

A New Method of the Expression of the Atomic Nucleus Space Structure—The Diamond Structure

Jiong Zhang, Dongxiao Li, Youngqiang Zhu

The Physics Department, Fudan University, Shanghai
Email: zhuyq@fudan.edu.cn

Received: Jun. 15th, 2013; revised: Jul. 10th, 2013; accepted: Jul. 17th, 2013

Copyright © 2013 Jiang Zhang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This paper reveals that the new method is one of the express of the space structure of the atomic nucleus and that any neutron and proton have their space place in atomic nucleus: generally speaking, the proton has the place of the body-centre and the neutron has the place of the face-centre in the diamond structure. They withstand each other by nuclear force's bond, and they are un-orderly spinning with the place of their mass centre, with the result that it can decide the binding energy, mass, body and distribution of the nuclear charge for any atomic nucleus. And the space structure of the atomic nucleus can decide which atomic nucleus has spinning energy level, vibration energy level, hyper-change, electric quadrupole moment and so on.

Keywords: Atomic Nucleus; Space Structure; Combined Procedure; Binding Energy

原子核空间结构表述的一种新方法——金刚石结构

张 炯, 李冬晓, 朱永强

复旦大学物理系, 上海
Email: zhuyq@fudan.edu.cn

收稿日期: 2013 年 6 月 15 日; 修回日期: 2013 年 7 月 10 日; 录用日期: 2013 年 7 月 17 日

摘 要: 本文揭示了原子核空间表述的一种新方法即原子核中每一个中子和质子都有它们的空间位置: 一般质子处在金刚石结构中体心位置而中子处在面心位置, 它们靠核力键相互顶紧, 并以它们的质心位置无序地旋转, 从而来确定每一种原子核的结合能、质量、大小和电荷分布。原子核的空间结构还可以决定哪些原子核具有转动能级、振动能级、超变和电四极矩等性质。

关键词: 原子核; 空间结构; 结合过程; 结合能

1. 引言

人们通过研究原子和原子核的超精细相互作用如氢原子基态超精细分裂 $\Delta\nu = 1.42$ GHz。 ^{57}Fe 原子核能级 14.4 keV 的超精细分裂、汞的偶同位素的能级移位 $6^3\text{P}_1 \rightarrow 6^1\text{S}_0$ 等可以计算原子核的电四极矩分布、原子核体积效应、原子核角动量等以及一些理论模型如费米气体模型、壳层模型和集体模型来近似计算原子

核的基态磁矩、电四极矩、核振动能谱等。但都不涉及在原子核中每一个核子的相对位置, 以前曾有人讨论过少核子的原子核行为(如 Illinois 大学的 Panipande)和少数原子核如 Co-60 原子核结构(如日本的 Hisashi Horinchi), 但是还不具备普遍性。本文提出了一种新方法将适宜于一切原子核内部每一个核子空间结构计算。

2. 原子核空间结构原理

核力是强相互作用，比电磁相互作用大一百倍，但是它的起因仍是人们探索的、悬而未决的基本问题，1935年，日本物理学家汤川秀树认为核力是通过交换某种介质来实现的，后来人们认为这种介质就是 π^+ 、 π^- 、 π^0 。但是本文假设核力产生的原因可能是两个核子相互靠拢、是在一个核子和另一个核子内部产生正负裸体电子偶相互吸引造成的。

人们会有一个疑问即作为核子之间强相互作用的核力岂不就是电磁相互作用了吗？电磁相互作用的区域范围根据经典电子半径

$R_e = e^2/m_e c^2 = 2.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$ ，即电子和电子、正电子、质子等的电磁作用范围一般不会小于 $2.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$ ，但正负裸体电子半径为 $1.0 \times 10^{-14} \text{ cm}$ ，它们之间相互发生电磁相互作用的范围可以达到 0 cm ，两个正负裸体电子之间距离为零时，它们的相互吸引力要比正负电子相距为两个经典电子半径距离时的相互吸引力大 784 倍。一般来说核力是电磁相互作用的 100 倍，所以如果用正负裸体电子之间的强电磁相互作用去描述核力也是一种有可能的方式。

什么是正负裸体电子偶？先要问什么是正负裸体电子。电子和正电子一直是人们所熟悉的，它们有静止质量 m_e ，并带有 $4.8 \times 10^{-10} \text{ CGSE}$ 电量，它们的静止能量为 $m_e c^2$ 即 0.511 Mev ，电子和正电子可以湮灭为两个光子 (0.511 Mev)，同时高能量的 γ 光子会在重原子核附近重新产生正负电子。但是人们并不注意中子和质子内部会存在正负裸体电子，即正负裸体电子只能存在于中子、质子和其它基本粒子内部，通过实验永远不可能发现一个单独存在的裸体电子，因为它一到自由空间就立刻转化为电子了。通过高能电子和质子的对撞实验得知在质子内部有点状电荷分布，这种点状电荷有可能就是正负裸体电子。

假设正负裸体电子都是球状的，并且假设半径为 $r = 1.0000 \times 10^{-14} \text{ cm}$ ，因为正负裸体电子只存在于核子内部，当核子和核子靠拢时它们才会相互作用，而且核子和核子之间的相互作用分为第一过程、第二过程、第三过程、第四过程和第五过程。

在液滴模型中中子和质子的半径大小为 $0.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$ ，因为考虑到它们是相互活动的，而在本文的原子核空间结构中设想它们会有一个固定的相

对位置，并假设它们的半径都为

$1.1000 \times 10^{-13} \text{ cm} = 11r$ 。中子和质子的直径都为 $22r$ ，可以推测核力作用范围在相邻核子的边缘距离从 $22r$ 到 $0r$ 。当核子数多的时候，中子和质子内部的正负裸体电子处在中子和质子的表面上，于是核力作用距离变为 $26r$ 到 $0r$ 。

2.1. 第一过程

第一过程，分为三种情况：

- 核子数数目小于等于 7 时，作用过程以两核子边缘相距 $11r$ 至 $22r$ 计算，作用几率为 $1/2$ 。
- 核子数数目大于 7 小于等于 11 时，作用过程距离同上，但作用几率上升为 1。
- 核子数数目大于等于 12 时，由于它们接近时正负裸体电子中心可能已跳出核子表面 $1r$ ，故作用过程以两核子边缘相距从 $15r$ 至 $26r$ 计算，作用几率为 1。

在以上三种情况两核子所感应的正负裸体电子都在距核子中心为 $5.5r$ 连线上，不论是 $22r$ 还是 $26r$ ，把它们的集体能记为 W_0 ，(同一个核子内部感应的正负裸体电子不必记入集体能内，但不同核子之间感应的正负裸体电子都要一一记入集体能，不管它们离多远)不论是 $11r$ 还是 $15r$ ，把它们的能量记为 W_1 ，第一过程在 1 情况中做功为 $1/2(W_1 - W_0)$ 在 2、3 情况中做功为 $(W_1 - W_0)$ 。

第一过程相邻核子边缘距离 ($11r$ 或 $15r$) 向第二过程相邻核子边缘距离 ($11r'$ 或 $15r'$ ， $r' = r$) 的转化，在转化过程中核子并没有发生移动，但是感应的正负裸体电子从距中心为 $5.5r$ 的连线上跳到距中心 $12r$ 的连线上。记 $11r$ 或 $15r$ 的集体能为 W_1 ，则跳出核子表面后在 $11r'$ 或 $15r'$ 位置上的集体能为 W_2 。对于情况 1 核引力做功为 $1/2(1/2W_2 - 1/2W_1)$ ，对于情况 2、3 引力做功为 $1/2(1/2W_2 - W_1)$ 。在 W_2 上 $1/2$ 的系数意味着正负裸体电子停留在距中心 $12r$ 处的几率一定为 $1/2$ (因为它跳上跳下)，括号外 $1/2$ 的意义是正负裸体电子从距中心 $5.5r$ 处跳到 $12r$ 处的能量来源一半来自于内部调剂，一半来自于核引力做功。

2.2. 第二过程

第二过程从两核子边缘距离 $11r'$ 或 $15r'$ 到两核子边缘为 $4r$ 处，前者集体能为 W_2 ，后者集体能为 W_3 ，

由于作用几率为 $1/2$ ，在第二过程中做功为 $1/2(W_3 - W_2)$ ，当相邻核子之间的距离为 $4r$ 时形成的核键为次键。

对于核子数目大于 7 时，总结以上在第一过程、第一过程转化到第二过程、第二过程的核引力的做功，如果从第一过程向第二过程能量的转化全部由核子内部调剂，则：

$$\text{Energy}_1 = (W_1 - W_0) + (W_3 - W_2)/2$$

如果从第一过程向第二过程能量的转化全部由核引力做功，则：

$$\text{Energy}_2 = W_3/2 - W_0$$

而实际情况是它们的平均值，有：

$$\text{Energy} = (\text{Energy}_1 + \text{Energy}_2)/2$$

2.3. 第三过程

第三过程(当核子数目大于 7 时)，当相邻核子边缘距离由 $4r$ 变为 0 时，这一过程做功可看作为以上过程的和，即：

$$\text{Energy}_3 = (\text{Energy}_1 + \text{Energy}_2)/2$$

经过第三过程核力把次键转化为主键，这时候核引力做的全部总功为：

$$\text{Energy}_3 + (\text{Energy}_1 + \text{Energy}_2)/2 = \text{Energy}_1 + \text{Energy}_2$$

2.4. 第四过程

第四过程(当核子数目大于或等于 12 时)是一个复杂过程，核子的排列呈金刚石堆积结构，当核子距离很近时，以每十个构成球形的核子作为一个单位，每个球中均有四个体心核子和六个面心核子，体心和周围的三个核子相连，面心与周围的两个核子相连。组成球形的每个面心核子产生两个感应电荷，分别位于该核子与相邻两个核子中心连线的角平分线上，而每个体心核子产生三个感应电荷，分别位于该核子与相邻三个核子中心连线两两的角平分线上。当相邻核子边缘间距处于 $26r - 15r$ 时，感应电荷处在距核子中心 $5.5r$ 处，当相邻核子边缘间距处于 $15r - 4r$ 时，感应电荷外切与核子，即处在距核子中心 $12r$ 处。

由于每个核子上的感应电荷应该尽可能为整数，于是产生了两种等价的感应电荷取法：一种是每个感

应电荷电量为 $+0.5e$ ，这样面心核子上的总感应电量将是整数 $+1e$ ，而体心核子上的总感应电荷电量相应为 $-1.5e$ ；另一种是每个感应电荷电量为 $+0.66e$ ，这样体心核子上的总感应电量将是整数 $-2e$ ，而面心核子上的总感应电荷电量相应为 $+1.33e$ 。既然这两种取法是等价的，那么采取其中某一种取法的概率是 $1/2$ ，即最终的能量将是分别处于这两种情况下的能量的平均值。

每个感应电荷与处在别的核子上的感应电荷均发生作用。把相邻核子边缘间距为 $26r$ 、感应电荷处在距核子中心 $5.5r$ 时的能量记为 W_0 ；相邻核子边缘间距为 $15r$ 、感应电荷处在距核子中心 $5.5r$ 时的能量记为 W_1 ；相邻核子边缘间距处于 $15r$ 、感应电荷处在距核子中心 $12r$ 时的能量记为 W_2 ；相邻核子边缘距离处于 $0r$ 、感应电荷处在距核子中心 $12r$ 时的能量记为 W_3 。由于第四过程中与第一过程不同，核子的相互作用为弱相互作用，所以在核子边缘间距由 $26r$ 变为 $15r$ 的过程中核子间的相互作用几率为 $1/2$ ，核力做功可表示为 $(W_1 - W_0)/2$ 。在核子边缘间距由 $26r$ 变为 $15r$ 的过程中，感应电荷不断的跳上跳下，它们的相互作用几率也是 $1/2$ ，核力做功可表示为 $(W_3 - W_2)/2$ 。在核子中心间距为 $15r$ 处，感应电荷将有一定的几率从距核子中心 $5.5r$ 处跳出来，若令这个几率为 β ，则核力所做的功为 $\beta \times (1/2 \times W_2 - 1/2 \times W_1)$ 。随着核子不断的靠近，相邻的核子会相切，这时感应电荷会通过一个偶然的过程达到同步，最终感应电荷将不再跳动，而变成始终停留在 $12r$ 处不跳下，相应的几率变为 1 ，为前面所述的能量的 2 倍，即为

$$W_{\text{总}} = (W_1 - W_0) + (W_3 - W_2) + \beta(W_2 - W_1)。$$

为了方便计算 W 的值，这里把体心核子的三个感应电荷都认为是处于该核子同与之相邻的三个核子所组成的正三棱锥的顶角平分线；把面心核子的两个感应电荷都认为是处于该核子同与之相邻的两个核子所组成的等腰三角形的顶角平分线上；感应电荷跃出几率 β 则仿照第三过程取为 $1/2$ ，计算的结果为 10.019 Mev 。现在再考虑一下本文所做的近似：第三过程只考虑两个核子的作用，在第四过程中，体心核子受到的最大的三个力分别来自与之相连的三个核子，面心核子所受到的来自于相邻两个核子的力的合力。计算可知， W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别升高约 1.6% 、

2.2%、2.6%、5.1%，导致总能量升高约 0.7 Mev。然后再考虑这个核子与次近一层核子的作用，同理可知，这将导致总能量减小，最终能量升高约 0.3 Mev。但是注意到这种电荷分离成三个位置上的几率不会超过 1/2，于是总的修正值 W 约为 $10.299 + 0.2 + 0.3/2 = 10.65$ Mev。通过实验把第四过程的总能量值取为 10.610 Mev。

对于复杂原子核存在几个以每十个核子构成的球形单位，即说它具有几个第四过程，但是由于它们内部的干扰使相邻的每十个核子构成的球形单位只能公用一个核子，如 $^{23}_{11}\text{Na}$ 具有两个这样的球形单位，它们公用一个核子。有几个第四过程，结合能就增加 10.610 MeV 的几倍。

2.5. 第五过程

第五过程通常是在有五个、六个、九个、十个第四过程的某些特殊的情况下发生，当一个第四过程的顶点处在相邻四个第四过程的四个顶点的中心位置上就可能发生以五个第四过程单元的顶点核子作为一个新的单位相互作用(特别地：当中子数相对比较少的情况下，在四个第四过程或八个第四过程对称情况中有可能包含产生一个第五过程的能量如： $^{40}_{20}\text{Ca}$ 、 $^{107}_{47}\text{Ag}$ 、 $^{151}_{66}\text{Dy}$)。这五个核子处在同一个平面上，一般为中子，四个核子在正方形的四角上，一个处在正方形的中心上，由于每个核子上的感应电荷尽可能为整数，它只可能有一种方式即中心核子感应电荷电量为 $+4e$ (或 $-4e$)，而在四个角上核子的感应电荷电量为 $-e$ (或 $+e$)。在这个第五过程新单元中，每个感应电荷与处在别的核子上的感应电荷均发生作用，但是这五个核子并不是相邻核子，称为相近核子。把相近核子边缘间距为 $26r$ ，感应电荷处在离核子中心 $5.5r$ 时的能量记为 W_0 ；相近核子边缘间距为 $15r$ ，感应电荷处在离核子中心 $5.5r$ 时的能量记为 W_1 ；相近核子边缘间距为 $15r$ ，感应电荷处在离核子中心 $12r$ 时的能量记为 W_2 ；相近核子边缘间距为 λr ，感应电荷处在离核子中心 $12r$ 时的能量记为 W_3 。当相邻核子边缘间距为 $0r$ 时，相近核子边缘间距 λr 应为

$2 \times 22r \times \sqrt{2}/\sqrt{3} - 22r = 13.926r$ 。类似于第四过程，相近核子边缘间距由 $26r$ 变为 $15r$ 的过程中核力做功可表示为 $(W_1 - W_0) \times 1/2$ ，核子边缘间距由 $15r$ 变为

