

近代干涉仪

[英] C. 坎恩达勒著

上海科学技术出版社

近代干涉仪

[英] C·坎恩达勒 著

周雄豪 译

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书叙述近代工业上、实验室和研究机构用的各种干涉仪器,内容包括各种干涉仪设计所依据的理论,它们的结构,应用方法,应用范围和效果等。并把衍射光栅也列为一种干涉仪而讨论了它的划线工作和装璜方法,可供全国各高等学校有关专业、科学研究工作者、仪器制造方面的工程技术人员参考。

近 代 干 涉 仪

MODERN INTERFEROMETERS

原 著 者 [英] C. CANDLER

原出版者 HILGER & WATTS

LTD., 1951 年版

译 者 周 雄 豪

*

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路 2004 号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

上海市印刷五厂印刷 新华书店上海发行所总经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 19 字数 470,000

1959 年 10 月第 1 版 1959 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—2,300

统一书号: 13119 · 281

定 价: (十四)3.15 元

作者序

我希望在不久将来会有一位作者能写出一本关于干涉的书，它的内容就象梅叶教授所写关于衍射的书^①一样，包罗得非常广泛。现在这本书取材的范围比较狭，局限于讨论干涉仪和它们的用途，以及研究这些仪器所不可缺少的部分理论，也就是说，是讨论干涉仪而不是干涉学。不过，在这样具有一定限制的范围以内，本书的面还是力求广泛，凡是工业上用的、实验室用的以及研究机构用的各种仪器，都一一列举，详细介绍；不仅如此，本书还把衍射光栅也划为干涉仪之一而作了论述。

这里所谓范围具有一定限制是说在一本篇幅较大的著作中能够找到的很多内容，特别是那些只用来解释理论而无实际用途的实验，在本书中都被删去了；本书中也不重述那些树立光学基础的老科学家（例如杨氏）的工作。作者不写历史进展的原因一半也是出于不得已，因为在写这本书时，1930年以前发行的期刊极大部分都不在身边，无从得到参考。

本来准备每一章写一种仪器，但是因为法卜利·珀罗标准具、泰曼干涉仪和衍射光栅这几种仪器的应用都很广，如果每种写一章，势必写得很长，所以分几章写。在分章方面，可以按照理论来分，也可以按用途来分。威廉士在他所著“干涉度量学”一书中是按照理论来分的；他将各种仪器依照干涉光束是由波前的分割所产生的，还是由振幅的分割所产生的而分为两大类。本书则以仪器的用途作为分章的依据；一架干涉仪可用以测量光程差、长度、波长

^① 这是指 Meyer 所著 “Diffraction of Light, X-rays, and Material Particles” 一書——譯者。

或折射率,本书中的各种仪器就是按这些标题而进行归类的。

曾經为了符号的問題大伤腦筋。一个符号,一旦給于一个重要的量以后,就应该在全書中永远作为該量的符号;要接受这个原則很容易,但是应用时有困难,因为,当我们引用一位科学家的著作时,在不必要时并不希望更改他的符号。本書选用了康拉第所提出的首尾一致的符号系統。

专用名詞的問題比較容易处理,因为除了波数的單位以外,其他的名称都在好多年前就統一了。在討論到超精細結構和原子光譜的任何問題时都要用到波数,而且在討論用来研究超精細結構的干涉仪时,用“波数”要比用“波長”方便得多。甚至可以說过去就是因为大多数的科学家在討論这些題目时用了“波長”而不用“波数”才使理論上发展得很慢。因此,許多人都建議“波数”的單位應該采用比(厘米)⁻¹(cm⁻¹)更为方便的形式,但是至今还不曾广泛地采用任何其他的名稱。历史上認為“波数”这一名詞是由斯东尼所引用的,而里德伯首先在他的著名公式中广泛地应用这个名詞。因此,用“里德伯”作为这一單位的名称好象是很适当的,在本書中就采用这个名称,而用 R 作为略号以代替以前用的 cm⁻¹①。

无庸怀疑,在苏联杂志上发表了几篇关于干涉仪的文章是很重要的;在1931到1946年間的几篇关于泰曼干涉仪的文章都是由列宁格勒的国立光学研究所发表的;这些文章为研究工作开辟了新的場地。但是,要参考这些文章的研究人員会遭到两个很大的困难:第一,因为英国,美国,德国的“摘要”書中很少列入苏联的文章,所以研究人員即使要找他們感到兴趣的題目的名称也会有很大的困难②;虽然有些苏联杂志已將他們发表的文章的題目翻

