对称性，即么旋对称性。如把复合粒子中的  $p$ 、 $n$  与  $\Lambda$  互换，组成的粒子之间也应具备上述相似的性质。这样，由两个基础粒子组成的介子复合体，与  $\Lambda$  介子性质相似的应该有 9 种，除了 3 个  $\pi$  介子、4 个  $k$  介子以外，还应有 2 个中性介子，这 9 个粒子组成一个八重态和一个正单态。在以后的实验中，果真发现了这 2 个中性介子。同样，对重子  $N$ 、 $\Sigma$ 、 $\Xi$  也应形成八重态，类似于赝标量介子的八重态。以后又发现应有自旋为 3/2 的粒子组成十重态。根据对称性原则，十重态中 9 个粒





工作者自觉地学习、运用辩证唯物主义的思想，经过几年的努力，于 1966 年提出了强子结构的层子模型，表明物质结构是由无限系列的层次构成，而人们对它的认识也可以无限地深入下去。强子结构的层子模型认为，强子是物质结构无限层次中的一个层次，它具有内部结构，可以分割，所以称组成强子的亚粒子为“层子”。并认为，假如层子形成一个三重态的话，那么这 3 个层子就具有分数电荷的性质，由此可以解释一系列的介子和重子的电磁性质、电磁相互作用过程和弱相互作用过程，除了少数计算结果和实验有矛盾以外，大部分都符合得很好。假如层子有 9 个的话，它们仍然保持着整数电荷的性质。

层子模型的提出，除了运用正确的思想指导以外，还根据不少实验所提供的结果和线索，也就是说，它可以从实验中找到根据。例如，当时已经测得质子的电磁半径为  $0.71 \times 10^{-13}$  介子的电磁半径为  $0.63 \times 10^{-13}$  充分表明这些粒子虽然很小，但毕竟不是一个“数学点”，它们还是有大小的。又如，若把当时已经发现的强子，将其质量按一定的规律排成“质量谱”，它与原子光谱、原子核光谱很相似。大家知道，原子光谱和原子核光谱为研究原子结构和原子核结构提供了一个重要的依据，由此推知，强子的“质量谱”也将为强子具有内部结构提供重要的线索。再如，高能电子和质子进行深度非弹性散射时，电子并不是碰在一个实心体上，而是碰在一些间断的点上，这充分表明质子内部有空隙，有空隙就意味着它有内部结构。

我国提出的层子模型，当层子具有三重态时，它与夸克模型很相似，但是层子模型有一整套的数学计算，并考虑到粒子内部的动力学机制。当时曾预言，层子的质量至少比核子质量大 10 倍以上，所以认为 3 个层子组成的粒子，它的结合能很大（将在 30Gev 以上），比原子核中的核子平均结合能大 1000 倍以上。由此，曾预言可能存在一种“超强相互作用”。但是后来的实验结果表明，层子（或夸克）的质量不那么大，它们之间的相互作用也不一定很强。

夸克模型（或层子模型）提出以后，大家很自然地要去证实夸克或层子的存在，物理学工作者就从实验或宇宙射线中寻找处于自由状态的夸克或层子。经过 20 多年努力，至今还未能证实自由态的夸克或层子的存在。随着实验新结果的不断获得，理论工作也向纵深发展，到现在为止，夸克（或层子）的数目已由 3 个增加至 6 个，出现了 c 夸克（c 层子）、b 夸克（b 层子）和 t 夸克（t 层子），也提出了新的模型来探讨基本粒子的结构问题。

## 教育理论·教学方法

### (一) 教育理论知识简介

#### 一、国外有影响的教育论思想

##### 【夸美纽斯的教育理论】

夸美纽斯(1592—1670)，捷克人。他总结了当时新兴资产阶级的教育经验，从而为近代教育理论奠定了基础，他的教育思想集中反映在其代表作《大教学论》中，该著作的问世，才出现了独立的教育学，因此，他被尊崇为教育史上的“哥白尼”。

他的一生正处在阶级矛盾和思想斗争非常激烈的时代。他从新兴资产阶级的利益出发，反对封建贵族垄断教育的特权，提出了“泛智”的思想，主张“人人均应受教育”，“人人均需学习一切”，“把一切事物教给一切人”。他提出的一系列的教育理论和教育主张，充分反映了文艺复兴时期批判封建主义旧文化、发展资本主义新文化的时代特点。夸美纽斯教学论的基本点：

1. 出了学年制和班级授课制。针对中世纪学校组织十分松散，提出学校工作实行学年制，学校要在一年的同一时间开学，同时放假，每年招生一次。学校工作要按年、月、日有计划地进行，教学科目要根据儿童认识发展顺序合理安排，学生在规定的时间内都要达到规定的学习标准，学年终通过考试同时升级。针对中世纪学校个别施教的传统作法，他主张班级教学制，指出班级授课不仅可以提高教学效率，而且能促使儿童互相激励、互相帮助，产生良好的学习效果。这是教育史上的重大进步，符合近代学校教育、特别是普及教育发展的需要，为后人广泛采用。

2. 提出了一系列教学原则。

(1) 直观原则：认为“事物是本体，文字只是衣着”。他把“一切知识都是从感官的感知开始的”作为教学的基础，要求“在可能的范围内，一切事物都应该尽量地放到感官的跟前”，因为“只有依据感觉所提供的种种证据，才能获得关于各种实际事物的可靠认识”。夸美纽斯要求，教学应从观察实际事物开始，在不能进行直接观察的时候，应利用图片或模型代替实物；对于自然科学知识的教学，要重视参观、实验等活动。教学用书要配有生动的插图。他首次对直观教学进行了理论论证，并详细说明运用直观原则进行教学的具体方法。

(2) 循序渐进原则：认为自然界的发展和人类许多活动的进行，都是井然有序的。因而要求传授给学生的知识应该是系统的，教学应该循序渐进。在教学内容上，要妥当地安排教学科目的顺序，每一门科目则要仔细分成阶段，务使先学的能为后学的扫清道路。在教材安排上，要求做到由

近及远，由易到难，由简到繁，由已知到未知，由具体到抽象等等。在教学时间安排上，也要仔细划分好，务使每年、月、日、时都有它指定的工作。此外，还要求学生在学习知识的过程中，首先从感官的活动开始进行观察；在理解的基础上再去记忆；最后才是实际运用的练习。

(3)启发学习愿望与主动性原则：认为“知识的求得在于求知的志愿，这是不能够强迫的”。“人的天性是渴求知识的，应采取一切可能的方法来激发学生的求知愿望”。他强调要选择实际有用的知识作为教学内容，而且必须向学生说明它的益处，认为这是激发学生学习愿望和积极性的重要基础。而且“学校本身应当是一个快意的场所，校内、校外看去都应当具有吸引的力量”。

(4)教学要彻底的原则：夸美纽斯以牢固地掌握知识并达到随时可以应用的程度作为衡量教学是否彻底的标准。他主张多做练习和经常复习，认为这不仅可以磨练记忆力，巩固所学的知识，而且有益于掌握技能。

3. 重视教学用书。教学用书包括供学生使用的教科书和帮助教师进行工作的指导书。为学生编写的教科书，应当简单明晰，使他们在必要时可以不依靠教师，自己去学习功课。为了达到这一要求，最好使用对话的形式，他认为应根据学生不同年龄阶段的发展情况，分别编写初级书、入门书、升堂书和聚珍书四种由浅入深的百科全书式的读本。

#### 【赫尔巴特的教育理论】

赫尔巴特(1776—1841)，德国著名的教育家。他所处的时代是德国仍处于分散、落后的封建君主专制状态，因而在赫尔巴特的教育思想中，明显地表现出维护封建贵族利益，其哲学、心理学和伦理学都是从维持现存社会制度的最基本的观点中引伸出来的。但他在教学理论方面有比较突出的创见。

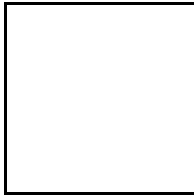
赫尔巴特教学论的基本点：

1. 明确提出了教育性的教学原则，认为任何教学过程都必须具有教育作用，不可能有无教学的教育，也不可能有无教育的教学。他说：“教学的最高的、最后的目的，包括在德行这一概念中”。

2. 提出教学必须激发学生牢固掌握知识和扩充知识的兴趣。他十分重视兴趣，并把兴趣的多面性看成教学的基础，多方面的兴趣，有赖于学习多种学科，掌握各方面的知识而形成。赫尔巴特把兴趣分为六种、两大类：经验兴趣，思辨兴趣，审美兴趣，同情兴趣，社会兴趣和宗教兴趣。前三种被归为一类，叫自然的兴趣；后三种被归为另一类，叫历史的兴趣。经验兴趣，表现为观察自然的愿望；根据经验兴趣，应设有自然、物理、化学、地理等学科。思辨兴趣，表现为喜欢思考问题；根据思辨兴趣，应设有数学、逻辑、文法等学科。审美兴趣，体现对各种现象都愿进行艺术评价；根据审美兴趣，应设有文学、唱歌、图画等学科。同情兴趣，指愿意跟一定范围的人接触；根据同情兴趣，应设有外国语、本国语等学科。社

会兴趣，则愿意与社会上较广泛的人接触以尽公民职责；根据社会兴趣，应设有历史、政治、法律等学科。宗教兴趣，是对所信奉教派的重视；根据宗教兴趣，应设有神学。他还把六种兴趣都分为四个阶段，即注意、期待、探求和行动。他认为在教学过程中，学生掌握知识必须通过“钻研”和“理解”两个环节。而这两个环节不论在心理活动的静态和动态都能够实现。

3. 提出阶段教学的理论。赫尔巴特把教学程序分成四个阶段：明了、联想、系统和方法。在教学过程中教学各阶段与掌握知识环节、观念活动状态、兴趣阶段及教学方法等构成如下相互配合的关系：



据此，赫尔巴特确定教学阶段的具体步骤如下：

明了：这一阶段学生的观念活动状态属于静态的钻研，为了学习和掌握新的教材，必须集中注意力，深入研究学习的材料。从兴趣特征看，则为注意阶段。这时要求教师尽可能简练、清楚、明白地讲解新教材，用讲解、举例或演示等进行教学。

联想：这一阶段学生的观念活动状态属于动态的钻研，要求学生集中注意力深入进行思考，把上一阶段所获得的观念与旧有观念联系起来，即要在旧观念的基础上形成新观念。从兴趣特征看，则为期待阶段。这时应该采用分析方法进行教学。

系统：进入对教学内容的理解阶段，学生观念活动状态属于静态的理解。从兴趣特征看，则为探求阶段。这时要求寻找确切的定义和结论，在教学方法上，宜采用综合法。

方法：这一阶段是使学生把系统化了的的知识运用于实际，从学生的观念活动状态看，已进入了动态的理解。从兴趣特征看，则为行动阶段。这时要求学生自己去做作业，在教学方法上，则采用独立完成各种练习、演算等。

赫尔巴特的阶段教学论，后来被他的后继者加以发展，改变成为五个阶段，即预备、提示、联系、总结和应用。

19世纪后半期，赫尔巴特的阶段教学曾广为流传，对欧美及世界各国都有很大影响。20世纪初，五段教学法流传到我国，在旧中国曾风行一时，对我国教育有较大影响。

#### 【杜威的教育理论】

杜威（1859—1952）是美国实用主义的资产阶级教育家。他所处的19世纪是一个“科学世纪”，最伟大的成就是建立进化论和电磁学。19世纪末，教育领域里，学校制度、课程、教学方法还是沿袭欧洲的传统，形式

主义仍占主要地位，特别是传统教育思想阻碍着美国教育适应新形势的要求。杜威就是在这种历史背景下，提出了实用主义教育观点。

杜威教学论的主要观点：

1. 认为课程内容不能脱离社会生活及其影响，而书本知识却是脱离现实的，为此，提出了儿童现在的生活经验是课程的主要内容的课程理论。主张建立社会雏形的学校环境，在这个特殊的社会雏形的环境中，学生的经验得到不断的改造和改组，教材应是生活的联系中心，它不能离开学生的社会生活实际而提出。

2. 提出实用主义教学过程的理论。教学过程是一个社会过程，一个参与生活的过程，在教学过程中，学生是起点，中心是教学要达到的目标。教材不能从外面灌输进去，要通过其经验活动去掌握。教学中强调培养学生的良好思维习惯。思维起于疑难，是其教学过程的理论基础。而疑难产生于活动，在活动中提出疑难，然后通过科学、合理的假设，小心、致密的求证去解决。并提出了一个教学过程模式：第一，创造情境，学生要有一个真实的、有经验感的情境，要有一个对活动本身感到兴趣的连续的活动。第二，引起动机，在这个情境内部产生一个真实的问题，作为思维的刺激物。第三，确定目标，通过占有知识资料，从事必要的观察，来对付这个问题。第四，实行计划，必须一步一步地展开他所想出的解决问题的方法。第五，评价成果，要有机会通过应用来检验他的想法，并证明是否有效。

3. 提出的教学原则是：第一，教学必须注重学生的主动性，注意学生的活动。第二，注意表象教学。学生对一个事物的认识在很大程度上依赖于他对那个事物所形成的表象，因此教师要经常注意学生是否在形成适当的表象，以获得正确的认识 and 知识。第三，要注意学生的兴趣。对学生的兴趣不要压抑，也不能放任，压抑兴趣会减弱好奇性和灵敏性，而放任兴趣则等于以暂时的东西代替永久的东西。第四，要注意情绪在教学中的作用。

杜威的教学思想在美国 30 年代占有统治地位，对我国的教育有较大的影响。

#### 【凯洛夫的教学论思想】

凯洛夫（1883—1978），前苏联有影响的教育家，是四五十年代前苏联教育学的代表人物之一。他的教学论思想产生于三四十年代。20 年代，前苏联出现了极左的教育思潮，片面强调劳动教育，没有给学生充分的普通教育知识，对培养有足够读写能力、能很好掌握科学基本知识的学生升入中等技术学校和高等学校的这个任务，执行得不能令人满意。学校没有很好地完成培养学生成为理论与实践结合和掌握技术的全面发展的社会主义建设者。在这种背景下，凯洛夫提出了一整套较完整的教学论思想。

凯洛夫教学论的主要内容：

1. 对教学过程本质的看法。他认为学生掌握知识的过程和人类在历史发展中认识世界的过程具有共同点，因此，教学过程应在科学认识论的指导下进行。同时，他又认为，教学不是也不可能是与科学的认识过程完全一致的过程。教学过程是使学生领受既知的、为人类所获得的真理。就是说，学生的任务主要是自觉地、牢固地掌握和利用已为前人所发现和整理的知识，并不一定非要发现新真理不可。因此中小學生，主要是在教师指导下，采取各种途径，迅速地获得大量知识成果，避免走弯路、犯错误。

2. 教学的基本组织形式。学校教学工作主要是在课堂上对组成班级的学生进行，上课是教学工作的基本组织形式。只有通过这种形式，才能保证教学和教育任务的完成，才能逐步地给学生以多方面的知识，提高学生的知识质量，培养学生兴趣，改善纪律状况，发展智力，树立正确的世界观等等。

3. 指出教师在教育和教学中的主导作用。特别强调“在学校的一切教学工作中，绝对保证教师的领导作用”。他认为教学过程尽管是师生的双边活动，但师生的作用并不是均等的，教师的讲授应起主导作用。因为教学的内容、方法、组织实施，除了经过教师，别无他法。教学过程正是教师领导学生掌握知识技能的过程。学生的知识能否得到充实和巩固，学生学习的自觉性能否养成，首先和大部分依赖于教师。

4. 重视教科书的作用。认为教科书是学生获得知识的主要来源，必须稳定各科教科书。学校的主要工作是教学，教学内容决定学校工作的性质，而教学内容具体体现于教学计划、教学大纲和教科书中。教科书应包含各该学科中最重要、最根本的内容，而不是某门学科的全部；教科书只能编入确定不移的、颠扑不破的原理，而不是科学上尚无定论或正在争论的意见。

凯洛夫的教学思想的核心是强调教学中的三中心，即课堂为中心，教师为中心，课本为中心。针对当时教育中的问题，对揭示课堂教学的规律性，提高普通教育的质量，有一定的积极作用；对我国中小学教育的发展也产生了重大影响。但近一、二十年来，世界教育形式的发展和观念的变化，凯洛夫的教学论思想也暴露出不少问题，因而，在新的历史条件下，对凯洛夫的教学思想进行深入研究，做出新的评价是十分必要和自然的。

#### 【巴班斯基的教学论思想】

巴班斯基（1926—1987），前苏联当代著名的教育家、教学论专家。从本世纪60年代中期开始，由于进行了为期10年的教学内容改革，学校工作中出现了学生负担过重的普遍现象，师生同处于精神紧张状态，相对地对劳动教育有所放松，结果造成中学教育与劳动就业在一定程度上的脱节。为了克服这一矛盾，在70年代后期，一方面重新修订教学大纲，减轻学生负担；一方面则竭力强调以综合性观点对待教育工作，在抓智育的同

时，强调保证政治思想教育、德育教育和劳动教育的统一性。正是在这个背景下，巴班斯基总结了实际教育试验的经验，提出了一整套最优化的教学理论、措施和建议，得到了比较广泛的应用。

巴班斯基的基本教学论观点：

1. 用整体性观点考查教学内容，分析它的结构成份和活动环节，并按结构成份的序列，建立一套较完整的教学原则体系。教学过程作为一个系统，有6个基本成份，即目的成份、激发-动机成份、教学内容成份、操作-活动成份、检查-调节成份、评定-结果成份。这6种成份构成一定的序列性，以系统形式描述教学过程，有助于全面地、完整地对待教学过程结构的选择。为了优选，就必须整体而有序地考虑教学过程的诸成份及其相互联系，力求使全过程及其每一成份都能发挥最优的功能。

2. 用联系性观点分析研究教学过程的联系，揭示过程发展的规律性。他提出教学过程具有下列规律性：（1）教学过程制约于更广泛的社会过程和社会主义社会的需要，特别是对能够积极地参加生产过程、科学过程、社会活动过程和文化过程的全面、和谐地发展的人的需要。（2）教学过程与完整的教导过程中所包含的教养、教育和发展的过程相联系。（3）教学过程依存于学生实际的学习可能性。（4）教学过程依存于得以进行的外部条件。（5）在完整的教学过程中，教的过程和学的过程合乎规律地相互联系。（6）教学内容取决于教学任务，任务本身反映了社会的需要、科学发展的水平和逻辑、实际的学习可能性和教学的外部条件。（7）激发、组织和检查学习活动的目的和方法，取决于教学的目的、任务和内容。（8）教学的组织形式取决于教学任务、内容和方法。（9）在相应条件下，教学过程所有成份的相互联系，保证教学有巩固、明确和实效的结果。把握住这些基本规律就可以保证教学过程取得最优效果。

3. 用综合性观点处理教学方法和形式问题，以期教学效果最优化。巴班斯基把教学方法分为3大组，每组都有几个层次，形成一个教学论的方法体系。第一组，组织和自我组织学习认识活动的方法。它按传递和接受教学信息分，有口述法、直观法、实际操作法；按逻辑分，有归纳法、演绎法、分析法和综合法；按掌握知识时思维的独立程度分，有在教师指导下的学习活动方法和学生的独立工作方法。第二组，激发学习和形成学习动机的方法（略）。第三组，教学中的检查和自我检查方法（略）。关于教学形式，用综合性观点考察教学组织形式，在确认班级授课制的实效的前提下，提出全班教学、分组教学和个别教学三种组织形式。各种形式各有其优缺点，因而在每一具体场合都必须考虑其最优结合。

巴班斯基的教学理论当时在前苏联还只是处于不断再实践和推广阶段，其理论也在不断校正、修改和充实中，但已经看到了它的初步效果。

#### 【赞可夫的教学思想】

赞可夫（1901—1977），前苏联著名的教育学、心理学、教学论专家，

他提出了教学与发展的理论。50年代中期，前苏联总结了几十年教育科研中出现的教育学中无儿童（由于30年代开展了对资产阶级实用主义儿童学——即一切以儿童为中心——的批判，造成了长期忽视教育对象的研究）及教育中教师注重知识的传授，而忽视能力的培养和学生习惯于死记硬背、创造性差等弊端，要求建立一种新的教学体系，以揭示教学与发展的相互关系。赞可夫教学理论的基本思想就是以最好的教学效果（掌握知识）来促进学生的发展（能力的发展），并提出发展所表现的3个主要方面：

（1）观察力：观察是认识世界的重要途径，一个人对周围世界视而不见，他的精神世界就很贫乏。观察力是一个人，特别是一个研究自然科学的人，不可缺少的品质。培养观察力也就启发了求知欲。观察越精细，越能提出更多的“为什么”。他对后生长期研究的结果发现，其普遍特点之一就是观察能力薄弱，因而缺乏应有的求知欲。（2）思维能力：主张要始终注意发展学生的逻辑思维，不仅要培养学生分析、综合、归纳、推理的能力，还要特别注意培养学生思维的灵活性和创造性，要使学生在学习某一事物时既能坚持从一个角度看问题，又能在必要时改变看问题的角度，或者同时从好几个角度看问题。他做了大量的实验发现：“知识”与“发展”之间有某种剪刀差，因此要有目的、有意识地在学生“发展”上下功夫；培养思维能力是一项复杂的多方面的任务，科技时代对人的智力才能要求更高了，因此各科都要利用一切可能发展学生的思维能力。（3）实际操作能力：指出实际操作能力是学生发展的重要因素，劳动课有独特的促进学生发展的可能性。

他根据教学与发展的理论提出了新的教学论5原则。

（1）以高难度进行教学的原则。这是教学体系中起决定性作用的因素。他认为当前学生的智力情况与40年前大不相同，教学内容必须更新，使教学在高难度水平上进行。他批评传统教学内容的原始性，简单贫乏而学习过程又拖得太长，不能引导学生进行创造性的学习。七岁儿童入学时已经有了相当的知识储备，如果不能使他碰到足够的困难和问题，就没有学习的积极性。他以心理学家维果茨基的心理理论为依据，认为学生的认识有最近发展区（经过努力才能达到的认识程度）和现有发展区，教学应该立足于最近发展区，而不能停留在现有发展区。他说：“教学不应该把眼睛看着儿童发展的昨天，而应该看着儿童发展的明天。”“只有走在发展前头的教学才是好的教学。”

（2）以高速度进行教学的原则。认为现行教学中单调的重复太多，教师讲得过多过细，有不少繁琐哲学和形式主义。主张以知识的广度来达到知识的深度，强调“知新温故”。高速度并不是开快车，要丰富学生的智慧，在学生观察、思考、争论时不要吝惜时间。

（3）理论知识起主导作用的原则。认为在认识活动中感性与理性是交织在一起的，不是分段的，总是相互作用的，不能片面强调哪一方面。过



去总是强调由感性到理性，往往使学生的观察停留在表面的孤立的现象上。过去强调由近及远、由易到难、由简单到复杂，就会影响学生思维的发展，应该运用概念，发挥理论的指导作用，学生往往对不是身边的东西更感兴趣，不能总是强调摸、看、听的原始感观。

(4) 使学生理解学习过程的原则。认为过去强调的自觉性原则只强调学生自觉地去理解教材、掌握知识，着眼于学习活动的外部因素。而这一原则强调学习过程本身，着眼于学习活动的内在因素。学生懂得了学习过程，就可以进行创造性的思维。

(5) 使全班学生都得到发展的原则。高难度、高速度并不是为了培养尖子，甩下一大批学生。提出高难度的理论根据不是依据少数智能特殊的学生，而是根据绝大多数一般学生的实际。他很注意研究后进生，认为后进生学习上落后的教学原因(当然还有众多的其他原因，特别是社会原因)是：感情、意志、情绪上多数有“自我中心主义”，不服从别人的要求，不管别人的利益，常常与人闹矛盾，自尊心强但又有沉重的思想负担；没有学习愿望，求知欲低，对学习、学校、教师常有反感；观察力薄弱，语言表达无条理，抽象思维能力差。他主张要尽量减轻后进生的思想负担，减少分数带来的外界压力；要利用一切机会引导他观察，从观察中培养求知欲；要吸引他参加喜爱的课外小组活动，发挥他的特长，逐步克服自我中心主义。

#### 【布鲁纳的课程结构论与发现教学法】

布鲁纳(1915—)，美国著名的认知派心理学家。1958年美国国会通过“国防教育法”，大量拨款改革中小学的学科设置和教学方法。1959年美国科学院召开了中小学教学讨论会，35名著名的科学家参加了会议，布鲁纳是大会主席，在会上正式提出课程结构论和发现教学法。其主要理论是就教什么，什么时候教，怎样教提出了新见解。

1. 教什么——认为课程的中心是学习学科的基本结构。如何使学生在有限的时间内学到的东西受益终生？他主张“无论大中小学校的什么学科，首先要学生学习这门学科的基本结构”，“与其说是使学生掌握学科的基本事实和技巧，不如说是教授和学习基本结构”。所谓基本结构就是指知识和学科中具有普遍适用性的基本概念、基本原理和规律，包括研究本门学科的基本态度和方法。这些东西应该成为各学科课程的中心，也就是教学的中心。强调基本结构的理由是：

(1) 有助于理解学科知识。因为掌握了基本概念和原理就可以理解许多特殊现象。

(2) 有助于教材的记忆。详细的资料是靠简化的表达方式保存在记忆中，简化的表达方式具有再生的特性(公式、常数、图表、图象)，“高明的理论不仅是现在用以理解现象的工具，而且也是明天回忆那个现象的工具”。

(3) 有助于知识的迁移。传统教学思想强调的是技能的迁移，布鲁纳强调的是一般的迁移，即基本原理和方法的迁移。基本原理可以缩小高级知识与低级知识之间的间隙，掌握了知识结构，迁移就较容易。

(4) 有助于激发兴趣和引起思维。学习的最好刺激就是兴趣，而不是外来的目标（奖励、分数……）。兴趣是内在的，掌握了这门学科的结构，能在变化的情况中运用它，就可引起兴趣。他特别强调“原理和态度的迁移应该是教学过程的核心”。原理指具有广泛而又有力的适用性的东西。态度指研究这门学科的基本观点与方法，即把本学科的科学方法的基本程序教给学生。他认为“如果你理解了知识的结构，那么这种理解会使你可以独立前进，你无须为了知道各事物的属性而与每事每物打交道，只要掌握某些深奥原理，便可推断出所要知道的个别事物，这是解决课程论实际问题的一个巧妙的‘策略’。”他还认为“每个认识活动也都有一定的认识结构。人类认识在主观上的结构叫图式。在认识过程中个体把客观事物纳入主体的图式之中叫同化过程。同化后使图式发生量的变化。与主观图式不符的不能同化，为此就要调整原有图式创造新图式，这叫异化过程。异化后使图式发生质的变化。通过同化和异化作用，才能使认识达到平衡。

2. 什么时候教——提出了一个大胆的假设：“任何学科的基本原理，都可以用某种形式教给任何年龄的任何人”，这就是早期教育的可能性。其根据是：

(1) 生理学上的根据：大脑发育的早期成熟是早期教育的物质基础。研究表明一个人出生后第五个月到第十个月之间是大脑发育的关键时期，到第二年末（满两周岁），大脑已基本完成了它的生理成长过程。

(2) 心理学的根据：人在发展的各个阶段（包括儿童）都有他自己观察世界和解释世界的独特方式。如果以 17 岁时的智力为 100%，则 4 岁时为 50%，8 岁时为 80%。

(3) 从学习行为的过程来看：学习任何一门学科都有一系列的学习单元。他认为人接受知识的程度，除和年龄有关外，在很大程度上要随文化教育的条件不同而加快或推迟，甚至停滞。在教学中向学生提出挑战性但又合适的课题可以引导智慧的发展。因此，他认为教科书和教师的一件大事是“在于发现那些学生既能解答得了，又能使之前进的难易适当的适中问题。”他认为小学生与物理学家的认识都属于同一类的活动，其间的差别仅在程度而不在性质。因此他认为一门课程在它的教学进展中，应反复回到那些基本概念上，以这些概念为基础，直至学生掌握与这些概念相伴随的完全形式的体系为止。他认为学科内容安排上应该是螺旋式的。

综合教什么和什么时候教，他在课程设计上提出了两条原则：第一，各门学科都要给予那些和基础课有关的普遍的和强有力的概念和态度以中心地位。第二，要把教材分成不同的认识水平，使之和不同年级、不同能力的学生配合起来，使它既能由普通的教师教给普通的学生，同时又能清

楚地反映学科的基本原理；并要善于发现学生的认识结构，使课程设计与认识结构统一起来。

3. 怎样教——强调发现法教学。发现法指以探究性的思维方法为目标，以基本教材为内容，让学生自我去发现。发现指认识人类尚未知晓的东西和运用思维去掌握他还未知但人类已知的东西。

他认为运用发现法有四大优点：（1）提高学生的智力潜力，学生可以学会解决问题的方法，学会转换和组织信息，从中得到尽可能多的东西。

（2）有利于外部动机向内部动机转化。（3）学会启发式的研究方法和工作方法，为进一步发现打好基础。（4）有助于记忆和回忆信息，有助于把所学的东西迁移到新的情景中去。

发现法教学可分为4个步骤：（1）提出问题。使学生既可能解答又能使之前进的难易适当的“适中问题”，以激起兴趣和探究要求，明确发现目标。（2）提出假说。让学生提出解决问题的可能的方案。（3）得出结论。搜集资料，发现依据，得出结论。（4）运用检验。

#### 【根舍因的“范例教学”理论】

50年代德国出现的教学理论，是德国和西欧一些国家教学改革的理论依据。其主要观点：

##### 1. 教学内容上坚持3个特性

（1）基本性：就学科内容而言，强调要选择一些基本知识，包括基本概念、基本原理、基本规律等，使学生掌握学科的知识结构。

（2）基础性：就受教育者接受教学内容来说，应是一些基础的东西。强调教学内容要从学生实际出发，包括要适应学生的智力发展水平，适应学生的知识水平，切合学生的生活经验。

（3）范例性：就教育者传授的角度来说，教给学生经过精选的基础知识，务必起到示范作用。它是一个窗口，从这个窗口可以看到全室；它是一面镜子，从这面镜子可以看到全貌。通过范例性，有利于学生举一反三，触类旁通，有助于学习迁移，有助于实际应用。所以在教学内容上反对庞杂臃肿，反对面面俱到，力求做到典型性、代表性、开导性。

##### 2. 教学要求上达到4个统一

（1）教学与教育的统一，也就是坚持教学的教育性。教学一方面要传授知识、技能，另一方面要进行思想教育、政治教育、道德教育，把这两个方面结合起来，统一起来，这种要求是德国教育的传统。

（2）解决问题的学习与系统学习的统一。教学是按一个个课题进行的，这种教学一方面有针对性，即针对学生存在的问题进行教学；另一方面又要有系统性，保证学生掌握学科整体的系统。

（3）掌握知识与培养能力的统一。“范例教学”在知识与能力的关系问题上，要求既要以知识、技能武装学生，又要培养学生的各种能力，把传授知识与教给学习方法、科学方法、思想方法，发展智力、培养能力结

合起来。

(4) 主体与客体的统一。“范例教学”认为教学主体是受教育者，即学生；教学客体是教材。教学就是教师引导学生掌握教材。在教学中，要求做到主体与客体的统一，即既要了解教材，熟悉教材，掌握教材；又要了解学生，熟悉学生，熟悉他们的智力发展水平，知识水平，个性特点。

除此之外，关于教师备课和教学程序上，分别要求对教学内容做到 5 个分析，即基本原理的分析、智力作用的分析、未来意义的分析、内容特点的分析和结构的分析。对教学程序应遵循 4 个阶段，即范例地阐明“个”的阶段、范例地阐明“类”的阶段、范例地掌握规律的阶段、范例地获得切实经验的阶段。

## 二、心理学主要流派

### 【构造主义心理学】

构造主义心理学又称为实验心理和新心理学，由德国近代心理学家冯特为代表，产生于 19 世纪 60 年代。早期从事于感观生理学研究的冯特，运用自然科学有效的数量实验法开创了实验心理学的研究。

1879 年冯特建立了世界上第一个心理学实验室，心理学才开始成为一门独立学科。实验心理学认为心理学是一门经验科学，把心理现象的研究分解为简单心理元素，然后再把这些元素合成为复杂的观念，提出了研究心理现象的分析与综合原则。通过研究，认为心理元素有感觉和感情两个。感觉元素的复合（指元素的结合）构成对外部世界某种东西的形象的观念，而感情元素的复合就构成人们各种具体的情绪状态。冯特认为心理组合有联想和统觉两种形式。联想是一种被动的过程，不受意志的影响。统觉则是一种创造性的综合，受意志的影响，是一种主动的过程，包括关联、比较、综合、分析依次上升的四种统觉组合功能。总之，统觉是个人使用或把握经验元素的过程，在实验心理学中占有重要地位。冯特运用元素分析法，研究了意志的复合过程，认为感情在意志的形成上有重要作用，是感情激起意志，成为意志的发端，并发展了意志。在他看来，意志与感情具有特别密切的关系。同时，他认为意志的成份中也有感觉，即包括了人的认识部分。所以意志概括了心理的一切，在整个心理学中占有特殊的地位。通过实验，冯特剖析了意志过程，认为意志是一种特殊机能，在意志心理研究上打开了一条思路。

实验心理学在心理科学实践上作出了历史的贡献，推动了心理实验的发展，为心理科学的大发展造就了一代新人。

### 【行为主义心理学】

行为主义心理学是美国现代心理学的主要流派之一，产生于 20 世纪初期，也是对西方心理学影响最大的流派，其代表人物是美国心理学家华生

等人。他们认为，心理学应该探索行为的规律，掌握这些规律就可据以预测和控制人的行为，从而提高生产效率，维持社会秩序。

行为主义心理学的基本观点：

1. 把心理、意识归结为行为。华生把心理、意识都归结为行为而没有留下任何精神的因素。他一方面把有机体应付环境的一切活动统称为行为，把作为行为的最基本成份的肌肉收缩和腺体分泌称之为反应。另一方面把引发有机体活动的外部 and 内部的变化统称为刺激，并认为刺激必然是属于物理性或化学性的变化。尽管引发人的行为的原因可以是高度复杂的，但无论怎样复杂，最后也要通过物理性或化学性的物质变化作为刺激才能起作用，才能为有机体所接受。至于作为反应的肌肉收缩和腺体分泌，当然也是物理变化和化学变化。这样，全部行为，包括身体活动和通常所说的心理活动，都不外是由一些物理或化学变化引起另一些物理或化学变化而已。华生认为这样就可以把心理学纳入整个自然科学体系中去，把精神现象还原为物质现象，取消了心理现象不同于其他的自然现象的独特性。认为“人和动物的全部行为都可以分析为刺激和反应”。而最基本的刺激、反应连结叫反射。不管是多么复杂的行为总不外乎是一套反射而已。因此，他宣称“行为主义者是严格的决定论者”。

2. 反对内省法，提倡条件反射的研究方法。反对内省法，是他在研究对象上否认意识的必然结果，他说：“内省陈述的真假无法确定，因为一个人除了能对自己做内省观察外，决不能对任何别人进行内省观察。”因此，他宣称：“行为主义者满足于观察开初的客体（刺激）和终末的客体（反应）。”他认为重要的是看可给予的刺激是什么样的，再看该刺激所引起的反应是怎么样的，或者该刺激使已在进行的反应发生了什么变化。这种观察结果可以由不同的观察者同时进行而互相验证，它符合一切自然科学所要求的真实性标准。华生采用条件反射作为基本的研究方法，把原来内省法只能由自我一个人来观察的事实，转化为“有目共睹”的事实。这就在内隐反应与外显反应之间建立起条件反射，使原来只能引起内隐反应的刺激也引起外显反应，然后通过外显反应来间接观察内隐反应。

3. 坚持环境决定论。否认行为的遗传也是华生的基本观点之一。他认为行为前后都可还原为由刺激引起的反应，而刺激不可能来自于遗传，既然如此，那行为当然就不可能来自遗传了。再者，行为主义以控制行为为研究目的，遗传是不能控制的，所以遗传的作用愈小，控制的可能性就愈大。他认为较复杂的行为的形成，来自于学习，尤其是早期训练。而学习的决定因素是外部刺激，外部刺激是可以控制的，控制的最基本途径是条件反射法。这样，不论多么复杂的行为都可以通过条件反射这一机制建立起来。对于形成新行为的这一看法，最适合行为主义预测和控制行为的要求，因此华生非常重视学习问题，提出了教育万能和环境决定论。

华生的行为主义是对传统心理学的反抗，他提倡行为主义，否定意识，

贬低脑神经的地位，片面强调环境和教育而忽视人的主观能动性。这给心理学理论的研究带来困难。但他以行为为心理学的对象，消除了心理学的主观性而取得自然科学共同的客观性，心理学与自然科学在对象和方法上便有了共同的语言。客观行为的观察取代了主观意识的内省，而凭借比感觉远为灵敏的外部感受器为研究工具，因此获得了较为可靠的结果，有利于心理学的发展，扩大了心理学的研究领域和应用范围。

#### 【新行为主义心理学】

20世纪20年代末，美国实验物理学家和自然哲学家布里奇曼创立了操作主义，二次大战后广泛流传到其他资本主义国家。30年代后心理学中的操作主义开始盛行，出现了新行为主义。新行为主义者在新形势下，把巴甫洛夫学说同操作主义观点相融合，一方面引入巴甫洛夫反射说的术语，另一方面却在这些术语中注入操作主义内容，构成了新行为主义理论体系。其中古斯里、斯金纳、托尔曼、赫尔等就是这一理论体系的代表人物。

新行为主义的理论体系要点：

行为主义者把心理、意识归结为行为，而行为遵循简化了的“刺激-反应”公式，按照这个公式，人们发现相同的刺激并不得到相同的反应，因而华生的行为主义观点日益引起人们的批评。新行为主义者托尔曼、赫尔等人在20年代末和30年代初，借助于受刺激的有机体的内部因素，克服了这个公式的缺点，并提出了中介变量的概念。新行为主义者反对行为的生理分析而主张行为的心理分析。指责“刺激-反应”公式不过是一种肌肉收缩的生理学，而非真正的心理学。他们认为所提出的中介变量是同可以观察到的周围事件和行为表现相关联的，而且可以根据这些事件和表现推断出来。指出中介变量是与实验变量（亦称自变量）和行为变量（亦称因变量）相关联，它中介于实验变量和行为变量之间，并可用下列公式说明行为变量与实验变量之间的函数关系

$$R=f(S、P、H、T、A)。$$

式中R代表行为变量；S代表环境刺激，P代表生理内驱力，H代表遗传，T代表过去经验或训练，A代表年龄，总称实验变量。上述公式表明，行为是环境刺激、生理内驱力、遗传、过去经验或训练以及年龄等的函数。也就是说，有机体的行为随着这些实验变量的变化而变化。这样，就可以得到实验者的反应。至于为什么有这种反应呢？新行为主义者按照另一行为公式“S—O—R”予以说明，认为这是在S（刺激）和R（反应）之间的O（有机体）内部发生了什么。他们从可以观察到的环境刺激（自变量）和行为反应（因变量）之间探索有机体的内部过程来解释为什么会有这种反应。他们认为中介变量是不能直接观察到的，但它是引起一定反应的关键，是行为的决定者。只有研究清楚这个中介变量，才能回答在一定的刺激情境下为什么能引起某种可观察到的反应来。新行为主义提出的中介变量思

想是对心理学的一项贡献，在理论学习中引起很大的反响。

### 【格式塔心理学】

格式塔心理学又称完形心理学，诞生于 1912 年，是现代西方心理学的主要流派之一。20 世纪初，德国的政治、经济以及文化科学等方面，都倾向于整体的研究，心理学也不例外。格式塔心理学也强调整体观点。其代表人物是韦特墨、克勒和考夫卡。

格式塔心理学的基本主张：

反对行为主义心理学，只承认人的行为而否定人的意识，但也反对冯特的构造主义心理学把人的意识分解为若干要素的作法。它承认意识的价值，是以认识过程中的感知觉过程为研究对象。其理论的基本点是：整体的行为不是由个别元素的行为决定的，但部分过程本身则是由整体的内在性质决定的，决定这种整体的性质的因素就是格式塔理论所要研究的。基于这种原则，格式塔心理学家试图用完形这个术语去研究人的心理活动。他们认为，知觉本身显出一种有组织的整体性，一种形式，一个完形，如果力图加以分析，这种整体性就被破坏。因而它是通过联想的原理把所接收的感觉元素机械地联系起来。他们也用整个情境和在刺激之间所发生的关系来解释学习过程，认为解决问题属于重建知觉场，如果把问题作为整体考虑，则容易解决。格式塔心理学重视整体的观点，重视部分之间的联系，克服了元素主义的机械观点，冲破了元素主义的框框。但它的研究局限于知觉领域而无法解决人的意向活动和认知活动，而且排斥经验的作用，把客观世界只看作是现象性的客观存在，因而带有先验论和唯心主义倾向。

### 【现代认知心理学】

现代认知心理学起始于 20 世纪 50 年代中期，60 年代之后迅速发展，成为西方心理学界影响最大的流派。美国心理学家尼塞于 1967 年出版了《认知心理学》，该书的出版标志着现代认知心理学已成为一个流派而立足于心理学界。现代认知心理学的产生主要是心理学内部矛盾运动的结果。本世纪初，占统治地位的意识心理学由于事实上并没有解决好意识问题而被行为论心理学所取代，然而行为论却走向了另外一个极端，完全撇开了人的意识过程。随着时间的推移，一些心理学家逐渐认识到行为论心理学同样没有能够解决心理学的一系列基本问题，于是，心理学家重新研究人的认知过程，成为产生现代认知心理学的一种内部动力。现代认知心理学的产生，也继承了行为主义心理学和格式塔心理学的某些观点和研究方法，是心理学内部发展进行批判与继承的结果。与此同时，语言学研究有了新的进展，一些新兴学科有了重大发展。其中主要是通信工程、信息论、数理逻辑和计算机科学的发展，对现代认知心理学的研究产生了巨大的影响，成为其产生的重要外部条件。

现代认知心理学的核心观念是：企图把“认知”概括为人的全部心理

活动，并把它看成是计算机式的信息加工系统。这个系统的基本特征在于能够用符号的形式表示外部环境中的事物，也能用符号的形式表示自身的一系列操作过程；能对外部环境进行信息加工，也能对自身的操作过程进行信息加工。

现代认知心理学的基本观点是：

1．认为人不是机械地接受刺激和作出反应的被动实体，而是有选择地获取和加工环境刺激的有机体。

2．人对刺激不是直接地反应，而是要经过一连串的心理转换活动才能实现的。研究人的认知规律就是要研究这一连串心理转换过程的规律。

3．把人的认知过程规律用计算机进行类比和模拟，认为人脑的思维和计算机的信息加工原则是一致的，把人的感知、记忆、思维、行动看作如计算机的输入、储存、编码、输出等环节那样的完整信息加工系统。它根据计算机的设计程序来分析人的思维规律。

4．认为使用科学手段主要不是为了去观察、改变或塑造人的外部行为，而是要去分析人的认知程序结构及规律。

现代认知心理学之所以在西方取得了心理学研究的主导地位，并有了突破性的进展，是由于它冲破了行为主义心理学的禁锢，使心理学从只研究人的外部行为，转向研究内部心理机制，从行为主义强调研究“没有心理”的心理学，转变到重视认识过程的研究，把研究心理与行为统一起来。它还抛弃了行为主义心理学的严格环境决定论，明确提出以人的认识过程为研究对象，为揭示这个过程的实质，揭示人的思维规律，提供了有价值的研究成果，并得到了心理实验的证实，使心理学与人类的实际生活更紧密地结合起来。但在现代认知心理学取得成功的同时，也暴露出它的缺陷和问题。人的全部心理活动过程包括意向活动和认知活动两大领域，他过于强调了对认知活动的研究而忽视对意向活动的研究，甚至用认知活动来代替人的整个心理活动过程。同时把人的心理和认知完全和计算机类比，虽然在一定程度上使研究工作取得了成功，但这只能得到一些心理活动的规律，并未解决心理活动的实质，同时把人类比作计算机，这就必然使心理活动的生理机制的研究产生困难。

### 三、教育心理学的基本理论与要点

#### 【教育心理学】

教育心理学的对象就是教育过程中的种种心理现象及其变化。它研究受教育者在教育影响下形成道德品质、掌握知识和技能、发展整个智慧和个性的心理规律，研究教育同受教育者的心理发展的相互关系，以提高教育效率。由于受教育者的体质发展和心理发展是紧密相关的，教育心理学也要联系到这方面的有关问题。



学校教育的过程大都是教育者和受教育者协同活动的过程，教育者在这种过程中起着主导作用。因此，关于教育者方面的心理学问题，也是教育心理学研究的一个特殊的领域。

教育心理学主要包括下述几个方面：

(1) 受教育者的共产主义道德品质形成的心理学问题。如共产主义道德品质的形成和发展的心理规律，包括生产劳动及其他实践活动和教育措施的作用等。

(2) 受教育者学习知识、技能的心理学问题。包括学习动机、学习兴趣及其形成，掌握知识、形成技能的心理过程和条件，以及学习各学科的特殊心理学问题，在教学中采用现代科学技术手段的心理学问题等。

(3) 受教育者的体质发展及其心理发展的关系问题，体育教学中心理学依据等。

(4) 教育工作其他方面的心理学问题。如艺术教育对受教育者心理发展的作用以及这方面的心理学依据等。

(5) 受教育者的心理个别差异问题。如个别差异的形成和适合受教育者的心理特点的适当教育措施，其中包括智能表现超常、低下或具有特殊才能的受教育者的心理特点和与之相应的教育。

(6) 教师的心理问题。如教育者所应有的心理品质及其形成，教育者的品质对受教育者的影响，以及教育者在教育工作中的作用的心理学依据。

#### 【教育与心理发展】

心理的发展是在人与周围环境不断地相互影响的活动中实现的。其动力来自于心理发展的内部矛盾。一般说来，在心理发展中那种新生的和衰亡的心理过程、心理特点、心理品质之间的矛盾，是心理发展的动力。而教育不断地对人提出各种新的要求，引起人的新的需要，原有的心理发展水平已经不能满足这种需要，这就要求心理活动提高到更高的水平，要求在原有心理发展水平的基础上出现新的心理过程、特点和品质，促进了人的心理发展。

心理发展的一般特点是：

(1) 心理发展是一个持续不断的前进过程。每一心理过程和心理学特点都是逐渐地、持续地发展着，由较低水平到较高水平。可以说，心理发展自出生的一瞬间即已开始。

(2) 心理发展有一定的顺序性。整个心理发展有一定的顺序，个别心理过程和个性特点的发展也有一定的顺序。

(3) 心理发展过程中前后相邻的阶段有规律地衔接，前一个阶段为后一阶段准备了条件，从而有规律地过渡到后一阶段。

(4) 各个心理过程和个性特点的发展速度不完全一样，达到成熟水平的时期也各不相同。

(5) 心理各个方面的发展是相互联系和相互制约的。

(6) 同年齡学生的心理发展可能会有显著的差别。

教育对学生的心理发展起主导作用，制约学生心理发展的过程和方向；同时，教育工作也要以学生心理发展的水平和特点为依据。学生心理发展的趋势、速度和水平，都受教育的影响，没有适当的教育措施就无法指导学生的心理发展；另一方面，如果教育工作不适合学生心理发展的水平和特点，就不能促使学生心理得到应有的发展。所以说，教育与学生的心理发展之间存在着比较复杂的相互依存关系。这种关系主要表现在相互联系的两个方面，即学生的智能和个性品质的发展。

#### 【学习的理论】

(1) 刺激-反应理论：其代表人物是桑代克、华生、斯金纳等人。认为学习反应是由学习刺激决定的，强刺激将引起强反应。因此这种学习理论强调学习过程中外界刺激的作用。

(2) 认知理论：其代表人物是魏特海墨、考夫卡、苛勒等人。认为学习反应并不直接由学习刺激决定的。外界刺激是通过学习者个体内因而引起反应，因此这种学习理论强调学习过程中个体内因的作用。

### 四、学科教学法学科教学论与学科教育学

#### 【物理教学法】

是研究为了完成物理教学任务，师生在物理教学过程中所采用的手段和方法。既包括教师教的方法，也包括学生学的方法。它是建立在教学经验总结的基础上，是以研究“怎样教”为核心，基本上回答了教学过程中“是什么”的问题，而没有从根本上清楚地回答教学过程中的“为什么”。

#### 【物理教学论】

是研究物理教学过程的一般理论与规律。它对教学过程中的各种问题作出“为什么”的回答，深刻揭示了物理教学过程的基本规律、基本特点。因而它着重从理论上研究问题，需要有一个比较完整的物理学科理论体系。它站在高于实践的高度，对物理教学实践给予指导，并作出预见，但其研究范畴仍然是物理教学本身。

#### 【物理教育学】

是研究整个物理教育过程的规律与原理的科学，是近些年来随着教育科学应用方面的发展而兴起的一门从微观上研究教育的新学科。从广义上说即要研究物理教育与社会、政治、经济、哲学之间的关系，从狭义上说即要在物理学科范围内研究人的全面发展，提高人的素质，研究全面体现物理教育的功能和规律。具体讲，就是要研究物理学科的理论功能、应用功能、教育功能和培养功能。当然在物理教育过程中，物理教学过程应是整个体系的中心，应发挥其核心作用，它既是物理教育的主体，又是进行

物理教育的基本途径。但决不能由此就把教育过程等同于教学过程，把物理教育学等同于物理教学论。

## 五、教学测量与标准化考试

### 【成功的教学测量必须具备的条件】

当前存在着滥用考试的情况，考试的结果也遭到随心所欲的解释，因此应该强调教学测量必须具备一定的条件才有意义。

#### 1. 有效考试必须具备的条件

(1) 对象的可考性：即考核的对象是可测的，并可能使用考试的方法来进行测量。

(2) 目标的明确性：即要明确考核什么，要达到什么目的。

(3) 试题的代表性：即试题的数量、分布和具体内容对被测的学生应有一定的代表性。

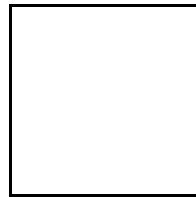
(4) 测量的客观性：即考试过程中的各种干扰所造成的误差不致使测量结果失去起码的客观程度。

#### 2. 衡量考试质量的 4 个主要指标

(1) 效度：衡量测量准确性的指标，即测量是否测得了所要测量的东西，它表示所考的与所要考的两者之间相符合的程度。如果考试完全反映了所要考的东西，则效度为 1；如果与所要考的完全无关，则效度为零。真正做到正在测量的恰是想要测量的并非容易，如一次物理考试一个学生得分很低，那么这是由于学生缺乏必要的物理知识呢？还是由于对题目没有正确理解呢？若是后者，那就说明这次测量并没有测出学生的物理水平，而测量的仅是学生的阅读能力、语文水平，它作为一次物理考试，其效度就很低。常使用的效度有两类，即效标效度和内容效度。

效标效度：效标指的是人为确定的效度标准，也就是被预测的目标。如公认的标准考试所得的分数，历年来的学习成绩等等都可作为效标。它反映了在多大程度上预测了被测的指标，即测量结果与效标间的一致性程度。

效度用效度系数  $r_{xy}$  来表示。效度系数  $r_{xy}$  就是测量分数与效标分数的相关系数，即

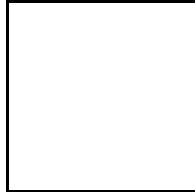


式中  $x$  为测量分数变量， $y$  为效标分数变量。

如计算一下某次高考试题的效度。随机抽样 5 个学生的入学考试成绩（测量分数）与他们入学后一年的学习成绩（效标分数），求效度系数。

高考分数	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
	370	390	354	410	425
一年级平均分	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
	86	75	64	90	87

则  $n=5$ ,  $\sum xy=157601$ ,  $\sum x=1949$ ,  $\sum y=402$ ,  $\sum x^2=763041$ ,  $(\sum x)^2=3798601$ ,  $\sum y^2=32786$ ,  $(\sum y)^2=161604$ ,



这是什么意思呢？即它反映了大学一年级的平均分（效标分数）中有 42% 的差异可由高考成绩来预测。由效度系数  $r_{xy}$  的平方可得差异数的百分比，本例中  $r_{xy}=0.65$ ,  $r^2_{xy}=(0.65)^2=0.42$ , 即 42%。

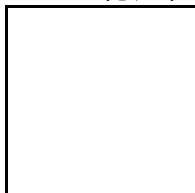
效度是反映测量优劣的指标，效度系数越高，则说明测量越优（最高为 1），一般作为入学考试的效度应在 0.4~0.7 之间。

内容效度：教学测量是在需要测量的知识总体中，选取一些具有代表性的知识作为样本组成试题进行测量的。作为样本的试题能否很好地代表知识总体的全部内容，即考试内容与预定要考的内容间的一致程度就是内容效度。内容效度尚无法使其数量化，只能靠逻辑推理进行判断。关键是对试题要采取代表性取样，如讲过初中力学以后，出了 10 道考题进行测量，全部都是关于压强方面的，其他内容，如力、运动和力、浮力、密度、简单机械、功和能等完全没有，则不管学生考得怎样，这份题目的内容效度却不高。

(2) 信度：衡量测量可靠性的指标。

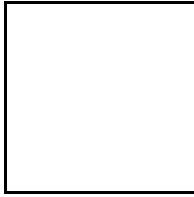
信度的计算方法通过计算信度系数  $r_{xx}$  来表示，信度系数越大，说明测量结果越可信（最大为 1）。我国一般要求测量信度在 0.8 以上。信度系数可用相关法求得，但由于搜集测量结果的程序不同，又有三种不同的系数。

稳定性系数：又叫再测信度。是用同一测量内容在不同时间里进行

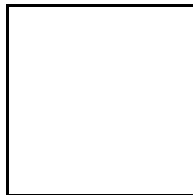


二次施测。

等值性系数：又叫等值复本信度。是用内容取样、题目难度、试题长度都大体相同的两套试题，在最短的时间内，进行两次测量，并计算两



分半信度系数：为了克服再测信度和等值复本信度要进行两次测量所造成的困难，便将一次测量的题目，等值地分为两半，如按奇、偶数分题，相当于两次考试计时，将此两部分的分数分开统计，一半以变量  $x$  表示，一半以变量  $y$  表示，计算其相关系数作为信度的指标，称为分半信度系数。分半信度系数计算时省时、省力，但测量的信度与测量长度有密切联系，分半结果使测量长度缩短了一半，因此实际计算时常常使用“斯皮尔曼-布朗”公式加以校正。该公式是



式中  $r_{xx}$  为校正后分半信度系数， $r_{nn}$  为奇数与偶数题所得的分半信度系数。

这里主要介绍分半信度系数的计算。

如一次测量共出 10 道题，其中每个学生每次做 5 道题，共测了 8 个学生。

被测学生/一/二/三/四/五/六/七/八

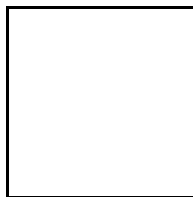
单数题平均/6/5/4/4/1/15/2

分数  $x$

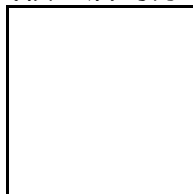
双数题平均/4/3/2/4/3/1/5/4

分数  $y$

则  $n=8$ ， $xy=100$ ， $x=28$ ， $y=26$ ， $x^2=124$ ， $(x)^2=784$ ， $y^2=96$ ， $(y)^2=676$ ，



经“斯皮尔曼-布朗”公式校正后的分半信度系数

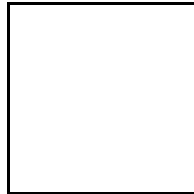


(3) 难度：表示测量题目的难易程度。测量难度是影响鉴别力的最重要因素。难度太大，学生得分就普遍降低，形成正偏态分布；难度太小，

学生得分就普遍偏高，形成负偏态分布。两种分布分别集中在高分与低分端，不能有效地鉴别学生的优劣，且分数过分集中，缩小分数分布范围，减小了得分间的差异。

一般的教学测量题目的难度都要求测量结果的分数接近正态分布。分数分布范围较广，是测量良好的重要条件。

难度  $P$  一般可用 1 减去该题所得平均分  $X$  与该题满分  $W$  的比值来计算，即



一般难度应在 0.3~0.7 之间，整个试卷的难度在 0.5 左右为宜，但这不是绝对的。

(4) 区分度：指测量时对被测者的知识和能力水平的鉴别程度。区分度大的测量使程度高的学生得高分，程度低的学生得低分。在录取率较低的考试中，一般要求区分度要大些，通常应在 0.3 以上。

区分度的计算，一般采用两端分组法。即把考生的得分按由高到低的顺序排列，然后用习惯上的“27%划分法”，从最高分开始向下把 27% 的考生作高分组，从最低分向上，把 27% 的考生作低分组，分别求出高、低分组中答对的比例  $P_H$  和  $P_L$ ，则区分度  $D=P_H-P_L$ 。

#### 【标准化考试】

指按照系统的科学组织程序，具有统一标准，并对误差作严格控制的考试，即对考试过程的各个环节都做到标准化，使之能客观而准确地反映出考生真实水平的考试。标准化考试通常有以下 4 项要求：

1. 测量工具即试卷的标准化。按照统一的命题计划，编制出大量高质量的试题，这些试题都经过多次试测和筛选，难度和区分度符合要求，并搭配成多份等价的试卷，这些试卷都具有符合要求的信度和效度。这样一方面按照科学要求，实现了试卷组成的最优化，另一方面，对于使用标准试卷的不同次考试，成绩有了可比性。

2. 考试过程的标准化。在命题的同时，编制出考试条件（考场编制，答卷时间，对考生所作的说明，考生答题方法等）和实施过程的说明书，要求严格按照说明书的规定组织考试工作。这样一方面有效控制了考试实施中可能引起误差的干扰，另一方面不同时间、不同地点的同类考试，又具备了相同的考试条件，具有了可比性。

3. 评分的标准化。按照统一的评分标准和给分办法进行评分。标准化考试除个别主观性试题外，一般都采用阅卷机评分。

4. 分数的解释和使用的标准化。将原始分数转换为标准分数，并提供用作比较的分数标准——“常模”和“目标”。分数常模，就是对大规模

的同类考生，使用标准化试卷，在严格控制条件下（标准化的考试过程）进行测试，所得到的考试分数的平均值。分数目标，就是按照教学目标规定的可通过的最低标准。实际上它也是根据能够被人们承认为基本达到教学目标的人员的平均水平制定的。

标准化考试的优点是：考试的各个环节，对于可能造成误差的因素都进行了严格的控制，因而测试的结果准确可靠；不同次考试的标准、实施程序、测试条件都是相同的，它们的分数就具有可比性；对于经常举行的大规模考试来说，减少了重复劳动，较为经济。这是近几十年来世界各国广泛推行标准化考试的重要原因。

标准化试卷的编制，一般经过以下几个步骤：

1. 明确考试目的。在编制试卷前，首先要明确考试目的，即明确考什么，考什么人和为什么考。

2. 制定考试大纲。在明确考试目的后，就要根据教学大纲的基本要求，进一步具体规定考试的内容及各部分的比例、考试的方式（如开卷、闭卷、操作等）、方法（如组织、评分、计分等）、考试的类型（如选择、简答、综合等）、考题的多少、相对的重点及考试的时间等。

3. 拟定编题计划。编题计划，实际就是设计试卷的蓝图，通常是列出一张双向细目表，指出试卷所测量的知识和能力，以及对每一种知识和能力的相对重视程度。知识指的是某一学科的各个课题，能力是指通过教学在认识行为上要达到的目标。美国心理学家布鲁姆，把学习的认识活动分为记忆、理解、应用、分析、综合、评价6个层次，根据我国的情况，一般可分为了解记忆、理解掌握和运用发展3个层次。

4. 编写和审定题目。命题前先要搜集有关资料作为命题的依据。资料要丰富齐全，具有普遍性，要以大纲和教材为题目来源，编写题目要注意以下几点：

（1）题目的内容范围要与考试计划所列的双向细目表一致。

（2）题目的数量要比最后所需的多几倍，以备筛选和编制复本。

（3）题目的难度必须符合考试目的的需要。

（4）题目的说明必须清楚明白。

（5）题目试测。目的是对初步筛选出的试题性质优劣作出客观鉴定，以便发现题目质量方面的问题。测试要有代表性，而且人数不能太少。

（6）题目分析。指对题目测试结果进行统计分析，确定题目的难度、区分度。

5. 拼配题目成试卷。总的编排原则是由易到难，形成梯度，以免考生在难题上耽搁太多时间而影响解答后面问题。最后可有少数难度较大的题目，以测考生的最高水平。如果同一份试卷中包含不同性质的材料或不同形式的题目，则要把属于同一内容或同样形式的题目编排在一起，便于作答和记分。

6. 搜集效度和信度资料。试卷在试测和正式使用过程中，要对它在不同情况下测量的有效性和可信性作出评价。严格说来，没有效度、信度证据的试卷是不能使用的。



## (二) 教学方法

教育思想、教学内容及教学方法是教学过程中的三个重要因素，三者不是孤立的。教学方法要受教育思想与教学内容的限制和制约，但反过来，教学方法又应体现教育思想。因此，对教学方法应该进行综合优化处理。

### 1. 设计、选择教学方法的原则

在具体设计和选择一种教学方法时，应该充分考虑下列几种因素：

(1) 教学目的：即不论什么教学方法都一定要有利于教学目的的实现。它既是设计、选择教学方法的出发点，也是检验教学方法的根据之一。

(2) 教育思想：即在执行实施教学方法时，要看是不是体现、符合正确的教育思想。

(3) 特点与功能：任何教学方法都有自己的特点和功能，因此，在采用某种教学方法时要充分考虑是否能发挥它的特点和功能。

(4) 适用条件：任何教学方法都是一定条件下的产物，因而都具有局限性。局限性的另一个侧面就表现为各种教学方法都应具有针对性。

(5) 师生状况与教学条件：即要看师生的智力基础和水平及时间与物质条件的可能。

### 2. 如何进行教学方法的综合优化处理

教学方法是多种多样的，在具体确定教学方法时，要从教学的总功能和现代人才观及教学实际状况来统观教学方法。否则往往会出现局部是优化的，但全局不一定是优化的情况。因此，要坚持多种教学方法综合优化处理，充分发挥各种教学方法的特长。综合优化处理的基本观点是：

(1) 知识与能力统一分化的观点：既要看到知识与能力的统一性（可相互转化），又要看到它们是两个不同范畴的概念。两者对教学方法的要求有不同的侧重。

(2) 辩证适量的观点：要弄清每种教学方法的主要特点与条件，但不能强调过头，不能绝对化。事物往往并不都是以对立状态出现的，如讲与练，实验与理论，教师与学生，动脑与动手都不能认为对立到不相容的程度。

(3) 目的、内容决定方法的观点：在教学中有的课以知识为主要目的，有的却以能力培养为主要目的，方法的确定要在目的、内容确定之后，而不能走在它们的前面。不能抛开目的、内容来考虑方法。

#### 【讲授法】

讲授法是教师通过口头语言，辅以演示实验，系统连贯地向学生传授知识的教学方法。讲授法在物理教学中应用最广泛，既用于传授新知识，也用于巩固旧知识，它通过循序渐进地叙述、描绘、解释、论证、推理来传递信息，阐明概念、规律、定理、公式，引导学生分析和认识问题，促进智力与品德的发展。

讲授法的具体方法：(1)讲述。教师生动形象地描绘某些事物的现象，陈述事物产生发展的过程，使学生形成鲜明的表象和概念。(2)讲解。对某些较复杂的问题、概念、定律等，进行系统详细的解释和论证，说明事物的内部结构和联系等。(3)讲演。教师就教材中的某一专题进行有理有据、首尾连贯的论说，通过分析、论证来归纳概括科学的结论。

讲授法应力求做到：(1)讲授内容要具有科学性、系统性和思想性，要做到主题明确、判断准确、推理合乎逻辑；(2)讲授要突出重点和难点，抓住关键，主次分明地进行论述，做到详略适宜，切忌杂乱松散、平铺直叙、空洞枯燥；(3)讲授过程要思路清晰、层次分明、条理性强；(4)教师的语言要准确、清晰、简练、生动、有趣，通俗易懂具有启发性，要善于用语言调节课堂气氛，课堂既要严肃认真又要生动活泼；(5)讲授要与演示、实验、板书、板画等各种教学手段相配合，以取得最佳讲授效果；(6)讲授要立足于发展学生的智力，注意使学生掌握发现问题、分析处理问题和解决问题的方法。

#### 【谈话法】

谈话法又称问答法。教师根据学生已有的经验和知识，提出问题，引导学生积极思维，通过师生对话，获取新知识、巩固旧知识或检查知识掌握程度的一种教学方法。

谈话法的基本特点是：教师提出问题，用启发性对话逐步引向结论，集中学生的注意力，促使学生积极思维、独立思考，在回答问题中获取新知识，培养语言表达能力。

谈话的方式有：引入课题的谈话，叫引入性谈话；传授新知识的谈话，叫传授性谈话；启发学生思维，引导学生回答问题的谈话，叫启发性谈话；巩固知识或检查知识的谈话，叫巩固性谈话；还有指导性谈话和总结性谈话等。

谈话法应力求做到：(1)谈话要围绕教材内容和教学重点来进行；(2)提出的每个问题，必须题意清楚、具体，表述准确，要求适度，能引起学生思维，问题的难易程度要因人而异；(3)教师要面向全体学生提出问题，要因势利导，引导全体学生思考，让个别学生回答，要允许学生互相补充或向教师提出质疑；(4)谈话结束时，教师要归纳总结，得出正确结论，对学生反映出的错误认识，要明确纠正，使学生获得系统、科学、准确的认识。

#### 【讨论法】

讨论法是围绕教学的重点、难点、疑点或带有规律性的知识，提出问题，引导学生进行讨论，以达到提高认识、弄清问题而获取新知识的一种教学方法。

讨论法的基本特点是：能充分发挥学生独立思考的积极性和主动性，通过议论、争辩，互相启发、开阔思路、集思广益，以达到学习新知识、

巩固旧知识、培养语言表达能力的目的。讨论的形式可以是全班性的，也可以分组在师生间和学生之间进行。

讨论法的程序是：（1）学生自学；（2）师生提出问题；（3）讨论和答辩；（4）教师总结。

讨论法应力求做到：（1）讨论题要有启发性，能引起学生深入钻研的兴趣，有讨论价值；（2）讨论时要把学生的注意力引导到问题的本质和争论的焦点上，逐渐向纵横发展，使学生获得系统、清晰的认识；（3）创造条件，充分利用教材和资料，防止讨论脱离主题、流于形式；（4）做好讨论小结，对讨论的问题要作出明确的结论，纠正错误和片面模糊的认识。讨论法适用于学生接受起来不是最困难的问题，但在理解、应用上常常容易出现错误的内容。讨论题的范围应是：新知识中含有培养能力的因素，易错易混的问题以及具有方法的多样性、知识的规律性、实验的关键性等问题。

### 【研究法】

研究法是在教师的指导下，选取教学中难度较大、没有明确结论的问题，先由学生独立思考和探索，然后互相研究，得出初步的判断和结论，再由教师归纳总结，使学生获取知识的教学方法。

研究法的基本特点是：研究的内容是教学中比较复杂、难度较大的课题或习题；以学生独立思考和探究为主；在探究的基础上，进行实验验证和理论论证；主要培养学生的思维能力和掌握研究问题的方法。

研究法的结构和程序是：（1）提出研究课题；（2）引导学生进行科学猜想；（3）设计实验研究方案；（4）进行实验观察，分析和处理实验数据；（5）研究探索，得出科学结论；（6）引导学生进行理论论证。

研究法应力求做到：（1）正确选择研究课题，课题要有一定的难度和研究价值；（2）提供必要的条件，供给实验所需的仪器、设备和参考资料；（3）放手让学生独立思考和探索，适当给予必要的启发和引导；（4）研究题目要从易到难，从单一到复杂，从参与局部的研究过渡到全过程的研究；（5）引导学生得出肯定或否定的结果，给出正确的结论；（6）注意总结研究方法和探索解决问题的思路、途径。

### 【练习法】

学生在教师的指导下，依靠自己的能力，将知识加以运用，以巩固知识、掌握方法和形成技能技巧的一种教学方法。从生理机制上看，通过练习，学生在神经系统中形成一定的动力定型，以便顺利地、成功地完成某种活动。

根据练习曲线揭示的一般特点，练习可分三个基本阶段：开始阶段曲线上升得慢；中间阶段曲线上升得快；结束阶段上升速度逐渐减慢，直至出现停滞状态，或称高原状态。

练习法按性质特点，可分为心智技能练习，动作技能练习和行为习惯

练习；按培养能力的方向，可分为语言表达练习，书面文字练习和实际操作练习；按学生掌握技能技巧的进程，可分为模仿性练习，独立性练习和创造性练习。

指导学生练习的步骤是：（1）教师提出练习任务，说明练习的意义、要求、方法；（2）教师进行必要的示范指导；（3）学生独立练习，教师个别辅导；（4）检查和总结。

练习法应力求做到：（1）明确目的要求，掌握练习内容的理论依据；（2）选择练习内容，设计练习程序，把典型练习、变式练习和创造性练习密切结合起来，由易到难，由浅入深，由简到繁，由模仿到创造，从基本练习到综合练习；（3）根据练习曲线，掌握练习规律，分量、次数、时间要适度；（4）掌握练习的结果，及时检查。

### 【复习法】

教师指导学生温习已经学过的教材，以强化记忆、加深理解、融会贯通，把零散的、片断的知识条理化和系统化的教学方法。复习的作用可以防止遗忘，同时可以诊断和弥补学习上的缺陷，发展学生的分析概括能力、记忆能力和思维能力，达到温故而知新的目的。

复习有以下几种类型：（1）学期、学年开始的复习。目的在于重温旧知识，为学好新知识奠定良好的基础；（2）经常性复习。日常教学的各环节采取边学边复习，以旧带新；（3）阶段复习。学习完某章、某单元后的复习，使获得的知识系统、巩固、充实、提高；（4）总复习。对学过的知识进行总结性的复习，掌握知识的体系结构，内在联系，系统、完整、牢固地掌握知识。复习的方式灵活多样，可采用系统总结的方法，练习、检查的方法，实验的方法和电化教学的方法。

复习法应力求做到：（1）按照教学大纲的要求进行系统复习，引导学生掌握最基本、最重要的知识；（2）复习要含有新的学习因素，通过复习有新的收获和体会，提高复习的积极性；（3）复习方式多样化，通过复习学会创造性地学习；（4）复习要及时；（5）要教给复习的方法；（6）复习时要注意收集学习情况的反馈信息，不断地改进教学，提高教学质量。

### 【演示法】

演示法是指在教学过程中，教师运用直观性教具，配合讲授进行示范性的操作表演，使学生从观察中获得感性认识或验证理论知识的一种教学方法。演示法在我国教育史上的记载早于西方。

演示法的基本特点是：直观性强，使学生得到具体、真实、生动、鲜明的观念和直接经验；能提高学生的学习兴趣，集中学生的注意力；有利于理论联系实际，发展学生的观察力、想象力和思维能力。

演示法的种类，按演示用的器材可分为：（1）实物、标本、模型的演示；（2）图片、图画、演示实验板的演示；（3）实验操作演示；（4）幻灯、投影、录音、录像、教学电影的演示。按演示的内容和要求可分为事

物现象的演示和事物内部情况及变化过程的演示等。

演示法应力求做到：(1)明确演示目的，选好演示教具，作好演示准备；(2)演示要直观、形象，效果显著，使学生都能清晰地感知到演示的对象；(3)引导学生有目的、分层次地观察，把学生的注意力集中到演示对象的主要特征、主要方面和事物的发展过程上来；(4)演示要按规程操作，起到示范作用；(5)演示要在教学最适宜时进行；(6)要结合演示进行讲解和谈话，使演示的事物与所要学的知识密切结合。

### 【实验法】

学生在教师的指导下，运用一定的仪器设备，通过控制条件和操作过程，观察所要研究事物的现象及过程的发展变化，认识事物的规律，从而获得新知识和培养能力的教学方法。

实验法包括边讲边实验、学生分组实验、演示实验、学生课外实验等。按获得知识的类型，可分为感知性实验、验证性实验和探索性实验三种。按实验性质，可分为定性实验、定量实验和析因实验。实验的组织方式可采用分组实验、个别独立实验和演示表演实验等。

实验法的基本特点：主要是靠学生亲自动手做实验，把实验感知和思维活动紧密结合来获得知识，培养技能，发展智力，提高能力；能养成勤于动手、善于思考的习惯，培养严谨的科学态度和实事求是的作风。

实验法应力求做到：(1)编制实验计划，做好组织准备。对仪器设备、实验材料要仔细检查，以保证实验的效果。(2)明确实验的目的、要求、步骤和方法。知道实验的原理、过程和注意事项，提高实验的自觉性。(3)引导学生观察。观察实验过程是获取知识的基础，实验时要引导学生有目的、分层次、有重点地观察，把握事物的本质特征；同时要留心意外现象，注意分析和发现新知识。(4)做好实验小结。总结实验概况，指出优、缺点及存在问题，分析产生的原因和提出改进意见，指导学生写好实验报告。(5)实验要注意安全。

### 【实验学导法】

实验学导法是在教师的引导下，以物理实验为基础，通过自学讨论和实验探索的形式获得知识，并运用知识解决问题，以达到培养能力和发展智力的教学方法。首先，教师把教材归纳为不同的类型，即讲授性教材、自学性教材、实验性教材、讨论性教材和练习性教材，以此为确定教法的基础，对不同类型的教材采取不同的实验手段。

实验学导法的课堂教学程序分为5部分：(1)实验设疑。根据教材内容创设物理情境，激发学生进行实验的兴趣。(2)自学探讨。通过布置自学提纲，指导学生通读教材，设计实验进行自学探索，边自学边实验，使学生手、脑、口、眼并用。(3)讨论质疑。对探讨时提出的问题，采用不同方法解决。简单问题用三言两语当场解答；通过看书和实验能解决的问题，教师引导点拨，由学生自己解决；对学生普遍存在的疑难问题，引导

学生进行实验探索。(4) 实验论证。对重点、难点和疑点,进行实验探索。讲授性教材辅以直观性较强的实验,自学性教材辅以验证性实验,实验性教材以分组实验为主,讨论性教材以探索性实验为主,练习性教材以设计性实验为主。(5) 应用练习。选择小、精、活的题目进行形式多样的练习,采用问答、改错、填充、选择、判断、组合、抢答等方式,总结和巩固知识。

### 【参观法】

参观法是教师根据教学内容、任务及要求,组织和带领学生到校内、外一定场所,直接观察、研究实际事物,从而获得知识,开阔眼界,扩大知识面的教学方法。参观法的作用是获得正确、鲜明、切实的感性认识,实感强,印象深刻,理论联系实际,了解学科理论在实际中的具体应用,培养学习兴趣;参观实际的生产过程,启发学生的思维,扩大视野,发展认识能力。

参观法可按以下步骤进行:(1) 参观前的准备。教师制定切实可行的参观计划,包括参观的目的、对象,组织安排,参观过程的指导,组织纪律要求和参观后的总结等。(2) 参观的进行。参观时应争取参观单位的密切配合,向学生介绍工艺过程、生产流程及其学科知识原理在实际中的应用,引导学生注意观察事物的主要方面和关键环节;启发学生提出问题,收集资料,作参观记录;参观过程应加强组织纪律性和安全教育。(3) 参观的总结。参观结束后,指导学生写参观报告,组织座谈,交流参观的收获和体会,教师总结时要着重将学生获得的感性认识结合教材上升为理性认识。

### 【单元教学法】

单元教学法是按照知识的系统结构和内在联系,把教材内容分成若干个教学单元,分段组织教学的方法。

单元教学法的基本特点是:以教材本身的知识结构为依据划分教学单元,学生按单元进行自学探究,系统地掌握知识,教师不采用逐节的讲授,而是运用综合性的教学方法分段进行教学。

单元教学法的教学过程包括4个环节:(1) 自学探究。教师把单元内容概括地介绍给学生,提出问题,启发引导学生去自学探究。(2) 重点讲授。教师根据学生自学探究中出现的问题,确定重点讲授内容,讲授时着重讲解重点、难点和关键,指出知识形成的来龙去脉、因果关系、知识间的内在联系和区别,使学生在自学的基础上,牢固、准确地掌握新知识,取得系统、规律性的认识。(3) 综合训练。训练时所选的题目要精炼典型,照顾各个知识点,安排好训练次序,本着先易后难、循序渐进的原则确定训练梯度。(4) 总结巩固。引导学生进行单元总结,把握基本概念、基本规律及知识间的区别和联系,使单元内容系统化,形成整体认识。

单元教学法应力求做到:(1)按全章知识结构划分单元进行整体教学;

(2) 学生学习的主要方法是阅读思考, 实验观察, 联想提问, 讨论交流, 归类巩固; (3) 教师的指导作用是计划组织, 启发点拨, 引导把关, 系统总结, 介绍思维方法和学习方法; (4) 不增加课时, 不增加负担, 教材系统不作大变动。这种教学方法一般设有专供采用单元教学法用的教材。

#### 【自学辅导教学法】

自学辅导教学法是中国科学院心理研究所在总结“程序教学”的基础上提出来的, 首先在数学教学中试验, 总结经验后推广到其他学科。这种方法是把教师讲、学生听的课堂教学方式, 变成以教师指导、学生自学为主的课堂教学方式。在教师指导下, 学生采用课本、练习本、答案本为自学教材, 教师用“启、读、练、知”的方法进行综合教学。“启”就是学生在学习中遇到困难时, 教师及时启发; “读”就是学生自己动脑阅读教材; “练”就是学生独立作练习; “知”就是学生立即知道练习的结果, 自己可以批改作业。

教学全过程大致可分 4 个阶段: (1) 领读练习阶段。思想动员, 使学生乐于自学, 教给阅读教材的方法, 掌握粗读、细读和精读的“三读”方法。(2) 启发自学阶段。使学生适应自学方式, 逐渐形成自学习惯。(3) 自学辅导阶段。巩固自学习惯, 培养独立学习能力。(4) 个性研究阶段。在自学过程中, 充分发挥学生的独立性, 教师仅起启发指导、检查督促和总结提高的作用。

#### 【启发式综合教学法】

启发式综合教学法是苏州大学许国 教授在 80 年代初提出来的, 在国内一些省、市实验, 取得较好的教学效果。启发式综合教学以面向全体学生、大面积提高物理教学质量、不片面追求升学率的思想为指导, 在教学过程中体现以教师为主导、学生为主体、实验为基础, 以培养能力和教给方法为主线的教学思想。

应用启发式进行教学活动的 5 种教学模式是: 以观察为主的启发式、以讲授为主的启发式、以实验为主的启发式、以讨论为主的启发式和以练习为主的启发式。

启发式综合教学法的核心是“启发”与“综合”。所谓启发, 是以辩证唯物主义认识论和现代科学方法论为指导, 调动学生动脑、动手、动笔、动口去认识问题和掌握规律, 去发现问题和掌握解决问题的途径及方法, 使学生增强学习兴趣、端正学习动机, 达到积极主动地学习知识和培养能力的目的。所谓综合, 是指综合各种教学方法的长处, 用到物理教学过程中, 以求获得最佳教学效果。不提倡固定的课堂教学模式和单一的教学方法, 要求从实际出发安排教学过程。

教学结构大致有 3 个中心环节: (1) 设疑引导。设下疑问引起学习兴趣, 引导学生自己学习。(2) 辨疑解难。对学生能发现和能解决的问题, 鼓励学生去辩论, 教师适当点拨, 指出解决问题和抽象思维的方法。(3)

释疑巩固。通过解答问题、做练习、改作业、应用和小结等环节来巩固和运用知识。

启发式综合教学法应力求做到：（1）在整个教学过程中贯彻启发式，根据教学内容，合理地把某一种教学方法与其他几种教学法结合起来，综合应用于物理教学中；（2）体现以学生为主体的思想，调动学生学习的主动性和积极性，让学生有充分的活动机会；（3）以实验为基础，鼓励学生自己设计实验、动手做实验，培养观察实验能力；（4）创造学习情境，课内、外结合，注意全面发展；（5）培养兴趣，养成学习物理的习惯，发展特长和爱好。

#### 【读读、议议、讲讲、练练教学法】

又称“八字”教学法。是上海育才中学在总结多年教学经验的基础上提出来的。八字教学法的基本精神是让学生成为学习的主人，变被动学习为主动学习，变接受式学习为接受与探究相结合的学习。读、议、讲、练的相互关系是：读是基础，议是关键，讲是贯穿教学始终的主线，练是知识的应用。

八字教学法的教学过程是：（1）提出阅读目的和要求，学生在课堂上自己看书、思考，逐步了解教材的基本内容；（2）教师画龙点睛地讲解、答疑，有意识引导学生理解教材的重点和难点；（3）课堂上师生间互相磋商、讨论，主动探索问题；（4）课堂上做练习，基本做到当堂理解、消化和巩固。

八字教学法的基本特点是：教学形式灵活，学生手、脑、口并用，体现了教师为主导、学生为主体的作用；较好地处理了教与学的关系，体现了指导学习与独立探索相结合的学习方式；改变了“一言堂”的局面，从单纯的接受学习转变为主动、积极地学习。

#### 【六课型单元教学法】

又称“最优化教学方式”。是湖北大学黎世洁教授倡导的。该教学法是根据学生的学情，把全章教材按知识的系统结构，分成若干个单元，把8个系统的学习环节改为与之相应的6种课型的教学方式。

8个系统的学习环节是：制订计划，课前自学，专心上课，及时复习，独立作业，解决疑难，系统小结，课外学习。

6种课型是：（1）自学课。在课堂上按印发的自学提纲去阅读教材，做实验，分析数据，得出结论，解释规律。（2）启发课。在教师引导下，解决学生带有共性的疑难问题，深入理解概念和规律。（3）复习课。按提纲系统复习，使知识系统化、概括化。（4）作业课。明确思路和方法，形成比较完整的解题方案，独立完成作业。（5）改错课。师生结合共同审查批改作业，开阔思路，澄清错误认识。（6）小结课。综合内容，将已学知识进一步系统化、概括化，使学生的技能进一步综合化、熟练化。六课型单元教学法改变了传统的课堂结构和教学组织形式，减轻了学生负担和教



师批改作业负担。

### 【有序启动式教学法】

有序启动式教学法是齐齐哈尔师范学院辛培之教授倡导和实施的教改实验，在我国一些省、市、地区实验，比较有影响。该教学法的精髓在于“有序”和“启动”。所谓有序，指教与学构成的系统是开放系统，与外界有信息交换，是有序的。教学过程的有序体现在由简到繁、由易到难、由低级到高级，教学内容的有序体现在纵横的知识网络有明确的逻辑关系；学生学习的有序体现在符合学生的学习心理和认知结构，以形成完整的知识体系和知识结构。所谓启动，包括“启”和“动”两方面，“启”是指启发学生学习的积极性，体现学生的主体地位；“动”是指以教学动态观点调动学生动眼观察、阅读，动手实验、操作，动脑思考，动口议论、表述，动笔练习、记述。

有序启发式教学的基本内容包括5个方面：实验教学研究；基础理论知识教学研究；习题教学研究；课外活动教学研究；培养能力教学研究。有序启动的基本精神体现在7个教学环节上，即阅读，实验，讨论，释疑，练习，小结和巩固。

教学全过程分4段进行：第一为适应阶段，师生都要适应以学生为主体的教学活动；第二为形成阶段，学生形成自学习惯，能总结概括所学知识，各种能力达到一定水平；第三为发展阶段，能独立设计和操作实验，独立地去获取新知识；第四为巩固阶段，通过复习总结，能用所学知识去分析和解决实际问题。

有序启动式教学法应力求做到：（1）坚持以实验为基础，注重实效，防止形式主义；（2）坚持将有序与启动有机地结合为一体，体现“教学相互作用”的思想；（3）有序与启动要贯穿于教学全过程；（4）重视反馈，建立检测指标；（5）全面衡量教学成绩。

### 【纲要信号图示教学法】

纲要信号图示教学法是一种由字母、单词、数字或其他“信号”组成教学图表，把讲述的内容提纲挈领、突出重点、简明扼要地表现出来，以图表作为信息传递给学生的教学方法。它是前苏联乌克兰顿涅茨克市中学教师B·沙塔洛夫提出的。他认为既然人们能借助于各种新的生产工具减轻体力劳动的负担，教师就应创制一种科学的教学方法，以减轻学生负担，提高教学质量。该方法的核心是“纲要信号图”。

编制图表的要求与做法是：（1）从教材的整体结构出发，以理论知识为指导，以知识体系为骨架来编制图表；（2）采用“大块”集中讲授理论知识的方法，抓主要、本质的内容，以重点为纲进行编排；（3）以事物之间的有机联系，将分散的知识纳入整体知识体系中，使知识系统化和条理化；（4）编制图表时体现科学性和逻辑性，以合理的布局制成醒目、直观、有吸引力的图表。

