

在某一個狀態下，當我們量了X方向的位置再去量y方向的位置後，回過頭來再量X方向的位置，我們發現並沒有什麼改變。可是當我們量X方向的位置，再量X方向的動量後，回過頭來我們會發現X方向的位置已經改變了，因為在測量X方向的位置分量的狀態中，X方向的動量並不確定，所以在我們測量X方向的動量時，我們已經把X方向的位置的狀態改變了，我們自然無法得到相同的位

置了。所以有些測量是不能相容的，而這不準確性也就是量子論的基礎，由其不相容的程度的基本假設，我們就可以構築整套量子論。

最後我要再提一點，就是像 $\Delta P \Delta X > h$ ， $\Delta t \Delta E > h$ ，這些是 Heisenberg 所提出的不準確性原理，關於在這些不準確性實際上有嚴密的定義，我們這裏暫且不提它。但大家要知道，不準確性是「狀態」本身所產生的，從這些不相容的情形，我們可列出方程式而建立起整個量子論。

李怡嚴博士，31歲，於1964年獲密西根大學 Ph. D. 主修理論物理，現專攻高能物理，今年開大一普通物理與博士班量子理論及弱交互作用專題。

介紹李、楊對弱作用中 宇稱守恒性的探討

~何宏澤~

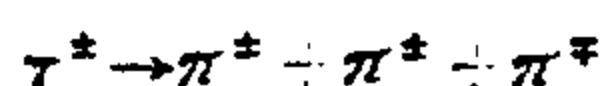
在自然界及日常生活中我們常可發現一個現象——對稱 (symmetry)。例如人的雙耳、雙手、雙眼等即是生物上對稱結構的一個例子。又如在藝術上、數學上我們也不難找出很多對稱的實例。而物理學中對稱的觀念可以說是直接導源於我們的日常生活。在力學問題中，我們往往祇需追索對稱性，便可得到重要結論。例如，在氫原子裏，一個電子的軌道角動量量子化的情形，事實上是原子核加諸電子的庫倫力 (Coulomb force) 球對稱的自然結果。對稱性在這裏是指庫倫力的各向同性。這樣的對稱原理，在古典物理中雖然已經存在，但是在量子力學中，我們對它的了解却大大地深入而且推廣了。對稱原理在量子力學中的重要地位可舉兩個倒來看：選期表的一般構造，實質上祇是上面所提對稱性——庫倫力的各向同性的直接而美麗的結果；又如反粒子的存在，乃是狄拉克理論所預期的。他的理論就基於相對論的對稱原理。由上所述，以及其他例子中，我們看到自然界似乎經常利用許多

對稱例的簡單數學表現。這種對稱帶給物理結構的深奧和複雜性，及其所牽涉到的數學推理的優美和精闢，是鼓舞物理學家們最大的力量來源。它使得我們企望自然界是具有我們可能理解的秩序的。

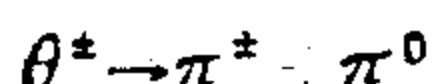
在許多對稱原理中，關於左右的對稱 (right-left symmetry)，是自古以來就常被討論的。過去許多哲學家也曾詳細地辯論過自然界是否顯示這一種對稱的問題。在生物現象中自從1848年巴斯德 (Pasteur) 的研究以來，我們就知道，有機化合物或生物常常只呈現兩者中的一種，例如蝸牛或海螺的壳。然而，在無機過程中，兩者常常同時發生，並且彼此是對方的鏡像。但是，物理定律却經常顯示左右之間的完全對稱。這種對稱，在量子力學中也可以簡單地陳述為守恒定律 (Conservation law)，即空間反轉或宇稱的守恒性 (Conservation of parity)。這是與左右對稱原理完全相當的一項守恒律。在分析原子光譜時，它很快地就變得非常有用。這個觀念以後又被擴展到原子核物理，

以及介子和奇異粒子等現象上。逐漸地我們習慣於原子宇稱性及原子核宇稱性等概念，進而又討論並測量介子宇稱性。在所有這些發展過程中，宇稱觀念及宇稱性守恒律始終都是極端有效的，它的成功轉而被認為支持左右對稱性在物理定律中的真確性。

