

# 物理學漫談

(2期)

丘宏義

編者言：丘宏義先生是本系早期的系友，他是有名的太空物理學家，曾在民國五十四年左右應教育部的邀請，回國主持暑期科學講習會物理部門，與吳大猷先生合授基礎物理學。在這段時間內他和當時系上的同學有頗多的接觸。

我回來之前，吳大猷先生曾經告訴過我說：在台灣，學生會自己去看書，這是一個好現象，不過他所怕的一點是，怕他們誤解了物理的真諦而走入歧途，不注意物理的正統發展。在某種意味上，這句話很有一點道理，例如某些人對這門課所抱的希望太高，把它看作速成班，希望在兩個月內速成，修完這門課以後，就可以去計算 Field Theory 裏面的種種問題，事實上，這是不可能的。

昨天有位同學對我埋怨說，我的課程太淺，教的材料都是他從前學過了的，當然，我不能怪他。他又建議說：為什麼不教像 E. T. Whittaker 的 Analytical Dynamics 這一類的書？他說他有許多這本書裏面的問題解不出來，他問我能不能幫他解？我的回答是：他解不出來，我也解不出來。哈，許多問題我也解不出來，要解那書本裏面的問題，需要用到應用數學的種種技巧。但是這些與真正物理學上的問題是毫無關係的。例如有這樣一個形狀古怪的曲線：

arc length:  $s$

force =  $F(s)$

$$= e^{-ks} \int_0^s (ks) dk$$

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

$$x = a \sin \omega u + bu, \quad y = c \cos \omega u + hu^2$$

( $u$  爲一參數)

叫你去解一個質點限制在這曲線上運動時的運動方程式。這是一個很繁難的問題，即使這個問題被解出來了，對實際的物理問題或現象的瞭解也是毫無幫助的，請問自然界有沒有上述的這種情形存在呢？他又說：他以前念 Landau and Lifshitz 的量子力學時，因爲一開頭講的就是實驗，覺得很枯燥無味，於是就沒有繼續看下去。事實上，理論並不是什麼最重要的東西，在物理學上最重要的事是什麼呢？我說是實驗。一個人有這種誤解——忽視實驗——大部分是受到教授教書方法的影響。他們所教的方法，都是一開始就把理論非常公式化地寫出來，然後就引導；不問與實驗結果能比較的數字結果在那裏？與實驗比較起來如何？我當時便去拿了一本物理刊物給他看，那是 1956 年出版的 Physical Review, 104, 254 (1956)。那裏面有一篇是楊振寧和李政道得到 Nobel Prize 的論文：Question on Parity Conservation in Weak Interactions。

這篇論文裏面講到當時不能解決的問題，那就是  $\tau$ - $\theta$  puzzle 問題是這樣的：當時觀察到有一種粒子叫  $\tau$  介子它產生出來後經過大約  $1.2 \times 10^{-13}$  秒後，就衰變成爲三個  $\pi$ -mesons：

$$\tau^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^{\pm} + \pi^{\mp}$$

同時又觀察到另一種粒子，叫  $\theta$ -介子，它產生出來後也是經過大約  $1.2 \times 10^{-13}$  秒後，就 decay 爲兩個  $\pi$  mesons：

$$\theta^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^0$$

因爲那時大家都相信粒子在衰變過程中（即弱作用）必須遵守對等保守律，經過 Dalitz 對實驗數據作詳細的統計分析之後，就斷定  $\theta$  和  $\tau$  具有不同的對等性，所以  $\theta$  和  $\tau$  必定是不同的粒子。好，那麼這兩個不同的粒子總該有些地方顯出來有點不同才對。然而奇怪的是：這兩個粒子，不但半衰期相同，而且質量也相同（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的實驗事實指出  $\theta$  和  $\tau$  是相同的！！這就令人迷惑了。你們不要以爲李楊一下子就懷疑到對等性保守律，結果碰巧就成功了。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，不合理的觀念的枷鎖掙扎出來是要經過非常辛勞的努力的。他們兩人曾經在假定對等性保守的大前提下，作過種種嘗試來解釋這個不可思議的現象，例如假設有兩種  $\Lambda$ -粒子存在， $\Lambda^{\circ}_1$  和  $\Lambda^{\circ}_2$ ，結果惹出許多麻煩來，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，爲什麼不乾乾脆脆接受實驗事實呢？ $\theta$  和  $\tau$  是相同的粒子，而同一種粒子可以同時有兩種不同的衰變方式。可是這兩件事實合併在一起，却跟大家所相信的對等性保守律矛盾！他們就問道：爲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。於是他們就去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。

