

這些問題的解答。許多問題仍將懸而未決——每一步新的發展所帶來的新問題的總是比它所解決的舊問題多，這也就是一個健康進步的研究領域的象徵。

主要的新儀器現在才開始應用在世界各地的研究中心裏；新的儀器產生的數據約較以前精確了兩個數量級(two order)，重大的進步是可以預期的。

原子核的作為一個微型實驗室以研究基本物

理的功用，最近才為人們所體認，將來這方面的工作一定會做得更多，而且更精緻。

許多設計來供原子核研究用的超高能量的電子和質子加速器的出現，將為原子核物理開啓一扇明窗，提供一連串空前的探測工具。我們研究原子核多體問題的工作已經上軌道了，然而未來二十年裏仍有著漫長的途徑待我們去達成。（取材自 Physics Today, 29-36, 5, 1968）

等離子體物理學 PLASMAS

離態物理之受到重視是近二十年來的事，在此以前，人類並未將它列為正統物理的一部份。離態物理起源於對氣體放電現象之研究，不外乎游離、激發、再組合及一些有關原子碰撞的問題。直到 Irving Langmuir 發現離態物體中的靜電振動現象之後，離態物理才開始走上一段新的里程。據 Langmuir 的解釋，靜電振動係粒子的集體運動(Collective motion)所造成。離態粒子的集體運動產生與電場或磁場的交互作用，這是離態與一般流體最大的區別。

早期的離態物理研究者主要是天文物理學家與地球物理學家。一九三〇年代，Edward Appleton 藉對游離層的研究，確立電磁波在離態物質中傳佈的性質。其後 Sydney Chapman 和 Vincenzo Ferraro 又提出離子流與地磁交互作用的理論。1934年 Willard Bennett 又預測(pinch effect)的存在，這是25年以後多數實驗家競相探究的問題。1941年 Hannes Alfvén 的「Cosmical Electrodynamics」才對波的性質作了最完善的敘述。離子體的動力論可能開始得更早，1934年 Lev Landau 導出 collision integral 的近似公式即 Fokker - Plank approximation。隨後 Chapman 與 Thomas Cowling 的「The Mathematical Theory of Nonuniform Gasses」證明 Boltzmann Equation 可適用於離態物質。1945~1946年，Landau 與 A. A. Vlasov 分別提出不考慮碰撞的 Boltzmann equation，雖然此方程式欠缺嚴謹的證明，但卻是離態物理發展中不可或缺的基礎。

1950年，有人提出利用熱離子體與磁場交互作用以達成可控制的熔合反應的可能性，使離子物理的研究大受激勵。數年之後，科學家又發現太陽產生的等離子體對星際太空的重要影響。於是這一方面的研究更受到廣泛的重視。

等離子體理論

在本質上，離態物理是一種多體問題，其中的基本交互作用早已為人類所知，而且量子效應亦可忽略。故統計力學原可很輕易的應用於離態系統。但是因為離態的交互作用力可伸展到很長的距離，所以就有許多種型式的集體運動可能發生，便使問題顯得較為複雜。但過去十年中，經由多體問題的研究已經導出一種略加修改的 Boltzmann equation，亦即前述之 Fokker - Plank equation。此方程式再加上馬克士威方程式可以總括離態的一切性質，因此離態物理的動力學是建立在一個六度空間上。此外尚有兩個很適切的假說可以使問題更為簡化。假如 characteristic distance 大於 Debye length

$$\left(\frac{1}{r_a^2} = \sum_a \frac{4\pi e_a^2 n_a}{K T_a} \quad n: \text{密度} \quad T: \text{溫度} \right)$$

振動頻率小於 $(4\pi e^2 n/m)^{1/2}$ 則任何運動皆必須維持 quasineutrality。假如距離大於 gyro-radius，頻率小於 gyrofrequency，則 Boltzmann equation 可以用 guiding center approximation 處理。用這種近似方法能決定在何種情況之下，流體理論可以適用。並且也預測了低頻率 drift wave 存在，後者已有實驗予以證實。

