

原子核物理学

海森堡著

科学出版社

原子核物理學

海森堡著

馬振玉譯

科學出版社

W. HEISENBERG
NUCLEAR PHYSICS
PHILOSOPHICAL LIBRARY
NEW YORK 1953

內 容 簡 介

本書深入淺出地扼要介紹原子核物理學的基本知識，大部分偏重於講述原子理論的發展歷史和原子核物理學的主要原理，最後介紹原子核物理學的研究工具及原子核物理學的實際應用。書末並附一篇關於第二次世界大戰期間德國研究原子能技術的情況的報告。

原 子 核 物 理 學

海 森 堡 著

馬 振 玉 譯

*

科學出版社出版 (北京朝陽門大街 117 號)

北京市書刊出版業營業許可證出字第 061 號

科學出版社上海印刷廠印刷 新華書店總經售

*

1958年11月第 一 版

書號：1514 印張：5

1958年11月第一次印刷

開本：850×1168 1/32

(滬)1000—8.604

字數：179,000

定價：(10) 0.90 元

序

本書係在原先的一系列講演的基础上，爲愛好自然科學，尙熟悉一些物理概念，但缺乏理論物理訓練的讀者們寫的。這些講演是在德國電工學會主持下進行的；根據它的明確要求，在講原子核物理學之前，先對原子物理學的歷史，以及原子結構與原子核結構的現代知識，作一簡短介紹。顯然，不可能從這簡短的概述裏獲得關於原子核物理學的一個徹底瞭解，不過它至少可以爲對後面的（原子核物理學）講演的瞭解打下基礎。本書在原子核物理學的講述方式上和其他論述這一題目的通俗書籍略有不同，本書係以原子裏的過程及其反應的理論爲開端，而以實際應用作爲結束。同時，爲使有關這方面的理論易於瞭解，主要不靠數學，而是藉助於例示模型和徵引一些較廣泛知悉的有關現象作爲類比。原子核物理學採取這種方式較許多其他自然科學部門更爲相宜。不過，這種方法顯然有其天然的局限性，爲了對於全部複雜關係的整體獲得更深透的瞭解，數學的表述當然是不可缺少的。在這一意義上，如欲對原子核物理學進行徹底研究，現有許多優良著作，可資參考。本書只在第七章論述了研究原子核物理學所用的一些儀器裝置；第八章，也就是最末的一章，則論述截至目前爲止已獲成功的實際應用。

自從本書第一版在第二次大戰期間出版以來，關於原子核物理學領域中的巨大發展，尤其是直到那時仍被限制在交戰國秘密實驗室內的那些有關原子核的技術發展，屢有報道。這些新的發展都在講述原子核物理學應用的最末一章裏，作了扼要的論述。此外，只是在戰後獲得的或發表的發現，則散見於本書其他各章節內。

在德文版以後出現的現在，這個英文版可能引起興趣，在於它偏重原子核物理學的歷史和原理，而不很注意其最近的發展。在

本書寫成之後，更是在 1948 年本書重訂版之後，原子核物理學無論在原理方面或者在技術應用方面，都已取得了巨大發展。所以書內有些內容，現在對許多讀者來說，或許是極為平凡的，有的部分甚至肯定是過時了，因為新發現改變了它的面貌。在這新版裏，原子核的壳層結構應佔中心地位，因為通過梅爾-哥伯特 (Mayer-Göppert)、海塞爾 (Haxel)、詹森 (Jensen) 和休斯 (Suess) 的工作，大大簡化了我們對於原子核的認識。在核力的論述方面，應當提及近幾年來所發現的一切新型介子，以及它們的相互作用的方式。但要把原子核物理學在目前情況完全包羅在一本簡短著作裏，是完全不可能的。所以，本書對於這門需要更多、更廣泛的研究的原子核物理學來說，還是可以作為一個初步介紹。

在本書末的附錄中，刊載於一篇關於德國在第二次大戰期間所發展的原子核技術的報告。這篇報告是 1947 年在“自然” (Nature) 雜誌裏發表的。因為國外很少有人知道這篇報告，故重新把它披露於此。

