

基础物理学

上 卷

(日)金原寿郎编 王路等译 郭永江校



基础物理学

上 卷

〔日〕金原寿郎 编
王 路 等 译
郭 永 江 校

高等教育出版社

《内 容 提 要》

本书根据日本裳华房出版的金原寿郎编(石黑浩三、金原寿郎、小谷正雄、原岛鲜、山内恭彦执笔)《基础物理学》1977年第27版译出。全书分上下两卷,上卷包括力学、振动与波、光学和热力学等方面的内容,下卷包括电磁学、相对论、量子力学、电子学、原子核等方面的内容。

前言、第1章、第13—16章、附录由王路译,第3—7章由吕乔青译,第2章、第8—12章由穆向荣译。

本书可作理工科大学的物理课程的参考书。

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日,上级同意恢复“高等教育出版社”,本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

基 础 物 理 学

上 卷

〔日〕金原寿郎编、王路等译、郭永江校

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 14.25 字数 340,000

1980年3月第1版 1983年8月第3次印刷

印数 20,901—24,450

书号 13010·0444 定价 1.05 元

前 言

目前日本的大学教育分为一般教育(基础教育)和专门教育(专业教育),然而以学习知识为主要目的的一般教育,一定要向专门教育发展。有鉴于此,本书既包括专门教育的内容,又是主要为攻读理工科学生编写的普通物理学教科书。

就其特点而言,本书对将要攻读物理学科及其邻近学科的学生来说,是物理学的入门书,而对其他读者来说,则应该作为以后查阅的参考书。因此执笔人把重点主要放在基础部分,同时从现代状况着眼,竭力把科技人员所必需的知识尽量搜集进来,并且由全体执笔人来决定全书内容,讨论叙述方法。

由于内容涉及许多方面,有些部分还涉及某些专门领域,所以要把本书全部内容都放在规定的上课时间内,在课堂上完成,那是不可能的。在课堂内,只打算讲基础部分。其他内容,希望同学们自学。所以我们尽力使叙述易懂,同时推导公式时尽可能不省略中间过程。而且随时穿插例题,并在章末附有习题,书末附有习题略解。因此本书是一本摆脱了教科书传统观点的自学书。自学时,必然会出现的疑难问题,希望能在课堂上解决。实际上,如果不采用这种方法,就不可能把今天这样发展了的物理学,在一般教育的有限时间内完成。

在物理学的学习方面,经常遇到的障碍是术语不统一和单位制混合使用。为了防止在这种非本质的问题上分散精力,本书用语尽可能依据日本文部省编的学术用语集。而单位和物理量符号,则依据国际理论物理与应用物理协会和日本工业标准调查会的建议。这两个机构都推荐 MKS 单位制,对电磁学推荐 MKSA

制。因此在下卷采用 MKSA 制,在上卷采用 MKS 制。例如,作为热量的单位,采用 J(焦耳),这对笔者也是不习惯的。但是可以预想到将来是会常用的,所以我们才决心采用。我们认为最初多少有点不便,而从国际统一的观点来看,倒是可以互相体谅的。

编者

1964 年 3 月 8 日

目 录

第一章 物理量和单位

§ 1.1 物理学研究方法	1	§ 1.5 重力质量及其单位	10
§ 1.2 单位和单位制	3	§ 1.6 单位的换算和量纲	12
§ 1.3 长度的单位	4	§ 1.7 物理量之间的关系式	14
§ 1.4 时间的单位	7	习题	15

第二章 运 动 学

§ 2.1 位置矢量和位移矢量	16	§ 2.8 速度的极坐标分量	26
§ 2.2 一般矢量	17	§ 2.9 加速度矢量	27
§ 2.3 直角坐标	19	§ 2.10 加速度的直角分量	28
§ 2.4 极坐标和圆柱坐标	21	§ 2.11 加速度的极坐标分量	31
§ 2.5 矢量的直角分量	22	§ 2.12 切向加速度和法向加速度	32
§ 2.6 速度矢量	23	习题	34
§ 2.7 速度的直角分量	25		

第三章 力 与 运 动

§ 3.1 力的本质	36	§ 3.10 单摆、简谐振动	56
§ 3.2 作为物理量的力	37	§ 3.11 弹簧振子	59
§ 3.3 惯性定律	39	§ 3.12 摩擦力	61
§ 3.4 惯性质量	41	§ 3.13 行星的运动与万有引力定律	64
§ 3.5 运动定律	43	§ 3.14 惯性力	68
§ 3.6 作用与反作用定律	46	§ 3.15 地球的自转	73
§ 3.7 重力加速度	48	习题	76
§ 3.8 抛射体运动	51		
§ 3.9 约束运动	52		