Guiding Center Approximation 大致是：粒子在磁場中穿過時，它的 drift 爲 $\vec{E} \times \vec{B} / B^2$ ，這是磁力綫本身的速度。因此 $\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = 0$ 。在運動坐標中電場爲零。同時粒子因受到平行於 \vec{B} 的電場分量的推動而加速。假如沒有這種平行於 \vec{B} 的運動，它們就會緊伴着磁力綫而運動，故離子與磁場結合在一起。這是無限傳導度流體理論最顯著的特性。在另一方面，當波在磁力綫方向的相速 (phase velocity) 小於粒子的速度時，這些橫向運動的平均效應爲零，對於電子來說，磁力綫不再能強有力的限制住它，在此種情況下，drift wave 就會發生。

用 Guiding Center Approximation 以研究低頻波與一些不穩定現象 (instability)，但是頻率增高時，characteristic distance 較短，位置、形狀諸方面的影響較少，各方向異性 (anisotropic) 往往是造成不穩定之主要因素。

物理學家對綫性化波已有相當充足的知識，但是對較複雜而且常常具有決定性影響的非綫性因素的探討即尚待努力。這方面的研究很類似古典的 Navier-Stokes turbulence。乍看之下，這似乎是很棘手的問題，必須考慮許多種類的波的非綫性交作用，並且涉及粒子在六度空間的分佈情形。幸好物理現象有許多必須遵守的規則 (例如 Liouville's theorem, adiabatic invariant 等)。fully turbulent motion 不致發生，在振幅小時還可能出現穩定狀態。目前，這種弱擾動 (weak turbulence) 是理論家的主要探討對象之一，目的在找尋一種相當穩定而又能限制在一個區域中的等離子體以供熱核子研究。

等離子體之實驗

在 1948 以後的十年中，美英俄等國都開始做離態物理各部門的研究工作。簡單的流體理論曾被用以處理 dynamics of pinches，及不穩定現象，並試圖製造一種 toroidal pinch 形狀生存期長而穩定的等離子體，因而發明 toroidal magnetic bottles (stellarators tokamaks，實驗家證明用 magnetic mirror 可以有效的控制 (confinement) 熱離子體，促成 plasma heating, plasma accelerator, rotating plasma, collisional plasma shocks 的發展。用以作流體性質實驗的等離子體溫度約 $10^4 \sim 10^7$ °K，密度約 $10^{14} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，其產生主要是用加熱與磁壓縮的方法。藉助可見光，紫外光及 x-ray 的光譜儀或

微波干涉儀可以準確的偵測等離子體的性質。

1958 年日內瓦會議之後，國際合作研究熱核子 controlled fusion 開始實施。

關於熱離子體 (hot plasma) 的研究工作，進步最大的是 mirror machines。很早以前，科學家已能使單一粒子侷限在一個構造複雜的磁場中，這也符合 adiabatic invariance 的規則。但是當高溫 ($10^7 \sim 10^9$ °K) 離子束射入磁場中，密度達到 $10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 時，高頻率的不穩定現象開始呈現，導致 velocity-space diffusion。關於 velocity-space stability 的研究因 mirror machine 中 fluidlike instability 的存在而受阻，藉助 minimum B magnetic field shaping 才使之消除。其後發現在磁場中的中性原子束有 Lorentz association 現象，人們才發展出一種可以控制高能離子的方法。在理論方面，高頻模式 (high-frequency mode) 的光譜已經研究完成，原先的 infinite medium 的理論已加以推廣以研究有限範圍的效應，其結果與實驗結果十分符合。關於有限等離子體流體性質的知識也大爲拓展，包括許多複雜的動力問題。往日用以探討不穩定現象的無限傳導度流體理論首先由實驗結果予以否定，新的理論 (Finite-resistivity stability theory) 應運而生。不久 gyroviscous effect 理論出現，並由實驗得到證明，由此導致 drift wave 及 temperature-gradient instability 的重大發現。

目前許多基本的離態實驗可以採用簡單的綫型容器而不必在複雜磁場構成的容器中進行。碱金屬等離子體 (Q machines) 已被利用以造成 drift wave 及 ion acoustic wave。同時在密度低的穩定氫等離子體中所產生的波也被用以證明 Landau damping 及 wave echo 的存在。太空中有 collisionless shock 的理論也在實驗室裡的 Theta pinch 中予以證實。由連貫的快速穩定的電子環所形成的離態狀特已經造成，不過要想形成 controlled fusion 的封密磁瓶 (magnetic bottles) 還有一段距離。雷射技術在離態物理中也佔有相當重的份量，通常多用在偵測技術 (interferometer, Faraday rotation 及 Thomson scattering) 與在高能離子體中造成 point source。

