

當然，還有一些實際的問題待解，我們知道許多關於噪音及其控制，但我們尚未造出一隻大齒來除去我們周遭的噪音，這實在是對聲學的一大挑戰。

之於探討非完美晶性 (imperfect crystallinity) 了。

那麼我們這一代是不是能繼承前人的衣鉢，並予以發揚光大呢？我想只有兩個具有革命性的觀念在我們這一代發芽和結果。第一個是「準粒子」(quasi-particle) 觀念。我們知道，任何固體的「實際」粒子——指原子核和電子——永遠在不斷地交互作用著，此作用強烈到足以把二者本身的個別特性融於羣體。有時，此描述誠然真確，譬如在晶格波和離子體振盪 (plasma cscillation) 的情形下；但有時却要反其道而行之，把金屬中部份粒子的行動視為完全獨立，各具運動和電力的性質，才能解釋固體的行為，此時我們就得把這些粒子比擬作平時耳聞目見的質點了。這些觀點為一些前鋒物理學家神秘地猜測出來，他們假定金屬內部充滿自由電子，而終於能很成功地討論金屬的性質。同時利用多體問題，它本身奠基於量子場論的處理方式，已能推導，證明此種想法；並且甚至於能予以定量的處理。使這當初被目為悖謬的逆子而今名份確立。

另方面有關「假位」(pseudopotential) 的見解雖不深入，但事實證明極有用處。因為有一個很難解決的大問題便是如何把電子由晶體晶格的離子場中退耦 (decouple) 出來；強勢之外必為弱性。人們發現用來計算電子結構的代數可重新轉用於求金屬和半導體 (semiconductor) 的電力和運動性質，這方法非常簡便而不必詳細了解離子的排列情形；因此，原有的問題便無形消失。雖然就數學分析而言，此觀念的基礎並不十分穩固，但亦不足以因此而棄置不用。

在實驗技術方面自也有如足的進步。早先隱藏在晦澀的理論性論文之後的一些數學假定，如今已陰霾盡消，由其而導出的物理定論，已是實驗室中的日常用語。而今我們整日與能元、載子 (carrier)、磁子 (magnon)、激子 (exciton)，錯位 (dislocation)，jogs 及 stacking fault 等為伍，並且發展某些技術以分離、純化，甚至用肉眼去觀察它們。或許也有一些早先的新奇觀念現在已成為一般物理學家的「直覺」了。誰也不曉得像超流體 (super fluid) 中的「通量量子化」(flux quantization) 這種簡單觀念；或者像「斷折對稱」(broken symmetry) 這心智的結晶，會不會有朝一日由禁錮而成為雅俗共賞呢？同時我們也無從確知目前高階層知識份子的用語如格臨函數 (Green's function) 及圖式級數 (diagrammatic series) 它們

能對許多簡單的觀點提供解析性的證明，是否也註定要取代咱們的老朋友薛定諤方程式 (Schroedinger equation) 而為固態這門的常用語呢？這種趨勢常如「水之就下，沛然莫之能禦」，誰也無從干預。引一句 marcel proust 的話「貝多芬四重奏曲的本身，在半個世紀中造出了一個被它們風靡的羣衆，並使這個羣衆日益擴大。這樣，像每一件偉大的藝術作品一樣，即使不論其藝術成就，它們至少標明了智識社會又向前挺進一步。而這個智識社會並非由貝多芬四重奏曲出現當時的人所組成，而是由今日能欣賞這些作品的人們所組成」。

在我們這一代中，一切顯示「固態物理」有很多條路，可供身手矯健的人兒開拓建設；但是正像在酒席桌旁大快朵頤的老饕們，在酒酣耳熱之際，忽略了蓬廬瓦牖之戶，他們沒把才智用在實用性的知識上。我的意思是說，直到如今，搞理論的固態物理學家僅只像是一些罕見的鳥族，他們只被迫跟他們搞實驗的同伴們交換意見。遠離了旁人，也偏離了科學的真宗旨。