第四章 运动方程的变形

§ 4.1 第一种变形(动量与冲量)	78	§ 4.5 保守力与位	87
§ 4.2 第二种变形(动量矩与力矩)	80	§ 4.6 位与力的分量	90
§ 4.3 第三种变形(动能与功)	83	§ 4.7 能量	92
§ 4.4 功	84	习题	95

第五章 质点系与刚体力学

§ 5.1 质点系的动量与质心的运动.....97	§ 5.7 具有固定轴的刚体的运动.....112
§ 5.2 动量守恒定律.....100	§ 5.8 转动惯量.....116
§ 5.3 球的碰撞.....102	§ 5.9 复摆.....118
§ 5.4 质点系的能量.....105	§ 5.10 刚体的平面运动.....120
§ 5.5 质点系的动量矩.....108	§ 5.11 刚体的平衡.....123
§ 5.6 刚体.....111	§ 5.12 刚体的平面运动举例.....126
	习题.....130

第六章 弹性

§ 6.1 固体的变形.....132	§ 6.5 切变弹性模量.....143
§ 6.2 应变与应力.....135	§ 6.6 扭转.....145
§ 6.3 杨氏模量与泊松比.....137	§ 6.7 弯曲.....148
§ 6.4 体积弹性模量(体积弹性系数).....139	习题.....150

第七章 流体

§ 7.1 静止流体内的压强.....152	§ 7.6 粘滞性.....163
§ 7.2 静止流体内的压强与高度的关系.....154	§ 7.7 哈根-泊肃叶定律.....166
§ 7.3 浮力.....155	§ 7.8 流体中的运动物体所受的流体阻力.....168
§ 7.4 理想流体的运动.....157	§ 7.9 流动相似原理.....172
§ 7.5 伯努利定理.....160	习题.....174

第八章 振动

§ 8.1 谐振动的合成.....176	§ 8.3 受迫振动.....186
§ 8.2 阻尼振动.....180	习题.....191

第九章 波动

§ 9.1 波动.....192	§ 9.7 波的干涉和绕射.....204
§ 9.2 波动的微分方程.....195	§ 9.8 波反射所引起的周相变化.....206
§ 9.3 弦上传播的横波.....197	§ 9.9 驻波.....209
§ 9.4 杆上传播的纵波.....198	§ 9.10 沿任意方向传播的平面波方程.....210
§ 9.5 空气中传播的纵波(声波).....200	习题.....211
§ 9.6 惠更斯原理.....202	

第十章 声学

§ 10.1 基音和泛音.....213	§ 10.2 音色和音调.....214
----------------------	----------------------

§ 10.3 弦的振动·····	216	§ 10.7 声音的多普勒效应·····	223
§ 10.4 弹性杆的纵向振动·····	217	§ 10.8 声的能量·····	226
§ 10.5 空气柱的振动·····	219	§ 10.9 声强级和声的响度·····	229
§ 10.6 耳与口·····	222	习题·····	230

第十一章 几何光学

§ 11.1 光线·····	232	§ 11.7 节点·····	245
§ 11.2 平面波、球面波与成象·····	234	§ 11.8 放大镜的放大率·····	246
§ 11.3 共轴球面系·····	237	§ 11.9 显微镜的放大率·····	247
§ 11.4 薄透镜的公式·····	238	§ 11.10 望远镜的放大率·····	249
§ 11.5 两个薄透镜的透镜组·····	241	§ 11.11 滑动透镜组·····	250
§ 11.6 主点·····	244	习题·····	251

第十二章 物理光学

§ 12.1 费马原理·····	253	§ 12.10 周相差显微镜·····	287
§ 12.2 光的干涉·····	255	§ 12.11 偏振光·····	290
§ 12.3 薄膜干涉·····	261	§ 12.12 反射引起的偏振光·····	291
§ 12.4 防止反射膜·····	266	§ 12.13 双折射·····	292
§ 12.5 光的相干性·····	268	§ 12.14 克尔效应 光弹性效应·····	295
§ 12.6 光的绕射·····	270	§ 12.15 旋光性·····	299
§ 12.7 光的单缝绕射·····	275	§ 12.16 光的速度·····	301
§ 12.8 绕射光栅·····	278	习题·····	304
§ 12.9 分辨本领·····	281		

