



出現在 1927 年 12 月 Physical Review 上的一篇文章“ Diffraction of Electron by a Crystal of Nickel ”被認為是建立電子波動性質的文章，後來被無數的專題論文及教科書所引用。在 50 年後的現在，讓我們來回顧導致這項發現的來龍去脈及發現者，Clinton Davisson 及 Lester Germer 是非常恰當的。

Clinton Joseph Davisson，1881 年 10 月 22 日，出生於伊利諾州的 Bloomington。20 歲那一年他從高中畢業，因為他對於數學及物理的熟練，而獲得了芝加哥大學一年的獎學金。他在芝大的六年求學生活曾屢次因缺乏錢而中斷。他從 Robert Millikan 那裡獲得了對物理的喜愛及尊重。在還沒有從芝大畢業以前，他就在普林斯頓大學工作。深受物理學家 Owen Richardson 的影響。Davisson 後來將他自己的成就歸因於從 Millikan 及 Richardson 這些人那裡掌握到了物理學家看事情的方法，觀點及思考方式。完成學位後，他到匹茲堡的 Carnegie 學院教書，每週教書 18 小時，使他沒有多餘的時間做研究。在那裡的 6 年，他只發表了三篇論文。這段時期中唯一值得注意的是，1913 年暑假，他與 J.J. Thomson 在英國的 Cavendish 實驗室一起工作

。1917 年他因身體虛弱的緣故，不用服兵役，就開始在西方電子 (Western Electric) 公司做有關軍事方面的研究。他的工作是發展和試驗鍍上氧化物的鎳絲以取代鍍上氧化物的鉑絲。一次吉束時，他接受了該公司所給他的永久職位。從那時開始他才做了一連串引導他發現電子繞射的研究。在那裡他碰到了一位年輕的同事，Lester Halbert Germer。Germer 1896 年 10 月生於芝加哥，高中畢業後，獲得康乃爾大學四年的獎學金，Germer 在康乃爾大部份都是自己學習的。在大三時，他和他的兩個同學，不滿意於電磁學課程，於是他們買了一本更深的書，定期聚會討論，真的學了一些東西。畢業後，他到西方電子公司作研究，那時他尚未與 Davisson 認識。1919 年 2 月他生了一場病，經過三星期的休息以後，重新回到公司，在一項新的研究計劃下工作，此計劃的主持人正是 Davisson。

Davisson 和 Germer 那時的工作是研究正離子轟擊 (bombardment) 對於從鍍上氧化物的陰極上所放射出來的電子的影響，因為他們的母公司 AT & T，非常關心三極真空管放大器的效率，那是公司當時剛建造的橫越大陸電話綫的主要元件，所以他們的頂頭上司要 Davisson 做這方

