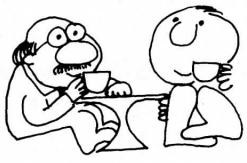
固体物理 35, 451-462 (2000)

サロン



# Nevill Mottの物理と固体物理のこれから

東京大学大学院理学系研究科　青木秀夫

## 1　はじめに

Sir Nevill Mottが亡くなってからもう4年たつ．彼は，いわば固体物理学の祖の一人であり，多くの人が巨星墜つと感じたであろう．このあたりで彼の物理を振り返るのも，足跡を偲ぶというだけでなく20世紀の固体物理のケーススタディーを通して21世紀の展望を探るよすがになろう．本「固体物理」誌でも「これからの固体物理」というシリーズが走っているが，このような趣旨で，Mottの仕事を縦糸に，私の個人的な思い出を横糸に綴ってみたい．主にモットの自伝'*A Life in Science*'[1]に基づいた彼の生涯の概略(文中「……という」,「……の由」というのはこの本からの引用である)と業績を眺めながら，最後に展望を試みてみたい．

Mottについては十数年前の本誌に上村氏が随筆を記している[2]．そして1996年8月8日にはMottが90歳で亡くなった．本誌でも森垣氏[3]により，物理学会誌でも上村氏[4]により追悼がなされた．その前年の1995年にはPeierlsがやはり88歳という高齢で亡くなり，Mottによる追悼文がNatureに現れており[5]，輪廻を感じさせる．この追悼の最後の方に触れられているように，Peierlsが最後に書いた論文の一つは「Mott or Peierls?」と題されており，酸化バナジウムにおける金属·非金属転移を論じたものであった．

Mottの生きた時代(1905–1996)は，量子力学の勃興期に始まり，固体物理学がモダンな意味で創り出された時期といえるが，彼の果たした役割は，単に固体物理の創成の重要メンバーというだけでなく，いかに固体物理学が素粒子·原子核物理学に優るとも劣らない面白さをもっているかを，実証した点にあるといえよう．その事始めについて，彼は自伝の前書きで，自分の生きた時代は科学の''heroic''な時代であった，という文章で始めている．Rutherfordによって，原子は原子核と電子からなることが発見され，これらが巨視的な数だけ集まったときに，何が起きるか，というのが真剣に問われ始めた時代である．(広い意味での)原子核物理学の発生と世の中への重大な関わりを描いた本には，Segrèの本[6]やPaisの一連の著作[7]があるが，Mottが強調するのは，固体物理学も純粋科学として独自の面白さをもつのは云うまでもないだけでなく，マイクロエレクトロニクスなどを通して世の中と関わるという点でも重大なものをもっている，という点である．Mottの自伝は，このような背景の元に，今世紀初頭に始まる物語である．

## 2　生涯と業績

自伝の冒頭は，「私は物理学というものがどういうものであるかを知った瞬間から，物理学者になろうと決心した」という胸のすく文章で始まる．学問の面白さを手取り足取りして教えてもらわねば良くわからない，という近頃ありがちな若い方には煎じて飲ませたい文章である．両親ともに英国Cavendish研究所(Cambridge大学物理学科)[8]で働いていた，という学問的な家系に生まれたという．Mottの両親の頃は1902年，時あたかも電子を発見[9]して数年後のJ. J. Thomsonの元で研究していたわけである．ちなみに，原子の構成員たる原子核，中性子，電子のすべては

