



原子船

B.B.拉哈宁 H.M.西罗夫著

沈维道 等译

人民交通出版社

本書由如何獲得原子核能的物理原理講起，簡要介紹了各種類型的反應堆和熱力系統，從而闡述利用原子能發動船舶的優點和途徑。介紹了世界各國的船舶原子動力裝備的系統，尤其是蘇聯和平利用原子能和原子破冰船所獲的偉大成就，最後，並根據巨多的文獻資料對船上原子動力裝備的現況和發展作了科學的分析。

本書不僅能為水運工作人員學習參考用，並可供凡對原子動力設備的研究有興趣的廣大青年和技術人員參考閱讀用。

本書序言和§ 1—3由楊松濤譯，§ 4—6和§ 12由沈維道譯，§ 7—9由練淦譯，§ 10—11由劉咸鼎譯，§ 13由任文江譯，以上統由沈維道校審。§ 14—17由王劍虹譯，§ 18—20由鄒祖芳譯，§ 21—24由劉銘于譯。

0494/14
原 子 船

В. В. ЛАХАНИН, Н. М. ШИЛОВ
КОРАБЛЬ
НА АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
“МОРСКОЙ ТРАНСПОРТ”
МОСКВА-1957

本書根據蘇聯海運出版社1957年莫斯科俄文版本譯出

沈維道等譯

人 民 交 通 出 版 社 出 版

(北京安定門外和平里)

北京市書刊出版業營業許可証出字第〇〇六號

新 華 書 店 發 行

人 民 交 通 出 版 社 印 刷 廠 印 刷

1959年8月北京第一版 1959年8月北京第一次印刷

開本：850×1168毫米 印張：4張

全書：130,000字 印數：1—1,800冊

統一書號：15044·5178

定價(10)：0.75元

目 录

卷首語

序 言

第一章 核子能及其释放的方法	4
§ 1. 物質和原子的結構	4
§ 2. 天然放射性及原子核的結構	7
§ 3. 核子能的产生及其計算	11
§ 4. 釋放原子核核能的方法	16
1. 組成輕元素的原子核的方法	16
2. 改变重元素的原子核的方法	20
§ 5. 使原子核发生改变的鏈式反应	21
§ 6. 人为的放射性与放射現象	32
第二章 原子核反应堆及热力装置系統	35
§ 7. 原子核燃料及其生产	35
§ 8. 原子核反应堆工作的物理原理及其基本組成	39
§ 9. 原子核能直接轉变为电能	41
§ 10. 反应堆及热力系統的分类, 以及其工作的指标	43
§ 11. 苏联科学院原子能发电站装置	53
§ 12. 苏联的一些反应堆的介紹	57
§ 13. 某些外国反应堆的介紹	61
第三章 海船原子装置及其应用的发展展望	86
§ 14. 原子能动力船的优点、特点和发展展望	86
§ 15. 船舶原子装置的类型及其在船上的布置	90
§ 16. 具有加压水反应堆的船舶原子装置	91
§ 17. 有沸水反应堆的船舶原子装置	97
§ 18. 有均匀反应堆的船舶原子装置	99
§ 19. 有用鈉冷却的反应堆的船舶原子装置	103
§ 20. 有燃气涡轮机的船舶原子装置	109
§ 21. 原子船	116
§ 22. 反应堆燃料消耗量及装填量的計算	120
§ 23. 关于原子装置的計算和尺寸的一些問題	126
§ 24. 关于核能价值的一些問題	129

“开展为运输业建立原子能动力装备的工作。

制造装有原子能发动机的破冰船”。

苏共第二十次代表大会的指示。

卷 首 語

本書內容取材旨在使讀者获得关于核子能的基本概念和了解利用核子能发动船舶的可能性及其发展展望。

在第一章內采用一般水运人員容易了解的形式，闡述获得核子能的物理原理。

在第二章內說明各种类型的反应堆和热力系統的装备。

在第三章內簡要介紹利用原子能发动船舶的优点、特性和途徑；詳細地說明适用于船舶上的原子能动力装备的系統，并对各系統的优缺点加以分析。此外，在本章內提供文献內所报导的，关于建造和設計原子能船舶方面的資料以及举出与原子能动力装备有关的一些計算問題。

在編写本書時曾参照苏联和国外的文献。

作者希望本書对水运工作人員以及水运学校学生有所帮助。

本書“序言”和§1~9由物理数学碩士H.M.西罗夫副教授写成；§10~24由技术科学博士B.B.拉哈宁教授写成。

作者对B.Ю.吉特基斯教授在审阅手稿時所提供的許多宝贵意見表示感謝。

序 言

原子能的发现是现代科学上最伟大的成就，它对社会的技术进步起着重大的影响作用。

核子能的蕴藏量远远地超过目前所利用的全部能源的蕴藏量。印度教授哈·巴巴为了估计世界上能的蕴藏量，曾提议以燃尽330亿吨煤所放出来的能量作为能量的规定单位。据统计从纪元初到十九世纪中叶，人类耗费了大约9个规定单位能量，而在近百年来（到1950年为止）耗费了大约5个单位，即十九个半世纪中耗费完大约14个单位能量。可能提取和使用的煤、石油和燃气的世界蕴藏量估计为100个规定单位。

