

物理教学丛书

原子能基础知识

华东师大物理系物理教学编委会编



华东师范大学出版社

72.3
~~24.34~~
6

原子能基礎知識

华东师范大学物理系物理教学編輯委员会編

华东师范大学出版社

1959年上海

序 言

張开圻

原子核变化时所产生的原子能，自从本世紀四十年代被科学家发现后，以美帝国主义者为首的国家，濫用这个宝贵的科学研究成果，制造武器，殘杀人民，并且一貫地叫嚣原子战争，威胁世界和平。我們要感謝偉大的苏联科学家，他們不仅使苏联拥有原子武器，来保卫和平；并且他們积极地研究原子能的和平利用，终于在1954年6月，建立了世界上第一座原子能发电站，創造了历史上偉大的动力源泉，得到了光荣的原子能研究领导地位。

1955年1月，苏联部長會議发表声明：对中国、波蘭、捷克斯洛伐克、羅馬尼亞、德意志民主共和国分別贈送具有热功率为5000千瓦的實驗性原子反应堆和迴旋加速器，并在研究技术上进行帮助，苏联政府还考虑更进一步扩大她所能贈送的国家的范围。这种大公无私的精神，为全世界人类进步而努力的政策，和美帝国主义者壟断原子武器，执行破坏和平的所謂“实力政策”，对于誰要和平，誰要战争，是一个有力而鮮明的对比！

我国在苏联政府无私的帮助下，第一座實驗性重水型原子反应堆，已于今年6月13日开始了它的鏈式反应，热功率的范围为7,000千瓦，可以达到10,000千瓦；而我国第一座迴旋加速器和自制的靜电加速器也已經建成。这些偉大的成就，标志着在中国共产党的正确领导下，我国已經跨进了原子能时代了！这个反应堆建成后，我国科技工作者正在广泛地进行原子核物理放射化学和生物学等各方面的科学研究，并可以生产大量放射性同位素，供給工业、农业、医疗和交通等技术方面的需要。这对于提高生产，推动技术革命和文化革命以加速我国社会主义建設，將起重大的作用。

1956年苏联政府曾在我国首都北京举行过苏联和平利用原子能科学技术展览会，不但介绍了原子能和放射性同位素的应用，并且还介绍了原子核物理的基本原理。现在又将于本月内，在上海举行这个展览会，苏联专家们更将向上海的科学技术工作者，在提高和普及相结合的方针下，发挥他们大公无私的精神和牢不可破的友谊，来促进上海对于和平利用原子能的大跃进。中国物理学会上海分会曾委托华东师范大学物理学系编辑一本关于原子能的基本知识，帮助大家参观辉煌的展览会中，了解有关原子能的一些问题。这本小册子现在已经和读者见面，它是几位同志集体编写的，只不过彙集各方面的基本问题，供大家作为参考之用，希望各方面加以指正。他们乐于接受编写的任务，是希望大家从原子能的基本知识着手，在展览会中得到生动而具体的观察后，更进一步在原子能的理论和应用上，能够钻研到每个专业方面的专门知识中去。为了热烈拥护和平利用原子能，促进我国科学技术工作大跃进，提高科学理论水平，让我们在党的领导下，为社会主义建设的加速而奋斗！

1958年12月

目 录

原子結構·····	胡瑤光
原子核的結構·····	胡瑤光
天然放射現象·····	殷大敏
核的嬗变和人为放射性·····	孙 滂
裂变和聚变·····	匡定波
粒子加速器·····	鄔学文
观察放射現象的方法·····	鄔学文
放射性同位素的应用·····	戎象春
基本粒子·····	惠斯考夫著 郑一善译

原子結構

胡瑤光

一、原子的核模型

形形色色的物質，由形形色色的分子組成。從分子運動論的觀點看來，組成物質的分子，不是靜止的、互不關聯的，而是運動的、相互作用着的。物質分子的運動，叫熱運動。人所熟知的擴散、熱傳導、熱脹冷縮等熱現象，就是分子熱運動的宏觀表現。