第十三章 温度和热量

§ 13.1 温度·····	306	§ 13.7 溶解、凝固、升华·····	324
§ 13.2 固体、液体的热膨胀·····	309	§ 13.8 蒸发和凝结·····	325
§ 13.3 气体的热膨胀·····	313	§ 13.9 过热液体和过饱和蒸汽·····	327
§ 13.4 热量·····	318	§ 13.10 热传导·····	331
§ 13.5 热容量、比热·····	318	§ 13.11 热传递·····	334
§ 13.6 气体的比热·····	322	习题·····	336

第十四章 热力学第一定律

§ 14.1 绝热壁·····	338	§ 14.6 道耳顿定律·····	349
§ 14.2 热力学第一定律·····	339	§ 14.7 焦耳-汤姆孙效应·····	350
§ 14.3 准静态过程·····	343	§ 14.8 理想气体的两种比热之差·····	352
§ 14.4 等容过程和等压过程·····	344	§ 14.9 理想气体的绝热准静态 过程·····	353
§ 14.5 理想气体的内能·····	346		

§ 14.10 循环.....	357	习题.....	360
§ 14.11 卡诺循环.....	357		

第十五章 热力学第二定律

§ 15.1 可逆过程和不可逆过程.....	362	§ 15.8 熵.....	378
§ 15.2 热力学第二定律.....	364	§ 15.9 熵的性质.....	380
§ 15.3 各种现象的不可逆性.....	367	§ 15.10 熵和不可逆过程.....	382
§ 15.4 在两个热源之间运转的 热机.....	369	§ 15.11 热力学过程的进行方向 和平衡条件.....	383
§ 15.5 克拉珀龙-克劳修斯方程.....	371	§ 15.12 麦克斯韦法则.....	384
§ 15.6 热力学温度.....	373	习题.....	386
§ 15.7 克劳修斯公式.....	375		

第十六章 热和分子运动

§ 16.1 原子论的发展.....	387	§ 16.6 固体的分子运动.....	401
§ 16.2 气体的分子运动.....	388	§ 16.7 液体的分子运动.....	404
§ 16.3 能量均分定律和气体的 热容量.....	393	§ 16.8 布朗运动.....	404
§ 16.4 麦克斯韦速度分布律.....	395	§ 16.9 熵的分子论解释.....	408
§ 16.5 平均自由程.....	400	习题.....	411

附录	413
----------	-----

习题略解	423
------------	-----

索引	431
----------	-----

第一章 物理量和单位

§ 1.1 物理学研究方法

物理学分析研究自然界的种种现象的方法,是有其特点的.即首先分析现象,从中得到具有大小的要素.然后用这些要素之间的数量关系来表示现象.例如,一个球在空中沿弧形轨道运动这一现象,就可用给予球的力、作用于球的重力、球的速度、球的位置、运动的时间等要素之间的关系来表示.象这样一些具有大小的要素就叫做物理量,或简称为量.而且,物理定律一般可用物理量之间的数量关系来表达.在物理量中,有的量(例如体积)可以只考虑其大小;还有的量(例如力),除考虑它的强弱(大小)之外,同时还必须考虑它的方向;但都是物理量,这一点是无疑的.

于是分析研究一个物理量时,首先必须把它的特点弄清楚,然后再把用来测定这个物理量大小的物理方法加以规定.例如,物体重量,不能仅凭托在手上的感觉来确定它的轻重.因为感觉并不那么精确,而且也并不那么值得信赖.无论如何也要考虑某种成为标准的、象秤那样的东西,必须依据秤的刻度来显示重量.

实际上,自然界发生的现象,有多种物理量相互联系着、复杂交错着.要把其中某种要素分离出来,实际上是不可能的.比如说,我们联系物体的运动来考虑距离、时间、质量、力等物理量,请想一想,用什么办法从其中确定例如时间这样的量.