苏联拥有大量的动力资源。已经查明的各种能量资源，如固体燃料、石油、天然气和水力，要换算成标准燃料，在苏联共计有15900亿吨，在美国有15500亿吨，在欧洲（不包括苏联在内）有7300亿吨，在英国1750亿吨，在西德有245亿吨。

集中在原子核内能的蕴藏量是巨大的。

仅在已勘查的铀和钍的世界矿藏中就集中1700个规定单位能量！这种能量可以在上述元素的原子核发生分裂而进行链式反应时释放出来。此外，也可以在轻元素产生原子核结合而进行热核子反应时释放出来。这种蕴藏量目前还无法估计，但是无疑，它们大大地超过分裂物质的能的蕴藏量。

核子能的巨大蕴藏量的利用将导致规模宏伟的技术和经济革命。我们已经进入了原子时代的开端，并且我们生活和行动在这个时代里。

苏联人民和政府在共产党的领导下，始终站在世界各国人民争取和平，禁止使用原子武器及氢武器的伟大斗争中的最前列。

但是帝国主义国家中的反动集团仍然不放弃将原子能用在军事上破坏亿万人民劳动成果的企图。

苏联科学家和工程师则是致力于研究和利用原子能的各种方法。这些努力获得了光辉的成就。人所共知，在1954年世界上第一座利用原子燃料发电的工业电力站在苏联开始发电。

世界上第一座原子能发电站发电的经验使我们能够详细地进行研究许多操作过程，并向建筑新式巨型的原子能电站过渡。苏联共产党第二十次代表大

会关于发展国民经济第六个五年计划的指示中规定，将建筑五座发电能力为40~60万千瓦的原子能电站。这些电站将从1958年末到1960年间进行动工。原子能电站的总发电能力预定在1960年达到200~250万千瓦。除强大的原子能电站外，在第六个五年计划期间内将建筑数座发电能力为50万千瓦的实验性的原子能电站并进行发电。

其他国家对建筑原子能电站也是很注意的。美国预定建筑许多原子能电站。在1975年以前全部原子能电站的总发电能力预计达到2000万千瓦。在加拿大，两座电站正处在建筑阶段；第一座电站将在1958年运转。在英国许多发电站正处在建筑和設計阶段；其中在克尔傑勒——豪勒地区的第一座电站在1956年10月开始建筑，在1965年前原子能电站的总发电能力预计达到150~200万千瓦。在法国正在建筑两座电站。

原子能工业给予科学和技术提供大量的放射性同位素，其辐射被广泛地应用在国民经济中。在物理、化学、冶金、机器制造业和其他许多方面都可利用放射性同位素进行研究和检查各种各样的过程。

核子燃料的巨大容量在水路、铁路和航空运输方面开辟了广阔的应用途径，使星际旅行问题可能得到解决。

现有释放核子能的装备目前还具有很大重量。所以在轻载运输工具上利用原子能动力设备会遇到很多困难。但是这种装备完全可能在巨型重载航海船舶上使用，其重量将由不多的燃料储备量所补偿。

苏共第二十次党代会关于第六个五年计划的指示中规定：开展为运输业建立原子能动力装备工作以及制造装有原子能发动机的破冰船。

在美国第一艘“缸鱼”号原子能潜水艇在1955年造成；还要建造数艘潜艇，正在设计航空母舰和原子机车的装备。在挪威、日本和其他一些国家也正在准备进行建造原子船舶。

第一章 核子能及其釋放的方法

§1 物質和原子的結構

俄国科学之父M. B. 罗蒙諾索夫繼承了古原子学者的学說并奠定了物質結構的微粒子理論的基础。按照这个理論，我們周圍的一切物体不是連續的、完整的，而是具有間断的結構，是由微小的質点（粒子）^①——分子所組成。分子不是最簡單的質点，而是具有一定的結構和組成：它們是由更加微小的質点所組成。在二十世紀以前科学家們認為这种質点是最簡單的、不可分割的，而称为原子（表示“不可分割”的意思）。在分子內的原子之間存在着力（由于电子交換和产生离子的緣故），这种电吸引力引起了分子能。

我們早已学会了釋放分子能和按我們需要加以利用。分子能在燃料燃燒的化学反应下以热能的形式釋放出来。如煤中之碳在燃燒过程中由于碳原子与空气中的氧原子化合，結果生成二氧化碳分子。大家都知道，1公斤优质的煤在燃燒时放出6000~7000仟卡热量。

