

吳 有 訓

按着 Compton¹ 和 Debye² 的理論, Compton 效應中波長的變動 $\delta\lambda$, 應為

$$\delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi) \quad (1),$$

式中 λ 為入射 X-線的波長, λ' 為散射 X-線的波長, ϕ 為散射角, h 為 Planck 常數, m 為電子的質量, c 為光速。以已知的數值代入, 則得 $h/mc = .024\text{\AA}$, ($1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$)。 (1) 式的正確和普遍, 已為許多物理學家³ 所證實。惟推求 (1) 式, 係假設入射的光子 (Photon), 為散射體中的自由電子所散射, 結果可以解釋 Compton 效應中變線的起源。而實際除變線外, 平常尚有一不變線, 他的波長, 同入射 X-線的波長, 完全相等。關於不變線之發生, Compton⁴ 曾假定為束縛電子散射的結果; 因為此種電子, 緊縛於原子中, 入射的光子, 不能撞他出來, 變作後退電子 (Recoil electron); 故入射光子的能同散射光子的能, 完全一樣, 即散射 X-線之波長, 全不變動。此種解釋, 已為一般物理學家所同意。

入射的光子, 既經散射分成變線和不變線兩部, 那末這兩部間強度的分配, 當然是一重要的問題。因為藉此問題的研究, 或可決定 Compton 效應發生的條件, 及原子中的各階級電子是如何參加散射作用。作者對於變線與不變線間強度分配一問題, 曾作下列研究: 第一, 兩線強度之比率與散射角的關係⁵; 第二, 兩線強度之比率與散射體原子數 (atomic number) 的關係⁶; 第三, 兩線強度之比率, 與入射 X-線

浪長的關係。本篇目的在總列研究的結果，與現時關於此問題的理論，互相比較；同時對於 Compton 效應中不變線之消沒一問題，亦加以討論。

研究的結果

研究應用的儀器和方法在以前發表的論文中，曾詳細敘述過，本篇不復重贅。研究的結果，可總述如次：試令 R 表示變線強度與不變線強度之比率，令 ϕ 表示散射角，令 N 表示散射體之原子數，則實驗許多散射體，所得 R 與 ϕ 之關係，可列如第一表， R 與 N 之關係，可列如第二表。但研究 R 與 ϕ 之關係時，所用之入射 X-線為 $Mok\alpha$ 線 ($\lambda = .7097\text{A}$)；研究 R 與 N 之關係時，所用之入射 X-線為 $Agk\alpha$ 線 ($\lambda = .5604\text{A}$)。第三表所列之結果，可表示 R 與入射 X-線波長 λ 之關係，其中祇列由炭(石墨)散射的結果，其他原質，未曾一一實驗，可是由第三表所示，便可概見其餘的了。

第一表 (入射 X-線為 $Mok\alpha$ 線)

各種放射體在不同的放射角所得的強度比率

放射體	木	白臘	炭	鋁	硫
ϕ \ R	R	R	R	R	R
60°	1.19	2.29	1.08	0.46
75°	1.85	3.10	1.31	0.74	0.25
90°	2.73	4.69	1.45	0.91	0.41
105°	3.21	5.16	1.82	1.23	0.67
120°	4.57	5.49	2.26	1.45
135°	5.38	6.52	3.42	2.11
150°	6.21	6.98	4.05	2.52
165°	7.00	7.47	4.86

第二表 (入射 X-線爲 $Agk\alpha$ 線)
各種放射體在放射角 = 120° 所得變線與不變線之強度比率

放射體	N	R	放射體	N	R
Li	3	∞	S	16	1.91
Be	4	8.72	K	19	1.72
B	5	7.02	Ca	20	1.71
C	6	5.48	Cr	24	.75
Na	11	3.04	Fe	26	.51
Mg	12	2.78	Ni	28	.40
Al	13	2.61	Cu	29	.21
Si	14	2.33			

第三表 (散射體爲炭)
用不同的入射 X-線所得的強度比率

入射線	R ϕ	75°	90°	105°	120°	135°
Mok α	R	1.31	1.45	1.82	2.26	3.42
Agk α	R	4.20	4.50	5.02	5.48	6.34