Cavendish 研究所で発見されているから，この研究所は固体物理学の原材料の発見の地ともいえる．この両親から，科学がいかにエキサイティングで重要かを子供の頃から伝えられたという．父親は，世界史で教えるところのフランスのユグノーの子孫であり，Mott もフランスの de la Motte 伯爵から突然「お宅は儂の親戚か？」という手紙をもらって驚いた由である．Mott の父親は，Newton で有名なケンブリッジのトリニティー・カレッジを卒業後，Cavendish に来たという．母親の方は，女性を受け入れることで著名な Newnham カレッジで数学を専攻した後，物理に転向し Thomson の研究室に入ったという．Cavendish 研究所では，毎年度初めに全員の写真をとる習慣があり，それがロビー(DNA 二重螺旋の模型などが置かれている)の壁に貼ってある．この1903/1904年(Mott の生まれる前年)の版に両親が写っている．Thomson 先生は二人の女性研究者と並び両手に花(だが気難しい顔を崩していない)．この母親は，祖先に北極探検家をもつなど，仲々の傑物らしく，婦人参政権，養子制度，ナチの時代の亡命者の保護，など社会運動にも熱心だったという．Mott も，私の両親は of highest moral standards と賛嘆している．

学校は，パブリック・スクールの中でも理科系に強いという所に行ったという．イギリスのパブリック・スクールについては多くが語られている．イギリスの上層部の人々の青年期の形成を，良きにつけ悪しきにつけ規定しているようだが，今はそれを論じる場ではない．大学は1924年にケンブリッジの St. John's カレッジに奨学金を得て入り，数学を専攻した．Mott の両親は科学者には結局ならなかったが教育には関心が高く，Mott はこの後大学，研究の様子をこと細かに両親への手紙で伝えた由であり，自伝の源の一つとなっている．ケンブリッジのカレッジの常として St. John's も立派な礼拝堂をもっており，Mott もここでの英国国教会の礼拝を大切にするようになった由．この礼拝堂では，私もエキストラとしてパーセルの「聖チェチーリアのための頌歌」を歌ったことがあるが，重厚なチャペルである．英国国教会というのは，ヘンリー八世が離婚するためにローマ法王と手を切って作った，という不純な起源をもつが，基本的にはカトリックである．ただし，ヘンリー八世は，Oxford の Christ Church(カレッジ)を創設するなど学問には理解があったようである．

Mott の Cambridge に対する印象は，complete and absolute freedom．そして，最初の指導教官というものはしばしば人生を決めるものであるが，Mott の最初の指導教官になったのは(後の Sir) Harold Jeffreys という．彼は有名な地球物理学者(たとえば地震の p 波，s 波の解析を最初にやった)として知られているが，数学にも強く，'*Method of Mathematical Physics*' の本は最近ですら新版が出ている[10]．偶然だが，私は Sir Harold の夫人を知っており，今や97歳という高齢にもかかわらずお元気である[11]．この夫人の正式な称号は Lady and Dame Jeffreys といい，彼女は自身数学者であり Dame(ナイト(Sir)の称号の女性版)を叙勲されていると共に，夫が Sir であるために Lady という称号も同時にもつ，という珍しいご婦人である．ところが，Harold 先生の方は指導教官としては最悪だったようで，指導の時間になると，「質問はないですか，ない？　じゃ今日は終わりにしましょう」というのが定番であったという．次に指導した Cunningham に放った Mott の最初の質問は，「なぜ金属では電子が流れる(Mott の父の世代に担体が電子であることは既に知られていた)のに，絶縁体では渋滞しているんですか」というのに対して，「実はそれは未だに分かっていないんですよ」というのが答だったという．これに対し Mott は「何が未知かを知るのは嬉しかった」と反応している．後に Mott の金属·絶縁体転移や Mott-Anderson の金属·絶縁体転移を提唱して歴史に残ることになる人の質問として，誠に暗示的な最初の質問である．

そして，Mott の迎える Cambridge での長い夏休み，平底の船漕ぎ(punt)，友と議論する神や宇宙や Bertland Russel の著作(今の若者はこういうことをどのくらい議論するのか——また繰り言が出てしまった)．ある夏には Venizia まで自転車(!)旅行をしたという．この頃(1926年)は，Bohr (当時は英国 Manchester 滞在)による前期量子論