就另方面來說，有很多問題仍非只用數學作迅速地演算所可解決的。有關此門科學的探討，目前僅止於獲得一些合宜的近似結果，對於在某種情形下，是否能藉著一系列的運算而準確的用數字表示出幾何特性，力、場及波動函數一事，成就不大。

### 不是希臘，而是羅馬

即若這二十年不是心智上的革命時期，也是一段工藝上突飛猛晉的時代。自大戰以來，為數極多的嶄新實驗和觀察的方法已經發展成熟，而使我們有關固態物理方面的知識大大地增進了。

譬如說，大量生產液態氦已使低溫物理由僅限於少數實驗室中，具備特殊技術的人的專利；演進到這類低溫研究已成為一般實驗室均可從事了。

在極低溫下，熱振動靜止，探討這種簡單而極端情況下物質的性質，將有助於我們對物理性的了解。

同時我們也能消除外來的干擾而製出非常純和完美的結晶體。晶體長成 (crystal growth) 的新技術，如帶形精鍊 (zone refining)，或由熔融液中「拉」出晶體的技巧，最先因鍺、矽等半導體裝置製作的需要而發展；但這些技術也大大地使固態物理學家的態度改觀，因為如此可使得某些現象易於觀察，否則觀察將為不可能，因微小粒體中由雜質和缺陷所導致的電子和能元的散射將使一切均顯得朦朧不清。

電子顯微鏡的發明促使晶體缺陷的研究為之一新。直到1950年代錯位 (dislocation) 還不過是一個由理論家所假想出來以解釋可塑性 (plasticity) 的量。現在居然能夠目睹它們的產生、活動、推擠、堆積以及排列起來。因此本為實驗的冶金術反成為研究的第一法則。

大戰中所發展的微波雷達術也深深影響了固態物理學在一個共振空洞 (cavity) 中的強磁場提供了一個理想場所來，固體中原子核及電子的自旋 (spin) 和旋轉 (orbital motion) 被激發的情形從這可以測得一些複雜而不易解釋的現象。起初，微波雷達術僅用於隔離中的原子核，比如說帶有大量結晶水的晶體的原子。現在我們卻能夠激發整個晶體，使得準粒子 (quasi-particle) 如電子、空穴 (holes) 及磁子 (magnons) 產生共振。

最後我要談到中子非彈性繞射的技術。藉著熱中子的繞射我們可以窺知晶體中原子的動態 (dynamic) 現象。只要花上充份的時間仔細測量，我們可以分析晶體的每種波譜 (lattice spectrum) 以及其中磁場和自旋波的複雜分佈。五十年前的一個夢想——有一天人類能藉著晶體振動發現原子間的作用力——今日即將成為可能。

傳統實驗技術的改良也開闢了幾個新園地。例如準確度與靈敏度的提高革新了紅外線光譜術、量熱術 (calorimetry) 及 X 光繞射術。但是在另一方面却使得正統的固態實驗更加昂貴。雖然，只有熱中子的繞射實驗需要巨大經費，但是要從一般固態實驗中得到可靠的結果還是要花 \$ 10,000 左右的錢。更不幸的是，兩個花費較廉的實驗 (正子的 annihilation 和 Mössbauer 效應) 却難以對晶體作定量的分析。有待探索和理解的現象，仍有無限。比方說，我們凍結一杯水，對所見每一件現象就不能完全了然。

### 被征服的聖母峯

憑著這些新的理論和實驗技巧，我們究竟走到了那一步？無疑地，超導體的解釋是這個新紀元中最重要的發現。半世紀前，超導體還是人們研究中的一個神秘現象。在年代末期，一些巨觀 (macroscopic) 性質，如排斥磁場的通過，臨界溫度隨磁場的變化，和中間態 (intermediate state) 的性質，均為人們所熟知。戰後冷凍技術和微波光譜術的改進解釋了一些微妙的性質，但是基本的理論仍未確立。最重要的一步還是在於人們把理論建立在電子和能元的相互作用上。而最後由於氧的研究，超導體的發展始竟全功：利用我們可以描述能元和電