分子可以分割，分割以後，不復具有原物質的性質，而成為原子。

原子是元素的最小單元，是輕而小的物體。它的質量在 10^{-22} 克左右，綫度約 10^{-8} 厘米。可是，它還是一個複雜的、由別的東西組成的動力系統。

從陰極射綫的研究以及其他方面的研究，證明在一切原子中都有電子。原子是中性，電子帶負電，含負電的中性原子必還有正電荷。這正電荷是如何分布的呢？

1903年，湯姆遜提出一個原子模型。在他看來；原子象一個西瓜似的圓球，正電荷以均勻體密度分布在整個圓球內，電子却象瓜子似地散置在圓球的各個地方，與瓜子不同、電子能在其平衡位置附近振動。從這模型出發，頗好地解釋了光的散射、吸收等許多現象。可是，由於它與實驗之間的尖銳矛盾，很快就被丟棄了。

1912年，盧瑟福提出另一個原子模型。在他看來；正電荷集中在比原子小得多的體積內，形成原子核，電子卻繞核運動着。這模型是在他所做的、著名的 α 粒子散射實驗的基礎上提出來的，又得到其他實驗的支持，因而，很快地被公認了。

二、玻尔的氢原子理论

原子由电子、原子核组成，组成原子的电子、原子核在原子中是怎样运动的呢？为了解一般的情景，先看简单的氢原子。

氢原子由带正电(+e)的核、带负电(-e)的电子组成。核和电子之间作用着库伦引力 $\frac{e^2}{r^2}$ ，这力可以充当使电子绕核作圆周运动的向心力。因而，应有

$$\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

式中， m 是电子的质量， v 是电子的速度， r 是电子与原子核间的距离。

玻尔假定：1. 在所有可能的运动中，只有角动量

$$p = nh \quad (2)$$

的运动才是稳定的。 h 是普朗克常数。 $n=1, 2, 3, \dots$ 等正整数，叫量子数。条件(2)叫玻尔的量子条件。2. 当电子在稳定轨道上运动时，不辐射能量，电子从一稳定轨道(有较大能量 W_k)过渡到另一稳定轨道(有较小能量 W_i)时，才辐射能量，辐射频率

$$\nu_{ik} = \frac{W_k}{h} - \frac{W_i}{h} \quad (3)$$

$h = \frac{h}{2\pi}$ 。这条件叫玻尔的频率条件。

电子绕核作圆周运动时，动量矩 $p = mvr$ ，总能量 $W = -\frac{e^2}{r} +$

$\frac{1}{2}mv^2$ ，以之与(1)(2)比较，消去 p ； v ，得知电子绕核运动的圆轨道的半径

$$r = \frac{h^2}{me^2} n^2 \quad (4)$$

在这圆轨道上运动的总能量

$$W = -\frac{me^4}{2h^2} \frac{1}{n^2} \quad (5)$$

从这能量表示式和玻尔频率条件，算出的氢原子可能的辐射频率，与光谱分析所得的氢光谱谱线很好地符合。这就证明：玻尔理论很好地揭露了氢原子的秘密。

从玻尔理论看来：电子绕核作圆周运动，轨道半径不是任意的、而是由量子条件制约着，能量也不是连续的、而是量子化了的。轨道和能量完全由量子数 n 所决定。由是可知，量子数 n 完全标志出电子绕核运动的状态。这也就赋予了量子数以生动的物理内容。量子数不是别的，是表征微观体系运动状态的数字。

进一步的研究指出：电子轨道一般的不是圆，而是椭圆。轨道平面的取向也不是任意的，而是量子化了的。同时，电子本身还象陀螺似的有所谓“自旋”。所以，原子中电子的运动状态，也不是由一个量子数表征，而是由四个量子数 n, l, j, m_z 表征。 $n=1, 2, 3, \dots$ 叫主量子数，决定着轨道的大小。 $l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$ 叫辅量子数，决定着电子的轨道动量矩。 $j=1 \pm \frac{1}{2}l$ 决定着包括轨道和自旋的总动量矩。 $m_z = \pm j, \pm(j-1), \dots, 0$ 决定着总动量矩的取向。

