

萬 有 文 庫

第 二 集 七 百 種

王 雲 五 主 編

物 質 與 量 子

(下)

茵 菲 爾 著

何 育 杰 譯

商 務 印 書 館 發 行

子量與質物

(下)

著 謝 菲 函
譯 孟 寶 何

書 齋 小 學 科 教 社

編主五雲王
庫文有萬
種百七集二第

子量與質物
冊二

The World in Modern Science:
Matter and Quanta

究必印翻有所權版

中華民國二十五年三月初版

原著者

L. Infeld

譯述者

何育杰

發行人

王雲五
上海河南路

印刷所

商務印書館
上海河南路

發行所

商務印書館
上海及各埠

*D六二五

徐

(本書校對者朱仁寶)

第四章 原子核

在本世紀，關於原子構造之知識，逐漸增加。吾人不再以原子爲不可分裂之質點；且知其中有一核，原子之質量，幾乎盡聚於此，此外有行星式電子依圓形或橢圓形軌道繞之而運行；又知原子核不僅含有質子，并含電子；電子雖能更變核荷，因而更變整個原子之特性，但對於原子之質量，更變極微。

核之構造若何？此爲現代物理學中首要問題之一。此時關於此門知識，極不完備；無數問題，尚待解決。但現在所知者，較之數年前已增加不少。此部分之物理學，近來可謂無年不有顯著之進步。在最近的將來，原子核構造問題，定將成爲物理學之主要問題，猶數年前之於原子構造。原子之外部構造，由其光譜而呈露；現在有一大批現象，可確定其與原子核之構造有深切之關係，此時物理學企圖制一原子核構造之畫圖，卽以此類現象爲基礎。許多著名科學家致力於此問題，其中最

傑出者，無疑的爲圓橋大學 (Cambridge University) 之堪文迪須實驗室 (Cavendish Laboratory) 室長拉率福特。

氦原子核及物質之毀滅

梅特萊甫之表，揭示各元素原子之相對的重量。氦原子之質量爲 1.0072 單位，此單位雖小，但係確定。氦原子之質量，即可從上數計算而得。氦之原子核爲四個質子與兩個電子所合成，電子質量極微，可略而不計，則氦核之質量應四倍於氫原子之質量，即：

氦原子質量應爲 $4 \times 1.0072 = 4.03$ 。

試將此數與梅特萊甫表中量度而得之數相比較，吾人見表中所列者爲：

氦原子質量 = 4

爲何有此歧異乎！此係一個嚴重的困難。因最後裁判必須根據量度，故吾人不得不解釋何以氦原子之質量爲 4.00 單位，而非 4.03 單位。欲覓解釋之途，吾人須從相對論所設立之質量與能量

之關係上着想。吾人已知能量所代表之質量極微，故質量爲比較巨大能量之所在。二者之關係，上面已經見過，即

$$\text{能量} = \text{質量} \times \text{光速} \times \text{光速}$$

在聯合四質子二電子而爲氦核之過程中，質量少去 0.03 單位。最簡單之假定爲構成氦核之時，有一光子射出；0.03 單位之質量，變爲輻射能而散佚於宇宙間。與此微小質量相當之能量，比較巨大。故出放之輻射必甚硬，亦即出放之輻射必有極短之波長；因上面已經說過，抱有極大能量之光子，與極短波長之波相當也。由一簡單的計算，即可知構成氦核時所出放之輻射，波長尙短於 γ 射線，而在宇宙射線之範圍中。愛丁頓 (Eddington) 設想，在宇宙中，如星際之巨大空區，中有散佚之碎片物質，或星體之內部，其溫度較在地球上之所能有者高至多倍，在此類遙遠之區域中，可發生地球上觀察不到之現象；質子電子構成氦核之過程，或在此類地方進行。依愛丁頓之見解，宇宙射線之產生，即在物質毀滅之時。質量之一部分，毀滅而化爲極硬之輻射。愛丁頓之見解果不誤乎。關於宇宙射線，現在所有之知識，尙極淺陋，欲以之解答此問題，相差遠甚。此時尙不知宇宙射線是

否如 γ 射線，爲一波長極短之電磁波，抑係微粒輻射，如一羣速率近於光速之電子。就最近之發現言，似微粒假說較爲合理。在最近的將來，宇宙射線問題，必有新線索發現；因之物質毀滅問題，不久亦將得有新知識。

但此處，吾人仍繼續上述之思想，將依從金斯 Jearns 想像一個過程，較前更趨於極端——即電子與質子之結合。依金斯之意，電子質子之結合，與一電荷之毀滅相當。質量消滅，電子質子之能量，全部消滅，化爲極硬之輻射，投入空間。與此輻射相當之波長，較構成氦核時所出放之輻射猶短，光子之能量遂亦較大。如宇宙射線果屬電磁輻射，則其所含光子之能量，可與物質之全部毀滅相當，不僅於物質之部分毀滅相當。如金斯之假說不誤，則劃分物質與輻射之界線不能存在，因物質可全部或部分毀滅而化爲輻射也。因此種過程有存在之可能，遂使吾人對於另一疑難問題，得到一個線索。太陽爲能之源泉——事實上，爲地球上一切生命之源。每秒鐘不知出放若干噸之輻射，散播於巨大之空間。是則太陽冷卻，應比較甚速。蓋最簡單之假定，似爲太陽出放之輻射，盡取償於其自身之熱能；但如是，則太陽之年齡不能甚大，恐尙不到二十兆年。然依地質學家之計算，即地殼

之構成，至少亦須一千兆年；所以不能假定太陽之輻射僅取償於其熱能。對此疑難問題，將何以解決之乎？吾人不能討論此問題亦不能列舉所有解此問題之一切研究工作。此處所欲注意者，祇爲與物質構造問題有關之部分。愛丁頓曾提出一大膽而奇特的假說，謂每百個氫核中，祇要有幾個合成氦原子，則由此物質部分毀滅所解放之能，足以使太陽維持其溫度不跌至若干兆年。如從金斯設想太陽所出放之能，由於電子質子結合時物質全部毀滅所供給，則太陽之年齡當更大。

此問題開始時，卽布滿待解之謎，至今日依然如是。所可驚訝者，吾人研究原子，而能獲到支配宇宙間星體定律之了解。

前說氦核構成時，大量之能因之出放。茲可作一與此相反之斷語：氦核分裂而爲電子質子之時，須有大量之能加於其上；故氦核爲一極穩固之物理系。因其極穩固，故能抵抗別的電子質子之碰撞而不生影響；是皆由於其質量虧損之故。後面討論其他某種過程時，此事將更明瞭。

同位素

氦核爲一穩固之構造。往後，當可看到他元素之原子核構造中，氦核爲「高級組織」之一。氦核亦稱爲 α 質點。在比較複雜的原子核中之質子電子，聯結而成 α 質點（組合緊密不受外來影響之實在物）。

茲假定原子核由質子電子所構成，且核內至少有一部分質子電子聯結而成 α 質點。

α 質點，或氦核，含有原子量4，電荷2。

試以氧（原子序數8）之原子核爲例；因其原子量爲16（ $\equiv 4 \times 4$ ）單位，核荷爲8（ $\equiv 2 \times 4$ ）倍質子之電荷，故其核含有四個 α 質點。依同理，碳（原子序數6，原子量12）之原子核含有三個 α 質點。由是可知元素之原子量應不能與整數相差甚遠。與整數微異之故，可用氦核之例解釋之——即此類元素構成之時，有一小部分質量變爲輻射能而放出，同時使原子核抱有穩固性。但一觀梅特萊甫之表，即感到一嚴重的困難：表中有數個元素，原子量與整數差異甚顯。例如氦（原子序數10），其原子量爲20.17，此數與整數有顯著的差異。吾人將如何解釋之乎！如果氦核爲五個 α 質點所合成，其原子量應爲 $4 \times 5 = 20$ 。如果氦核爲一穩固的組織，則構成之時，將有一部分質

量輻射，是則原子量尙應微小於 20 。又如氦（原子序數 2 ），其原子量爲 39.4 ，距整數更遠。吾人將何以使此類顯著的差異與前之假定（即假定核爲質子電子所構成，其一部分組織 α 質點）相合乎。答此問語之前，須先考慮另一問題。

定元素之特性者，吾人已知其爲核荷；元素之化學性質，光譜特點，以及核外行星式電子之組織，俱由核之電荷而定。再取上舉之例，如想像氦（原子序數 2 ）之原子核祇含有五個 α 質點，則氦之原子量當爲 $5 \times 4 = 20$ ，核荷當爲 $2 \times 2 = 4$ 。但吾人可想像氦核之構造與此略異。設想在氦核中添上一個質子一個電子——此時氦核中有五個 α 質點，一個質子，一個電子——核之電荷與前無異，仍祇十倍於質子之電荷。元素之特性（即其化學性質）亦與前無異。祇有原子量與前不同，此時爲 21 而非 20 。（核中添了一個質子）吾人又可設想在氦核中添上兩個電子兩個質子，元素之性質仍與前無異，惟原子量此時變爲 22 。大概的言之，吾人可想像屬於同一元素之原子，其核荷同，其原子序數同，而其原子量可各異。此處，又可見現代物理學將原子量之地位降低，因可以想像數個各異之原子量與同一元素相當也。於此有一重要問題焉，即自然界是否真

有原子量互異之同一元素存在。此問題已由阿司登 (Aston) 獨出心裁之動人的試驗，得一肯定之答語。

欲知阿司登實驗之原理，可設想有一羣游離的氯原子——即氯原子經他電子或他原子碰撞，而失其一個行星式電子者。氯原子本爲中和，此時則帶一電荷，與質子之電荷相等。在電場磁場作用之下，一羣游離氯原子將在確定之路線上運動。路線之形狀，不僅由氯原子之速率而定，尙須視其質量之大小。依據此理，阿司登創製一精緻複雜之儀器，稱爲質譜儀。在光學中，分光鏡分析各色，將光之各部分分開；在此處，阿司登之質譜儀，負一類似之職務。

設有一羣在運動中之氯游子（即游離的氯原子），如果其質量不盡相同，則在電場磁場作用之下，阿司登的質譜儀能將彼等路線分爲若干條，各不相混。路線之條數，等於羣中游子之原子量的個數。如果全羣氯游子之質量盡屬相同，則路線祇有一條，不能分析，是與光學中之單色光相似。如果羣中游子之質量不盡相同，則路線即被分析作若干條。是則阿司登之實驗，即可斷定氦，或氫，或其他元素是否爲同一原子量之原子所合成，抑係原子量互異之原子混合物。其結果如下：氦

爲原子量不同之混合物。在氦氣（原子序數 10）中，有原子量等於 20（五個 α 質點）之原子，有原子量等於 21（五個 α 質點加上一個質子一個電子）之原子，有原子量等於 22（五個 α 質點加上兩個質子兩個電子）之原子。氦（原子序數 17）爲兩式原子所合成；其原子量俱可用整數表示，卽 35 與 37。易言之，氦——或氫——爲同位素之混和物，因原子量互異之同一元素，吾人稱爲同位素也。氦爲三個同位素所合成，氦爲兩個同位素所合成。由是可知何以梅特萊甫表中之原子量可有距整數甚遠之值。用化學方法所測定之原子量，乃諸同位素混合物之平均原子量。如氯之原子量爲 35.44，因其兩個同位素，原子量 35 與 37，在混合物中之比率約爲 3:1，又如氦，爲三個同位素之混合物，具有原子量 20 之同位素，佔混合物之百分之八十八，是卽氦的平均原子量距 20 不甚遠之理由。

如對於其他元素作同類之試驗，吾人當見同位素之存在是普遍的。但亦有無同位素之元素，不過爲數極少；譬如氦，至現在尙未見有同位素發現。有數個元素，同位素之數甚大；譬如錫（原子序數 50）有同位素十一個，其間原子量相差有大至百分之十者。在一四五頁之表中，吾人臚列幾

個元素之同位素。表中各元素的同位素原子量之排列次序，係依其在混合物中數之多少而定，最多者，列在第一。

於此有一問題焉，爲何一元素之原子量各處所遇者俱相同？易言之，爲何每一元素，同位素之混合，恆爲同一之比率？譬如氦，氮，鎳，錫等，無論在何種情形之下，其原子量爲何總不變？此問題現在尙無滿意之解答。尙有一問題，即能否將一元素之各同位素分開？譬如氦，能否將其兩個原子量互異之成分，從其混合物中分出？如能之，則雖懷疑之人，亦可使其信有同位素之存在。但此類試驗，極端困難，因每一元素之各同位素，化學性質絲毫無異也。然現在已得有幾個明確的結果，不過在極窄的限度之內。現在吾人已能將氦之兩部分分離——一部分之原子量較平均原子量爲低，其又一部分之原子量則較平均原子量爲高。雖結果中之數字，相差極微，但足以證明兩種原子量互異之氦的存在。同位素之理論，亦即因此而完全徵實。此外尙有一疑問，即是否有同位素配合比率互異之元素存在？此問題，往後將另有討論。此處，祇須提及下述之事實：現在已發見有原子量互異之鉛。原子量互異，即顯出其同位素之配合比率互異。但就大體的言之，每一元素之同位素配合比

第 一 表

第四章 原子核	元素	原子序數	同位素個數	同位素原子量
	鋰	3	2	7-6
	硼	5	2	11-10
	氖	10	3	20-22-21
	鎂	12	3	24-25-26
	矽	14	3	28-29-30
	硫	16	3	32-34-33
	氯	17	2	35-37
	氫	18	2	40-36
	鉀	19	2	39-41
	鈣	20	2	40-44
	鐵	26	2	54-56
	鎳	28	2	50-60
	銅	29	2	63-65
	鋅	30	6	64-66-68-67-65-70
	鈷	31	2	69-71
	鎳	32	8	74-72-70-73-75-76-71-77
	硒	34	6	80-78-76-82-77-74
	溴	35	2	75-81
	氬	36	6	84-86-82-83-80-78
	鉀	37	2	85-87
	鈣	38	2	88-86
	鈣	40	3	90-92-94
	銀	47	2	107-109
	錫	48	6	114-112-110-113-111-116
	錫	50	11	120-118-116-124-119-117-122-121-112-114-115
	銻	51	2	121-123
	碲	52	3	128-130-126
	氙	54	9	129-132-131-134-136-128-130-126-124
	銻	58	2	140-142
	銻	60	3	142-144-146
	銻	80	7	202-200-199-198-201-204-196
	鉛	82	3	208-206-207

率是不變的。

氫的同位素之發現歷史，頗有興味。發現距今不久（1932）。所用方法，與發現其他元素之同位素的方法不同。所用之儀器，非阿司登之質譜儀而為尋常之分光鏡。

上面已經說過：氫出放輻射，其光譜中各線，組成線系；表示各線系波長之公式，含有黎德堡常數。吾人計算黎德堡常數之值凡兩次；第一次，假定太陽式之核靜止不動。第二次，棄此簡單之假定，而設想電子及質子繞彼等公共重心而運動，由是而得黎德堡常數之較確值如下：

$$\frac{\text{黎德堡常數之較確值}}{\text{黎德堡常數之近似值}} = \frac{1 + \frac{1}{1830}}{1}$$

設想氫亦有一同位素，并設想此同位素之核，由兩個質子一個電子所合成。是則核荷及原子序數與尋常之氫無異，惟核之重量加倍。波耳的原子模型及行星式電子之軌道，與尋常之氫亦幾無區別。但計算黎德堡之較確值時，吾人遇一極微之差異。氫的同位素之太陽式的核，較尋常氫核重二倍，故假定其為靜止不動，所生之誤差，較尋常之氫為小。（此種推理的方法，並非此處初用，前

在比較巴爾麥系與游離氫之第四系時曾用之。此處吾人得

$$\text{對於氫的同位素，黎德堡常數之較確值} = \frac{\text{黎德堡常數之近似值}}{1 + \frac{1}{2 \times 1850}}$$

$$\text{式中之分母爲 } 1 + \frac{1}{2 \times 1850} \quad \text{而非 } 1 + \frac{1}{1850} \text{。}$$

氫的同位素之巴爾麥系系限，較尋常氫之巴爾麥系系限，位置當略移。系中各線之位置，自亦略移。所移之距離，可從理論計算而得之。具有較重的核之氫原子，為數殆極微，故移位的諸線甚形淡薄。但諸線之存在，已由實驗徵實，不過在正常情形之下，似乎每數萬之氫原子中，祇有一個其原子量為2而已。氫的同位素之發現，即係用此方法。最近所謂「重氫」亦已提出。又水之分子含氫，故吾人應可得一種水，較尋常之水為重。此種重水，現在亦已得到。此為一最重要的發現，對於化學及生物學之將來發展，必有重大影響。

從上述之例，可知在某幾種情形之下，不用質譜儀之直接方法，用分光鏡亦可使吾人發現新

同位素，茲再舉一同樣有趣之事實：上面所曾討論之氦，吾人可用質譜儀方法，亦可用分光鏡方法，此兩種方法之原理，大不相同，而所得之結果完全一樣。

如同位素在混合物中爲量極微，則質譜儀方法不甚適用，有時遇質譜儀之直接方法不能得到結果時，可用分光鏡審察在已知譜線附近之淡弱的譜線以徵實同位素之存在。氧及碳之微量同位素之發現，即係用此方法。

茲將再討論梅特萊甫之表。依上所述，可知此表與現在所有之知識不合。表中之原子量，係同位素混合物之平均原子量。茲可想像將此表在三次空間重製；其法可用下述之例以顯之：譬如氦有三同位素。在氦之方格上，疊置三個籌碼。格中所有之籌碼，屬於同一名稱同一原子序數之元素。每一籌碼，代表一同位素。在最下面之一籌碼，代表混合物中最多之同位素，此處，即具有原子量 4.0026 之氦。在此籌碼上，記下原子量 4.0026 ；仿此，在第二個籌碼之上，記下原子量 3.9990 ；最上之一籌碼，代表混合物中最少之同位素。記下原子量 3.9962 。表中第五十方格（即錫及其十一同位素之方格）之上，須疊置十一個籌碼。如各元素俱依此法處理，將得一合於現在知識之梅特萊甫表在三次中的結構。

當見每一籌碼上，與原子量相當之數字與整數極近；由原子量不近整數所生之困難，因是得有解釋而消滅。

放射性

在前世紀，變金術家之幼稚思想，被視爲確定的過去之事；人無須再以科學研究此問題；科學已確切證明——當時，人皆以爲如是——元素不能變化，原子不可分裂。至本世紀，變金術家之問題復活，不過其形式與前大異。吾人不欲尋覓點金石，企圖從鉛或水銀而得黃金，如變金術家之所爲。吾人所欲研究之問題，範圍較此爲廣：變更原子核之電荷，因而變化元素，此事是否爲可能？往後當見此類的變金術在堪文迪須實驗室中，在拉率福特指導之下，已告成功。但所得之成績，比較「自然」本身所成就者爲極微。在放射現象中，吾人見元素能自動的變化。此爲一自動的過程，人不能加以任何影響；不能使之延緩，亦不能使之加速；不能使之減弱，亦不能使之增強。放射學在近數年中發展甚速；關於支配放射過程定律之知識，近數年來增加甚多。此處祇舉其現已確定之結

果，至於如何得此類結果之方法，將略而不述。

請再觀梅特萊甫之表。爲何元素之數適爲九十二？爲何表中元素，至鈾而止？表中最後之數個元素，構造似不穩固，易遭分裂變化之禍。佔據表中最後數格之一組放射性元素中，銻（原子序數 81）列第一。除 85, 87 兩個空格（與此兩個原子序數相當之元素，有否發現，此時尙成問題）不計外，從銻至表末，共有十個方格，爲放射性元素之所在；每一放射性元素有數個同位素，故總計放射性元素，數在四十以上。（嚴格的言之，此語顯不正確。表中祇有十格，元素之數，豈能高至四十。吾人已知元素之同位素不能視作另一元素，但說及放射性元素之諸同位素時，常泛泛的如說各異之元素。）