子相互作用下多體系統的量子狀態，而這狀態相當於能量小於準粒子激動態的一個凝相 (condensed state) 稱為超流體 (superfluid)

由於這項成功的發現，超導體在過去二十年來成為固態物理的寵兒。許多新的現象，例如通量的量子化，連貫的能位穿越及第二類型的超導性先後被發現。而週期表上的每個元素也被一一試驗，是否具有超導性。這方面的進展如此神速，因此我有時也不敢確定我們對超導體的了解多，而是對「正常」導體的了解多。根據一項合理的界定，極低溫下液態氦的超流體性是列入固態物理學中的，現在這方面的性質大半可以解釋，儘管定量的分析並非易事。

一個全然未曾預料的發現是超導體在磁場強度大於十萬奧斯特時電阻依然為零。利用這類物質製造泡沫室的強力磁鐵，流性磁的實驗裝置 (magneto hydro dynamic rigs)，熱核子反應爐等，已在開始之中。凡是對科學的潛能深具信心的人，不論其偏重純理論與否，對於這次成功都會欣喜的。於是大家的注意力集中於尋找在常溫下依然具有超導性的物體。自然這是值得一試的，只要我們不要過早地驚呼成功。

### 製造較好的捕鼠機

神秘的超導性只能在極端的情形下顯出；而半導體却非常普遍，它的原理已為人所熟知，因此研究的情形就沒有如此熱烈。直到一篇獲諾貝爾獎的著作解釋了電荷的少數負載物 (minority carrier)，P-n 接頭 (junctions) 等作用時，半導體才引起人們的注意。這個英雄式的成就恰巧發生在固態物理的新紀元初期。它也是大量開支 (人力或物力) 的主要原因之一。

當然在這兒無需強調那些熟練固態電子學者的驚人手藝；他們可將駱駝般大小的電子計算機縮小到針孔那麼小；他們可用細小的半導體，鐵氧磁物 (ferrite) (分子式為  $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , M 為二價金屬)，鐵電的 (ferroelectric) 或超導體來測量和產生聲、光、熱、電；他們的儀器在使用上精確，具有彈性，而且不斷地改良。這是固態物理的新頁，如日中升，其前途未可限量。

甚至我們對於基本物理現象的了解也隨著技術的革新而有所增加。要想造一個 carrier phonon、磁子、光子等之間的作用滿足我們需要的理想介質，我們必須道知電子能帶結構、晶體波譜、流動性 (mobility) 錯位密度、雜質能位等等知識。無

疑地關於這方面的努力揭開了許多新的物理現象，釋清許多含糊的觀念，更激發了新的實驗技巧，而且達到了以往所欠缺的精確度。實用的半導體裝置多經特殊設計，因而對我們的微觀的固態物理理論並無大助，但這些在工廠中大量生產出的裝置全靠一些基本的參數以發生作用，這使我們確信，只要細心觀察，從這些裝置中也能看出一些有用的固態物理現象來。一個追求純學術的人士居然能見到他的心血結晶能與生產和實用的實際社會息息相關，當然要興奮萬分了。

## 作 圖

低溫微波光譜術、完美結晶以及假位 (Pseudo potential) 等為另一項研究 (金屬的 Fermi 面) 帶來了生機。如我早先所述者，以等能面 (在動能空間中 momentum space) 表示金屬的電性的想法可遠溯至1930年，但是從直接觀測計算能面始終不成功。困難之處是在於這些計算不可往回驗算錯差與忽略之處，此乃因為導出的可觀測量往往只是一些簡單的純量或張量，例如電導係數或赫爾常數 (Hall constant)。戰前的觀測中，唯一能提供足夠資料以計算費爾米能面的是，某些金屬的單晶體在極低溫下的磁阻 (magnetoresistance)。