如果在作用過程中對等性不保守的話，這就等於說在作用中有兩種對等性不同的狀態混合起來，這不同對等性的混合程度可用一參數  $F^2$  來表示， $F^2 = 0$  表示對等性是絕對保守的。而這個不同對等性的混合會影響核子反應（如散射）的角分佈律，關於這種實驗，當時所做到的精確度並不好，但

是也可以用來估計  $F^2$  的大小，他們研究結果說：這樣的實驗可以保證

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

另一方面在電磁作用中我們知道對等性的選擇規則在原子和核子物理中用起來無往而不利，所以不同對等性的混合程度參數  $F^2$  一定很小。由原子光譜學他們兩人估計出來： $F^2 < 10^{-5}$

他們還不滿意，就再進一步分析下去：如果對等性不保守的話，那麼必須有這樣的電極偶（e.d.m）存在：

$$e.d.m \sim e \times (\text{原子或核子大小})$$

當時已經有人作過實驗測量中子的電極偶，結果說是：如果中子有電極偶的話，它一定要小於

$$e \times (5 \times 10^{-20} \text{ cm})$$

$$e.d.m \lesssim e \times (5 \times 10^{-20} \text{ cm})$$

因為中子的大小差不多是  $10^{-13} \text{ cm}$  所以由這個實驗他們得到  $F^2$  的上限是  $10^{-13}$ ：

$$F^2 \lesssim 10^{-13}$$

在核子反應（即強作用）中耦合強度（Coupling Strength） $G^2/\hbar c \sim 1$ ，而在電磁反應中耦合強度  $e^2/\hbar c \sim 1/137$ ，所以  $F^2$  小於  $10^{-13}$  的實驗證明用來保證在核反應和電磁反應中「對等性是保守的」，可以說是足足有餘的。因此大家都相信對等性的保存性是一個宇宙中的廣泛的特性。可是科學和宗教是不同的，「相信」本身是無濟於事的，在這裏，問題的關鍵是：弱作用的耦合強度  $g/\hbar c \sim 10^{-12}$  這樣小，已有的實驗結果  $F^2 \lesssim 10^{-13}$  能不能保證在弱作用「對等性是保守的」呢？他們說這是不可能的。因為他們分析的結果說：要保證對等性在弱作用中保守，必須要測量出來

$$F^2 < 10^{-24}$$

這樣高的準確性才能保證。他們問來問去，找來找去，查遍所有文獻，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：在弱作用中對等性的保守沒有實驗的支持和證明。

接着，他們兩個人就建議幾個實驗：第一個是  $\pi$  介子的衰變  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ，微中子是百分之百的沿運動方向極化；第二個是  $\text{Co}^{60}$  的  $\beta$ -衰變，也就是後來吳健雄和其他人做的實驗，第一次證明了對等性是不保守的。把  $\text{Co}^{60}$  降低溫度，利用外面的磁場使  $\text{Co}^{60}$  的原子核排列起來，（即它們的自旋方向都相同），然後測量看看電子往上放出來和往下放出來的數

目是不是一樣：

結果發現往下放出來的電子多（電子的運動方向與  $\text{Co}^{60}$  的自轉方向

相反），這就證明了在  $\beta$ -衰變中對等性是不保守的。電子這個上下分佈不對稱的結果證明對等性混合參數  $F^2$  不等於零，因此才會影響到電子的角分布。還有一個是  $\mu$  衰變的實驗， $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu$ ，這裏面  $\mu^-$  介子和電子  $e^-$  並不完全極化，但是也有某種程度的極化，用  $\vec{S}$  表示之。我們可以實驗觀測衰變產生的電子對於  $\mu$  介子的自轉方向  $\vec{S}_\mu$  的角分布，這就要測量  $\vec{P}_e \cdot \vec{S}_\mu$  這樣的一個量，如果  $\vec{P}_e \cdot \vec{S}_\mu \neq 0$ ，也就是說電子的分佈是不對稱的，那就表示對等性的不保守。還有其他別的實驗……。後來