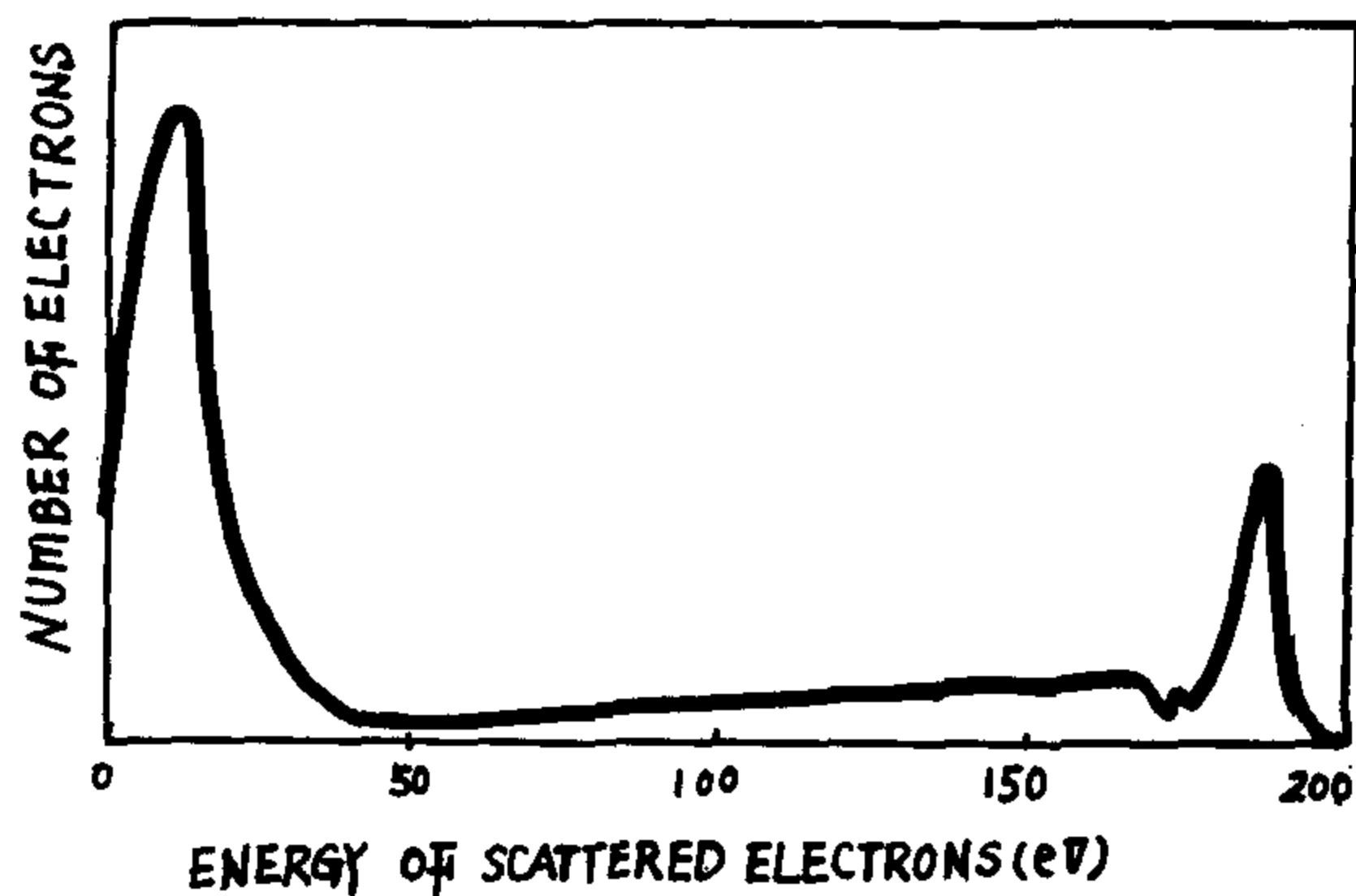


圖 1

面的研究。研究的結果發表在 1920 年的 *Physical Review* 上，認為從被鍍上氧化物的陰極上所放射出來的電子，正離子的轟擊對他們的影響是可以忽略的。這個問題解決了，但是另一個相關的問題出現了：從受電子轟擊的柵極，屏極上所放射出來的二次 (Secondary) 電子的本性如何？*Davisson* 被任命做此項研究，一位剛從加州大學拿到博士學位的 *Charles H. Kunsman* 擔任他的助手，在此時 *Germer* 轉移到另一個計劃，做鎢熱電子性質的測量。在 *Davisson* 和 *Kunsman* 開始二次電子放射的研究以後，他們觀察到一個奇怪的現象：很小的比例 (約 10%) 的入射電子向著電子槍的方向被彈性散射 (見圖 1)，以前的觀察者只在低能量的電子 (約 10 eV)，從來沒有在能量超過 100 eV 的電子身上發現這種現象，雖然這項發現對 AT&T 的股東們，沒有造成直接的震撼，但是 *Davisson* 本人却深受影響。對他來講這些彈性散射的電子可以用來當作研究原子結構的工具。當 *Rutherford* 在 1911 年宣佈他的原子模型時，*Davisson* 完成他的學位。當他在劍橋與 *Thomson* 一起工作時，*Geiger* 和 *Marsden* 完成他們對 *Rutherford* 原子模型的實驗測試，同時 *Bohr* 也在 1913 發表他的原子模型，所以 *Davisson* 他會如此熱切的希望用這些電子來探測原子結構也就不足為奇了，他想以電子代替 *Rutherford* 的 α 粒子來作散射實驗，*Davisson* 說服他的上司讓他和 *Kunsman* 花大部份的時間

