

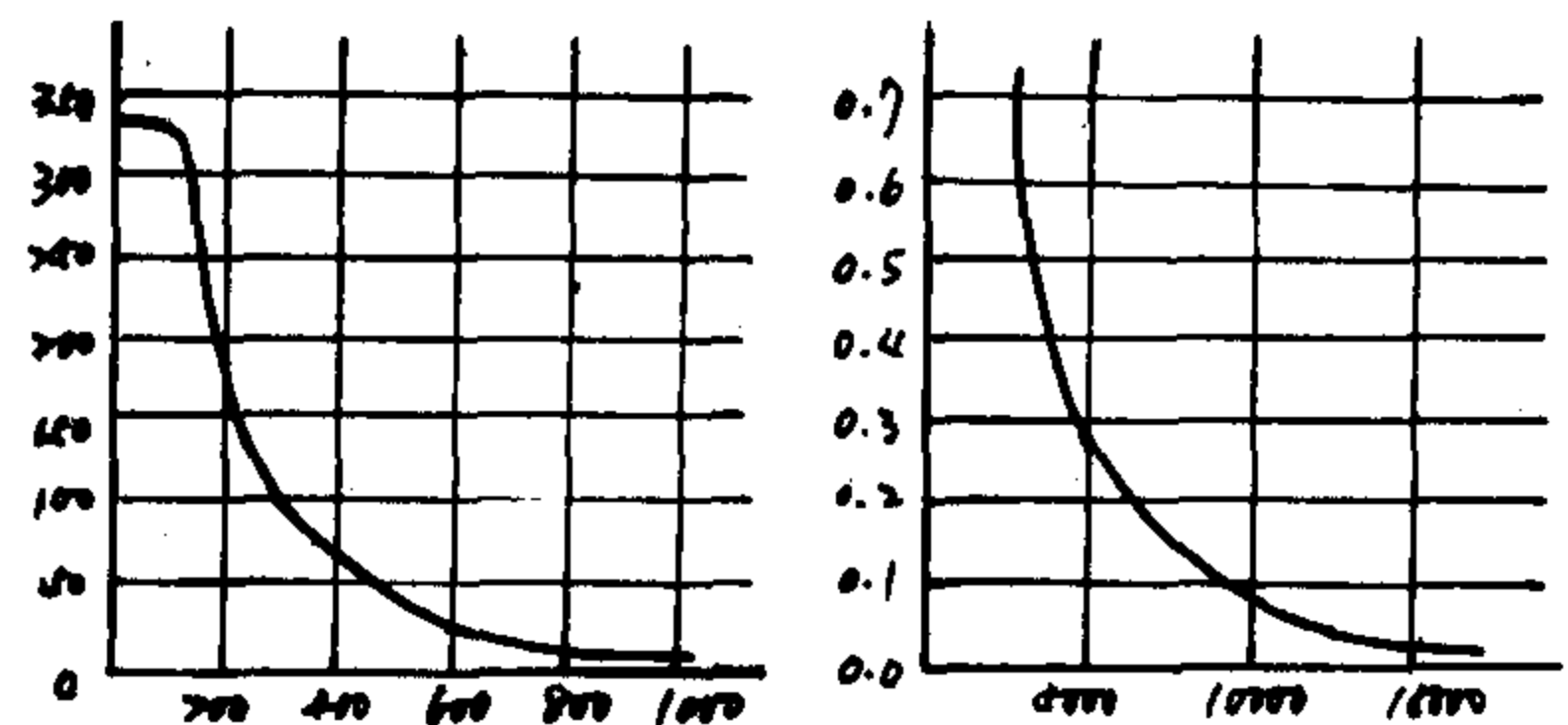
在廿世紀初期，當自然界一些富有變化性的質點在宇宙線中被發現後，一些關於宇宙線的現象開始為物理學家們所注意，導致物理學家黑斯在 1912 年提出的問題——“從外太空來而像雨點一般落在地球上的宇宙線，到底是什麼東西”，得到解答。