三、电子壳层

玻尔理论指出：氢原子中的电子，是在一些特定的量子轨道上运动着。其他原子，包含的电子数目，不是一个，而是很多个。这多个电子在原子中又是怎样运动的呢？

人们从玻尔理论得到启示，建立了电子在原子中运动规律的壳层理论。

从壳层理论看来；电子不是可以任意运动的，而只可在一些特定的壳层中运动。这些壳层是以原子核为中心的同心圆，用主量子数 n 编号。 $n=1$ 的壳层叫K层， $n=2, 3, \dots$ 的壳层叫L, M……层。K层离核最近，L层次之，编号愈大的壳层离核愈远。

从壳层理论看来；电子在特定的、用主量子数编号的、称之为K、L、M……的任一壳层中运动时，不辐射能量。电子由量子数较高的壳层（有较高能量 W_i ）过渡到较低的壳层（有较低能量 W_j ）时辐射能量，辐射频率

$$\nu_{ij} = \frac{W_i}{h} - \frac{W_j}{h}.$$

反之,电子吸收能量时,会从較低的壳层,跃迁到較高的壳层。

泡里原理指出:以四个量子数 n, l, j, m_z 表征的一个态中,不能有多于一个的电子。另一方面,量子数的可能取值告訴我們: n, l, j 相同, m_z 不同的态有 $2j+1$ 个。 n, l 相同, j, m_z 不同的态有 $2(2j+1)$ 个。 n 相同, l, j, m_z 不同的态有 $2n^2$ 个。由是可知,号数为 n 的壳层中,有 $2n^2$ 个态,最多的电子数是 $2n^2$ 个。这就是說:K 层中最多只能有两个电子。L 层中最多有 8 个电子。M 层中最多有 18 个电子。余类推。

能量最小原理指出:一切物体,尽可能地要处于能量最低的状态。对原子中的电子來說,由于內壳层的能量,一般地小于外壳层,电子一般地要处于內壳层中,內壳层被占滿之后,方占外壳层。在某些情况下,內壳层某些位置的能量,高于外壳层的低能量,因而,电子在未占滿內壳层时,就占外壳层。

包括泡里原理、能量最小原理的壳层理論,揭露了元素性質周期变化的本質。由于电子尽可能地要占低能量壳层,而每一壳层所能容纳的电子数又有限制。所以,必存在这样的一个壳层,能量高于它的壳层全部空着。它自己或被电子占滿,或只有一些电子。在这一壳层中的电子叫价电子,它完全制約着元素的物理的和化学的性質。氢原子只有一个电子,处于 K 层中,原子价为一。氦原子有两个电子,充滿 K 层,成为惰性气体。鋰原子有三个电子,两个充滿 K 层,一个在 L 层中成为价电子。氖原子有十个电子,充滿 K 层和 L 层,成为惰性气体。鈉原子有十一个电子,十个充滿 K 层和 L 层,一个在 M 层是价电子。这就說明:氢、鋰、鈉有类似的性質。氢和氖都是惰性气体。按照这样的規律排列下去,元素性質的周期性,就瞭如指掌的了。

人們发现了原子,掌握了原子內部的結構,从而使我們能更深刻地了解物質世界的客观規律。然而即使壳层理論也只是电子在原子中运动規律的近似反映。

原子核的結構

胡瑤光

很早以前，人們就知道，形形色色的物質都由原子，分子組成。隨着生產的日益發展、科學的日益進步，人們對物質的認識也日益深入。現在，不僅對原子有深刻的認識，對原子核也已有初步的了解。本文只介紹一些原子核本身的性質。

一、原子核的基本特征

原子核的特征，現在看來，可用電荷數、質量數、大小、密度、自旋、磁矩等標志。

1. 質量數和電荷數：任何原子核的電荷，都是電子電荷的整數倍，這整數以 Z 表之，叫原子核的電荷數。實驗表明：元素原子核的電荷數，數值上等於該元素在元素周期表中的原子序數。

物理學中，取氧的輕同位素的質量的十六分之一作質量單位，叫原子質量單位。在原子質量單位中，各種原子核的質量都接近於整數，這整數以 A 表之，叫原子核的質量數。

電荷數和質量數是原子核的最基本特征，常把它們分別記在元素符號 X 的左下角和右上角， X^A 用以表征元素的原子核。

電荷數相同、質量數不同的元素，在元素周期表中，處於同一位置，故叫同位素。現在已知，在一百零二種元素中，有着一千多種同位素。這些同位素，有些是天然的；有些是人造的；有的是穩定的；有的是有放射性的。