课堂讲授和复习巩固时可运用纲要信号图示教学法，它可分成5个阶段：（1）教师按教材内容进行详细讲解；（2）出示图表进行第二次讲解；（3）把小型“信号图表”分发给学生进行消化，大型图表展示在教室墙上，便于学生对比学习；（4）课后学生按图表复习；（5）下节课上按图表回答问题。

纲要信号图示教学法应力求做到：教师认真研究教材，对内容进行高度概括，把握知识的主干；图表醒目，用不同颜色区分主要知识和次要知识。该方法的优点是：理论先行，推动教学进程，图表的浓缩性强，容量大，学生掌握的知识多，教学任务简明化。其缺点是容易造成学生无意识地死记硬背教材，制约了学生智力的发展。

### 【发现教学法】

发现教学法是教师提供适合学生进行再发现活动的教材，学生通过自己探索、尝试过程来发现知识，以培养学生提出问题、探索发现问题能力的教学方法。早在18、19世纪，法国教育家J.J.卢梭和美国教育家J.杜威等曾经提倡实践过。20世纪60年代，美国心理学家J.S.布鲁纳根据瑞士心理学家皮亚杰的智力结构发展理论，指出每门学科都有它的基本结构，要培养具有发明创造能力的人才，不但要使学生掌握学科的结构，理解基本概念和原理，而且要发展学生的探索精神，从学科内容本身激发学生学习的动机。运用发现法，就能达到上述目标。

发现法的基本特点是强调学习过程和学习动机，强调知识结构和能力结构的辩证统一，提倡直觉思维。

发现教学法的具体实施一般可分为以下几个步骤：（1）选择探究的问题，明确要发现问题的方向和目标；（2）创设探究问题的情境，激发学生探究的需要和兴趣；（3）引导学生猜想、臆断等，教会探索的方法；（4）归纳总结，上升为概念和原理，得出结论；（5）将知识转化为活的能力。发现法的优点是：（1）学生亲自发现事物间的关系和规律，产生兴奋感和自信心，激发学习的内在动机；（2）学生能掌握发现的思路和方法，养成思考问题的习惯，培养独立分析问题和解决问题的能力；（3）由于学生自己把知识系统化、结构化，就能更好地理解、掌握和记忆学习内容，也能运用所学知识解决实际问题。

### 【启发发现法】

启发发现教学法又叫“探索发现法”或“指导研究法”，是上海师范大学附属中学和广西玉林高级中学等学校试验的一种教学方法。它是以探索性思维为目标，以再发现为步骤，向未知领域探求知识，发现问题和解决问题的教学方法。

启发发现法的基本特点是：教师根据教材结构特点和学生的思想、知识及能力水平，创设实验条件，引导学生通过阅读、观察、实验、思考、讨论和听讲等途径，主动研究问题、总结规律，从而达到获得知识、发展

能力、学会方法、促进学生全面发展的目的。

启发发现法的教学过程可分为4种类型和5个阶段。4种类型是：理论教学中的启发发现，实验课中的启发发现，习题课中的启发发现和复习工作中的启发发现等。5个阶段是：（1）启动阶段。教师提出需要探究的问题，激发求知欲，调动学生带着问题积极主动地学习。（2）指导探索阶段。指导阅读、观察、实验，取得探索问题的感性材料，掌握研究方法。（3）指导加工整理阶段。引导学生进行分析、综合、鉴别，找出事物的本质特性和变化规律。（4）启发发现阶段。运用概括、推理，抽象出概念和规律，获得新知识。（5）运用、巩固知识阶段。指导学生解决实际问题，在运用中深化认识、巩固知识、形成技能。这种方法的优点是：有利于培养学生探索问题的思路和方法；养成思考问题的习惯；锻炼自己设计实验的能力；进而发现、理解新知识。

#### 【掌握学习教学法】

掌握学习教学法是指学习者在最佳教学状况以及足够时间的条件下掌握学习材料的一种学习方式。美国心理学家B.S.布鲁姆是提倡这一学习方式的代表。掌握学习法认为如果对“掌握学习”规定明确的标准，按规律有条不紊地进行教学，并给予足够的时间，以便达到“掌握学习”的程度，特别是在学生面临学习困难的时候给以帮助，那么所有的学生事实上都能够学得很好。而学习成绩的差异，主要表现在达到“掌握学习”所需时间的长短。

布鲁姆提出，有助于“掌握学习”的良好条件是：（1）清楚理解教学目标；（2）具备必要的知识和技能；（3）具有学习的意愿，不惜花费时间和精力；（4）给学生提供学习材料的有关线索；（5）对学习成绩给以强化、反馈和校正。教师的施教行为应该是：准确诊断学生的情况，预测他们将来的成绩；规定各种适当的学习任务；按要求定向学习；及时反馈学生的学习及进步情况；对学习进步较慢的学生及时给予辅助性教学。

掌握学习教学法的教学过程可分为5步：（1）确定教学内容和要求；（2）制定实施教学计划；（3）测量学生的学习情况；（4）根据存在的问题给学生第二次学习机会（即辅导）；（5）有针对性地对没有达到“掌握学习”的学生讲述有关内容。

掌握学习教学法的基本特点是：教学目标明确，重视强化、反馈和矫正的价值，不把考试作为教学终结，在学习者和学习结果之间架起桥梁，帮助学生增强自信心和学习兴趣。不少人认为，在注意真正掌握学校规定的学科内容，破除分数、等第观念的情况下，“掌握学习”是可取的。但它对学生独立学习的训练较少助益，学生的灵活性和创造精神受到损害。

#### 【四段论教学法】

四段论教学法或“五段论教学法”，是德国教育家J.F.赫尔巴特提倡的教学方式。19世纪传入中国，对中、小学教育有一定影响。赫尔巴特把

人的心理过程归结为认识过程，把教学过程看作是从清楚明确的感知，到与旧观念的联系与扩大，再到应用的过程。这种感知觉越丰富、越系统，就越能吸收新知识。

四段论教学法把教育分为管理、教学和德育 3 部分。对管理提出纪律要求，教学要以严厉的态度和方法管理，但管理并不是教育，而是进行教育的必要条件。教学是教育的最基本的手段，教学应以多方面的兴趣为基础，他把兴趣分为经验的、思辨的、审美的、同情的、社会的、宗教的等 6 种，教学的任务在于通过不同的学科来形成儿童的各种活动观念。还主张多方面的教育必须是完整而统一的，学生认识到的一切应当是一个统一体。他提出教学形式阶段的理论，把教学分为 4 个阶段：（1）明了——给学生明确地讲授新知识；（2）联想——新知识要跟旧知识联系起来；（3）系统——作概括和结论；（4）方法——把所学知识应用于实际（习题解答、书面作业等）。与这 4 阶段相应的心理状态是注意、期待、探究和行动。赫尔巴特的学生把第一阶段分为预备和提示两个阶段，连同联想、系统、应用一起又称为“五段论教学法”。

四段论教学法，对待学生采取严酷的态度和方法，很少注意学生的创造性和主动性，教育思想是理智主义的、形式和机械的，但也有其积极因素，即注意教育学与心理学的相互联系，重视教学管理和德育教育，注意教育的系统性和社会性，主张发展学生多方面的兴趣。

#### 【程序教学法】

程序教学法是一种使用程序教材，以个人自学形式进行学习的教学方法。学生借助于机器独立地进行学习，因此又称机器教学。程序教学是美国教育心理学家 S.L. 普雷西根据 E.L. 桑代克学习定律中的练习律、效果律和近因律，设计的以练习材料进行自动教学的机器。后来，美国实验心理学家 B.F. 斯金纳以此为基础，以操作条件反射和积极强化理论，设计了程序教材进行程序教学。这种教学的理论根据是，认为有机体的行为要受环境的制约，来自环境的刺激要引起有机体的反应，强化正确反应，消退错误反应，能提高学习的效果；学习效果及时反馈能加强学习的动机；以效果律控制学习行为，并经多重强化和连续强化，把有效行为保持在一定的强度水平上。60 年代初，世界一些国家先后推行了这种方法。

各派心理学家的理论观点的差异，先后出现多种程序模式，主要有：

（1）斯金纳的直线式程序。它把学习材料分成许多连续的小步子，逐步呈现问题，学生逐步构答，答对了前进，答错了用正确答案纠正后再前进。

（2）普雷西的直线选答式程序。它也是逐步呈现问题，但要学生在预定的正确、错误答案中选答。答对了前进，答错了要另选，直到选对了才前进。

（3）美国 N.A. 克劳德多重选择反应的衍支式程序或内在程序。它把学习材料分成内容较多、步子较大的逻辑单元，将逻辑单元编成主干程序，又把学习时常犯的典型错误编成分支程序。学完某单元后，进行选答式的检

查性测验，答对了进入下一单元，答错了就引入分支程序，经补充知识、纠正错误后，回到原单元重学重答，直到答对了才前进。（4）英国 H. 凯直线式与分支式相结合的程序。它对各种知识、概念有不同水平的解释。学生学习主序列中的知识  $n$  时，答对了，进而学习知识  $n+1$ ，答错了，则转而学习具有补充材料的子序列  $n_A$  或  $n_B$ ，直到答对了再进而学习  $n+1$ （不回到  $n$ ）。

程序教学法的优点是：（1）学习目的明确，循序渐进，能增强学习者的积极性和责任感；（2）学习时能手脑并用，培养自学能力；（3）自定学习步调能适应各人的学习速度，后进学生也能获得明显进步；（4）学习效果的及时反馈能加强学习的动力；（5）有关键刺激和构答引导，可以减少错误反应，提高学习效率。其缺点是：严格规定了学生前进的步子，不利于培养学生的主动性、创造性。在程序教学中，师生之间、学生之间关系都不密切，削弱了教师的主导作用和学生之间的信息交流。

#### 【暗示教学法】

暗示教学法是保加利亚心理学家 G. 洛扎诺夫提出来的。它是以现代生理学和心理学为基础，运用暗示手段，激发个人心理的潜在意识，将各种无意识通过暗示因素组织起来，提高教学效果，达到自我发展的教学方法。暗示教学法认为，理智和情感、分析和综合、有意识和无意识，是不可分割的，而暗示是环境和个人之间一个经常的、不知不觉的或意识模糊的刺激影响，它能产生巨大的“熏陶”作用。在教学过程中，要通过暗示建立无意识的心理倾向，影响人的感知觉、记忆、想象、思维、情感、意志等全部心理活动，创造强烈的学习动机，开发潜力，提高记忆力、想象力和创造性解决问题的能力，充分发展自我。这种教学法必须精心设计教学环境，系统运用启发、联想的力量，在清醒而放松的状态下，让个人知道暗示过程，从而采取积极的态度来提高学习效率。

暗示法的教学原则是：（1）学生要有自信心，愉快而不紧张；（2）用情感调节理智，无意识调节有意识；（3）设置情境，采用交际性练习，短期内学习大量材料；（4）师生互相信任和尊重。实施方法可概括为两种：一是心理学的方法，教材、设备、教学组织都要从心理学的角度作相应的改变；二是教育学的方法，要在尊重学科本身特点的前提下，重新组织教学单元，加强教学的整体性、逻辑性和情感的效果。

在运用暗示教学法时应注意：（1）暗示的目的必须明确，教师要有明确意识，思维要有特定的目标；（2）暗示的内容必须具体，要使学生无意识的心理活动与教师的预想共鸣；（3）暗示要把握适当时机，使学生的无意识心理活动向有意识心理活动转化；（4）注意设计暗示环境。

#### 【问题教学法】

又称“五步教学法”。是教师针对学生在生活、活动中遇到的困难，提出的问题，帮助他们分析问题，寻求假设，进行实验，以求解决问题的

教学方法。问题教学法开始于以美国教育家 J. 杜威为代表的进步教育派。杜威强调人的经验的主观性,他把教学过程看作是使学生在活动中增长“经验”的过程,是“从做中学、从经验中学”的过程。在教学过程中将体验到的模糊、疑难、矛盾和某种混乱的情境,转化为清晰、连贯、确定和谐的情境,把学生引向问题的确定、解决和应用。

五步教学法的教学过程可分为 5 步:(1) 情境。给学生设置一种情境,学生在情境中发现疑难,产生兴趣。(2) 问题。从疑难中提出问题,引起思考。(3) 假设。学生应获取资料 and 进行必要的观察,提出解决问题的假设。(4) 解决。推断何种假设能解决问题,提出解决问题的方法。(5) 应用。学生通过做来验证自己的想法。后来,杜威把这一过程修改为暗示、问题、臆说、推理和试证。

杜威的哲学观是主观唯心主义的,把自然(客观世界)归结为经验,把德国教育家 J.F. 赫尔巴特的教育称为保守的传统教育,而把自己创立的实用主义教育称之为进步的现代教育。但问题教学法重视用问题引导学生开展探索和获取新知识,发展学生的智力和创造力,在传授系统的科学知识过程中注意应用,方法和形式强调多样化,这些都是有积极意义的。

#### 【个别教学法】

个别教学法是教师分别对学生进行指导的教学组织形式。它废除了按年级和班级进行的教学方式,在教师指导下,学生各自独立地在实验室(作业室)内根据拟定的学习计划,以不同的教材、不同的速度和时间进行学习,以适应不同学生的能力、兴趣和需要,发展个性。美国 H.H. 帕克赫斯特创立的道尔顿制(Dalton Plan)和美国 C.W. 沃什伯恩创立的温内特卡制(Winnetka Plan)都是这种教学形式。

道尔顿制的主要措施是:(1) 布置各种作业室来代替传统的教室,室内按学科性质设置参考图书,实验仪器、标本等教学和实习用具,并有教师指导学生学学习;(2) 学习内容分月安排,师生按月订立“学习公约”,教师根据学生的程度指定作业;(3) 学生根据自己的能力,自由地掌握学习的速度和时间,并可与教师及同学研究讨论;(4) 学生完成本月的公约,经教师考试,及格后才可以学习下月的公约;(5) 把学生的成绩和进度登记在学习手册上。

温内特卡制与道尔顿制有很多相似之处,不同的是温内特卡制把课程分成两部分,一部分是必须学习的基本知识和技能,另一部分是社会意识的活动,目的在于培养学生团体生活的习惯、互助合作精神和发展其创造能力。

个别教学法弥补了班级教学制度的不足,在发展学生个性、因材施教、培养学生独立工作能力等方面都有积极作用,但它们又过分强调个性差异,忽视了集体作用与德育,容易产生偏科和放任自流的倾向,因此在本世纪 30 年代后日渐少用。但自 50 年代以来,工业发达国家为了适应经济

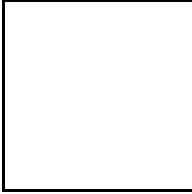
和科学技术迅猛发展的需要，为了培养高级科学技术人才，个别教学法又受到一些教育家的重视。物理教学由于难度大，学生能力差异较大，对好、中、差生采用“分餐式教学法”，也属于个别教学的一种类型。

## 现代物理学·新科学技术

### (一) 粒子物理

#### 【质子】

质子的故事古老而又新奇。1919年卢瑟福用天然放射性物质产生的



现了元素的人工转变，多少世纪来“点石成金”的梦想成为现实。1932年中子发现以后，伊凡宁柯和海森堡捷足先登立即提出“原子核由质子与中子构成”的主张，质子成了组成物质的最重要的基石。半个多世纪来，质子以它的资格老、稳定性强、分布面广、所处位置重要这几点成为基本粒子大家族中不可缺少的顶梁柱。今天，质子依然是粒子物理学家瞩目的对象，在古老的质子身上，科学家谱写了新的篇章。

质子在原子核内可以转变为中子，但自由质子是稳定的，寿命无限长。这个传统观念现已受到挑战。1974年乔治(Georgi)和格拉肖(Glashow)提出了把强、弱、电三种相互作用统一在一起的SU(5)大统一理论。按照这种理论，质子是不稳定的，它估算出质子的寿命约为 $10^{28} \sim 2.5 \times 10^{31}$ 年。大统一理论还作出种种诱人的预言：它可以自动得出电荷量子化，即所有电荷应是 $e/3$ 的整数倍的结论；它还可以说明宇宙中反物质比物质少的原因，这对探索宇宙起源提供了线索……科学家们的想象力甚至走得更远，他们推测，一旦证实质子真的会衰变，大约 $10^{35}$ 年以后，宇宙将成为稀薄的电子正电子等离子体。当然，这对于人生不过200年的当代人，毕竟是太遥远了。

于是测定质子的寿命成为大统一理论能否安身立命的试金石。由于质子寿命很长，估计为 $10^{31}$ 年左右，这就是说一年期间在 $10^{31}$ 个质子中才会有一个质子蜕变。为了消除宇宙射线的干扰，整个实验要在地底深处进行。1983年前后，美国、印度、日本等国的粒子物理学家做了一些探测质子衰变的实验。他们不惜巨资，一头钻进不见天日的地下矿井，耐心细致地测量。其中最有说服力的实验是美国IBM公司的一个协作组在俄亥俄(Ohio)州克里弗兰(Cleveland)市以东600多米的一个盐矿中进行的。探测装置的中部是 $17 \times 18 \times 23\text{m}^3$ 的纯水，矩形体的六面布置了2048只光电倍增管，每只直径为12.5cm，想以此来探测正电子和两个高能光子通过纯水时产生的契仑柯夫辐射。经过204天的连续观察，未测到一个质子衰变事例。据此推算，质子的寿命一定大于 $1.7 \times 10^{32}$ 年，从而否定了SU(5)理论。但另一个由印度和日本科学家组成的实验小组，在地下3000米的柯拉金矿的



废矿井中，进行的实验却传出佳音。经过两年观察共发现 6 个质子衰变的事例，其中 3 个认为是比较可靠的，据此推算，质子的平均寿命约为  $7 \times 10^{30}$  年，与大统一理论相符。但这一实验结果比较粗糙，没有得到公认。质子是否衰变，尚在探索之中，一时难以定论。

除了质子的寿命，自 50 年代以来质子或范围更广的强子的内部结构一直是粒子物理学家感兴趣的问题。这里有两条线索。一条是盖尔曼（Gell-mann）的夸克理论，另一条是高能电子弹性散射和深度非弹性散射的研究。

用带电粒子作炮弹来研究物质结构是一种始于卢瑟福经典实验的传统做法。循着这条路，美国的霍夫施塔特（Hofstadter）从 1950 年起使用斯坦福大学直线加速器把高能电子射向金、铅、铝、铍等靶子，电子被核子弹性散射，按电子的能量和散射后的偏转角对电子进行计数，从而描绘出核子的电荷分布。1957 年他利用更有力的加速器和散射装置，发现质子和中子具有同样的大小和形状，直径为  $10^{-14}$  厘米，并得出核子的磁矩分布。霍夫施塔特通过高能电子弹性散射研究核子电磁结构的杰出贡献，使他荣获 1961 年度诺贝尔物理学奖。

1967 年初，20GeV 的电子直线加速器在斯坦福大学建成，最初重复了弹性散射阶段的工作，没有新的发现。有的物理学家戏称：“看来桃子没有核。”但随着能量增大，实现了高能电子深度非弹性散射过程，出现了新现象。实验结果的分析表明质子内部存在更小的点状粒子。弗里德曼（Friedman）、肯达尔（Kendall）、泰勒（Taylor）因上述高能电子深度非弹性散射实验而获得 1990 年度诺贝尔物理学奖。实验后不久，费曼提出了部分子模型，他把核子内部的点状粒子称为部分子（Parton），并解释了实验中出现的称为无标度性的典型现象。现在一般倾向于认为高能电子所“看”到的部分子正是夸克。实验表明，质子内两个 u 夸克和一个 d 夸克携带了质子动量的 50%，另外 50% 的动量由不带电的胶子携带。可是至今未探测到自由夸克，圆满解决质子结构问题还有长长的一段路要走。

### 【中微子】

中微子曾是基本粒子家庭中的稳身客。从理论预言它的存在到实验发现它的踪影隔了整整 26 年。即使在今天，依然是云遮雾障，人们难以窥见它的全部风姿。

1914 年，23 岁的查德威克（Chadwick）在卢瑟福指导下研究放射性，他发现原子核衰变中射线的能量分布是连续的，即衰变放射的电子能量从零到一个最大值之间都有可能，而且在任何情况下总是只有衰变电子的最大能量才等于放射过程中母核与子核的能量差。还有一些能量到哪里去了？除了能量外，还有角动量和统计性方面的问题也摆在物理学家面前要求作出合理解释。1930 年 12 月 4 日，泡利在一封公开信中指出，“在原子核中可能存在一种自旋为  $1/2$ 、服从不相容原理的电中性粒子”，他

将它称之为“中子”，从而解决了衰变中出现的问题。1932年查德威克发现中子，1933年费米把泡利的“中子”易名为中微子。尽管从30年代开始中微子在实验上尚属子虚乌有，但科学家从未怀疑过它，一致把它看作是基本粒子家庭中堂堂正正的一员。

一场围捕中微子的战斗从科学先知们预言之日就开始了。观测中微子困难重重。中微子不带电，不能引起电离效应；它只参与弱作用，而不参与强和电磁作用，即使它的静质量不为零，引力作用也极弱，而弱作用的几率极小，中微子必须贯穿若干光年厚的固体物质才能使反应的几率达到1/2；中微子本身又是稳定的粒子，无法从它的衰变产物来追溯它的存在。因此科学家先是只能收集中微子存在的间接证据，并取得不少成果。其中值得一提的是我国物理学家王淦昌在1941年提出的用轨道电子俘获过程探测中微子的方法，这方法至今仍有生命力。直接验证中微子存在的实验由美国的雷因斯(Reines)和柯万(Cowan)领导的实验小组在1956年完成，历时3年。1962年6月美国的莱德曼(L.Lederman)、施瓦茨(M.Schwartz)和斯坦伯杰(J.Steinberger)利用布鲁克海文那台强聚焦质子同步加速器发现存在两种类型的中微子——电子中微子 $\nu_e$ 和 $\mu$ 中微子 $\nu_\mu$ 。莱德曼等3人因此而获1988年度诺贝尔物理学奖。1975年人们发现质量较重的轻子( $m_\tau=1780\text{MeV}$ ，已超过质子的质量)。1990年春，西欧核子研究中心确定存在3种中微子，也就是说除电子中微子 $\nu_e$ 和 $\mu$ 中微子 $\nu_\mu$ 外，还存在中微子 $\nu_\tau$ 。

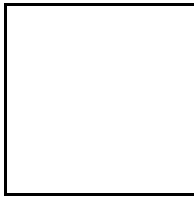
中微子的特性在粒子物理学理论中至关重要。衰变(弱作用过程)宇称不守恒就跟自然界不存在右旋中微子和左旋反中微子有关。前苏联科学家朗道最早提出中微子只具有一种螺旋度(螺旋度是表示粒子的自旋方向和动量方向之间关系的量子数)，并以此作为导致弱相互作用中宇称不守恒的原因，但他没有深究下去，一次历史性的重大突破就此失之交臂。同时李政道、杨振宁和萨拉姆也分别提出类似的想法。后来实验测定中微子的螺旋度为-1，即中微子是左旋的，而反中微子是螺旋度为+1的右旋粒子，证实了上述设想。物理学理论中有这样的结论：只有零质量的粒子(以光速运动)才具有确定的螺旋度。如果中微子确实只有一种符号的螺旋度，它的质量必须是零。中微子到底有没有静质量？如果有，静质量是多少？将会产生什么效应？这些问题是当前科学界议论的热点。测定中微子的质量比仅仅证实它的存在更加困难。1983年前苏联的莫斯科小组根据实验算出电子中微子 $\nu_e$ 的静止质量不低于20eV。相隔不久，美国的两个实验小组得出的结论是 $\nu_e$ 的静止质量必须小于6eV。两国得出的两个数据大相径庭。目前测定中微子质量的实验正在好几个国家的实验室内展开。一旦确证中微子有静质量，粒子物理理论就必须作重大修改。中微子这个小不点儿的身价与日俱增。不仅粒子物理学家对它关怀备至，而且天体物理学家也给以青睐。也许揭开硕大无朋的宇宙演化之谜，倒要请这位渺小绝伦的

中微子先生助一臂之力呢！

### 【夸克】

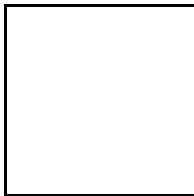
把质子、中子、电子、介子等取名为“基本”粒子，物理学家们无疑是犯了与当年古希腊哲学家德谟克利特同样的错误。最早提出强子结构观点的是费米和杨振宁，1949年他们提出介子是核子与反核子构成的。50年代中期发现了一大批奇异粒子和共振态粒子。这蜂拥而来的大群粒子增加了人们的困惑，难道它们都是“基本”的吗？1956年日本物理学家坂田昌一提出一个模型，他认为在已知的强子中只有3种粒子，即p、n、和它们的反粒子，是基本的，其余强子是它们的复合体。坂田的思想闪耀着辩证法的光辉，他选用的SU(3)群数学工具也是正确的。但后来的研究证明，把p、n、这3个粒子作为基础粒子却是不妥当的。坂田模型的成功与失败之处都可供后人借鉴，显然，应当寻找新的客体作为强子的基础粒子。

从50年代中期起，美国的盖尔曼(Gell-mann)开始研究粒子的分类问题。他将介子和重子分别按自旋J和宇称P分成几个“多重态”，在一个多重态中的粒子再按照同位旋I及奇异数S分类。以赝标介子 $J^P=0^-$ 和重

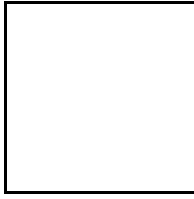


得出，用SU(3)群进行粒子分类是和已知粒子特性最为吻合的。这里，我们无法详述理论的细节，只能泛泛而谈。SU(3)是指3个基础对象间的一种对称性，这3个对象构成SU(3)群的基础表示，更高的表示都是由基础表示构成的。例如基础表示3及其共轭表示 $\bar{3}$ 的组合是： $3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8$ ；3个基础表示的组合是： $3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10$ 。用群论的语言，一个多重态就是群的一个表示，上面第一个等式右边的8对应介子八重态，第二个等式右边的8和10分别对应重子八重态和重子十重态。处于同一个多重态中的粒子彼此性质相近，但由于SU(3)对称性的破缺，质量并不相同。盖尔曼作了一个简单假定并由此得出粒子质量公式，也和实验符合得很好。

盖尔曼的理论虽然吸引了不少人，但多数人仍然将信将疑，特别是对



4个重子共振态( $\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^{++}$ , 质量1238MeV)应属于SU(3)



十重态尚是一幅端倪初露、神龙见首不见尾的图象。1962年日内瓦欧洲核子研究中心举行的国际高能会议上出现重大转机， $\Sigma^*$ 、 $\Sigma^{*0}$ 共5个粒子相继发现。盖尔曼不仅预言奇异量子数为-3的第十个粒子 $\Xi^-$ 存在，而且根据前几个粒子的质量，推断 $\Xi^-$ 粒子的质量为1685MeV，并给出了 $\Xi^-$ 粒子的衰变模式。1964年2月美国布洛克海文实验室的萨米奥斯(Samios)根据盖尔曼预言的衰变模式，经过艰苦努力，终于找到了 $\Xi^-$ 粒子，并确定其质量为 $1686 \pm 12\text{MeV}$ 。这是科学史上颇富喜剧性的一幕，人们不禁回想起上一世纪门捷列夫预言的类硼(钷)、类铝(镱)、类硅(锗)元素最终被发现时的狂喜场面。

1964年盖尔曼提出了夸克模型。根据盖尔曼理论，重子八重态和十重态都是由3个属于基础表示的基础粒子构成，不同的基础粒子共有3种，他称之为u(上)夸克、d(下)夸克和s(奇异)夸克。其性质如下：

	u	d	s
重子数	1/3	1/3	1/3
电 荷	2/3	-1/3	-1/3
奇异数	0	0	-1

3个夸克分别构成了 $p(uud)$ ， $n(udd)$ ， $\Sigma^+(uds)$ ， $\Sigma^-(dds)$ ， $\Sigma^0(uds)$ ， $\Lambda^+(uus)$ 等。

至于夸克这个名称的意义却是众说纷纭。它的英文原义是海鸥之类的鸣声，是个冷僻词。在一篇西方小说《芬尼根彻夜祭》中有这样的情节：海鸟对着芬恩先生高叫3声夸克，芬恩先生生了3个儿子，他通过这3个儿子的行为来表现自己。盖尔曼想用夸克比方3个儿子，意思是通过夸克来显示质子的行为。这谜一样的名称配上夸克谜一样的行为可说是相映成趣。这一点可以用盖尔曼自己的话印证。他说：“现在所有的强子都可以用这3种夸克像搭积木一样拼凑起来。可是夸克的性质太奇特了，所以它们也许根本不存在，只是一种数学符号而已。”盖尔曼没有勇气承认夸克是一种物理实体，可能是出于一种科学家的谨慎。但物质是无限可分的，物质的形态也是无限多样的。夸克携带分数电荷及其他种种特性，不过是物质形态多样性的反映而已。

盖尔曼因此获得了1969年度诺贝尔物理学奖。和盖尔曼同时提出SU(3)对称理论的还有尼曼(Neeman)。值得一提的是，1965年北京基本粒子理论组根据强子结构的动力学研究提出了层子模型，因而夸克在中国又称为层子。

1974年发现的J/ψ粒子的奇特行为归之为第四种夸克——c(粲)夸克的存在,而1978年发现的ψ粒子中,人们又发现了第五种夸克——b(底)夸克的踪影。粒子物理学家相信第六种夸克——t(顶)夸克也是存在的,但迄

今未发现。最新实验确定t夸克的质量下限为质子质量的90倍,可见不同夸克的质量相差很大。

迄今为止,未曾在实验中找到过自由夸克。也许夸克很重,目前的能量还不足以把它们从强子中分离出来;也许由于某种原因,夸克被禁锢在强子内部而不能以自由状态存在,这就是所谓的“夸克囚禁”。孰是孰非,一时难下定论。

### 【宇宙线】

早在18世纪,宇宙线这个神秘的天外来客就已悄悄地闯进物理研究领域。1785年库仑注意到,放在空气中的带电体会逐渐失去电荷,但他未能作出满意的解释。直到1900年前后,随着实验技术的进步,人们才认识到,带电体漏电是因为有极大贯穿本领的辐射充满房内的空间。那么辐射源又在哪儿?有人认为辐射源存在于地球大气之外。循着这条线索,科学家们进行了勇敢的实验探索。最早的气球探测实验是在1900年进行的。1911年奥地利科学家赫斯(Hess)在奥地利航空俱乐部协助下制成10个探空气球,在连续3年内完成10次飞行实验。决定性的实验完成于1912年8月7日,这是赫斯的第9次飞行。上午6点12分,运载着物理学家赫斯、一个驾驶员和一个气象员的氢气球从奥地利的奥西格镇升空,飞行6小时,升到5350米高空。中午,气球降落在德国柏林以东50公里处。赫斯取得一串读数,发现在1500米到2500米之间,辐射强度与地面上的正常值相同,然后,随着气球高度的增加,辐射也明显增强。赫斯得出结论:“目前观测的结果,完全可以用这样的假设来解释:高贯穿本领的辐射是从上空进入地球大气层的;直到大气层低层,仍能在密闭容器中观测到所产生的离子的一部分。”赫斯把这种射线称为“超辐射”,后来密立根把它命名为“宇宙射线”。1934年底,赫斯在纽约洛克菲勒研究所的帮助下,在因斯布鲁克附近的高山上,建立一个研究站,作为经常观测大约海拔7000米以上的宇宙射线之用。赫斯的这些成就使他获得由于宇宙线的贯穿本领很强,它一直被误认为具有射线的特征,这也就是赫斯命名的由来。1927年以后,人们陆续观测到一些现象,证明宇宙线在进入地球大气层之前就是一些带电粒子,它们的运动受到地球磁场的影响。今天我们知道,宇宙线是从宇宙空间射到地球上来的高能粒子,其中93%是质子,6%为α粒子,另外还有少量的电子、β射线和其他原子核。这些带电粒子在星际空间或强或弱的磁场中会偏转,因而无法按其飞来的方向推断它的发源地。目前一种较占上风看法是,它可能来自超新星的爆发。

1929年德国的博特(Bothe)采用他发明的符合电路论证宇宙射线

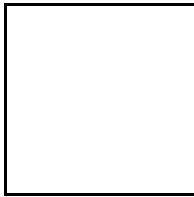
可能是粒子。1932年美国的安德逊(Anderson)和尼德迈尔(Neddermeyer)在宇宙线中发现了电荷为正、质量与电子相同的带电粒子，这就是狄拉克曾经预言的正电子。1933年英国的布莱克(Blackett)发现了宇宙线产生的“簇射现象”。比如说一个能量极高的电子，通过某原子核近旁时(例如穿过铅板或与大气作用)，就会辐射光子。这个光子路过别的原子核时，又会变成正负电子对。只要初始粒子能量足够高，这个过程就会一直继续下去。一个高能电子(或光子)最终竟会变成数以百万计的电子、正电子、光子。由此可以推算出，初始粒子的能量在 $10^{15}\text{eV}$ 以上。1937年安德逊等人又在宇宙线中发现了一种新粒子，现在称为 $\mu$ 介子。稍后，英国的鲍威尔(Powell)发展了感光照相乳胶记录宇宙线径迹的技术，1947年从高空气球所得的资料中揭示了期待已久的 $\pi^+$ 介子(+)的存在。安德逊、布莱克、鲍威尔和博特分别获得1936年、1948年、1950年和1954年度诺贝尔物理学奖。

1953年在我国云南海拔3180米的高山上建立观察站，开始了宇宙线研究工作。1965年，这个站搬往云南东川海拔3222米的高山顶，并建设了大型磁云室。1972年6月在那儿发现了一个可能的重粒子事例，引起世界各国的广泛注意。1976年7月中国科学院高能物理研究所又在西藏海拔5500米的高山上设置乳胶室。我国的科技工作者冒着高原的严寒，如不知疲倦的哨兵长年厮守在仪器旁，默默地奉献对科学事业的忠诚，对祖国和人民无比的爱。宇宙线曾是一只生金蛋的母鸡，但宇宙线成分复杂，含有各种粒子，粒子流很弱，比如 $1\text{m}^2$ 面积上从宇宙空间射来能量为 $10^{14}$ 的粒子每小时大约只有一个，因此宇宙线很难用来进行定量的研究工作。差不多在30年代“宇宙线热”方兴未艾之际，加速器就问世了，宇宙线不再是唯一的高能粒子源。不过，宇宙线中含有能量高达 $10^{21}\text{eV}$ 的粒子，而设计中的美国“超导超强核子碰撞机”，尽管能量高达 $40 \times 10^{12}\text{eV}$ ，与前者相比仍是小巫见大巫。因此，作为极高能区(大于 $10^{13}\text{eV}$ )的高能粒子源，宇宙线仍具有重要意义。近年来利用火箭和地球卫星来研究宇宙线，开辟了现代天体物理学的新领域。

### 【探测器】

我们无法用肉眼直接观察微观世界中倒海翻江、山崩地裂般的种种变化，因此可以说，粒子物理学的发展一开始就同探测工具的创制和改进分不开。不妨从科学史摘录一点有关的史实：1908年德国的盖革发明探测粒子的气体放电计数管，次年盖革和马斯登观测了 $\alpha$ 粒子通过金属薄膜在各方向的散射分布情况，为卢瑟福核式理论的建立提供了实验依据。1911年英国的威尔逊(Wilson)发明记录 $\alpha$ 、 $\beta$ 等带电粒子轨迹的云雾室照相装置。威尔逊云室功勋卓著，依靠它，发现了正电子、 $\mu$ 子、 $K^0$ 介子和 $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 超子等。尽管由于它动作太慢，现已渐趋淘汰。1934年，前苏联科学院物理研究所的研究生契伦柯夫(Cherenkov)发现了契伦柯夫效应：当快

速带电粒子穿过介质时，只要粒子速度超过光在此介质中的速度，就会产生辐射——契仑柯夫辐射。1951年以后根据这一原理制成的契仑柯夫计数器被用于探测高能粒子。1955年发现反质子，用的就是这种计数器。契仑柯夫因此而获1958年度诺贝尔物理学奖。1944年美籍德国人卡尔曼（Kallman）利用光电倍增管设计发明了闪烁计数器，大大提高了计数速度。1945年美国鲍威尔（Powell）发明探测带电粒子的照相乳胶记录法。1947年用它发现 $\pi$ 介子，以后又发现了 $K^\pm$ 介子、 $\Lambda^-$ 超子、 $\bar{\Lambda}^0$ 反超子等新粒子。1952年美国的格拉塞（Glaser）发明气泡室。其原理与云室相仿，利用接近沸腾的液体在粒子径迹上汽化成泡的现象，并用快速照相把高速带电粒子径迹摄成照片。格拉塞因此获得1960年度诺贝尔物理



态粒子。1959年我国王淦昌教授等发现 $\bar{\Lambda}^-$ 反超子，就用了液体丙烷气泡室。气泡室发展很快，今天的气泡室结构复杂，工程浩大，造价昂贵。

上述种种探测器可分为两类。一类能对粒子计数但不能记录粒子的轨迹，如各种计数器。但它有很好的时间分辨率，可与电子线路联合使用，对大量粒子进行统计测量以作定量的研究。另一类则能记录粒子的径迹，如云室、核乳胶、气泡室等。它们各有特点。那么能不能兼取两者之长，设计一种既能计数又能记录径迹的新型探测器呢？1957年日本的福井崇时和宫本重德首先注意到提高氖管的气压可以使放电只在带电粒子通过的地方发生，从而提出了火花室的方案。1959年制成并投入使用。1962年利用火花室发现自然界中存在两种中微子：电子中微子 $\nu_e$ 和 $\mu$ 中微子 $\nu_\mu$ 。火花室兼备径迹探测器和闪烁计数器两者的功能；且结构简单，使用方便。但它也存在不少缺点，如死时间较长，不能精确测定粒子的性质等。现在火花室已为多丝正比室和在多丝正比室基础上发展起来的漂移室所取代。多丝正比室是1967年在丝火花室和正比计数器基础上发展起来的，1970年底开始用于高能实验。它是由两块作负电极的平行金属网中间夹一作正电极的平行金属丝平面构成一个单元（称为一个丝平面），用两个到三个相互垂直的丝平面可确定粒子径迹在空间一点的坐标，多个丝平面就可确定粒子径迹在空间的位置。整个室中充以气体，电极间加以直流高压（高压加在正比区）。当高能带电粒子穿过多丝正比室时，路径上的气体原子就电离。电离产生的电子在附近某一金属丝的电场中形成雪崩，其放电的总电量正比于初始电离中电子的数目（所谓正比放电）；放电形成的负脉冲正比于该粒子的电离损失。利用专门的电子学线路将这些脉冲放大，甄别成形，贮存和编码送到计算机分析处理就可知道哪根丝上有信号，从而确定入射粒子穿过室的位置，进一步由多个单元定出粒子径迹。多丝正比

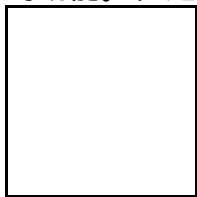
室记录速度快，空间分辨率高，既能计数又能显示粒子径迹，且兼有其他多种功能。多丝正比室和漂移室已成为目前最常用的探测器。

粒子物理的实验和理论进展势必对探测器提出更高的要求。可以设想，新型的探测器将在现实需要的召唤下应运而生。

### 【粒子加速器】

当你手执小锤敲开核桃的硬壳挖取核桃肉的时候，你大概不会想到你的行为跟粒子物理实验家的工作倒有几分相像。为了轰开原子核以至基本粒子，要用威力越来越大的“炮弹”。在粒子物理舞台上，首先登场献技的是天然放射性物质放射的粒子，接着是宇宙线独领风骚，现在则是各种各样的粒子加速器唱起了主角。

用粒子轰击原子核，好比用一块天然的石头去砸碉堡，力量毕竟有限。宇宙线成分太杂，强度太低，何况这种守株待兔式的工作方法终究不合人意。在1919年卢瑟福利用粒子源进行第一次核反应实验后，人们就提出了建造加速器的设想。1932年英国的科克洛夫特（Cockcroft）和瓦尔顿（Walton）建造了一台高压加速器，可以把质子加速到具有  $7 \times 10^6 \text{eV}$  的动能。在这台安置于剑桥大学卢瑟福实验室的加速器上，他们完成了历



$\times 10^6 \text{eV}$ ，锂原子在高速质子的轰击下嬗变为2个氦原子。这一实验，使人们第一次有可能对爱因斯坦的质能关系式  $E=mc^2$  进行实验验证。由于这个功绩，科克洛夫特和瓦尔顿同获1951年度诺贝尔物理学奖。在大西洋彼岸，1928年美国的劳伦斯（Lawrence）从全球闻名的耶鲁大学转到一所普通的州立大学——伯克利的加利福尼亚大学担任物理学副教授，他的这一惊人之举使物理学界同行深感意外。但短短的几年内，加利福尼亚大学就成为世界闻名的研究中心，英才辈出，许多人跻身于世界最优秀的物理教师行列。与英国科学家遥相呼应，也是在1932年，劳伦斯与他的两个研究生埃力伏森（Edlfsen）和利文斯顿（Livingston）一起发明了一种圆形加速器，后来称为回旋加速器。到了1939年，劳伦斯和他的合作者建造的加速器创造了能量高达  $2 \times 10^7 \text{eV}$  的记录，超过了天然放射源的能量水平。劳伦斯获1939年度诺贝尔物理学奖，这是获得这项殊荣的第一个土生土长的美国人。1938年意大利的塞格雷（Segrè）遭到墨索里尼法西斯政权的迫害，移居美国，在伯克利加利福尼亚大学任研究助理兼讲师。他充分利用加利福尼亚大学的回旋加速器，于1940年发现了原子序数为85的元素砹，1941年又发现可以作为制造原子弹材料的元素钚。1955年他与美国物理学家张伯伦（Chamberlain）利用该校的高能质子同步稳相加速器发现了反质子。这是自1932年安德逊在宇宙线中发现正电子后找到的第二个反



粒子，了却了多年来物理学家盼望找到新的反粒子的宿愿。由于这个杰出贡献，两人同获 1959 年度诺贝尔物理学奖。不过，许多评论家认为，对塞格雷来说，他以前的种种贡献比起使他获奖的那个发现更为重要。

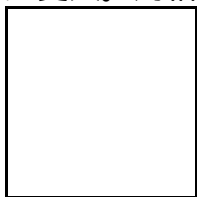
加速器的种类越来越多，被广泛应用的约有 20 余种。但是，尽管新的加速器不断涌现，原有的加速器类型并没有成为只能进博物馆的古董，它们在科技新成就的基础上不断获得改进和发展，继续在各种不同的领域发挥作用。各种类型的加速器简介如下。一、高压加速器。最早由科克洛夫特和瓦尔顿设计，是利用高压电源产生的加速电场使带电粒子一次（或二三次）贯穿得到加速的加速器。它受到高压绝缘的限制，所达能量不高，但粒子流量较大，现在在高能加速器中常用作预注入器。二、回旋加速器。劳伦斯最早设计的回旋加速器的工作原理并不复杂。两个空心的半圆形盒子（D 形盒）放置于磁极之间的空间里，磁场使带电粒子转弯，两 D 形盒之间的电场对带电粒子加速。在原始的回旋加速器的基础上，人们作了种种改进，建造了各种新型的加速器，如稳相加速器、同步加速器、强聚焦同步加速器等。强聚焦同步加速器是当前最主要的高能加速器类型，也是对撞机采用的唯一类型。1959 年欧洲核子研究中心（CERN）建成第一台强聚焦质子同步加速器（代号 CPS），能量 28GeV（1GeV=10<sup>9</sup>eV），其他几台主要的强聚焦质子同步加速器为：美国布鲁克海文，1960 年，33GeV；前苏联，1967 年，76GeV；西欧核子研究中心的 SPS，1976 年，400GeV。最大的强聚焦质子同步加速器位于美国的费米实验室（FNAL），1972 年建成，能量为 500GeV，主加速器的直径约 2 公里，整个费米实验室占地几万亩。三、直线加速器。有电子直线加速器和质子直线加速器之分。质子直线加速器的结构是在一个大圆筒里有一系列一个比一个长的称为漂移管的铜管电极排成一直线，质子在漂移管内匀速运动，当通过漂移管间隙时就不断加速。60 年代初美国建成一台 800MeV 的质子直线加速器，能量虽不高，但粒子束流强度大，且引出和注入方便。60 年代末电子直线加速器的能量增加到 20GeV。现在，直线加速器也常作为圆形加速器的注入器。

1969 年，意大利建造了一台 3GeV 的对撞机，现在对撞机已成为最重要的高能物理实验设备。美国利用超导磁体将那台 500GeV 的强聚焦质子同步加速器改装成为质心能量高达 1600GeV 的质子、反质子对撞机，可以说是伏枥老骥变成了千里骏马。

### 【对撞机】

大型加速器体积越来越庞大，造价越来越昂贵，这就迫使人们寻找能量高而投资少的新型加速器。1956 年，凯尔斯特（Kerst）和奥尼尔（O'neil）建议用两束运动粒子相互对撞以得到较高的有效能量。撇开技术上的困难不谈，这一建议本身并非只有非凡睿智的人方能想到。日常经验告诉我们，一辆飞速奔驰的汽车跟一辆静止汽车相撞较之两辆飞速奔驰的汽车迎面相撞，其破坏程度自不可同日而语。相对论效应推波助澜使两者差

距更大。用相对论不难算出，若用高能质子去轰击静止的质子靶，那么



子的静止能量 938.3MeV)。这表明有用能量  $W$  与入射粒子能量  $T$  的平方根成正比。入射粒子能量增加 100 倍，有用能量只增加 10 倍。其实这点也不难理解。根据相对论，质量随能量的增加而增加。一辆汽车跑得越快，质量就越大，渐渐变得像一列火车那么重了。这一辆像火车一样重的汽车与一辆静止的、质量不变因而相对来说轻飘飘的汽车相撞，后者犹如挡车的螳螂并不能使隆隆而过的庞然大物的能量发生很大的改变。也就是说，在这种碰撞中能用于“发热”的能量（指引起反应、激发内部自由度或产生其他粒子的能量）是很少的。而对撞就不一样，此时两辆汽车都越跑越重，砰然相撞，力量之巨可想而知。计算表明，用  $T=500\text{GeV}$  的质子轰击静止的质子靶，有用能量仅为  $30.6\text{GeV}$ ，相当于两束  $15.3\text{GeV}$  的质子对撞。对静止质量更小的粒子（如电子），对撞的好处更为显著。例如，靶电子静止，要得到  $30\text{GeV}$  的有用能量，入射电子的能量竟要高达  $9000\text{GeV}$ ！

对撞机就是这样一种利用两束反向运行的粒子束对撞以提高有效相互作用能量的高能物理实验设备。它的结构与同步加速器极为相似，高能粒子（质子、电子等）要用别的加速器注入，这些粒子在对撞机的环形真空室内贮存起来不断回旋，积累到较高密度以增加对撞的机会。在对撞机上专门建有供对撞的直线段（对撞区），对撞产物用探测器探测。对撞机的优点已如上述，不过它也有一定的局限性。它不能进行更多种粒子的对撞实验，比起超高能加速器，它每秒平均事例少，实验技术上有更多的困难。因此定量的精细工作，还是利用高能粒子流与静止靶作用来进行，以弥补对撞机的不足。

1969 年第一台意大利的正负电子对撞机建成，质心系能量（下同）仅为  $3\text{GeV}$ 。1971 年西欧（欧洲核子研究中心，似法文缩写 CERN 定名）建成  $65\text{GeV}$  的质子对撞机。1979 年美国建成  $36\text{GeV}$  的正负电子对撞机。80 年代初，西欧的、能量为  $450\text{GeV}$  的强聚焦质子同步加速器改装成  $540\text{GeV}$ 、后又提高到  $900\text{GeV}$  的质子反质子对撞机，质子和反质子在其中运行而不丢失的距离已超过冥王星的轨道直径。美国则利用超导磁体技术将一台能量为  $500\text{GeV}$  的质子强聚焦加速器改装成高达  $1600\text{GeV}$  的质子反质子对撞机。1986 年日本建成  $60\text{GeV}$  的正负电子对撞机。1987 年美国建成  $100\text{GeV}$  的正负电子直线对撞机。1989 年西欧建成  $110\text{GeV}$  的正负电子对撞机，并利用超导高频腔，将能量提高到  $200\text{GeV}$ 。德国正在建设  $314\text{GeV}$  的电子质子对撞机。西欧 12 个国家通力合作，经过 30 年努力，终于率先发现  $W^\pm$ 、 $Z^0$  粒子。在 1989 年底到 1990 年春，进一步将  $Z^0$  粒子的许多性质数据测量出

来，并确定中微子数目为 3，一举夺走美国保持了 35 年的高能物理研究的领先地位。美国岂能甘心，已开始设计 40TeV (1TeV=10<sup>12</sup>eV) 的超导超级质子对撞机 (SSC)。这台对撞机含有两个巨大的磁场圈，粒子反应通道的直径有 3 米，延伸长度达 23.7 公里，总投资约 82.49 亿美元，是本世纪结束前世界上最大的一项科学工程。倡导者认为一旦建成可与 1969 年人类登月的壮举媲美；当然，反对者也大有人在，对它的实际效益尤为怀疑。几经周折，终于下马。西欧则计划建设能量为 16TeV 的质子对撞机。从 30 年代第一台加速器问世以来，平均大约每隔 8 年，加速器的最高能量就提高将近 10 倍。这场加速器竞赛，虽然远没有像核军备竞赛那样惊心动魄，也没有像空间技术竞赛那样令万众倾倒，但同样紧张激烈，其结果将多方面影响 21 世纪的科学进程。

我国自 1956 年起加入前苏联杜布诺联合原子核研究所并承担该所部分经费。1965 年退出该所，着手建立自己的高能物理实验研究中心。1978 年重新计划建造我国的高能物理实验中心，第一步先建造一台能量为 50GeV 的质子同步加速器。1980 年底下马，经两年反复酝酿讨论，终于决定建造质心能量为 4.4GeV、将来可以提高到 5.6GeV 的正负电子对撞机以及相应的探测谱仪和数据处理中心。1984 年重新上马，1988 年胜利竣工。这台对撞机的性能优于国外现有几台同样能区的对撞机。1992 年 4 月，我国科学家在北京正负电子对撞机上的一项实验研究中，获得了  $\mu$  粒子质量的最新数据，这是我国以至国际高能物理界近期取得的最重要的成果。

### 【真空】

真空的观念从古到今经历了深刻的变化。顾名思义，真空的原始含义必然是指一无所有的空间。古希腊亚里士多德学派曾断言“自然害怕真空”，否认真空存在的合理性。然而托里拆利实验以无可辩驳的事实证明获得真空的可能性。牛顿曾经对自己的万有引力定律中那种穿越真空的超距作用表示怀疑，但超距作用的观点还是为当时多数物理学家接受。与此同时，反对超距作用的人，从笛卡尔开始，把一种叫做“以太”的神秘物质引进了物理学。1831 年法拉第作出了他最伟大的发现——电磁感应。他也不相信有空虚的空间存在，但他认为没有必要假设“以太”的存在，1932 年他初步提出“场”的思想。到了 20 世纪初，“以太”终于寿终正寝，而场作为物质存在形态已经成为现代物理的台柱。

爱因斯坦说，不是物质存在于空间中，而是物质具有空间广延性。脱离物质的空间是不可思议的。如果说法拉第的场还可以勉强看作是叠加在真空之上的，那么下述的狄拉克理论则是旨在讨论真空本身的结构了。1928 年二十六岁的狄拉克建立了狄拉克方程，这是相对论性量子力学的重要组成部分。狄拉克方程既有正能解，还有负能解，也就是说，允许存在电子能量为负值的状态，而且负能级没有下限，任何一个电子都可以无止境地堕入这个无底的负能深渊，从而无限地释放能量，这显然与事实不符。为

摆脱困境，狄拉克根据泡利不相容原理，大胆假设所有的负能级事先已被大量电子占满，从而正能级上的电子无法再往下跳。为了解释实验观察不到负能电子这个事实，他还假设已经填满的负能电子海造成的总效果为零，即整个负能电子海所有的可观测量——电荷、质量、动量等等都是零。狄拉克设想的负能电子海显然就是平时所说的真空。负能电子海（真空）中的电子吸收了一定能量的电磁辐射（光子）可跃迁到正能态成为普通电子，同时电子海中出现了一个“空穴”，“空穴”相当于一个质量与电子相同而电荷相反的粒子，并且因为缺少了负能而具有正能量，这就是狄拉克预言的正电子。1932年美国的安德逊（Andersson）从宇宙线中发现了正电子。狄拉克方程对所有自旋为 $1/2$ 的粒子都是适用的。这表明真空在吸收了一定能量的电磁辐射后就能从中产生正负电子对、正负 $\mu$ 子对……可见，真空本身就是物质存在的一种形式，而不是不存在物质的空间。

按照现代物理学的观点，微观粒子具有波粒二象性，我们可以对不同的粒子引入相应的“量子场”，反之对场进行量子化，就可以把连续的场转变为相应的粒子。通过量子化了的场来描述高能微观粒子的产生、消灭和转化，这就是量子场论，它是研究粒子性质和相互作用的主要工具。其中，按量子场论的方法研究带电粒子与电磁场之间相互作用的那部分理论就是量子电动力学。现代物理学定义量子场的基态（能量最低的状态）为真空态。在真空的情况下，所有量子化的场（电磁场、电子场等等）都处于不激发的状态。这时虽然没有光子，没有电子，但是电磁场、电子场还在，它们只是没有激发而已。真空的电磁场仍然可以和电子发生作用，真空的电子场仍然可以和光子发生作用。在量子电动力学里，利用电磁场的“真空零点振动”和电子场的“真空极化”成功地计算了氢原子能级的兰姆移位和电子的反常磁矩，在极高的精度上与实验符合。真空又是不对称之源，从真空对称性自发破缺出发可使没有质量的规范粒子 $W^\pm$ 、 $Z^0$ 获得质量，从而为弱电统一理论的建立铺平了道路。有人进一步设想：在特殊条件下，真空的对称性可能发生突变（称为真空相变）。李政道指出，“这类改革真空性质的实验方法可以称为真空工程”，“如果我们确实变革真空，那么我们会碰到新的完全没有料到的现象”，而使粒子物理学家伤透脑筋的夸克囚禁问题有可能迎刃而解。

真空不空。真空就像是魔术师手中的箱子，不识个中奥妙的观众误认为它是空的，但转眼间魔术师就能从中源源不断地掏出各式各样的宝贝来。真空倒底还有哪些奇妙的性质？它总不会是一个供人随意捏弄的面团吧！

#### 【四种相互作用】

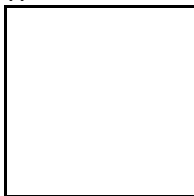
恩格斯说过：“要精确地描绘宇宙、宇宙的发展和人类的发展，以及这种发展在人们头脑中的反映，就只有用辩证的方法，只有经常注意产生和消灭之间、前进的变化和后退的变化之间的普遍相互作用才能做到。”

(引自《社会主义从空想到科学的发展》)国外有的物理课本给物理学下的定义是：“物理学是一门研究物质的组成以及各成分间相互作用的科学。藉助于这些相互作用，科学家得以解释宏观物体的性质以及观察到的其他自然现象。”我们无意去评判这个物理学定义与国内现今流行的定义孰优孰劣，只是想由此说明相互作用的研究在物理学中占有何等重要的地位。

自然界里存在着四种类型的相互作用：强相互作用，电磁相互作用，弱相互作用和引力相互作用。这四种相互作用强度之比依次为  $1 : 10^{-2} : 10^{-12} : 10^{-37}$ 。可见引力相互作用是一种特别微弱的相互作用，在粒子物理学中一直不予考虑。不过随着能量的增大，引力作用将越来越不可忽略。

比较起来，我们对电磁相互作用了解得最为透彻。电磁相互作用是有光子(包括实光子和虚光子)参与的一种相互作用。它可以引起光子与带电粒子间的散射，带电粒子对湮没为光子，光子产生带电粒子对以及其他一些过程。以电子与质子的弹性散射  $e^- + p \rightarrow e^- + p$  为例，这是电磁相互作用过程。在经典物理学中，这个过程表述为：电子与质子间发生相互作用是由于电子“感受”到了质子的电磁场，从而在电磁场的影响下改变了自己的运动。按照量子场论的观点，电磁场本身是量子化的，变成类似粒子的光子。我们说，在电磁相互作用中，电子和质子“交换”了一个光子。这个过程可用上图所示的费曼图表示之。这个光子从发射到重新被吸收的时间很短，根据测不准原理  $\Delta t \sim h/E$ ，在比  $\Delta t$  更短的时间内无法探测它，所以称为“虚光子”。电磁力的力程为无穷大，两个带电体无论相距多远，它们之间的库仑力总是存在的。

弱相互作用是一种广泛存在于轻子与轻子、轻子与强子、强子与强子之间的一种基本相互作用。很难用一句话简洁地定义。它的主要特点是：作用强度微弱，是电磁作用的  $10^{-6}$  倍，强作用的  $10^{-12}$  倍；作用范围小，估计力程在  $10^{-14}$ cm 以内；所引起的反应进行较慢，特征时间在  $10^{-10}$  秒以上；比其他相互作用有较低的对称性，在弱作用中，宇称、电荷共轭宇称、同位旋等都不守恒。关于弱相互作用机制，费米最早建立的是四费米子点作



个模型因理论上存在难以克服的矛盾而被放弃。现在粒子物理学家已确认弱作用是通过交换一种称为中间玻色子 ( $W^\pm, Z^0$ ) 的媒介粒子来完成的，其费曼图见下图 (b)。

强相互作用是存在于重子、介子等强子之间的一种基本相互作用。其

特点是：强度大，是电磁作用的  $10^2$  倍，是弱作用的  $10^{12}$  倍；力程短，大约在  $10^{-13}\text{cm}$  以内；所引起的反应迅速，特征时间是  $10^{-23}$  秒；具有较高的对称性，即对强相互作用存在着众多的守恒律。强相互作用的机制，目前还不十分清楚。一般认为，强作用也是通过交换中间粒子实现的。但这个中间粒子是什么，却有一段认识过程。早在 1935 年，日本的汤川秀树就提出核力的介子理论，认为核子之间的强作用（核力）是交换介子的结果。按照当前的看法，强子之间的强作用归结为组成强子的夸克和胶子之间的作用，胶子是传递夸克之间强相互作用的粒子。在此基础上发展起来的量子色动力学被认为是一种很有希望的理论。

今天，相互作用理论正沿着三条道路齐头并进。一是进一步探明各种相互作用尤其是强相互作用的机制。二是把看起来大相径庭的几种相互作用纳入统一的理论框架。弱电统一的成功鼓舞人们提出强、弱、电磁三者统一的“大统一理论”。四种相互作用统一的理论也在探索之中，物理学家正在重温当年爱因斯坦的统一场论的美梦。三是探讨是否还存在新型的相互作用——超强相互作用和超弱相互作用。

玻尔说过：“孤立的物质粒子只是一种抽象，它们的性质只有通过和其他系统的相互作用才能定义，才能进行观察。”世界是物质的，物质处于普遍联系、永恒发展之中。粒子物理学的发展为辩证法提供了最有力的佐证。

#### 【对称性和守恒律】

从飞舞的雪花形状、七星瓢虫的美丽花纹到社稷坛的奇妙布局、天安门华表的左右耸峙，这类几何形状的对称性在自然界和人工建筑物中随处可见。在物理学中，我们还讨论了许多物理规律的对称性。所谓物理规律对称性，指的是物理规律在某种变换下的不变性。本世纪最伟大的女数学家、德国的诺特（Emmy Noether）证明了：对于可以用连续变换不变性来描述的对称性，总有一条守恒定律和它相联系。于是，对称性、不变性、守恒律常是三位一体，成为物理学中基本的、重要的观念。举个例子来说吧，我们知道，同一个物理实验，不论在两极、在赤道、在山巅、在海滨，只要消除了因温度、重力加速度、地磁场、科里奥利力等的差异产生的影响，所得结果总是同一的。这表明，空间是均匀的（这是一种对称性）。空间均匀性意味着，当坐标原点移动时，物理规律（表现为运动方程）的具体形式不会改变。换句话说，物理规律对于坐标平移交换  $r=r+r_0$  具有不变性。从这个坐标平移交换不变性出发，经过逻辑严谨的推理，可以得到动量守恒定律。类似地，从时间均匀性可以得到能量守恒定律，从空间各向同性可以得到角动量守恒定律，从空间反演不变性可以得到宇称守恒定律等等。物理学中还引入了不少与通常的时空空间不同的抽象空间，如同位旋空间、味空间、色空间等，它们也常称作内部空间。在内部空间，也有对称性、不变性，也有与之相应的守恒定律，例如电荷守恒、同位旋

守恒、重子数守恒、轻子数守恒等。

一切对称性的根源在于某些基本量的不可观测性。例如空间均匀性表明绝对位置是一个不可观测量。而守恒律的作用也正在于它排除了那些不遵守该守恒律的物理过程发生的可能性。当主宰微观粒子间相互作用的动力学机制尚未探明之时，通过对物理过程中呈现的对称性的研究来弄清微观粒子的运动特征，是一种行之有效的手段。即使相互作用的动力学机制已经建立（如牛顿力学），对称性和守恒律的研究仍有重要价值。四十年来，因对称性方面的理论研究和实验探索而获得诺贝尔奖的可说是接踵而至：1957年李政道、杨振宁的弱作用宇称不守恒；1963年维格纳（Wigner）的用于物理的对称群理论；1965年盖尔曼（Gell-mann）的么正对称理论；1979年格拉肖（Glashow）、温伯格（Weinberg）、萨拉姆（Salam）的弱电统一规范理论；1980年菲奇（Fitch）、克罗宁（Cronin）CP不对称性的实验发现；1982年威尔逊（Wilson）的重正化群理论。

对称性是宇宙之美，在科学美学思想中对称性给予人的美感占有重要的一席之地；对称性是幻想之源，1931年狄拉克根据电和磁的对称性推测磁单极子存在，也有人根据质量和电荷的对称性推测负物质——一种以斥力而不是通常的引力方式作用的物质的存在；对称性是统一之本，未来的把四种基本相互作用统一起来的伟大理论只能植根于对称性这片丰腴的土地上。

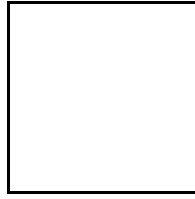
现今物理学家手头已有近二十种各式各样的守恒律。物理学家对对称性和守恒律的偏爱不是没有道理的，难怪1957年李政道、杨振宁关于弱作用宇称不守恒的结论曾在物理学界掀起了轩然大波。但大自然终究不是为迎合人们的爱好而存在的，今天，物理学家已能坦然接受自然界中种种不对称的“缺陷”，甚至还利用这种“缺陷”大做文章哩！

研究对称的数学理论是群论。在粒子物理中，尤其是其中的群论表示那部分起了很大作用。群论是19世纪为解决代数方程用根式求解的可能性问题而创立的。它的奠基者是年轻有为、27岁因贫病交加而去世的挪威数学家阿贝尔和同样年轻有为、21岁因决斗而去世的法国数学家伽罗华。他们大概不会想到，一个半世纪后，群论竟会在基本粒子理论中扮演如此重要的角色。

#### 【 - 疑难】

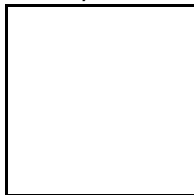
50年代是粒子物理丰收的年代。千奇百怪的新粒子和多彩多姿的实验事实为粒子物理理论的进展提供了丰富的素材。人们兴奋，人们困惑，在顽强的探索中，在激烈的论争中，无数新颖的见解相互撞击迸发出绚烂的火花。其中李政道和杨振宁对于宇称守恒普适性的否定堪称是这个年代的杰作。

在1956年前的几年中，人们观察到两个粒子，当时称为  $\theta$  和  $\chi$  粒子，分别按下列方式衰变：



两个粒子的质量分别为  $(966.7 \pm 2.0) m_e$  和  $(966.3 \pm 2.0) m_e$ ，寿命分别为  $(1.21 \pm 0.02) \times 10^{-8}$  秒和  $(1.19 \pm 0.05) \times 10^{-8}$  秒，在误差范围内简直没有区别，完全有理由把它们看作是以不同方式衰变的同一个粒子。但根据当时已广为接受的宇称守恒定律，加上  $\pi$  介子的宇称已确定为负，故变成两个  $\pi$  介子的  $\pi^+$  粒子的宇称为正，而变成三个  $\pi$  介子的  $\pi^+$  粒子的宇称为负，也就是说， $\pi^+$  和  $\pi^+$  粒子具有不同的宇称，它们不可能是同一个粒子。面对这一事实，有两种可能性可供选择：（1）认为  $\pi^+$  和  $\pi^+$  是不同的粒子，因为它们的宇称不同，它们具有相同的质量和寿命纯属巧合。（2）认为  $\pi^+$  和  $\pi^+$  是具有单一质量、寿命、自旋和宇称的同一粒子，但在上述两个衰变过程中有一个衰变改变了宇称。从衰变寿命看，它们都是弱相互作用过程，即弱作用过程中，宇称可以不守恒。相比之下，第一种解释虽符合传统但总嫌勉强，而第二种解释无疑会引起观念上的激变。

1956 年夏天，李政道和杨振宁一起，查阅了当时已有的大量实验资料，得出一个结论：和一般人确信的相反，在弱相互作用中实际上并不存在宇称守恒的任何实验证明。正如李政道后来在回忆当年情景时所写的：“那时候，宇称守恒定则已广泛地用于一切过程——强、电和弱。……只有当一个人认识到弱、强及电磁相互作用的情况不同，到那时为止，还没有一个弱相互作用的实验曾经涉及到宇称破坏的问题，进展才有了可能。为了直接去观察这样一种破坏，人们必须从一切都是左、右对称的装置中去测量一个物理的赝标量。一旦明白了这一点，就有一大批数目的实验提出来用以检验这个宇称定律。”李政道和杨振宁提出了一个检验  $\pi^+$  衰变（弱作用过程）中宇称是否守恒的实验方案。吴健雄及其合作者出色地完成了这个实验，证实在  $Co^{60}$  的  $\beta$  衰变中宇称确是破坏了。



的电子的角分布如左图所示，右边部分是左边部分的镜像。若该过程是镜像对称的，则图中的右边部分也应该是可以真实发生的物理过程。也就是说，计数器在逆着  $Co^{60}$  核的自旋方向（左半图）与顺着  $Co^{60}$  核的自旋方向（右半图）计得的电子发射率应该相同。实验大致是这样安排的：放射性原子核  $Co^{60}$  置入一块硝酸铈镁晶体中，通过绝热去磁的方法把它降低到 0.01K 以减少热运动，并加上强磁场使  $Co^{60}$  原子核极化，即使其自旋指向同一方向。实验过程中，计数器不动，“原过程”和“镜像过程”是通



过改变磁场 B 的方向来区分的。实验结果表明，这两个过程是不等效的，即“左”、“右”是不对称的，宇称不守恒。进一步的研究表明，这个实验中宇称不守恒与中微子的行为有密切关系，凡有中微子参加的过程，宇称都不守恒。

于是左和右就是可以区分的了。对此，李政道作过生动的描写：考虑两个虚构的、先进的文明世界 A 和 B，假设它们彼此隔离，然而可以通过非极化的光信号来通信。如果这两个文明世界，比如说要进行机器贸易，那时右手螺旋的确定是非常重要的。要是没有宇称不对称性的发现，这是很不好办的事。而借助于弱作用衰变过程，左、右之间就存在一种绝对的差别了。两个文明世界尽管只用非极化光作联络纽带，但可以获得一致的右手螺旋的定义。

宇称守恒这一传统观念的否定在物理学界造成了巨大的冲击波。著名物理学家泡利在看到李政道、杨振宁文章时，曾写信给韦斯科夫 (Weisskopf) 说：“我不相信上帝是一个无能的左撇子，我愿意出大价和人打赌，实验中电子角分布将是左、右对称的。我看不出有任何逻辑上的理由说明镜像对称会和相互作用的强弱有关系。”当听到吴健雄等人的实验结果后，他在信中又写道：“现在第一次震惊已经过去了，我开始重新思考……”。“现在我应当怎么办呢？幸亏只在口头上和信中提起，而没有形诸文字，也没有认真打赌，这是一件好事，不然输那么多钱，我哪里负担得起呢！不过别人现在有权来笑我的。”“使我震惊的还不是上帝是左撇子这一事实，而是他为何在强表现时仍是左、右对称的呢？”从那以后， $\pi^+$  和  $\pi^-$  被确认为同一个粒子，现在称为 K 介子。第二年，即 1957 年，李政道和杨振宁就获得该年度诺贝尔物理学奖，在诺贝尔奖获得者的长长名单中第一次写上了炎黄子孙的名字。

#### 【弱电统一模型】

仰观宇宙之大，俯察品类之盛。鸢飞鱼跃，日升月落，万物各得其所。寻找深藏着的支配物质运动的规律，是科学家的使命；而探索表面上看来截然不同的运动形式之间更深层次的内在统一性，更使科学家废寝忘食，乐此不疲。遥想牛顿当年，以凌云才气统一了天上的力和地上的力。而经过奥斯特、法拉第、麦克斯韦等人的顽强拼搏，终于把电、磁、光三者纳入统一的电磁理论框架。爱因斯坦罄后半生之力，想把电磁力和引力统一起来，遗憾的是这块板实在太硬太厚，终于未能钻透。后来知道，自然界的相互作用，除电磁力和引力外，还有力程极短的强相互作用和弱相互作用。鉴于电磁相互作用和弱相互作用的特点，首先把这两种力统一起来是比较有希望的。为建立弱电统一模型，展开了一场全世界科学家参加的大会战。东方的科学家和西方的科学家一道披坚执锐，冲锋陷阵，一显身手。

粒子物理学的仓库中已有一些现成的武器，尽管还很不完备。1954 年

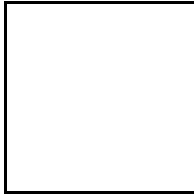
杨振宁和米尔斯创立的非阿贝尔定域规范场理论如出炉之剑正待淬炼。人们设想弱相互作用也像电磁相互作用一样靠传递规范粒子来实现。因在弱作用过程中电荷可能变化，弱作用规范粒子应是三种中间玻色子：两种是荷电的，称为  $W^+$  和  $W^-$  粒子；一种是中性的，称为  $Z^0$  粒子。但由于弱作用力程极短，而量子理论中有这样一个结论：力程越短，传递相互作用的规范粒子的质量越大，因而  $W^+$  和  $Z^0$  粒子应该很重。然而杨-米尔斯理论却要求规范粒子的质量为零。这确是一个不易逾越的障碍。

科学家正是一批在畏途 岩上不避艰险努力攀登的人类精英。他们立誓要在榛莽荒芜之中开辟出一条前无古人的新路来。1960 年德国的海森堡等人从固体物理学中搬来了一件重武器，把它移植到粒子物理学，这就是对称性自发破缺的概念。真空是量子场的基态。但量子场的势并不像右图 (a) 那样只有一个最低点，而是有两个最低点，如右图 (b) 所示。然而物理真空却只能两者居一。1961 年哥德斯通 (Goldstone) 发现：有一类体系，它的拉格朗日函数  $L$  在某种变换下是严格对称的，但真空态在这种变换下却是不对称的，这就产生了对称破缺现象。真空是不对称之源。但他还推导出一个结论：与这对称破缺相联系还存在着一种无质量的粒子，称为哥德斯通粒子。这种无质量的哥氏粒子因无实际对应物也不受人们欢迎。正当人们为这两类无质量的粒子——杨-米尔斯理论中的规范粒子和哥氏粒子大伤脑筋的时候，1964 年英国的希格斯 (Higgs) 推出了一个富有戏剧性的理论，把这两个问题一揽子解决了。他引进一个所谓的希格斯场 (其量子为希格斯粒子)。当人们把规范场和希格斯场一起考虑时，哥氏粒子奇妙地消失了，而规范粒子却获得了质量，不过那个神秘的有质量的希格斯粒子还在。作一个不太确切的比喻，就好像在希格斯场的催化作用下，无质量的规范粒子一口吞下了无质量的哥氏粒子，居然吃成了一个胖子。这一套使规范粒子获得质量的方法称为“希格斯机制”。这样一来，杨-米尔斯理论中的绊脚石被搬开了，规范理论向前跃进了一大步。按照现代场论的观点，一个正确的物理理论必须是可以量子化和重整化的。前苏联物理学家法捷耶夫 (Faddeev) 和波波夫 (Popov) 通过路径积分量子化方法对杨-米尔斯场进行了量子化。1971 年胡夫特 (G. t. Hooft) 证明杨-米尔斯场可以重整化。规范理论的合理性牢固地树立起来了。

1961 年美国的格拉肖 (Glashow) 率先提出弱相互作用和电磁相互作用统一的思想，预言中性弱流的存在。美国的温伯格 (Weinberg) 和巴基斯坦的萨拉姆 (Salam)，于 1967 年和 1968 年，各自独立地提出统一弱和电磁相互作用的具体方案。他们认为电磁和弱作用应满足定域规范不变的要求，并选择包括  $SU(2)$  群和  $U(1)$  群在内的更大的群作为规范群。 $SU(2)$  群要求三个规范场，而  $U(1)$  要求一个规范场。这四个规范场本来都是没有质量的，运用希格斯机制使三个规范场获得质量，这就是三个传

传递弱作用的中间玻色子。一个规范场保持零质量，这就是传递电磁作用的光子。这就是弱电统一模型，也称温伯格-萨拉姆模型或 WS 模型。

弱电统一模型预言中性流的存在。例如电子和反中微子的散射过程：



弱相互作用。左图 (a) 中由  $W^-$  介子传递，而右图 (b) 中由不带电的  $Z^0$  介子来传递，此时存在中性流。1973 年欧洲核子研究中心发现中性弱流的踪迹。1978 年加利福尼亚斯坦福电子加速器对氘核散射高能电子的实验结果与格拉肖等人的理论预言一致。这两个实验被认为是对 WS 模型的有力支持。格拉肖、温伯格、萨拉姆被授予 1979 年度诺贝尔物理学奖。但其时弱电统一模型中预言的中间玻色子尚未发现，人们担心诺贝尔奖会不会发早了。按 WS 模型，利用实验测出的温伯格角（它是  $SU(2)$  群与  $U(1)$  群两个相互作用常数比值的正切）可以估计出中间玻色子  $W^\pm$  和  $Z^0$  的质量。据 1979 年 9 月测得的温伯格角  $\theta_w$  的数值为  $\sin^2 \theta_w = 0.23$ ，由此算得  $W^\pm$  介子的质量为  $80\text{GeV}$ ， $Z^0$  介子的质量为  $90\text{GeV}$ 。1983 年 1 月和 6 月，欧洲核子研究中心先后宣布发现中间玻色子  $W$  粒子和  $Z$  粒子，实验测得的质量与理论预言一致。中间玻色子的发现是三十多年来粒子物理探索中取得的最重大进展之一，它使弱电统一理论立于不败之地。为此，瑞典皇家科学院于 1984 年 10 月 17 日庄严宣告：授予发现  $W$  和  $Z$  粒子的意大利的鲁比亚 (Rubbia) 和荷兰的范德梅尔 (van der Meer) 1984 年度诺贝尔物理学奖。

弱电统一模型也有许多不足之处。有人认为弱电统一是把两个群  $SU(2)$  和  $U(1)$  凑合在一起，相互作用常数仍是两个；不能算真正“统一”；理论中未知参量太多，尤其是理论中举足轻重的希格斯粒子从未在实验中发现过；希格斯场的实质是什么，使对称性自发破缺的机制到底是什么，也须作进一步研究。不过，成绩是主要的。弱电统一理论的成功意味着规范不变原则可能是自然界相互作用理论必须遵循的普遍原则。顺着这条路，人们又向新的目标进发了。

弱电统一模型是一块“千人糕”。除了获奖的那五位外，许多国家的科学家都作出了重要贡献。他们既合作又竞争，终于浇灌出这一朵绚丽的理论物理之花。由此可见，加强科技合作、交流信息、取他人之长为我所用的重要性。可以断言，在未来重大的科技攻关战中，一旦树起进军的大纛旗，也必定是群贤毕至，少长咸集！

## （二）相对论 宇宙学

### 【狭义相对论】

爱因斯坦在研究电动力学过程中，于 1905 年在德国《物理年鉴》杂志上发表了一篇论文，题目为“论运动物体的电动力学”。在这篇论文中，他大胆抛弃了传统的牛顿绝对时空观，提出了关于物质运动与时间、空间互相联系的全新的时空理论，并从时空观出发对旧物理学的结构重新改造，使其更加合理而简洁，并使新的力学适应接近光速的高速运动领域，克服了当时旧物理理论与新实验事实之间的尖锐矛盾。今日狭义相对论已经成为近代物理学的主要基础之一。

19 世纪末、20 世纪初，在物理学中对电磁现象的研究逐步取代对力学的研究，新的实验事实层出不穷，并不断对古典物理学提出挑战，其中一个最大的挑战是所谓的“以太之谜”，而“以太之谜”实际上是光的传播问题上的困惑。当时关于电磁现象的最高理论总结（即麦克斯韦的电磁场理论），就以麦克斯韦方程组来表述。麦克斯韦得出了电磁场以波动方式传播，光就是电磁波，而光在真空中亦能传播，真空中的光速是一个不变的普适常数等结论。以太是当时被假设用来传播电磁波的一种介质，因为电磁波到处可以传播，所以以太就无处不在，充满整个空间。麦克斯韦方程得出真空中光速是个常数，所以，当时认为该方程只有在相对以太静止的参考系中才能成立，而在相对以太运动的参考系中，真空中光速在不同方向上的传播速度应是不同的。这样一来，就得出了电磁规律不满足相对性原理的结论，事实上，麦克斯韦方程组在伽利略变换下确实要改变形式。因此，人们相信可以利用电磁学实验，比如，利用光速的测定来判断实验室参考系是否相对以太静止，从而解决在牛顿力学中无法找到的绝对静止参考系。

根据以上思想，当时就设计了许多实验，企图来测定所在参考系相对于以太的速度。其中，最重要的是著名美国物理学家迈克尔逊所进行的实验。迈克尔逊利用其发明的干涉仪，从光的干涉条纹的细微变化中，可以精确测定地球相对于以太的速度。但是，实验的结果却大出意料，当时大多数物理学家所预料的干涉条纹的移动，完全没有看到。结论是地球相对于以太没有运动，或者说以太根本不存在，真空中的光速是不变的。

迈克尔逊实验如此精细、严格，实验结论是不可改变的，而这样一个实验结果，就对旧物理学提出了非常尖锐的挑战。物理学家必须在下列两者中作一选择：一种选择认为麦克斯韦理论是正确的，相对性原理是普遍的，不仅力学满足，电磁学亦满足，那么不论在任何参考系中真空中光速永远是一个普适常数，也就永远测不到参考系相对静止以太的速度，存在以太的假设亦是多余的。但是，这种选择不能为当时大多数物理学家所采纳，他们认为麦克斯韦方程与相对性原理是矛盾的，因为麦克斯韦方程在

伽利略变换下，不可能保持形式不变，那就不满足相对性原理。所以，要既保留麦克斯韦方程，又保留相对性原理，那么必须放弃伽利略变换，而伽利略变换是牛顿力学的基础，假如放弃它，等于摒弃牛顿力学，那是不可思议的。

大多数物理学家的选择，都是在保留伽利略变换，保持牛顿力学的基础上作出的，那就只有改变麦克斯韦方程，或者放弃相对性原理的普遍性。一般说来，逻辑严密的麦克斯韦方程不容修改，而放弃相对性原理又与包括迈克尔逊干涉实验在内的许多事实相冲突。因此，当时的物理学家彭加勒惊呼物理学出现了“危机”！

爱因斯坦以极其简洁而明晰的观点，认为以上企图寻找地球相对以太（光介质）运动的实验的失败，说明“绝对静止”的概念不仅在力学中，而且在电动力学中，亦是不可取的，即相对性原理是普适的，而真空中光速不变作为一个基本事实应当简单地接受。爱因斯坦正是从这两个基本公设出发，重新得出了两个惯性系之间的时空变换的新的关系式，即洛伦兹变换。值得指出，这个新的时空变换关系完全是由于历史的原因，而称为洛伦兹变换的。洛伦兹作为一个经典物理学时代的伟大的物理学家，他在狭义相对论建立后很久还是始终不愿放弃绝对时间、绝对空间的观念，他对以他的名字命名的变换关系的解释，完全是基于绝对时空基础之上的，因而是错误的。

狭义相对论的时空理论集中反映在洛伦兹变换关系之中，它与伽利略变换的主要区别在于考虑到了任何信息的传递总需要时间，信息传递的最高速度为真空中的光速，在狭义相对论的理论框架中，实际上假定了任何信息的传递速度不可能大于真空中的光速，真空中光速是作为一切真实运动速度的极限。而伽利略变换所反映的时空理论，是以超距作用为前提的，即承认世界上存在着无限大速度，这显然是不合理的。所以，从这一点上可以明显看出狭义相对论是场的理论，而以牛顿力学为基础的经典物理是超距作用的理论。前者的时空是与物质运动紧密相联的，而牛顿的绝对时空是与物质运动完全无关的。

#### 【时钟佯谬】

在狭义相对论中，根据洛伦兹变换，很容易得出“运动时钟变慢”的结论，这就是所谓的“时间延缓效应”或“时间膨胀效应”。根据相对性原理，这种效应完全是相对的，即运动时钟相互认为对方均变慢了。比如，地球上的人可以认为高速飞行的火箭上的钟变慢了，火箭上的人也可以认为火箭不动，而地球相对火箭在运动，所以应该是地球上的钟变慢了。那么到底是哪一个钟慢呢？

我们知道，物质的任何自然过程都可以看作为一个计时的钟。因此，假如将一对孪生子，一个留在地球上，另一个乘火箭去宇航，当宇航归来、两人重逢时，到底哪一个年龄大些呢？这个问题无法回避，也没有任何相

对性可言，因为这对孪生子的年龄是可以在重逢时进行比较的。这就是所谓的“时钟佯谬”，也称“孪生子佯谬”。在相对论所有的假想佯谬中，孪生子佯谬可以说是最著名、最容易引起争论的。从1905年相对论刚建立，爱因斯坦就提出了这个问题，并作了结论，但直到1959年它还是一个在文献上激烈争论的问题。相对论的理论认为，在重逢时，宇航归来的双生子必然比地球上的那个年轻些；两个相同的时钟，当其中之一运动一周回到原地时，两钟相比较，运动归来的那个时钟绝对地变慢了，那个留在原地的钟比运动的钟要走得快，其中没有任何相对性。时钟佯谬或孪生子佯谬并不是指他们重逢时，一个年龄比另一个更大，这一违反一般常识的佯谬。而是指为什么在这里两者没有相对性，为什么一定要认为地球不动，火箭运动，因而一定是认为地球上的钟快，而火箭上的钟慢，而不能相反。这样就违反了相对性原理，相对论本身就出现了理论矛盾，这才是“佯谬”之所在。

实际上，以上所谓的理论矛盾并不存在，所以只是“佯谬”。我们知道，相对论断言，运动时钟“变慢了”，并不是指两个钟之间的关系，而是指一个运动的钟与静止在不同地点的一系列校正同步的钟相比较，运动的钟走慢了。用相对论的术语说，这是固有时与坐标时之间的比较，即与运动物体固定在一起的一个钟，总是比静止在不同地点的钟走得慢些，这种比较则是完全相对的，可以说相互认为对方在运动，对方的时钟必走得慢些。现在的问题与以上所谓的时间延缓效应不同，“时钟佯谬”所出现的矛盾是在两个钟之间比较快慢，这两个钟所记录的时间分别是两个参考系中的固有时，所以，这是固有时与固有时的比较，这是两个问题，而后者具有绝对性，不具有相对性那就没有什么矛盾了。

我们说，分别静止在两个参考系中的两个钟只能相遇一次，因此，要比较两个给定钟的速率，可以让一个钟作往返航行。例如，钟A以速度 $+v$ 远离钟B，当它走过了一段路程后给其一反向加速度，使其突然改变速度方向，并以速度 $-v$ 朝着钟B运动，当A与B重新相遇时，比较它们各自的读数。因为狭义相对论只适用于惯性系，B钟没有经历过加速过程，即它始终处于同一惯性系中，从B的观点计算是不会出问题的。而钟A经历了加速过程，即它从一个惯性系(以 $+v$ 相对于B运动)变到了另一惯性系(以 $-v$ 相对于B运动)，因此从A的观点计算必须要考虑这个事实，这个事实带来的影响是由不同地点的同时性问题产生的，如果把这种同时性效应从计算中扣除，最后的结论是无论从A或B计算，钟A比钟B绝对地走慢了。

另外，我们从对称性角度亦可说明，两个运动钟之间没有相对性，是因为一个钟经历了加速过程，另一个钟没有经历加速过程，而所谓有没有加速度是相对于整个宇宙背景来说的。假如宇宙间只有两个钟就无法比较它们之间的不对称性了。因此，可以这样说，谁对整个宇宙作变速运动，谁就活得更长久、更年轻，这是绝对的，佯谬是不存在的，这就是相对论