早期研究宇宙線的科學家，認為宇宙線是一種能量極高的光子，如 1929 年德國的書刊上，都把宇宙線稱為“外太空來的 γ -射線，這是根據當時所知除了宇宙線外，就是 γ -射線穿透力最強，康普敦效應告訴我們：高能量光子的吸收，主要是由於康普敦碰撞，以康普敦效應為根據預測光子的平均自由徑隨光子的能量增加而增加。這個預測經實驗的結果證實。 γ -射線的平均自由徑為數百米， β -射線為數米， α -質點更小，儘管當時並沒辦法找到如此高能量的光子，但大家仍相信康普敦效應的推論，認為宇宙線是一種高能量的光子，只是我們一時還無法在實驗室中找到。雖然大家認為宇宙線是一種高能光子，但對於宇宙線的由來，並沒有得到合理的說明，一直到密立根 (Millikan) 才提出為大家所接受的理論：

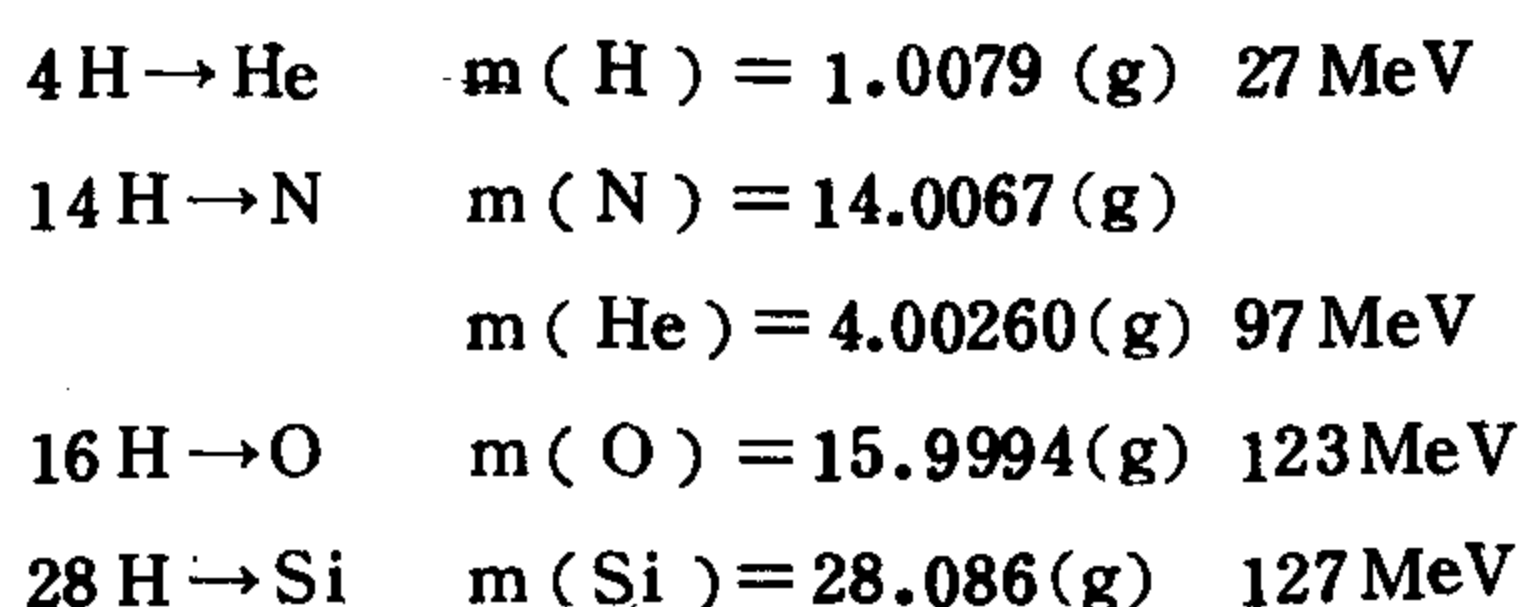
密立根以宇宙線是一種高能光子為基礎，從而由宇宙線四面八方均勻落下的現象為線索，提出了他的假說——“宇宙線是散佈在太空中的稀薄氫 (H_2) 氣，熔合成重元素時，所放出能量極高的光子。”

一束帶相同能量的平行光子，穿過一物體時，它的吸收曲線應是成指數 (exponential) 形式，一個吸收曲線的性質可以平均自由徑來描述，對於同一物體，光子穿透的吸收曲線中的平均自由徑，隨光子的能量增加而增加。由於宇宙線行進的方向並非同一方向，而是四面八方均勻進入，在計算時我們可以加以修正，得到結果是，吸收曲線不再是指數形式而是成次方形式。

