

## 稳定核素的应用

华明达

(中国科学院原子能研究所)

### 引言

#### 同位素和核素

本世纪初,索迪和汤姆逊发现了元素的同位素。同位素是指某元素的几种不同的原子形式,其原子序数相同而原子量(或质量数)不同。其后的四十年中,把不同原子序数的各种原子形式泛称为同位素,这是不确切的,混淆了同位素的定义。五十年代创造了一个新词“核素”(Nuclide)泛指不同原子序数、原子量(或质量数)和能态的各类原子。“核素”既可以狭义地指某一种原子,如<sup>6</sup>Li,也可以广义地泛指几种以至全部原子形式,如“核素图”。“核素”和“同位素”有不同的定义,因而在不同场合使用。核素和同位素皆可分为稳定和放射两种,又可分成天然和人造两类。至今已发现二千多种核素,有人估计可能超过四千种,其中绝大部分是人造放射核素,而天然的稳定和放射核素约340种,其中稳定核素285种。“稳定”是相对的,凡是目前探测不出放射性衰变的核素就叫稳定核素。但实际工作中常把半衰期 $10^9$ 年以上的放射核素归入稳定核素类里,如<sup>87</sup>Rb、<sup>124</sup>Sn等。

天然稳定核素,尤其是人工制备的浓缩稳定核素,是研究的对象和工具。四十年代以前主要用在核物理研究,五十年代起广泛用于核物理、凝聚态物理、生物、化学、环境、地球和宇宙等基础科学研究以及核武器、核动力、工业、农业、国防、医疗、地质、气象和公安等技术科学。七十年代,已召开过多次稳定核素应用的综合性国际会议,讨论了稳定核素及其标记化

合物的生产,稳定核素的检测和应用。我国从五十年代起,首先在核科学和地球科学方面应用稳定核素,随后在国防、农业、生物、工业和其他科学研究领域开始利用这一新工具。

#### 应用的物理基础

应用是基于稳定核素的三个主要性质:

(1)自然界里元素的稳定同位素丰度基本恒定,但在地球和天体演化、自然力作用过程中,丰度又有某些特异的变化。由此可以研究核素的形成过程及机制、核素的地球丰度和宇宙丰度、分布规律、引起丰度变化的原因等,从而探索地球和天体的起源和演变,研究成矿过程并指导勘探,研究气候变化、生态变迁和环境保护等。

(2)从宏观角度而言,稳定同位素化学性质与元素基本相同,因此浓缩稳定同位素可作为示踪剂和稀释剂等。

(3)从微观角度而言,稳定核素核特征不同,是核物理研究的对象和工具。

#### 在核科学方面的应用

##### 核物理

用元素来研究核性质时,其同位素的核反应、衰变、核谱等混在一起,获得的数据很复杂,难以分析处理。如用较纯的某种核素做实验,可精确测定各种核素的核特征。例如天然硼元素含<sup>10</sup>B(19.8%),<sup>11</sup>B(80.2%)两种稳定同位素,用氘核轰击天然硼靶,<sup>10</sup>B(d, $\gamma$ )<sup>12</sup>C和<sup>11</sup>B(d, $\gamma$ )<sup>13</sup>C两种核反应的 $\gamma$ 辐射谱重叠在一起,分辨不

清。只有用浓缩 $^{10}\text{B}$ 作靶才能精确测定 $^{10}\text{B}$ 的能级(图1)。

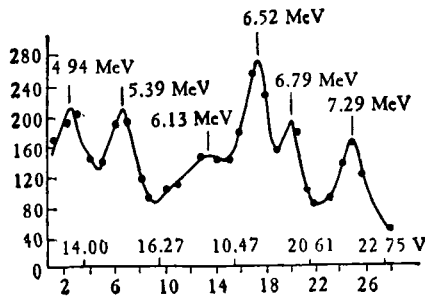


图1  $^{10}\text{B} + \text{d}$  的  $\gamma$  谱

六十年代利用浓缩稳定核素发现了 $\mu$ 介子俘获X射线的现象。例如钕有质量数从142—150的七种稳定同位素。它们的X射线能量不同, $^{142}\text{Nd}$ 的X射线能量最大, $^{150}\text{Nd}$ 的能量最小,说明随着中子数增加,核的形变增大,形变效应引起 $\mu$ 介子K俘获X射线谱的同位素位移(图2)。