$13.926r$ 的过程中核力做功可表示为 $(W_3 - W_2) \times 1/2$ ，在核子边缘间距为 $15r$ 处时，感应电荷将有一定的几率从距核子中心 $5.5r$ 处跳出来，若令这个几率为 β ，则核力所做的功为 $\beta \times (1/2 \times W_2 - 1/2 \times W_1)$ 。随着核子不断的靠近，感应电荷会通过一个偶然的过程达到同步，最终感应电荷将不再跳动，而变成始终停在距核子中心 $12r$ 处不跳下，相应的几率变为 1，为前面所述的能量的 2 倍，即

$W_{\text{总}} = (W_1 - W_0) + (W_3 - W_2) + \beta(W_2 - W_1)$ 。感应电荷跃出的几率 β 则仿照第四过程取为 1/2，计算的结果为 3.9020 MeV。

2.6. 其它

除了上述五个过程之外，还存在使质子靠拢的库伦能，可将质子看作点电荷，以电荷之间的相互感应公式计算所有的质子的这部分库伦能，并且这部分能量对最后的核子总能量产生负效应。

在以上的模型中已包括了液滴模型的魏扎克公式^[1]的前三项即体积能、表面能、库伦能，关于对称能和对称项也可以从空间结构中单、双键的多少和位置上反映出来。莫勒-尼克斯质量公式中宏观能项已在空间结构的各种形状反映出来，而微观能项与壳层模型计算得到的单粒子能级有密切关系，它包括壳修正和对修正两项，关于对修正已在空间结构的对称性中反映，唯有壳修正仍需补充。

从上面的模型怎么能和原子核壳层自旋相联系呢？原来以上的空间结构模型并不是静止的而是在作无序的转动(这种无序转动不是自旋)，这就好像氢原子 1S 基态电子在 $r_1 = 0.53 \text{ \AA}$ 附近的无序运动，在一段较长的时间内看它们每一个核子的轨迹似乎都布满一个球面，由于它们每二个相关中子和二个相关质子对对关联(即自旋相反)时，能量最低，即基态的 $J = 0$ ，偶偶核的基态自旋一定为零，宇称为正；实验结果无一例外，正因为偶偶核无自旋，所以看到它的外观应当为无序转动，由于这种无序转动使得绝大部分偶偶核无电四极矩，而只有少数偶偶核(如超变原子核 $^{152}_{66}\text{Dy}$ 等)处在高自旋状态并有电四极矩和转动能级，这就和本文提出的空间模型有关即有它的规则外形决定，通过对空间结构的研究可以得出：凡是中子、质子分布中心对称的空间结构就容易产生转动能级

如 ${}^{152}_{66}\text{Dy}$ 、 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 、 ${}^{180}_{72}\text{Hf}$ 、 ${}^{168}_{68}\text{Er}$ ；当空间结构中某一个第四过程相对于其它第四过程结合较松弛的情况则容易产生振动能级如 ${}^{120}_{52}\text{Te}$ 。以上是偶核的情况，关于奇偶核，原子核总自旋量子数为 $1/2$ 的整数倍，奇奇核的总自旋量子数为 1 的整数倍。从量子力学知道当原子核自旋量子数为 $1/2$ 或 0 时，它的电四极矩恒为 0 。当原子核总自旋量子数为 $1/2$ 或 1 的整数倍时，它的电四极矩由壳层模型中核的形状决定。但是根据壳层模型并不能确定原子核中哪个核子能级高，哪个核子能级低，而是把它们看成等同地在自洽场中运动。然而根据本文的空间结构就可以知道离中心最近的核子能级最低，离中心最远的核子能级最高，由这种距离的远近就可以定下每个核子的具体能级(中子和质子分别讨论)，本文把离中心最远的核子称为最外层核子，即有最外层中子(0 或 1)和最外层质子(0 或 1)。由壳层结构中最外层中子和最外层质子的角动量、自旋最后决定原子核的总的自旋。单质子绕球对称的满壳芯旋转时，整个核等效为一个扁椭球，使电四极矩小于 0 ；相反当满壳层缺一个质子时，整个核等效一个长椭球，电四极矩大于 0 。根据上百种原子核电四极矩的正负和本文的空间结构联系起来看，凡是电四极矩为负的都是最外层上核子以质子为主，反之，凡是电四极矩为正的都是在最外层上核子以中子为主，因为中子磁矩为负，最外层中子就相当于具有空穴的功能。重原子核由于核外中子的单键比较多，所以它的电四极矩大多为正，并且从定性看，整个原子核总自旋越大原子核体积越大最外层核子的键合能越小，那么它的电四极矩越大。当整个原子核自旋很大时，它的电四极矩不单由最外层核子决定，还由它壳内的核子的电荷分布决定。原来原子核自旋是在它无序转动的基础上再加上一个固有转动角动量，而固有转动角动量大到一定程度就会破坏这种无序转动(当自旋为 0 时，无序转动使任何原子核看上去是一个球形原子核)。

3. 原子核空间结构实例

3.1. ${}^3_1\text{H}$ 的结构

${}^3_1\text{H}$ 由一个质子及两个中子组成，它们形成一个正三角形，共感应出 6 个裸体电荷，如图 1 所示，通过第一、二过程形成次键。每个核子即中子、质子它

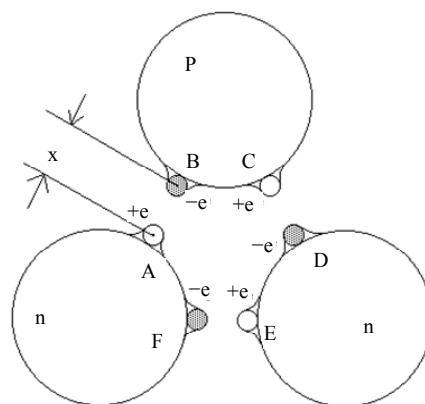


Figure 1. The structure of the deuteron
图 1. 氘的原子核结构图(这是第二过程中的一个瞬态状况)

们的半径都是 $11r$ ，而每一个感应电荷的半径都是 $1r$ ，这里 $r = 1.0000 \times 10^{-14} \text{ cm}$ 。

对于 ${}^3_1\text{H}$ 而言，当核子边缘两两相距为 $22r$ 至 $11r$ 时为第一过程。此过程中把核子产生的感应电荷的位置看成是核子半径的中心处，即距中心 $5.5r$ 处，且位于相邻核子中心的连线上。此过程中感应电荷出现的几率为 50% ，电量就是电子的电量，每一对感应电荷的电性相反。

当核子边缘两两相距为 $11r$ 至 $4r$ 时为第二过程。此过程中，核子产生的感应电荷处在核子的表面处相邻核子中心的连线上，感应电荷紧贴着表面，因为一会儿跳上一会儿跳下，所以在表面出现的几率为 50% 。

每个感应电荷与处在别的核子上的感应电荷均发生作用。把相邻核子边缘间距为 $22r$ 、感应电荷处在距核子中心 $5.5r$ 时的能量记为 W_0 ；相邻核子边缘间距为 $11r$ 、感应电荷处在距核子中心 $5.5r$ 时的能量记为 W_1 ；相邻核子边缘间距处于 $11r$ 、感应电荷处在距核子中心 $12r$ 时的能量记为 W_2 ；相邻核子边缘间距处于 $4r$ 、感应电荷处在距核子中心 $12r$ 时的能量记为 W_3 。由于第一程中作用几率为 50% ，核力做功可表示为 $1/2(W_1 - W_0)$ 。在第二过程中作用几率为 50% ，核力做功可表示为 $1/2(W_3 - W_2)$ 。在核子边缘间距为 $11r$ 处，感应电荷将有约 50% 的几率从距核子中心 $5.5r$ 处跳出来做功，其余 50% 则由核子内部调剂来实现，核力所做的功为 $1/2(1/2W_2 - 1/2W_1)$ 。则核力所做的总功，即 ${}^3_1\text{H}$ 原子核的结合能为

$$W = 1/2[(W_1 - W_0) + (W_3 - W_2)] + 1/4(W_2 - W_1)。$$

其中算得 $W_0 = 0.035494 \text{ MeV}$, $W_1 = 0.10636 \text{ MeV}$, $W_2 = 2.1188 \text{ MeV}$, $W_3 = 18.067 \text{ MeV}$, 则 $W = -8.5126 \text{ MeV}$ 。与实验值 -8.4811 MeV 相比较有 0.0315 MeV 的差异, 是因为三个核子边缘间距并非理论上所说的 $4r$ 那样紧密, 也即跳出来的感应电荷之间还有一定的距离。

3.2. 原子核空间结构和结合能

这里 C 的同位素如图 2 所示; 同质异位素 $^{51}_{23}\text{V}$ 与 $^{51}_{24}\text{Cr}$ 如图 3 所示; 同质异位素 $^{60}_{27}\text{Co}$ 与 $^{60}_{28}\text{Ni}$ 如图 4 所示; $^{235}_{92}\text{U}$ 如图 5 所示; $^{239}_{92}\text{U}$ 如图 6 所示; $^{265}_{108}\text{Hs}$ 如图 7 所示。

3.2.1. $^{265}_{108}\text{Hs}$ 的结合过程

质子和中子从无穷远到进入金刚石结构中相邻核子还未发生作用时, 可以考虑它不做功。

- 第一过程从两相邻核子边缘间距为 $26r$ (此时

$3 \times 3 \times 3$ 的立方体边长为

$$a_1 = 12 \times \frac{48r}{\sqrt{3}} + 2 \times 11r \approx 354.55r = 354.55 \times 10^{-14} \text{ cm}$$

到两相邻核子边缘间距为 $15r$ (此时 $3 \times 3 \times 3$ 的立方体边长为

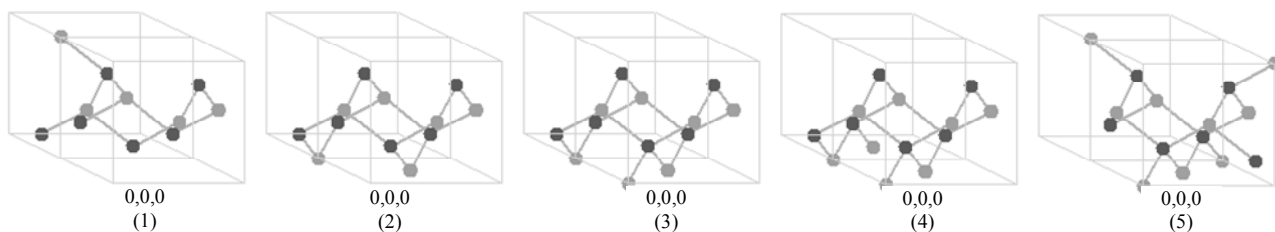
$$a_2 = 12 \times \frac{37r}{\sqrt{3}} + 2 \times 11r \approx 278.34r = 278.34 \times 10^{-14} \text{ cm},$$

第一过程所需能量为 -17.000 MeV 。

- 第一过程向第二过程的转化, 在转化过程中核子并没有发生移动, 但是感应的正负裸体电子从距中心为 $5.5r$ 的连线上跳到距中心 $12r$ 的连线上, 第一过程转化到第二过程所需能量为 -45.600 MeV 。
- 第二过程从两相邻核子边缘间距为 $15r$ 到 $4r$ (此时 $3 \times 3 \times 3$ 的立方体边长为

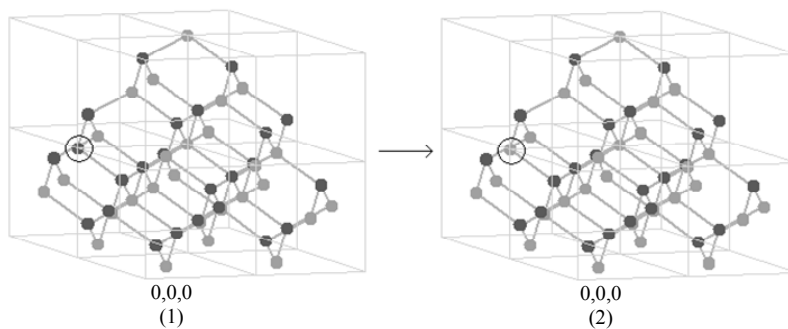
$$a_3 = 12 \times \frac{26r}{\sqrt{3}} + 2 \times 11r \approx 202.13r = 202.13 \times 10^{-14} \text{ cm},$$

第二过程所需能量为 -1251.3 MeV 。



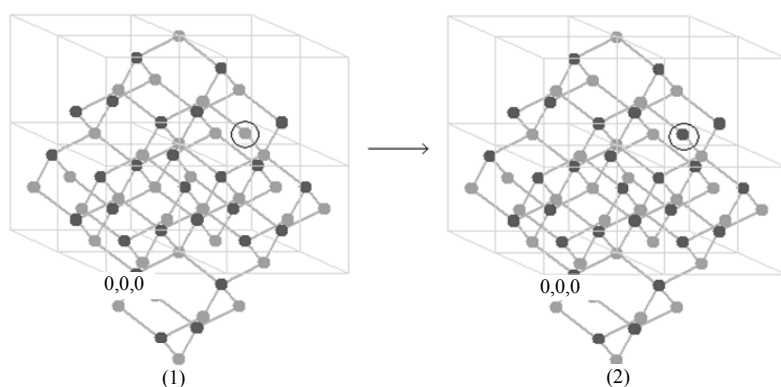
它们都具有 1 个第四过程, 其中(1)为 $^{12}_6\text{C}$, 模型计算的结合能为 -73.673 , 实验值为 -73.444 ; (2)为 $^{13}_6\text{C}$, 模型计算的结合能为 -92.682 , 实验值为 -92.162 ; (3)为 $^{14}_6\text{C}$, 模型计算的结合能为 -98.872 , 实验值为 -97.113 ; (4)为 $^{15}_6\text{C}$, 模型计算的结合能为 -105.30 , 实验值为 -105.29 ; (5)为 $^{16}_6\text{C}$, 模型计算的结合能为 -105.90 , 实验值为 -106.50 。

Figure 2. The structure of atomic nucleus of isotope of the carbon
图 2. C 的同位素原子核结构图



其中(1)为 $^{51}_{24}\text{Cr}$, 具有 5 个第四过程, 模型计算的结合能为 -442.24 , 实验值为 -444.28 ; (2)为 $^{51}_{23}\text{V}$, 具有 5 个第四过程模型计算的结合能为 -448.29 , 实验值为 -445.81 , $^{51}_{24}\text{Cr}$ 到 $^{51}_{23}\text{V}$ 的转换是通过上图圆圈内的一个质子进行轨道电子俘获变成中子得到的。 $^{51}_{24}\text{Cr}$ 是不稳定的, 因为圈内的质子占据着中子的位置, 所以它必须俘获电子变成中子, 得到的 $^{51}_{23}\text{V}$ 是稳定的。

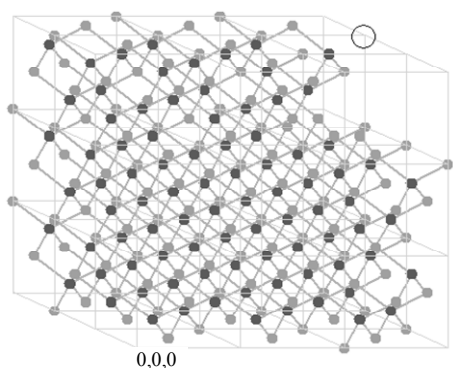
Figure 3. The structure of the atomic nucleus of the $^{51}_{23}\text{V}$ and $^{51}_{24}\text{Cr}$
图 3. $^{51}_{23}\text{V}$ 和 $^{51}_{24}\text{Cr}$ 的原子核结构图



其中(1)为 ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ，具有6个第四过程，模型计算的结合能为-524.24，实验值为-524.82；(2)为 ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ ，具有6个第四过程和2个第五过程，模型计算的结合能为-526.19，实验值为-526.83。 ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 到 ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ 的转换是通过如图所示圆圈内的一个中子进行 β 衰变成质子得到的。 ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 是不稳定的，因为圈内的中子占据着质子的位置，所以它必须进行 β 衰变成质子，得到的 ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ 是稳定的。

