

用激光分光计测量稳定氦的 光学同位素位移

张 绍 祥 W. Makat and F. Schneider
(西北大学物理系) (西柏林 自由大学)

提 要

本文简单介绍用计算机程序控制的光谱范围在 400~700 nm 的激光分光计。用此分光计测量了氦波长 432 nm, 436 nm 和 557 nm 的光学跃迁无多普勒效应的同位素位移, 并用金(King)图检验实验数据, 结果是十分满意的。从所测量的同位素位移值, 推算出稳定氦的平均平方核电荷半径变化 $\delta\langle r^2 \rangle$ 。

一、引 言

测量原子跃迁谱线的同位素位移, 是获得核电荷半径变化信息的一个重要途径^[1]。连续可调谐染料激光分光计与无多普勒效应检测方法相结合, 大大提高了测量的灵敏度和精度。由此获得了许多有价值的结果^[2~4]。此外, 在测量位移频率时, 同样要求尽可能高的精度, 因为它包含着所研究核的信息。为此, 研究用电子计算机程序控制的偏频锁定系统^[5]。它具有很高的频率测量精度, 而且业已为多种元素的同位素位移测量所证实^[5~8]。近年来, 虽然有一些精密的测量氦同位素位移的工作^[9~11], 但精度都不够高, 因而有必要用氦的三个不同的光跃迁, 重新测量所有稳定氦的同位素位移。

二、实 验 装 置

图 1 为激光分光计的整体装置方框图。用此装置, 采用饱和吸收方法, 观测氦在波长 557 nm ($5S |3/2|_2 \rightarrow 5P' |1/2|_1$)、432 nm ($5S |3/2|_2 \rightarrow 6P |5/2|_3$) 和 436 nm ($5S |3/2|_2 \rightarrow 6P |1/2|_1$) 的光跃迁。所用的激光分光计, 主要由氦离子激光泵浦的单模染料激光器组成。图 2 为激光频率稳定的主要部件及电子线路连接方框图。为把染料激光器的频率漂移 ($\Delta\nu = 10$ MHz) 减小到 1 MHz 以下, 有效的稳定措施是不可少的^[12]。

经过频率稳定的染料激光束, 耦合到第二个干涉仪上, 而该干涉仪本身又经过锁定稳频系统依赖于单模氦氖激光器。如果改变它的频率 $\Delta\nu_1$, 那么必然改变染料激光器的频率 ν_2 :

$$\Delta\nu_2 = \lambda_1 \Delta\nu_1 / \lambda_2 \quad (1)$$

为了能够重复地、数字式地连续调谐氦氖激光器和染料激光器, 采用将偏置氦氖激光束和碘稳频氦氖激光束一起, 共线聚焦加到快速雪崩光电二极管上, 并使形成的拍频与由计算