海森堡於哥廷根，1952 年 9 月。

目 錄

第一章	從古代到十九世紀末的原子理論	1
	I. 古代哲學中的物質和原子	I
	II. 截至十九世紀末的近代原子理論	4
第二章	分子和原子	12
	I. 分子結構	12
	II. 盧瑟福的原子模型	18
	III. 元素的周期系	29
第三章	放射現象與核的構造單元	32
	I. 放射現象	32
	II. 人爲核嬗變	38
	III. 原子核的構造單元	41
第四章	原子核的正常狀態	49
	I. 核的結合能	49
	II. 核的結構	57
	III. 核能的三個類型	59
第五章	核力	66
	I. 核場的一般性質	66
	II. 核力作爲交換力	70
	III. 核力的飽和	75
	IV. 核的穩定性	76
第六章	核反應	82
	I. α 輻射	82
	II. β 發射體	88
	III. 其他類型的自發核嬗變	91
	IV. 人工感生的核嬗變	92
第七章	原子核物理學的工具	101
	I. 探測和觀察的方法	101
	II. 核嬗變的產生程序	106

第八章	原子核物理學的實際應用.....	112
I.	為有益目的原子能的開發.....	112
II.	鈾裂變和鏈式反應.....	116
III.	鈾反應堆.....	118
IV.	核反應所造成的物質的升值.....	121
V.	人造放射性物質作為示踪物.....	123
VI.	人造放射性物質在化學方面.....	124
VII.	人造放射性物質在生物學和生物化學方面.....	128
VIII.	人造放射性物質在醫學方面.....	130
IX.	穩定同位素的用途.....	131
附錄：	原子能技術應用的研究在德國.....	133
附表		143

第一章 從古代到十九世紀末的原子理論

I. 古代哲學中的物質和原子

原子核物理學是最近發展的物理學中幾個分支之一。“核”這個名詞約在 40 年前首先由盧瑟福 (Rutherford) 提出，而對原子核的詳細認識則不過才十五年的光景。但物質的原子結構這一概念，也就是說，存在有某些構成一切物質的最小的、終極的、不可再分的基本構造單元這樣一種想法，須回溯到古代哲學，而且是由希臘哲學家們在 2500 年前作為一個大胆的假說提出的。如欲對近代原子理論有所瞭解，最好研究一下原子這個概念的歷史，以便熟悉一下現已在近代物理學中有了豐碩成果的那些概念的起源。因此，下面以原子核物理學為敘述對象的講演，要從原子理論簡史的概述開始。

一切物質的最小、不可再分的基本構造單元這一概念起初是在關於“物質”、“存在” (Being) 與“生成” (Becoming) 的概念的鑽研裏發展起來的，這些概念的鑽研表徵了初期的希臘哲學。正當古代哲學黎明時期，我們發現公元前六世紀中居住在米勒脫 (Miletus) 的泰來士 (Thales) 的一個重要述說，他說：水是一切東西的根源。正如尼采 (Nietzsche) 所闡明的，這句話裏表達了哲學中三個最主要而基本的思想：第一是一切東西的起源問題；其次，提出了一種要求，即這問題的解答要合乎理性而不求助於神話或神秘主義——認為一切東西的起源必求之於實物中，如水中，而不求之於生命中，在當時，沒有比這概念更為明顯的了；第三，它是一種公設，認為把一切事物最後歸結到一個原理必然是可能的。在這個述說裏，泰來士首次表明了整個宇宙係由基本物質所構成的，這種見解，雖然在當時，“物質”一詞肯定地不能理解為我們今天給與它的純實質的意義。