① 譯者認為 R 这一个字很容易和其他名詞(如半徑,反射系数等)混扰,并且至今还没有普遍采用,所以在譯本中仍用 cm⁻¹ 或在 R 字样后面加以注解。

② 这个困难直到1949年6月才得到解决,那時科学和工业研究部出版了“翻譯的期刊目录單”——原作者注。

譯成其他國家的文字，但是這樣做並不能代替一個適當的“摘要”。
第二個困難是：即使知道了題目的名稱，研究人員還是不能達到他的目的，因為他還必須找一個能閱讀俄文，並且對他的學科有相當認識的人來替他翻譯；而且，即使他能使別人翻譯給他，也不能夠使在這方面工作的其他人員都得到這分翻譯（這是制度上的問題）。所以，對一個不能閱讀俄文的人，這些困難幾乎是不能克服的。為了能稍許減輕這種困難，在本書每一章末尾的參考文獻和書籍目錄中將俄文的文章和其他國家的文章分別列出，還將題目翻譯成英文。在本書的附錄中開列了一些文章，這些文章是著者在整理好書頁以後才注意到的^①。

在一本內容很多的書中，錯誤是難免的；假使任何人願意告訴我錯誤的地方，我是很感激的。

C. 坎恩達勒

① 為了使讀者在參考時方便一些，已將這些文獻分別放在有關各章的參考文獻目錄中——譯者。

目 录

作者序

第一章	干涉仪的应用	1
第二章	單色的輻射	7
第三章	長度的測量	55
第四章	厚板与薄膜	72
第五章	迈克尔孙干涉仪	127
第六章	泰曼稜鏡干涉仪	159
第七章	泰曼透鏡干涉仪	180
第八章	测定量規的干涉仪	222
第九章	用法卜利·珀罗标准具来測量長度	245
第十章	迈克尔孙的星体干涉仪	276
第十一章	反射式阶梯光柵	289
第十二章	透射式阶梯光柵	327
第十三章	用来測量波長的法卜利·珀罗标准具	342
第十四章	陆末·革尔克板	381
第十五章	衍射光柵的划綫工作	410
第十六章	平面衍射光柵	441
第十七章	凹面光柵裝置的方法	493
第十八章	凹面光柵的光譜和象差	520
第十九章	用作折射計的法卜利·珀罗标准具	549
第二十章	瑞利干涉仪	559
第二十一章	雅滿干涉仪	583
	英文人名地名譯名表	592

第一章 干涉仪的应用

1. 干涉仪的原理

所有的干涉仪都是將一束光分成两束光或許多条光束；这些光束在經過不同的路程后,再度重合而产生干涉条紋；这些条紋的形狀由相鄰光束間的光程差所決定。

由此可見,干涉仪首先是測量光程的差值。但是,因为光程差是几何路程和折射率的乘积,所以,如果两束光是在同样的媒質中进行,干涉仪就可以用来測量几何路程的差別；而当几何路程相等时,干涉仪又可以用来測量折射率的差別。因此,一架干涉仪可以測量三个物理量,那就是:光程差,長度和折射率。

測量光程差的單位是光的波長,所以一个測量長度的实验同时也測量了所用的光的波長。因为干涉条紋的寬度与波長有关,所以干涉仪可以和稜鏡一样使白光分解为光譜(也就是产生色散現象),而干涉仪的色散率通常要比稜鏡的大得多。

用干涉仪来測量这些物理量的小量差值时,要比測量它們的絕對值时好得多；事实上,有几种干涉仪只能測量差值(而不能測量絕對值)。譬如,陆末板可以用来測量光譜綫的精細結構,但是不能測量光譜綫的波長；雅滿干涉仪可以用来測量折射率的变化,但是不能測量它的絕對值。

2. 光程差

在一架完美的仪器中,不論是望遠鏡,显微鏡,照相机,或者是

攝譜仪，从光源到單色的象之間，各条光綫的光程都應該相等。用泰曼干涉仪就可以測量出通过光学系統的各条光綫的光程之間的小量差值，这样就可以以仅有的物理学上認為滿意的标准，也就是瑞利的“四分之一波長判据”，來衡量象差。在工厂中，这种仪器也是很重要的，因为它可以使产品的校正工作減輕。虽然在获得成功以前，还必须克服一些技术上的困难，但是在今天，我們已經用泰曼干涉仪來檢驗很复杂的光学系統，例如高倍显微鏡的物鏡和六吋口徑的远距照相鏡。