的结论。

上面人们从理论上讨论了如何消除“时钟佯谬”，用实验也能直接进行验证。特别值得一提的是1971年美国的海弗尔（Hafele）与凯汀（Keating）环球航行原子钟的试验，完全证实了时间延缓的相对论结论。他们把4个铯原子钟放到飞机上，飞机在赤道平面附近分别向东及向西绕地球飞行一周后回到地面上，然后比较飞机上的铯原子钟与一直静止在地面上的铯原子钟的读数，在实验误差范围内结果与理论值相符，很好地证实了相对论的理论。这就完满地解决了“时钟佯谬”问题的论争。

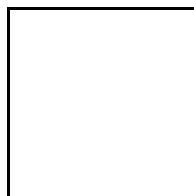
### 【高速运动物体的视觉形象】

在狭义相对论中，我们都知道运动物体的长度在沿运动方向上会缩短，而在垂直于运动的方向上则长度不变。因此，相当多的科普书籍、甚至教科书上都有关于运动圆球看上去成了椭球、正方体由于运动而成了压扁了的长方体之类的叙述。这样的叙述和认识是不正确的，而且长期以来人们并未意识到这是一种误解，直到本世纪50年代，人们经过仔细分析，才认识到一个高速运动物体的视觉形象的问题与相对论中关于运动物体长度的测量是很不相同的两个问题，不能混为一谈。

一个高速运动物体的视觉形象，不可能是被压缩性的形变，一般来说是形状不变，仅仅转过了一定的角度。这是为什么呢？说来也并不复杂，我们知道，人在某一时刻看到（或拍摄到）一个物体的形象，完全取决于该时刻实际到达人眼（或照相机镜头）的光线。值得指出，这些同一时刻到达的光线却是在不同时刻从物体的不同部位发出的，即观看或拍摄一个运动物体，必须考虑到光线从物体出发再到达观察者的渡越时间。物体部位不同，离开观察者的距离不同，光线所需的传播时间也不同。因此，一般说来，一个观察者并不能简单而直接看到物体长度的相对收缩。为此，我们可作以下简单的讨论。

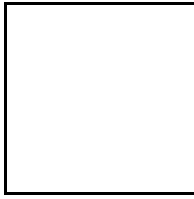
设有一正立方体，其每条边长为 $L$  [下图(a)]，当其静止时，一个正对立方体的观察者，只能看到其正面 $ABCD$ 这一正方形。

当正方体以速度 $v$ 沿 $AB$ 方向运动时，我们假定观察者距离正方体较远，观察的立体角（视角）很小，我们可以认为 $ABCD$ 面上各点同时发出的光是同时到达观察者的，因此观察者能看到 $ABCD$ 正方形的 $AB$ 边长度缩短为

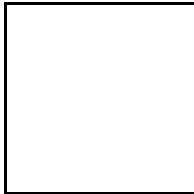


$AD$ 边长度不变仍为 $L$ ，正方形便变为一长方形 $ABCD$  [上图(b)]。同时，由于立方体的运动，侧面 $ADHE$ 上各点发出的光，观察者也可以看到，不过，

同一时刻为观察者所看到的却是由 ADHE 上各点不同时刻先后发出的



侧面，看到的形状也是长方形[上图 (b) 中的左侧]。故观察者所看到的以  $v$  运动的立方体，完全等价于将该立方体转过了一个  $\theta$  角后静止地呈现



则转过角度越大。所以，观察者看到的运动立方体正是转过了一个角度  $\theta$  的形象。

以上关于高速运动物体形象的分析，主要由特勒尔 (Terrell) 与彭罗斯 (Penrose) 在 1959 年所指出，而韦斯科夫 (Weisskopf) 在 1960 年对这个问题作了总结，他指出，关于高速运动物体形象的效应，是狭义相对论理论创立 50 年以来，一个最重要的发展。在此之前，许多重要的物理学家对这个问题都没有作出正确的阐述，相反许多叙述却是错误的。所以，对于狭义相对论的许多时空特性的结论，应当严格按洛伦兹变换进行计算与解释，而不应当随意作出容易引起误解的错误陈述。

#### 【广义相对论】

广义相对论是爱因斯坦继狭义相对论之后，深入研究引力理论，于 1913 年提出的引力场的相对论理论。这一理论完全不同于牛顿的引力论，它把引力场归结为物体周围的时空弯曲，把物体受引力作用而运动，归结为物体在弯曲时空中沿短程线的自由运动。因此，广义相对论亦称时空几何动力学，即把引力归结为时空的几何特性。

如何理解广义相对论的时空弯曲呢？这里我们借用一个模型式的比拟来加以说明。假如有两个质量很大的钢球，按牛顿的看法，它们因万有引力相互吸引，将彼此接近。而爱因斯坦的广义相对论则并不认为这两个钢球间存在吸引力。它们之所以相互靠近，是由于没有钢球出现时，周围的时空犹如一张拉平的网，现在两个钢球把这张时空网压弯了，于是两个钢球就沿着弯曲的网滚到一起来了。这就相当于因时空弯曲物体沿短程线的运动。所以，爱因斯坦的广义相对论是不存在“引力”的引力理论。

进一步说，这个理论是建立在等效原理及广义协变原理这两个基本假设之上的。等效原理是从物体的惯性质量与引力质量相等这个基本事实出发，认为引力与加速系中的惯性力等效，两者原则上是无法区分的；广义协变原理，可以认为是等效原理的一种数学表示，即认为反映物理规律的一切微分方程应当在所有参考系中保持形式不变，也可以说认为一切参考

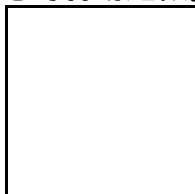


系是平等的，从而打破了狭义相对论中惯性系的特殊地位，由于参考系选择的任意性而得名为广义相对论。

我们知道，牛顿的万有引力定律认为，一切有质量的物体均相互吸引，这是一种静态的超距作用。

在广义相对论中物质产生引力场的规律由爱因斯坦场方程表示，它所反映的引力作用是动态的，以光速来传递的。

广义相对论是比牛顿引力论更一般的理论，牛顿引力论只是广义相对论的弱场近似。所谓弱场是指物体在引力场中的引力能远小于固有能，即



场中，才显示出两者的差别，这时必须应用广义相对论才能正确处理引力问题。

广义相对论在 1915 年建立后，爱因斯坦就提出了可以从三个方面来检验其正确性，即所谓三大实验验证。这就是光线在太阳附近的偏折，水星近日点的进动以及光谱线在引力场中的频移，这些不久即为当时的实验观测所证实。以后又有人设计了雷达回波时间延迟实验，很快在更高精度上证实了广义相对论。60 年代天文学上的一系列新发现：3K 微波背景辐射、脉冲星、类星体、X 射电源等新的天体物理观测都有力地支持了广义相对论，从而使人们对广义相对论的兴趣由冷转热。特别是应用广义相对论来研究天体物理和宇宙学，已成为物理学中的一个热门前沿。

爱因斯坦一直把广义相对论看作是自己一生中最重要的科学成果，他说过，“要是我没有发现狭义相对论，也会有别人发现的，问题已经成熟。但是我认为，广义相对论不一样。”确实，广义相对论比狭义相对论包含了更加深刻的思想，这一全新的引力理论至今仍是一个最美好的引力理论。没有大胆的革新精神和不屈不挠的毅力，没有敏锐的理论直觉能力和坚实的数学基础，是不可能建立起广义相对论的。伟大的科学家汤姆逊曾经把广义相对论称作为人类历史上最伟大的成就之一。

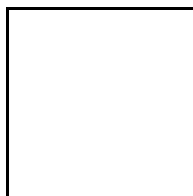
目前，引力理论如何与其他几种相互作用统一，引力场如何量子化等问题摆在物理学家的面前，我们相信，量子引力论建立之日，将是广义相对论被突破之时。

### 【黑洞】

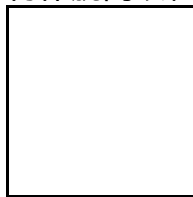
黑洞是一个十分奇妙的物理概念，严格地说它是相对论引力理论，即广义相对论中提出的一个概念。它是指恒星（或任何物质）的外部会有一个特别的时空区域，在这个区域中，由于存在特别强烈的引力作用，那里的时空便变得如此弯曲，以至那里的光和其他粒子都只能单方向落入引力源，而不能静止或向外运动，其中恒星物质本身也只能不断收缩而变成密

度为无穷大的奇点。这样一个特别的时空区域就叫做黑洞。

早在 1796 年法国科学家拉普拉斯就曾在牛顿力学基础上计算过这样一个有趣的问题：一颗恒星收缩到多大时，它附近的引力可大到足以使恒星的所有辐射物，包括光也不能逃逸。我们知道，对于质量为  $M$  的恒星来说，当质量为  $m$  的物体之速度  $v_e$  满足

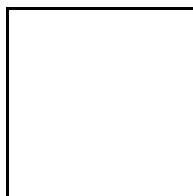


时，它就可逃离该恒星。也即物体脱离该恒星的逃逸速度是



其中  $G$  为万有引力常数。

当  $v_e$  为光速  $c$  时，有



此式告诉我们，在  $r < r_g$  的球形区域中，即使光也无法逃离（辐射）出去。

以上简单的计算结果令人惊叹的是它恰恰与广义相对论的结果完全一致，正是这个半径为  $r_g$  的球形区域叫做黑洞， $r_g$  称为该恒星的引力半径或席瓦西尔半径。

上面介绍的黑洞概念本身是易于理解的，然而问题是一颗恒星能否收缩到引力半径  $r_g$  这么大小，甚至更小的区域呢？根据简单计算，太阳的引力半径大约为 3 千米（太阳的实际半径为  $6.96 \times 10^5$  千米）；地球的引力半径则不到 1 厘米（实际半径为  $6.37 \times 10^3$  千米）。显然，引力半径比它们的实际半径要小得多。那么，自然界是否存在这么大的作用力，能够把星体收缩到如此之小的区域之内呢？长期以来人们一直认为是不可能的。即使爱因斯坦的广义相对论问世后，1916 年就算出了以上的引力半径，但也仅看作是理论计算的一个数学解，并没有引起人们的重视与注意。但是本世纪 60 年代以来，随着恒星演化理论的发展以及天文观测手段，特别是射电技术的进展，黑洞这一理论概念受到越来越多的物理学工作者的重视。到了 70 年代，黑洞则成为当时天体物理学的一个热门的前沿课题，使许多人深入到这个领域，展开了多方面的研究，甚至成了社会文化的一个热门话题。

恒星演化理论的发展使人们认识到，不需要依靠什么神奇的力量，仅

仅依靠物质本身的引力，就能使星体一直崩塌收缩为一个黑洞。我们知道，恒星的演化是以前其内部核反应的能源作标志的，该能源维持着星体内部的温度及压力分布，而正是后者抵挡了星体的自身引力作用，实现着力学的平衡。一颗恒星当其内部核燃料耗尽，核反应停止后，究竟演化为哪一类天体，完全取决于其自身的质量，目前的理论结论大致可归结如下：

对于  $M < 1.2M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  为太阳质量) 的晚期恒星，将演化为密度极大的白矮星，它由高密度的等离子体构成(密度约为  $10^9$  千克·米<sup>-3</sup> ~  $10^{12}$  千克·米<sup>-3</sup>)，即使它的温度降得很低，根据量子力学中的泡利不相容原理，电子不能占有相同的能量空间，这意味着物质内部结合的紧密程度有一定的限度，当物质内部粒子靠近这一限度时，就会出现相互排斥的作用，这种作用称为简并电子气体的费米压力。白矮星内部正是由电子简并压力与引力保持着平衡，这类恒星在晚期还会丢失部分或大部分质量，从而形成一颗质量较小的白矮星。

对于  $1.2M_{\odot} < M < 3.2M_{\odot}$  的晚期恒星，将最后演化为中子星。所谓中子星是由原子核瓦解后形成的高密度中子气体所构成(密度约为  $4 \times 10^{17}$  千克·米<sup>-3</sup>)，中子星靠中子气的简并压力与引力平衡而存在。1967 年观测到的脉冲星被证实是快速旋转、并具有强磁场的中子星。

对于  $M > 3.2M_{\odot}$  的晚期恒星，它的内部再也没有能抵挡住引力的作用机制了，因此不再存在稳定的结构，这种星体将无止境地塌缩下去，最后形成黑洞。

当一颗恒星最终形成黑洞后，任何信息都不能传出来，那么天文上如何能观察到黑洞，或如何确定黑洞的真实存在呢？虽然黑洞是漆黑一团、不发射任何东西，但还是有许多外部的观测效应，为黑洞的存在提供有力的证据。

寻找黑洞的可行途径之一是利用密近双星。所谓密近双星是指靠得很近的两个星体，在相互引力作用下，形成相互环绕运行的一个系统。每一个双星系，常常由一个明显可见的正常星和一个看不见(或看不清)的物体(从正常星体运行轨道可推断其存在)所组成，前者称主星，后者称伴星。如果一个黑洞和一个正常恒星构成密近双星，那么我们可以通过正常星的运行周期、质量来判明其中黑洞的存在。

另外，双星系中的主星，由于受到伴星黑洞强大引力的吸引，当其外层物质被黑洞潮汐力撕裂后，这些物质必然会被吸积到黑洞中去。在这些物质向黑洞坠落的过程中，巨大的能量将以 X 射线或  $\gamma$  射线辐射出来。所以，强烈 X 射线源常常是寻找黑洞的主要线索之一。

现在大多数天文学家认为“天鹅座 X-1”这一密近双星系的一员，很可能是黑洞。因为根据天文观测，其主星是质量为太阳质量 20 倍的超巨星，周期为 5.6 天。这说明两星的密近程度，而其伴星的质量亦很大，是太阳质量的 5.5 倍以上，所以不可能是中子星。这颗看不见的星还测到了

强烈的 X 射线辐射。美国在 1978 年 11 月发射的“高能天文台 2 号”卫星，曾特地给这个最有希望的黑洞候选者拍摄了一张 X 光照片。

虽然许多天文学家相信黑洞的存在，但是因以上这些证据都带有某些不确定性，所以还有争论。人们正通过其他途径努力寻找黑洞存在的更确切的证据。

在黑洞理论方面，英国当代著名物理学家霍金 (S.W.Hawking) 作出了重要贡献：1971 年提出了黑洞面积不减定理；1974 年进一步把量子理论与广义相对论结合，提出了黑洞的辐射理论，这就是在 70 年代~80 年代引起物理学界轰动的“霍金辐射”。

### 【新星和超新星】

在天空中本来看不到星的地方突然出现的亮星，天文学上叫做“新星”。新星是一些正在膨胀着的恒星，在膨胀时喷向宇宙空间的恒星物质像一个膨胀着的气体壳层，它被恒星的其余部分所照亮，所以能为我们观察到。其中有些亮度特别大的新星叫做“超新星”。

其实把它们叫做“新星”、“超新星”真有点名不符实。它们并不是什么新产生或新出现的恒星，恰恰相反，它们都是演化到了晚期的恒星。它们原来的亮度太微弱了，人们用望远镜也观察不到它们，而当它们进入晚期、发生爆发时，亮度突然（可在不到一天的时间内）增加到原来的几万、几十万甚至几百万倍时，才为人们所观察到。我国古代把它们看作是偶而来做“客”的，所以称之为“客星”，又名“暂星”。

晚期的恒星为什么会爆发呢？原来恒星在中年期是比较稳定的（如太阳目前就处在中年期），其内部物质间的万有引力作用使恒星有巨大的向内收缩的力；而恒星中心区域又在发生轻核聚变反应——热核反应，热核反应一方面使它向外产生辐射，有辐射压力，另一方面又使恒星内部达极高温度，组成恒星微粒的热运动也会产生向外的气体压力。这些向外的压力与引力的收缩作用平衡时，恒星就处于稳定状态。

恒星内部的热核反应最初是氢聚合成氦，在恒星内近中心的地方，温度和压力都最高，热核反应主要在此进行，因此这里的氢最早消耗完毕，而在中心区域形成一个由氦组成的核心，叫氦核。当恒星中央形成氦核时，其周围氢的热核反应仍在不断继续和向外扩展，再向外是尚未“燃烧”的氢的壳层。此时恒星中心的温度约 1500 万，密度为 100 吨/米<sup>3</sup>，即温度和压力都还未高到足以使氦发生热核反应的程度，也就是说在氦核区的热核反应暂停了，不再供应能量了。于是向外的斥力就减弱了，引力和斥力间的平衡遭破坏，等到氦核的质量达到一定程度，巨大的引力就会使恒星的核心部分向内收缩，收缩时要释放大量能量，一部分能量使氦的温度升高、燃烧，当达到点火温度时，氦又发生聚合成碳的热核反应；另一部分能量输送到外壳，使恒星外层的物质急剧膨胀，表面积迅速增大，恒星又处于新的平衡状态。待氦用完后又继之以碳、氧……的聚合反应，最后

较轻的元素都合成为铁族元素，而恒星中并不具备铁族元素的聚合反应的条件，于是恒星内的热核反应就停止。这意味着使恒星物质间的巨大引力完全失去了与之抗衡的斥力，犹如坑道中抽掉了支撑的坑木，整个恒星向中心激烈“坍缩”，把核心部分的物质挤压得非常厉害，致使组成物质的原子中的电子也被挤压到核内，与核内的质子结合成为中子，恒星的核心部分演化为中子星，同时又向外放射出大量中微子。中微子具有极强的贯穿本领，强大的中微子流毫不费劲地撕碎恒星外壳，并将它抛向远方。恒星外壳的这种迅猛异常的碎裂、膨胀过程，释放出惊人的能量，这就是新星、超新星的爆发过程。晚期恒星爆发时抛向宇宙空间的外壳（这部分约占恒星总质量的1~2%）成为星云，而残留下来的核心成为密度更大的星体，小质量（小于1.2个太阳质量）的恒星演化为白矮星，中质量（1.2~3.2个太阳质量之间）的恒星演化为中子星，大质量（大于3.2个太阳质量）的恒星则演变为黑洞。

新星和超新星的爆发过程，并不意味着一颗恒星的灭亡，但显然是一颗耗尽核燃料的恒星坍缩为白矮星、中子星等的巨大“灾变”。在此剧变时释放出极大的能量，超新星爆发时一秒钟放出的能量，相当于100亿亿颗百万吨级的氢弹爆炸的能量，它在几天内产生的能量超过它在几十亿年内所辐射出的能量总和。所以根据我国宋史记载的、公元1054年5月在金牛星座的星（我国古代叫天关星）附近出现的一颗超新星，虽然与地球相距5000光年之遥，但人们仍然可以用肉眼在大白天看到它“芒角四出、色赤白”的壮观盛况。这最大光度阶段经历的时期并不长，继而它又逐渐暗淡下来，回复到原来的光度。如1054年的这颗超新星，持续亮了23天才开始暗下来，近2年才从人的视野里消失。（现今所看到的蟹状星云就是该超新星爆发后遗留下来的气体云。其中心处的星体，就是一个每秒转动30周的中子星，这类闪烁发光的中子星也叫脉冲星。）超新星爆发时喷向宇宙空间的恒星物质，像膨胀着的气体壳层，其膨胀速度可达每秒几百千米、甚至几千千米以上。研究这些高能现象和过程，有可能使人们探索到天体起源和演变的奥秘。超新星爆发所产生的强辐射，也可能是地球上古老的庞然大物——恐龙灭绝的原因。地球上现存的较重的元素，以及人体所需的大多微量元素，如铁、铜、锌、钼等，几乎都是超新星爆发留下的“灰烬”。

在银河系里观察到的上一颗超新星是由开普勒在1604年于长蛇座发现的。至今在银河系内已发现了150个以上的新星和7个超新星，如1901年发现的英仙座新星、1918年的天鹰座新星，1942年的船尾座新星等都是有名的新星。我国公元1700年之前古书记载、现整理并认证出来的约有90个新星和超新星的记录。

#### 【脉冲星】

1967年英国剑桥大学新建了一架射电望远镜，用来观察行星际闪烁现

象，以此研究射电源的性质。所谓行星际闪烁是指遥远恒星所发射的电波在通过太阳系中各行星际空间时，这些电波讯号大小产生起伏变化的现象。射电讯号起伏主要是受行星际空间的太阳风（太阳上抛射出来的带电粒子流）作用所引起的。望远镜的观测由记录仪自动记录在纸上，然后由计算机分析。但因仪器刚投入运行，为了检验它们工作是否正常，所以当时由一位叫乔斯琳·贝尔的年轻研究生进行人工分析。

1967年10月贝尔发现，仪器记录纸上有一段不易辨认的记录，它不是闪烁，也不是其他干扰，因为它出现在深，深夜时太阳是在地球背面，这时太阳风引起的闪烁非常小，贝尔感到这个现象无法解释，就去请教她的老师赫威斯（A.Hewish）。赫威斯决定对这一现象作快速记录，以便弄清这段信号的精细结构。经过一番周折终于在11月末获得了第一个快速记录结果，研究发现这段信号不是那种没有规则的跳动，而是一连串有规则的脉冲，每两个脉冲间隔周期都是1.337秒，极其稳定，极其准确。那么这种脉冲信号是从哪里发出来的呢？根据进一步的分析，这种脉冲信号既不可能是地球上某个电台发射的无线电信号，也不可能是其他星球上的“理智居民”、所谓的“小绿人”发出的无线电报。赫威斯肯定这种脉冲信号来自一种新型的天体。1968年2月英国的《自然》杂志发表了赫威斯和贝尔等5人的文章，标题就是“发现快速脉冲射电源”。这种奇妙新天体的发现，很快就轰动了全世界的天文学家与物理学家。这种脉冲射电源很快被定名为脉冲星。到1978年，人们已经在银河系内找到了300多颗脉冲星，它们的周期短到0.033秒，长到3.7秒。据估计，银河系内脉冲星的总数至少有10万颗左右。

为什么人们对脉冲星的发现如此重视呢？脉冲星的什么奇妙特性引起人们巨大的兴趣呢？这又要从晚期恒星结构说起。我们知道，恒星的能量主要来自其内部的核反应所释放的能量，当恒星稳定地燃烧其核燃料时，依靠核反应产生的辐射和热压力同它自身的引力相抗衡来维持平衡，核燃料烧完之后，恒星会不会在自身引力作用下无限制地收缩下去呢？不会，当星体收缩到一定程度，由于物质密度增高，内部物质粒子的相互靠近，会出现一种叫做电子简并压力，只要恒星质量 $< 1.2$ 倍太阳质量，这种压力就能抵挡住恒星的自身引力。所谓电子的简并压力，是一种量子效应，根据泡利不相容原理，一个系统中不可能有两个电子处于完全相同的状态。又根据测不准原理，当电子处于某个状态时，它的位置确定得越准确，其动量值变化的范围就越大。当恒星晚期达到高密度状态时，其中的电子不可能处在相同的状态，它们因挤压所占的空间体积非常小，所以，每个电子的空间位置的变动范围就非常小，因而其平均动量就变得非常大，动能也很大。根据气体分子运动论，这种状态下的电子“气”的压强也极大，这种压强就是电子简并压的来历。电子简并压与恒星的自引力相抗衡，使星体处于一种新的平衡状态。这样的晚期恒星就是白矮星，它的密度可达

到 100 千克/立方厘米以上。

1932 年发现中子以后不久，前苏联物理学家朗道就猜测，既然中子和电子一样服从泡利不相容原理，那么由中子气的简并压同引力相平衡也将形成一种稳定的状态。宇宙中可能存在这种完全由中子组成的更高密度的星体——中子星。这是关于中子星的最初预言。那么，这种完全由中子组成的极高密度的中子星，在自然界中真的存在吗？它通过什么途径形成的呢？美国科学家巴德和兹维基首先提出，中子星可能是在超新星爆发过程中形成的。1934 年，他们发表了一篇题为“超新星及宇宙线”的短文，全文只有 400 字，却对超新星爆发的全过程作了全面的推测，这些推测几乎全部为今天的天文观测所证实。所以，它是一篇科学史上不同凡响的论文，文章最后的论述是：“作为存照，我们还提出这样的观点：超新星是表示从普通恒星到中子星的过渡，所谓中子星，就是恒星的最终阶段，它完全由挤得很紧的中子构成。”1939 年，物理学家还进一步建立了一个中子星的简单模型，预计这种星的质量与太阳同数量级，但体积很小，直径只有几十千米，其密度则高达每立方厘米几亿吨到几十亿吨。

30 年代关于中子星的一系列科学预言，在以后几十年中却一直没有为天文观测所证实，中子星一直渺无踪影，关于中子星的预言也备受冷落。就在这种情况下，赫威斯与贝尔的发现，很快为科学界公认，1968 年所发现的脉冲星不是别的，正是几乎被人遗忘了的中子星。那么，怎么知道所发现的脉冲星就是中子星呢？这主要从脉冲星发射的脉冲信号的特征，可以分析出能发射这种脉冲信号的星体必定是中子星。我们知道，中子星是由恒星坍缩而成的，根据角动量守恒定律，恒星坍缩过程中角动量是不会改变的，当恒星坍缩为中子星时，尺度变小了许多倍，所以，中子星的角速度比恒星的自转角速度要大许多倍，计算表明，中子星的角速度大约为 1 秒左右转一周，这同观测到的脉冲星周期范围是符合的，所以，中子星是高速旋转的星体。另外，在恒星坍缩为中子星的过程中，磁场也会随星体而收缩，星体表面的磁场变得非常强。例如一个太阳大小的恒星表面磁场强度大约为  $10^2$  高斯，但当这个恒星收缩为半径 10 公里的中子星时，磁场强度可达到  $10^{12}$  高斯。这一点已为 X 射线脉冲星的能谱分析得到证实。在这么强的磁场中，电子几乎沿磁场方向高速运动，从而发出的同步加速辐射与电子运动方向相同，形成一个细的射线束，一般中子星磁轴与自转轴并不重合。因此，当中子星自转时，这个细的射线束也在空中扫射，像探照灯光扫过空间一样，当它扫过我们的望远镜时，便形成一个脉冲信号。中子星转一周，射线束在空中扫一圈。所以，脉冲信号的周期就反映了中子星的自转周期。观测表明，在一个周期内，脉冲所占的时间仅为百分之三到百分之十，其余大部分时间无信号。观测的结果与理论推测是一致的。

脉冲星的脉冲周期极其稳定，这主要是由于中子星的自转周期基本恒定。但它的周期也不是完全不变的，而是会逐渐细微地变慢，大约一天中

周期加长  $1.5 \times 10^{-13}$  秒。从脉冲星周期的细微变化中可以推测它的年龄。在已经观测到的脉冲星周期中，蟹状星云脉冲星的周期最短，说明它是一颗比较年轻的中子星，它每天周期大约变长 35 毫微秒，由此可推出它的年龄为 1000 年左右，这与天文观测值符合得较好。而且脉冲星自转周期的细微变化，恰恰是其能量的来源。我们知道当星体在引力坍缩时，星体自转加快，这时引力能转化为转动能，当转动逐渐变慢时，能量又转化为磁场中高能电子的能量，由此获得同步辐射的能量。

中子星的表面温度约为 1000 万 K，中心温度高达 60 亿 K，是一个少有的超高温世界。中子星又是超高密度物质，密度高达  $10^{15}$  克/厘米<sup>3</sup>。总之，中子星具有超高密度、超高温、超高压、超强磁场、超强辐射等各种“极端”物理条件。这在地球上的实验室内是无法实现的，这是一个天然的理想实验室，利用它可以研究各种极端条件下的物质性状。

脉冲星的发现并被证实为中子星，为恒星晚期演化理论提供了关键性的支持，为宇宙中物质形态多样性的观点提供了有力的证据，为现代物理学学科的发展提供了新的领域及动力。这一发现的意义的的确十分重大，它当之无愧地被列为 20 世纪 60 年代天文学的四大发现之一。赫威斯因此获得了 1974 年诺贝尔物理学奖。

### 【膨胀的宇宙】

爱因斯坦在 1917 年首次提出的宇宙模型是静态的，即认为宇宙在大尺度结构上是静止不变的。在这之后不久，陆续又有其他人提出了一些宇宙模型，其中弗里德曼和勒梅特前后得出了动态的，即膨胀的宇宙模型。所谓膨胀是指宇宙的空间尺度随时间而不断地增大。如果我们仍用二维的有限无边的球面来类比三维的有限无边的宇宙，那么膨胀的宇宙就类似于一个不断吹胀的气球。当气球不断胀大时，气球上的许多小点间的相互距离就越来越大，它们的密集程度就越来越稀，如右图所示。

图中的小点可代表宇宙中的星系，当球面不断膨胀时，任何星系之间的距离就越来越大。如果我们设想一个观测者站在其中的任何一个星系上，他就会发现，所有其他的星系都在远离他而去。而且，与他距离较近的星系离去得慢一些，与他距离较远的星系离去得快一些。距离越大，彼此远离的速度越大。这就是一幅膨胀宇宙的图景。

那么这样一种膨胀的宇宙模型，是否代表真实的客观宇宙图景呢？为什么长期以来人们总是认为宇宙是不变的呢？诚然，有浮云掩月、天空绕北极星回旋、还有月亮的圆缺、月亮和行星在星空背景上运行等，然而，这些只不过是太阳系里的运动所产生的局部现象。在行星以外，所有的恒星都像是永恒不变、不动的，不然还会叫恒星吗？但是事实上恒星不恒，即使是恒星也都在变、都在动，一颗快速的恒星一年大约要走 100 亿公里左右。那么为什么我们看不到恒星的运动呢？这主要是这些恒星离我



们实在太远了。最近的恒星距离我们至少在几十亿公里以上，因此我们就很难观察到恒星视位置的变化，所以长期以来静止不变宇宙的观念一直占统治地位。直到本世纪 20 年代，由于天文观测上河外星系光谱线的红移现象的重大发现，静止宇宙的观念开始动摇，一个动态的膨胀宇宙的观念逐步确立。

首先在 1910~1920 年的 10 年内，洛威尔天文台的斯莱弗(V. Slipher)发现许多星系的谱线有红移现象(极少数星系，如仙后座星系，有蓝移现象)。所谓红移，就是整个光谱结构向光谱红色的一端偏移。这现象可以用多普勒效应加以解释：由于星系的退行(即退离我们的运动)，接收到的星光的频率就变低，谱线就向红端(长波方向)移动，而且从红移的大小还可以算出这种退行速度。根据这种解释，星系光谱线的红移，说明绝大多数星系都以不同的速度离开我们而运动。

1919 年美国天文学家哈勃(E. Hubble)发现，所有河外星系的谱线都有红移现象，他把所测得的各星系距离和它们各自的退行速度画到一张图上，然后发现，在大尺度上，星系的退行速度是和它们离开我们的距离成正比的，越远的星系退行得越快，即红移越大。这一比例关系叫做哈勃定律，它可表示为

$$v_0 = H_0 r。$$

其中 $v_0$ 为星系退行速度，距离 $r$ 的单位为光年， $H_0$ 称为哈勃常数，目前一般认为的估计值为 15 千米/(秒·百万光年)，因为星系距离很不容易测定，所以 $H_0$ 至少有 25%的误差。哈勃定律给我们提供了星系都远离我们而去的有力证据。值得指出，所有星系都远离我们而去，好像我们所处的银河系是处在宇宙的中心。其实，其他星系并非只是离开我们而去，而是彼此相互远离。从任何一个星系上看，其他星系都在退行远离，这实际上显示的正是我们前面所绘出的一幅宇宙膨胀的图景。

宇宙膨胀的观念彻底改变了宇宙学上的一种传统观念，即认为大尺度上的天体应当是静态的。也就是说，虽然太阳、银河等小范围中的天体是有运动的，但是在一个更大的尺度上看天体系统的平均速度应当为零。形成这种观念的根源是，我们肉眼常见的天空景象，除了东升西落之外，几乎看不见其他变化。爱因斯坦也没有摆脱这种传统观念的束缚。尽管按照他的引力场方程只能得到运动的解，但是他觉得大尺度的运动(即动态的宇宙)是不能接受的，所以他甚至不惜修改引力场方程，以凑出一个静态模型。红移现象发现后，爱因斯坦对自己原来的做法深表后悔，本来宇宙膨胀是他广义相对论的一个自然结果，可是他却放弃了它。爱因斯坦曾说，这是他“一生中最大的一件错事！”

人类认识到宇宙的膨胀，是宇宙学历史上的一件大事。天文观测上红移的发现，证实了宇宙膨胀的事实。这又一次说明实践是检验真理的唯一标准，科学实验是推动科学发展的强大动力。

## 【大爆炸宇宙学】

我们已经知道，宇宙是膨胀的。既然认为宇宙一直在膨胀，那么逆着时间往上推，追根寻源，早期的宇宙一定处在比现在小得多、密集得多的状态，而且原则上允许一直追溯到初始奇点（即体积无限小、密度无限大的一种状态）。因此，人们提出了宇宙是起源于原始火球大爆炸的假设。原始火球就是初始奇点，现在宇宙的膨胀正是大爆炸所开始的空间膨胀的继续。值得指出，所谓大爆炸是空间本身的“爆炸”，即从一开始就充满整个空间的爆炸，而不是有什么东西在现成的空间中爆炸。目前比较盛行的是热大爆炸宇宙学。这一派的主要观点是，我们的宇宙曾有过一段从密到稀，从热到冷的演化历史，按照这种观点来研究宇宙中物性演化的历史，统称为大爆炸宇宙学。

大爆炸宇宙学是本世纪 40 年代由伽莫夫（G.Gamow），阿尔芬（R.A.Alpher）和赫尔曼（R.Herman）提出来的。他们认为宇宙是在 100 多亿年以前，由一个超高温、超高密的原始火球（宇宙蛋）发生大爆炸而产生的。从他们三位开始，经过许多科学家，包括许多粒子物理学家的努力，目前我们已经能够作出宇宙的形成和演化的过程，大致如下：

（1）大爆炸 宇宙开始于一个初始奇点。那时它有无限高的温度和无限大的密度。宇宙从此爆炸，从此时间开始。当然，目前还不能用已知的数学和物理规律来说明当时的情况。

（2）宇宙暴涨 根据现有的粒子物理理论，可推知大爆炸后  $10^{-43}$  秒的情况。那时宇宙密度是  $10^{93}\text{kg}/\text{m}^3$ ，温度为  $10^{32}\text{K}$ （地球平均密度为  $5 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ ，温度为  $300\text{K}$ ；宇宙现时的平均密度估计为  $10^{-27}\text{kg}/\text{m}^3$ ，温度为  $3\text{K}$ ），宇宙没有任何粒子，只有时间、空间和真空场。在  $10^{-35}$  秒、温度为  $10^{28}\text{K}$  时，宇宙发生了一次暴涨，其直径在  $10^{-32}$  秒内增大了  $10^{50}$  倍。激剧的暴涨产生了数目惊人的粒子。但由于能量非常高，这时强作用、弱作用和电磁作用没有区别，都还是统一的一种力，而产生的粒子也没有区分。这一时期重子数不守恒的过程不断进行，造成重子略多于反重子。暴涨过后，宇宙继续膨胀，强作用、弱作用和电磁作用逐渐区分开来。当温度降至  $10^{13}\text{K}$  时，夸克才结团构成质子和中子一类的强子。这时宇宙中除了质子和中子外，还有电子、光子、中微子、 $\mu$ 子、介子、超子等等。大约在大爆炸后百分之几秒、温度降到  $10^{11}\text{K}$  时，粒子的热运动能量远低于重子（中子、质子等）的静能，因此产生重子的反应停止了，短寿命的重子迅速衰变而消失，正反重子对也迅速湮灭，重子中只剩下一些质子和中子，结果反物质也消灭了。

因中子与质子的静能之差并不大，小于当时的热运动动能，所以两者容易和轻子反应而互相转化，质子和中子的数目几乎相等，它们和轻子、光子一起处于热平衡状态，这时轻子反应仍很强烈。

中子质量大于质子，随着温度的降低，中子转变为质子的过程将比逆

过程占优势，结果中子逐渐减少，质子逐渐增多。

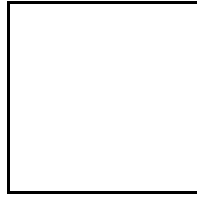
(3) 4 秒钟以后 温度降至  $10^9\text{K}$  以下。这样的温度不足以产生正反电子对，因此，正反电子对迅速湮灭。加上中微子温度降低，质子和中子之间的转变反应基本停止。这时中子数约占 14%，质子占 86%。

(4) 3 分钟之后 温度降到  $10^8\text{K}$ 。这时热运动动能不足以破坏氦核，于是中子和质子迅速结合成氦核，氦核又通过各种反应形成氦核。中子占 14% 左右，当中子全部和质子结合成氦核后，氦约占总质量的 28% 左右。这时各种粒子在相互碰撞中，由于能量不够，不能相互转化（少量的湮灭除外）。因此，从这时起宇宙中各种粒子数的丰度就基本保持不变直到今天。这时宇宙的年龄大约为 30 分钟。今天实测的氦丰度和这一理论值非常一致，是大爆炸理论的令人信服的证据之一。

(5) 随后的 100 万年 在大爆炸半小时后，大量正反粒子湮灭，产生了大量的光子、中微子和反中微子，这时宇宙中重子数与光子数的比约为  $10^{-9}$  以，当时的宇宙是光子的海洋。由于这时温度仍然很高，光子有足够的能量去击碎任何短暂形成的原子。但是，随着宇宙的膨胀，光子能量在不断减小，这是多普勒效应的结果。由于宇宙的膨胀，光子到达任何一点时，都将因退行引起的多普勒效应而使其波长变长而能量减小；由于退行速度随宇宙的膨胀而逐渐增大，这些光子的波长也就不断增大而能量不断减小。大约经过 100 万年，这些在大爆炸初期产生的光子的能量就降到了不足以击碎原子、甚至激发原子的程度，于是宇宙中的原子和光子变成了没耦合的两种独立组份。此后原子气体的变化将对光子气体不发生影响，这时宇宙就进入了退耦代，宇宙变得透明。这时宇宙的温度约降到  $3000\text{K}$ 。从这时候起开始形成原子，最初是形成较轻的元素。较重的元素是在星系、恒星形成后，在恒星内部形成的。在恒星形成后，在各恒星的内部也就有各自不同的温度了。

从退耦代开始，宇宙中脱离了耦合的光子气体，叫做宇宙背景辐射场。这些大爆炸初期产生的光子，随着宇宙的膨胀，能量还在不断减小。伽莫夫提出 100 多亿年之后这种显示大爆炸遗迹的光子应该仍然存在，他还计算出这种光子现在的波长应该是 1 毫米（即相当于无线电微波），这种光子相应的温度应该是  $5\text{K}$  左右。这一预言在 1965 年被美国贝尔实验室的两位工程师彭齐亚斯（A. Penzias）和威尔逊（R. Wilson）所证实，所以，大爆炸宇宙模型很快就成为人们公认的最好的宇宙模型，称为“标准模型”。

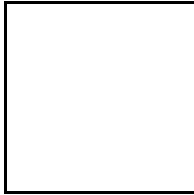
(6) 今日宇宙 宇宙从大爆炸至今，大约已有 100 多亿年了。根据大爆炸宇宙学，很容易计算宇宙年龄的估计值。宇宙的年龄就等于哈勃常数  $H_0$  的倒数，即



大约 100 亿年 ~ 200 亿年之间。宇宙年龄的这个估计值，与放射性年代测定银河系中最古老星系的年龄相符，也和天文观测估算最老的球形星团的年龄一致。也可以说，所有已知宇宙间最古老星系物质的年龄，均不违背大爆炸宇宙学。这也是支持大爆炸宇宙学的观测事实之一。

宇宙从光子退耦代至今，差不多 100 多亿年了。在宇宙的演化史中，这个阶段最长。在这个阶段开始时，宇宙中主要是气状物质，以后逐渐靠引力的作用及某些扰动引起气体物质的局部塌缩，逐渐发展成星云，再进一步收缩成星系、星团、恒星、行星……直到形成我们今天看到的星空世界。

上面我们概略介绍了大爆炸宇宙学所描述的宇宙演化史，下面列出宇宙演化历史的大事表，其中有关 50 亿年前事件的时间标度，只能看作为假定，因为我们现在还不能精确知道宇宙的年龄。



从上可见，大爆炸宇宙模型，由于得到许多观测数据的支持，特别是 3K 宇宙背景辐射预言的证实，更为大爆炸宇宙学奠定了非常可靠的基础。就在作者编写本书之际，又传来了支持大爆炸理论的最新成果，美国宇航局的“宇宙历史背景探测者”卫星发现宇宙最远的天区存在物质波动，这一发现对长期以来还没解决的星系、恒星形成理论是一个有力促进，对宇宙的大爆炸模型又提供了新的证据。当然，大爆炸模型尚未解决的疑难问题还很多，这些将有待人们进一步去研究，因此，宇宙学作为人类探索自然奥秘的重要前沿之一，它将继续激励人们的兴趣，争取对宇宙之谜的探索取得新的突破。

#### 【宇宙微波背景辐射】

1978 年度的诺贝尔物理学奖，由两位美国的无线电工程师彭齐亚斯 (A.A.Penzias) 和威尔逊 (R.W.Wilson) 所获得。瑞典科学院在颁奖的决定中指出：“彭齐亚斯和威尔逊的发现是一项带有根本意义的发现：它使我们能够获得很久以前，在宇宙的创生时期所发生的宇宙过程的信息。”这样一个重要发现，称得上是哈勃定律以来宇宙学上最重大的进展，却是在无线电通讯的研究中完全偶然发现的。

1964 年，美国贝尔电话实验室在新泽西州荷尔姆德的克劳福德山上建起了一架巨大的喇叭形天线，这架不寻常的天线的特征是一个 20 英尺、具

有极低噪声的角状反射器。他们建立这架天线的目的是为了改善卫星通信的质量，提高通信的效率，消除各种噪声，或者至少查明各种噪声的来源。彭齐亚斯和威尔逊正是利用这架方向性很好的喇叭形天线来查明太空中各种原因的噪声，无线电工程师的行话就是测量天空的有效噪声温度。

无线电工程技术中所说的噪声，与日常生活中所谓的噪声不同，它指的是通信、广播中影响正常信号传递的各种无规则信号。例如，天线结构和放大器电路中，由于电路材料中导电电子的无规则热运动所产生的电路器件的固有噪声。一般来说，温度越高，电子的热运动越激烈，它的噪声也越大。因此，噪声的大小与温度有一定的对应关系。无线电工程上常用温度来标志噪声，对于那些不是由于热运动所造成的噪声，也用一个对应的“等效温度”来表示噪声辐射强度，即统一用“温度”来表示各种原因的噪声水平。

彭齐亚斯和威尔逊为了测量来自太空的微小噪声，首先采用方向性特别好的喇叭形天线以减少地面及周围的无线电干扰，他们设计的性能优良的天线，使地面噪声的贡献只有绝对温度 0.3 度。另外为了减少天线、接收器、波导管等电路对于噪声的贡献，他们用了一种称为“冷负载”的设备，将接收到的功率和一个浸在绝对温度为 4 度左右的液氦里的人工噪声源所给出的功率相比较，因为放大电路的噪声电平对于两种情况都是一样的，因此，在比较中就可以消除它，从而可以直接测量天线接收到的功率。

1964 年 5 月进行了初步的测量。出乎彭齐亚斯和威尔逊的意料，在 7.35 厘米波长的微波段上，扣除大气噪声、天线结构的固有噪声及地面噪声后，最后还有 3.5K 的剩余噪声。为了找出这剩余噪声的来源，首先考虑的是天线本身产生的电噪声是否比预期的高。为此，彭齐亚斯和威尔逊仔细检查了天线金属板的接缝，赶走了曾在天线的喉部筑巢的鸽子，清扫了天线，除去了鸽子巢居期间在天线喉部涂上的一层“白色的电介质”（鸽粪）。所有这些努力，均没有能消除这个剩余噪声。

从 1964 年到 1965 年，彭齐亚斯和威尔逊发现，这个消除不掉的噪声，在一天之中没有变化，在一年四季也没有变化，且是一种与方向无关，亦无偏振的“稳定”不变的噪声。显然，这种噪声不可能来自人造卫星，不可能来自太阳或银河系，同样也不可能来自河外星系的某个射电源。因为，以上这些来自某个辐射源的信号是有方向性的：当天线指向这个方向时，接收到的信号就较强；背对这个方向时，接收到的信号就较弱。而实际测得的这些微波噪声完全不随方向变化，这就足以证明这些噪声一定不是来自任何一个射电源，它必定来自银河系之外的、更广阔的宇宙，它在各方向上分布均匀，弥漫于整个天空背景上，而它的等效温度为 3K 左右，彭齐亚斯和威尔逊就给它起名叫“3K 微波背景辐射”。但这种微波背景辐射究竟是什么原因造成的？他们无法回答。

这个神秘的消除不掉的微波噪声的来源及意义，很快从普林斯顿大学

的天体物理学家那里得到了解释。彭齐亚斯在一次完全偶然的电话联系中，从朋友贝尔纳·伯克（Bernard Burke 麻省理工学院的射电天文学家）那里知道，普林斯顿大学的一个天体物理研究组不久前发表了一篇论文的预印本，文中预言在 3 厘米波长的微波段，应当接收到温度为 10K 的噪声。彭齐亚斯与威尔逊很快就向这篇文章的作者、普林斯顿大学的物理教授迪克（R.H. Dicke）等人发出了邀请，并进行了互访。他们相信，彭齐亚斯和威尔逊发现的这一消不掉的噪声，很可能正是普林斯顿大学以迪克为首的研究组，已经理论预言、并正在努力寻找而还没有找到的东西。这次互访促成了两项完全不同研究目的的美妙合作，使贝尔电话实验室为提高卫星通信质量而进行的、非常实用的研究项目，意外获得了完全属于基础理论研究的、纯粹是宇宙学探索的一项带根本性的重大发现。

普林斯顿的天体物理学家究竟是如何作出这一预言的？彭齐亚斯和威尔逊的发现又为什么正好证实了他们的预言呢？这还得从大爆炸宇宙学说起。

我们已经知道，本世纪 40 年代末期，伽莫夫、阿尔发及赫尔曼根据河外星系光谱的红移现象，得出了宇宙膨胀的结论，从而提出了宇宙演化的大爆炸模型理论。

根据这一理论，宇宙起源于一次原始火球的大爆炸，由此宇宙不断膨胀，不断降温，从核子合成到元素生成，直至构成今天的世界。他们在 1948 年曾经作出过一个预言：宇宙经过 100 多亿年的不断冷却，到今天应当还留下 5K 的辐射背景。但是，由于当时大爆炸生成元素理论所遇到的一些困难，这些宇宙学的早期工作几乎没有引起人们的重视，并很快被人们遗忘。普林斯顿大学迪克等人也不知道伽莫夫等人的这一预言。但是，他们继承了大爆炸理论的思想。大爆炸宇宙学关于宇宙背景辐射的预言，同彭齐亚斯和威尔逊测到的结果正好相符。

为了进一步证明，彭齐亚斯和威尔逊所发现的微波背景辐射确实是宇宙早期一度处于热平衡状态时所遗留下来的辐射，科学家们提出了一个十分严格的检验办法。因为宇宙背景辐射来自宇宙一度达到的热平衡状态，它应当具有热平衡物体辐射——黑体辐射的特征，即辐射能量随波长的分布应符合普朗克公式的黑体谱曲线。紧接着，彭齐亚斯和威尔逊发现，所测的背景辐射，强度随波长的变化恰好符合温度为 2.7K 到 3K 的黑体谱曲线。1990 年，根据人造卫星（Cobe 卫星）对于背景辐射的测量，给出了更加精确的符合温度为 2.7K 的黑体谱曲线。这次测量结果之所以引起人们的特别重视，原因是利用卫星才有可能精确测量到波长小于 0.1 厘米的红外波段的背景辐射，而在此之前红外波段背景辐射的测量是比较粗糙的。

当我们了解了微波背景辐射的来源后，就立即认识到这项发现的重要意义了。假如我们把宇宙学亦看作为一门考古学，那么，宇宙背景辐射就是 100 多亿年前，宇宙早期遗留下来的、被红移了的辐射“化石”。我们

从这一宝贵的“化石”中可以推出宇宙演化的许多历史事实。

从宇宙微波背景辐射的实测温度为 3K 这个关键性的数字,首先可以得到一个最重要的定量结论,即在宇宙早期,每个核子都伴随着 10 亿个光子,即核子数与光子数之比为  $10^9$ ,这个数字对于考察早期宇宙的历史是一个重要的数据。从这个数据出发,我们可以得出结论,星系和恒星的出现必然在宇宙温度降到 3000K 以下、中性原子形成之后。另外,从这个数据再往前推,我们又可以知道,在宇宙更早一段时间,必然是以辐射为主,即宇宙中辐射所含的能量比物质所含的能量大得多。

宇宙微波背景辐射的各向同性,表明宇宙在大尺度上确实是非常均匀的。它也反映了在大爆炸后 50 万年的那个时候的均匀性,因为背景辐射正是在这一时刻发出的。这也说明星系、星系团等天体在那时,还没有一点要凝聚而成的迹象,因为假如当年等离子体状态的宇宙介质,已经有了集团的现象,那么今天的背景辐射也会出现某些可观察到的斑点。所以,混沌初开之时的宇宙,只能是均匀的等离子气体,星系等的凝聚肯定是在这以后相当长时间后的事情。

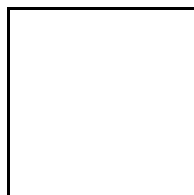
由此可见,宇宙背景辐射的发现极大地支持了大爆炸宇宙学。距今 150 多亿年前的事,居然可以作为理论预言,并被实际测量所证实,这是非常令人鼓舞的。大爆炸宇宙学终于赢得了人们的信任,确立了其应有的地位。

#### 【宇宙的未来】

根据大爆炸宇宙模型,我们知道目前的宇宙正处在不断的膨胀之中,而且可以肯定还会继续膨胀一段时间。至于宇宙以后的命运,是永无止境地一直膨胀下去呢?还是有一天会不再膨胀而收缩呢?宇宙收缩的可能性是存在的。我们知道,宇宙膨胀根据现在的理论,并不是由于任何种类的斥力,而是过去的大爆炸给它的速度所留下来的效应。而宇宙是一个引力作用体系,由于引力的作用,这个速度正在逐渐降低,天文学上可以测出这个减速度的量——减速参数,只是目前认为这个减速参数不够大,不足以使宇宙收缩。那么宇宙继续膨胀或可能收缩,究竟和现时宇宙的什么特征有关呢?根据广义相对论,它决定于宇宙的密度是大于还是小于某临界密度。

这一决定宇宙命运的临界密度,又与什么量有关呢?究竟等于多大?我们可以作一简单推算。

考虑一个由星系组成的、半径为  $R$  的球(设此半径  $R$  大于星系团之间的距离,小于任何表征宇宙作为一个整体的距离),这个球的质量是球的体积乘以密度,即



根据牛顿万有引力定律，球面上任何星系的位能为

$$U = -\frac{GMm}{R}$$

式中  $m$  为该星系的质量， $G$  是牛顿引力常数

$$U = -\frac{GMm}{R}$$

球面上星系的速度可由哈勃定律给出

$$v = HR,$$

式中  $H$  为哈勃常数。因此该星系的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mH^2R^2$$

星系的总能量则为  $E = U + E_k$ ，即

$$E = -\frac{GMm}{R} + \frac{1}{2}mH^2R^2$$

这个星系的总能量在宇宙膨胀时应当守恒。因为动能永远为正，而位能在无限远处可忽略不计。因此，可能出现三种情况：

$E > 0$ ，表示星系可以逃逸至无限远处，而且还有剩余动能；

$E < 0$ ，表示星系不可能逃逸至无限远处，在某有限远处即返回；

$E = 0$ ，表示星系正好能逃逸至无限远处，而耗尽动能，使其速度为零。

因为  $E = 0$ ，这时有

$$-\frac{GMm}{R} + \frac{1}{2}mH^2R^2 = 0$$

其密度  $\rho$  的值，即为临界密度值

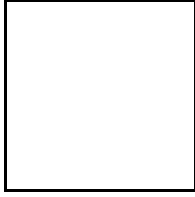
$$\rho = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

这个结果虽然是用牛顿力学定律推出的，但只需把密度  $\rho$  理解为宇宙总能



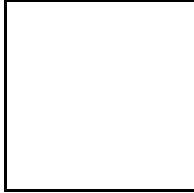
量密度除以  $c^2$  ( $c$  为光速)，即与用广义相对论计算结果一致。

设  $H$  是目前的公认值，为 15 公里每百万光年·秒，而每光年为  $9.46 \times 10^{12}$  公里，于是有



因为每千克有  $6.02 \times 10^{26}$  核子，所以，目前算出的临界密度相当于 2.7 个核子每立方米。

现在，我们可以根据现时宇宙的平均密度与以上临界密度相比较来判断宇宙的前途。但是测量与估算现今宇宙物质的平均密度却是相当复杂而困难的。因为对于星系质量，目前主要通过它的光强（包括无线电波、X



宙中除了发光的星体外，还有许多不可视物质（或暗物质），这包括宇宙尘、黑洞、中微子等。而且根据粒子物理理论，可以认为宇宙中非重子暗物质是宇宙的主要组份。比如，假如中微子有质量，只要它具有电子质量的十万分之一，那么它们的总质量就会比所有质子和氦核的质量大。但目前实验不能确定中微子有质量。前苏联物理学家曾宣称测到了中微子质量，但测量不能重复，所以没有被大家承认。天文学家相信，宇宙中主要是不发光物质，例如在银河系内可能有 80%~90% 的物质是不发光的。如果这样，宇宙就可能收缩。

另一个线索却相反，表明现今宇宙的密度不是太大。这主要根据宇宙中氘的丰度来推算宇宙的物质密度。根据大爆炸模型，在大爆炸后 3 分钟終了时，宇宙中除了产生大量的氦以外，还产生出极少量的氘。如果我们知道了恒星形成之前的原始氘丰度值，就可以精确地确定光子与核粒子的比值。然后，根据目前的背景辐射温度为 3K，就可以精确定出宇宙现在的物质密度。可惜要确定真正的原始氘丰度又是非常困难的，因为我们可能测到现今宇宙的氘丰度，但与原始宇宙的氘丰度有很大的偏差。比较正确的测量值是利用人造卫星进行紫外观测。1973 年哥白尼号人造卫星携带一个紫外光谱计以测量半人马座热星 光谱的吸收线（其中一条由星际云中的氘引起），测量结果得知星际介质包含有百万分之二十的氘（按重量计）。以后对别的热星进行紫外观测，也得到相似结果。假如这  $2 \times 10^{-5}$  的氘真的是早期宇宙产生的，则可算出，那时（现在也是）光子与核子的比值为 11 亿比 1，这样算得现时宇宙的密度只有 0.5 个核子每立方米，这大大低于临界密度。1990 年 4 月，美国“发现”号航天飞机送入太空的哈勃望远

镜，所测得的新数据，在 1992 年 1 月宣布了，星际空间的氘只有百万分之十五，那就更低了。所以，根据这一数据，宇宙将永无止境地膨胀下去。

宇宙的未来命运究竟是什么？是膨胀还是收缩？目前从理论到观测值，还不足以肯定回答，我们只能期待将来的研究。然而，不论是膨胀还是收缩，宇宙的命运只能是悲剧性的，它面临着或者是无限冰冷的、或者是炽热难忍的末日。当代理论物理学家、诺贝尔奖金获得者温伯格说过“宇宙越可理解，也就越索然无味”。

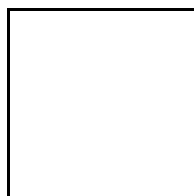
歌德说过：“一切产生出来的东西，都一定要灭亡”。宇宙作为一个具体的物质过程也一样，有生有灭。但是正如恩格斯所说“我们还是确信：物质在它的一切变化中永远是同一的，它的任何一个属性都永远不会丧失，因此，它虽然在某个时候一定以铁的必然性毁灭自己在地球上的最美的花朵——思维着的精神，而在另外的某个地方的某个时候一定又以同样的铁的必然性把它重新产生出来。”

### (三) 电磁学 光学

#### 【电磁能的守恒及输送】

能量守恒定律是自然界中最精确的定律之一。在电磁领域，它当然仍然成立。辐射场可以独立于电荷而存在，这说明电磁场是物质的，电磁场必定具有能量。对于一个孤立的、包含电磁场的系统，其能量守恒必定是包含电磁能量在内的总能量的守恒。

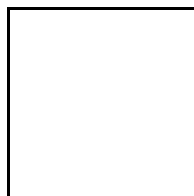
利用麦克斯韦方程组和能量守恒定律可以计算出电磁场能量密度，其表达式为



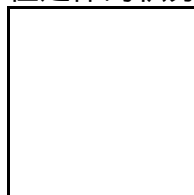
电磁能流密度矢量为

$$S = E \times H,$$

能量守恒的形式为



在这里引入了能流密度矢量  $S$ ，它的物理意义是单位时间内流过单位横截面积的能量。 $S$  的引入，给能量守恒定律带来深刻的解释。为了说明这一点，必须用到上述能量守恒定律的积分形式：



式中的面积分是对区域  $V$  的表面进行。上式左端积分的结果是电磁场在区域  $V$  内所做的功率，右端第二项对应着该区域内的电磁能量的减少率，右端第一项则对应着单位时间内该区域外流进该区域的能量。

这表明能量守恒定律对任意的区域、任意的体系都成立，而不只是仅对整个宇宙或孤立系统才成立。我们通常所说的某系统的能量不守恒，实际上是只看到了该系统内的能量变化，而忽略了该系统和外界的能量交换。如果计及这个交换，能量实际上也是守恒的。能流密度矢量的引入，使我们更明确地看到了系统和外界的交换，对孤立系统，这种交换为 0，这就是通常意义下的能量守恒。

电磁能的传输图象是电磁运动的一个本质问题。日常生活中，电磁能的传输大都是利用导线来进行的。所以，极易使人们误认为电磁能是在导

线中传播的。事实上，电磁能是蕴含在场中的，电磁能的传输是靠场的运动进行的。这一点在电磁波的情形中是容易理解的。如光的传播就是如此。但是，在低频情况下，情形就不是这么清楚。因为传输线的存在。使人们产生误解。

实际上，只需稍作计算就可发现电磁能不是在导线中传播的。在一般的导线中，自由电子的平均速度大约是  $10^{-5}$  米/秒的数量级，用这样的速度来传播电磁能是不可想象的。日常生活中，接通开关和用电器工作几乎同时，所以电磁能的传播肯定不是在导线内进行的。

利用电磁能流的概念，很容易说明电磁能的传输特征。计算表明，导体附近的电磁能流的方向是指向导体的，这说明场能是从导体外进入导体内的。计算同时表明，这部分进入导体的电磁能量完全被转化成焦尔热，所以导线的存在消耗了一部分电磁能量。

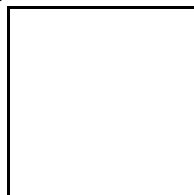
既然导线要消耗电磁能，而电磁能又不在导线内传播，那么为什么还要使用导线呢？这是因为若无导线，发电厂发出的电磁场会弥散在整个空间，很难作定向传输，这不利于高效率地使用发电厂发出的电磁能。有了导线之后，导线和电磁场的相互作用使得电磁场在导线附近集中并沿一定方向传播。虽然这样会使一部分电磁能转化为焦尔热，但大部分可以抵达用电器而被利用。因此，电磁场能实际上是在导线周围的空间存在和传播的，导线的存在只不过为电磁场能的集中和定向传输创造了条件。

#### 【导体与非导体】

导体和非导体的主要区别在于：导体内存在自由电子，而非导体中无自由电子。我们通常所说的导体的导电性，就是指导体内的自由电子对电磁场或电流的传导作用。

一般的导体都是晶体，它是由晶格点阵和自由电子组成的。导体内的每个原子或分子都贡献出一个或几个电子作为自由电子，而剩下的离子部分则相互作用构成离子点阵——晶格，晶格是稳定的，它没有宏观变化和运动。各原子或分子贡献出的自由电子则不再属于某个个别的离子，而变为各离子所共有。自由电子可以在晶格中“自由”运动而形成“自由电子气”。自由电子在晶格中运动，必然受到晶格的碰撞作用或其他形式的作用，导体的电导率就是反映这种作用的。

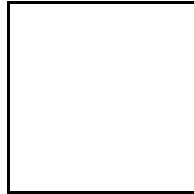
我们知道导体的电导率为



其中  $N$  是单位体积内原子或分子的个数， $e$ 、 $m$  分别是电子的电荷和质量， $f_0$  是每个分子贡献出的自由电子数， $r_0$  是晶格对自由电子的阻尼系数， $\omega$  是外场频率。

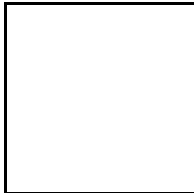
此结果表明，一般情况下电导率是一个复数，而且亦与外场频率有关。上述结果是用经典方程算出的，而电导率问题实际上是量子力学问题，其中泡利原理起着重要的作用。但无论如何，经典结果已经给出电导率变化的定性描述。

导体的电导率在某种程度上可以描述导体的导电性能，但却不能完整描述。导体的导电性能取决于传导电流  $j$  和位移电流  $j_D$  的比值。计算表明：



是导体的介电常数。很显然，上述比值越大，导体的导电性能越好。

上述结果表明：导体的导电性能不仅和导体本身的性质有关，还和传递的电磁波的频率有关。例如，对海水来说， $\sigma = 5 (\text{m})^{-1}$ ， $\epsilon = 80\epsilon_0$ ，



体。

电导率 在某种程度上可以描述介质的导电性能，但这仅对某些物质有效。对一些特殊的物质，如等离子体，电磁场在其内部的传输情况就必须用更加基本的方法来处理，此时，电导率失去了意义。

#### 【光子静质量的现代观点】

现在的有关光子静止质量的理论是以相互作用理论为基础的。按照现代的观点，各种基本的相互作用都应当是满足规范变换不变性的。

之所以要求相互作用满足规范不变性，是由于在量子场论中存在着著名的发散困难，发散困难必须用重整化方法来解决，而重整化方法可行的条件就是理论必须满足规范不变性。但是，规范不变性是与规范场粒子静质量为 0 紧密联系在一起的。例如电磁场的规范不变性就是与光子的静质量为 0 直接相关的。

从理论上讲，不仅电磁相互作用如此，其他相互作用亦是如此。强、弱相互作用如此，爱因斯坦所建立的引力相互作用理论——广义相对论亦如此，它们都是规范理论。在此基础上建立起来的弱电统一理论，70 年代以来提出的将强、弱、电磁三种相互作用统一起来的理论都是规范理论，人们甚至设想把引力相互作用也纳入该理论中而建立起完全统一的理论。总之，规范理论已经成为物理研究中一个极重要的方向。

然而，1983 年发现的  $W^\pm$ 、 $Z^0$  粒子虽然证实了规范化的弱电统一理论的正确性，但实验却表明它们都具有静质量。解决这个困难的方法认为：那些规范场粒子本来的确是没有静质量的，现在观察到的质量是由于真空

的对称性破缺引起的。也就是说，在原来的真空中这些粒子并没有静质量，但真空本身可以变化，在变化后的真空中它们表现出有质量。

物理上的真空事实上是由正、负粒子对构成的而非绝对的虚无。真空背景在一定的条件下会发生起伏，这种起伏称为真空极化。此时的光子就会和由于真空极化而产生的正、负粒子对发生相互作用，从而使光子的行为好像具有静质量。

在真正的真空中，光子是没有静质量的。在现在的物理真空中，光子是可以有静质量的。至于现在的真空如何由原来的真空演化而来，这在物理学中乃是一个最最基本的问题。

上述观点乃是一些理论设想，是否正确还有待于进一步的研究。

### 【光子静质量的测量】

光子的静质量是否为零，不仅对电磁理论是重要的，对狭义相对论也是重要的。因此，测量光子的静质量具有十分重要的意义。为了测量光子的静质量，人们设计了大量的实验。当然，由于实验精度的限制，实验上给出的只能是光子静质量的上限。下面就是有关这方面实验的简单介绍。

#### 1. 平方反比律法

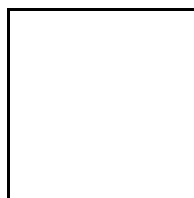
光子的静质量是否为零，直接决定着库仑定律的成立与否，因此，测量静电力对平方反比律的偏离就可以给出有关光子静质量  $m_r$  的知识。

自 1785 年库仑提出以他的名字命名的静电力的平方反比律之后，人们做了大量的实验来验证它。早期的实验只是为了验证平方反比律的成立与否，还没有意识到光子的静质量与平方反比律的联系。如 1769 年第一个做该类实验的卢比召 (S.J. Robison) 和 1773 年卡文迪许 (Cavendish) 的实验就是如此。后来，随着物理学的发展，人们才意识到  $m_r$  和平方反比律之间的联系。近来，这方面的实验的精度已大大提高，例如 1971 年给出的结果为

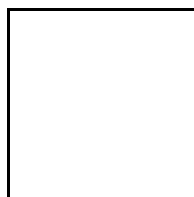
$$m_r < 1.6 \times 10^{-47} \text{ 克。}$$

#### 2. 真空中的色散效应

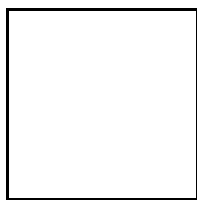
若  $m_r \neq 0$ ，则真空中的光子的色散关系为



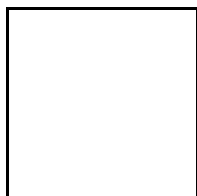
因此，光的相速度为



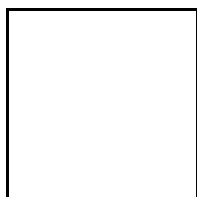
而群速度为



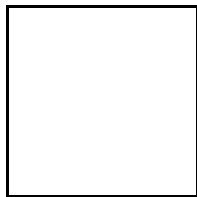
由于  $m_r$  很小，故



因此， $c$  只是  $\lambda$  很大时的光速。由上式可以算出，频率分别为  $\nu_1$  和  $\nu_2$  的两束光的群速度之差为



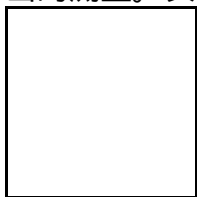
两束光通过路程  $L$  的时间差为



其中  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为两束光的波长。这样，人们可以测定不同频率的光的速度或两列波通过相同路程的时间差，从而可以确定光子的静质量。下面介绍两种具体的方法。

#### (1) 直接测定不同频率的光信号的速度

长期以来，人们已经用各种方法（如空腔共振、雷达、无线电干涉仪、光谱线及晶体调制等）对各种频率的电磁辐射在真空中的传播速度做了精密的测量。实验使用的频率范围很宽，在  $10^8\text{Hz}$  到  $10^{15}\text{Hz}$  的范围内，在达



的光子静质量为

$$m_r = 5.6 \times 10^{-43}\text{g}。$$

#### (2) 星光到达地球的时间差

前面的公式表明  $L$  越大， $\Delta t$  越大，测量越容易进行。因此，我们可以测量远方星体在同一时刻发射的不同频率的电磁辐射到达地球的时间差，从而得出  $m_r$ 。德布罗意在 1940 年提出了用双星来确定光子静质量的方法。双星是在一个椭圆轨道中不停旋转的两颗星（将它们分别叫做  $S_1$  和

$S_2$ ), 在某一时刻,  $S_1$  星把  $S_2$  星挡住, 使我们看不到  $S_2$  星 (双星蚀), 随后,  $S_2$  星从  $S_1$  星背后显现出来, 以此时刻为初时来测量  $S_2$  星发射的不同频率的光波到达地球的时间差, 利用此法得出

$$m_r = 0.8 \times 10^{-39}g。$$

利用脉冲星也可以做这个实验。测量不同频率的光脉冲到达地球的时间差, 也可得出  $m_r$ 。1969 年 Feinberg 用这种方法得出

$$m_r = 10^{-44}g。$$

利用星光的色散效应来解释光子的静质量有一个很大的缺点, 那就是从星球到地球的空间中充满了等离子体, 等离子体的存在亦可引起光的色散效应。因此, 若不能用另外的方法获知星际等离子体的密度, 就无法分辨星光的色散究竟是由等离子体引起的还是由于光子的静质量引起的。这就使我们在利用星光色散效应确立光子的静质量时受到了很大的限制。

### 3. 静磁场方法

如果光子具有不为零的静质量, 则它对静磁场亦会有一些影响, 利用这一点可以确定光子的静质量。

1943 年, 薛定谔提出了用静磁场确立光子静质量的方法。他用地磁数据给出的光子的静质量为

$$m_r = 2 \times 10^{-47}g。$$

地磁场是永久磁场, 在麦克斯韦电磁理论中, 可以粗略地认为地磁场与磁偶极场相当。1895 年, Schmidt 分析了地磁力的各分量, 并考虑到可能存在偶极场、外来场和非势场等三种类型的地磁场, 其中, 外来场是一种在地球内部找不到源的磁场, 是均匀场; 偶极场是地球的磁偶极矩激发的场; 非势场是地球——空气电流产生的场, 这部分场的源同样不在地球内部。薛定谔提出用光子静质量效应可解释地磁分析中的外来磁场和非势磁场。由此他建立了上述光子的静质量上限。

薛定谔发表他的文章时认为, 地磁场中的外来场部分的源应在地球内部, 他当时并不知道有什么外部磁源存在。但就现在所知, 外部磁源的贡献有如下几种:

- (1) 静质子云状带的贡献;
- (2) 地磁尾中的电流的贡献;
- (3) 磁层中的热等离子体的贡献;
- (4) 太阳风对地磁场的压缩;
- (5) 星际磁场的贡献。

考虑到上述原因和其他实验方面的原因, Goldhaber 和 Nieto 1968 年得出的光子静质量的上限为

$$m_r = 7 \times 10^{-48}g。$$

上述薛定谔外来场方法, 同样适用于其他星体的磁偶极场, 最好的对象就是木星, 它的半径大约是地球的 11 倍, 其磁场较强, 周围的磁层离开



较远，因此用卫星测量木星磁场时，其测量精度比较高。1975年 Davis、Goldhaber、和 Nieto 把薛定谔的方法用于木星的磁场，他们得到的可靠的上限是

$$m_r = 8 \times 10^{-49} \text{g}。$$

利用光子静质量会影响地磁场这一原理可以算出地磁场随高度的变化，同测量结果比较可以得出光子的静质量。这种方法的优点在于：可能把由光子静质量所引起的效应和地球周围的真正外部磁源所产生的磁场区分开来，但是具体测量的难度较大，因为在高度超过3倍地球半径处时，外来干扰已变得十分严重。

#### 4. 星际等离子体效应

星际等离子体效应在这里主要是指磁流体力学效应。磁流体力学研究的是导电流体在磁场中的运动。磁流体力学的基本方程是通常的流体力学方程和麦克斯韦电磁场方程，在考虑了运动流体和磁场之间的相互作用后，经过修改而成的。

考虑了光子静质量对磁流体力学波的色散关系的影响，利用电磁波在等离子体内的传播特性，可以确定光子的质量上限。用此法得出的结果是

$$m_r = 1.1 \times 10^{-49} \text{g}。$$

上面叙述的只是有关测量  $m_r$  的最基本的原理，在此基础上衍生出的具体方法是很多的，此处限于篇幅，不再一一介绍。

#### 【电荷量子化和狄拉克的磁单极理论】

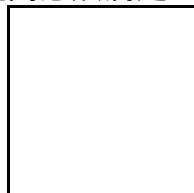
迄今为止，实验上发现的一切基本粒子所带的电荷都是电子电荷的整数倍，即所有粒子带的电荷都不能连续变化，而只能取分立的数值，这就是电荷量子化现象。现在实验所能达到的精度表明：实测的电荷量值和满足电荷量子化的电荷量值之差只有电子电量的  $10^{-20}$  倍。这个结果使人们坚信电荷是量子化的。但是电荷为什么是量子化的呢？这是自然界的一大奥妙，其中一定蕴含着极其深刻的物理本质。

为探究电荷量子化的奥妙，狄拉克在1931年提出了他的磁单极理论。这个理论不仅使电荷量子化得到圆满解释，同时也揭开了人们对磁单极研究的序幕。

狄拉克利用量子理论证明了下述论点：

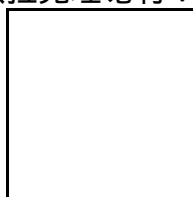
1. 磁单极若存在，则电磁理论必须作相应的修正。修正后的电磁理论与量子理论可以一致地存在，并不会发生任何矛盾；

2. 电磁理论和量子理论一致地存在的条件是：磁单极的强度  $g$  (基本磁荷) 和某一物体的电荷  $Q$  之间必须满足：



值得指出的是，狄拉克虽然证明了磁单极可以和量子力学一致地存在，但是该证明并没有肯定磁单极一定存在。磁单极存在与否，最终只能由实验来决定。

狄拉克的磁单极理论已经提出 60 年了，然而至今还没有充足的实验证据说明磁单极的确存在。尽管如此，人们对磁单极的研究和探索并没有因此而中止，寻找磁单极的实验依然不停地进行。是什么原因使得物理学家这样执著地追求呢？一个极其重要的原因就是它给出了电荷量子化的自然解释。若磁单极存在，则据狄拉克理论有：



这显然就是电荷量子化的表示。由于电荷量子化是自然界的一个重要特征，对此给出完善解释的磁单极理论自然就使物理学家产生极大的兴趣。

#### 【有关磁单极的现代观点】

到目前为止，还没有充足的实验证据来确认磁单极的存在，因此，有关磁单极的种种观点还只能是处在臆测阶段。现在人们发现，若磁单极存在，则在物理学领域内会引起一系列的变革。

首先，若磁单极存在，受其影响最大的自然要数电磁理论了。磁单极的存在可以改变经典电磁理论中电和磁的不对称。这便使经典电动力学和量子电动力学需要作相应的修改。由于电磁相互作用乃是四大基本相互作用之一，电磁理论的修改必使当今的物理学发生较大的变化。

其次，若磁单极存在，则量子力学会自然给出电荷的量子化，使得电荷量子化这一物理事实得到合理的解释。

另外，若磁单极存在，则人们对宇宙起源的认识会更加深入。有的科学家认为，磁单极在宇宙大爆炸的瞬间产生，后来，宇宙的温度下降，极性相反的磁单极就相互湮没，以致于幸存至今的磁单极甚少。这样就在磁单极和宇宙起源及演化之间建立了联系。由于这个原因，磁单极若存在，对它的研究会给出有关宇宙起源的一些信息。

在大统一理论中已经证明：若黑格斯粒子存在，则必然存在黑格斯场，那么在宇宙最初的  $10^{-35}$  秒时就应产生磁单极，于是一系列悬而未决的疑难将会得到不同程度的解决。

#### 【寻找磁单极】

在现实生活中，人们对磁铁具有两个磁极是深信不疑的。一块磁铁，无论把它分割得多么小，它总是具有两个磁极。这意味着磁体的南极和北极不能单独存在。这种现象反映在电动力学的基本方程中，就是电场是有源场，源就是电荷，而磁场是无源场，磁荷（磁单极）不存在。

然而，电和磁有着许多相似之处。电和磁的早期研究就是从它们之间

的相似性着手的。许多自然现象表明电和磁可能是对称的，若不存在磁荷，就破坏了电和磁的对称性。所以人们认为自然界中可能有磁单极存在，如果真的是这样，电磁理论形式将更加完美。

1931年，著名的英国物理学家狄拉克证明了磁单极和量子力学中的薛定谔方程可以一致地存在。他指出，如果自然界中存在磁单极子，则量子论给出电荷是量子化的，即任何粒子所带的电量必须是一个基本电荷的整数倍。由于电荷的量子化乃是一个基本的物理事实，狄拉克的理论就引起了人们的广泛注意，从而开创了磁单极研究的新的时代。

然而，尽管狄拉克的理论是完美的，结果也是非常迷人的，但这并不能作为磁单极存在的证据。磁单极是否真正存在，只能由实验来确定。

用实验来确定一个粒子的存在，是一件很不容易的事情。磁单极的特殊性质决定了用实验来寻找磁单极是极其困难的。然而，这些困难并未阻止物理学家去探索和追求。

人们曾经期望用高能加速器来产生磁单极子。如果这类实验能成功的话，人们就会同时找到磁单极子和它的反粒子。可是实验没有发现任何有意义的结果。当然，这并不能说明磁单极一定不存在。但是这个结果却表明磁单极的静止质量很大，现在使用的加速器无法提供足够的能量使其产生。

人为产生磁单极的实验不能成功，人们只好求助于大自然的恩赐。于是，人们想了许多方法来捕捉自然存在的磁单极。实验物理学家首先想到了宇宙线，因为宇宙线所具有的能量比目前实验室中能够产生的能量不知要大多少倍，很可能在宇宙线中存在着磁单极。

1975年夏，美国加利福尼亚大学和休斯顿大学组成的一个联合科研小组声称他们发现了一个磁单极。实验是这样的：把一些记录仪器用气球送上天空，并把它们保持在靠近大气顶部处一些日子，然后，把仪器放下来进行分析。他们从乳胶片上发现了一条不同于带电粒子的径迹。这条径迹与理论分析得到的磁单极的径迹相吻合。于是他们认为这就是磁单极。然而，对这个结果，许多物理学家持否定态度。

1982年，美国斯坦福大学的 Blas Cabrera 做了一个十分精巧的实验。他把一个直径为 5cm 的铌线圈降温至 9K，使其成为超导线圈，并把它放在一个超导的铅箔筒中。该筒用以屏蔽掉一切带电粒子引起的磁通量和消除外界磁场的影响，只有磁单极进入铌线圈时可以引起磁通量的变化。1982年2月14日下午1时53分，他们的仪器测到的磁通量突然增高。经反复研究，他们认为这是磁单极进入铌线圈引起的变化。

迄今为止，这个实验还未重复做成，所以这个实验结果还不能被肯定。因为对仅出现一次的现象，想正确确定其出现的原因是非常困难的。所以在物理实验中，对无法重复的实验现象不予肯定。

几十年过去了，寻找磁单极的工作仍然没有振奋人心的结果。然而众

多的实验物理学家并没有气馁，而是以更大的热情投入实验。如果能找到磁单极的话，电荷量子化这一自然界的基本特征就会得到很好的解释，当今的电动力学、量子电动力学就必须做必要的修改，对宇宙起源的认识也会更加深入。总之，磁单极的存在将会引起物理学的巨大变化。

### 【信息光学】

信息光学是现代光学前沿阵地的一个重要组成部分。

信息光学采用信息学的研究方法来处理光学问题，采用信息传递的观点来研究光学系统，这之所以成为可能，是由于下述两方面的原因。

首先，物理上可以把一幅光学图象理解为一幅光学信息图。一幅光学图象，是一个两维的光场分布，它可以被看作是两维空间分布序列，信息寓于其中。而信息学处理的电信号可以看作是一个携带着信息的一维时间序列，因此，有可能采用信息学的观点和方法来处理光学系统。

然而，仅仅由于上述原因就把信息学的方法引入光学还是远远不够的。在光学中可以引入信息学方法的另一个重要原因是光学信号通过光学系统的行为及其数学描述与电信号通过信息网络的行为及其数学描述有着极高的相似性。在信息学中，给网络输入一个正弦信号，所得到的输出信号仍是一个正弦波，其频率与输入信号相同，只不过输出波形的幅度和位相（相对于输入信号而言）发生了变化，这个变化与、且仅与输入信号的性质以及网络特点有关。在光学中，一个非相干的光强按正弦分布的物场通过线性光学系统时，所得到的像的光强仍是同一频率的正弦分布，只不过相对于物光而言，像的可见度降低且位相发生了变化，而且这种变化亦由、且仅由物光的特性和光学系统的特点来决定。很显然，光学系统和网络系统有着极强的相似性，其数学描述亦有共同点。正因为如此，信息学的观点和方法才有可能被借鉴到光学中来。

信息学的方法被引入光学以后，在光学领域引起了一场革命，诞生了一些崭新的光学信息的处理方法，如模糊图象的改善，特征的识别，信息的抽取、编码、存贮及含有加、减、乘、除、微分等数学运算作用的数据处理，光学信息的全息记录和重现，用频谱改变的观点来处理相干成像系统中的光信息的评价像的质量等。这些方法给沉寂一时的光学注入了新的活力。

信息光学和网络系统理论的相似是以正弦信息为基础的，而实际的物光分布不一定是正弦分布，因此，在信息光学中自然必须引入傅里叶分析方法。用傅里叶分析法可以把一般光学信息分解成正弦信息，或者把一些正弦信息进行傅里叶叠加。把傅里叶分析法引入光学乃是信息光学的一大特征。在此基础上引入了空间频谱思想来分析光信息，构成了信息光学的基本特色。

信息光学的基本规律仍然没有超出经典波动理论的范围，它仍然以波动光学原理为基础。信息光学主要是在方法上有了进一步的发展，用新的

方法来处理原来的光学问题，加深对光学的理解。当然如果这些发展只具有理论的意义，它就不会像现在这样受到人们的重视，它除了可以使人们从更新的高度来分析和综合光现象并获得新的概念之外，还由此产生了许多应用。例如，引入光学传递函数来进行像质评价，全息术的应用等。

### 【全息照相】

全息照相是可以“拍摄”物体的立体图象的一种技术。全息照相的原理是伽伯（D.Gabor）在1948年为提高电子显微镜的分辨本领而提出的，他因此而获得了1971年度的诺贝尔物理学奖。

全息照相的过程分两步：全息记录和全息再现。

第一步全息记录。将一束激光束在分光器S处分成两束：反射光束A和透射光束B。反射光束A直接照射到照相底片上，因此我们将其称之为参考光束。透射光束B经物体散射后亦到达底片，与参考光束在底片上叠加而成干涉图样。这样的干涉图样就称之为全息图。

全息图与照相底片完全不同。普通照相底片记录的是来自物点的光，和物体有直接的关系；而全息图记录的是参考光束和物点上发出的光的干涉结果，和被“拍摄”的物体并无直接关系。事实上，将全息图底片显影后用显微镜进行检查，可以看到，全息图并不显示与被“拍摄”物有任何几何相似的形象，而是显示出一种复杂的干涉条纹。然而，这干涉条纹图记录了物光波前的全部光信息。因为干涉图样取决于相干光束的振幅和位相，所以，全息图记录了物光波前的振幅和位相。这就是所谓的波前的全息记录。

第二步波前再现。将物撤走，用一束与参考光束的波长和传播方向完全相同的光束R'照射全息图，R'通过与全息图的相互作用，在底片后面产生了一个衍射光束，该光束与原来被物体散射后的光束完全相同，故此人们可以用眼睛观察到一幅非常逼真的原物形象，悬空地再现在全息图后面的原来的物的位置上，而且，当人们移动眼睛从不同的角度观察时，就好像面对原物一样看到它的不同侧面的形象，甚至在某个角度上被物遮住的东西亦可在另一角度看到它。因此，全息图再现的是一幅逼真的立体形象。更有意思的是，如果全息图的一部分被损坏或被遮住，通过剩余部分再现出的物体形象仍然是完整的。这表明，全息图上的每一小片都完整地记录了物光波前的全部信息。

由上述再现过程可以看出，布满干涉条纹的全息图起一块复杂光栅的作用。照明光束经过全息图后，产生复杂的衍射场，其中包含原物的波前，人们在全息图前看到的就是这个再现波前所产生的虚像。可见波前再现是一个衍射过程。

全息照相的特点

和普通照相比较，全息照相具有以下特点：

1. 全息照相过程分两步：全息记录和波前再现。全息记录是一个干涉

过程，全息再现是一个衍射过程。全息照相用波动光学的规律来描述，而普通照相则是以几何光学的规律为基础。

2. 普通照相底片所记录的仅是物体各点发出的光的光强（或振幅），而全息图记录的是物体各点的全部信息，包括振幅和位相，从而有可能使重现的物体的像是立体的。

普通照相过程中，物像之间是点对点关系，即一个物点对应像平面中的一个像点。虽然多个物点发出的光信号可以到达同一相点，但是普通照相底片仅能记录光强而不能记录位相，故无法从该像点上把不同物点的光信号识别出来。而在全息照相过程中，物体与底片之间是点对面关系，即每个点所发射的光束直接落在底片的整个平面上。全息图中的每一局部都包含了物体各点的光信息，而且各物点的光信息是可以识别的（通过干涉条纹识别）。因而，即使全息图碎了，拿来其中一片，仍然可再现整个原物。

3. 和普通照相比较，全息照相有其独特的再现方式。当使之再现的光束跟制作全息图时所用的参考光束的波长和传播方向均相同时，再现的图象才会与原物一致，否则会出现一些差异。

4. 普通照相只是记录光强，并不要求光的相干性，所以用普通光源就可以了。而全息照相是干涉记录，要求参考光束与各个物点的物光束彼此都是相干的，这就要求光源发出的光具有很高的时间相干性和空间相干性。光源的相干长度越长，波前上的相干区越大，就越能有效地实现全息照相，尤其被“拍摄”物很大时，更是如此。正是这个原因，使用普通光源无法实现全息照相，直至激光器发明以后，全息术才真正能够付诸实施。