同时存在着其他形式的化学反应，这就是某些物質的爆炸（如三硝基甲苯），爆炸的同时就伴随着能量的釋放。爆炸反应时，爆炸物的复杂的和不稳定的分子会发生分裂，同时生成最簡單的和稳定的分子。剩余能量在分子的改造过程中釋放出来，但是它小于燃燒反应时釋放出来的能量。如1公斤三硝基甲苯在爆炸时放出1000仟卡热量。

为了更好地了解原子核的反应，我們注意到：为了要使燃料燃燒，就必须將燃料点燃，即，提高燃料的溫度。有时观察到煤的自然，这也是由于氧化过程使溫度升高以后才发生的。当溫度升高时，参加反应的原子的运动速度增大，这些原子就有可能互相接近到电力作用的距离以內，互相吸引，从而形成了新的分子。在低的速度时，这种情况不会发生。爆炸反应通常是由于外部的急剧的作用（衝击）所引起，以及由于局部的溫度升高或点燃所引起。化学反应的进行依靠釋放出来的能量来維持。

如果分子具有能量，就很自然地产生是否組成分子的原子也具有能量的

① 譯者注：質点与粒子意相同，后文兼有此两个詞，实指一物。

問題。為了解答這個問題必須詳細地研究原子的結構。

觀察和分析各種物質得知，物質分子的生成，是由於一些為數不多的最簡單的物質——化學元素的原子，以不同形式結合的結果。化學元素有銅、錫、鐵、氫、氧及其他。

在自然界中總共存在92種自然元素。由於進行研究核子反應及利用原子能問題，在近年來又發現了9種人造元素，原子序數為93—101：鐳（93）、銻（94）、釷（95）、錒（96）、錒（97）、錒（98）、釷（99）、釷（100）和鐳（101）。

原子主要特徵之一則是重量非常小，所以採用規定單位測定。以氫原子量的 $1/16$ 作為規定單位。按照這個單位計算，氫原子量是1.008，氧——4.003，鈾——233.07等（以克計的規定單位等於 1.63×10^{-24} 克）。

原子的大小若與長度單位厘米、毫米相比較，則是極微小的。假如把原子當作小球，並把它們在直線上相互排列起來，那麼在1厘米上就要排到1億個原子。而正是這種質點卻又具有很複雜的結構！

偉大的俄國科學家Д. М. 門捷列夫在1869年曾經發現了化學元素的週期律並且在原子研究方面作了巨大的貢獻（第101種化學元素即用他的名字命名）。他按照原子量遞增次序，排列了所有元素之後得出週期系。在分析元素性質的同時，他証實了元素的性質隨著元素原子量的遞增次序而有週期性的變化。

週期系對於推動科學進一步發展，發現原子能方面起了巨大的影響作用，並且指明了原子的複雜結構。

早在週期系創立以前，俄國科學家М. Г. 巴甫洛夫、Б. Н. 切切林、Н. А. 莫羅佐夫等人曾經指出過原子結構的複雜性，但是他們的思想直到前一世紀末葉，電子發現以後才獲得了發展。電子乃是具有質量的物質質點，大約為氫原子量的 $1/1840$ ，並且是帶有微量負電荷的帶電體（ 4.8×10^{-10} 靜電單位）。

在電子發現以後，已是二十世紀，曾經採用行星式原子模型：在原子中心有帶正電的核，電子類似行星繞太陽運行一樣而繞核旋轉。電子運動速度大約為每小時3.6百萬公里。在陽電核和陰電子之間有靜電引力作用着。核的陽電荷與電子的陰電荷總數相等。整個原子的電性中和。核電荷用規定單位測定。以氫原子核的電荷作為單位，它的數量與電子的電荷相等。利用核電荷的規定單位數來確定週期系中元素的位置——它等於原子序數和繞核旋轉的電子數。圍繞氫原子核有1個電子旋轉，氧2個，鋰3個，鈷27個，鉀

42个，铀92个。氫、氦、鋰原子的結構簡略示出在图 1 a, 6和B 內。

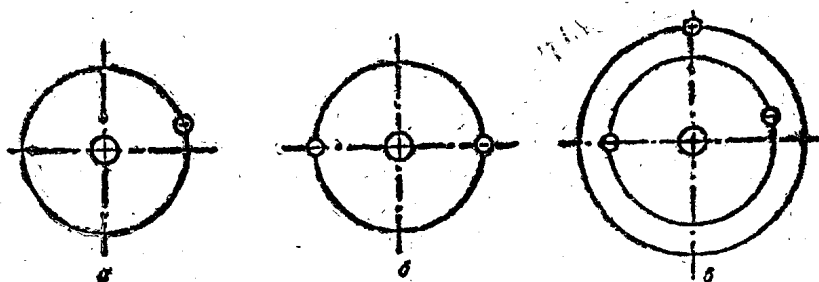


图 1 原子結構示意图。

a-氫；6-氦；B-鋰。

研究証实，决定原子性質的基本因素不是原子量，如像人們所曾想像的那樣，而是核的阳电荷。同一元素的各单独原子的原子量可能不同，但是它們都具有相同的核电荷，具有相同的化学性質并且在元素周期系中占有一个位置。