Figure 4. The Structure of the atomic nucleus of the ${}^{60}_{27}\text{Co}$ and ${}^{60}_{28}\text{Ni}$

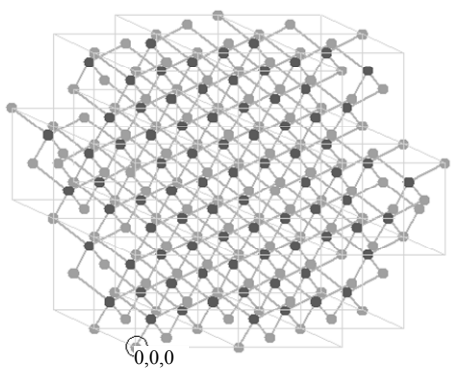
图 4. ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 和 ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ 的原子核结构图



具有23个第四过程，它的模型计算的结合能为-1781.965，实验值为-1783.89，在圆圈位置添加一个中子即得到 ${}^{236}_{92}\text{U}$ 。

Figure 5. The Structure of the atomic nucleus of the ${}^{235}_{92}\text{U}$

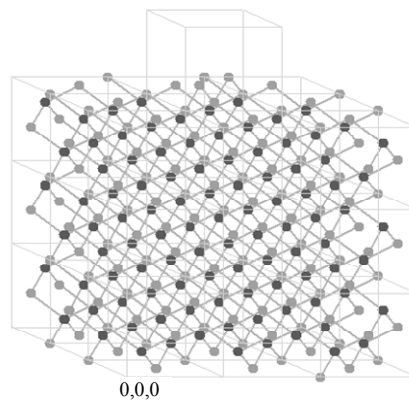
图 5. ${}^{235}_{92}\text{U}$ 的原子核结构图



具有23个第四过程，它的模型计算的结合能为-1806.49，实验值为-1807.38，去掉图中圆圈内中子即为 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 。

Figure 6. The Structure of the atomic nucleus of the ${}^{239}_{92}\text{U}$

图 6. ${}^{239}_{92}\text{U}$ 的原子核结构图



具有27个第四过程，它的模型计算的结合能为-1932.43，实验值为-1933.41。

Figure 7. The structure of the atomic nucleus of the ${}^{265}_{108}\text{Hs}$

图 7. ${}^{265}_{108}\text{Hs}$ 的原子核结构图

- 第三过程把次键转化为主键，两相邻核子边缘间距从 $4r$ 到 $0r$ (此时 $3\times 3\times 3$ 的立方体边长为 $a_3 = 12 \times \frac{22r}{\sqrt{3}} + 2 \times 11r \approx 174.42r = 174.42 \times 10^{-14} \text{ cm}$)，所做的功为前三步的总和为-1313.9 MeV。
- 第四过程是金刚石结构中每十个构成球型的核子(四个体心质子和六个面心中子)为一个单位进行作用，由前面的原理知每个第四过程的能量为10.61 MeV，而 ${}^{265}_{108}\text{Hs}$ 有27个第四过程，则第四过程总能量为-286.47 MeV。
- 质子的结合能为981.89 MeV。
总的结合能等于这六项之和，为-1932.43 MeV。

3.2.2. ${}^{265}_{108}\text{Hs}$ 的核键

总的键数为 423, 单键数为 15, 大原子核的中子数相对比质子数多, 当没有足够的质子使其以双键或三键的形式连接时, 它只能以单键存在。

3.3. ${}^7_3\text{Li}$ 与 ${}^{17}_8\text{O}$ 的电四极矩(图 8)

${}^7_3\text{Li}$ 和 ${}^{17}_8\text{O}$ 都是奇 A 核, 它的自旋由奇核子的最外层一个核子决定。由 M. G. Mayer and J. H. D. Jensen^[2]得出的自旋 - 轨道耦合引起能级的分裂——幻数出现表上可查出 ${}^7_3\text{Li}$ 的 2 个质子在 1s, 最外层一个质子在 $1p\frac{3}{2}$, 所以 ${}^7_3\text{Li}$ 自旋为 $3/2$; ${}^{17}_8\text{O}$ 的 2 个中子在 1s, 4 个中子在 $1p\frac{3}{2}$, 2 个中子在 $1p\frac{1}{2}$, 最外层一个中子在 $1d\frac{5}{2}$, 所以 ${}^{17}_8\text{O}$ 自旋为 $5/2$ 。按照壳层理论 ${}^7_3\text{Li}$ 是满壳层外一个质子, 所以电四极矩为负; 又因为 ${}^{16}_8\text{O}$ 的电四极矩为 0, 而 ${}^{17}_8\text{O}$ 的满壳层外是一个中子, 所以它的电四极矩应该为 0, 但是这与实验不相符。现在通过本文的空间模型得知 ${}^7_3\text{Li}$ 和 ${}^{17}_8\text{O}$ 都只有一个单键, 这个单键上连着一个质子(质子在单键上使库仑能变小)。无序旋转使这个质子在无序转动球面上随机运动, 但是这个无序转动球又有一个自旋面, 当这个质子经过自旋面时在单位面积上所逗留时间比在两极逗留时间要短, 整个核等效为一个长椭球, 使电四极矩小于 0。

根据经验公式 $C = \frac{I \cdot e^{-E} \cdot \sqrt{R}}{Q} \sim \text{常数}$ (E 为最外层核子键合能, R 为无序旋转半径), 由本文得出的 ${}^7_3\text{Li}$ 和 ${}^{17}_8\text{O}$ 的具体参数可以算出 $C({}^7_3\text{Li}) = 6.66$,

$C({}^{17}_8\text{O}) = 6.01$, 这与经验公式符合。

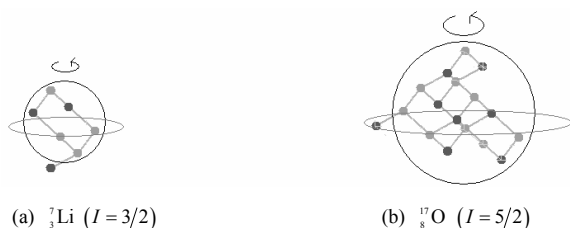


Figure 8. Compare: the electric quadrupole moment of the ${}^7_3\text{Li}$ and ${}^{17}_8\text{O}$
 图 8. ${}^7_3\text{Li}$ 和 ${}^{17}_8\text{O}$ 的电四极矩的比较

3.4. ${}^{10}_5\text{B}$ 与 ${}^{11}_5\text{B}$ 的电四极矩(图 9)

与 3.8 类似有: ${}^{10}_5\text{B}$ 为奇奇核, 它的最后一个奇中子在 $1p\frac{3}{2}$, 最后一个奇质子也在 $1p\frac{3}{2}$, 两者耦合得到 ${}^{10}_5\text{B}$ 的自旋为 3; ${}^{11}_5\text{B}$ 为奇 A 核, 它的最后一个奇质子在 $1p\frac{3}{2}$, 所以 ${}^{11}_5\text{B}$ 的自旋为 $3/2$ 。现在通过本文的空间模型得知 ${}^{10}_5\text{B}$ 和 ${}^{11}_5\text{B}$ 都只有一个单键, 这个单键上连着一个中子。无序旋转使这个中子在无序转动球面上随机运动, 但是这个无序转动球又有一个自旋面, 当这个中子经过自旋面时在单位面积上所逗留时间比在两极逗留时间要短, 整个核等效为一个扁椭球(中子相当于一个空穴), 使电四极矩大于 0。

仍然由经验公式得出, $C'({}^{10}_5\text{B}) = 0.152$, $C'({}^{11}_5\text{B}) = 0.148$, 这里 C' 与 8 中 C 不等是因为最外层核子为中子或质子是两种不同的情况, 应该分别讨论。

3.5. 超变原子核(${}^{146-150}_{64}\text{Gd}$, ${}^{150,151}_{65}\text{Tb}$, ${}^{151-153}_{66}\text{Dy}$; ${}^{189-194}_{80}\text{Hg}$, ${}^{193-195}_{81}\text{Tl}$, ${}^{192,194,196,198}_{82}\text{Pb}$)

上面括号内的 6 种原子核属于两类结构, ${}^{146-150}_{64}\text{Gd}$, ${}^{150,151}_{65}\text{Tb}$ 和 ${}^{151-153}_{66}\text{Dy}$ 都是长短轴比为 2:1 的原子核, ${}^{189-194}_{80}\text{Hg}$, ${}^{193-195}_{81}\text{Tl}$ 和 ${}^{192,194,196,198}_{82}\text{Pb}$ 都是长短轴比为 1.65:1 的原子核。

这些原子核为什么发生超变, 它们中子数要比正常的核子少是一个原因, 但是集体模型不能说明它们长短轴形成的原因。根据本文的空间结构得出的长短轴比例分别是 2:1 和 1.63:1, 与实验基本吻合, 这是第四过程组合对称性稳定的原因。

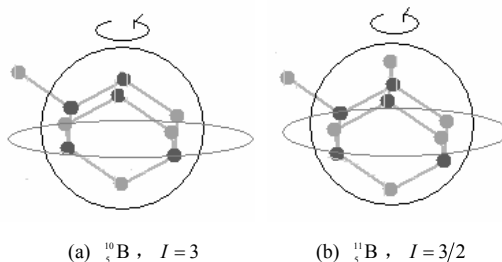


Figure 9. Compare: the electric quadrupole moment of the ${}^{10}_5\text{B}$ and ${}^{11}_5\text{B}$
 在(a)中: 最外层中子键合能为 6.39 MeV, 无序旋转半径为 4.98 fm, 实验电四极矩为 0.074b, 在(b)中: 最外层中子键合能为 6.45 MeV, 无序旋转半径为 4.93 fm, 实验电四极矩为 0.0355 b。

Figure 9. Compare: the electric quadrupole moment of the ${}^{10}_5\text{B}$ and ${}^{11}_5\text{B}$

图 9. ${}^{10}_5\text{B}$ 和 ${}^{11}_5\text{B}$ 的电四极矩的比较

以 $^{152}_{66}\text{Dy}$ 为例, 1986年英国 Daresbary 实验室在 30 MeV 串列加速器 NSF 上, 利用 205 MeV 的 $^{48}_{20}\text{Ca}$ 离子轰击靶核 $^{108}_{46}\text{Pd}$, 通过 $^{108}_{46}\text{Pd}(\text{}^{48}_{20}\text{Ca}, 4\text{n})^{152}_{66}\text{Dy}$ 反应, 第一次发现了角动量 I 高达 $60\hbar$ 的高自旋核 $^{152}_{66}\text{Dy}$ [3]。如果用集体模型是无法解释的, 但是用本文提出的模型就可以解释了。因为 Ca 是 $2\times 2\times 1$ 的空间结构, 而 Pd 是 $2\times 2\times 3$ 的空间结构, 它们结合就可得到如图 10 中 $^{151}_{66}\text{Dy}$ 类似的 $2\times 2\times 4$ 的超变结构。超变原子核具有高自旋的原因一是由于它们的高度对称性, 二是超变原子核周围核力势梯度很大容易接收 γ 光子能量, 三是超变原子核核外分布了较多的质子也容易接收 γ 光子能量。正因为它们是高自旋, 它们没有无序转动, 它们的电四极矩全部由它们的电荷分布决定。根据本文的空间结构, 如果把 $^{48}_{20}\text{Ca}$ 换成足够能量的 $^{75}_{33}\text{As}$ ($2\times 2\times 2$) 去轰击靶核 $^{108}_{46}\text{Pd}$ 可能得到长短轴之比为 2.5:1 的超长变形核 ($2\times 2\times 5$)。

3.6. 原子核的转动(图 11)

$^{180}_{72}\text{Hf}$, $^{238}_{92}\text{U}$ 都为偶偶核, 是无自旋核(基态), 电四极矩都为 0, 相对于 xy 平面反射不变, 如图所示 abcd 平面即为两原子核的 xy 平面, z 轴是垂直于 abcd 面过其中心, 可以看出质子和中子都是关于 abcd 面对称的, 它们满足由量子力学得出的变形偶偶核建立在基态上的转动带, 所允许的 I 值只能是偶数[4]。其它哪些原子核有典型转动谱是可以根据本文的空间结构推出的, 如 $^{168}_{68}\text{Er}$ 也具有这样的 abcd 对称面。

实验测得 $^{180}_{72}\text{Hf}$ 、 $^{168}_{68}\text{Er}$ 、 $^{238}_{92}\text{U}$ 分别当 $I=2$ 时它们的第一激发态转动能级分别为

93 keV, 79.8 keV, 44.91 keV, 根据量子力学公式

$$E_I = \frac{\hbar^2}{\ell} I(I+1) \text{ 和 } E_{\text{转}} = \frac{R^2}{2\ell}$$

来求出原子核存在带有集体运动的转动角动量 R。带有集体运动的转动角动量 R 不仅有原子核的质量决定, 更重要的是有它们的几何形状和它的旋转轴决定, 由图 12 可看出 $^{180}_{72}\text{Hf}$ 比

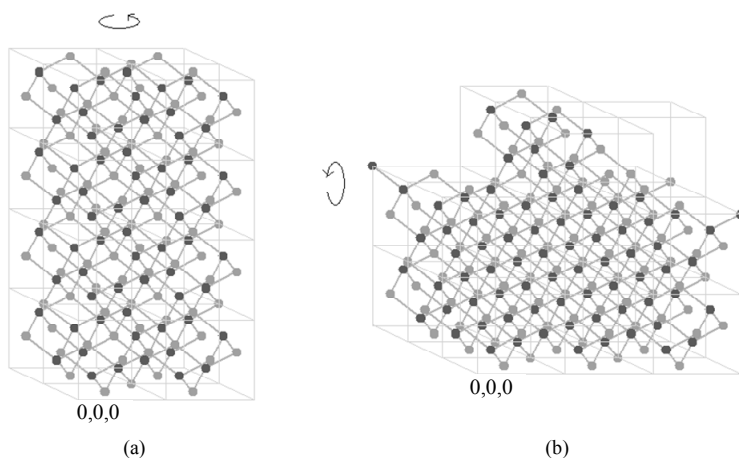


Figure 10. The hyperchange atomic nucleus: (a) $^{149}_{64}\text{Gd}$; (b) $^{192}_{82}\text{Pb}$

图 10. 超变原子核: (a) $^{149}_{64}\text{Gd}$; (b) $^{192}_{82}\text{Pb}$

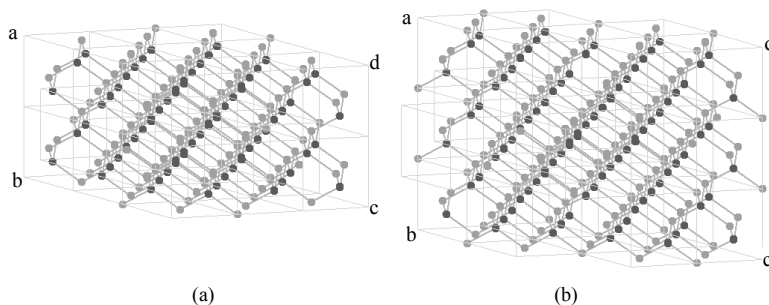


Figure 11. The spinning of the atomic nucleus: (a) $^{180}_{72}\text{Hf}$; (b) $^{238}_{92}\text{U}$

图 11. 原子核的转动: (a) $^{180}_{72}\text{Hf}$; (b) $^{238}_{92}\text{U}$

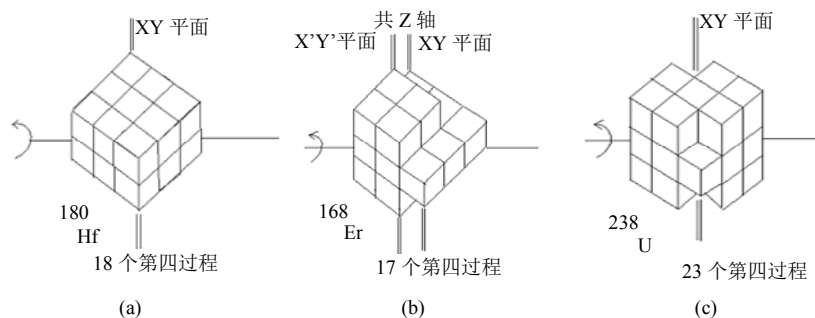


Figure 12. The Compare of the Spinning Inertia With Collective Sport: (a) ^{180}Hf ; (b) ^{168}Er ; (c) ^{238}U
 图 12. 和集体运动有关的转动惯量的比较: (a) ^{180}Hf ; (b) ^{168}Er ; (c) ^{238}U