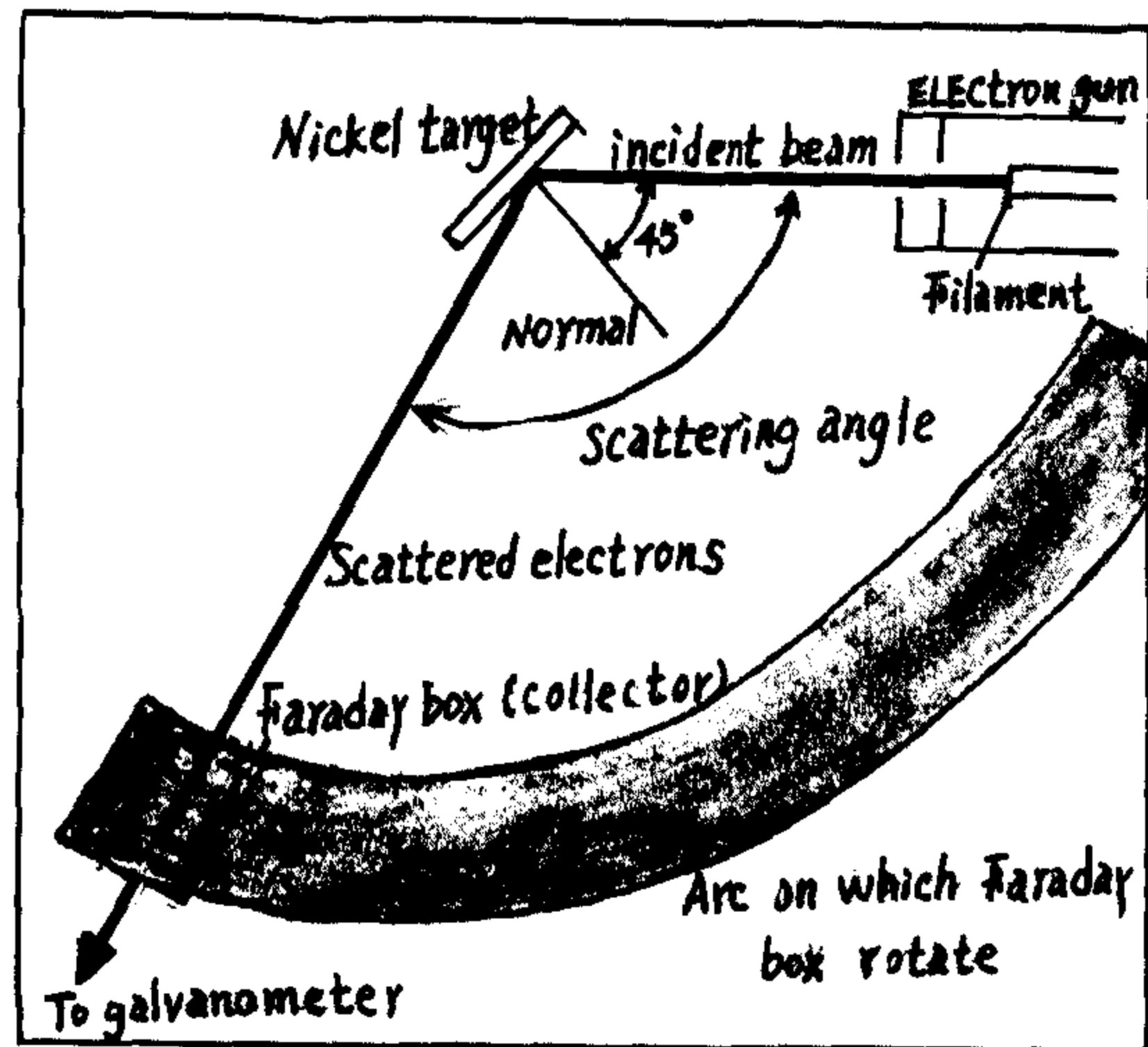


圖 2

在這一方面，並且給予必要的支持。儀器的主要部份見圖 2，是一個真空管，內有電子槍，一個對入射電子成 45° 傾斜的鎳靶，和一個 Faraday - box 被當作收集器。它能移動 135° 的範圍，包括了電子可能散射的路徑，它被設定在某一電壓，用來接受能量為入射電子 10% 的電子。經過二個月的實驗，發表在 *Science* 上的論文包括了一個殼層模型 (Shell model) 來解釋實驗的結果，並且對此模型所隱含的事情，做一個數值上的預測，很可惜他們的嘗試不令人滿意。