具有不同原子量的同一化学元素的原子称为該元素的同位素。目前已发现1000种以上同位素。它們分布在元素中是不等的。氫和鈾的同位素用来釋放原子能具有重大的作用。

氫有三种同位素：原子量为1的——普通氫、原子量为2的——氘、原子量为3的——氚。氘和氚是氫彈中核子燃料的重要組成物。氘存在于自然界中、占水中所含氫的1/6000。氚不存在于自然界中，要用人工方法制取。

鈾有三种同位素：鈾234，鈾235和鈾238。只是在不久前才采用人工方法用釷制取原子量为233的鈾同位素。鈾同位素233和235是原子彈中核子燃料的重要組成物。它們对于在和平利用原子能的裝置中釋放核子能也起着重要的作用。

上面所敘述的行星式原子模型仅仅是大致近似的。現代物理学确定，原子結構相当复杂。目前一般采用的是能級式原子模型。从該模型来看，原子是由質点所組成的某种完整的体系。这些質点的分布及其状态完全与一定的能量相符合。原子中的电子运动由极复杂的原子內部規律所約制，它們不同于机械运动的規律。

現代物理学又表明，不仅原子具有复杂的結構，而且原子核也具有复杂的結構。原子核如同原子，由一些質点所組成。

§2 天然放射性及原子核的结构

1898年法国科学家贝克勒尔发现天然放射现象以后，开始了对原子核进行系统的研究。他发现铀盐通过不透光的物体使底片感光。由此他得出结论：铀自动放射出看不见的射线。玛丽·居里—斯克拉多夫斯卡娅证实了其他重元素，也能自动放射出射线。不久她发现了新的元素，这种元素更加强烈地自动射出贝克勒尔射线，并命名为钋。以后便称这种射线为放射性射线，放射这些射线的现象称为放射现象。

为了观察到放射性射线，在最初研究期间曾经采用照像底片。后来发现射线能引起气体分子的强烈电离作用，使气体分子电离成带电的质点——离子。

放射性射线的电离作用是研究放射性射线的强有力的方法，目前被广泛地利用。借助这种方法，可以看到放射性射线的径迹。物理学者是通晓蒸汽在离子上凝结的现象。如果射线穿过饱和蒸汽，则在射线经过的途径上形成大量的离子。在离子电场作用之下，中性的雾滴带了电荷。雾滴被离子所吸引，在离子上凝结，并在射线的途径上形成一条雾。这条雾通过显微镜能很好地看到，有时在适当灯光照耀下可以用肉眼观察到。

威尔逊设计了观察放射性射线径迹用的电离室，如图2所示。雾室是由圆筒1与玻璃盖2所组成；可以移动的活塞3当作圆筒底。当活塞迅速向下移动时，空气由于膨胀受到冷却的缘故变成过饱和蒸汽。将放射物4放在支架5所关闭的小窗口前面。当活塞向下移动时小窗口被开启，射线穿过室内某途径，同时使空气电离。凝结在离子上的水蒸汽形成一条雾，在图2内用直线表示出。这条雾通过玻璃片2可以观察和摄影。

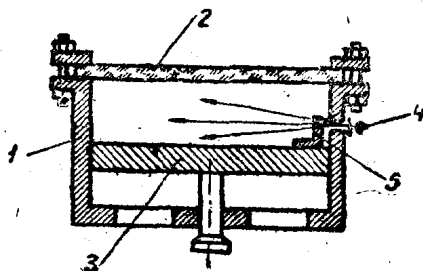


图2 威尔逊雾室略图

类似威尔逊雾室的电离室，目前被广泛应用于原子能装置上，进行检查核子反应和控制反应堆。放射性射线和其他高速运行质点的电离作用是各种不同结构的探测器作用原理的基础。探测器是用来测定原子能装置的放射性辐射。最简单的探测器外形与一支自来水笔相似。在杆内装有绝缘很好的小型验电器，并使预先带有电荷。放射性射线作用时探测器杆内之空气产生

电离，同时驗电器放电。探测器所感应到的放射性射綫的剂量愈大，驗电器放电也就愈强。进入原子能装置工作室内的每个人員都发給探测器。从室内外出时要检查探测器上的示度，以断定这个人所受到的放射性幅射的剂量。如果超过允許量，要立刻把受害者送到医院去。

