# 第 15 章 单位、单位制与基本常数简史

## 15.3 基本物理常数的测定与评定

随着科学与技术的进步，科学成果的交流日益频繁，国际合作广泛开展，大量信息在科学技术领域中传播，这就要求人们对测量数据有共同认识，建立大家公认的基准，否则就会产生不应该的误解，或引起不必要的麻烦。

为了做到对测量数据有共同的认识，除了有必要确定国际公认的单位和单位制之外，还有一必不可少的环节，就是一些重要的物理常数，必须是科学界普遍接受的那些数值。

物理常数大致可以分为两类，一类与物性有关，例如：沸点、比热、导热系数、电阻率、电阻温度系数、折射率等。这些常数表征物质的固有特性，可以称为物质常数。另有一类常数与具体的物质特性无关，是普适的，例如真空中的光速、基本电荷量、普朗克常数、精细结构常数等，人们称之为基本物理常数。这些常数出现在物理学的各个分支里，通过物理学一系列定律和理论彼此相互联系，构成了物理学框架中不可缺少的一些关节点。

基本物理常数大多与原子物理学和粒子物理学有关，其数目不下四五十个。随着物理学的领域向纵深发展，基本物理常数涉及的范围越来越广，数目越来越多，测量方法日新月异，结果也越来越精确。一个基本常数往往可以用几种不同的方法测定或经不同的途径得出，于是就要互相比较、检验、评定并定期地在评定的基础上作出选择，把最佳的结果推荐给科学技术界的广大公众，使基本常数成为科技人员普遍利用的数据资料。

基本物理常数的精确测定是实验工作者长期奋斗的结果，是当代科学技术水平的集中反映。这项工作的意义在前一章已作说明，毋庸赘述。下面仅就基本物理常数的评定工作做些介绍，并列举几项重要的基本物理常数及其历史发展概况。

### 15.3.1 基本物理常数的评定

既然基本物理常数可以从不同途径得出，或者可以经各种定律和理论相互联系，就会发生是否协调的问题，如果不协调，必然引起严重后果。因此早在 20 世纪初，科学界就有人致力于总结出一套协调的基本物理常数供公众采用。

1926 年瓦希本（E.W.Washburn）主编的《国际评定表》第一卷（International Critical Tables，vol.1）问世，书中收集了大量物理常数和化学常数，把一套经过认真审核的基本常数列成一览表提供给使用者，深受科技界欢迎。

1929 年伯奇（R.T.Birge）发表了著名论文：《普通物理常数的可几值》[[1]](#footnote-1)，系统地对基本物理常数进行分析评定，对不同来源的数据进行对比，加以校正，用最小二乘法逐项处理基本物理常数，求其最可几值。由此向公众推荐了一套可靠的基本物理常数，深受科技界的欢迎。尽管伯奇 1929 年的工作尚属初步，但他开创的最小二乘法平差（least squares adjustment，平差就是调整的意思）方法，为以后的常数评定工作奠定了基础。1937 年至 1955 年间，陆续有一些综述性论文，采用伯奇的方法对基本物理常数进行评定。1941 年和 1945 年伯奇也发表了自己这方面的工作。他们大多以个人的名义进行评定工作，力量分散，内容重复，没有统一标准。

1955 年科恩（E.R.Cohen）等人，1963 年泰勒（B.N.Taylor）等人集中了较大力量，作了系统的调查研究，先后发表了两组用最小二乘法处理过的基本物理常数。

更进一步的工作有待于国际组织加强领导。只有国家间协同工作，才能取得更大成效。1966 年，在国际科协理事会（ICSU）领导下，成立了科学技术数据委员会（CODATA）。

这个委员会的宗旨是在世界范围的基础上促进、鼓励、协调科学与技术数据的搜集分析和编撰。CODATA 下属一个基本常数工作组，专门从事与基本常数有关的工作，负责定期发表为全世界科学技术界可接受的协调的基本物理常数。

这样一来，基本物理常数的评定工作，就从学者个人的研究课题，变成了国际组织中有权威的公认代表的集体任务，同时，各国研究精密计量和基本常数的机构和专家，也在这一国际组织的指导下，按预定的目标共同攻关，既有分工，又有协作和交流。基本常数的测量和评定工作，从此走上了新的台阶。