在1954—1956年之間， θ - τ 的難題 (θ - τ puzzle) 產生了。問題是這樣的：當時觀察到一種粒子叫 τ 介子，它產生出來後經過大約 1.2×10^{-8} 秒就蛻變成三個 π 介子：



同時又觀察到另一種粒子叫 θ 介子，它產生出來後也是經過大約 1.2×10^{-8} 秒，就蛻變成兩個 π 介子：



由於實驗的證明，宇稱守恒律在強交互作用 (strong interaction) 及電磁交互作用 (electromagnetic interaction) 中具有很大的準確性，所以當時大家都相信，這些 θ ， τ 粒子在蛻變過程中 (即弱交互作用) 必須遵循宇稱守恒定律。經過 Dalitz 對實驗數據作詳細的統計分析之後，由於它們蛻變產物所具的角分布及不同的宇稱性，可以斷定 θ 和 τ 不可能是同一個粒子。既然是不同的粒子，那麼它們的物理量如質量、電荷等總該有些地方顯出不同才對。然而，奇怪的，由測量的結果 θ 和 τ 不但有相同的質量，平均壽命也一樣長 (至少精密的實驗觀測不出有什麼不同)。甚至還有其他各種散射 (scattering) 的實驗事實指出 θ 和 τ 是相同的!! (今天我們知道 θ 和 τ 介子是同一個粒子，而被稱為 K 介子)。

這個難題的解決，首先由李政道和楊振寧於1956年及提出左右對稱在弱作用中並不成立的說法。他們兩人也因此得到諾貝爾物理學獎。

李政道和楊振寧解決這個問題並不是一下子就懷疑到宇稱守恒定律，而結果碰巧成功的。事實上，完全不是這樣一回事。在物理學發展過程中，一個人要從老的，不合理的枷鎖掙扎出來，是要經過非常辛勞的努力的。他們兩人曾經在宇稱守恒律成立的大前提下，做過種種嘗試，來解決 θ 和 τ 的難題；例如假設有兩種 Λ 粒子存在： Λ_1^0 和 Λ_2^0 。結果惹出了許多麻煩來，看樣子是到了山窮水盡疑無

路的時候了。最後他們反其道而行，乾脆接受實驗的事實， θ 和 τ 是相同的粒子而同一種粒子可以同時有兩種不同的蛻變方式，可是這兩種蛻變事實合併在一起，卻跟大家所相信的宇稱守恒定律互相矛盾！他們就問道：為什麼不能放棄這個定律呢？這也是有史以來最大膽的懷疑之一，許多人都承認這一點。於是他們就着手研究這個定律的可靠性如何，這就要去分析實驗對這個定律支持到什麼程度？(事實上他們之所以敢下這種假設，乃由於他們搜遍了所有的實驗資料，並沒有發現宇稱守恒定律在弱作用是成立的證明。)

我們知道，如果宇稱在交互作用的過程中不守恒的話，則所有原子及原子核的 states 會由兩種具有相反宇稱的 states 所混合而成。相反的宇稱所佔的比例可用 F^2 來表示。 $F^2 = 0$ 表示宇稱為完全守恒。

由於宇稱選擇定則 (parity selection rule) 在原子及原子核物理方面應用起來無往而不利，所以混合率 (F^2) 不可能太大由原子分光術 (atomic spectroscopy) 的測量，可估計出這個極限：

$$F^2 > 10^{-6}$$

在原子核方面所得到的極限還要更小。另一方面，如果宇稱不守恒，就可推論在交互作用中有宇稱的混合現象存在。在核子反應中，由於這種作用的存在會影響到 angular distribution 關於這種實驗，當時所做到的精確度並不太好。李、楊在他們的研究結果說：這樣的實驗可以保證：

$$F^2 > 10^{-4}$$

為了得到更滿意的結果，他們就進一步分析下去：如果宇稱守恒律不成立的話，則對所有的 system 必存在一 electric dipole moment 具有大小為：