茲將對世上人口最多之中國，考慮其人民死亡率問題。中國有人口四百兆。研究此問題時，無須對其國內人民個別審查。在中國人中，吾人並無戚友。死者爲張三，或爲李四，非吾人所注意；吾人所欲知者，每百人中每年死亡若干人而已。此問題或亦可用下語表示之：此刻生存之中國人，過若干年以後，尙有一半未死？欲求此類問題之答語，必須用統計方法。吾人不能對每個中國人審察其

健康，以估計其生命之長短。吾人所用之手續，與此大異。從已知之統計數據，計算其死亡率，再作一不十分正確之假定，謂此死亡率不變，吾人遂得上述問題之答語。

對於放射現象，吾人所用之手續，與此有幾分相似。爲何此原子，不是彼原子，須遭分裂之禍？此事爲吾人所不知。吾人所用之方法，純屬於統計的。放射現象之特點，卽一放射性元素原子分裂，變成另一放射性元素，此另一放射性元素原子分裂，再變成他放射性元素，依次遞變，凡原子經一次分裂，元素卽遇一變化。放射性學卽研究此類變化之次序，及此類變化所遵之定律。

佔據梅特萊甫表中最後三格之元素爲

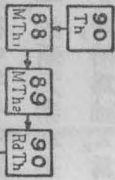
90—釷(Th)； 91—釷(Pa)； 92—鈾(U)。

此三個元素各爲一放射族之始祖，各爲一世系之起點。此三個世系具列於一五三頁中，形式上俱頗相似。茲將詳察此三個世系之一——鈾的世系。

鈾自始卽爲鈾族之始祖；係一耐久的元素，蛻變甚慢，但不能免，猶上面所說之中國人社會，在某一時刻，總有幾個鈾原子死亡。計放射性元素蛻變之快慢者爲半化期，卽一放射性元素原子個

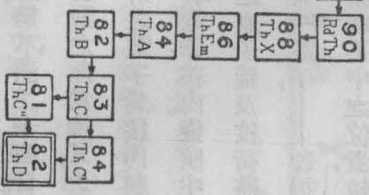
數減少一半所需之時間——即經過半化期的時間——放射性元素的質量有一半變化。鈾之半化期甚大，為四千五百兆年。經此長時期之後，二克之鈾方能減至一克。再經過四千五百兆年，此一克之鈾又少去一半——此時祇餘半克。放射性蛻變影響原子之最內部分，即原子之核。原子核為蛻變發動之地。鈾原子蛻變時，其情形何若乎？有一 α 質點，以高速從其原子核射出。上面已經說過：核中之質子電子有一部分聯成 α 質點。鈾原子當分裂之時，此類 α 質點有一個從其核中射出。其速率甚大，約等於光速二十分之一。吾人已知 α 質點較電子重 $4 \times 1850 = 7,400$ 倍，故射出之 α 質點帶有比較極大之運動能。從上所說，鈾原子核射出射一個 α 質點——即氦原子核。因而鈾原子之數逐時減少。在鈾之附近，則有氦產生。此事已直接的由分光鏡觀察完全徵實。氦核射出之後，所餘者不能仍為鈾原子。上面曾經說過多次：定元素之特性者為核荷。損失一 α 質點，不僅元素之原子量更變，最重要者，其原子序數亦因之而更變。原子量將作何變？更答語極簡單：原子量較前少一出射之氦的原子量——即減少四單位。原子序數將作何變？更答亦極易：原子序數減少 2，2 為氦之原子序數。鈾所產生之元素，稱為鈾 X。此元素在梅特萊甫表中之位置，自鈾後退二格即得——即

錳族

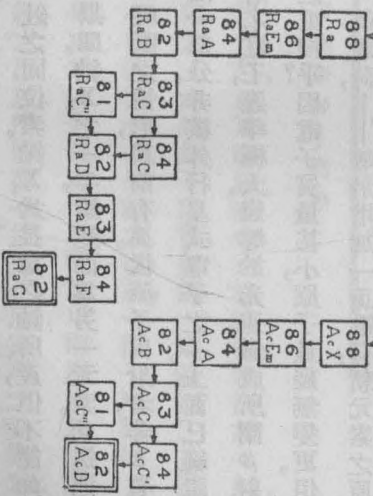
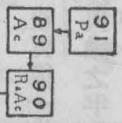


放射性能元素之系列表

錒族



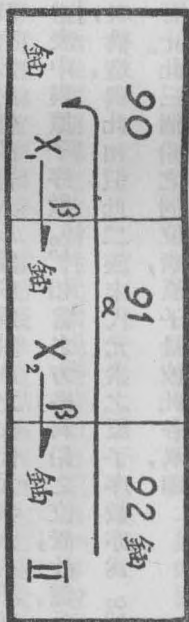
錒族



屬於原子序數 88 之方格，——故鈾 X_1 爲釷之同位素。鈾 X_1 爲長壽之鈾所產，但不能如鈾之長壽。其半化期比較極短，幾不滿二十四日。在此期間，鈾 X_1 之一半，蛻變而爲另一元素。此迅速之蛻變，其原因何在？此次發動之地爲鈾 X_1 之核，所經歷之情形，與前有異。從原子出射者，非 α 質點而爲電子。但須注意：此出射之電子爲核內組織之一部分，非核外行星式電子之一。上面已經說過：原子核不僅包含質子，尚有電子在內。從核中出射之電子，速率極大，幾等於光速，做成所謂 β 射線。電子從核內出射後，元素之原子量及核荷將因之更變乎？因電子質量甚小，原子量幾無變更。但原子序數因之而變，核中損失一電子，——即損失一負電荷，——等於增加一正電荷，新元素之原子序數當較前增一。故新元素在系中之位置，較其父高一級，較其祖則低一級。再後一代之情形將如何？鈾 X_1 所產之元素，稱爲鈾 X_2 爲鐳之同位素。其半化期更短，祇約一分鐘。與鈾之半化期相比較，一爲四千萬年，一祇一分鐘，相差何遠？鈾 X_2 分裂之情形，與其父相似，——即出放 β 射線（高速電子）而分裂。其所產元素稱爲鈾 II，原子量仍不變，而原子序數則加一，系中位置又升高一級；至是吾人重到出發時之位置。故鈾 II 爲鈾之同位素。因自鈾蛻變至鈾 II 時，中間有一度出放氦核，故其原子

量較鈾少四單位。茲將上面所述之變化，圖示於下：

第十三圖



鈾的世系表之一部分

所有此類變化，觀鈾之世系表（第一五三頁），即可明瞭。表中之縱箭標，示出放 α 射線之蛻變；橫箭標示出放 β 射線之蛻變。在各元素名稱之上者為原子序數，每遇一縱箭標（ α 射線之出放），原子序數減去2，原子量減去4單位；每遇一橫箭標（ β 射線之出放），原子序數增1，原子量不變。故在鈾之世系表中，吾人見起首的變化，由於 α 射線之出放；繼之以兩度 β 射線之出放（而至鈾II）。此後接連幾度變化，俱由於 α 射線之出放。中間有一度變化，所產生之元素為鐳（ Ra ，

原子序數 88) 鐳係波蘭科學家居里夫人 (Madame Curie) 所發現，為最強放射性元素之一。其半化期約為一千六百年。所產之元素為鐳射氣 (原子序數 89)。與梅特萊甫表比較，即可斷定鐳射氣為一鈍氣，其原子之構造，完成一外部電子層。鐳射線生命甚短，半化期約為四日。在鐳射線之後，接連經過兩度出放 α 射線之變化，吾人又遇出放 β 射線之變化，在梅特萊甫表中又復推進一格，此時吾人至鐳 C。鐳 C 原子中有出放 α 射線者，有出放 β 射線者，故鐳 C 蛻變所產之元素有二。此處，吾人初次遇到一放射性元素所產之元素不止一種。茲將討論鈾族之最後的一代，是為鐳 G。此時尚未發現鐳 G 具有放射性，故吾人以鐳 G 為鈾族之末代元素，永久不發生變化。鐳 G 之原子序數為 82，梅特萊甫表中與原子序數 82 相當之方格，為鉛之位置，故鐳 G 為鉛之同位素。

鈷及鐳之世系表，構造與此相似。此二族末代元素之原子序數，亦為 82，亦即鉛之同位素。故所有放射變化，至鉛而止。此三個鉛之同位素，原子量彼此各異，即

鐳 G—206; 鈷 D—208 鈷 D—207

尋常之鉛，為此三同位素之混合物，其平均原子量為 207.11。

地殼中有富於鈾之岩石，有富於釷之岩石。在此類岩石中，放射蛻變，不息進行，故除鈾釷外，必有蛻變之產物。鈾岩石中之鉛，爲鈾族蛻變之最後產物，其原子量是否果小於釷岩石中之鉛？從地質學上之研究：審察由各種岩石所得之鉛的原子量，知從鈾所得之鉛的原子量，實較小於從釷所得之鉛的原子量。

茲將上面所說之結果，再簡述之：放射性元素蛻變時，卽有氦核（ α 射線）放出，或電子（ β 射線）放出。發現此事實者爲拉率福特。 α 質點及 β 質點抱有巨大之能量，近數年來，物理學家曾竭盡實驗室之技能以製造一種儀器，俾可用人爲方法與氦核或電子以同等之速率，用此極複雜之儀器，使氦核或電子加速，吾人目的係欲得一效應，與放射性原子核中奇異機構所自然發生者相同。

從放射性原子放出之氦核，極易完成其原子之構造，祇須攝引兩個自由電子入其勢力範圍，使之在量子軌道上繞轉，卽得一完全的氦原子。故放射性元素附近，常有氦產生。

α 射線之放出，使元素之原子量減少，元素在梅特萊甫表中之位置，左移兩格。 β 射線放出時，

元素之原子量，不因之而改變，但梅特萊甫表中之位置，則右移一格。此兩個有名定律，在一九一三年，法央(Fajans)及少第(Soddy)幾乎同時發現。

從波耳學說以視上面所述之觀念，幾乎無須解釋。一九一三年研究原子構造方在開始之時，上面所述之觀念，大部分業已發現。關於原子及原子核構造之初步成績，吾人不得不歸功於堪文迪須實驗室中之先進。

上面已經說過：所有放射變化，至鉛而止；又在鈾岩石中吾人可得鈾族之鉛。由岩石中存在之鉛量，即可推算岩石之年齡：因放射性各元素之半化期，爲吾人所已知，故可藉之以計算產生某量鈾族鉛所需要之時間；岩石年齡，即可由此得一估計。其結果約爲一千四百兆年。故地球之地質年齡，在一千四百兆年以上。此例表示物理學之成功可使他門科學亦受其影響。物理學爲地質學，生物學，及醫學開闢思想及活動之新途徑。

原子核之分裂（以 α 質點射擊）

原子爲一甚小之實在物。上面已經說過：原子半徑在一厘米的百兆分之一左右。其中心之核，吾人想像之較原子尙小得極多。依現代物理學之物質觀念，原子核之半徑，約爲原子半徑數十萬分之一。故在太陽式的核與行星式的電子之間，有一極大的空洞區域，如行星系。此與吾人感覺所得之物質印象，相差何遠？吾用以寫字之桌——或較確的言之，現代物理學之桌的觀念——係一空洞之區域，中有物質（即質子及電子）散布，但非常稀疏。設有一能思想之物，較質子尙小，彼對於物質之想像，當如吾人之於星體羅列之天空——即一浩大的空區，有無數質點散布於其間。

從表面上觀之，似乎現代物理學能使變金術家之夢想不難實現。祇須於原子核中去一質子，即可得一新元素之原子。但吾人將如何到達原子核乎？能有法將核改變乎？變化元素，使舊時「元素不能變化」觀念永久入地之魔棒安在？在梅特萊甫表中，吾人能從其最後數格步入他格乎？即能否以人力改變尋常元素之原子核構造，如表內最後數格中放射性元素之自動的蛻變？於一九一九年，拉率福特首先舉行此類試驗而獲有成績。

一羣歐彈式電子射擊原子，使原子游離。抱有巨大能量之電子，能將內層——K層或L層——

——之行星式電子驅至原子範圍之外。但欲變更原子之核，則射擊物之質量及能量，俱須較此大得甚多。拉率福特之研究，即欲使重而有高速之射擊物以射擊原子。如射擊物之數甚大，其中必有數個（數雖極微）能擊中原子之心——即核。但從何處可得此類重而有高速之射擊物乎？「自然」卻有他的產物，適能供給吾人之所需。鐳或他放射質所出放之 α 質點，能量質量俱大，即可以之爲此類射擊物。 α 質點之質量，較電子的質量大7,000倍。拉率福特之試驗，即欲以鐳所出放之 α 質點射擊氦原子。中的之 α 質點，爲數當然極微。中的與否，純爲偶然之事。能近氮核使之分裂之 α 質點，百分數極小。分裂之情形將何若乎？被 α 質點擊中之核，其組織中有一小顆粒從核內擲出——即質子，亦即氫核。故以 α 質點擊氮，被擊中之原子即有一質子從其核中出射。吾人用此法遂能從氮而得氫！出射之氫核，本爲崩潰的氮原子之成分，此時各向散射。此現象可譬之於爆炸， α 質點猶投入於炸藥中心之一已燃的火柴。

其他許多元素，曾用同法試驗；以 α 質點射擊原子核，受試驗之元素中多數有質子出射。特別有可注意者爲鋁。從鋁核出放之氫核，能量較大於射擊之 α 質點——此結果，初視之似與能量不

滅原理抵觸。α質點之運動能量，似變爲出放的質子之較大的能量，但實際上並不如此。吾人會將此現象比之於爆炸，由一已燃的火柴所致使：α質點猶火柴，使元素之內部能量解放。所有多出之能量，其源實爲鉛原子之內部。此時鉛原子有一小部分之質量已變而爲質子之運動能量。

此類試驗，出入如是之大，吾人雖非懷疑，應以極小心之態度考慮之。上面所說之結果，是否可確定其爲原子核之分裂？氫原子是否確從被射擊之氣體而來，並非由於含氫的污物之存在？對於此類疑問，物理學家會作許多煩瑣工作，證明其確係原子核之分裂。吾人現在已能用人力產生放射分裂現象，毫無可疑之餘地。

頗有幾個元素，因α質點之射擊，出放質子，此處無須列舉。比較有意味者，爲此時用α質點尚不能分裂其核之元素。所有原子量大於 20 之元素，盡屬於此類，最輕諸元素中，如鋁及鈹，亦屬於此類。此外，氮、碳、氧亦顯出不受α質點射擊之影響。茲再討論此三元素之原子序數及原子量，即

元素： 氮 碳 氧

原子序數： 2 $6=2 \times 3$ $8=2 \times 4$

原子量： 4 12 = 4 × 3 16 = 4 × 4

從上面數字，即可知此三元素之原子核構造。碳核為三個 α 質點所構成，氧核為四個 α 質點所構成。 α 質點為堅穩之構造，鏷所出放之 α 質點的能量，尚不足以分裂此類元素之核。彼等能抵抗 α 質點之射擊而不為其所分裂，即足以證明在此類原子核中之質子，必聯結而為氮核。欲將彼等分裂，所需之能量，較「自然」所供給之 α 質點的能量，要大得甚多。

茲用上法以審察經 α 質點射擊時能出放質子之元素——即

氮——原子序數 7；原子量 14。

氮核之組織已認為

3α 核 + 2 質子 + 1 電子。

故其原子量為 $3 \times 4 + 2 = 14$ ，與量度所得之值相符；又從上式可得氮之原子序數為 $2 \times 3 + 2 = 8$ ，亦與已知之數相合。故在氮核中，除結成 α 質點者外，尚有質子存在。經外來的 α 質點與核之碰撞，一質子即從核內擲出。至於用以射擊之 α 質點，在碰撞後情形何若，數年前亦已有實驗解

答：即 α 質點滯留於被擊之核而不復出。故從氮原子，吾人得一氫原子，同時又得一另一元素之原子。氮原子將變成何元素之原子乎？吾人必須想像：從氮核中有一質子出放，同時有一 α 質點加入，故其結果，核之組織變成

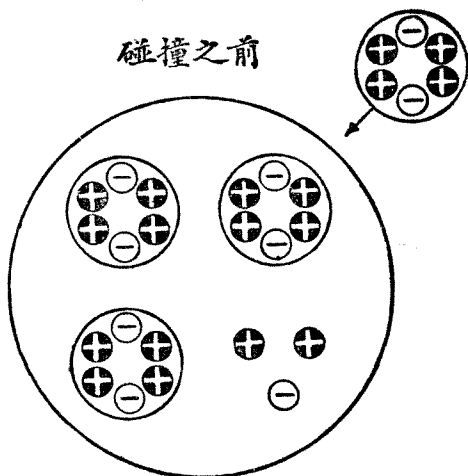
$4\text{氦核} + 1\text{質子} + 1\text{電子}$ 。

是則原子序數等於 $4 \times 2 + 1 - 1 = 8$ ，但原子序數為 8 之元素，吾人已知其為氧。故 α 質點之射擊，能使氮變為氫及氧。茲請考察其原子量。依核之組織，原子量應為 $4 \times 4 + 1 - 1 = 17$ ，但觀梅特萊甫之表，氧之原子量為 16，是亦無害。上面已經說過：用光譜分析方法，物理學家曾發現一個氧之同位素。此同位素之原子量為 17。在 12500 氧原子中，祇有一個其原子量為 17。氮所變成之氧，即此同位素。第十四圖係表示上述之過程。

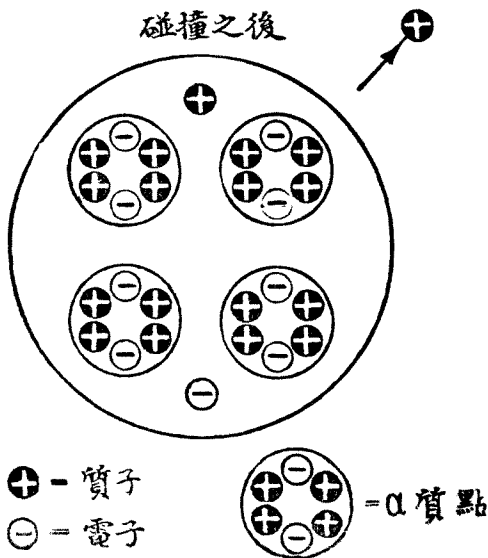
欲分裂各原子之核而探得物質最深之祕奧，必須設法得高速之射擊物，其速率須較「自然」所供給者大得甚多。氫核、氧核、碳核以及較重諸元素之核，俱非氫核所能分裂。如實驗室中能有法與 α 質點以一更近光速之速率，則原子構造之知識，當有豐富之進步。近數年來，在此方面已得有

第十四圖
氮核及 α 質點


碰撞之前



碰撞之後



⊕ - 質子
⊖ = 電子

 = α 質點

非常之成績，原子核構造之知識，在最近將來，必能大增。

原子核之分裂（以質子射擊）

試就一百物理學家，詢其對於近二年來實驗上之發現以何者爲最大，答語定不一致；如詢以近二年來最大之三個實驗爲何，則彼等必將齊聲列舉如下：（1）考克勞甫脫（Cockcroft）及華爾登（Walton）之以質子射線分裂原子核；（2）楷迪克（Chadwick）之發現中子；（3）勃蘭開脫（Blackett）及沃迦里尼（Occhialini）之發現正子。發現之地點，俱爲圓橋大學之堪文迪須實驗室；初次發表，俱在 Nature（註）通信欄中之一小簡，而全科學界爲之震動。甚至於尋常日報上亦登載此事，（但往往被改，致失其本來面目。）茲將依上述之次序，討論此三個發現。考克勞甫脫及華爾登之發現，與人爲的放射問題有最密切之關係。上面所述之拉率福特實驗，可用符號表示如下式：