はあったが，その不完全性も明らかになりつつあった．ここにHeisenberg(Göttingen)による行列力学と，Schrödinger(Wien)による波動方程式が現れたわけである．Mottは「この新理論によって数学と直観を結び付ければ，自然が物理的·化学的にどうなっているのかが理解できるのではないか」，と感じたという．「数学と直観を結び付ける」というのは仲々含蓄深い点である．Cambridgeにおいて新理論を発展する力をもっていた唯一の人間はDiracであった．しかし一方においてDiracは，量子力学さえできてしまえば，物理·化学の問題は単に方程式を解くに過ぎない，というreductionism(すべてはより基本的なものに還元されるという主義)を明言していたわけだが，Mottの方は，量子力学は出発点に過ぎず，固体物理学には豊かな世界が広がっているということを予感していたのではないだろうか(実際，後にそれを身をもって示した)．ちなみにDiracは，食卓で隣にいた人から「お宅のご専門は」と聴かれ，「断熱不変量とは何のことかご存知か？ご存知ない．それでは私が何を云っても無駄」，と答えたというエピソードの持ち主の由で，社会へのaccountabilityが大事云々という現今の議論の前では目を剥かれそうである．

さて，Mottの最初の仕事は，クーロン力による散乱問題(古典的にはRutherford散乱)の量子力学版を作ったことである．時あたかも量子力学の勃興期であり，その興奮を見ていると，現代の電子相関の物理の勃興を思い出させる．Mottは奨学金を得て，当時の量子力学のセンターであるCopenhagenへ行った．ちょうどこの時，Diracがスピンを理論的に「発見」した．これは，実験·理論からこうなっていそう，というのではなく，論理(この場合は相対論)的に存在が強制される，という鮮やかな理論であった点がMottをいたく感激させたという．物理には，「許されるものは強制される」という信念があるが，Diracはそれを行使する達人であった．スピン，それは現代の電子相関の物理での重要な鍵になるものでもある．

MottはBohrと，スピンは観測可能か，などの議論をしたあと，Cambridgeに戻る．Blackettは，「モット，君はコペンハーゲン帰りで性格が変わったね，研究所に一日中入り浸っているじゃないか」といったそうである．これは1929年の話であるが，半世紀後に私が親しく目にした1980年頃でも，MottはCavendishの，特に彼が所属したPCS(physics and chemstiry of solids)の実験グループに入り浸っており，Mottの大きなカバンには実験の論文がぎっしり詰まっていた．これが昔から培われた習慣であったことがわかる．さて，Mottは，クーロン力による散乱(Mott散乱)にスピン自由度を入れる手始めとして，同種粒子によるクーロン散乱(具体的にはα粒子·α粒子散乱)を考えた．同種粒子の統計性を考慮すると散乱確率には二倍の差が生じるという結果を得て，これはすぐにRutherfordの右腕だったChadwickにより確められた．このことにより，Mottは理論物理学でキャリアを築くことに自信をもったという．

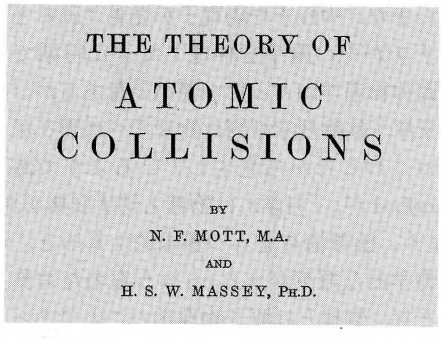
さて，MottはManchester大学からtenureをもらい，William Lawrence Bragg(William Henry Braggの令息であり，後にRutherfordの後任としてCavendish Professor)の元に行く．Braggは，云うまでもなく25歳で父親と共にノーベル賞を授賞したX線結晶学の祖である．つまり，RutherfordのCavendishやBohrのCopenhagenが原子物理学のセンターだとすると，MottはManchesterで固体物理と接触することになる．しかし，わずか2年でCambridgeに呼び戻される．Gonville and Caiusカレッジ(創立は14世紀，普通キース·カレッジと略称)のfellowとしてである．