實驗數據由 Hess, Kohlhörster, Millikan, Regener 和其他科學家在大氣 (atmosphere) 和在水中測量宇宙線的強度得到如下圖：



由數據圖形的形式知，宇宙線的吸收曲線並不符合任一單獨能量光子的吸收曲線，但仔細研究發現，它是三組吸收曲線的合成而得：這三組吸收特性曲線的平均自由徑為 300 g/cm^2 ， 1250 g/cm^2 ， 2500 g/cm^2 ，參考 Dirac 康普敦效應的理論，換算得這三組特性曲線所對應的光子能量是 20，110，220 MeV。若假設太空中稀薄氫氣能熔合成較重元素，參考宇宙成份的比例知除了氫 (H) 最多外，依次為氦 (He)、氮 (N)、氧 (O) 和矽 (Si)，下面是當氫熔合成下列元素時所放出光子的能量，由 Einstein 質能互換公式 $E = mc^2$ 。



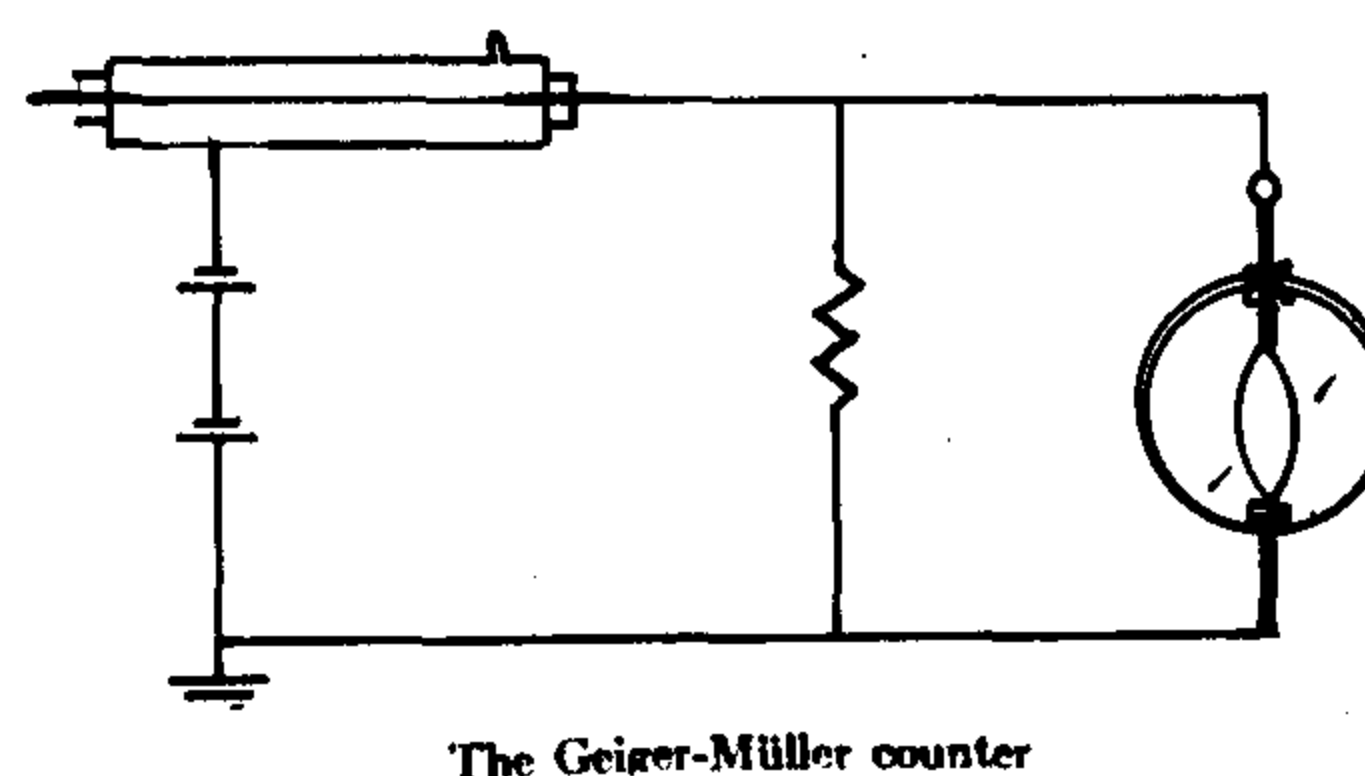
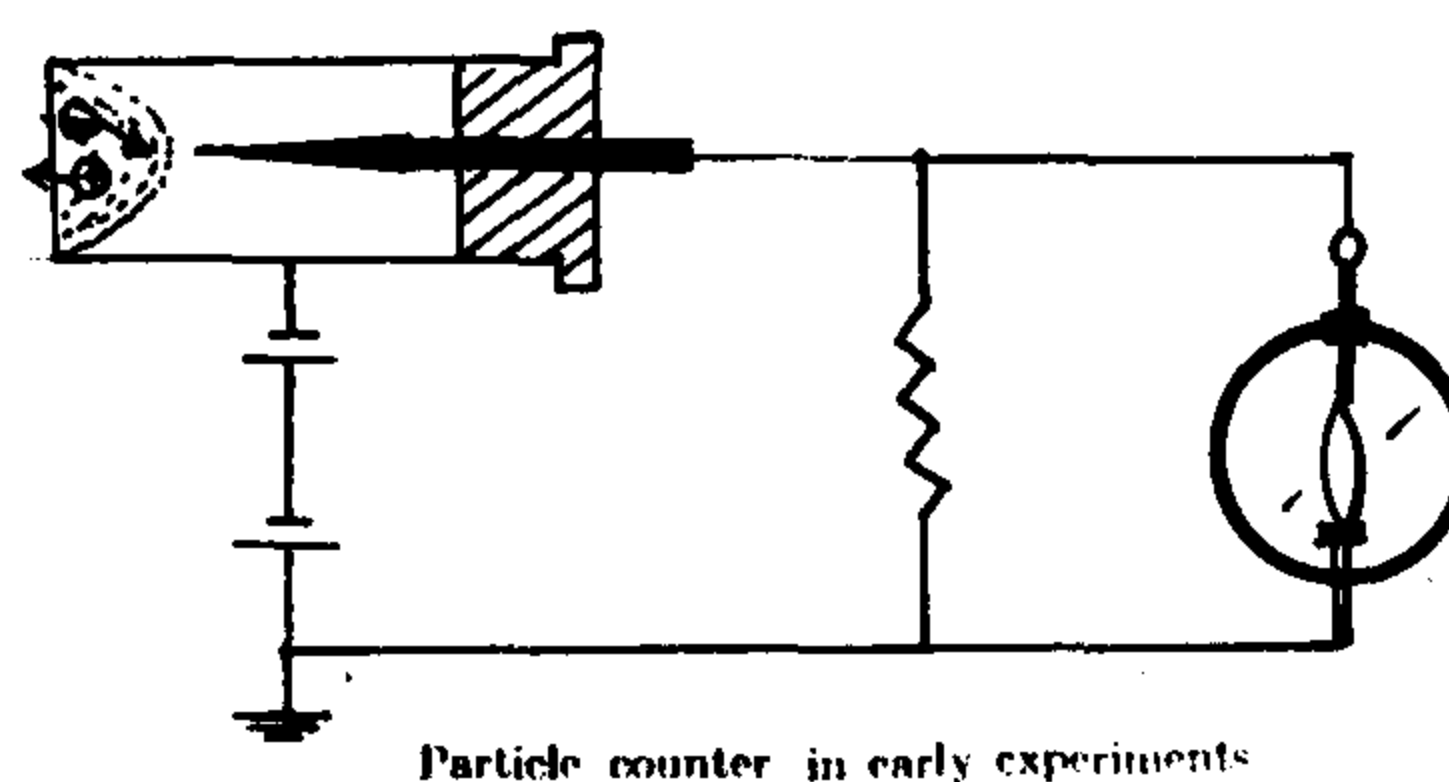
由上面計算可以知道組成宇宙線三組光子的能量，恰好近似於氫原子熔合成氮、氮、氧、矽所放出的光子能量，由於有實驗數據有力的支持，密立根就認為宇宙線是當太空中產生重元素時所放出的高能光子，這好像一個嬰兒在出生後的初啼。

密立根宇宙線的理論在當時很受大家的信任，雖然也有人持相反意見，認為密立根的計算結果和實驗數據相同，只不過是巧合而已，太空中溫度並不能有效地產生熔合反應，但對於宇宙線是光子的假說卻絲毫沒有影響。此時 Bothe，Kohöloster 提出一個意義重大的實驗，他把宇宙線的發展帶上正確方向，雖然並不能提供我們宇宙線的由來，卻告訴我們宇宙線的真實性質。