表 15 – 1 表示历年来较有影响的几次基本常数评定工作。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 表 15 – 1 历年来的基本常数评定 | | |
| 年份 | 主持人 | 反映科学技术中的哪些重大进步 |
| 1929 | 伯奇 | 光谱学、光速测定、油滴仪实验 |
| 1941 | 伯奇 | X 射线衍射、电子技术 |
| 1947 | 杜蒙、科恩 | 微波 |
| 1955 | 科恩、杜蒙 | 核磁共振 |
| 1969 | 泰勒等 | 微波激射和激光 |
| 1973 | 科恩、泰勒 | 约瑟夫森效应 |
| 1986 | 科恩、泰勒 | 激光光谱学、量子霍尔效应 |
| 1998 | 莫尔、泰勒 | 激光光谱学、量子电动力学、带电粒子陷阱技术 |
| 2002 | 莫尔、泰勒 | （从这一届起以后将每四年进行一次评定） |

跟 1973 年平差相比，1986 年有如下新进展：

（1）光速已定为精确值；

（2）由于激光光谱学的发展，里德伯常数进一步精确；

（3）由于量子霍尔效应的发现，精细结构常数测得更准；

（4）由于创造了 X 射线光学干涉术，阿伏伽德罗常数突破了 ppm（百万分之一）大关；

（5）由于创造了单电子彭宁陷阱方法，电子 *g* 因子测量精确度大有提高；

（6）大多数基本常数的不确定度都降低了一个数量级，达 1 ppm 以下。

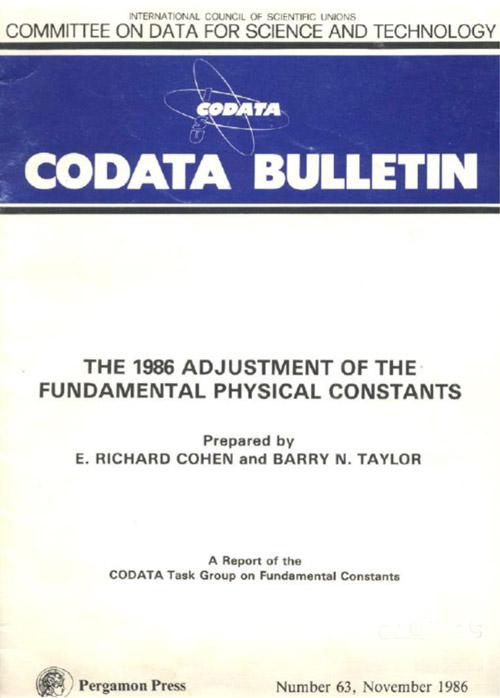


图 15 – 9 科学技术数据委员会 1986 年通报

1998 年平差比 1986 年又前进了一步，大多数基本常数的不确定度下降为原来的 1/5 至 1/12。里德伯常数 *R*∞ 的不确定度是所有常数中最突出的，下降达 1/160。其原因是，1986 年 *R*∞ 的推荐值主要根据 1981 年的实验结果，从 20 世纪 90 年代开始，测定氢原子跃迁频率的方法已用光学频率测量代替了原来的光学波长测量，而里德伯常数 *R*∞ 正是用氢原子跃迁频率值获得的，由于方法的改进，使不确定度下降了几个量级。

2003 年年底公布了新的一轮基本物理常数的评定结果，收集的实验数据截至 2002 年 12 月 31 日，因此称之为 2002 平差。与 1998 年平差相比，引力常数 *G* 的精确度提高了十倍。

### 15.3.2 几项重要的基本物理常数

下面从基本物理常数中选几个较重要的，略述其历史发展概况。

#### 1．真空中的光速

这是最古老的物理常数之一。早在 1676 年，罗默从木星卫的观测得出光速有限的结论。观测证实了他的预言，据此，惠更斯推算出光速约为 2×108 米/秒。

1728 年布拉德雷根据恒星光行差求得 *c* = 3.1×108 米/秒。1849 年，斐索用旋转齿轮法求得 *c* = 3.153×108 米/秒。他是第一位用实验方法测定地面光速的实验者。实验方法大致如下：光从半镀银面反射后经高速旋转的齿轮投向反射镜，再沿原路返回。如果齿轮转过一齿所需的时间正好与光往返的时间相等，就可透过半镀银面观测到光，从而根据齿轮的转速计算出光速。1862 年，傅科用旋转镜法测空气中的光速，原理和斐索的旋转齿轮法大同小异，他的结果是 *c* = 2.98×108 米/秒。第三位在地面上测到光速的是考尔纽（M.A.Cornu）。1874 年他改进了斐索的旋转齿轮法，得 *c* = 2.999 9×108 米/秒。迈克耳孙改进了傅科的旋转镜法，多次测量光速。1879 年，得 *c* =（2.999 10 ± 0.000 50）×108 米/秒，1882 年得 *c* =（2.998 53±0.000 60）×108 米/秒。

