

远离稳定线的原子核的研究

杨福家

(复旦大学)

纵观近年来召开的一系列有关原子核物理的国际会议,可以发觉,由于固体探测器、电子计算机技术的进展和广泛应用,由于高能物理和原子核物理的相互靠拢,特别是利用了高能加速器,利用了介子探针的结果,还由于高质量重离子束的产生,使原子核物理的实验广度和精度有了大大的扩展和提高^[1-4],原子核物理的发展正进入一个新的阶段,正处于可能发生重大突破的前夕。本文就这些发展中的一个重要方面,即对于远离稳定线的原子核的研究,给以适当介绍^[5]。

一、什么是远离稳定线的原子核?

在自然界中,人们发现了原子序数 $Z=1-94$ 的各种原子核(大多是稳定的)^[6]共 300 多个,加上过去 40 年来用人工方法制造的(大多是不稳定的,即放射性的)原子核,总共达 1500 多个。大家知道,原子核是

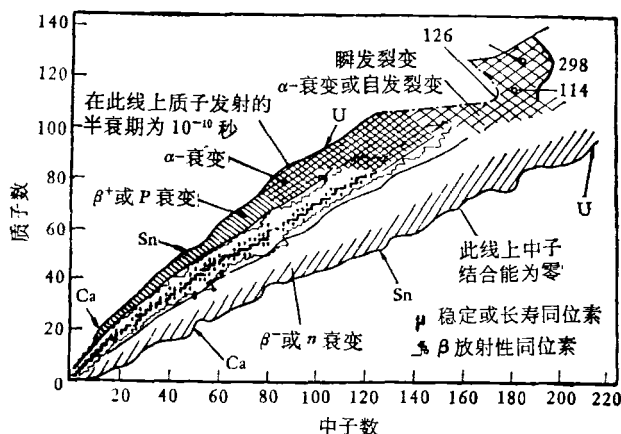


图1 核素的分布图。图中黑点代表的稳定核形成了稳定区。稳定区外两条细线之间,包括了现在找到的 1500 多个原子核。最外面两条边界线之外的原子核,按目前的理论,就不再允许存在了。

由中子和质子组成的,不同原子核具有不同的中子数 N 或不同的质子数 Z ,稳定的原子核在 $N-Z$ 图上的分布形成了原子核的稳定线,上述 1500 多个原子核都分布在稳定线上或其邻近,形成一半岛似的长条,见附图(图1)。起初,长条在 $Z=N$ 线周围,随着 Z 的增大,核内质子间的库仑斥力增大,就必须增加中子数 N ,即

增强核力部分来使原子核保持稳定,因此,稳定线就逐渐向中子数较大的方向偏离 $Z=N$ 线。在稳定线的右侧,中子数过多,属中子不稳定,原子核就会进行 β 衰变(或者,在远右侧时,应该会发生中子发射);在稳定线左侧,质子数过多,属质子不稳定,原子核会进行 β^+ 衰变(或者,在远左侧时,应会发生质子发射)。原子核逐渐增重,发生 α 衰变及自发裂变的几率越来越大,稳定线在铅附近逐渐终止。到目前为止人工造出的最重原子核为:质子数 $Z=105$,中子数 $N=157$,即质量数为 $A=262$ 。

目前所有对原子核结构的了解,都是根据了对稳定线邻近的 1500 多个原子核的研究,它只占目前理论上预言可以存在的 5000 多个原子核的一小部分。本文所介绍的“远离稳定线的原子核的研究”,就是指:把 1500 多个原子核形成的长条半岛往横的方向扩大。