原子核 + 用以射擊之 α 質點 = 另一種原子之核 + 被逐之質子

拉率福特之實驗，有兩個特點：（1）射擊物爲 α 質點，（2）從原子核逐出者爲質子。原子核之

人工的分裂，與放射性元素原子核之自然的分裂，其間有一根本不同之點，即前者吾人祇得質子，後者吾人祇得 α 質點，即氦核，（暫不顧及 β 射線。）考克勞甫脫及華爾登之實驗，與拉率福特實驗情形適相反。其原理可簡述如下：原子被質子射線所射擊而放出放氦核。用符號表示之，吾人得下式

原子核 + 用以射擊之質子 = 另一種原子之核 + 被逐之 α 質點

試取此兩個方程式而比較之，即可見其兩邊互易之處。茲將考華二氏之實驗，再行加詳分析。吾人已知鋰為最輕元素中之第三個，係原子量6及原子量7之兩個同位素的混合物，其平均原子量為6.94。與吾人所欲敘述之現象有關者，祇為原子量7之同位素。故下面所說，彷彿祇有此同位素成問題。（事實上，在鋰之混合物中，此同位素較原子量6之同位素為多，相差甚巨。）上面已經說過：輕元素中不受 α 質點射擊之影響者，鋰居其一。以 α 質點擊鋰，不能使之出射質子，似乎 α 質點之能量不足以分裂鋰核。實際上並不如此。吾人有一種較輕之射擊物，能量較小（用作射擊物之質子，能量較小，）但為另一種射擊物，用之以擊鋰，能獲一意外的新效應。

用作射擊物之質子，可在實驗室中由一簡單過程而得。以電子碰撞氫原子，使其行星式電子脫離，再使所餘之質子在一電場作用之下增加速率。用強烈之電場，可得到抱有（比較）巨大能量之射擊物。在所述之試驗中，此類質子之能量（用以加速之電場雖極強，較「自然」所給與 α 質點之能量為小。當此類質子射擊鋰時，每一擊中，原子即毀；因擊中之時，原子核即遭分裂——當有兩個 α 質點，抱有極大之能量，從鋰核出射。吾人將何以解釋此變化之過程乎？

鋰之同位素——原子序數 3，原子量 7

吾人可推得其核之構造如下：

鋰核 = 1 α 質點 + 3 質子 + 2 電子

從此式，得原子序數 3 (= 2 + 3 - 2) 原子量 7 (= 4 + 3) 與上相合。鋰為質子射擊，中之質子滯留核內，做成另一元素之原子核。新核之組織若何。與前相同，不過加一質子——即

1 α 質點 + 4 質子 + 2 電子。

但四個質子加上兩個電子，又成一 α 質點；故上面結果，可由下式表示之：

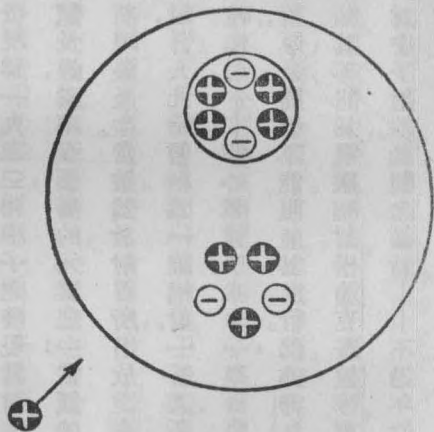
鎳核 + 氦核 = 2α 質點。

是即考克勞甫脫及華爾登實驗之解釋。從一鎳核及一氦核，吾人得兩個氦核！第十五圖即表示上述之過程。

此現象之能的方面，尤足動人。做成之兩個 α 質點，速率極大。人或以爲射擊的質子之運動能量，應等於散射的兩個 α 質點之運動能量。於此吾人得一奇異之結果——此兩個 α 質點之能量，較質子所投入之能量，大得甚多？前者可較後者幾大百倍，上面（在第一六〇頁中）討論鋁核分裂之時，吾人見出放之質子，能量亦大於射擊之 α 質點，但所差之量比較爲小。此處吾人首次遇到一個過程，能解放巨大之能量，能量之來源爲物質。用以射擊之質子，爲鎳核中構成氦核所短之一鏈環。但吾人已知氦核創生之時，質量減少，同時出射能量。在此處所述之實驗中，吾人遇到此類之創生，鎳核中有一小部分之質量，變爲 α 質點之運動能量。質量之減少，即保證所得之氦核，結構穩固。欲將此二氦核復變爲鎳核，所需之能量，較射擊的質子所抱者要大得甚多。質量之減少雖微，與其相當之能量則極大。此發現所展開之希望，何等濃厚！煤乎，石油乎，瀑布乎，吾人將無所用之。但吾人

第十五圖
鋇核及 α 質點

碰撞之前



碰撞之後



是否已得有門徑，能於最近將來，將存在每一碎塊之鐵，鋇，或其他物質中大量之能解放將來科學進步，能導吾人至若何程度，為吾人所不知。但此時欲以技術解放物質中之能而利用之，則相差尚遠。此事可譬之於獎券。如能中獎，所得自當萬倍。但有獎之號碼極少，每百兆號碼中祇有一個。質子射擊鋇時，每百兆質子中，祇有一個能擊中鋇核。所得獎款，由鋇核之「能幣」給付。但百兆個質子，

祇有一個中獎，爲數極微，其餘盡屬浪費。故利用物質中之能，此時尙純粹屬於理論的。其他元素亦曾經同類之試驗。有許多元素，被質子射擊時，亦見其有 α 質點出放。

中子

第二個重要發現，爲一九三二年中子之發現。當討論拉率福特企圖以 α 射線擊碎原子核之時，吾人曾見鈹，猶氦及鋰，爲不受影響的元素之一：當氦核射擊之時，不見其有質子出放。但對此元素繼續試驗，有一新現象產生。當鈹爲放射質所出放之高速 α 質點射擊時，其本身變爲一新奇的輻射之源。此類輻射，吾人此時暫稱爲「鈹輻射」。吾人所知之各種標識，對此俱不適用。此類輻射，非一種已知之微粒輻射，——非一羣質子，亦非一羣 α 質點或 β 質點。因其貫穿本領極強，故不能爲尋常物質的輻射。厚金屬板不能阻止其進行。然亦非 γ 射線一類之短波電磁輻射；有許多效應，此處無須列舉，俱顯其不能爲電磁輻射。楷迪克在拉率福特實驗室中研究鈹輻射，首先謂此係一種新射線。彼稱其爲中子射線。此觀念甚新——不過年餘——但已有豐饒之效果；以後或能使吾

人對於原子核之構造，可獲有許多新線索。

何謂中子乎？在氫原子中，一電子繞一質子而運行。電子軌道之半徑，在一厘米的百分之一左右。茲想像有一電子，繞質子運行。其軌道之半徑，較波耳的模型之半徑，短至數萬分之一。是則此組織對於電爲中和，其大小則與核相類。此卽中子之模型。在中子中，質子電子間之聯結，較氫原子強數百兆倍。故欲將中子分裂，——卽將電子質子分離，——所需之工，必較分裂氫原子時大得多。中子之質量，約等於質子之質量。嚴格的言之，中子之質量應微小於質子之質量；因中子爲一穩固的組織，當產生時（如氦核產生時），一部分之質量化爲能而出射也。從上所述，卽可知何以物質對中子爲透明（姑借用此字），何以一羣中子能貫穿厚金屬板。吾人視物質爲質子電子所合成，中有寬廣之空洞區域。原子核與行星式電子之平均距離，較中子大數萬倍，故中子在物質中進行，並無障礙；厚金屬板對中子輻射，完全成爲多孔的（姑借用此字）。因中子係中和的，故核及電子之電場，不能使其進行之路徑偏斜。

茲吾人將估度（如不算爲已知）中子出放時所有之變化。吾人先寫下

鈹——原子序數4，原子量9。

設 鈹核 = 2α 質點 + 1 質子 + 1 電子

則 原子序數 = $2 \times 2 + 1 - 1 = 4$ ， 原子量 = $2 \times 4 + 1 = 9$ ，

與上數相合，楷迪克假定在鈹核中之一質子一電子合成一中子；故上式變為

鈹核 = 2α 質點 + 1 中子

設以 α 質點射擊鈹核，中的之 α 質點（如前面數例）留在核內，但同時有一中子出放。吾人得表示此變化之方程式如下：

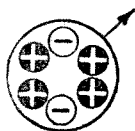
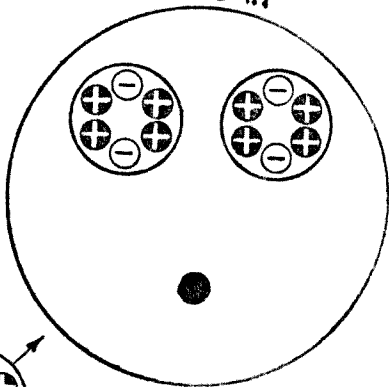
鈹核 + 用以射擊之 α 質點 = 3α 質點 + 出射之中子

由三個 α 質點所合成之原子核，——即原子量為 12 原子序數為 6 之元素的原子核——為碳之原子核。如果吾人所想像者不誤，則以 α 質點射擊鈹時，當得到中子射線及碳原子。第十六圖即表示上述之過程。

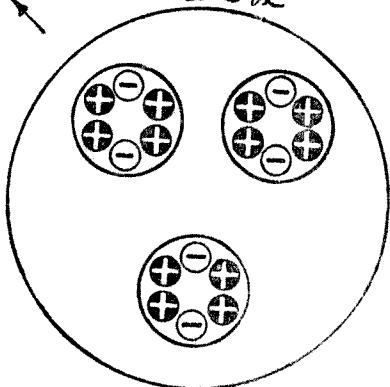
中子或實為核內組織之一部分；甚或核內之電子恆與質子合成中子。加一中子於核內，因核

第十六圖
鉍核及α質點

碰撞之前



碰撞之後



● - 中子

荷未曾變更，故元素之特性不變；但原子量則因之而變。故吾人得一結論：設有數元素，其原子核不同之處，祇為中子之數，則此類元素為同位素。

中子輻射，於他元素亦見之。此問題及其他關於原子核構造問題，預示吾人最近將來之實驗。

及理論之趨勢。

正子

茲將敘述第三重要發現——即一九三三年勃蘭開脫及沃迦里尼的正子之發現。

吾人已知電子質子爲物質之基本成分；彼等之電荷，其值相等，其號相反；質子之質量，較電子之質量約大1,850倍。但最近的科學發展，使吾人感覺現在情形不能如此語所述者之簡單。

第一，中子之發現，暴露原子核之一種新成分，爲從前所不知。中子實爲核的組織之一部分；但不帶電荷，在核內加一中子或減一中子，不能影響核荷，故不能變化元素，不過使之變爲另一同位素。

此外，尚有一物質的基本成分，現在方出現！是即正子。

火車經過時，即有蒸汽及塵土在後表示其進行之路線，電子或質子在韋爾孫(Wilson)霧室中高速進行時，亦留有經過之痕跡。霧室之原理，茲不敘述。吾人祇須知有此儀器，實驗物理學得以

攝取電子或質子遺跡之照片。可以研究彼等在外加的電場磁場作用之下所生之路線的變化；從其變化之程度，可以推測此類質點之速率與質量。

吾人已知放射質爲出放電子（ β 射線）及出放氦核（ α 射線）之源。設置韋爾孫霧室於放射質附近，即可見此類質點之遺跡；電子之遺跡與 α 質點之遺跡，形狀互異。欲「睹」電子質子之遺跡，非必須在放射質附近。儀器可置於任何地方。無論何處，無論何時，俱可見有此類遺跡，不過在放射質附近之處，其數特別加多而已。

產生此類遺跡之能源爲何？是爲宇宙射線——宇宙射線，各處俱能貫穿，地球上無論何處俱有之；有時與物質碰撞，發生現象，現象所留之痕跡，卽爲韋爾孫霧室中所觀察之質點遺跡。

美國之安特孫（Anderson）及圖橋大學之勃蘭開脫與沃迦里尼因此而得一新發現，使吾人對於物質宇宙之觀念，根本改變。彼等所發現者，爲上述之質點遺跡中，有數個非電子之路線，非質子之路線，亦非 α 質點之路線。在磁場作用之下，此類質點，宛若帶有正電元，但其質量，較質子小得極多。易言之，彼等宛若正電元，而具有與電子質量相等之質量。此新的物質主要成分，稱爲正電子。

或正子，（後面當見正子之發現，並非意外，因理論方面，已預測有正子存在。）

所以在物質宇宙中，吾人有：

負電元：

電子

⊖

正電元，質量同上：

正子

⊕

正電元，質量較上大1,850倍：

質子

⊕

無電荷之質點，質量微小於質子的質量：

中子

●

此物質宇宙的畫圖，可否略為簡化？能否假定質子為一中子與一正子所合成？是否有負電元，其質量與質子的質量相等？此為現在新問題中之數個，要求科學予以解答。

懷疑家於此將謂：吾人從前認物質宇宙中，僅有兩個主要成分，即電子與質子，但現在則謂除電子質子外，尚有正子與中子；然則以前所說，俱係依據祇有電子質子存在之假定，是否不誤？

人遇棘手的問題，往往將本問題撇開而言他，吾人亦將師此法，進而討論其他問題。

第五章 物質與輻射

支配物質輻射間相互作用之基本定律爲何？本章之目標，即欲對此作一答語，吾人上製圖畫中所留之主要裂口，亦將由是而補合。

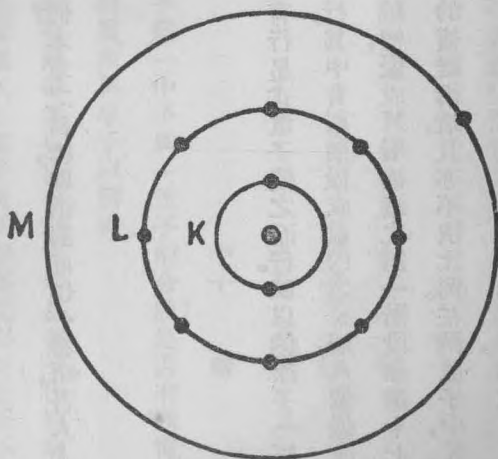
X射線

茲請重回至原子模型。原子中心爲一核，外有行星式電子繞之而行。試以鈉原子（原子序數 11）爲例：鈉原子有十一個行星式電子繞核而行，其中有兩個做成最內之K層；八個做成第二層，即L層；其餘一個，即第十一個，在原子外部單獨繞轉，做成M層構造之第一階段；如第十七圖所示。但須注意：此圖係一略圖，不能表顯原子之實際的複雜構造，且亦不依比例。在鈉原子中，K、L兩層之構造已完成。列在表中較後之較重的元素，原子構造較此尙爲複雜，M層之外，尙有N、O等層，或

已完成，或構造尙在開始。諸層成一序列，其名稱如下：

K, L, M, N, O, P, Q.

氦原子祇有K層；鈉原子有K層、L層及M層之第一階段。較重諸原子，層數逐漸加多。上面討論原子構造時，大部分係注意於游行外部而開始新層構造之電子。當此類電子從其正常軌道擲升能量較高之級後，跌回能級較低之軌道時，即為輻射之源；此類輻射，屬於可見的、紅外的、紫外的光譜範圍之內。上已說過：譜線係由原子之最外層而定，元素之多數物理性質、化學性質，亦由是而定；梅特萊甫表中同行諸元素之相似，係由於彼等原子外部構造之相似。原子外形能為決定元素之公有的物理性質之要素，



第十七圖
鈉原子簡略模型。

實一可訝之事。

關於在原子最內部分——即在核內——所發生之現象，上已略述。是爲自然的及人爲的元素蛻變時之放射現象。

此處，吾人遇到第一個重要裂口。吾人已知某數種現象，係由於原子之外部構造而定，某數種現象，由於核之構造而定，但原子構造中之已完成的諸層——即內部電子層，如鈉原子內之K層、L層——將如何？是否亦有現象由彼等負責往後，即可看到X射線能予吾人以已完成的電子層之知識，猶光波能予吾人以原子外部之知識。

茲在討論X射線如何起源及如何出射之理論以前，先敘述理論所欲解釋之諸現象。

X射線之存在，爲人所熟知。人皆知X射線能使照相片發生效應，能貫穿輕的物體，或薄的金屬片；見手骨之照片；吾人亦不以爲奇，因已知X射線在醫學上之應用。故關於X射線之存在，此處無須詳說；即關於X射線管之詳細構造，及研究X射線之各種實驗，亦無敘述之必要。吾人祇注意於此類現象之一重要的方面——即支配此類現象之諸定律。

在X射線管中，有一羣高速電子投射於一金屬板——假定其爲銅板——之上。金屬板——通常稱爲對陰極——遭此射擊，即出放具有貫穿本領之輻射，是即X射線。此爲X射線管之簡單原理，實際上所用者，構造極爲複雜。從對陰極出放之X射線，其本性何若乎？爲物質（電子或質子）之運動乎？抑係一種有繞射效應之波動（以一確定之速率傳播，並有一確定之波長）乎？當倫琴在上世紀之末，發現X射線時，即有此種問題發生。關於如何得到此類問題之答語，此處將不詳爲解釋。吾人祇須知：所得之答語，不但明白，而且確定！X射線（如光波）係一電磁輻射；與可見之光比較，所不同者，僅爲X射線之波長較光波波長短得甚多，故貫穿本領亦較強；其傳播之速率與光速絲毫無異。

對陰極遭高速電子射擊時，即成爲X射線之源——一波動輻射之源。吾人能使此種輻射通過一分光鏡，如審察光波時之所爲，將各波長之輻射分開，分爲單色的成分，得一X射線譜，如吾人得一白光的光譜或氫所輻射之光譜乎？後面，即可看到欲對極短之波如X射線，製一分光鏡，不能如對於可見之光製一分光鏡（用一稜鏡）之易。但在此處，祇須知：關於分光鏡製造之困難，已經

克服，X射線譜（即X射線分爲最簡單成分所得之譜）已經獲得。因屬於此譜之波，較可見光之波，短得甚多，故人目不能直接觀察，祇能利用其在照相片上所生之作用，紀錄之於一照相片之上。所得之譜，爲連續譜乎？抑爲線譜乎？研究可見光譜時，吾人知譜有兩種，一爲連續譜，一爲線譜。太陽的光譜，吾人已知其爲一連續譜，所有各色，具見於譜。稀淡之氫，氦，或其他氣體之原子光譜，俱係線譜，因彼等俱係與各波長相當之狹條所合成。X射線有連續譜，亦有線譜。茲先討論X射線之線譜，線譜之構造極簡單，且極明晰。

觀察X射線之線譜，當見其譜線攢聚成羣，羣之爲數，不止一個，吾人以K、L、M、N……字母標識之。每羣爲一組貼近之線所合成。（譜中，羣之名稱與原子中電子層之名稱，所用字母相同，並非無故，往後自知。）