“Bothe - Kohöloster” 實驗

Bothe - Kohöloster 實驗的成功要歸功於計數器的發展；古老的計數器是利用驗電器來做，高能質點游離空氣的分子而使驗電器帶電，這種方法可行性要有足夠的游離分子和足夠長的時間，才能產夠多電荷使驗電器的金鉑片張開。爲了要發展一種可以計數單獨高能粒子的計數器，德國人 Geiger 研究一種針棒計數器 (point-counter)，構造主要爲金屬盒子、針棒，使針棒帶

正電，金屬盒帶負電，當空氣中的分子因爲穿透鉛鉑的窗口，游離金屬盒中的空氣分子時，因針棒和金屬盒之間造成的電場，使游離分子帶正電的跑到金屬盒而帶負電的跑到針棒，等於把電荷帶到驗電器的金鉑外殼，在電壓小於 1000 V 時，空氣中的游離分子，碰撞空氣分子使之游離的能力較少，所以產生微弱信號，但當電壓高於 1000 V 時，這時游離的分子有足夠動能再游離其他空氣分子而產生倍增的效果，而得到強信號。這個裝置再經過 Geiger 和他的學生 Müllbr 的改良成爲計數管 (counter tube)，改良的計數器有效空間是整個金屬管，管的口徑和長度可任意決定。有了這個效率高的計數器，我們可以有效地計數個別高能粒子的通過。



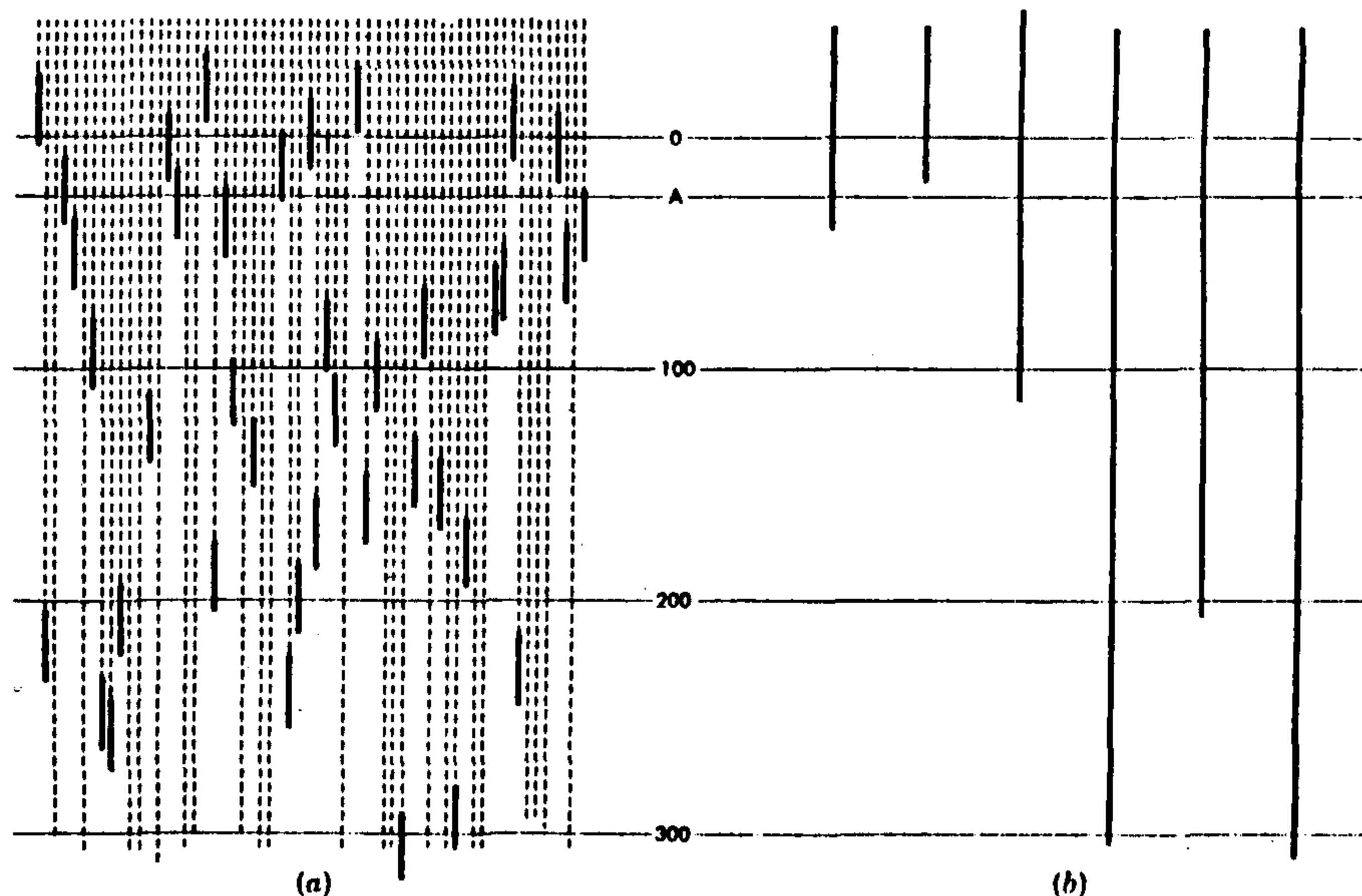
Bothe 和 Kohöloster 在用 G.M counter 測量宇宙線的強度時，無意中發現，兩個上下並行的計數器的驗電器有相同的響應，仔細研究發現這並不全是由於偶然的巧合，因爲兩管距離加長，這個響應頻率就降低，這種現象可以用康普敦双重效應來說明：當高能光子通過兩管時，在兩個管都有發生康普敦碰撞。但接著又發覺當金屬管換成金屬和管壁加厚時，這種響應頻率並沒有減少多少，若宇宙線是高能光子，穿透效應會減