$^{168}_{68}\text{Er}$ 、 $^{238}_{92}\text{U}$ 更具备集体运动的状况，而 $^{238}_{92}\text{U}$ 在转动过程中前后内部有不对称的状况最大，所以 $^{238}_{92}\text{U}$ 虽然原子量大但是它的带有集体运动的转动角动量还是比 $^{180}_{72}\text{Hf}$ 、 $^{168}_{68}\text{Er}$ 要小得多。

3.7. 原子核的振动(图 13)

$^{120}_{52}\text{Te}$ 的最上面的一个第四过程可以作振动，而它为偶偶核，自旋为 0，因此它作无序转动，其半径 r 随着最上面一个第四过程的振动而变化。实验表明， $^{120}_{52}\text{Te}$ 的振动能级并不是简并的，而且当能量超过 2 MeV 时，能级结构变得十分复杂，没有振动谱的特点能明显观察到了。从最上面一个第四过程的放大图可以看出它靠三个在同一直线上的中子和下部的 12 个第四过程相互联系时，使它不但存在上下振动，还可以左右摆动，因此出现了以上的实验现象。

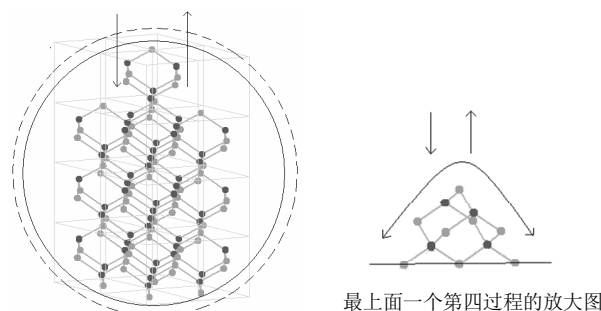


Figure 13. The Vibration of the $^{120}_{52}\text{Te}$ and the unordered spinning

图 13. $^{120}_{52}\text{Te}$ 的振动和无序转动示意图

4. 结果及讨论

4.1. 原子核模型结合能、实验结合能和质子结合能曲线图

从附表 1 中可知，由本文金刚石模型计算得到的原子核结合能与实验值相差的绝对值小于 4，而相对误差在 0.13%左右(图 14)，可以认为该模型基本反映了原子核的真实结构，是合理描述原子核空间结构的方法之一。

4.2. β^- 衰变与 EC 轨道电子俘获

β^- 衰变：在原子核中，由于中子处在质子的位置上而导致该中子不稳定，易发生 β^- 衰变成为质子得到稳定结构。一般来说，当该中子与两个中子相连时(n-n-n)的寿命比它仅与一个中子相连时(n-n)的寿命要短。

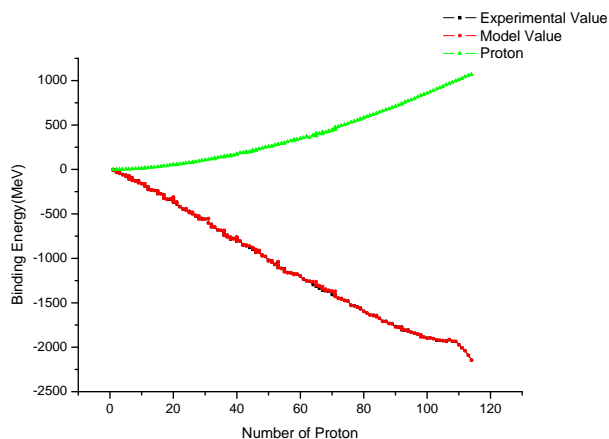


Figure 14. Curve: the model value of BE, the experimental value of BE and the value of proton BE

图 14. 原子核模型结合能、实验结合能和质子结合能曲线图

EC 轨道电子俘获：在原子核中，由于质子处在中子的位置上而导致该质子不稳定，必须通过俘获一个核外轨道电子成为中子来达到稳定结构。一般此种情况都是 P-P-P 结构的。

4.3. 中子对质子的替代

为了尽量地保留金刚石结构即尽量地保留较多

的第四过程，可以通过用一个中子代替一个体心质子的位置来达到保留第四单元的目的，但每一个单元只允许替换一个质子，因为替换更多的质子会导致单元内的中子太多而衰变，这样的结构是很不稳定的。但最多只允许有两个中子替代质子，并且不能在同一个第四过程中进行替代，因此在替换了两个后再减少质子，就要把所有原来所替换的单元的中子还原成质子，然后集中在一个单元集中减少质子，减少一个第四过程。对于减少第四单元的顺序则遵循空间对称的原则，使得原子结构接近稳定的球形。

4.4. $^{235}_{92}\text{U}$ 的裂变

由图 5、图 6 可知，与 $^{238}_{92}\text{U}$ 相比， $^{236}_{92}\text{U}$ 少了两个中子的结构发生了重大的变化，减少的第四过程由原来的对角空间对称位置变为集中在同一层上减少相邻的 4 个第四过程，原因是在同一层上减少相邻的 4 个第四过程比对角空间对称减少 4 个第四过程需要更少的中子，对于 $^{236}_{92}\text{U}$ 来说比较不稳定。但同时因为在同一层减少了 4 个相邻的第四过程，使得这一层剩下的 5 个第四过程向外分离的趋势明显， $^{236}_{92}\text{U}$ 比 $^{235}_{92}\text{U}$ 多了一个(8, 4, 8)单元格的单键中子，使最上层的 5 个第四过程更容易向外分裂， $^{235}_{92}\text{U}$ 相对是很稳定的；在一个中子的激发下， $^{235}_{92}\text{U}$ 容易形成 $^{236}_{92}\text{U}$ 的不稳定结构，然后发生裂变，如

$n + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U}^* \rightarrow ^{138}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3n$ 等裂变过程。在自然界， $^{238}_{92}\text{U}$ 的丰度达到 99.275%，发生 α 衰变，半衰期为 $4.468 \times 10^9 a$ ； $^{235}_{92}\text{U}$ 的丰度达到 0.720%，发生 α 衰变，半衰期比 $^{238}_{92}\text{U}$ 要短，只有 $7.038 \times 10^8 a$ ，可见空间对称减少第四过程较在同一层减少第四过程为更稳定的结构。

4.5. 原子核的电荷空间分布

由该模型计算以其中心无序旋转得出的电荷空间分布(以 Au, Sb, In, Co, Ca 为例)，由图 15 可以看出当 ^{197}Au 原子核绕其中心无序旋转时，它的电荷密度在以核中心为 $2 \times 2 \times 2$ 的空间内几乎是恒定的，因此可以算出此时的半径为

$$\frac{1}{2} \left(8 \times \frac{22r}{\sqrt{3}} \right) \approx 50.807 \times 10^{-14} \text{ cm} = 5.0807 \text{ fm};$$

同样推算出它的边界厚度约为

$$(7.6210 - 5.0807) \text{ fm} = 2.5403 \text{ fm}$$

$$\left(\frac{1}{2} \left(12 \times \frac{22r}{\sqrt{3}} \right) = 7.6210 \text{ fm} \right); \text{ 而电荷密度的零点在}$$

$$\frac{1}{2} \left(10\sqrt{2} \frac{22r}{\sqrt{3}} \right) \approx 8.9815 \text{ fm 到}$$

$$\frac{1}{2} \left(12\sqrt{2} \frac{22r}{\sqrt{3}} \right) \approx 10.778 \text{ fm 之间。这与 B. Hahn, D. G.}$$

Ravenhall 和 R. Hofstandter 的文章中给出的核电荷分布图一致^[5]。同样对于 Sb、In、Co、Ca 根据本文的原子核空间结构的无序旋转可得出它们的恒定电荷密度半径，边界厚度 $0.9\rho_0 \sim 0.1\rho_0$ ，零电荷密度半径，它们和实验值取得一致(如表 1):

在表 1 可以看出，虽然 Sb 比 In 的原子序数只大 2，但是零电荷密度半径却增大了 0.7 fm，按常理这很难理解，现在从本文的附表 1 中可分析出 $^{123}_{51}\text{Sb}$ 是 13 个第四过程，它们的空间结构同本文图 13 中 $^{120}_{52}\text{Te}$ 的空间结构相似，而 $^{115}_{49}\text{In}$ 的空间结构是 12 个第四过程，恰恰少了最上面一个第四过程，这使它的无序旋转半

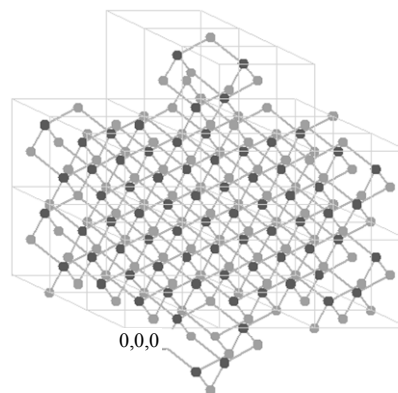


Figure 15. The structure of the Au atomic nucleus
图 15. Au 原子核的结构

Table 1. The space distribution of the charge of the atomic nucleus
表 1. 原子核的电荷空间分布

模型值	实验值	恒定电荷密度半径(fm)	边界厚度 $0.9\rho_0 \sim 0.1\rho_0$ (fm)	零电荷密度半径 (fm)
$^{197}_{79}\text{Au}$		5.0	2.5	10.0
		5.0	2.5	10.0
$^{121,123}_{51}\text{Sb}$		4.2	2.4	8.8
		4.2	2.6	8.9
$^{115}_{49}\text{In}$		4.2	2.4	8.1
		4.2	2.5	8.2
$^{59,60}_{27}\text{Co}$		3.0	2.4	7.0
		3.2	2.3	7.0
$^{40,41}_{20}\text{Ca}$		2.4	2.4	6.5
		2.4	2.4	6.5

径迅速减少，于是出现了这种情况。

4.6. 第四过程的演化过程

原子核空间结构随着核子数增加第四过程，为了保持能得到较大的结合能和尽可能具有旋转对称性，它的发展有一个演化过程，大致如图 16。

4.7. 重离子轰击和空间结构的联系

从 1955 年吉奥索(A. Ghiorso)等人用 41Mev 的 α 粒子轰击 ^{253}Es (镱)，合成了 101 号元素 $^{256}_{101}\text{Md}$ (钔) 以来，在 1981 年前人们通过重离子反应，相继发现了 102~106 号元素，例如，利用 $^{249}_{98}\text{Cf} (^{12}\text{C}, 4n) ^{257}_{104}\text{Rf}$ 反应获得了 104 号元素，利用 $^{243}_{95}\text{Am} (^{22}\text{Ne}, 4n) ^{261}_{105}\text{Ha}$ 反应获得了 105 号元素等。三个重元素 107、108 和 109 号的发现要归功于西德达达姆施塔特的 GSI 重离子实验室，在 1981~1984 年间他们用 ^{54}Cr 轰击 ^{209}Bi 得到了 $^{262}_{107}\text{Ns}$ ；用 ^{58}Fe 轰击 ^{208}Pb 得到了 $^{265}_{108}\text{Hs}$ ；用 ^{58}Fe 轰击 ^{209}Bi 得到了 $^{266}_{109}\text{Mt}$ 。以上这些轰击为什么取得成功可以从本文的空间结构的合成过程来分析，对于目前自然界最大原子核的空间结构都是 $3 \times 3 \times 3$ 或称为 $9+9+9$ 结构，若它有一些空缺位 $9+9+(3, 4, 5, 6, 7, 8)$ 等，这时候如果轰击元素轰击这些富含双键、三键的空缺位上就会补缺这些空缺位而合成新元素(参见下表 2)，如下：

GSI 企图用 $^{48}_{20}\text{Ca}$ 轰击 $^{248}_{96}\text{Cm}$ 终未成功，不成功的原因也可用本文的空间结构分析出来：

$$^{48}_{20}\text{Ca} + ^{248}_{96}\text{Cm} = ^{48}\text{Ca}[4] + [9+9+(6)] \xrightarrow{x},$$

反应无法进行的原因是(6)比(9)少了 3，而企图打入[4]这是不可能实现的。此外，自然界尚不存在的 119 号元素和大于 110 号元素的空间结构分别为 28、29 和 30 个第 4 过程(见附表 1)即 $9+9+9+(1, 2 \text{ 或 } 3)$ ，为了能形成稳定的结构需要更多的中子参加，在 GSI 实验室中实现了如 $^{64}_{30}\text{Zn} + ^{208}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{272}_{112}\text{Cn}$ ($[6^{\wedge}] + [9+9+3] \rightarrow [9+9+9+(1)]$)。宣布要合成 119 号元素的俄罗斯杜布纳联合研究所是一个有名的机构，近年来最新的元素周期表中有 6 个就是他们合成的，如 $^{48}_{20}\text{Ca} + ^{244}_{94}\text{Pu} \rightarrow ^{289}_{114}\text{Uug} + 3n$ ，这里扩大了第三

Table 2. The heavy ion bombardment and change of space structure
表 2. 重离子轰击和空间结构的变化

轰击反应	空间结构变化
$\alpha + ^{253}_{99}\text{Es} \rightarrow ^{256}_{101}\text{Md} + n$	$\alpha[0] + [9+9+(7)] \rightarrow [9+9+(7)] + n$
$^{12}\text{C} + ^{249}_{98}\text{Cf} \rightarrow ^{257}_{104}\text{Rf} + 4n$	$^{12}\text{C}[1] + [9+9+(7)] \rightarrow [9+9+(8)] + 4n$
$^{22}\text{Ne} + ^{243}_{95}\text{Am} \rightarrow ^{261}_{105}\text{Ha} + 4n$	$^{22}\text{Ne}[2] + [9+9+(6)] \rightarrow [9+9+(8)] + 4n$
$^{54}_{24}\text{Cr} + ^{209}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{262}_{107}\text{Ns} + n$	$^{54}\text{Cr}[4+1] + [9+9+(3)] \rightarrow [9+9+(9)] + n$
$^{58}_{26}\text{Fe} + ^{208}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{265}_{108}\text{Hs} + n$	$^{58}\text{Fe}[4+1] + [9+9+(3)] \rightarrow [9+9+(9)] + n$
$^{58}_{26}\text{Fe} + ^{209}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{266}_{109}\text{Mt} + n$	$^{58}\text{Fe}[4+1] + [9+9+(3)] \rightarrow [9+9+(9)] + n$

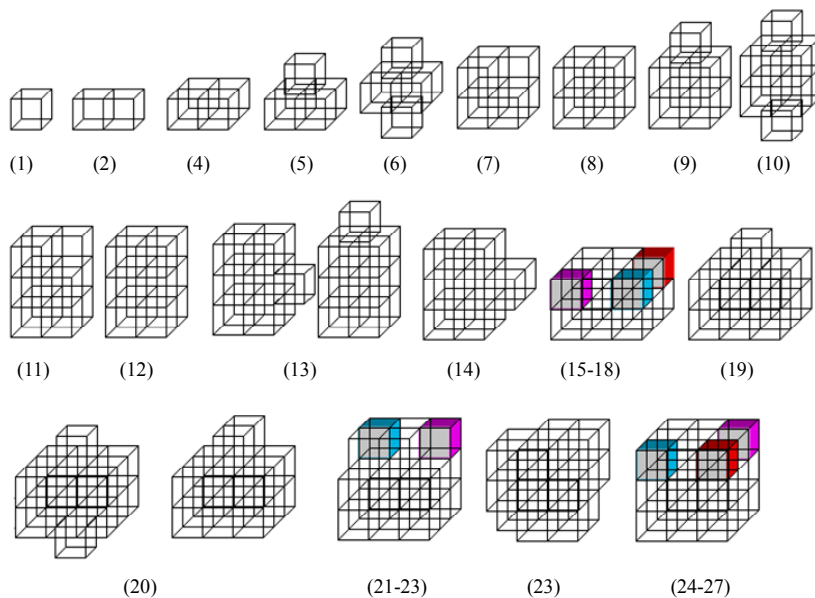


Figure 16. The develop of the 4th process of the atomic nucleus Structure
图 16. 原子核结构第四过程的发展演化