雖然 *Davisson* 有點失望，但是他又花了兩年的時間，建造了一些真空管。以其他的金屬當靶，發展了在真空下的實驗技術，並且對散射強度做理論上的預測。他們的結果並不很出色，很多結果都沒有發表。事實上，沮喪的氣氛在 1923 年籠罩了他們，這可以從 *Kunsman* 離開公司，*Davisson* 也放棄了他的散射研究可看出。一年後，*Davisson* 準備再嘗試電子散射，這種心境的轉變，是因 *Davisson* 強烈的被計劃所吸引？還是急切的想獲得其他有關原子結構的資料而激起的？在 1924 年，*Germer* 回到電子散射的計劃以代替剛離開的 *Kunsman*，在那時 *Germer* 已經完

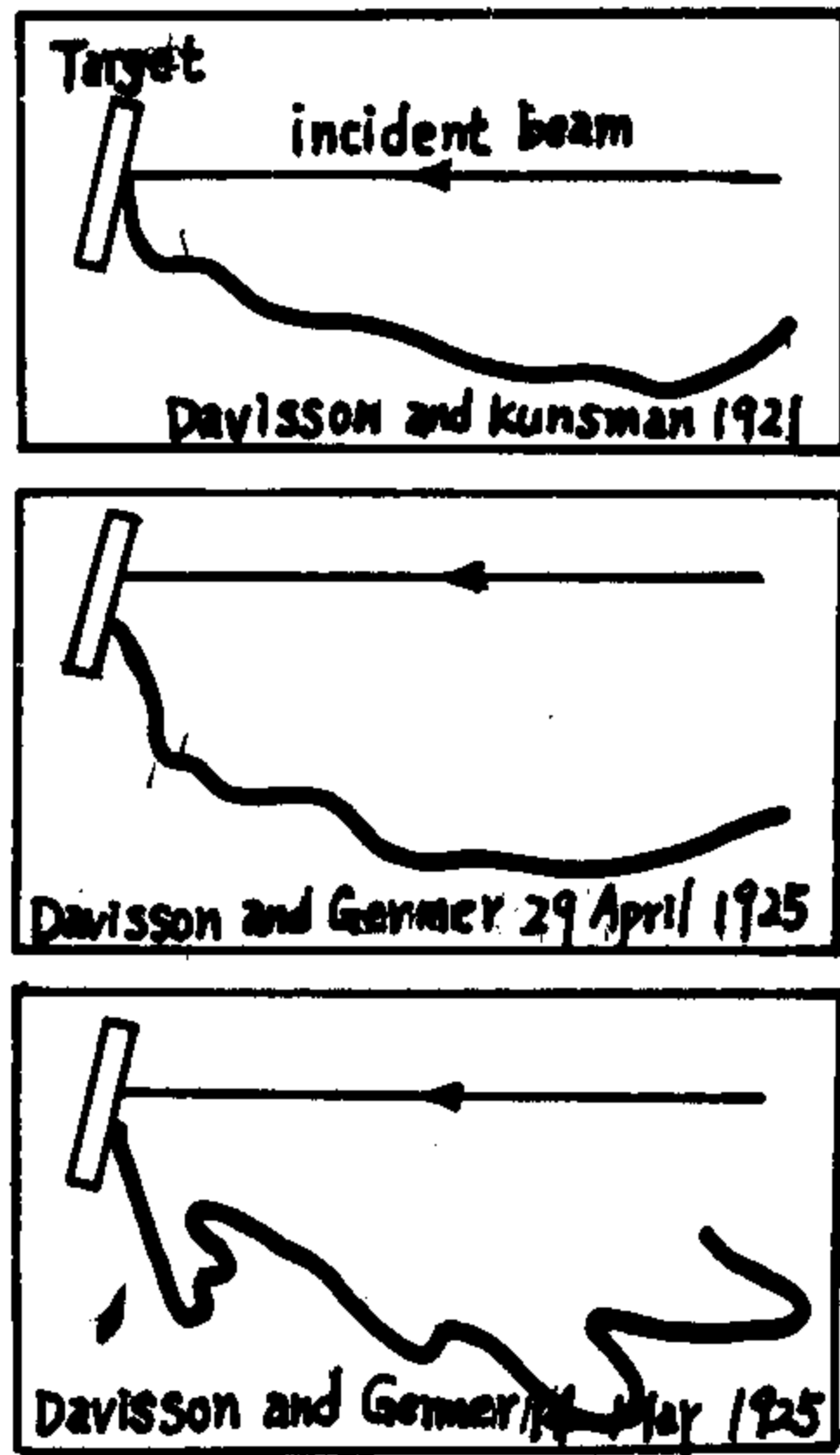


圖 3

成幾個熱電子放射的研究。Germer 後來回憶：我在 Columbia 的時候學得很少...，但是很幸運能跟 Dr. C. J. Davisson 一起工作。我從他那裡學到很多東西，包括如何做實驗，如何對實驗做思考，如何把它們寫下來，如何知曉其它人在這個領域已經做了那些事？