實驗結果一個個的證明了：「在弱作用中對等性是不保守的」。

你看，如果把這些實驗的分析，都寫入書本裏面，豈不是也要令人覺得枯燥無味的嗎？但是，像他們這樣，遇到不能解決的問題，便細心的去分析已有的實驗的可靠性和種種限制其可靠性的因素，這才是真正可以說是研究物理問題，在瞭解自然，他們在這裏面所做的事並不是在演繹物理定律而是尋求物理定律，在這裏沒有定理可以應用，也沒有公式一套進去就可以解的，一切都要從頭來，從實驗開始。

以前我在台大念書時，教我們普通微積分的是已經逝世的周鴻經先生，很著名的數學家，一生都在研究 Fourier series。當然，他教的非常好，可是半學期下來，工學院學生已經學了許多定理和公式，應用來計算了，他還在為我們詳細講解“Limit”極限的觀念。許多學生都不以為然，事實上，這正是周鴻經先生高明的地方，因為一個人將來作研究要證明一個定理或解決一個問題，常常是沒有其他定理可以用的，更不可能有什麼公式一套進去，就可以解出來的，這時一定要回到基本的觀念上去，極限就是最重要的觀念之一，不但是微積分，整個解析數學的基礎就建立在這個極限的觀念上，你想，這個觀念沒有徹底弄清楚，還能作什麼研究嗎？

反過來我們看Whittaker的書裏面所講的方法：告訴你位能和運動方程式，那麼問題就簡化到“quadrature”，這幾乎可以說是應用數學的問題了。如不能用解析方法解，就用近似的方法解或用計算機去解析它算得比人準確多了，也快多了，人的生命有限，計算機能算的就讓它去算，不必浪費我們的生命在這上面。\*而像上述的對等性問題，這種情形就不能夠用計算機來做了：像李楊他們從不同的觀點出發，分析各種實驗，看看能夠提供出什麼證據，能夠建議什麼新的思路，最後找出物理定律。這樣才是真正的從事於物理的研究工作，探討自然，瞭解自然。當然，在某種情況下，我們也必須做演繹的工作，而這個通常是在尋求新的物理定律的種種的性質，而不單純在演繹新的物理定律。

舉例言之。十七世紀，牛頓和哈雷的故事，哈雷是天文學家，（哈雷慧星的哈雷）他觀察到慧星的軌道是拋物線，他沒有辦法解釋這個現象。有一天，他就去請教牛頓，是什麼力量使它的軌道成這個樣子？牛頓告訴他，如果力是 $F = -Gm_1m_2/r^2$ 則其軌道是拋物線。現在物理學研究的情形也是一樣的，力或作用是我們不知道的，於是必須做實驗觀察去得到數據，由這裏去求得力的定律。例如結合核子的力我們不知道，因此我們必須觀測研究粒子受到核子力的散射的情形，測量散射截面與粒子的能量關係如何，測量相角位移，角分佈、極化性等等，我們企圖自這些實驗來尋找核子力的性質。

你也許要問，近來在物理評論上也有許多論文關於公理式的場論（即任何物理場可由一些簡單之公理及數學推出。）方面的，寫得非常公式化，一開始就寫出很長很長的Lagrangian，然後就開始解，把Lagrangian展成攝動展開式（Perturbation expansion）（Taylor series）結果第一項小，第二個項大一點，第三個項更大……到這裏差不多要一年才能算出來，再下一項也許要十年才能算出來，場論的工作，算到這裏為止。甚至還有人這樣算，他說：「我們把第二項以後略去不管，那麼第一項與實驗相符」，於是就結論說：「我們的場論可以解釋問題」，你想這種態度豈是物理學家所應

該有的嗎？有人開玩笑把這種人稱為Deltaepsilonist，叫做 $\delta-\epsilon$ 專家，他們解決問題的態度好像是這樣的：在 $\delta=0$ 和 $\epsilon=0$ 的條件下，我們得到了場論的什麼什麼……。然而如果 $\delta$ 比 $\epsilon$ 先趨近於0，結果就不對，反過來，如果 $\epsilon$ 比 $\delta$ 先趨近於0，也不對。這種人用這樣的方法在研究物理，結果在物理上的貢獻可以說等於零，毫無貢獻。這些論文所做的，都只是一種把物理重新敘述的工作，重新把場論用稍不同的觀點寫一遍，希望在改寫中間，可以除去一些場論內在基本的困難，而且可以包羅宇宙萬象。這樣做會不會有成就呢？會得到什麼結果嗎？……也許我們還不能斷言，因為還沒有人能嚴格地證明場的方程式有解。