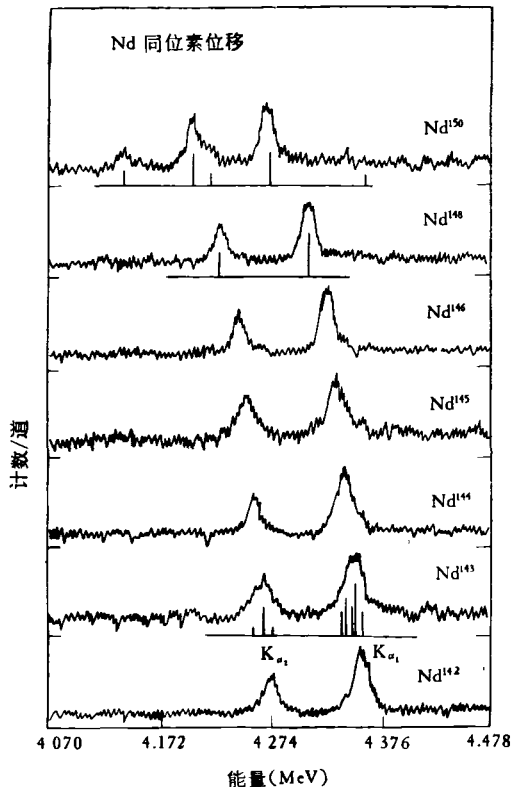
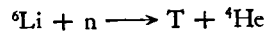


图2 钕同位素的 $\mu$ 介子K俘获X射线谱

物理

## 核能源

众所周知, $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$  是裂变核燃料,氘、氚是聚变核燃料,除氘是稳定核素外,其他是放射核素。 $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$  和氚在自然界极微,都是人造的。在反应堆中用中子照射 $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  可以得到 $^{239}\text{Pu}$  和 $^{233}\text{U}$ 。 $^{238}\text{U}$  和 $^{232}\text{Th}$  的半衰期与地球年龄相近,自然界含量丰富,通常看作是稳定核素。氚是用稳定核素 $^6\text{Li}$  在中子轰击下制得的:



地球上海水中大约有  $4.5 \times 10^{13}$  吨氘,锂在地壳里也很丰富,可以为人类提供巨大的能源。

最近有人提出了“聚变-裂变”反应的设想,让 $^7\text{Li}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{15}\text{N}$  和  $^{19}\text{F}$  等稳定核素与氢核发生聚变反应,形成不稳定的复合核,而后再分裂成2, 3, 4, 5个氦核,同时放出巨大的能量。

## 在生命科学方面的应用

在生命科学方面应用放射核素作示踪剂有显著弱点:(1)射线破坏了生物细胞,改变了生理机制;(2)射线使标记化合物分解;(3)射线使标记化合物与生物体发生化学反应时具有不确定性;(4)使用短寿命放射核素时,研究工作受时间限制。因此近年来在生命科学研究中广泛应用浓缩稳定核素。

## 农业科学

迄今,地球上生物圈转换和利用太阳能的主要方式是叶绿素的光合作用。植物光合作用的太阳能利用率只有1%。能不能提高叶绿素转换太阳能的效率呢?这就要研究光合作用机制。氧没有合适的放射同位素可作为示踪剂,因而常用浓缩的 $^{18}\text{O}$ 来研究,发现光合作用分解出来的氧只来源于水份,不来源于吸收的二氧化碳(图3)。

合理施肥将提高农作物产量和节约肥料。利用浓缩稳定核素 $^{15}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{41}\text{K}$  等研究了肥效、土地肥力、植物营养和生长激素等。用

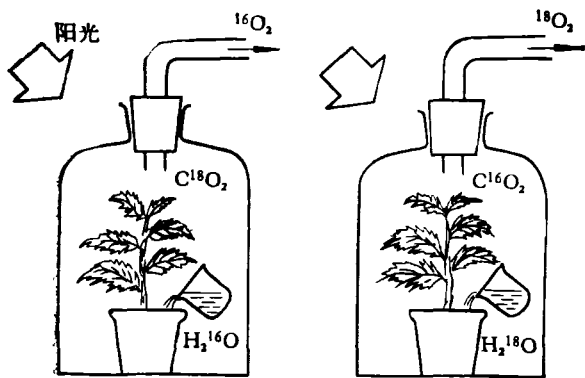


图3 用 $^{18}\text{O}_2$ 研究光合作用

$^{15}\text{N}$  研究黍类植物表明在花序分化初期,氨基酸和蛋白质合成极其旺盛,此时应大量追肥,而在花序分化前不必施肥,这样使植物处于缺氮状态,促使追肥时氮素更快地被植物吸收和转化。用 $^{15}\text{N}$  研究水稻吸收氮肥情况,发现将氨水深施于耕作层 6—8 厘米处比较好,其利用率比面施高出一倍。此外还用浓缩稳定核素研究了植物固氮作用、除莠剂、农药药效和残毒问题以及家畜饲料吸收等。