后来迈克耳孙综合旋转镜法和旋转齿轮法的特点，发展了旋转棱镜法，1924—1927年间，得 *c* =（2.997 96 ± 0.000 04）×108 米/秒。迈克耳孙在推算真空中的光速时应该用空气的群速折射率，可是他用的却是空气的相速折射率。这一错误在 1929 年被伯奇发觉，经改正后，1926 年的结果应为 *c* =（2.997 98 ± 0.000 04）×108 米/秒 =（299 798 ± 4）千米/秒。

后来，由于电子学的发展，用克尔盒、谐振腔、光电测距仪等方法，光速的测定比直接用光学方法又提高了一个数量级。20 世纪 60 年代激光器发明，运用稳频激光器可以大大降低光速测量的不确定度。1973 年达 0.004 ppm，终于在 1983 年第十七届国际计量大会上作出决定，将真空中的光速定为精确值。表 15 – 2 表示历年来真空中光速的测量结果。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 表 15 – 2 历年来真空中光速的测量结果 | | | | |
| 年份 | 工作者 | 方法 | 结果（km/s） | 相对不确定度（km/s） |
| 1907 | Rosa，Dorsey | esu/emu | 299784 | 15 |
| 1928 | Karolus 等 | 克尔盒 | 299786 | 15 |
| 1947 | Essen 等 | 谐振腔 | 299792 | 4 |
| 1949 | Aslakson | 雷达 | 299792.4 | 2.4 |
| 1951 | Bergstand | 光电测距仪 | 299793.1 | 0.26 |
| 1954 | Froome | 微波干涉仪 | 299792.75 | 0.3 |
| 1964 | Rank 等 | 带光谱 | 299792.8 | 0.4 |
| 1972 | Bay 等 | 稳频 He-Ne 激光器 | 299792.462 | 0.018 |
| 1973 |  | 平差 | 299792,4580 | 0.0012 |
| 1974 | Blaney | 稳频 CO2 激光器 | 299792.459.0 | 0.0006 |
| 1976 | Woods 等 |  | 299792.4588 | 0.0002 |
| 1980 | Baird 等 | 稳频 He-Ne 激光器 | 299.792.4581 | 0.0019 |
| 1983 | 国际协议 |  | 299792.458 | （精确值） |

#### 2．普朗克常数

起初普朗克常数是用光谱、X 射线和电子衍射等不同方法测定的。通过如下关系可以确定普朗克常数：

测量 X 射线连续谱的极限，得 *h*/*e*；

电子衍射方法求德布罗意波长，得 *h*/；

从谱线精细结构常数，得 *e*2/（*hc*）；

从光谱的里德伯常数，得 *me*4/*h*3*c*。

1962 年约瑟夫森效应发现后，从约瑟夫森频率 *ν* 可以求普朗克常数 *h*：*ν* = 2*eV*/*h*，其中 *V* 为加在两弱耦合的超导体之间的直流电压。

由于普朗克常数无法直接测定，要从实验得到普朗克常数，总需通过一定的关系式间接推出，因此必然与其他基本物理常数有密切联系，特别是与电子的电荷值有联系，所以只有经过平差处理，才能得到和其他常数协调的普朗克常数。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 表 15 – 3 历年来普朗克常数的测量结果 | | | | |
| **年份** | **工作者** | **方法** | **结果（10–34 J·s）** | **相对不确定度** |
| 1900 | 普朗克 | 黑体辐射 | 6.55 |  |
| 1916 | 密立根 | 光电效应 | 6.547（6） |  |
| 1921 | 叶企孙等 | X 射线连续谱 | 6.556（9） |  |
| 1955 |  | 平差 | 6.62517（23） |  |
| 1969 |  | 平差 | 6.626196（50） | 7.5×10−6 |
| 1973 |  | 平差 | 6.626176（36） | 5.4×10–6 |
| 1986 |  | 平差 | 6.6260755（40） | 6.0×10–7 |
| 1998 |  | 平差 | 6.62606876（52） | 7.8×10–8 |
| 2002 |  | 平差 | 6.6260693（11） | 8.5×10–8 |