事實上，近來幾個有成就的，可以說是物理學上發展過程的里程碑的學說，都是直接與實驗有關的，而不是單從公理出發去演繹出來的。公理式的物理就是希望物理像歐氏幾何一樣由一組公理去導出來。很不幸的，這是受到大物理學家Einstein的影響結果。他在晚年曾經講過一句話，大意是說：「物理的公理一定是要人去發明的，不能用實驗找出來」。他講的，也許含有別的意思，不幸的是，許多人多半誤解以為Einstein是主張axiomatic physics，說，物理是某些聰明人先把公理寫出來，其他的人所能做的就是去演繹。事實上，這是不對的，研究物理不是這樣子的，不是由公理出發的，而應該由實驗和觀察做根據，做出發點，因為惟有實驗和觀察是一切可靠的物理知識的泉源。由我們自己認為是合理的公理演繹出來的結果對不對呢？這個毫無保證，終究還是要以實驗來決定。我們應該根據這些實驗和觀察儘量去瞭解自然，在這過程中，我們應該知道我們能做到的地方，也應當承認有我們無法做到的地方。例如某些物理量（如隱變數Hidden Variable）根本不能觀測出來，我們就永遠無法知道。

的確，我們不能否認，主張所有物理都可以由一組公理或假設演繹出來的物理學派，在十九世紀曾經有過很大的貢獻，然而這件事實並不是說物理都可以由一組已知的公理去演出來。這件事實可由近代物理學的發展經過情形看出來。由牛頓起到十九世紀為止，數學上解析的發展還不完全，所以在以後每一次新的發展中，你都可以發現某些新的物理現象可以利用新的解析方法來處理。牛頓當初的微積分非常粗陋，簡單，然而發展到後來，可以應用到水力學，熱力學、天體力學……等等方面。<sup>\*\*</sup>尤其在天體力學上，牛頓的力學系統得到了最大的勝利，那就是根據牛頓力學預言天王星和冥王星的存在。兩位天文學家Leverrier和Adams個別地根據推算的結果，指着天上某一地方說：「你們從這個地方看去，可以看到一顆新的行星。當時有名的天文學家Airy反對說：這是不可能的<sup>\*</sup>。但是，在德國天文台，有人依照指示去觀察，結果真的發現那兒有一顆從來沒有被發現過的行星。後來還有許多別的預言，結果都被觀察證實了，這在當時是一件非常轟動的事情，這些都是根據理論去推測出來的，因此牛頓力學被當時人們以為是一個非常完全、美滿的學說，所以有人說，科學發展到此為止。沒有再繼續追問下去。

1897年，Lord Kelvin曾經在一次著名的演講中說：科學裏面，再沒有事情可做了，有的只是演繹的工作。他勸人不要念物理，他說：「現在的物理界就像一片蔚藍的晴空，一目瞭然，只是在遙

遠的地方，我還看見有兩片很小很小的烏雲，一個是 Rontgen 最近發現的神秘的 X-ray，另一個是 Becquerel 發現的 Natural Radioactivity，這些不久將可以瞭解，其他沒有什麼別的事可以做的了。……」我不必再說下去，大家也都知道，二十世紀物理學的基礎就建立在他當時認為的僅僅是兩片烏雲上面。這兩個新的物理現象，沒有辦法用古典力學來加以解釋的。這兩個現象的發現，都是由包裝良好而却感光而發黑的軟片上去分析出來的。那時照片技術剛在應用。他們慢慢去分析原因，結果斷定有不可見的光存在，以後我們才逐漸瞭解 X-ray 和自然輻射物體。當然，以後還有許多新的發現都成為近代物理的基礎，例如 1902 年 Michelson-Morley 的實驗，1905 年 Planck 的量子假設解釋黑體的輻射。