### 生物学

应用 D,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{34}\text{S}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{77}\text{Se}$  和  $^{80}\text{Se}$  等浓缩稳定核素: (1) 标记代谢物质, 研究动物和人体代谢速度和途径; (2) 标记营养物和药物, 研究其吸收、传输、分布和排泄; (3) 标记氨基酸以研究蛋白质的合成和演变; (4) 标记胆固醇、三磷酸腺苷等研究脂肪代谢、糖代谢等生物化学反应机制和可逆性; (5) 研究微量元素在人体内的功能; (6) 标记核酸来研究遗传信息; (7) 标记蛋白质的抗原和抗体进行免疫研究; (8) 标记药物研究杀菌能力和机理等等。

例如过去认为动物体内脂肪是静止的, 后来用氘标记脂肪研究其代谢, 发现体内脂肪处在动态平衡之中。躯干部分脂肪在 6—9 天更新一半, 肝脏脂肪 1—3 天更新一半, 脑的脂肪更新最慢, 10—13 天才更新一半。胆固醇更新一半的时间是: 躯干部分 12—13 天, 肝内 5—7 天, 脑部 100 天以上。

红血球寿命过去难以测定, 现在利用 $^{15}\text{N}$  标

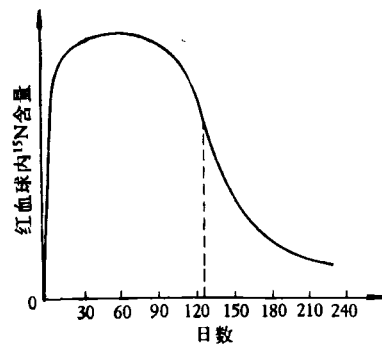


图4 测定红血球寿命

记的甘氨酸或用 $^{50}\text{Cr}$  标记的铬酸钠测出正常红血球平均寿命 127 天(图 4)。而患有血液病的人就不同了, 白血病患者只有 70—75 天, 患镰刀状血球性贫血病的人, 红血球仅 10—30 天就死去一半。

### 医疗卫生

在医疗卫生方面, 浓缩稳定核素既可用于来制靶然后辐照成放射核素, 又可直接利用。

一般医用放射同位素是天然元素经反应堆或加速器辐照而成, 天然元素常含多种同位素, 因而辐照后将生成各种放射同位素的混合物, 不适合医疗之用。为了制取高比度、高纯度的放射同位素, 就要用浓缩的稳定同位素作原料。例如用放射性铁可以测定血液流速、铁的吸收和代谢等, 从而诊断和研究心脏病、脉管炎、静脉炎及贫血等。但天然铁含 $^{54}\text{Fe}$ (5.84%),  $^{56}\text{Fe}$ (91.68%),  $^{57}\text{Fe}$ (2.17%),  $^{58}\text{Fe}$ (0.31%) 四种稳定同位素。在中子照射后,  $^{54}\text{Fe}$  变成 $^{55}\text{Fe}$ , 其半衰期是 2.7 年,  $^{58}\text{Fe}$  变成 $^{59}\text{Fe}$ , 半衰期 45 天。后者适用于作为示踪剂, 而前者应尽量避免进入人体, 所以需要事先经过同位素分离, 制备浓缩 $^{58}\text{Fe}$ , 然后辐照成高比度、高纯度的 $^{59}\text{Fe}$  示踪剂。

钨的一个放射核素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  具有 140 千电子伏的 $\gamma$  射线和 6 小时的半衰期, 常用于肝、肾、骨、脑、肺、脾、甲状腺和唾液腺扫描。虽然 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  寿命很短, 但人们用浓缩 $^{98}\text{Mo}$  经辐照制成“钼-钨发生器”, 可以用 10—15 天, 它源源不断地供应 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  扫描示踪剂, 适用于医院, 尤其是小城市、农村、边远地区和野战医院。另一种“锡-钨发

生器”是用浓缩的  $^{112}\text{Sn}$  稳定核素作原料经辐照而成。

肾扫描过去用  $^{203}\text{Hg}$ , 半衰期 47 天,  $\gamma$  能量 0.28 MeV, 现在改用  $^{197}\text{Hg}$ , 半衰期 2.7 天,  $\gamma$  能量 0.077 MeV, 它是由浓缩稳定核素  $^{196}\text{Hg}$  制成的。