#### 【激光的特性】

就本性而言，激光和普通光源发出的光波并无差别，它们都是电磁波。但是就光的产生机制与产生方式而言，两者却有很大区别。首先，激光是受激发射占优势，而普通光则是自发发射占优势；其次，绝大多数激光器都具有普通光源所没有的谐振腔。正因如此，激光才具有普通光束所不具备的特点。

通常人们把激光的特性概括为四个方面，即单色性好，方向性好，相干性好和亮度高。实际上，它们的量子性根源相同。激光的上述四个特性，是激光具有很高的光子简并度的不同表现，它们不是相互独立的，它们之间有着深刻的内在联系。另外，激光还具有聚焦性质、调谐性和超短脉冲等特性，下面就简单介绍之。

##### 1. 方向性

所谓激光的方向性好，是指激光器发出的光能流在空间方向上高度集中，或者说激光束具有高度的准直性。

普通光源是向着三维空间的所有可能的方向发光的，即使经过光学系统把光能流进行集中，其发射度亦较激光大得多。一般激光束的发散角在

毫弧度的数量级上，即使是方向性最差的半导体激光器发出的激光束，其发散角一般是  $(5 \sim 10) \times 10^{-2}$  弧度，这是普通光束所无法比拟的。

## 2. 单色性

通俗地说，单色性好，就是颜色纯。表现在光谱上，谱线宽度越小，单色性越好。

通常，一条有一定宽度的谱线对应着波长在一定范围内变化的一系列的单色光，人们便用该波长的变化范围来表示这条谱线的宽度。对普通光源，单色性最好的是氪灯， $\text{Kr}^{86}$  的  $\lambda = 6057.8 \text{ \AA}$  的谱线，在低温条件下其线宽可达  $\Delta \lambda = 4.7 \times 10^{-3} \text{ \AA}$ ；而一般激光谱线的宽度大约是  $10^{-7} \text{ \AA}$ ，在激光实验中，曾经利用 He-Ne 激光器得到了  $\Delta \lambda < 2.6 \times 10^{-11} \text{ \AA}$  的谱线。

## 3. 空间相干性和时间相干性

空间相干性与准直性有着密切联系。理想的平行光束是完全相干的，即在光束截面上处处相干。单模激光器发出的激光，在整个光束截面上几乎有理想的空间相干性。激光的空间相干性还表现在两个相互独立的同类型激光器发出的光是相干光，而两个普通光源所发出的光绝不会是相干光。

时间相干性与单色性存在着简单联系。由于激光的单色性好，其相干时间就长，相干长度也就越长。理论上讲，激光的相干长度为  $10^{10} \sim 10^{11}$  米的数量级。当然受种种因素的限制，激光的相干长度不可能这么大。实验上已经获得的激光的相干长度在几百公里以上，甚至达到了几万公里；而前面提到的  $\text{Kr}^{86}$  线，相干长度只不过是 77 厘米。

## 4. 亮度

由于激光束的方向性好，光能可集中到达某一区域从而形成极高的亮度。一台 1 毫瓦的小型 He-Ne 激光器所发出的激光辐射的亮度可达太阳亮度的 100 倍，其光谱亮度则可达太阳光谱亮度的  $10^6$  倍。

现在亮度最高的普通光源是高压脉冲氙灯，其亮度可达太阳亮度的几十倍。然而，采用 Q 开关技术的巨脉冲红宝石激光器的辐射亮度可达太阳的 100 亿倍，这个亮度相当于氢弹爆炸时闪光的亮度。

上述几点是激光的主要特性，它和激光的另外几条特性也是相互联系的。我们可以把这些特征概括为三个方面：激光的频率高度集中（单色性好），激光能量在空间分布的高度集中和发射时间上的高度集中。正是由于这些原因，激光才具有普通光源所无法比拟的优点。当然，就某一台具体的激光器而言，它所发射的激光并不一定具有上述全部特性，更不一定具有那些特性的最佳指标。但就激光领域所达到的那些性能而言，普通光源是望尘莫及的。

### 【全息显微技术】

全息照相的想法当初就是为了改进电子显微镜的分辨本领而提出的，因此，它自然地应用到显微技术中去。一般说来，欲看到一个较好的物体的三维图象，显微镜必须有较大景深。所谓景深就是指能在同一像平面

上成清晰像的物空间在光轴方向上的范围。一般光学系统的相对孔径愈大，其景深就愈小。因而，对显微镜而言，欲使其分辨本领高，其数值孔径总是做得大一些，结果其景深就很小，只能看到几乎是一个平面上的物，想观察一个立体的物体就要多次调焦。

采用全息照相可以解决显微镜的分辨本领和景深的矛盾。全息图片是平面的，因此用显微镜观察时只须一次聚焦即可。利用参考光束，通过全息图可显现物的三维像。这样，只要事先拍出待观察物的全息图，利用显微镜即可观察到物的三维像。

采用全息显微技术的意义还远不止于此。在科学实验中经常要测样品中浮动粒子的分布、大小及其他特性，而这些粒子是不停地运动着的，利用显微镜根本无法观测这些粒子，因为观测时根本来不及将显微镜调焦在这些粒子上。应用全息图，进行这类观测是方便可行的，因为只要在某时刻把体积中的粒子全部拍摄成全息图再进行观测即可。

#### 【全息存贮】

在记录信息的功用上，全息图和普通照片是类似的，比较起来，用全息图来储存信息更有价值。原因是：1．全息图信息是立体信息；2．全息图的一部分所贮存的信息与整幅图的作用相同，这就意味着一个物的全息图可以是很小的，因此一个不大的胶片上可存贮很多个信息；3．以全息图或傅里叶频谱的方式来存贮信息或恢复信息比用实像好，这种信息存贮的方式也许就是人脑中存贮信息的方式。

用全息图来存贮信息有广泛的应用，一个突出的例子就是它在电子计算机中的应用。在电子计算机中，存储器是一个十分重要的部分，它像人的大脑一样有记忆功能。存储器的容量和可靠性决定着计算机的计算速度。全息存储器是目前正大力发展的存储器之一。在一张全息图上可以并存许多全息图，利用角度选择性可依次读出不同的信息。在已试制成功的全息照相存储器中，每平方厘米胶片上可存贮  $10^7$  个以上的信息。另外，这种存储器是用照相的方法将信息固定存贮在全息图上，所以保存信息的可靠性很高，不易失去。全息照相用于信息存贮和信息显示，是目前大力发展的一个重要的应用方向。

#### 【激光原理及激光的发展】

激光是诞生于本世纪 60 年代初的一项重要的技术成就。激光的发展，迄今为止只不过 30 年，然而其基本原理却可追溯到本世纪初。

早在 1917 年，著名的物理学家爱因斯坦就预言了原子中同时存在自发辐射和受激辐射，并建立了它们的半经典理论，从而奠定了激光理论的基础。

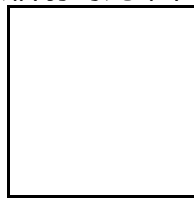
按照爱因斯坦的理论，处在激发态的原子，其辐射必定通过两种途径（自发辐射和受激辐射）来实现。

从本质而言，自发辐射和受激辐射都是电磁波，但是这两种电磁波所



具有的特点却有很大差别。自发辐射是原子内部的自然过程，和其周围的原子无关，因此不同原子自发辐射出的各光子间并无必然联系，它们不是相干的。而受激辐射则不然。理论上可以证明：受激辐射出的光子和入射的光子（激励原子使之产生受激辐射的光子）的运动形态完全相同，它们同方向、同位相、同频率，它们是相干的。因此，虽然诸原子的情况可能不同，但只要入射到物质上的光是相干光，则由此而引起的物质内诸原子的受激辐射就是相干光。这是自发辐射和受激辐射之间的本质区别。

原则上讲，只要有入射光便可引起受激辐射，从而可以得到激光。但是实际上远非如此。在热平衡态下，处于激发态的粒子数远少于处于基态的粒子数，此时可以证明受激辐射的几率和自发辐射的几率比为



室温下，对波长为  $6000 \text{ \AA}$  的光，有

$$R \sim 10^{-35}。$$

这表示在室温下可见光区域，受激发射可以忽略，因而一般光源的发射都是自发发射。这表明在热平衡态下想获得激光是绝对不可能的。

要产生激光，一个重要的条件就是要使媒质中处于激发态  $E_2$  的粒子数  $N_2$  大于处于基态  $E_1$  的粒子数  $N_1$ ，此时物质处在非平衡的亚稳态。若  $N_2 > N_1$ ，我们就称为媒质中发生了粒子数反转。很显然，只有通过外界对物质的作用才能实现这种状态。实现这种状态的具体方式称为抽运（亦称激励或泵浦），它是激光器的基本技术问题。

处于粒子数反转的物质称为激活物质。它的存在仅是激光振荡的必要条件。若要获得激光辐射，还要引入适当的正反馈。激光器中起正反馈作用的元件是光学谐振腔。它能提供连续的、大量的相干光子作入射光，使得激活物质在其作用下产生相干受激辐射，获得具有实用意义的激光。

从上面的论述可以看出，激光原理和产生激光的技术并不是十分复杂，本世纪初的科技水平已经完全可以制作产生激光的仪器，那么为什么激光会迟至本世纪 60 年代才诞生呢？

原来，本世纪 40 年代前，物理学工作者处在以狭义相对论和量子力学的诞生为标志的物理学革命的浪潮之中。这段时间内，人们紧张地致力于基础理论的研究，这些研究使得核物理和粒子物理等新学科相继建立。直到 50 年代，人们的注意力才转移到激光上来。

激光的发展，很大程度上得益于二次世界大战中发展起来的雷达技术。大战对雷达、电信工程的需要，促进了这方面的研究。无线电通信中，为了增加传送的信息量，就要提高载波频率。在寻找高频载波的过程中，人们于 1954 年发明了微波激光器，从而打开了激光技术的大门。

1958年，汤斯（C.H.Townes）和肖洛（A.L.Schawlow）发表了一篇文章，探讨把微波激射技术扩展到光频段的可能性及物理条件，这篇文章后来被视为激光时代的开端。在此基础上，休斯研究室的梅曼（T.H.Maiman）发明了世界上第一台激光器，为激光技术奠定了基础。

激光有着和普通光波所不具备的特点，因而它一经产生便迅猛发展，并获得了广泛的应用。激光的诞生，使得传统光学得到了进一步的发展，并产生了一些崭新的领域，如全息术、非线性光学等。同时，激光的产生也为深入研究物质微观结构、分子运动规律等方面提供了重要手段。

#### (四) 凝聚态物理 等离子体物理及超导

##### 【能带结构理论】

固体的能带理论是理解固体的导电性能所必须的重要理论，它奠定了半导体物理的理论基础。

能带结构理论可形象解释如下：

一氢原子的能级如下图，它的每条能级都是简并的。若用一定的手段可使它们分裂，每个能级能变成一个能级束。每个能级束中的诸能级靠得很近，该束中最高能级与最低能级的能量差  $\Delta E$  很小，这样的每个能级束称为一条能带， $\Delta E$  称为能带的宽度，两条不同的能带之间的那些能量区域称为禁带或能隙，禁带中的能量值不满足薛定谔方程。

上面的图象可以帮助我们理解能带的概念，但还远远不能包括近代能带理论的基本内容。因为能带理论讨论的是固体中电子的能级。固体中的电子除了受它所在的原子的作用之外，还要受到其他原子的作用，其他原子的作用可以视为周期性势场。这周期性势场相对于库仑场的偏离是使能级分裂的原因。但分裂的结果却与上述氢原子能级分裂的情形相去甚远。除了能级结构和氢原子能级结构有较大的区别之外，其主要的区别是每条能带中能级的数目很大，使得每条能带中两相邻的能级近于重合，因此每条能带中能量的变化可视为连续的，这些能级形成了一条“名符其实”的能带。在该能带中的所有能量值都满足薛定谔方程。下面是一种特殊的能带结构图。该图表示出了一般能带的基本特征。图中斜线部分表示诸允许能级构成的能带，空白部分是禁带。

可以证明每条能带中能级的条数是固体中原子（对晶体而言是晶胞）个数的 2 倍。诸原子中的电子可以以不同的方式占据各能级。按照被电子不同的占有情况，能带可分为价带、满带、空带、导带。完全被电子占据的能带称为满带，完全未被占据的称为空带，部分被占据的称为导带，价电子占据的称为价带。价带可以是满带，也可以是导带。

能带被电子占据的方式决定了介质的导电性能。若一介质有导带存在，那么在不大的外加电场（不至于使原子结构被破坏）的作用下，导带内的电子会在该带内发生跃迁。这种跃迁所需的能量甚小。由于该带内诸能级对应的动量不同，跃迁的结果使得电子系的总动量发生连续改变，因而形成宏观定向移动。这种介质就是导体。绝缘体是无导带的介质。由于绝缘体中只存在满带和空带，因而电子的跃迁只能在不同能带之间进行，这种跃迁需要的能量较大，一般不容易发生，这就是绝缘体通常不导电的原因。若外加电场足够强，则可发生这种不同能带之间的跃迁，而这时，绝缘介质的内部结构已被破坏（被击穿）。

能带理论的最大成就是它能够解释半导体现象。原来在半导体中，能带也是满带，但是一个满带和空带之间的能隙很小，或者有交叠。这样它就容易在外界作用（如光照、升温等）下发生跃迁而形成两个导带，从而发生导电现象。但它的导电性能比导体要差得多。

能带结构理论是在自由电子模型的基础上发展起来的。在这方面作出巨大贡献的主要人物是布洛赫，他在 1928 年提出了能带结构理论，实现了固体物理的一大进步，为半导体物理的发展打下了理论基础。然而这个理论也有它的局限性。对电子之间的相互作用问题，原子内层电子被强束缚的情形，这个理论就无能为力了。

### 【X 射线及其衍射】

X 射线的发现始于对阴极射线的研究。1895 年 11 月 8 日夜晩，德国物理学家伦琴（W.C.Rontgen）偶然发现阴极射线打在固体表面会激发一种穿透能力极强的未知射线，他命名为 X 射线。尽管物理学界对这一发现反应热烈，但对未知射线本质的研究却进展迟缓。X 射线是波还是粒子流？是波，就该有干涉和衍射现象存在。现在我们知道 X 射线是一种波长很短的电磁波，一般的狭缝与 X 射线的波长相比实在是太宽了，难怪得不到像可见光那样的干涉、衍射实验。直到 1912 年，德国的劳厄（M.v.Laue）才找到了一个巧妙的解决办法。

德国的慕尼黑大学在本世纪初可说是群星荟萃。当时主持实验物理学讲座的是伦琴，而主持理论物理学讲座的是索末菲（A.Sommerfeld），都是超一流科学家。当劳厄提出用晶体作为天然光栅来作 X 射线衍射实验的构想时，两位大人物并未予以支持。伦琴认为劳厄实验的结果将是否定的。索末菲则抱住下面的论点不放：原子散射体受到（室温下）热运动的影响，不可能形成观测明确的衍射束所必须的足够好的周期性排布。劳厄说服了正在伦琴指导下做博士论文的保尔·尼平（P.Knipping）和刚当上索末菲助教的瓦尔特·弗里德里希（W.Friedrich）。他们 3 人于 1912 年 4 月 21 日开始实验，5 月 4 日终于发现了伦琴射线的干涉现象，劳厄还完成了数学阐述。实验安排是这样的：X 射线从铅屏蔽罩后面的玻璃管中射出，并通过一个狭缝装置准直，放在 X 射线束中的第一块晶体的表面镀了铜，X 射线透过晶体后在照相底片上形成衍射花样。1912 年 6 月 8 日索末菲向巴伐利亚科学院提交了劳厄、弗里德里希和尼平的题为《伦琴射线的干涉现象》的论文，通报了实验结果。

劳厄实验不仅解决了关于 X 射线本性的争论，而且标志着固体物理学的真正开端。第二年，即 1913 年，英国的布喇格父子（W.H.Bragg，W.L.Bragg）进一步观察到 X 射线在晶体表面反射时同样能形成衍射花样。他们提出了著名的布喇格公式： $2d\sin\theta = n\lambda$ ，其中  $\theta$  是射线与晶面的夹角， $\lambda$  是射线波长， $d$  是晶面间距。那些入射方向符合此关系式的射线将得到加强。从此 X 射线被广泛应用于晶体结构的研究。反之，如果已知某

种晶体的结构，也可用以精确测定 X 射线的波长。

以后的研究表明，X 射线谱由两部分构成，一部分是波长连续变化的连续谱，另一部分是具有各种波长的线状谱，也称为标识谱。年轻有为却被第一次世界大战过早地夺去生命的英国物理学家莫塞莱（H.G.Moseley），深入研究各种物质的标识谱，得出莫塞莱定律。原来标识谱是原子内层电子跃迁时发生的，它反映了原子内部结构的情况。X 射线标识谱对研究原子结构有重要意义。

自劳厄首次提出 X 射线衍射报告以来，80 年风雨岁月过去了。从早期对晶体结构的测定到现时对最复杂的有机物结构的研究，从早期的康普顿散射实验到现时具有高精度能量分辨率的 X 射线非弹性散射实验，从布喇格父子设计的第一台简陋的 X 射线波谱仪到现代大型精密的 X 射线实验设备，这些巨大的进步无不与 X 射线源的不断改进紧密相连。然而采用普通的 X 射线管，除辐射强度太低外，空间辐射特征也不能令人满意。它的辐射面太宽，以致在衍射实验中只有一小部分 X 射线可被利用，大部分都给准直装置挡掉了。人们呼唤新的更有效、更“明亮”的 X 射线源，于是同步辐射装置便应运而生。

电子（或正电子）在电磁场的作用下导入圆形轨道。电子的向心加速度垂直于速度，而作加速运动的电荷是要辐射电磁波的。在回旋加速器的高真空管道中，这种所谓的同步辐射是能量损耗的唯一原因，却正好可以利用作为优良的 X 射线源。在电子速度接近光速的情况下，辐射集中在前方很窄的锥形区域内，即它是高度准直的，能量很高，如右图所示。

尽管同步辐射源某一瞬时发射的 X 射线是高度准直的，但从整体来看，同步辐射依然是四处飞散，并无实用价值。因而现代同步辐射源不再简单地由一个圆形轨道构成。电子先是在直线加速器中加速，待达到合适的能量后注入贮存环。辐射所损耗的能量由高频谐振腔补充进贮存环。贮存环由一些不产生辐射的直线段和为造成闭合路径所必需的足够多的偏转磁铁构成。尤其是，在现代先进的同步辐射源上还把扭摆器和波荡器这类插入装置安插在贮存环的直线段上以高效地产生辐射（下图）。

扭摆器和波荡器实质是同一类东西。当磁场强度较大时，它按扭摆器方式工作；反之，当磁场强度较小时，它按波荡器方式工作。两种工作方式的原理大体相同，唯波荡器的辐射更为集中。下图是它们的工作原理图。图(a)表示电子在偏转磁铁作用下沿曲线轨道运行时不断向外辐射能量，辐射分布面较宽。图(b)表示利用适当的磁铁排布，使电子沿波浪线前进，这个装置就是扭摆器或波荡器。图(c)表示电子在扭摆器中前进时辐射集中在较窄的范围内，其辐射强度可以比单个偏转磁铁的辐射强度高 10 ~ 50 倍。

扭摆器和波荡器是目前产生高效率 X 射线的最优装置。它们只在需要的地方产生辐射，辐射强度大，方向性强，能量大小范围集中，可以是连续谱，也可以是标识谱。

X 射线物理学依靠这种新型的 X 射线源在过去几年内得到了复兴，势头有增无减。同步辐射源的诞生使物质结构研究登上了一个新的台阶，累累硕果已经昭示于世。例如，聚焦良好的 X 射线可用于微晶结构研究。众所周知，大的单晶是不易制备的，现在就有可能在矿物学和生物学研究中采用小到  $1\ \mu\text{m}$  的微晶。对基本粒子的径迹分析，X 射线荧光光谱有希望成为最灵敏的技术。表面物理、磁体结构、固体中元激发等的研究，都离不开新型的 X 射线源。

世界上最先进的同步辐射装置——欧洲同步辐射装置正在法国的格瑞诺布尔 (Grenoble) 建造。美国也在规划建设类似的辐射源。可以相信，19 世纪末发现的辐射线在 100 年后的今天将焕发出夺目的光彩。

#### 【液晶及其应用】

物质的状态除了我们常见的汽、液、固三态外，在某些特定条件下还会呈现一些其他的状态。如某些棒状或盘状分子在一定的温度区间内会处于一种既非固体，又非液体的状态——液晶态。处于液晶态的物质，分子质心位置的排列完全没有周期性，因此它们不是晶体；但它们物质分子的取向又表现出明显的各向异性，又具有能产生双折射等晶体所特有的性质，因此它们又不是普通的液体。

我们知道，通常一般的物质，在温度较低时是固体，加热后会熔化成液体。然而有些有机物分子，在固体转变成液体之前，会经历一个或几个中间态。处于中间态的物质的性质又介于固体和液体之间，这类中间态我们称之为液晶相，简称液晶。用升温的方法产生的液晶叫做热致液晶。有些材料在溶剂中，当处于一定的浓度区间内也会产生液晶，这类液晶我们叫它溶致液晶。

液晶按其对称性可分为向列型、胆甾型和近晶型。向列型液晶的棒状分子有一平均取向，可用矢量  $n$  表示，如右图所示。在胆甾型液晶中，从宏观看，分子排列也无规律，但从局部看却有分层结构，每一层中分子的排列又像向列型液晶，有一平均取向。从整体上看，胆甾型液晶中  $n$  的指向有一螺旋对称，如左图所示。因此，又可分为左螺旋和右螺旋。从名称上看，近晶型液晶更接近于晶体。目前发现近晶型液晶可分为 8 大类，其中最典型的是 A、B、C 三大类。它们共同的特征都是层结构。分子可在同一层内运动，而在层与层之间运动的几率很小。A 型中，分子按层的法向排列，层的厚度就是分子的长度，如下左图所示。C 型液晶的结构示意如下右图所示，可以看到分子排列取向和层的法向有一倾角，因此层的厚度

比分子长度小，倾斜度则随温度变化而变化。

胆甾型中分子的排列（为方便起见，这里分别画出几个平面，但是这些平面并没有任何特定的物理意义。）

自 1888 年发现液晶以来，对液晶的研究工作主要集中在液晶的合成和分类，用偏光显微镜进行纹理观察、识别和研究，液晶对 X 射线和光的散射，液晶和电磁场的相互作用等方面。但这些研究还停留在理论上。

近晶 A 型中分子的排列近晶 C 型中分子的倾斜排列 1968 年，美国 RCA 公司发现了向列型液晶的同态散射现象，从而提供了液晶用于显示的实用性，也揭开了现代液晶研究的序幕，液晶研究从此走出了实验室而进入了人类的生活中。第二年，前联邦德国研制成功了室温液晶。1970 年，美国杜邦公司制成了高强度的高分子液晶。1972 年~1973 年，性质极其稳定的联苯液晶研制成功。短短几年，液晶材料工业突飞猛进地发展起来。与此同时，基础研究也取得了重大进展。1975 年，合成了唯一的铁电性液晶——近晶 C\* 型。1980 年，发明了铁电性液晶双稳态开关。法国用近晶 A 型制成了响应很快的终端显示屏。日本在此期间已研制成功了大小为 3 厘米 × 4 厘米的液晶电视样机。同时也开展了彩色液晶显示的研究，目前已有产品问世。近年来，液晶薄膜材料作为良好的二维材料系统被用于二维相变理论研究中。

我国的液晶研究起步较晚。1970 年，中科院化学所研究了胆甾型液晶的合成和测试，目的是利用胆甾型液晶的热敏特性对金属进行无损探伤。1977 年，我国研制成功液晶显示模拟电压计；1979 年制成了具有矩阵显示的气象字符显示器。中科院上海有机所也研制成功了 32 × 32 位的液晶显示组页器，一页的显示时间为 520 毫秒。上海华东医院和有关高校合作研制成了立体 X 射线液晶体视镜。1972 ~ 1975 年，我国制成了反射式投影大屏幕电视，尺寸为 2 × 3 米<sup>2</sup>。与此同时，还研制成功了反应速度能满足电视信号要求的液晶配方和驱动方式。在肿瘤诊断方面，上海第一医学院等医院用液晶热图象对乳腺等人体表面肿物进行了广泛的普查、分析工作。对乳腺肿瘤的正确诊断率达 90% 以上。在液晶材料的研制方面也取得了很大的成绩，目前已能自制完全符合显示要求的液晶材料。

#### 【相变和临界现象】

“相”和“态”这两个物理概念既有联系，又有区别。我们把系统内部物理性质和化学性质完全相同的均匀部分称为一个相。不同的物态当然是不同的相，但某种物质在同一种物态下却可能存在好几种不同的相。例如，固态水有 7 种（或说有 8 种）不同的结晶状态，即存在 7 种或 8 种不同的相。液氮也有氮 I 和氮 II 两种不同的相，等等。不过在不至引起歧义

的情况下，两者往往交相使用。

直到 19 世纪末，人们还只能从物质的宏观特征来区分物质的状态。说起物态，无非是指固、液、气三态。随着科学技术的进步，对物质在超高（低）温、超高（低）压下的状态作了大量深入的研究，人们对物态的认识从宏观转入微观，从现象转入本质。物质三态的认识界限打破了。种种奇妙新颖的态（或相），诸如等离子态，超固态，中子态，超导态，超流态，液晶态等，摇曳生姿，呈现在人们的眼前。同时一门从微观角度研究热现象的理论——统计物理学也日臻成熟，成为指导理论研究的有力工具。

在一定的条件下物质从一相转变为另一相，这就是相变。下图是  $\text{CO}_2$  的三相图。其中汽化曲线最有讨论价值，它的始点是三相点  $O$ ，并有一个引人注目的终点  $C$ 。早在 1869 年，英国的安德鲁斯（T· Andrews）发现在  $31^\circ\text{C}$  附近  $\text{CO}_2$  气体和液体的一切差别都消失了，气液间的分界面也不见了。他把汽化曲线上对应这一温度的点  $C$  称为临界点，这个名词一直沿用至今。 $C$  点以右的各点都是气液不分的状态，即此时再问物质究竟处于气态还是液态是没有意义的。由于临界点的存在，只要沿图中虚线改变温度和压力，就可以使物质从液态  $A$  连续地变到气态  $B$  而不经任何相变点。临界点附近的现象称为临界现象。人们已经发现许多有趣的临界现象。例如，原来清澈透明的气体或液体在接近临界点时由于对光的散射作用增强而变得浑浊，呈现出一片乳白色，称为“临界乳光”。近二三十年来，对于临界现象的研究取得了较大的进展。

相变是自然界中普遍存在的现象，相变的形式和机制多种多样。1933 年厄伦菲斯特（P. Ehrenfest）提出了一个现在看来很不完善的相变分类标志。按照这一分类法，一级相变的特征是相变过程中伴随有明显的体积变化和热量（相变潜热）的吸收或放出。一级相变的例子很多。普通的固、液、气三态间的相变就是一级相变。此外，例如石墨在高温、高压下，可以转变成金刚石；坚实、锃亮的白锡在  $-40^\circ\text{C}$  以下低温，会变成粉末状的灰锡；奥氏体钢经淬火热处理后，变为硬度很高的马氏体钢，这一类同素异晶转变现象也属于一级相变。自然界中还存在另一类相变——二级相变。二级相变的一个特征是相变时没有潜热和体积变化，体系的宏观状态不发生任何突变，而是连续变化，因此二级相变也称为连续相变。气液相变是一级相变，但在临界点处的相变无潜热和体积变化，成为二级相变的重要范例。一般说来，任何一种物质两相平衡共存，只要存在临界点，在临界点上的相变就是二级相变。当然并非所有的两相平衡共存都有这样的临界点存在，如固液、固气相变就不存在临界点。因此，二级相变、连续相变和临界现象三者指的是相同的意思。属于二级相变的还有：液氦横过  $\lambda$  线的相变，铁磁体的铁磁—顺磁相变（ $B=0$  时），反铁磁相变（ $B=0$  时），



铁电体相变（电场为零时），超导相变（ $B = 0$  时），二元溶液相变以及合金的有序-无序相变等。此外，液晶中的种种相变最初也被认为是连续相变，最近的研究表明，其中有些相变不是连续相变，另一些则有待进一步的研究。

人们发现，气液、铁磁-顺磁相变、反铁磁、合金的有序-无序相变，尽管其机制各不相同，表现形式却十分相似。这就促使人们致力于发现这些连续相变中表现的共性，进而建立统一的描述方法。例如，拿铁磁-顺磁相变来说，铁磁体的磁化与温度的关系很奇特，随着温度上升，饱和磁化强度逐渐减少，当达  $T_c$ （称为居里温度）时降为零。在  $T_c$  以上，铁磁性消失，铁磁体变成了顺磁体。铁磁-顺磁相变本来是一级相变，但在临界点（即居里点）附近，是二级相变。如左图所示，铁磁体相图上  $T < T_c$  的一段温度轴也是一条相界线，将铁磁体的磁矩向上和向下的两个“相”分开，这条相界线以  $T_c$  为终点。在温度高于  $T_c$  时，两相没有差别。由于临界点的存在，可以连续地从一个相转变到另一个相（如虚线所示）。杨振宁和李振道在 1952 年曾就一个简单模型，证明了气液相变理论和铁磁体问题的理论在数学上等价，这就揭示了它们的共性。再看合金的有序-无序相变。以铜锌合金（ZnCu）为例，它属于一种体心立方结构，可看作由  $\alpha$  和  $\beta$  两种简单立方格子晶体嵌套而成（右图）。在完全有序的情况下，比如说 Zn 都在  $\alpha$  位置上，Cu 都在  $\beta$  位置上。X 射线衍射实验表明，随着温度的升高，越来越多的 Zn 和 Cu 跑错了位置，即 Zn 跑到  $\beta$  位置，而 Cu 跑到  $\alpha$  位置上去了。不过在温度低于临界温度  $T_c$ （742K）时，Zn 在  $\alpha$  上的几率仍大于 Cu 在  $\alpha$  上的几率，即位置“坐”对的原子还是占多数。而当  $T > T_c$  时，发现 Zn 在  $\alpha$  上的几率等于 Cu 在  $\alpha$  上的几率，即此时晶体结构对于  $\alpha$  和  $\beta$  是对称的，这种状态称为无序状态。合金的有序-无序相变也是一种存在临界点的相变。

关于相变的理论研究，长期以来一直没有脱离平均场理论的模式。本世纪五六十年代，由于实验技术的发展，积累了不少有关临界现象的实验资料，一再发现与平均场理论的预言有明显差别。60 年代中后期，出现了临界现象的标度理论。70 年代初威尔逊（Wilson）把量子场论中的重正化群观念移植到统计物理学中来，建立了关于临界现象的重正化群理论。相变和临界现象是当今物理学的重要研究课题。人们期待着实验和理论方面的新的突破。

#### 【向绝对零度趋近】

物质在绝对零度（ $0K = -273.15$ ）到液氢沸点（大约  $20K = -253$ ）的温度区间内，会呈现许多奇异的现象。如我们熟知的超导电性、超流动性等在常温下观察不到的宏观量子效应。另一方面，物质在低温下的性质对于研究物质的微观结构及物质的相变都十分重要。而这些都是以一定的低

温环境为基础的。因此，低温的获得一直是低温物理和低温技术的重要研究领域之一。

低温的获得一直是和气体的液化技术相联系的，法拉第 (M. Faraday) 是最早进行这方面研究工作的科学家。早在 1823 年，他就实现了氯气和其他一些气体的液化。到 19 世纪中叶，除了氧气、氢气、氮气等 6 种所谓“永久气体”外，其他的气体已被全部液化。1877 年，法国科学家凯莱特 (L. P. Cailletet) 和瑞士科学家皮克特 (R. P. Picter) 成功地液化了氧气、一氧化碳和氮气。1883 年，实现了氧气的工业化生产。基于焦耳、汤姆逊效应 (气体通过多孔物质而发生的不可逆的绝热膨胀后温度下降的现象)，后来又发明了一种装置，可以在工业上大量生产液化空气。1898 年，苏格兰化学家杜瓦 (J. Dewar) 成功地液化了氢气，后来又在 55 毫米汞高的压力下液化了氢气，使温度下降到  $-259^{\circ}\text{C}$ 。本世纪以来，在这一领域中，荷兰物理学家昂尼斯 (H. K. Onnes) 一直处于领先地位。早在 19 世纪 80 年代他就开始对低温下的物态进行了研究。他在莱登建立了一个低温实验室，可以根据研究需要达到各种低温环境。为了获得更低的温度，他对当时刚发现的惰性气体——氦气进行了研究。终于在 1908 年实现了氦的液化，达到了 0.9K 的低温。在这一领域里，前苏联科学家卡皮查 (H. A. Kapitza) 也做了大量的工作。我们目前使用的氦液化装置，还是根据他 1934 年制成的第一台氦液化器的原理设计制造的。

物质的温度越低，微观结构越有序。要进一步获得低于 1K 的温度，就要使具有一定无序度的物质系统有序化，以进一步降低熵值。顺磁盐绝热去磁致冷法就是根据这个原理。如右图所示，致冷过程可以分成 2 步进行。第一步是等温充磁。利用外界磁场使顺磁盐中磁性离子进一步有规则排列，增加有序度，降低熵值。磁化热由热交换器或热开关传到液氦池，如右图 (a)、(b)。第二步就是绝热去磁。撤去外磁场，对于绝热过程，熵不变，失去了外磁场的约束，温度进一步下降。常用的顺磁盐有硝酸铈钕 ( $2\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 3\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ ) 简称 CMN，铬钾矾 ( $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ )，简称 CPA。前者可达到 2 毫开 ( $2 \times 10^{-3}\text{K}$ ) 温度，后者的温度虽然稍高一些，但起始温度可高些，致冷能力也较大。该方法是 1926 ~ 1927 年提出来的，1933 ~ 1935 年在实验上获得成功。本世纪 60 年代前，顺磁盐绝热去磁致冷法一直是毫开温度的唯一获得手段。它的不足之处在于不能连续工作，低温维持时间较短，致冷能力较小。

$^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  稀释致冷机也能获得毫开温度。这种方法是由 G. R. 克拉克和 E. 门德兹在 1962 年提出来的。1965 ~ 1966 年实验上获得了成功。如下图所示。T=0.87K 时， $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$  两相分离。致冷机中包括两相界面的叫混合室。包括稀相 (含  $^3\text{He}$  少) 自由面的叫蒸馏室。混合室中  $^3\text{He}$  原子由相面进入稀相，类似于气体的蒸发，需吸收热量，使混合室的温度进一步下降，

用以冷却实验样品或作进一步降温的前置致冷。就  $^3\text{He}$  而言，它在浓相中的熵比稀相中的熵要小，因此有净的吸热致冷效果。蒸馏室中的温度一般在  $0.6 \sim 0.7\text{K}$ ，由于  $^3\text{He}$  的饱和蒸汽压比  $^4\text{He}$  高得多，可用抽气的方法使稀相中的  $^3\text{He}$  蒸发，再通过冷凝器使  $^3\text{He}$  由相面进入稀相，以保证稀相中有一定浓度的  $^3\text{He}$  原子（混合室中约为常数  $6.48\%$ ）。热交换器的作用是利用由稀相向蒸馏室流动的  $^3\text{He}$  来冷却返回稀相的  $^3\text{He}$ （液体），使  $^3\text{He}$  的温度尽可能低，因此热交换器的好坏对致冷机的性能影响极大。目前利用稀释致冷机可达到  $2$  毫开的温度。该致冷机结构简单可靠，冷却能力大。特别是它能长时间连续工作，可获得稳定可调的温度。这是顺磁盐绝热去磁法无法比拟的。它的问世能获得极低温，由此，能使许多研究课题延伸到从未达到过的极低温范围，因而有着极其广泛的用途。

在稀释致冷机的基础上利用波多兰丘克致冷法可以进一步降低温度，获得  $1$  毫开的温度。此方法是利用在  $T < 0.32\text{K}$  时，液态  $^3\text{He}$  的熵比固态  $^3\text{He}$  的熵小的事实，压缩液  $^3\text{He}$ ，使一部分液  $^3\text{He}$  变为固体而吸热的致冷方法。这个方法  $1950$  年就已提出， $1965$  年实验中才第一次获得成功。 $1970$  年，用此方法第一次观察到了  $^3\text{He}$  的超流相。右图中表示固  $^3\text{He}$  和液  $^3\text{He}$  的熵沿熔解线随温度的变化关系。可以看到在  $0.32\text{K}$  以下，由液态  $^3\text{He}$  转变为固态  $^3\text{He}$  时，是从有比较有序的状态转变到有序度差的状态，因此要吸收热量  $Q = T(S_2 - S_1)dn_s$ 。  $dn_s$  为形成的固  $^3\text{He}$  的摩尔数。如果要更进一步降低温度，可以采用核绝热去磁的方法。因为核磁子的磁矩比玻尔磁子小  $1836$  倍，因此原子核磁矩之间的相互作用力比电子磁矩之间的相互作用力要小得多。直到毫开温度，核磁矩还是杂乱无章的。因此可以采用类似于顺磁盐绝热去磁的方法使核系统达到更低的温度。该方法  $1934$  年 ~  $1935$  年就已提出，但因为当时低温技术不能达到它所要求的起始温度（毫开温度），同时又需要强磁场的作用，才能使很小的核磁矩取向一致，外磁场方向上的磁能才会明显低于其他方向，技术要求很高，所以直到  $1956$  年才首次获得实验成功，金属铜的核系统温度达到了  $16$  微开（ $16 \times 10^{-6}\text{K}$ ）的低温。目前，用稀释致冷作它的前级致冷，用超导磁体产生强磁场，已使核绝热去磁方法成为一种实用的致冷方法。用二级核绝热去磁方法已使核系统达到了  $50\text{nK}$ （ $50 \times 10^{-9}\text{K}$ ）的低温。这是目前所能达到的最低温度。

#### 【耗散结构理论】

耗散结构理论是比利时布鲁塞尔学派领导人普利高津（I. Prigogine）教授  $1969$  年在一次“理论物理与生物学”的国际会议上，针对非平衡态统计物理学的发展提出的。理论指出，一个远离平衡态的开放系统，通过不断地和外界交换物质和能量，当外界条件达到一定的阈值时，系统可能从原来的无序的混乱状态，转变为一种在时间上、空间上或功能上的有序状态。普利高津把在远离平衡态情况下所形成的有序结构命名为“耗散结

构”。耗散结构理论就是研究耗散结构的性质，以及它的形成、稳定和演变规律的理论。

耗散结构理论研究的对象是开放系统。宇宙中的系统无一不是和周围环境有着相互依存和相互作用的开放系统，不论是有生命的，还是无生命的，都是如此。因此，这一理论涉及的面之广，在科学发展史上是罕见的。这一理论从诞生到现在，短短的二十几年中，在各方面的应用都已取得了可喜的成果。

我们应该清楚地看到，在自然界、科学实验、乃至社会现象中，从宏观上看，都有必要、也必须区分平衡结构（平衡状态下的稳定化有序结构）和耗散结构（耗散状态下的稳定化有序结构）。这里所讲的平衡结构，是指热力学意义上的平衡，即在与外界没有物质、能量交换的条件下，宏观系统的各部分在长时间内不发生任何变化。而耗散结构是指宏观系统在非平衡条件下，通过和外界不断地进行能量和物质交换而形成并维持的一种稳定化了的有序结构，即在非平衡态下宏观体系的自组织现象。通俗一点讲，平衡结构是一种“死”的有序化结构，而耗散结构则是一种“活”的有序结构。我们熟知的晶体和液体是比较典型的平衡态下的稳定化有序结构。连续介质力学中的“贝纳特不稳流”则是布鲁塞尔学派最早用来说明耗散结构物理图象的一个例子。这个实例说，加热一个液体系统，液体内部会产生一个温度梯度。温度梯度较小时，热量通过传导在液体中传递，不存在一种有序的自组织现象。但如果继续加热，当温度梯度达到一定的特征值时，一种有序的对流元胞会自动呈现，整个体系则由无数个这种对流元胞组成，它对应于一种高度有序化的分子组织，此时热量是通过宏观对流来传递的。这种图象就称为“贝纳特花样”，如右图所示。这种产生在不稳定之上，当体系达到某一特征值时稳定化的宏观有序的新组织、新结构，就是所谓的耗散结构。

热力学第二定律指出，熵是无序度的一种量度。熵增加原理又指出，孤立系统的熵永不减少。它终究要达到一个极大值，此时对应于一个热力学的平衡态。因此高熵对应于平衡态，低熵对应于非平衡态。而对于布鲁塞尔学派来说，耗散结构是“非平衡态是有序之源”这一基本出发点的必然结果。对于一个和外界可以交换能量或物质的开放系统，在时间  $dt$  内，体系熵的增加量  $ds$ ，应该由两部分组成。一部分是由于体系和外界交换能量及物质而引起的熵增，称为熵流，用  $d_e s$  表示。另一部分称为“熵源”，顾名思义，它是由于体系内部的不可逆过程所引起的，用  $d_i s$  表示。 $ds$  可表示为  $ds = d_e s + d_i s$ 。熵增加原理告诉我们  $d_i s \geq 0$ 。而对于一个开放系统来说，只要满足  $d_e s < -d_i s$ ，总熵变可以小于零。由此可见，负的熵流可以使体系的熵减少，形成有序化。当一个开放系统处于稳定态的时候，必然有  $ds/dt = 0$ ，因而  $d_e s/dt = -d_i s/dt$ 。可以在开放系统得到一个有序化原理：

非平衡态是有序之源。或者讲，在开放的非平衡耗散条件下，在存有负熵流的情况下，体系有可能出现耗散的有序化结构——耗散结构。

我们可以把非平衡区分为近平衡区（又称线性非平衡区）和远离平衡区（又称非线性非平衡区）。系统处于近平衡区的定态时，外界的约束是微弱的，系统向平衡态的过渡是连续的，此时系统具有接近于平衡态的某些性质，如空间均匀性。此时系统不可能出现有别于平衡结构的自组织结构。而在非线性非平衡区则不同，当约束条件变化时，体系将逐渐偏离平衡态。当约束条件的值超过某一特征值时，体系变得不稳定。此时一个微小的扰动就可以使体系离开不稳定的定态，进入一个稳定化的状态——有序化的耗散结构。

布鲁塞尔学派认为，耗散结构的形成的直接原因是涨落。从本质上讲，耗散结构的出现，对应于一个巨涨落，例如贝纳特不稳流中的温度梯度特征值。

耗散结构理论所研究的对象极其广泛，几乎覆盖了整个宇宙，它的诞生和发展，不仅对自然科学各个领域的发展产生巨大的推动作用，而且对社会科学的各领域的发展也将产生巨大的作用。

#### 【高压和超高压物理】

物质在高压下会呈现一些平时所看不到的性质，这对于我们进一步认识物质世界的本质是极为关键的。高压物理就是研究在高压条件下物质的结构和性质的学科。它涉及到凝聚态物理及材料科学的许多领域。在高压下，物质原子的空间位置和电子结构都将发生变化，从而引起相变。如原子结构发生变化就会引起结构相变；对物质分子也一样，我们都知道冰在高压下就有几种不同的结晶状态，而且高压下冰的熔点可高达 400 °C；对于金属材料来讲，高压会使电子云的重叠增加，电子公有化程度提高，从而电阻降低；对于绝缘体来讲，高压会使禁带变窄，出现金属化趋势……化学家、地质学家及地球物理学家对高压都很感兴趣。化学家希望利用高压来合成新材料；而地质学家和地球物理学家则希望利用高压在实验室中模拟地壳和地幔以下的物理化学过程。

高压物理虽有着如此诱人的前景，但由于技术上的原因，起步和发展都比较晚。直到 1880 年才首先实现 3000 千克/厘米<sup>2</sup> 的压力，并在此压力下实现了气体的液化。在这一研究领域，美国物理学家布里奇曼（D.W.Bridgman）作出了杰出贡献。他设计了专门的压力设备，发现了行之有效的、无支持面密封原理，其密封度随压力增大而增大。从此高压容器不再为漏压所限制，只受材料的强度所制约。1910 年，他利用这个原理设计了可达 20000 千克/厘米<sup>2</sup> 的高压装置，又在此基础上，采用了特殊合金——磷化钨，改进了装置，制成了二级高压容器，一步一步地把他设计的高压容器的压力提高到 100000 千克/厘米<sup>2</sup>。在某些条件下，压力可提高到 400000 ~ 500000 千克/厘米<sup>2</sup>。在 300000 ~ 400000 千克/厘米<sup>2</sup> 的压力

条件下，他测定了 100 多种物质的力学、电学和热学性质，获得了大量的数据，引起了物理学界的注意；他发现了高压下许多物质的变体，如磷的同素异构体——黑磷，冰的异构体 6 种以上等。他发现的 Te（碲）的高压相变点至今仍被用作测量高压的标准。高压物理的应用技术，最突出的是人工合成金刚石。1953 年，美国通用电气公司设计制造了叫做“BELT”型的高压装置，利用这个装置于 1955 年首次合成了金刚石。它以石墨为原料，采用的压力约为 60000 千克/厘米<sup>2</sup>，在 1500 温度下合成了金刚石。金刚石的首次合成成功，轰动了世界工业界。后来又合成了许多超硬材料。近年来，在高压物理和高压技术领域，也取得了很大成就：

(1) 静高压实验压力已经超过了地心压力。日本科学家将金刚石压钻技术 (DAPC) 运用到高压研究中。经过近 20 年的努力，毛阿光 (H.K.Mao) 首先达到并超过了地幔底部的压力 (约 170 万大气压)。贝尔 (BeL) 等人又改进了压钻结构，在 DAPC 的压力基础上进一步提高到 200 万大气压以上。邦迪 (Bundy) 等又在总结历年来对碳的结构和相图的研究基础上，指出在 170 万大气压下金刚石还能稳定存在；并预言利用金刚石能达到 280 万大气压以上的压力。徐济安等人又进一步改进 DAPC 装置，使压力达到了 550 万大气压，大大超过了地心压力 (约 360 万大气压)。目前，DAPC 技术在地球科学、固体物理、材料科学等方面已被广泛采用。

(2) 高压下物质结构研究的新技术。物质在高压下最普遍的变化是结构改变。DAPC 技术的应用，解决了百万大气压的产生问题。但用传统的 X 射线源和衍射测角仪，研究测试高压腔中的样品时，用照相方法或测定衍射角都很费时，研究工作大受限制。现在有人提出用位敏正比计数器 (PSPC) 来替代传统的衍射角测定 (或照相方法)，以提高衍射数据的采集效率，改进信噪比。虽然用目前常用的 X 射线源来提高效率，效果并不明显，但这也不失为一种方法。要根本改变现状，就必须进一步改进 X 射线源。现在已采用同步辐射 X 射线源和能量分散型漂移 X 射线探测器 (EDXD)，由于同步辐射 X 射线源的辐射强度比常规 X 射线源高出 100 万倍，而且还包含波长范围很宽的白光辐射，和 EDXD 配合，作高压下的结构研究，可以大大缩短衍射数据的采集时间。1977 年前联邦德国的电子同步加速器 (DESY) 上首先进行高压结构的测定工作；接着，美国斯坦福同步辐射实验室的正负电子加速环 (SPEAR)、康乃尔的高能同步辐射室都开展了这方面的研究；日本的筑波高能物理实验室的被称为光子工厂的同步辐射源配上了 MAX80 多压钻型高压装置，能在 7 万大气压和 700 以上高温下，迅速采集衍射数据。目前，这是在高压、高温条件下研究物质结构的转变过程和反应过程的最新装置。

(3) 动高压技术，作为高压技术的一个重要组成部分，近年来也有了迅速发展。80 年代初，轨道激光冲击技术的发现，使动态高压技术从百万大气压又提高了 1 个数量级。据最近报道，利用激光冲击的飞片技术，当

飞片的飞行速度达到 135 千米 / 秒时，相应的冲击压力可达 4.4 亿大气压。这个压力要比地心压力大 2 个数量级。

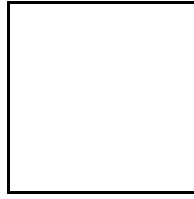
高压技术的发展，也推动了其他相关领域的研究工作。在地球物理研究领域，对地球内部的研究，目前已进入了定量阶段。利用同步 X 射线高压、高温衍射技术，已能够精确地测定地幔的组成成份——石榴石的固熔体的物态方程等重要的热力学性质。可以用同步辐射观察熔态的硅酸盐在高压、高温下的粘度和密度。已能了解地球分层结构和岩浆的形成过程。

应用高压技术，材料科学领域也已取得了很多成果。利用高压合成了用于蓝色发光二极管的高电阻率的 P 型 GaN；利用高压氮气下生长 GaP 晶体，使氮的掺杂浓度提高了 2 个数量级，大大提高了绿色发光二极管的效率；高压下合成了新的超导材料—— $B_1$  型结构的 NbN 和 MoN；利用 Nb—Si 非晶合金高压下的晶化规律合成了通常不存在的 A·15 型超导材料  $Nb_3Si$ 。高压技术的发展，改进了同步辐射 X 射线衍射数据的采集，运用高压下原位测定结构技术取得了合成金刚石与立方 BN 过程中结构衍射数据随时间的变化关系，增加了对合成时物理、化学过程的了解，由此，又合成了许多超硬材料。利用高压下急冷及显著降低非晶形成过程的降温速率，合成了人造翡翠、双稀土氧化物等等。

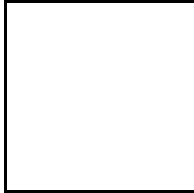
大部分物质在压力不断增大时，会出现更多的未知结构，从而导致新的物性变化。首先是轻元素在高压下分子固体金属化的问题。近年来应用 DAPC 技术，根据所测得的喇曼谱线随压力变化的频率可判断，氢分子键在 36 万大气压时被破坏，它的同位素则在 50 万大气压时分子键瓦解。冲击压实验也找出了氮气在 30 万大气压和 6000K 高温时面临分子键解体的转变。这是一种流体状态下的结构转变。在 150 万大气压时，虽然还没有出现可用来标志金属化的导电性，但液体已开始变得不透明；180 万大气压时，我们还能观察到分子振动模式，由此可以断定，金属化转变是一个渐变过程。地幔中含有铀、钍，它们的放射性蜕变是地热的重要来源，因此它们在高压下的结构转变的研究对于地球科学的研究是非常重要的。随着高压物理和高压技术的进一步发展，地球科学、材料科学等相关领域的研究也将进一步发展。

#### 【量子霍尔效应】

1879 年美国物理学家霍尔 (E.H.Hall) 在研究载流导体在磁场中受力的性质时，发现了一种前所未有的电磁效应：若将通电导体置于磁场中，磁场  $B$  垂直于电流  $I$  的方向，则在导体中垂直于电流和磁场的方向上会产生一个横向电动势  $U_H$  (右图)，称作霍尔电势差，相应的电场称作霍尔电场  $E_H$ 。实验测出它们可分别表示为



式中  $d$ 、 $b$  分别是导体的宽度和厚度， $q$  是导体内载流子所带电量， $n$  是



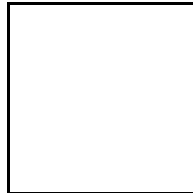
在磁场中受洛伦兹力而偏转来解释。根据洛伦兹力公式

$$F = qv \times B$$

可知，若运动的载流子带的是正电荷，那么它在外磁场中受到洛伦兹力后将向下偏转，并聚集到导体的底部，而导体顶部由于缺乏正电荷而显示出有多余负电荷，因此将在导体内部产生一个从下指向上的横向电场  $E$ ，这个场要阻止正、负电荷的继续聚集。最后当电场增强到使  $qE$  与  $qv \times B$  两者对载流子的作用相平衡时，横向霍尔电场的大小保持为  $E_H = vB$ ，而霍尔电势差  $U_H = Ed = vBd$ 。按经典电子论可知，导体中的电流与载流子的漂移速度  $v$  的关系是

$$I = nqvS = nqvdb。$$

式中  $S = db$  是导体的横截面积， $n$  是导体的单位体积内载流子的数目（即载流子浓度），由此可得



如果导体中载流子带的是负电（它的运动方向与电流方向相反），则导体内部将产生由上指向下的霍尔电场及相应的霍尔电压。

由此测出霍尔电压的正负可以判断出导体或半导体中载流子的种类（是电子或是空穴，正、负离子）；在电流  $I$  和磁场  $B$  已知的情况下，按（1）式还可算出载流子的浓度  $n$ ；而当给定的材料薄片（一般为半导体材料，其中载流子浓度相对金属中电子浓度要小得多，故霍尔系数较大）通过确定的电流时，通过测定霍尔电压可精确地测出磁场。由于霍尔效应对科学技术发展的作用，人们将霍尔的成功誉为“过去 50 年中电学方面最重要的发现”。开尔文则说：“霍尔的发现可和法拉第的发现相比拟”。

在霍尔效应发现 100 年之后，1985 年 10 月 16 日瑞典科学院宣布，把 1985 年的诺贝尔物理学奖授予前联邦德国的物理学家克劳斯·冯·克利青（1943—），以表彰他对量子霍尔效应的发现所作的杰出贡献。

近二三十年来，半导体物理学中出现了一个崭新的研究领域——二维

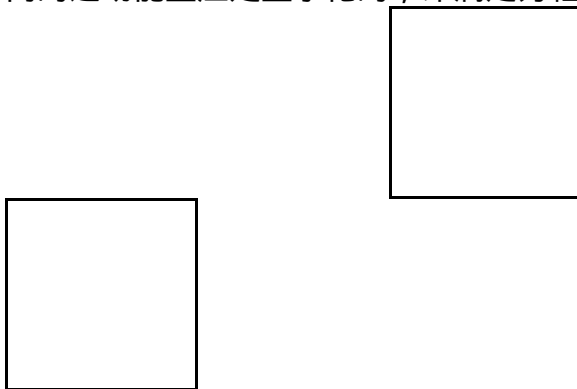


电子系统。1957年 J.R.Schrieffer 指出，如果与半导体表面垂直的电场很强的话，表面附近就会出现与体内导电类型相反的反型层，反型层中的电子被限制在一个很窄的势阱中。在与表面垂直的方向上，电子的运动应该是量子化的，形成一系列分立的能级；而与表面平行的方向上的运动是自由的，这就是一个“二维电子（气）系统”。

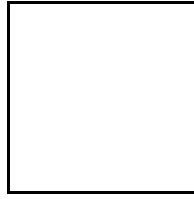
n 型沟道 SiMOSFET 的剖面示意图（衬底是 P 型硅，源极 S 及漏极 D 是重掺杂的 n<sup>+</sup>区，绝缘层 SiO<sub>2</sub> 上有铝栅极 G）

50 年代末、60 年代初制成了金属-氧化物-半导体场效应晶体管（写作 MOSFET），其结构是：在 n 型（或 P 型）晶片上扩散生成两个 P 型（或 n 型）区，分别称为源和漏，从上面引出源极和漏极，源和漏之间有一个沟道区，在它上面隔一层硅氧化层（或其他绝缘层），然后制作下层金属电极，称为栅极（左图）。在恰当的条件下能把电子没入绝缘层和半导体之间，而且在绝缘层足够薄（小于 10<sup>-7</sup> 米）、半导体的温度足够低（1.5K 左右）的条件下，电子将限于作二维运动，即为二维电子气系统。当 MOS—FET 工作时，栅极电压的变化会引起沟道导电性能的变化，因而控制了源、漏之间电流的变化。

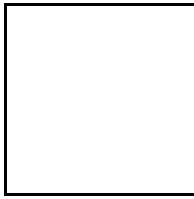
如果把 SiMOSFET 放在强磁场中，使磁场的方向与界面垂直，则电子气不仅在与表面垂直的方向上的运动受到限制，而且在平行于表面的方向上也不能自由运动。根据经典理论，电子在与表面平行的方向上将作圆周运动；而根据前苏联物理学家朗道（L.D.Lan-dau）的量子理论，电子在该方向的运动能量应是量子化的，即满足方程



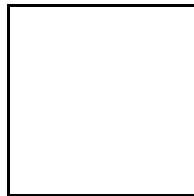
其中  $m_0$  是电子的有效质量，这一系列能量  $E_n$  叫做朗道能级。每个朗道能级都是高度简并的，单位面积的简并度为  $CB/h$ ，故理想的二维电子气在强磁场中应该成为一个能量完全分立的系统（右图）。在能级中所有  $k$  个电子都力求挤到最低能态上而形成所谓费米气体。而根据泡利不相容原理，每一个可能的能态不允许有两个电子，所有  $k$  个电子将填满从最低能态到具有动能  $K_f$  能态之间的所有态。 $K_f$  叫做费米能级，它与单位体积内传导电子数（载流子数） $n$  的关系为



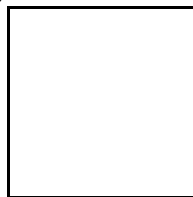
冯·克利青及其同伴们把 SiMOSFET 放在十几特斯拉的强磁场及 1.5K 左右的极低温下，测出霍耳电压  $U_H$ ，并算出霍耳电压与馈给器件的电流之比——霍耳电阻  $R_H$ ，发现该电阻随着栅极电压  $V_G$  的增大而下降，并出现一系列的台阶（坪）（左图），这个效应叫做量子霍耳效应，与平台相对应的  $R$  值叫做量子霍耳电阻。



这里  $e$  是电子电量， $N$  是电子面密度。量子霍耳效应可解释为：当栅极电压不断增加时，反型层中的电子浓度随之增加，它们逐次填充各个朗道能级。每当费米能级移到两个朗道能级之间时，电阻呈现极值，即当电子填满整数个朗道能级时，霍耳电阻出现“平台”。在硅晶体和二氧化硅的界面很小缺陷的理想情况及极低温下，如果电子正好填满  $i$  个朗道能级，则有

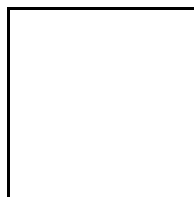


将 (4) 式代入 (3) 式得

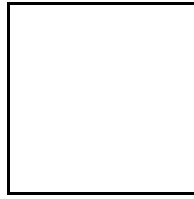


此式表明霍耳电阻是量子化的，而且实验表明在出现霍耳平台的同时，电流方向的电阻（即纵向电阻）等于零。

量子霍耳效应发现的意义深远，在科技应用方面也极有价值。例如精确测量了霍耳电阻  $R_H$  的值，就可得到同样精确的精细结构常数  $a$ 。精细结构常数  $a$  可表达为



而霍尔电阻可写成



式中 $\mu_0$ 和 $c$ 分别为真空磁导率和真空中的光速，都是已知恒量，因此利用量子霍尔效应可方便、精确地测出 $\alpha$ 。而精细结构常数 $\alpha$ 是表征带电粒子与电磁场之间的相互作用，是最重要和最基本的物理常数之一。

又由于量子霍尔电阻有很精确的数值，可用作电阻的自然基准，从而增加了电阻标准的精确度。

尽管量子霍尔效应的理论和应用的研究还在不断深入进行中，然而它毕竟是“今日物理学的一个激动人心的发现”，马克思·普朗克协会固体研究所所长之一、著名的半导体专家 H.J. Queisser 教授对此曾说：“今日物理学激动人心的发现不是出现在高能物理学的昂贵的数公里长的管道里，而是出现在晶体的内部。”

#### 【等离子体物理】

本世纪最初的一年，发生了一件使当时的科学家们为之一惊的“怪事”。那就是 1901 年 12 月 12 日，在加拿大的纽芬兰收到了英国人马克尼从英国康沃尔发出的电讯号。人们在当时怎么也弄不明白，一向以直线传播的无线电波怎么会横越 3400 公里的大西洋 绕过弯曲的地球表面传到纽芬兰呢？原来这是等离子体在作怪。

等离子体又被称为物质的第四态，它是由电子和正离子组成的一种物质的聚集态。众所周知，物质的聚集态随着物质温度的升高会发生由固态到液态最后到气态的变化。然而，这只是常温状态下的情况，如果温度升高，达到几万度甚至几十万度，则分子和原子之间已难以相互束缚，原子中的电子也会摆脱核的束缚而成为自由电子，这样原来的气体就变成了一团由电子和核离子组成的混合物。这种混合物就称为等离子体。等离子体是一种全新的物质的状态，它与气体有本质的区别。

等离子体的存在使本节开头的问题得到解决。英国的物理学家海维赛德和美国电气工程师肯涅利在等离子体概念确立之前就设想大气层的高处有一个带电粒子层（等离子层），无线电波向四面八方传播时，有一部分向地面上空传播，这部分电磁波遇到了高空中的带电粒子层就反射回来传到远处。30 年代英国物理学家阿普顿（E.V. Appleton）用实验证实了高空中的电离层的存在，因而他获得了 1947 年度的诺贝尔物理学奖。由此可见，等离子体有下述特征：

1. 等离子体是一种由带电粒子构成的物质的聚集态，这许多粒子的集体对外界物质进行作用。如前所述，是电离层对电磁波进行反射，而不是单一的粒子对电磁波的散射。这种效应就是由于诸带电粒子之间的库仑作

用而导致的“协作效应”。而对一般的气体而言，诸分子之间的相互作用只是近程的相互作用（如碰撞），所以一般的气体无协作效应。

2. 等离子体基本上是中性的，因为它是在星电中性的气体的基础上形成的。

3. 等离子体具有很高的温度。一般说来，即使温度在1万 左右，物质中等离子体所占的比例约为1%。因此，在我们生存的空间，等离子体现象很少见。然而，宇宙中大量的物质均以等离子体的形式存在，等离子体约占宇宙物质的99%，甚至更多，这是因为宇宙中大部分物质都集中在恒星内，而恒星的温度都比较高，如太阳中心的温度高达1千万 ，那里的物质显然都以等离子体的形式存在。

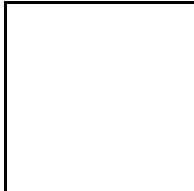
等离子体物理是研究等离子体的性质及其和外界相互作用的学科。空间中大都是等离子体，因此，等离子物理对空间物理、宇宙理论、太空技术等都具有十分重要的意义。

#### 【等离子体的温度】

对一般的等离子体而言，其温度通常在1万度以上。例如极光、闪电等，它们都是等离子体所构成，其温度之高是毋庸置疑的。然而，若说霓虹灯、日光灯内亦有等离子体存在，恐怕就很难理解等离子体的高温度了。

然而，事实上霓虹灯、日光灯内确有等离子体存在，日光灯里面的电子温度大约为2万 。那么，为什么日光灯还被称为冷光灯？日光灯管为什么不会烧坏呢？这就要弄清楚温度的概念。

日常生活中，温度是物体冷热程度的表示。而温度的微观意义是它表征了物质内部微观粒子热运动的剧烈程度。根据能量均分定理可知电子的



度是大量粒子热运动的集体宏观表现，对单个粒子来说，它的温度是没有意义的。等离子体也同样如此。

在等离子体物理中，为了研究的方便，往往直接用粒子的能量来表示温度  $T$ ，而且一般情况下等离子体内存在两种不同的温度，即电子温度和离子温度。这说明电子和离子之间没有达到热平衡。这是因为等离子体内存在两类质量差别很大的粒子（电子和离子），各类粒子之间碰撞时所传递的能量是不同的。电子和电子之间，离子和离子之间通过碰撞可分别达到热平衡，因此它们各自有自己的平衡温度。而电子和离子碰撞时，由于两者质量悬殊，它们就不一定能达到热平衡。因而一般情况下等离子体具有两个不同的温度，两者之间可以差别很大，在这种情况下，笼统地说等离子体温度是没有意义的。

然而电子与离子之间的碰撞可以是多次的，一次碰撞不能达到平衡，

多次碰撞后会怎样呢？这就要看具体情况了。通常，实验室产生的等离子体是通过气体放电产生的，气体放电过程中，外部电源将能量直接传给电子，电子便获得能量，温度较高。离子主要是通过与电子碰撞获得能量。电子和离子的质量差别较大，每次碰撞电子只把很少一部分能量传递给离子，同时，电子又从外部电源中获得能量以作补充。因而一般情况下，电子温度高于离子温度。当然，在某些条件下，离子温度亦会与电子温度相同，甚至高于电子温度。

明白了温度的概念，解释日光灯内等离子体的温度就容易了。日光灯内等离子体约占管内气体的万分之一，管内中性原子及等离子体中离子的温度大约和室温相同，不会破坏灯管。至于等离子体中的电子，虽然其温度高达2万，但一方面电子数量不大，且每个电子相应的动能（因而其热容）很小，撞击管壁时传给管壁的热量也很小，根本不足以损坏日光灯管，这和“高处不胜寒”的情形有相似之处。

### 【受控核聚变】

受控核聚变是高温等离子体的重要应用之一，也是当代世界科学技术领域的主攻课题之一，它的实现将为人类提供一种新型的理想能源。

核聚变能源与其他能源相比，有下列优点：

#### 1. 核聚变的原料储量极其丰富

核聚变的主要原料是氘和氚。氚可以利用储量丰富的元素锂在聚变堆中再生，而氘的储量极其丰富，它与氧结合成重水存在于海水之中。据估计，地球上海水中含氘 $3 \times 10^{16}$ 千克。目前人类平均每年消耗能源 $2 \times 10^{20}$ 焦耳，这只需“燃烧” $10^6$ 千克氘就可提供，故海水中所储藏的氘可供人类使用300亿年。根据下列数据：地球的年龄约为50亿年，地球上蕴藏的所有化石燃料只能供人类使用100年左右，我们不妨自己作一比较。

#### 2. 单位质量燃料放出的能量大

“燃烧”1千克氘所放出的能量相当于4千克铀（铀是核裂变燃料），也相当于7000吨汽油或1万吨煤所放出的能量。现在已知道每千克海水中含氘0.03克，因此“燃烧”每千克海水和燃烧210千克汽油所获得的能量相当。

#### 3. 使用安全，对环境无污染

氘易于提炼，易于保存和运输，这是核裂变原料铀所无法相比的。另外，核聚变反应堆中每秒只需投入大约1克的原料，且原料是持续供给而不是一次性供给的，因此一旦发生不测情况，可立即停供原料，反应堆也就立即关闭，不致发生灾难性情形。

核裂变会产生大量放射性物质，稍有疏忽，这些放射性物质就会泄漏到反应堆外，对人类、环境造成难以估量的危害，而核聚变虽产生少量的放射性物质，但这类放射性物质被固定在反应堆构造物的原子之间，不会逸散到反应堆外。同时，核聚变产生的放射性物质的半衰期很短，放射性

物质的减少速度比核裂变要快得多。所以核聚变是一种理想能源。

能为人类提供有益能量的是受控核聚变，不可控核聚变往往给人类带来灾难。例如，氢弹爆炸实际上是热核聚变反应，但氢弹爆炸是在一瞬间完成的，能量无法利用。而受控核聚变是把核聚变反应变成一个可控过程，使核聚变能够持续受控地进行，并且把产生的能量变成电能或其他形式的能量，以造福于人类。

核聚变是氢元素的两种同位素氘、氚的原子核高速碰撞聚合成较重的氦原子核，并产生高速中子，同时放出能量。实现受控核聚变，必须具备三个条件。第一，要把氘和氚加热到几亿度的超高温，使它们具有足够大的速度和动能来克服它们之间的库仑斥力，彼此便能靠近到相距  $10^{-13}$  厘米，从而结合成新的核，同时放出聚变能。此时，它们显然是以等离子体存在的，因此核聚变是一种等离子体过程。第二，必须使等离子体的密度达到每立方厘米 100 万亿个，增加结合成新核的几率。第三，要使高温等离子体维持足够长的时间，以便充分发生聚变反应，也就是说要使聚变能够持续地进行。因为等离子体的不稳定性，它一经产生便很快消失，所以满足第三个条件是相当困难的。

能满足第三个条件的装置称为约束装置，它是受控核聚变的关键所在。常见的约束装置有托卡马克装置、磁镜装置、仿星器和箍缩装置、激光聚变、相对论性电子束聚变、轻离子束聚变和重离子束聚变等等，总的来说，约束装置可分为磁约束和惯性约束两种。约束装置的发展至今仍不十分理想。目前最成功的受控核聚变是 1991 年 11 月在英格兰牛津郡欧洲联合环形聚变反应堆中进行的。它产生了 1.7 兆瓦的电力，持续时间为 2 秒。这是人类在受控核聚变方面的一个重要里程碑。

目前受控核聚变的最高研究中心在普林斯顿。它计划在 1993 年第一次将氘用于其现有的大机器装置中。美国、俄罗斯等前苏联的加盟共和国、欧洲、日本等计划联合投资 60 亿美元，来建造一个能持续不断运转的核聚变反应堆。这项计划如能成功，将开创人类能源史上的新纪元。

## 【超导电性】

### 1. 超导现象

超导电性简称超导。超导现象是本世纪的重大发现之一。1911 年荷兰物理学家翁纳斯 (H.K. Onnes) 首先发现汞在 4.2K 以下电阻突然减小到零 (约  $1 \times 10^{-5}$  左右) 的现象，并初次称之为“超导性”。自那以后，人们又相继发现了许多金属 (如铟、铌、锡、铅、铝等)、合金 (如铌-钛，铌-锆等) 和化合物 (如  $Nb_3Sn$ ,  $Nb_3Al$  等) 在低温下也都能转变成超导材料。物体从正常态过渡到超导态，犹如它们在气态、液态、固态中转变一样，是一种相变，发生这种相变时的温度称为超导体的“转变温度”或“临界温度”，常用  $T_c$  来表示。转变温度随材料而异。在 1985 年之前发现的超导材料的转变温度都在 23.2K 之下的极低温区，实际应用的价值不大，因

此寻求具有较高转变温度的材料是多年来科学家奋斗的目标。1986年4月瑞士科学家缪勒和柏诺兹发现镧钡铜氧的转变温度达30K以上，由此，高温超导材料的研究有了突破性的进展。美国、日本、中国等国相继报导获得转变温度为40K、46.3K、48.6K、98K、123K（甚至有报导达240K、299K、304K等，对此许多科学家持保留态度）的材料，目前大部分材料的转变温度仍然在液氮温区（氮的液化温度为126.16K）。在研制高转变温度材料的同时，制成和达到技术上可用产品的竞争已悄然深入开展。

## 2. 超导体的电磁特性

超导体的电阻准确为零（这并不是指纯金属在绝对零度时电阻为零的现象），即使按目前的测量精度，超导体的电阻率至少低于 $10^{-21} \text{ m}$ ，这样小的电阻率已经不会带来任何实际后果。因此，在超导环中一旦形成电流，它就经久不消。有人做过这样的示范实验：在超导铅环中激发了几百安培的电流，在持续两年半的时间内没有发现可观察到的电流变化。超导电流不需要电场维持（超导体具有完全的抗电性，即它体内的电场强度 $E=0$ ），也不产生焦耳损耗，所以超导体是一种理想导体。

超导体的另一个电磁特性是完全抗磁性。这是1933年迈斯纳、奥森费尔德等人最先从实验中发现的：超导体内部的磁感应强度恒为零，即超导体能将体内的磁场完全“排挤”出去。这里包含两种情况：一种是把原来内部没有磁场的超导体样品移到磁场中时，由于移入过程中，穿过样品的磁通量发生变化，而在样品表面产生感应电流，感应电流在超导体内部产生的磁场正好抵消外磁场，因而超导体内的磁场仍为零；另一种是已处在磁场中的样品，原先是非超导态的，内部有磁场，当其温度降低而转变成超导态时，其内部磁场也会完全消失。这说明，在转变过程中超导体表面也产生了电流，这电流在其内部产生的磁场完全抵消了原来的磁场。材料能减弱其内部磁场的性质叫抗磁性，而超导体具有完全的抗磁性。样品在转变为超导态时能排挤掉体内磁场的现象称为迈斯纳效应。

超导体的完全抗磁性与理想导电性虽有密切联系，但两者是互相独立的现象。综合具有此两特性的材料才是超导材料。

把处在超导态的样品放到外磁场中，发现当外磁场增强到某一定值 $B_c$ 以后，样品将失去超导电性而转入正常态， $B_c$ 称为临界磁场。大多数纯金属超导体的临界磁场是唯一的，即处在低于临界温度的某温度下，当外加磁场弱于 $B_c$ 时，超导体完全排斥磁力线进入；而当外磁场强于 $B_c$ 时，超导特性消失，磁力线可进入超导体，这类超导体叫第一类超导体。另一类超导体在一定温度（低于 $T_c$ ）下有高、低两个临界磁场 $B_{c2}$ 和 $B_{c1}$ 。当磁场小于低临界磁场 $B_{c1}$ 时，样品处于纯粹的超导态，完全抗磁，称为迈斯纳态。当磁场介于 $B_{c1}$ 和 $B_{c2}$ 之间时，样品处在“混合态”，此时材料具有超导区和正常区混杂、并存的结构，即整个材料是超导的，但其中嵌有许多细的正常态的丝，这些丝是平行于外磁场方向的，混合态的样品中可以进入部

分磁场，而这些细丝就是外磁场磁力线的通路，每根细丝都为涡旋状的电流所环绕，这些电流屏蔽了细丝中的磁场对外面超导区的作用。当外磁场强于高临界磁场  $B_{C_2}$  时，样品完全转入正常态。实用的超导材料要求临界磁场  $B_C$  越高越好。现在已制备出高临界磁场的超导材料，如  $Nb_3Sn$ （铌三锡）的  $B_{C_2}$  高达 22 特斯拉。

超导体还有一些特性，如具有临界电流密度值：当超导体中的电流密度超过某一临界值  $j_c$  时，超导电性也会遭到破坏。临界电流密度值  $j_c$  随材料而异，实用要求材料的  $j_c$  越高越好。超导体还具有同位素效应，同一种超导元素的各种同位素的临界温度  $T_C$  与同位素的质量有关等。

### 3. BCS 理论

虽然本世纪初翁纳斯就发现了超导现象，但直到 1957 年才由巴丁（J.Bardeen）、库柏（L. N. Cooper）和斯里弗（J.R.Schrieffer）联合提出超导的微观理论，现在叫做 BCS 理论。这一成就使他们三人获得 1972 年度的诺贝尔物理学奖。

按照经典电子论，金属的电阻是由于形成金属晶格的离子对定向运动的电子碰撞的结果。金属的电阻率与温度有关是因为晶格的无规则热运动随温度升高而加剧，而当金属冷却到绝对零度时，点阵离子将停止其热运动，电子在离子间穿越就不受任何碰撞，电阻便会消失。但这不能解释在绝对零度以上某个温度时，有些金属的电阻会突然完全消失的现象。BCS 理论提出产生超导现象的关键是超导体中电子形成了电子对（叫“库柏对”），金属中的电子并不是十分自由的，它们通过点阵离子而发生相互作用。每个电子都要吸引晶格的正离子，从而把晶格扰乱了。扰乱的晶格又会与另一电子相互作用，总的效应是一个电子对另一个电子产生小的吸引力，因而在低温情况下，该引力可克服两电子间的库仑斥力而成对结合，而超导电性就是这类电子的集体效应。

当超导金属处于静电平衡时（没有电流），每个“库柏对”由两个动量相反的电子组成。按照量子力学的观点这种结合是可能的，它们犹如两列沿相反方向传播的波，能较长时间交叠在一起，且相互作用。

当超导体中有电流时，每个库柏对具有一定的总动量，这动量的方向与电流方向相反。这种库柏对在通过晶格运动时不受阻力。因为晶格对库柏对中两个电子作用而使它们产生的动量变化是数量相等、方向相反的，所以库柏对的总动量不变，即晶格既不减慢也不加快库柏对的运动，这在宏观上表现为在超导体中电荷流动是没有电阻的。BCS 理论成功地解释了超导现象。

### 4. 约瑟夫森效应

超导电性的量子特征明显地表现在约瑟夫森效应中，所谓约瑟夫森效应是英国剑桥大学研究生约瑟夫森（B. Josephson）于 1962 年首先提出的，指在两块超导体之间存在弱耦合时会发生超导电流的现象，又称超导隧道

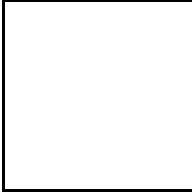


效应。

在两块超导体中间夹一层绝缘的氧化薄膜就形成了一个超导隧道结，约瑟夫森在对此进行理论研究时，预言“约瑟夫森”效应具有下述的主要现象和特征：

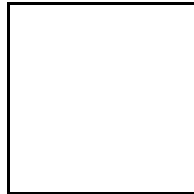
(1) 在超导结中应有超导电流通过，即使当氧化层两面间的电压为零时，仍可能有电流通过。当此电流超过某个临界值  $J_c$  时，就不再是无阻的了，此时结上将出现一定的电压。此现象叫做直流约瑟夫森效应。

(2) 当超导结上有直流电压  $V$  时，在结中还会产生一个交变电流，



子电量， $h$  为普朗克常数。此现象为交流约瑟夫森效应。

(3) 如果用频率为  $\nu$  的电磁波去照射超导体结，改变通过结的电流时，结上的电压会出现台阶式的变化，跳变电压值  $V_n$  和频率  $\nu$  的关系为



(4) 如果把超导结放在外磁场中，则其临界电流  $J_c$  的值随着外磁场的增大而发生周期性的变化，即出现类似于单缝衍射中光强的周期性变化的现象。

约瑟夫森效应不能用经典理论解释，只能用量子力学的原理来阐述。按照经典理论，超导结中的绝缘层是禁止电子通过的，因为绝缘层的电势比超导体中的电势低得多，对电子的运动形成一个高的“势垒”，结中电子的能量不足以使它翻越这势垒，所以宏观上不能形成电流。但是按照量子力学原理，即使是能量相当小的电子也可能出现在势垒的另一面，犹如势垒的低部有“隧道”供其穿越一样，所以库柏对能在超导结内形成超导电流。而且按照物质波的概念，电磁波与光波一样，可以相互作用产生一系列独特的干涉效应。

约瑟夫森效应犹如超导科学中的一颗明珠，无数科学家和发明家相继投入该项研究，超导理论得到进一步发展，超导技术的应用也获迅速发展。由于约瑟夫森效应在理论上和应用上都有重大意义，约瑟夫森和他的导师获得了 1973 年度的诺贝尔物理学奖。

#### 5. 超导在科技中的应用

利用超导线圈制成的电磁铁，不产生焦耳热，只需维持低温的能量，因此能耗大大降低了；也不需要庞大的冷却设备，所以可以用来产生强磁场和做得很轻便。目前已应用于高能加速器、受控热核反应和核磁共振波

谱仪等方面。

在电力工业中超导发电机、超导电动机可望获得应用。利用超导材料输送电能、储存电能都极有前途。

利用超导体的抗磁性能可制造磁悬浮列车，经试制投用其最高时速可达 517 千米，而且可能比利用轮子的列车更安全。

利用超导的约瑟夫森效应，可以使基本常数  $e$  和  $h$  的比值之测定达到前所未有的精确度。……

### 【约瑟夫森效应的应用】

约瑟夫森效应的应用是很广泛的，此处只能介绍一下这些应用的基本原理和基本方面。

约瑟夫森效应分为直流约瑟夫森效应和交流约瑟夫森效应两种。直流约瑟夫森效应是指在静磁场作用下的隧道结产生的效应，而交流约瑟夫森效应则是指直流电压和交变电磁场作用于隧道结产生的一些现象。

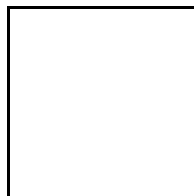
#### 1. 直流约瑟夫森效应测磁场

在约瑟夫森结单独存在（无外电压和外电磁场存在）时，实验表明，此时结中超导电流依然存在。若加一与电流垂直的静磁场  $H$ ，则超导电流随磁场的变化如左图所示。

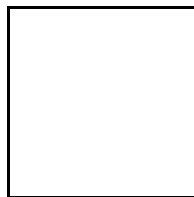
该图非常类似于光学中的衍射图样，而且电流对磁场十分敏感，0.5 高斯的磁场（地磁场的数量级）变化就会引起电流成倍的变化，所以，由测到的电流值来确定磁场可达到很高的精度。因此，利用直流约瑟夫森效应可测量较弱磁场强度，而且其精度很高。用约瑟夫森效应制成的磁强计，灵敏度可达  $10^{-12}$  高斯。现在测量磁场精度最高的方法就是利用与此相仿的超导量子干涉效应达到的。

#### 2. 交流约瑟夫森效应测电压

在隧道结上加一直流电压  $V$ ，若同时还有圆频率为  $\omega_s$  的外加电磁波照射，则结中电流是一系列不同频率的交流电流的叠加，诸交流成分的圆频率为

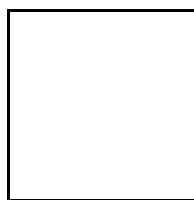


而且当

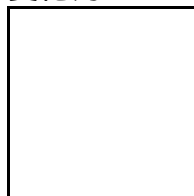


时，超导电流中有直流成分。

显然， $w_s$  已知时，



两次直流成分出现对应的电压变化为



故用此法可精确测定电压的数值，并制成精度很高的测压装置，亦可制成保持和比较电动势的装置。

### 3. 交流约瑟夫森效应作辐射源

超导电流是大量库珀对激发的。这些库珀对构成了一个热力学系统。当交流约瑟夫森效应发生时，电子对是从化学势高的一方运动到化学势低的一方，因此该过程不消耗能量。这样，每一库珀对通过隧道结时，就会多出  $2eV$  的能量，该能量将会变成光子放出，所以隧道结可以作为辐射源，可以用此来产生和检测极短波长的电磁波。

另外，约瑟夫森效应中，场的频率  $w_s$ 、常数  $2e/h$  都是很重要的参数，因此利用约瑟夫森效应可以测量频率和  $2e/h$ 。普适常数  $2e/h$  的最新精确数值就是用该效应测定的，该常数的测定，对量子电动力学带来了有益的影响。

约瑟夫森效应的应用远不止这些，该效应已成为当代电子技术极为注意的课题之一。迄今为止，它已经在国防、医学、科学研究和工业等各方面都得到了应用，在电压标准、磁场探测等方面的发展则更加迅速。现在，在计算机领域，该效应已经被作为逻辑及记忆元件使用。随着人们研究的不断深入，这种应用将会更加成熟和广泛。

#### 【超导应用新技术】

半个多世纪以来，人们已经在了解超导电性的本质、建立超导唯象理论和微观理论方面，做了大量的工作，并取得了巨大的成功。同时也合成了包括元素、合金、化合物等几千种超导体材料。特别是 60 年代初，第 II 类超导体和超导隧道效应的发现，给超导应用技术的发展提供了基础。超导磁体和超导量子干涉器的研制成功，给超导技术的实际应用开辟了广阔的前景。目前，超导电技术已作为当前的新兴尖端技术之一，并成为一些新兴学科和新技术、高技术发展的基础。超导电技术的应用可分为强电应用和弱电应用两大类。

超导强电应用的基础在于超导体的零电阻特征和像第 II 类超导体那样可以负载很高的临界电流的能力。超导磁体已成为超导技术最广泛、最

有成就的应用。它的显著优点是在大的空间范围内可以产生和保持高强磁场，而不需要很大的励磁功率。如一个  $10^5$  高斯的超导磁体可以用一个汽车蓄电池来供电，而且一旦充电完毕，可以利用持续电流装置，去掉外部电源，只要不破坏超导态，就能永远保持高强磁场。另外，超导磁体不需要像常规磁体那样的庞大的供水和冷却系统。它具有质量小、体积小，稳定性好，均匀度高，高梯度，以及容易启动、能长期运转等特点，完全能够取代常规磁体。

超导磁体的应用范围极广，在固体物理研究、绝热去磁、高能物理、粒子加速器、气泡室、受控核聚变装置、发电机、电动机、变压器、磁流体发电、电磁推动装置、超导磁悬浮高速列车、磁力选矿、污水处理以及人体核磁共振成像装置等许多方面都有着广泛的应用。

### 超导量子干涉器件

以约瑟夫森效应为基础，以建立极灵敏的电子测量系统为目标的超导结电子学，作为“低温电子学”的主体，与超导磁体并列，已成为超导电性的另一类实际应用——超导弱电应用，并已显示了巨大的优越性。利用超导双结中存在的量子干涉效应作为传感器件的，称之为直流超导量子干涉器（DC-SQUID），如下图（a）所示。利用含有一个超导结的超导环，与一振荡器耦合，作为传感器件的，称为射频量子干涉器（AC-SQUID），如下图（b）所示。利用超导量子干涉器件做的探测器的分辨本领极高，见表 1，因此它们已被广泛地用于现代科学仪器中。作为磁强计已应用于分数电荷、引力波和磁单极子的探测，低温下的磁化率的测定，生物样品的磁化率的测定，岩石磁力的测定以及空中探矿、预报地震等方面。作为梯度计已应用于地磁场的梯度测量。作为伏特计可用来测量液氮温度下的霍耳效应。医院里可用于监视人体脑、肺和心脏的活动功能，作肺磁、脑磁和心磁图。约瑟夫森结还能作超导电子计算机元件，具有灵敏度高、噪声低、功耗小和响应速度快等一系列优点。