$$\text{Moment} \sim eF \times (\text{dimension of system})$$

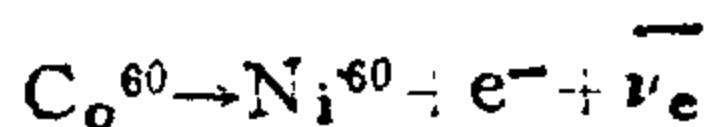
例如：如果一個質子具有 electric dipole moment $\approx e \times (10^{-6} \text{cm})$ 則由於氫原子有 2P 能階的存在。引起的微擾作用 (perturbation) 會使 2P 能階產生大約 1Mc/sec 的變移 (shift)。另外吾人可在電子——中子 (electron-neutron) 的交互作用中發現相同的例子。對於一個中子如果具有 electric dipole moment 的話，其大小一定要小於 $e \times (5 \times 10^{-22} \text{cm})$ 。因為中子的 dimension 差不多是

10^{-13} cm所以所得到的 F^2 的上極限是 3×10^{-13} : $F^2 < 10^{-15}$ 。在原子核反應(即強相互作用)中,結合強度(Coupling strength)約為 $G^2/hc \sim 1$ 。而在電磁作用中,結合強度大約 $e^2/hc \sim \frac{1}{137}$ 。所以宇稱混合率(parity mixing) F^2 小於 10^{-6} 的實驗證明,用來保證在原子核反應和電磁作用中「宇稱性是守恆」,可以說是足足有餘的。因此大家都相信宇稱守恆定律是一個不易的定律。

可是科學和宗教不同,「相信」本身是無濟於事的。在這裏問題的關鍵是:在弱相互作用中的結合強度是非常地小(約為 $2\pi g^2/hc \approx 10^{-12}$)。已有的實驗結果: $F^2 < 10^{-6}$ 能不能保證在弱相互作用中,宇稱性是否仍然守恆呢?他們說這是不可能的。因為他們分析的結果:要保證在弱相互作用中宇稱性守恆的話,必須要有 $F^2 < 10^{-24}$ 這樣高的精確度才能保證。他們問來問去,找來找去,查遍所有的文獻,發現到那時為止,沒有一個實驗能夠提出這樣的保證。於是他們得到結論說:在弱相互作用中宇稱性守恆沒有實驗的支持和證明。