用于检查骨损伤、骨瘤、甲状腺、心血管病的  $^{18}\text{F}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{81}\text{Rb}$  等是分别用浓缩的  $^{18}\text{O}$ ,  $^{68}\text{Zn}$ ,  $^{122}\text{Te}$ ,  $^{124}\text{Te}$ ,  $^{80}\text{Kr}$ ,  $^{82}\text{Kr}$  等稳定核素经加速器辐照而成的。

在诊断治疗疾病时直接利用稳定核素可以避免射线对人体的伤害。1973 年《第一届稳定同位素在化学、生物学和医学中的应用国际会议》呼吁对婴儿、儿童和孕妇要尽可能用稳定核素代替放射核素。1977 年报道了给儿童服用  $^{13}\text{C}$  标记的葡萄糖, 然后用质谱计测定呼出的  $^{13}\text{CO}_2$ , 从而检查糖尿病。

人体血液内尿酸含量太高, 会得痛风性关节炎、痛风性肾病和尿酸盐结石, 甚至肾功能衰竭而死亡。用  $^{15}\text{N}$  标记尿酸可以测定血液中尿酸含量及代谢速率, 或用  $^{13}\text{C}$  标记甘氨酸等测定尿中尿酸浓度。

用中子俘获核反应治疗癌症是稳定核素在核医学中应用的又一新成就。它利用某种稳定核素, 其中子俘获截面大, 反应后产生  $\alpha$  粒子而没有或很少高能  $\gamma$  射线, 同时反应产物半衰期很短, 例如把  $^{10}\text{B}$  注入肿瘤组织, 然后用热中子局部辐照, 发生  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  反应,  $\alpha$  粒子电离效率高而射程短, 只杀死附近的癌细胞而不会损伤其他组织, 特别适用于治疗头部、颈部的肿瘤, 因这些部位不宜于用钴炮的  $\gamma$  射线来治疗。

## 在技术科学方面的应用

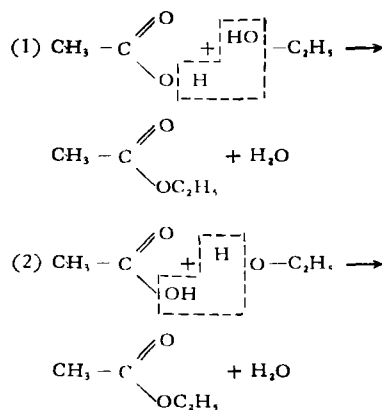
### 化学化工

利用稳定同位素 (1) 研究化学反应的同位素效应, 形成了“同位素化学”; (2) 研究化学反应历程、反应机制、动力学效应等, 形成了一种“化学反应动力学的同位素方法”; (3) 稳定同位

素稀释分析法。

有人用 2537 Å 和 3000—3400 Å 波长的光照射 96% 氘标记的丙酮, 研究其光解过程。分析光解产物发现含有 25%  $\text{C}_2\text{H}_6$ , 25%  $\text{C}_2\text{D}_6$  和 50%  $\text{C}_2\text{H}_3\text{D}_3$ , 证实丙酮光解的一次过程是分子分解成游离基而不是直接分解为乙烷和二氧化碳, 因为如直接分解, 就不会生成  $\text{C}_2\text{H}_3\text{D}_3$ 。

乙酸和乙醇生成乙酸乙酯和水, 有两种可能的方式



水中  $\text{OH}^-$  离子可能来自乙酸的羧基, 也可能来自乙醇的羟基。经过用浓缩  $^{18}\text{O}$  标记乙醇做实验, 分析结果表明水中的  $^{18}\text{O}$  是天然丰度, 乙醇上标记的  $^{18}\text{O}$  没有到水里去, 证实上述酯化反应是按 (2) 式进行的。

稳定同位素稀释分析法是一种新的微量分析技术, 是在同位素分离和质谱分析技术的基础上发展起来的, 凡是有两个以上稳定同位素 (包括长寿命放射同位素) 的元素基本上都能用此法分析, 因此可以分析周期表上 80% 的元素, 灵敏度  $10^{-6}$ — $10^{-13}$  克。广泛用于分析物质成分, 痕量杂质, 金属和合金中微量气体, 物质中结晶水, 矿石、陨石和海水中微量元素, 环境中微量污染物, 地质年龄, 核燃料裂变产物等。

