

■ 林 其 文

■ 曹 培 熙

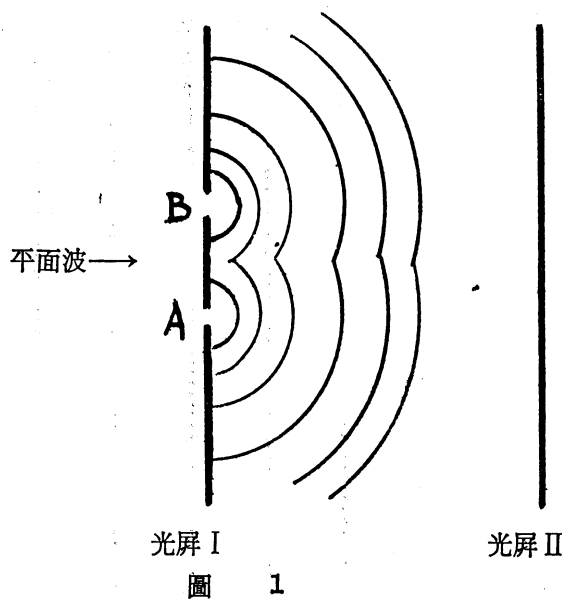
光 是

在 這裏，我們的討論不是從「光子」的先驗定義出發，以導出與它的性質有關的種種結果，而是以實驗所得的經驗知識為出發點。我們可以從這些實驗導出「光」的某些性質，接着探討怎樣用一種統一的觀點解釋這些實驗。

波 動 性

1. 雙狹縫干涉

裝置：(圖 1)



- 實驗：**(1) 把A遮住而將B打開，得到均勻的照射。
(2) 遮住B而打開A，也得到均勻的照射。
(3) A和B同時打開，則光屏II顯出干涉圖型，而非(1)和(2)的照度和。