我很肯定我受教育過程中最好的部份，是要感激於 Davisson 給我的教導，我不相信這些是可以從傳統的方式得到的。

散射實驗又重新開始了。但是在實驗重新開始不久，1925年2月5日下午，他們發現管子破裂，靶也生鏽得很厲害，實驗被迫停止，我們可以很輕易的想像他們所感受到的失望與挫折。這個特殊的破裂，以及修理它的方法，對以後的發現電子繞射扮演一個重要的角色。1925年4月6日，修理好的真空管開始工作。在以後的幾個星期之內，實驗結果類似於四年前所得到的。但是在5月中一個完全不同的結果出現了（見圖3），這個令人困惑的發現，使實驗停頓了幾天，他們切開真空管、檢查靶，想找出引至此新結果的原因，他們發現鎳靶的複晶結構，因為高熱形成大約10個結晶面，入射電子束在這個區域被

散射。Davisson 推測新的散射圖形是因靶的新結構所引起，也就是說晶體中原子的排列引起散射強度的改變，並不是由原子內部的結構所引起。Davisson 認為新的圖形太複雜難以導出任何有用的資料，所以他們決定用單晶來做，應是更合適的。因為他們對晶體知道的不多，所以在 Richard Bozorth 的幫助下，花了幾個月的時間檢查受損的靶，直到他們完全熟悉在不同的狀態及方位下從鎳晶體所得到的 X-光繞射圖形為止。1926年四月，他們從 Howard Reeve，一位冶金學家處得到一塊合適的單晶，把它安裝在新的真空管，並且使收集器能 360° 運動，新的設計顯示出他們想找出使電子通過晶體受阻力最小的方向，花了一整年的時間，他們所得到的結果比先前的結果更令人覺得提不起興趣。1926年暑假，Davisson 夫婦到英國旅行。這期間，理論物理起了基本的改變，1926年薛丁格發表波動力學，Heisenberg、Born 的矩陣力學，de Broglie 的物質波等，在牛津 Davisson 參加了一個討論會，他對這些量子力學的發展大部份都不知道，但是當他聽到波恩的演說中用他和 Kunsman 在 1923 年以鉑靶所得的圖形，以證明 Broglie 的電子波時大為驚訝。散會後，Davisson 與一些與會者包括 Born 等，討論他和 Germer 最近的實驗結果。

一些歐洲的物理學家，如 Walter Elsasser, E. G. Dymond, Blackett, James Chadwick 他們也嘗試相同的實驗，但是因為要達到高真空及偵測低強度電子束的困難，使得他們放棄了。聽到 Davisson 的結果，他們覺得很振奮，在那裡 Davisson 花費了大部份的時間研究 Schrödinger 的文章，回到 Bell Labs（西方電子公司的電機部份從 1925 年起改稱 Bell Labs）後，Davisson 開始研究 Germer 所做的一些結果，他們發現從 de Broglie - Schrödinger 理論所預測的角度與實驗所得稍有差異，為了進一步的研究，他們切開真空管、檢查靶，發現大部份的差異是由於收集器意外的移動所造成，為了要找出繞射電子束，他們訂了一項研究程序，按照

Davisson 自己的作風，在正式開始以前，有一段時間是用來做詳細的準備及修改實驗裝備之用。Davisson 在寫給 Richardson 的信中表示，他要以此套散射儀器來試驗 Schrödinger 的理論。