层上的破缺层,使这反应比 $^{48}_{20}\text{Ca}$ 轰击 $^{248}_{96}\text{Cm}$ 来得容易即($^{48}_{20}\text{Ca}[4]+[9+9+(6)]\rightarrow[9+9+9+(2)]+3n$)。尚未合成的 119 号元素可能会包含 30 个第四过程,由于它是不对称结构使转动中心偏离体心会造成更大的不稳定性,而 118 号元素(29 个第四过程: $[9+9+9+(2)]$)是一个对称结构。

4.8. 巨共振和空间结构的联系

巨共振是历史上最早(40 年代末)发现的原子核集体运动,这是在光核反应中首先发现的。光核反应主要是光中子反应,包括(γ, n) ($\gamma, 2n$) 和($\gamma, 3n$) 等反应。来自 γ 光子所引起的核的电偶极激发,称为巨偶极共振(GDR),它有下面一些特点: 1) 光子反应截面和光子能量曲线共振峰的宽度 r 约 3~7 Mev; 2) 峰值处的共振能量 $E_m \approx \text{常数} \cdot A^{1/3}$ 。通过实验结果的仔细分析,发现对不同的 A 值, $E_m A^{1/3}$ 并不是一个常数,而是分成了四段直线,它和本文的空间结构有一定的联系,如图 17。

N 从 5 到 8 原子核偶极巨共振主要在 $[4+1]$ 到 $[4+4]$ 空间结构基础上, N 从 9 到 13 原子核偶极巨共振主要在 $[4+4+1]$ 到 $[4+4+4+1]$ 空间结构基础上, N 从 14 到 17 原子核偶极巨共振主要在 $[4+6+4]$ 到 $[9+6, 7, 8]$ 空间结构基础上, N 从 18 到 21 原子核偶极巨共振主要在 $[9+9]$ 到 $[9+9+1, 2, 3]$, 由于它们系列不同就造成了它们的差异。如第四系列要产生集体变形所受的阻力不仅随 A 的增加而增加,还随着它空间结构比其他 3 个系列更稳定,造成它的巨共振常数 E 进一步增加。

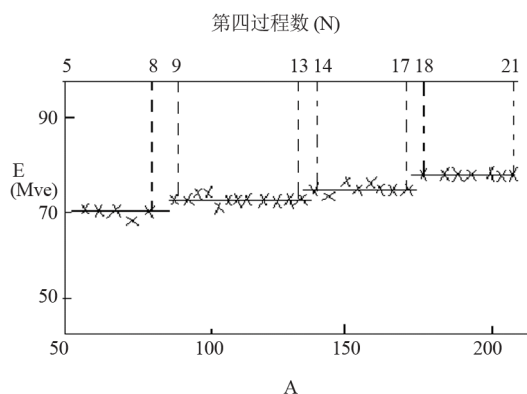


Figure 17. The Contact between the idot-extreme huge-vibration $E = E_m A^{1/3}$ and the space structure
图 17. 偶极巨共振 $E = E_m A^{1/3}$ 和空间结构的联系

4.9. 原子核半径和电荷分布半径

为了计算原子核半径和电荷分布半径,首当其冲要得到中子质心,质子质心和进一步求出中子和质子的权重比。

设在第一、二、三、四、五过程中核子全部做功为 W , 而总核数 $N = \text{中子数 } A + \text{质子数 } B$, W/N 即为每一个核子的质量亏损。在原子核中中子质量 $W_{\text{中}} = \text{一个中子的质量} - W/N$; 质子质量 $W_{\text{质}} = \text{一个质子质量} - W/N + W_p/B$, 其中 W_p 为质子结合能,由此求得在原子核中中子质子权重比为 $W_{\text{中}}:W_{\text{质}}$, 进一步可求出原子核中子中心和质子中心的合中心即为原子核的转动中心。

由于计算机的计算能力有限,如果在大量微积分公式的基础上计算就需要较长的时间,为此在软件模拟的条件下做了较为简单的近似,具体计算如下:

将每一个核子(直径为 $22r$)等间距切割成 11 份(每份宽度为 $2r$),同时又认为以转动中心为球心的切割球面可近似认为切割线为等距的直线。根据球冠体积公式 $V = \pi h^2 (R - h/3)$ 可求得截取每一份的体积,其中 $R = 11r$,

$$V_1 = V_{11} = \pi(2R/11)^2 (R - 2R/33) = 124/3993 \pi R^3$$

$$V_2 = V_{10} = 340/3993 \pi R^3; \quad V_3 = V_9 = 508/3993 \pi R^3;$$

$$V_4 = V_8 = 628/3993 \pi R^3; \quad V_5 = V_7 = 700/3993 \pi R^3$$

$$V_6 = 724 \pi R^3;$$

再以转动中心为球心将整个原子核空间与间隔 $2r$ 分成若干球壳,每一层球壳里填充入上文提到分割好的相应空间内的核子质量和电荷数量,将所有核子质量和电荷全部分入每层球壳后,可求得每一层球壳的平均质量密度和平均电荷密度,其最大半径即为原子核半径和其最大质子分布半径即为电荷分布半径,计算结果可参看附表 3。显而易见,原子核电荷分布半径小于或等于原子核半径,它们的差别随着原子序数的增加而增加。原子核半径和电荷分布半径并不随着原子序数单调增加而是有起伏的,当空间结构的第四过程数目从 $[1]$ 至 $[2]$;从 $[8]$ 到 $[9]$;从 $[9]$ 到 $[10]$;从 $[16]$ 到 $[17]$ 会有台阶式地增加,例如同位素:

4.9.1. $^{21}_{11}\text{Na}$ 和 $^{23}_{11}\text{Na}$ (图 18)

$^{21}_{11}\text{Na}$ 含有 1 个第四过程,其原子核半径和电荷分

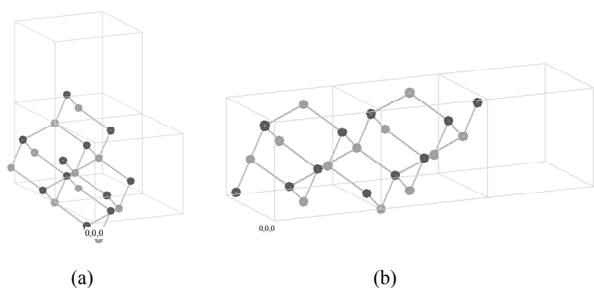


Figure 18. Isotope: (a) $^{21}_{11}\text{Na}$; (b) $^{23}_{11}\text{Na}$

图 18. 同位素: (a) $^{21}_{11}\text{Na}$; (b) $^{23}_{11}\text{Na}$

布半径分别为 5.8491 fm 和 5.8225 fm, $^{23}_{11}\text{Na}$ 含有 2 个第四过程, 其原子核半径和电荷分布半径分别为 7.8449 fm 和 7.8449 fm。

4.9.2. $^{103}_{45}\text{Rh}$ 和 $^{105}_{45}\text{Rh}$ (图 19)

$^{103}_{45}\text{Rh}$ 含有 10 个第四过程, 从上到下包含 4 个, 其原子核半径和电荷分布半径分别为 11.2745 fm 和 10.1941 fm; $^{105}_{45}\text{Rh}$ 含有 11 个第四过程, 从上到下包含 3 个, 其原子核半径和电荷分布半径分别为 9.8917 fm 和 9.7410 fm。

4.9.3. $^{133}_{55}\text{Cs}$ 和 $^{137}_{55}\text{Cs}$ (图 20)

$^{133}_{55}\text{Cs}$ 含有 12 个第四过程, 其原子核半径和电荷分布半径分别为 9.9908 fm 和 9.9908 fm; $^{137}_{55}\text{Cs}$ 含有 14 个第四过程, 其原子核半径和电荷分布半径分别为 10.6694 fm 和 10.1396 fm。

4.9.4. $^{235}_{92}\text{U}$ 和 $^{238}_{92}\text{U}$

$^{235}_{92}\text{U}$ 和 $^{238}_{92}\text{U}$ 都含有 23 个第四过程如图 5 和图 6, 它们的空间排列不同还会造成内部质量分布和电荷分布不一样。

$^{235}_{92}\text{U}$ 的原子核半径和电荷分布半径分别为 14.8284 fm 和 12.1112 fm; $^{238}_{92}\text{U}$ 的原子核半径和电荷分布半径分别为 12.2462 fm 和 10.9338 fm。 $^{235}_{92}\text{U}$ 的转动中心 (5.876286, 6.646185, 5.450165) 偏离体心 (6.000000, 6.000000, 6.000000) 使它内部质量和电荷的分布呈混沌状态; 而 $^{238}_{92}\text{U}$ 的转动中心 (6.058467, 6.025057, 5.983295) 和体心几乎重合使它内部的质量和电荷的分布呈现 3 个起伏作相互支撑形成稳定结构, 它的电荷分布半径比 $^{235}_{92}\text{U}$ 的电荷分布半径小 1.1774 fm, 使它不容易裂变。从图 21 中还可看出它们的转动中心的质量、电荷密度为 0, 即表明转动中心正处在核子之间的空隙中。

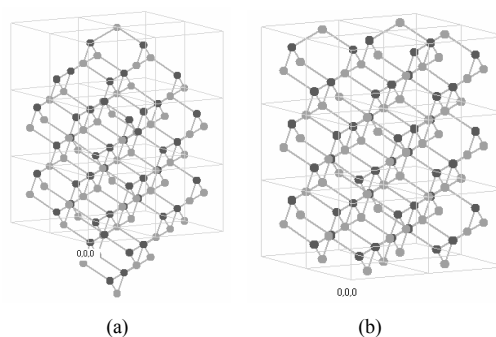


Figure 19. Isotope: (a) $^{103}_{45}\text{Rh}$; (b) $^{105}_{45}\text{Rh}$

图 19. 同位素: (a) $^{103}_{45}\text{Rh}$; (b) $^{105}_{45}\text{Rh}$

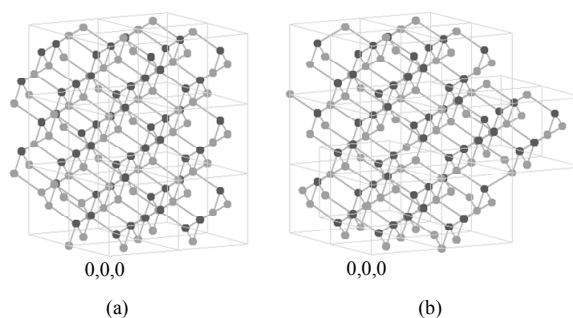


Figure 20. Isotope: (a) $^{133}_{55}\text{Cs}$; (b) $^{137}_{55}\text{Cs}$

图 20. 同位素: (a) $^{133}_{55}\text{Cs}$; (b) $^{137}_{55}\text{Cs}$

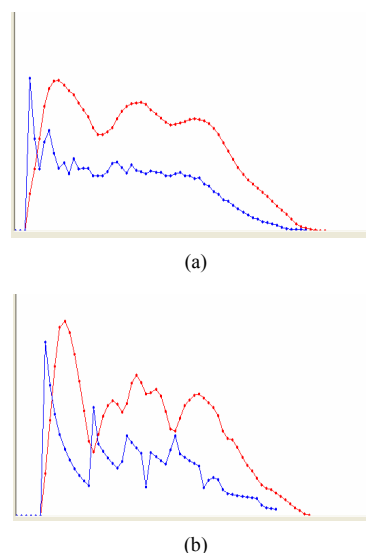


Figure 21. The distribution of the mass and charge in the atomic nucleus (the above curve is mass distribution): (a) $^{235}_{92}\text{U}$; (b) $^{238}_{92}\text{U}$

图 21. 原子核内部质量和电荷的分布图(上曲线为质量分布曲线): (a) $^{235}_{92}\text{U}$; (b) $^{238}_{92}\text{U}$

4.10. 幻数和空间结构

在 1949 年迈耶尔和简森在壳层模型中加入了自

旋一轨道项解释了三个幻数 50、28 和 126 时原子核会比较稳定，而本文从空间结构来讨论三个幻数。

4.10.1. 具有质子数 50 的 $^{120}_{50}\text{Sn}$ 和 $^{121}_{51}\text{Sb}$ (图 22)

$^{120}_{50}\text{Sn}$ 具有 12 个第四过程[2 × 2 × 3]的空间结构具有体心对称状态，在第四过程的周角上可容纳更多的中子状态，因而具有 10 个同位素，它还容许再增加一个质子成为 $^{121}_{51}\text{Sb}$ ，同时使平均结合能明显变小。

4.10.2. 具有中子数 50、82、126 的原子核

$^{88}_{38}\text{Sr}$ 、 $^{138}_{56}\text{Ba}$ 、 $^{208}_{82}\text{Pb}$ 分别具有 9、14、21 个第四过程，因为它们空间结构不对称，造成了它们在凹处可容纳较多的中子状态。此外 $^{88}_{38}\text{Sr}$ 再增加一个质子，二个质子成为 $^{89}_{39}\text{Y}$ 、 $^{90}_{40}\text{Zr}$ ； $^{138}_{56}\text{Ba}$ 再增加一个质子成为 $^{139}_{57}\text{La}$ ； $^{208}_{82}\text{Pb}$ 再增加一个质子、二个质子成为 $^{209}_{83}\text{Bi}$ 、 $^{210}_{84}\text{Po}$ ，由附表 3 中查出上述三种变换中原子核半径和电荷分布半径几乎不变，反证出它们的稳定性。

4.11. 核电四极矩和转动倾向轴

以 Z 轴旋转的球形核电四极矩 $Q = 0$ ；长椭球的核($c > a$) $Q < 0$ ，扁椭球的核($c < a$) $Q > 0$ ，Q 的单位为靶 10^{-24} cm。设核电四极矩为 Q，原子序数为 Z，可以求出原子核在对称时的纵横比的倒数 $1/(c/a) = (5Q/2z + 1)^{1/2}$ 。实际上奇原子核或奇奇原子核虽然根据它的空间结构知道它的电荷分布和转动中心的坐标，但是并不知道它的转动轴，所以还不能直接计算核电四极矩，只能用近似的方法对 X、Y、Z 三根轴做对称度分析；如果都不对称则三根轴转动几率各为 1/3；如果某根轴具有一定的对称性则这根轴转动几率

为 1/2，其余二根轴转动几率各为 1/4；如果某根轴具有较好的对称性则这根轴转动几率为 2/3，其余二根轴转动几率各为 1/6；如果某根轴具备完全的对称性则这根轴转动几率为 1(图 23)。

已知 $^{176}_{71}\text{Lu}$ 的电四极矩 $Q = 8.00$ ，纵横比 $c/a = 0.8833$ ；已知 $^{175}_{71}\text{Lu}$ 的电四极矩 $Q = 5.68$ ，纵横比 $c/a = 0.9129$ 。从空间结构分析虽然 $^{176}_{71}\text{Lu}$ 和 $^{175}_{71}\text{Lu}$ 都具有相同的质子分布坐标，但是由于 $^{176}_{71}\text{Lu}$ 比 $^{175}_{71}\text{Lu}$ 多了一个中子使它的转动中心坐标发生有更对称的趋向： $^{175}_{71}\text{Lu}$ 质心坐标为(5.982875、5.960148、4.006246)； $^{176}_{71}\text{Lu}$ 质心坐标为(5.994270、5.994270、4.028808)。