泰來士的門生安納克西曼德(Anaximander)，也在米勒脫居住並授徒，在他的哲學裏，他把唯一基本物質這一概念用一種基本兩極性，即“存在”與“生成”的對立(antithesis)性這個觀念來代替。他辯解道，如果只應有唯一基本物質存在的話，則這無窮盡的、均勻的物質就會充滿宇宙，從而也就無以解釋現象的繁複多樣性了。而且爲了這個原因，則“變化”與“生成”必將從一切東西的那個不可捉摸的元始基素裏來產生。安納克西曼德似乎認爲上述“生成”的過程就是這個渾然無別的“存在”的某種退化式降貶，也可以說是一種逸出，最後所付的代價是返還於無形無性的境界中去。

在赫拉克烈特(Heraclitus)的哲學裏，“生成”的概念取得首要地位。在他看來，動的東西——火——是基本元素。巴門尼德(Parmenides)的教義也是以一種基本兩極性，即“存在”與“非存在”爲其中心概念的。巴門尼德也認爲宇宙萬象是由兩種對立原理的作用和反作用的結合而成的。

在泰來士以後約一世紀的安納薩哥拉(Anaxagoras，大約生活在公元前500年)，主張把現象世界明確地轉移到更爲唯物的觀點上。他假定存在着的基本物質多至無限；它們的相互作用產生了形形色色的世界過程。在他的觀點裏這些基本物質在大得多的程度上具有純粹物質元素的性質；他設想它們本身是永恆的、不可毀滅的，而且他認爲現象的變化和順序只是由於它們隨機地參合在一起運動而產生的。

大約十年之後，恩培多克(Empedocles)認爲作爲萬物“元始根源”的有四種元素：地、風、火和水。他認爲萬物的元初狀態是由元素的渾然無別、純勻的混合所構成，由“愛”而結成永恆極樂的狀態，“憎”則要使之彼此分離，從而演成變幻多端的人生戲劇。

這種唯物主義的顯著傾向由於與恩培多克同時的哲學家羅西泊(Leucippus)和羅西泊的門生德謨克里特(Democritus)加以提倡而達到了最高的發展。“存在”與“非存在”的對立性，在羅西泊的教義裏變成了“盈”與“虛”的對立性。“盈”所代表的概念本身表

顯爲終極的、不可再分的粒子，即“原子”，它們之間除虛空外一無所有。原子就是純粹的存在，永恆的、不可毀滅的，但既然有數目多至無限的原子，所以純粹的存在，在某種限度內，可以重複無限次數。這樣歷史上第一次宣揚了存在着最小終極的、不可再分的粒子，也就是原子，作爲一切物質的基本構造單元的觀念。這樣一來，物質概念實際上變得分解爲兩個輔概念：即，原子和原子運動所在的虛空。在從前，人們認爲空間好像爲物質所充滿，好像爲有形物質所撐開的那樣，而絕對空間是不可想像的。但在這時空虛的空間却被賦予了一個很重要的職能：由於它使原子的各種排列和運動成爲可能，它變成了幾何學和運動學的承載媒介。

雖然認爲原子在空間中具有一定的位置、也有形狀，並進行某種運動，但是除了這些純幾何性質以外，再沒有被賦予以任何其他屬性了。原子既無顏色，也無氣味或者味道，至其爲人們的器官所感覺的性質以及其變化和突變，則假定爲是由原子在空間中的運動和位移所產生。“恰如喜劇和悲劇二者都可以用同樣字母表中那些字母去書寫出來一樣，宇宙萬象就認爲是同樣原子的不同位置、不同運動的產物”。德謨克里特說道，“一種東西只不過顯得有顏色，只不過顯得甜或苦而已。惟有原子和一無所有的空間才有真正的存在”。

原子理論的基本觀念爲以後的希臘哲學家們所接受，而且作了部分的修正。柏拉圖(Plato)在他的“泰密阿斯”(Timaeus)對話一書中，曾把這些概念和畢達哥拉(Pythagoras)的數的諧和理論調和起來，並把元素土、風、火、水的原子去和一些對稱體，例如，立方體、八面體、四面體和二十四面體、等同起來。伊壁鳩魯學派(Epicureans)也接受了原子理論的主要概念，並把自然的必然性這一概念附加了進去，這概念在後一個時期的自然科學裏起了重要作用。根據這種理論，原子既不像擲骰子那樣，亂投亂擲在一起，也不像受到所謂愛或憎那樣的力而起運動，而是它們的運動軌道決定於自然規律，或者說，是由不顧一切的必然性的作用所決定的。