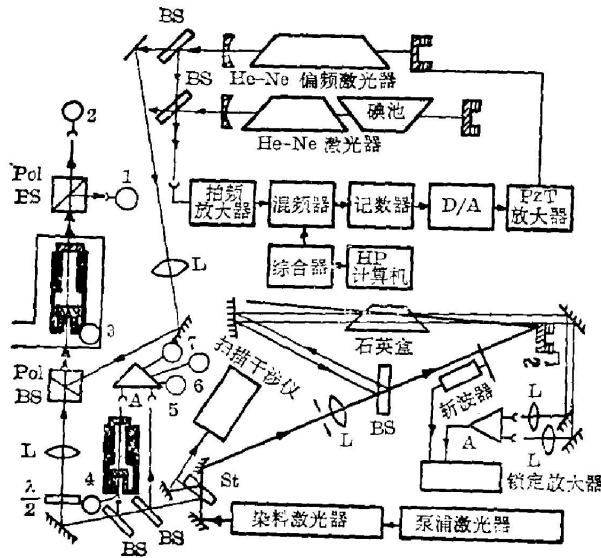


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement

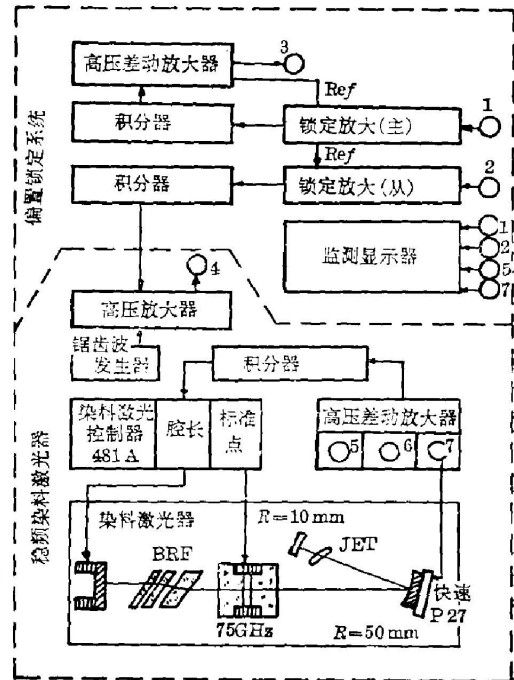


图 2 染料激光器稳频和偏频锁定系统
电子线路连接方框图

Fig. 2 Block diagram showing the electronics for frequency stabilization and offset-locking system of the dye laser

机和程序控制的综合器的频率,在混频器上作比较。调整电路使其始终保持恒量, $\nu_{\text{扫}} - \nu_{\text{偏}} = 30.0 \text{ MHz}$ 。于是,当改变综合器的频率,就引起氦氖激光器频率 ν_1 的变化,由此,按照等式(1),将使染料激光器频率 ν_2 变化。为了测量光谱使用时间平均法,我们用碘稳频氦氖激光器作为波长标准,保持所有频率绝对不变。

三、实验结果

用饱和光谱法测量非常小的氦同位素位移 ($\Delta\nu_{\text{同}} \approx 100 \text{ MHz} \approx 0.1 \Delta\nu_{\text{多}}$), 已为很多人熟悉,并已有文章详细描述^[12],我们主要把测得的实验结果综述如下。

图 3 为所有稳定同位素氦在 432 nm 谱线时的饱和光谱图。除偶核子数 ($I=0$) 的同位素外,还有许多谱线,它是由同位素 $^{83}\text{Kr} (I=9/2)$ 产生的。注有标记的信号是超精细结构跃迁,而无标记的信号(所谓能级交叉信号),对超精细能级间隔很密的同位素的饱和光谱是普遍存在的^[13]。

图 4 和图 5 表示偶数同位素氦的饱和光谱,它具有很高的频率分辨率,并标有精确的频率定标值。在 $10 \mu\text{bar}$ 气压时,所测光谱图实际上没有本底,而且是洛伦兹线型。图 4 是丰度较高的 ^{80}Kr , ^{84}Kr , ^{82}Kr 和 ^{86}Kr 同位素位移的饱和光谱图;图 5 是 ^{80}Kr , ^{78}Kr 同位素

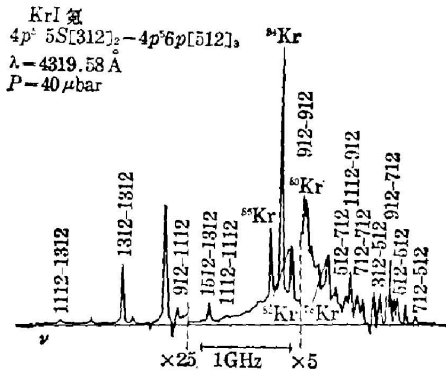


图3 天然氪同位素混合物在 432 nm 跃迁时无多普勒效应光谱图综述

Fig. 3 Doppler-free whole-spectrum of natural Krypton isotopic mixture in 432 nm transition

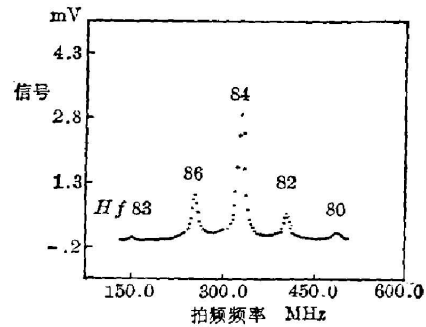


图4 天然氪同位素混合物拍频光谱

Fig. 4 Beat frequency spectrum of a natural Krypton isotopic mixture, the frequency scale was defined by the offset-locking method

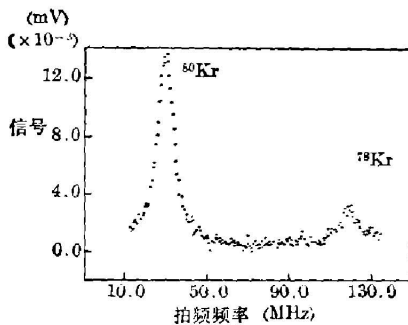


图5 同位素 ^{78}Kr (0.37%) 和 ^{80}Kr (2.27%) 拍频光谱

Fig. 5 Beat frequency spectrum of Krypton isotopes ^{78}Kr (0.37%) and ^{80}Kr (2.27%). The spectrum results from an average of 6 individual spectra