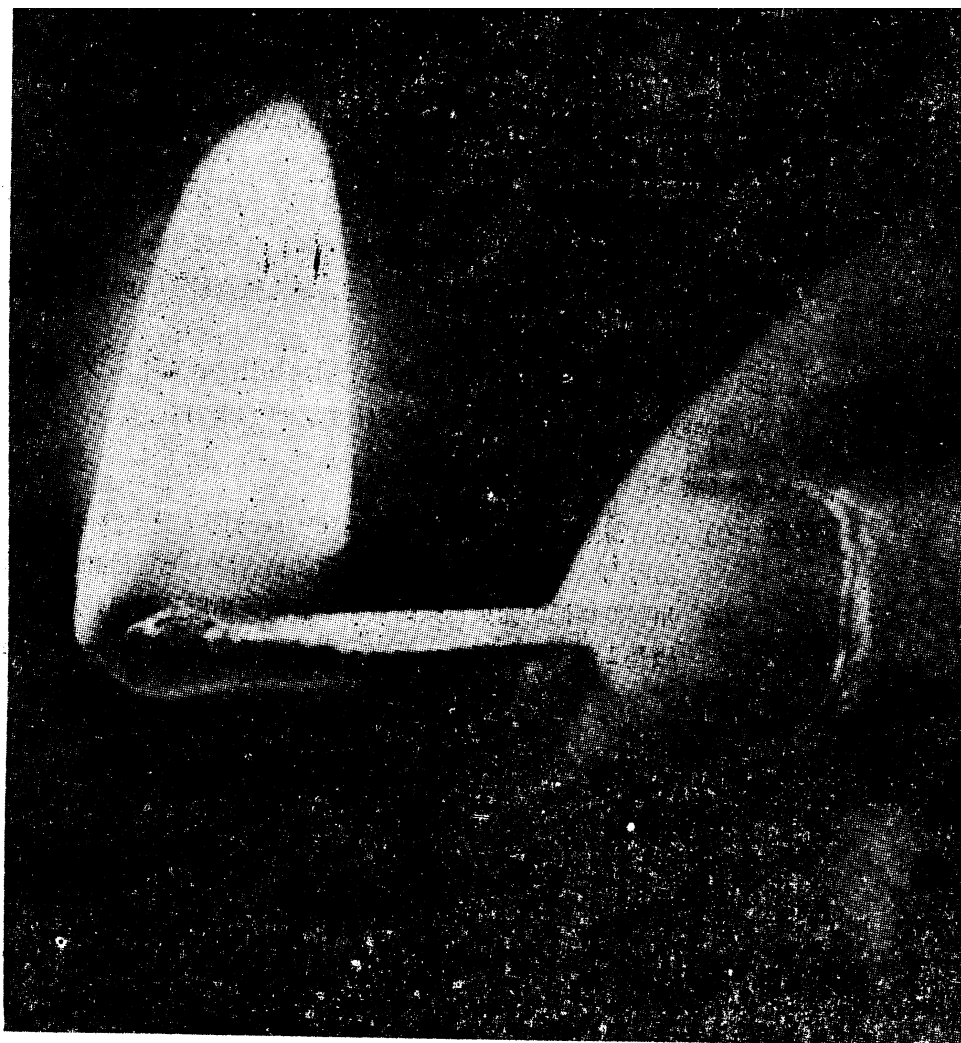
解釋：

對這現象所能作的最簡單解釋是什麼呢？

我們可以假設：到達A和B的光是平面波，而在通過狹縫之後，變成以A和B為軸的柱狀波，而且這些波動都照着馬克士威方程式傳播。這樣的說明，可以完整地解釋這現象。

那麼，如果我們接受這解釋的話，這實驗告訴我們什麼呢？它告訴我們：光是一種波——無限地伸展在空間的任何方向上。它不是局部存在的。當然，在觀念上，這是和「質點」迥然不同的，一個質點只存在於空間的局部，而且沿單一方向運動。

什麼？



2. 廣角干涉

裝置：(圖2)

文獻：P. Selenyi, Zeitsch, f. Physik 108, 401 (1938).

P. Selenyi, Ann. d. Phys. 35, 444 (1911).

E. Schrödinger, Ann. d. Phys. 61, 69 (1920).

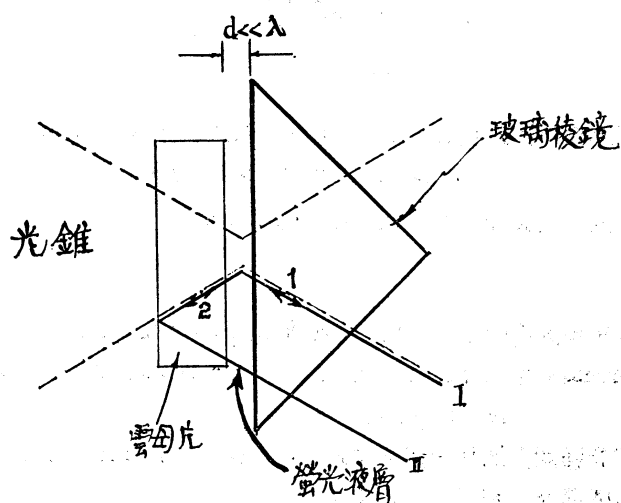


圖 2

實驗：沿 I 和 II (1)觀察干涉現象：發現光的強度有正弦型的行徑。

(2)分析極化情形。

便可發現只有與紙面垂直的成份出現。在 I 和 II 方向上，各缺 1 及 2 兩種成份。

釋解：(1)原子發射出來的光，成為相干性的球面波而傳播。

(2)就強度分佈而言，所觀察到的波具有偶極輻射 (Dipole Radiation) 的特徵。

3. 光強度很低時的邁可生 (Michelson) 干涉儀

[L. Jánossy and Zs. Náray APASH 7, 403 (1957)]

裝置：(圖 3)

實驗：(1) 在尋常強度 (每秒光子數 $N=10^{10}/\text{sec}$) 時，光束被半透光鏡 (Semi-Transparent) 分為兩部分 (B_1 , B_2)。這兩部份重新會合時，光電倍增器顯示出干涉圖型。