自此以後，古代的原子理論無論在古代的哲學方面或者科學方面，都沒有獲得再進一步的發展。

II. 截至十九世紀末的近代原子理論

以上所述一切發展都出現於少數幾個世紀中。到兩千年過去之後，這些發展才又爲人們所回憶，並且才有另一思想家接受了這些古代思想而把它們加以發揚光大。古代後期，尤其是中世紀的時候；亞里斯多德 (Aristotle) 的哲學思想被認爲是一個無爭辯餘地的基礎，而且由於基督教的見地，對於實在的看法改變到如此的程度，以致物質的自然界長期以來引不起人類的注意。

× × × ×

使這被忽略的思想傾向重新復活起來的第一位哲學家是法國人伽桑基 (Gassendi)。這位神學家兼哲學家於 1592 年生於普羅凡斯 (Provence)，1655 年歿於巴黎。他和伽里略 (Galileo) 及開普勒 (Kepler)，是同時代的人，因此他親眼見到自然科學復興的初期成就。大約就在這個時期，這荒蕪了將近 2000 年的土壤又爲科學知識的進展重新肥沃起來。

新自然科學的初期代表人物，包括伽桑基在內，反抗了亞里斯多德的權威，而轉向古典時代的其他哲學家。正是這樣，伽桑基接受了德謨克里特的教義，並立即給以一個完全唯物的形式。他也主張世界是由終極的、不可再分的、小到看不見的單位或者原子所構成。和德謨克里特一樣，他認爲宇宙萬象是原子各式各樣排列和運動的產物。已經自然出現了一種看法，以爲物理現象，藉助於原子理論，可以由更具體甚至可以說更平凡的方式而得到瞭解。因此，水與酒的混合物可以比之於兩種不同型的沙的混合物：沙攪拌得如此均勻，以致兩種顆粒完全混和在一起，而且純以統計的方式按純機會分佈着。水和酒的原子，對於漫無秩序、不能分離的混合來說，適與沙粒相對應。不僅如此，自然出現一種看法，認爲物質的聚集形態，雖然不像我們目前所瞭解的那樣清楚，照樣可以由原子理論來解釋。今天我們知道，在“固態”水裏，也就是冰裏，原子

好像一隊排成行列的士兵那樣緊密地聚集着。它們在“液態”水裏也是緊密地聚集着，但是處在無秩序的狀態中，並作無秩序的運動。最後，在水蒸汽裏，原子（或更正確地說，某些原子集團，我們稱之爲分子的），猶如一羣果蠅，運動於彼此相隔很遠的距離之內。

這種想法也爲其他學者所承認，並突飛猛進地應用於整個物質世界。對希臘的學者來說，原子概念仍然是認識世界、解釋一切實際事物的手段。不過現在它已經成爲只是瞭解粗糙的、無生命的物質的手段罷了。

另一個科學家我們所要提到的是英國人波義耳（Boyle, 1627—1691）。他是一位化學家兼物理學家而不是哲學家。他的主要成就是關於氣體的理論。他發現這樣一個規律：氣體在一定溫度時，其壓強和體積的乘積永遠是一個恆量。化學受惠於波義耳也還由於一些其他重要發現，特別是由於他那以近代思想所介紹的關於化學元素的概念。古代希臘學者早已把元素的概念和基本自然現象——靜與動、地與火——聯系在一起，但波義耳却以完全唯物的方式把這一概念和化學過程聯系起來。化學能够使不同的物質彼此互變，波義耳的疑問是：自然界中存在着多至無限的均勻物質究竟是由何種物質所組成？而且，這些不能再被分解的、並以各種方式爲一切物質所由構成的元素究係何物？這些問題都是從波義耳以前多少世紀的煉金術家所提根本不同問題中發生出來的。煉金術是從這種根本觀念發展起來的：即，每種物質到最後都會還原成爲一種基本物質，而且任何物質、任何類型的物質，至少原則上，都有可能變成任何其他物質——例如，水銀可變成黃金。無如在這方面所有一切努力均屬徒然；這種嬗變永遠不可能以化學方法來實現。似乎物質在這一意義上——當用化學手段處理時——顯然不是均勻的，而必然是有不能用化學過程來進行彼此互變的基本物質存在着。自從波義耳時代以來，一個整系的基本物質，或者元素，對着今天所知道的約有五十萬種均勻化合物而存在，已經成爲一個盡人皆知的常識問題。化合物的數目大大超過了基本元素的數目。雖然如此，這元素的數目仍然大得難以使人