3. 長度的測量

在均匀的媒質中，光程差和長度的差別是成比例的，因此可以用干涉仪來測量長度。按照長度的大小(是几分之一個波長，还是几个波長，还是几千个波長)，可以采用不同的原理(事实上是采用不同的仪器)。从历史上看，最先掌握的是測量几个波長長度的原理(或仪器)，而在实际的情形，也是以这个原理应用得最广。

在實驗室中，只要能比較两个差不多相等的長度(也就是測出它們之間的小量差值)，就可以准确地測量長度或者檢驗平行性，甚至还可以測量角度；在做這項工作时，用干涉仪要比用任何其他仪器求得好，因为用它來測量时，所用的單位是不变的單色光的波長。做這項工作时通常是用斐索方法的一种改良形式，斐索的方法是在長度需要比較的两个物体上各放一块玻璃板，而后用計算条紋的方法来測量两个長度的差別。由寇斯特和道威尔所分別設計的，泰曼干涉仪的两种改良形式也可以用来比較在名义上具有同样長度的两个端規。

当溫度改变时，待測量的長度也会改变，但是真空中的波長是不变的，因此可以用斐索的方法来測量膨脹系数。

厚度只有几分之一個波長的薄膜，長久以来，一直被認為是一个不容易解決的問題；但是在最近的十几年內，白洛杰发明的双重

梯級和托拉恩斯基在半鍍銀薄膜中發現的明晰干涉條紋，對解決這個問題提供了簡單而準確的新技術。

今天在測量几百個波長的長度時總是用“正確小數法”，因為如果要數這樣多的條紋數目，那是既費力又容易產生誤差。在1892年，邁克爾孫第一次以波長為單位測量標準米尺時，是用他自己發明的邁克爾孫干涉儀，但是在後來的許多次測量中都是用法卜利·珀羅標準具。

4. 波長的測量

任何一個以波長為單位來測量米尺的方法也就是以米尺為單位來測量波長的方法；所以波長的初級標準（紅鎢綫的波長）就是在用法卜利·珀羅標準具以波長為單位測量標準米尺時確定的。另外有幾個次級波長標準也是用這個方法加以証實的，但是其他的波長都是將未知光譜綫和初級波長標準作比較後才確定的。

在這項（測量波長的）工作中，使用法卜利·珀羅標準具的次數要比用任何其他儀器的次數來得多，但是我們認為用反射式階梯光柵可能會得到更高的精密度；顯然，在波長很短的極遠紫外光區域，那就只能用反射式階梯光柵，因為在用標準具作精密測量工作時，標準具中的兩塊平板必須有很大的反射本領，而在這個光譜區域中沒有一種金屬具有所要求的高反射本領。

5. 超精細結構的分析

在分析超精細結構的工作中，曾經用過四種干涉儀；按照它們的重要性來排列，這四種干涉儀是：法卜利·珀羅標準具，反射式階梯光柵，透射式階梯光柵，和陸木板。這些儀器的主要特性在表1-1中列出。

在比較這些儀器的性能，同時考慮到將來可能有比現在更好的儀器時，注意力通常是集中在分辨本領上；但是，儀器的分辨本

值并不是一个常数,它与波长有关;而且它和高分辨本领仪器的另一个重要常数,“不重叠的区域”之间的关系不能够清楚地和显示地表示出来。

表 1-1 四种高分辨本领干涉仪的特性比较

	标准具	反射式阶梯光栅	透射式阶梯光栅	陆末板
光量的损失	严重	很少	很少	有损失;但是不象标准具那样严重
应用在紫外光区	用水晶平板可以用到 2000 Å	即使在 2000 Å 以下的光谱区域也可以用	实际上几乎不能用	用水晶板可以用到 2000 Å
价格	便宜	很贵	贵	比标准具稍贵
“不重叠的区域” ^①	可以随著平板间的距离而改变	固定的(不能变)	固定的	固定的
用来测量波长	可以	可以	不可以	不可以