設將對陰極之質料更易，譬如銅製對陰極，易以銀製對陰極，X射線譜中之羣，（X射線譜特狀，）將不見其變更，不過羣中各線俱依短波方向遷移而已。

可見光譜之特性，從某一元素至次一元素，即根本變易。譜之構造，大概俱甚複雜。經過許多科

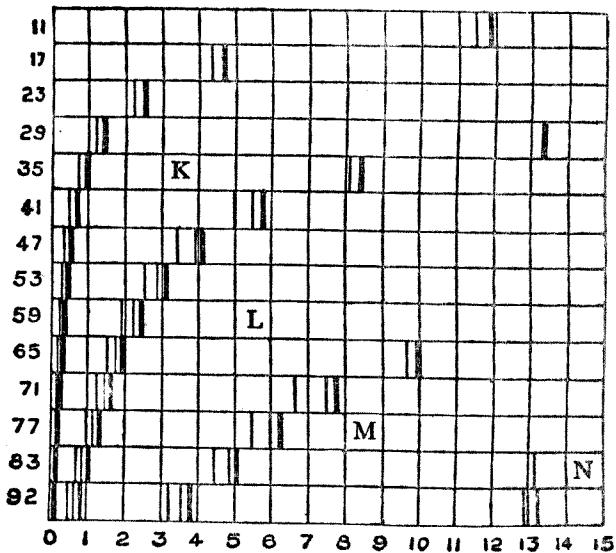
學家之煩瑣手續，始能將各線分編成系。祇梅特萊甫表中同行諸元素，方見其光譜之相似。至於元素之X射線譜，問題比較簡單得多。各元素之X射線譜俱相似。所不同者，祇較重元素之譜線較近於短波方面而已。X射線譜之研究，雖僅開始於一九一三年，而關於X射線譜此時所有之知識，卻遠過於研究較久之可見光譜。吾人之所以能得此高深而幾乎徹底之知識者，不僅由於X射線譜之構造簡單，亦由於在實驗所得之許多混亂事實中，有波耳學說以指迷耳。

試觀第十八圖。縱軸上之數字，為各元素之原子序數。圖中之第一個元素，亦即圖中之最輕元素，為鈉（原子序數11）。最後，亦即最重的元素，為鈾（原子序數92）。其間之數字，為重量介於鈉，鈾之間之數個元素的原子序數。試取原子序數為29之元素（銅）屬於此元素之橫線上，有譜線兩羣，即K羣及L羣。橫軸上之數字，係指波長，其單位為埃；故從圖可約計與各線相當之波長。如原子序數為29之元素，K羣各線之波長約為1.5埃，L羣各線之波長在兩個限數13埃及14埃之間。與L羣相當之波長，較與K羣相當者為長，故與L羣相當之輻射亦較軟。圖中銅之後為澳（原子序數35），其譜線亦有K、L兩羣，但俱向左移於短波的方面，即移於較硬輻射之方面。其

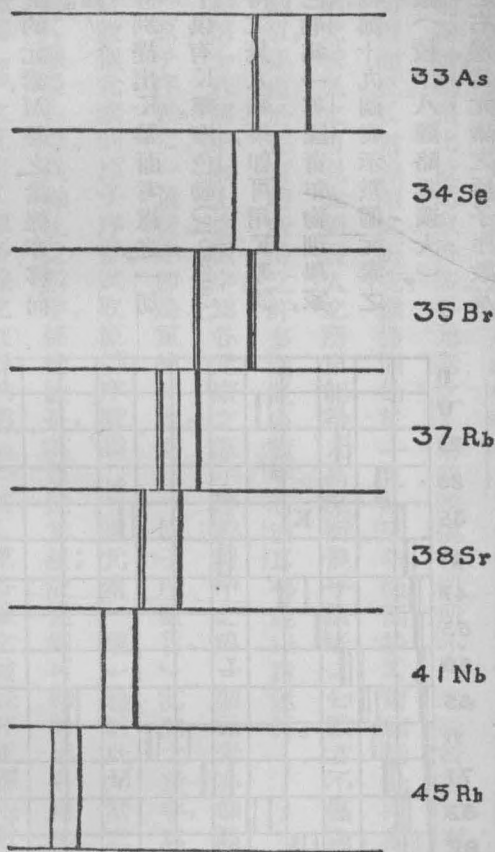
後較重的諸原素，譜線俱取相似之途徑。最重的諸元素，除K羣、L羣外，尚有M羣、N羣，波長更長。自一較輕的元素至一較重的元素，M羣之譜線亦移向短波方面。

茲特別提出K羣而考慮之。一切元素，幾乎俱有K羣。摩色勒(Moseley)實驗所得之驚人結果，即可用K羣說明之。摩色勒為一英國青年物理學家，死於歐戰。第十九圖表示數個元素之K羣諸線（較十八圖略為擴大）。

圖之右邊，為元素之原子序數及



第十八圖
各元素之X射線譜。



第十九圖

各元素的X射線譜中之K系

其符號。從一元素至一原子量較大之元素，各線俱移向短波方面，在圖中明晰可見。摩色勒研究數個元素，發現下述之事實：在依次排列之元素系中，從任一元素至次一元素，K羣向短波方面遷移

一步。摩色勒並算得步之長短，在第十九圖，即可見從元素 83 至 84 及從 84 至 85 ，俱屬於一步之遷移，從 85 至 87 ，遷移較遠，屬於兩步之遷移。所以即使先不知在 (86) 有一元素遺漏，但一觀 X 射線之譜，即可看出在此處 K 羣遷移較遠，實由兩步所合成。

有何結論可從上述事實推得之乎？

前已說過：梅特萊甫表之排列手續，有兩個階段：(1)依各元素之原子量而排列之（有四個例外）；(2)再將依上法排列之元素，寫成適當之行列。茲先考慮其第一階段：元素排列，究應以何為標準乎？不能以原子量為標準，因表中對於原子量升序定則，有四個例外。在第三章中，吾人曾謂元素排列之標準為核荷；此亦不能視為滿意之答語。測定核荷之方法，在彼處並未敘述；當時問題並不如是。元素早經排列，當時祇對每個元素予以一核荷，與其序數相當而已。至摩色勒發現其定律，吾人始見元素排列得有依據之標準。設將各元素依其 K 羣諸線向短波方面遷移之步而排列之，則所得者即在梅特萊甫表中所見之排列。用此法排列元素，絕對正確，並無例外之處。於此，吾人又見原子量為一偶遇之量，惟 X 射線譜所暴露者始真為元素之序數。又元素如遵此法排列，吾人

可確定有何元素尙待發現。譬如在元素 ∞_1 之後的一個元素，其譜線向短波方面遷移兩步，故此元素之序數，應爲 ∞ 而非 ∞_1 ；序數 ∞ 須留待尙未發現之元素。故X射線譜之分析，不僅建立元素之正當序數，準確而無例外，且顯示在梅特萊甫表中何處應留空隙以待尙未發現之元素。後來科學進展，所留空隙，多已填滿。故吾人謂

X射線譜爲各元素規定一個次序，方法準確，應用時毫無例外。

構造梅特萊甫表之第二階段，爲將已經排列成序之元素編爲正當行列。吾人已知在同一縱行之元素，其光譜之可見部分，有幾分類似。梅特萊甫表中之行列，能以此類似爲標準乎？上面已經說過：氫（原子序1）、鋰（原子序3）、鈉（原子序11）有類似之可見光譜，因其原子最外部分之構造相似——俱祇有一個行星式電子。蓋決定可見光譜的特點之因素，係原子最外部分之構造也。X射線譜亦可爲決定梅特萊甫表中元素行列之因素乎？顯然不能。因梅特萊甫表之特點爲週期性，而X射線譜並無週期之痕跡。從任一元素至次一元素時，K羣，或L羣，或M羣，向短波方面遷移一步；在同一縱行之元素，對此並無特殊類似之點。吾人因而推測與X射線譜有關者，

非原子最外部分之構造，而爲其內層之構造。原子最外部分之相似，與X射線譜之相似無關。X射線譜誠能將各元素排成完美的次序，但元素之週期性，則爲其所隱蔽。假如吾人祇知元素之X射線譜，則雖能確定各元素之正當序數，但不能得有梅特萊甫之週期表。

關於X射線譜中各線之基本事實，現已略述，即譜中有K、L、M、N之線羣，從任一元素至一序數較高之元素時，羣線俱向短波方面遷移。

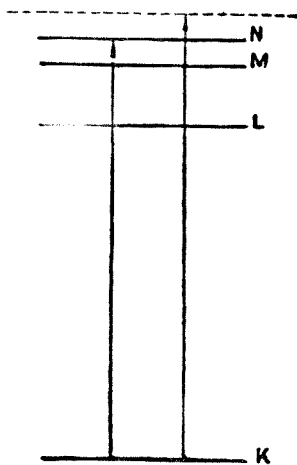
X射線譜之解釋爲何？彼等發生之情形何若？

下面所用之推理方法，與第三章所用者相似。

欲得X射線，第一步須使對陰極之原子預備出放射。研究可見光譜時，與此相類之初步過程，係使原子最外層電子從其正常軌道升至能量較高之軌道，或使之脫離原子範圍。此處，欲使原子出放X射線，礮彈式電子之速率必須較高，亦即能量必須較大。原子可視若一礮壘——即中有一核，核外環以圍牆式之電子層以保衛之。最外層之牆——即原子之最外層——或未完成。低速之電子不能入犯內層，祇能使尙未完成之電子層中的電子升於能量較高之級，俾可出放可見之

輻射。但對陰極遭高速電子射擊時，當有數個瞄準的電子穿過外層，而達於較內之電子層。試以一重元素之原子為例：設其中K層、L層、M層俱已完成，N層之構造亦已開始。如使N層電子之一，升至能量較高之軌道，此原子即可出放可見之輻射，但較速之電子射擊對陰極時，能將已完成之K層或L層或M層之電子逐去一個。設礫彈式電子速率極大，能直達最內之K層，則屬於K層之行星式電子當有一個被逐。被逐之電子，往後情形將何若乎？彼不能在L層或M層覓一位置，因此二層之構造已完成，電子之數已足。但N層中尙有空位。

故一速率足高之瞄準的電子，能將K層之一行星式電子逐入N層，或竟使之脫離原子範圍。內層位置，原係全被電子佔據，此時將有空位騰出。第二十圖表示與各層相當之能級。欲將一電子從K層擲至N層，或擲至原子勢力範圍之外，必須作工。工之多少則等於兩個能級之能量的差異，



第二十圖
發射K系前原子之激發。

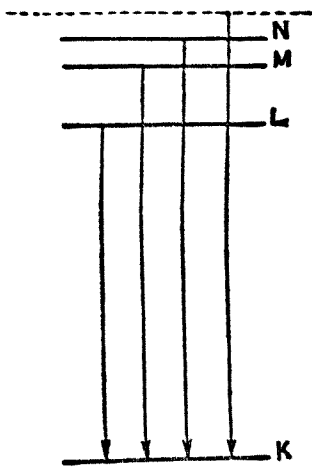
如第二十圖中箭標之所示。使一電子從K層升至N層，所需之工，小於使彼從K層升至極限能級之所需。此所需之工，即由礮彈式電子做成。礮彈式電子因此損失其本身之能量，同時增加原子之能量。原子在此狀態中，即預備出放X射線。

茲設想有一城市，市中住宅，不敷分配，不得已而在郊外添築。追求最烈，價值最高之住宅，係在市之中心區域。郊外每添一所，市中即可騰出一所；但一經騰出，即有人競欲得而有之。

原子中之情形亦若是。K層一有空位，立刻有一電子從較外之層躍入而佔據之。對陰極爲一巨數原子之集團，原子中時有K層之空位被填；但各有不同之情形：填滿K層空隙之電子，或從最近之層——即L層——而來，或從較遠之層而來。是爲出放X射線過程中之第二階段——即發射的階段。當電子從較遠之層躍至K層之時，原子之能量減少。所失之能量——即跳躍前及跳躍後兩個能級之能量的差異——即以光子形式而發射。發射之光子，能量豐富，與具有短波長之波相當——即與X射線之波相當。第二十一圖即表示發射之過程。圖中箭標之長短，與發射的光子之能量相當。（注意與氫原子來曼系相似之點。）由是可見K羣包含不止一線，係由數線所合成，

各與一可能之出發點相當，但俱向同一之目的地——即K層。

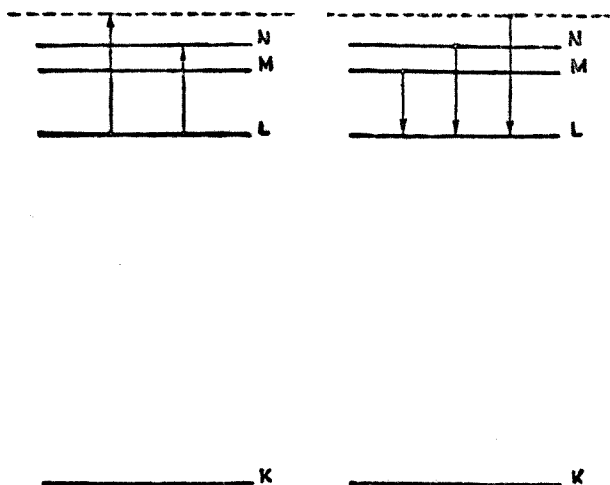
L系亦可如是解釋。假定礮彈式電子速率較小，能到L層而不能侵犯K層。吾人可如前想像礮彈式電子作工於原子之上，將L層之一電子逐至較外之層。所需之工，顯然較前為少。原子在此狀態中，即預備出放L羣之射線（第二十二圖）。故L羣諸線之發射，與電子躍至L層之跳躍相當，（注意：此處，與巴爾麥系有相似之點。）設礮彈式電子速率極大，足以使K羣發射，則同時將有L羣出現。是亦不難理會。電子從L層躍至K層時，L層將有一空位騰出，當立刻為M層或N層之電子所補，因彼等常想趨近於核也。填補L層空位的電子之跳躍，即產生L羣之諸線。故L羣發射時，可無K羣之發射（即礮彈式電子速率太小，不足以使K羣發射時，）而K羣之發射，則恆有L羣及較遠各羣與之為伴。



第二十一圖
K系之發射。

從任一原子至較重的原子時，X射線譜中各線俱移向短波方面，此事實，亦能由上面所述X射線發射之概況解釋之。元素之原子序數愈高，核荷愈大，因而行星式電子與核之聯結愈益強固；結果，各能級間之能量相差愈大——故放出之光子能量亦愈大；又吾人已知光子之能量升高，即等於波長縮短。

關於X射線發射之機構，上面所說者，祇為一大概的輪廓。實際上，L羣之組織，較上面概略中所述者為複雜；羣中譜線之數，亦較所述者為多。當研究波耳



第二十二圖a 第二十二圖b
發射L系前原子之激發，及L系之發射。

之簡化的原子模型時，亦有與此相類之情形。彼時吾人祇討論能級 I、II、III 等等，（猶此處較重元素之原子中 K、L、M 等層。）迨後加上相對論的修正，顧及質量之變更，氫現子模型之理論的結構，本極簡單，此時遂較前爲複雜，而同時對譜線之精細構造，得一解釋：能級 II 分而爲兩個鄰近之能級，能級 III 分而爲三，等等。此處，亦有類似之情形。假定每一層有一明確規定之能級與之相當，遂使問題大爲簡化；其實 X 射線譜線之組織，與實驗結果較爲相合者，複雜遠過於第二十一，第二十二，兩圖之所示。L、M、N 之能級，各須分爲數個互異之能級，結果顯爲 X 射線譜線之構造增加其繁複。因可能的初級及可能的終級之數加多，與各跳躍相當之譜線自必相當加多。

上面所述之概略，顯具理論進展時所恆有之各特點。企圖與宇宙間繁多現象相融合，吾人日使理論增加複雜，并應用此加精之理論於新研究區域而助科學之不已的進展。

上面已經說過：X 射線有線譜，亦有連續譜。以前所說，祇及線譜。吾人已知線譜之特性由製成對陰極之元素而定。每一元素各有其標識的線譜，但其大概的性質，各元素俱相同。連續譜則不然；問題爲另一種。連續譜與對陰極之本性無關，僅與礮彈式電子之能量有關係。吾人將如何解釋此

連續譜乎？連續譜如何發生乎？連續譜之發生，非由於數個礮彈式電子射擊內層，將內層之電子逐離；其發生係礮彈式電子本身之飛行被對陰極阻礙所致。礮彈式電子被阻時，其能量一部分化而爲熱，一部分化爲X射線之輻射。如此說不誤，則可得數個結論：試取一極端之例：設礮彈式電子之運動能量，全都化爲出射之光子，是則光子抱有最大可能之能量，而相當之波長亦卽爲最短可能之波長。由是可知：X射線連續譜之光子能量不能超過礮彈式電子之能量。故X射線連續譜應在短波方面有一確定之極限。此極限波長，卽係光子能量等於礮彈式電子能量時之波長。連續譜從此極限起，依長波方向延展，且祇依此一個方向延展。此與能量等於或小於礮彈式電子能量之光子相當，（礮彈式電子所餘之能量，化而爲熱。）上面所述之現象，適與光電效應相反，光電效應係礮彈式光子之能量化爲出射的電子之能量；此處所述之現象，適與之相反。

X射線連續譜中有一確定的分明的極限存在，已由實驗徵實。理論與實驗之數量上密合，亦已建立；與連續譜中極限波長相當之光子能量，等於礮彈式電子之能量。此數個結論，（已由實驗完全徵實）猶光電效應，如依據波動說，卽無從理會。在此類現象中，X射線呈露其微粒特性。

吾人對X射線之線譜及連續譜，二者俱已略述大概。至於X射線線譜之波長用何法可以斷定，此問題前未提及，茲將討論之。

在可見光譜範圍內之波長，係用何法斷定乎？上面已經說過：光之繞射現象，可使人測定其波長。當光通過一孔隙或遇一障礙物，其大小與光之波長比較不十分過大時，即發生繞射現象（由於光波進行不沿一直線）。第一圖（第二四頁）表示光波通過一極小長方孔隙時之繞射。原方向的光線（產生一清晰的長方輪廓）之旁，吾人見繞射線產生明暗相間之條片，逐漸泯滅。從明暗相間的條片之距離，可約略計算光波之波長。此種量度及計算，頗不精確，近乎祇屬於品性上的研究。現代的實驗技術，已得有極準確極靈敏之方法以量度光波之波長。設吾人不僅有一個長方小孔如第一圖之所示，而有一極大數目之長而且狹的長方小孔，排列緊密；接近的兩孔間之距離，設為一毫米的百分之幾。彼等能產生繞射花樣，使人得以準確的測定波長。此時所得之繞射花樣，與前僅用一孔時所得者不同。在中間有一狹條之光，與原方向之光線相當。與第一圖同；但此處無明暗相間之條片，在黑地上祇呈一組狹條之光（假定射入之光為單色光）。第二十三圖為此種

繞射花樣之略圖。中間爲原方向之光線，兩邊各有繞射線一列；圖中每邊祇示兩條。如用一波長較長之單色光，繞射益甚；繞射線較前開展，兩線間之距離亦較前爲大。從兩線間之距離，即可計算波長。如不用單色光而用一白光，則屬於各色波長之繞射線，彼此分離，吾人得一各色俱全之光譜；始於紫色，繞射最小，終於紅色，繞射最甚。用此法，不但可以計算波長，且能將光分析，如用一稜鏡然。

排列上說小孔之技術，現在已達非常精確之程度。此類儀器，稱爲繞射光柵。但吾人能用此類繞射光柵以得X射線之繞射現象乎？

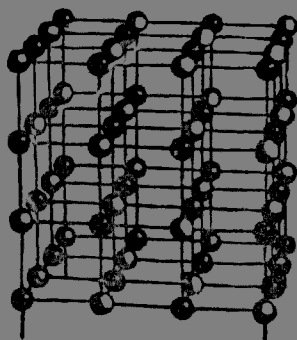
X射線之波長，較可見光線之波長，短得甚多。欲得其繞射現象，所需之小孔，較上用於可見光線者須小得甚多，切近的兩孔間之距離，亦須小得甚多。實驗室中所造之繞射光柵，不能如是之小，如是之密，可合於研究X射線之用。然則X射線之波長，將如何量之乎？一九一二年，德國科學家勞厄(M. von Laue)提出一個方法，此難題於是