通过对 $^{175}_{71}\text{Lu}$ 和 $^{176}_{71}\text{Lu}$ 分别对 X、Y、Z 三轴计算它们的纵横比，对 $^{175}_{71}\text{Lu}$ 而言：对 X 轴 $c/a = 1.20085$ ，对 Y 轴 $c/a = 1.16529$ ，对 Z 轴 $c/a = 0.69065$ ；对 $^{176}_{71}\text{Lu}$ 而言：对 X 轴 $c/a = 1.20140$ ，对 Y 轴 $c/a = 1.16601$ ，对 Z 轴 $c/a = 0.68975$ ，通过比较对 $^{176}_{71}\text{Lu}$ 而言 X 轴 c/a 对 Y 轴 c/a 的差值比 $^{175}_{71}\text{Lu}$ 更小，以及对 Z 轴 c/a 也比 $^{175}_{71}\text{Lu}$ 更小，所以肯定， $^{176}_{71}\text{Lu}$ 具备较好的对称性，Z 轴的转动几率为 2/3；而 $^{175}_{71}\text{Lu}$ 具备一定的对称性，Z 轴的转动几率为 1/2，为此计算出理论模型值 $^{176}_{71}\text{Lu}$ 的 $c/a=0.8544$ ， $^{175}_{71}\text{Lu}$ 的 $c/a = 0.9368$ 。

4.12. 同粒素

本文预言对某些稳定的同位素，其内部某一个中子可以以单键形式稳定存在，又可以以双键形式稳定存在，这时同位素就有两种同粒素构成，并具备固定的占有比(图 24)。

$^{55}_{25}\text{Mn}$ 空间结构本身左右不对称，它的左边核键数较多而右边核键数又较少，所以这个单双中子处在右边时以双键形式存在成为 $^{55}_{25}\text{Mn}(1)$ ，在左边时以单

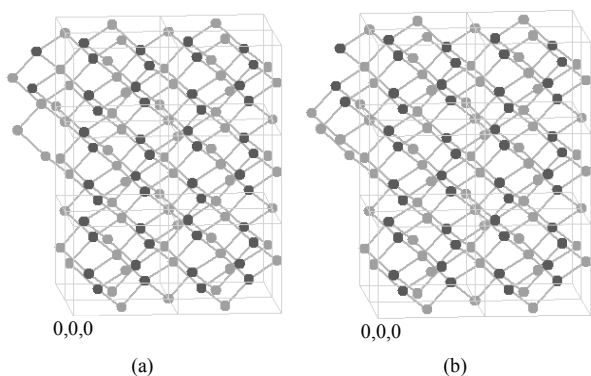


Figure 22. The atomic nucleus with a unreal number 50:

(a) $^{120}_{50}\text{Sn}$; (b) $^{121}_{51}\text{Sb}$

图 22. 幻数 50 的原子核: (a) $^{120}_{50}\text{Sn}$; (b) $^{121}_{51}\text{Sb}$

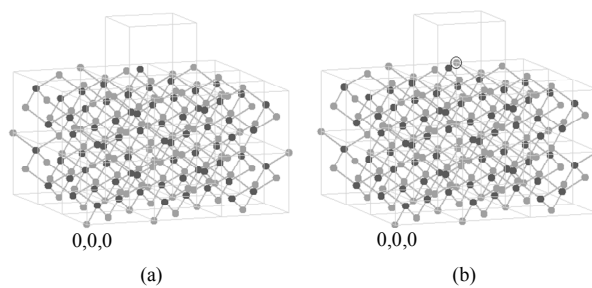


Figure 23. The nucleus electric quadrupole moment: (a) $^{175}_{71}\text{Lu}$; (b)

$^{176}_{71}\text{Lu}$

图 23. 核电四极矩: (a) $^{175}_{71}\text{Lu}$; (b) $^{176}_{71}\text{Lu}$

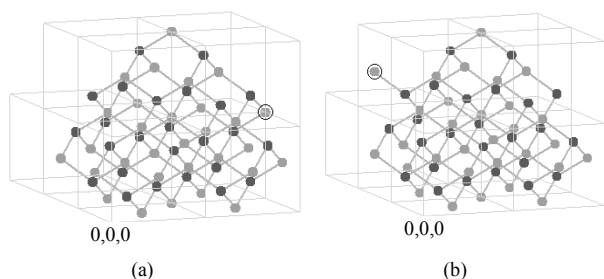


Figure 24. Particletope: (a) $^{55}_{25}\text{Mn}$ (1); (b) $^{55}_{25}\text{Mn}$ (2)

图 24. 同粒素: (a) $^{55}_{25}\text{Mn}$ (1); (b) $^{55}_{25}\text{Mn}$ (2)

键形式存在成为 $^{55}_{25}\text{Mn}$ (2)。 $^{55}_{25}\text{Mn}$ (1) 共具有 82 个键，其原子量为 54.9338，占有比为 33.3%； $^{55}_{25}\text{Mn}$ (2) 共具有 81 个键，其原子量为 54.9401，占有比为 66.6%，混和后形成 $^{55}_{25}\text{Mn}$ 的原子量为 54.9380。

如上所述，本文金刚石模型研究的重点是原子核的形成过程、具体形状、具体大小及每个核子的相对位置，和以前尚无法计算的原子核中的质子共势能，而目前的液滴模型^[6]、球形模型^[7]、壳层模型^[8,9]及其它核子模型^[10-12]的研究重点是原子核的内部能级、激发态能级及自旋状态，以及有关原子核的一些其他性质^[13,14]，两者之间会相互补充。

5. 致谢

致谢参加这项工作的复旦大学物理系 2001 届毕业生叶龙飞、丁黎江、陈小江、李晶；复旦大学物理

系 2003 届毕业生梁致衡、陈剑；复旦大学物理系 2005 届毕业生刘川东、冯浩以及北京大学物理系 2005 届毕业生陈茜；(出国前在复旦实习)复旦大学物理系 2006 届毕业生张覃等；以及感谢上海老年科学技术协会创新委和交通大学物理系雷啸霖中科院院士所给予的讨论。

参考文献 (References)

- [1] 曾谨言, 程植生, 杨福家. 高能物理与核物理[M]. 1980, 4: 632.
- [2] M. G. Mayer, J. H. D. Jenesen. Elementary theory of nuclear shell structure. Wiley, New York, 1955.
- [3] P. T. Twin. Phys Rev Lett, 1986, 57: 811.
- [4] A. Bohr, B. Mottelson. Phys Rev, 1953, 90: 717.
- [5] C. S. Wu, J. Y. Zeng, Commun in Theory Phys, 1987, 5: 751.
- [6] C. Y. Tseny, T. S. Cheng and F. C. Yang. Nucl Phys, 1980, A334: 470.
- [7] R. Fossion, C. D. Coster, J. E. Garcia-Ramos, T. Werner and K. Heyde. Nucl Phys, 2002, A697: 703-747.
- [8] S. Cwiok, J. Dobacaewski, P. H. Heenen, P. Magierski and W. Nazarewicz. Nucl Phys, 1996, A611: 211-246.
- [9] H. Hernal, B. A. Brown. Nucl Phys, 1997, A627: 35-52.
- [10] T. Egidy, C. Doll, J. Jolie, N. V. Warr, J. Kern, M. Crittin and L. Genilloud. Nucl Phys, 2003, A714: 335-390.
- [11] V. Bondarenko, T. Egidy, J. Honzatko, I. Tomandl, D. Becurescu, Nucl Phys, 2000, A673: 85-121.
- [12] N. Vinh, J. C. Pacheco. Nucl Phys, 1996, A607: 163-177.
- [13] 杨福家, 王炎森, 陆福全. 原子核物理(第二版)[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2002: 417-419.
- [14] 杨福家. 原子物理学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 412-540.

附表

利用已知元素的原子量可以推知该元素原子核的空间结构以及其他性质,反过来对未知元素原子核的空间结构进行分析又可以推知它的原子量。下表是对 194 种元素的初步分析结果。

Chart 1. The binding energy of the atomic nucleus and the total potential energy of the protons
附表 1. 原子核结合能和质子共势能

Nuclide	Experimental value of BE (MeV)	Model value of BE (MeV)	Value of proton BE (MeV)
^1_1H	-2.2244	-2.2221[0]	0
^2_1H	-8.4811	-8.5126[0]	0
^3_2He	-7.7184	-7.9597[0]	0.55290
^4_2He	-28.296	-29.401[0]	0.77224
^6_3Li	-31.944	-35.748[0]	1.2000
^7_3Li	-39.245	-42.317[0]	1.0822
^8_4Be	-56.500	-59.930[0]	2.2233
^9_4Be	-58.164	-59.498[0]	2.3999
$^{10}_5\text{B}$	-65.216	-63.896[0]	4.3885
$^{11}_5\text{B}$	-76.201	-76.542[0]	4.3885
$^{11}_6\text{C}$	-73.444	-73.673[1]	5.4274
$^{12}_6\text{C}$	-92.162	-92.682[1]	5.4274
$^{13}_6\text{C}$	-97.113	-98.872[1]	5.4274
$^{14}_6\text{C}$	-105.29	-105.30[1]	5.4274
$^{15}_6\text{C}$	-106.50	-105.90[1]	5.2063
$^{13}_7\text{N}$	-94.104	-96.928[1]	7.3721
$^{14}_7\text{N}$	-104.66	-103.39[1]	7.3721
$^{15}_7\text{N}$	-115.49	-115.63[1]	7.3721
$^{16}_7\text{N}$	-117.98	-116.53[1]	7.3721
$^{16}_8\text{O}$	-127.61	-126.26[1]	9.6339
$^{17}_8\text{O}$	-131.76	-133.42[1]	8.9900
$^{17}_9\text{F}$	-128.22	-129.40[1]	12.092
$^{18}_9\text{F}$	-137.37	-135.87[1]	12.092
$^{19}_9\text{F}$	-147.80	-148.57[1]	11.927
$^{20}_{10}\text{Ne}$	-160.65	-158.04[1]	14.595
$^{21}_{11}\text{Na}$	-163.08	-161.50[1]	17.365
$^{23}_{11}\text{Na}$	-186.56	-186.02[2]	16.037
$^{24}_{12}\text{Mg}$	-198.26	-195.85[2]	20.034

续表

$^{27}_{12}\text{Mg}$	-223.12	-225.36[2]	20.262
$^{27}_{13}\text{Al}$	-224.95	-222.15[2]	23.432
$^{28}_{13}\text{Al}$	-232.53	-234.27[2]	23.625
$^{28}_{14}\text{Si}$	-236.53	-237.45[2]	27.463
$^{29}_{15}\text{P}$	-239.29	-240.14[2]	31.259
$^{30}_{15}\text{P}$	-250.61	-252.10[2]	31.259
$^{31}_{15}\text{P}$	-262.92	-264.63[2]	31.259
$^{32}_{15}\text{P}$	-270.86	-270.87[2]	31.259
$^{32}_{16}\text{S}$	-271.78	-273.21[2]	35.454
$^{34}_{17}\text{Cl}$	-285.57	-288.51[2]	39.397
$^{35}_{17}\text{Cl}$	-298.21	-301.74[2]	39.397
$^{38}_{17}\text{Cl}$	-323.21	-323.13[4]	37.354
$^{39}_{18}\text{Ar}$	-333.94	-336.30[4]	42.318
$^{39}_{19}\text{K}$	-333.72	-329.26[4]	47.395
$^{41}_{19}\text{K}$	-353.93	-355.56[4]	47.239
$^{38}_{20}\text{Ca}$	-313.14	-311.58[4]	55.224
$^{39}_{20}\text{Ca}$	-326.43	-324.03[4]	55.224
$^{40}_{20}\text{Ca}$	-342.05	-340.34 [^] 4	55.224
$^{41}_{20}\text{Ca}$	-350.41	-350.17[4]	54.029
$^{43}_{20}\text{Ca}$	-369.83	-370.78[4]	52.211
$^{43}_{21}\text{Sc}$	-366.83	-366.54[4]	56.535
$^{45}_{21}\text{Sc}$	-387.85	-385.56[4]	56.701
$^{48}_{22}\text{Ti}$	-418.70	-416.37[5]	61.161
$^{51}_{23}\text{V}$	-445.81	-448.29[5]	66.908
$^{51}_{24}\text{Cr}$	-444.28	-442.24[5]	72.957
$^{52}_{24}\text{Cr}$	-456.36	-454.34[5]	72.833
$^{54}_{25}\text{Mn}$	-471.81	-473.71[5]	78.108
$^{55}_{25}\text{Mn}$	-482.12	-486.06[5]	78.108
$^{56}_{26}\text{Fe}$	-492.29	-491.74 [^] 5	83.125
$^{57}_{26}\text{Fe}$	-499.90	-497.84 [^] 5	82.756
$^{59}_{27}\text{Co}$	-517.31	-516.37 [^] 6	88.103
$^{60}_{27}\text{Co}$	-524.82	-524.24[6]	88.103
$^{60}_{28}\text{Ni}$	-526.83	-526.19 [^] 6	94.619
$^{63}_{28}\text{Ni}$	-552.07	-556.65[6]	94.043
$^{63}_{28}\text{Ni}$		-550.29[6]	94.043
$^{63}_{29}\text{Cu}$	-551.38	-550.01[6]	100.68

续表

⁶⁴ ₂₉ Cu	-559.27	-561.66[6]	100.68
⁶⁴ ₃₀ Zn	-559.14	-558.89 [^] 6	107.50
⁶⁴ ₃₁ Ga	-551.18	-551.94 [^] 6	114.45
⁶⁹ ₃₁ Ga	-601.97	-602.64[7]	113.33
⁷¹ ₃₂ Ge	-617.89	-619.96[7]	120.82
⁷⁴ ₃₂ Ge	-645.64	-644.62[7]	120.26
⁷⁵ ₃₃ As	-652.56	-652.37[8]	128.81
⁷⁸ ₃₄ Se	-680.00	-678.54[8]	133.87
⁷⁹ ₃₅ Br	-686.36	-683.92[8]	141.21
⁸¹ ₃₆ Kr	-703.30	-703.78 [^] 8	147.03
⁸⁴ ₃₆ Kr	-732.26	-732.39[9]	146.43
⁸⁵ ₃₆ Kr	-739.40	-740.98[9]	144.72
⁸⁵ ₃₇ Rb	-739.27	-738.97[9]	153.61
⁸⁷ ₃₇ Rb	-757.84	-757.80[9]	152.95
⁸⁸ ₃₈ Sr	-768.48	-767.74[9]	161.39
⁹⁰ ₃₈ Sr	-782.67	-780.71[9]	161.39
⁸⁹ ₃₉ Y	-775.49	-776.35 [^] 9	169.38
⁸⁸ ₄₀ Zr	-762.63	-760.71 [^] 9	177.84
⁸⁹ ₄₀ Zr	-771.91	-773.60 [^] 9	177.57
⁹⁰ ₄₀ Zr	-783.90	-781.08 [^] 9	177.57
⁹¹ ₄₀ Zr	-791.13	-789.26[9]	177.57
⁹³ ₄₀ Zr	-806.43	-808.01[9]	177.55
⁹¹ ₄₁ Nb	-805.74	-806.87[9]	185.30
⁹⁸ ₄₂ Mo	-846.25	-844.43[10]	189.39
⁹⁹ ₄₂ Mo	-852.18	-856.36[10]	189.39
		-849.93[10]	189.39
⁹⁹ ₄₃ Tc	-852.70	-854.38[10]	197.38
¹⁰⁰ ₄₃ Tc	-859.47	-861.17[10]	197.38
¹⁰² ₄₄ Ru	-878.00	-877.91[10]	205.55
¹⁰³ ₄₅ Rh	-884.17	-882.03[10]	214.14
¹⁰⁵ ₄₅ Rh	-900.12	-902.44[10]	214.98
¹⁰⁶ ₄₆ Pd	-909.46	-906.85[11]	223.49
¹⁰⁹ ₄₆ Pd	-931.44	-932.04[11]	223.01
¹⁰⁷ ₄₇ Ag	-915.26	-914.92[11]	231.88
¹⁰⁹ ₄₇ Ag	-931.68	-929.56[11]	231.92
¹¹³ ₄₈ Cd	-963.56	-962.08[12]	240.57
¹¹⁴ ₄₈ Cd	-972.56	-974.71[12]	240.57