要解决这二个困难,可以引用另外一个物理量,那就是“可以分辨的最小间隔” $\Delta\nu_L$,它的单位是波数的单位,它是仪器的一个常数(或者差不多是一个常数),并且它与“不重叠的区域” $\Delta\nu_R$ 之间的关系是很简单的。

以“里德伯”(也就是 cm^{-1}) 为单位的“不重叠的区域” $\Delta\nu_R$ 就是以厘米为单位的两条相邻干涉光束间的光程差的倒数;但是如果光束是在一个色散的媒质内进行,那末这里所說的光程差是指群光程差(相当于群速度的光程差)而不是相光程差(相当于相速度的光程差)。因为在原理上四种干涉仪都是由一块厚度为 D 的平行板所组成的,所以两条相邻光束间的光程差和 D 成正比。事实上,在两种比较重要的仪器(法卜利·珀罗标准具和反射式阶梯光栅)中,光程差就等于 $2D$ 。

① 在原书中,这里用“有用的区域”(useful range),事实上就是下面提到的“不重叠的区域”(range without overlap),它的意义可参看第十一章第 6 节——译者。

相似地,以里德伯(cm^{-1})为单位的“分辨限度” $\Delta\nu_L$ 也是两条光束的群光程差的倒数,不过现在所说的两条光束是指从光栅(或阶梯光栅)的边缘射出的两条光,而且只有在所有的干涉光束都具有同样的光强时,才可以用这种说法。因此,

$$\Delta\nu_L = \frac{\Delta\nu_R}{P},$$

其中 P 是阶梯光栅平板的数目(或者是光栅中划线的数目)。在讨论到法卜利·珀罗标准具时,因为各条干涉光束的光强不相等,所以上面的公式应该改成下列形式:

$$\Delta\nu_L = \frac{\Delta\nu_R}{P_e},$$

其中 P_e 是有效的干涉光束的数目。从理论上的推导,可知: P_e 只和标准具平板的反射本领有关。在一般情况,可以得到的最大的反射本领在 0.9 左右,这时 P_e 大约等于 29。

如果要设计一种仪器,它的分辨本领比今天有的一切仪器都大,那末最好对平板的厚度 D 和有效的干涉光束的数目 P_e 分别加以考虑。到现在为止,还没有造出一架平板厚度大于 2 厘米的阶梯光栅或陆末板,以后可能会有 5 厘米厚的平板;但是标准具的长度却已经用到 12 厘米,而且还可以用更长的;所以很有可能造出一架标准具,它的“不重叠的区域”只有其他干涉仪可能有的最小值的五分之一。虽然,太小的“不重叠的区域”有时会产生困难,但是用“二个前后排列的标准具”就可以克服这个困难^①。

在目前有的仪器中,很难想象有效的干涉光束的数目(P_e)会

① 在分析超精细结构时,非但要分辨本领大,还希望“不重叠的区域”不太小(否则不容易测量);但是分辨本领和“不重叠的区域”是成反比的。要解决这个矛盾可以用二个标准具,其中一个的分辨本领很大而“不重叠的区域”很小,另一个的性质正好相反。将这样二个标准具一前一后放在一条直线上就可以得到最佳的结果;既有第一个标准具的高分辨本领,又有第二个标准具的较大的“不重叠的区域”(见第十三章第 16 节)——譯者。

超过 50。曾经造出有 50 块板的阶梯光栅,而且某些科学家也曾用过平板反射本领高达 0.92 的标准具(这时 $P_0=36$);但是,在可见光区,如果用银或铝的薄膜,这个数字差不多已经到达可能获得的最大值了^①;所以在这方面讲,反射式阶梯光栅要比标准具好。但是,因为在反射式阶梯光栅中,光程差要比标准具中的小得多,而在 P_0 数目上的占先并不能补偿这个缺点。只有在紫外光区域,因为反射本领的降低会使标准具的 P_0 值降低,而对反射式阶梯光栅,反射本领的降低只对光强有影响,而“分辨限度”却能保持不变(也就是说,分辨本领不降低),所以在这个区域中,反射式阶梯光栅的分辨本领比较大。

6. 折射率的测量

假使光线所经过的几何路程相等,那末光程差的改变必定是由于折射率的变化。因此可以用干涉仪来测量固体,液体和气体的折射率。在测量固体或液体的折射率时,干涉仪并不比精密的折射计好多少;但是要准确地测量出气体的折射率,那就只能用干涉仪。因为各种气体的折射率相差很多^②,所以如果能够精密地测定气体的折射率,那就可以很快地估计出一种气体中所含的另一种杂质气体的百分数。