我们对时间的长短不能凭直观得知.只有长度或角度那样具有一维空间延伸的量,才能凭直观知道.因此,必须把时间的测定转换为长度或角度的测定.而且这长度或角度必须可视为以一定

速度而改变的量。但要知道其速度，就必须先知道与这运动有关的定律，然而，既然测量时间的方法还没有确定，运动也就不可能确定。这样一来，在定义某一个量之前，就需要先把另一个量定义好，而定义这第二个量时，又涉及到它和第一个量之间的联系，这就产生了所谓循环的关系。

这种关系，和求解含有很多未知数的联立方程的情况相类似。解多元高次方程时，用直接法顺次求各未知数是办不到的。遇这种情况，我们必须根据观察而求解。即首先对几个未知数暂且给与预想的数值，由此求出其它的未知数，然后验算一下，看这些数是否满足所有的联立方程，如果不能满足，那么就要修正最初的预想值，这样，由粗略值逐步趋向于正确的答案。

现在用上述例子，来说明这种方法。把地球设想为匀速转动的物体，由此来规定时间长短的测定法。另一方面，因为许可作适当的假设，所以又规定质量和力等物理量的测定法，导出运动定律。然后，以这个运动定律为基础，讨论地球的自转运动。如果我们能够证明地球是匀速转动的，那么就等于证明了原先的设想。由于这样的原故，对于物理量，一开始就给出明确的定义，并且用明确的测定方法，按顺序一个一个规定下去，那是不可能的。我们不得不采取这样一种方法，即进行测定时预设一些假定，一边修正这些假定，一边测定，要求就整体看时其间没有矛盾。特别是在力学的开头部分，在各量的测定方法上，有的地方缺乏逻辑的必然性，而这些量是应该从整体的联系上去定义、去理解的。

上述情况，在推导定律时也是一样。当我们为了查明几个要素之间的关系而进行实验时，实际上其它要素不可避免地也要混进来。但是，我们设想从实验结果中除掉混入要素时的结论，由此来归纳已知要素之间的关系，即定律。由此看来，物理学的研究方法是归纳法，而不是演绎法。因此，即使假定现在有尚可认为完整

的物理学体系，但将来的新事实究竟能不能无矛盾地都被包括进去，这还是不能保证的。如果原有的物理学体系不能包括新事实的话，那就得重新建立体系。照这样，逐步地走向完整的体系，这就是物理学的研究方法。

§ 1.2 单位和单位制

为了表示一个物理量，首先要适当选择大小可成为其标准的量，也就是单位，然后表示出该物理量相当于这个单位的几倍（数值）就可以了，即可以用下面关系表示：

$$\text{物理量} = \text{数值} \times \text{单位}$$

因为单位应该按照各个物理量来规定，所以，可以任意地分别选择单位。例如，长度和面积本来是不同种类的量，因此，分别地去规定单位并没有什么不好。不过，在规定物理量的单位时，我们让它具有某种关系，这样作，在把现象作为数量关系来表示的情况下，可以使问题简化。例如，任意规定长度的单位，那么就把面积的单位规定为以这个长度为一边的正方形的面积，而把以单位长度为一边的立方体的体积规定为体积的单位。长度和时间的单位适当地确定之后，速率的单位就规定为在单位时间内前进单位长度的快慢。象这样，最初适当选定的单位叫做基本单位，由此导出的单位叫做导出单位。研究全部物理量需要几个基本单位呢？对于处理力学现象的范围来说，需要三个基本单位，并且只要这些就足够了。这一点，在处理实际的力学问题时，将会容易理解。基本单位必须是可以确信其绝对不变的。我们选取认为满足这个条件的长度、质量、时间这三个量作为基本单位。这样，长度、质量、时间这些基本单位以及由它导出的全部导出单位这一整体称为绝对单位制。

关于质量，我们在后面还要详细叙述，一定质量的物质，可以

认为作用于它的重力也是固定不变的。只是重力随测量地点之不同,而多少有些差异,所以指定了地点,那么作用于物体的重力也可以选为基本单位。象这样,把长度、力、时间这三个量作为基本单位的单位制就是重力单位制。

在物理学中处理的量是从很大的量一直到极微小的量。对长度来说,是由天文学上的距离到原子的线度。于是,对一个单位设立副单位是方便的。实际采用的副单位,象表 1.2-1 那样,是在基本单位的名称上加上词冠来称呼。例如 nm(纳米, nanometer),表示 10^{-9}m , Tg(太克, teragram) 表示 10^{12}g 。