2. 大小和密度：粗淺地看來，原子核是一個近似的球體。這球體的半徑 $R = 1.5 \cdot 10^{-13} A^{\frac{1}{3}}$ 厘米。這球體的體積 $V = \frac{4}{3} \pi R^3 = 1.4$

• 10^{-38} A 立方厘米。球体的密度 $\rho = \frac{A}{V} \approx 10^{14}$ 克/立方厘米。

由此可知，原子核是一个体积小而密度大的物体。体积小，小到只及原子的百万亿分之一，在二厘米寬的地方，可以并排排下一万个原子核。密度大，大到一亿吨的原子核，只占一立方厘米的空间。

3. **自旋和磁矩**：象旋轉着的陀螺似的，原子核是具有“自旋”的动力系统。自旋的动量矩是不連續的、量子化了的，它的数值

$$P_I = \sqrt{I(I+1)} \hbar$$

\hbar 是普朗克常数， I 叫自旋量子数，只能取0、1、2……等整数，或 $1/2$ 、 $3/2$ 、 $5/2$ 、……等半整数。

由于自旋量子数，只能是整数或半整数，原子核被区分为两类。自旋量子数为半整数的原子核，和电子一样，服从泡里原理和费米统计法。自旋量子数为整数的原子核，象光子似的，不服从泡里原理，却遵循玻色统计法。

自旋着的系统，也有磁矩。原子核的磁矩，比电子的自旋磁矩小几千倍。

二、原子核的组织成份

事实告诉我们，原子核也不是不可分割的粒子，而是可以变化、可以分割的复杂系统。这些复杂系统是由什么东西组成的呢？

1. **电子、质子说**：起初，由于放射性元素的 β 蜕变放出电子来，由于各种核的质量都几乎近于质子质量的整数倍，人们认为原子核是由质子、电子组成的。从这观点看来；质量数为 A 、电荷数为 Z 的核中，含有 A 个质子、 $(A-Z)$ 个电子，质子、电子之和为 $(2A-Z)$ 。质子、电子之和即核中粒子的总数是奇是偶？依 Z 而定。 Z 是奇数，粒子总数也是奇数。 Z 是偶数，粒子总数也是偶数。

量子力学指出：自旋量子数 I 是整数还是半整数，与核中粒子总数是奇是偶有关。由于质子、电子的自旋量子数都是 $1/2$ ，相互间的取向又只能是平行或反平行。因而，粒子总数为奇数的原子核，自旋量

子数应是半整数。粒子总数为偶数的原子核，自旋量子数应是整数。

从电子、质子说的观点看来； ${}_{7}\text{N}^{14}$ 的粒子总数是奇数，它应有半整数的自旋。可是，实验指出； ${}_{7}\text{N}^{14}$ 的自旋不是半整数，而是整数1。对一些别的核（如氦）的讨论，也显出理论与实验间的尖锐矛盾。

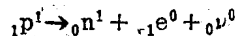
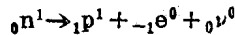
从电子、质子说的观点看来；核的磁矩，应有电子自旋磁矩的数量级。可是，上面我们就说过，核的磁矩比电子磁矩小几千倍。

原子核的自旋的研究、磁矩的研究，以及一些其他现象的研究，都使电子、质子说沦于破产，因而就被抛弃了。

2. 中子、质子说：中子被发现之后，伊凡宁科就提出假定，假定原子核是由中子、质子组成的。在他看来；质量数为A、电荷数为Z的核中，含有Z个质子，(A-Z)个中子，中子、质子之和即粒子总数是A。因而，核中粒子总数全由质量数决定，是奇是偶取决于A。

从中子、质子说的观点看来； ${}_{7}\text{N}^{14}$ 中粒子总数是偶数。由于中子的自旋也以量子数 $\frac{1}{2}$ 表之，也只能与其他粒子有平行或反平行的取向。因而， ${}_{7}\text{N}^{14}$ 的自旋量子数应取整数值，这与实验很好地符合。不仅如此，从这观点还很好地解释了磁矩和一些电子、质子说不能解释的其他现象。这种学说，现在是核子物理的基础之一。