上述观察放射性射綫的方法使我們能够对射綫的性質进行研究。实验証明，如果在鋅有槽的鉛块1的底部放进放射物（图3），則从槽中放射出一束狭窄的射綫从未荷电的电容器的平板間通过，成直綫发散。如果电容器荷电，射綫束就分成三部分：向阴极板偏轉的射綫称为甲种（ α ）射綫；向阳极板偏轉的射綫称为乙种（ β ）射綫；在电场中不偏轉的射綫称为丙种（ γ ）射綫。研究証明，甲种射綫是带阳电荷的

質点流——氢原子核，質量为4个单位，电荷为 $+2$ 个单位。乙种射綫是带阴电荷的質点——电荷为 -1 个单位的普通电子。丙种射綫無論在电场中或在磁场中都不偏轉，为电磁幅射。

实验表明，放射性射綫是由原子核射出的。由此从放射现象中得出第一个基本結論：原子核不是最簡單的，而是具有复杂结构的，因为从其中飞出質点。

在放射性質点幅射时，所給元素的原子核发生变化：原子核蜕变成其他元素的原子核。例如，如果从鈾238核中飞出 α 質点，那么鈾本身質量就亏损4个单位，而阳电荷减少 $+2$ 个单位。質点飞出后原子量为 $238 - 4 = 234$ ，而原子序数为 $92 - 2 = 90$ ，就是說从鈾中产生一个釷的同位素。

如果从形成釷同位素的原子核中飞出 β 質点，它就减少 -1 个阴电荷。 β 質点的質量是很小的，可以不計算。因之，在 β 質点飞出后原子量保持不变，而原子序数为 $90 - (-1) = 91$ ，即釷的同位素蜕变成成为鐳的同位素。在 γ 質点飞出时原子序数和原子量都不改变。

現在可以得出第二个基本結論：化学元素的原子不是不能改变的；它們从一种蜕变成另一种。

引起放射性幅射的原子蜕变称为元素自然放射性蜕变。蜕变速度由原子性質和数量来决定，并以半衰期为特征。所給元素的半数原子发生裂变时所

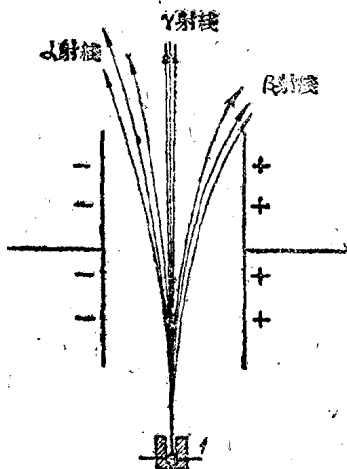


图3 放射性射綫在电场中分散成三部分的情形

經過的時間称为半衰期。半衰期的数值变化的幅度很大。例如，钍238的半衰期为45亿年，鐳約1600年，氡3.8晝夜，鐳A 3分鐘，而鐳C'百分之一秒。

为了实际检查裂变速度，需要計算所給元素射出的質点数。为此目的，多采用盖勒—穆勒計数器，如图4所示。計数器是由玻璃圓筒1和塗有一薄层金屬的内壁2所組成。通过圓筒中心穿上一根金屬絲3。在金屬层和金屬絲之間，通过高电阻5，接上電池組4。放射性質点由放射質6射出，流暢无阻地穿透圓筒壁，它們与气体分子相互撞击，并使其电离。阳离子吸向阴极，阴离子吸向阳极。結果在电路上产生电流，因而在电阻5上引起电压降。該电压降立刻傳至放大器輸入端，在輸出端可能接有計数器或者記錄仪表。射入圓筒1內的每个質点都能在扩音器內引起彈指声或者在記錄帶上留下齿痕。按彈指声的响数或者齿痕数可以計算出質点数和測定半衰期。

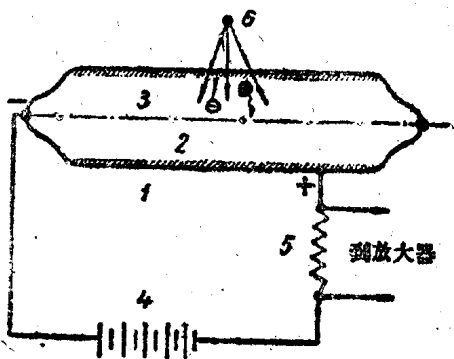


图4 盖勒—穆勒計数器示意图

半衰期数值能够解决与和平利用原子能有关的許多問題，以及研究防御原子彈爆炸的有效方法。

理論上和实际上的研究証明，放射性質点放射的速度是巨大的。甲种質点速度达到每秒鐘2~4万公里，乙种質点速度接近光速（每秒鐘20~25万公里）而丙种質点速度等于光速（每秒鐘30万公里）。使質点得到这样的速度需要消耗很多能量。但是放射性輻射是自发地进行，沒有从外部供給原子核能量。