表 1.2-1

因 数	词 冠	国际代号	因 数	词 冠	国际代号
10^{-1}	déci (分)	d	10^{-12}	pico (皮可)	p
10^{-2}	centi (厘)	c	10^3	kilo (千)	k
10^{-3}	milli (毫)	m	10^6	méga (兆)	M
10^{-6}	micro (微)	μ	10^9	giga (吉咖)	G
10^{-9}	nano (纳诺)	n	10^{12}	téra (太拉)	T

§ 1.3 长度的单位

长度本来是为了表示点的相对位置的量。把两个长度叠合在一起,就可以凭直观判定其大小。长度在所有物理量中成为最基本的单位,其理由也就在这里。而且很多其它物理量,也是依据长度的测定来测定的。例如,用钟表指针移动的距离测定时间,用秤的刻度测定物体的重量,用水银柱长度测定温度。

物理学中采用米(m)作为长度的单位,米这个单位首先是在法国于1795年制定的。最初是用地球子午线全长的 4000 万分之一作长度单位,并对子

午线进行了测量。其后，几经周折，到 1875 年才开始在国际上产生米条约，制定了米原器。这个米原器有特殊的截面（这是为了不易弯曲），是由含铂 90%、铱 10% 的合金作成的棒，在接近它的两端的地方刻有细标线。在 0°C 时，这两标线间的距离规定为 1 米。这个国际米原器保存在巴黎郊外的国际权度局，而各国保存着和它几乎相同的副原器。每个原器都难免没有些误差；分配给日本的米原器的两标线间的长度是

$$1\text{m} - (1.3 + 8.667t + 0.00100t^2) \mu\text{m}$$

其中 t 是温度 ($^{\circ}\text{C}$)， μm 是微米，即 10^{-6}m 。

这样决定出来的米原器也有许多缺点。首先是永恒不变性的问题，既然是人工制造的东西，就不能说没有破损的危险，并且这种用合金制成的东西，年长日久，不能保证它不自行变形。况且，比这更重要的缺点是精确度问题。原器两端的标线虽是细线，但也约有 $6\sim 8\mu\text{m}$ 的宽度。因此即便是取两线的中心，对全长来说也不能避免有 $0.2\mu\text{m}$ 左右的误差。也就是说，相对误差只有 2×10^{-7} 的精确度，这满足不了已经进步了的现代精密科学的要求。因此，从永恒不变性这一意义着想，从二十世纪初人们已开始考虑用某种光的波长作为长度标准。并且，曾经有人建议，采用 Cd(镉)蒸气中放电时发出的红色光作为长度的标准。

其所以用光的波长作为长度标准，是基于如下考虑：

“不受外部任何影响的静止的同一种类原子所发出的光，其波长是恒定的^①”。

但是实际上，元素是同位素的集合体，不是完全由同一种类原子组合成的；原子之间存在着相互影响；原子要受到使它发光的电性影响；原子前后左右振动着，即使发出的光是固定的，也会由于多普勒效应而观测到不同波长的混合光，此外还有其它种种原因，所以未能得到波长一定的纯单色光。

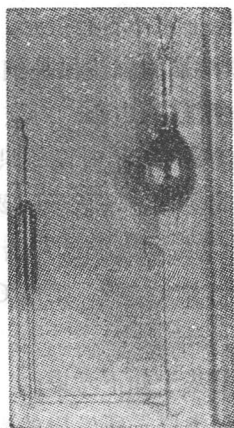
经过后来的研究，人们分离出一种叫做 ^{86}Kr ^② 的同位素，已经

① 因为是由几个不同波长的光混合的，所以选用其中的一种波长。

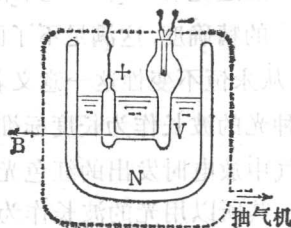
② 在 Kr 中本来就含有质量数为 78、80、82、83、84、86 的同位素。

能够得到接近于理想的光。接着,在1960年10月14日的国际权度大会上,决定采用 ^{86}Kr 发出的Kr 86 橙色线的波长作为今后长度的单位。在日本也用政府法令作了决定,从1961年7月1日起采用它。

图1.3-1示出这个 ^{86}Kr 灯的概况,V是具有热阴极的真空管,里面封有少量的 ^{86}Kr ,从B的方向,用分光仪观测由于放电而得到的光的波长。将V放入液态氮N中,这氮用抽气机减压,使用时N的温度控制在 $(63\pm 1)\text{K}$ 的范围。