1905 年有三篇重要的論文發表，這三篇都是由同一個人寫出來的，他就是 Einstein。篇篇論文都是直接與實驗有關的。一篇是狹義相對論，這裏面就牽涉到時間和空間的概念，這是很基本的問題，他就問：我們如何去瞭解時間和空間？如何去定義？如何去測量時間和空間？等等，他就由這些基本概念的分析出發，然後去導出轉換解釋 Michelson 的實驗，而後得到  $E = Mc^2$  這種重要的結果；第二篇是關於光電子效應的論文，他研究這個現象，用它來證明 Planck 的量子假設是對的，同時提出量子的觀念來。1922 年左右他得到諾貝爾獎就是由於這篇論文的貢獻；第三篇論文是關於 Brownian 運動。早年英國植物學家 Brown 發現花粉在水中作不規則的運動，那時一直無法解釋這個現象，後來 Einstein 認為應該用氣體動力學來解釋，雖然當時氣體動力學已經被大家接受了，但只是在解釋大數量的物理現象，如氣體受熱膨脹，受壓力則體積減小等等現象用到而已，沒有人真正深入考慮到在小數量的物理上的情形，每一個分子都在動嗎？這似乎是很顯然的，但是在那時候沒有直接的證據。Einstein 認為每一個花粉微粒是受到水分子的撞擊而作不規則的運動。他說：我現在用這個來引導一花粉運動的性質，也許可以用來作證明，也許可以推翻分子的學說。這三篇論文所處理的問題是屬於三個完全不相干的領域，至少在當時是不相干的，在一年內能寫出這樣三篇重要的論文，一直到現在，還沒有再看到有這樣天才的人。一般人都以為他主要的貢獻是在廣泛相對論，其實他的廣泛相對論還沒有完全被接受。（沒有被接受的原因是因為沒有實驗根據，見拙編“Gravitation and Relativity” Introduction。有興趣的讀者可以來函，我可以寄上這篇文章。然而他這三篇論文在物理學上的貢獻，已經是不可埋沒的了。這三篇論文都不是用別人的理論去引導結果，更不是由什麼原理出發去計算某種數量，而是直接研究，分析實驗事實，由實驗來得到理論，再由理論去導出新的物理定律，去預言新的實驗和新的結果。

1909 年 Rutherford 提出了一個很重要的原子模型雖然當時他自己以為沒有什麼了不起，因為這個模型一開始就不對，然而這個模型對以後物理界的影響却是深遠廣大。他用  $\alpha$ -質點去打金箔，發現質點幾乎全都穿過去，似乎沒有什麼阻礙，根據這個  $\alpha$ -質點散射的實驗結果，他設想原子裏面大部分是空隙，原子核和電子只佔很小很小的空間，原子核在中央，四周圍繞着電子。不幸，這個模型有一個大缺陷，因為根據古典電動力學的計算，電子會因為加速度而放出電磁波，失去動能而落向原子

核，受到激發時再出來，主要的麻煩是電子慢慢繞進去時放出來的一定是連續光譜，而實驗觀察到的却是明線光譜，所以他自己也以爲這是一個失敗的模型。

然而這是有史以來，第一個根據實驗結果而提出來的原子模型，嘗試解釋原子的構造。

根據這樣的Model去作別的計算，結果拿來再與實驗比較，這才是物理！不像在哲學上，如古代希臘人所講的空空洞洞玄想出來的Atom，Atom，那種東西。1913年N. Bohr根據Rutherford的原子模型再加上量子化的假設，在Bohr的原子模型裏頭，每一個原子中央有一個原子核，四周圍繞着一些電子在有一定層次的軌道上運動，而電子可以由一個軌道跳到另一個軌道，同時放出或吸收光，這樣的一個模型不但解釋了當時最令人頭痛的氫原子的光譜，甚至也解釋了它的Fine Structure，這是一件震動全世界的大事。Bohr非常推崇Rutherford的原子模型，說這是有史以來最大膽的假設。

1922年De Broglie提出了物質波的假設，1924年Davisson和Germer的實驗證實了這個假設，不久Heisenberg的量子力學和Schrodinger的波動力學相繼問世，展開了量子力學的全盛時期，問題多，人工作起來更起勁，幾乎每一個實驗都是一個發現，原子的現象可以說原則上都可以解決了。1926年到1935年可以說是量子力學的黃金時代，這一個時代裏，人才輩出，歐本海默（Openheimer）稱這是：科學的英雄時代。