由此得出第三个基本結論：在原子核內集中着巨大的能量。

但是在放射性輻射的情况下核不发生裂变，只是由一种蜕变成另一种。由此可見，使質点得到速度所消耗的能量是集中在原子核內总蘊藏量的一小部分。

为了闡明这种能的性質和发生的原因，需要洞查核子內部，研究它的結構。可是这是非常困难的。即使物質被加热到高温，被提高压力，发生各种化学反应，甚至引起巨大破坏的强烈爆炸，但对原子核都不起任何作用。原

子可能失掉全部电子，但是原子核仍不改变。

仅在放射性辐射时原子核才发生变化。因此放射现象引起了许多科学家的注意。他们不但研究了放射现象的实质，而且也研究了放射性质点对物质的作用。大家都知道，炮弹所引起的巨大破坏。这提醒科学家利用放射性质点进行轰击原子核。要知道，放射性质点具有极高的速度！

世界各国科学家都从事射击原子核的研究，并且取得了卓越的成就。例如，曾经发现在用甲种质点轰击作用下，放射出了在电场和在磁场内都不发生偏转的某种射线。研究表明，放射线是不带电的质点流，即中子流。中子的质量近似氢原子核——质子的质量，但是中子不同于质子，它不带有电荷。中子在原子能释放方法当中起着极重要的作用。

以后证实了从原子核中飞出来的，有介子、阳电子、中微子、中微子和其它质点，总共七种以上。

理论计算表明，假如核内含有从其中飞出的所有质点，则核将是极不稳定的。但是实验证明，实际上这些质点都是从核中飞出，而且核是极稳定的。

在很长一个时期内，科学家不能解决原子核的结构问题。直到1932年以Д.Д.伊万诺科为首的一批苏联科学家才提出了质子-中子原子核学说的基本原理。这学说在目前获得了卓越实验证明和普遍的承认。

从质子-中子学说观点来看，原子核仅由两种质点——质子和中子所组成，其中不存在其他质点。核内的质子数等于周期系中元素的原子序数，而中子数等于原子量与原子序数之差。例如，普通氢的原子核是由1个质子所组成，氦——1个质子和1个中子，氦——1个质子和2个中子，锂——2个质子和2个中子，铷——27个质子和31个中子，铀235——92个质子和143个中子，铀238——92个质子和146个中子等所组成。图5所示为氦(a)，

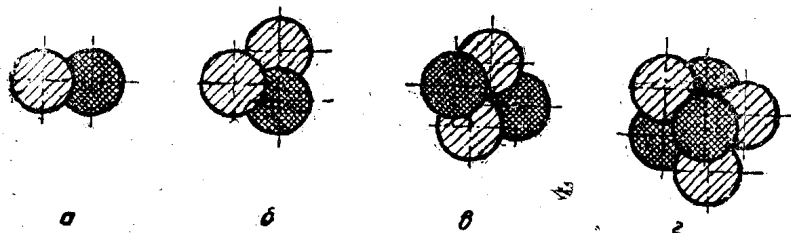


图5 原子核略图

a-氦；b-氦；c-锂和r-铷。

氦(6)，氮(7)和鋰(9)的原子核。

核內物質密度为每立方厘米1.2亿吨。这就是說，假如一个立方厘米內都是原子核的話，它的質量就有1.2亿吨！由此可見，質子和中子在核內距离极小(約为 10^{-13} 厘米)。

質子和中子在核內不是始終不变：它們由于能量和电荷的交換而相互轉变。因此科学家認為核是由某些同一种的質点——核子所組成。

核子可能处在不同形态：質子和中子是核子可能存在的两种形态。从前科学家認為核子是最簡單的質点，并且利用其他質点轟击的方法測定核子的直徑(1.5×10^{-13} 厘米)。現代更精確的實驗表明，核子直徑为上述数值的三分之一(0.5×10^{-13} 厘米)。根据对这些新的實驗結果的分析，科学家得出結論，認為核子具有复杂的結構。单独的核子能放射和吸收特殊的質点——介子(为电子質量的数百倍)，結果核子被介子云所圍繞(正像原子核被电子圍繞一样)。

在从前的實驗中采用低能量的質点进行轟击核子，这些質点从介子云上彈回。實驗所得到的是核子和介子云一起的直徑。在現代的實驗中采用高能量的質点进行轟击，这种質点冲破了介子云，同时从核子內部反射回来。實驗所得到的核子直徑小了三分之二。