续表

		-968.22[12]	240.57
¹¹⁵ ₄₉ In	-979.38	-978.59[12]	250.39
¹²⁰ ₅₀ Sn	-1020.54	-1022.1[12]	256.78
¹²¹ ₅₀ Sn	-1026.75	-1028.2[12]	256.78
¹²¹ ₅₁ Sb	-1026.34	-1024.1[12]	266.16
¹²³ ₅₁ Sb	-1042.11	-1042.9[13]	263.74
¹²⁰ ₅₂ Te	-1013.20	-1014.7 [^] 13	272.14
¹²⁶ ₅₂ Te	-1066.38	-1064.7[13]	274.26
¹²³ ₅₃ I	-1039.24	-1041.2 [^] 13	283.16
¹²⁷ ₅₃ I	-1072.6	-1073.8[12]	285.84
¹³¹ ₅₃ I	-1103.35	-1104.5[13]	284.83
¹³² ₅₄ Xe	-1112.50	-1110.6[12]	297.61
¹³³ ₅₅ Cs	-1118.58	-1117.9 [^] 12	306.35
¹³⁷ ₅₅ Cs	-1149.28	-1151.1[14]	298.40
¹³⁸ ₅₆ Ba	-1158.24	-1157.0[14]	312.31
¹³⁹ ₅₇ La	-1164.51	-1164.7[14]	322.36
¹⁴⁰ ₅₈ Ce	-1172.73	-1172.7[15]	324.05
¹⁴¹ ₅₈ Ce	-1178.10	-1178.1[15]	326.04
¹⁴¹ ₅₉ Pr	-1177.87	-1176.9[15]	339.09
¹⁴⁴ ₆₀ Nd	-1199.07	-1199.1[15]	348.32
		-1226.2[15]	358.72
¹⁴⁸ ₆₁ Pm	-1223.68	-1221.3[15]	357.58
		-1253.13	365.58
¹⁵² ₆₂ Sm	-1253.13	-1253.4[16]	365.58
¹⁵³ ₆₃ Eu	-1259.03	-1259.5[16]	379.72
¹⁴⁹ ₆₄ Gd	-1229.03	-1228.7[16]	383.34
¹⁵⁸ ₆₄ Gd	-1295.9	-1295.2[16]	388.92
¹⁵¹ ₆₅ Tb	-1244.11	-1244.1[16]	394.18
¹⁵⁹ ₆₅ Tb	-1302.07	-1302.3[16]	397.74
¹⁶¹ ₆₅ Tb	-1316.07	-1316.1[16]	395.51
¹⁵¹ ₆₆ Dy	-1242.40	-1240.3△△16	405.45
¹⁶⁴ ₆₆ Dy	-1338.01	-1338.5[17]	410.12
¹⁶⁵ ₆₇ Ho	-1344.28	-1344.9[17]	422.28
¹⁶⁶ ₆₇ Ho	-1350.48	-1350.7[17]	421.50
¹⁶⁸ ₆₈ Er	-1365.75	-1365.8[17]	433.00
¹⁶⁹ ₆₉ Tm	-1371.36	-1371.4[17]	445.15
¹⁷⁴ ₇₀ Yb	-1406.56	-1406.3[18]	457.41
¹⁷⁵ ₇₁ Lu	-1412.08	-1412.1[18]	464.99

续表

¹⁷⁶ ₇₁ Lu	-1418.38	-1418.3[18]	464.99
¹⁷⁷ ₇₁ Lu	-1425.43	-1425.2[18]	470.48
¹⁸⁰ ₇₂ Hf	-1446.25	-1446.8[18]	479.44
¹⁸¹ ₇₃ Ta	-1452.24	-1452.2[18]	492.25
¹⁸⁴ ₇₄ W	-1473.91	-1473.9[19]	506.44
¹⁸⁵ ₇₅ Re	-1478.30	-1478.9[19]	519.50
¹⁹² ₇₆ Os	-1526.10	-1526.2[19]	529.64
¹⁹³ ₇₇ Ir	-1532.08	-1532.5[19]	541.88
¹⁹⁵ ₇₈ Pt	-1544.14	-1544.1[20]	546.32
¹⁹⁷ ₇₉ Au	-1559.36	-1560.0[20]	566.38
¹⁹⁸ ₇₉ Au	-1565.94	-1565.9[20]	561.39
¹⁸⁹ ₈₀ Hg	-1493.17	-1492.3[20]	581.25
²⁰² ₈₀ Hg	-1595.20	-1596.8[20]	581.02
		-1590.7[20]	580.05
¹⁹³ ₈₁ Tl	-1522.25	-1523.2[20]	587.75
		-1620.5[20]	594.80
²⁰⁵ ₈₁ Tl	-1615.10	-1613.7[20]	594.50
¹⁹² ₈₂ Pb	-1504.08	-1504.1[20]	600.59
²⁰⁸ ₈₂ Pb	-1636.48	-1636.6[21]	607.02
²⁰⁹ ₈₃ Bi	-1640.23	-1642.9[21]	619.86
²¹⁰ ₈₄ Po	-1645.19	-1643.5[21]	631.66
²¹² ₈₄ Po	-1655.74	-1655.9[21]	631.66
²¹⁶ ₈₅ At	-1674.67	-1673.3[21]	645.07
²²² ₈₆ Rn	-1708.16	-1708.8[21]	658.87
²²² ₈₇ Er	-1707.47	-1710.1[22]	672.70
²²⁶ ₈₈ Ra	-1731.61	-1734.8[22]	684.37
²²⁷ ₈₉ Ac	-1736.67	-1738.8[22]	699.50
²³² ₉₀ Th	-1766.66	-1764.1[23]	710.54
²³³ ₉₁ Pa	-1771.98	-1774.9[23]	724.82
²³³ ₉₂ U	-1771.85	-1769.4[23]	737.00
²³⁵ ₉₂ U	-1783.89	-1781.9[23]	737.00
²³⁶ ₉₂ U	-1790.38	-1788.1[23]	737.00
²³⁸ ₉₂ U	-1801.68	-1801.2[23]	739.98
²³⁹ ₉₂ U	-1806.49	-1807.4 [23]	739.98
²³⁹ ₉₃ Np	-1807.0	-1805.3[24]	755.60
²³⁹ ₉₄ Pu	-1806.88	-1805.7[24]	767.74
²⁴¹ ₉₄ Pu	-1818.74	-1818.0[24]	767.74

续表

²⁴³ ₉₅ Am	-1829.81	-1830.1[24]	785.45
²⁴⁵ ₉₆ Cm	-1841.36	-1841.4[24]	800.70
²⁴⁷ ₉₇ Bk	-1852.24	-1852.0[25]	817.43
²⁴⁹ ₉₈ Cf	-1863.32	-1863.1[25]	831.44
²⁵² ₉₈ Cf	-1881.29	-1881.8[25]	831.44
²⁵³ ₉₉ Es	-1885.60	-1886.7[25]	844.55
²⁵⁵ ₁₀₀ Fm	-1896.12	-1898.5[25]	857.74
²⁵⁵ ₁₀₁ Md	-1894.31	-1895.1[25]	873.27
²⁵⁷ ₁₀₂ No	-1904.27	-1904.7[25]	888.85
²⁶⁰ ₁₀₃ Lr	-1919.88	-1917.5[26]	905.47
²⁶¹ ₁₀₄ Rf	-1924.18	-1922.1[26]	919.01
²⁶² ₁₀₅ Ha	-1926.64	-1925.0[26]	934.94
²⁶³ ₁₀₆ W	-1929.81	-1928.1[27]	954.17
²⁶² ₁₀₇ Ns	-1916.40	-1914.1[27]	967.99
²⁶⁵ ₁₀₈ Hs	-1933.41	-1932.4[27]	981.89
²⁶⁶ ₁₀₉ Mt	-1933.43	-1934.9[27]	997.29
²⁶⁹ ₁₁₀ Ds	1962.19*	-1962.2[28]	1011.67
²⁷² ₁₁₁ Rg	1975.16*	-1975.2 [28]	1024.86
²⁷⁷ ₁₁₂ Cn	-1999.18*	-1999.2 [28]	1044.43
²⁸⁴ ₁₁₃ Uut	-2050.77*	-2050.8 [28]	1061.22
²⁸⁹ ₁₁₄ Uuq	-2086.86*	-2086.9 [29]	1073.05
²⁸⁸ ₁₁₅ Uup	2063.69*	-2063.7[29]	1089.75
²⁹² ₁₁₆ Uuh	2073.70*	-2073.7[29]	1104.55
²⁹³ ₁₁₇ Uus	2063.31*	-2063.3[29]	1121.12

注：1) BE = binding energy, 2) 一个△表示已加一个第五过程结合能 3.9020; *表示对未知详细数据元素的推测值; [n]表示有 n 个第四过程, 并已加上 n 个第四过程结合能 10.610, 3) 在附表 1 中 ⁴Li 与 ³Li 相对误差较大的原因是它们核子数少, 正处于次键向主键转化的过程, 而模型值是完全从主键来考虑的。

Chart 2. The six hyperchange atomic nucleus
附表 2. 六种超变原子核

Nuclide	Model Binding Energy of Nucleus (MeV)	Binding Energy of Proton (MeV)	Num. of 4 th Process
¹⁴⁹ ₆₄ Gd	-1228.68	383.34	16(2 × 2 × 4)
¹⁵¹ ₆₅ Tb	-1244.06	394.18	16(2 × 2 × 4)
¹⁵¹ ₆₆ Dy	-1242.40	405.45	16(2 × 2 × 4)
¹⁸⁹ ₈₀ Hg	-1492.25	581.25	20(3 × 3 × 2 + 2)
¹⁹³ ₈₁ Tl	-1523.17	587.75	20(3 × 3 × 2 + 2)
¹⁹² ₈₂ Pb	-1504.05	600.59	20(3 × 3 × 2 + 2)

Chart 3. The nuclear radius, the nuclear electric radius and the number of the nuclear bond
附表 3. 原子核大小, 核电荷分布大小及核键数

Nuclide	Nuclear Radius (fm)	Electric Radius (fm)	Structure and Number of Bond
^2_1H	2.4000	2.4000	[0] 1
^3_1H	2.6187	2.6187	[0] 3
^3_2He	2.6187	2.6187	[0] 3
^4_2He	2.7012	2.7012	[0] 6
^6_3Li	3.2066	3.2061	[0] 6
^7_3Li	3.9273	3.9273	[0] 7
^8_4Be	3.8500	3.8500	[0] 10
^9_4Be	3.6599	3.4723	[0] 10
$^{10}_5\text{B}$	4.9777	3.5466	[0] 11
$^{11}_5\text{B}$	4.9306	3.5401	[0] 13
$^{11}_6\text{C}$	4.7448	4.5142	[1] 11
$^{12}_6\text{C}$	4.4008	4.4005	[1] 14
$^{13}_6\text{C}$	4.9460	4.5873	[1] 15
$^{14}_6\text{C}$	6.2435	4.8691	[1] 16
$^{15}_6\text{C}$	5.7040	5.2232	[1] 16
$^{13}_7\text{N}$	4.9423	4.9423	[1] 15
$^{14}_7\text{N}$	4.8303	4.8296	[1] 16
$^{15}_7\text{N}$	4.7862	4.7862	[1] 18
$^{16}_7\text{N}$	5.1254	4.6736	[1] 18
$^{16}_8\text{O}$	5.1973	5.1973	[1] 20
$^{17}_8\text{O}$	5.7894	5.7894	[1] 21
$^{17}_9\text{F}$	5.1237	4.9913	[1] 21
$^{18}_9\text{F}$	5.4784	5.1380	[1] 22
$^{19}_9\text{F}$	5.5754	5.5277	[1] 24
$^{20}_{10}\text{Ne}$	5.7237	5.7233	[1] 26
$^{21}_{11}\text{Na}$	5.8491	5.8225	[1] 27
$^{23}_{11}\text{Na}$	7.8449	7.8449	[2] 29
$^{24}_{12}\text{Mg}$	6.5971	6.5466	[2] 31
$^{27}_{12}\text{Mg}$	6.9044	5.6653	[2] 36
$^{27}_{13}\text{Al}$	6.2405	6.5626	[2] 36
$^{28}_{13}\text{Al}$	6.2283	5.3835	[2] 38
$^{28}_{14}\text{Si}$	6.2862	5.5703	[2] 39
$^{29}_{15}\text{P}$	6.2310	5.5138	[2] 40
$^{30}_{15}\text{P}$	6.2250	5.4038	[2] 42

续表

$^{31}_{15}\text{P}$	6.2248	5.4503	[2] 44
$^{32}_{15}\text{P}$	7.1633	5.5402	[2] 45
$^{32}_{16}\text{S}$	6.1831	5.4561	[2] 46
$^{34}_{17}\text{Cl}$	6.4770	6.4770	[2] 51
$^{35}_{17}\text{Cl}$	6.5780	6.5780	[2] 51
$^{38}_{17}\text{Cl}$	6.8857	6.7217	[4] 51
$^{39}_{18}\text{Ar}$	6.8678	6.7116	[4] 54
$^{39}_{19}\text{K}$	6.8252	6.6601	[4] 54
$^{41}_{19}\text{K}$	6.8229	6.6589	[4] 58
$^{38}_{20}\text{Ca}$	6.7902	6.7227	[4] 52
$^{39}_{20}\text{Ca}$	6.8733	6.7904	[4] 54
$^{40}_{20}\text{Ca}$	6.7836	6.6836	Δ_4 56
$^{41}_{20}\text{Ca}$	6.8229	6.6591	[4] 58
$^{43}_{20}\text{Ca}$	6.8861	6.7317	[4] 61
$^{43}_{21}\text{Sc}$	7.5457	7.5457	[4] 61
$^{45}_{21}\text{Sc}$	6.8386	6.7662	[4] 64
$^{48}_{22}\text{Ti}$	6.9502	6.9502	[5] 68
$^{51}_{23}\text{V}$	7.4036	7.2384	[5] 74
$^{51}_{24}\text{Cr}$	7.4034	7.2391	[5] 74
$^{52}_{24}\text{Cr}$	7.4506	7.1207	[5] 76
$^{54}_{25}\text{Mn}$	7.5023	7.5023	[5] 80
$^{55}_{25}\text{Mn}$	(1) 7.4770 (2) 7.7433	7.4770 7.3963	[5] 82 [5] 81
$^{56}_{26}\text{Fe}$	7.9337	7.9337	Δ_5 83
$^{57}_{26}\text{Fe}$	7.9866	7.9866	Δ_5 84
$^{59}_{27}\text{Co}$	9.0660	8.0404	Δ_6 86
$^{60}_{27}\text{Co}$	8.9759	7.9457	[6] 88
$^{60}_{28}\text{Ni}$	8.9765	7.9462	$\Delta\Delta_6$ 88
$^{63}_{28}\text{Ni}$	(1) 8.7815 (2) 8.8214	7.7735 7.7967	[6] 94 [6] 93
$^{63}_{29}\text{Cu}$	8.7821	7.7742	[6] 94
$^{64}_{29}\text{Cu}$	8.8200	7.8255	[6] 96
$^{64}_{30}\text{Zn}$	8.8210	7.8267	Δ_6 96
$^{64}_{31}\text{Ga}$	8.8210	7.8267	Δ_6 96
$^{69}_{31}\text{Ga}$	7.9382	7.9382	[7] 103
$^{71}_{32}\text{Ge}$	7.8904	7.8904	[7] 107
$^{74}_{32}\text{Ge}$	7.8131	7.8131	[7] 111