(2) 用強度極低的光束重做這實驗。若假定由原子發出長度為 Λ 的一個光子，而 Λ 的數量級是 1 米 [這個值是以觀察所得的相干長度 (Coherent Length) 為根據的]，則只要

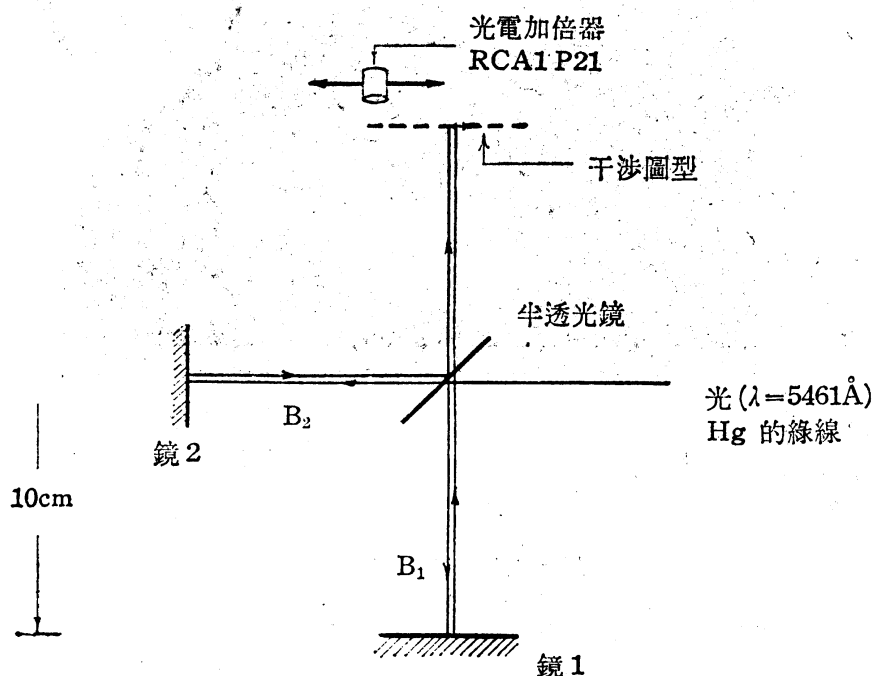


圖 3

光子間不發生任何程度的重疊，就可以說強度 N 是很低的，這條件可以表示成

$$N \ll N_0 \equiv C/\Lambda \approx 3 \times 10^8 \text{ 光子/秒}$$

其中強度 N (以每秒光子數表示) 的定義是

$$N = \frac{I}{h\nu}$$

而 I = 每秒流過的能量，用熱電偶測定 $h\nu$ = 光量子的能量。

Jánossy 設計了使 N 減小的方法，而得到低強度的光束：

$$N = 10^6 \text{ 光子/秒}$$

「低強度」的另一種定義是：要求每秒中在儀器內能發現的光子數之平均值小於 1；也就是說，把強度上限規定為

$$N_0 = C/l$$

而 l = 儀器內部路徑的長度。

當然，這兩種定義所得的低強度上限實際上是相同的。

由於單獨的光子可用眼睛察知，上述準則是可以直接使用於判別的，所以「是否真的只有少數光子出現」這個問題是可以直接藉吾人的知覺予以驗證的。不過，對這實驗所作的解釋並不需要把光子看成質點。

Jánossy 做這實驗時，把整套儀器裝在地面下30米深處的隧道裏，並且用遙控設備操作濾光器、光開關等。這樣子可以使溫度保持相當穩定，而足以防止干涉條紋的移位（例如）於一級 (Order) 的十分之一以內。在做正式測定之前，整套設備必須保持兩三天不受擾動，以達成熱平衡和力學平衡，因為應力 (Stress) 會使儀器發生緩慢的變形，而使干涉圖型發生「蠕動」。

在常溫下，RCA1P21 光電倍增管內的暗電流 (Dark Current) 約為 10^5 脈動/秒，這是需要減少的。減少它的方法是使陰極片的不用部份失去效用，以使它不參與暗電流的產生。又在倍增管外殼上施以適當的電位。於是暗電流就減少為每秒約 200 脈動。