3. 中子和质子的关系：从现在的观点看来；质子和中子是处于不同状态的核子，核子处于带电状态时叫质子，处于中性状态时叫中子。核子是质子和中子的统称。对于核子的不同状态，在质子、中子之间是可以相互转变的。中子转变为质子时，放出电子和中微子。质子转变为中子时，放出中微子和正电子。用 ${}_1\text{p}^1$ 记质子； ${}_0\text{n}^1$ 记中子； ${}_{-1}\text{e}^0$ 记电子； ${}_{+1}\text{e}^0$ 记正电子； ${}_0\nu^0$ 记中微子，质子、中子的转变过程可用方程式表为



应该注意：自由质子是稳定的，自由中子却不稳定。因而，中子转变为质子的过程，可以自然发生。反之，质子转变为中子的过程，只有在能量足够大的情况下才有可能。

质量数为A的核中，有A个核子，Z个是质子，(A-Z)个是中

子。在質子、中子之間，在A与Z之間有无規律可寻呢？实验和理論都指出，这規律是存在的。图1是实验图綫。下面是理論公式

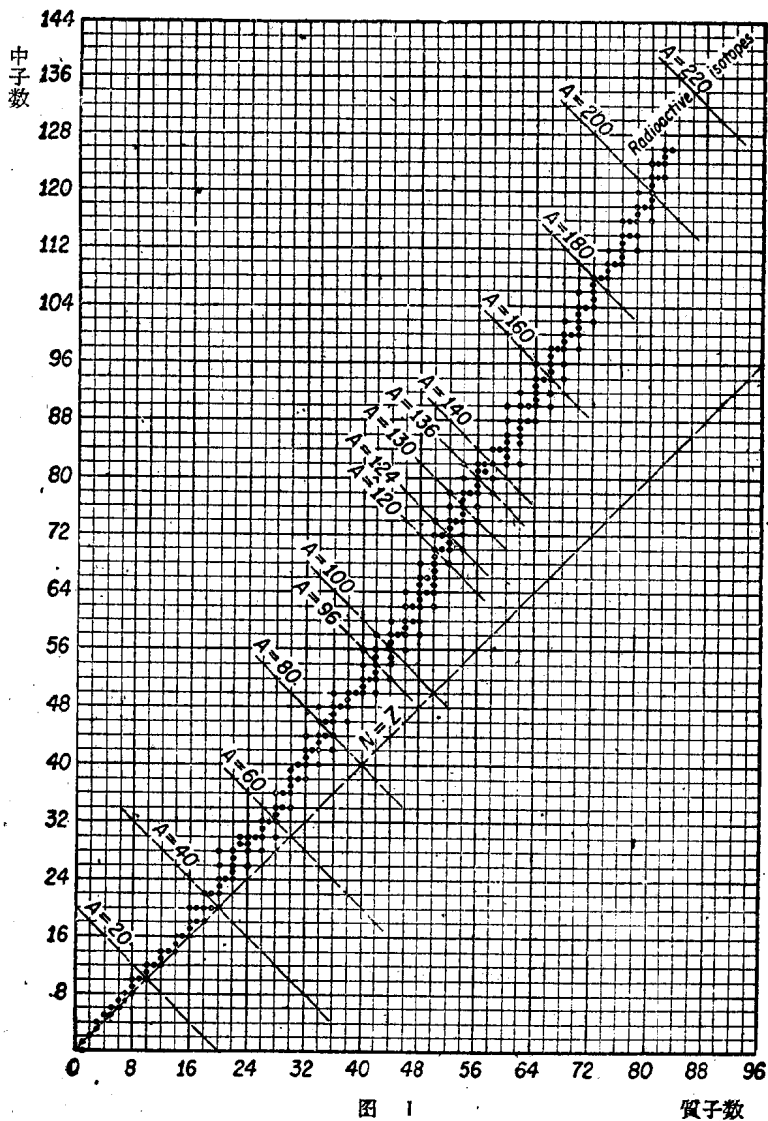


图 1

質子數

$$Z = \frac{A}{1.98 + 0.015A\%}$$

公式和圖綫都指出：在較輕的核中，質子、中子各占一半， $Z \approx \frac{A}{2}$ 。在較重的核中，中子較質子為多。例如： ${}^4_2\text{He}$ 中有兩個質子，兩個中子。 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 有92個質子，146個中子。