至于近年来正在探讨的另两类原子核,超重元素和不平常原子核,当然可算远离稳定线的原子核,但不属本文讨论范围。超重元素,是指理论上预告在 $Z=110-126$ 之间可能存在一组稳定的核区,即在稳定线的右角前方可能存在一个稳定小岛。虽然在实验上已作了几年的努力,但至今仍未找到^[6]。关于“不平常的原子核”,已由李政道博士最近在我国作了介绍;理论上预告,在稳定线的东北角的远方,可能有一块由千万个稳定原子核形成的“洲”,这些原子核的中子数和质子数均可大到几千、几万,其核半径要比现有的原子核小,而结合能则要大 10 倍左右,故称之为“不平常的原子核”。理论上还认为,只有当几百 GeV (即几千亿电子伏)能量的铀核与铀核相碰撞时,才有可能产生“不平常的原子核”。因此,这类原子核虽然稳定,但不会存在于自然界,只能用人工方法制造。据说,企图制造这类原子核的实验正在准备。

1) 以前,认为自然界中最重的元素是铀 ($Z=92$)。在 1972 年,在一种叫氟碳铈镧矿的稀土矿物中找到了钚 (Pu , $Z=94$)。因此,自然界中最重元素是第 94 号元素。从 1-94 号元素中,除 43,61 和 93 号外,均已在自然界中找到。

二、为什么要研究远离稳定线的原子核?

当把研究领域扩展到远离稳定线的区域时,我们可以研究一系列新的现象,诸如质子、中子发射,双质子发射,高能 β 衰变,延迟粒子发射。我们可以把具有特别重要性质的 $N=Z$ 线的研究从目前的 $Z=35$ 左右向高 Z 处延伸。对于理论上预告的形变区,目前我们只研究了其中一小部分。我们已经注意到,当向闭壳层的不同端点靠近时,会显出巨大的差异,例如,在 $A=150$ 附近,形变发生得很突然; ^{152}Eu (铕,左上角数目表示中子数与质子数之和,即质量数 A)的两个衰变子体具有截然不同的能级。而在闭壳的上端,形变却是逐步发生的。原因何在?现在很不清楚。我们有必要在(远离稳定线的)其他形变区来考察类似的现象。我们甚至不知道,在远离稳定线的区域有没有幻数¹⁾,有的话,和现在的是否相同?譬如,在铪同位素中, $^{92}\text{Zr}_0$ 一般公认为是一个好的幻核,但当中子加到 $N=62$ 时,已发现 ^{102}Zr 可能是形变的;往另一方向走, $^{92}\text{Zr}_0$ 又是如何呢?再譬如,在欧洲核子中心(CERN)已经发现,在极端缺中子的同位素 ^{180}Hg , ^{182}Hg 中,虽然很靠近 $Z=82$ 幻数,但形变竟突然出现了。这些问题都涉及了原子核物理现有理论的基本方面(对于 $Z=110-126$ 之间超重元素的预告,也涉及到幻数这个基本问题)。当前原子核物理的发展所面临的某些重要问题,只有当我们把研究领域扩展到远离稳定线时,才能回答。

此外,对远离稳定线原子核的研究中,很可能会找到一些具有足够长寿命的、对医药和工业有用的新的同位素。同时,也有可能找到轻核裂变元素(“干净”的裂变元素),为原子能应用提供新的前景。

三、怎样研究远离稳定线的原子核?

对研究远离稳定线的原子核的重要性,早已有所认识,但由于涉及到的原子核寿命较短,产生和分离它们的方法均有困难,因而阻止了对它们的研究。六十年代中期开始用各种方法克服这一困难,基本的特点是:在加速器或反应堆上联放一同位素分离器(称之为“在线同位素分离器”)。采用的手段,大致可分三类:用高能质子引起散裂反应;重离子反应;裂变。裂变过程产生的一般是丰中子同位素,而带电粒子反应则可提供缺中子同位素。

我们把世界上目前用的装置列于表1。其中,最有代表性的是CERN的ISOLDE和橡树岭的UNISOR,这两装置的详细描述可以参见资料[7]和[8]。

比较起来,利用重离子反应具有明显的优点:

1. 只要适当选择靶子、重离子和能量,在产生缺

表1 在运转的在线同位素分离器装置
A. 用中子源

名称	地点	开始工作日期	靶子(活性)
TRISTAN	美国	1966.11	$^{235}\text{U}(\text{Kr}, \text{Xe})$
ARIEL	法国	1968.6	$^{233, 235, 238}\text{U}$, $^{232}\text{Th}(\text{Kr}, \text{Xe})$ 及 $^{235}\text{UO}_2(\text{Cs}, \text{Rb}, \text{Cd})$
SOLIS	以色列	1968.夏	$^{235}\text{U}(\text{Br}, \text{Kr}, \text{I}, \text{Xe})$
OSIRIS	瑞典	1968.6	^{235}U (许多元素)
IALF	阿根廷	1969.3	$^{235}\text{U}(\text{Rr}, \text{Kr}, \text{I}, \text{Xe}, \text{Ba})$

注:除IALF为高压倍加器外,其余均用反应堆。

B. 用加速器

名称	地点	开始工作日期	粒子
EMSONHIB	苏联杜布纳	1967.6	重离子
ISOLDE	瑞士 CERN	1967.10	高能质子引起散裂
POLARIS	美国普林斯顿	1969.6	高能质子引起散裂
PINGS	瑞典	1969.6	α 粒子, 225cm 迴旋
UNISOR	美国橡树岭	1972.9	重离子, 193cm 迴旋

中子核时就可有较大的选择性,而用散裂反应则会产生相当多的核,标认较困难,本底也大。

2. 由于入射粒子质量重,在采用了薄靶后,就可利用靶核的反冲把生成核中任何需要的同位素反冲出来,直接进入同位素分离器。这样就节省了从靶到离子源的扩散和转移时间,从而使可研究的核的寿命范围大大下降(到毫秒数量级)。同时,这样一来,也就不要求被研究的同位素一定要是从靶中蒸发出来的元素。象CERN用600MeV质子做散裂反应,研究的同位素只限于气体或易于从靶中蒸发出来的那些同位素,例如从熔融铅中蒸出汞。这样,不仅限制了可研究的同位素种类,同时也增加了所产生的同位素进入分离器的时间,以致寿命小于1秒的同位素一般就无法研究。

3. 用重离子,可方便地采用薄的同位素浓集靶。由于重离子射程短,不必用厚靶。

4. 由于重离子带有高角动量,故可用重离子研究很高自旋的同质异能素。

四、研究的问题及动向

1. 原子核的形变区

到现在为止研究得较多的形变区是稀土元素和铜系元素,但是理论上早已预告有其他形变区的存在。譬

- 1) 当原子核内中子数或质子数为2, 8, 20, 40, 50, 82……时,原子核特别稳定,这些数称之为幻数。原子核幻数的存在导致了原子核壳层模型,具有幻数的原子核即达到了闭壳层,原子核呈球形。远离闭壳层时,原子核发生形变。

如,在 N 和 Z 都从 50 到 82 之间的区域即应有一形变区。从 $(\alpha, \text{xn}r)$ 反应,已在这一区域发现了建于基态的转动带,然而,更需要的不只是偶偶核中的基态转动带,而在于确定奇 A 核的尼尔森(Nilsson)能级,寻找振动带、振动-转动相互作用、科里奥利(Coriolis)耦合,等等。

2. 原子核的过渡区

当我们从基态为高度形变的原子核过渡到近球形状的原子核时,能级结构发生了巨大的变化,对于这种变化的了解是十分重要的,但目前对不少过渡区知道得很肤浅。例如,质量数很小的 Os-Pt 核,质量很轻的稀土核,在 $Z, N=50-82$ 核附近的区域。微观模型的发展迫切要求这些过渡区的知识。

3. 幻核和接近 $N=Z$ 线的原子核

从诸如 ${}^{16}_8\text{O}_8$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$ 和 ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$ 这些双幻核的研究中,我们得到了有关壳模型和独立粒子运动的许多精确的知识。但是, ${}^{40}\text{Ca}$ 和 ${}^{208}\text{Pb}$ 之间相隔太大,迫切需要弥补。当中子或质子高度超额时,幻数究竟是否保持不变的问题,只有靠实验来回答;不了解这一点,很难自信地把壳模型计算用于远离稳定线的区域。有关核形状、核质量及超重元素的理论计算均需要这类知识。