要是用第一表所列的結果，畫圖表示，則得第一圖。圖中每一曲線，表示實驗一個散射體的結果，一望而知 R 是隨着 ϕ 的大小而變易。在五曲線裏面，祇有白臘的一條，與衆不同，其餘都是在小的散射角時，凹向上面，在大的散射角時，凸向上面。白臘一條特別的原故，是因在白臘所散射的 X-線中，不變線的強度很弱，所以實驗時的度量，也比較的不可靠，遂致表現結果的一條曲線，也是有些不規則呢。

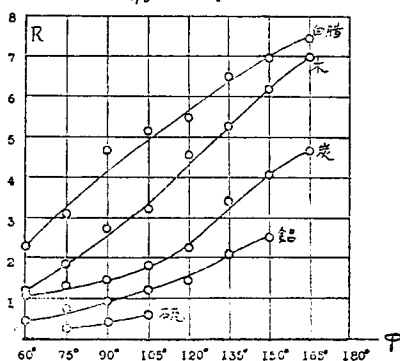
要是以第二表所列的結果，畫一 (R-N) 曲線，則得第二圖之曲線 I。如畫一 ($\frac{1}{R}$ - N) 曲線，則得第二圖之曲線 II。這兩條曲線，均可表示強度比例與放射體原子數的關係。

第三表中,只有兩個不同的入射 X-線,不便畫圖表示。如是入射的 X-線用得很多,那末也可畫一曲線,表示 R 和入射線的 λ 之關係。

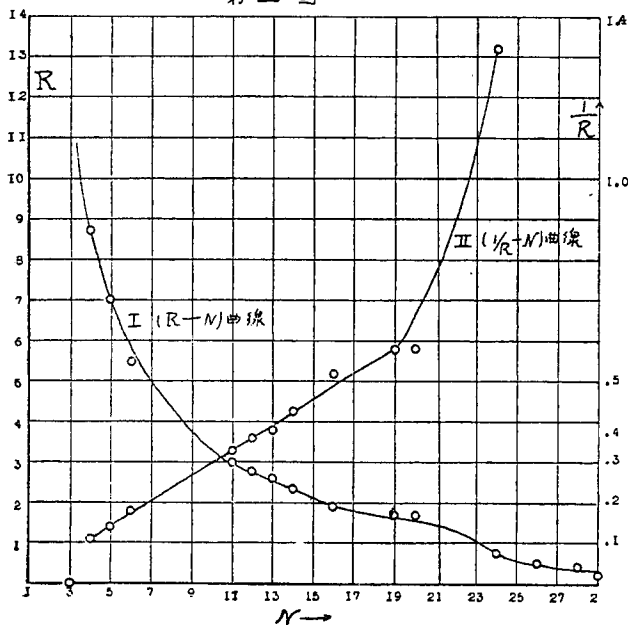
由是可知散射 ϕ , 原子數 N, 入射 X-線之波長 λ , 皆與變線及不變線間強度之分配有關,容於下節詳細討論之。在作者之研究結果未發表以前,此種關係,已為一般物理學家所注意。如 Ross⁸ 所得的變線和不變線的攝影, Compton

和作者⁹所得的變線和不變線的游離曲線,皆指示 ϕ , N 及 λ

第一圖



第二圖



同變線與不變線之強度比率有關,後來研究 Compton 效應者,也得着同樣的結論。不過當時的實驗結果,都是定性的,而且零星沒有系統。等到作者的論文發表後,才有定量的結果。以後研究

者有 Kallmann 和 Mark,¹⁰ De Foe,¹¹ Jauncey 和他的學生,¹² Albrecht¹³ 諸人;可是他們應用的方法,都不及作者方法之可靠,故準確的程度,也比較差一點,這層已有人論及,這裡無須細說。