結果：高強度與低強度實驗的分佈情形和相對強度方面都沒有具體的差別。原來估計會觀察到 5 至 10% 的差別的。

解釋：由於各光子是互不相關地到達光電倍增管，所以不會互相干涉。因此，干涉圖型必定不是由於相異光子間的干涉而造成的。假如一個光子可以看成是一個波，而半透光鏡把它分成兩部份，最後光子自己與自己發生干涉，那麼我們就可以了解這現象。所以，一個光子就是一個相干波 (Coherent Wave)。

質 點 性

4. 光電效應

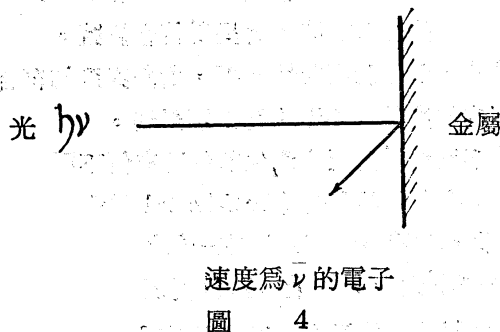
裝置：(圖 4)

發現：(1) ν 與入射光的強度無關，只跟頻率有關。

解釋：愛因斯坦的解釋是：光只能以能量為 $h\nu$ 的光量子形式被吸收或發射：

$$h\nu = A + \frac{1}{2}m_e v^2$$

這裏的 A 是該金屬的游離電位。



發現：(2) 自金屬表面逸出的電子數隨入射光強度而俱增。

這效應被人們用在偵測光子的標準裝置——光電倍加器 (PM)。到達倍加器的單個光子激發出一個光電子，以致造成電子的湧生 (Avalanche)。這結果可以放大而記錄下來。我們便可藉着光電倍加器直接計數光束中的光子。倍加器的效率約為1/20到1/200，因裝設方式而異。這效率決定於到達陰極的光子激發電子的機率。因此，倍加器不能數出每個光子，只能在每 n 個中數出一個，這“ n ”是倍加器的特性。

就單一頻率 ν 的高強度光束而言，系統中受照射部分的光子密度，與馬克士威方程式預計的能量密度成正比。

5. 光束強度的起伏

Vavilov 由實驗顯示微弱光束的強度會有起伏 (Fluctuation)，顯示出光子是彼此不相關的。

6. 光子間的符合

[A. Adám, L. Jánossy and P. Varga APASH 4, 301 (1955)]

裝置：(圖 5)

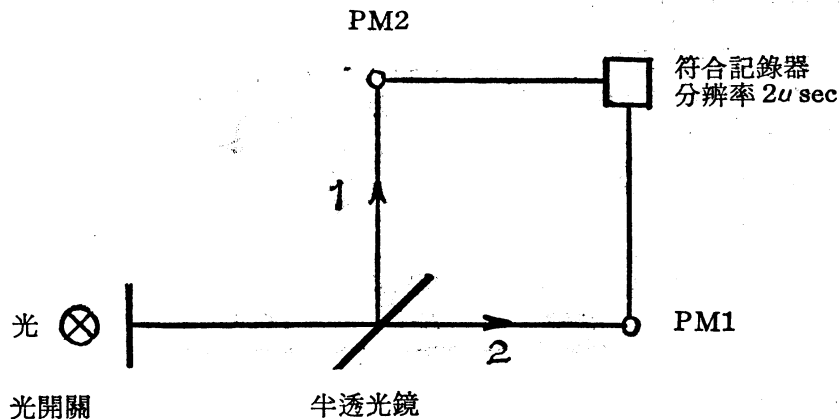


圖 5

實驗：設減弱了的光源發射強度為 N 光子/秒。若在光源前面放一個開關，而開關保持開放的時間是

$$\tau \ll \frac{1}{N}$$

則光子大多數是單個地逸出。這樣就造成了產生相離單個光子的光源。接着，我們考慮當光子撞及鏡面時的情形。它必須沿路徑 1 和 2 行動。若一個光子會被那半透光鏡分裂，則 PM1 和 PM2 兩個倍加器之間，會呈現符合信號。