然而到了1950年代，人們却發現一些其他現象，它們完全決定於費爾米能面的幾何構造。在這些新方法中，反常表面效應 (anomalous skin effect) 可「測」出一個平均曲率，de Haas-van Alphen 效應可「測」出截面積，而磁聲 (magnetoacoustic) 效應可「測」出一個「直徑」等等。因此關於這個假想中的數學平面，我們可經由一連串的實驗，繪出整個圖來，而金屬的電性更由此一目了然。

第一幅完全的費爾米能面的形成狀事實上是非常古怪的。甚至最聰明的理論物理學家也不知它代表些什麼。同時它也提醒了我們，有些關於晶體電子應該知道的性質已被忘懷。多層相聯的 (multiply connected) 費爾米能面已不是新鮮事情，只是我們想像的能力尚未達到這個地步。

如果假位的觀念不予解決，實驗數據只會不斷地增加，到達飽和而不會有可觀的結果。一般金屬的費爾米能面已經證實和自由電子者相似。今日費爾米能面的繪製已成為例行的工作，同時可研究的金屬愈來愈少。這種局面，和固態物理其他研究技術的日異更新相比之下，真是淒慘。不過，目前我們只研究過純粹完全的晶體的費爾能階 (在低溫下)。在合金，無定形固體上，利用光學、X 光和激發光

子的方法去研究其電子能階方面仍有廣大的園地。

也許我們由此得到一個教訓：在忙著計算時不妨停下和實驗結果相印證。在固態物理的這一部門，我們相信「在基本上」已經了解所有的現象，而目前在進行定量預測之前，技術上還有極大的困難尚待克服。

非完美晶體 (imperfection) 的研究仍停留在原始階段。錯位現象可解釋晶體的脆弱性質。四十年前它曾被認為是晶體生長 (crystal growth) 的主因。但是由於觀察儀器的缺乏，我們只可猜測當晶體發生彈性變形、拉斷、變硬、磨裂時可能發生的事情。錯位如何產生，如何增加，移動的速度多快，相互之間的作用如何，與雜質、空位、原子，grain boundary 以及其他晶體缺陷間的關係又如何呢？有些聰明的假設提了出來，但是純粹基於想像中的結構和作用的理論也帶來了過度自信的謬誤。

利用電子顯微鏡直接觀察錯位的新方法結束這段揣度時期。在另一方面，它也顯示出這個現象的實際複雜性。利用一張草稿紙，我們就可算出應變 (strain) 和應力 (stress) 間的關係，然而可也沒有誰能夠分析電子顯微鏡上所看到的一幅有關鋼片的圖，圖上盡是些像虫子蠕動一樣的東西。在這方面，就和輻射損害的研究一樣，我們必須一步步的前進，耐心地建立起一整體的知識，決不可期待於某一個重大發現 (雖然 focusing collision 的現象是一個有趣的例外。)

幸虧有龐大的經費支持著這些研究。天知道去研究反應器中石墨的性質值得花費多少錢，然而只要肯投下資本，即使是堅如金石的難題，也會迎刃而解的。我們可能就在另一次工業革命的邊緣。接著的四十年可稱為「物性科學」時代。紡織品、合金，和陶磁器將改觀整個工業技術，將可和固態物理對電機、電子工業革新的影響等量齊觀。

## 未竟之業

我已討論過固態物理學的主要成就，我也談到其他相關的題目，如磁性、離子晶體、表面層及薄層 (thin films)，離子體波型 (plasma mode)，以及有秩序一無秩序 (order-disorder) 等現象。這類問題的發展已超過了廿年前人們所能體認的程度。但是自滿是人類易犯的通病，所以我們應注意還有些尚未解決的「頑固」問題。

例如金屬的鐵磁性理論從大戰以來仍無進展。雖然投入了許多努力，加入了新的假設，得到了一

些式子，但是要想解釋，鐵中的層電子，一方面自由運動以造成能帶（energy band）一方面又得束縛於原子核周圍以產生強的自旋，仍無良策可循。

關於金屬的結能（cohesive energy）目前只算到週期表前面的一列元素。問題的關鍵是在於我們離子本身的化性了解不多。至於合金的熱學性質，完全在目前所能研究範圍之外。人們發現銅和錫融成青銅已有數千年的歷史，但是為什麼銅和錫可以這樣作成合金呢？