少才是，為何仍保持原來的情況呢？這時宇宙線是一種高能光子的說法遭到考驗。事實上高能光子並非是通過計數管，而是高能分子碰撞空氣分子產生游離電子，這些游離高能電子再達到計數管，我們設游離電子是高能光子，經康普敦效應將能量傳給電子，電子沿高能光子行進的方向前進，由圖(a)中得到在不同水深時光子或電子的吸收率。若 60 個光子，則電子在 0, 100, 200 level 時的吸收率是 6 : 4 : 3，把光子數目再

增加到 6000 個，則三種不同深度的吸收率變為 600 : 430 : 326 和宇宙線的吸收曲線相符合。

但若從電子的能量計算其穿透力，則幾乎無法穿透 4.1 cm 厚的金質管壁，這又與實驗不合，因此 Bothe 和 Kohöster 認為若宇宙線是高能粒子，則這種行為就可以合理解釋。高能粒子因康普敦效應而產生兩個計數管的響應。

由宇宙線的吸收曲線圖中，我們可以得到粒子在不同 level 所具有的吸收率如圖(b)。



若我們把兩個計數管置於水平面和水平面下 A 處時，由兩種假設（光子和粒子）所得到的吸收率有很大差別。若以高能光子碰撞出的電子打到計數管為基礎，則在水平面時是 6 個，在 A 處時是 1 個，機率降低了 5/6。但若以粒子為假設，則在水平面是 6 個，在 A 處是 5 個，機率幾乎保持一樣，這個結果和實驗結果相符合，所以 Bothe 和 Kohöster 才認定宇宙線是一種高能粒子。

此實驗關鍵在於提供宇宙線到底是光子或粒子的判斷若沒有此實驗，則光子說和粒子說所得到的宇宙線的吸收曲線都一樣，分不出來。本實驗告訴我們若宇宙線是光子，產生的兩個計數器的

響應，會因金屬壁的材料和厚度以及水深的影響，事實上此實驗與粒子說的推論結果一致，除了指出不是光子外，還指明不是 α 和 β 質點，因為計數管用 1.1 mm 鉛壁為材料，若是 α 或 β 質點，則應該會被擋住，而不會使計數管的驗電器產生反應，所以宇宙線既不是光子，也不是 α 、 β 質點，得到強而有力的證明。另外一點因為在不同水深時多少有吸收率，這指出宇宙線並不是單一的能量所組成，若研究他的吸收曲線則可以把宇宙線的能譜求出來，Bothe - Kohöster 實驗不單確定了宇宙線的粒子行為，而且由於實驗的啓示提供後人進一步研究宇宙線的更多性質，進一步談到如何根據這此性質去推測宇宙線的由來。