太空等離子體

過去 20 年中，離態物理在太空物理及天文

物理中，一直擔任日形重要的角色。1958年，美國第一艘太空船「Explorer X」攜帶儀器的探測地球外圍受地磁的 magnetic mirror affect 限制住的高能粒子，這些粒子沿著地磁場來回振動，在靠近地球時因地磁增強而折回，並因各處磁場之不均勻及地球之轉動而在地球周圍漂移。利用 adiabatic invariance 的原理有助於瞭解這些粒子的運動。在1960年代早期，人造衛星發現太陽不斷的放射高速離子體（即太陽風）。其實更早以前，科學家由日冠(sun's corona)的平衡原理以解釋彗星尾的成因時已預言太陽風之存在。因為太陽風有高度傳導性，不能穿過地磁場，只能在地球四周流動，因此產生 magnetosphere (geomagnetic cavity)，即是我們所發現的 Van Allen 輻射帶。geomagnetic cavity 的邊界在1961年已經完全測定，它對於太陽的形狀及位置也吻合太陽風壓與磁壓平衡的原理。1965年「Imp I」衛星發現 geomagnetic cavity 在反太陽方向形成一個圓柱狀的磁尾，延伸至數百倍地

球半徑之遠。在磁尾之中，磁場平行於圓柱，北半部與南半部的方向不同，交界處形成一個中和地帶。在此區域中的離子體不穩定現象與極光 (aurora) 與磁風暴(magnetic storm)有關，至於磁尾的成因現仍無定論。

太陽風是無碰撞的離子體，1964年「Imp I」在地球外圍發現首次 stand off shock，其後「mariner probes」再度發現 collisionless shock。這是理論上的一大勝利。太陽風中含有 photo sphere 放射出的弱磁場。由於太陽的轉動及太陽風的前進，磁力綫也被扭曲成螺旋(Archimedean spiral)。其與太陽地球之連綫交成 45° 。磁力綫的方向與 photo sphere 中對應區域的 polarity 有關，這顯示磁場是由有傳導性的流體造成。

以上是過去二十年間等離子體物理發展的概況。人類在這個領域中的知識已經相當豐富。假如今後二十年中仍能够像過去一樣有所斬獲則人類對離態物理的瞭解將更趨完善。

晶體結構學

二十年來，晶體結構學(Structure Crystallography)在物理、化學和生物學上的影響已今非昔比。在一九三〇年代末之前，晶體結構學為很多固態現象的解釋奠立了基礎，因為它對序列規則性的簡單分子和結晶構造能够提供詳盡的知識，二十年前化學家們，更不用提生物學家了，在探求一個複雜的結構時，不會來找結晶學家。那時，雖然人們也研究清楚了一些物的結構，有些還相當複雜，然而就一般而言，進展很慢，不確定，並且困難重重。在那時候物理學家和化學家、生物學家間的溝通聯繫還不密切，以致物質的結構始終並未解決，在過去的歲月中，這三門科學的間距要遠比現在長。有關過去 X 光繞射以及個人經驗發展的歷史可見 P. P. Ewald 的 Fifty Years of X-Ray Diffraction, Utrecht 1962。

晶體結構學的發展

步驟或結果	1948	1968
如何選擇問題	不確定。在很多彼此相關的複雜結構中，找一個具最簡單晶體的來研究。	遇彼此有關的晶體，不大再去逐一檢視了。
晶胞單元的決定	照相	仍然用照相

底下的表將過去二十年來結構的發展作一摘要。很明顯可看出對於複雜結構的發現不論就速度上，就正確性而言，都要比1948年進步多了。誠然，在過去的二十年中，用快速數值計算機來改進晶體結構學的工作效率，是此門科學得以迅速進展的主因。

計算機的應用

在這方面所需的計算均是極度重複並耗時的。要解決相位(phase)問題的主要工具——三度的派特森(Patterson)函數仍被運用著，它是含有幾千項的三度傅里葉和(Fourier Summation)，而且要在60,000—100,000點上得出此函數的值(見Physics Today, January 1965, 第28