これが1930年のことであり，これに続く数年は科学にとっても，世の中においても激動の年である．つまり，中性子や陽電子が発見されるとともに，ナチがその魔手を伸ばしてきた時期でもある．固体物理学にとっても黎明期であるが，実は素粒子原子核物理学の固体物理学への理不尽な無理解はこのころから発生しているようである．Rutherfordが，「科学には物理と切手収集がある」(つまり，論理構造をもつ基本的なものと，単なる博物学的な羅列がある)という有名な言葉を吐いたとき，物理とは原子物理学のことであった，とMottはわざわざコメントしている．実際，固

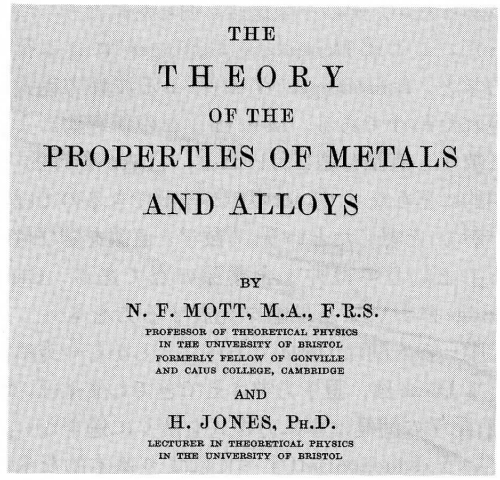
体物理が切手集めではなく，場合によっては原子物理学以上に物理的であることは歴史が示している．Mottは，Mott散乱を調べたりEllisとβ崩壊を研究するなど，自分は生粋の核物理屋さんだと1930年当時は思っていたという．一方，固体物理学の草分けはWilsonであった．固体物理の教科書で必ず出てくる，バンド理論による金属と絶縁体の違いを提唱したWilsonである．最初にこの理論を聴いたときに，たいして面白いとは思わなかった，とMottは告白している．

さて，Cavendishでの理論物理学の教授であったFowlerは，統計力学の有名な教科書を書いたが，その後Oxfordに移り，シリーズ・エディターとして物理の本を出し始めた．Diracの量子力学の教科書もこの中にある．Mottも，Masseyと共に原子衝突の本を1933年に出版する(**第1図**)[12]．

さてCambridge二年目にして，MottはBristolに，二代目の理論物理の教授(一代目はLennard-Jones)として移る．目指したことは，固体中の電子の振舞いはBlochやWilsonによっていわば第0近似の理解はできていたのをふまえて，それをより現実的な理解に発展させよう，ということであったという．ここで啓示となったのは，Oxfordの冶金学者であるHume-Rotheryによって見いだされたHume-Rothery則(合金において，結晶構造と1原子当たりの価電子数の間に密接な関係があること)の由である．冶金学と量子力学に密接な関連があることへの感激が，Mottの二冊目の教科書である，Jonesとの共著「金属と合金の理論」(**第2図**)[13]に反映されていると思われる．これは固体物理の最も初期の教科書といえ，以前


THE THEORY OF
ATOMIC
COLLISIONS
BY
N. F. MOTT, M.A.
AND
H. S. W. MASSEY, PH.D.

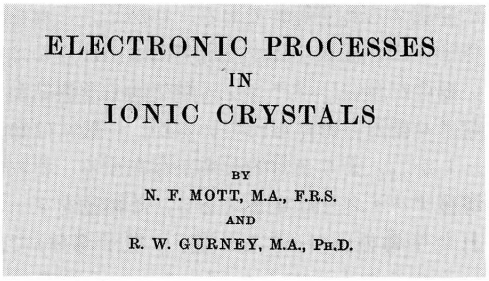
**第1図** "Mott-Massey" の教科書.