在第二表中,用 Li 爲散射體,所得的 R 爲 ∞ ,表明散射的 X-線中,不變線的強度,幾等於零。換言之,即指明 Compton 效應中不變線之消滅。作者對於此問題的研究,係由比較第一表中之結果所啟發。按第一表所列,由炭所散射的 X-線中,不變線的強度,較由木塊所散射者爲大;而由木塊所散射的不變線,則較由白臘所散射者爲強。木塊係炭氫氧所組成,白臘爲炭氫的化合物,故知散射現象中,發生變線的作用,氫原子是特別的活動。在白臘所散射 X-線中,不變線是非常的弱,似乎表示散射 X-線的光譜 (Spectrum) 中,不變的部分,全由於炭原子的作用。所以由純蠟所散射的 X-線,應得只有變線。要實證此種申說,作者便分析由原質 Li 所散射的 $Mok\alpha$ 線(散射角等於 110°),果然所得的光譜中,不變線是差不多完全消滅,剩下一條很強的變線,這是第一次證明 Compton 效應中不變線消沒的實驗⁵。後來再分析由 Li 所散射 $Agk\alpha$ 線,也得到同樣的結果,如第二表所列。除掉 Li 以外,用任何原子數較高的原質作散射體,無論入射線爲 $Mok\alpha$ 或爲 $Agk\alpha$, 散射的 X-線之光譜中,總有變線和不變線並列;有時不變線之強度雖是微弱,可是他的存在,是確定無疑。以上所叙關於不變線之消滅的實驗,一面是現象的本身,非常有趣,一面是此種結果,與下章討論的理論,大有關係,將再論之。

結果的討論

由上所列的結果,顯見:(1)一定波長之入射X-線,爲一定原質所散射,則變線與不變線之強度比率,依着散射角的加大而增加。(2)一定波長之入射X-線,爲各種原質在同一散射角所散射,則變線與不變線之強度比率,依着散射體原子數的增加而減少。(3)不同的入射X-線,爲一定原質在一定散射角所散射,則變線與不變線之強度比率,依着入射線的波長增長而減少。因爲決定入射光子散射成變線或不變線的條件,必定也是決定變線與不變線間強度分配的條件,所以散射角,散射原質的原子數,和入射X-線的波長三者,一定是這種條件中的重要份子。任何關於強度分配的理論研究,必須能於此三者得定量的解釋,方稱滿意。

參照第一圖,可見每條曲線的形式,均甚相似,故知強度比率與散射角之關係,係一有規則之變化。參照第二圖之曲線 I,可見強度比率 R 與原子數 N 之關係,可以一很規則的曲線表之。惟在 Ca ($N=20$) 與 Cr ($N=24$) 兩原質間,強度比率 R 的數值,突然由 1.71 降成 0.75; 這種突然變化,或者同充滿原質的內部階級 (inner level) 有關。¹⁴ 相似的現象,可以從原質 Sc ($N=21$) 的磁性和 M 階級的 Moseley 曲線¹⁵ 看出來。我很感謝葉企孫先生,引我注意這種有趣的關係。在第二圖的曲線 II,也可看出剛才討論的一點,同時也指示另一有趣的實驗結果,即散射體爲各種輕的原質時, $\frac{1}{R}$ 是依着 N 的一次方而增加。

關於變線與不變線間強度分配的理論研究,較早有

Jauncey¹⁶ 的理論,最近有 Wentzel¹⁷ 的理論。 Jauncey 的理論,是根據光子概念而計算,所引伸的結果,定性上頗和本篇所報告者相合;如同 R 與 ϕ 的關係, R 與 N 的關係,及 R 與 λ 的關係,皆大體相符;特別是 Jauncey 所得表示 R 與 ϕ 的關係之理論曲線,形式很同實驗所得者相似。 可是定量的比較,理論與實驗,相差甚大。 比方 Jauncey 所預計由炭在 90° 所散射的 $Mok\alpha$ 線, R 應為 1.04, 而作者所得為 1.45, 相差達百分之四十;其餘別的散射體的預計,也相差很多。 Jauncey 的理論最不滿意的地方,是關於不變線的消沒一問題。 照着 Jauncey 的計算,用一定的 X-線為入射線,則每一散射體有一臨界 (critical) 散射角,在此臨界散射角時, Compton 效應中的不變線,應得消沒。 如入射線為 $Agk\alpha$ ($\lambda = .5604A$), 則 Be, B 及 C 三原質之臨界散射角應各自為 64° , 98° 及 137° 。 但作者¹⁸的實驗結果,完全與預料者不符。 作者分析由 Be 在 105° 及 120° , 由 B 在 120° 及 135° , 由 C 在 140° 所散射的 $Agk\alpha$ 線,每次均證實不變線是確實存在。 Jauncey 和他的學生曾發表與作者相反的結果,可是後來重新實驗,也得到同作者一樣的結論¹⁹。 這是 Jauncey 的理論最弱的一點,也可說是全部的致命傷。 此外 Compton²⁰ 曾指明關於變射的寬度,依 Jauncey 的理論所計算者,亦與實驗不符。 至於 R 與 N 及 R 與 λ 的關係,照着 Jauncey 的理論,很難作有系統的計算,故不能與本篇所列之結果相較。 同時由上所述 Jauncey 理論之不滿意,也可說是這種比較,似可無須舉行。