相信它們是物質的終極、不可再分的構造單元。當然，波義耳所知道的，只不過是目前九十六種元素中的少數幾個而已，儘管如此，他對化學的目的和任務作了十分明確的表述，他說：“我們所要作的在於決定，究竟用化學方法能把物質分析成爲何種基本物質，而且這些基本物質都是什麼”。因此我們知道，他的化學元素與德謨克里特的元素：地、風、火和水，是毫無共同之點的。

一個世紀之後，出現了一位近代化學的真正奠基者，拉瓦錫 (Lavoisier)。他生於 1743 年而以一個法國革命的受難者歿於 1794 年。他對於科學的永久貢獻是關於定量化學基礎的奠定。他是最先正確解釋燃燒過程的。直到那時，人們一直相信，任何物體在燃燒的時候，都有一種所謂燃素這種東西釋放出來，所以，物體燃燒以後一定會變得輕些。拉瓦錫却採取了相反的看法，認爲燃燒是一個元素與氧的結合，因此，物體必然變得重了一些。實驗證明，他的理論是正確的。同時，他完成了一件極關重要的事項：他鼓勵了化學家們去探討由化學變化所引起的質量變化。

現在我們把拉瓦錫於 1774 年所表述的，而且幾年以後一變而成爲化學家們公共財富的這一定律敘述一下：即，質量守恆定律。拉瓦錫早就主張，在每一化學變化中，相關物質的全部質量是保持不變的——這意味着，被轉變了的物質，其總質量在轉變後稱得的和在轉變前稱得的恰好相等。這定律的發現和表述標誌着近代化學的實際開始，而且僅在短短幾年中，它變成了波義耳的化學和伽桑基的原子理論之間的橋梁。

1792 年，德國學者瑞希特 (Richter) 發現了化學元素往往按照一定的數量比例相化合而成爲化合物。我們不可能恰好使任意數量的氫和任意數量的氧相化合而成爲水：氫和氧必須永遠以 1:8 的比例相化合而成爲水。否則就會有未起變化的氫或者氧剩餘下來。這倍比定律以後由道爾頓 (Dalton) 提高到化學基本定律的地位，而且不久，它使化學和原子理論有了密切聯系。道爾頓以更爲精確的形式敘述了這一定律，並給以一個幾何解釋。

最爲重要的就是這個幾何解釋。我們可以拿一個實例來說明

它。按照近代術語，當氫和氧相化合而成爲水時，我們必須把這過程理解爲兩種元素的最小質點——原子——在一個比較高級而複雜的單位裏，一個水分子裏的相互結合。我們現在能够理解，一個分子是由單個原子所組成的幾何結構，而且一個水分子是由兩個氫原子和一個氧原子所組成的物體。這種看法使得倍比定律一目了然。因此，我們名之爲水的這個化合物由氫和氧原子的比值 1:2 表徵了出來。