表 1

物理量	磁场	磁通量	磁场强度	电流	电压	位移	加速度	电磁能
分辨能力	$10^{-11}$ Gs	$10^{-11}$ Gs·cm <sup>2</sup>	$10^{-9}$ Gs·cm <sup>-1</sup>	$10^{-9}$ A	$10^{-15}$ V	$10^{-18}$	$10^{-12}$ g	$10^{-14}$ W

利用超导电性可制成不少超导器件，这些器件可用于各种不同的场合。下面我们介绍几种超导器件。

给超导体施加一个大于临界磁场的磁场时，超导体将从超导态转变为正常态。这两个态的热导率和电导率有很大的差异，因此我们可以利用超导体的这个性质用控制磁场的方法来控制热流和电流，制成磁场控制开关。金属在极低温度下，由正常态转变为超导态时，热容量大幅度下降，约要下降 200 倍。用磁场来控制电流的开关称为冷子管，也叫低温管。上

图所表示的是一种线绕低温管。一条门线 ( $T_a$ ) 上绕一控制线圈 ( $N_b$ )，元件工作于极低温下，两个电阻都处于超导态，控制线圈中通以电流，产生磁场，用来控制门线。当电流大到一定值时，它所产生的磁场就超过临界磁场，使中心门线转化为电阻区，起到开关作用。这种开关一般只能工作于千赫范围或更低频率。常用于致冷系统、电磁体或放大器中。右图表示的是十字膜低温管。这种开关的最大优点在于它的开关速度可达几兆赫。

超导磁体在工作时要用到持续电流电路。下图 (a) 是一个用一个十字膜冷子管和一个导线圈组成的持久电流电路。其等效电路如左图 (b) 所示。冷子管处于超导态时，有电流  $I$  流过电路，电流将按照两支路上自感成反比分配。如支路 1 的自感比支路 2 的自感小很多，那么大部分电流将通过支路 1，此时开启冷子管，使支路 1 变成电阻态，那么电流将流入支路 2，再使支路 1 回到超导态，我们会发现电流将仍在支路 2 中流过，这就是持久电流现象。由于支路 2 中没有电阻，也就没有压降，其上的电流将保持不变，若此时我们切断电流  $I$ ，电路将产生永久性循环电流。切断电流的方法是我们设法注入一个和电流  $I$  大小相等、方向相反的电流  $e$ ，如左图 (c) 所示。电流  $e$  也将按两支路上自感的大小反比分流，即也将主要通过支路 1。上图 (d) 状态和上图 (c) 状态相同，它表示在无外电流的情况下，将持续电流  $0.9I$ 。如使冷子管恢复电阻态，循环电流将减弱，在 X、Y 两端将产生一个电压降。这个电压的极性和循环的贮藏电流的流向有关。因此，持久电流电路除了用于超导磁体，还能用于贮存信息，它可以贮存两个方向的电流，电流的方向可以用控制电流并观察单元上的电压降来确定。这种冷子管制成的开关元件已经用于电子计算机的存贮系统。它的记忆能力大于  $10^7$ ，因此虽然液氮制冷机的成本很高，但同它的存贮量相比，还是十分经济的。

磁场 (小于临界磁场) 不能穿透第 I 类超导体，因此置于磁场中的超导体将受到一个向内的流体静压力。所以能用磁场来支持一个超导体，而这个静磁场是由另一个超导磁体产生的。右图就是用两个电流环支持一个超导球体的磁力线。如果我们设法使球体转动起来，它的阻力极小，可以制成一个漂移很小的超导陀螺仪，也可以制成超导电机。

其原理如下图所示。一个八角形的转子由 3 个超导绕组包围。如启动绕组 A，转子会顺时针转动起来，这个使转子转动起来的力来自绕组 A 产生的磁场分布。相继启动绕组 B、C，转子也能转动起来。由于在造价、重量、尺寸和效率上的优越性，人们对用超导电机代替涡轮发电机产生了极大的兴趣。美国麻省理工学院已研制成功了 5 兆瓦的超导发电机并进行

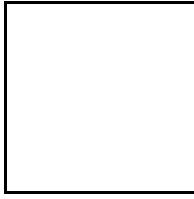
了实验性运转。利用这个原理还能制成超导悬浮列车。其基本结构是：超导磁体安装在火车上，沿轨道放置金属导体板，列车用车轮启动后，由于磁体的运动，金属板上产生的涡流和列车上的磁体相互作用而使列车悬浮起来。据报道，日本国家铁路公司已制成了 4 人乘坐的悬浮列车样机，并进行了悬浮表演，时速超过了 500 千米。

### 【高温超导材料】 - -

超导电性自 1911 年被发现以来，人们一直期望把超导体的这些特性运用到生产实践中去，为社会创造更多的物质财富。利用超导体的完全导电性，可制造无损耗或者损耗极小的高强磁体。但由于超导体的转变温度太低，给实际应用带来很大的局限性。尽管如此，在加速器、核聚变装置、核磁共振和磁分析仪上仍被大量采用，它所产生的经济效益和社会效益是不言而喻的。据报道，美国的费米实验室用了约 1000 个超导磁体，每年花费在液氦上的经费约为 500 万美元，但每年节省的电力开支却高达 18500 万美元。据称美国在 90 年代建成的长达 83 千米的质子对撞机要用 1 万个超导磁体，每年节省的电力开支可达 6 亿美元。超导核磁共振层析仪 (NMR - CT) 可给出人体的任一部位的剖面图，这是现代化医院的必备设备……超导应用的优越性还远不止此，科学家们一直向往着在更大的范围内应用它。

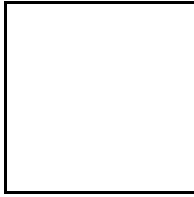
作为实用的超导体材料，主要应用特征是超导临界温度、临界磁场和临界电流。由于第 II 类超导体的发现，就以目前采用的 NbTi 合金和  $Nb_3Sn \cdot V_3Ga$  化合物等超导强磁场材料而言，其临界磁场大约为 10 万 ~ 25 万高斯。在强磁场下临界电流可达  $10^5$  安培/厘米<sup>2</sup> 以上。因此可以认为超导应用上的磁-电障碍已不复存在，而主要障碍在于临界温度。

回顾一下超导电性自发现以来，科学家在提高超导临界温度方面所做的工作。1986 年上半年以前，最好的成绩是 1973 年发现的  $Nb_3Ge$  的临界温度  $T_c$  为 23.2K，见表 1。在长达 62 年的时间内， $T_c$  以平均每年 0.3K 的速率上升，按此速率目前也只能达到 30K。虽这已达到了液氢的温度，但至今所有的实用装置还都在液氦温度下工作。由于要获得液氦的装置和技术比较复杂，氦资源又少，致冷效率低，液氦的成本就很高。这就严重地限制了超导电技术的进一步应用，影响了它与其他常规技术的竞争能力。因此，高临界温度的超导材料的探索一直是具有发展基础科学和技术应用双重意义的重大课题。1973 年以来，科学家们仍以极大的努力想方设法提高超导体的临界温度。但直到 1986 年的 13 年中超导体的临界温度的纪录一直未被打破。同时，理论上提出的所有在于提高超导临界温度的新的超导机理在实验上都没有获得成功。那么，到底是否存在液氮温度，甚至是室温条件下的超导体呢？无论在实验上，还是在理论上都是一个谜。以致使这段时期世界范围内的超导研究处于低潮。



1986 年以来，情况有了根本的改变。首先是 1986 年 1 月，瑞士苏黎士 IBM 研究所的米勒 (K.A.Miiller) 和贝德诺兹 (J.G.Bednorz) 意外地发现了一种镧、钡、铜三元化合物在 30K 时出现了超导性转变，在 13K 时出现零电阻。4 月发表了第一篇论文，但没有引起广泛注意。一直到同年 12 月，日本东京大学、美国休斯顿大学都宣布重复了实验才引起重视。此后，各国科学家纷纷加入这一研究行列。中国科学院物理所也按此组份制备成功，于 1987 年 1 月 17 日宣布：临界温度  $T_c=48.6K$ 。1986 年 12 月 25 日美国贝尔实验室宣布得到转变温度为 40K、临界温度为 36K 的超导体。12 月 31 日，休斯顿大学的华裔教授朱经武在《休斯顿论坛报》上宣布得到  $T_c=52K$  的超导体。1987 年 2 月 16 日，朱经武和另一位华裔科学家吴茂昆宣布得到了转变温度为 98K 的超导体 (钇、钡、铜三元氧化物，经核对  $T_c=92K$ )。1987 年 2 月 24 日中国科学院报道了转变温度在 100K 以上 ( $T_c=78.5K$ )。3 月 4 日，北京大学也宣布得到了  $T_c=91K$  的材料。3 月 3 日，日本金属材料技术研究所宣布得到了转变温度为 123K ( $T_c=93K$ ) 的材料.....在短短的几十天内 (1987 年开始的 75 天)，所取得的成绩就超过了以往 70 多年的成绩。真正的国际“超导竞赛”开始了。高临界温度超导体的研究领域发生了革命性的转变。首先是实现了液氮温度以上的超导体，尤其是某些系统的零电阻温度超过了 90K，有的甚至在室温附近也出现了超导反常现象。其次是发展速度极其迅猛，超导临界温度的纪录一再被打破。1986 年 12 月以来，每天都有新的进展。科学家们改变了以往把研究成果发表在学报上的传统做法，往往通过报纸、电台或电视台等新闻媒介直接发表结果。另外，高温超导材料的发展不但引起了物理学界的注意，而且也引起全社会的注意，形成了一种内行、外行，甚至普通老百姓都密切注视这一研究领域的局面。这是一次超导电性知识的大普及。

面对已经取得的成就，科学家们并不满足，继续寻找更高临界温度的材料。1987 年 5 月 23 日朱经武说他看到  $T_c$  为 225K 的材料。5 月 27 日美国能源转换器件公司 (ECD) 说发现了  $T_c=299K$  的材料，5 月 29 日南斯拉夫萨格勒布大学说发现了  $T_c=283K$  的材料，6 月 4 日美国 ECD 和莫斯科大学分别宣布了  $T_c=280K$  和  $T_c=308K$ 。6 月 19 日美国 ECD 又宣称  $T_c=305K$ 。但在正式刊物上，只有《物理评论快报》上 6 月 15 日的一期发表了  $T_c=155K$  的含氟氧化物.....许多科学家对这些报道都持保留态度。认为这些材料都没有达到超导体应用的条件。7 月在意大利召开的国际高温超导体会议上，把这些材料分为 4 大类，见表 2。



目前，超导微观理论中 BCS 理论是一致公认的，但它对于高温超导机制并不适用。为此，科学家们又提出了一大堆企图解释高温超导机制的理论模型，但都不能自圆其说。对于这个问题，目前还是一个谜。现在一般的看法是：BCS 理论在  $T_c$  越低越符合， $T_c$  越高偏差越大；另一方面，人们普遍认为  $T_c$  没有上限。

### 【超流动性】

1911 年，昂尼斯 (H.K. Onnes) 成功地液化了氦气后，发现了超导电现象。以后在极低温度下陆续发现了一些有趣的现象，吸引了许多科学家的注意，前苏联科学家卡皮查 (P. Y. Ka-pitza) 是在这方面有卓越功绩的科学家之一。1934 年，他从英国回到前苏联，前苏联政府为他新建了莫斯科物理问题研究所，并从英国购买了他所使用的全部仪器，使他能继续从事他的研究工作。1934 年，他发现液氦在温度从 4K 下降到 2K 时，突然出现一个从未见过的有趣现象。这时液氦能从盖得很严的瓶子里逃逸出来，并从很细的毛细管或狭缝（两块经光学抛光的玻璃压在一起形成的  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  厘米的狭缝）中迅速流过。它的粘滞系数近似于零。卡皮查把这种现象叫做超流动性，把处于这种状态的液氦称作氦 II。普通的液氦叫氦 I。英国物理学家艾伦 (J.P. Allen) 和迈斯纳 (A.D. Misener) 几乎同时也发现了这一现象。他们的论文和卡皮查的结果发表在同一期的英国《自然》杂志上。为了表彰卡皮查在超流动性研究中的卓越功绩，人们把 1978 年的诺贝尔物理奖授予了他。

氦 I 和氦 II 两相的转变温度称为  $\lambda$  点。用抽真空的方法降低液氦的蒸汽压来降低温度，当温度下降到 2.17K 时，液氦发生相变，氦 I 相转变为氦 II 相。在相变点，比热有一个尖峰，比热曲线形状像希腊字母“ $\lambda$ ”，由此而得名  $\lambda$  转变或  $\lambda$  相变。相交点叫  $\lambda$  点。 $\lambda$  点以上为氦 I 相， $\lambda$  点以下为氦 II 相。以后我们发现这就是  $^4\text{He}$ （氦的一种同位素）的超流相。在  $\lambda$  相变时，既没有相变潜热（物质在相变时吸收或放出的热量，如汽化热、熔解热等），也没有体积突变（液体在汽化时体积会突然变大）。但熵和体积的一阶微商——比热和膨胀系数有突变。这就是所谓的热力学二级相变。也就是说在 2.17K 时系统出现了新的有序。下图为  $^4\text{He}$  的相图。图中  $\lambda$  线上的相变就是  $\lambda$  相变。由图可以看到，随着压力的增大，发生  $\lambda$  相变的温度下降。

自超流动性发现以来，许多科学家都加入了这一研究行列，并取得了很大的进展，其中前苏联科学家朗道 (L.D. Landau) 的贡献最大。他和卡



皮查 1937 年就开始研究超导电性。朗道把量子理论运用到液氦的超流动性上，1941 年提出“二流体模型”，认为液氦中存在着既相互独立又相互渗透的两种流体——正常流体和超流体。正常流体的熵和粘滞系数均不为零，可以携带热量，其密度为  $\rho_n$ 。超流体的熵和粘滞系数均为零，其密度为  $\rho_s$ 。超流体处于基态，正常流体处于激发态。液体的总密度在  $\rho_n$  和  $\rho_s$  之间。随着温度的升高， $\rho_n$  增大，而  $\rho_s$  减小，在液体处于正常流体时，超流动性消失。在  $T=0K$  时，液体全部处于基态，此时  $\rho_n=0$ 。右图就是  $\rho_n$  和  $\rho_s$  随温度变化的关系图。从图中可以看到超流动性消失的点就是  $T=0K$  点。

### He 相图

科学家们在研究中发现，当超流动的速度达到某一值时，超流动性就被破坏了。这个破坏超流动性的极限速度就是临界速度。我们可以这样来理解： $^4\text{He}$  在毛细管中流动时，如果管壁没有摩擦，那么流体将以恒定的速率流动，流体中不存在因流动而产生的元激发（具有确定能量和相应动量或准动量的基本激发单元）。而在有摩擦的情况下，流体的速率将减慢。这种变慢（激发）可以用流体中出现新的元激发来描述。经计算可得到这样的结论：只有当流动速度  $v < (\varepsilon/p)_{\text{极小}}$  时，才有可能出现新的元激发。根据定义  $v=d\varepsilon/dp$ ，上述条件 ( $v < (\varepsilon/p)_{\text{极小}}$ ) 可等价于在  $^4\text{He}$  的元激发谱（上图）中过原点作  $\varepsilon(p)$  曲线的切线。它决定了  $(\varepsilon/p)_{\text{极小}}$  的值，它近似等于  $v_c = \varepsilon_0/p_0$ ， $\varepsilon_0$  为能隙， $p_0$  是元激发谱中极小值所对应的动量 ( $p$ ) 值。因此只要  $v < v_c$ ，当  $v < (\varepsilon/p)_{\text{极小}} = \varepsilon_0/p_0$ ，流体就不会出现新的元激发，速度就不会改变，呈现出超流动性。流速的这个临界值—— $v_c = \varepsilon_0/p_0$  就称为临界速度。

将一个烧杯放入液氦中，盛满液氦，然后将它慢慢提起逐渐超出液面，我们会发现，杯中的液面也会随着杯子的提起而慢慢下降，当烧杯离开液面时，杯底不会留有液氦。产生这种现象的原因是只要温度足够低，在和液氦接触的任一表面都会有一层只有几十个分子厚度的液氦薄膜覆盖着，而且薄膜能以一定的速度 ( $T=1K$  时，约为每秒 20 厘米) 沿着表面迅速蔓延。这就是所谓的“行膜效应”。我们知道，在正常流体中，由于液体和器壁分子间的范德瓦耳斯力的作用，在表面只能形成厚度随高度迅速减小的膜。而且由于杯壁和液体之间存在的温差，这层膜会慢慢蒸发或回到杯中，不可能有行膜效应。但对于氦超流体，由于它有很大的热导率（比正常氦高  $10^6$  倍），不会在杯壁和流体之间形成温差。同时氦的粘滞系数近似于零，因此它可以沿杯壁而到达顶部越过杯口。由于行膜效应，在利用氦作低温实验时会增加不必要的附加蒸发，减压和降温就更加困难。

氦还有一个奇特的效应叫做“喷泉效应”。一根充填满金刚砂细粉的 U 型管，形成了一个只能让超流部分通过的通道。如右图所示，如果用

光照的方法加热细管下部的多孔塞部分（金刚砂细粉），该部分的温度将上升， $\rho_s$ 下降，与U型管的另一端形成超流部分的浓度差，超流部分将通过多孔塞部分流向温度高的地方来补偿这个浓度差，该部分压力增加，氦便从细管中喷出，犹如一股喷泉，高度可达30厘米。喷泉效应是1938年发现的。第二年又发现了它的逆效应——机械热效应。由于氦的超流部分的熵为零，一根充填了金刚砂细粉的管子可以看成是一个“熵过滤器”，因此流出的流体温度较低。这样，经喷泉效应后，留在容器中的液体的温度略有上升。以上所讲的超流动性都是液 $^4\text{He}$ 超流相中发现的。氦有两种同位素，一种原子量为4，这是最常见的。另一种原子量为3。它们分别叫氦4和氦3，用 $^4\text{He}$ 和 $^3\text{He}$ 表示。虽然它们都可以被液化，但它们的性质却很不相同。从统计物理角度讲， $^4\text{He}$ 服从玻色分布， $^3\text{He}$ 服从费米分布。朗道1956年~1958年建立的费米液体的理论，能成功地解释液 $^3\text{He}$ 的特有性质。 $^3\text{He}$ 的超流相除了上面所讲的 $^4\text{He}$ 超流相所具有的性质外，1972年又有了新的发现。奥舍罗夫（D.D.Oshoroff）等人在冷却 $^3\text{He}$ 的固液混合物时，发现在 $^3\text{He}$ 的熔解线上2.6mK（毫开）和2.0mK（毫开）处分别有一相变点。实验证明这新出现的两个液 $^3\text{He}$ 相都是超流相，它具有不寻常的磁学性质。从上图中可以看到34个大气压以上是 $^3\text{He}$ 固相，34个大气压以下是液相。液相又可以分为正常相和超流A相、超流B相三个区域（在存在磁场时还有 $A_1$ 相），正常相转变为A相或者B相是二级相变。A相转变为B相是一级相变。 $^3\text{He-A}$ 和 $^3\text{He-B}$ 都含有无粘滞性的超流成份。

1956年发现， $^3\text{He}$ 和 $^4\text{He}$ 混合液在极低温下有相分离的现象。右图是 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 混合液的相图。它表示在不同的温度、不同的成份下溶液的状态。图中 $x=n_3/(n_3+n_4)$ ， $n_3$ 和 $n_4$ 分别为 $^3\text{He}$ 和 $^4\text{He}$ 在液体中的摩尔数，因此 $x$ 表示 $^3\text{He}$ 的摩尔浓度。 $x=0$ 时为纯 $^4\text{He}$ 液体，在2.17K时发生相变而转变为超流相。当 $^3\text{He}$ 浓度增加时，发生相变的温度下降。当温度低于三相点Q时（三相点 $T=0.87\text{K}$ ）， $^3\text{He}$ 和 $^4\text{He}$ 混合液相分离。根据含 $^3\text{He}$ 的浓度分，可分为浓相和稀相。由于 $^3\text{He}$ 原子比 $^4\text{He}$ 原子轻，浓相就在上，稀相在下。当温度低于0.5K时，两相界面清晰可见，每一相中 $^3\text{He}$ 的浓度由该温度下相分离线上的相应点给出。稀释致冷机就是根据这个原理研制的。稀释致冷机中相分离总是发生在温度最低的混合室里，一般都低于0.1K。由图中可以看出，此时浓相中几乎都是 $^3\text{He}$ ，稀相中主要是 $^4\text{He}$ 超流相，并溶有少量 $^3\text{He}$ 原子，即使在0K时也有一定数量的 $^3\text{He}$ 原子，此时 $x_0=0.064$ 。这是稀释致冷机要利用的一个重要性质。

## (五) 空间物理

### 【空间物理学】

1957年10月4日，前苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星，从此，开创了人类航天时代的新纪元。三十多年来，伴随着空间活动的频繁发生，逐渐形成了一门独特的综合性学科——空间科学。它主要是利用空间飞行器作为手段来研究发生在宇宙空间的物理、化学和生命等自然现象的一门前沿科学，包括了空间物理学、空间天文学、空间化学、空间地质学、空间材料科学和空间生命科学等分支。

空间物理学主要研究地球空间、日地空间和行星际空间的物理现象，是地球物理学的自然延伸。它的研究对象包括太阳、行星际空间、地球和行星的大气层、电离层、磁层，以及它们之间的相互作用和因果关系。空间物理学又包括下列分支学科：

(1) 高层大气物理学 研究距地面 50 公里到 2000 公里以上的空间区域的物理现象。覆盖整个地球的大气质量约为  $5.3 \times 10^{21}$  克，其 90% 聚集在离地表 15 公里高度以下，99.9% 在距地面 48 公里以内。地球大气的密度、压力、组分和电磁特性都随高度而变化，按不同物理特性可分为对流层、平流层、中层、热层和外层；按组分状况可分为均匀层和非均匀层；按电磁特性可分为中性层、电离层和磁层；按化学成份特征还有臭氧层。地球大气是人类赖以生存的主要环境，与人类的空间活动、军事活动和科学研究有着密切的关系。在发展航天事业的同时，人们不能不注意到航天发射对大气层的破坏，会影响人类健康和全球生态平衡。

(2) 电离层物理学 研究发生在电离层中的电离过程、动力学和光化学等物理过程。地球高层大气中的分子和原子受太阳产生的电磁辐射与粒子辐射的作用，其外层电子会脱离分子和原子的束缚而电离出来，从而使大气中出现大量的自由电子、正离子和负离子，形成从宏观上仍然是中性的等离子体区域，叫电离层，它处在离地表大约 60 公里至几千公里高度的一个确定空间。由于电子密度不同，电离层可分成 D 层、E 层和 F 层。电离层中的带电粒子在外加电磁场的作用下会发生振动，产生二次辐射，同原来的无线电波外加场矢量相加，使电波向下折射而传播。超短波（30~300 兆赫）的散射传播会穿透电离层，可用于地面和空间飞行器之间的跟踪定位、遥测、遥控和通信联络。等离子体技术在空间技术（例如等离子体推进）、氢弹及受控热核反应、磁流体发电等各个方面都有实际应用。

(3) 磁层物理学 我们知道地球是一个磁体，地磁场与一个棒状磁体的磁场（偶极场）相似，地磁轴与地球自转轴的交角为  $11^\circ$ 。地磁场的主要部分约占 99% 的磁场，称为基本磁场，来源于地球内部；另一部分称为短期变化磁场，来源于外部，主要是由太阳风与地磁场之间相互作用和高空电流体系引起。太阳风以 350~700 公里/秒的速度流向太阳系空间，因而把

地磁场压缩在一个空间区域，形成磁层，其边界称磁层顶。磁层顶在向阳面的边界距地心约 10 个地球半径，在背阳面形成磁尾，一直拖延到 100 个地球半径以外的行星际空间。磁层的接近地球部分，在地磁场作用下，随地球一起共转，形成等离子体层。

磁层的存在对人类进行空间活动有很大的影响。磁层中的粒子（主要成份是质子和电子）与物质发生作用时，可以引起电离、原子位移、化学反应和各种核反应。从而容易损伤空间飞行器、人体和材料等。为了确保航天飞行的安全，必须加强对磁层的研究。

（4）行星际空间物理学 行星际空间是太阳系内行星之间的空间，研究行星际物质的分布、密度、温度和磁场等物理性质，是这门学科的主要内容。它阐述太阳风（太阳抛出的高速带电粒子流）和太阳磁场的形成、运动、在行星际空间的分布以及对其他行星际物质的作用，这些对推测太阳系的起源、演化都有重要的作用。

（5）行星大气物理学研究太阳系中行星大气层的组成结构以及物理效应。太阳系中，水星、金星、木星、火星、土星、天王星、海王星周围，都有一定的大气环绕，其分层类似地球大气分层。冥王星有无大气，至今不能断定。

（6）行星磁层物理学由于太阳风与行星磁场的相互作用，行星磁场就被限制在一定的空间区域，形成行星磁层。行星磁层就是行星磁层物理学的研究对象。

（7）宇宙线物理学 来自宇宙空间的各种高能微观粒子——质子（氢原子核）、 $\alpha$  粒子（氦原子核），电子、中微子和高能光子（X 射线和 $\gamma$  射线）称为宇宙线。宇宙线物理学研究的是宇宙线的来源、传播及与星际空间的相互作用，它是我们研究天体演化的一个重要途径。

随着空间技术的发展，借助航天器等新的研究手段和方法，空间物理学的研究必将达到一个新的水平，吸引更多的青少年将来投身于航天事业。

### 【空间技术】

空间科学和空间技术合称空间科技，是一门新兴的综合性尖端科学技术。空间技术是从事空间飞行的综合性技术，指各种航天器的设计、制造、发射和应用方面的技术。它主要包括空间飞行技术，空间系统工程技术，空间控制与导航技术，空间通信跟踪与遥控技术，空间遥感与控制技术，图象与数据处理技术等等。

空间技术是火箭和启动控制两门技术结合的结果。火箭是我国古代的四大发明之一；现代火箭在技术上有了划时代的改进，成了宇宙飞行的运载工具，但其基本原理依然是喷气推进。前苏联火箭专家齐奥尔科夫斯基和美国科学家戈达德为现代火箭奠定了理论基础。德国在第二次世界大战中共发射了 4300 枚 V-2 火箭。50 年代，美国、前苏联两国研究洲际导弹

和地球卫星。70年代以前，空间技术主要是发展火箭、制导系统和其他装置，包括对人造地球卫星、载人飞船、行星际探测器及其系统结构、设备的研制、试验。在这期间，前苏联于1957年10月发射了第一颗人造地球卫星，1961年发射了第一艘载人宇宙飞船“东方号”，1964年又成功地将载有3名宇航员的“上升一号”一举送入空间。美国则分别于1958年和1960年发射了第一颗人造卫星和第一次载人航行，并于1969年由推力达3400吨的“土星五号”运载火箭将“阿波罗号”飞船送上月球，广寒宫已先后留下了六批12人的脚印。

本世纪70年代以来，空间技术的重点主要在两个方面：人造地球卫星的广泛应用和研制长时间在地球轨道上运行的空间站，以及集火箭、飞船、飞机于一体的航天飞机。至今为止，人类已向空间发射了4200多个种类繁多的太空飞行器，共进行140多次载人航天，有240多人进入过太空。前苏联飞行总记录超过17300人·小时，是美国的3.5倍，30年来在账面上的投资总额已超过1890亿美元。太阳系家族的成员金星、火星、木星等的秘密已被初步揭开。1977年夏天，美国发射的“旅行者”号和号宇宙探测器正携带着“地球之音”飞出太阳系，去寻找宇宙生命。

空间技术的发展，使人类的活动进入广阔的宇宙空间，应用型空间技术的日趋成熟，为人类创造了巨大的物质和精神财富。通信卫星作为信息社会传递信息的枢纽，联结世界各地，引起了通信体制的根本改变。现在世界上三分之二的国际电话业务和几乎全部洲际电视转播业务，均由国际通信卫星承担，每年营业额高达20亿美元。运用地球资源卫星，可以把气象观测、资源考察、环境监测和地图绘制等工作自动化，既节约大量人力时间，又可及时得到可靠的丰富资料。通过各类应用卫星进行侦察、预警、通信、导航、广播、考察、预报、测绘等，可以获得巨大的军事价值和经济效益。空间技术的发展，使人类对地球、太阳系及宇宙的观测和探测手段发生了根本改变，拓宽了认识范围，促进了天文学和天体物理、微观物理的进展，同时也使空间生态学、空间生物医学、空间工程学、星际飞行学等一大批新学科应运而生。

经过30多年的发展，航天事业已日益显示出强大的生命力。90年代以空间站为基地，人类开发空间达到了新的高潮。在能源日趋紧张的今天，人们正设想向太空要能源，建立太阳能卫星发电站，由微波送往地球，再转换成电流。人们还设想建立太空工厂，利用宇宙空间的失重，高真空、强辐射、超低温、无菌等优越条件，生产新材料、新药品。人类还将探测和研究月球以及小行星的矿物资源种类和分布，为开发太空原料作准备。太空研究也将从近地空间扩展到远地空间，从内行星扩展到外行星，对太阳系所有行星进行跟踪观察，对宇宙背景及地外文明进行探测，为认识太阳系和宇宙演化、生命起源等理论增添新内容。

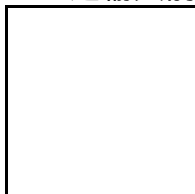
#### 【火箭技术】

火箭是一种靠发动机喷射工质产生的反作用力向前推进的飞行器，是实现卫星上天和航天飞行的运载工具，故又称运载火箭。火箭技术就是要解决火箭的制造和发射等问题。没有火箭技术的发展，就没有空间科学蓬勃发展的今天，火箭技术为人类打开了探索宇宙的大门。

火箭由结构系统、动力系统和控制系统三部分组成，外形像一支削过的铅笔。结构系统即火箭的壳体，头部装置有效载荷（即要运送的对象，如人造卫星、飞船或核弹头等），仪器舱安装控制系统，尾部安装火箭发动机，携挂推进剂贮箱。运载火箭的各部分要求连接成一个结构紧凑、外形理想的整体。动力系统是指火箭发动机和推进剂输送系统。发动机的结构主要包括燃烧室和喷管。推进剂输送系统犹如人的血管，其作用是向发动机燃烧室输送燃料，燃料燃烧后产生的高温、高压燃气以高速度从喷管排出，强大的推力使火箭拔地而起，冲向太空。控制系统包括制导系统、姿态控制系统及电源配电系统。控制系统主要设备有陀螺仪、加速度表和计算机等。通过火箭上的仪器设备进行惯性制导或地面的无线电制导，指令火箭上的控制系统产生控制力和力矩，使运载火箭保持姿态稳定并按预定弹道飞行。

我们知道，卫星或飞船环绕地球轨道运行的第一宇宙速度是 7.9 千米/秒；飞船或星际探测器实现太阳系内的行星际航行的第二宇宙速度是 11.2 千米/秒；要使星际探测器摆脱太阳系的引力去探索宇宙的第三宇宙速度则需 16.6 千米/秒。飞机是依靠机翼上、下两面产生的压力差上升飞行的，其喷气发动机燃烧煤油，利用空气中的氧气为氧化剂，所以飞机离不开大气，而且飞机发动机的推力也不足以把飞行器加速到摆脱地球引力所需的第一宇宙速度。这就必须依靠火箭了。火箭发动机所消耗的燃烧剂和氧化剂（两者统称推进剂）都是由火箭自身携带的，因此火箭可以在真空中飞行。火箭推进剂燃烧时，从尾部喷出的气体具有很大的动量，根据动量守恒定律，火箭就获得数值相等、方向相反的动量，因而发生连续的反冲现象。随着推进剂的消耗，火箭逐步减轻，加速度增大。当燃料烧尽时，火箭即以获得的速度沿着预定的空间轨道飞行。

运输火箭的航程主要取决于飞行的最大速度和弹道倾角。根据俄国学



量， $M_2$  是推进剂耗完脱落以后火箭的质量）。这就要求采用高性能的推进剂和研制先进的发动机。但在现有技术条件下，靠提高发动机性能和多装推进剂减轻结构所受重力还很难使单级运载火箭的速度超过 5 千米/秒，也就达不到第一宇宙速度。因此，运载火箭通常为三级以上的多级火箭，其组接形式有各级首尾相接的串联式和下面两级并联、上面一级串联的串并

联混合式。各级火箭发动机可以都用液体推进剂，或都用固体推进剂，或由两者混合组成。各级火箭依次点火并在用完后自动与主体火箭分离，通过一级级加速来提高火箭速度。

火箭可应用在军用和民用两大方面。按不同飞行任务，大致可以分为三类：探空火箭，用于高空大气测量；弹导式导弹，是带战斗部的有控火箭；卫星（飞船）运载器，把卫星或飞船送上轨道。目前世界上最大的运载火箭是美国的“土星五号”，直径10米，高85米，起飞时重量近3000吨，第一级火箭装有五台发动机，推力3000多吨，点火后150秒即可把2000多吨液氧和煤油烧光。第二级装有450吨高能推进剂（液氧和液氢），推力525吨。第三级装有106吨推进剂，推力100吨。“阿波罗”登月飞船就是由它运载并送入轨道的。

目前，虽然现代火箭技术已经发展到很高水平，但是其有效载荷只占运载火箭起飞重量的1~2%，如发射一颗1吨重的卫星，运载火箭必须重50~100吨，运输效率太低。另外，若用目前的化学推进剂，运载火箭实现恒星际载人航行，到达最近的恒星也要几万年，这对载人航行是不可想象的。科学家们正在为研制电子火箭、核火箭甚至光子火箭提出种种设想，并进行探索。

我国在1970年4月24日发射了第一颗人造地球卫星，现在已成为世界上第五个依靠自己力量研制成火箭发射卫星、第三个掌握卫星回收技术、第四个用一枚火箭发射多颗卫星的国家。长征号运载火箭还承担了瑞典、美国等国发射卫星的业务。我国不仅掌握了发展空间科技的基本手段，而且培养造就了一支航天科技队伍，建立了全套卫星发射、测控设施。

#### 【新一代火箭】

人造卫星、宇宙飞船和航天飞机的发射都离不开化学火箭，化学火箭是利用推进剂发生化学反应而得到巨大推力的。但是，如果要使宇宙飞船飞离太阳系到银河系飞行，即使载有大量燃料的大型化学火箭，也不能达到所需要的速度。为此，人类想到其他行星中去旅行，必须研制离子火箭、光子火箭、原子能火箭等新型火箭。目前，上述火箭中，有的已进入研制阶段。

离子火箭，是把铯和汞等金属原子离子化，如果施加高电压和强磁场，气体原子的阳离子和阴离子能以非常高的速度喷射出去，推动火箭飞行。离子火箭的推力远比化学火箭小，但可长时间保持其推力，适用于长时间旅行。目前有人设想利用太阳能和原子能作离子火箭的电源。这样再加上离子化装置，体积显得比较庞大，不适宜地面发射，但可用于空间站发射。

光子火箭，利用光子的粒子，使火箭速度不断加大，以接近30万千米每秒的光速飞行。人类的宇宙活动范围，早晚要扩大到太阳系以外而进入银河系。但是，银河系中离地球最近的恒星是人马座，它距地球4.3光年。据推算，如果人类要到人马座去旅行，用化学火箭路上要花几十年，用

离子火箭也得 6000 年。如用光子火箭以接近光的速度飞行，那么只要 5 年左右就能达到。因此，一旦光子火箭诞生，其意义是很大的。但是，推动这种火箭的热源以及能耐 1 亿度以上超高温的材料能否找到，目前还很难预料。可见要使光子火箭变成现实，还很遥远。

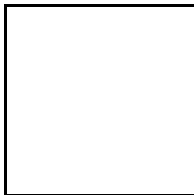
原子能火箭有好几种。其中主要的一种是用原子反应堆加热液态氢，将产生的氢气从火箭尾部喷射出去。这种火箭的缺点是，载人旅行时，为了防护放射线，得用很厚的防护墙，火箭本身很重。不过，原子能火箭能产生巨大的推力，所以用来发射去行星旅行的巨型宇宙飞船还是合算的。目前美国正在进行开发性研究。

除了上述 3 种火箭外，人们还设想多种未来火箭，如等离子体火箭，弧光火箭。游离基火箭和太阳能火箭等。这些还仅仅是设想而已。

### 【航天器】

在宇宙空间按照天体力学规律运行的各类飞行器统称为航天器，又称空间飞行器。世界上第一个航天器是前苏联 1957 年 10 月 4 日发射的人造地球卫星 1 号。第一个载人航天器是前苏联航天员加加林乘坐的“东方”号飞船。第一个把人送到月球上的航天器是美国“阿波罗”11 号飞船。进入太空的第一位女宇航员瓦伦丁娜·V·特列什科娃乘坐的是“东方六号”飞船。第一个在太空行走的前苏联宇航员乘坐的是“上升二号”飞船。第一个空间站是 1971 年 4 月发射的“礼炮号”。第一个兼有运载火箭、飞船和飞机特征的航天器是美国的“哥伦比亚”号航天飞机。第一个行星探测器是 1960 年 3 月射入金星轨道的“先驱者 5 号”。1988 年第一个飞离太阳系的是 1977 年 7 月美国发射的“旅行者”号星际飞船。至今，世界各国已发射了 4200 多个航天器。

航天器一般分为两类：无人航天器和载人航天器。具体分类见下表，它们按用途和飞行方式还可进一步分类。从分类可以看到，行星和行星际探测器是以太阳为焦点之一的椭圆轨道运行的，其他航天器基本上都是环绕地球运行的。



各类航天器是按不同需要分别发射的。但是频繁的发射，将造成地球臭氧层的重大破坏，给人类健康和全球生态平衡带来灾难。近年来，多功能多用途卫星的使用，一箭多星的发射，以及利用航天飞机放置、修理和收回卫星，提高了载荷的利用率。随着航天器设计的标准化和星体结构的积木化（像搭积木那样用一个个独立的小结构组装成大结构，特别是前苏联的空间站），根据不同的需要，换装不同科研或应用方面的有效载荷。为了进一步提高航天器的发射效益，科学家们正在研究利用浮体式石油钻



井平台作为海上移动型运载火箭发射场，这有助于保护陆地环境，确保设施的安全距离，同时可根据具体要求将发射台移到最佳地点，增加发射场地。另外，美国轨道科学公司提出采用 B-52 轰炸机携带叫做“飞马”的运载火箭到空中进行发射，也具有海上发射的优点，而且其发射价格比从地面发射降低三分之二。日本一公司设想在 90 年代末，从地下 2000 米深处，利用压缩空气发射火箭，这能节省能源，提高初速度，增加 35% 的搭载量。人们还可以利用航天飞机携带的接力火箭，把飞船或卫星从太空推向更高的轨道。总之，随着航天技术的发展，航天器的发射将会走向更高的层次。

航天器在宇宙空间运动，是由于天体引力场的作用，它的速度是由发射的运载器提供的，根据不同的任务，可选择和设计不同的轨道。大多数航天器不带飞行动力装置，它一般由专用系统（有效载荷，不同用途的航天器装有不同的专用舱）和保障系统（包括结构系统、电源系统、姿态控制系统、无线电测控系统、生命保障系统、应急救生系统、返回着陆系统等）组成。航天器的诞生和使用，使人类的活动范围从陆地、海洋、大气层扩大到广阔无限的第四环境宇宙空间，引起了人类认识自然和改造自然能力的飞跃，并对社会经济和社会生活产生了重大影响。展望未来，航天器的发展和应用，主要是提高从空间获取信息和传输信息的能力，扩大应用范围；加速在空间环境条件下生产新材料和新产品，探索在空间利用太阳辐射能，建立卫星电站，向地球输送能源。同时，航天器也必将为丰富自然科学知识、探索宇宙起源和地球外文明架起桥梁。

### 【航天飞机】

航天飞机是一种有人驾驶的、可以重复使用的航天飞行器，是往返于地球表面和近地轨道之间运输有效载荷的空间运输工具。它像火箭一样垂直发射，进入绕地球运行的轨道后，成为一艘载人飞船；在完成宇宙空间的各项使命后，又重返大气层，靠惯性滑翔飞行，并在预定的机场跑道上像飞机一样水平着陆。航天飞机兼火箭、飞船和飞机三者之长于一身，是一种新型的空间飞行器。

美国于 1969 年就开始研究航天飞机。1972 年美国副总统尼克松正式宣布开始研制航天飞机，动员了 47 个州的科技单位和工厂，投资约 70 亿美元研制样机。1977 年 8 月 12 日，由改装的波音 747 飞机背负着第一个轨道飞行器“企业号”试验载人滑翔着陆。1981 年 4 月 12 日，第二架航天飞机“哥伦比亚号”首次飞上太空并安全返回地面。此后，美国又研制成“挑战者号”、“发现号”、“亚特兰蒂斯号”、“奋进号”等新型航天飞机，至今已作了 50 多次飞行。虽然 1986 年 1 月“挑战者号”升空才 73 秒钟就因右侧助推火箭断裂，造成机毁人亡的悲剧，给航天飞机蒙上一层阴影，但展望 90 年代和 21 世纪，航天飞机仍将是联结地球和太空之间的桥梁和工具。

美国的航天飞机由轨道飞行器、外挂燃料箱和两个固体火箭助推器组

成。轨道飞行器是航天飞机的主要部件，外形像一架大型三角翼飞机，机长 37 米，翼展宽 24 米，高 17 米，重 68 吨。它的前部是驾驶舱，舱内可容纳 4~7 人（紧急情况下还可再增加 3 人）。具有与地面大致相同的大气环境，在室内工作可以不穿宇宙服。中段是一个货舱，货物是从顶部舱盖吊进去的，可装二三十吨货物。欧洲空间局的太空实验室就曾由此货舱运载上天。货舱内还有两只“机械手”，它在宇航员的电视监视、操纵下，能在轨道上发射卫星或回收卫星。尾部装有 3 台主发动机和 2 台变轨发动机。轨道飞行器完成任务后返回地面进场检修，又可待命再次起飞。外挂燃料箱是个尖头大圆桶，桶内贮存液氧和液氢，液氧和液氢可供轨道飞行器主发动机作推进剂用；起飞后 8 分钟，燃料烧完，它便和轨道器分离，在再进入大气层时烧毁。外挂燃料箱是唯一不可回收的部件。两个固体火箭助推器分挂在轨道器的两翼下面，它是用来帮助轨道器克服地球巨大引力的。它在起飞后两分钟烧完推进剂，并从航天飞机上分离出来，用降落伞溅落海面进行回收，可重复使用 20 次。整个航天飞机就好像一架飞机悬挂在 3 个大圆柱上。起飞时，它同普通运载火箭一样，垂直竖立于发射台上，三台主发动机和两台固体火箭同时点火，两分钟便把航天飞机送上 50 千米高空。抛掉助推器后，轨道飞行器在本身发动机作用下继续升高，直到进入预定的轨道。返回时，它是靠滑翔降落到预定机场的。

航天飞机的特点和优点是：第一，可重复使用 100 次左右，发射费用大约是一次性火箭的十分之一。第二，有很大的运载能力，不但能装载各种飞行器上天，而且能回收、维修卫星，延长卫星的使用寿命，并减少重新研制卫星的巨额费用。第三，可以缩短空间发射的地面准备时间，有利于空间飞行的经常化，并可用来进行空间紧急营救。第四，由于发射和返回阶段的超重较火箭发射减少一半，普通人也可以经受得住它的压力，这就为非职业宇航员进入太空创造了条件。第五，在军事上它可以进行侦察、破坏、捕捉敌方军用卫星，甚至可以把炸弹或核弹扔到敌方目标上。第六，它可以促进空间工业化的实现，试制新材料，进行生物学试验，在空间组建工厂、医院、空间站和实验基地。同时，它还可以把接力火箭带到太空，安装在卫星或宇宙飞船上，把它们推向更高的轨道，去探索宇宙的奥秘。

目前，欧洲航空局和日本都在研制航天飞机。我国的卫星发射和回收技术，也已达到世界先进水平，并已完成了宇航动物实验。专家们预计：近期就可以完成空间载人宇宙飞船的航行，1995 年可以完成小型航天飞机的实验，90 年代末可望建立小型空间站。

### 【空间站】

空间站是能载人进行长期宇宙飞行的航天器，又称航天站或轨道站。1961 年 4 月 12 日，前苏联宇航员加加林乘坐“东方一号”卫星式飞船环绕地球飞行一周安全返回地面，揭开了载人太空飞行的序幕，宇宙飞船技术迅速发展。前苏联相继发射了东方号系列飞船、上升号、联盟号；美国

也发射了“水星”号、“双子星座”号飞船。据统计，从1969年7月到1972年12月，先后有6批共12名宇航员乘坐“阿波罗”飞船登上月球，耗资250亿美元。由于宇宙飞船体积较小，人在飞船上的行动不便，在太空停留的时间又不长，不能携带太多的科学仪器设备进行科研活动，而且一个接一个的发射也耗费了巨额资金和大量的人力、物力。这就迫使人们考虑建造体积更大、活动更自由的飞船，以便装上更多的生活用品和仪器设备，送上轨道长期运行，就像一个搬到空间去的实验室。人们称它为空间站，它是宇宙飞船发展的必然结果。

空间站一般重达数十吨，可居住空间数百立方米。它基本上由几段直径不同的圆筒串联组成，分为对接舱、气闸舱、轨道舱、生活舱、服务舱和太阳能电池翼等几个部分。对接舱一般有数个对接口，可同时停靠多艘载人飞船或其他航天器，是空间站的停靠码头。气闸舱是宇航员在航道上出入空间站的通道。轨道舱是宇航员进行科研和工作的场所，装有各种必需的仪器设备。生活舱是宇航员吃饭、休息和娱乐的地方。服务舱主要用来承装动力和能源系统。太阳能电池翼通常装在空间站本体的外侧，为空间站上各个仪器设备提供电源。在空间站里，可以探测天体，研究天文；观察地球，勘测资源；加工新材料，试制新药品；为人们在空间长期居住、开展航天活动、开发太空资源提供场所。目前已发射的空间站有美国的天空实验室，欧洲空间局的空间实验室和前苏联的礼炮号、和平号空间站四个。

美国在1973年5月14日由“土星五号”火箭发射了“天空实验室”空间站，该空间站重82吨，总长36米，直径6.7米，工作容积350立方米。有3批（每批3位）共9位宇航员在实验室分别工作了28天、59天和84天。他们进行空间药品、人体生理、材料物理等一系列的实验；拍摄了大量太阳照片和地面照片。“天空实验室”共运行了6年多，航程14亿多千米，于1979年7月坠入稠密大气层焚毁。

1973年，由法国、英国、前联邦德国、比利时、丹麦奥地利等14个欧洲国家组成的空间局开始制订空间实验室计划。10年后，耗资17亿美元的“空间实验室一号”，由美国“哥伦比亚号”航天飞机运载，在1983年11月28日至12月8日成功地进行了首航。该“空间实验室”的设计使用寿命10年，可重复利用100次。密封舱内的大气和地面上的大气一样（1个大气压，相对湿度70%），宇航员可以不穿航天服而在其中生活和工作。参加这次飞行的4名乘员中，包括1名前联邦德国的物理学家——U.梅鲍尔德。在10天的飞行中，科学家共进行了宇宙医学、生物学、天文学、太阳物理、等离子物理、大气物理、地球观测、空间加工等70余项实验，取得了丰富的资料。

在空间站这个领域，前苏联一直保持着领先地位。从1971年4月19日至今，已发射了7个“礼炮号”空间站，目前正在太空工作的“和平号”属第三代空间站。前苏联的第一代“礼炮号”规模较简陋，居住空间只有

100 立方米，且只有一个对接舱，宇航员由“联盟号”飞船来回接送。1977 年 9 月发射的第二代空间站“礼炮 6 号”，增加了一个轴向对接口。1984 年 4 月发射的“礼炮 7 号”，重新设计了对接接合器，与“联盟号”载人飞船和“进步号”供应飞船进行了 52 次对接，空间停留时间最短 75 天，最长达 237 天。在“礼炮 6 号”、“礼炮 7 号”服役期间，轨道上 45% 的时间内有人。1986 年 2 月前苏联发射了崭新的空间站“和平号”。它全长约 13 米，与“礼炮号”相同，重约 21 吨，最大直径 4.2 米，有 6 个对接口可同时使用，太阳能电池帆板 80 平方米（是礼炮号的 1.8 倍），站内工作条件和生活条件有了很大的改善。1987 年 4 月 23 日，“和平号”空间站、“量子号”天体物理实验舱、“联盟 TM-2 号”飞船与“进步 29 号”货船 4 个航天器在空间第一次实现对接，这一航天史上的壮举为永久性空间站的建立进行了有益的尝试。“联盟 TM-15 号”还分别与“和平号”、“礼炮 7 号”联接，首次实现了两个太空站之间的联系。穆萨·马纳罗夫创下了在空间站连续工作 1 年的纪录，并累计在空间停留时间达 515 天。

美国普林斯顿大学物理教授杰·奥尼尔设想 90 年代末在太空建造一个有山、有湖、有公园，但没有污染和疾病的大型空间站“一号岛”，并实现向太空移民，在站中生产药品、晶体和精密机械零件，逐步发展太空农业，向月球采矿。展望 90 年代的空间技术，空间站必定成为开发太空的基地。

## (六) 声学 and 声技术

### 【超声及超声效应】

频率高于人类听觉上限频率 20000 赫兹的声波，称为超声波。研究超声波的科学称超声学。超声学是声学的一个重要分支。它主要研究超声的产生、接收和在媒质中传播的规律，超声的各种效应，以及超声在基础研究和国民经济各部门的应用等。目前一般认为，人耳听觉频率极限为超声频率的起点，但它的最高极限，至今还没有明确限定。随着科学技术的不断发展，近年来已能在实验室内产生频率高达  $10^{12}$  赫兹数量级的超声。对频率如此宽广的超声，由于理论上、技术上、应用上的不同特性，目前已有再加以划分的趋势。例如，已有人建议把 500 兆赫或 100 兆赫以上的超声称为微波超声，把  $10^{12}$  赫兹以上的超声称为特超声。

人们最早制成机械型超声发生器（又称换能器）来研究超声的产生和接收，由于这种换能器成本低，经不断改进，至今仍广泛用于对流体媒质超声处理技术中。20 世纪初，电子学的发展使人们能利用某些材料的压电效应和磁致伸缩效应，制成各种机电换能器（包括发生器和接收器）。最近几年，为了物质结构等基础研究的需要，超声波的产生和接收需向更高频率（ $10^{12}$  赫兹以上）发展。例如，在媒质端面直接蒸发，或溅射上压电薄膜（ZnO, CdS 等），或磁致伸缩的铁磁性薄膜，就可获得数百兆赫直至几万兆赫超声。此外，用热脉冲、半导体雪崩、超导结、光子与声子的相互作用等方法能产生或接收更高频率的超声。但应用大功率远红外激光器，通过压电表面激发是产生频率在  $10^{12}$  赫兹以上超声的最有效的方法。

超声波可在媒质中反射、折射、衍射、散射等。超声在固体中传播时，固体媒质本身形状和性质的多样性，导致超声在固体中传播的复杂性。在无限大、各向同性的均匀固体媒质中传播时，一般只有纵波和横波。在无限大、各向异性的固体媒质中传播，一般沿每个方向上可以有 3 种波，即准纵波和另两个准横波。超声在一般气体、液体中的传播理论已较成熟，但对在高速流动的流体媒质中的传播，在液晶以及大振幅声波在流体中传播的非线性问题等的研究仍在发展中。当超声波在媒质内传播时，超声能量转换成其他形式的能量，这必促使媒质发生一系列的物理变化和化学变化，这些变化效应称为超声效应。具体指超声机械效应，超声光效应，超声电效应，超声热效应，超声化学效应和超声生物效应等。例如，超声波在媒质中传播时，媒质便产生应力、应变、速度或承受辐射压力等，从而产生超声机械效应。超声加工、粉碎、凝聚等都属于超声机械效应。当超声在媒质中传播时，空化或其他原因而引起发光现象的效应称为超声光效应。所谓空化，是当液体中有强度超过该液体的空化阈的超声传播时，液体内会产生大量气泡，小气泡随着超声振动而逐渐生长和增大，然后又突然破灭和分裂，分裂后的气泡又连续生长和破灭。当超声在媒质中传播时，

空化产生脉冲高压，空泡表面便出现电荷并引起放电，从而产生超声电效应。当超声在媒质中传播时，由于弛豫、内摩擦等原因，声能就被媒质吸收而转变为热能，媒质便发热或由此而引起其他现象的效应，这就是超声热效应。超声治疗作用，超声焊接，超声化学作用等都属于超声热效应。当超声在媒质中传播时，媒质产生强烈的分子碰撞而导致分子电离以及其他化学变化的现象称为超声化学效应。当超声在生物体内传播时，生物有机体的生理现象产生某种变化或促进这类变化的作用（例如，植物种子经超声处理后，可加速种子发芽和提高其发芽率与出苗率，医学上超声治疗作用等）称为超声生物效应。

超声学是一门应用学科和边缘学科，但又是一门年轻的学科，许多超声应用的机理还未彻底了解，实践还在不断地向超声学提出各种新课题。

### 【声成像】

利用声波可获得物体内部结构特点的可见图象。利用声学、电子学和信息处理等技术以达到声成像的目的。声波可以透过很多不透光的物体，利用声波可以获得这些物体内部结构的声学特性的信息，而声成像技术则将其变换成人眼可见的图象，即可以获得不透光物体内部声学特性分布的图象。物体的声学特性分布可能与光学特性分布不尽相同，因而同一物体的声像可能与其相应的光学象有差别。声成像方法可分为常规声成像、扫描声成像和声全息 3 种。

常规声成像是从光学透镜成像方法引伸而来。用声源均匀照射物体，物体的散射声信号或透射声信号，经声透镜聚焦在像平面上形成物体的声像，它实质上是与物体声学特性相应的声强分布。用适当的暂时性或永久性记录介质，将此声强分布转成光学分布，或先转换成电信号分布，再转换成荧光屏上的亮度分布。由此获得人眼能观察到的可见图象。

扫描声成像是通过扫描，用声波从不同位置照射物体，随后接收含有物体信息的声信号。经过相应的处理，获得物体声像，并在荧光屏上显示成可见图象。本世纪 70 年代以来，扫描声成像方法发展迅速。声束扫描经历了手动扫描，机械扫描，电子扫描或电子扫描与机械扫描相结合的几个阶段。声束聚焦也由透镜聚焦发展到电子聚焦、计算机合成。获得图象的方式和图象所含的内容也各不相同。扫描声成像有 7 种类型：B 型声像。平行于声束传播方向的物体断层的声象。C 型声像。垂直于声束传播方向的物体断层的声象。F 型声像。物体任意断层的声象。多普勒成像。利用运动物体散射声波的多普勒效应，按散射声信号的多普勒频移的幅度来显示图象，图象与散射体的运动速度分布相对应。计算机超声断层成像。由计算机 X 射线断层成像引伸而来，利用此方法可以获得声速、声衰减系数和声散射系数等声学参量的定量分布图象。正在研究的计算机超声断层成像法有透射型和反射型两种。合成孔径成像。采用换能器陈列，各单元作为点元发射，发射声束照射整个物体，接收来自物体各点的

信号并加以存储，然后根据各成像点的空间位置，对各换能器元接收信号引入适当时延，以得到被成像物体的逐点聚焦声像。 三维图象显示。利用三维合成孔径成像法可得到三维信息，或将若干个断面图象综合，也可合成三维图象。根据绘透视图的原理进行计算机处理，可在荧光屏上显示三维图象。

声全息是将全息原理引进声学领域后产生的一种新的成像技术和数据处理手段。早期的声全息完全模仿光全息的方法，但新的声全息方法与光全息方法不同，只有液面声全息基本上保留了光全息的做法。扫描声全息可分为两类： 激光重现声全息。用一声源照射物体，物体的散射信号被换能器阵列接收并转换成电信号，再加上模拟从某个方向入射声波的电参考信号，于是在荧光屏上形成全息图并拍照。然后用激光照射全息图，即可重现物体声像。 计算机重现声全息。用上述方法记录换能器阵列各单元接收信号的幅度和相位，用计算机进行空间傅里叶变换，即可重现物体声像。

声成像的研究开始于 20 世纪 20 年代末。随后，相继出现很多种声成像方法，至 70 年代已形成一些较为成熟的方法，并有了大量商品化产品。当前，声成像技术已得到广泛应用，主要用于地质勘探、海洋探测、工业材料非破坏探伤和医学诊断等方面。特别是 B 型断层图象诊断仪已成为与 X 射线断层扫描仪和同位素扫描仪并列的医学三大成像诊断技术之一。

#### 【声全息技术】

为了检测和显示可见光及 X 射线不透明的媒质中的结构，20 世纪 60 年代中期把全息技术引进到声学领域而出现的新科学技术。声全息技术是利用干涉原理来获得被观察物体声场全部信息（振幅分布和相位分布）的声成像技术。一般包括获得声全息图和由声全息图重建物体可见像。要构成声全息图，除了含有待测物体信息的声波——物波外，还要另一束与物波相干的参考波，两者的干涉形成了既有振幅信息又有相位信息的声全息图。在声全息技术中，参考波一般用声波，有时也可用电信号来模拟。若需要保存声全息图，通常把声全息图记录在照片底片上作为光调制器，需要时可随时用激光重建可见像；若不需要保留声全息图，声成像的两个阶段可以设法使其极快完成，这就是所谓实时重建。

声全息的成像方法很多，最常用的是液面声全息和扫描声全息两种。液面声全息是利用液面的变形来形成声全息图，其装置如图 1 所示。频率为兆赫级的信号源同时激励两个声源，透过物体后的物波与参考波在液面上相互干涉，就可在液面上形成声全息图。当激光照射该液面时，声全息图表面就把相位变化加到反射光束上，使光束产生衍射，利用光阑，强度同液面上干涉图样振幅变化成正比的衍射光能通过，经摄像头接收后就可以在荧屏上直接观察到物体的实时重建像了。图 2 是用液面声全息拍摄的重建像。液面声全息的优点是能实时重建物像，可以观察动目标。液面处

的最低声强为  $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{W/cm}^2$  时，才可获得可分辨的图象，因此其灵敏度低，不宜用于较大距离的检测。

图 1 液面声全息装置示意图

图 2 成人拇指的液面声全息重建像

扫描声全息所需要的声强只要  $10^{-11} \text{W/cm}^2$ ，它是一种灵敏的成像方法。采用一个尺寸小于  $1/2$  声波波长点接收器，在物波与参考波重叠声场的全息记录平面上扫描，获得每一点上的相位和振幅信息。如果用这个信号调制一同步扫描的点光源，底片便感光，即能得到一幅声全息图。在扫描声全息中，也可以不用参考声源，点接收器提供的物波信号可以直接与超声波发生器提供的参考电信号互相迭加，然后输入显示器，以显示声全息图，如图 3 所示。这种方法不仅比较简单，而且还有减少声干扰信号的明显优越性。这种单探头的扫描声全息，设备简单，成像时间较长，只能观察静目标。

声全息图重建物像中，除光学法重建外，近年来随着数字计算机的发展，利用电子计算机进行成像处理技术得到发展。这种数字声全息技术，通常用换能器，对声全息图或被物体散射的波阵面的相位和振幅进行扫描，获得数字化超声数据，然后对数字化数据进行滤波或其他数字信号处理，在计算机内重建数字物像，最后再显示声全息物像。由于超声数据的数字化，可以消除图象中的噪声，提高成象质量，而且还能对图象进行平移、图象变换及图象彩色编码等处理工作，减小象液面声全息中菲涅耳环的干扰和在扫描声全息中声波的多次反射、折射所造成的像的畸变。而且，数字相位检测技术允许使用宽带的发射脉冲，显著提高了空间分辨率。

#### 【超声显微镜】

利用超声显示物体微细结构的一种声学成像装置，又称声学显微镜或简称声镜。本世纪 70 年代，声成像技术发展迅速，利用声成像方法来产生高反差、高放大倍数的物体图象一般有：吸收式超声显微镜、激光扫描法超声显微镜、聚焦声束扫描法超声显微镜、布喇格衍射成像法超声显微镜、光导压开关法和辐射压力法超声显微镜。其中以扫描法发展较快。目前，受到广泛重视的是激光扫描超声显微镜和聚焦声束机械扫描超声显微镜。

入射到物体上的声波发生反射、折射、衍射和吸收等，该声波因与物体发生相互作用而含有物体信息，利用声波的某些物理效应把含有新信息的声波显示出来实现声成像。特别是超声波的传播速度较慢，波长极短，超声显微镜的分辨率便相当高。另外，物质中的声速约比光速小 5 个数量级，当声波频率为  $3 \times 10^9$  赫兹时，在水中的波长就达到  $0.5 \mu\text{m}$ ，这时它的分辨本领已和光镜相近，经放大肉眼便可直观。

超声波利用的是材料声学性能，因而传输超声波的媒质种类要比传输



光的媒质多得多。被测物体不需要透光；生物组织切片或样品不需要染色，可以直接观察；大规模集成电路不需要损坏样品表面就可以进行内层观察。这些都比普通光学显微镜或电子显微镜优越。

超声显微镜的主要用途有三个方面：生物学和医学上，可以进行活体观察；微电子学上，利用反射式声镜，可对大规模集成电路不同层次（包括层间细节）进行非破坏性观察；材料科学上，样品表面不必抛光腐蚀，声像能显示出明显的晶粒间界、合金内不同组分的区域。最近，超声显微镜在计量方面得到了新的应用，如测量极薄层状结构的层厚，观察鸡胚胎纤维细胞。超声显微镜的主要缺点是，高频超声波的衰减一般都比较大，灵敏度较低。为了提高超声显微镜的分辨率，美国科学家将声镜放在0.2K液氦环境下，获得 $5 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 的分辨率。英国采用高压气体作声耦合媒质，在30大气压的氦气中，若频率为45兆赫，则能获得 $7 \mu\text{m}$ 的分辨率。另外，日本发展了无透镜技术，直接采用微型球面聚焦换能器。

#### 【光声显微镜】

利用聚焦的激光束对固体样品表面扫描，测量不同位置处产生的光声信号的振幅和相位，从而确定样品的光学性质、热学性质、弹性情况或几何结构，于是便发展成为光声显微镜。利用光声显微镜，可对各种金属、陶瓷、塑料或生物样品等的表面或亚表面的微细结构进行声成像显示，特别可对集成电路等固体器件的亚表面结构进行成像研究，为此，光声显微镜已成为各种固体材料或器件非破坏性检测的有效工具。

光声显微镜装置的方块图见下页：

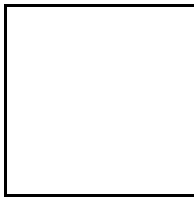
1880年A.G.贝尔首先发现当物质受到周期性强度调制的光照射时会产生声信号，这种现象称为光声效应。这是由于光照射时，物质因吸收光能而受激发，然后通过非辐射消除激发过程，吸收的光能（全部或部分）就转变为热。如果照射的光束经过周期性的强度调制，则在物质内产生周期性的温度变化，这部分物质及其邻近媒质便热胀冷缩产生应力（或压力）周期性变化，于是产生声信号，这种信号称为光声信号。光声信号的频率与光调制频率相同，其强度和相位则决定于物质的光学、热学、弹性和几何的特性。光声信号可以用传声器或压电换能器进行接收，进而发展光声成像技术。

利用光声显微镜检测物质的组分和特性时，检测的是被物质所吸收的光能与物质相互作用之后产生的声能，因此检测非常灵敏。另外，高功率激光源的出现，可利用光声效应作为声信号的激励源，在气体、液体和固体中激发声波，用以研究媒质的声学特性及声与声或声与其他物质的相互作用。因为光声信号的激励源不必与媒质直接接触，所以特别适用于极端条件（如高温、低温、高压或侵蚀性的环境）下的研究工作。同时，由于激励源产生的光声信号源可在媒质中高速运动而不致引起涡流，避免了涡

流产生的附加噪声干扰。

### 【电声换能器】

把声能转换成电能或电能转换成声能的器件。它是 19 世纪中期随电话的问世而出现的。广义的电声换能器应用的频率范围很宽，它包括次声、可听声、超声和水声换能器。但通常电声学中的电声换能器，仅属于可听声频率范围内的电声换能器，如传声器、送话器、扬声器、受话器和耳机等。按照换能方式，到目前为止，比较成熟的可分为电动式、静电式、压电式、电磁式、碳粒式、离子式和调制气流式等。其中后 3 种是不可逆的，碳粒式只能把声能变成电能，离子式和调制气流式只能产生声能。而其他类型换能器则是可逆的，即可用作声接收器，也可用作声发射器。具体分类见下表：



各种电声换能器，尽管其类型、功用或工作状态不同，但它们都包含两个基本组成部分，即电系统和机械振动系统。在换能器内部，电系统和机械振动系统之间通过某些物理效应相联系，以完成能量的转换。例如，电动式接收和发射换能器设计的基本原理是：当导线在声波作用下发生振动，并在磁场中切割磁力线时，在导线中产生电动势；反之，当电流通过磁场中导线时，导线受到垂直于导线和磁场方向的力。又如压电式，它是 1880 年 P. 居里兄弟首先发现的，在某些晶体（如石英、电气石）的特定方向上受压时，就会在其表面产生电荷，撤去压力，电荷也随之消失。这称为正压电效应，它是由于晶体在机械力的作用下发生应变，引起正、负电荷的重心发生不对称的相对位移，从而晶体的总电矩发生改变，晶体表面出现电荷现象。逆压电效应是晶体在电场作用下，内部电畴转动，点阵变形产生应变，这种压电应变与所加电场强度成正比，当外加交变电场时，晶体就产生相同频率的振动。在其外部，换能器的电系统与信号发生器的输出回路，或前级放大器的输入回路要相匹配；换能器的机械振动系统，其振动表面与声场要相匹配。应用于不同媒质中的换能器，为了能使换能器的声阻抗匹配，其结构往往有很大差别。如所用的振动方式不同，对气体常用弯曲振动，对固体常用纵向振动，对液体常用弯曲振动、纵向振动或它们的复合振动。要使阻抗匹配得更好，换能器常带有阻抗转换器，如变幅杆、 $1/4$  匹配层等等。换能器中的电、声阻抗匹配是很重要的。因此，设计电声换能器要同时考虑到力——电——声三个体系。这三个体系是互相牵制的，处理不好往往会顾此失彼。例如，一个有效的磁系统可能非常笨重，变成一种令人不能接受的声障碍物，或者声输入阻抗（或电输出阻抗）的数值，可能根本不能与周围媒质或附属设备阻抗相匹配。这就要求

电声换能器设计时在许多相互矛盾的因素中采取折衷的办法。

### 【噪声】

噪声有两种含义，一种是物理学上指不规则的、间歇的或随机的声振动；另一种指任何难听的、不谐和的声或干扰。有时也指在有用频带内的任何不需要的干扰，这种干扰不仅是由声音的物理性质决定，还与人们的心理状态有关。因此，从声波对人的干扰来说，噪声是不需要的声音，它可以是无规则的，也可以是谐和的。这样人们在不同的环境中根据主观评价和引起的生理损伤来判断噪声。由此可见，噪声的类别可分为有规噪声和无规噪声。各种机械和气流产生的噪声，属有规噪声，这种噪声完全由机械运动和流体特性所确定。交通噪声、多个声源产生的背景噪声或扰动产生的噪声，振幅瞬时值不能由预先给定的函数确定，只遵循某种统计分布规律，这种噪声称为无规噪声。

噪声源可分为机械声源和气流声源。机械声源又可分为稳态振动源和撞击性声源。由机器运转时机件转动或往复运动的力就激发起稳态振动。这种噪声产生的原因有机器运转时平衡调节不好；轴承或相互摩擦部分润滑不足；齿轮啮合或转动系统不良等等。撞击性机械源的发声机理和发声规律，目前掌握得不多。喷气噪声源是由喷口外喷流和大气的混合区中的大量湍流产生的。

噪声是环境的三大公害之一（污水、污气和噪声）。噪声对人产生生理损伤，引起心理影响和干扰语言中枢等。噪声的生理损伤是指长期处在噪声过强的环境中工作，引起听力损失或噪声性耳聋，甚至导致某些疾病。下页表中列出各个 A 声级下不同暴露年限（限于 8 小时工作制）时出现的噪声性耳聋的百分率。射击、爆炸等脉冲性噪声还往往会使人耳鼓膜破裂、中耳链失效（这称为噪声外伤）。对一般强度的脉冲性噪声，开始只引起暂时性听力损失，但长期反复暴露将会造成永久性耳聋（即噪声性耳聋）。噪声不仅危害听力，还可导致心血管等疾病。噪声能引起烦恼、降低工效、分散注意力和影响睡眠等。噪声对语言的干扰，主要表现为降低语言的清晰度。它不仅直接影响到噪声下的语言通信，也是一般人烦恼和抱怨的原因。人耳无法听到次声，但目前研究认为，次声噪声会产生头昏、中耳压感和堵塞感、胸部发闷或胃部不适、呕吐感等。对乘车，乘船或空中飞行时出现的晕车、晕船现象，次声噪声影响很大。

发生噪声性耳聋的百分率

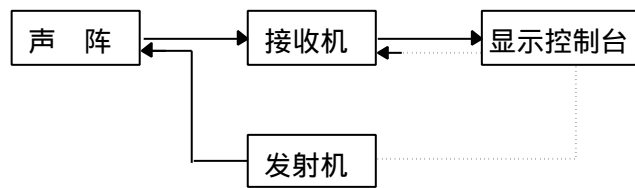
A 声级 ( dB )	暴露年限 ( 年 )						
	0	5	10	15	20	25	30
80	0	0	0	0	0	0	0
85	0	1.0	2.6	4.0	5.0	6.1	6.5
90	0	3.0	6.6	10.0	11.9	13.4	15.6
95	0	5.7	12.3	18.2	21.4	24.1	26.7
100	0	9.0	20.7	30.0	35.9	38.1	40.8
105	0	13.2	31.7	44.0	49.9	54.1	57.8
110	0	19.0	46.2	61.0	68.4	73.1	73.8

噪声是工业化的副产品，随着工农业和国防建设的现代化以及机械化程度的提高，噪声增加了。因此，控制噪声对目前我国能否顺利实现四个现代化也是重要课题之一。如果在工业化过程中不注意噪声控制，其结果必将增加噪声的污染，加重对人类的危害。相反，采取措施控制噪声，它将促进工业化的发展。例如，控制机械系统的噪声，必须改进精度、提高运转的稳定性，这必然会提高产品的质量和性能。对噪声的控制可以从以下 3 个环节入手，即噪声源、噪声的传输路径和噪声的污染区。其中以控制噪声源为最理想。控制噪声源的噪声，不同的噪声源有不同的方法，例如要降低喷气声源的噪声，目前主要采取降低喷注流速；改变喷口形状，假如把喷气口作成梅花瓣形状（实验证明噪声可降低 6~8dB）；在保持喷口总面积不变，代之以大量小孔喷注，据此设计的小孔喷注消声器，其噪声可降低 30dB。控制传输路径上的噪声，可采用隔声、吸声及消声等原理进行控制。例如，入射到材料表面上的声能可以转为热而耗散掉，从而可以吸声，减少噪声。目前有几种新型的吸声材料，即微孔板吸声结构，多孔水泥复合吸声砖，无规分布共振吸声板。如果噪声已传入到人耳附近，就要用护听器加以保护，护听器分耳塞和耳罩两大类。

#### 【声纳技术】

声波是目前已知的唯一能在海水中远程传播的波，声纳就是利用声波对水下物体进行探测和定位识别的方法及所用设备的总称。它基本上可以分为被动声纳（无源声纳）和主动声纳（有源声纳）两大类。主动声纳由发射机、声阵、接收机（包括信号处理器）、显示控制台几个部分组成（见主动声纳结构方框图）。它是向水中发射声波，通过接收水下物体反射回波发现目标，并测量其参量。通过发射脉冲和回波到达的时间差来估计目标距离。通过测量接收声阵中两子阵间的相位差得到测定目标方位。被动声纳由接收声阵、接收机（信号处理）和显示控制台三部分组成。它是通过接收目标的辐射噪声探测目标并测定其参量。一般被动声纳只能测定目标方位，其原理和主动声纳相同。被动测距声纳利用三子阵测量波阵面曲

率来测定目标距离。



声阵由换能器件元组成。声纳声阵可分为发射声阵和接收声阵两大类。发射声阵把来自发射机的电能转换为声能向水中发射。声纳发射机产生发射信号波形，经功率放大后驱动发射声阵发射声波，其功率可小到数瓦、大到数兆瓦。现代声纳发射机都采用晶体三极管 D 类放大器构成功率放大单元模块。多个功放模块组成发射机，前置级可根据控制台指令给各功放模块送去不同相位的激励电压，经过功率放大后驱动不同换能器件元来控制发射波束旋转。接收声阵把声信号转换为电信号送到接收机。用多个换能器件元组成声阵的目的是产生一定的方向性，对发射声阵可以集中声能，对接收声阵则可以控制干扰。由于声纳往往工作在很强的干扰中，声纳接收机的任务要把来自声阵的信号进行放大和处理，从干扰中检测信号并测定其参量。现代数字式声纳接收机由预处理器、数字信号处理器和后置数据处理器三部分组成。声纳显示控制器主要有两方面的功能，一是显示探测结果，二是人-机对话。主要显示方式有“距离/方位”、“距离/多普勒”等。最常用的显示格式是 B 型和 PPI 型。

声纳技术目前主要广泛应用于海军各兵种。它可以探测到潜没在水中的潜艇，可以使没在水中的潜艇了解它周围的环境，因此，一艘现代化的潜艇装有声纳 10 多部。此外，声纳技术还被用于探雷、导航、航道测量、制导、引信等各个方面。在民用方面，声纳技术被用于捕鱼、海底地质勘探、水下定位、导航、石油开发等各个方面。

#### 【超声应用】

超声的传播机制和超声对媒质的各种效应是超声应用的物理基础。目前超声有着广泛的应用。现主要介绍超声在医学、工业和科研领域中的应用。

超声在医学上的应用。 超声诊断。从体外向人体内部器官发射一束超声波，然后根据体内器官反射回来的超声波的特征来判断或检查该部分器官的生理或病理状况。超声诊断具有所用声强较小，对人体没有损害，操作简便，结果迅速，受检查者无不适感等特点，所以超声诊断发展迅速和推广较快。目前超声诊断已用于颅脑、眼、颈部、乳腺、胃、肝、胆、脾、肾、心脏、腹部及盆腔肿块、胸腹积液等疾病的诊断与鉴别诊断以及产科等方面。 超声治疗。把较强的超声波发射到人体某一部位，借助超声波对有机体的生物效应或其他物理、化学效应而治愈某些疾病。它所用的工作频率约 1 兆赫左右。有时发射探头做成聚焦型结构，发射的超声波能就集中在所需治疗的较小区域。早期被用于治疗神经痛、神经炎等疾病，

继而扩大应用于骨、关节、肌肉及其他软组织的创伤、劳损与炎症，呼吸系统疾病，消化系统疾病以及疤痕等病理情况。近年还试用治疗眼和脑的疾病。另外，超声外科、超声喷雾、口腔科的超声处理都属于超声治疗。

**超声医学。**由于超声波在医学上应用很广，超声学与医学相结合，或超声技术应用于医学各部门而形成了一门分支科学叫超声医学。它包括超声在基础医学、临床医学、卫生学及其他医学领域中的研究与应用。例如基础医学中包括超声在生物学、生理学、生物化学、生物物理学、微生物学等有关内容中的研究；在临床医学中包括超声诊断、超声治疗、超声外科、超声洁齿、超声钻牙等；在卫生学及其他方面有超声除尘、超声清洗、超声灭菌、超声乳化以及实验生理学、实验外科学、生物制品中的一些超声技术应用等。由于超声医学与保障人类健康紧密相关而特别受到重视并发展迅速，例如，超声成像技术的成就很快被应用到超声医学中。

**超声在工业中的应用。**

**超声检测。**利用超声波束检查材料、物件的缺陷、伤痕，或利用超声波来测量材料、物件的某些物理、化学性质。它的物理基础是各种材料的声学性质不同或材料中有缺陷、伤痕，影响了超声波的传播特性。例如，影响它的传播速度或衰减的数值，以及使其产生反射、折射、衍射等现象。超声检测的应用很广，在工业上常作为无损探伤手段来检查金属、非金属物体中的缺陷、伤痕，或用来测量液位、流速、流量、厚度、粘度、硬度、温度等；在电子工业中可做成各种延迟线和信息处理器件；在国防上用来探测海洋、潜艇等水下目标。超声检测中，可以利用连续超声波，而目前较多的是利用脉冲超声波。根据不同应用目的，可制成专用仪器，例如超声探伤仪、超声诊断仪、超声厚度计、超声声速仪、超声衰减仪等。

**超声加工。**利用超声振动的能量来对硬脆性材料（例如石英、宝石、玻璃、陶瓷、硅、锗、铁氧体等）进行切割、钻孔、研磨等。超声加工时，由超声换能器产生的超声振动先经过变幅杆把振幅加以放大，使连接在变幅杆顶端的工具头能以较强的振幅振动，在工具头与被加工工具之间送入磨蚀液，并使工具头以一定的静压力压在工件上，磨蚀液中的磨料颗粒由于受工具振动的作用而冲向工件，对工件引起微小的击破，从而使该部分工件材料逐渐被除去，加工所得的孔的形状与工具头端面的形状完全一样。超声加工的工作频率一般为数十千赫，功率一般为数瓦到数千瓦。

**超声处理。**利用超声波的能量使物质的一些物理、化学、生物特性或状态发生改变，或使这类改变的速度加快。它属于强声超声应用范围。当超声波消失后，这种已有的改变一般被保持下来不再复原。它的形式很多，例如超声清洗、超声焊接、超声乳化、超声搪锡、超声雾化、超声凝聚、超声金属成型、超声处理种子以及超声促进化学反应等。超声处理过程的物理基础一般与超声空化有关。但每一种处理方式大都又各有其作用机制，不少作用机理目前仍在探索之中。

**超声在科研领域中的应用。**机械运动是最简单、也是最普遍的物质运

动，它和其他形式的物质运动以及物质结构之间的关系非常密切。超声振动本身就是一种机械运动，因此，超声方法是研究物质结构的一个重要途径。从 20 世纪 40 年代起，人们在研究媒质中超声波的声速和声衰减随频率变化的关系时，陆续发现它们与各个分子弛豫过程及微观谐振动之间的关系，从而形成了分子声学的分支学科。目前，超声波的频率已接近点阵热振动频率，利用高频超声的量子化声能——声子，来研究原子间的相互作用、能量传递等问题是十分有意义的。它可以用来研究金属和半导体中声子与电子、声子与超导结、声子与光子的相互作用。当前，超声和电磁辐射、粒子轰击一起被列为研究物质微观结构和微观过程的三大重要手段，与其有关的一门新分支学科——量子声学正在形成。

## （七）计算机技术和其他新技术

### 【人工智能】

研究用机器来模拟人类的智力活动，又称机器智能，是计算机科学的一个分支。人的大脑是人体中最维妙的智能器官，它仅 1.3 千克，体积只有 1400 立方厘米，但存储的信息量竟高达  $10^{12}$  比特，而现代大型计算机只能储存  $10^8$  比特的信息。因此，自从计算机问世以来，人们就力图模拟人的大脑，探索和模拟人的感觉及思维过程的一般规律，借助于电子计算机编制程序，使它执行类似人的智能的任务。从 20 世纪 50 年代到 60 年代初，人工智能研究已取得了相当成果，编写出一些试验性程序，建立了专门语言——表处理语言。60 年代末以来，又出现了不少具有实用价值的系统。

人工智能应包括感知、推理、执行、学习及问题求解等功能。感知：未来计算机应能直接认字、识图，直接听取人的语言。这就要求人工智能应该有视觉、听觉、触觉等功能，以感知周围事物的情况。推理：计算机对所感知的信息进行加工，相当于人的思维。思维的一个重要方面是推理。用计算机做归纳推理和不精确推理是人工智能的重要研究课题。执行：人工智能应能行动，应能用“手”做事、写字、并能说话，这些都是执行机能。学习：人工智能的“学习”包含多种意思，自动积累知识，根据执行情况修改计划，通过人所提供的正、反两方面例子使其形成概念，经过训练识别模式和模拟科学研究的系统等都是“学习”的含义。例如，一个系统可通过分析大量数据发现物理规律，另外一个系统可根据一些简单的数学概念和公理形成复杂的概念并作出数学猜想。问题求解：这是人工智能的核心。一个需要解决的问题一般包括对象、操作和要求三个方面。例如，利用电子计算机与人对弈国际象棋在西方颇为盛行，甚至每年都要举行世界计算机弈棋锦标赛。计算机弈棋，就是把下棋的规则编成程序储存在计算机中，然后与人对弈。每走一着棋都由计算机进行“决策”：“马 c3—d6”、“王 b7—c6”……，你采用西班牙布局，我以西西里防御。每着棋通常有 32 种可能情况，一位好的棋手应当预先考虑几着棋。如果是两着棋，这就意味着存在  $32 \times 32 = 1024$  种可能情况。因此，一台计算机的程序在作出正确的“决策”之前，一般要考虑 10 亿种以上的可能情况。这里国际象棋的棋子摆在棋盘上就是对象。棋子的一种摆法构成对象的一种状态。每走一着棋（即操作）能把对象从一个状态变为另一个状态。逐次执行操作，能使对象从指定的初始状态变为目标状态（即要求）。

人工智能在处理实际问题时较为复杂，具体解决实际问题时可以把问题分为几个子课题，这些子课题在人工智能的其他方面也很重要。表示：问题的表示方法对于问题的求解非常重要。解决某方面的问题需要有关方面的知识，因此知识表示是人工智能的重要课题之一。寻找：寻找满足



要求的一系列操作。对初始状态施行所有可能的操作可以变作一组状态，其中每一个又可以变出一组状态。如果满足要求的操作系列存在，查遍所有可能的操作系列总可以找到这一个系列，但这种盲目的普查法在复杂问题中无疑是大海捞针，这必须要有“窍门”。用“窍门”指导寻找是人工智能的一个基本思想。计划：解决问题可以订一个计划，执行中发现有缺点可以修改。

人工智能在现代科学技术中有着广泛的应用。例如，用计算机进行产品设计和工程设计、自动化管理、翻译、自动情报检索、自动程序设计、教学、医疗诊断、探矿、化学分析、解决数学问题、绘画、作曲、博弈和机器人控制等。人工智能可以提高计算机在应用中的灵巧性，探索新的应用领域，并为计算机软件、硬件的新设计指明方向和提供依据。从目前情况看，人工智能总的还比较低级，功能不够完善。当今世界上功能最多、水平最高的弈棋机是美国的“弈棋挑战者”牌，它能对 300 万个不同的可能情况进行分析，它还会“说话”，对 50 个词汇已经达到运用自如的程度，能说出每一着棋的称呼，如“马 c3—d6”；“吃掉”你的某个棋子时，还会客气地打个招呼。因此，如果你想和他对垒，只须在棋盘上挪动棋子，弈棋机便会很快作出反应，走自己的一着棋。即使这样，目前一台大型计算机的智能还不如一个 3 岁孩童。1980 年 5 月，美国某大学曾张贴一张招贤布告称，哪台计算机若能战胜国标象棋的世界冠军，将奖励给编制程序者 10 万美元。有科学家预言“在 2000 年前，肯定有人会揭榜”。因此，获得越来越高智能水平是电子计算机的发展方向。

### 【机器人】

具有类似某些生物器官功能、用以完成特定操作或移动任务的、应用程序控制的机械电子自动装置。对机器人的定义，欧美和日本的科学家不同。欧美工程师认为机器人应该是由电子计算机控制的通过编排程序具有可以变更的多功能的自动机械。而日本科学家则认为机器人就是任何高级的自动机械，它应包含那种只需一个人操纵的机械手。因此，复杂的机器人除机械手外，还应具有多种人类器官的功能，如触觉、视觉、听觉、行走机构以及用计算机实现的控制和规划系统。

目前，机器人大致可分为六种类型：手控式。一种需要人操纵的自动机械，其作用类似于人手和臂。擅长于自动传递材料，特别适用于铸造锻压厂和机床厂。固定程序控制式。能按设计程序完成规定的重复性动作，但灵活性差，只适用于工厂流程比较固定的大批量生产线。可变程序控制式。动作受计算机控制，可以根据新的要求重新设置，不受原有程序的限制，具有通用性。这种机器人具有十分灵巧、技术高超的“手”。适用于工艺多变的小批量生产线，如用于汽车装配。复演式。可自编程序进行复杂动作的工作，并可根据需要对个别动作进行重复。它是欧美工程师眼中最基本的机器人类型。主要用于电子器体的自动装配，直线和曲