三、原子核的液滴模型

前面已提到：原子核近似球體，體積 V 與質量數 A 成正比。而核中核子恰為 A 個。這意味着：各種原子核的體積，因所含核子數目不同而異。但是，每一核子在任意原子核中，所占的體積都是相同的。換句話說：儘管不同的原子核有不同的體積，各種原子核的密度却都一樣。進一步的研究證明：各種原子核的密度雖不盡相同，相差却也有限。

大家知道：水，不管是自來水也好，井水也好，河水也好，密度都幾乎是一樣的。別的液體也有象水這種的性質。原子核也是如此。因此，可以把原子核比作特殊的液滴，這液滴的特殊，在於它不是由尋常的分子，而是由特殊的核子組成的。把原子核比作液滴的看法，叫核的“液滴模型”。從這模型看來：各種各樣的原子核，都是同一種液體的液滴，不同的只是液滴的大小而已。形成原子核的液體叫作核液，它與其他的液體不同，只能以液滴的形式存在，不能形成汪洋大海，這原因與質子間存在庫倫斥力有關。

四、質量虧損和結合能

大家知道：水汽凝結成水時，會放出能量。別的气体凝成液體時，也會放出能量。核子形成核的液滴時，會不會放出能量呢？放出的話，放出多少哩？

1. 質量虧損：實驗指出：在原子質量單位中，中子的質量 $M_n = 1.008982$ ；質子的質量 $M_p = 1.007593$ ；每個中子和兩個質子的總質量為 $2M_n + 2M_p = 4.03315$ 。可是，當它們形成氦後，質量却是 4.00275 ，比原來少了 0.030375 。

对于别的核也有类似的结果； Z 个质量为 M_p 的质子、 $(A-Z)$ 个质量为 M_n 的中子组成的原子核，其质量却不等于 $ZM_p + (A-Z)M_n$ ，而等于较它为小的量 M 。这意味着：核子形成原子核时，质量受到损耗，损耗的质量 $4m = ZM_p + (A-Z)M_n - M$ 叫质量亏损。

2. 爱因斯坦关系式：大家知道，质量、能量都是表征物质及其运动的物理量。它们二者之间有无联系呢？从经典物理的观点看来；它们是互不关联的、彼此独立的物理量，它们各有各自的守恒定律，即能量守恒定律和质量守恒定律。从相对论的观点看来；它们是相互制约、相互依存、有内在联系的物理量。这联系用爱因斯坦公式

$$E = mc^2$$

表之。 E 是物质的能量， m 是物质的质量， C 是光在真空中的速度。

3. 结合能：从爱因斯坦关系式看来；核子形成原子核时，既有质量亏损，必有能量亏损；质量亏损既为 $4m$ ，能量亏损必为 $4E = 4m \cdot C^2$ 。这能量亏损，我们称之为结合能，如以核子数除之，则为一个核子的平均结合能 $4\Sigma = \frac{4E}{A} = \frac{4m}{A} C^2$ 。结合能不是别的，正是核子凝结成液滴时，放出的能量。

核子物理中，常用电子伏特作能量单位，用 ev 表之。有时，嫌其太小，而以它的百万倍作单位，叫兆电子伏特，用 Mev 表之。

一电子伏特的能量，等于一个电子通过一伏特的电位差时获得的能量。

$1 ev = 1.60 \times 10^{-12}$ 尔格 $= 3.83 \times 10^{-20}$ 卡 $= 4.45 \times 10^{-26}$ 千瓦小时。