於 1803 年所提出的關於原子化合成分子而能以幾何方式來說明的道爾頓理論，獲得了進一步的發展，而且幾年之間，便被提高到一個成立的科學假設的地位。早在 1811 年，阿弗伽德羅 (Avogadro) 提出了一個大胆的假說，從而奠定了我們今天所熟悉的原子化學理論的基礎。他指出，同體積的一切氣體，在同一溫度同一壓強的條件下，含有相同數目的分子。雖然這假說尚有待於實驗的證明，但不久它便成爲測定原子量的綫索，而且也爲道爾頓的原子理論奠定了一個鞏固而永久的基礎。如果一定量氣體所含有的原子或分子的數目是已知的，則一個單獨分子的組成，例如，一個水的分子是否會有一個氧原子和兩個氫原子，就能够正確地予以表出。

這樣就爲原子的重量或者原子的質量比值的定量測定鋪平了道路。雖然我們對於原子在任何一個時刻所含有的絕對數目有所不知，但在同一溫度同一壓強的條件下，同一體積的氣體含有相同數目的分子，則是可以肯定的，而且這已是足夠的了；因爲這把關於原子和分子的質量比值的情況提供了出來。

此後不久，瑞典科學家柏基拉斯 (Berzelius) 測定了許多元素的原子量，並就分子由單個原子所構成的方式發展了一些極爲明確的理論。柏基拉斯也對分子內把原子結合在一起的本性進行了研究。一種元素的一個原子和另一種元素的一個原子相結合，與此結合力有關的原子價這一概念也是由他提出的。在研究這個力時，他斷定這力必然是電性的。

約在 120 年以前的原子理論的概況可以作如下的總結：數目

龐大的化合物可以分解為數目較少的化學元素，這些元素在當時雖然遠非全部，但許多是已知的。這些元素的原子，其質量比也能精確地為我們所知道，例如，氧原子的質量約為氫原子的 16 倍，氮原子的質量約為氫原子的 14 倍。不過在這方面仍然存在着許多有待於彌補的缺陷。原子的絕對大小以及其在一定體積內的數目的數量級，還是一無所知的。我們所知道的，只是在同一溫度同一壓強的條件下，相同體積的一切氣體擁有相同數目的分子。就正確認識來說，一個原子，正如德謨克里特所想像的那樣，仍然被認為或許像飛揚於日光中的一粒塵埃那樣大，或者也許是無窮之小。同樣，對於原子的形狀以及原子與原子之間的作用力，也是毫無所知的。關於後一問題只能望風捕影地亂猜亂想而已。不僅如此，在化學方面，人們都知道原子是物質的最終極的構造單元——也就是說，用化學手段和方法可表明的最小單位——至於這些化學原子是否可以利用其他方法再被分割或者彼此相互轉化，則無人知道。

這裏有一個發現，蒲勞脫 (Prout, 1785—1850) 於 1815 年首先從它得出一項重要結論的，對原子的絕對不可再分說實際上提出了反駁。蒲勞脫拿當時已知的原子量——主要是一些輕元素的——都幾乎是氫原子量的整數倍這件事實作為他的推論的依據。根據這個事實，他的看法是：一切原子都是由氫原子所構成。既然一個碳原子大致 12 倍於一個氫原子的重量，而一個氧原子 16 倍於一個氫原子的重量，那末碳原子必然是由 12 個、氧原子則由 16 個氫原子所構成。因此，氫原子必然是所有一切物質的唯一的、終極的構造單元。這種主張將近一百種不同元素都有存在的假說，一向認為是難以接受的。因為我們果真相信自然界的均一性的話，那末很明顯，基本元素的數目要比這少得很多才好。

不管蒲勞脫的假說是多麼迷人，它畢竟幾乎完全被忽視了一百多年之久。它被遺棄的主要原因是：重元素的原子量沒有被證明為近於整數。雖然如此，這假說的確含有一粒極關重要的真理種籽。以後我們將會見到，它以一種修正的形式在近代原子核物