實驗要比較的，是下列兩種情況裏，所觀察到的符合次數：(1)倍加器受到相干性光束照射時；(2)受同樣強度的非相干性光束照射時。

實驗結果看不出兩種情況所產生的效應有何不同。所以，我們可以安全地假定：所有被記下的符合數，都是偶然符合 (Accidental Coincidence)。實際記錄到的符合事件，可以看做是：把開關打開時，偶然地聚在一起的獨立光子所造成的。總而言之，單個光子只被 PM 中的某一個記下，而不會同時被兩個 PM 測出。

解輯：光子必定是互不相關的。實際上，我們可以把「光子被開關釋出的時間間隔」任意放大，以使得光子間不可能產生關聯。

兩個綜合波動性和質點性的 Gedanken Experiment

現在，我們着手設計兩個想像的實驗 (Gedanken Expt.)，以綜合地表現前面提到的各種現象。所謂的 Gedanken Expt.，是一種到目前還沒有人做過，也可能由於時間、人力或財力的不足，而永遠不會被實現的實驗，例如一項費時需 200 年才能完成的實驗。不過，一個 Gedanken Expt. 並非任意想像的，而是在技術上必須是可行的實驗，而且它的結果也必須是能藉真正的（即人們實際做過的）實驗作確定預言的。

1. 雙狹縫干涉的想像實驗

我們把第一個實驗的設計改變一下，而重做該實驗：用一些光電倍加器代替光屏 II，並使光源只能射出單個光子。也就是說，我們要把光屏 II 的寬大面積，縮成點偵測器，並且把光的強度減小。

每個光子（至多）只能觸發一個 PM，因此，通過狹縫的每個光子只能出現在屏上的一個點。用單獨的獨立光子重做實驗①時，在許多許多次實驗之後，實驗的總結果，必定顯示與實驗①之干涉圖型的強度分佈，因為

- (1) 由 Vavilov (⑤) 的實驗，我們知道單獨的光子是互不相關地到達屏上各點，而且
- (2) 由 Michelson 實驗③可知：干涉圖型與光子間的交互作用無關，因為若把光束強度減低，就一定會減小這交互作用。

我們能使一個光子通過（例如）1,000 個裝置，而非使一千個光子通過一個儀器的方法，以得到相同的圖型。

結論：光柵產生的干涉圖型，是單獨光子之個別而獨立的效應。

顯然地，這是一項非常重要的實驗結果。它使下一個想像實驗造成一個詭說 (Paradox)。

2. 偶極輻射的想像實驗

第一種裝置：（圖 6）

實驗：在作偶極輻射的光源周圍，放置一些 PM，以偵測發射出來的光子之方向。

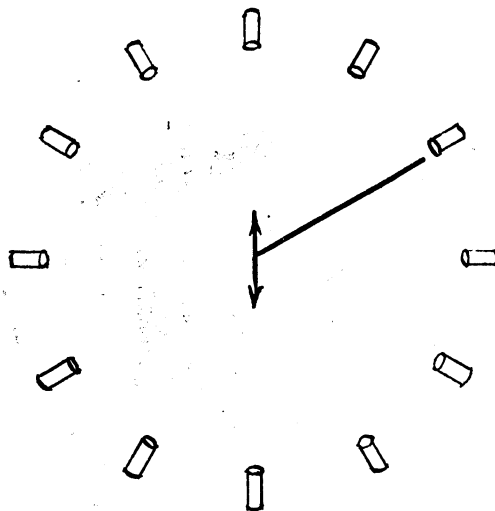


圖 6

這樣射出的光子不會自行干涉，因為它不會同時出現於相反方向，例如，我們無法像 Selényi 所做的那樣，使它們相遇。藉着康普頓散射，或發出光子後原子的反彈現象等，我們可以測出光子傳播的方向〔參看如 G. Breit, Journal of Op. Soc. Am. 14, 374 (1927)〕。