(a) Kr86 灯泡



(b)工作原理图

图 1.3-1

其所以使用低温低压下 ^{86}Kr 所发出的光,是为了减少上述种种干扰,而对于放电电流也可给以一定的限制。

在这样发出的光中,将所谓 Kr86 橙色线在真空中的波长的1650763.73 倍规定为1 m,当然这和历来的1 m 几乎没有差异。

这种方法,精确度是非常高的,米原器的精确度是 2×10^{-7} ,而在这里可得到 10^{-8} 的精确度,将来有希望可以达到 10^{-9} 的精确度。

§ 1.4 时间的单位

我们大家虽然能够体会到时间的经过，但是并不能精确地知道所经过时间的数量。于是，就象在 § 1.2 所叙述的那样，假设有一可看作具有一定周期的物体，或者可以看作匀速运动的物体，并用它来测定时间。但是这一想法正确与否，就要看由此出发而形成的整个物理学体系如何来判定。

即便是那样，还必须规定某一确定的时间，也就是说，必须规定时间的单位。最初采用的确定的时间是由地球的自转推算出来的。现在设想在天空中有一个以地球的中心为中心、半径很大的球面（图 1.4-1），试将所有的星体向这天球上作投影，如果不考虑地球的自转，所有的恒星大体上都成为天球上的固定点，可是太阳却在此天球上运动。那是因为地球是在太阳的周围公转的原



图 1.4-1

故。太阳的轨道 $VDACV$ 叫做黄道。由于地球在太阳周围并不是以固定的角速度运行，所以黄道上的太阳的速率也不是固定不变的。同时，地轴并不垂直于黄道面（即地球的公转轨道平面）。因此，地球的自转角速度即使是固定的，1天的长短，也就是说，太阳从某日中天到次日中天的时间是随四季而变化的。

因此，通过地球的中心并与地轴相垂直的平面同天球的交线 EW 取名为赤道，在这个赤道上，设想有一个以固定的速率运动的假想的太阳，称它为平均太阳。在赤道和黄道的交点 V 、 A 之中，太阳由南半球向北半球移动时经过的点 V 叫做春分点，另一点 A 叫做秋分点。平均太阳的运动速率，规定为和真太阳同时由春分点出发，次年同时返回到春分点的速率。实际上，地轴并不保持一

定的方向,而是象陀螺那样,非常缓慢地做进动运动,所以赤道面的方向缓慢地发生变化,春分点也多少有些移动.由春分点出发再回到春分点的时间,严格来说,比太阳在天球上转一周的时间稍短,这叫做1太阳年(或1回归年).

总而言之,因为平均太阳是在赤道上以一定的速率运动,所以如果地球的自转的速率一定时,平均太阳从今天的中天到次日的中天的时间就应是一定的.把这个时间定为一日,它的 $1/24$ 定义为1小时.

在日本,选取通过东经 135° 的地点也就是明石市的子午线为基准.因此,平均太阳在正午时准确地^在明石市中天,而真太阳则不一定是那样.

上面是历来的时间的单位,这是以地球自转速率固定不变这一假设为基础的.但是使用迄今这样规定的时间时,由地球见到的月球的运动,和由计算所预想的有差异,察觉到在长年中有逐渐加快的趋向.对地球有万有引力影响的,除太阳之外还有行星.因此地球不是在太阳周围做准确的椭圆运动,其轨道的形状接近于圆形,虽然其接近程度很小.月球的视运动和计算不吻合的原因之一就在这里,但是仅仅用这个原因还不足以说明计算的差异.由于这种情况,对于地球自转速度为恒量的假定很早以前就发生了怀疑.近年来,钟表工业取得了很大的进步,特别是发展了石英钟,于是极为精确的时间测定成为可能,这就越发加深了这个怀疑.

石英伸缩时,在其两端产生正负电荷,因此,如以正负电荷交替给与两端,并且使它的周期和石英片的伸缩振动周期合拍时,就会引起很强的共振.此振动周期极为稳定,温度的影响等也非常小.因此利用石英片可以产生一定周期的交流.只是此时交流频率非常大,因而可用电子管回路将频率减小到几分之一.这样可得到普通的交流,这里再应用电钟的原理,就可以制成以一定速率而动作的钟.这就是石英钟的原理.

这样一来,现在已经不再认为地球的自转速度是固定不变的,