融熔現象和液態也還未曾定量的分析過。我們沒有足夠的能力來描述像玻璃、陶器等無定形物體的結構」。我們不是以「局部規則」（local order

）巧飾過去，便是建立N個質點相互間作用函數（correlation function）的層系（hierarchy）而希望獲得最佳的結論。這種「統計幾何學」即使在純數學家的眼底，可能也會覺得十分可笑。

就是一些幾近完美晶體的性質還是不能從基本原理中定量地導出二氯化鈉的熱導係數，銅的電導係數和熱電效應，鉛的超導性的臨界溫度，汞的凝固點，鈉金屬中空位的擴散係數。也許有人可從戰前印出的書中查到計算某些性質的「妙方」，但是我們還在等待一位能處理各種成份的「大廚師」。也許帶著希望前進比抵達終點更好些。

## 系 友 來 鴻

收集了幾封信，摘要的刊登在下面，有些是系主任、楊乃川同學、周馨同學提供的，對學長們對母系的關心，首先表示由衷的謝意，並盼望在下一期能收到更多的信與『美援』。

▽      ▽      ▽      ▽

黃主任鈞鑒：

生已於本月一日順利抵達此間，MSU校園極大，學生有四萬人，中國同學大約三百人，是美國北部一個很大的學校。本系成立不久，是一個 graduate Dept 教授有七位，學生大約有二十位，另外 Postdoctor 很多，大約有十五位，外國人很多，來自法國、埃及、捷克、印度、中國、德國、希臘，簡直就是一個 international center 大家說起英文來，半猜半懂難免比手劃腳，十分有趣。本系十分有錢，所有的學生都有 ship，設備和 research program 都很吸引人。因 Biophysics 是一個很新的 subject，所以每一個學生在 undergraduate 時，很難有機會 take 這方面 course，一旦進入本系後，都需補充基本課程，在這方面美國學生比較佔便宜，因為他們在 under 時，學的比較廣博，進研究所以後要補的課就少得很多，我這個台大物理系的學生只唸過普通化學，其它有機、物化、生理方面的課，從未唸過，當然比較痛苦，這個學期選的全是化學，一門有機、一門物化，明年還要修生化和生理，甚至遺傳和微生物也需要，到是物理課唸得過了頭。這裏對物理的要求只有力學、近物、量力（或量子化學）熱力學，所以我建議系

裏同學有志讀 biophy 不妨在三年選有機、四年級選生化、物化、另加一門生理方面的課。當然物理讀得越多越好，因為 biophysics 到底是物理。

在本系唸 Ph. D.，沒有最低學分要求，也不須外國語，最奇怪的是沒有 qualify 考試，學生只要 research 作得好就可求得 degree，非常自由，壓力也很小，但是如果 researcher 作得不好，不管修課成績再高，也沒有用，這是此地作風我以為很有道理。

系裏同學，如果需要我供給 information，我一定盡力幫忙，我的地址是 Mr. Leaf Huang 232 Haslett st East Lausung mich 48823 或者寄到系裏也可以，系裏諸師長，併此請安。祝愉快

生黃力夫上 12.9

△      △      △

黃主任、各位老師：

時間過得真快，來到美國一轉眼已一個半月，因為我英文不行，須唸一種英文，所以我只選兩門課，學分卻已夠算 Fulltime 學生，一門是量力由 Prof Feinberg 教，用的是 Grottfried 著的另一門是 Electromagnetic Theory 老師是 Prof Tryson 用的是 Jackson 的。哥大中國同學非常多，若把土生土長及大學部都算進去據說有四百多人，研究生今年便有十位之多，台大物理系已佔了五位，課餘討論問題都跟自己同學討論，一點也不覺得是到了外國。教授從不點名，學生也很多時常遲出的，只不過教室只有前門，沒有後門，所以只有遲到的學生，