準備時間花了三個星期，一個新的助手 Chester Calbick 參與此項工作，經過一個月的實驗以後，真空管在一次測試中突然破裂，但是損壞很小，以新的真空管所做的第一次實驗，沒有產生奇特的結果。在他們 1926—27 的工作中，入射電子束是垂直靶面的，散射角稱為“Co-latitude angle”。同時靶能對入射電子束做 360° 的旋轉，此種旋轉即對應一個方位角 (azimuth angle)。實驗包括對一個固定的 Co-latitude 及 azimuth 角，改變加速電壓 (即改變電子能量 E 與波長 $\lambda = h/(2mE)^{1/2}$)，看是否有任何效應發生？實驗從 1926 年底開始，在 1927 年 1 月 6 日有了戲劇性的變化。他們想要找出對一個中間的散射角度 (40° 左右)，何種電壓下散射電子束強度最強？理論上的計算值是 78 V，但是實驗結果是 65 V。電壓值在 79 V 附近時，每隔 1 V 做一次，在以外的範圍，每隔 2 V、5 V 或是 10 V 取數據，仍然發現在 65 V 時強度最大。為了謹慎，在 65 V 附近每隔 1 V 取數據，確實發現 65 V 會造成一個峯值。實驗情況到此突然轉變。1 月 7 日，他們對其他的電壓值，不同的散射角度做實驗，發現散射角為 45° 時，比 1 月 6 日用 40° 作的，可得更大的強度。Davisson 取電壓值為 65 V，對不同的散射角做實驗，所得出的曲線正是 Davisson 從 1920 年起所想要尋找的！將電壓固定在 65 V，散射角 45°，旋轉靶面 (normal 把持不變)，即改變方位角，所得的結果 (見圖 4) 顯示了鎳晶體的對稱性 (如果我們將此結果與 X-ray 在被同一物體不同方向散射結果比較，會發現兩者之間非常相似。這表示電子的行進與 X-ray 一樣是有波動性的)。

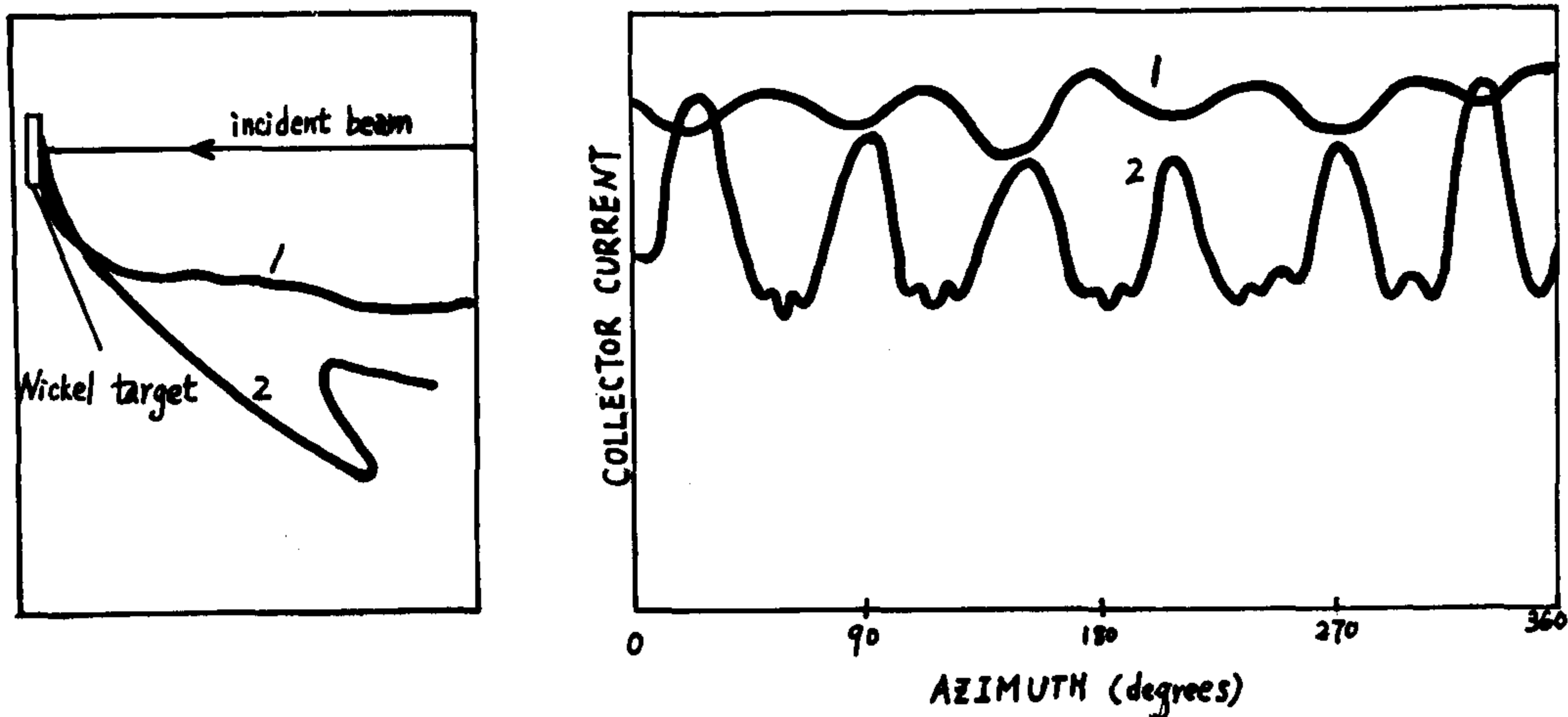
另一個促使 Davisson 快速 (可是小心的) 進行實驗，並且儘可能提早發表的原因，是他感覺到其他人可能也在做相同的研究，他怕被捷足