第二十三圖
用繞射光柵所得單色光之繞射。

遂告解決。實驗室中之所不能爲者，「自然」假吾人以助力。吾人有一天然的繞射光柵，其精確非人工光柵所能及。晶體爲許多原子之集團，各原子在晶體中排列整齊，相距極近。第二十四圖係一個極簡單的晶體之構造模型。此處吾人所欲利用者非小孔，而爲一組之極小的障礙物。此障礙物即由原子組成；原子排列整齊，距離極近，猶尋常光柵中之小孔。原子間距離如是之小，應能使極短之波——X射線之波——呈現波之繞射效應。實驗已明示吾人：利用晶體中三次排列之緊密的障礙物，能使X射線繞射。德國之勞厄、英國之勃蘭格父子(The Braggs)及他人，先後發展此晶體光柵之應用及理論，以彼等所得之繞射花樣爲出發點，卒能對於X射線之波長，得到準確之斷語。

設令一柱X射線投射於一晶體之上，通過晶體之後，使之紀錄於一照片，此照片將呈現繞射花樣。研究X射線譜之方法甚多，茲不詳述。吾人祇在卷首插入數張，X射線繞射花樣之照片。



第二十四圖
食鹽晶體之模型。

之中心，各爲原方向X射線所生之效應，其周圍之點或圓，則爲繞射的X射線所生之效應。從此類照片，即可計算X射線之波長。

從勞厄發現晶體光柵之日起，X射線譜之分析，進步極速。不僅對於X射線譜，得有不少知識，對於晶體之構造，亦獲到許多意外的新線索。

γ射線

茲將討論一種硬於X射線之輻射——即γ射線。在第二章，吾人曾略敘光譜之各區域，始於最短之波，終於最長之電磁波；彼時亦曾提及γ射線。γ射線呈現於放射現象。在此類現象中，元素蛻變時，除出放β射線（即高速電子從原子核出射者）或α射線（即氦核）外，尚有短波輻射——即γ射線——之出放。

γ射線之研究，至今尚不能如X射線研究之徹底。用於X射線得到美滿成績之觀察方法，不能用於γ射線。對於γ射線，晶體光柵中之障礙物尚嫌太大，障礙物之互距，亦嫌太遠；故晶體光

柵對於 γ 射線之不適用，猶人造光柵之於X射線。 γ 射線中之波長較長者，雖亦能用晶體光柵，使其發生繞射效應，并可量度，但就一般的言之， γ 射線之波長，祇能用間接方法量度。此類間接方法，茲姑略而不述。

在蛻變過程中之放射性元素，爲 γ 輻射之源。設有一放射性元素A，出放 β 射線及 γ 射線，變成元素B（在梅特萊甫表中右遷一格）。 γ 射線如何產生乎？不能由於原子最外層之電子，因此類電子祇對可見輻射負責；亦不能由於已完成的內層之電子，因此類電子僅能發生X射線。因 γ 輻射與放射性原子核之碎裂相伴，故吾人推測 γ 射線之發源地係在原子之核中。

γ 輻射無連續譜，祇有線譜；波長較X射線爲短，貫穿本領亦較X射線爲強。

於此有一問題焉：在上述之兩個元素A、B中， γ 射線從A出放抑從B出放？易言之， β 射線與 γ 射線，出放之次序爲何？先出放一電子，繼之以 γ 射線乎？抑 γ 射線先電子而出放乎？經許多困難複雜之試驗，結果俱爲 γ 射線係從B出放，即在A已蛻變成B之後。吾人有一確定的 γ 射線譜，與A蛻變成B相當，而 γ 射線之源則在於B。

γ 射線在原子核中發生之情形何若乎？原子核構造復雜，內含許多電子與質子，一部分結成 α 質點（4 質子 + 2 中子），一部分結成中子（1 質子 + 1 中子）。至於原子核由此類成分如何構成，吾人從未提及。從 γ 射線及其確定波長的譜線之存在，并從測定此類波長之各種實驗，即可知原子核爲一複雜的構造；此時科學尙未能深悉其底蘊。

茲姑以上面敘述原子中行星系組織時所用之觀念，應用於核。設想核中亦有可能之各能級存在。如上例之 A、B 二元素，當元素 A 出放 β 射線而成元素 B，元素 B 之原子核即升至較高之能級，而入於激發狀態；從此能級跌至較低之能級，或直返於其正常能級，即有一光子出放，是即 γ 射。故 β 射線或 α 射線之出放，與上面所說行星系遭礮彈式電子之碰擊相當；使元素 B 之原子核入激發狀態，迨其跌回較低之能級時，即有 γ 輻射出放。

此處又遇前面所屢次提及之特點，即當一理論發展時，復雜逐漸增加。僅假定原子核含有定數之質子及電子，此時殊嫌不足。吾人所欲解決者，爲一徹底的問題：原子核如何構成？人所未先想及者，即爲應用物理學對於原子本身所得之觀念於原子之最內部分——即核。對於原子核，吾人

不亦可以想像有量子軌道，有確定的能級，有從某一能級至他一能級之跳躍，以及與此類跳躍相當之光子發射，因而得有 γ 輻射乎？但現在已知上述關於行星式電子之軌道及運動諸觀念，對於核不能適用。關於支配原子核組織之定律，此時方開始稍有認識，稍得了解。在最近將來，關於原子核構造問題，或有新理論出現，可使吾人得有正確之了解。

繼 γ 射線之後，吾人應討論較 γ 射線猶硬之輻射——即宇宙射線。此射線，上面已數次提及。宇宙射線實為目前物理學最重要問題之一。與宇宙射線有關之諸現象，此處將不敘述。因關於此類現象，此時正在熱烈辯論中。宇宙射線是否為極短波長之輻射（較 γ 射線波長尚短得甚多，因而其貫穿本領亦較 γ 射線強得甚多），抑係微粒之輻射（即一羣高速之質點——電子，依最近之意見，或為中子，竟或質子）而抱有近乎光速之速率？吾人必須待辯論之結果，及科學之裁判；判決書不久定可發表。

設有光投射於一實質之上。光之一部分爲實質所吸收，一部分通過實質；其餘，一部分反射，一部分散射。完全透明或完全反射之物體，純爲理想的，世間並無此類物體存在。即最透明的氣層，光波通過時，亦必有一部分散射。故光波在氣體中前進，必有散射現象與之相偕。吾人稱物體爲「透明」時，意爲散射之能量爲入射波能量之一比較微小的分數。

典型物理學對光之散射效應作何想像乎？投射於氣體的或液體的質點之單色波，抱有某種確定之律動；質點受此律動之影響，亦即隨之而振動。每一質點當波經過時，即成一振動之源。原來入射之波，因而發生許多微弱的支波，各向散播；支波之源，即實質之各個質點；支波之律動，即入射波之律動。故下述事實：散·射·光·之·波·長·與·入·射·光·之·波·長·無·異，可從典型物理學而得其解釋。

天空之蔚藍，自昔爲人所驚奇，情之所動，人往往藉詩歌或丹青以描摹其美麗；吾人觀蕾勒 (Lord Rayleigh) 之工作，及其對於天空蔚藍之明晰的理解，亦頗具同樣之驚奇情緒。

即最稀疏之氣體，亦使可見光散射；光波愈短，散射亦愈甚。自太陽而來之光波，須經過厚層之大氣，能量之一小部分因而散射；但散射程度，各色不同。紅色幾不散射；因光波愈短，散射愈甚，故散

射最甚之光（就可見部分而言）應爲紫色。天之所以不能爲白者，卽大氣散射光波，各色不等之故；蔚藍係近於光譜紫端之色。

天色蔚藍之解釋，發現遠在量子論產生以前。散射不改變原波之波長，可依據典型物理學演繹而得，爲波動說所產之結果。但亦可用微粒說的語調，表示此結論，謂一羣礮彈式光子碰撞物質一部分各向散射，但散射之後，光子與前無異。彼等能量，無稍變更，故彼等波長亦無稍變更。

茲將再提光電效應從波動說的見地，吾人對此現象，完全不能了解；如依據微粒說，卽可得一簡直明瞭之解釋：一個礮彈式光子投射於一金屬板之上，將金屬板中一電子擲出；光子之能量化爲被逐電子之運動能量。

此處吾人舉了兩個現象：

- 一、 散射現象，
- 二、 光電效應，

彷彿光在第一現象呈露其波動性，在第二現象呈露其微粒性。

茲將設一譬喻，後面論辯，得此當益明瞭。假設吾人有二角半及五分兩種錢幣。如將一個二角半的錢幣投入於郵票自動機之內，吾人當得一張兩角半的郵票。是即可喻光電效應。礮彈式光子（猶二角半的錢幣）擲出一電子，能量與光子相同（猶兩角半的郵票）。如自動機內郵票已盡，吾人所得，將為投入之錢幣，是可喻散射現象。光子（二角半的錢幣）之方向改易，但能量如舊。茲再想像有一種郵票自動機，錢幣投入後，不但能與吾人以郵票，并可與吾人以餘找。譬如將二角半錢幣投入，吾人可得一張兩角的郵票，同時得一個五分的錢幣。在物理學中，有與此相類者乎？如有之，則此現象將介乎散射現象及光電效應兩者之間；礮彈式光子之能量，一部分化為電子之運動能量，所餘者仍為一光子，不過其能量較前為小。此奇異的效應，在一九二三年為美國物理學家昆普吞（A. H. Compton）所發現。吾人稱之為昆普吞效應。

設將一柱極硬的單色X射線——例如比較重的實質（譬如鉾）所製之對陰極所發射的K羣輻射之一——分出，使之投射於比較輕的實質——譬如碳、石蠟，或紙——之上，當有散射現象發生。原有確定方向之射線，至是各向散射。茲將審察散射的諸線之波長。但在敘述實驗所得之

效應以前，將先略述從波動說及微粒說的見地而得之推論。

擁護波動說者視X射線之散射與光之散射毫無區別。在此二種現象中，彼祇見一種律動由入射的輻射加於質點之上。質點傳此律動於散射線。故散射光之波長等於入射光之波長。

擁護微粒說者之推論，與此大異。物質與輻射間之作用及反作用，由光子與電子之碰撞而定。假設散射實質為碳；碳為比較輕的元素（原子序數比較不高），其原子中，外層電子與核之聯結極弱，故欲使外層電子脫離核的勢力範圍，所需之工（即游離工）比較不大；如不計核與電子間之束縛而假定最外層之電子為自由電子，所生之誤差亦不大。其實，可用此假定者，惟有硬的X射線；因其光子能量如是之大，對碳原子最外層電子之微弱束縛，儘可略而不計。入射的輻射愈硬，所生之誤差愈小，所以對 γ 射線，此假定更為可用。根據此理，吾人想像有一礮彈式光子（抱有確定能量）與一自由電子碰撞，並從典型力學的見地考慮此碰撞。此碰撞可視若二球之碰撞；其一（光子）具有高速，其一（電子）靜止。碰撞之結果為高速之球損失其能量之一部分，所損失之能量即為靜止之球所得，二球能量之和與前無異。碰撞後躍離之光子，能量較前為小，電子之速率

則增加。如果此想像不誤，散射的輻射當爲能量較小之光子所合成，如用波動說名詞，吾人謂散射的輻射，波長當較長。是則使X射線散射之實質能改變輻射，使之向長波方面遷移——使X射線變軟——猶上面所說之自動機，投入二角半的錢幣（代表入射的光子），能與吾人以一張兩角的郵票（代表電子的能量）及五分的餘找（代表散射的光子）。

欲知試驗結果能否徵實上面微粒說的推論，先須從數量上再加考慮。用量子論之假說，吾人得以預測光子與電子碰撞之結果。茲舉一用適當的數學推理所得之結果如下：設有X射線從某定方向而來，各向散射，同時其波長增加。增加多少，隨散射線之方向而不同。設從一與X射線原有方向正交之方向觀察散射線，其波長應有如何變化？即散射線之觀察方向與原來入射線之方向成九十度之角時，波長應增加若干？從理論所得之結果如下：

蒲郎克常數

$$\text{波長之增加} = \frac{\text{電子質量} \times \text{光速}}{\text{蒲郎克常數}}$$

式中含有牽涉電子及光子之量，自不足怪；又式中含有蒲郎克常數，亦不足怪，因其爲光子的

能量與波長之基本關係中所含之常數。右首各量之值，前面俱已提過（第九一——九二頁。）由一簡單的計算，即可得

$$\text{波長之增加} = 0.0243 \text{ 埃}$$

實驗已徵實上面所得之結果：散射線較入射線爲軟；在與入射線正交之方向，波長之變化，在誤差限中與理論所預測者完全相合。在昆普吞效應中，輻射彷彿呈露其微粒特性。昆普吞效應，非依據波動說所能解釋或理會。

但尙有一應須考慮之處：從上面所得之結果，知入射線之軟硬雖或不同，波長之增加無異。從一與入射線正交之方向觀察，波長之增加恆等於 0.0243 埃。故可見輻射譜線應亦有與此相同之遷移。此斷語似與實驗不合，但其故亦易明瞭。上面推理所根據之假定，不能應用於能量微小之光子——在可見光譜範圍內之光子。如光子能量不大，碰撞時之情形，與前不同。請想像一橡皮球從一固定的牆上回跳。球之運動的方向變易，但其能量如舊。可見輻射之情形，與此相似。光子之能量不大，與束縛比較強固之電子碰撞，即跳回。光子之運動的方向，雖因之而變，其能量及波長與碰

撞前無異，如典型物理學之所期。

上述理論，尙能解釋另一實驗效應：遷移於長波方面的昆普吞線之旁，尙有譜線一條，與X射線原有之波長相當，如典型效應（即波長不變之散射效應）之所產生者。此線發生於光子與核之相撞，核猶前喻中之固定的牆壁，此種碰撞，不能變更光子之能量。

關乎輻射呈露微粒結構之實驗的事實，因昆普吞效應而加廣。另有一效應，與昆普吞效應有幾分相似，繼之而發現，是爲刺曼（Raman效）應。

刺曼效應

此處所欲敘述之過程，係發生於可見光譜之範圍中。試取一單原子的氣體，（譬如汞汽）在正常狀態中，原子在其最低之能級。吾人已知如何可使之能量加增。譬如礮彈式電子可使其行星式電子升至能量較高之級，當行星式電子回至原來之能級時，礮彈式電子在原子上所作之工即行解放。除用礮彈式的電子外，吾人能否有他種方法使原子激發？實驗昭示吾人，在某幾種情形之

下，用礮彈式的光子，亦可使原子受激。茲想像有一柱單色光，投射於一汞原子集團——即汞汽——之上。此光柱可視爲一羣具有某一能量之光子所合成。再設想入射之光子，能量適足以激發原子，使其從正常狀態升至次高之能級。當光子與原子相撞，光子能量全部損失，爲原子所得。此時汞原子即升至能量較高之級而入於激發狀態。與此光子相當之波長，吾人稱爲共振波長（參看第三章所用之名詞。）迨原子從其激發狀態回至正常狀態時，即有一光子放出，與前所吸收之能量相等。

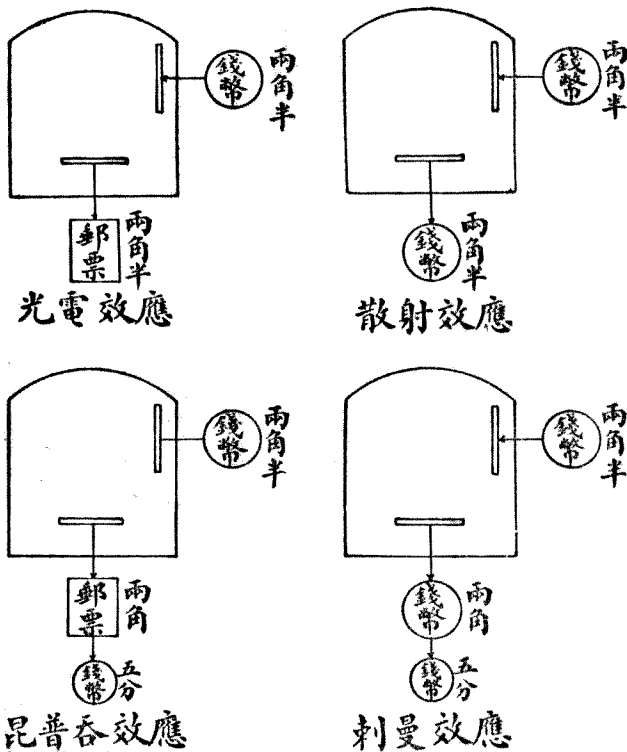
故·出·放·之·射·線·波·長·與·入·射·光·之·波·長·相·等。試再回至上設之喻，此處所述之情形，猶自動機內郵票已盡，吾人投入一錢幣（具有確定能量之光子）彼將從他方向重復出來。在此處，是否亦有一種效應，類於自動機出補餘找之情形？欲得一類似，較合於此處之情形，吾人須將自動機所負之職務略爲改變。當吾人投入一個兩角半的錢幣（光子），自動機予吾人者，非一張兩角的郵票（電子能量）及五分的餘找（能量較小之光子），彼能予吾人以兩個較小之錢幣；投入之一個兩角半的錢幣，化爲一個兩角的錢幣及一個五分的錢幣——猶入射之光子化爲兩個能量較小

之光子是為刺曼
效應之模型。

設一礮彈式

的光子投射於一
質點，光子之一部
分能量，用以作工
於質點之上，其餘
能量以光子形式
而放出。在一九二
三年，司密克爾
(Smekal)即預測
應有此種效應存

自動機之模型



在理論遂引起一個新的實驗事實之發現。至一九二八年，印度人刺曼及俄國人孟特爾斯坦 (Mandelstam)倫資堡 (Landsberg)幾乎同時發現此種效應；但刺曼發表最先，故有今名。

刺曼效應最初在流體及固體中確定。在此類實質中，原子組合而為分子。至於原子如何組成分子，此問題甚繁重，且現在對於此部分知識，尙極不完全，茲不加以解釋。關於從分子而得之光譜，以及分子光譜與原子光譜之區別，此處亦概不敘述。吾人祇須知分子中亦有能級存在，出放輻射亦由於從一能級至一較低能級之跳躍。

設有一流體（譬如三氯甲烷 chloroform），以單色光照之。光之一部分將沿一任何預定之方向——譬如與入射線正交之方向——散射。在此方向，吾人將見有散射線，波長與入射線波長相等。是與典型理論相合，因依典型理論，散射不改變波長也。但同時吾人遇一新奇驚人之效應，即上面所解釋之刺曼效應：在散射線之光譜中，吾人不僅見有與入射線波長相當之譜線，此外尙有其他譜線存在。參看第二十六圖。主線（即圖中所示之最長的一條）與典型效應——即波長不變之散射效應——相當；在主線之兩旁，尙有其他新譜線，非波動說所能解釋。茲將先討論主線

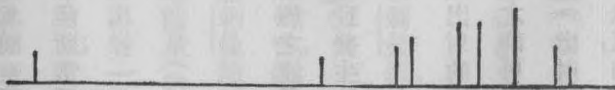
左邊之諸線——即遷移於長波方面之諸線，（譬如主線爲紫色，則在其左邊之線將爲藍色或綠色。）彼等與量子「殘餘」(quantum remainders)相當。礫彈式光子之一部分能量，用以激發分子，其餘部分由分子以較長波長之光子形式出放。故在刺曼效應中，有下列之關係：