通常用瑞利或雅满干涉仪来测量折射率;但是任何一架干涉仪,只要能放在真空紧密套中,都可以用来测量折射率;曾经用过法卜利·珀罗标准具精密地测量气体的折射率。

① 在 1956 年发明用多层薄膜的方法使反射本领增加到 0.97,此时 P_0 约为 100 (参考 Penselin und Stendel, Z. Phys. 142, 21, 1955)——译者。

② 这里的所谓“折射率相差很多”是指 $(N-1)$ 的数值相差很大, N 是气体的折射率——译者。

第二章 單色的輻射

1. 綫光譜的光源

在選擇和干涉儀一起使用的光源時，首先要考慮下列幾個問題，那就是：使用時的方便，光的亮度，以及在光譜中光譜綫的適當分布。不論在那一個實驗中，光源是按照這四種要求的相對重要性而選擇的。

第一要選擇激發出一個綫光譜的方法，第二要選擇被激發的元素。可以用的激發方法有：火焰，電弧，放電燈（或放電管），空陰極放電管，和原子束。

一個加鈉（Na）鹽的本生燈火焰會發射出兩條黃色的 D 光譜綫，它們是雙綫，波長相差 $6\text{\AA}$ ，波數相差 $17\text{R}(\text{cm}^{-1})$ ；這種光源只有在研究薄膜的工作中才可以當作是單色光源。如果用鋰（Li）來代替鈉，那末光的顏色就會從黃變到紅，而且雙綫間的距离也會縮小得多；但是鋰鹽比鈉鹽容易蒸發，因此鋰鹽的火焰不容易保持穩定。鉈（Tl）鹽的火焰能發出很強的綠色光譜綫，但是因為鉈蒸氣是有毒的，所以很少用它。如果燃燒氧與乙炔使火焰的溫度提高，那就可以激發其他的金屬，但是因為用電弧放電要比用火焰方便得多，所以在目前已經很少用火焰作為光源了。

汞放電燈是最常用的和最強的單色光源；在可見光譜區域，汞所發射的強光譜綫不超過 6 條，而其中三條最強的光譜綫（也就是波長為 $5461\text{\AA}$ 的綠綫以及波長為 $4358\text{\AA}$ 和 $4047\text{\AA}$ 的兩條紫綫），都可以用濾光片分別隔離成單色光。隔離出來的綠綫可以有百分

之 99 的純度,这种光源在目視干涉度量学中应用得很广;这条光譜綫的唯一缺点就是它有相当广的超精細結構,因此当光程差很大时,它所产生的条紋看起来不很清楚。如果將干涉条紋拍照,那就可以用波長为 $4358\text{\AA}$ 的光譜綫。波長为 $4358\text{\AA}$ 和 $4047\text{\AA}$ 的两条光譜綫都可以用作激发喇曼光譜的單色光源,但是这两条光譜綫都有波長相差不大的卫星綫 (satellite), 这些卫星綫是不能用濾光片除去的。

在五十年前开始用鎘 (Cd) 和鋅 (Zn) 放电灯,为了有足够的蒸气,必須將管子加热;但是,如果在放电管中加一些惰性气体,就可以在比室温高一点的温度中使用这种放电灯;在这种情况下,这些放电灯是相当亮的,使用时也很方便,而且可以在工厂中生产^[38]。鎘灯和鋅灯所发出的在可見光譜区域的光譜綫的数目都很少。

如果不妨有許多条光譜綫,那末用电弧作为光源是很方便的;鉄弧光源所发射的光譜中有許多条可以作为次級波長标准的光譜綫。在靠近电极处的强电场会使光譜綫变寬,但是这个缺点是可以避免的,如果用一个 15 毫米長的电弧,并且只取它中間部分的光。通常用普丰特电弧的裝置,再用恒定电流的綫路来增加稳定性。將來可能用鈾 (Ce) 来代替鉄,因为鈾的原子量比較大,并且在鈾的光譜中,光譜綫的分布也比較均匀。

真空电弧 (vacuum arc) 所发射的光譜綫比在空气中的电弧所发射的来得細,但是在許多實驗室中,使用前者的时候感到不方便。柏恩斯,梅格斯和克以斯等人特別推薦^[29] 刻替斯所設計的真空气弧^[22], 这种电弧通常是在 1 到 6 个毫米水銀柱的气压下使用。如果用 6 个或小于 6 个安培的电流,那末在使用这种电弧时可以不冷却系統,并且很容易操縱。