总之，不仅原子和原子核具有复杂的結構，而且核子也具有复杂的結構。核子是由一定直徑(0.5×10^{-13} 厘米)的核所組成，这核为介子云所圍繞。介子云的直徑(1.5×10^{-13} 厘米)为核的直徑的三倍。这便确証，B.И.列宁的天才預言：“电子也象原子一样，是无穷无尽的”。

核子在核內相互作用的結果，导致核力和核子能的产生。

§3 核子能的产生及其計算

从基本的观点来看，核子能的发生原因可以解釋如下，大家都知道，带有不同电荷的两种物体互相吸引。这种引力是由于带电体所造成的电場的作用力引起的。电場具有能量，带电体依靠这种能量互相接近，互相吸引着。該能量的存在可用这种方法証实，当移开相近的带电体时，我們必須花費能量，进行作功。能如同物質一样，具有不連續的結構——它是由被称为量子的极微小的能的質点所組成。

核子自身能够造成所謂核場，核場的量子是介子。如果利用某种方法使核子接近，以便介子云相互接触，則介子場发生作用，于是核子相互吸引，同时生成原子核。一般地說来，核子間有核力吸引着。

对核力及其发生的原因的研究还是很不够的。大家都知道，为达到上述的目的，要完成所谓电核独立性的研究，即是核力与质点电荷无关，在阳电质点、阴电质点和中性质点间有核力作用着，并且它们始终是引力。电荷独立性指明，核力不是电力。它们既不属于磁力，也不属于万有引力。核力具有特殊的性质并且仅仅在距离很小，约等于核子直径的情况下，才能在原子核内核子之间起作用。

其次，大家都知道，核力具有巨大的数值，它们与核子间的距离有极大的关系。由核力决定核内物质的巨大密度。

核子在核内不是处于静止状态：它们在进行振动，这便导致核子间距离的改变。间距稍微的减少，便引起核力的急剧增加。核子相互激烈地“撞击”而引起相互转变，质子转变成中子或者中子转变成质子。可以比喻说，这时，被称为介子的物质块乃与核子脱离。介子可能带有阳电荷或者阴电荷，数量上等于电子或质子的电荷。如果从中子中飞出阴介子，它就转变成质子。如果从质子中飞出阳介子，它就转变成中子。介子可能相互结合，生成新的质点，它们从核内飞出而引起蜕变。核子振动愈快，则核内反应就愈强烈。

如果采用这样的质点，即它的具有足够克服核力的能量，对原子核进行轰击的话，那么由于这局外的质点进入核内，核子的振动便急剧地增加。这便加速核内蜕变，导致新的质点的产生和辐射的出现（人为放射性），有时还引起原子核的分裂。

由于核内核子的核引力，引起核子能，通常称为原子能。为了测定这种能量的数值，研究以下的例子。地上的石块具有能量。只要试图将石块举高就很容易证实这一点。举起石块需要做功，克服吸引力。假如我们把石块抛开，超出地心引力范围以外的话，这时所消耗的功，等于处在地面时石块的能量。

由两个核子组成的氦核内集中的能量等于将一个核子分离到另外一个核子的核子场范围以外所消耗的功。换句话说，核子能等于将原子核分裂成单独的核子所消耗的功。为了求得这种能量或功，科学家根据物质质量与能量相互联系的规律，写成公式：

$$E = mc^2, \quad (1)$$

式中的 E ——能量， m ——质量， c ——真空中的光速（其值30万公里/秒）。

该规律表明，巨大的能量与物质有关。1克物质中集中 9×10^{10} 尔格的能量。将数值代入上式后，可以证实：

$E = 1 \text{ 克} \times 9 \times 10^{20} \text{ 厘米}^2/\text{秒}^2 = 9 \times 10^{20} \text{ 克厘米}^2/\text{秒}^2 = 9 \times 10^{20} \text{ 达因/厘米} = 9 \times 10^{20} \text{ 尔格}$ 。又因 1 尔格 = 10^{-7} 焦耳，所以结果得出 9×10^{13} 焦耳。都知道 1 千克米 = 9.8 焦耳。

因此，1 克物质中含有 9.2×10^{11} 千克米的能量。如果物体质量为 1 公斤，则其中蕴藏的能量可以由下列方法算出。因为物体重量 $P = mg$ ，式中的

g ——重力加速度，所以质量 $m = \frac{P}{g}$ 工业用质量单位。代入公式得出：

$$E = \frac{1 \text{ 公斤}}{9.8 \text{ 米/秒}^2} \times 9 \times 10^{16} \text{ 米}^2/\text{秒}^2 = \frac{9}{9.8} \times 10^{13} \text{ 千克米}$$

$$= 0.092 \times 10^{13} \text{ 千克米} = 9.2 \times 10^{11} \text{ 千克米}。$$

因为物质能量与其质量有关，由此可见，物质能量的改变应当伴随着质量的改变：随着能量的增加，质量增加，反之随着能量的减少质量减少。例如，1 公斤水加热到 100° 时多出 47 亿分之一克。炮弹在静止中为 720 公斤，在以 500 米/秒的速度运动时获得质量增益为百万分之一克。这是因为被加热的水分子和运动的炮弹所引起的，它们比水在 0°C 时或者炮弹在静止时具有较大的能量，因此质量也较大。如果物质运动速度低于光速运动，则质量的变化是极微小的，实际上我们觉察不到。