礫彈式光子之能量 = 分子之增加的能量 + 以光子形式出放之殘餘的能量

殘餘的能量，即呈現爲刺曼線（第二十六圖中主線兩旁諸線，吾人常稱爲刺曼線。）上面方程式之左邊爲已知量，因吾人已知入射光之波長，故能知入射光子之能量。又量度刺曼線之波長，即可斷定所出放之殘餘能量。由是，吾人可得分子之增加的能量如下：

分子之增加的能量 = 礫彈式光子之能量

— 以光子形式出放之殘餘的能量



波長增加之方向

第二十六圖
三氯甲烷之刺曼線

分子增加能量時，其情形爲何？乎？碰撞之後，分子即入於激發狀態，迨其回至原來狀態時，即出放一光子，與產生尋常分子光譜之情形相同。與此光子相當之波長，可依前所常用之方法，由下式而得：

$$\text{分子之增加的能量} = \text{普郎克常數} \times \text{光速} \\ \text{分子光譜中譜線之波長}$$

從上面兩個方程式，可知量度刺曼各線，即可間接得到分子光譜中譜線之波長。（礮彈式光子與分子相撞，分子能量有種種許可之增加，與分子之各激發狀態相當，遂致發生波長不同之刺曼線。）

尙有一應須注意之點：分子能級常相離甚近，故與能級間跳躍相當之出射的光子，能量比較微小；故分子光譜譜線之波長，常甚長，在光譜之紅外部分中。又因分子能量之許可的增加甚微（與礮彈式光子之能量比較），故從上面方程式，可知刺曼線常靠近主線，（出射的殘餘能量，幾與礮彈式光子之原有能量相等。）事實上，分子光譜之譜線在紅外區域中愈遠，相當之刺曼線愈

近主線。

上面所述研究刺曼線（在光譜之可見部分）以尋覓分子光譜譜線（常在光譜之紅外部分）之方法，遇譜線遠在紅外部分，不能直接觀察時，甚有價值。遇譜線能直接觀察時，此法又能助吾人審核理論之是否合於事實。現在吾人已知理論與實驗完全符合。

主線左邊之刺曼線，已如上述。茲將討論主線右邊之各線。主線右邊之刺曼線，較左邊諸線爲弱，且數亦較少；但從理論的立場，其解釋頗有意義。

此處，吾人又可藉自動機以解釋諸線之存在。設想先投入一個五分的錢幣，繼投入一個兩角的錢幣，如自動機能予吾人以一個兩角半的錢幣，吾人即得一與發生右邊刺曼線類似之過程，設有一礮彈式光子（猶兩角的錢幣）射擊一分子，設此分子已得有所需之能量（猶五分的錢幣），在激發狀態中，此時所發生之情形將爲何？若分子將回至正常狀態，應同時出射一光子（與分子光譜中之一譜線相當），但有時此光子與入射之光子結合，因而能量微有增加；故碰撞後，有時可得一出射的光子（猶兩角半的錢幣），其能量比入射的光子（猶兩角的錢幣）爲大。是即

散射的光子之能量 = 入射的砲彈式光子之能量 + 與分子光譜譜線相當的光子之能量。易言之，此種散射線之波長，應短於主線之波長。故在主線之右邊（即短波的方面），可見有刺曼線呈現。

故刺曼效應之發生，有兩種不同之情形。其一種為最常遇的（與左邊較強較多諸線相當），即一個光子分而為二。其又一種（與右邊弱少之線相當），係兩個光子合而為一。

昆普吞效應與刺曼效應，有數個相似之點。在此兩個效應中，輻射俱呈現其微粒性；二者俱由於光子與物質碰撞時能量變易而發生；在此兩個效應中，物質之態度改變，將入射的光子能量更易，波長亦遂因之而更易。但用以產生此兩個效應之輻射，波長範圍，彼此互異。昆普吞效應發生於X射線及γ射線，刺曼效應則發生於可見輻射之範圍。

第六章 現代量子力學

現代量子力學之起原

科學的一切學說俱有誕生，有發達，有死亡。彼等各有其壽命，各有其成功及勝利，最後俱各讓位於新觀念及新展望。上面，吾人曾略述波耳學說之大勝利。波耳學說誕生於一簡單奇偉之思想，即引用不連續性觀念——量子論——於原子構造問題。茲向波耳學說告別以前，將再撮述其所得之結果。

在氫原子中，一電子在一量子軌道上繞轉。每一量子軌道，有一確定的能級與之相當。當電子從其正常軌道（軌道 I）升至較高之軌道時，原子即入於激發狀態。但原子不能久留於此態中，電子當隨即躍回正常軌道。是時即有一輻射放出。放出的光子之能量，等於兩個能級——始級及

終級——能量之差異。巴爾麥所觀察之氫譜線系，從波耳學說得一極簡單之解釋。當其解釋從經驗而得之黎得堡常數，使之與物理學基本常數發生關係時，波耳學說遇其第一次的大勝利。因理論的計算與實驗的結果密切相合，使人信波耳學說中支配微眇物理世界之定律代表一顯著偉大之進步。波耳學說之成功，不止於是。試一想及游離氦問題，游離氫譜線位置較氫譜線位置略為移動之事實，光譜之精細構造，X射線之理論，元素之序列及各元素之原子模型，原子核問題，以及昆普吞效應，刺曼效應等，即可認識波耳學說之偉大及其生產力之豐富。

波耳學說之成功及勝利，雖如上述，但吾人亦必須指出其缺點，同時觀其於新學說產生時如何沒落之情形。當現代量子力學崛起之時，昔日光明燦爛之波耳的軌道學說，一變而為暗淡淒涼之殘照。

學說死亡之時，必有事物使之枯乾凋謝，有若人之壽終。依據前數章所述，吾人可將此意闡發略為加詳。

波耳之原來的簡單模型，未曾解釋光譜之精細構造。光譜學發展，觀察所得之新數據，日漸增

加。巴爾麥所發現之定律，祇成爲初級的近似。各個譜線，實爲數線所構成。欲解釋此複合的構造，「電子祇有圓形軌道」舊觀念，勢須委棄；所用數學，較前複雜；原來使問題簡化之假定，不得不棄之。以求理論與新得事實之相符；除圓形軌道之外，尚須添上橢圓軌道；再將「質量不能更變」觀念放棄，應用相對論之結果於原子構造問題。波耳學說經此困難，依舊成立；其成功亦卽在此。但有一新困難隨之而起。理論預測氫譜線之複合構造，但其結論與實驗結果不能完全相合。理論所預測諸線，觀察不能盡得。此問題從一個新的理論觀念——選擇定則——得到解答。此定則猶一篩，理論上所有可能，必須經過此篩，「自然」所不許可者，因之得以剔除。

從前面（自第一〇一頁至第一二二頁）所略述之例，吾人知理論進步，複雜亦日甚。理論與實驗爭先，實驗恆獲勝利。理論日趨繁複，原有之簡單佳處，日益不章；逐漸埋沒於與時俱增之一堆假定中，成爲一種不易運用之工具，欲藉之以發現新結果，日覺不易；生產力日弱，生活力日微，對付當前之新事實，日不勝任，預測事實之雄心，當然亦終歸消滅。歷時愈久，衰弱象徵愈益顯著，改造愈覺不能避免。此時理論革新之時機已至。

是爲每一學說每一新觀念所不能避免之結果。在科學之現在狀況中，謂能有一最後學說，完全無缺，永不改變，可解釋一切現象，祇可視爲對「實在」之無盡的蘊藏，毫無感覺者之一種妄想而已。

理論之崩潰，或由於漸變，或由於突變。理論與實驗猝然發生根本上衝突，所有調和企圖，俱歸失敗，是即崩潰屬於突變；或解釋不同現象時，吾人須作互相矛盾之假定，是亦屬於突變的崩潰。

波耳學說經過許多大勝利後，開始呈露衰象（但常爲其早年成績所掩。）上面所臚舉之種種象徵，雖未必具備，但其少壯時代，業已過去。波耳學說誕生於一九一三年，科學家對之即大施活動，學說同時亦大得進步；其間有不少創造之工作及新事實之發現，俾吾人在理論及實驗中，得更深刻之認識。經過十年之美滿生活，學說始呈蹉跎之狀。物理學家至是俱承認欲使科學脫離困境，非另求新學說不可。波耳學說變成如是複雜而不就範，不能再以之爲新的生產工作之用具。事實上，存在已久之漏洞，至是始格外顯露於其垂盡之生活中。理論與實驗之矛盾，日益明顯。但此處不能徧舉此類之困難，祇就其與本書所述之事實有關係者略討論之。

上面已經說過：氦原子爲一核與兩行星式電子所合成；行星式電子繞核運行，做成K層。彼等所遵之軌道爲何？若乎前面吾人故意不敘述氦原子之詳細模型，祇說其兩個行星式電子做成K層，因不能想像一氦原子模型，可以確切解釋氦之光譜。氦原子問題，牽涉三體（一質子及二電子）問題，非波耳學說之力所能及。上面亦已說過，破彈式電子作工於氦原子之上，能使兩個行星式電子中之一脫離原子勢力範圍；遇此情形時，破彈式電子所作之工，吾人稱爲游離工。構造氦原子模型，似應依下列之原則，即根據所造模型，用理論算得之游離工，須與實驗所得之值脗合。但所有對於此事之企圖，俱遭失敗，所得之結果俱與實驗所得者不符。

對於波耳學說，另有一非難，性質比較普遍，與九三頁至一〇四頁所討論之諸問題有關。吾人已知波耳學說爲二組兩不相容的假說——根據典型力學而得之假說及量子假說——之奇特混合物。核引電子之力，遵依庫侖定律，使電子在一橢圓軌道上運行；此想像完全依據典型力學中支配行星系之定律而成；同時對於許可的及不許可的軌道，原子之定態，以及行星式電子跳躍時光子之發射，則又引用量子假定。當計算譜線之強度時，（此問題關於原子集團，故其性質屬於統

計的，又應用典型物理學。似乎在微眇物理學中，量子論及典型力學之分野，界線完全消滅。典型力學中諸原理，爲何有數個可用，其餘不可用，殊難了解。

此類懷疑與非難，遂引起新量子力學之產生。但逕謂現代物理學拒絕波耳學說，則亦不合，且易引起誤會。新量子力學雖使吾人觀念加精，其實亦祇爲波耳學說之進一步的發展。從波耳學說至新量子力學之過程，此時尚難確說其爲進化式的過程，抑係革命式的過程；過程中，此二式俱有其類似之處。吾人不能因波耳所引入之觀念而重返於典型物理學。新量子力學係舊量子論之精深的擴展。

新量子力學研究之第一結果，發表至今，不過九年。此九年中，科學得前所未有之根本的有力的進展。所得結果，已迫使吾人不得不將物理學的及哲學的展望全部改變。但爲時雖短，此時已盼望有新觀念之產生，因使學說新陳代謝之象徵，現已微露其端也。

欲以數語概括九年來所生之巨大變化，吾人當謂覺悟吾人知識之有限，此時更爲透徹。吾人撇開具體的圖畫及模型，而與學說以抽象的特性。知應用粗顯物理的觀念於原子內部之雛形宇

宙爲無效，吾人用數理的模型以代具體的模型；由是可使知識加深，但同時「實在」仍布滿迷離之現象，要求吾人之解釋。

因新量子力學具有抽象特性，所用之數學又極深奧，故此處所述之概略，膚淺寬泛，自不能免。在新量子力學之發展史中，誰爲主要人物乎？吾人祇舉四人——即法人勃羅格里 (L. de Broglie) 德人海孫堡 (W. Heisenberg) 及率勒丁格 (E. Schrödinger) 英人狄拉克 (P. A. M. Dirac) 四人俱曾得諾貝爾 (Nobel) 科學獎金，後三人在一九三二年及一九三三年得之。

勃羅格里的推理

光之繞射現象，上面曾經討論。一柱光線通過一極小之孔，或繞一極小之障礙物時，不能顯出一分明之影。光線彎繞，結果在幕上呈現明暗相間之條紋。繞射現象，顯露光之波動性；吾人因而斷定光爲一種波動，以確定之速率傳播。

但尙有其他現象，非根據波動說所能解釋。在此類現象中，光呈現其微粒性。如光電效應，昆普

吞效應，刺曼效應俱支持微粒說；光可視為一羣具有確定能量之礫彈。

認識光之具有兩方面，——即認識光有時可呈現其微粒性，有時可呈現其波動性，——爲科學中之一偉大的新成就。用前設之喻，吾人猶聾者或瞽者之於有聲電影，祇認識現象之一方面，而不知有兩方面同時存在，互相補充。

繞射效應，祇能在小孔或小障礙物產生。尋常物體能有分明之影者，祇因光波波長比較極爲微小之故。X射線之繞射效應，更不易得。尋常光柵，對於X射線，成爲一列巨大（與X射線比較而言）之孔，故祇產生分明之影而不能呈現繞射效應。祇有晶體格子，其中原子間之距離，在百兆分之一厘米的數級，始能表顯X射線之波動性。對於硬的 γ 射線，此類晶體格子，尙嫌太大，不能表顯其波動性。

波長愈短，輻射之波動性愈趨含糊；產生繞射效應愈難，因而欲輻射呈露其波動特性，愈覺不易。波長愈長，輻射之波動性愈分明。電磁波之波動性最顯著，彼不產生陰影，而繞射現象最爲顯然。輻射之微粒性，適與此相反，紅外輻射之光子，吾人曾比之於棉製小球，X射線之光子，比之礫

彈。波長愈短，光子能量愈大，適成反比。出射的光子能量愈大，光子之存在愈益顯著。至於極長的波，如電磁波，微粒之能量，比較極微，人幾不覺有微粒之存在。暴露輻射微粒性之數個效應，何以祇能發生於硬輻射，至是當可明瞭。紅外波不能發生光電效應，因光子能量微弱，不足以從金屬板扭離一個電子。紅外輻射之不能發生昆普吞效應及刺曼效應，亦同此理。設吾人向短波方面進行，波長愈短，輻射愈失其類波性，而微粒性愈益顯著。至於長波的方面，波長愈長，微粒性愈隱晦，波動性愈顯著。是猶有聲電影，有時聲音方面佔優勢，有時圖景方面佔優勢，其實二者俱同時存在。

認識輻射具有兩方面，在尋求輻射定律之過程中，係一顯著之進步——所謂進步，因其新闢一條思路，用處不僅限於物理學中單獨一部分之範圍。勃羅格里首先認識輻射之兩元性觀念可應用於另一區域之現象——可應用於支配物質之定律。

設有一羣電子或質子，以同一之恆速，沿直線而進行（吾人能有實驗方法得此類質點，）彼等呈現微粒效應，猶單色輻射之光子。此類質點，可比之於一羣具有確定能量之礮彈，質點之速率加增，其能量亦加增。

初觀之，質量似祇有微粒性一方面。但是否可有現象，表示一羣電子之行爲，如一柱具有確定波長之波？通常，吾人不能觀察物質之波動的方面，是否因其隱而不顯，如極短波長之波若 γ 射線？在物質現象中，首疑有此二元性（微粒——波）之存在者爲勃羅格里。根據此觀念而作之推論，已有實驗徵實。

勃羅格里之論文，發表於一九二四年。論辯簡明，思想新穎，爲此文之特殊優點。斯時物理學所以用以推理之數學，雖極端複雜，讀此文，覺祇須有創造的科學想像力，卽能理會此簡單奇妙之思想，固無需乎乾燥無味之數學也。勃羅格里之論文，當時不能得科學界之回響；羣目爲一種浮泛無精意之作。迨後愛因斯坦始注意及之，且謂將來科學進步，勃羅格里所提出之觀念，當能發展。

勃羅格里辯論所用之原理，及由是而得之物理的推論，大致如下：

如上所說，勃羅格里應用輻射現象所呈露之二元性於物質定律。茲將表示光子能量及波長關係之基本方程式重寫於左：

$$\text{光子能量} = \frac{\text{蒲郎克常數} \times \text{光速}}{\text{波長}}$$

一運動的電子（或質子）代表一能量，從波動說的見地，此運動為一物質波，非電子（或質子）的運動。上面之方程式，移用之於物質波，成爲

$$\text{物質（電子或質子）能量} = \frac{\text{蒲郎克常數} \times \text{物質波之速率}}{\text{物質波之波長}}$$

試審察此方程式中之各量。左邊之物質能量，係一微粒觀念，如已知物體之速率及質量，即可將彼等適當配合而得物體之能量。在最簡單之例中——即當電子靜止時——其能量（以爾格計算）如下式所示：

$$\text{電子能量} = \text{電子質量} \times (\text{光速})^2$$

（參看第九六頁。）運動的電子，能量較大。相對論予吾人以一簡單公式，表示能量與靜止質量及速率之關係。故上面勃羅格里方程式之左邊為一已知之量。至於右邊諸量，蒲郎克常數無須解釋，

但其餘兩個——即物質波之速率及波長——俱爲未知之量。吾人不能從方程式以得此二量，但如能從別的根據以計算物質波之速率，則從此方程式可得其波長。勃羅格里用何種推理而得物質波傳播之速率，此處不擬敘述。吾人祇須知物質波傳播之速率不等於光速，亦不等於質點之速率，但與此兩個速率有關係。質點之速率愈大，物質波之速率愈小。物質波之速率與質點之質量無關，祇與其速率成反比例。在輻射現象中，並無與此類似之點。光波在真空中傳播時，各色之速率俱相同；是即光子能量雖不等，其速率則俱相同。至於物質波，速率由質點之能量而定，易言之，由其速率而定。

勃羅格里根據其推理，卒能計算物質波之速率。下面所示者爲其所得之最後結果。表示波長與質點（電子或質子）的質量及速率（是爲從微粒的見地表示質點特性之量）之關係：

$$\text{波長} = \frac{\text{普郎克常數}}{\text{質點的質量} \times \text{質點的速率}}$$

從此式，可見對於物質，微粒觀念與波動觀念亦可相聯而並列。用微粒名詞所表示之語，亦可

如前（第四五頁）轉移之，使成爲用波動名詞所表示之語。茲舉數例於下：

用微粒名詞

- 一、一羣電子以等速運動。
- 二、電子速率加倍。
- 三、運動的質子之質量較同速之電子質量大 $1,850$ 倍。

用波動名詞

- 一、一列電子波有確定波長。
- 二、電子波波長減半。
- 三、質子波之波長爲同速電子波波長之 $1,850$ 分之一。

勃羅格里的推理，能否有任何物理意義？所得結果，有可用實驗審察者乎？能有現象，與物質微粒觀念衝突，而爲物質波動說所能解釋乎？

茲舉一簡單計算爲例：設有一羣運動的電子，速率等於光速十分之一，即每秒 $30,000$ 仟米。欲求其波長（以厘米計算），吾人須除蒲郎克常數以電子質量及速率（以每秒厘米計算）。用上面之公式及第九一——九二頁中所示之數字，由一簡單的計算，即可得到所求之波長爲 0.22 埃。大概的言之，電子波之波長與 X 射線之波長爲同級之量。故一柱抱有確定波長之電子，可與一

柱同波長之單色X射線相比。但從前面所說，吾人知光波與物質波之間，有根本不同之點存在。

設有一羣運動的質子。速率亦爲每秒 30,000 仟米，其波長等於上值之 $\frac{2000}{2000}$ 分之一（確切的言之，等於上值之 $\frac{1}{1,850}$ 分之一）即 0.0001 埃。