第二種裝置：（圖 7）

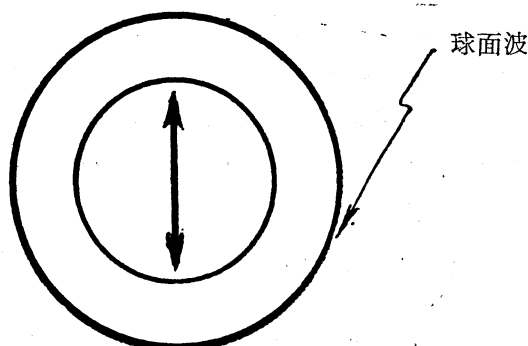


圖 7

實驗②顯示各個方向上都有輻射。我們就用實驗②的裝置和前述第一種裝置圍繞光源，以得到第一個，第三個第五個……等光子的方向分佈，而使第二、四、六等光子發生干涉。

經過很多次實驗之後，我們可以下個結論：所有的光子都兼具兩種性質。雖然我們不曾真正地測定第二、第四等光子的方向分佈，及第一、第三等光子的干涉圖型，我們却知道它們會有那些行徑，因為計數的方法是完全隨意的！

這就相當於說：如果我們每隔秒看某棵樹一次，而看到它還在原處，就推論道「當我們不看的時刻裏，那樹也在那兒」。這是所有實驗的一項基本假設，例如，我們測定由加速器射出的質點能量，並確定它們是 π 介子，然後就在「它們是同樣能量的 π 介子」之假設下，進行實驗。

我們若是接受這個結論，就會得到跟常用的量子力學之哥本哈根解釋相抵觸之處，因為就實驗⑥來說，哥本哈根學派認為光子處於兩種狀態之中，而我們却說它必定在兩個方向的某一個上，不能被分裂。

* 解 釋 *

1. Jánossy 的解釋 [APASH 1, 423 (1952)]

光是以光子的方式發射的。一旦它被發射出去之後，它就變成一個波，而按馬克士威方程 λ 傳播着。它被吸收時，這傳播就告終止，而且在吸收的過程裏，它又以光子方式出現。

吸收作用被描述為：電磁場與電子或原子間，極端強烈的交互作用。交互作用的結果之一是：整個波收縮了，而且以高於光速的速率被吸收中心吸入。

若一個光子同時與多於一個的吸收中心，開始發生強烈的交互作用，而且作用時每個中心都會獨立地吸收該波，好像沒有其他吸收中心一樣。那麼就會發生一種複雜的過程，結果是有一個中心克服了其他中心的交互作用，而吸收整個光子。

這只是一種定性的物理描述。它和實驗結果一致，雖然我們也許難以在字面上接受「高於光速的吸收過程」；例如 我們可以不想像「吸入」，而考慮以高於光速之速率「吐出」光子的排拒中心。

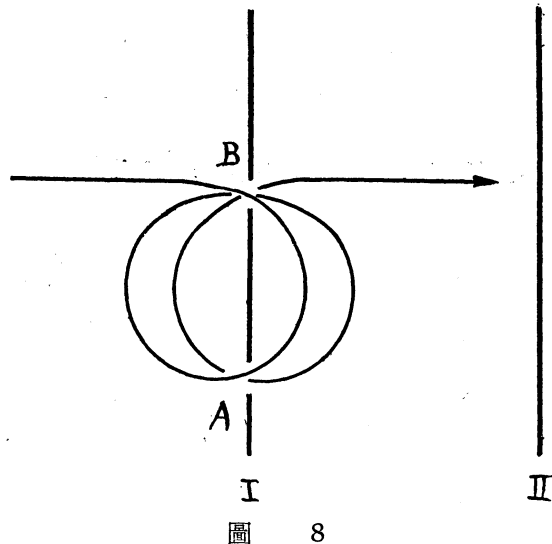
2. 統計性的解釋

設 ψ 表示一狀態向量 (state vector)，而用算符 O 對應於某個物理量的測定，並且本徵函數 (eigenfunction) 為 ψ_1, ψ_2, \dots ，那麼狀態 ψ 就可以表示成

$$\psi = A_1\psi_1 + A_2\psi_2 + \dots \quad (O\psi_k = A_k\psi_k)$$

於是狀態 ψ 就被解釋為許多處於相同狀況的原子或光子的狀態，而非任一單個光子或原子的；而且，若對每個光子（原子）作相同的測定，則結果將是分散的，而得到某個特定物理量值 O_k 的機率則是 $|A_k|^2$ 。