由实验测定各种原子核的质量亏损，由爱因斯坦关系式算出它的平均结合能，结果有如图2所示。

结合能曲线指出：各种原子核的平均结合能，都在八百万电子伏特左右。中等核的平均结合能较大，轻核、重核较为小。

这平均结合能，就是核子凝结时放出的能量，是大得惊人的。它比水的汽化热要大几百万倍，比原子结合成分子的化学能也要大几

百万倍。一吨煤燃烧时，放出的能量，比一克核子凝成原子核时放出的还少近百倍。可见，原子核结合能巨大到何等程度！和平利用原子能的意义多么深远！

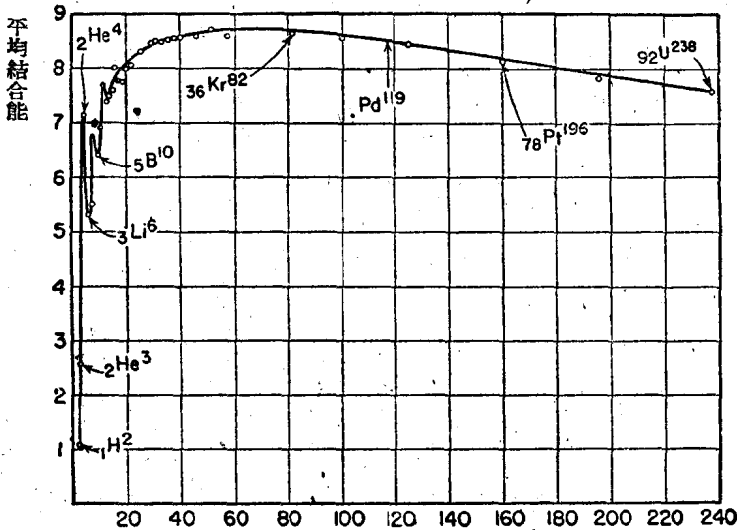


图 2 质量数

平均结合能的巨大，标志着原子核的牢固和坚实。这说明：原子核发现之后，人们千方百计地用高温、高压、强场都不能影响原子核的性质。只有高能粒子、特殊高温才使原子核变了质。

中等核的平均结合能，大于重核和轻核的事实，表明中等核比重核、轻核更稳定。因此，有这样的趋势：重核要变成中等核，轻核也要变成中等核。这正是产生裂变和聚变的前提，原子能用作动力的先决条件。

五、核子力

原子能在工业、农业、医学、军事等各个方面，获得了很大的利用。这利用，正日益扩大、日益发展。可是，对于产生如此巨大能源的根本原因，对组成原子核的核子之间的相互作用规律，还了解得很不清楚。

万有引力的作用，使地球經年累月地繞太阳旋轉。庫倫力的作用，使电子与原子核共處，結成了原子。是什么原因使核子結成牢固、堅實的原子核呢？万有引力嗎？不是！庫倫电力嗎？也不是！万有引力太小，决不能使原子核結合得如此堅實、牢固。質子之間的庫倫电力是相互排斥的，不但不能使核子結合，反要使它們分離。由此可見，核子之間的相互作用力，是一种新型的**作用規律**，名之曰**核子力**。

庫倫力作用的結果，使分子具有几个电子伏特的化学能。核子力作用的結果，使原子核具有几兆电子伏特的結合能。可見核子力的巨大性。这正是原子核堅實、牢固得通常的高溫、高压、强場不能影响其絲毫的根本原因。

結合能曲線指出：各原子核的平均結合能相差无几，都在八百万电子伏特左右。这意味着：每一核子，不管在重核中也好，在輕核中也好，結合能是大致相同的。換句話說：它受到其他核子的作用，不因核子的多少而异。这只有在仅仅是相鄰核子才发生相互作用的前提下，方有可能。作用只存在于相鄰核子之間的事實，使我們相信核子力是短程力。核子只能和相鄰核子作用，而不能和远鄰核子作用的性質，叫核子力的飽和性。

應該指出：核子力存在于中子与中子之間；中子与質子之間；質子与質子之間。質子間除相互吸引的核力外，还有庫倫斥力。核力是較庫倫力巨大得多的短程力，庫倫力是較核力为弱的長程力。由于这些原因，原子核結合得很牢固。也由于这些原因，重核可能自动分裂，而更重的核却不存在于自然界中。

除知道核力是巨大的短程力外，对于核力的本質，还很不清楚。1935年，湯川秀樹提出核力本質的介子場論。由于电荷之間的相互作用，是通过电磁場即光子場來實現的。湯川秀樹認為：核子之間的相互作用，是通过介子場來實現的。介子是質量介于电子和質子質量之間的基本粒子。1947年， π 介子被发现了，它还可以从原子核的变化过程中产生出来，这使介子場論得到有力的証明。可是，这理論还很不完善，它常給出与实验不符的結論。核子力的本質到底如何？还有待进一步的研究。