续表

⁷⁵ ₃₃ As	7.7004	7.7004	[8]	112
⁷⁸ ₃₄ Se	8.8546	8.3444	[8]	117
⁷⁹ ₃₅ Br	8.7866	8.2855	[8]	119
⁸¹ ₃₆ Kr	9.1333	9.1333	^Δ 8	123
⁸⁴ ₃₆ Kr	10.4146	9.3425	[9]	126
⁸⁵ ₃₆ Kr	10.8989	9.8954	[9]	127
⁸⁵ ₃₇ Rb	10.4400	9.3812	[9]	128
⁸⁷ ₃₇ Rb	10.4738	9.4094	[9]	131
⁸⁸ ₃₈ Sr	10.1929	9.1263	[9]	134
⁹⁰ ₃₈ Sr	10.0199	8.9578	[9]	136
⁸⁹ ₃₉ Y	10.1333	9.0774	^Δ 9	136
⁸⁸ ₄₀ Zr	10.4534	9.3848	^Δ 9	136
⁸⁹ ₄₀ Zr	10.5477	9.4769	^Δ 9	138
⁹⁰ ₄₀ Zr	10.0750	9.0112	^Δ 9	138
⁹¹ ₄₀ Zr	9.0239	9.0239	[9]	140
⁹³ ₄₀ Zr	10.5864	8.8457	[9]	143
⁹³ ₄₁ Nb	9.9631	8.9162	[9]	144
⁹⁸ ₄₂ Mo	11.5725	10.4796	[10]	149
⁹⁹ ₄₂ Mo	(1) 11.3799	10.2851	[10]	151
⁹⁹ ₄₂ Mo	(2) 11.0940	10.3422	[10]	150
⁹⁹ ₄₃ Tc	11.3774	10.2989	[10]	152
¹⁰⁰ ₄₃ Tc	11.4139	10.3273	[10]	153
¹⁰² ₄₄ Ru	11.3110	10.2264	[10]	157
¹⁰³ ₄₅ Rh	11.2745	10.1941	[10]	159
¹⁰⁵ ₄₅ Rh	9.8917	9.7410	[11]	161
¹⁰⁶ ₄₆ Pd	9.8973	9.7597	[11]	163
¹⁰⁹ ₄₆ Pd	9.7716	9.6607	[11]	167
¹⁰⁷ ₄₇ Ag	9.8486	9.7088	^Δ 11	165
¹⁰⁹ ₄₇ Ag	9.8850	9.7673	[11]	168
¹¹³ ₄₈ Cd	10.1787	9.5008	[12]	173
¹¹⁴ ₄₈ Cd	(1) 10.1088	9.5696	[12]	175
¹¹⁴ ₄₈ Cd	(2) 10.2593	10.3422	[12]	174
¹¹⁵ ₄₉ In	11.2989	9.8789	[12]	177
¹²⁰ ₅₀ Sn	9.9140	9.8291	[12]	185
¹²¹ ₅₀ Sn	10.6453	9.7576	[12]	186
¹²¹ ₅₁ Sb	9.9287	9.8291	[12]	187
¹²³ ₅₁ Sb	11.6835	10.2370	[13]	188

续表

¹²⁰ ₅₂ Te	12.9553	11.8364	^Δ 13	184
¹²⁶ ₅₂ Te	11.3719	10.0483	[13]	193
¹²³ ₅₃ I	12.8932	10.6952	^Δ 13	190
¹²⁷ ₅₃ I	10.0391	9.9670	[12]	198
¹³¹ ₅₃ I	11.7503	10.0400	[13]	201
¹³² ₅₄ Xe	10.8574	9.7996	[12]	206
¹³³ ₅₅ Cs	9.9908	9.9908	^Δ 12	208
¹³⁷ ₅₅ Cs	10.6694	10.1396	[14]	209
¹³⁸ ₅₆ Ba	10.6647	10.1419	[14]	212
¹³⁹ ₅₇ La	10.6683	10.1328	[14]	215
¹⁴⁰ ₅₈ Ce	11.0316	11.0316	[15]	215
¹⁴¹ ₅₈ Ce	10.9978	10.9978	[15]	216
¹⁴¹ ₅₉ Pr	10.9742	10.9742	[15]	218
¹⁴⁴ ₆₀ Nd	10.9935	10.9689	[15]	223
¹⁴⁸ ₆₁ Pm	(1) 10.9768	10.9768	[15]	229
¹⁴⁸ ₆₁ Pm	(2) 11.0277	11.0277	[15]	228
¹⁵² ₆₂ Sm	10.8050	10.7872	[16]	233
¹⁵³ ₆₃ Eu	10.7774	10.7382	[16]	236
¹⁴⁹ ₆₄ Gd	11.8778	11.4968	[16]	232
¹⁵⁸ ₆₄ Gd	11.8109	10.8008	[16]	243
¹⁵¹ ₆₅ Tb	11.9256	11.5402	[16]	236
¹⁵⁰ ₆₅ Tb	11.8797	11.5557	[16]	246
¹⁶¹ ₆₅ Tb	11.8788	11.5312	[16]	248
¹⁵¹ ₆₆ Dy	11.8937	11.5113	^{ΔΔ} 16	236
¹⁶⁴ ₆₆ Dy	12.6483	10.8619	[17]	252
¹⁶⁵ ₆₇ Ho	12.8774	10.8636	[17]	255
¹⁶⁶ ₆₇ Ho	12.8924	10.8581	[17]	256
¹⁶⁸ ₆₈ Er	12.9146	10.8771	[17]	260
¹⁶⁹ ₆₉ Tm	12.8736	10.9123	[17]	263
¹⁷⁴ ₇₀ Yb	13.0775	10.9210	[18]	269
¹⁷⁵ ₇₁ Lu	13.0650	10.9066	[18]	271
¹⁷⁶ ₇₁ Lu	13.0402	10.8802	[18]	272
¹⁷⁷ ₇₁ Lu	13.0463	10.8849	[18]	274
¹⁸⁰ ₇₂ Hf	13.0759	10.9139	[18]	279
¹⁸¹ ₇₃ Ta	13.0971	10.9334	[18]	282
¹⁸⁴ ₇₄ W	11.8869	11.0373	[19]	286
¹⁸⁵ ₇₅ Re	11.9079	11.0597	[19]	289

续表

¹⁹² ₇₆ Os	11.8914	11.0807	[19]	298
¹⁹³ ₇₇ Ir	11.9116	11.1029	[19]	301
¹⁹⁵ ₇₈ Pt	11.3132	10.8768	[20]	302
¹⁹⁷ ₇₉ Au	11.3189	10.9123	[20]	308
¹⁹⁸ ₇₉ Au	12.8423	11.3291	[20]	308
¹⁸⁹ ₈₀ Hg	12.8110	11.3561	[20]	299
²⁰² ₈₀ Hg	(1) 12.8620	11.0310	[20]	316
	(2) 12.7909	11.3789	[20]	315
¹⁹³ ₈₁ Tl	12.7926	12.7926	[20]	305
²⁰⁵ ₈₁ Tl	(1) 12.9590	11.0295	[20]	322
	(2) 13.1119	11.3800	[20]	322
¹⁹² ₈₂ Pb	12.7488	12.7488	[20]	304
²⁰⁸ ₈₂ Pb	12.8873	11.4504	[21]	325
²⁰⁹ ₈₃ Bi	12.8617	11.4400	[21]	328
²¹⁰ ₈₄ Po	12.8663	11.4584	[21]	330
²¹² ₈₄ Po	12.7860	11.5004	[21]	332
²¹⁶ ₈₅ At	12.7117	11.5080	[21]	337
²²² ₈₆ Rn	12.9689	11.5594	[21]	345
²²² ₈₇ Er	12.9608	11.6098	[22]	346
²²⁶ ₈₈ Ra	12.9202	12.2506	[22]	352
²²⁷ ₈₉ Ac	12.9118	12.2387	[22]	356
²³² ₉₀ Th	12.8928	11.9204	[23]	359
²³³ ₉₁ Pa	12.8703	11.9335	[23]	363
²³³ ₉₂ U	12.8284	12.1067	[23]	364
²³⁵ ₉₂ U	12.8645	12.1112	[23]	366
²³⁶ ₉₂ U	12.8390	12.1030	[23]	367
²³⁸ ₉₂ U	12.2462	10.9338	[23]	369
²³⁹ ₉₂ U	12.2046	10.8798	[23]	370
²³⁹ ₉₃ Np	14.4010	12.2073	[24]	371
²³⁹ ₉₄ Pu	14.3585	12.1653	[24]	373
²⁴¹ ₉₄ Pu	14.4920	12.1653	[24]	375
²⁴³ ₉₅ Am	14.4010	12.2073	[24]	380
²⁴⁵ ₉₆ Cm	-14.3118	12.1171	[24]	384
²⁴⁷ ₉₇ Bk	12.4322	11.0935	[25]	387
²⁴⁹ ₉₈ Cf	12.4026	11.0766	[25]	391
²⁵² ₉₈ Cf	13.3562	11.0309	[25]	394
²⁵³ ₉₉ Es	12.3586	11.9618	[25]	397

续表

²⁵⁵ ₁₀₀ Fm	12.3696	11.9946	[25]	401
²⁵⁵ ₁₀₁ Md	12.4002	12.0039	[25]	403
²⁵⁷ ₁₀₂ No	12.3880	12.0249	[25]	407
²⁶⁰ ₁₀₃ Lr	12.3607	12.0530	[26]	410
²⁶¹ ₁₀₄ Rf	12.2551	12.0773	[26]	413
²⁶² ₁₀₅ Ha	12.2288	12.0911	[26]	416
²⁶³ ₁₀₆ W	12.2452	12.1385	[27]	418
²⁶² ₁₀₇ Ns	12.2124	12.1332	[27]	418
²⁶⁵ ₁₀₈ Hs	12.2474	12.1511	[27]	423
²⁶⁶ ₁₀₉ Mt	12.3121	12.2134	[27]	426
²⁶⁹ ₁₁₀ Ds	13.5002*	12.3782*	[28]	431
²⁷² ₁₁₁ Rg	14.1007*	12.3914*	[28]	435
²⁷⁷ ₁₁₂ Cn	13.4803*	12.3574*	[28]	442
²⁸⁴ ₁₁₃ Uut	13.9800*	12.4719*	[28]	453
²⁸⁹ ₁₁₄ Uuq	14.2403*	12.8290*	[29]	459
²⁸⁸ ₁₁₅ Uup	14.2450*	12.7954*	[29]	458
²⁹² ₁₁₆ Uuh	14.3880*	12.7598*	[29]	462
²⁹³ ₁₁₇ Uus	14.3625*	12.7337*	[29]	463
²⁹⁴ ₁₁₈ Uuo	14.3950*	12.7655*	[29]	466

注：1) 附表 3 计算的是原子核的最大边界和电荷分布的最大边界，可能略大于实验值；2) 带*表示对未知详细数据元素的推测值。

Chart 4. The electric quadrupole moment of the atomic nucleus and the revolving axis of tendency
附表 4. 原子核的电四极矩和转动倾向轴

Nuclide	Experimental Value of c/a and Q(10 ⁻⁴ b)	Model Value of c/a	The Revolving Axis of Tendency
²⁷ ₁₃ Al	0.9880 1490	0.9898[1/3]	
³⁵ ₁₇ Cl	1.006 -789	1.0010[1/3]	
⁴⁵ ₂₁ Sc	1.013 -2200	1.0211[1/3]	
⁵¹ ₂₃ V	1.002 -400	1.0065[1/3]	
⁵⁵ ₂₅ Mn	0.9736 5500	0.9515[1/2]	z
⁵⁹ ₂₇ Co	0.9820 4000	0.9876[1/2]	x
⁶³ ₂₉ Cu	1.007 -1600	1.0178[1/3]	
⁶⁹ ₃₁ Ga	0.9929 1780	0.9834[1/2]	z
⁷⁵ ₃₃ As	0.9888 3000	0.9869[1/2]	z
⁷⁹ ₃₅ Br	0.9884 3300	0.9896[1/2]	x
⁸⁵ ₃₆ Kr	0.9574 13100	0.9764[1]	x
⁸⁵ ₃₇ Rb	0.9910 2700	0.9877[1/2]	x

续表

⁸⁷ ₃₇ Rb	0.9956	1300	0.9966[1/2]	y
⁹³ ₄₁ Nb	1.006	-2000	1.0124[1/3]	
⁹⁹ ₄₃ Tc	0.9914	3000	0.9799[1/2]	x
¹¹⁵ ₄₉ In	0.9717	11600	0.9640[1/2]	x
¹²³ ₅₁ Sb	1.018	-7000	1.0195[1/3]	
¹³¹ ₅₃ I	1.018	-7000	1.0182[1/3]	
¹³³ ₅₅ Cs	1.000	-30	1.018[1/3]	
¹³⁹ ₅₇ La	0.9954	2100	0.9561[1/2]	y
¹⁴¹ ₅₉ Pr	1.001	-590	1.0186[1/3]	
¹⁵³ ₆₃ Eu	0.9470	29000	0.9381[1/2]	z
¹⁵⁹ ₆₅ Tb	0.9759	13000	0.9363[1/2]	z
¹⁶⁵ ₆₇ Ho	0.9512	28200	0.9421[1/2]	z
¹⁷⁵ ₇₁ Lu	0.9129	56800	0.9368[1/2]	z
¹⁷⁶ ₇₁ Lu	0.8833	80000	0.8544[2/3]	z
¹⁸¹ ₇₃ Ta	0.9523	30000	0.9426[1/2]	z
¹⁹³ ₇₇ Ir	0.9765	15000	0.9453[1/2]	z
¹⁹⁷ ₇₉ Au	0.9908	5900	0.9575[1/2]	z
²⁰⁹ ₈₃ Bi	1.006	-4000	1.0066[1/3]	
²²⁷ ₈₉ Ac	1.025	-17000	1.0252[2/3]	x
²³³ ₉₂ U	0.9556	35000	0.9681[2/3]	z
²³⁵ ₉₂ U	0.9486	41000	0.9531[2/3]	z
²⁴¹ ₉₄ Pu	0.9329	56000	0.9687[1]	z
²⁴³ ₉₅ Am	0.9412	49000	0.9553[1]	z

注：附表 4 中[1/3]表示 x、y、z 三轴转动几率各为 1/3；[1/2]表示某轴转动几率为 1/2，其余二轴转动几率各为 1/4；[2/3]表示某轴转动几率为 2/3，其余二轴转动几率各为 1/6；[1]表示某轴转动几率为 1。

Chart 5. The six isotopes which may embody particle topes
附表 5. 六种可能包含同粒素的同位素

Nuclide	Model Value BE (Mev) and Number of Bond		Model Value of Atomic Mass	Model Value of %
⁵⁵ ₂₅ Mn (1)	-486.06	82	54.9338	33.3
⁵⁵ ₂₅ Mn (2)	-480.19	81	54.9401	66.6
⁶³ ₂₈ Ni (1)	-556.65	94	62.9247	27.5
⁶³ ₂₈ Ni (2)	-550.29	93	62.9316	72.5
⁹⁹ ₄₂ Mo (1)	-856.36	151	98.9032	34.8
⁹⁹ ₄₂ Mo (2)	-849.93	150	98.9101	75.2
¹¹⁴ ₄₈ Cd (1)	-974.71	175	113.9011	66.2
¹¹⁴ ₄₈ Cd (2)	-968.22	174	113.9079	33.8
¹⁴⁸ ₆₁ Pm (1)	-1226.24	229	147.9149	50.0
¹⁴⁸ ₆₁ Pm (2)	-1221.25	228	147.9201	50.0
²⁰² ₈₀ Hg (1)	-1596.77	316	201.9689	73.8
²⁰² ₈₀ Hg (2)	-1590.73	315	201.9754	26.2

注：1) 附表 5 中原子量和占有比为计算值。2) 其相应的同位素原子量：⁵⁵₂₅Mn 原子量 54.9380；⁶³₂₈Ni 原子量 62.9297；⁹⁹₄₂Mo 原子量 98.9077；¹¹⁴₄₈Cd 原子量 113.9034；¹⁴⁸₆₁Pm 原子量 147.9175；²⁰²₈₀Hg 原子量 207.9706。