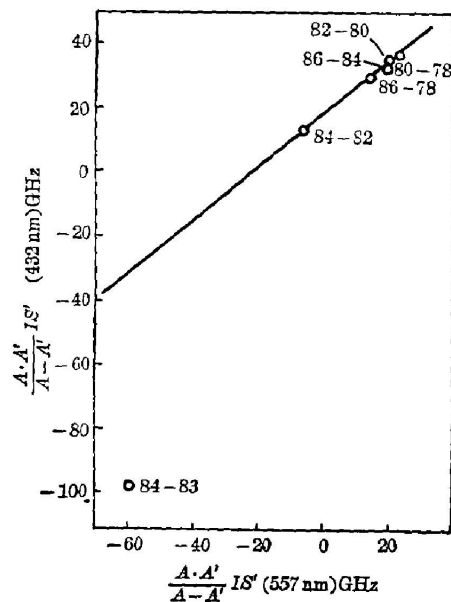


图6 应用测量的同位素位移数据作的金图
Fig. 6 King's diagram plotted with the measured data of Krypton isotope shifts

位移的饱和光谱。因为 ^{80}Kr 和 ^{78}Kr 的丰度很低，在天然氪的混合物中仅含有 2.27% 和 0.37%，所以同位素位移光谱信号很小。为了能测量出这些丰度很低元素的精确位移值，采用计算机程序控制对单个测量的饱和光谱求平均^[5]以提高信噪比。图 6 是六个单个测量光谱用计算机控制求平均后所得到的平均光谱信号。

洛伦兹线型的程序适用于所测量的光谱。

表 1 列出实验求得同位素位移值。为便于比较起见，同时引用其他作者的测试结果。

表 1 氪的同位素位移实验值

Table 1 Experimental value of Kr isotope shift

同位素对 跃迁波长	86-84	84-82	82-80	80-78	84-83	备注
557 nm	86.4(4)	83.3(4)	95.3(4)	101.4(4)	33.6(4)	本工作
557 nm	87.5(6)	84.6(6)	94.6(8)	102.3(3)		文献[11]
557 nm	86.0(9)	82.4(9)	94.4(9)	99.8(9)	—	文献[9]
432 nm	114.0(5)	113.6(4)	126.2(4)	133.1(4)	40.1(4)	本工作
432 nm	115.8(9)	112.9(9)	126.0(9)	135.0(9)	—	文献[11]
432 nm	112.2(30)	108.9(36)	130.8(36)	121.5(30)	—	文献[10]
436 nm	114.5(7)	112.6(5)	125.5(4)	132.6(5)	—	本工作

四、讨 论

金(King)图^[4]通常用来验证同一元素在不同的跃迁中所获得的同位素位移数据的一致性。图 6 表示由实验数据所作的金图。它的纵横坐标由不同跃迁的同位素位移值减去正常质量效应位移值,再乘以质量因子 $A A' / (A - A')$, ($A > A'$) 而得。从该图可以得出两个结论:

1. 偶核子数的同位素位移值,准确地位于金图直线上,亦即彼此很好地符合。测量值的误差为 ± 0.2 。

2. 同位素对 $^{84-83}\text{Kr}$ 远离金直线。可能的解释是二阶超精细相互作用对同位素位移的贡献起作用,这和在外面一些地方所观察到的情况一样^[15,16]。当能级间隔很密时(557 nm 谱线的上能级就是这种情况),这种效应总是出现。

为了从实验所测得的同位素位移数据,求出平均平方核电荷半径的变化,不仅必须知道电子因素 F ,而且还必须知道光跃迁的特殊质量效应。这些量的定义和讨论可参阅文献[1]。

在盖哈德等人的工作中^[17],已给出氪的这些量的数值: $F = 540 \text{ MHz/fm}^2$ 和 $\text{SME} = (-11.4 \pm 10.9) \text{ MHz}$, 代入(2)式,求出平均平方核电荷半径变化 $\delta\langle r^2 \rangle$, 如表 2 所示。

$$\delta\langle r^2 \rangle = \frac{\Delta\nu_{\text{ex}} - \text{NME} - \text{SME}}{F_{557}} \quad (2)$$