线的电弧焊接等。日本许多高度自动化的汽车制造厂里都可以看到它们对复杂的内外表面作喷涂工作。 数控或计算机数控式。它不是按电钮、而是根据数字化的指令工作。调换计算机卡片便可很方便地改变其程序和动作，因而用途十分广泛。 智能式。这种机器人有感觉，有理解能力，并会作出判断。因此它能自动识别周围环境（如水下识别地貌），并自动作出行动规划（如绕过障碍）。识别环境主要通过视觉、听觉和触觉的敏感元件将信息输入到计算机，经过处理后，提取关键信息，并对它进行识别和理解。视觉是由电视摄像机输入二维图象，先进行预处理，然后抽取特征，据此进行识别。听觉可作为人机联系的手段。在有限范围内，机器人可以接受自然语言。除了声音识别外，还应具有理解自然语言的能力。触觉可识别简单几何物体的形状。力觉和滑觉主要用于调节机械手的抓握力，使之恰好能抓住物体，既不用力过猛，又不致滑落。制定行动规划，也就是要求机器人具有自动求解问题的能力。例如，工作台上有一个工件 A、B 和 C，它们的相对位置是 A 在 B 上，而 B 又在 C 上。向机器人下达的任务是将 C 置于 B 上，自动规划系统根据当前状态和目标状态及各项操作的前提条件，考虑到要在 B 上置物，必须清除 B 的上面，为了抓住 C 又必须清除 C 的上面，因此制定出如下的行动规划：先将 A 放到工作台上；再将 B 放到工作台上，最后将 C 放到 B 上。这类问题可由一套特殊的产生式规则在状态空间中搜索求解。为了得出操作序列，可以从当前状态集出发，进行正向搜索，也可以从目标状态集出发进行逆向搜索，也可根据目标状态和当前状态的差选择合适的操作（手段-目的分析法）等多种求解策略。

机器人可以不知疲倦地整天工作，它比工人增加 30% 的产量，并大大降低废品率，更大的优点是可以代替人在有害或危险性大的环境下工作。例如，核电站的反应堆厂房里有放射性，核电站工作时工作人员不能进入反应堆大厅，如果大厅发生故障需要检修排除时，核电站只能停止工作，等反应堆大厅内放射性剂量降到一定标准后才可进入大厅。美国科学家研制成功一种能够在高温、高压、高放射性场合工作的机器人，用以代替人到核电站工作。1977 年，一架载有氢弹的美国飞机，在飞过西班牙附近海面时，不慎将一枚氢弹掉入海中，引起西方巨大震动，最后还是由美国一个海军研究所的机器人潜入水下 700 米处顺利地把这枚氢弹捞出来。日本是工业发达、高楼林立的国家，因此，要用人工来清扫、检查高层建筑外壁，需要搭脚手架，这样危险性大、成本高。近年来日本研制出一种从地面到墙壁能自动跨越、行走的机器人，它可以根据需要用无线电指令来操作。下图 (a) 是“四条腿行走的机器人”。可以自如地上、下楼梯。下图 (b) 是步行机器人之一。下图 (c) 是能扭转臀部并侧行的“瓦伯特一号”机器人。下图 (d) 是能阅读乐谱并弹奏电子琴的“瓦伯特二号”机器人。

## 【第五代计算机】

把信息采集、存储、处理、通信同人工智能结合在一起的智能计算机系统。它能进行数值计算或处理一般的信息，主要能面向知识处理，具有形式化推理、联想、学习和解释的能力，能够帮助人们进行判断、决策、开拓未知领域和获得新的知识。人-机之间可以直接通过自然语言（声音、文字）或图形图象交换信息。第五代计算机又称新一代计算机。1981年10月，日本首先向世界宣告开始研制第五代计算机，并于1982年4月制订为期10年的“第五代计算机技术开发计划”，总投资为1千亿日元，目前已顺利完成第五代计算机第一阶段规定的任务。

第五代计算机是为适应未来社会信息化的要求而提出的，与前四代计算机有着本质的区别，是计算机发展史上的一次重要变革。当前电子计算机存在的主要不足有：首先，目前的电子计算机虽然已具有一些相当幼稚的“智能”，但它不能进行联想（即根据某一信息，从记忆中取出其他有关信息的功能）、推论（针对所给的信息，利用已记忆的信息对未知问题进行推理得出结论的功能）、学习（将对应新问题的内容，以能够高度灵活地加以运用的方式进行记忆的功能）等人类头脑的最普通的思维活动。其次，目前电子计算机虽然已能在一定程度上配合、辅助人类的脑力劳动，但是，它还不能真正听懂人的说话，读懂人的文章，还需要由专家用电子计算机懂得的特殊的“程序语言”同它进行“对话”。这就大大限制了电子计算机的应用、普及及大众化。再其次，目前的电子计算机虽然能以惊人的信息处理来完成人类无法完成的工作（例如遥控已发射的火箭），但是它仍不能满足某些科技领域的高速、大量的计算任务的要求。例如，在进行超高层建筑的抗震设计时，为解析一种立柱模型受到摇动时的三维振动情况，用目前的超大型电子计算机算上100年也难以完成。又如，原子反应堆事故和核聚变反应的模拟实验、资源探测卫星发回的图象数据的实时解析、飞行器的风洞实验、天气预报、地震预测等要求极高的计算速度和精度，都远远超出目前电子计算机的能力极限。由此可见，当今的电子计算机已不能适应信息社会的需要，必须在崭新的理论和技术基础上创制新一代计算机。

第五代计算机基本结构通常由问题求解与推理、知识库管理和智能化人机接口三个基本子系统组成。问题求解与推理子系统相当于传统计算机中的中央处理器。与该子系统打交道的程序语言称为核心语言，国际上都以逻辑型语言或函数型语言为基础进行这方面的研究，它是构成第五代计算机系统结构和各种超级软件的基础。知识库管理子系统相当于传统计算机主存储器、虚拟存储器和文体系统结合。与该子系统打交道的程序语言称为高级查询语言，用于知识的表达、存储、获取和更新等。这个子系统的通用知识库软件是第五代计算机系统基本软件的核心。通用知识库包含有：日用词法、语法、语言字典和基本字库常识的一般知识库；用于描述系统本身技术规范的系统知识库；以及把某一应用领域。如超大规模集成

电路设计的技术知识集中在一起的应用知识库。智能化人-机接口子系统是使人能通过说话、文字、图形和图象等与计算机对话，用人类习惯的各种可能方式交流信息。这里，自然语言是最高级的用户语言，它使非专业人员操作计算机，并为从中获取所需的知识信息提供可能。

当前第五代计算机的研究领域大体包括人工智能，系统结构，软工程和支援设备，以及对社会的影响等。人工智能的应用将是未来信息处理的主流，因此，第五代计算机的发展，必将与人工智能、知识工程和专家系统等研究紧密相联，并为其发展提供新基础。目前的电子计算机的基本工作原理是先将程序存入存储器中，然后按照程序逐次进行运算。这种计算机是由美国物理学家诺伊曼首先提出理论和设计思想的，因此又称诺伊曼机器。第五代计算机系统结构将突破传统的诺伊曼机器的概念。这方面的研究课题应包括逻辑程序设计机、函数机、相关代数机、抽象数据型支援机、数据流机、关系数据库机、分布式数据库系统、分布式信息通信网络等。第五代计算机的发展必然引起新一代软件工的发展，极大地提高软件的生产率和可靠性。为改善软件和软件系统的设计环境，将研制各种智能化的支援系统，包括智能程序设计系统、知识库设计系统、智能超大规模集成电路辅助设计系统、以及各种智能应用系统和集成专家系统等。在硬件方面，将出现一系列新技术，如先进的微细加工和封装测试技术、砷化镓器件、约瑟夫森器件、光学器件、光纤通信技术以及智能辅助设计系统等。另外，第五代计算机将推动计算机通信技术发展，促进综合业务数字网络的发展和通信业务的多样化，并使多种多样的通信业务集中于统一的系统之中，有力地促进了社会信息化。

### 【计算机的未来】

电子计算机自 1946 年诞生以来，已经历了电子管、晶体管、小规模集成电路和大规模集成电路四代的发展过程，现在电子计算机正朝着第五代计算机方向发展。这些计算机都是用电子器件构成的，科学家预言，除了用电子器件构成计算机外，还可用其他器件来制成计算机，未来将出现光计算机、生物计算机、超导计算机和模糊计算机等。

#### 1. 光计算机

是一种由光信号进行数字运算、逻辑操作、信息存储和处理的新型计算机。20 世纪 70 年代起，光学领域出现了一个叫做集成光学的新的分支学科，这门学科对激光能够进行传输的薄膜作了深入研究，因此，又称薄膜光电子学。它是一门专门研究设计、制造集成光路的科学。光计算机的基本组成部件是集成光路。运用集成光路技术，可以把光开关或光存储等器件集积在一块芯片上，制成单一功能的集成光路；也可以将光源、光波导（用以构成集成光路中的连接元件）、光开关、光存储等器件集积在一块芯片上，以组成一个完整的光系统。要得到一台光计算机，可以选用集成光路进行组装，而光导纤维则能用作光计算机之间的直接通信线。光计

计算机的优点在于 运算速度快。电子计算机的运算速度取决于每个开关、器件改变状态所需的时间。目前使用的开关速度最快的是硅晶体管，其开关时间很难小于 10 亿分之一秒，即电脑的工作速度很难超过每秒 10 亿次。事实上现在世界上巨型电脑运算速度几乎都在每秒 10 亿次以下。激光技术发展告诉人们，如果能制造出用激光来传送信号的光计算机，从理论上计算，光晶体管开关时间在 1 微微秒水平，即这种光开关器件每秒能进行 1 万亿次逻辑运算，与当前运算速度最高的巨型计算机相比要快数百倍。

存储容量大。它的存储容量可达 100 亿亿 ( $10^{18}$ ) 二进制信息位，将是现有电子计算机的几万亿倍。可以同时处理几路信息。这是因为几束光通过光晶体管时能够相互独立，而几路电流输入晶体管时却会混在一起。

不受磁场影响。电子计算机利用电子传输信息，容易受磁场影响，而光计算机是利用光传输信息，不会受磁场影响。正因为光计算机比电子计算机优越，所以世界上许多国家正在努力发展光计算机。据 1983 年英国皇家学会宣布，英、法、前联邦德国、意大利等西欧国家的科学家集中在英国共同研制世界上第一台光计算机。1984 年 6 月美国宣布已经制造了第一台光计算机的设备，不过它只能在接近绝对零度条件下工作。日本对光计算机研究甚为重视，从 1979 年开始推行“光电子技术开发计划”。目前光计算机的研究工作仍处于实验室阶段。美国著名电子学家比尔·沃尔什预言，2000 年以后，光计算机将开始取代电子计算机。

## 2. 生物计算机

利用有机分子作为基本部件制成的计算机。因为有机分子存在于生物体内，所以这种计算机又称“生物计算机”。电子计算机最基本的构件是开关元件，正是这千百万只开关组成的电路显示出各种奇妙功能。电子计算机传送信息的“语言”归根到底只有“0”和“1”两种状态，这两种状态与“开”和“关”相对应。科学家发现，一些半醌类有机化合物存在两种电态，即具备“开”和“关”功能，并进一步发现，蛋白质分子中的氢也有两种电态，一个蛋白质分子就是一个“开”、“关”。因此，从理论上讲，用半醌或蛋白质分子作为元件，就能制造半醌型或蛋白质型的计算机。目前，生物计算机研制工作正沿着两种截然不同的方向进行。第一种是用有机分子取代当代的半导体，研制一种能完成数字计算机逻辑元件和存储元件功能的分子电子器。因此，生物计算机通常也称分子计算机。另一种是模拟活生物体。因为机体的免疫系统内，当大量病菌侵入血液，白血球能识别进入血液的病原菌表面分子结构后，在白细胞内外引起一连串防御性的化学反应。科学家希望类似的反应能在由彼此相互作用的蛋白质和其他复杂分子构成的生物计算机中出现。事实上，生物计算机的运算过程就是蛋白质分子与周围物理化学介质的相互作用过程。计算机的转换开关由酶来充当，程序则在酶合成系统本身和蛋白质的结构中表示出来。由于有机分子构成的生物化学元件的特殊性，生物计算机就具有显著的优

点：体积小、功效高。以分子水平的线路为目标的生物化学元件线度可达几百埃（ $10^{-8}\text{cm}$ ），一平方毫米的面积上可容数亿个电路，比目前的电子计算机提高了几百倍。可靠性高。因为生物本身具有自我修复的机能，所以即使计算机芯片出了故障也能自我修复。耗能少。有机分子构成的生物化学元件是利用化学反应工作的，需要能量少，不存在发热问题。目前，生物计算机正在崛起，本世纪 80 年代初，美国首先燃起了生物计算机的兴趣之火，1983 年 11 月召开了近 40 名不同学科的科学家对制造生物计算机的可能性问题进行讨论。1987 年英国拨款 3000 万英镑用于研制生物计算机。大多数专家认为，即使到本世纪末，生物计算机也未必能研制成功。

### 3. 超导计算机

用超导器件作为元件的计算机。1911 年荷兰物理学家昂尼斯发现水银冷却到 4.2K 时，电流可无阻地流过，这种现象称为超导电现象。具有超导电性质的物质，叫超导体。1962 年正在英国剑桥大学攻读物理博士学位的约瑟夫森发现，在两块厚度只有十分之几微米的铅或其他合金做成的超导体薄膜之间，夹一层厚度只有约 10 埃的绝缘介质层，组成一种类似“三明治”结构，即“超导体——绝缘体——超导体”的结构。当此超导薄膜两边加上电压时，电子便像通过隧道一样毫无阻挡地从绝缘介质穿过，形成很小电流，绝缘介质两端没有电压。这种现象称为超导隧道现象。它揭示了超导体内的电子对穿过绝缘层的“隧道”时所显示出来的一系列电学、磁学、辐射方面的特性，预示了超导材料用于生产实际的可能性，为此，当时年仅 21 岁的约瑟夫森于 1973 年获得了诺贝尔奖，并将超导隧道效应命名为约瑟夫森效应。以约瑟夫森效应为基础制成了超导开关器件和超导存储器这两种计算机中最基本的器件。这两种器件又称约瑟夫森器件。这种器件具有如下特点：开关速度快。目前已达几微微秒，比高速硅集成电路快几百倍。功耗非常小。仅为硅集成电路的几百分之一。有人预测，过去需要 10 千瓦功率的大中型计算机，如用约瑟夫森器件制成的超导计算机，则只需 1 节干电池。功耗小，散发热量少，集成度高。器件结构基本上和现行大规模集成电路相同。因此，超导计算机的性能是目前计算机所无法比拟的。事实上，近十几年来，人们一直为实现超导计算机而努力奋斗，制造了具有独特优点的各种器件。例如，美国于 1976 年曾观察到单一约瑟夫森器件的开关速度为 29 微微秒；1978 年在第 25 届国际固体电路会议上报告称：一种实验性超导开关逻辑电路，开关速度为 42 微微秒；1983 年 11 月日本却获得开关速度为 5.6 微微秒。尽管目前进展很快，但与研制成超导计算机还有相当距离。其主要原因是：各类约瑟夫森器件相连接是个难题；超导计算机要有超低温环境，这就需要附加一整套超低温设备；超导计算机如何与输入、输出等外部设备相接等问题都有待解决。所以，有人把超导计算机称为“梦幻式计算机”，可见制造超导计算机相

当困难。

#### 4. 模糊计算机

是一种专门用以处理模糊信息的计算机。众所周知，迄今为止的电子计算机采用的数学语言都是由“0”和“1”两个数码构成的。这种“0”和“1”两值逻辑体制，对计算机而言具有两大优点：一是信息十分精确，判别一个简单的概念，往往需要进行一大堆数学运算，得出很高的精度。二是硬件容易实现（只需两种状态即可）。但有一个明显的缺点是对自然现象和人类社会中大量的模糊信息较难处理，有的甚至使计算机无能为力。例如人们在谈论某人头秃了，这个“秃”并没有具体数字界限，如果定义少于1000根头发为“秃”，那么在实际生活中很难辨认999根与1000根。另外，像美与丑、明与暗、黑与白、香与臭、胖与瘦、好与坏、高与矮等，虽然是完全相反的含义，但因事物总具有相对性，它们中间没有截然可分的界限，这些没有确切界限的事物及其表达形式被称为模糊概念。它是一种不规则的逻辑，由此构成的信息是含义模糊的信息，即模糊信息。例如要表达一个人老态龙钟，便可用白发苍苍、步履蹒跚、面容憔悴等一些形容词来说明，这便是典型的模糊信息。1956年英国人查德创立了模糊数学。它是专门处理模糊概念、模糊信息等的专业性数学，但又决非是以模糊代替精确，它只是经典数学发展中的一个分支。大千世界变化无穷，大量的模糊事物就不能只用当前计算机中的“1”（是）和“0”（非）这样“一板一眼”两值逻辑来处理，还要用介于“0”和“1”之间的小数这种连续逻辑来解答。人脑能非常敏捷地处理模糊信息，因此，科学家们设想制造模糊计算机，这种计算机除了具有一般计算机的功能外，还像人脑一样具有学习、思考、判别和对话功能，这便是第六代计算机的重要使命。日本于1984年首先提出研制模糊计算机，并以不规则、非逻辑为基本函数的理论为基础，设计、试制成功模糊集成电路，使计算机的体积大幅度下降。但要真正能够研制成尽可能具有人脑功能的模糊计算机，就必需集中大量电子学、心理学、大脑生理学、语言学等专家一起来开发和研制。据推测，这将在公元2000年之后。然而，如果一旦研制成功具有人工智能水平的计算机，必将对人类社会产生极其深刻的影响。

#### 【电视新技术及新进展】

电视是门年轻的学科，但又是综合性较强的学科。今日世界的许多新技术、新成果都可引入电视领域，它便以惊人的速度发展。40年代末期出现黑白电视，50年代中期又兴起彩色电视，各种规格、式样和附加特殊功能（如遥控、多画面、立体图象）的电视机成为人们获取信息知识，享受文化娱乐的最重要媒介。计算机在国民经济各个领域的应用，又使电视技术在制造计算机的显示终端方面大显身手。最近，又出现了数字电视。

数字电视新技术一般是指将模拟电视信号转变为数字信号，并进行处理、记录、存储、传输和接收等技术。传统的电视信号都是模拟信号，它

是把非电的声音、图象信号分别经话筒和摄像机转换成在时间上连续的电信号，其频率随声音大小和图象明暗而变化。而数字电视是将电视信号数字化。通常它包括采样、量化和编码 3 个步骤。采样是将连续信号按一定时间间隔抽取样值，使其变成时间上离散的一系列脉冲信号。量化，又称量化级数，是把被采样的信号在幅度上化成有限个数值，即分成有限个级层。然后用相当于“四舍五入”的方法将每个采样值归入与其相接近的量化级层中。量化层的多少将影响图象的质量，电视机中通常规定分层数为 $2^8=256$  量化级层。编码是把伴音和图象信号分别用二进制数“1”或“0”表示。这样，就把一系列二进制编码的脉冲代替伴音和图象信号。如把伴音大小分为 8 个等级，而每个等级用 3 位二进制数代表，声音最小编码为“000”，随着声音增大，依次为“001”、“010”、“011”、“100”、“101”、“110”，声音最大为“111”。图象信号可分解成许多小点，每个小点作一个亮度单位，称为像素。像素越多，图象越清晰，一般一幅电视图象有几十万个像素。编码时根据像素的明暗程度分 8 个等级，也用 3 位二进制数表示。这样一幅图画就变成了一系列“1”或“0”的数字脉冲。彩色电视除对亮度信号编码外，还需对色差信号编码。数字图象信号的传输，一般采用光纤信道、同轴电缆信道、数字卫星信道等。当前世界各国正在大力进行数据压缩，希望数字电视传输带不超过模拟信号传输带宽。在电视接收方面，接收数字信号的家用全数字接收机正在研究之中，而模拟电视机的数字化却以惊人的速度发展。最初，从遥控调谐器开始引入数字技术，目前的多功能电视机均引入了数字技术，家用电视接收机已与游戏机、录像机、计算机相连，成为多功能家用信息终端。

数字电视技术发展之所以迅速，是因为它具有许多优点。数字信号便于处理，又便于与计算机接口，使许多设备或部件能实现自动化操作。

数字电视信号存储方便，稳定性和可靠性高。数字信号不受非线性失真影响。数字设备不需要调正，便于使用。数字信号易于加密处理，便于军事图象传输通信。它的不足之处或有待发展研究的问题是：数字电视信号占的频带很宽，以致要求交换和传输设备所需的带宽非常宽，这便造成很大困难；另外，对数字电视信号的监视也较复杂。数字电视是一门新兴的电视技术，已引起国际学术界的重视。1982 年，国际无线电咨询委员会（CCIR）通过了有关数字电视技术规范的建议，为数字电视的发展创造了条件。

近几年来，卫星直播电视，给边远地区人们带来福音；目前，人们正在研究各种制式的立体电视、微型手表电视和大屏幕平板电视；除广播电视外，激光、红外、X 光等特种电视也正在加速发展。电视技术新的领域已层出不穷。

根据电视接收者的要求，电视机所占据的空间不能太大，画面要非常清晰，因而平面型电视机和高清晰度电视机是今后电视机发展的重点。平



面型电视机不用显像管，制成轻而薄的电视接收机，可以挂在家中墙壁上，供全家享用。1970年，有的研究人员已采用电子荧光显示的办法完成了这种壁挂电视机的实验。但研究人员反复比较认为，用淀积在很大平面上的许多薄膜晶体管做成陈列，来驱动液晶显示装置，这是制造壁挂电视机的更有效方法。日本三洋公司已实验成功5英寸液晶彩色电视显示装置，估计4×6英寸这种平面型液晶显示设备最近将问世。电视机要达到高清晰度，必须大大增加每帧画面扫描的行数。每帧画面扫描的行数越多，意味着画面的象素越稠密，图象就越清晰。按照我国制式，每帧画面扫描625行，每秒扫描25帧（采用隔行扫描，一帧分两场扫完，每秒扫描50场）。通常用的日本制式则是每帧525行，每秒30帧（60场）。日本广播协会研究实验室经过10年工程设计，5年多工业试制，耗资1亿美元，首先试制成高清晰度电视制式。它每帧1125行，每秒扫描60帧。用这种制式制成的10英尺大屏幕投影电视，其清晰度与35毫米的电影胶片相同。目前，世界各国都十分重视高清晰度电视。法国于1985年就建议在世界范围内用10年时间从现行制式有秩序地过渡到高清晰度电视制式。欧洲19国联合组织宣布一项为期4年、投资1.86亿美元的高清晰度电视研制计划，作为尤里卡计划的一部分。

#### 【新材料】

新材料是指那些新近发展或正在发展的、具有优异性能的材料。材料是工业的基础，是技术进步的关键，现代新兴技术的兴起是以新材料为支柱的，有的甚至以新材料的出现为先导。没有新材料，便没有电子计算机技术，没有当前迅速发展的光通信技术，没有今天的太空技术。因此，有些专家指出，现代化工业的骨头是材料，血液是能源。日本则把能源、材料和信息誉为现代文明的三大支柱。材料种类繁多，据测算目前世界上已有材料40多万种，而且每年以5%的速度增长。综合世界各国新材料技术的发展情况，新材料大致可分为信息材料、能源材料、高分子有机合成材料、复合材料和新型金属材料。

信息材料的特点是要求高（超纯、超净、高精度）、专用性强、涉及面广、技术更新快。它可分为4种：半导体材料。硅是最关键的半导体材料，全世界年产量近3000吨，近年由于制作大规模集成电路的需要，单晶向大直径、高纯度等方向发展。按目前发展趋势，从直径来看，大约每4年增大1英寸；从纯度来看，高纯硅的杂质浓度为0.1ppb（即每100亿个原子中才有一个杂质原子），在实验室中能达到的纯度已接近理论极限纯度。信息记录材料。信息记录材料是计算机外围设备的关键，是软件和信息库的基础。没有信息记录材料的大容量、高密度及高速度存取，也就没有现在的信息库。目前，一张直径为30厘米的磁盘上，可以存入几千本甚至几万本书的信息量。敏感材料。指物理性质对电、光、声、力、热、磁以及气体有敏感的材料。它是传感器的核心，敏感材料的灵敏度决定着

控制的精度。例如材料的电阻随温度而变，便可制成温敏元件。 光导纤维。主要有石英型、多组分玻璃型光纤和塑料光纤。光导纤维主要用于通信，还广泛用于传感、测量、数据处理、医疗和照明等方面。

能源新材料是发展新能源及节约能源的关键。这类材料种类较多，当前引起世界各国重视的有： 非晶硅薄膜。这种薄膜的光吸收系数比单晶硅高一个数量级，用作电池材料只需 1 微米厚，原材料消耗仅为单晶硅的 1/200，成本低。目前国外非晶硅电池的光电转换效率在厘米级面积上最高为 10.5%。估计在 2000 年前可达 15%。 高温结构陶瓷。这类材料具有高强度、抗氧化、耐腐蚀等优点。当前世界发达国家正在大量应用结构陶瓷，使工业设备性能发生改变。例如，如果美国热能设备广泛采用结构陶瓷，其热效率可提高 15%~30%，由此每年可节省能源费近千亿美元。预计到本世纪末，结构陶瓷将是陶瓷、复合材料以及特种合金等材料中发展最快的一种新材料。 超导材料是有广阔发展前途的新材料。如果用这类材料制造电机，可增大极限输出量 20 倍，质量减小 90%左右，造价减少一半，还可实现电力的无损耗远距离传输。

复合材料是将两种或几种不同的人工材料，以一定的形式组合起来，使它们取长补短，综合发挥优异特性的人工合成材料。它是今后新型材料发展的重点之一。这种材料由基体材料和增强材料两部分组成。当前正在发展的有： 纤维增强塑料，其中用量最大的是玻璃纤维增强塑料。 碳纤维增强塑料。 芳纶。例如，碳化硅纤维复合材料，其耐高温性能和化学稳定性都超过碳纤维复合材料，美国已将碳化硅纤维增强陶瓷用于导弹制造方面。展望未来，可以认为复合材料是“21 世纪材料”。

高分子有机合成材料具有原料丰富、耗能低、便于加工等特点。现在最有发展前途的有： 高强度工程塑料。通过合金化、结晶化和其他各种增强方式，塑料的强度和模量就能与钢相近，但密度却只有钢的 1/6。 功能高分子材料。如高效分离膜，可用于化工中多种分离工序。化学反应膜，把催化剂、微生物和促进反应的其他物质固定在膜里，可以简化反应工序，节约能源，有利于连续生产。具有导电功能的高分子材料称为导电高分子材料。通常这种材料可分为复合型 and 结构型。复合型是由绝缘性高分子材料和各种导电材料通过填充复合和表面复合等方式制成。目前特种复合技术的研究已成为这类材料发展的主要方向之一。结构型是指高分子结构本身或经过掺杂之后具有导电功能的高分子材料。根据导电率大小又可分为高分子半导体、高分子金属和高分子超导体。导电高分子材料不像金属那样具有自由电子，导电是通过共轭 电子的活化来进行的。近年来离子导电高分子发展较快，但由于存在导电稳定性差和脆性等缺点，目前尚未进入商品化阶段。胶粘剂，目前数以千种的有机合成胶粘剂正在各种领域广泛应用。如现代飞机蒙皮用粘接代替铆钉铆接，使疲劳性能提高并减轻了质量。

新型金属材料是随着新工艺和新技术的发展而问世的。它包括非晶态金属、新型合金及金属氢等。非晶体金属是原子以杂乱无章的非晶态排列的金属。这种金属既不失去金属的固有特征，又有许多比晶态金属更可贵的特性。例如，非晶态金属在维氏硬度达 1000 时的高硬度下仍是高韧性材料；它有优异的化学稳定性；具有十分良好的软磁特性。新型合金主要指记忆合金、防振合金、超导合金等。记忆合金在外力作用下会产生形变，当把外力去掉，在一定温度下能回复原来的形状。这种合金不仅具有很强的回复功能，还具有耐磨、耐蚀、无磁性、无毒性等优点，用途十分广泛。防振合金是一种具有衰减特性（材料吸收振动的性能）的新型材料。防振合金以不同材质可分为复合型、铁磁性型、孪晶型和位错型。除此之外，还有超导合金、硬质合金、贮氢合金和金属氢等。

### 【新能源】

能向人类提供所需的电能、热能、机械能等的一切自然资源称为能源。目前正在普遍使用、技术较成熟的能源叫常规能源。如煤、石油、天然气、水能等。石油和天然气消耗量约占当今世界能耗量的 70%，随着世界各国工业化进程，能耗量逐年增加，据估计今后 50 年石油和天然气将会枯竭。因此整个世界都十分重视能源的开发研究。正在开发利用、尚未普遍使用的能源叫新能源。它主要包括核能、太阳能、地热能、氢能。开发利用这些能源的技术称为新能源技术。

核能，又称原子能，指核反应过程中，原子核结构发生变化释放的能量。原子核结构发生变化时，会出现质量亏损，根据爱因斯坦的质能关系式  $E=mc^2$ ，式中  $m$  表示质量， $c$  表示光速，亏损质量都可以转化成能量。利用核能的方法有：核裂变反应。原子核由质子和中子（统称核子）组成。带正电荷的质子由于核内存在核力，把核子凝聚成原子核。核力具有短程、与电荷无关、饱和性等特点。一般来说核力大于电磁力，大多数原子核是稳定的。只有某些重原子核中核力控制能力较弱，元素难以稳定。例如像铀原子核的质子和中子数目多，由于原子核结构可以看成球形水珠似的所谓“液滴模型”，铀核直径较大，通常只能勉强保持原子核完整。20 世纪 30 年代末，科学家发现用中子轰击铀原子核，一个入射中子能使铀核分裂两块具有中等质量数的碎片，同时释放大量能量和二三个中子，二三个中子又能引起其他铀核分裂，这便是链式反应，它可在瞬间把铀核全部分裂，释放大量能量。核电站和原子弹是目前核裂变能的两大应用。核电站的关键设备是核反应堆。1942 年 12 月 2 日世界上第一座核反应堆首次实现链式反应，宣告人类进入了“原子时代”。1954 年第一座核电站建成，到 1986 年底，全世界共有 26 个国家、394 座核电站的反应堆投入使用，装机容量近 2.7 亿千瓦，占世界总发电量的 15%。据推算，到 2000 年世界核电站装机容量可达 5 亿千瓦左右。我国已建成秦山核电站，容量达 30 万千瓦。核聚变反应。较轻原子核（如氢的同位素氘和氚的核）聚合成

较重原子核（如氦核）的过程中所释放出来的能量称为核聚变能。要想使带正电荷的原子核聚合，需要把它们加热到极高的温度，使其动能大到足以克服静电斥力而结合成新的原子核，这种高温下的聚变反应，常称热核反应。太阳是一座巨大的天然核聚变反应堆。核聚变可分为不可控和可控核聚变。氢弹是不可控核聚变，而目前主要解决可控核聚变的反应技术。现有许多国家使用托卡·马克等离子体反应器、热核靶激光电子和离子加热等技术，把轻核燃料温度增高到几千万度，甚至上亿度，从而达到连续、可控制地进行核聚变反应。可控核聚变技术如果能获得成功，将会极大地改变人类利用能源的方式。这一技术的最大优点是：释放能量大。一个氘核和一个氚核聚变成一个氦核释放出来的能量为 1760 万电子伏特，是相同质量反应物化学能的 1000 万倍。燃料蕴藏量丰富。如氘可从海水中提取，1 立方米海水约有 3 克氘，而 1 克氘核聚变释放的能量相当于 100 立方米汽油燃烧的能量。因此，人类一旦掌握了可控核聚变技术，海水就成为取之不尽的新能源。当前可控核聚变技术的研究已奠定了转入工程技术阶段的基础，预计到 21 世纪前 25 年内，容量达几千万千瓦的热核电站有可能投入使用。

太阳能指太阳发出的辐射能。太阳是一颗巨大而炽热的恒星，它每时每刻都在进行着由氢核“聚变”成氦核的“热核反应”，向宇宙辐射大量太阳能，而辐射到地面上的能量仅占其总能量的 22 亿分之一。科学家测定，垂直于太阳光的平面上，每分钟每平方厘米面积接收到的辐射能为 1.96 卡，功率是 1.367 瓦。我国陆地表面每年可接受到太阳能约为  $12 \times 10^{23}$  千卡，地球表面每年从太阳获得的能量为  $6 \times 10^{17}$  千瓦时，相当于目前所有能源所提供能量的 2 万倍。太阳能发射稳定、持久，据推算，太阳至少还能存在 50 亿年。因此可以说太阳能是人类永久使用的天然能源。太阳能可转换成热能，利用它可加热或冷却物体；太阳能可转变成电能，它又可分为光电技术和电力塔技术。光电技术是借助于各种光电池将光能转变成电能；电力塔技术是通过建造大型太阳炉，利用大型抛物镜采集太阳光发电，将电力输入电网。这种技术目前尚处在研究阶段，世界上第一座这类电站的功率将达到 10 万千瓦。

地热能即地球深层热具有的能量。地球是一个巨大的热库，仅地壳表面层 10 公里内含有的热量，就相当于全世界储煤发热量的 2000 倍。通常认为，地热能来源于地球内部放射性元素的衰变。地温随深度而增加，在地壳最上部的 10 公里范围内，一般每向下深入 100 米，温度增加 3（地热梯度）。某些地方，由于地壳构造活动引起局部异常，增温值比正常值高出许多，这些往往就成为具有开发价值的地热田。地热资源分为水热型、地压型、干热岩、熔岩等四类。水热资源是埋藏在地层浅表的水或蒸汽，出露地表即为温泉，温度从几十度到二三百度不等。地压资源是封闭在深处沉积岩中含有甲烷的高盐分热水，热水压力超过水静压力。干热岩位于

地下几千米深处，是温度为 150 ~ 650 的热岩层。熔岩埋藏最深，是温度高达 650 ~ 1200 的熔化或半熔化状态的岩浆。迄今为止，已开发利用的仅仅是水热资源。从 70 年代开始，一些先进国家开始着手研究干热岩地热开采技术。如打一对相距不远的伸入热岩层的深井，用炸药爆破或地下核爆炸，使两口井的井底之间形成断裂缝隙，用高压水流扩展并疏通裂隙，形成“地下热交换器”，从一口井注入冷水，另一口井便得到高温热流。地压资源和熔岩资源的利用目前尚处于设想阶段。1904 年意大利建立了世界上第一座地热电站，截止到 1984 年底，全世界地热发电总装机容量 388 万千瓦，虽然只及 1 座大型火力发电站，但在几种新能源中仅次于原子能发电。如果干热岩采热技术一旦得到推广，地热能将得到大规模的开发。

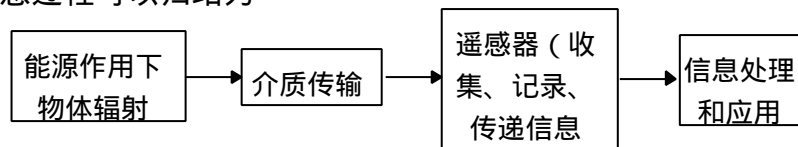
氢能。氢气在通常情况下是无色无臭的气体，在低温下可液化和凝固。氢燃烧的热值为同质量汽油的 3 倍、煤的 5 倍。氢可从水中制取，被认为是一种理想的含能体能源。但要使氢能真正成为广泛使用的能源，主要要解决制氢的方法和贮氢的手段。制氢方法上，科学家正在努力探索用热化学法和光分解法从水中制氢。热化学法是把化学试剂加入水中，在几百摄氏度的高温下，经过多步反应，把水分解成氢和氧。光分解法分为三种，即光电解法、光化学法和光生物化学法。这三种方法目前还处在实验室研究阶段。解决氢气的输送和贮存问题，国内外已研制出多种贮氢合金。这些合金在一定温度和压力下能大量吸取氢气，在另一个温度和压力下又能把氢气释放出来。现在稀土金属间化合物合金已初步投入使用。从 20 世纪 70 年代以来，人们又开始用现代科学技术方法重新开发风能。风力发电是风能利用的一种主要方式，在风力丰富的地区，利用风力发电很有潜力。近年来风能利用的一个突破性变革是建立所谓“风力田”，即在选定的风场上集中一大批风力发电机联合向电网供电。至今世界上最大的风力田建立在美国加利福尼亚州，截止 1984 年 9 月，已安装风力发电机 2700 台，装机容量为 21 万千瓦。目前利用风能发电的研究重点是提高发电效率和降低造价。

#### 【遥感技术】

从空间远距离检测地球表面物体所辐射或反射的电磁波强度及其在空间和时间上的分布，以获取大气、陆地或海洋环境信息的技术。它是通过传感器对远距离目标进行探测，以取得某种资料、数据，从而进行识别和分类。这是由于地球上各种物体都具有发射电磁波的特性，不同物体又具有互不相同的光谱特征，人们在事先掌握了各种物体的光谱特征后，只要借助某些手段收集、记录物体的不同性质的光谱特征，把这些特征信息与事先掌握的光谱特征进行比较，就可以区别不同的物体。因此，现代遥感技术由三部分组成： 传感器。这种仪器能接收到物体发射或反射过来的电磁波，感知远处物体的性质。目前传感器有航空摄影机、多光谱照相机、

多光谱扫描仪和微波雷达等。 遥感平台。是装载遥感器的工具。可用于飞机、气球、火箭、人造卫星和航天飞机等。 遥感图象处理。为满足不同不同的应用要求，需要对遥感器获取的原始图象进行处理。常用方法有光学的和电子学的两种，而目前以电子技术中的计算机数字处理最为重要。处理内容有图象整饰、几何纠正和镶嵌、特征提取和分类及各种专题处理。

遥感过程可以归结为



遥感过程示意图

遥感技术是在 30 年代航空摄影和判读的基础上，随着空间科学、电子计算机和信息技术的发展而发展起来的一门新兴的、综合性技术。它包括研究各种地物的电磁波谱特性，研制各种遥感器和遥感平台以及研究遥感信息的记录、传输、接收、处理方法和分析解释技术。还涉及到农林、水文、地质、气象、海洋、城市、工程建设和环境保护等各个学科领域的应用。遥感技术的核心内容是信息获取、存储、传输和处理技术，与电子学和计算机技术有密切的联系。

遥感技术在检测地球表面物体时具有明显的优点： 可以远距离探测。如人造卫星的轨道高度一般约 1000 千米，在地球资源卫星上拍一张照片，覆盖地面面积可达 3400 平方千米，甚至有时可以把半个地球拍在一张照片上。 肉眼只能感受到可见光，利用各种现代的探测仪器，既可感受到紫外波段和 射线，也可感受到红外波段和微波。 能监测动态变化。地球资源卫星，每 18 天可覆盖地球一遍，每星期能拍摄和积累地面照片近万张，因此，利用遥感技术能及时反映地面景象，还可以对比分析环境的动态变化，赢得预测预报的时间。 遥感技术广泛吸收了材料、能源、激光、全息等新技术方面的成就，又涉及到空间物理、大气物理、地理环境、生态系统等方面的基础研究领域。因此，它是把天、地、生、物和人类活动广泛联系在一起的最先进的技术之一。

目前，遥感技术有着广泛的实用价值。利用航空遥感，特别是航天遥感的发展，为地面大范围的勘测、找矿找水，为加速荒地、森林、水利和地热资源的调查，对监视农作物长势、病虫害，河、湖、海洋污染及森林草场火灾蔓延，以及河床演变、海岸变化、海水运动、洪水泛滥等动态变化的监视都有很好的应用效果。遥感技术又为直观地研究全球性的宏观规律变化提供了方便。例如卫星图象上清晰可见几千千米的地壳深部断裂，为动力地质学研究、地球演变、大陆漂移及地震分析等提供了直观依据。又如对云量、地热场和海水透明度等全球性同步数据的分析，在航空、航海和国防上都有实用价值。现在世界上已有 30 多种先进的遥感器。我国于

70年代中期发展遥感技术，已研制成多种可见光、红外和微波遥感器，并应用于国民经济的许多领域，取得了显著的效益。各国还在研究设计更多的新型探测仪器，并逐步朝着多波段、高分辨率及微型化方向发展。

### 【微波技术】

专门研究和应用微波的无线电技术的学科。微波是频率高、波长短的电磁波。它的波长在1米到1毫米之间，频率为 $3 \times 10^8$ 赫兹到 $3 \times 10^{11}$ 赫兹。微波能穿透电离层，具有波粒二象性的量子特性。微波成为一门技术科学，开始于20世纪30年代。微波技术的形成以波导管的实际应用为标志。若干形式的微波电子管（速调管、磁控管、行波管等）的发明则是另一标志。第二次世界大战中，微波技术得到飞跃发展，因战争需要，当时微波研究的焦点集中在雷达方面，由此而带动了微波元件和器件、高功率微波管、微波电路和微波测量等技术的研究和发展。至今，微波技术已成为无论在理论和技术上都相当成熟，又不断向纵深发展的学科。

微波技术的基本理论是以麦克斯韦方程为核心的经典电磁场理论；“场解”是基本研究方法，它涉及到求解偏微分方程，因此，一般求场解都相当复杂。微波的广泛应用，要求一种简便的工程计算方法，发展至今已形成了“微波等效电路理论”。应用微波技术，主要的问题是微波元件和微波测量，无论如何复杂的微波系统都由若干微波元件组成，而微波测量是微波技术的定量实验方法和解决工程实际问题的重要手段。由于受控热核反应研究的需要，微波与等离子体相互作用的研究相当活跃，最近利用高速运动的等离子体产生了超高功率毫米波和亚毫米波。近年来，在超导研究中，微波约瑟夫森效应研究进展很快，除了探讨其作用机理外，已制成了各种约瑟夫森效应微波器件，它有可能引起低功率微波系统的重大革新。但是，微波技术研究和发展的主要趋势，仍是频率不断向更高范围推进。

微波技术之所以得到迅速发展，其主要原因是它有巨大的应用价值。目前，微波技术应用层出不穷，主要有：雷达。微波技术的早期发展是和雷达交织在一起。雷达不仅用于国防，也用于导航、气象测量、大地测量、工业检测和交通管理等方面。现在雷达种类很多，如超远程预警雷达，它的作用距离在1万千米以上，可以对洲际导弹的突然袭击给出15~30分钟的预警时间；又如现代相控阵雷达，可以根据需要同时探测许多目标和自动跟踪许多目标。通信。微波频带宽、信息量大，可以用微波作为载波进行通信。现主要应用在卫星通信和常规的中继通信中。是一种科学研究手段。近年来，微波作为科学研究手段得到广泛应用。例如，所谓“原子钟”就是工作在微波波段的一种时间基准。1967年第十三届国际计量大会决议：定义时间单位“秒”为铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9 192 631 770个周期的持续时间，这根谱线落在微波频段。此外，射电望远镜、微波加速器等对于物理学、天文学研究具

有重要意义。毫米波微波技术为控制热核反应的等离子体测量提供了有效方法。值得注意的是，微波作为一种观测手段，对科学发展作出了重大贡献，如 60 年代天文学四大发现：类星体、中子星、2.7K 背景辐射和星际有机分子，全都是利用微波作为主要观察手段而发现的。微波能的应用。主要有微波加热，其基本原理是微波与物质分子相互作用并被吸收而产生热效应。微波加热的特点是加热速度快，热能利用率高，可实现快速自动控制。目前，正在形成微波医学、微波生物学、微波化学等新的边缘学科。有趣的是，有的科学家用微波能来解释金字塔内的神奇奥秘。举世闻名的埃及金字塔，建造于约 5000 年前，塔高 164.6 米，由 230 万块巨大石头堆成。本世纪 30 年代后期，法国人鲍维斯参观金字塔时发现，位于塔高  $\frac{1}{3}$  处的一只垃圾桶里有水果屑、死猫死狗等小动物，当时塔内温度虽然很高，但这些小动物的尸体并不腐烂，反而脱水变成木乃伊。他回国后，模仿金字塔的构造作了一个模型，并把死猫放在塔高  $\frac{1}{3}$  处，结果发生同样现象。从此便有一种神奇的“金字塔能”的说法。后来，人们相继发现金字塔不仅可以对水果保鲜，而且有人在金字塔式的建筑物内睡觉，感到头脑清晰，甚至还能消除牙痛、肿痛等症状。捷克一位工程师把剃头刀片放在金字塔式的建筑物内，发现已钝的刀片又变得十分锋利，据说他为此还得到了“金字塔剃头刀片锋利器”的专利。金字塔内如此多的神奇奥秘，科学家经过研究分析，倾向于“金字塔能”实际就是微波能。事实上，金字塔式的建筑物是一种最有效的微波振荡器，它能把宇宙间各处发射来的微波有效地汇集起来，并使之发生谐振。因此，采用金字塔式结构可以把来自宇宙深处的能源有效地集中起来为人类服务，实验还表明，塔身  $\frac{1}{3}$  处最为有效。当然，关于金字塔内奇异现象与微波的联系，仅为一家之言，仅供参考。

### 【微波炉】

利用微波能量加热的炉灶。微波作为能源开始于 50 年代后至 60 年代末，它是随着微波炉商品化而得到发展的。微波炉原理是利用微波与物质分子相互作用并被吸收而产生热效应的。实用微波炉是在一对平行板电容器的两个极板上施加超高频电压，如图所示。国际上规定微波加热专用频率是  $(915 \pm 25)$  兆赫、 $(2450 \pm 50)$  兆赫、 $(5800 \pm 75)$  兆赫和  $(22125 \pm 125)$  兆赫，常用的是 915 兆赫和 2450 兆赫。这些频率所对应的波长很短，故称为微波。

现在具体分析一下微波炉烧开水的原理。水分子是由氧原子和氢原子组成，氢原子带正电荷，氧原子带负电荷，即使在外电场不存在时，水分子的正、负电荷中心也不重合，它相当于一个电偶极子，因此水分子是有



极分子。假设在某一瞬时平行板电容器上面极板带正电荷，下面极板带负电荷，在此电场作用下，水分子中的氧原子向上，氢原子向下；另一瞬时，极板上的电荷改变了，水分子中的氢、氧原子也跟着转向。随着外部超高频电压的不断变化，水分子中的氢、氧原子也随之迅速上、下改变方向。于是，平行板电容器中超高频电场的能量就传给了水分子，水分子剧烈运动，产生大量热量，水就沸腾起来。

微波炉的应用范围是很广泛的。在工农业生产方面，可用它进行加热、烘干食品、解冻；医学上可用它杀虫灭菌；但其主要应用是食物烹调。微波炉加热的特点是；微波可以深入到食品内部，热量产生于物质本身，不依靠热传导，里外同时加热，瞬时可达高温，因此，热效率高，节省能源；清洁卫生，既不污染食品，也不污染环境，而且不破坏食品的营养成份。在现代科学技术中，微波炉解决了宇航员在太空船中喝开水的问题。人类在地球上用壶烧开水，由于壶底部的水首先受热膨胀，向上运动，而上部的冷水向下沉降，这种对流作用使得整壶水受热均匀而沸腾。但是，在太空中飞行的宇宙飞船完全处于失重状态，冷、热水之间不能对流，水的热传导作用又差，因此，在太空船中烧水，下部早已开了，而上部还是凉的。微波炉依靠交变电场的作用，使所有水分子频繁地换向、激烈地运动，不需水的对流就能把整壶水烧开。

#### 【红外技术】

红外线是可见光红端与微波间的电磁波，其波长范围约在  $7 \times 10^{-7}$  米至 1 毫米间。太阳光及物体的热辐射中都包含红外线的连续谱。分子的振动与转动光谱往往处于红外光谱范围内。红外技术就是研究红外辐射的产生、传播、转化和测量及其应用的技术科学。其内容包括四个主要部分：

红外辐射的性质，其中有受热物体所发射的辐射在光谱、强度和方向的分布；辐射在媒质中的传播特征——反射、折射、衍射和散射；热电效应和光电效应等。 红外元件、部件的研制，包括辐射源、微型制冷器、窗口材料和滤光片等。 把红外元件、部件组成系统的光学、电子学和精密机械。 在军事上和国民经济中的应用。

1800 年，F.W.赫歇耳发现了红外辐射。此后，红外辐射和红外元件、部件的科学研究逐步发展起来，但比较缓慢，直到 1940 年前后才真正出现现代的红外技术。红外探测器的发展是红外技术发展的先导。我们知道，要察觉一个客观事物的存在或测量它的强弱，一般都是通过它所引起的效应来观测的。红外辐射照射到某些物体时会发生热效应，如温度升高、体积膨胀等，而温度和体积是可以测量的。红外辐射照射到另一些物体时还会发生所谓“光电效应”，即引起物体的电学性质变化，电学性质也是容易测量的。因而可以利用红外辐射热效应的温度、体积变化，光电效应的电学性质变化来量度红外辐射的强弱。凡是能把红外辐射量转变成另一种便于测量的物理量的器件，叫做“红外探测器”。它可分为两类：一类是

利用红外辐射热效应制成的热敏探测器。1940年前研制的主要是热敏探测器。另一类是利用红外辐射光电效应制成的光电探测器。它以硫化铅红外探测器为开端，50年代随着半导体物理学的迅速发展，光电探测器得到新的发展。从60年代中期起，红外探测器开始向两个方面发展，即在1微米~14微米范围内的探测器，由单元向多元发展；响应波段向长波延伸，从几十微米到几百微米以至几千微米。另外，这一时期激光的出现也极大地影响了红外技术的发展。在这以前，红外技术仅探测非相干红外辐射，激光的出现，很多重要的激光都在红外波段，其相干性便于利用电子技术中的外差接收技术。探测性能比功率探测高好几个数量级。

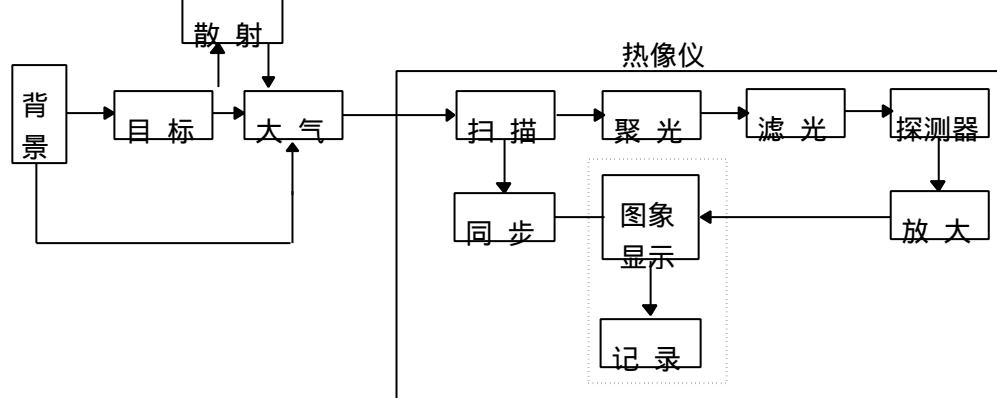
近三十年来，红外技术已成为一门迅速发展的新兴技术。它已经广泛地应用于军事、工农业生产、医学和科学研究等各个领域。红外技术在军事上的应用有红外侦察、红外雷达、红外制导、红外通信、红外夜视和红外对抗等。一切物体都在不断产生红外辐射，物体的温度越高，其红外辐射的波长越短。室温（300K）物体发出大量的8~13微米的辐射，飞机发动机在工作时发生大量的3~5微米的辐射。利用红外探测技术，就有可能侦察到这些物体。因此一切军事目标，如飞机、导弹、军舰，甚至部队的行动，都散发热量，发出大量的红外辐射。利用红外探测技术可以侦察、跟踪和监视目标，或者引导炸弹投向这些目标。70年代以来，红外预警卫星一直监视着弹道导弹的发射，红外反导弹在大气层的搜索、跟踪距离已接近2000公里，侦察卫星依靠红外和多光谱仪器及时获取大量的军事情报。红外制导导弹已成为用量最大的近程战术导弹。红外探测装置比微波雷达能更有效地追踪贴近海面飞行的低仰角导弹和飞机。另外，红外通信具有更好的方向性，适用于国防边界哨所与哨所之间的保密通信。红外技术在工业、医学和科学研究中的应用有：红外制冷、红外测温、红外成像、红外无损探伤、红外气体分析、红外加热干燥、红外遥感、红外吸收光谱、红外导航、红外文物鉴定等。红外技术的应用，给人类进步作出了很大贡献。例如，60年代以前，人类对天体的认识，只限于从天体发射来的可见光和射电无线电波。后来又增加了红外波段。宽波段红外望远镜发现了宇宙间充满着2.7K的辐射背景。美国、英国、荷兰三国联合发射了红外天文卫星，利用它来观察宇宙空间，发现了过去人类一无所知的红外天体达20万个。当前，虽然红外技术得到广泛应用，但所利用的波段仅仅是0.75微米~13微米的近红外和中红外波段。还有广阔的远红外线没有得到应用，远红外波段是目前科学家注意的重点。

#### 【热成像】

把景物反射或自身辐射的红外辐射图样转换成人眼可观察图象的技术称为红外成像技术。红外成像技术可分为两类：一类是以红外辐射源照射物体，利用被反射的红外辐射照射物体的像，称为主动式红外成像；另一类是不用人工照明源，只依靠目标和背景的不同辐射成像，称为被动式红

外成像。被动式红外成像反映了被摄景物中不同辐射的温度差别，它包含了被摄景物的温度信息，因此被动式红外成像通常称作热像。热像不需要红外辐射源，应用于军事中具有不易暴露等优点，它是红外探测技术发展的必然结果。

被动式红外成像装置叫做热象仪。现阶段热像技术是以光学机械扫描方式为主的光机扫描热象仪，它由光机扫描、红外探测器、测温机构、显示和记录器等组成。其型式有：用于远距离探测的望远镜型；用于近距离探测的普通型；用于观察细小物体的显微镜型。虽然型式不同，但其工作原理却是相同的，即热像仪所摄景物包括目标及背景，两者辐射的差别是构成热图象的基础。目标及背景的辐射通过大气，被吸收或散射之后到热像仪。一般热像仪的接收元件采用单个或线列型的红外探测器，它只摄取景物的部分辐射。为了获得被摄景物全体的图象，必须用光学扫描方法使红外探测器顺序视整个被摄景物空间，接收的按空间变化的红外辐射由红外探测器转换成按时间顺序变化的电信号，经放大处理后，再在阴极射线管上转换成可见的图象（见热像仪工作原理图）。



热像仪工作原理图

自然现象、人体生理现象和加工生产过程等方面都普遍进行着能量交换，都和热或温度有关，热像仪正是获取这种信息的一种手段，因此，目前热像仪的应用已涉及到医学、工业、军事、气象及科研等部门。医学上，热像仪能把人体发出的红外辐射转变为可见图象，为医学上研究人体疾病提供了直观依据。热像是利用人体自身所发出的红外辐射而得到的，因此利用热像技术诊断人体疾病不需要与人体接触，不会改变人体的任何状态，对人体无害，这比用X射线和同位素等优越。1957年临床医学上首次使用热像技术探测乳腺癌。目前，全世界已有数百家医院使用热像仪。热像仪已成为诊断浅表肿瘤、血管疾病、皮肤病等方面比较有效的工具。如有的国家将热像技术作为妇女普查乳腺癌的第一轮筛选手段，有资料表明，普查1924人中，患乳腺癌的有24例，检查出22人，其中2人因癌的大小不到4毫米而未查出，其准确率达92%。工业上，可以应用热像技术检测工业设备或工业产品。如钢铁厂为安全生产的需要，必须及时知道

高炉的炉衬已薄到何种程度，现可用红外电视装置的摄像机摄取高炉表面红外辐射，因炉衬薄的地方炉子外表面温度高于其他地方，这样在电视屏上呈现的明亮部分就是高炉危险部位。又如在电力系统，电气部件的事故一般不是一下子发生的，而是逐渐恶化的，在恶化过程中，电气元件表现为温度升高，这便可用热像仪直接观测到潜在故障的位置和严重程度。科研上，利用热像仪，可研究空间技术。如人造卫星在升入太空前，都要在地面进行各种模拟试验，其中一个重要试验是确定卫星在轨道上所允许的最高和最低温度。科研人员在空间模拟室中用炭弧灯模拟太阳能辐射，通过模拟室的一个窗口，利用热像仪观测和记录卫星表面温度，并在卫星表面温度稳定时拍摄热分布图，这些都是卫星进入轨道后分析其表面热平衡状况有价值的信息。

### 【夜视仪】

利用光电变换器件，把红外线转换为可见光的一种仪器。夜视仪分为主动式和被动式两大类。主动式夜视仪是利用近红外辐射照射目标，利用光电子发射现象的变像管，将反射回来的红外像转变成可见像而显示在屏幕上，工作波段不大于 1.3 微米。被动式夜视仪则利用目标本身发射的辐射，用单元红外探测器（加光机扫描）或多元列阵探测器摄取目标的热图象，并转变成可见图象显示出来。这种夜视仪，实际上就是热像仪。根据需要，红外成像装置有各种不同形式，热像仪就是这类装置的总称。

夜视仪是以红外变像管、红外摄像管等部件为核心组装的。红外变像管是把红外像转变成可见像的一种电真空器件。它由对红外敏感的光阴极、电子光学系统和荧光屏组成。人们知道，光照射到某些材料会发射出电子，光电子数与光强度成正比，这便是光电效应。有少数光电材料，受到红外辐射的照射时也会发射电子。红外变像管根据这个原理，用一种对红外辐射敏感的银氧铯作为光电子发射材料，再根据目标辐射与变像管辐射的强度不同，发射出的电子密度也不同，这样，就可以在荧光屏上显示出来。红外摄像管是把光学像转变成一维的电信号，经电子技术放大，然后再还原为光学像的电真空成像器件。目前，简单的夜视仪有红外瞄准具、红外驾驶仪、观察仪及指示报警器等种类，但它们一般都由红外探照灯（辐射源）、光电变换器件和电源组成。红外探照灯的作用是把不可见的红外辐射投射到目标上，“照亮”目标。光电变换部件由物镜、变像管和目镜组成，是夜视仪的心脏部分。物镜将目标反射过来的红外辐射，成像于变像管的阴极面上，通过目镜可以见到荧光屏上的目标像。在光电变换器中，电子透镜需要几千伏甚至 2 万伏的高压直流电源。其工作原理可用下图表示。

第二次世界大战期间，由于军事需要，各国大力发展夜视仪。这是因为夜视仪有许多优点，它不仅白天可以使用，更重要的是在夜间，利用目

标和背景辐射特性的差异，较容易识别各种军事目标，特别可以揭示敌人的伪装目标。被动式夜视仪，更具有隐蔽、安全、保密性强等优点。因此，夜视仪在军事上可以用来侦察敌方的行踪，查明敌方地面军事设施或搜索发现敌人、敌机。红外瞄准装置可装在步枪、机枪、大炮和火箭上，作夜间瞄准用。红外驾驶仪可安装在坦克及各种车辆上，驾驶员借助于这种仪器，可以在夜间观察前进道路及地上物体。红外报警器可安装在军事设施或重要部门的周围，一旦红外辐射被阻断，便立即发出信号警报。尽管目前各国仍继续使用和装备主动式夜视仪，但由于它容易暴露观察者，探照灯需要高压电源，仪器又笨重，因此，各国很重视被动式夜视仪的研制。近年来已有几种被动式夜视仪投入使用。如手持红外观察仪，重 2.7 千克，使用 6 伏电源，能挂在腰带上，可像望远镜那样操作，并能连续工作 12 小时，它不仅能在夜间探测和识别人员、目标，而且在白天能识别用树叶等伪装的人员及车辆。另外，还有红外电视，它也是很好的夜视装备。

#### 【核磁共振技术】

经典电磁理论告诉我们，磁矩不为零的原子核，受到恒定的磁场作用而产生力矩，该力矩使磁矩绕恒磁场方向进动，进动频率  $\nu$  与恒磁场的磁感应强度  $B_0$  成正比，即  $\nu = \frac{\gamma}{2\pi} B_0$ ，式中  $\gamma$  称为回磁比。当外加射频场作用

于这个系统，并使射频场的频率等于  $\frac{\gamma}{2\pi} B_0$  时，就出现核磁共振。以质子（氢核）为例，当  $B_0=1.41$  特斯拉时，频率  $\nu$  为 60 兆赫兹。因此，所谓核磁共振，就是在恒磁场中，磁矩不为零的原子核受射频场的激励，发生磁能级间共振跃迁的现象。1946 年 E.M. 珀塞耳和 F. 布洛赫等人分别在实验中首先发现固体石蜡和液体水分子中氢核的共振吸收。此后核磁共振技术发展迅速，目前核磁共振已成为波谱学中的一个重要分支。

核磁共振技术在近代物理和化学方面有着广泛应用。可以使用核磁共振谱仪获得核磁共振谱。利用核磁共振方法来测量核磁矩，其绝对准确度可达  $10^{-5}$ ，曾用这种方法测量了 80 多种核磁矩，在核物理研究中起了重要作用。还经常用核磁共振方法来准确地测量磁场。在核磁共振技术应用中，有核磁共振分析和核磁共振成像。核磁共振分析已成为一种重要的无损分析手段。其原理是在实际样品中核所处的磁场除了外加的恒磁场，还叠加有内磁场。内磁场来源于样品核周围的核、电子和离子的贡献。内场的作用使得某些物质的核磁共振谱线呈现复杂的结构。因此，原子核可看成是安置于物质内部的微小探针，通过它们来探测物质的微观结构和各种相互作用。例如，1949 年 W.G. 普罗克特和我国的虞福春先生首先利用核磁共振分析发现在不同的有机氮化合物中氮核共振频率存在微小移位。此后 J.T. 阿诺德等人发现乙醇分子（ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ）中化学环境不同的三种质子在核磁共振谱中有不同的共振峰，强度比为 1 2 3，如右图所示。频率的差异一般仅为共振频率的  $10^{-6}$  数量级。对质子和碳-13 核分别用四甲基硅分子

中甲基的质子和碳作标准，样品的各个共振峰与标准的频率差（以 Hz 为单位）与标准核的共振频率（以 MHz 为单位）的比值称为化学位移。当化学位移和自旋耦合（即邻近的两种核自旋之间相互作用使共振谱线分裂现象）造成的复杂谱能区分近十分之几赫的两条谱线时，这种谱称为高分辨核磁共振谱。它对量子化学的发展起了很大作用。常用质子和碳-13 核的高分辨谱分析有机化合物，每种有机化合物都有它特定的质子和碳-13 核的共振谱，人们积累了成千上万个有机化合物这类图谱，用来鉴定分析有机化合物或测定未知化合物的结构。核磁共振成像则是利用在物体的不同点处场强互不相同，它们在各点上产生互不相同的核磁共振频率，共振吸收谱线强度的频率分布就对应共振核的空间分布，借助于电子计算机，利用与 X 射线断层照相术类似的方法，重新组建原来的图象。核磁共振成像也可显示共振核的某个参数（包括密度、自旋点阵弛豫时间和自旋弛豫时间）在物体中的空间分布。对动物和人体组织的核磁共振实验表明，正常组织和癌病组织的质子密度以及自旋点阵弛豫时间有很大差别，因此核磁共振人体成像仪有希望成为诊断疾病的有力工具。它不使用能引起辐射损伤的辐射源，对软组织反应灵敏，除了得到解剖学图象外，还能反映生理状况。

#### 【穆斯堡尔效应及其应用】

指一种原子核无反冲的  $\gamma$  射线共振散射或吸收的现象。德国物理学家 R.L. 穆斯堡尔于 1957 年~1958 年间在观察  $^{191}\text{Ir}$  (129keV) 的  $\gamma$  射线共振本底时首先发现这种现象，并在理论上作了解释。一个自由原子核发射或吸收  $\gamma$  光子时，原子核要受到反冲，反冲能量损失，发射谱或吸收谱便产生偏差，对大部分核辐射，难以实现共振吸收。若原子核被束缚在晶体点阵上，晶体质量远大于一个原子核的质量，发射或吸收  $\gamma$  光子时，整个晶体反冲，反冲能量将显著减小，容易观察到共振吸收现象。这就是所谓无反冲  $\gamma$  共振吸收。但实际上点阵振动状态是量子化的，在反冲能量小于点阵振动的能级间隔时，它将被整个晶体吸收。所以穆斯堡尔效应又称零声子发射和吸收。迄今为止，已经观察到的穆斯堡尔效应有 40 多种元素，80 多种核素，100 多条穆斯堡尔跃迁线。这些核素称为穆斯堡尔核。其中最常用的是  $^{57}\text{Fe}$  (14.4keV) 和  $^{119}\text{Sn}$  (23.8keV)，括号内为  $\gamma$  光子的能量。无反冲  $\gamma$  射线最主要特点是谱线的宽度接近于核能级宽度，这表明它具有极高的  $\gamma$  射线能量分辨率，因此能观察到原子核能级的超精细结构。在共振实验中，由于源同吸收体的化学环境的差异，原子核外 s 电子电荷密度发生变化，它与原子核电荷的相互作用使跃迁能量相应变化，其差值表现为能量位移。称为同质异能位移或化学位移。自旋大于 1/2 的核，电荷分布非球形对称，核具有电四极矩，它与核所处的电场梯度发生相互作用，核能级便产生四级分裂。自旋大于零的核，具有核磁矩，它与核所处的内

磁场相互作用，核能级就产生分裂。在穆斯堡尔谱中可以清楚地分辨这些超精细相互作用引起的位移和分裂。若已知核周围环境的电磁结构，则可以研究核的特性；反之，若核的性质已知，由测量结果可以推得核周围环境的电磁结构，即利用穆斯堡尔核，能探测物质的微观结构。

利用多普勒速度扫描可以实现共振吸收测量，这种装置称为穆斯堡尔谱仪。由该仪器能获得穆斯堡尔谱——透过吸收体的  $\gamma$  射线光子数对多普勒速度的函数。上图是一个典型的穆斯堡尔谱，凹峰表示最大共振吸收发生的位置，它与机械零速度的速度差值反映了吸收体相对于源的化学位移。

穆斯堡尔效应的各种应用，通称为穆斯堡尔谱学。它几乎涉及所有自然科学领域。20 世纪 60 年代，物理学家用穆斯堡尔效应在地面上测量了源同吸收体在高度上相距 22.5 米时的  $\gamma$  射线能量位移，在 1% 的精度内验证了重力位移效应和爱因斯坦等效原理，并发现谱线随温度移动（热红移）。有些物理学家把这类实验看成是相对论时间效应的一个验证。在核物理方面，穆斯堡尔谱学可以用来测量核激发态的磁矩、电四极矩；也可以由谱线宽度确定核能级寿命；由能量位移确定激发态和基态间核电荷半径的相对变化。凝聚态物理方面，测量无反冲过程的几率可用于固体的点阵动力学的研究；磁超精细相互作用对磁有序材料，如铁磁、亚铁磁和反铁磁的研究，可以确定物质磁结构；根据内磁场随温度变化，可以确定磁有序化温度、鉴定含铁物相、相变研究。穆斯堡尔谱学还可用来研究高压对材料性质的影响；在极低温下，用来研究超导性质的转变及化学成份与超导性的关系。在化学上，可用来研究穆斯堡尔原子的电子组态，并可以获得化学价键方面的知识，以及研究锡、钛金属有机化合物。在生物科学方面，利用穆斯堡尔效应可研究血红素蛋白、铁硫蛋白、贮铁及转移铁的蛋白等结构和性质。

## 中学物理教学

### (一) 中学物理知识分析

#### 一、初中部分

##### 测 量

#### 一、疑难分析

1. “测量所能达到的准确程度”与“测量所需要达到的准确程度”的区别上述两句话，前一句是说“可能达到”，后一句是说“需要达到”。“可能”是与测量工具性质有关，“需要”则与选择测量工具有关，与测量的目标有关，这两者之间应先有“需要”后有“可能”。

2. 关于“质量”的定义和说明

- (1) 质量是物体所含物质的多少。
- (2) 质量是物体惯性大小的量度。
- (3) 质量是物体产生引力场和受引力场作用能力的量度。
- (4) 质量可以作为物体所蕴藏的能量量度的量度。

其一，物体质量的不变性，只适用于速度远比光速小的物体。对于高速的物体，根据相对论力学，质量与物体运动的速度有关，是可变的。其二，对同一物体，当选择恰当的单位时，惯性质量和引力质量数值相等。在一般情况下，统称质量。但两者量度方法不同，惯性质量用惯性秤来量度，引力质量用天平来量度。

#### 二、习题类型

1. 训练自测长度。建立1厘米、1分米、1米长度的具体概念。
2. 单位换算：千米、米、厘米、毫米之间的换算题。
3. 会用特殊方法（以直代曲，以多求少）测长度：薄纸的厚度，球的直径，测图中曲线的长（例如铁路线近似长度）等。
4. 国际单位制中长度、质量的主单位，主单位与其他辅助单位之间的换算。
5. 天平的调节和使用方面的题目。
6. 判断刻度尺的准确程度。会用多次测量的平均值来减小误差，区别误差和错误。

#### 力



## 一、疑难分析

### 1. 关于“力的初步概念”中几点须知

(1) 力是物体对物体的作用，说明力必须涉及两个物体。如果我们把力说成是物体甲对物体乙的作用，那么物体乙对物体甲同时也有作用，所以物体间力的作用是相互的，它是成对出现、同时消失、大小相等、方向相反，分别作用在两个相互作用的物体上。

### (2) 力的命名法

平时提到力，有时叫做推力、拉力、提力、压力等，有时则称重力、弹力、摩擦力等。前一种是根据力的效果来分类的，后一种是根据力的性质来分类的。

### (3) 重力

由于地球的吸引而使物体受到的力叫重力。地球的吸引是万有引力，而重力则是万有引力中的一部分，它的大小是由物体质量  $m$  和重力加速度  $g$  决定的。 $m$  不同，物体受到的重力也不同。加速度  $g$  也是一个变量，它随物体处在地球上的位置（高度和经纬度）不同而稍有不同。方向是竖直向下。重力的作用点一般是在物体上。但  $g$  在初中物理中当作一个常数，其值为 9.8 牛顿/千克。

### (4) 力的作图法

要求把力画在受力物上，力的大小要按标度定，箭头画在已确定长短的线段末端。

### 2. “二力平衡”的条件

一个物体在两个力的作用下，如果是保持静止状态，我们说这两个力是平衡的。但如果物体在两个力的作用下，虽不保持静止但作匀速直线运动，则这两个力也是平衡力。

### 3. 物体的重心

物体的重心不一定在物体内部，也可以在物体外。

## 二、习题类型

1. 力的基本概念的练习：判断物体是否受力，判断一个力的施力体、受力体。

2. 确定  $G$ 、 $m$ 、 $g$  三者之间关系的练习。

3. 用力的图示法画各种不同的力。会确定物体的重心。

4. 判断物体受到的两个力是否平衡，判断物体平衡时的受力情况，以及用图示法把两个力表示出来。

## 运动和力

### 一、疑难分析

#### 1. 惯性和惯性定律的区别

惯性是物体的固有属性，跟物体受不受外力或是否运动无关。

惯性定律是物体在不受外力作用的条件下遵循的规律。

#### 2. 在变速直线运动中平均速度不等于速度的平均

根据平均速度的公式  $\bar{v} = \frac{s}{t}$ ， $\bar{v}$  是限制在  $s$  路程中或  $t$  时间内的平均速度。

设在  $t_1$  时间内通过  $s_1$  路程的平均速度为  $\bar{v}_1$ ，在  $t_2$  时间内通过  $s_2$  路程的平均速度为  $\bar{v}_2$ ，则在  $t (t_1 + t_2)$  时间内通过  $s (s_1 + s_2)$  路程的平均速度

$$\text{为 } \bar{v} = \frac{s}{t} = \frac{s_1 + s_2}{t_1 + t_2} ;$$

而速度的平均为

$$\frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{s_1}{t_1} + \frac{s_2}{t_2} \right) = \frac{s_1 t_2 + s_2 t_1}{2 t_1 t_2}。$$

显然，平均速度不等于速度的平均。

### 二、习题类型

1. 判断运动、静止的相对性。确定参照物，或当参照物确定后，判断物体的状态。

2. 速度单位米/秒和千米/时之间的换算。

3. 根据公式  $v = \frac{s}{t}$ ，已知两个量求第三个量。

4. 根据公式  $\bar{v} = \frac{s}{t}$ ，已知两个量求第三个量。

5. 会运用惯性、惯性定律解释各种现象。

6. 知道物体的运动状态，判断受力情况。

## 密 度

### 一、疑难分析

1. “密度”是物质的一种特性而不是物体的一种特性

只要是同一种物质构成的物体，不论其体积大小，形状各异，密度是相同的。

2. “密度是物质的一种特性，每种物质都有一定的密度”是否有条件

因为密度是由质量和体积共同决定的，质量不变，体积随温度变化而发生变化，那么密度随之也发生变化。

### 3. 密度的定义

“单位体积的某种物质的质量叫这种物质的密度”，只适用于质量均匀分布的物质。“物体的质量和体积的比叫做这种物质的密度”，它不仅适用于质量均匀分布的物质，也适用于质量分布不均匀的物质。

## 二、习题类型

1. 会根据密度表判断物质密度的大小。
2. 根据公式  $\rho = \frac{m}{V}$ ，已知两个量求第三个量。
3. 会测固体、液体及浮在液面物体的密度。
4. 会计算综合题。

## 压 强

### 一、疑难分析

“帕斯卡定律”和“液体内部压强的传递规律”的适用范围

帕斯卡定律指的压强是外加在密闭液体表面的压强，而液体的压强指的是因液体有重力而产生的压强，但无论是前者还是后者，它们都要求所研究的液体处于静止状态。如果液体流动，就不是流体静力学问题，这时传递压强的规律也就不同了。

### 二、习题类型

1. 判断支承面受到的压力、压强的大小。
2. 面积、压力、压强不同单位之间的换算。
3. 根据公式  $p = \frac{F}{S}$ ，求  $p$  或  $F$  或  $S$ 。
4. 应用帕斯卡定律的公式  $p_1 = p_2$  或  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}$ ，求压力或受力面积。
5. 运用公式  $p = \rho gh$  进行计算。
6. 会利用公式  $p = \rho gh$  解释各种现象（连通器、船闸等）。
7. 会解释大气压作用所产生的现象。
8. 利用大气压随高度变化的规律进行计算。

## 浮 力

## 一、疑难分析

1. 水对物体向上和向下压力的差就是水对物体的浮力，如果这个物体是球形或者是倒放的圆锥体，如图所示，又怎么理解呢？

如果物体 A 全部浸在液体里，在固体的四周和液体接触的表面上就要受到液体对它的压力。液体内部压强是随深度的加大而增加，因此作用在浸没于液体的固体表面各部分的压力并不相等，物体的下部浸入液体比较深，所受压力比较大，倘使把物体的四周所受的压力分解为水平方向和竖直方向的分力，并分别按这两个方向求它们的合力，结果是全部水平方向分力的合力为零，全部竖直方向分力的合力竖直向上，显然这向上的合力就是液体对浸没物体的浮力。

2. 比重计的刻度为什么不是均匀的？

比重计是测量液体密度的仪器，它是利用二力平衡 ( $F_{\text{浮}}=G$ ) 的原理制造的。比重计所受重力  $G=mg$  是定值。根据阿基米德定律，比重计在待测液体中所受浮力  $F_{\text{浮}}=\rho_{\text{液}} \cdot gV_{\text{浸没}}$ 。根据二力平衡  $F_{\text{浮}}=G$ ，得

$\rho_{\text{液}} \cdot gV_{\text{浸没}}=G$ 。因为  $g$ 、 $G$  是定值，可用  $k=\frac{G}{g}$  表示，则  $\rho_{\text{液}}=k\frac{1}{V_{\text{浸没}}}$ ， $\rho_{\text{液}}$  与  $V_{\text{浸没}}$  成反比例函数关系。当液体的密度数值是均匀变化时， $V_{\text{浸没}}$  不可能是均匀变化的，如左图所示，因而比重计的刻度是不均匀的。

## 二、习题类型

1. 影响浮力大小的因素。

2. 利用  $F_{\text{浮}}=\rho gV_{\text{排}}$  公式解有关习题。

3. 将浸在液体中的物体挂在弹簧秤上，弹簧秤示数  $F_{\text{弹}}=G-F_{\text{浮}}$ 。利用此式可求有关未知量（如求  $F_{\text{浮}}$ 、 $G$ 、 $F_{\text{弹}}$  等）。

4. 利用公式  $G=F_{\text{浮}}$  解悬浮、浮在液面物体的有关习题（如求  $\rho_{\text{液}}$ 、 $V_{\text{物}}$ 、 $V_{\text{排}}$ 、 $V_{\text{露}}$  等）。

5. “研究物体浮在液面的条件”实验中的有关题目。

6. 利用物体的浮沉条件解释有关现象。

## 简单机械

### 一、疑难分析

### 1. “定滑轮”与“动滑轮”的区别

虽说定滑轮、动滑轮都是简单机械，而且都是杠杆类的简单机械，但它们的支点却不同。定滑轮的支点在中间，是固定的；动滑轮的支点在旁边，而且是可变的，一旦用力向上提动滑轮和重物时，只要滑轮和重物一移动，它的支点（指在空间的位置）就改变了。

2. “使用滑轮组的时候，重物和动滑轮的总重由几股绳子承担，提起重物所用的力就是总重的几分之一”的条件

如左图所示的动滑轮组，提重物时所用的力为  $F$ ，根据上述判断法，即重物和动滑轮的总重由几股绳子承担，提起重物所用的力就是总重的几分之一，得  $\frac{1}{5}G$ 。

按力的平衡原理，将每一个动滑轮分别分析，则动滑轮 1，受力为  $2T_1=G$ 。动滑轮 2，受力为  $2T_2=T_1$ 。动滑轮 3，得  $2F=T_2$ 。解上述三个方程，得  $F=\frac{G}{8}$ 。

上述两次答案不同，究竟哪个答案对呢？显然应该是  $F=\frac{G}{8}$  对。可见应用“重物和动滑轮的总重由几股绳子承担，提起重物所用的力就是总重的几分之一”的结论是有条件的，这就是只有一根绳子穿在滑轮组中间。图中画出的这种情况中，它的重物和动滑轮是由三根绳子共同承担的，所以只能用力平衡原理来求解。

## 二、习题类型

1. 判断示意图上的支点，动力，阻力，动力臂，阻力臂。
2. 利用杠杆平衡条件  $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$ ，求  $F_1$ 、 $F_2$  或  $l_1$ 、 $l_2$ 。
3. 判断哪些是杠杆，哪些是轮轴。
4. 计算  $\frac{F_2}{F_1} = \frac{R}{r}$  式中的未知量。
5. 会计算滑轮组中有关习题。根据动滑轮上绳子股数，求拉力的大小是物重的几分之几；已知拉力及滑轮组情况求物重。
6. 会画滑轮组中绳子绕法的图示。

## 功和能

### 一、疑难分析

1. “对使用任何机械都不能省功”的理解

我们在理解“使用任何机械都不能省功”这句话时，要知不能省功并不等于不费功。确切的认识应是使用机械做的功是大于或等于不用机械直接对物体所做的功。实际上由于摩擦等阻力的存在而造成一定的消耗（称为额外功），所以使用机械非但不省功而且费功。既然使用机械做功不但不省功而且要费功，那么为什么还要使用机械做功呢？因为使用机械能改变力的大小、方向或距离，这就会提供相当大的方便，所以我们宁可费些功也仍然愿意使用机械。

## 2. 对于“能”的概念的理解

一个物体能够做功，我们就说它具有能。除此之外，能还可以定义为“表示物体做功本领大小的物理量”，也可以定义为“能是物质运动的一般量度。”第二种定义说明，对于一个运动状态，有一个唯一确定的能量值，所以能量是一个状态物理量。当物质的运动形式发生转变时，能量形式同时发生转变。

## 二、习题类型

1. 会判断物体是否做功。
2. 根据公式  $W = F \cdot S$  进行计算。
3. 计算  $p = \frac{W}{t}$  式中的有关量。
4. 利用功的原理公式  $W_{\text{动力}} = W_{\text{阻力}}$ ，计算物重、高度等。
5. 根据公式  $\frac{F}{G} = \frac{h}{l}$ ，计算斜面省力的题目。
6. 根据机械效率  $\eta = \frac{W_{\text{有用}}}{W_{\text{总}}} \times 100\%$ ，计算  $W_{\text{有用}}$ ， $W_{\text{总}}$  和  $\eta$  等。
7. 判断物体是否具有能，若有，它是什么能。
8. 计算一些综合题。

## 光的初步知识

### 一、疑难分析

#### 1. 光的反射定律能否简化为“反射角=入射角”

学生初学光的反射定律时，常认为只要有反射角=入射角就能说明问题了，不必写出反射定律的具体内容。

学生画的光路如右图所示。从平面上看，用入射光线与界面的夹角定义为入射角，反射光线与界面的夹角定义为反射角，只要入射光线确定，再加反射角=入射角，反射光线的位置就确定了。但是光线是在三维空间中射向某一确定面的，如果用上述判别法，得到的反射光线的位置却是无数

个，如左图所示，这就违背了实验结果。因此入射光线和反射光线之间还要确定法线，三线（入射光线、反射光线、法线）共面，而且法线居中；再根据反射角=入射角，才能正确地反映实验结果。因此，光的反射定律决不能简化为反射角=入射角。

## 2. “光在同种媒质中是直线传播的”有无条件限制

经过太阳附近的光线要经受太阳引力场引起的偏离，所以“光在同种媒质中是直线传播的”是有条件限制的。

## 3. 光线的会聚、发散与透镜对光线的会聚、发散，两者不能混为一谈

右图中(A)表示一束会聚光线。(C)表示一束发散光线。(B)中有一组入射光线a，一组射出光线b，中间虚线表示透镜。所谓透镜对光线的会聚作用可理解为射出光线相对入射光线向透镜主轴靠拢。(D)中与(B)同样表示a、b光线，中间虚线也是透镜，这里射出光线相对入射光线偏离透镜主轴。

4. 一束平行光射到凹镜中，由于光的反射将会会聚到焦点，可不是会聚到凹镜的反射球面的球心。

一条光线射到球面上某一点，它将反射，若把入射点附近极小面当作平面，则球半径是法线，反射光线与入射光线相对法线对称，所以反射光线不可能经过球心，则反射光线只能会聚到凹镜的焦点而不是球心。

## 二、习题类型

1. 利用光的直线传播、光的反射、折射现象等规律解释现象。
2. 利用平面镜、凸透镜的特点作图。
3. 计算光速、光通过的路程和光通过的时间等。

## 热膨胀 热传递

### 一、疑难分析

1. “条件相同时，固体膨胀最小，气体最大。”是有条件的

物体的体膨胀是指  $V_t - V_0 = \beta V_0 t$ ，其中  $V_0$  是  $0$  时的体积， $t$  是温度从  $0$

增加到  $t$  时的增量， $\beta$  是体胀系数， $\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}$ 。当  $V_0$ 、 $t$  相同时，固

体的 最小，气体的 最大。所以条件相同是指  $0$  时体积相同，温度的增量相同。

2. 火炉能作热源，冬季用火炉取暖，放在火炉旁的物体会被烤热，这两处热传递的方式的不同

冬季用火炉取暖：热源是火炉，也就是高温物体，整个房间的空气是低温物体，传热的媒介物是空气。传热的方式是空气受热膨胀上升，冷空气下降形成对流。

放在火炉旁物体被烤热：热源是火炉，也就是高温物体，火炉旁的物体是低温物体，传热的媒介物，如果是空气的传导，但因空气是热的不良导体，所以不会很快变热，因此主要不是靠传导。如果利用空气流动，只能由下向上形成循环，火炉旁的物体也不会很快变热，所以也不是靠对流，那只能是辐射传热。

3. 两个物体发生热传导，决定热传递快慢的因素。

当构成物体的材料一定时，两个物体的温度差越大，单位时间里从高温物体传给低温物体的热量越多；当两个物体的温度差一定时，如果用导热性更好的材料做物体，则单位时间里从高温物体传给低温物体的热量越多。可见两个物体发生热传导时，决定热传递快慢的因素是物体的导热性和温度差。

## 二、习题类型

1. 辨析概念中常见错误：(1) “一切物体热胀冷缩”与“一般物体热胀冷缩”的正确与错误。(2) 中空物体与实心物体的热膨胀的异同。(3) 鉴别与温度有关的现象。(4) 识别体温计的测温范围。(5) 固体在温度改变时，产生很大力的前提。

2. 根据热传递的方向，找出热源的位置。

3. 辨析热现象中那些是利用热传递的现象，那些是防止热传递的现象。

## 热 量

### 一、疑难分析

1. 热量与温度的区别

温度是表示物体的冷热程度，它是一个状态量。热量则是在热传递过程中一个物体获得或失去内能的多少，它是一个过程量。正因为两者表示的是不同的物理量，所以不能用温度去代替热量。