理學中起了重要作用。

原子理論裏的一個新紀元是由法拉第 (Faraday, 1791—1867) 引入的，他把原子理論與電的理論結合在一起。原子理論之受他的惠，是由於一個非常重要的定律：即，在由電——由電解——所引起的化學變化中，轉變了的物質，其數量永遠與一定的電量聯系着。此外，法拉第發現，由一定電量所轉變的物質，其質量與所謂“當量”，因此，對最簡單的情形——單價物質的——來說，與該物質的原子量關係着。這發現說明電也具有一個這樣性質的原子結構：一種化合物的每個原子或者分子永遠與一個或者多個電的原子聯系着，雖然聯系的方式究竟如何，在當時還沒弄清。這是早在1848年由韋伯 (weber) 指出的。這自然而然地闡明了，何以同量的電永遠與同量的物質——也就是說，與相同數目的原子——聯系在一起。目前，“克分子”和“克原子”都習慣上作為基本質量單位來用。任何物質的一克分子，其多少就是該物質稱得的克數正等於其分子量的數值，一元素的一克原子，其多少就是其自身稱得的克數正等於其原子量的數值。因此一克分子的氧 O_2 (分子量:32) 等於 32 克的氧氣，而一克原子的氧 O (原子量:16) 等於 16 克的氧*。單價元素的每個克原子，根據電解，都與 96520 庫倫的電量聯系着，而多價元素的一個克原子則與該電量的相應倍數聯系着。

另一進步出現在氣體理論的領域裏，這氣體理論是由麥克斯韋 (Maxwell)、波爾茲曼 (Boltzmann)、尤其是克勞修斯 (Clausius) 的努力，提高到精密科學地位的。通過這些科學家的研究工作，氣體由運動迅速的分子——與一羣飛蟲有些相像——所組成這一概念，按照嚴密數學原理，獲得了一個鞏固基礎。

1865 年給我們帶來了一項極關重要的新成就：那就是洛喜密脫 (Loschmidt) 對於原子大小的初步測定（這當然還只是大致的），因而也就是對於一定體積所含有分子數目的測定。洛喜密脫和以前的梅爾 (Mayer) 一樣，用氣體的內摩擦來作研究，並由於他

* 根據原子量的物理標度，氧同位素 O^{16} 的原子量為 16.0000。

的前輩的研究結果，他獲得了關於原子大小的一個初步綫索。他的結果仍然不够準確，但是他得到了正確的數量級。人們正確地知道原子的大小，到現在只有四十年的光景。爲了對原子的大小獲得一個具體概念，我們可以這樣說，把大約一千萬個原子逐個排起，使成一條直綫，則這條直綫僅有一毫米長。所以，單個原子是完全看不見的，而且也不可能直接予以觀察。就數量級來說，它們要比日光中的飛塵，德謨克里特認爲可以與原子相比擬的，小到無限的程度了。

在這以後，電學領域中又出現了一個重要發展。通過法拉第的發現，電的原子的存在似乎有望，不過在當時，人們僅僅知道電的原子是和化學元素的原子聯系着，而不是以自由的形式來存在的。電的自由原子，也就是不爲一般物質原子所束縛的電原子，是由希道爾夫(Hittorf, 1824—1914)在陰極射綫，(高度稀薄氣體放電的結果)裏發現的。希道爾夫研究了陰極射綫在磁場中所發生的偏轉，他發現，按照偏轉的大小來計算移動於陰極射綫中的質點其電荷與質量的比值是可能的。自洛喜密脫以後，單個原子的原子量是已知的，而且根據法拉第的發現。電原子的大小也能大致地予以計算，因此處在自由狀態中——在陰極射綫中——的電原子所聯系之質量的大小，就能從上述的比值來決定。根據最近測量的結果，這質量約爲原子中最輕，也就是氫原子的質量1840分之1。

這些自由電原子叫作電子，這個名稱是首先由史唐納(Stoney)提出的。

對電的原子來說，一個重要事實是我們找不到像化學元素的原子所具有各種各樣的質量。電子永遠與同一的質量聯系着，這情況完全符合於對自然界均勻性的要求。

電子以某種方式作爲原子的一個組成部分這一觀點，在以後幾年中，逐步得到了發展。最令人感到奇怪的是：我們一向只能觀察到負電，作爲電子，處於自由狀態中，至於正電則永遠與物質的原子聯系着。這說明，負電實際上是原子的一個組成部分。因此，