表 2 $\delta\langle r^2 \rangle$ 值Table 2 Values of $\delta\langle r^2 \rangle$

同 位 素 对	86-84	84-82	82-80	80-78
$\delta\langle r^2 \rangle_{AA'} (10^{-3} \text{ fm}^2)$	-30.7	-18.6	-34.2	-38.1

五、结 论

上述激光分光计适用于全部可见光范围,只需要按所要求波长改变染料和泵浦激光器

波长。用计算机程序控制染料激光器,同时检测处理数据,能使测量光谱求平均,从而改善了信噪比。

因为特殊质量效应的估算有很大的误差,所以实验上测得的高精度同位素位移数据,不可能直接反映在更精确的 $\delta\langle r^2 \rangle$ 中。虽然如此,这些数据仍然是有价值的。那些在同位素位移中显得很重要的效应,例如中子的主、次闭合壳^[17,81],只有用精密的同位素位移数据,才能确定。用这些高精度数据作的金图所得到的斜率和截距,提供了原子波函数较精确的相对值和质量效应间较精确的关系。这种激光分光计的使用范围,不限于同位素位移的测量,对精确测量频率移动和频率间隔也都是有意义的。

参 考 文 献

- [1] K. Heilig, A. Steudel; *Atom Data and Nucl. Data Table*, 1974, **14**, No. 5/6 (Sep/Nov), 613.
- [2] J. Bonn, G. Huber *et al.*; *Z. Physik (A)*, 1976, **276A**, No. 3 (19 Mar), 203.
- [3] C. Thibault, F. Touchard *et al.*; *Phys. Rev. (C)*, 1981, **23C**, No. 6 (Jun), 2720.
- [4] G. Huber, F. Touchard *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **41**, No. 7 (14 Aug), 459.
- [5] H. Gerhardt, F. Jeschonnek *et al.*; *Appl. Phys.*, 1980, **22**, No. 4 (Aug), 361.
- [6] H. Gerhardt, F. Jeschonnek *et al.*; *Hyperfine Interact.*, 1981, **9**, 175.
- [7] H. Gerhardt, E. Matthias *et al.*; *Z. Physik (A)*, 1978, **288A**, No. 4 (28 Nov), 327.
- [8] R. Wenz, A. Timmermann *et al.*; *Z. Physik (A)*, 1981, **303A**, No. 2 (Nov), 87.
- [9] C. Brechigac; *J. Phys (B)*, 1977, **10**, No. 11 (1 Aug), 2105.
- [10] D. A. Jackson; *J. O. S. A.*, 1979, **69**, No. 4 (Apr), 503.
- [11] H. Gerhardt, E. Matthias *et al.*; *Z. Physik (A)*, 1979, **292A**, No. 1 (Aug), 7.
- [12] T. W. Hansch, M. D. Levenson *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1971, **26**, No. 6 (19 Apr), 946.
- [13] H. Rinneberg, T. Huhle *et al.*; *Z. Physik (A)*, 1980, **295A**, No. 1 (Apr), 17.
- [14] W. H. King; *J. O. S. A.*, 1963, **53**, No. 5 (May), 638.
- [15] H. Brand, B. Seibert *et al.*; *Z. Physik (A)*, 1980, **296A**, No. 4 (Sep), 281.
- [16] K. A. H. von Leeuwen, E. R. Eliel *et al.*; *Z. Physik (A)*, 1981, **301A**, No. 2 (Jul), 95.
- [17] K. Bekk, A. Andl *et al.*; *Z. Physik (A)*, 1979, **291A**, No. 3 (25 Jun), 219.

The measurement of optical isotope shifts in stable Krypton-isotope by means of laser spectrometer

W. MAKAT AND F. SCHNEIDER
(Freie Universität, Berlin Germany)

Z. X. ZHANG
(Northwest University, Xian China)

(Received 20 June 1982, revised 27 September 1982)

Abstract

In the present paper authors give a brief account of a computer program controlled dye-laser spectrometer with spectral range from 400 nm to 700 nm. The Doppler-free isotope shifts in the optical transitions at 432 nm, 436 nm, and 557 nm have been measured by means of the spectrometer. The results tested by the King's diagram are found to be satisfactory. From the measured values of the isotope shifts the changes in the nuclear mean square charge radii $\delta\langle r^2 \rangle$ for stable Kr isotope are calculated.