二者俱顯示可用實驗以審察物質之有無類波特性的。設想有一羣等速運動之電子（或用波動名詞，一單色電子波）投射於一薄層晶體之上，晶體係一繞射柵子。吾人已知晶體中原子距離極近，能使X射線產生繞射效應。電子波波長與X射線波長，既爲同級之量，電子波通過薄層晶體時，應亦能產生繞射效應，在照相片上露其繞射花樣。事實上，實驗已得有此結果；是當然可稱爲近時理論實驗合作之最大成就之一。首得此結果者，爲美國科學家淡維孫 (Davisson) 及施滿 (Cermier)。彼等之實驗，後來重做多次，所用電子，每次速率不同（是即電子波波長每次各異）。所得之繞射花樣，俱與理論所預測者相合。在本書之首，有一照片，表示電子波繞射現象；與X射線繞射現象類似之處，照片中特殊顯露。吾人已知從X射線之繞射花樣，可斷定X射線之波長；茲從電子波之繞射花樣，吾人亦可斷定電子波之波長，而徵實下列之基本關係：

蒲郎克常數

波長 =

電子的質量 × 電子的速率

方程式左邊之量，可從繞射花樣斷定之。蒲郎克常數及電子的質量，俱爲已知之量。在適當強度的電場作用之下，可使電子得到小於光速之任何確定速率。是則上列方程式中之各量，俱爲已知。吾人因是可視實驗所得之各值是否與此方程式相合。事實上，是相合的。故此處實驗與理論又相符。質子波之繞射效應，亦與理論之預測相合。

所以吾人已得一顯露物質類波構造之現象，吾人知識之範圍，因而加廣，知輻射現象及物質現象俱有其兩方面，一爲微粒的，一爲類波的。

率勒丁格的推理

勃羅格里理論中之假設，極端簡單。所包括之事實，範圍甚狹，殆祇限於等速運動之電子；與原子構造問題，似無多大關係。電子波之存在，顯然不能影響波耳學說所得之結果。關於此點，率勒丁

格之理論，可視為一極充實之進步。彼將勃羅格里之觀念，加以精深之擴展，使吾人對於物質之展望，亦為改變。率勒丁格所發展之波力學，範圍之廣大，遠過於勃羅格里之理論。等速運動的自由電子之限制，不復存在；吾人得以研究電子在外加電場或磁場中之運動。波力學為波耳學說之真正繼承者，不僅對於波耳學說所包括之事實，能予以前後融洽之引人的解釋。同時吾人知識之範圍，亦因之而擴大。吾人不能用批評波耳學說之理由以批評波力學。又勃羅格里所得之推論，波力學中亦兼含之。電子波之繞射，及波長與電子速率之關係，不過為波力學中之一極端之例——即作用於電子上之外加電場及磁場俱等於零的時候所能生之效應——而已。

率勒丁格所根據之原理為何？

欲答此問，先須討論光學。在十九世紀，呈露光之微粒方面之諸效應，尙未發現。所有輻射現象，俱祇呈現其波動的方面。繞射及其他現象（此處無須列舉），俱以光為電磁波而解釋之。所有光學教科書，幾乎俱有一章稱為幾何光學。許多關於光學的簡單事實，可由幾何光學解釋之，無須使用物理光學——即光的波動說——之數學工具。譬如研究陰影效應或光在非均勻之介質中

過時所遵之路線，用幾何光學中之已知定律，即足以得準密之結果。幾何光學之主要定律中，其一——菲爾瑪原理 (Fermat's Principle)——謂光線在均勻介質中 A B 二點間之路程，係一條直線。如果 A B 二點間，介質不止一種，或介質連續的變更，因而光速亦連續的變更，則光線自 A 至 B，當取需時最少之路程，所有許多可能路程中，光線擇取合此條件之路程；猶競走者欲於最短期間到達預定之地點，如能減少其所需之時間，則路線雖若迂迴，亦必由之。

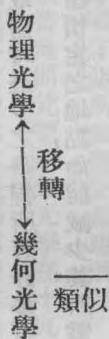
幾何光學之定律，較物理光學定律為簡單，但此兩組之定律，具有相互之關係。物理光學之假說，比較普遍。幾何光學之方程式，僅係物理光學方程式的極端之例。波長愈短——即輻射愈硬——幾何光學與物理光學之差異愈微，幾何光學之原理愈可應用。設吾人所研究之輻射，波長漸漸縮短，吾人漸漸從物理光學之定律移轉於幾何光學之定律。幾何光學可視為支配輻射現象的定律之一種初級近似，輻射之波長愈短，此近似愈即於真。

茲請討論典型力學與典型力學有關之現象，雖與光學的現象十分不同，但幾何光學與典型力學之間，哈密爾敦在十九世紀已發現一個形式上之類似。物理學中各異之部分，所討論之現象

彼此不同，而推理方式往往遇有類似之處，此即其一例。

設一物體在一力場中——譬如一行星在太陽之引力場中——經過 A B 兩點，物體所經之路線將爲何若乎？從典型力學之原理，物體將從所有可能路線中，擇取一條，物體如遵此條路線，則有一函數（此函數爲何，吾人無須細述）當得其最小之值。典型力學中此條原理與菲爾瑪原理相似。

幾何光學，物理光學，及典型力學之相互關係，可圖示之如左：



橫線表示形式上之類似，縱線表示從物理光學定律至幾何光學定律之可能的移轉（當波長無限的縮短時。）

此時吾人可答上面所設之問，即率勒丁格的理論中根本原理爲何？

猶幾何光學爲物理光學之近似，不能解釋繞射現象，率勒丁格認典型力學祇爲波力學之初級近似，雖足以對付粗顯的物理現象，但遇微眇的物理現象，如原子構造問題，必遭失敗。故上面之圖，茲須擴充如下：

波力學 \uparrow 移轉 \downarrow 典型力學

—— 類似 —— 類似

物理光學 \uparrow \downarrow 幾何光學

關於原子及質點之組織，吾人須以波力學推察之。率勒丁格取法於幾何光學之可移轉於物理光學，發現典型力學之可移轉於波力學。

前面吾人謂波力學包括波耳學說中所討論之現象。此語可用氫原子具體之例闡明之。對於氫譜之譜線，波力學將如何解釋之乎？

在氫核（即質子）之力場中，有一電子，核與電子。依庫侖定律而吸引。庫侖定律形式上與萬有引力定律相似。於此，吾人用典型物理學的觀念制成命題。此爲第一步。第二步即係將此問題移

轉爲波力學中之相當問題。此種進行手續，完全合理，不似波耳學說中所用者之晦昧及任意。命題一經用典型物理學觀念制成，率勒丁格與吾人以一合理的方法，能在波力學中構成一相當之命題。關於量子軌道及行星式電子（從某一軌道至他軌道）之跳躍，所有困難，此處不復存在。然量子論亦爲率勒丁格波力學中所使用，不過使用情形與波耳學說中全異。此處量子論出現於從典型力學至波力學之移轉法則中。此移轉由使用蒲郎克常數 h 而成。從典型方程式移轉於波動方程式時，量子論隨之出現。用波力學構成吾人之問題，即由此法。第三步（亦即最後的一步）爲求此波動問題（譬如上述之氫原子問題）之解答。至於所謂解答波動問題，其意何指，此處祇能作一浮泛之討論。設吾人謂解答一波動問題即係「求解一個二級的偏微分方程式，假定邊界條件爲已知。」對於未習數學之人，此語有何意義？但又不能改成易於了解之陳述。故吾人祇能說：波力學中之問題，係從波動方程式（與物理光學中之方程式相似）求覓所謂率勒丁格的函數。波動問題因而不能盡有解答。譬如氫原子，必其電子能量等於特殊規定之值時，方有率勒丁格函數存在；而此特殊能量恰與波耳用他法所得者相同。率勒丁格假定其波動方程有解式存在，得到能級與波

耳之能級無異。非如典型力學，所有能級俱在許可之列，波耳學說及波力學俱祇許數個特殊能級存在，如第六圖之所示。關於此點，波力學所得之結論，與波耳學說一致，不過所用之推理過程，比較合理，無波耳軌道學說之武斷性，惟數學上較為繁重耳。故率勒丁格學說之解釋氫譜譜線之整齊排列，無異於波耳學說。

上面所述波力學中之推理過程，當然不僅可應用於氫原子，此處不過以氫原子爲一具體之例而已。率勒丁格學說不但較波耳學說爲精深，所包事實，範圍亦較廣。

上面已經說過：波耳學說構造一氫原子模型，藉之以推測支配氫譜譜線之定律。但譜線除排列外，尙另有一問題，吾人亦曾提及，即譜中各線，強弱不一。用波耳學說之名詞，當謂：某線之強度最大，因發生與此線相當跳躍之原子爲最多。是則支配各線強度之定律，須從統計上考慮而得。氣體爲一巨數原子之集團，波耳發現支配各個原子之定律後，繼之以考慮各線之強度。此爲粗顯物理學之問題，故須用另一種推理方法，以統計爲根據。當時即另作數個新假定以解釋譜線之強度，此問題與原子自身之構造，根本無關；推理方法，具有統計性質，亦與研究原子內部構造時所用者完

全不同。

氫線強度問題，在波力學中另具一種情形。前所視為毫無關係之兩個問題，其一關乎能級，其一關乎氫線之強度，在此處則有密切之關係。當吾人討論波力學應用於氫原子時，知問題須合乎某種條件，方能得一解答。波耳之能級，即出現於此條件中；易言之，必須電子能量與波耳能級之能量相同時，方有吾人所求之率勒丁格函數存在。率勒丁格函數不僅與許可能級有上述之根本關係，同時又能使吾人作統計的研究，以定各個譜線之強度。因率勒丁格函數所表示者，為支配巨數原子所成的集團之定律也。因其如是，故波力學解釋支配各譜線強度之定律，顯然較為寬廣簡單而又直接。事實上，根據率勒丁格函數所得之推論，非指各個原子，俱係對於原子集團而言。波力學不能使吾人得到關於各個原子之知識；原子之狀態，非波力學所注意。根據率勒丁格函數，吾人得以解釋關於原子集團之種種合理構成的問題。總之，波力學具有統計性，首先認識波力學之統計性者為波恩 (M. Born)。

茲將再舉一例，較氫原子更為簡單，即自由電子。依率勒丁格，吾人先以典型力學的觀念陳述

問題，再用過渡方法（此處，吾人遇蒲郎克常數）移轉之於波力學中。對於自由電子，率勒丁格函數代表一波，其波長如下式所示：

$$\text{波長} = \frac{\text{蒲郎克常數}}{\text{電子質量} \times \text{電子速率}}$$

此式吾人已熟知之，與勃羅格里用他法所得者相同。故勃羅格里所研究之問題，在率勒丁格理論中，成爲一極簡單之特例。

試再討論上面物質波波長之公式。式中分子爲蒲郎克常數 h ，係一極小之量。典型物理學認能量爲一連續量，故須設想 h 等於 0。觀上面公式，如 h 逐漸減小而趨於 0，波長亦逐漸減小而趨於 0。物質之波動方面，不復存在，吾人又入於典型力學之範圍；是猶光波波長逐漸趨近於 0 時，吾人逐漸從物理光學移轉於幾何光學也。

海孫堡的推理

率勒丁格波力學之第一篇論文，於一九二六年發表。不久以前，青年科學家海孫堡有一論文，發表其新量子力學之大綱，彼所根據之意見，馬哈（E. Mach）曾已想及之。

波耳學說想像電子在軌道上繞轉，并指出某一時刻電子所在之地點，及電子在軌道上各點之速率，宛若吾人研究一物體在地球引力場中之運動然。但將粗顯物理學中之觀念，應用於原子構造，是否合理？吾人能想像量度方法以測定電子之位置，速率及其軌道乎？引用不能直接測定之量於科學中，是否正當？吾人應永以事實為基礎，與觀察或量度無關之觀念，應須委棄。在原子模型中，電子之位置，速率及軌道，俱不能直接觀察或量度；吾人在氫譜中所觀察者，祇為譜線之波長及強度。此二者應為吾人之基本觀念。新量子力學在其開始的階段，即以此二者（譜線之強度及波長）替代與量度或觀察無關之諸觀念。新量子力學之推理，完全屬於抽象的；故意避去具體的畫圖；對於原子，不作任何模型；但與吾人以方式。用此方式，每個典型問題，可由新量子力學以表示之，在新量子力學中，理論的結果與實地的觀察，祇能在其抽象推理中之最後一段，方能得有關係。

典型物理學所運用之物理量——如力，能量，質量等——在每一問題中俱可予以量度所得之值。

設有二量，以 a 、 b 代之，吾人知

$$a \times b = b \times a$$

典型物理學中所用之量，盡屬此類；計算時，式中之因數可任意顛倒，結果無異。但是否有不合此條件之量存在？即是否有 $a \neq b$ 二量，

$$a \times b \neq b \times a?$$

此類之量，數學家久已知之；但在物理學中，並無應用之處。

茲爲便於討論起見，吾人將用下列二名詞：

屬於「 $a \times b$ 」等於「 $b \times a$ 」之量，吾人稱爲 c 量。

屬於「 $a \times b$ 」不等於「 $b \times a$ 」之量，吾人稱爲 q 量。

典型物理學所用者僅爲 c 量，而新量子力學所用者則爲 q 量。

新量子力學之方法，約略如下：

新量子力學之方程式，原理上係依據典型物理學之方程式構成；譬如新量子力學中，關於一振動電子（代表一微渺物理系）之方程式，與典型力學中關於一振動質點之方程式（粗顯物理方程式）類似。所異者即在典型物理學中，方程式內之符號，俱代表 0 量；在新量子力學中，式內符號，俱指 q 量。

吾人茲將說明蒲郎克常數如何插入於新量子力學中，如 $\hbar \times D$ 不等於 $D \times \hbar$ 則

$$\hbar \times D - D \times \hbar \text{ 即不等於 } 0。$$

然則等於若干乎？新量子力學以此差數（即 $\hbar \times D - D \times \hbar$ ）為與蒲郎克常數 h 成比例，故 h 插入新量子力學中，彷彿為一種計算的定則。如果 $\hbar \times D - D \times \hbar$ 之差數不加規定，則新量子力學方程式所示之問題，數學上成爲不確定，不能得有解答。

由是亦即可知典型力學爲新量子力學之一極端之例，因使 h 等於 0 ，即可從新量子力學移轉於典型力學也。 $\hbar \times D - D \times \hbar$ 既與 h 成比例，故 h 等於 0 ，此數亦等於 0 ，是則 $\hbar \times D$ 與 $D \times \hbar$

相等， q 量成爲 c 量，新量子力學之方程式亦即成爲典型力學之方程式。此與波力學中，典型力學成一極端之例相似。

茲將討論下列二問題：

一、海孫堡新量子力學與率勒丁格波力學有何關係？

二、新量子力學與波耳學說，有何關係？

第一問題之答語極簡單，即二者所得之結果彼此無異。但率勒丁格與海孫堡二人推理之出發點，完全不同。率勒丁格將幾何光學及物理光學之類似，移轉於新現象之區域中，海孫堡則制一抽象的計畫，無敘述現象時使人迷惑之無謂的客觀關係。二人所用之數學工具，亦各不相同。率勒丁格建設微分方程，研求其解式，而海孫堡之新量子力學，則用包含無窮數的代數式之數學組織。二人之學說，形式上雖不同如是，但所得之結果，卻完全無異。首先證明此點者爲率勒丁格。吾人因是亦遂得第二問題之答語，即新量子力學不僅包括波耳學說所解釋之事實，且能接近波耳學說所不能解答之問題，（例如氦及其他元素之光譜。）所有對於波耳學說之根本非難，此處俱不適

用。至於方法之嚴密，構造之合理，形式之美觀，新量子力學均不亞於典型力學。

由上所述，可知「波力學」及「新量子力學」爲同義之二名，因兩者所包之事實相同，所得之結果亦相同也。

狄拉克的推理

英國青年科學家狄拉克對於科學會做許多創造工作，問題種類，亦頗不一。在彼所解答之諸問題中，此處祇能討論其一。

一九二三年至一九二五年，爲波耳學說危急時期之一。突破波耳學說藩籬之新事實，時有發現；光譜構造中，頗有幾個由觀察所得之細碎情形，與波耳學說中之斷語，不能融合；爲何K層由兩個行星式電子所合成，而L層則爲八個，M層則爲十八個，亦爲波耳學說所不能解釋。此類之謎，與時俱增。但當其讓位於新量子力學之前，波耳學說在一九二五年，尙獲一次大勝利，是爲其最後一次之大勝利。有一大部分事實，在先不能使之合於波耳學說，且與波耳學說有顯著的衝突，經烏倫

俾克 (Uhlenbeck) 及古斯米 (Goudsmit) 補充一簡單新假說——旋轉電子之假說——之後，俱遂得有解釋。此假說補足原子構造之畫圖。欲了解其意義，吾人仍用粗顯物理學的觀念及譬喻：電子不僅在量子軌道上繞核運行，且同時繞其本身之軸線而旋轉。彷彿地球，不但每年繞太陽運行一週，且須每日繞其軸線旋轉一次。旋轉電子之假說，出現於新量子力學誕生之年，為波耳學說生氣之最後一閃。旋轉電子觀念加入之後，波耳學說所能解釋之事實，範圍加廣。但雖如是，吾人從新量子力學而知此終非正當之途徑，欲依據粗顯物理之觀念以改造原子模型，終為不可能之事。

上面吾人曾說新量子力學（或波力學）包括波耳學說所包括之事實。此語尚須補充。在未有旋轉電子假說之前，波耳學說不能解釋之現象，其中有數個亦為新量子力學所不能解釋，故此數現象（從旋轉電子觀念得到解釋）超出量子力學範圍之外，波力學亦不能解釋之，因波力學與量子力學所得之結果相同也。

此外量子力學尚有一不滿人意之處。典型力學為量子力學及波力學構造之基礎。從波力學移轉於典型力學，類似物理光學移轉於幾何光學；在海孫堡之量子力學中，假定 h 等於 0 ， q 量

(即屬於 $\alpha \times \beta$ 不等於 $\beta \times \alpha$ 之量) 成爲 c 量 (即屬於 $\alpha \times \beta$ 等於 $\beta \times \alpha$ 之量), 吾人重返於典型力學的方程式。對於率勒丁格及海孫堡二人學說, 典型力學俱爲一極端之例。但物理觀念中由相對論所生之變化, 率勒丁格及海孫堡均全未顧及, 新量子力學與相對論中所得結果, 吾人將何以使之協調? 類此問題, 上面亦曾遇及。關於氫原子構造之最初最簡單的理論, 亦未曾計及相對論所得之結果。迨瑣曼弗耳始將相對論原理引入於原子構造問題; 假定質量須隨速率變更, 遂剖分能級而得光譜精細構造之解釋。因量子力學在其最初的階段, 與相對論不能發生有任何關係, 故當時似覺波耳學說較量子力學爲優。

綜上所述, 對於新量子力學, 彼時有二種非難: (一) 旋轉電子假說所能解釋之事實, 彼不能解釋; (二) 所根據者係典型力學, 非相對力學; 相對論所得之斷語, 不能與新量子力學之結果調和。

在一九二八年, 狄拉克謂此兩個非難可同時消釋。波耳學說優於量子力學之處, 至是遂剝奪淨盡。狄拉克將率勒丁格方程式略爲變更, 使與相對論協調, 因而證明旋轉電子假說所能解釋之

事實，量子力學亦能解釋之。因狄拉克，吾人又獲一大進步。彼使吾人對於周圍現象，得一較深切之了解；同時使新量子力學發展達一階段，使人確信其優勝於波耳之舊學說。

故率勒丁格方程式，祇一初級的近似；較密切的近似，爲狄拉克用相對論修正之方程式。是猶前面波耳學說中之波耳原來模型，祇爲初級的近似，璜曼弗耳之模型及旋轉電子之假說，則爲較密切的近似。