#### 3．电子电荷

电子发现于 1897 年，当时 J.J.汤姆孙并没有能够直接测到电子电荷，后来用云雾法也只能确定其数量级，直到 1909 年密立根用油滴仪才得到精确结果。

1929 年，伯奇经过仔细研究，指出密立根用油滴仪得出的电子的电荷值 *e* =（4.772 ± 0.005）×10−10 esu 与贝克林（Backlin）用 X 射线对晶体布拉格衍射得到的电子电荷值 *e* = （4.794 ± 0.015）×10−10 esu 有系统偏差。他虽然最后还是采纳了密立根的结果作为平差值，但同时指出，应继续改进这两种方法，以查明分歧的起因究竟在哪里。1931 年有人发现，原来是密立根在计算油滴运动时用的粘滞系数不正确。这一数据是密立根的研究生用扭秤实验测得的，这个研究生忽略了悬简两端的粘滞阻力和附在悬筒上的空气所造成的阻力对转动惯量的影响。如果考虑这些因素对粘滞系数作出修正，正好可以弥补两种方法之间的偏差。表 15 – 4 举出历年来得出的电子电荷值。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 表15 – 4 历年来电子电荷的测量结果 | | | | |
| **年份** | **工作者** | **方法** | **结果（10–19 C）** | **相对不确定度** |
| 1917 | 密立根 | 油滴仪 | 1.592（2） |  |
| 1930 | Bearden | X 射线测晶体结构 | 1.603（1） |  |
| 1947 |  | 平差 | 1.60199（24） |  |
| 1950 |  | 平差 | 1.601846（23） |  |
| 1955 |  | 平差 | 1.60206（3） |  |
| 1963 |  | 平差 | 1.60210（2） |  |
| 1969 |  | 平差 | 1.6021917（70） | 4.4×10–6 |
| 1973 |  | 平差 | 1.6021892（46） | 2.9×10–6 |
| 1986 |  | 平差 | 1.60217733（49） | 3.0×10–7 |
| 1998 |  | 平差 | 1.602176462（63） | 3.9×10–8 |
| 2002 |  | 平差 | 1.60217653（14） | 8.5×10–8 |

#### 4．里德伯常数

里德伯常数在光谱学和原子物理学中有重要地位，它是计算原子能级的基础，是联系原子光谱和原子能级的桥梁。

1890 年瑞典的里德伯在整理多种元素的光谱系时，从以他的名字命名的里德伯公式得到了一个与元素无关的常数，人称里德伯常数。由于从一开始光谱的波长就测得相当精确，所以里德伯得到的这一常数达 7 位有效数字。

根据玻尔的原子模型理论也可从其他基本物理常数，例如电子电荷 *e*，电子荷质比*e*/*m*，普朗克常数 *h* 等推出里德伯常数 *R*∞。理论值与实验值的吻合，成了玻尔理论的极好证据。

进一步研究，发现光谱有精细结构，后来又得到兰姆位移的修正，在实验中还运用到低温技术和同位素技术，同时光谱技术也有很大改进。从 20 世纪 30—50 年代，里德伯常数的测定不断有所改进。

然而最大的进步是激光技术的运用。稳频激光器和连续可调染料激光器的发明为更精确测定里德伯常数创造了条件。历年来测定结果如表 15 – 5。从 20 世纪 90 年代开始，测定氢原子跃迁频率的方法已用光学频率测量代替了原来的光学波长测量，而里德伯常数 *R*∞ 正是用氢原子跃迁频率值获得的，使其数据的不确定度急剧下降，达到了 10−12 的量级。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 表 15 – 5 历年来里德伯常数的测量结果 | | | | |
| **年份** | **工作者** | **方法** | **结果（cm–1）** | **相对不确定度** |
| 1890 | 里德伯 | 光谱 | 109721.6 |  |
| 1921 | 伯奇 | 光谱精细结构 | 109736.9 |  |
| 1929 | 伯奇 | 光谱精细结构 | 109.737.42 |  |
| 1952 | 科恩 | 平差 | 109737.309（12） | 1.1×10–7 |
| 1969 | 泰勒 | 液氮、氘谱 | 109737.312（5） | 4.6×10–8 |
| 1972 | Kessler | 氮谱 | 109737.3177（83） | 7.6×10–8 |
| 1973 |  | 平差 | 109737.3177（83） |  |
| 1974 | Hansch | 饱和吸收光谱 | 109737.3143（10） | 9.1×10–9 |
| 1976 | Goldsmith | 偏振光谱法 | 109737.31476（32） | 2.9×10–9 |
| 1981 | Amin | 交叉光谱法 | 109737.31521（11） | 1.0×10–9 |
| 1986 |  | 平差 | 109737.31534（13） | 1.2×10–9 |
| 1986 | Zhao 等 | 交叉光谱法 | 109737.31569（7） | 6.4×10–10 |
| 1989 | Biraben 等 | 重新校对频率标准 | 109737.315709（18） | 1.6×10–10 |
| 1998 |  | 平差 | 109737.31568549（83） | 7.6×10–12 |
| 2002 |  | 平差 | 109737.31568525（73） | 6.6×10–12 |

1. Birge R T.Rev.Mod.Phys.，1929（1）：1 [↑](#footnote-ref-1)