

原子核在反应……

И. М. 卡皮托诺夫
(物理数学科学博士)

Н. П. 尤金
(物理数学科学副博士)

按照量子物理学的规律,电磁辐射是由最小的(“基本的”)组分—场量子构成。通常把它们叫做光子或 γ 量子,如果所说的是频率大于 10^{20}Hz *的硬辐射。就其理论而言,它们类似已经熟知的粒子——电子,质子,中子。当物质吸收电磁波时,光子的能量不会自然消失,而是用在系统结构的重新组合上。同时,重新组合不是随意的:它局限于相当窄狭的范围内,而这些范围是由电磁场同微观系统的相互作用规律所规定的。这就能使人利用光子的吸收过程来探测微观系统的内部结构。

在原子—分子物理学的发展和量子理论的建立过程中,用光子探测原子和分子,起了突出的作用。在40年代中期就开始轮到原子核。那末在吸收 γ 量子时,原子核会发生什么情况呢?对于这个最重要的问题,在1945年,苏联青年理论物理学家A. B. 米格达尔(现在是科学院院士)就给出了正确的回答。

他最先弄明白了:这一过程是和质子对中子的激发振动相联系的。A. B. 米格达尔根据结合能的数据,估计了振动频率,得到十分惊人的数字—— $13\sim 14\text{MeV}$ 。他所建立的原子核吸收 γ 量子的曲线,即吸收强度与频率的依赖关系,应有相应的共振形式,其共振频率为 $13\sim 14\text{MeV}$ 。

在那些年代,这样频率的共振被认为是不太可靠的现象。按照已有的理论认识,核物质具有特别高的粘滞性。这就不可避免地导致产生了核中的有序运动,如质子对中子的振动,应瞬时即失,将其能量转化为混乱的热运动能量。量子物理学规律认为,在这种情况下不存在某种共振。然而1947年便证实了A. B. 米格达尔的预言:在吸收曲线中,的确

发现有频率约为 $13\sim 14\text{MeV}$ 的共振,也就是说, γ 量子吸收区集中于如此窄狭的频率范围之内。从那时起,便将这一现象叫做“偶极巨共振”(“偶极”的术语就决定了波长大大超过原子核大小的光子的吸收特点)。

偶极巨共振发现以后,在核物理学中开始了“光核的假繁荣”。后来的发展极为引人注目。在40年代末,人们得到了关于核中存在着核子(质子和中子)在它们共同的核力场中独立运动的令人信服的资料。与极强粘滞性的情况完全相反的形势是:核不象是粘滞的物质,而是理想的气体。情况越来越明显:核物理的未来是同研究核子独立运动的概念相联系的。自然也就产生了关于在新概念范围内对偶极巨共振的理论阐释问题。1956年,就得到了完全出乎意料的结果。

按照量子力学的规律,核子在核力场中(同时也象在任何别的场中一样)进行着足够复杂的运动,这种运动用经典领域的形象是不可想象的。为简化描述起见,我们将认为粒子是在沿着量子理论允许的某种轨道进行转移。关于其中每一条轨道,是相对能级而言。实际上,在任何核力场中,即具有核的大小并在其内固定不变的场中,能级是结合在壳层中。换句话说,按能量级差分组排列,各组被明显超过组中能级分散的区间相互分开。我们用1,2,3,4等数字标记壳层,从能量最低的一层开始。根据计算,在第一层含有4个能级,第二层为12个,第三层24个等等。

在每个核中,这些壳层能级填充着核子。

* 下面我们将用能量单位——兆电子伏(MeV)来计量频率,如在核物理学中通用的那样, $1\text{MeV} = 3 \times 10^{20}\text{Hz}$ (作者注)。

填充从能量最低的能级进行,同时要使得在一个能级上不能多于一个核子。例如,在氧同位素 ^{16}O 核中,第一、第二层的全部能级都被填充满了。真的,具有这样结构的核(壳层完全填充!)是一种例外:它们总共只有几个。而大多数核的最近的外壳层仅占据了一部分。

对壳层结构核中 γ 量子吸收的分析表明:这一过程与核子从最低的壳层向最近的外壳层转移有关,如果该壳层有空位的话。为此必需的能量等于壳层之间的能量距离。在核子数大的重核中,这个距离为 $7\sim 8\text{MeV}$ 。

这样,在核子独立运动的概念的范围内,便存在着偶极巨共振这样的现象。然而,偶极巨共振的能量却不是 $13\sim 14\text{MeV}$,象米格达尔曾经预言的那样,而原来是总共只有 $7\sim 8\text{MeV}$ 。

由于发现了如今称作集体态的特殊激发态的形成机制,严重的理论矛盾问题在1957—1959年,由英、美学者J.埃里奥特,F.弗劳尔斯,J.布朗,M.伯尔斯特利解决了。他们的工作以大多数核子的一致的“集体”运动而成绩卓著。

偶极巨共振,依赖于最显著的集体态之一——偶极态的 γ 量子激发。在此情况下,核子运动的特点恰巧符合米格达尔所预言的质子对中子的振动。

看来,在无相互作用的核子的系统中,不可能有集体运动形式。然而,对壳层结构稍加“修改”(不完全破坏它),就可出现这种运动形式。

将偶极巨共振与集体偶极态视为同一现象,就可解释偶极巨共振的能量。当集体偶极态激发时,引人入胜的核子间相互作用就减弱了,因而,相互作用的能量就增大了。具体的数值计算表明:偶极巨共振的能量(由于集体的性质)约增长 7MeV ,结果便等于 14MeV ,和米格达尔预言的一样。此外,把偶极巨共振与偶极态等量齐观,就可以弄明白偶极巨共振的独特的“单调性”,即重核从一