此處又遇每一問題發展過程中所必有之變化：推理所用之數學，逐漸複雜。狄拉克方程式較率勒丁格方程式，複雜甚多，用相對論修正之波動方程以解決特殊問題，其難日甚。科學發展，致用以推理之工具，日趨於複雜而不已以迄於革命，將舊觀念放棄，而以另一眼光審察諸現象。每一理論之發展，俱有新困難隨之發生，新缺點隨之呈露。

狄拉克的方程式，尚附帶一難於想像之觀念，是即具有負質量之電子。謂「某物體之質量爲負」無異於謂「我今日吸了負五支的烟捲」此二語同一爲人所不能了解。

狄拉克有一新異之意見，用以想像及解釋負質量電子之存在。吾人茲設下喻以顯之：

在一劇院中，將開始演奏之時，所有座票，全行出售；觀衆亦多已就位。間有一二遲到者，徘徊四曠，以尋覓未佔之空座。不多時，客座皆滿。

依狄拉克，在宇宙中有空位——「穴」Hole——以備電子之佔有，彷彿劇院中之空座，以備顧客之降臨。但宇宙中之「穴」，多已佔據，未佔之「穴」，比較甚少。猶劇院中之觀衆，電子幾已佔盡所有之空位，所餘空位，將來亦必有電子來佔據之。當所有空位盡被佔據之時，即爲物質宇宙之末日。進「穴」之電子與未進「穴」之電子，猶劇院中之已就座的觀客與尙在覓座的觀客，其間有根本之差別。已進「穴」（永不復出）之電子，爲具有負質量之電子；彼不顯露其存在，吾人亦無法得以證實其存在；吾人所能觀察之電子世界，係尙未進「穴」之電子世界（彷彿劇院中之遲到者）但在宇宙中，有正質量之電子，兼有負質量之電子。狄拉克謂「穴」（四周爲負質量電子所圍繞之空位）之性質如正電元，因其能吸引電子（正能量之電子）。電子填滿空位之舉動，同時亦即爲物質毀滅之過程。電子將其質量從正變負，一個負電元及一個正電元同時消滅；與此過程相伴者，爲質量之毀滅，及極硬射線（或即宇宙射線）之出放。具有正質量之電子，其數比較極小。在吾人宇

宙中，此時祇有殘餘之物質；即此殘餘之物質，將來亦終歸消滅，化爲輻射而散逸於宇宙中。

依狄拉克，吾人有：（一）正能量之電子（猶劇院中之遲到者）；（二）負質量之電子（猶已就座之觀客）；（三）正電元即負質量電子所圍繞之「穴」，（猶座客圍繞之未佔的空位）。

正電元——即負能電子所圍繞之「穴」——非即質子。吾人可藉計算以說明「穴」之性質，宛若正電元，但其質量等於電子之質量。狄拉克的理論，初時即因此事爲人所不滿。因既假定有負能之態，吾人不能不假定有向所未知之物質新成分——正電子——之存在。現在吾人已得有正電子存在之實驗證據（第一七四頁）；勃蘭開脫及沃迦里尼之實驗，意外的徵實狄拉克之想像。故前所不滿於狄拉克理論之處，今適足以表顯其偉大之勝利。

觀上面所示之例，可知現代物理學之觀念何等超脫！何等變幻！

非定命

吾人所欲敘述之事實，將近終了，所餘未說者，祇有關於由量子力學所發生之數個廣泛的哲

學問題。海孫堡所得之結果，影響物理學之主要問題及思想之方法，變更舊日之意見，使深入科學根基之問題，得一新穎之闡發。

茲請回至首章所討論之問題——即定命問題。

關於此問題，由量子力學所得之結果，曾經過不少之討論，發表不少之文字，意見多互相衝突。此處不能詳述；亦不欲解釋此問題所有之各方面。吾人祇須知此處所述者，係代表具有幾分主觀性之一個見地。

在第一章，曾討論定命法在典型物理學中之應用。在最初時期，物理學之自信心頗堅，以為祇待自然界定律之知識逐漸完備，各物理系之未來狀態，終能詳悉無遺。定命的推理，祇須確知物理系之初態及支配此系之定律，即可預測此系在未來任何時刻之狀態。預測之準確與否，可在此未來時刻觀察或量度此系之狀態以判決之。最簡單之例為力場中之一質點。假定質點之質量為已知，則吾人如知此系之初態——即質點之位置（質點之坐標）及速度——從力學原理，即可知作用於此質點上之力為若干，而質點在未來任何時刻之位置（即坐標）及速度，亦遂能因之而斷

定。茲請作進一步的討論：吾人欲知物理系之初態，必須量度；而物理系受量度之影響，所求之量，不免因之而稍有變動。譬如以溫度計量度液體之溫度，當溫度計插入於液體時，液體之原來溫度，必因之而微有變更，變更雖微，但不能免。吾人如依據典型物理學，則可想像此種變更，均極微小，如量度方法加精，此種變更尙可大爲減少。易言之，典型物理學許吾人想像量度方法可以逐漸加精，物理系所受量度之影響可以無限減小。

每一量度，誤差恆不能免。量度實點初位及初速時所生之誤差，視所用儀器之準確度而異。當一誤差成立時，吾人輒希望不久將有一較精密之量法以自慰；是爲典型物理學所許可之想像。想像中量法之得以逐漸加精，似無止境，設在百年以前，有人告當時物理學家，謂量度之準確，有一確定的限度，即用極精密之方法，亦不能超越此限；又此限度並非由於技術上之困難，實基於自然本身之定律；彼等聞之，當必十分驚訝。

再簡括的言之：在典型物理學中定命原理之可應用，係根據於下述之假定：物理系量度時所受之影響，僅爲極微之影響；且吾人可想像較精密之方法以定物理系之初態，困難較前爲少，而確

度較前爲高。

茲審察統計的方法；此法在第一章中亦曾經吾人討論。以氣體動力論爲根據，吾人設想氣體內分子之數極大，而每一分子由定命的定律所支配。如果分子集團中各個分子之初態爲已知——如果每一分子之初位及初速度已測定——則吾人可預測此系之將來；因每一分子之運動，以及任何二分子間之碰撞，俱爲典型力學中定律（即定命的定律）所支配也。但對於巨數的個體所合成之物理系，吾人不能將所有個體之初態，一一測定，勢不得不放棄定命法而取用統計法。用統計法所得之預測，乃關於物理系能得某特殊狀態機會之大小，非指系中各個個體之命運。吾人不能確定系之初態，故系之將來，終非吾人所得知，當然不能保其不含有意外。但雖如是，彼時物理學家仍以爲微渺物理系之構成與粗顯物理系相似，同爲定命的定律所支配。

迨波耳學說出現，吾人始覺定命法之不能普遍的應用，不能假定微渺物理系與粗顯物理系類似。原子構造之模型，顯然具有非定命之特性，吾人利用之而得支配光譜線系之定律，及波耳學說所包羅諸現象之了解。出射的光子之能量或波長，由於兩個能級（始級及終級）而定，非僅由

於初態。吾人由是而得解除從前思想上之一根本的錯誤，——即舊日之褊狹的見解，以爲支配微渺物理系之定律，與粗顯物理世界中所得者類似。波耳學說使吾人脫離典型物理學之桎梏，知「實在」具有某類問題。此類問題之解答，似將最穩固之學說推翻。

新量子力學之不容典型物理學之定命法，較波耳學說更覺明確而透徹；吾人所根據之觀念，較前更爲深刻。

試應用定命法於一自由電子（自由電子係一電子，無任何外力作用於其上）。試以定尋常質點初態之方法，定此電子之初態——即在某一時刻之位置及速度。茲請先說位置：電子爲一甚小之物體，欲定其位置，吾人必須設法「見」之——必須以輻射照着電子，使電子散射之。吾人常用顯微鏡以觀極小之物體，能否有一顯微鏡可用以觀察電子？此問題之答語，可從光學中得之。依光學，顯微鏡之放大率，有一最高之限；任何完全顯微鏡，不能超過此限。此最高之限，非由於顯微鏡構造之技術上困難，實基於物理學上之根本的定律。如物體小於所照之光之波長，即最完全之顯微鏡，亦不能使之顯露。波長短於 4000 埃之色，爲人目所不能見。 4000 埃爲紫色光之波長，亦即可見

光譜中最短之波長。即用最完全之顯微鏡，吾人不能見小於 $\frac{1}{1000}$ 埃之物體——即十萬分之一厘米左右的物體。此限度雖若極小，但從微渺物理系的見地，則爲極大。波耳原子與之相比，已大數千倍，原子中之行星式電子更無論矣。從上所說，「目睹」電子之事，祇可視爲一種幻想。茲吾人且遵此危險的幻想之途徑前進。想像有一種活物，能感覺各種射線，如人目之於可見輻射。是則彼等能見 X 射線， γ 射線，以及與物質毀滅過程相伴之極硬輻射。故雖任何微小之物體，此種活物俱能「見」之，祇須用適當短波之輻射以照所欲觀察之物體，即能達其目的。故用極硬之輻射，彼等能定電子之位置，準確惟其所欲。但一嚴重的困難，亦即隨之而發生。吾人想像之活物，所抱目的係欲定電子之初態——即電子之位置及速度。設電子之位置，已用上述方法測定，其速度將如何當極硬輻射與自由電子碰撞——即具有極大能量之光子與自由電子碰撞——吾人知有昆普吞效應（見第五章）。光子損失其一部分之能量，爲電子所得。光子電子間能量之授受，猶尋常兩個橡皮球之互撞。散射之光子，能量較前爲少，故輻射較前爲「軟」，代表一較長之波。而電子之能量，則因碰撞而增加，故其速率亦遂較原來爲大。輻射愈硬，昆普吞效應愈顯著，而電子速度之變更

亦愈大。故測定電子位置之過程，即須牽動電子之速度。輻射愈硬，電子位置之測定愈準，但其速度之變更愈大，速度既生變化，電子之初態即被擾亂。故吾人想像之活物，企圖測定電子位置之心愈熱，電子之初態愈益擾亂。

從上面及其他考慮，吾人得所謂測不準原理。首先發表此原理者為海孫堡。此原理在現代量子力學中頗為重要，可以下式表示之：

電子質量 \times 測定電子位置時所生之誤差

\times 測定電子速度時所生之誤差

與普朗克常數 h 約略相等。

茲將此式所含之意旨，闡釋略為加詳：吾人欲斷定電子之初態而量度，關於位置或速度之每一量度，俱有誤差隨之而產生；但量度位置時所生之誤差與量度速度時所生之誤差，彼此有一相互之關係，即兩個誤差所乘之積為一常數。量度位置時所生之誤差愈小，則量度速度時所生之誤差愈大。所用之輻射愈硬，電子速度之變更愈大。量度位置時所得之準確度如極高，則速度上所生

之誤差即極大。如欲不變電子之原有速度，吾人須用長波之輻射——譬如紅外輻射。用此種輻射，幾無昆普吞效應產生，故電子之速度改變甚微；但用此長波輻射，吾人已知不能確定電子之位置。

茲設一喻以顯之：在一劇院中之舞臺上，有甲乙二演員；甲在臺之前部，乙在臺之後部。吾人以觀劇鏡觀此二人之面。如將此鏡對於甲面調準，則乙面必模糊不清，對於乙面調準，甲面必模糊不清。欲以此鏡同時觀二人之面十分清晰，是為不可能。如將此鏡對於甲乙二人間之中途一點調準，則同時可觀二人之面，但俱不十分清晰，亦不十分模糊。喻中之二演員，一代表電子之位置，一代表電子之速度。

依典型物理學，質點的位置及速度之測定，準確度可惟人所欲——是猶喻中之甲乙二演員同在臺之前部。但在新量子力學中，量度之準確有一限度，位置上準確之限與速度上準確之限，兩者之間，有一關係存在。表明此關係者為測不準原理，而在此原理中，吾人遇蒲郎克常數 h ；設在不準原理中 h 之地位，非 h 而為 \circ ，則吾人復返於典型物理學，速度上及位置上之誤差，可同時俱等於零。

上面討論之結果，可撮述之如下：依量子力學之原理，吾人測定微眇物理系之初態，不能無限準確；量度所生之誤差，必須與海孫堡測不準原理相合。但物理學之可應用定命法，全恃乎初態有測定之可能；故在微眇的物理世界，吾人不能應用定命法，因不能將初態測至無限準確；簡約的言之，微眇的物理世界係非定命的。

茲將此意用他語表示之：在典型物理學中，吾人假定量度時所用儀器對於被量之物理系所生變動極微，且假定此變動可設法使之無限的減少。但在原子內部的世界，量度過程本身，即欲變動被量之系（微眇物理系），故上面所說之假定，對此不能適用。但如是，則量子力學之推論，有何用處？如不能示吾人以微眇物理系之將來，則量子力學之物理定律有何意義？科學之基礎，果爲其所動搖乎？吾人能否有不測未來狀態之物理學？能否不知初態即可預測依海孫堡之原理，人或以爲吾人將永無獲得關乎微眇物理知識之可能。對此種種疑問，吾人將如何置答？

在典型物理學中，吾人用統計法於物理系之集團時，假定集團中之各個物理系爲定命的定律所支配。所用推理之過程如下：

一、假定集團中各個物理系由定命的定律所支配。

二、應用統計。

三、預測物理系集團某種狀態之機會大小。

在量子力學中，此過程之第一階段，即不適用。微眇物理系係非定命的。然則量子力學所得之結果，吾人將用何法訴諸實驗？

在波力學中，各個問題由率勒丁格函數而解答。如果波力學不能告吾人以物理系之將來，則此種函數有何用處？率勒丁格函數乃量子力學所產生的關於一物理系知識之總彙。但此類知識，俱祇指物理系之集團而言。「非定命」的推理法，不能使吾人知各個物理系之將來。所有從量子力學而得之斷語，俱祇關於物理系之集團。當典型物理學遇巨數個體所合成之集團時，即用上述之推理過程，從定命的定律移轉於統計的定律；而量子力學所得之結果，則為直接的統計結果，此實由於根本上無得到初態知識之可能，非若典型物理學因放棄初態知識而移轉於統計的結果也。

茲將上面所說者簡括之：

一、量子力學中所得之斷語，具有直接的統計性，俱指巨大集團而言，非指各個原子或各個質點。

二、吾人不能移用粗顯物理之觀念於原子內部的世界；微眇物理世界自有其特殊定律支配之。

茲請再聽懷疑者之論辯：彼將謂「予不知世人對於近數年物理學之進步，何以崇拜如是之熱烈；是不過代表暫時之革新，棄事實之穩定基礎，而就誘人之險惡幻想，不辭與顛撲不破之原理相衝突。自然科學如不受定定律所支配，即無保留之價值。科學現在呈一衰落空虛之狀態，當其放棄定命法時，即入此態。科學終必復返於定命的方法。將來吾人認識現象比較深刻時，爲定定律所支配之「實在」世界，當能盡露其底蘊。」

熱心於現代物理學之人，對此將作何語？彼明知懷疑者論辯之不中肯綮，將謂：吾人既不知可以支配微眇物理系之定定律，而謂微眇物理世界須受定定律支配，有何意義？作此語者，僅係

表示一種迷信，爲人所不能徵實，亦不能否認——科學中無容納迷信之地位。至謂科學終必復返於定命的方法，則他日之事，孰能知之？試問百年前之最大物理學家能預知今日科學之狀況乎？將來定律是否須取定命的形式，爲一無關要旨之問題。吾人祇知此時不得不遠離典型物理學中之方法，祛除深固之成見，及傳統之思想，而覓推理之新工具；又現在吾人對於世界所抱之觀念，祇就世界現在之情形而構成，不涉其他。對於理論實驗之互相衝突，各爭認可，吾人有時須改造觀念，擴展理論，進行創造工作以調和之。

吾人由是而對於世界得一較深切之認識。但同時益覺吾人知識之淺陋。因科學之勝利，藉以認識宇宙協調之各大學說之出現，以及現代科學之進展，覺環繞吾人的「實在」之蘊藏豐富，益形吾人理解力之薄弱有限。

第 二 表

原子序數	符號	元素	原子序數	符號	元素
1	H	氫	42	Mo	鉬
2	He	氦	44	Ru	鈷
3	Li	鋰	45	Rh	銲
5	B	硼	46	Pd	鉑
6	C	碳	47	Ag	銀
7	N	氮	48	Cd	鎘
8	O	氧	50	Sn	錫
9	F	氟	51	Sb	銻
10	Ne	氖	52	Te	碲
11	Na	鈉	53	I	碘
12	Mg	鎂	54	Xe	氙
13	Al	鋁	55	Cs	銻
14	Si	矽	56	Ba	鋇
15	P	磷	57	La	鐳
16	S	硫	72	Hf	鈷
17	Cl	氯	73	Ta	鉭
18	A	氬	74	W	鎢
19	K	鉀	76	Os	銱
20	Ca	鈣	77	Ir	銱
24	Cr	鉻	78	Pt	鉑
25	Mn	錳	79	Au	金
26	Fe	鐵	80	Hg	汞
27	Co	鈷	81	Tl	鉛
28	Ni	鎳	82	Pb	鉛
29	Cu	銅	83	Bi	鉍
30	Zn	鋅	84	Po	釷
33	As	砷	86	Rn	氡
34	Se	硒	88	Ra	錒
35	Br	溴	89	Ac	錒
36	Kr	氬	90	Th	釷
37	Rb	銣	91	Pa	釷
38	Sr	銻	92	U	鈾
40	Zr	鈷			

元素週期表
(特殊元素前表)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	O	VIII
1	1 H 1.0072							2 He 4.0000	
2	3 Li 6.94	4 Be 9.02	5 B 10.82	6 C 11.9971	7 N 14.0003	8 O 15.9914	9 F 18.99	10 Ne 20.17	
3	11 Na 22.987	12 Mg 24.39	13 Al 26.96	14 Si 28.06	15 P 30.96	16 S 32.047	17 Cl 35.437	*18 A 39.92	
4	*19 K 39.083 29 Cu 63.52	20 Ca 40.07 30 Zn 65.35	21 Sc 45.13 31 Ga 69.69	22 Ti 47.87 32 Ge 72.57	23 V 50.92 33 As 74.893	24 Cr 52.01 34 Se 79.2	25 Mn 54.92 35 Br 79.871	*36 Kr 83.9	26 Fe *27 Co *28 Ni 55.81 58.92 58.66
5	37 Rb 85.38 47 Ag 107.821	38 Sr 87.58 48 Cd 112.34	39 Yr 88.88 49 In 114.7	40 Zr 91.1 50 Sn 118.63	41 Nb 93.2 51 Sb 121.69	42 Mo 95.9 52 Te 127.4	43 Ma — *53 J 126.862	54 Xe 130.1	44 Ru 45 Rh 46 Pd 101.59 102.8 106.6
6	55 Cs 132.74 79 Au 197.10	56 Ba 137.28 80 Hg 200.49	57-71 稀有土類 81 Tl 204.2	72 Hf 178.5 82 Pb 207.11	73 Ta 181.2 83 Bi 208.89	74 W 184.0 84 Po 210	75 Re 188.6 85 —	86 Rn 222	76 Os 77 Ir 78 Pt 190.9 192.93 195.1
7	87 —	88 Ra 226.85	89 Ac 227	*90 Th 231.99	*91 Pa 231	92 U 238.05			

稀有土類

57 La 138.82	58 Ce 140.1	59 Pr 140.8	60 Nd 144.17	61 Pm —	62 Sm 150.35	63 Eu 151.9	64 Gd 156.9
65 Tb 159.1	66 Dy 162.38	67 Ho 163.4	68 Er 167.5	69 Tm 169.3	70 Lu 172.9	71 Yb 174.9	