後來量子力學和相對論結合在一起的形成量子場論，也叫做相對性量子論。1936年以後量子場論的困難逐漸顯露出來，其中最主要的是發散的困難。舉一個例子說吧，例如電子的self-energy。它是指電子的某一部分電荷相互作用的能量，這是爲了解釋電子的輻射阻力的現象：電子加速度時會放出電磁波而失去能量，所以加速力必須做功，對什麼做功呢？對於電子的某一部分的電荷作用於另一部分電荷而產生的力做功。用另一種說法來解釋是：一個Single Charged Particle，不管是等速或加速運動，時時刻刻會在非常短暫的時間內（ $\Delta t \sim 10^{-20}$  秒），違背能量不減定律而放出一個（或多個）Virtual Photon（因為這種Photon是無法觀測到的，所以叫Virtual Photon，通常把放出虛質點的過程叫做虛過程。）然後自己立刻又把它吸收，這種作用叫做Self-interaction，所以就Quantum Electrodynamics的觀點來說，沒有一個帶電荷（或磁偶）的質點是真正的自由的，至少總有Self-interaction。這種Self-interaction的結果產生了帶電粒子的Self-energy。我們相信質點中如 $\pi^0$ 和 $\pi^\pm$ 的質量就是由這種效應所引起的。雖然虛光子是不能觀察到的，可是，如果由外面加給電子足夠能量的話（如加速它）那麼虛光子就會變成真的光子放出來而被觀察到。根據量子力學的運作定義，物理定律只處理可觀察的數量（Observable Quantities），因此，由於在 $\Delta t \sim 10^{-20}$ 秒這樣短的時間內，能量不保守是沒有辦法觀測出來的，所以，我們可以說：能量仍是保守的。不幸的是：如果我們把電子當作點電荷看待的話（一般Local Theory必須如此看待質點，Non-Local Theory雖可避免這個發散的困難，但是它本身另有其他更多的種種困難，例如在很短的距離內訊號的速度可以比光速更快，因而因果律不能成立。）計算的結果，電子的自作用能（Self-energy）無窮大

這顯然與實驗不合。

1974 年重正化 (Renormalization) 方法出現，例如質量重正化或電荷重正化。簡單的說，重正化的方法在大意上是兩個數目都變成無窮大，而它們相減的結果是有限的，例如說，在量子電動學裏面，當我們考慮一個電子與另一個電子作用時，因為一個電子放出來的虛光子可能被另一個電子吸收（互作用），也可能自己馬上又吸收（自作用），所以計算時無法把互作用和自作用分開，於是就混在一起計算結果得到無窮大；而自作用的單獨計算結果也是無窮大，把這兩個無窮大相減，我們得到一個有限值。我們認為這是由互作用來的，這個數值與實驗非常符合。再舉一個例子說吧，當我們計算電子在兩個 Vertices 之間 Propagate 的 Amplitude 時，把 Dirac Wave Equation 裏面的質量  $m$  和電荷  $e$  當作數學參數看待，而不當作是真正實驗測量出來的質量 和電荷  $e_{\text{exp}}$ 。這些參數與實驗值之間差一個修正值，這是由電子和其他粒子或場相作用的結果，

$$m_{\text{exp}} = m + \delta m \quad e_{\text{exp}} = e + \delta e$$

理論計算的結果  $\delta m$  和  $\delta e$  都是無窮大，因為在重正化方法的計算中，我們必須令  $m_{\text{exp}}$  和  $e_{\text{exp}}$  固定，所以我們可以解釋說：原來方程式中的參數  $e$  和  $m$  必須是一個負無窮大的數目。兩個無窮大的數目相減的結果，我們得到一有限值，這個值與實驗結果一比較，令人非常滿意。Bethe 利用這個方法計算氫原子的能位由於束縛電子的自作用能而產生的位移，「很成功地」解釋了 “Lamb Shift” 的現象。Lamb Shift 是由「真空極化」效應所產生的。你們認為真空的 Dielectric Constant 是 1，他說不是 1，因為真空受到強靜電場的影響，會有許多虛電子對真空產生，而電子對作用起來像電偶一樣，所以這時真空就好像有物質在裏面作用，可以被極化，於是它的 Dielectric Constant 就不等於 1 了，（與 1 相差當然很小）這種現象稱為真空極化。Lamb 利用微波技術觀測到氫原子的  $2S^{1/2}$  和  $2P^{1/2}$  兩個能位相差 4125 mega cycle，這是一個非常精確的測量。根據原來的 Dirac Theory，這兩個能位應該是沒有區別的，然而事實上却有微小的區別。