Wentzel 的理論,係依着最近發達的波動力學而計算,所引伸的結論,定性上均與本篇所列的實驗相符,惟定量的比

較,也不十分相合。Wentzel曾粗粗的比較由鋁(al)散射 $Mok\alpha$ 線的結果,得下列的數值:

θ	60°	90°	120°	150°
R (理論的)	0.25	0.67	1.41	2.05
R (實驗的)	0.46	0.91	1.45	2.52

依上表所示,似乎實驗的結果,在任何角度,均較理論的結果為大。可是Wentzel自己曾經說過,表中的理論數值,只是一種估計,每次都假設Al原子核的電荷,等於他的原子數,沒有用他的有效電荷(Effective charge)。要是把這一個改正加進,據Wentzel說,理論的數值,可以較實驗的大得多。除却Al原質之外,別的原質的估計,困難較多,故未一一比較。照着Wentzel的方法,Sommerfeld²¹對於此問題,也作了一回詳細的計算,可惜他的結果,只能對於氫原子,得定量的結論,對於多電子的原子,尚須補充。惟Sommerfeld所得計算臨界散射角的式子,似乎很值得注意。關於R與N及R與 λ 的關係,照着Wentzel的理論,用接近的方法,可以得到一有系統的結論。結論是否與實驗相合,當然尚屬問題,惟方法的一貫,則是顯而易見者。可惜計算的內容,過於繁複,詳細的討論,只好俟諸異日。

最後,作者認本篇所討論的問題,尚大有研究的餘地,特別是研究由氫(H₂)及氦(He)所散射的X-線,應得極有趣的結果,(實驗起來,當然須用液體的氫及氦)。比方原子核是否參加散射作用,也可藉此解決。上面不變線的消沒,似乎指明

原子核是不參加散射作用,可是入射的光子能加大,情形或須改變。同時關於氫氣的實驗結果,也可給理論物理學家很大的便利。

本篇所報告的實驗,都是在芝加哥大學 Compton 教授的實驗室中做成,作者對 Compton 教授之幫助與鼓勵,表示極誠懇的謝忱!

十八年十二月十六日于清華

1. A. H. Compton, Bull. Nat. Res. Couns. 1922, P. 16; Phys. Rev. 21, 483 (1923).
2. P. Debye, Phys. Zeits. 24, 161 (1923).
3. Cf. A. H. Compton, X-rays and Electrons, P. 260.
4. A. H. Compton, Phil. Mag. 46, 753 (1923).
5. Y. H. Woo, Phys. Rev. 27, 119 (1926).
6. Y. H. Woo, Phys. Rev. 28, 426 (1923); Transaction of Science Society of China, 1929 (在印刷中)
7. 作者未發表的結果。
8. P. A. Ross, Phys. Rev. 22, 525 (1923).
9. A. H. Compton, Phys. Rev. 22, 409 (1923); Compton and Woo, Proc. Nat. Acad. Sci. 10, 271 (1924), Y. H. Woo, Proc. Nat. Acad. Sci. 11, 123 (1925).
10. Kallmann and Mark, Zt. f. Phys. 36, 120 (1926).
11. Jauncey and Boyd, Phys. Rev. 28, 620 (1926),及其他論文(均在 Phys. Rev.)
12. O. K. de Foe, Phys. Rev. 27, 675 (1926).
13. E. Albrecht, Zt. f. Phys. 57, 326 (1929).

-
14. Cf. McLennan, Mclay, and Grayson, Proc. Roy. Soc. A. 112, 76, (1926).
 15. Bohr and Coster, Zt. f. Phys. 12, 342, (1922).
 16. G. E. M. Jauncey, Phys. Rev. 25. 314 and 723, (1925).
 17. G. Wentzel, Zt. f. Phys. 43, 1 and 779 (1927).
 18. Y. H. Woo, Phys. Rev. 28, 426 (1926).
 19. Jauncey and Boyd, Phys. Rev. 28, 620 (1926).
 20. A. H. Compton, X-rays and Electrons, P. 288.
 21. A Sommerfeld, Wellenmechanischer Ergaenzungsband, P. 257 (1929).