组向另一组跃迁时,其特性发生平稳地变化。

实际上,能表征核物理全部过程的集体态的发现,在该学科的发展中起了特殊的作用。偶极态的概念,对于中重核和重核是绝对正确的,扩展到轻核中的偶极巨共振,也完全是自然的。但直接试图用这一概念解决问题,还没有结果,因为在轻核中,偶极巨共振并不是“单调的”,而是特殊的。所以,在铍同位素 ^9Be 核中偶极巨共振可达到能量 $40\sim 50\text{MeV}$,而在氧同位素 ^{16}O 核中, γ 量子吸收区集中在 $22\sim 25\text{MeV}$ 范围内。这无疑指出了在轻核*中形成偶极巨共振的新物理学。

据已查明的情况,这里存在一些趋于消除偶极巨共振“单调性”的现象。这些现象的综合叫做“偶极巨共振组态分裂”。让我们举那些第三壳层被填充的核(比 ^{16}O 重比 ^{40}Ca 轻的核)为例,来研究它的特点,更具体一点,例如 ^{23}Na ,在它里面,1,2壳层被占满,3壳层占了一部分。在这些壳层中总共含有23个核子。

已经说过,在 γ 量子吸收时,应该进行核的重新组合:一个核子转移到较高位置的壳层上去。在这种情况下, ^{23}Na 核可以用两种方法组合。第一种情况,一个核子从外面的未填满的壳层3中转移到空壳层4。这样的过程我们叫做A型跃迁,或A分支。第二种情况,是B型跃迁(B分支)——一个核子从满壳层2中跃迁到部分占据的壳层3中。

在中重核和重核中,两种类型的跃迁大约要求同一能量。而在轻核中呢,B型跃迁要比A型跃迁多约 10MeV 能量。所以,在 ^{23}Na 核中,偶极巨共振是由位于不同频率区间的A、B两个分支构成的。在大多数轻核中,也象在 ^{23}Na 中一样,B分支不是集中在狭小的频率范围,而是分散在约等于 20MeV 能量区内。

莫斯科大学核物理研究所光核实验室的

* 按核中核子数分为轻、中、重核,我们把核子数小于40的核算作是轻核(作者注)。

同事们,首先从实验上证实了所述的理论认识。形成 A、B 分支的核子组态,产生了一次之后,就不可能永远存在——它们便逐渐地“熄灭”,或衰变了。这之所以发生,是因为一个核子与其它核子相互作用时获得的能量,可使它脱离原子核。在原始激发核处产生所谓最终核,而飞出的核子终于被物质“俘获”。看来,在偶极巨共振的 A、B 分支衰变时,产生核子的能量极为不同,因此人们能够认清它们的特点。

现在我们来研究一组轻核——重于 ${}^4\text{He}$ 而轻于 ${}^{16}\text{O}$ 。这里也有 A、B 型跃迁。但是,在这些核中还有一种效应,能使 A 分支照样也分裂为两个小分支。在其中一个主要的小分支中,核子的吸收大约仍以分裂前的频率(约 25MeV)进行,而在另一个小分支中,频率小到约 15MeV。这些理论上的结论并没有

引起怀疑,然而能够证实这些结论的实验,是很复杂的,暂时尚未进行。

关于轻核中偶极巨共振的观念,一开始就遭到科学界的极大怀疑,因为有关在轻核中形成“单调的”偶极态的广泛流传的各种说法不一,相互矛盾。然而在后来,莫斯科大学核物理所光核组得出的结果,在世界其他许多实验室(比利时,日本,奥地利等)得以证实。而且,出现了关于组态分裂普遍性的资料,即关于轻核特殊结构的资料,在研究原子核对任何依赖于时间的外部相互作用的“反应”时,必须注意这种特殊结构。现在可以认为,偶极巨共振组态分裂的概念已成为普遍通用的概念了。

(王学敏译自《Hayka BBCCCP》No3,1990)

(上接 11 页)

- 7,632(1989)
- [50] M. J. Godfrey et al., J. phys. G15, (1989)L163
- [51] R. Wadsworth et al., Z. Phys. A333,409(1989)
- [52] S. M. Mullins et al., J. Phys. G13(1987)L201
- [53] E. S. Paul et al., Phys. Rev. Lett. 61,42(1988)
- [54] R. Wadsworth et al., 同(20),P. 38
- [55] R. Wyss et al., Phys. Lett. 215B,211(1988)
- [56] Y. S. Chen Private Communication
- [57] T. Bengtsson 1987Nordita Preprint 87/14N
- [58] T. Rzaca—Urban et al., Z. Phys. A328, 379

- *****
- (1987) J. Burde et al., Phys. Rev. C38,2470 (1988)
- [59] A. Bohr and B. R. Mottelson, Nuclear structure (New York,1975,Vol. 2)
- [60] A. O. Macchiavelli et al., Phys. Rev. C38,1088 (1988)
- [61] J. Schirner et al., Phys. Rev. Lett. 63, 2196 (1989)