重正化方法不能說是解決了無窮大的困難，第一誰也說不出理由為什麼可以這樣做，第二，這個方法並不普遍有效，如假向量介子論 (Pseudo-vector meson Theory) 中就不能用了。事實上，這種方法是不合乎現在的數理邏輯的，也許就像幾十年前的  $\delta$ -function 一樣，當時也沒有人認為  $\delta$ -function 是合乎數學函數的，因為它在數學中是不能存在的，的確，它是 improper function，然而現在  $\delta$ -function 已經有 Distribution Theory 作它的數學基礎了。

物理學家為了快一點得到結果，常在計算推理過程中借重於「直覺」的幫助，而不很注意數學的嚴格性。這是理論物理學家和純數學家研究態度很不相同的一點。

常常地，在推理計算過程中，為了數學的嚴格性而介紹進來一堆麻煩的符號和其他東西，對物理觀念的瞭解並沒有什麼幫助。這並不是對重正化方法作辯護，我們還是希望將來有更健全的理論來代替它。

1951 年加速器出現以後，物理學家便利用它來研究原子核的構造，發現  $\pi$ -介子的確存在之後



，便嘗試以它來解釋核力，但是沒有完全成功。由於加速器的急速發展結果，發現了許多所謂「基本質點」。直到現在發現有兩種微中子和證實  $\Omega^-$  存在為止，共有 34 個基本質點和反質點。其他還有接近一百個由基本質點與基本質點暫時結合在一起而形成的動力系統叫做 Resonance。粒子物理並沒有什麼顯著的進展，理論上困難多，發展慢，實驗的 Data 也都是要花很多時間和金錢才能得到的，因此令人有一種「源盡」之感。

到目前為止，差不多所有屬於電磁作用的問題都可以計算。電磁力是由於荷電兩質點間相互交換虛光子，而產生的虛光子交換的數目可以是一個、兩個或更多個……如果二虛光子交換之幅 (Amplitude) [幅的絕對值平方正比於強度 (intensity)] 是  $A$  的話，那麼虛光子交換幅是  $(\frac{1}{137})A$  三個 Photon 是  $(\frac{1}{137})^2 A$ ，等等。所以在電磁作用中，主要的貢獻是來自於一虛光子交換，只有百分之一是來自二虛光子交換，百分之一由於三虛光子交換而來了。因此我們便得到一個收斂得很快的級數，稱為 Perturbation expansion。

但是在強作用裏面，情形就不同了。你可以問道：核子力可以正確的由  $\pi^-$  介子交換計算出來嗎？這是一個非常嚴重的問題，一點也看不出可以解決的希望，對應於光子的耦合強度  $\frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137}$ ， $\pi$  meson 的耦合強度是  $\frac{G^2}{hc} \sim 15$ ，這是非常強的力量，所以這種力量的作用叫做強作用 (Strong interaction)。你看，如果也用 Perturbation Expansion 來計算，後面每一項都比它前面一項重要，如交換一個  $\pi^-$  介子的幅是  $B$  的話，那麼交換兩個  $\pi$  介子的幅是  $15B$ ，三個介子交換的幅是  $(15)^2 B$ ……結果這個是否收斂不可知，因此我們不能去計算強耦合 (Strong Coupling) 的結果，你看，甚至連適當的 approximate 的結果也算不出來！