在原子世界里可以观察到另一种情景。前面已经指示，放射性质点以极大的速度从核中飞出，同时具有巨大的能量。在这种情况下，从核内飞出的质点将大大地超过在核内时的质量。

以电子作例子仔细地加以研究。电子的质量在静止时为 9×10^{-28} 克。

按照定律 (1)，电子具有能量 $E = mc^2 = 9 \times 10^{-28} \times 9 \times 10^{20} = 81 \times 10^{-8}$ 尔格。如果电子以 2×10^8 公里/秒的速度运动(从原子核内飞出的乙种质点)，

$$\text{则它将具有动能增益 } E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{9 \times 10^{-28} \times 4 \times 10^{20}}{2} = 18 \times 10^{-8} \text{ 尔格}。$$

$$\text{电子在运动的全部能量 } E_1 = E + E_k = 81 \times 10^{-8} + 18 \times 10^{-8} = 99 \times 10^{-8}$$

$$\text{尔格。根据定律 (1) 质量 } m_1 = \frac{E_1}{c^2} = \frac{99 \times 10^{-8}}{9 \times 10^{20}} = 11 \times 10^{-28} \text{ 克，因而电子}$$

在运动中的质量 m_1 比原来电子的质量 m 增加，其数值 $\Delta m = m_1 - m = 11 \times 10^{-28} - 9 \times 10^{-28} = 2 \times 10^{-28}$ 克。

如果同样的电子将以 4×10^8 公里/秒 (4 万公里/秒) 的速度运动，则

它的动能为 0.72×10^{-8} 尔格，而全部能量为 81.72×10^{-8} 尔格。这种能量与质量 9.08×10^{-28} 克相应，即是电子以40000公里/秒的速度（巨大的速度）运动时质量只不过增加 0.08×10^{-28} 克。

这就是我们为什么说，质点或物体的运动速度增大时，质点的质量或者物体的质量的变化只在接近光速（300000公里/秒）时才显著。仅仅是在原子世界，质点运动速度接近光速，这种效应才可以测到。

由此我们可以作出以下推论。假定某元素的原子核，其质量为 M_N 。核由质子和中子组成，它们的质量我们不是在核内测定而是当它们以巨大的速度运动时在核外进行测定。假定测出一个质子和一个中子的质量，分别乘上质子和中子个数，然后相加，我们便得出组成核的全部质点的质量总和 M_q ，根据上述道理质点的质量总和将大于核质量 M_N ，其数值 ΔM ：

$$\Delta M = M_q - M_N \quad (2)$$

该原理在物理学中称为质量亏损，并可以再加说明。

核内质子和中子之间具有巨大的核力吸引着。要分离它们需要做功，分离所消耗的能量（功）并不消失，而是以飞散的质点的能量保存起来（能量守恒定律）。可见，质点质量根据质量能量相互联系的规律，应该是大于原来质点在核内时的质量。

根据质量亏损和质量能量相互联系定律进行测定核子能的数值。兹以氦原子核为例来研究计算方法。氦核是由两个质子和两个中子所组成。质子的质量为1.008，中子的质量为1.009规定单位。质点质量的总和 $M_q = 2 \times 1.0008 + 2 \times 1.0009 = 4.034$ 单位。

氦原子核的质量 $M_N = 4.003$ 单位。可见，质点的质量大于核的质量为 $\Delta M = 4.034 - 4.003 = 0.031$ 单位。规定单位以克表示时等于 1.66×10^{-24} 克。质量差 $0.031 \times 1.66 \times 10^{-24} = 5.2 \times 10^{-26}$ 克。根据质量能量相互联系定律将差数和光速 3×10^{10} 厘米/秒代入公式，我们便测出氦原子核的核子能为 $5.2 \times 10^{-26} \times 9 \times 10^{20} = 4.68 \times 10^{-5}$ 尔格。在核子物理学中采用特殊的能量单位——电子伏特。1电子伏特 $= 1.6 \times 10^{-12}$ 尔格。通常还采用更大的单位——百万电子伏特来量度。用该单位量度，氦原子核的核子能为28.21百万电子伏特。

总之，为了计算核子能必须测定质点质量的总和和原子核的质量，求出它们的差数，然后乘上光速的平方。

目前采用这种方法进行计算一切化学元素的核子能，其中某些元素列在表1内。