這個解釋也和實驗結果相符，可是它並未包含我們所能得到的全部現象，因為我們可以用單個光子做實驗。以實驗①為例：



實驗。以實驗①為例：

若在狹縫A或B的後面放置計數器，而擋住狹縫，就能偵測出到達狹縫的光子，而光屏II上面就看不到任何圖型。假使把這些計數器拿開，光子就能在光屏II上形成干涉圖型。所以，我們可以由想像實驗②推論道：每個光子只通過一個狹縫，而在通過之後落在光屏II上。

現在我們考慮屏上干涉條紋中的暗紋。單看從狹縫A通過的光子，我們發現它們會避免落在暗紋位置上。假如遮住B，通過A的光子就不再避開那些位置。因此，必定有些光子在B開放和遮住時，落在不同位置上。這樣的解釋，只在當通過A和B通過的質點之間有交互作用時，才能夠成立。但是，實驗③已經否定了這種交互作用的存在，因為若使個別的質點，以相當長的時間間隔依次到達光屏II，則每個質點的命運，早在後繼質點到達之前就完全決定了。

所以，每個質點都必須通過A和B這兩個狹縫。那麼，這現象怎麼發生呢？難道就像圖8這樣嗎？

當然，這種路徑完全是虛擬的，而不可能真有這麼回事，因為，若是增加狹縫的數目，強度就會嚴重地減弱。

3. 哥本哈根解釋

[Dirac, The Principles of Q. M.; L. Rosenfeld, Nature 190, 384 (1961)]

狄喇克說：

「波動函數告訴我們的，是有關一個光子位於某特定位置的機率資料，而非該位置可能有的光子數之資料。我們可以由下述說明，知道這分佈的重要性：假定把一含着大量光子的光束，分成強度相等的兩個分束，又假設光束的強度與束中可能有的光子數有關，則每一分束應含有總數之半的光子。要使這兩個分束發生干涉，就得要求一分束內的某個光子能跟另一分束內的一個光子相干涉。有的時候，這兩個光子必須互相湮滅；有的時候，它們又必須形成四個光子。這就違反了能量的守恆（Vavilov 的實驗也否定了這現象）。把波動函數與一個光子的機率連繫起來的這個新理論（即指哥本哈根解釋）克服這難題的方法是：使每個光子能部份地存在於每一分束中。於是，每個光子只跟本身發生干涉。兩個相異光子間的干涉就不會發生。」

因此，照這個觀點看來，光子伸展成一個疊合的狀態 (superposed state)。測定的操作引起一項擾動，使得疊合狀態突然變成一個單獨狀態

$$\psi \longrightarrow \psi_k$$

對於實驗⑥，哥本哈根學派認為，在光子的路徑被分裂之後，我們無從知道該光子到底在那個光束內。觀察使得光子躍入一個確定的狀態。

那麼，這時候的觀察是怎麼做的呢？我們知道，那是用光電倍增器做的。光子和一個原子相撞，產生一個光電子。外加電場使光電子加速，而生成次級電子等等。大約十級之後，電子湧生的量就大得可以用宏觀方法記錄下來了。最先進入的光子之存在，決定了我們會得到這麼一個記錄。

不容易了解的是：為什麼單單一個光子同時到達兩個光電倍增器時，只觸發其中一個，而不觸發另一個。事實上，我們可以使兩個成份在不同的時刻到達倍增器，使該光子自所已到達的倍增器上消失，而使另一成份能觸發另一倍增器。假如光子只是這兩個狀態的疊合，那麼「光子到達某個 PM 是否比到達另一個 PM 為早」就無關緊要了。

我們注意到，本文所敘述的難題只是觀念上的，不是測不準原理對位置和動量的精確量度所加的限制的那種問題。