1955 年許多人嘗試用 Dispersion Relations 來計算強耦合這關係與「信號的傳播不能比光更快」的原理（也就是因果律）有關，但是沒有成功；1956 年擴充到 Double Dispersion Relations，也叫做 Mandelstam Representation，來計算強耦合，也沒有成功，1959 年有人推廣某些物理量，到「非物理境界」，在這個境界裏頭，物理量都變成是複數而不再是實數，（例如把角動量變成複數量），後來再用種種高深數學，想辦法去得到結果。還有人甚至走到 Riemann Surface 上面去。結果到 1962 年時，最流行的是 Regge Pole，這是複數角動量平面上面的 Singularity。利用 “Regge Trajectory” 來作質點的分類，預言新的 “Resonance” 的存在以及它的質量多少，還預言其他種種性質。有一陣子似乎做得很不錯，這幾陣捲掃物理界的風，現在吹過去了，這些幾乎全都被放棄了。有人告訴我說：Regge 是一個很有趣的人，當他聽說有人在複角動量平面上發現 cut 時，他說他不在乎，因為複角動量平面上的 Poles 已經使他得到了一個「鐵飯碗」— Professorship。現在還有少數一群所謂 “Polologist”（如 Regge, Froissart……諸人）在搞 Homology Theory（一種近世抽象代數，即「同調代數」主要應用在面的分類上，如 Sphere, Torus 等等。）希望把它應用到質點物理上面來。

目前流行的是利用對稱原理來研究質點物理，最成功的是 Y. Neeman 和 M. Gell-Mann 提出的 “SU symmetry”，又叫做 “The Eightfold Way”，這個根本上是群論，尤其是李氏群，在物理學上的應用。The Eightfold Way 最大的成就是在有系統的作強作用諸質點的分類如  $\pi$ - 介子核子等；（對 Leptons 如  $e, \mu, \nu$  不適用），導出粒子之間的質量規則，預言尚未被發現的質點，以及它的質量和其他性質，如 Isotropic Spin, strangeness ……等。我在前面說過，Charge Multiplets 如（ $\pi^{\pm}, \pi^0$ ）或（ $\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$ ）或（ $\Xi^0, \Xi^-$ ）……之間的質量差是由電磁作用的自作用能引起的，也可以認為是由電磁作用違背 Isotropic Spin Conservation Law 所引起的。同理，The Eight fold Way 認為相鄰的 Multiplets 之間的比較大的質量差（如  $\Sigma$  和  $\Xi$  之間的質量差）也是由強作用違背某種量子數不滅定律引起的。The Eightfold Way 裏面有 8 個不滅的量：Isotropic Spin 的 3 個分量，Hyper charge，以及另外 4 個未正式定名的量。由這個理論，日本物理學家 Okubo 導出質量規則。例如 N,  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$  這些質點之間的質量規則是：

$$\frac{1}{2}M_N + \frac{1}{2}M_{\Xi} = \frac{3}{4}M_{\Lambda} + \frac{1}{4}M_{\Sigma}$$

實際上，左邊等於  $1129M_{e^+}$ ，而右邊都是  $1135M_{e^+}$ ，所以也有小小的出入，不過一般來說這個理論與實驗很符合，它預言  $\Omega^-$ （ $I=0$ , Hypercharge $^{-2}$ ,  $M \cong 1676 \text{ Mev}$ ）的存在，幾個月前被證實了，這是一個很大的成功，現在有一個漸漸被大家接受的信念是說：強作用質點的數目的急速增加，只不過是表示 Energy State 的 Spectrum 的發現而已，沒有理由說這個 State 比那個 State 更基本，這些 Energy State 並沒有明顯的上限。

我講的偏重質點物理方面，因為它是近來物理思潮的主流，它的困難是遠超過一般人所能想像的。不只是實驗經費龐大得嚇人，而且理論難到實驗物理學家都不容易瞭解的地步。我懷疑粒子物理是否值得全世界極大部分的聰明才智都去花在它上面，諸位最好盡量把自己的興趣拓展得廣一點，將來這條路走不通還可以走那條路，而不至於陷入進退維谷的境界。

\* E. Fermi 一生很少用解析方法，因為常常用應用數學的方法可以很快地解出來，有一次一大群物理學家在討論一很繁的函數，Fermi 看了過數小時以後他算出這函數在四點之值用曲線連接起來，就知道它的特性，這時這群物理學家尚未能決定這函數是否存在。

\*\* 在水力學方面我們只能計算與線流（Laminar flow）有關的流體特性，但在一切應用上我們必須要知道渦流（Turbulent Flow）的流體特性，這在目前還無法做到。

\* 這 Airy 就是有名的 Airy function 的 Airy.