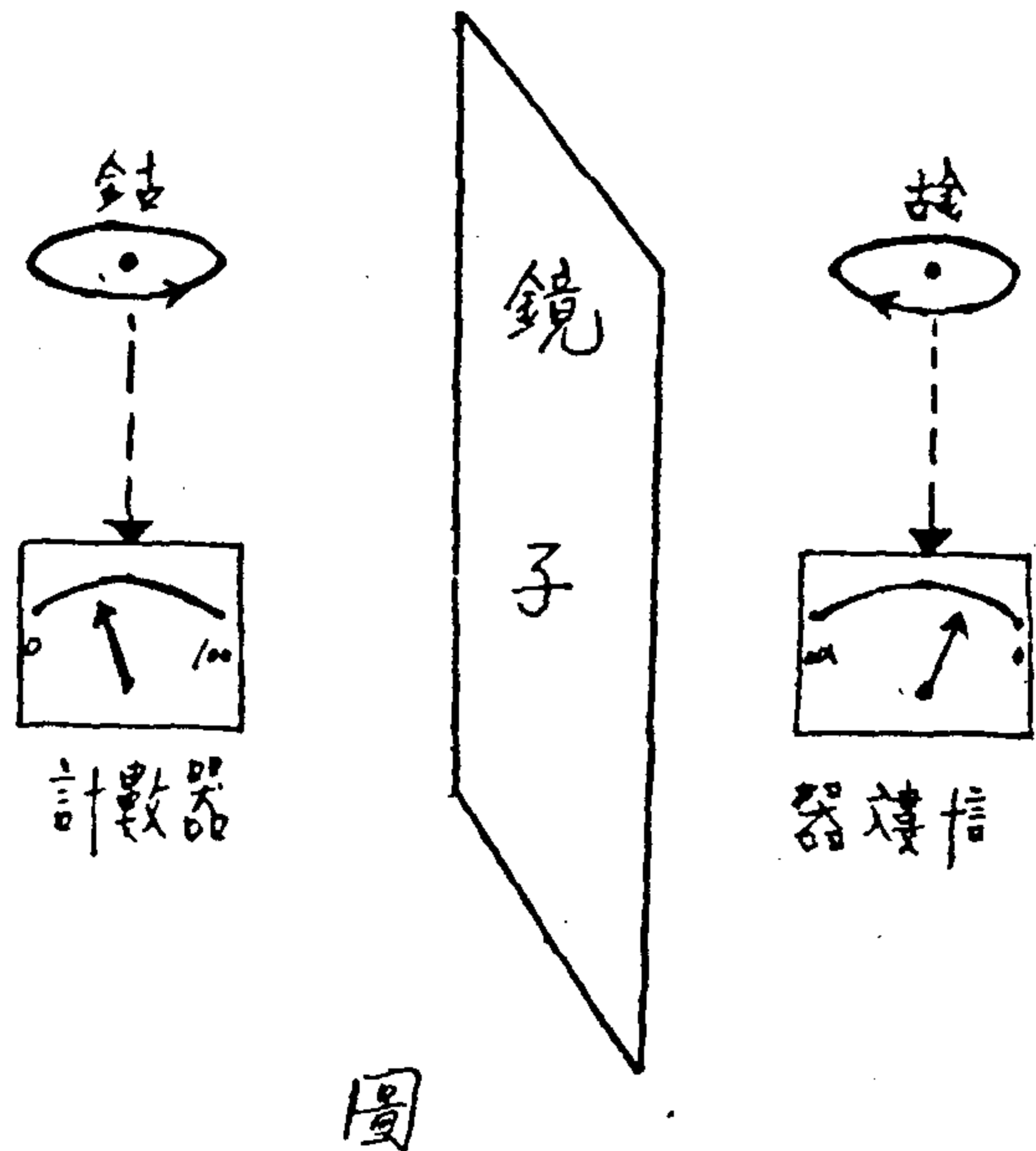
爲了要使他們的理論更具建設性。他們就建議幾個可行的實驗。一種是 Meson and Hyperon decays。另一個是鈷 60 (Co^{60}) 的 β -decay。後一個實驗爲吳健雄、安布勒(Ambler)、赫瓦德(Hayward)、霍普斯(Hoppes)和赫德遜(Hudson)等在1956年所做的。茲介紹如下:

我們知道 Co^{60} 具有核 β 蛻變爲:



要以這個實驗來測定弱作用是否不遵守左右對稱律,是用兩套互成鏡像的實驗裝置,它們必須包含弱作用,而且必須是彼此不相同的。然後檢查這兩套裝置是否經常產生相同的結果。如果不是的,那麼就毫無問題地證明了這個實驗違反了左右對稱性。我們可用圖形來分析,如果弱相互作用是守恆宇稱的話,則當我們測量由蛻變放出來的電子的方向,相對於 Co^{60} 核的自旋的方向,其一方的電子應該和其另一方的電子數目一樣多。不然的話,就會發生矛盾。圖一爲這個實驗的大意圖:

鈷原子核因弱作用而蛻變,蛻變所生的產物則由計數器記錄。線圈中的電子計數器是整個實驗最重要的因素,如果沒有這計數器,則在想像中鏡子



的裝置就是完全相同,那麼所產生的結果也將完全一樣。但要使電流能影響鈷原子核,必須除去熱震盪(thermal agitation)對於鈷的干擾。所以這個實驗必須在低於 0.01° 絕對溫度的極低溫下進行。

實驗結果顯示圖一中兩個電表有很不同的讀數。因為整個設備其他部份完全具有左右對稱性,所以我們能斷定這裏的不對稱,必定起因於鈷蛻變的過程中,而這個過程包含一個弱作用。

以上討論的乃對左右對稱而言,即所謂空間反射,通常以簡寫 P 來表示。由 P 在弱作用中的不對稱性,看來神在創造宇宙的時候,也隨意某些對稱被普遍而不完美地遵守着。但是爲何弱作用與被觀察到的對稱性的破壞有關却還沒有人知道其究竟。