围绕 ${}^{132}_{50}\text{Sn}_{82}$, ${}^{100}_{40}\text{Zr}_{60}$ 或 ${}^{100}_{50}\text{Sn}_{50}$ 的一些区域,都是很值得细加研究的。

4. 同质异能素

同质异能素的研究对原子核结构的了解具有很大意义。目前,特别是对形状同质异能素的研究,对重核中势垒能量表面的第二个极小值的研究,对 K 禁戒同质异能素的研究。

现在,已在周期表中不同区域内找到了一些高自旋同质异能素,象 10 秒 ${}^{133m}\text{I}(19/2^-)$, 161 天 ${}^{177m}\text{La}(23/2^-)$, 29 天 ${}^{179m}\text{Hf}(21/2)$, 45 秒 ${}^{212m}\text{Po}(18^+)$ 。完全可以预期,会在更多的原子核中找到这类高自旋同质异能素。寻找这些同质异能素,不仅对核结构理论的发展至关重要,而且,完全有可能从中找到一些对医药和工业有新应用的核素。

5. 粒子发射

近年来,在一些较轻的原子核中发现了 α 衰变,例如, CERN 的 ISOLDE 组已在 ${}^{179}\text{Hg}$ 到 ${}^{187}\text{Hg}$ 各同位素中发现了 α 放射性。象 ${}^{107}, {}^{108}\text{Te}$ 这样轻的同位素,也发生 α 衰变。理论上预告的双质子发射留待实验发

现。延迟粒子发射等现象正在被研究。

6. Q 值和质量公式

核质量公式是原子核物理学最基本的公式。目前的核质量公式只适合于紧靠核稳定线的区域。在重质量区,已发现可观的偏差,特别是当质子或中子束缚较松时。实验中已发现,在 $A=20$ 邻近轻核中,居然在中子束缚的预告极限之外存在着一个同位素。为得到可靠的核质量公式,有必要测量远离稳定线的原子核的质量。对这些核的 β 衰变的 Q 值的测量,也将为改进核质量公式提供依据。

7. 新的可裂变同位素

重离子涉及大的角动量。以大角动量转动着的原子核,比起非旋原子核来,具有的裂变位垒要低得多。因此,有可能找到比铀轻得多的原子核,它们可发生裂变,而且截面可观。

以上罗列的,只是可研究问题的一部分。可以预期,对远离稳定线的原子核的研究将不断产生丰硕成果。

参 考 文 献

- [1] Hamilton, J. H. and Manthuruthil, J. C., eds., *Radioactivity in Nuclear Spectroscopy* (Gordon and Breach, New York 1972).
- [2] Goldhaber, M., *Trends in Nuclear Physics—What Can We Learn From High Energy Interactions?* Proc. of Munich Conf., Aug. 1973 (North-Holland Publ. Co. Amsterdam, 1974).
- [3] *Proc. of Int. Conf. on Reaction between Complex Nuclei, Tennessee*, June (1974).
- [4] Bromley, D. A., *Trends in Nuclear Physics—The Challenge of Precision*. Proc. of Munich Conf., Aug. 1973 (North-Holland Publ. Co. Amsterdam, 1974).
- [5] Hamilton, J. H., *University Isotope Separator at Oak Ridge: A Report on the UNISOB Consortium*, (1973).
- [6] *Proc. of Nobel Symposium on Superheavy Elements*, (June 1974). 或参阅简单的叙述: 汤家镛, 复旦学报, 1973 年第 2 期 86 页; 杨福家, 《物理》, 1—3 (1972) 171.
- [7] *The ISOLDE ISOTOPE SEPARATOR on-line Facility at CERN* (A. Kjelberg and G. Rudstam, eds.) CERN 70-3, (1970).
- [8] *Proc. Int. Conf. on Low Energy Ion Accelerators and Mass Separators* (Skonde, Sweden, 1973).