### 铷同位素原子钟

导弹、卫星控制, 飞机、舰艇定位和导航, 卫星和宇宙通讯, 海上钻井定位, 精确授时等都要应用原子钟 (原子频标) 作为时间或频率标准, 以便时刻同步。

铷同位素钟与铯钟、氢钟相比,短期稳定度高、结构简单、体积小、重量轻。日稳定度  $10^{-13}$ ,秒稳定度  $10^{-12}$ ,准确度  $10^{-12}$ ,目前最小的铷钟为 1 立升、1.3 公斤。可以装在飞机、战车上。铷同位素钟是用  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  制作的,根据类似的原理,用  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  等制成磁力仪,可测到  $0.1\gamma$  的磁场变化。

### 激光技术

用天然元素作激光器工作物质,由于同位素位移,使谱线展宽,增益减小。例如氦-氖激光器,谱线展宽 1500 兆赫,如改充  $^3\text{He}-^{20}\text{Ne}$  或  $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ ,单色性提高,功率也提高 25% 左右。氦-镉激光器的镉有八个同位素,谱线展宽 4000 兆赫,如用  $^{114}\text{Cd}$ ,谱线宽度只有 1800 兆赫,同时增益提高 4 倍。因此在同样输出功率时,激光管可缩短到四分之一,在全息摄影、彩色电视等方面应用就方便多了。

### 在地球和宇宙科学方面的应用

#### 同位素地质学

利用硫、锶、氧、铅等元素的同位素可以探讨矿物的来源和成矿年代,研究地壳的演化和成矿机制等。太阳系和地球上原始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.70,上地幔的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.71,而大陆地壳中比值是 0.71—0.73。原因可能是  $^{87}\text{Rb}$  放射性衰变产生  $^{87}\text{Sr}$ 。由此可以区分不同来源的矿床。铅的四种同位素中  $^{204}\text{Pb}$  是非放射成因的, $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}$  分别是  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$  的蜕变产物,叫放射成因铅。因此凡是含有铀、钍的矿物中铅的三种重同位素逐渐增加,铅同位素丰度比不断变化,变化规律与铀、钍半衰期有关,测定  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  等的比值可以估计成矿年代。

不同物质相互接触时其中的同位素会发生交换反应,反应速度与当时温度有关,成矿后这些物质被“冻结”、“凝固”起来保存到现在,我们分析其中同位素比值,可以推算古温度。这就是“稳定同位素地质温度计”。例如:碳酸盐里

的氧与水中的氧发生交换反应,温度越高碳酸盐里含  $^{18}\text{O}$  越多,分析不同年代形成的石灰岩可以了解古温度。分析沉积海底的贝壳里氧同位素可以推算古海洋温度。水和空气中的氧也会发生交换,气温每升高  $1^\circ\text{C}$ ,冰里  $^{18}\text{O}$  含量增加 0.069%,因此分析冰川、冰层中  $^{18}\text{O}$  与  $^{16}\text{O}$  之比可以反映出古气温的变化。

#### 同位素地质年代学

天然放射核素按一定的衰变常数进行蜕变,其蜕变速率——半衰期不受温度、压力、磁场、重力场等外界条件的影响。因此放射核素的衰变量与其存在的时间有一定的函数关系,我们只要测出矿物或岩石中某种天然放射核素母体还没有蜕变的原子数,又测出子体稳定核素(放射成因物)的原子数,就可以得出母体的原始原子数,再根据其半衰期求出样品的地质年代。

有许多“核素对”可以用来测定地质年代,如  $^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}-^{208}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ca}$ ,  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$ ,  $^{87}\text{Rb}-^{87}\text{Sr}$ ,  $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ ,  $^{176}\text{Lu}-^{176}\text{Yb}$ ,  $^{115}\text{In}-^{115}\text{Sn}$ ,  $^{138}\text{La}-^{138}\text{Ce}$ ,  $^{138}\text{La}-^{138}\text{Ba}$ ,  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$ ,  $^{82}\text{Se}-^{82}\text{Kr}$  和  $^{130}\text{Te}-^{130}\text{Xe}$  等。每种“核素对”所能测定的地质年龄不能超过其半衰期的 10 倍。我国用上述方法测定了珠穆朗玛峰崛起的年代。