2. 为什么不能用“某物体含有多少热量”来表示热量？

因为热量是在热传递的过程中发生的量，它不是包含在某一种状态里的量，因此不能用“含有多少热量”来表示。

3. “温度总是由高温物体传到低温物体”这句话是错误的

温度是反映某一状态下物体的冷热程度，而“传到”则表示有一个过



程，可见这句话的前半句与后半句讲的不是同一物理量之间的关系，所以是错误的。

## 二、习题类型

1. 区别温度和热量的概念题。
2. 辨析燃烧值、比热是物质的特性之一的题目。
3. 热量的各种类型的计算题。
4. 利用“混合法求比热”实验中的题目。

## 物态变化

### 一、疑难分析

1. 晶体的熔解和凝固图象能直观表示的物理量和物理过程

A——实验开始加热时的温度

B、C——晶体的熔点

E、F——晶体的凝固点

D——晶体在实验过程中最高温度

G——实验结束时的温度

AB——升温过程（物质处于固态，吸热）

BC——恒温过程（物质处于固液共存态，吸热）

CD——升温过程（物质处于液态，吸热）

DE——降温过程（物质处于液态，放热）

EF——恒温过程（物质处于固液共存态，放热）

FG——降温过程（物质处于固态，放热）

B C ——熔解时间

E F ——凝固时间

O——开始加热时刻

B ——开始熔解的时刻

C ——熔解完毕的时刻

E ——开始凝固的时刻

F ——完全凝固的时刻

G ——停止加热的时刻

2. 自然界中物态变化的成因

在地面：露——属于液化，是夜晚，草、木、石块等固体辐射热量，使其附近的空气达到露点，水蒸气在草、木、石块上凝结成水珠。

霜——属于凝华，是夜晚露点低于  $0^{\circ}\text{C}$ ，水蒸气直接变成冰。

在空中：雾——属于液化，是空气的温度降到露点，水蒸气便凝结在尘埃上。

云——高层空气温度降到露点，水蒸气有的凝结成小水滴，有的凝华成小冰晶。

雨——在一定条件下，小水滴和小冰晶体积增大到一定程度时会下落，在下落过程中冰晶溶解成水滴，与原来的水滴一起下落。

雪——如果露点低于  $0^{\circ}\text{C}$ ，则水蒸气直接凝成雪。

雹——如果雨在下落时骤然遇到  $0^{\circ}\text{C}$  以下的冷空气，雨便凝成冰块，在地面再遇向上的风暴，空气中的水蒸气便凝在冰块的四周下落，遇冷冰块外又结一层冰，这样上下运动，冰块很大便形成雹。

说明：未饱和的空气，如果使它的温度逐渐降低，则相对湿度逐渐加大，最后达到饱和，达到饱和时的温度叫做露点。

## 二、习题类型

1 利用晶体的熔解和凝固图象来判断晶体的名称及有关的物理量和物理过程。

2. 通过已知的现象，判断物态变化的种类。

3. 已知物态变化的方式，找到相应的实例。

## 分子热运动热能

### 一、疑难分析

1. 分子间的引力和斥力是同时存在的

(1) 从左图中可理解分子间的引力和斥力同时存在，当引力=斥力时，分子间的距离  $r$  正处于  $r_0$  处；当  $r < r_0$  时，显斥力； $r > r_0$  时，显引力。

(2) 分子间的引力和斥力是同时存在的。下图中两个小球代表两个分子，小球分别用弹簧和橡皮带连接起来，其中弹簧是受压缩的，而橡皮带是受拉伸的。当分子间不受外力的压缩和拉伸时，两分子间的距离称为平衡位置。当分子间受到外力压缩时，分子间距离缩短，斥力  $>$  拉力，显示出分子斥力。当分子间受到外力拉伸时，分子间距离拉长，斥力  $<$  拉力，显示出分子拉力。

2. 从能的转化的角度来探讨改变物体热能的两种方法

在一般情况下，当系统状态发生变化时，做功和传递热量往往是同时

存在的。根据能量转化和守恒定律，则有  $Q=E_2-E_1+A$ （其中  $Q$  为外界对系统传递的热量， $E_2-E_1$  为系统内能的增量， $A$  是系统对外作的功，）；也可表示为  $E=Q+A$ ，即系统内能的增量=外界对系统传递的热量+外界对系统做的功。

讨论：当  $Q=0$ ， $A \neq 0$  时， $E=A$ ，即系统内能的增量=外界对系统做的功。

当  $A=0$ ， $Q \neq 0$  时， $E=Q$ ，即系统内能的增量=外界对系统传递的热量。

## 二、习题类型

1. 辨析概念：（1）分子运动论的基本内容。  
（2）区别热运动、热能、温度三个不同的概念。  
（3）从现象中区别改变热能的两种不同方法。
2. 举例说明热能和机械能的互换。
3. 有关热量和做功之间转换的计算题。

## 热 机

### 一、疑难分析

#### 1. 热机效率

热机的效率是热机做有用功所消耗的能量与所消耗的燃料完全燃烧所放出的能量之比。

热机的功率大，只表明单位时间里热机做的有用功多，并不表明热机的效率高。在单位时间里已知热机所消耗的燃料完全燃烧所放出的能量，而未知有用功的情况下，也是无法判断热机效率的高低的。

#### 2. 内燃机里的曲轴和连杆的作用

内燃机里的曲轴和连杆是把活塞的往复运动变成曲轴的转动，以便输出动力。

#### 3. 内燃机曲轴上的大飞轮的作用

飞轮的作用是贮存做功冲程中活塞传递的机械能，在做功冲程之外的时间里，飞轮靠惯性继续转动，带动曲轴、连杆和活塞，完成排气、吸气和压缩三个工作冲程，飞轮的惯性还能使曲轴转动更加平稳一些。

## 二、习题类型

1. 热机的共同特点，热机的四个冲程，汽油机和柴油机的区别等概念

的辨析。

2. 关于热机效率的计算题和概念辨析题。
3. 区别热机效率和热机的功率。

## 简单的电现象

### 一、疑难分析

#### 1. 导电与带电是不同的

带电是指物体具有吸引轻小物体的现象。

导电是指在外加条件下电荷可以通过物体的一种性质。

#### 2. 区分电路中的电流方向、导线中的电流方向和电荷的实际运动方向

电路中的电流方向要包括电源内部的电流方向，是从电源的正极经外部回到负极，再由电源内部负极流向正极。

导线中的电流方向是从电源正极流向负极。

判断电荷的实际运动方向，必须分析清楚实际运动的电荷是正电荷还是负电荷，若是正电荷，则与电路中电流方向相同；若是负电荷，则与电路中电流方向相反。

#### 3. 把电路图画成实物连接图的规律

首先在电路图中由电源正极出发找出一条电流通路，接着在实物图中找到相应的元件，按照电路图中这一条电流的方向，用笔线把电路连通，再在电路图中看是否还有第二条（或第三条）电流通路。若有的话，再用同样的方法接通实物图。

### 二、习题类型

1. 判断物体是否带电。
2. 判断两个带电体相互接触后能否中和。
3. 区分导体、绝缘体和半导体。
4. 确定电流方向或电流效应的种类。
5. 熟悉电路元件符号。
6. 识别电路种类：串联电路和并联电路。
7. 将电路图变成元件连接图，或将实物连接图变成电路图。
8. 实验题：连接串、并联电路，并知道电键如何控制电路中的用电器。

## 电流的定律

### 一、疑难分析

### 1. 正确理解公式 $I = \frac{Q}{t}$ 中的 $Q$

公式  $I = \frac{Q}{t}$  中的  $Q$  是指导电溶液中总的电荷数，它是正离子和负离子的总和。

### 2. 安培表和伏特表的读数

如下图所示电路中，当电键闭合时，安培表读数表示什么？伏特表的读数表示什么？若无意中将安培表和伏特表的位置对调了，将出现什么情况？

安培表的读数表示通过电灯的电流强度，伏特表的读数表示安培表和电灯的电压总值，由于安培表可以看作一个低电阻，所以  $U_{AB}$  就可以近似看作  $U_{L0}$ 。反之，从右下图中看到伏特表和安培表位置对调，由于安培表本身电阻很小，伏特表可看作一个高电阻，所以流过蓄电池和安培表的电流很大，将损坏安培表和蓄电池。而流过伏特表和电灯的电流很小，伏特表指针偏转很小，电灯不发光。

### 3. 滑动变阻器的连接

下面是将滑动变阻器连入电路后的结构示意图和电路图，请标出电路中电流的路径。若滑动变阻器的滑片  $P$  向左移动时，另画一示意图说明接入电路里的电流路径和电阻、电流强度变化情况。

上述中图箭头所指为电流路径。在变阻器中的电流走向为  $A \rightarrow P \rightarrow D$ 。

上述右图所示为滑动变阻器的滑片  $P$  向左移动时的电流路径。在变阻器中电流走向为  $A \rightarrow P \rightarrow D$ 。此时因为  $AP$  较短，当材料选定，横截面积相同时，长度越短，电阻越小，这时电阻变小。因为电源电压  $U$  不变（忽略电源内部电压降落），电路中的总电阻变小，则电流强度将变大。

## 二、习题类型

1. 计算电量、电流强度，或进行单位换算。
2. 应用公式  $I = \frac{Q}{t}$ ，求  $I$  或  $Q$  或  $t$ 。
3. 测定电路中的电流强度  $I$ ，及各部分用电器两端的电压  $U$ 。
4. 利用公式  $I = \frac{U}{R}$  计算有关习题。
5. 用滑动变阻器改变电流强度。
6. 利用串联、并联电路的特点求  $I$  或  $R$  或  $U$ 。
7. 计算一些简单的综合题。

## 电功 电功率

### 一、疑难分析

#### 1. $W=IUt$ 与 $W=I^2Rt$ 式子的适用范围

$W=IUt$  式子适合于任何一种类型的用电器，利用欧姆定律  $I = \frac{U}{R}$  将

$W=IUt$  式变形的  $W=I^2Rt$  及其他形式 ( $W = \frac{U^2}{R} \cdot t$ )，只适用于纯电

阻电路。即只适用于把全部电能转变成内能的电路，如电阻器、电烙铁等。公式  $W=IUt$  则适合于任何一种类型的用电器，包括电动机（主要是把电能转化为机械能）、电解槽（主要是把电能转化为化学能）等除把部分电能转化为内能外还转化为其他形式的能的用电器。事实上，用  $W=IUt$  计算得到的电功是用电器所消耗的总功，包括电能转化成其他形式的能的总和。

2. 根据纯电阻用电器的功率  $P=IU = \frac{U^2}{R}$  得到的  $R = \frac{U^2}{P}$  适用的几个

方面：

(1) 如果已知额定电压  $U$ 、额定功率  $P$ ，可通过  $R = \frac{U^2}{P}$  求出用电器的电阻  $R$ 。

(2) 如果实际电压为  $U$ ，此时的实际功率为  $P$ ，也可通过  $R = \frac{U^2}{P}$  求出用电器的电阻  $R$ 。

(3) 若两个用电器额定电压相等，则  $R_1 \cdot P_1 = R_2 \cdot P_2$ ，即  $\frac{P_1}{P_2} =$

$\frac{R_2}{R_1}$ ，则可知额定功率大的电阻小。

#### 3. 比较电流通过两灯泡所做的功

(1) 设两灯泡的电阻分别为  $R_1$ 、 $R_2$ ，将其串联后接入  $U$  伏的电源上，经过  $t$  秒，电流通过  $R_1$ 、 $R_2$  分别做多少功？总功是多少？

(2) 将其并联后接入上述同一电源（220V），通过相同时间  $t$  秒，电流通过  $R_1$ 、 $R_2$  分别做多少功？总功是多少？

(3) 比较上述两种情况下电流做的总功的大小。

(1)  $R_1$  与  $R_2$  串联，由  $I_1=I_2=I$ ， $U_1+U_2=U$ ，得

$$U_1 = I_1 R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U, \quad I = \frac{U}{R_1 + R_2},$$

$$U_2 = I_2 R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U。$$

$$\text{则 } W_1 = I_1 U_1 t = \frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2} U^2 t, \quad W_2 = I_2 U_2 t = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} U^2 t, \quad W = \frac{1}{R_1 + R_2}$$

$$W_{\text{串}} = W_1 + W_2。$$

由此可见，在同一电路里电流做的总功等于各串联用电器做功之和。

(2) 同理， $R_1$  与  $R_2$  并联，由  $U=U_1=U_2$ ，得

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}, \quad I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad \text{则}$$

$$W_1 = I_1 U_1 t = \frac{U^2}{R_1} t, \quad W_2 = I_2 U_2 t = \frac{U^2}{R_2} t, \quad W = \frac{U^2}{R} t。$$

$$W_{\text{并}} = W_1 + W_2。$$

由此可见，在同一电路里电流做的总功等于各并联用电器做功之和。

因此，不论哪种电路，电路里各用电器做功之和就是总功。

$$(3) \quad \frac{W_{\text{串}}}{W_{\text{并}}} = \frac{U^2}{R_1 + R_2} t / \left( \frac{U^2}{R} t \right) = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} < 1, \quad \text{所以并联时电}$$

流做的总功大。

## 二、习题类型

1. 利用公式  $W=IUt$ ，求  $W$ 、 $I$ 、 $U$  或  $t$ 。
2. 利用公式  $P=UI$  及额定电压、额定功率，计算  $I$ 、 $R$  或  $P$ 。
3. 利用公式  $W=Pt$ ，求  $t$ 、 $P$  或  $W$ 。
4. 利用公式  $Q=I^2RT$ ，求  $Q$ 、 $I$ 、 $R$  或  $t$ 。
5. 综合各种规律的习题。

## 电磁现象

### 一、疑难分析

1. 用安培定则(一)确定电流方向和电流周围的磁力线方向之间的关系

直导线在空间可以有三种放置方法，可以从六个方向观察。我们可以用铅笔模拟导线，笔尖指向表示电流方向，然后将此铅笔穿过白纸片，让纸片与铅笔垂直，这样就形成了电流与磁力线之间的模拟关系。然后可以

由上向下看，由下向上看；由左向右看，由右向左看；从前向后看，从后向前看。每观察一点就把通电导线和磁力线之间的关系描绘下来，加以记忆。六种情况如下图所示。

2. 用安培定则(二)确定通电线圈中电流方向、线圈的北极以及线圈中导线的绕法三者的关系

利用安培定则(二)可知，线圈中电流方向和通电螺线管的磁极之间符合右手螺旋法则。更进一步可以理解通电螺线管的北极不仅与电流方向有关，而且与线圈的绕向有关，即电流方向相同，线圈可以有两种不同的绕法，得到不同的北极指向，如左图所示。

## 二、习题类型

1. 已知磁极画出磁力线，或已知磁力线求磁极。
2. 利用安培定则(一)、(二)，求电流方向或磁场中某一区域或某一点的磁场方向。
3. 分析电磁继电器的工作原理。
4. 利用磁场对电流的作用或电磁感应现象的规律(左、右手定则)，分析电动机、发电机的工作原理。
5. 利用公式  $P=UI$ ，计算电动机、发电机工作时的  $P$  或  $U$  或  $I$ 。

## 用电常识

### 一、疑难分析

1. 照明电路中“进户线”、“总电度表”、“总闸刀开关”的用处
  - (1) 进户线：一般不包括三相电动机使用的动力线。它是从马路上的电网中将三相四线制的电线里引一根火线、一根地线进入用户，这两根线之间的电压为 220V。
  - (2) 总电度表：在实际照明电路中，从进户线引入用户时首先进入总熔丝盒，此熔丝盒是由电力公司安装而且用铅封住。它是限制该用户的总用电量。总电度表的功能是记录用户消耗了多少电能，以便支付电费。
  - (3) 总闸刀开关：起控制整个电路的作用。连接时要注意将静触头接在上方，动触头接在下方，防止有人在检修电路时闸刀因本身重自动合闸，造成意外的伤害事故。

2. 照明电路中的故障两则

- (1) 当电工把新建的房屋里的电路刚敷设完毕，检查电路是否有故障



时，常常用一个“校火灯头”（额定电压为 220V 的白炽灯）直接接到保险盒里两触头间，如发现白炽灯正常发光，请判断该电路是否有故障。

右图（a）是刚接好的电路。右图（b）中看到电压 220V 全部加在“校火灯头”上，而实际用户却没有电压（即  $U=0$ ），说明这新敷设的电路中一定有故障，即某处发生短路，因此必须检查全部线路。

（a）（b）

（2）在做电工实验时，发现照明电路中没有电，用测电笔量无论是与火线接触还是与地线接触，电笔中的氖管均发光，（左图）试问原因何在。

从现象分析，插座两头都应该与 220V 等电位，不仅火线经过电笔、人体与大地之间有一通路使电笔中氖管发光，就是地线也会因某种原因与火线连通变成与人体、大地连通的路，这样电笔中的氖管也会发光。应该检查地线是否与电源连通。

## 二、习题类型

1. 判断插座、开关、电灯的电路连接方法。卡口灯泡、螺口灯泡的电路连接法。

2. 计算照明电路中，装灯的个数，串联连接的条件。计算白炽灯正常发光时，每小时产生的热量，每小时消耗的电能，计算一个月应交的电费。

3. 已知照明电路中用电器的规格和数量，求保险丝或导线的规格。

4. 安全用电的常识：（1）安全电压；（2）触电种类；（3）安全用电原则；（4）照明电路使用时的注意点。

## 二、高中部分

### 力 物体的平衡

#### 一、疑难分析

1. 力的种类、力的作用效果和力的特征

力是物体间的相互作用。力一般可分为三种：场力（如电场力、磁场力、重力等）、弹力和摩擦力。在力学中常见的是重力、弹力和摩擦力。力的两个作用效果是：使受力物体发生形变和使受力物体的运动状态发生变化，即产生加速度。力是矢量，有三个特征（俗称三要素）：即力的大小、方向、作用点，可用矢量图示法表示。

2. 为什么不直接讲“重力就是地球对物体的吸引力”？

这是因为重力并不等于地球对物体的吸引力，重力与物体随地球自转所需的向心力之合力才等于地球对物体的吸引力。重力的大小随地理位置的改变而改变，重力的方向始终竖直向下。

### 3. 弹力的产生条件是什么？方向如何判定？

弹力产生的条件是直接接触并发生弹性形变，两者不可缺一，其方向必定与作用在物体上使物体发生形变的外力方向相反。

4. 摩擦力产生的原因比较复杂、至今未有定论。然究其原因，除了因接触面凹凸不平所引起的啮合作用外，分子间的吸引力以及因为电荷在接触面间的转移而引起的静电引力等都是不可忽略的原因。

### 5. 摩擦力的方向一定与物体运动方向相反吗？

相互接触的两个物体有相对运动或相对运动趋势时，产生在两物体的接触表面上阻碍相对运动或相对运动趋势的力就是摩擦力。但若见到“阻碍”两字就认定摩擦力的方向一定与物体运动方向相反，一定是阻力，那就错了。如放在卡车上的木箱，随卡车一起加速运动时，木箱受到的静摩擦力虽是阻碍它与卡车相对滑动趋势的，但该力却是动力，正是它使木箱获得了加速度。即使是木箱与卡车间发生了相对滑动，其滑动摩擦力仍是木箱获得加速度的动力，虽然该力仍是阻碍箱、车的相对滑动的。可见，摩擦力可以作动力，其方向也可能与物体运动方向一致。

### 6. 静摩擦力的大小及其方向的判断方法

滑动摩擦力在正压力与接触面性质确定后有一定数值，但静摩擦力不仅大小可以在零与最大静摩擦力  $f_m$  之间随物体受力情况的变化而改变，其方向也常是可变的。遇到静摩擦力方向难于判断时，可以用“假设接触表面接近光滑”的方法“化静为动”，用运动时滑动摩擦力的方向来替代静止时静摩擦力的方向，从而达到“化难为易”的目的。

### 7. 矢量与标量的根本区别是什么？

矢量是既有大小又有方向的物理量。但若以为“有正、负的量一定是矢量”就错了，如温度就有正负，但却是标量。矢量与标量的根本区别是在于它们的运算法则不同：标量的合成是代数法，矢量的合成是平行四边形法则。而且，平行四边形法则是适用于全体矢量的运算法则。

### 8. 力的合成和分解的特点

力的合成和分解，是力学上为了方便地解决问题而采用的一种重要的研究方法，其特点是：在维持力对物体作用效果不变的前提下，进行了一个力与一组力之间的相互替换。合力可以大于分力、等于分力和小于分力。力的分解的关键在于确定分力的方向。合力与分力的作用点相同。

### 9. 物体的平衡种类

物体的平衡状态包括静平衡与动平衡两类。静平衡有稳定平衡、不稳定平衡与随遇平衡三种状况。动平衡有匀速直线运动和匀速转动两种情况。

10. 力矩是使物体保持转动的原因吗？

没有转动的物体，若没有受到力矩的作用，将保持不转动状态；转动的物体，若没有受到力矩的作用，将保持匀速转动状态。物体的这种特性称为转动惯性。可见力矩的作用效果并不是维持转动，而是改变物体的转动状态：使静止的转动，使转动的静止或使之转动得更快或更慢。我们之所以不考虑转动轴的受力情况，其原因在于不论该力大小、方向如何，只要它通过转轴，其力臂就为零，力矩必为零，不会引起转动状态的变化。

## 二、解题方法及习题类型

### (一) 解题方法

#### 1. 受力分析的一般步骤

确定研究对象，单独画出研究对象（即受力物体）。

找出与研究对象相关联的所有其他物体，按所受的重力、弹力、摩擦力的顺序进行受力分析。

逐一正确合理地画出每个作用力的示意图。

检验有否做到“一个力不多，一个力不漏，一个力方向不错”的要求，若是力的图示还应达到，对标度而言，每个力的大小都准确的要求。

#### 2. 有关物体在共点力作用下平衡的习题的解答方法

图示法； 三角函数法； 几何法； 正交分解法等多种。但最重要的解题方法是正交分解法。

### (二) 习题类型

1. 检查力的基本概念及基础知识掌握情况的习题。

2. 已知物体处于共点力平衡状态，求物体所受的某些未知力的大小和方向。

3. 已知有固定转动轴的物体处于力矩平衡状态，求某些未知力的大小、方向或某些力的力臂。

4. 有关同时涉及以上 2、3 两类的小综合型习题。

## 直线运动

### 一、疑难分析

#### 1. 运动的绝对性与相对性

一切物质都处在永恒的运动之中，绝对静止的物体是不存在的，这就

是机械运动的绝对性，它是针对运动本身而言的。但要描述一个物体的运动，又必须研究它对于指定物体的位置是否发生变化来判断和描述，从这一意义上讲，机械运动又具有相对性。

## 2. 质点的概念

应该清楚，只有当物体仅作平动时，或在所研究的问题中，物体本身的大小与其运动范围相比差很远时，或物体作为总体来说其内部运动（如转动、振动等）对总体运动影响不大时，才能把物体当作一个有质量的点——质点来看待。实际上，质点是一种科学的抽象，一种理想化的模型。其特点就是把复杂的、具体的物体用简单的模型来替代，从而简化了它的条件，突出了主要因素，又便于找出其规律来。它是一种重要的科学研究方法。

## 3. “时间”和“时刻”的本质区别

“时间”是“一段时间”或“时间间隔”的简称，是时间长河中的一段间距，有长短区别；“时刻”是时间长河中的一个点，是时间间隔趋于零的一刹，无长短可计。实际应用中，几秒末、第几秒初、第几秒末等属于时刻，而前几秒、几秒内、第几秒内等均属时间。

## 4. “平均速率”是“平均速度的大小”吗？

速度的大小叫速率，但是不能认为平均速度的大小就是平均速率。因为，平均速度是指质点运动的位移与发生这段位移所用时间的比值，是矢量；而平均速率是质点通过的路程与所用时间的比值，是标量。而位移与路程是两个概念不同的物理量。

## 5. 平均速度、即时速度与速度平均值

平均速度只属于某段位移或某段时间，不同位移或不同时间内的平均速度一般不相同。用平均速度来描述运动的快慢，其精确程度随着平均速度所取的时间间隔的缩短而提高。如果我们把计算平均速度的时间间隔取得越来越小，趋向于零，那么平均速度也就趋向于即时速度了。这说明：平均速度有其对应性，即时速度有其瞬时性。

一般变速运动中，平均速度不等于速度平均值，只有匀变速直线运动中，平均速度才等于初速度 $v_0$ 与末速度 $v_t$ 的平均值，即
$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v_t)。$$

该式可利用速度图象证明之。

## 6. 加速度的概念

加速度是描述质点速度变化快慢（包括大小和方向）的物理量。它既不是速度 $v$ ，也不是速度的增量 $\Delta v$ ，而是速度的变化率 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ ，加速度的大小与方向和速度的大小与方向无关系可言。公式 $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ 中的加速度 $a$

只是指平均加速度 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ ，只有当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，才是即时加速度。若物体作匀

变速直线运动，其平均加速度的大小与方向和即时加速度的大小与方向一致。

#### 7. 怎样确定加速度的方向？

由定义式  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$  可知，加速度  $a$  的方向与质点运动速度的改变量  $\Delta v$

的方向是一致的。而由牛顿第二定律  $F=ma$  可知，加速度  $a$  的方向应与物体所受的合力  $F$  的方向是一致的。这两种方法前者称“运动学方法”，后者称“动力学方法”。

#### 8. 加速度恒定的运动，一定是直线运动吗？

加速度恒定的运动，是指加速度的大小与方向都不变的运动，或说是“匀变速运动”，但它决不只局限于直线运动，不少曲线运动（如平抛运动、斜抛运动等）也是加速度恒定的运动。

#### 9. 加速度很大的物体，其速度也一定很大吗？

加速度的大小，只与物体速度变化的快慢有关，而与速度的大小毫无关系。所以，加速度很大的物体，其速度可能很小（如子弹刚击发的瞬间）；同样加速度为零的物体，其速度可能很大（如高速匀速直线飞行的物体）；而沿加速度方向作加速运动的物体，当加速度方向不变，但数值逐渐减小到零的过程中，物体的速度仍在增加，只不过增加得越来越慢而已，当加速度减为零时，物体则有最大的速度。

#### 10. 运动的合成和分解

一个物体同时参与两个或更多的运动时，这些运动中的任一个都具有其独立性，都不会因为有另一个运动的存在而有所改变。所谓合运动，就是这些互相独立的运动的叠加的结果，这就是运动的独立性原理或运动叠加原理。据此，我们可以将运动合成和分解。位移、速度、加速度都可以合成和分解，它们都遵循矢量的合成和分解法则。要引导学生学会善于把一个复杂的运动看成几个简单的运动的合成来研究这一具有普遍意义的思想方法。

#### 11. 运动的相对性

同一物体相对于不同的参照系，其运动情况不相同，速度也不一样，这就是运动的相对性。如船（甲）相对于河水（乙）的速度为  $v_{甲对乙}$ ，河水（乙）相对于地面（丙）的速度为  $v_{乙对丙}$ ，则船（甲）相对于地面（丙）的速度  $v_{甲对丙}$  应按矢量合成法则，以  $v_{甲对乙}$  和  $v_{乙对丙}$  为邻边的平行四边形的对角线来表示。这里研究船的运动已牵涉到两个参照系。遇到这一类习题时，可运用以下解题原则：

原则一： $v_{甲对丙} = v_{甲对乙} + v_{乙对丙}$ 。

原则二： $v_{甲对乙} = -v_{乙对甲}$ ， $v_{乙对丙} = -v_{丙对乙}$ 。

## 二、解题方法与习题类型

## (一) 解题方法

### 1. 5个解题常用公式(适用于匀加速直线运动)

$$v_t = v_0 + at; \quad s = \bar{v}t = \frac{v_0 + v_t}{2} \cdot t;$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2; \quad s = v_t t - \frac{1}{2} at^2;$$

$$v_t^2 - v_0^2 = 2as。$$

上式中 $v_0$ 是初速度,  $v_t$ 是末速度,  $t$ 是运动时间,  $a$ 是加速度,  $s$ 是位移。以上5个公式中, 每一个公式都含有其中4个物理量, 可根据不同的已知条件, 灵活应用。

### 2. 解题心得点滴

学会灵活运用初速为零的匀加速直线运动的规律。

要善于运用运动学基本规律导出必要的推论。

充分运用示意图或图线来帮助开拓思路, 不少习题运用图线解题既形象又简便。

竖直上抛运动注意运用其“对称性”特征, 不少竖直上抛运动的习题都可巧妙地变换为自由落体运动来解。

### 3. 解题一般步骤

审清题意, 分清习题类型, 确定研究对象。

借助示意图或图线, 弄清各阶段运动性质, 抓住转折处运动特征, 详细分析物体运动全过程。

结合分析已知与未知条件, 选用确能反映各段运动特点的规律来列方程, 以解题方便为原则确定坐标系及其正方向。对于相关物体, 要依据相遇、追及、相距等具体情况下的时间、位移、速度等特点建立方程。

解方程或方程组, 并对答案进行验证和讨论。

### 4. 有关运动的合成与分解的习题的一般分析方法

确定研究对象, 选好参考系和坐标系。

判断研究对象相对于参考系所具有的所有运动。

列出(或画出)对应的分运动、合运动的矢量式或分运动的坐标代数式。

按矢量的合成或分解的方法求出合矢量或分矢量。

在涉及时间与位移的习题中, 充分运用运动的独立性原理与时间的同一性原理来解题。

## (二) 习题类型

1. 只涉及一个运动物体单一运动状态中的一段位移的简单习题。

2. 涉及一个运动物体单一运动状态中的多段位移的习题。

3. 涉及一个运动物体多个运动状态中的多段位移的习题。
4. 涉及两个以上的相关物体间的相遇、追及、相距等问题的习题。
5. 涉及物体运动的合成和分解的习题。

## 运动和力

### 一、疑难分析

#### 1. 牛顿第一定律的内涵与意义

牛顿第一定律是实验、推理的产物。它反映了物体在不受外力作用时将保持原有运动状态不变这一基本规律；揭示了任何物体都具有保持原有运动状态不变的特性——即惯性，因此该定律也叫惯性定律；在历史上第一次既深刻又科学地阐明了力的涵义：力并不是维持物体运动的原因，力的真正作用是使受力物体发生形变；改变物体的运动状态，是使物体产生加速度的外部原因。

#### 2. 牛顿第二定律释义

定律只适用于质点的运动情况。

定律明确告诉我们：力决不是产生速度的原因，即力与速度间毫无因果关系。

定律给予“质量”科学的定义：“在给定作用力下跟物体的加速度成反比的物理量”。体现了“质量是描写物体的属性的物理量”，即“质量是物体惯性大小的量度。”

定律深刻阐明了外力和加速度之间存在着下列关系：一是数量关系，即在物体质量一定的前提下，加速度的大小与外力（或合外力）的大小成正比。二是方向关系，即加速度的方向与外力（或合外力）的方向始终一致。三是瞬时关系，即加速度与外力（或合外力）同时产生，同时变化，同时消失。四是因果关系，即力是使物体产生加速度的原因，力是因，加速度是果。

#### 3. 惯性的概念

惯性是任何物体都具有的固有属性。

牛顿第一定律中所说的物体指质点，故惯性是质点的惯性，即仅指物体做平动的惯性。

不同物体的惯性大小不同，而物体惯性的大小，是通过人们改变其运动状态的难易程度表现出来的。

惯性是物质运动不灭的表现，存在于任何状态中。

#### 4. 从质量定义的不断深化中全面理解质量概念

“质量是量度物体所含物质多少的物理量”。这是较为通俗、直观的提法，它较易被初学者所接受。

牛顿定律表明“质量是物体惯性大小的量度”，被称为惯性质量。其大小体现了物体平动状态改变的难易程度，它应用惯性秤来量度。

万有引力定律表明“质量是物体产生引力场和受引力场作用的能力大小的量度”，被称为引力质量。通常用天平、杆秤称量出来的质量，实际上就是引力质量。

令自由落体加速度  $g = G \frac{M_{\text{地}}}{R_{\text{地}}^2}$ ，则物体的惯性质量在数值上等于物

体的引力质量。

质量不是恒定不变的，它与运动速度有关，其关系式为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

式中  $m$  是物体的运动质量， $m_0$  是静止质量， $v$  为运动速度， $c$  为光速。可见，运动速度越大，其质量也越大，而对低速运动物体，由于  $v \ll c$ ，则有  $m \approx m_0$ 。

根据爱因斯坦的质能公式  $E=mc^2$  可知：“质量可以作为物体所蕴藏的能量量度”。

5. 速度为零的物体一定处于受力平衡状态吗？

速度恒为零的物体是处于受力平衡状态。但若仅某一瞬时速度为零的物体，就不能认为它一定处于受力平衡状态中了。如竖直上抛运动在最高点速度为零，但受力却是不平衡的。

6. 物体的速度很大，其所受的合外力也一定很大吗？

对同一物体而言，它所受合外力大小只能说明物体获得的加速度的大小，但加速度与速度却无此类因果关系可谈。如汽车以最大速度匀速直线行驶时，其所受合外力却为零。

7. 物体的运动方向与所受合外力方向总是一致的吗？

运动方向指速度方向，而合外力方向只决定了加速度的方向，两者不是一回事，无关系可谈。如斜抛运动，其速度方向与合外力方向（即重力方向）始终是不一致的。

8. 若物体运动速率不变，则其所受合外力一定为零吗？

若只是速率不变，但其速度方向有变化，则物体所受合外力就不为零。作匀速圆周运动的物体就是一个典型的速率不变，合外力不为零的例子。

9. 同材料的等体积两球，一为实心，一为空心，从同一高度自由落下，则下落时间与落地速度都相同吗？

由牛顿第二定律可知物体下落的加速度  $a = g - \frac{f}{m}$ ，式中  $f$  为空气阻

力，它对于两球而言是相等的，则可知：实心球质量大，故加速度也大，下落时间短；而由  $v = \sqrt{2ah}$  可知，落地速度也大。只有当空气阻力不计时，两者才相等。



## 二、解题方法与习题类型

### (一) 解题方法

#### 1. 运用 $F=ma$ 解题的基本条件、基本思路及基本方法

基本条件：物体应可看作质点，故受力分析只考虑物体的平动情况而不涉及转动情况。

基本思路：先正确仔细分析物体的运动过程及这过程中各阶段物体的受力情况，然后以加速度  $a$  为桥梁，把动力学与运动学联系起来。

基本方法：一般都借助于“正交分解法”与“隔离体法”。解题关键在于“一个不多，一个不少，一个不错”地完成对所研究对象的受力分析（即受力图）。坐标  $X$  轴的正方向一般同加速度（或合力）的方向一致。

#### 2. 运用 $F=ma$ 解题的基本步骤

仔细审清题意，确定研究对象；选好参照系统，明了物理过程；分析过程阶段，理顺已知、未知。

巧妙隔离物体，正确分析受力；画出受力简图，标清  $a$ 、 $v$  方向。

正确选定坐标，标出力、角代号；根据运动定律，分别列出方程；若需补充方程，运动学中寻找。

完成单位统一，代入方程求解；证析结果正误，有时还需讨论。

### (二) 习题类型

1. 单一的求解加速度大小的简单习题。

2. 已知物体受力情况而求物体运动情况的习题。

3. 已知物体运动情况而求物体受力情况的习题。

4. 物体运动情况需运用分析、推理、讨论、假设等方法后才能获得正确结果的习题。

## 物体的相互作用

### 一、疑难分析

#### 1. 牛顿第三定律的内涵

牛顿第三定律强调的是两个物体间的相互作用。作用力与反作用力具有同性质、同存在、同消失、等大小、一直线、反方向的性质，它们互以对方为自己存在的条件，任何一方都不能孤立地存在，因此它们没有主、从之分，更不能说一个力是“起因”，另一个力是“结果”。作用力与反作

用力是分别作用在两个相互作用的物体上的力，决不是作用在同一物体上的两个力，因此决不会相互平衡成为一对平衡力！不论何种运动状态，不论作用时间长短，物体间的相互作用都遵循这一定律。

## 2．冲量和冲力的区别

力的冲量指的是持续施加在物体上的力对时间的累积作用，这种作用的后果是引起物体动量的改变；而冲力是剧烈碰撞的物体之间产生的一种短暂的、瞬息万变的相互作用力，它的作用结果是使受力物体产生加速度。把碰撞过程中各个时刻的冲力乘以作用的瞬间，然后把它们累积起来才等于这个过程中力的冲量。

## 3．速度和动量的区别

速度是运动学的量，描述物体运动的快慢和方向；动量是动力学的量，它是通过物体间相互作用而反映出来的一个用来描述物体机械运动大小的物理量。速度变化并不直接与力相联系，而动量的变化却直接与力的冲量相联系。

## 4．动量定理释义

动量定理是应用广泛的重要定理，尤其对于研究打击或碰撞问题具有特别重要的意义。但就定理而言，还要说明以下几点：

定理不仅反映了冲量和动量增量这两个不同物理量之间的数量关系，也反映了它们之间的方向一致性关系。但它反映的是力的时间累积效应。

定理中所说的“外力”是指作用在物体上的各个外力的合力。

定理对于直线运动和曲线运动，对于作用力是恒力、变力，各作用力同时作用或不同时作用均适用。

定理其实也是牛顿第二定律的另一种表达形式。

## 5．动量守恒定律释义

动量守恒定律是自然界最重要最普遍的规律之一，它揭示了当一个系统不受外力作用或所受合外力为零时，系统的总动量既不会增加，也不会减少，而是保持不变的这样一个客观规律。它也揭示了系统中物体之间的内力作用，不能改变整个系统总动量的这一规律。虽然系统内各个物体的动量均可能改变，但动量是物体机械运动的一种量度，物体动量的变化，只是反映了物体机械运动的转移，而动量在系统内转移过程中，始终保持系统总动量的守恒，这表明运动既不会创生也不会消灭。它深刻地从一个侧面反映了物质运动不灭这一普遍规律。

## 6．碰撞的种类

相对运动的物体相遇，在相互作用持续极短的时间内，物体运动状态发生了显著变化的过程，叫碰撞。碰撞结果分两类：若碰撞体速度发生变化，但总动能没有损失或内部状态不变的这类碰撞称为“弹性碰撞”。若碰撞体总动能有损失，即内部状态发生了变化的这类碰撞称为“非弹性碰

撞”；在特殊情况下，相碰物体不再分离，这时称为“完全非弹性碰撞”。各类碰撞都遵守动量守恒定律和能量守恒定律，只是在非弹性碰撞中，有一部分机械能转变为其他形式的能量，因此机械能不守恒。高中阶段只考虑正碰的问题，不涉及斜碰问题。

## 二、解题方法与习题类型

### (一) 解题方法

#### 1. 应用动量定理解题的一般步骤

确定研究对象。

对研究对象进行受力分析，选择坐标正方向。

在分析基础上，分别写出研究对象所受合外力的冲量与初、末状态的动量，并根据动量定理列出方程。

判断：在处理打击或碰撞问题时，若冲力远大于其他作用力（如重力），就可忽略其他力，而以撞击力来代替合外力。

根据选择的坐标正方向，正确代入数据（注意正负），解方程求解。

#### 2. 动量守恒定律的具体适用范围

系统不受外力作用时。

系统受外力作用，但外力的合力等于零时。

系统受外力作用，但外力的合冲量等于零时。

系统所受合外力不为零，但外力远小于系统内作用力，外力可忽略不计。

作用于系统的合外力虽不为零，但合外力在某一方向的分量为零，或在该方向上，合外力分量远小于该方向的内力，则也可以在该方向上应用动量守恒定律。

#### 3. 用动量守恒定律解题的一般步骤

根据具体问题，选择系统范围。

对研究对象进行受力分析，分清系统内每个物体所受的内力和外力，判断是否满足动量守恒定律的条件。

建立坐标正方向，并以此为据应用定律列方程。列方程时应注意三点：一是定律等号两边分别是相互作用前后的总动量；二是动量是矢量，动量守恒定律是矢量表达式；三是定律中的速度都是相对于同一参考系的。

检查列式与数据代入的正确性，所取正负是否与所选正方向统一，然后解方程（组）求解。

检验结果的正确性。

## (二) 习题类型

1. 应用牛顿定律解的有关连接体问题。
2. 应用动量定理解释一些生活生产中的问题。
3. 应用动量定理解单一物体的简单动力学问题。
4. 应用动量定理、牛顿定律解的连接体问题。
5. 运用动量守恒定律解只有一个过程、只涉及两个物体相互作用的简单力学问题。
6. 运用动量守恒定律、动量定理、牛顿定律等解的涉及两个或两个以上物体相互作用前后有多个物理过程的力学综合题。

## 曲线运动 万有引力

### 一、疑难分析

#### 1. 向心力、向心加速度及其来由

曲线运动中，当质点所受合外力方向与速度方向垂直时，合力仅改变物体速度的方向，不改变速度的大小；当合外力方向与速度方向夹角小于 $90^\circ$ 时，作用力起改变速度方向并增大速度量值的作用；若合外力方向与速度方向夹角大于 $90^\circ$ 时，作用力起改变速度方向并减小速度量值的作用。为使研究方便，我们把合外力正交分解为与速度方向垂直的法向分力和与速度方向同一直线的切向分力。切向力产生的加速度称切向加速度，它的作用是只改变运动质点的速度大小；法向力产生的加速度称法向加速度，它的作用是只改变运动质点速度的方向，而不改变速度的大小。当质点作圆周运动时，其法向加速度指向运动的圆轨道的中心，所以又叫做向心加速度。产生向心加速度的力（即法向分力）叫做向心力，方向也指向质点运动的圆轨道的中心。质点作曲线运动时，其向心力（即法向分力）的“向心”可理解为指向曲线上各点的曲率中心。作匀速圆周运动的质点，只具有向心加速度，即该质点所受外力的合力必定就是使质点产生向心加速度的向心力。

#### 2. 地球上物体的重力与万有引力的关系

地球上物体的重力不等于地球对物体的万有引力，这是物体随地球自转所需向心力正来自于万有引力的缘故。地球对物体的万有引力实际上是物体重力与物体随地球自转所需向心力的矢量和。设物体的质量为 $m$ ，处于纬度 $\phi$ 的位置，地球的质量为 $M$ ，半径为 $R$ ，自转角速度为 $\omega$ ，则应有 $F_{引} = G + F_{向}$ ，其中 $F_{引} = G \frac{Mm}{R^2}$ ， $G = mg$ ， $F_{向} = m\omega^2 R \cos\phi$ 。

地球上同一物体的重力从赤道到两极是逐渐增加的。其原因有二：一是赤道时 $\phi=0$ ， $\cos\phi=1$ ，即 $F_{向}$ 最大；二是地球赤道半径大于两极半径，赤

道上  $F_{引}$  最小, 根据  $G = F_{引} - F_{向}$  可得, 在赤道时,  $G = F_{引min} - F_{向max}$  是最小的, 而在两极,  $G = F_{引max}$  是最大的。又由于  $\omega^2 R \cos\phi \approx 0.025 \ll g$ , 故在精度要求不高的条件下用  $G = F_{引}$  还是可行的。

### 3. 对初学者在概念理解上的几个常见错误的分析\*

认为“匀变速运动一定是直线运动”, 而“平抛运动、斜抛运动的速度大小与方向时刻在改变着, 因此它们都是变加速运动”。这两种认识都是错误的。首先, 所谓“匀变速运动”, 就是加速度的大小与方向都是恒定的运动。平抛运动、斜抛运动的加速度都是恒定的: 大小等于  $g = 9.8$  米/秒<sup>2</sup>, 方向始终是竖直向下的。由此可见: 平抛运动、斜抛运动都是匀变速运动。这就是说, 匀变速运动既可以是直线运动, 也可能是曲线运动。

认为“匀速圆周运动是匀变速运动”, 这也是错误的。因为速度与加速度都是矢量, 不仅有大小, 而且有方向。作匀速圆周运动的质点, 其速度方向在时刻变化着, 即其向心加速度的方向也在时刻改变着, 因此, 匀速圆周运动是一种变加速运动, 其“匀速”两字只是“匀速率”的意思, 决不是“匀速度”的含义!

认为“向心加速度公式  $a = \frac{v^2}{R}$  和  $a = \omega^2 R$  是相互矛盾的。因为从  $a = \frac{v^2}{R}$  看,  $a$  与  $R$  成反比; 但从  $a = \omega^2 R$  看,  $a$  与  $R$  成正比, 这岂不矛盾吗?” 其实这两个公式并不矛盾。因为在公式  $a = \frac{v^2}{R}$  中,  $a$  与  $R$  成反比是以  $v$  不变为先决条件的; 而在公式  $a = \omega^2 R$  中,  $a$  与  $R$  成正比则是以  $\omega$  不变为条件的。

## 二、解题方法与习题类型

### (一) 解题方法

#### 1. 解平抛运动习题的关键

运用运动独立性与等时性原理, 把运动分解为水平方向的匀速直线运动及竖直方向的自由落体运动来解。

#### 2. 解匀速圆周运动习题的一般步骤

选择研究对象, 分析受力情况, 画出受力图。

确定圆周运动平面及圆心位置, 建立坐标系。一般以物体位置为原点, 指向圆心的矢径方向为  $X$  轴的正方向。

弄清楚向心力的来源, 写出  $X$  轴正向的合力表达式。

根据牛顿定律及共点力平衡条件, 写出  $X$  方向上的  $F_{合} = m \frac{v^2}{R}$  或  $F_{合} = m\omega^2 R$  的方程及正交方向上的力平衡方程。

解方程或联立方程组，求出结果。  
分析解的合理性。有时还需结合牛顿第三定律及其他运动规律来求解。

## (二) 习题类型

1. 单一的平抛运动习题。
2. 一个物体作水平面内圆周运动的习题。
3. 连接体在水平面上作匀速圆周运动的习题。
4. 考虑物体作竖直面上圆周运动中某一位置受力情况的习题。
5. 同时含有平抛运动和圆周运动的习题。
6. 单一检查圆周运动中角速度、线速度、向心加速度、向心力的关系的习题。

## 机械能

### 一、疑难分析

#### 1. 功与功的两要素辨析

功是量度能量转换的基本物理量，虽有正负，却是标量。功的两要素是“力和在力的方向上发生的位移”，切不可笼统地说成是“力和位移”。“功”和“做功”也是两个不同的概念：“功”是一个物理量，而“做功”则是指一个过程。“功”只有在“做功”的过程中才有意义。那么“某物体具有多少功”，“某物体得到（或失去）了多少功”之类的说法都是错误的。

#### 2. 即时功率和平均功率，额定功率和实际功率，有用功率和额外功率的区别

平均功率是一段时间内所做总功 $W$ 与时间 $t$ 的比值（ $\frac{W}{t}$ ），也可用力 $F$ 与平均速度 $\bar{v}$ 的乘积（ $F\bar{v}$ ）来计算。而即时功率则是用力 $F$ 与即时速度 $v_{\text{即}}$ 的乘积 $F \cdot v_{\text{即}}$ 来计算的，它也是以这一时刻为中心的极短时间里的平均功率。当然，功率也必须是力的方向上做功的功率。

额定功率是动力机械正常工作时允许发出的最大功率。超过额定功率，工作机械会熄火、损坏甚至烧毁。已知额定功率，就能求出一定牵引力条件下的最大速度，或某一速度下运行时允许的最大牵引力。但机械可以在小于额定功率的情况下运行，这时机械发出的功率称为实际功率。

机械为了做功目的所做的功的功率叫有用功率。机械克服摩擦等阻力而损耗的功率称额外功率。有用功率与额外功率之和就是机械的总功率。机械效率就是有用功率跟总功率的比值。

### 3. 能和势能的相对性

速度 $v$ 相对于某一参照物而言的,对不同的参照物,其速度大小也不一定相同,因此动能的值具有其相对性。零势能参考平面可以任意选择,故势能中的高度 $h$ 的值会随零势能面的选择不同而改变,由此可见,势能的相对性更为明显,也更为普遍。

### 4. 动能定理

动能定理是描述做功跟物体动能变化关系的规律,即合外力对物体所做的功等于该物体动能的增量。表达式为 $W_{\text{外}} = E_K$ 或 $W_F - W_f = E_K$ 。式中 $W_F$ 表示动力做的功, $W_f$ 表示克服阻力做的功, $W_{\text{外}}$ 表示合外力做的功, $E_K$ 表示动能的增量,是末动能与初动能的差。该定理无论外力是恒力还是变力,也无论物体运动轨迹是直线还是曲线,都是适用的。

### 5. 为什么重力势能有正负,弹性势能只有正值,而引力势能只有负值?

零势能面可以任意选择,只要物体位置高于零势能面,其势能为正;物体位置低于零势能面,其势能就为负。

弹性势能的零位置选在没有形变时的平衡位置,表达式为

$$E_{\text{弹}} = \frac{1}{2} Kx^2,$$

$x$ 为离开平衡位置的距离,不论 $x$ 是正还是负,其平方后均为正值,故弹性势能之值必为正值。

引力势能的零位置选在无穷远处,其表达式为 $F_{\text{引}} = -G \frac{Mm}{r}$ ,所以引力势能之值均为负值。

### 6. 动量和动能的区别

物体的动量 $mv$ 与动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 都是物体机械运动的一种量度,但每一种量度各适用一定的范围。当物体以保持机械运动的方式进行运动的传递,用动量 $mv$ 来量度,如碰撞中,物体动量的转移,反映了物体机械运动的转移。若物体运动方式并不局限在机械运动的范畴,而是从一种运动形式转变为另一种运动形式时,则需用动能来量度, $\frac{1}{2}mv^2$ 是表示机械运动转化为其他形式的运动的能力来量度机械运动。可见,两者适用范围不同,所以并不互相矛盾。而且动量是矢量,动能是标量。

## 二、解题方法与习题类型

### (一) 解题方法

#### 1. 应用动能定理解题的一般步骤

根据题意要求,考虑计算方法,确定研究对象。

明了研究对象的运动过程，分析其受力情况，画出受力图。

分别（或综合）列出各力（或合力）对研究对象所做的功。

列出研究对象的初动能与末动能。

利用动能定理列方程求解。

## 2. 应用动能定理解题的注意事项

若研究对象在运动过程中受力情况不明，则不能运用动能定理解题。

解题中应抓住始、末两个状态下的动能，不必考虑过程中运动状态如何变化以及变化性质。

物体受到几个先后不同作用的力做功，可用每个力做功的代数和来替代合力做的功。但尽量运用合力做的功求解。

若研究对象为一个物体，无论重力功和弹力功，都属外力对物体所做的功的范围。

对于连接体，也可分别对其中每一物体依据动能定理列方程后，联立求解。

在解题中还常需运用运动学、动力学等其他知识作为解题的辅助手段。

## 3. 机械能守恒定律的适用条件

系统完全不受外力和非保守内力的作用。

一切外力和非保守内力对系统作的功均为零。

一切外力和非保守内力对系统作的功的总和为零。

## 4. 用机械能守恒定律解题的一般步骤

明确研究对象（系统），分析系统中物体受力情况。

判断哪些力做功，哪些力不做功，哪些物体参与了动能与势能的相互转化，最后判断是否符合机械能守恒定律的条件，若满足条件，则按下面步骤进行。

选择零势能面，确定哪些是初态物理量，哪些是末态物理量，找出物理量之间的各种等量关系。

正确列出机械能守恒定律的方程式并解出结果。

## （二）习题类型

1. 能用动能定理或机械能守恒定律一步解得结果的、只具简单运动过程的习题。

2. 能用动能定理或机械能守恒定律或其他定律列方程解联立方程组求解的习题。

3. 除运用动能定理或机械能守恒定律外，还需综合运用其他多方面力学规律，并需仔细分析才能明了的、具有复杂物理过程的力学综合习题。



## 机械振动和机械波

### 一、疑难分析

#### 1. 机械振动与简谐振动

一个物体（或物体的一部分）做机械振动时，它总是在一定的位置（平衡位置）附近往返运动不已。这一事实本身就表明：在振动过程中物体不断受到一个指向平衡位置的作用力——回复力的作用，而且物体受到的摩擦足够小，能使振动维持一段时间。

简谐振动是指回复力跟位移大小成正比、且总是指向平衡位置的机械振动。

#### 2. 简谐振动的特点

回复力  $F$  满足条件  $F = -Kx$  ( $K$  为比例常数,  $x$  为位移)。

位移、速度、加速度分别满足方程： $x = A\cos(\omega t + \varphi)$ ； $v = -\omega A\sin\omega t$ ； $a = -\omega^2 A\cos\omega t$ 。式中  $x$  是位移， $A$  是振幅，角频率  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ （其中  $f$  为振动频率， $T$  为振动周期）， $\varphi$  为初相位。

周期  $T$  满足  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$  ( $m$  为振子质量， $K$  为比例常数)。

振动能量满足条件  $E = \frac{1}{2}KA^2$  ( $A$  为振幅)。

### 二、解题方法与习题类型

#### (一) 解题方法

##### 1. 证明简谐振动的一般步骤

明确研究对象，画出研究对象偏离平衡位置后的受力图，判定是否存在回复力。

写出回复力的表达式（通常是几个力的合力）。

看力  $F$  与位移  $x$  的关系是否符合正比关系， $F$  与  $x$  的方向是否恒相反，从而判定是不是简谐振动。

若不是严格的正比关系，则通过近似变换，进一步判析近似条件下是否可看作简谐振动。

##### 2. 解题中的注意点

应用单摆振动周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$  解题时要注意： $L$  是有效摆长，

不一定是绳长； $g$  不能呆板地理解为重力加速度，应该看作摆动体的“视

重”重力加速度；若处在“超重”或“失重”情况下，或受到“浮力”、“电场力”等力的作用时， $g$  会变化的。

解答涉及到振动图象和波动图象的习题，必须从图象的物理意义出发，对给出的波动图象，结合传播方向确定媒质中各质点的运动方向，然后才能决定一段时间后的波动图象。若波的传播与质点运动方向均未知，则要考虑两种可能，习题可能就有两个解甚至两个通解。

## (二) 习题类型

1. 检查本单元基础知识掌握情况的习题。
2. 简谐振动的有关证明题与运用  $F=-Kx$  的计算题。
3. 运用单摆周期公式解答的习题。
4. 运用振动图象与波动图象来解答的习题。
5. 与前面力学知识联系密切的力学综合性习题。

## 分子运动论 热和功

### 一、疑难分析

#### 1. 对温度的理解

温度是表示物体冷热程度的物理量，这只是对热现象表象的描述而已。对分子运动的研究表明：物体的冷热决定于物体内部分子的热运动。温度越高，分子的无规则运动越激烈，这就将温度这个宏观量与分子的微观运动联系起来。现在我们说：“温度是物体分子平均动能的量度”（严格说温度应是物体分子平均平动动能的量度），它揭示了温度的实质（不仅适用于气体，也适用于液体和固体）。应知道，温度是大量分子热运动的集体表现，平均动能正是一个对大量分子而言的统计平均值。对于个别分子，说它有多高的温度是没有意义的。

#### 2. 关于物体内能的改变

做功和热传递都能改变物体的内能。但是，做功是其他形式的能转变成内能的过程，而且做功既可改变物体的内能，又可以改变物体的机械能；热传递只能通过热量的传递来改变物体的内能，它只是内能的转移而已。因此，两者不仅改变内能的本质不同，而且它们也只有在“改变物体内能”这个前提下才是“等效的”。

关于“热量”，它只是在热传递过程中物体内能变化的量度，是一个过程量，决不是物体内能的量度。

#### 3. 热功当量

热功当量的含意是相当于单位热量的功的数值。 $J=4.2$  焦耳/卡的意义

是：传递给物体 1 卡的热量使它增加的内能，相当于对物体做 4.2 焦耳的功使它增加的内能一样。这里的“相当”决不是“相等”。

#### 4. 微观量与阿伏加德罗常数

阿伏加德罗常数是微观量计算的“桥梁”。设某种物质的摩尔质量为  $\mu$ ，密度为  $\rho$ ，阿伏加德罗常数为  $N$ ，则：

一个分子的质量  $m = \mu / N$ 。

一个分子的体积  $V = \mu / \rho N$ 。

一摩尔物质的体积  $V = \mu / \rho$ 。

单位质量中所含的分子数  $n = N / \mu$ 。

单位体积中所含的分子数  $n = \rho N / \mu$ 。

## 二、习题类型

1. 运用“分子运动论”分析、解释的有关习题。
2. 微观量的计算和运用微观量的计算。
3. 考查有关概念和利用有关概念解决问题的习题。
4. 运用热功当量、热平衡方程、比热等概念、规律进行的计算题。

## 固体和液体的性质

本单元的教学就是要抓住晶体与非晶体在形状、物理性质方面的不同和液体表面张力形成的原因这两个环节。

## 气体的性质

### 一、疑难分析

#### 1. 气体实验三定律在三种不同坐标中的图象

气体实验三定律分别反映了质量不变的理想气体在（1）等温状态（玻意耳 - 马略特定律）、（2）等容状态（查理定律）、（3）等压状态（盖·吕萨克定律）三种情况下状态量变化所遵循的规律。三定律在三种不同坐标中的图象如下图：

而  $p$ - $V$  图曲线与  $V$  轴围成的面积则表示气体所做的功。

#### 2. 理想气体

理想气体是一个理想化的物理模型。从宏观上看，理想气体是严格遵守三条实验定律的气体，其内能仅由温度决定而与体积无关。从微观上看，理想气体的分子大小与分子间距离相比可忽略；分子除碰撞一瞬间外，分

子间无相互作用力；而且碰撞是完全弹性碰撞。实际气体在温度不太低（与室温比较）、压强不太大（与常压比较）的情况下，可近似看作理想气体。

### 3. 理想气体的状态方程表达式及其推导公式

理想气体状态方程有两种表达式：

一定质量的理想气体状态方程：

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ 或 } \frac{pV}{T} = \text{恒量。} \quad (1)$$

应用时只要各对应量单位一致即可。

任意质量的理想气体状态方程，即克拉珀龙方程：对 1 摩尔的理想气体，有

$$pV = RT。$$

式中 R 叫普适气体恒量，当气体的质量为 1 摩尔时，对任何理想气体，常数 R 都是相同的。国际单位制中， $R = 8.31 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$ ；若 p 取大气压作单位，V 取升作单位，则  $R = 0.082 \text{ atm} \cdot \text{l} / (\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

设 n 摩尔理想气体的质量为 M，摩尔质量为  $\mu$ ，则有

$$pV = nRT \text{ 或 } pV = \frac{M}{\mu} RT。 \quad (2)$$

由方程 (1)、(2) 及密度公式  $\rho = \frac{M}{V} = \frac{\mu p}{RT}$  可推导以下公式：

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2}， \quad (3)$$

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} + \frac{p_3 V_3}{T_3} + \dots + \frac{p_n V_n}{T_n}， \quad (4)$$

$$pV = \left( \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n} \right) RT。 \quad (5)$$

(3) 式反映了压强、密度、温度三个物理量之间的关系，(4) 式、(5) 式反映了几部分气体从几个分状态合为一个状态（或相反）时各参量之间的关系。

### 4. 理想气体的内能

从微观角度看，由于理想气体分子之间无相互作用力，故无分子之间的势能。理想气体的内能是所含全部分子平动动能的总和。从宏观角度看，理想气体的内能仅由质量和温度决定，与体积无关。一定质量的理想气体，其内能只随温度而变化。

## 二、解题方法与习题类型

### (一) 解题方法

### 1. 压强单位换算

$1\text{atm}$  ( 大气压 ) =  $760\text{mmHg}$  =  $1.013 \times 10^5\text{Pa}$  =  $1.0336\text{kg/cm}^2$  ( 工业大气压 )  
=  $10.336$  米高水柱。

换算压强单位时，可利用上式，运用比例法而求得。

### 2. 应用气态方程解题的一般步骤

明研究对象：明确所研究的是哪一部分（或哪几部分）气体。

析状态过程：逐一分析研究对象的各状态，分析各研究对象状态变化的特点，弄清质量有无增减，有无不变的参量，还要分析不同研究对象的参量之间的制约关系等。

定气体状态：确定对象有几个稳定态，然后找出每一个状态下的各个参量。注意：气体的标准状态也是一个稳定状态，可资利用。这时  $p_0=1\text{atm}$ ， $T_0=273\text{K}$ 。一般确定  $V$ 、 $T$  容易，确定  $p$  常易错，应特别仔细。

选解题方程：根据实际情况选择合适的方程求解。

择应用单位：选用合理的使解题便捷的单位。

验结果正误：细心验证计算结果。如多解，则要选择合理的解；如单解，也要考虑解是否切合实际。

求一题多解：气态方程习题常有多种解法，要注意一题多解的训练，以扩大思维能力，寻求最佳解法。

## (二) 习题类型

1. 考查气体状态量与气体性质的基础知识的习题。

2. 判断气体状态变化过程中有关量的变化情况习题。

3. 只有一个稳定状态或只有一次状态变化的计算题。

4. 有关图线或要运用图线来解的习题。

5. 有两个（或两个以上）研究对象及有两次（或两次以上）状态变化过程的较为复杂的计算题。

6. 有关用气、漏气、充气等变质量问题的习题。

7. 与力学联系起来综合型习题。

8. 几种典型和常见的题目形式种类：

一端封闭玻璃管，正倒平斜多变换，研究被封气体长与短，正确计算压强是关键。

U型管类封与开，粗细长短盛液体，正确选择等压面，细析体积变化谜。

两个容器虽相连，中间有物相隔开，分别研究状态变化，抓牢两者压强联系。

变化气体等质量，弹簧砝码变压强，温度升降更无忌，百变状态方程解。

用气、漏气或充气，气体由此入他器，细析质量变化因，克拉珀龙运用灵。

## 电 场

### 一、疑难分析

#### 1. 库仑定律几点说明

公式 $F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 仅适用于真空，若两点电荷同时存在于介电常数为

$\epsilon$ 的同一均匀电介质中，应用公式 $F = \frac{Kq_1 q_2}{\epsilon r^2}$ 。

库仑定律是点电荷之间相互作用的基本定律，作用力方向取决于两点电荷的性质（同种电荷相斥，异种电荷相吸），其大小与其他电荷的存在与否无关。若一点电荷受到多个点电荷对它作用，则可分别求出各点电荷对它的作用力大小与方向后，利用矢量合成法求合力即可。严格地说，库仑定律只是对于观察者为相对静止的电荷间的相互作用规律。

#### 2. 电场、电场强度的几点说明

电场是电荷周围空间存在的一种特殊物质，电荷间就是通过它传递相互作用的作用力的。电场强度  $E$  是表示电场本身力的性质的物理量，是矢量，其大小、方向由电场本身决定，与检验电荷  $q$  无关。电场强度有三个计算公式：

$E = \frac{F}{q}$  为定义式，任何电场都适用； $E = \frac{KQ}{\epsilon r^2}$  只适用于点电荷形成

的电场； $E = \frac{U}{d}$  只适用于匀强电场。

#### 3. 电力线特性

电力线上每点的切线方向表示该点的电场强度方向。

电力线的密疏正比于电场强度的大小。

电力线起始于正电荷，终止于负电荷。

两条电力线在空间不会相交。

电力线必定与等势面垂直。

电力线方向必是电势降落陡度最大的方向。

#### 4. 电势能、电势的几点说明

电势能是电荷在电场中某点具有的势能，它由电场和电荷所共有，是标量，其正负、大小表示电荷在该点具有的电势能与零势能位置比较的相对量值。

电势是反映电场本身能的性质的物理量，由电场本身决定，与检验电荷无关，其大小必沿电力线方向降低。

电势正负规律：孤立正电荷形成的电场中，各点电势为正，且离电荷

越远，电势越低；孤立负电荷形成的电场中，各点电势为负，且离电荷越远，电势越高。匀强电场中，电势正负取决于零电势点的选择。

电势虽是相对的，但电场中任意两点的电势差却是确定的，与零电势参考点的选取无关

电势是标量。几个电场在同一点所产生的电势等于它们各自在该点所产生的电势的代数和。

#### 5. 处于静电平衡时的导体具有的性质

导体内部场强处处为零。

整个导体是等势体，导体表面是等势面。

导体表面上任何一点的场强都垂直于该点的表面。

导体内部没有净电荷，电荷仅分布在导体表面。

#### 6. 静电屏蔽

用一个空腔导体把外电场遮住，可使其内部不受电场影响。若把隔离内、外电场的空腔导体接地，就可以使内、外电场互不影响。

#### 7. 电场力做功的特点

电场力做功  $W = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = U_1 q - U_2 q = q(U_1 - U_2) = qU_{12}$ ，这一结论说明了电场力做功和电荷移动的路径无关。若电荷出发运动后最终回到出发点，则电场力做功为零。可见电场是一个保守力场。这样可便于计算，尤其对非匀强电场来说更能体现其优越性。

## 二、解题方法与习题类型

### (一) 解题方法

1. 判断分析有关电场力、电场强度的大小与方向，电势能、电势、电场力做功的大小及其变化情况时，可记住以下两句话，并学会灵活运用之：

正电荷顺电力线运动，电场力做正功；逆电力线运动，电场力做负功。负电荷顺电力线运动，电场力做负功；逆电力线运动，电场力做正功。

电场力对电荷做正功，电势能必减少；电场力对电荷做负功，电势能必增加。

#### 2. 解带电体在静电场中平衡问题的一般步骤

确定带电体为研究对象，分析受力情况，画出受力图。

根据各力特点及各力之间的关系列出各力大小关系式。

选择直角坐标系，把各力正交分解，并运用平衡条件列出方程或方程组。

解方程或方程组，求得结果。

#### 3. 解带电粒子在静电场中运动问题的一般步骤

分析研究带电粒子的受力情况，画受力图。

对各力大小分别用关系式列出。

判断分析其运动情况，有时可把较复杂的运动情况分解为两个直线分运动。

根据运动的特点，利用运动学、动力学等公式列出方程或方程组，并解出结果。

当题中只涉及始、末两位置的运动状态时，要充分利用动能定理或功能关系来解题，以简化运算过程。

讨论结果的合理性与正确性。

4. 如何讨论平行板电容器中电容  $C$ 、电量  $Q$ 、电势差  $U$ 、板间电场强度  $E$  的变化规律

以公式  $C = \frac{Q}{U}$ 、 $C = \frac{\epsilon S}{4\pi Kd}$ 、 $E = \frac{U}{d}$  为讨论的基础。

若电容器与电源始终相连，属电压  $U$  不变的情况，讨论步骤一般按  $C$   $Q$   $E$  的顺序。

若电容器充电后即与电源断开，属电量  $Q$  不变的情况，讨论步骤一般按  $C$   $U$   $E$  的顺序。

$C$  的变化一般由  $d$ 、 $S$  或  $\epsilon$  的改变而引起，不同原因常影响到  $E$  有不同的结果。

## (二) 习题类型

1. 讨论电场中各量之间关系的有关习题。
2. 研究带电体在电场中的平衡问题。
3. 讨论电荷的迁移、分布及电场中的导体处于静电平衡时的有关问题。
4. 研究带电粒子在电场中的运动问题。
5. 讨论平行板电容器中  $C$ 、 $Q$ 、 $U$ 、 $E$  等各量的变化规律问题。

## 稳恒电流

### 一、疑难分析

#### 1. 电阻的微观本质

导体对电流的阻碍作用叫导体的电阻。自由电子在定向移动过程中，要与金属正离子发生频繁的碰撞，形成了对自由电子定向移动的阻碍作用。

#### 2. 为何白炽灯基本都坏在通电的瞬间

一般认为白炽灯的灯丝为纯电阻。灯丝的电阻率随温度升高而增大，故灯丝的电阻也随温度的升高而增大。通过额定电压、额定功率而计算出



的电阻值是白炽灯在正常工作时（指在灯丝处于白炽状态下）的电阻值。在常温下，未点亮灯时用欧姆表测出的灯丝电阻阻值远小于正常工作时的电阻值。所以，在电灯刚接通的瞬间，电压相同，但灯丝电阻值小，此时的通电电流强度最大，由公式  $P=IU$  可知，此时电流的功率也最大，电灯最亮，发热功率也最大，所以此时的灯丝也最容易断。

### 3. 电源电动势释义

电源电动势在数值上等于电源没有接入电路时两极间的电压，它表征电源把其他形式的能转化为电能的本领。

电源电动势及其内阻都是表示电源特征的物理量，都由电源自身条件决定，与外电路性质、结构均无关。

电动势是标量。但为了研究问题的需要，我们规定由负极经电源内部指向正极的方向（即电势升高的方向）为电动势的方向。

电动势的产生是由于非静电力对电荷做功的结果。

### 4. 路端电压分析

由闭合电路欧姆定律可得路端电压的表达式：

$$U_{\text{路}} = \varepsilon - U_{\text{内}} = \varepsilon - \frac{\varepsilon}{R+r} \cdot r = \frac{\varepsilon R}{R+r} = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{r}{R}}$$

从以上表达式可知：外电路导通时，路端电压随外电阻的增大而增大，随外电阻的减小而减小；外电路断开时， $R \rightarrow \infty$ ，因此  $U_{\text{路}} = \varepsilon$ ；外电路短路时， $R = 0$ ，因此  $U_{\text{路}} = 0$ 。

### 5. 纯电阻电路与非纯电阻电路

纯电阻电路中，通过电流做的功全部转化为内能，这时电功和电热数值相等，即  $W = Q = UIt = I^2Rt = \frac{U^2}{R} \cdot t$ 。

非纯电阻电路中（如接有电动机、电解槽等用电器的电路），通过电流做功的过程，电能的一部分转化为电路的内能，另一部分转化为其他形式的能（如机械能、化学能等），这时电功和电热的数值是不等的。电功  $W = UIt$ ，电热  $Q = I^2Rt$ ，且必定有  $W > Q$ 。

### 6. 伏安法测电阻

设测量值为  $R_{\text{测}}$ ，真实值为  $R$ ，伏特表内阻为  $R_V$ ，安培表内阻为  $R_A$ ，对应电压为  $U_R$ 、 $U_V$ 、 $U_A$ ，对应电流为  $I_R$ 、 $I_V$ 、 $I_A$ ，则有

用安培表外接法时：

$$R_{\text{外测}} = \frac{U_R}{I_V + I_R} = \frac{U_{\text{并}}}{I_{\text{并}}} = \frac{RR_V}{R + R_V} = \frac{R}{1 + \frac{R}{R_V}}$$

可见，要使  $R_{\text{外测}} \approx R$ ，须满足  $R_V \gg R$  的条件。

用安培表内接法时：

$$R_{\text{内测}} = \frac{U_A + U_R}{I_R} = \frac{U_{\text{串}}}{I_{\text{串}}} = R + R_A。$$

可见，要使  $R_{\text{内测}} \approx R$ ，须满足  $R \gg R_A$  的条件。

### 7. 欧姆表刻度不均匀的原因

设欧姆表内电流表满偏电流为  $I_g$ ，内阻为  $R_g$ ， $R$  为调零电阻接入电路中的有效阻值， $\varepsilon$  为电源电动势， $r$  为电源内电阻，则有  $I_g = \frac{\varepsilon}{R_g + R + r}$ 。

当外接待测电阻  $R_x$  后，流过电流表电流为  $I_x$ ，则有  $I_x = \frac{\varepsilon}{R_g + R + r + R_x}$

很明显， $I_x$  与  $R_x$  并不存在正比的线性关系。再设当  $I_x = \frac{I_g}{2}$  时，可解得

$$R_x = R_g + R + r。$$

而  $(R_g + R + r)$  称为欧姆表的内阻，可见欧姆表的中间刻度值应等于欧姆表的内阻。当  $I_x = \frac{3}{4}I_g$  时，可解得

$$R_x = \frac{1}{3}(R_g + R + r)。$$

可见，欧姆表的刻度是不均匀的。

### 8. 电源效率何时最高

设  $P_{\text{出}}$ 、 $P_{\text{源}}$  分别为输出功率、电源功率， $\eta_{\text{源}}$  为电源效率，则有

$$\eta_{\text{源}} = \frac{P_{\text{出}}}{P_{\text{源}}} = \frac{IU_{\text{外}}}{I(U_{\text{外}} + U_{\text{内}})} = \frac{U_{\text{外}}}{\varepsilon} = \frac{R}{R + r}。$$

可见，外电压越高，或外电阻越大，电源效率越高。

### 9. 输出功率何时最大

$$P_{\text{出}} = IU_{\text{外}} = \frac{\varepsilon}{R + r} U_{\text{外}} = \frac{\varepsilon}{R + r} \left( \frac{\varepsilon}{R + r} \cdot R \right) = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2} = \frac{\varepsilon^2}{\frac{(R - r)^2}{R} + 4r}。$$

可见，当外电阻  $R$  等于电源内阻  $r$  时，电源的输出功率最大， $P_{\text{出m}} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$ 。

此时电源总功率为  $\frac{\varepsilon^2}{R + r} = \frac{\varepsilon^2}{2r}$ ，可见，此时的电源效率  $\eta_{\text{源}} = \frac{P_{\text{出}}}{P_{\text{总}}} = 50\%$ 。

## 二、解题方法和习题类型

### (一) 解题方法

#### 1. 解题基本步骤

分析电路结构，画出等效电路，理清用电器之间的串、并联关系，各电键、各电表的作用。

理清已知与未知，分析恒量与变量，明了电路变化的原因，理顺电路系列变化的推析过程。

找出已知与未知间的联系网络，再通过比较与分析选择一条由已知到未知的最佳通道。

根据以上分析，逐一列出方程（或方程组），并解出答案。

验证答案的正确性与合理性。

## 2. 解题心得小集

应用  $I = \frac{U}{R}$  解题时，三个物理量必须对应于同一段电路。

本单元习题常可用比例法解，应充分运用此法。

闭合电路中的电源电动势和内电阻一般均为常量，而外电阻值常因电键的通、断或变阻器的调节等而改变，从而使电流强度、电压等随之而发生变化。

凡题中提到“灯泡正常发光”，即表示灯泡两端电压和消耗功率均达到额定值，由此可用公式  $R = \frac{U_{\text{额}}^2}{P_{\text{额}}}$  算得灯泡正常发光下的灯丝电阻。

灯泡两端所加电压不同，灯丝电阻并不一样，但题目中通常认为灯丝电阻是不变的。

把电流表改装成伏特表要串联一个大阻值电阻起分压作用，可用  $U = I_g (R_g + R)$  计算，电压扩大量程的倍数  $n = \frac{U}{U_g} = \frac{U}{I_g R_g}$ ；把电流表改装成安培表要并联一个小阻值电阻起分流作用，可用  $I_g R_g = (I - I_g) R$  计算，扩大量程的倍数  $n = \frac{I}{I_g}$ 。

选用安培表、伏特表时，应考虑所测的电流、电压的最大值不能超出仪表的量程，以确保仪表不损坏。

求电路中变阻器起分压作用（作电位器用）时的消耗功率，因通过变阻器两部分的电流强度不同，需分两段单独计算消耗功率后再求代数和才行。

在分析电路中因外电阻起变化而引起的一系列量的变化时，要有很有据，有公式推析过程，切不可想当然。

纯电阻电路电功率可用公式  $P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$  中任一式计算；非纯电阻电路电功率一定要用公式  $P = IU$  来计算，但计算其发热功率时一定要用  $P = I^2 R$  来计算。

对于输电线路，因存在电阻  $R$ ，故输电中发热功率（即线路损耗功率）可用  $P_{\text{损}} = I^2 R = \frac{U_{\text{损}}^2}{R} = IU_{\text{损}}$  来计算。它也是电站输出功率  $P_1$  与用户得到的电功率  $P_2$  之差（ $P_{\text{损}} = P_1 - P_2$ ）。

(11) 在借助闭合电路的欧姆定律解题时，既要把闭合电路分解为各个部分加以考虑，逐段剖析电路的串、并联关系和进行有关计算；又要把电路的各个部分结合成为一个统一体加以考察，从总电流跟分电流的关系上，从电动势跟内、外电路电势差关系上，从电源消耗功率跟内、外电路消耗的电功率的关系上作出总体分析。

(12) 电路中某点接地，表示该点的电势为零。电路中有两点（或多点）接地，表示这两点（或多点）的电势相同。

## (二) 习题类型

1. 判断分析电路因外电阻变化而引起的一系列变化情况的习题。
2. 部分电路的分析与各量计算的习题。
3. 全电路的分析与各量计算的习题。
4. 考虑电表内阻对电路影响或含有电表改装计算的电路计算习题。
5. 含有电阻器分压电路及其功率计算的习题。
6. 以分析、计算含非纯电阻用电器电路的能量转换为主的习题。
7. 分析、判断电路故障的习题。
8. 黑匣子类习题。
9. 有关电路实验类的习题。
10. 与静电场相结合的综合性习题。

## 磁 场

### 一、疑难分析

#### 1. 磁力线特征

磁力线上每点的切线方向就是该点的磁场方向。

磁力线越密处，磁感应强度越大。

磁力线是闭合的曲线。

任两条磁力线在空间决不相交。

#### 2. 磁感应强度B及其定义式 $B = \frac{F}{Il}$

磁感应强度是描写磁场的力的性质的物理量。它的定义式是 $B = \frac{F}{Il}$ ，

对于磁场中某个位置， $\frac{F}{Il}$ 是个恒量，但决不能说B正比于F，反比于 $Il$ 。

该定义式只适用于在磁场中的通电导线是直导线，且跟磁力线互相垂直的这一特殊情况。

#### 3. 洛仑兹力计算式 $f=qvB$ 的应用说明

$f=qvB$  式中  $q$  是电量的绝对值。

洛伦兹力的方向，对正电荷来说，可用左手定则；若为负电荷，则受力方向与正电荷受力方向相反。

该式只适用于运动电荷的速度方向跟磁力线垂直的情况，在此情况下，洛伦兹力方向跟速度方向垂直。因此，洛伦兹力只改变运动电荷速度的方向，不改变其速度的大小，即洛伦兹力不会对运动电荷做功。

当运动电荷的速度方向跟磁力线的方向相交成  $\theta$  角时，洛伦兹力计算式应改用  $f=qvB\sin\theta$ ，此时运动电荷运动轨迹是等螺旋线。

## 二、习题类型

1. 有关磁场内通电导线的受力、平衡的习题。
2. 有关磁场内通电线圈的受力、平衡的习题。
3. 有关带电粒子在磁场中的受力、运动的习题。
4. 有关力、电、磁的综合题。

## 电磁感应

### 一、疑难分析

#### 1. 楞次定律释义

感生电流的磁场总是要阻碍引起感生电流的磁通量的变化，这就是楞次定律。其中，“阻碍”两字不能理解为是“相反”的意思，而是与“磁通量的变化”有关，若“磁通量不变”，也就无感生电流了。为此，具体运用时首先就要分清哪个是感生电流所形成的磁场，哪个是产生感生电流的磁场，它们的变化形式与情况如何，否则就无法解题。

#### 2. 法拉第电磁感应定律的两种表达式

表达式  $\varepsilon=Blv\sin\theta$  ( $\theta$  为  $v$  与  $B$  之间的夹角) 的物理意义是：感生电动势的大小与单位时间内导线切割磁力线的条数成正比。该式适用于直导线或部分电路，所求出的值可以是瞬时感生电动势的值。

表达式  $\varepsilon = n \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  的物理意义是：感生电动势的大小与穿过线圈的磁通量的变化率成正比。该式适用于线圈或整体电路，所求出的值是  $t$  时间内的平均感生电动势的大小。具体应用时，当线圈面积发生变化而磁感应强度不变时，表达式可写成  $\varepsilon = nB \frac{\Delta S}{\Delta t}$ ；当磁感应强度发生变化而面积不变时，表达式可写成  $\varepsilon = nS \frac{\Delta B}{\Delta t}$ 。

## 二、解题方法与习题类型

### (一) 解题方法

#### 1. 应用楞次定律判断感生电流方向的一般步骤

确定原磁场方向（即引起感生电流的磁场的方向）。

弄清原磁场的磁通量是增加，还是减小。

运用楞次定律，抓住“阻碍”两字本质，判断感生电流的磁场方向和原磁场方向是一致，还是相反。

根据感生电流的磁场方向，运用安培定则，确定感生电流或感生电动势的方向。

#### 2. 匀强磁场内转动线圈中的感生电动势和安培力矩的计算

设  $n$  匝矩形线圈从中心面（即线圈平面垂直于磁力线的位置）开始以角速度  $\omega$  匀速转动，线圈的长与宽分别为  $l_1$ 、 $l_2$ ，则当转过  $\theta$  角时：

线框中感生电动势的大小

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 2nBl_1v \cdot \sin\theta = 2nBl_1\omega \cdot \frac{l_2}{2} \cdot \sin\theta \\ &= nB\omega l_1 l_2 \sin\theta = nB\omega S \cdot \sin\theta.\end{aligned}$$

当  $\theta = 90^\circ$  时，线框有最大的感生电动势  $\varepsilon_m = nB\omega S$ 。

当线圈转过  $\theta$  角时，其安培力矩的大小为

$$\begin{aligned}M &= n \cdot 2 \cdot F \cdot \frac{l_2}{2} \cdot \sin\theta = n \cdot IBl_1 \cdot l_2 \cdot \sin\theta = I \cdot nBS \cdot \sin\theta \\ &= \frac{\varepsilon}{R} nBS \cdot \sin\theta = \frac{nB\omega S \cdot \sin\theta}{R} \cdot nBS \cdot \sin\theta = \frac{n^2 B^2 S^2 \omega \cdot \sin^2 \theta}{R}\end{aligned}$$

当  $\theta = 90^\circ$  时，有最大的安培力矩  $M_m = \frac{n^2 B^2 S^2 \omega}{R}$ 。

#### 3. 左手定则与右手定则选用规则

“求导体的运动方向用左手，求电流的方向用右手”，这种看法是错误的。它只看到了问题的表面而没有抓住实质。

正确的认识是：凡属磁场对电流作用的问题要用左手定则，凡属导体切割磁力线产生感生电流的问题要用右手定则。这里突出的是分析现象产生的因果关系。

从记忆效果出发，可记“左动右发”四个字。“左动”意指：左手定则属电动机原理，先有电、磁（是原因），后有运动（是结果）。“右发”意指：右手定则属发电机原理，先有切割磁力线运动（是原因），后有感生电流或感生电动势的产生（是结果）。

实际运用时，常常两个因果关系现象都存在，即两个定则都要用，这就必须对电流产生的原因进行质的探讨，弄清因果关系后才决定选用哪个定则解题。

## (二) 习题类型

1. 运用楞次定律, 右手定则, 左手定则, 安培定则进行单纯的判断性习题。
2. 导体在磁场中的运动问题。
3. 线圈在磁场中的转动问题。
4. 电磁感应中的功能问题。
5. 力、电、磁的综合题。

## 交流电

### 一、疑难分析

1. 交流电中感生电动势的最大值、有效值、瞬时值、平均值设线圈由中心面开始以角速度  $\omega$  作匀速转动, 则有:

$$\text{最大值 } \varepsilon_m = 2nBlv = nB\omega S。$$

$$\text{瞬时值 } e = \varepsilon_m \sin \omega t = 2nBlv \sin \omega t = nB\omega S \sin \omega t。$$

$$\text{有效值 } \varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{2} \varepsilon_m = \sqrt{2}nBlv = \frac{\sqrt{2}}{2} nB\omega S。$$

$$\text{平均值 } \bar{\varepsilon} = n \frac{\Delta \phi}{\Delta t}。$$

当线圈由中心面起转过  $90^\circ$  的过程中, 则有:

$$\bar{\varepsilon} = n \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{4nBS}{T} = \frac{2}{\pi} nB\omega S = \frac{2}{\pi} \varepsilon_m = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \varepsilon。$$

### 2. 理想变压器

理想变压器是实际变压器的理想模型, 指在变压过程中无能量损耗, 即总输入功率=总输出功率 ( $P_{\text{入}} = P_{\text{出}}$ )。当副线圈为一个时, 可表示为  $U_1 I_1 = U_2 I_2$ ; 当副线圈为多个时, 可表示为  $U_{\text{原}} I_{\text{原}} = U_{\text{副}} I_{\text{副}}$ 。不论副线圈为几个, 关系  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$  ( $n_1$ 、 $n_2$  为原、副线圈匝数) 始终存在。

### 3. 三相交流电四种接法

$$\text{Y-Y连接, 此时 } U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = U_L。$$

$$\text{Y- } \quad \text{连接, 此时 } U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}。$$

$$\quad \text{- 连接, 此时 } U_{\text{相}} = U_{\text{线}} = U_L。$$

$$\quad \text{- Y连接, 此时 } U_{\text{相}} = U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_L。$$

式中开始为发电机连接, 后为负载连接;  $U_{\text{相}}$  为相电压,  $U_{\text{线}}$  为线电压,

$U_L$  为负载电压。

## 二、习题类型

1. 有关交流电的基本特征与图象的习题。
2. 线圈在磁场中的匀速转动问题。
3. 三相交流电的连接及其特征量的计算问题。
4. 关于理想变压器的问题。
5. 关于远距离的输电问题。

## 电磁振荡和电磁波

### 一、疑难解析

#### 1. 电磁振荡过程中的电场能与磁场能

若不计一切能量损失，电磁场也不向外界传播能量，那么在电磁振荡过程中虽然电场能与磁场能之间不断地在相互转化着，但电场能与磁场能的总和保持不变。其中电场能的大小依赖电容器所带电量的多少，磁场能的大小是以电流的强弱来表征，因此当电流达最大时，即磁场能最大时，也应是电容器带电量为零（放电完毕时）、电场能为零的时刻。电磁振荡过程中，电场能随电容器的充、放电与电流方向的变化而作周期性的变化，磁场能随电流的强弱与方向的变化而作周期性的变化。

#### 2. 电磁波的形成条件

有人认为只要有变化的磁场就会在空间产生电磁场，这是错误的。因为若磁场是均匀变化的，则它只能产生稳定的电场，该电场周围就无法再产生变化的磁场了，电磁波当然无法形成。因此，只有当磁场周期性变化时（即交变磁场），才能产生周期性变化的电场，这电场又产生周期性变化的磁场，周而复始，就形成了电磁波。