既然 P 的不變性在弱作用中被推翻了,人們不禁要問電荷(C)和時間(T)的不變性,是否也有被違反的可能呢?在1964年夏天由克利奧遜(Christenson)及柯洛甯(Cronin)等的實驗所得的決定性證據又粉碎了CP的完美性,即在弱作用中CP不變性也可能不成立。根據CPT定理,CP不變性若被違反,則T的不變性也一定被違反。但是真正顯示T不變性在弱作用中被違反的實驗仍然是有其需要的。不幸在最近的將來有關這類的實驗還不容易被做到。

假使時間逆轉對稱性被違反的話,我們是否必

須重新估價統計物理中的傳統觀念呢？特別是熵（entropy）的觀念。幸虧這個問題很容易回答，熵是屬於平衡統計物理學的觀念，而在平衡狀態中根本沒有時間逆轉的問題。因之時間逆轉不變性的破壞，雖然允許基本粒子弱作用在「過去」與「將來」不同，但是這種區分與我們日常意識中的過去與將來並無聯繫。後者純粹是統計現象中熵的增大。

在論及基本粒子強作用顯示對稱性而弱作用顯示非對稱性時，人們不禁要問是否有一比較統一的圖案可以預見？我們可以楊振寧的一席話來作結：「……從對稱性考慮在物理學中成功的完美邏輯推理與堅強的實驗結果看來，人們有權相信物理學中一個比較統一的圖案出現時，將引起整個物理事業的轉變。如果現在還沒有人構想過這樣一個圖案，

本篇乃為補述林杉勇先生於57年2月16日的演講，「李政道、楊振寧與對稱性」而作。文成之後，承林杉勇先生在百忙中過目修正，多所指導，特在此誌謝。

加速器發展與 原子核物理研究

•張繼昆筆記•

近二十年來物理學發展極為迅速，尤其是原子核物理和基本粒子物理，世界各地有無數的物理學家都在努力從事着這方面理論和實驗的研究。理論如果沒有實驗的證實是不可靠的，實驗如果沒有理論的說明是空洞的，唯有理論和實驗互相印證，才促成了今日物理學的迅速進步。

在理論方面，當物理學家不能從基本原理（如不滅定律或守恆律）導出一個適當的說明以解釋某些物理現象時，他們通常尋找某些已瞭解的物理現象，藉從已知的瞭解導出一個模型（Model），以說明未知的。物理學家波爾（Bohr）根據這個原則導出他的原子構造模型。至今我們對於核力知道還不够完全，我們不能從基本原理導出一個完全能夠說明原子核構造的學說，因此，我們必須藉模型以說明原子核構造。數十年來，實驗方面已累積了許多有關原子核構造的資料，面對着這些複雜的資料，理論物理學家實在難以着手，但是他們根據上述的

那並不是物理學家們還沒有去嘗試，而是自然還不會充分地揭露她自己而已。」

參考書目：

1. Physics Review: 1956, (104)
C. T. Lee & C. N. Yang: Question on parity conservation in weak interaction.
2. C. N. Yang: Elementary Particles, A Short History of Some Discoveries in Atomic Physics.
3. 丘宏義: Fundamental Physics.

林杉勇先生，28歲，1967級校友，以第一名優異成績畢業，現留校服務。

林爾康博士於三月十五日
對物理系一、二、三年級同學講

原則，終能先後提出了許多有關原子核構造的模型，以說明實驗的結果。這些模型例如液滴型（Liquid drop model），費米氣體型（Fermi gas model），阿伐粒子型（ α particle model），殼層型（Shell model），及集合型（Collective model）等，沒有一個是完美無疵的，每一個模型通常只可圓滿的解釋原子核一部分性質。在這些模型中以殼層型近於實際比較成功。殼層型與原子構造模型很相似，核中的核粒和原子中的電子一樣，佔有某些。殼層原子核內的殼層，分為質子殼層和中子殼層兩組，各不相干，再應用量子論處理模型中的諸問題。近數年來這方面的理論不斷的在繼續發展，以殼層型為出發點，加以修正和擴充之。由於高速計算機的問世和迅速發展，配合原子核物理理論的研究，過去許多無法尋求計算答案的複雜問題，如今都可能得到解決了，對於促使今日原子核物理的發展至為重要。