#### 宇宙科学

核素也是宇宙空间物质存在形式之一。研究稳定核素的宇宙丰度和分布等不仅是探讨地球发展史的钥匙,也是认识天体演化规律的手段。

陨石里许多元素的同位素组成与地球上的一致。例如氢、碳、氧、硅、氯、钾、硫、铬、铁、铜、钴、镍、锡、铅和铀等。分析了从月球取回的月岩样品,证实其核素组成与地球物质近乎一致。说明了太阳系天体的同源性。用同位素地质年代法测定陨石和月球的年龄,都接近 45 亿年,说明了太阳系天体的同时性。也就是说:陨石、地球、月球以至于太阳系的类地行星是由相同的物质,在同一段时间内经过分异而成的。

这是共性。

也有个性。地球上 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值约为 $10^{-7}$ ，而铁陨石中比值高达0.315。陨石中 $^6\text{Li}/^7\text{Li}$ 比值比地球上高20倍。研究太阳光谱发现太阳里氢同位素组成和太阳系其他行星不同，太阳中心处D/H是 $1/10^{18}$ ，太阳大气圈中比值是 $1/10^7$ ，而地球上 $1/6000$ ，说明太阳中氘非常少。而太阳气体中含有10%氦，其中主要是 $^4\text{He}$ 。由此人们提出了太阳里存在着“质子-质子循环”或“碳-氮循环”等热核反应的假设。

宇宙天体中碳的两种稳定同位素丰度有很大差别。地球上 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 大约是90，太阳中是36—70，而红巨星中比值大概是1—19，说明红巨星里可能碳-氮循环占主导地位。

关于稳定核素的宇宙丰度的研究，现在仅仅是开始，随着空间技术的发展，将会得到许多更直接的数据。

综上所述，稳定核素既是研究的对象，又是研究的工具。稳定核素也是一种资源，通过某些同位素分离技术而浓缩了的稳定核素是贵重的社会财富，应用的范围越来越广，国外已经可以生产250多种浓缩稳定核素，并建立起“稳定核素库”，国内也已生产过100多种浓缩稳定核

素。

## 参 考 文 献

- [1] 华明达，稳定核素，科学出版社，(1980)。
- [2] J. Koch, *Electromagnetic Isotope Separators and Applications of Electromagnetically Enriched Isotopes*, North-Holland Pub Co., (1958)。
- [3] C. S. Wu et al., *Annual Rev. Nucl. Science*, **19** (1969), 527.
- [4] *Proceeding of the First International Conference on Stable Isotopes in Chemistry, Biology and Medicine*, AEC CONF-730525, (1973)。
- [5] *Proceeding of the Second International Conference on Stable Isotopes*, ed. by E. R. Klein and P. O. Klein, US ERDA CONF-751027, (1975)。
- [6] T. A. Baillie, *Stable Isotopes Applications in Pharmacology, Toxicology and Clinical Research*, The Macmillan Press Ltd. (1978)。
- [7] *Isotope Effects in Chemical Processes in Advances in Chemistry Series*, ed. by R. F. Gould, American Chemical Society Pub., (1969)。
- [8] M. B. Neiman and D. Gál, *The Kinetic Isotope Method and its Application*, Budapest, Akademiai Kiado, (1971)。
- [9] J. Tölgyessy et al. *Isotope Dilution Analysis*, Tr. by I. Finály, Oxford, Pergamon, (1972)。
- [10] K. Pankama, *Isotope Geology*, London, Pergamon Press, (1954)。
- [11] J. Hoefs, *Stable Isotope Geochemistry*, Springer-Verlag Berlin, (1973)。

## 高 激 发 态 里 德 堡 原 子

张 绮 香

(中国科学院物理研究所)

### 一、引 言

在调频激光器和高分辨率激光光谱学迅速发展的过程中，近几年来十分引人注目的研究领域是原子和分子的高激发态光谱学。对原子来说，高激发态是指原子中的电子被激发到主量子数 $n$ 很大的量子态，当只有一个电子被激发到高量子态时，称为里德堡原子。例如在实验室中已制备出 $n \approx 105$ 的氢原子；在星际介

质中已观测到 $n \approx 250$ 的氢原子。里德堡原子在高激发态原子光谱中起着特殊的典型作用。它有很奇特的性质，例如由于其外层电子的轨道半径很大，当别的原子或分子从中穿过，可几乎不受干扰；它很容易被电场离化；而其自然寿命又很长。关于他们的碰撞性质、极化性质、多光子电离性质等都是值得研究的新问题。关于他们的精细结构和超精细结构的研究，更有待于进一步发展。研究里德堡原子的重要性，还在于它们具有许多重要应用，如激光同位素分