先登的緣故。回想在牛津時，他與其他人的談話，以及他們所表現出來的對此事的興趣，Davisson 寫了一封信給 Richardson，提到：“如果你認為有必要的話，我希望你能跟 Nature 的主編聯絡，希望能提前發表，我們知道有其他三個人也在做相同的工作，我害怕他們搶在我們前面”。事實上，其他的人都已放棄了，只是 Davisson 不知道，但是有一個 Davisson 不知道的研究者，那就是 J. J. Thomson 的兒子 G. P. Thomson，用高能量電子及金屬薄膜作研究，他們的論文也是發表在 Nature 上，只是比 Davisson 他們晚了一個月。

發表在 Nature 上的論文標題是“*The Scattering of Electrons by a Single Crystal of Nickel*”。這篇文章列舉了電子繞射的實驗證據，比早期的工作更跟波動力學有密切的關係，對波動力學的觀念給予實驗上的支持。

從 4 月 6 日起到 8 月 4 日止，Davisson 和 Germer 開始較廣泛的實驗及理論上的研討，在 8 月 4 日因管子破裂，實驗停止，報告的整理從 6 月中開始，大部份都是由 Davisson 負責寫作，論文在 8 月送到 Physical Review，出現在 12 月份上，在此篇文章尚未刊出以前，一些著名的物理學家，如 Niels Bohr, de Broglie, Born, Heisenberg, Langmuir, Schrodinger 等都認為 Davisson 和 Germer 的實驗確定了波動力學，顯示物理學家非常樂意接受電子波動的實驗證據。

Davisson 和 Germer 成功了可是其他人失敗了，事實上，上面所提到的一些人 (如 Blackett, Chadwick)，遠在 Davisson 和 Germer 以前就有了電子繞射的觀念，只是他們找不到實驗證據來證實。G. P. Thomson 表示，Davisson 和 Germer 的工作是實驗技術上的一大勝利，他們所使用的慢速電子是很難處理的，實驗結果如果具有價值，那真空必定要非常的好，即便是現在 (1961 年)，這也是一個很難的實驗，這要歸功於 Davisson 的實驗技術。Davisson 和 Thomson 共同獲得 1937 年的諾貝爾物理獎，他們的伙伴 Germer 和 Reid 却沒有和他們分享此榮譽。



左圖及右圖分別表示散射電子的 Colatitude 及 azimuth 分佈，1926 年 Davisson 帶去英國的是曲綫 1，曲綫 2 是 1927 年 1 月 6 日的結果。 圖 4

如果我們想要嘗試回答這樣的問題，為什麼是 Davisson 和 Germer，而不是其他的人？我們可能會想到像在 1925 年真空管的破裂及 1926 年到英國去這二件事情的影響，Davisson 和 Germer 他們自己也表示這兩件事情的關鍵性，但是太過於強調它們將會是一種錯誤，如果他們不是非常徹底、仔細、具有創造力的進行實驗及

反省，這些事情他們就不會記得很深刻。也許具有相同重要性的是 Davisson 從學生時代開始就建立的對於技術性細節注意的習慣，另一個重要的因素是 Western Electric - Bell Labs 所提供的作純研究的時間，以及在那個工業性的實驗室中所提供的高真空及電子偵測技術。



「科學的企圖，是要使雜亂無章的、感官經驗的多端變化，跟邏輯上一致的思想系統相符。」

— 愛因斯坦