如果需要很准的波長 (誤差小于 $10^{-3}\text{\AA}$), 那就應該用空阴极放电管 (通常称为修勒放电管) 来代替电弧;在空阴极放电管中,在金屬表面上会发出电子束,而这种金屬的光譜就是我們所需要的。放

電管中的氣壓比較低，陰極可以用水或液態空氣來冷卻，因此它所發射的光譜綫的寬度要比電弧的小得多。

在由電弧放電激發的惰性氣體（氖 Ne，氬 Ar，氪 Kr）的光譜中，有許多條寬度很小的光譜綫；在多原子分子氣體的發射光譜中，常有光譜帶，而在這些惰性氣體的光譜中，這種光譜帶是不存在的。如果在液態空氣中使用這種放電管，那就可以得到寬度非常小的光譜綫；因此在大光程差的干涉儀中，用這種光源是很適宜的。在國際天文聯合會所發布的一些波長有八位有效數字的光譜綫中，就有幾條氖綫和氬綫；事實上，該聯合會已經認為：同時用 8 條氖綫所得到的任何結果和用初級波長標準所得到的結果有同樣的價值。

但是，氖所發射的光譜綫幾乎都是在橙光和紅光的區域中；並且因為氖的原子量比氬的小得多，所以氖光譜綫的寬度比較大。如果將氬放在液態空氣中冷卻，那就可以看到第一百萬級干涉條紋^①。在氬光譜中，波長為 $5570\text{\AA}$ 的綠綫和波長為 $5871\text{\AA}$ 的黃綫是比較顯著的，曾經用來測量過標準米尺。

以上提到的光源所發射的光譜綫的寬度大多是由于在視線方向的原子的無規則運動所引起的。如果需要寬度極小的光譜綫（譬如在研究超精細結構時），那可以用原子束作為單色光源，這種原子束的運動方向垂直於視線的方向；用原子束作光源可能將光譜綫的寬度減少到正常數值^②的十分之一，但是光強很低。

2. 產生光譜綫的有限寬度的原因

如果沒有超精細結構，光譜綫的有限寬度是由下列四種因素產生的，那就是：自然的變寬，多普勒效應，氣壓所產生的變寬，和

① 光譜綫的寬度愈小，可以觀察到的干涉級次愈大——譯者。

② 這裡所謂正常數值是指用其他常用的激發方法（例如用電弧）所產生的光譜綫的寬度——譯者。

斯塔克效应。

自然的变宽是因为：激发态的生存时间是有限的，以致发射波列的长度也是有限的，按照傅里叶分析，没有自然宽度的严格的单色光必须有无限长的波列。

多普勒效应所产生的变宽是由于在视线方向的原子的运动而产生的；在室温时，这是四种因素中最主要的一种。

气压所产生的变宽是由于发射光或吸收光的原子和其他原子或分子间的碰撞而引起的。

斯塔克效应所产生的变宽是因为外界的电场或由原子和离子所引起的电场对发射光的影响而产生的。在空气中，在电弧两极附近所发出的光谱线通常是比較宽的，这是因为在那里的电场是特别的强。

通常可以选择实验时的工作条件来减少使光谱线变宽的因素^[50]，如果蒸气不是用电来激发的，而且它的气压能保持在0.01毫米水银柱以下，那末斯塔克效应和气压所产生的变宽都可以忽略不计；如果使一束稀薄的原子束以垂直于一个光束的方向运动，那末吸收光谱线的多普勒效应就可以大大地减少（如果能够使原子束成为准确的平行射线，那吸收线的多普勒宽度可以完全消除）。在这种情况下，就只剩下一个重要的因素了，那就是自然的变宽。

玻恩，魏斯考普夫，和怀特等人曾经详细讨论了关于光谱线宽度的问题^[44,46,55]。这些论文的内容比本书所提到的大概情形要详细得多，但是本书并不是专门讨论这个问题的，所以不能讲得太多。从他们写论文的时候开始，到目前为止，主要的理论并没有很大的变动。

3. 光谱线的多普勒宽度

气体的分子是经常在运动的，所以当它们发出光的时候，有的是向着观察者移动，而有的是在离开观察者的方向移动。按照多