振荡电路中，电容器的电场是按正弦规律周期性变化的，只要将电容器两极板拉开，组成开放电路，就能发射电磁波。

## 电子技术初步知识

本单元只要抓住二极管的单向导电特性及其原理和三极管的放大原理及电路，就能使全单元“活”起来。

## 光的反射和折射



## 一、疑难分析

### 1. 光的直线传播条件

光只有在真空中或同一种均匀媒质中是直线传播的，在非均匀同种媒质中光沿曲线传播，当光由一种媒质进入到另一种媒质时，光会偏转某一角度，产生折射现象。

### 2. 实像和虚像

实像：指是实际光线经反射或折射后会聚（或相交）而成的像，它可在屏上显示出来，也能用眼在一定区域直接观察到。

虚像：指实际光线经反射或折射后的发散光线的反向延长线相交而成的像，是实际上不存在的像，因此无法在屏上获得，只能用眼睛看到，当然，进入眼睛的还是实际光线。为什么虚像能用眼睛看到呢？这是因为发散光线经人眼的眼球折射后在视网膜上会聚后又变成了实像。对人眼而言，对物体、实像、虚像的感觉是一样的，因在视网膜上三者所成的都是实像。

### 3. 折射率两公式的涵义

若光从第一种媒质进入第二种媒质时，不论入射角的大小怎样变化，入射角  $i$  的正弦跟折射角  $r$  的正弦之比为—常数。这一常数等于第二种媒质对于第一种媒质的相对折射率，记作  $n_{21}$ ，其值也等于在第一种媒质中的

光速  $v_1$  对在第二种媒质中的光速  $v_2$  的比值。即  $n_{21} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$ 。若光是从

真空进入某媒质，则  $n = \frac{\sin i}{\sin r}$  的值也可看作是—该媒质的绝对折射率  $n$ ，当

然，它也等于光在真空中的速度  $c$  与光在该媒质中的传播速度  $v$  的比值。

即  $n = \frac{c}{v}$ 。

### 4. 密度较大的媒质并不一定是光密媒质

两种物质折射率相比较，折射率较大的叫光密媒质，折射率较小的叫光疏媒质。有人认为，两种物质相比，光密媒质的密度一定较大，这种认识是错误的。如酒精折射率为 1.36，而密度为  $0.8 \times 10^3$  千克/米<sup>3</sup>，水的折射率为 1.33，小于酒精，但密度却为  $1 \times 10^3$  千克/米<sup>3</sup>，大于酒精。由此可见，两种物质相比较，光密媒质的密度并不一定比较大。

### 5. 透镜成像规律

类别	物的位置	像的位置	物的性质	放大率	应用	
凸透镜	$u$	$v < f$	一点	$m=0$		
	$u > 2f$	$f < v < 2f$	倒立缩小实像	$m < 1$	照相机, 眼睛	
	$u=2f$	$v=2f$	倒立等大实像	$m=1$		
	$2f > u > f$	$v > 2f$	倒立放大实像	$m > 1$	幻灯机、电影机	
	$u=f$	$v$	不成像	/		
	$u < f$	$v < 0$	像物同侧	正立放大虚像	$m > 1$	放大镜
凹透镜	$u > 0$	$v < 0$ 且 $ v  < u$	像物同侧	正立缩小虚像	$m < 1$	近视眼镜片

从上表中可以看出：

放大率  $m$  是像高与物高之比，是线放大率 ( $m = \left| \frac{v}{u} \right|$ )。而面积放大率 (即像与物面积之比) 等于线放大率的平方 ( $m_{\text{面积}} = m^2$ )。

物与像移动的方向一致，但移动的速度大小不一样。

凸透镜的焦点  $F$  是成实像或虚像的分界点；两倍焦距处是像比物大或小的分界点。实像总是倒立的，且像和物分居透镜两侧；虚像总是正立的，且像和物位于透镜同侧。

#### 6. 透镜成像公式 $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ 的应用说明

公式中，若  $v < 0$ ，则为虚像；若  $v > 0$ ，则为实像。

公式中，凸透镜焦距  $f > 0$ ，凹透镜焦距  $f < 0$ 。

由于中学不接触虚物 ( $u < 0$ )，故物距  $u$  为正值。

#### 7. 几种现象浅析

晴天中午，在枝叶茂密的大树下可见到地面上许多圆形的光斑，这是太阳光线通过茂密树叶间的小孔隙在地面上形成的一个个太阳的像 (小孔成像原理)。

草上露珠有时看起来特别亮，这是光的全反射现象产生的。当阳光由空气射入水珠时，在一定角度上，有时光线又从水珠的另一个球面上射回，发生了全反射，所以看起来特别亮。

雨过天晴，天空出现的彩虹是阳光通过雨珠后产生色散现象所致。

在有水珠的树叶尖下，常看到一些叶子被烧焦的黄点，这是因水珠如同凸透镜，具有聚光作用，当太阳光照射水珠时，若叶子的某些点恰好在水珠的焦点上，叶子的这些点就被会聚的太阳光烘烤了。

## 二、习题类型

1. 有关检查基础知识的判断题。
2. 应用反射定律，折射定律来解答的习题。
3. 用透镜成像作图法解有关光路图的作图问题。

4. 有关光具选择或光具暗盒的习题。
5. 应用成像公式与放大率的知识来解的习题。

## 光的本性

### 一、疑难分析

#### 1. 光的频率决定光的颜色

不同颜色的光具有不同的频率，光的频率决定于光源，与媒质无关。色光在不同媒质中的颜色不变，经测定可知，光在不同媒质中的频率不变，而波长却要改变。可见，光的颜色决定于光的频率而不决定于光的波长。

#### 2. 光的物质性

光是一种物质，它具有波粒二象性，它是具有电磁波特性的光子。光子的能量  $E = h\nu$ ，决定于频率；光子的动量大小等于  $\frac{h\nu}{c}$ 。光子虽无静质量，但它有动质量，其大小为  $\frac{h\nu}{c^2}$ 。光还有光压作用等。可见，光是一种物质。

#### 3. 几种现象浅析

浮在水面上的油层在太阳光线照射下呈现七色彩纹，这是由于厚度不同的油膜的上下表面反射的同频率太阳光叠加后产生的干涉条纹。

透过羽毛看到的彩色条纹是光的衍射现象的结果，因为羽毛有极窄的细缝。

分析太阳光谱能知道太阳成分，但分析月亮光谱却无法知道月亮成分，因为月亮自身不发光。

物体温度由低逐渐升高时，其颜色常由深红变成黄色、绿色、紫色以至白光。原来物体在不同温度下，发出不同颜色的光，其中红色光温度最低、紫色光温度最高。所以，当物体的温度逐渐增高时，发出的光的颜色就会如此变化，当发出的光中包含有各色光时，即混合成为白光。

白色光源与墙间放一不透明的屏，屏上有一直径为几厘米的圆孔。当圆孔直径为几厘米时，在屏上可看到较大的圆形光斑；当圆孔较小时，看到较清楚的倒立的光源的实像（小孔成像）；当圆孔更小时，看到中心点周围许多彩色相间的圆形条纹（光的衍射现象），直到孔闭合后光线不能通过为止。

### 二、习题类型

1. 有关光现象、光本性的判断题、解释题。
2. 有关波长、频率、波速、光能、光颜色的计算题。

## 原子和原子核

### 一、疑难分析

#### 1. 原子核内无电子，为何衰变时能放出电子？

原子核发生衰变时会放射出电子或正电子，这是在衰变过程中产生的。在负衰变中，原子核内一个中子变成一个质子，同时放出一个电子（即 ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1H + {}_{-1}^0e$ ）。放出正电子的β衰变，是由于原子核内一个质子放出一个正电子而变成了一个中子（即 ${}_1^1H \rightarrow {}_0^1n + {}_{+1}^0e + \gamma$ ）。这就像原子从激发态向基态跃迁过程中会放出光子的道理一样。

#### 2. 质能关系式适用于宏观世界吗？

1905年爱因斯坦提出了质能关系式 $E=mc^2$ ，在讨论微观粒子的变化或在原子核反应中，应用它计算原子核反应中放出的能量。其实，质能关系式也适用于宏观物体，它是一个普遍适用的公式。只是由于在宏观世界中，这个质量变化太微小，完全可以忽略不计。如1千克的水包含的全部能量为 $E=mc^2=9 \times 10^{16}$ 焦耳。若把它温度升高1℃，其能量增加 $E=Q=4.18 \times 10^3$ 焦耳。其质量相应增加 $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = 4.6 \times 10^{-14}$ 千克，这一变化极微小，乃至目前测量技术还无法测量出来。

### 二、解题方法与习题类型

#### （一）解题方法

##### 1. 运用玻尔理论解题的注意点

在求解电子运动轨道半径时，可用 $r_n = n^2 r_1$ 公式，式中 $n$ 为量子数， $r_1 = 0.53 \times 10^{-10}$ 米，为电子最小轨道半径。

氢原子的电子绕核运动时，其向心力由电荷库仑力提供。

电子动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ，势能由定态理论求出，即 $E_p = E_m - E_n$ 。

原子物理中能量单位习惯用“电子伏特”。

氢原子的电子在各个可能轨道上运动的能量（包括动能和电势能）可由公式 $E_n = \frac{E_0}{n^2}$ 算出，其中 $n$ 为量子数， $E_0 = -13.6$ 电子伏特。

##### 2. 书写核反应方程的要求

熟记常用的粒子符号及电荷数与质量数。

写方程时必须遵守质量守恒、电荷守恒、能量守恒。

3. 解有关放射性元素半衰期的习题时，注意运用公式  $m_{\text{剩}} = \frac{m_0}{2^{t/T}}$ 。

式中  $m_0$  为衰变前的质量， $m_{\text{剩}}$  为衰变后的质量， $T$  为半衰期， $t$  为经历时间。

4. 计算质量亏损的一般步骤

算出核反应前各粒子的质量，再算出总质量。

算出核反应后各粒子的质量，再算出反应后总质量。

求出反应前、后的总质量之差，即质量亏损  $m$ 。

代入质能方程，算出释放的能量  $E = m \cdot c^2$ 。

## (二) 习题类型

1. 有关本单元科学发展的基本史实、重要实验、重要发现的问题。
2. 运用玻尔量子理论解的有关习题。
3. 关于核反应方程及其衰变规律、人工转变规律的习题。
4. 有关半衰期的习题。
5. 有关质量亏损与质能公式的习题。
6. 与力、电、磁相联系的综合型习题。

## (二) 中学物理实验教学指导

### 一、中学物理实验教学的作用

物理学是一门实验科学。观察和实验是物理知识建立的基础。物理实验就是创设条件使物理现象重现。观察和实验有利于培养学生手脑并用，有利于发展学生的创造能力。大纲规定，在物理教学中要加强演示和学生实验，培养学生的实验能力。教师在教学中要指导学生认真观察演示实验，指导学生自己动手做好分组实验，要求学生在日常生活中注意观察物理现象，创造条件多做一些课外小实验。

### 二、中学物理实验的分类

#### 1. 演示实验

##### (1) 作用

演示实验是指在课堂上配合教学内容、由教师操作表演的实验。演示实验有以下三个作用：由演示有关现象抽象概括出概念；在演示实验的基础上建立物理规律；演示物理原理应用于生活、生产中的实例。

下表是现行课本中，必学的演示实验统计数

初 中		高 中	
力 学	50	力 学	40
热 学	23	分子物理学和热学	8
电 学	37	电 学	43
光 学	7	光 学	14
		原子物理学	1
合 计	117	合 计	106

##### (2) 要求

教师要在课前作好充分准备，确保演示成功；演示前，要使学生明确演示目的，观察要求；演示时操作规范，现象清楚，能见度好，突出主要，淡化次要，使学生观察到鲜明的物理现象和学到规范的操作技能；演示后要引导学生揭示现象本质，培养学生观察和思维的能力。

#### 2. 学生实验

##### (1) 作用

学生实验是指有明确的实验目的、要求，在教师指导下，由学生自己动手的分组实验。学生通过分组实验，可以加深理解和巩固掌握已学的物理概念和规律，同时也训练了一定的实验能力。

##### (2) 要求

学会正确使用仪器进行观察、测量和读数；学会分析实验数据并得出正确的结论；了解误差的概念，能初步分析产生误差的因素；会写简单的实验报告。

现行课本安排的要求学生必做的实验数如下表

初 中		高 中	
力 学	7	力 学	9
热 学	3	分子物理学和热学	1
电 学	8	电 学	6
光 学	1	光 学 3	
		原子物理学	0
合 计	19	合 计	19

### (3) 辅导学生实验的要求

教师要在课前做好实验准备工作和学生分组组织工作，引导学生认真做好预习；实验时教师要想方设法让每个学生动手操作，要指导学生做好实验；实验后要让学生独立完成实验报告；要培养学生实事求是的科学态度、严谨的作风和勇于探索的精神，培养学生遵守纪律和爱护仪器的优良品质。

### 3. 课外小实验

#### (1) 作用

课外小实验是学生按照教师布置的要求或者学生自己提出要求，在课外用一些简单或自制的仪器、器材独立进行的实验。通过课外实验，扩大学生的知识，提高学习兴趣，培养独立工作能力。

现行课本安排的课外小实验数如下表

初 中		高 中	
力学	10 (其中有3件小制作)	力学	10
热学	5	分子物理学和热学	2
电学	7	电学	6 (其中有1件小制作)
光学	3	光学	2
		原子物理学	0
合计	25 (其中有3件小制作)	合计	20 (其中有1件小制作)

#### (2) 要求

实验的内容要有意义；实验的器材要简易，有的可以自己制作；实验的方法要简便；实验的过程要安全，确保不发生任何事故。

## 三、中学物理学生实验指导

学生实验可以激发学生学习物理学的兴趣，启发学生积极思维，使学生学会使用基本物理仪器的技能，培养和训练学生多种能力。教学中，教师要重视对学生实验的指导，切实提高学生实验质量。

学生实验主要分基本练习性实验、测定性实验、验证性实验和探索性实验四类，具体见下表：



分类	初 中		高 中	
	第一册	第二册	上 册	下 册
基本练习性实验	测量圆的周长和直径 (练习使用刻度尺) 用天平称物体的质量 (练习使用天平)	用温度计测量温度 (练习使用温度计) 用安培表测电流强度 (练习使用安培表) 用伏特表测电压 (练习使用伏特表) 用滑动变阻器改变电流强度 (练习连接电路和使用滑动变阻器) 组成串联电路和并联电路 (练习连接基本电路) 安装简单的照明电路 (练习安装照明电路) 安装直流电动机模型 (练习安装电动机模型)	练习使用打点计时器 (练习使用电磁打点计时器)	练习使用万用电表测电阻 (练习使用万用电表电阻档)
测定性实验	测定物质的密度 测滑轮组的机械效率	测定物质比热 用伏特表、安培表测电阻 测定小灯泡的功率	测定匀变速直线运动的加速度 用单摆测重力加速度	电场中等势线的描绘 (测等势点) 测定金属的电阻率把电流表改装为伏特表(测电表的内阻、量程)用安培表和伏特表测定电池的电动势和内电阻测量玻璃的折射率测量凸透镜的焦距
验证性实验	研究弹簧秤的刻度 研究物体浮在液面的条件		共点的两个力的合成 (验证共点的两个实验力合成的平行四边形法则) 验证牛顿第二定律 碰撞中的动量守恒 (验证动量守恒定律) 验证机械能守恒定律 验证波意耳-马略特定律	

分类	初 中		高 中	
	第一册	第二册	上 册	下 册
探索性实验	研究杠杆的平衡条件	研究凸透镜成像 研究萘的熔解过程	有固定转动轴的物体的平衡 (研究其平衡条件) 研究平抛物体的运动	研究电磁感应现象 用卡尺观察光的衍射现象 (研究狭缝宽度对衍射条纹的影响)

### 1. 基本练习性实验指导

这类实验一共有 11 个。其中 7 个是通过对某一量的直接测量来练习使用常用的基本量具，计有刻度尺、天平、温度计、安培表、伏特表、万用电表和电磁打点计时器等 7 种。另 4 个是练习安装基本电路和电动机模型。

#### (1) 基本量具的使用

使用要求：了解结构、原理；使用前要会观察量具的量程、最小刻度和零刻度的位置；会调节量具；会正确使用，会读数，会记录。

调节要求：对指针式仪表，如安培表、伏特表，使用前应检查表针是否停在左端“0”的位置（灵敏电流计应停在刻度表盘中间的“0”处），如不在该处，要用小螺丝刀轻轻转动表盘下边中间的调整定位螺丝，使指针指零（使用万用电表欧姆档测电阻，测量前，也要“调零”）；对天平，使用前要将底盘调水平、横梁调平衡；对电磁打点计时器，使用前要先检验周期的等时性，如有问题，要进行调整；对刻度尺，要检查尺的刻度起始端有否磨损。

测量要求：要根据测量需要达到的准确程度来选择量具；测量值不能超过量具的最大量程；要按照各个量具的使用方法正确测量。

读数要求：只能准确到最小刻度值，最小刻度值以下一位数字只是估计数。读数时，要求学生练习用目测估读出最小刻度以下一位的数字。

数据的记录和运算：使用任何一种量具，记录的测量结果，必须在数字后面写出所用的单位。在计算多次测量的平均值时，平均值的位数要与测量值的位数相同。计算时，先计算到比测量值多一位，然后四舍五入。在处理实验数据和进行加、减、乘、除运算后，最终结果只要取两位或三位。

误差：测量值与真实值的差异叫误差。从来源看，误差可以分成系统误差和偶然误差两种。

系统误差是由于仪器本身不精确、或实验方法粗略、或实验原理不完善而产生的。系统误差的特点是在多次重做同一实验时，误差总是同样地偏大或偏小，不会出现这几次偏大另几次偏小的情况。要减小系统误差，必须校准量具，改进实验方法和完善实验原理。

偶然误差是由各种偶然因素对实验者、测量仪器、被测物理量的影响

而产生的。偶然误差总是有时偏大，有时偏小，并且偏大和偏小的机会相同。因此，多次测量，取其平均值就能减小误差。

**刻度尺** 测量长度的基本工具。

**使用要点：**按测量需要来选择尺；只要测量方便，可选取尺的任一刻度线作为测量的起点线，不必非选零刻度线为起点线；使用厚刻度尺时，应使刻度接近、对齐被测长度；读数时，视线应与尺垂直。

**实验指导：**要训练学生的目测能力；对于一些不能直接用刻度尺测出的长度，要让学生自己想办法去解决。

**误差分析：**系统误差产生于仪器误差（即由于刻度尺刻度间过长、过短或刻度不均匀等造成）和环境误差（即由于温度的变化，尺热胀冷缩所造成）；偶然误差产生于读数，可多测几次，求得平均值，以减小误差。

**托盘天平** 天平是应用杠杆平衡条件原理制成的，用来测量物体质量的仪器。实验室常用的有物理天平和托盘天平。托盘天平结构简单、使用简便，但灵敏度较低，用于初中学生测量物体质量等实验。

**结构：**由天平盘、横梁、指针、底座四大部分组成。学生用天平，最大称量是 200 克，感量为 0.2 克。它没有 1 克以下的微量砝码（片），但装有可在横梁标尺上移动的游码。游码在标尺上每移动 1 分格，相当于在砝码盘（右盘）上增加 0.2 克砝码。对于质量小于 1 克的物体可直接用游码称量（右盘不放砝码，移动游码至横梁平衡，则游码在标尺上的示数即为物体的质量）。

**使用要点：**把天平放在水平桌面上，先将游码对准横梁标尺的零刻度线处，再调节横梁平衡；左盘放被测物，右盘加砝码，同时移动游码，直至横梁平衡；右盘的砝码总质量与游码所计的质量之和即为物体的总质量；必须用镊子取用砝码，用毕放回砝码盒；天平的左、右两盘不能互换，各组的砝码也不能互相借用、调换；被测物的质量不能超过天平最大称量。

**实验指导：**对微小物体的质量测量，可取相同的几个或几十个一起称量，称出它们的总质量，再求平均值，则该平均值即为单个物体的质量。

**误差分析：**为了消除天平横梁两臂不等带来的系统误差，可采取复称法（测量时称两次，一次把被测物放在左盘，砝码放在右盘；另一次把被测物放在右盘，砝码放在左盘，如果两次砝码的质量分别为  $m_1$  和  $m_2$ ，则被测物的质量  $m = \sqrt{m_1 m_2}$ ）；为减小称量中产生的偶然误差，可称量多次，求取平均值。

**温度计** 根据液体热胀冷缩性质制成的，用来测量物体冷热程度的仪器。实验室常用的水银温度计，测量范围为  $-39 \sim 357$ 。另外，还有酒精温度计，测量范围为  $-114 \sim 78$ ；煤油温度计，测量范围为  $-30 \sim 150$ 。

**使用要点：**被测物的温度不能超过温度计的测量范围；测量时，温度计的玻璃泡要与被测物充分接触，达到热平衡时方能读数；测液体温度时，

不能将温度计从液体中取出来读数，而应放在液体中读数；读数时视线应与液柱面所对的刻度线垂直；实验用温度计的最小刻度一般为 0.1 ，所以读数一般可以准确到 0.1 。

实验指导：不同的煤油（酒精）温度计，均一性较差，学生实验如采用煤油温度计，实验前应事先挑选一下，再发给学生测量；估测温度的实验应多做几次，以增强对冷热感受的区分程度，不断提高估测温度的能力；测量液体温度时，被测液体不能过少，以免散热过快、测温不准。

安培表和伏特表电学实验中两个常用仪表，分别用来测量电流强度和电压。

结构原理：磁电式仪表是根据磁场对通电线圈有磁力矩作用，使线圈偏转的原理制成的。在电流计上并联分流电阻，制成有一定量程的安培表；电流计上串联分压电阻，制成有一定量程的伏特表。实验用安培表有两个量程，分别为 0.6 安培和 3 安培，刻度盘上每小格的读数分别为 0.02 安培和 0.1 安培；实验用伏特表有两个量程，分别为 3 伏特和 15 伏特，刻度盘上每小格的读数分别为 0.1 伏特和 0.5 伏特。

使用要点：使用前要先检查、校验电表的零点；安培表应串联在被测电路中，伏特表应并联在被测电路的两端，电表的极性不能接反；要选择合适的量程，如果被测电位的电压或电流强度不能事先估计，可先把量程放在最大档，再接通电路试一下，观察指针偏转大小，以确定合适的量程。

实验指导：实验中，连接电路是关键，读数是难点，要增加练习次数，以达到熟练程度；要安排适合两个不同量程的实验电路，使学生能准确而熟练地读数；要养成“按电路图连接线路、按线路核对电路，待检查正确无误后再接通电路”的良好习惯。

误差分析：安培表、伏特表的刻度盘分格均匀，但磁电式仪表实际磁场的不完全均匀以及仪表结构上的其他原因造成了系统误差；两表的内电阻造成的系统误差；初中电学实验不考虑电表内阻对实验带来的误差，高中电学实验要进行误差的一般分析。

万用电表 是一种多用仪表，可测量多种量程的交、直流电压，直流电流和电阻等。

结构原理：由表头、测量项目和量程选择开关、欧姆调零旋钮和测试笔及插孔等组成。表盘上有标明交、直流电压，直流电流及电阻等各个量程的刻度。其电压、电流档各是多量程的伏特表、多量程的安培表电路的组合；直流电压档是交流电压档加以整流电路组成的电路；欧姆档的电路是根据闭合电路的欧姆定律制成，测量电阻，实际上是测量通过电阻的电流，其值用相对应的电阻值在刻度盘上直接标出，因此测量十分方便。

使用要点：测量前要检查、校正指针是否在表盘左端“0”处；测电阻时的步骤如下：“扳档” “调零” “测量” “读数”（注意，每调换一个量程，要重新调零）；测量时，只要将手同时接触被测电阻两端（以

免人体电阻并联而造成误差)，要将被测电阻与别的电路、元件和电源断开，以免测量不准甚至烧毁万用电表；用毕，应从插孔中取下表棒，把选择开关旋到交流电压量程的最大档（如 $\sim 500V$ 档）上，防止以后使用时因操作错误（如拿起表来不看何档就去测量交流电源电压）而烧毁电表。

实验指导：要选择多个不同阻值的电阻，练习使用不同量程的测量，练习读数并分析同一电阻在不同量程读数不尽相同的原因。

误差分析：欧姆档刻度不均匀，刻度分格从右向左越来越密，给读数带来困难，造成误差（可增加练习和选择合适量程来减小读数误差）；磁电式仪表表头结构造成的系统误差；对于刻度不均匀的欧姆档，标尺的不同部位对应的绝对误差不同，相对误差也不同，应选择合适的量程，尽可能使用标尺的中部（越往两侧，相对误差越大）；表内旧电池，电池电动势减小、内电阻增大，会引起误差；使用欧姆档测得的电阻误差较大，所以测量结果只取两位有效数字。

电磁打点计时器 一种使用交流电源的计时仪器。

通过研究打在纸带上点的间隔，可以研究带动纸带的物体的运动情况。是高中力学学生实验的主要物理仪器。

结构原理：由线圈、磁铁、振片等组成。接上 $4\sim 6$ 伏交流电源后，在交变磁场作用下，振片按 $50$ 赫的频率振动，振针每隔 $0.02$ 秒便在纸带上打出一个清晰的点。

使用要点：使用前，要调整好振针振动周期的等时性（确保打点周期的等时性），要调好振针的高度，平整纸带，变换复写纸的位置，使打点清晰；要使振针的振动稳定后再进行实验；每打完一条纸带，切断一次电源，防止线圈过热烧坏。

等时性的检验和调整：

检验 用自由落体运动的纸带来检验打点周期的等时性。当打点周期稳定在 $0.02$ 秒时，纸带上任意两个连续打点的位移差 $d$ 应为 $3.92$ 毫米（取 $g$ 为 $9.8$ 米/秒<sup>2</sup>）。

调整 松开振动片的固定螺钉，改变振动片的长度，当其振幅达最大时固定。这时振动片的固有频率与交流电频率刚好相同，打点周期的等时性最好。

实验指导：实验前一定要认真调试，以达到良好的等时性和打下清晰的点子；认真安装实验装置，确保纸带运动与被研究物体运动一致。

误差分析：系统误差产生于打点器的结构、装配所造成的打点周期的不等时；实验操作可产生偶然误差，这可重复几次实验，挑其中一次做得好的，以减小误差；在纸带上测量长度时，要用长尺一次测出，不要用短尺一段、一段测量后再相加，这样可以减小误差。

## （2）基本电路的安装

实验指导：实验前，要按电路图对照器材，搞清所使用的是什么电源，

分清电源的正、负极；连接电路时，要按照电路图，一般从电源正极开始，按电流流过的路径，把各元件一个个连接起来，最后连到电源的负极（对并联电路，应先连好干路，再把各支路并到共同的两个端点上）；电路连接的过程中，应将电键放在断开的位置；连接导线是一种基本技能，应将多股铜芯拧成一股，然后顺接线柱的螺帽旋紧方向，把导线绕到接线柱上（接线柱上如有垫圈，还需将导线夹在两个垫圈之间，然后再旋紧螺帽），且接线时要防止将绝缘层夹到接线柱去；接通电源前，要先核对电路，待正确无误后，方可将电源接上并把电键闭合；闭合电键后，如出现故障，应立即断开电源，再从电源的一个极出发，逐段检查原因；多次练习，达到正确和熟练两个要求。

滑动变阻器的使用指导：

连接方法：第一种是串联法，接通电路前，应把变阻器的滑片置于使变阻器连入电路部分的电阻最大（即电路电流为最小）的位置处。第二种是接成分压器，接通电路前，应把滑片置于使分压器的输出电压为最小的位置处。

使用注意点：使用前要先观察滑动变阻器铭牌上标明的电阻值和允许通过的电流最大值；使用时，在滑动变阻器阻值可调范围内，通过的电流不可超过允许的最大值；滑动变阻器的接线柱有3~4个（有的滑动变阻器金属棒的接线柱只有一个），接入电路时，接线柱不要接错。

## 2. 测定性实验指导

这类实验一共有13个。其中初中5个，测定5个物理量（密度、机械效率、比热、电阻和电功率）；高中6个，测定6个物理量（加速度、重力加速度、电阻率、电源的电动势和内电阻、折射率和焦距）。还有两个实验（电场中等势线的描绘和把电流表改装为伏特表），分别测定电势和电表的内电阻等物理量。

这类实验的特点是间接测量，即先用仪器测出有关物理量，再根据待测量与它们间的定量关系求得待测量。通过实验，学生可以巩固和加深对概念和规律的理解，可以学会有关测定的实验方法，掌握使用仪器的技能，并能进行误差分析。

### 初中

#### （1）测定密度

实验原理是应用密度公式求密度；实验关键是正确使用天平测质量和正确使用量筒测液体的体积、测不规则形状物体的体积。

使用量筒前要弄清该量筒的量程和每小格刻度代表的数值，观察时，视线要水平且与水面凹形的底部相对。

增加用测定物质的密度来鉴别物质的实验，以加深学生对密度是物质属性的认识。

#### （2）测定滑轮组机械效率

实验原理是机械效率的概念；实验关键是滑轮组的装配，弹簧秤的读数和弹簧秤、钩码拉动距离的测量。实验时，弹簧秤应匀速、竖直向上拉动，且在拉动过程中读数。为准确测得距离，可在一木板座上贴划有厘米刻度的白纸，竖在滑轮组后面，然后实验。学生要有分工，互相配合完成上述要求。多做几次实验，求出平均值，以减小实验误差。

### (3) 测定比热

减小误差的关键是实验过程中要尽量避免热量的散失。为此，必须注意实验程序不可颠倒；铜块投入量热器时，动作要快，搅拌要均匀，温度读数要适时；量热器中的水不能过多，以能浸没铜块为宜，水温要有较明显的升高，以利于读数。铜块加热要充分（15分钟），且应均匀。放入量热器前先抖动一下，除去附在铜块表面的沸水，以减小实验误差。实验时，热量损失不可避免，所以实验结果比真实值略小。

### (4) 测定电阻

伏安法测电阻的原理是欧姆定律。实验电路有两种，即安培表内接法和外接法，课本上的电路是外接法。误差分析：增加实验次数，求得测量的平均值，可以减小偶然误差。电表内阻对实验电路带来的误差是系统误差。用外接法时，由于伏特表内阻  $R_V$  的分流，安培表测出的电流比通过电阻的电流大些，计算所得的电阻值就比真实值小些；用内接法时，由于安培表内阻  $R_A$  的分压，伏特表测出的电压比电阻两端的电压大些，这样计算所得的电阻值就比真实值大些。待测电阻的阻值比  $R_V$  小得多时，可采用外接法，误差就小；待测电阻的阻值比  $R_A$  大得多时，可采用内接法，误差就小。实验用伏特表的  $R_V$  一般为几千欧，安培表的  $R_A$  一般为十分之几欧，当待测电阻为几十欧时，不论采用哪种接法，结果都相差不大。

### (5) 测定电功率

测定小灯泡的额定功率和实际功率时，一共要进行3次实验（其中，高于额定电压和低于额定电压各测一次）。要注意选择合适的滑动变阻器、小灯泡和电源，使它们互相配合。接通电路前，一定要使变阻器连入电路的电阻值达最大，以免一合电键就烧坏灯泡。

## 高中

### (1) 测定加速度

在钩码落地处应放置软垫或砂箱，以防撞坏；在木板的定滑轮前面，放一泡沫塑料块，以免小车撞坏滑轮。调整电磁打点计时器，使打点等时，减小计时误差。小车加速度取大些，每隔0.1秒取一个计数点，可在50厘米的纸带上清楚地取出7个~8个计数点，以减小长度测量时的相对误差。纸带上的点子应打得小而清晰，可减小误差。

### (2) 测定重力加速度

实验用的摆球密度要大（如用铜或铁球）、直径要小（小于2厘米），摆线的长度取1米左右，且要细而不易伸长。要使摆球在竖直平面内振

动，但不形成锥摆；摆角要小于  $5^\circ$ 。测量摆长时，下端应从球心量起。可用毫米刻度尺测量，读到毫米位。因误差主要来自时间的测量，计时要求较高，可在摆的平衡位置下面放一个标志物，计时要从平衡位置开始，因为此处摆速大，产生的计时误差较小。要采用倒数计数法来开动秒表，保证计数准确。误差分析：偶然误差来自摆长和摆动周期的测量，且以周期的测量为主；系统误差来自实验装置和摆动时所受阻力等因素，但系统误差远小于偶然误差，可不予考虑。测得的  $g$  值可有 3 位有效数字。要多测几次，求取  $g$  的平均值。

### (3) 测定电阻率

被测金属丝的选取：要选用电阻率大（如镍铬合金丝）的材料，直径在 0.4 毫米左右，电阻在 5 欧 ~ 10 欧之间。伏安法测电阻的电路应采用安培表外接法，以减小测量系统误差。实验时，电流应调节在 1 安以下，防止因温度升高而金属丝的长度和电阻率发生明显变化。用螺旋测微器测金属丝直径时，应在 3 个不同的位置上各测一次，求出平均值，测金属丝接入电路的一段长度时，应用米尺测量 3 次，求取平均值。要正确使用螺旋测微器，因为该实验误差主要来自于金属丝直径的测量。

### (4) 测定电池电动势和内电阻

被测电池的内阻要大些，以使路端电压变化明显。实验用的开关接触一定要紧密，以免有开关电阻附加在电源内阻上，影响测量的准确性。

用图线法可减少测量的偶然误差。测量的数据不可少于 6 组，且变化范围要大。为避免大电流放电而电池内部极化造成的电动势下降，实验时，应由大到小读数。每次读数要快，读完要立即断电。由于伏特表内阻的分流，安培表的读数就比流过电池的电流要小些，形成系统误差，使测量值  $\varepsilon < \varepsilon_{\text{真}}$ ， $r < r_{\text{真}}$ 。

### (5) 测量折射率

这是一种粗略的测法。为减小误差，应选用宽度在 5 厘米以上的玻璃砖，入射角可在  $15^\circ \sim 75^\circ$  范围内取值。大头针的位置要靠近玻璃砖，两个大头针之间的距离要远些，针要钉得与白纸垂直，使确定的光路准确。用细铅笔作图，力求精确。

### (6) 测量焦距

在小灯外做一遮光罩，上开一三角形小孔，外糊半透明纸，作为光源。这样，测量物距方便，调节成像容易。被测凸透镜的焦距应在 10 ~ 15 厘米，应调节发光体、透镜和光屏在同一高度。实验时，所调的像大小要适中，有利分辨像是否清晰。用共轭法测焦距，系统误差小，测量较为准确。测量物距、像距，只要用毫米刻度的直尺。应多测几次，求取焦距的平均值。

## 3. 验证性实验指导

这类实验一共有 7 个。其中初中 2 个，高中 5 个。这类实验的特点是，



课堂教学中演示、推理、判断在前，学生实验在后。通过实验，学生把课堂上学到的规律加以验证，从而加深对概念、规律的认识，同时也进一步掌握实验的基本方法和技能。

做好这类实验的关键：必须具有严格的科学态度，根据实验要求，认真操作，用实验数据来分析、研究问题，进而验证有关规律，要防止用已知规律来倒凑数据。实验中出现误差，实验结论与已知规律不完全一致，这是很正常的。要让学生学会分析误差产生的原因，从而设计改进实验的方法，以减小误差。通过多次实验，只要在实验条件允许的误差范围内，就可以证明规律的正确性。

## 初中

### (1) 研究弹簧秤刻度

研究弹簧的伸长跟拉力的关系，着眼点是弹簧的伸长量，所以白纸条上的“0”刻度特别重要。实验用的弹簧应选软一些的；钩码的总重不能超过弹簧秤的量程，钩码的个数以能定4~5个刻度为宜。读数时视线要与刻度尺垂直。本实验误差不大。

### (2) 研究物体浮在液面条件。

要选用合适的量筒和试管。量筒的口径一般为试管的2倍。量筒的刻度要精细些，以利于较准确地测出试管排开水的体积。试管不要太小，以便多装些砂粒，使排开水的体积有较大的变化。试管放入量筒时，注意不能附着在量筒壁，以免造成误差。由于天平称量、量筒读数的误差较大，本实验的结果与已知规律间不完全一致，这是完全正常的。

## 高中

### (1) 互成角度的两个力的合成

应选用板式测力计。使用前应调准零点，并用标准砝码检查其示值是否准确。实验时，要使弹簧伸长方向与拉力方向保持一直线，测力计的各部分不要与其他部分相碰发生摩擦。用同一测力计分别测出各个力，可以避免用不同的测力计带来的误差。取角小于 $90^\circ$ ，取力为2牛左右，实验误差便小。作图要准确、规范，用平行四边形法则求合力。本实验有一定误差，不同组别的差距较大。

### (2) 验证牛顿第二定律

为了减小系统误差，实验采取了平衡摩擦力的方法。在每次改变小车的总质量时，都应重新调整木板倾角，重新平衡摩擦力。当 $m \ll M$ 时， $F = mg$ 。实验中，当验证 $M$ 一定， $a$ 与 $F$ 成正比时， $M$ 可取600克~800克；在验证 $F$ 一定， $a$ 与 $M$ 成反比时， $M$ 可取500克~1000克。小桶与砂的总质量 $m$ 取100克左右。实验时，要保护滑轮不被小车撞坏。实验中产生系统误差的原因：打点计时器工作时，振针对纸带的摩擦力是断续的、周期性变化的，因而难以做到小车重力的分力与摩擦力相平衡；车轮存在转动惯量；纵然 $m \ll M$ ， $F$ 也不能完全与 $mg$ 相等。

### (3) 碰撞中动量守恒

做好实验的关键是测出小球碰撞前、后的速度。因采用相等时间内的水平位移之比代替速度之比，所以小球飞出的水平距离一定要测准些。

要确保两球正碰，并使多次重复实验均在同一位置相碰，小球落地才有良好的密集性。实验中产生误差的主要原因是不易做到正碰，不易做到平抛，水平距离不易测准等。

### (4) 验证机械能守恒定律

打点计时器要安放稳固，重物、纸带要确保自由下落。纸带不宜过长（约 40 厘米左右），选取的计数点要离起始点远些，以减小测量  $h$  值的相对误差。误差分析：重物和纸带下落时要克服阻力做功， $E_k < E_p$ ；计算  $E_k$  用的是速度的理想值，而计算  $E_p$  用的是高度的实际值，最终却使  $E_k > E_p$ 。对这种不合理的实验结果要给学生作必要的分析，以防止对知识的错误理解或造成乱凑数据应付了事。

### (5) 验证玻意耳-马略特定律

本实验若不用水银，则比较安全，但误差较大，只能粗略地验证玻意耳-马略特定律。实验时，注射器要竖直，两侧挂的钩码要对称，上拉活塞时，拉力要通过活塞轴线，以减小摩擦。实验中，为保持恒温，手不可握住注射筒。体积变化要大些，以减小误差。

## 4. 探索性实验指导

这类实验一共有 7 个。其中初中 3 个，高中 4 个。这类实验是实验在前，讲授相应内容在后。学生通过实验，可以探索某些物理现象，获得新的知识，同时也学到了利用实验来进行科学研究的方法。

探索性实验带有研究性质，做好实验的关键：教师要创造条件让学生在实验中开展研究，学生要在教师指导下，通过观察、思维、探索，得出结论。要防止教师包办代替和学生毫无目的地进行实验。这类实验对学生的要求较高，教师在教学中要根据学生的实际情况给以适当的启发和指导。

## 初中

### (1) 研究杠杆平衡条件

实验中要保持杠杆水平。用弹簧秤拉杠杆时，要使拉力竖直向上，弹簧及其附件不要与外壳相碰，以免产生摩擦，造成误差。要指导学生从实验结果总结出杠杆的平衡条件。

### (2) 研究凸透镜成像

这是一个探索性很强的实验，可先指导学生如何调节到一个清晰的像，然后再按课本要求，分别观察成像的各种情况，最后通过比较实验中各种成像情况，初步得出凸透镜成像的规律。实验中，要调节凸透镜和光屏的高度，使凸透镜、光屏和烛焰的中心在同一高度上。实验时，可在已有的一支蜡烛旁再增放一支蜡烛，让学生在光屏上同时看到与物左、

右互换的两个像，使学生对透镜成的像与物的上、下，左、右颠倒有一个完整的认识。

### (3) 研究萘的熔解过程

选用的试管不宜过大，可选 15 毫米 × 150 毫米试管一支，中放萘粉柱 20 毫米左右。温度计要放在萘粉的中间偏下，不能碰到管底，温度计要用线环吊牢。水的加热要均匀，酒精灯的火焰要防风，温度的读数要准确。要教会学生根据实验结果画出图线。要会处理偏差较大的点。要让学生通过研究图线，得出萘熔解的特点。

## 高中

### (1) 有固定转动轴物体的平衡

实验前，应检查圆盘能否达到随遇平衡，否则要配重。要检查弹簧秤是否准确。轴杆与圆盘孔的间隙要小，安装时盘面要竖直，轴孔加少许润滑油，尽可能使盘转动灵活。为使作图、量力臂方便，在盘上先用小钉钉一张白纸。实验中要确保各力的力臂在同一竖直面内，各力的力臂、力矩宜取得大些，以减小摩擦力矩。本实验误差较小，且容易成功。

### (2) 研究平抛运动

安装实验装置时，图板必须竖直，斜槽末端的切面必须水平。实验前，利用挡板从斜轨上试放小球，应使小球呈水平抛出，小球不与图板相碰，小球平抛的轨迹尽可能布满图板的大部。实验时，要确保坐标原点和轨迹上各位置点画得准确。研究时，选取的点应离原点远些，以减小误差。要让学生重复做 2 次 ~ 3 次实验，以利研究平抛运动的普遍规律。

### (3) 研究电磁感应现象

实验前，要教会学生看懂线圈的绕向，弄清灵敏电流计指针偏转方向与电流方向的关系（教师要告诉学生，灵敏电流计允许流过的电流很小——约 100 微安，若电流过大，则会损坏电表）。按课本要求完成实验后，可增加一个用变阻器改变原线圈电流的实验。有时，个别学生会发现，尽管原线圈电路还没连接好，而在移动副线圈时，灵敏电流计中就有电流通过。这是由于穿过副线圈中的地磁场的磁通量发生变化而产生的。可以由学生解释，并在做实验时尽量避免，以集中研究原、副线圈间的电磁感应现象。原线圈的电源不能用学生电源的“直流输出”档。因为这只是经全波整流后的直流电源，输出的是频率为 100 赫兹的脉动直流电。这个脉动磁场将使副线圈产生同频率的脉动感生电流，灵敏电流计的指针便会作小幅度的振动。

### (4) 用卡尺观察光的衍射现象

做这个实验前，应先介绍卡尺使用、读数的方法，并让学生测量几个实物。由于卡尺的精度、测量面的光洁度很高，要请学生爱护器材，使用时不可用力过猛。实验时，缝宽可由 1 毫米逐渐减小到 0.1 毫米。如

观察日光灯，距离要远些，狭缝要与日光灯平行。观察时，要注意避免看到卡尺光洁测量面上的光源虚像。

#### 5. 设计性实验

设计性实验是指由学生自己设计、自己独立完成的实验。设计性实验是实验教学的一个因材施教内容，有利于少数学有余力的学生创造性思维的发展，科学方法的掌握和实验能力的提高。

设计性实验的内容，源于教材，高于教材。可对课本原有实验进行改进，也可配合课本设计新的实验。设计性实验不一定是非常复杂和难度很高的实验，应该是原理、方法、步骤都很科学的实验。设计性实验的确定可在教师指导下进行，也可由学生自选、教师审定。所选内容必须是有意义的，实验器材也不超出中学现有的设备。

教师应对设计性实验加强诱导，特别在设计思想、科学方法和科学手段上多加指导。

### (三) 中学物理教学评价

#### 一、物理教学评价概述

##### 1. 物理教学评价及其作用

教学评价是一种对教学目标及实现目标的教学活动过程进行分析和价值判断的活动。物理教学评价的核心是对物理教学质量的评价。从宏观看,由评价而产生的反馈信息,对促进教学改革、提高教学质量有着十分重要的意义;对教学过程管理的优化和形成合理的操作常规有着积极的矫正作用。从微观看,由评价而产生的反馈信息,对调整课堂教学的过程、优化课堂教学目标和教学方法有着具体的指导作用。

##### 2. 物理教学评价系统的组成

(1)物理教学过程评价:主要是对教师的评价,它包括制订教学目标、备课、课堂教学等方面的评价。评价方法主要采用分析与综合评价相结合、定性评价与定量评价相结合的方法。

(2)物理教学成果评价:主要是对学生基础学力的评价,主要包括认知(知识与能力)、操作(实验操作技能)、情感(态度、兴趣、意志、习惯)等三方面。评价的方法主要采用考试、测验、练习、观察行为等形式。

##### 3. 物理教学评价的主要内容

(1)物理课程评价:着重于物理教学的大纲或课程标准,各年级的教学目标,教材,实验器材,课程结构等等。

(2)物理课堂教学评价:涉及备课、上课、实验、辅导、考核等各教学环节。

(3)物理教师基本素养评价:注重教师的素养、教学方法、教学研究等有关教学科研方面的评价。

(4)物理教学质量评价:主要是对学生的学习质量评价,应包括学生的学科思想教育评价和各类考试、考试命题、考试组织以及试卷的评定和分析。另外,还应深入学生的学习技能领域,对学生的实验操作技能以及学生学习物理的兴趣、态度、意志、科学观、学习习惯等方面按标准予以全面评价。

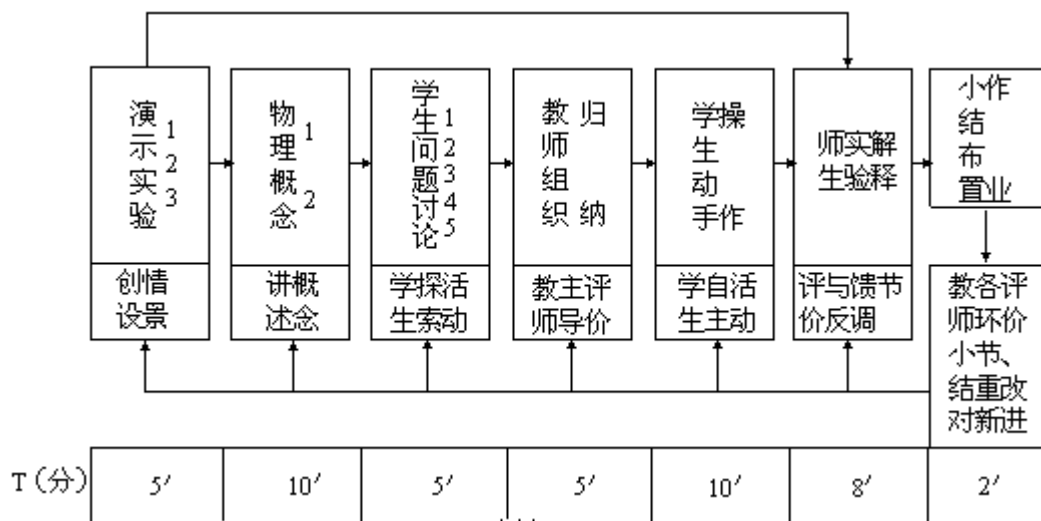
#### 二、物理教学过程及其评价

1. 物理教学常规:指物理教学过程中经常实施且确保教学质量稳定的一些工作规定。包括对教师的备课、上课、命题、辅导、批改作业、实验指导等方面作出的一些基本规定,这些规定的内容与要求就是物理教学常规评价的基本标准。

2. 物理教学的备课：指教师在上课前的教学准备。包括钻研教材，了解学生，组织教学内容，准备实验器材，选择教学方法以及设计板书、板画等等，其中精心组织教学内容和合理选择教学方法是备好课的关键。教学常规中有关备课的要求是评价备课的基本标准。

3. 物理课的教案：指教师根据教学大纲和教科书，把备课时的教学设计以课时为单位编写成具体的教学方案。包括课题、课型，教学目的，教学中难点、重点的剖析，教学内容及其相应的教学方法和时间分配，教师与学生的活动情况，板书、板画设计，作业布置等内容。教案根据教学的需要分为详案、简案。详案记述课上师生所有活动的详细过程，简案只是提纲式的记述教学的主要内容。教案中应明确体现教学目标，教学方法和培养学生的能力、情感的措施，这是评价教案的最基本的标准。

4. 物理教学流程图：指用图表或流程式的框图来反映物理教学过程的图式。它能较为简洁地表达课堂教学的结构和教学活动的內容，它还可附带反映教学方法及教学时间的分配。教师在课上以流程图为依据把握课堂教学的各个环节，同时也可作为参与课堂教学评价的听课人员提供评课依据。流程图要求结构合理，含义明确，表述简洁。下图为一种物理教学的流程图。



5. 物理课堂教学：指教师根据设计好的教案进行的教学实践活动。物理教师的课堂教学必须遵循学科知识的结构特点和学生的认知规律，要突出物理概念和物理规律教学，并根据学生学习情况调整教学“进程”；演示实验要科学规范，突出观察的重点，调动和发挥学生感官的积极性，指导学生学会探究物理问题的观察和思维方法，培养学生实事求是的科学作风；板书、板画要合理规范，教学用语要正确清楚，教态要亲切自然，并注意培养学生的非智力因素。

6. 物理课的作业：物理作业的形式要多样化，除书面作业外，还可以有阅读、观察、思考、小实验、小制作等多方面的内容。教师必须重视作业的批改与检查，及时讲评反馈。在作业示范教学中要突出培养学生解决

问题的思维方法，同时注意规范化，培养学生良好的学习习惯。

7. 物理教学业务档案：指物理教师在平时业务活动中所积累的资料。主要包括教学实绩，备课笔记，各类统计表格，公开课教案，教学研究心得体会，论述报告，教学评价资料，进修记录等等。它是评价教师业务活动水平的重要依据，一般由学校业务部门建档管理，也可以由教师本人自行建档。

8. 物理课的课程：

(1) 随堂课 在日常教学中，教育行政人员为了了解课堂教学情况，在不预先通知的情况下进入课堂现场，对执教老师的课堂教学活动进行细致的考察和记录，同时按评课的要求予以评价，而后将有关信息反馈给教师本人和学校领导，以利总结经验，改进教学，提高教学质量。

(2) 公开课 是一种有准备的教学交流活动，执教老师对教学目标的制定，教学内容的选择，教法设计和实验等都事先准备妥当，在一定范围内予以公开执教，向同行或教育行政领导开放。公开课一般都由富有教学经验和具有教学特色的老师执教，其课应能在教学组织、教法等方面体现示范性。

(3) 研究课 以教学中的难点、重点内容，教学目标，教学方法为研究对象而开设的公开课。教学人员围绕所研究的专题进行教学设计，旨在从中找到解决问题的方法，并提供听课老师共同探讨。

(4) 观摩课 指一种示范性的教学活动，具有教学表演功能。观摩课可以介绍优秀执教老师的教法、教学艺术和教学经验，或者是介绍成熟的教学方法、课堂教学结构和课堂教学的驾驭技术。所以，执教老师一般应具有良好的教学素养和丰富的教学经验。

### 三、物理课堂教学评价

#### 1. 概述

物理教学过程由备课、课堂教学、作业批改、课外辅导和考试等环节组成，其中课堂教学是物理教学过程的核心。

物理课堂教学评价主要是对执教老师在课内完成教学任务的一种评价，是对教学内容，课堂结构，教法实施，实验操作和教学效果反馈方面给出的结论性意见。

教学活动是一种复杂多变的动态系统，因此很难制定统一的评定标准和准确度很高的评分方式，往往采取专家经验型与数学模糊型相结合，定性分析与定量分析相结合的评价方法。

课堂教学评价的作用是通过评价、反馈来提高教师的课堂教学水平，从而提高教学质量。同时也为研究物理课堂教学的结构、方法、模式提供可靠的信息和依据。

2. 评价方法物理课堂教学评价基本上有三种程式：一是经验型的专家评价，它是定性评价，执行起来比较方便。这种定性的评价缺少可比性，标准不一，出入较大；二是量化评价，即运用数学工具对课堂教学予以测量，它的过程先把专家经验转化为评价指标，然后分部打分，它比较客观，量化后的分数有一定的可比性，但比较机械且方法麻烦不易推广；最后一种是将专家经验评价与数学量化评价相结合的方法，这是一种较为合理的评价方法。

课堂教学评价内容一般分为教学内容，教学方法，课堂结构，教学演示实验，课堂用语，板书、板画，当堂教学效果等。

3. 物理课堂教学的集体评价由部分有经验的老教师在听课后讨论评课，其依据是学生当堂的测试卷，及每位评课教师手中的评价提纲（评价提纲罗列评课的条目、教态、教法、课堂结构等等），这种方式是一种传统的评价方式，气氛比较融洽，但难以有客观的结论，甚至谈不出课的缺点所在，优劣程度难作横向比较。

4. 物理课堂教学的问卷式评价听课后将评课意见填入表格。对每一指标（如教学内容的准确性、科学性，教学手段，演示实验等）划分为三级模糊变量（好、中、差），由评课教师进行主观评价，最后汇总所有表格，得到结论性评价意见。

5. 物理课堂教学模糊综合评价运用模糊教学的方法可以较科学地衡量教师的课堂教学水平，而且比较精确。这类评价先将影响课堂教学质量的主因素赋以语言变量值（如对教学内容科学性、准确性，教法手段，学生活动量，教学演示质量，学生当堂接受力，教师的教态、语言、板书、板画等方面），并对各主因素分配权重，再在主因素的语言变量值上打分，然后运用权重矩阵与模糊矩阵联合计算，经过归一处理最后得到任课教师课堂教学得分值。这样的得分值能较客观地反映执教老师的实际水平，同时教师间还可以相互比较，也能用来分析教师教学中的某些特色。

6. 物理课堂教学评价凡例



中学物理课堂评价表

学校\_\_\_\_\_ 年级\_\_\_\_\_ 班级\_\_\_\_\_ 课题\_\_\_\_\_

评价指标			标准达到度(分值)				小计 分	总体印象评价及 教学特长特色
序号	名称	优等评价标准	完全达 到(A)	大部分 达到(B)	基本达 到(C)	部分达 到(D)		
1	教学 目的	符合大纲切合实际	8	6	5	4		
		眼发展培养能力	6	4	3	2		
	内容	重视德育发展情意	6	4	3	2		
		内容正确结构合理	8	6	5	4		
2	教学 手段	把握关键突出重点	10	8	6	4		
		创设情景点拨思维 (实验演示直观清楚)	10	8	6	4		
	方法	学生活动充分有效	8	6	5	3		
		方法优化紧扣环节	8	6	5	3		
		注重反馈及时调节	8	6	5	3		
3	教学 效果	掌握知识反应正确	10	8	6	4		
		技能操作要求落实	8	6	5	3		
		积极参与师生共鸣	10	8	6	4		
三项指标评价累计分								
总体评价调整分(±5)								
教学特长特色加分(1~5分)								
总体评价总分及等第							_____分 _____等	
教学基本 素养评估	教学组织		20	16	10	8	定性评价	
	教学民主		15	10	8	6		
	教学语言		25	20	13	10		
	实验能力		25	20	13	10		
	板书板演		15	10	8	6		
教学基本素养评价累计总分							_____分	

时间\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日\_\_\_\_\_午\_\_\_\_\_ 节执教者\_\_\_\_\_ 评价人\_\_\_\_\_

使用说明：

(1) 每一项指标都是对课堂教学全过程的评价。评价时将有关教学状况与优等评价标准逐项对照衡量后，在评价等级分值栏内打“ ”。

(2) “小计分”是指某一项指标的几个评分要素得分之和。

(3) “总体评价调整分”是指在“定量评价三项指标总分”的基础上，根据总体评价的印象进行调整。一般在1分~5分幅度内进行调整。

(4) 对“教学特长特色”加分时，应简要写明所具有的特长或特色，及加分理由。加分应从严掌握，一般控制在1分~5分。

(5) “总体评价总分”是指“定量评价三项指标总分”与“总体评价调整分”、“特色加分”之和。

(6) 总体评价等级分为优、良、及格、不及格四个等级。优等为100

分~90分,良等为89分~75分,及格等为74分~60分,不及格等为60分以下。

(7)“教学基本素养评估”是指通过一堂课的全过程,根据三项评价指标来评价物理教师在课堂教学中的“组织教学”等五项基本素养。分定量评价和定性评价两部分。其评价结果应与课堂教学“总体评价”基本相符,若相差甚远则应慎重考虑重新评价。

#### 四、物理教师教学能力评价

1.概述指实现开发学生智能的实际工作本领,就教学活动而言,教学能力应包括教学组织能力,教学表达能力,实验设计和操作能力,教学研究能力等。

2.教学组织能力是物理教师的基本教学能力之一,它主要反映在教和学两个方面,是教师能否完成教学任务的关键。它主要包括制定整个课程的教学计划,安排合理的课程结构,科学地处理教材的重点和难点,在组织教学中注意物理学自身的自身特点和学生的认知发展规律,恰当地组织指导学生的课内外的动手操作活动,在启发学生觉悟的基础上建立良好的课堂教学秩序,充分发挥教学过程本身的组织作用,使学生明确学习目的,以生动活泼的教学技巧和方法吸引学生,调动学生,提高课堂教学的效率。

3.教学表达能力物理教师的表达能力是一种重要的教学能力,它是向学生传授知识和技能的必备条件。它主要包括两个方面:一是语言驾驭能力;二是板书、板画能力。语言表达要求声音洪亮,层次丰富,准确明了,形象生动,有节奏感,并给学生留有间隙,便于学生思考。板书要求有计划性,条理清楚,能突出课堂教学的重点;文字符号书写要求简洁规范;板画要求线条简洁、科学合理,画面形象生动。

4.实验设计和操作能力物理教师应具备实验的设计能力,能根据教学的实际情况,因陋就简、就地取材,运用学生日常生活中常见的器具组合实验,帮助学生理解物理概念和规律。教师在日常教学中应经常动手自制和改制演示器材,熟练操作技术,以严格的规范要求进行实验,为学生作出表率。

5.教学研究能力教师在完成教学任务的同时,还必须从事与物理教学相关的各类教学课题的实践与研究,这是一种不断提高自己教学水平的必不可少的措施。它主要包括物理教学理论的研究能力、物理教学方法论的探究能力,各种教法的实践能力和论文报告的撰写能力。

#### 五、教学成果评价

1.范围 教学成果是指学生通过物理学习在智力、技能和情感领域中

取得的进步。因此，对于教学成果的评价，也同样应包括这三个方面。学生学习成果在认知领域中主要表现为能掌握和运用所学的知识，掌握学习物理的方法；在动作技能领域中主要表现为实验操作技能的养成；在情感领域中主要表现为兴趣、爱好、意志、学习态度和科学观方面的发展。

## 2. 功能

教学成果评价的结果既可以反馈给学校分管教学的领导，以完善教学管理机制，制订更有利于开展教学改革，提高教学质量的各项制度；也可以为教师改进教学、优化教学过程、提高教学效益提供依据。除此之外，还有利于学生学习的自我反馈、自我矫正。

## 3. 学生学习成果评价概述

学生的学习成果评价是指对学生学习物理的科学方法和知识掌握程度的评价。一般可通过平时的作业检查和组织定期的考试、考查来评定。

教学成果的评价原则是由学科特点决定的，物理教学成果评价原则主要包括：平时考察与考试相结合的原则，即教师对学生的物理学习评价，要重视平时考察，特别要注意学生的学习情感、科学态度和思维品质方面的评价；理论与实践相结合的原则，即教师既要重视书面形式的理论考查，还要重视学生操作技能的考查；知识与方法相结合的原则，即教师既要重视物理知识的考查，又要重视学生对物理学方法论掌握程度的考查；定量评价与定性评价相结合的原则，即教师在评价中不仅注意学生的定量分数值，还应注意学生的一些复杂多变而恰恰又在学习过程中起着重要作用的情感因素，如学习态度的变化、科学世界观的形成等等，这些都可以用定性的专门术语来描述评价。

(1) 物理考试 指一种书面的考查形式，在完成其具体教学内容应举行的考查，有定期的小测验和期中、期末考试，还有以评定毕业或升学为目的的水平考试。物理考试应让学生在规定的时间内独立解答题目，按其准确度给予评分，这是对被测学生的物理学习能力的一种测量。

(2) 物理考试的依据 依据是物理教学大纲中所规定的教学内容与教学要求。具体执行时，一般按照国家教学部门颁布的有关文件精神，根据地区教育行政部门教学方面的指令性意见为依据，规定考试的范围、难易程度、试卷长度、命题形式等。

(3) 物理考试的功能 各种类别的物理考试可以发挥各自不同的功能。例如，形成性考试和诊断性考试可以发挥诊断和反馈功能，即通过考试，学生能了解自己的学习情况，改进学习方法，提高学习成绩。同时也向教师反馈了教学效果的信息，为教师积累教学经验、改进教法提供了可靠的依据。总结性考试用来鉴定学生知识和能力的达成度，一般都用于学校的毕业或升学考试之中，它有比较高的区分能力。

(4) 物理课堂测验 指教学过程中的一种检查，可以在章、节、单元教学结束（或在重点、难点的物理概念讲述）之后进行的一种考试。这种

考试时间短、容量小，有一定的机动灵活性，其目的是用来检查当堂或一个阶段的教学效果，督促学生及时复习、巩固已学的知识。

(5)期中、期末考试 指一种阶段性考试，在学年的中期及期末举行。这种考核的目的旨在督促和帮助学生系统整理所学的物理知识，达到融会贯通，加深理解，提高能力。

(6)诊断性考试 指教师为了了解学生在学习中存在困难的原因而进行的一种考试，可以根据自己的教学情况和学生的学习情况而定。试卷所提供的情况仅是为了了解教学情况，不作为学生学习成绩的依据。在试题编制中，应注意容量和覆盖面，要反映学生在物理概念理解和运用方面的重点内容和常见错误，试题难度要低，且便于分析，从中找到矫正的方法。

(7)形成性考试 指内容局限于一个学习阶段的小型考试。这种考试可以向学生和教师不断提供学习成败的反馈信息，可以发现教和学的问题，成为教师制定或修改自己的教学计划和学生强化、矫正自己掌握学习的依据。所测量的成绩一般不作为评价学生学习好坏的依据。

(8)常模参照性考试 常模是指一群类型相同的学生在考试中的成绩（表现为平均分与标准差）。常模参照性考试是指参照某个常模来反映学生分数的考试。这类考试一般规模较大，教育行政部门常用这种考试抽查学校的教学质量。对于物理学科教学来说，参照一定的常模进行考试，可以更可靠地了解学生在相应群体中掌握知识的水平。

(9)标准化考试 指大规模的常模参照性的水平考试。具体包括试题编制标准化，评分记分标准化，分数分成及分数的解释都予以标准化，用计算机处理数据。一般用于大规模的升学选拔考试，通常使用分离式客观性试题，考试内容覆盖面大，题量较多，考试操作的技术性较强。

(10)物理命题 根据教学大纲、具体教学内容、考试性质制定命题计划，再按命题计划编制试题与试卷。命题不仅要重视学科本身的特点，还必须遵循教学测量的科学性，命题时要综合考虑试卷的难易程度、试题形式、内容覆盖、试卷的长度以及学生的应试心理，命题还包括编写试卷的参考答案和制订详细的评分标准。编制题目中切忌杜撰脱离科学实际的试题，离开考生学习实际的难题、怪题。

(11)物理命题细目表 是试卷编制的框架蓝图。它根据教学大纲要求，按知识点、题型、难易程度及赋予的分值等指标来组合试题，科学合理地规定了试卷编制的各项要素，提高了试卷的测试可靠程度。在编制试卷前，一般都应先根据教学目标及学生的实际学习情况拟订一份细目表，然后根据细目表进行配题，在配题时对于表中每一网格必需配上若干道题，以供最后筛选，统筹形成正卷或等价的备用卷。

(12)物理命题细目表凡例

细目表“知识点”项填入根据大纲和教学内容所规定学生必需掌握的知识内容条目。

“题型”项应根据考核内容来确定，可全用，亦可选用，甚至另找题型替换。

“测试级别”栏根据教学目标而定，反映各知识点的学习水平。其中A是“知道”，B是“理解”，C是“运用”，D是“综合”。

根据教学分配，在上述空格中填入相应得分，表上可具体反映各知识点的题型类别、考试级别，并从得分小计栏中反映题型分数比、难易程度比、知识覆盖程度等各项试卷指标。

物理试卷命题细目表（初中）

章	节	知识点	题型				得分小计																
			测试级别		填空	选择		作图	计算	问答	实验												
			A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	
得分小计																							

(13) 试题的编制 试题编制的首要问题是收集素材，包括收集现成试题，教师在日常工作中应分门别类按知识点、测试级别和题型进行归类，制作试题卡片，对于这些试题，还应根据实际情况重新组合、改编，并收入到自己的题库中以备后用。教师也可根据教学内容要求、学生的学习水平自行编题，编题应紧扣教学大纲，注意试题的科学性、题材的合理性，题意明确、新颖，杜绝偏题、怪题。在编制同时，还应作出参考答案和试卷的评分标准。

(14) 物理试题的类型 按试题的解答方式，可以将试题划分为两大类型——客观性试题和主观性试题。

客观性试题指答案简短，内容和形式唯一的固定式应答题。一般物理考试中常见的客观性试题有填空、判断、作图、简算、选择等类型。主观性试题指有一定解答自由度的长答案试题，主要有问答、论述、论证、演绎、计算等形式。从教育测量角度看，主、客观性试题各有利弊，它能互补不足。客观性试题取样面大，内容覆盖面广，评分简捷，误差较小；主观性试题取样面小，评分复杂，评分过程中由于主、客观因素而产生的误差较大，但主观性试题可以较全面深刻地反映受试者的思维过程，学习品质和能力。一般来说，编制一份物理试卷应尽量组合使用，这样可以全面地发挥考试的评价作用。

论述题 一般是用来解释物理现象、论述物理原理，较全面地考查学生思维、分析、演绎的能力，是主观性试题的主要形式。可以让学生有较大发挥个人叙述、说明、评价、分析问题能力的自由度。这类题在高中阶段使用较多。

简答题 主要考查学生对物理基本原理、基本概念的掌握程度，答

案比较简单。题型可以有简述、问答、列举、说明等。

**作图题** 运用物理图象、图表来考查学生对物理概念掌握的程度。题型可以是根据文字作图，也可以是完善图象或改正图象等。

**填空题** 对重要的物理概念及必须记忆的内容运用空格填词（或数据）的形式而编制的题型，这是一种客观性基础题。编制时应明确题意和上、下文的连贯，并注意整卷的其他类型的题目中不能重复出现填充空格中所要考核的内容。

**选择题** 通常由题干和题支（备选答案）组成，题支中有多个备选答案，而可供选择的答案又往往是学生对概念理解和计算中容易混淆和搞错的。备选答案中只要求选一个为正确解答的称单项选择题，至少有两个答案为正确的称多项选择题。编制选择题应随机安排正确备选答案的编序。

**计算题** 是物理试卷中的主要题型，主要考查学生分析物理问题，建立物理模型，运用公式解决问题的能力，“分析——列式——计算”的解题过程可以反映考生的学习水平和思维水平。它可以按单一物理概念、单个公式编题，或以多个物理概念、多个公式组合成综合题。为了增加题目的难度和考核级别，可以把命题条件隐含在题意中，考查学生的理解能力和分析能力。

**判断题** 又可分是非判断题和分析判断题。是非判断题是一种客观性试题，是用来判断一个含义完整的试题是非对错，这种试题编制简单，取样广泛，但考生猜题得分可能性大，不宜大量使用。分析判断题，也是一种客观性试题，这类题的解答要求较高，除要判断试题的正误外，还要给出正确的分析，运用指定的符号表示判断结果。这种判断题考查的正确性高，但编题难度较高，且取样面不广。

**（15）题库** 是学科中各类试题的总体，它能根据考试性质和要求提供命题，组合成各类不同长度、难易度和不同考试要求的试卷。它的含量应能覆盖大纲和教学内容，每一试题都必须科学、合理、准确，并备有答案和评分细则。每题制成卡片，卡片应记载试题、答案、章节篇目、题型、难易级别、试题的使用次数等项目。一般大型题库都储存于计算机中，根据编题要求给计算机指令，即可从计算机中得到所需的正、副试卷。

**（16）试题给分方法** 分步给分法是主观试题的一种重要给分方法，将主观性试题（如论述题、计算题）的正确答案分解成一定的步骤，根据全题总分对每一步骤在整题解答中的地位分别给分。阅卷时根据分步评分标准给分，这样有利提高给分的客观性、准确性和一致性，对学生不同解法和解决问题过程有一个公正合理的评价。

**（17）试题的难度** 难度是衡量试题难易程度的指标，物理试题的难度值是表征考生解答该题的难易程度。试题难度值的计算公式：

$$P = \frac{\bar{x}}{W}。$$

式中 $P$ 为难度值， $\bar{x}$ 为全体考生在该题得分的平均值， $W$ 为该题的满分。

试题的难度要适中，一般在 $0.3 \sim 0.7$ 。难度值过大或过小都反映了考试区分度差。

(18) 试题的区分度 指试题鉴别考生学习水平的差异程度，是鉴别考生在群体中学习水平高低的指标。区分度高的物理试题能把不同学习水平的考生的成绩拉开档次。

将样本内全体考生从最高分开始取样本数 $27\%$ 的人作高分组( $H$ )，同样从最低分开始取 $27\%$ 人作低分组( $L$ )，分别求出高分组通过率( $P_H$ )和低分组通过率( $P_L$ )，代入试题区分度的计算公式：

$$D = P_H - P_L,$$

即得试题区分度指数。

一般认为，试题的区分度指数在 $0.3 \sim 0.6$ 之间就能认可，其中 $0.4$ 以上属于比较好的， $0.3$ 以下则需要改进。

(19) 考试的信度 信度是考试分数一致性和可靠性的指标，它反映了考试结果所表达考生水平稳定的程度。用同样试卷，同时多次考查水平相同的学生，可以得到基本一致的成绩，这就是该卷的信度。

考试信度的计算公式： $r = \frac{n}{n-1} (1 - \frac{\sum pq}{s_2})$ 。式中 $r$ 为试卷的信度值， $n$

为试卷的题量数， $p$ 为各题的答对率， $q$ 为各题的误答率( $q = 1 - p$ )， $s$ 为考试分数的标准差。影响物理考试信度的因素主要是试题的难度、试题的数量和内容的覆盖面。试题数量越多，内容覆盖越全，则试卷的信度越高。信度反映了考试的准确程度，一般要求达到 $0.2 \sim 0.9$ ，但在大规模的标准化考试中，甚至要求达到 $0.95$ 。

(20) 考试的效度 效度是考试对其预定目标实现的有效性和准确性的量度指标，它反映了考试结果与预定目标之间的相关程度。影响考试效度的主要因素是考试的目标确定不当，考试的内容覆盖片面。

将样本内全体学生得分按高低次序，均分成高、中、低三组，分别计算高分组和低分组各道题得分的平均值，然后求出高、低分组各题的均分差，用均分差值除以该题的满分即为该题的效度值。考试的效度一般在 $0.4 \sim 0.7$ 之间。

(21) 原始分数 指学生在各类考试、测验中所得的实际分数。一般用来表达学生个体在考试中水平的高低。

(22) 平均分数 指某一样本的算术平均数，它是以原始分数总和除以样本总数。平均分数可以比较各个样本或总体，可以反映样本或总体的一般水平，可以用来分析教学现象之间的依存关系，还可以纵向研究样本或总体的学习成绩变化。

(23) 平均差 在一组数据中，每个数据与其平均数之间差数的平均

数称平均差。每个数与平均数之差称作离差。离差是计算样本方差和标准差的重要数据。

(24) 方差和标准差 用来说明样本内个别差异的统计量。方差是各个数据与平均数的离差的平方除以数据的总频数, 即  $s^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N}$ 。式中  $s^2$  表示方差,  $x - \bar{x}$  表示离差,  $\sum(x - \bar{x})^2$  表示离差平方和,  $N$  表示点频数。

方差的平方根就是标准差, 即  $s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N}}$ 。它表示样本中变量值离散程度。利用标准差可以得到考生的标准分数。

(25) 标准分数 指原始分数与平均分的差数除以标准差所得的商数, 即  $z = \frac{x - \bar{x}}{s}$ 。式中  $z$  为标准分数,  $x - \bar{x}$  表示离差,  $s$  为标准差。标准分数是以标准差为单位的一种量数, 它不以原始分数为单位, 是一种相对的差异量数, 标准分数又称作  $z$  分数。 $z$  分数不仅能反映原始分数在样本中的分布地位, 而且能比较不同分布的各原始分数, 同时可用代数方法加减或平均。

(26)  $T$  分数 指一种常态化的标准分数, 即  $T = 50 + 10z$ 。 $T$  分数的平均数是 50, 它的每一个标准差是 10,  $T$  分数无实际单位, 它能避免  $z$  分数中出现小数点和负值。

## 六、情感领域的评价

### 1. 概述

人的情感, 是人所固有的对世界的特殊形式的态度, 它反映客观事物与人的需要之间的关系。情感是在认识过程中产生并发展的, 因此, 情感和认知之间的关系十分密切。实践证明情感的升华也与思维有着千丝万缕的联系, 情感是影响教学效果的非智力因素。

### 2. 主要内容

包括道德感(爱国感、集体感、责任感、正义感)和理智感(惊奇感、怀疑感、确信感等)两类。它还可以物理学科的大纲和中学德育大纲为依据, 即

(1) 通过辩证唯物主义思想教育, 学生应在学习物理基础知识和培养基本能力的同时, 逐步树立辩证唯物主义的基本观点, 为树立科学的世界观奠定基础。

(2) 通过爱国主义教育, 学生应了解我国历史上和社会主义建设时期在科学技术上的重大成就, 以及在某些科学技术方面同世界先进水平的差距, 从而树立民族自信心, 自豪感和责任感。

(3) 通过科学态度的教育, 学生应相信科学、热爱科学, 以科学态度



分析物理变化，养成实事求是、严谨治学和遵师守纪、爱护仪器的良好学习态度。

(4) 培养学习兴趣和物理学科的情感，养成对科学执著追求的良好习惯，注重学生情感迁移，注意创设情景，让学生在气质、意志、能力倾向等方面得到发展，以弥补学科教学内容对人才造就之不足。

### 3. 目标

长期的教育培养，使学生形成一种稳定的情感。为了对情感领域的教学成果作出科学的评价，并从评价中得到情感教育的反馈矫正信息，就必须制定一套可供操作的参照目标。以下为中学物理情感教学的目标及其水平分类，供参考。

水平	定义	情感特征
A 接受	学生愿意注意课堂中特定的刺激和情景，而不是采取回避和拒绝的态度，但是这种接受是消极被动的。	学生对老师的讲解（演示、板书、布置的练习）只是被动地听、看或做，但不一定专心。
B 反应 配合	学生具有从参与到积极参与课堂活动的表现，对活动采取同意和赞同的态度，情绪上反应是顺从的，通常是感到愉快、兴奋和满足。	学生对课堂的活动感兴趣和主动参与，如自觉阅读物理书籍，找出预习的要点，提出问题；实验时自己积极动手，独立完成；自觉多做课外习题，作业整洁，速度快；反应热烈，当答对一个问题或做好一个实验时，会感到一种由衷的喜悦和乐趣。
C 偏爱	学生对物理教学活动抱有持久和专注的态度，并对它的社会价值和科学价值的认识已形成较为一致的和稳定的态度。	学生爱好物理，相信观察和实验的方法是解决物理问题的基本方法，并能致力应用于解决实际问题；能自觉阅读物理课外书籍，积极参加课外活动采充实、扩展的物理知识；对物理问题不仅仅满足答和验证，在情感的支配下，形成探究物理问题的习惯。
D 信奉	学生已从某种哲学思想和理论的高度来看待物理学科的社会价值和科学价值，并努力通过自己的活动来证明自我追求的价值观，对物理学习探究活动充满了激情和自信，有明显的个性特征。	学生能把物理学研究方法归结为辩证唯物主义认识方法体系中的一个范畴，把对物理的学习看作是对科学的追求。从而把这一信念作为终身追求的目标。

### 4. 评价方法

一般采用定性评价的方法，即运用观察、交谈、问卷的方式进行。

教师在实施评价时，必须从专用术语的角度来理解描述性词语的意义，如接受、好奇、注意、觉察、倾听、选择、意识、观察、认识、感受

为 A 级水平评判术语；又如参与、反应、遵从、遵守、观察、完成、表现、乐趣、发现等定为 B 级行为评判术语；再用渴望、感受、喜欢、考察、偏爱等表示 C 级行为评判术语；用形成、信奉、判断、确定来描述 D 级行为评判术语。

评判测试中还可以借鉴心理实验中的一些测量方法，如简单信息测验、自由联想测验、兴趣调查、强迫选择、语义差异分析技术、投射技术等方法和手段。

[例证] 两个顶端的词组中，请在某一格内填上“ ”，以表示你与那边的联系更密切些。

做课外小实验、小制作

①兴奋的	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> </tr> </table>								厌烦的
②有价值的	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> </tr> </table>								无价值的
③愉快的	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> </tr> </table>								不愉快的
④安全的	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> </tr> </table>								危险的
⑤必要的	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> <td style="width: 10%; height: 15px;"></td> </tr> </table>								不必要的

这是一个利用语义差异分析方法的测验， 、 用以评估对小实验的反应程度， 、 、 用以评估对小实验的价值的态度。

## 七、技能行为的评价

### 1. 概述

物理实验操作技能考试是物理教学成果评价的一种重要形式，是培养既善于“动脑”，又善于“动手”，适应现代社会需要人才的重要手段之一。

任何人作出一个有目的的动作，总是要涉及认知、情感和技能三个领域，三者是相互影响、难分难解的，但在同一行为动作中，三者也是有主次的。从实现教学目标的角度看，书面考试主要用以评价学生的认知水平，实验操作考试则主要用以评价学生的技能水平。因此，实验操作考试既具有书面考试相同的命题、监试、评分、反馈等环节，又具有有利于书面考试的特殊要求。

### 2. 物理教学中的技能与操作

技能是指精细的肌肉控制的动作行为，简单的肌群反应不属于技能范畴。物理学习中的技能是一种习得的能力，它总是伴随在学生完成某种操作动作中表现出来。这种操作的动作大多数是可以观察、可予以客观评价的外显行为。

### 3. 物理实验操作技能评价的因素

熟练操作动作的要求是协调、准确。具体由下述变量描述：

(1) 反应速度 指人从接受刺激到作出反应动作之间所需的时间。时间越少，反应速度越快，表明其操作动作越熟练。

(2) 意识参与程度 指人在完成操作动作时, 意识参与的多少。一般讲, 技能水平越高, 操作动作越熟练, 其意识参与也越少, 也就是完成动作的认知成份越少。

(3) 灵敏度 在操作过程中, 能分辨所看到、听到、触到的一切信息中哪些是可利用的相关信息, 哪些是必须摒弃的无关信息。灵敏度高指对十分微弱的有关信息也能充分利用。

(4) 精确性 熟练的操作往往表现出预见性, 反应方式都十分精确, 从而保证操作动作有良好的达成度。

(5) 连贯性 操作者能否将完整的操作动作畅通无阻地连续运行, 是操作动作连贯性的表现, 也是衡量操作动作熟练程度的标准之一。

(6) 稳定性 指操作者在操作环境等外部条件发生变化时, 能否发挥正常的操作水平的特性。在相同条件下, 操作越协调、准确, 其熟练程度也越高; 如若环境条件较差, 但操作者仍能达到高质量的操作水平, 则其熟练程度越高。

(7) 差错率 指错误动作的发生频率。一般以在规定的操作过程中, 出现错误动作的次数来度量。操作动作越熟练, 差错率越低。

#### 4. 物理实验教学目标

要使物理实验操作技能评价有较好的信度、效度, 则首先必须制订物理实验教学目标, 它为学生实验操作技能评价的试题编制提供可靠的依据。

任何一个物理实验, 均可分解成理论知识、观察、操作三部分, 因此, 教学目标也必须分别就这三个方面来制订。其中操作部分的主要成份即归入技能领域。在中学物理实验中, 学生的操作能力培养目标可以分成三级水平:

(1) 模仿动作指一种在榜样示范(或与榜样示范相类似的情景)下进行的动作。可以是教师的直接示范动作, 可以用挂图、板画、投影仪进行示范, 也可以是教师用讲解代替示范动作。

(2) 意识动作指一种完全在学生独立意识控制下进行的动作。这里的意识主要是指指挥动作的思维部分。它包括对仪器的调试和操作; 将仪器、材料进行组装; 对组装好的装置进行调试和操作。

(3) 定型动作指一种因经过多次练习而已经达到较为熟练的动作。它包括能熟练地调试和操作仪器; 能在较短时间内按要求组装好仪器; 能对组装好的装置较为熟练地调试和操作。

#### 5. 物理实验操作技能评价的测量指标

(1) 完成操作的时间完成操作的时间越短, 得分越高。对于在限定时间内没有达到考试要求的考生, 应以目标达到度来评定其成绩, 即考生完成操作的情况与考题要求达到的目标之间的差距越远, 得分越低。

(2) 操作质量包括动态质量和静态质量。动态质量主要是指在操作过

程中错误动作的多少，错误动作越少，得分越高。静态质量主要是指学生完成操作任务后，实验器材、装置的完好率及工艺质量。

#### 6. 物理实验操作技能评价的内容

- (1) 按要求将实验器材组装成一定的实验装置；
- (2) 对组装好的实验装置进行调试，达到一定的工作点；
- (3) 按照一定的操作顺序，进行达到实验目的的主体操作。

#### 7. 物理实验操作技能评价的方式

(1) 从评价的内容上分，可分为全程式和组合式。全程式即让学生将一个完整的实验从头至尾做一遍。其优点是具备单个实验完整性，缺点是实验整体覆盖率低，而且费时。组合式即把实验的操作部分分解为若干个组装、调试、测量等小部分，每个小部分即为一道考题。由于各部分教学目标各不相同，评价时，可以根据目标水平、内容等，在几个实验中各抽一、二道小题，搭配组合成一组考题。针对目前中学物理教学现状，取组合式似乎更好些。

(2) 从考生组成上分，可以有单个、小组、大组等几种方式。单个考试即让学生一个一个地进行考试。小组考试一般是4人~5人，每人一桌，同时考试。大组考试一般是取全班人数的二分之一，每人一桌。

#### 8. 物理实验操作技能评价的实施

实验操作考试除了一般考试所需要的准备（如命题计划，拟题，试卷，监考人员安排等）以外，还有其自身的特殊要求：

(1) 事前必须准备好必要的仪器和材料，并仔细检查；如果考题是组装实验装置，则应把仪器、材料分列于实验桌上；如果考题是调试实验装置，则应把桌上的器材组装好。

(2) 确定统一的评分细则，制定统一的监考记录表格，规定统一的记录要求，“规定”尽可能细致、明确、清晰，具有可操作性。

(3) 进行卓有成效的监考岗位培训，包括思想教育培训（使监考者在上岗前能正确认识考试的目的、意义，讲究应试品德，严格执行监考纪律），心理素质培训（使监考者在上岗前了解有关学生实验思考心理知识，评分时尽可能客观、公正）和技术培训（采集、加工、分析监考信息的技术，掌握评分标准的技术，对考试结果分析、评价的技术等等）。

#### 9. 中学物理操作技能评价凡例

##### 实验“电场中等势线的描绘”

- (1) 操作部分教学目标

项目	内 容		目标水平
组 装	时间	4 分钟	
	质量	1.白纸、复写纸、导电纸依次贴匀、固定，导电纸的导电面朝上。	B
		2.电路正确，电极位置间距适当。	A
		3.导线连接规范，钢丝基本不外露。	B
		4.电极与导电纸接触良好，电路无断路现象。	B
	5.连接电路时，电键处于“断开”状态，电源要最后连接。	C	
调 试	时间	3 分钟	
	质量	6.将探针在导电纸上任意试触数点，检查灵敏电流表是否良好。	B
主 体 操 作	时间	25 分钟	
	质量	7.极、基准点及探针探到的不同等势点的位置均能用不同符号表示，并能清晰地复印在白纸上。	B
		8.两探针不能同时在导电纸上移动，探针不能压着导电纸移动。	B
		9.画出的等势线要平滑，电力线基本垂直于等势线，白纸无严重污损。	B
	10.整理好实验器材，复原摆齐。	C	

## (2) 考题

组装“电场中等势线的描绘”实验装置。

探测 5 个基准点的共 50 个等势点（每个基准点两侧，每侧各 5 个点）。

描等势线并画一组电力线。

## (3) 考场准备

桌上备有直流电源 1 个，电键 1 个，电极 2 个，灵敏电流表 1 个，探针 2 根，制图板 1 块，导线若干，白纸、复写纸、导电纸各 1 张，图钉 4 个（供上题 用）。

题 器材同题 ，但已组装好（供上题 用）。

桌上提供已经全部探测好等势点的白纸（可事先印好）1 张（供上题 用）。