THE
THEORY
OF THE
PROPERTIES OF METALS
AND ALLOYS
BY
N. F. MOTT, M.A., F.R.S.
PROFESSOR OF THEORETICAL PHYSICS
IN THE UNIVERSITY OF BRISTOL
FORMERLY FELLOW OF GONVILLE
AND CAIUS COLLEGE, CAMBRIDGE
AND
H. JONES, PH.D.
LECTURER IN THEORETICAL PHYSICS
IN THE UNIVERSITY OF BRISTOL

**第2図** "Mott-Jones" の教科書.

に江崎玲於奈氏の講演を聴いたときにも，1945年頃Mott-Jonesを勉強した，という件りがあったように記憶する．このように，Mottは固体物理屋さんになって行くが，同僚には，π中間子を発見したPowellがいる．なぜ中間子の理論をやらなかったかというと，やり方がわからなかったからだ，と正直にいっている．曰く，「これにはthe most talented theoristが必要であった」——つまり，後に湯川秀樹が果たす役割である．

さて，具体的に始めたのは半導体物理学である．これはGurneyとの共同研究で，Gurneyは，α粒子の崩壊をGamowに先だって説明した人であるという．半導体に興味をもったきっかけは，GöttingenのPohl[14]の仕事であるという．彼は，NaClやKClなどのイオン結晶においてNaやKを過剰にすると色がつくこと(colour centre, F-中心)を調べ，その機構はこの当時のホットな話題であったそうである．固体においては，元素の微量な添加によって伝導度や色が劇的に変わる——この固体特有な現象に啓発されたMott-Gurneyの共同研究は，あまり知られてはいないが写真フィルムの感光のメカニズム(latent imageがどうやって生じるか)の解明にも貢献した．これから発生した彼の3冊目の教科書，Mott-Gurney「イオン結晶における電子過程」(**第3図**)[15]は良く知られている．MottはPohlのことを「固体物理学の真の父の一人」とまで云っている．ただし，量


ELECTRONIC PROCESSES
IN
IONIC CRYSTALS

BY
N. F. MOTT, M.A., F.R.S.
AND
R. W. GURNEY, M.A., PH.D.

**第3図** "Mott-Gurney" の教科書.

子力学の構築に立ち会った実験家からはPohlは汚い結晶を見る人，と蔑視されていたそうで，新しいことをやるには蔑視など何程のものでもない，という見本のようである．これを理論サイドから支援したのがMottとアメリカのSeitzであった由．Mottは自分のキャリアを振り返って，「私のやった仕事はHeisenbergやDiracのような鮮やかなbreakthroughではないが，私の仕事がユニークといえるのは，基礎物理の主要道(mainstream)以外の所でも実り多いものがある場所に取り組んだことであろう」，と謙虚に述懐している．ここでいう当時の基礎物理のmainstreamとは量子力学，素粒子物理学のことであり，実り多い場所とは固体物理学のことである．

この頃Mottは励起子にも興味をもっている．固体物理の教科書に，Frenkel励起子とWannier励起子がある，という説明を見るが，後者はWannier-Mott励起子と呼ばれることもある[16]．これは，Wannierが結晶中に広がった電子と正孔の間のポテンシャルを$-e^2/r$としたのに対し，Mottが1938年にこれを$-e^2/\kappa r$（$\kappa$は母体結晶の誘電率）とした[17]，という細かい訂正によるものであるが，MottはFrenkelと個人的にも親しく，ヒットラーが政権をとった翌1934年の不穏な空気の中でソ連を初めて訪問したときに，Frenkel[18]に会っているという．

ここで第二次世界大戦になるが，本論からはずれるのでスキップすると，終戦直後MottはBristolに9年間(1945–54)過ごす．ここでMottが任命した人材の中にはFrank(転位論におけるFrank-Read源で知られる)がいるという．また，彼が数年間呼んだFriedelは，その後フランスの固体物理の要の一人となる．また，Mott転移の最初の論文(1949)もこの時期である．*Philosophical Magazine*や*Journal of Physics*などの雑誌にも深く関わり始めたのもこの時期になるという．Mottは1948–1970年まで*Phil. Mag.*のeditorであり，1985年にはMottの80歳記念号が編集されている[19]．IUPAP会長にもなり，1953年には日本での理論物理学国際会議の開催に尽力した由．

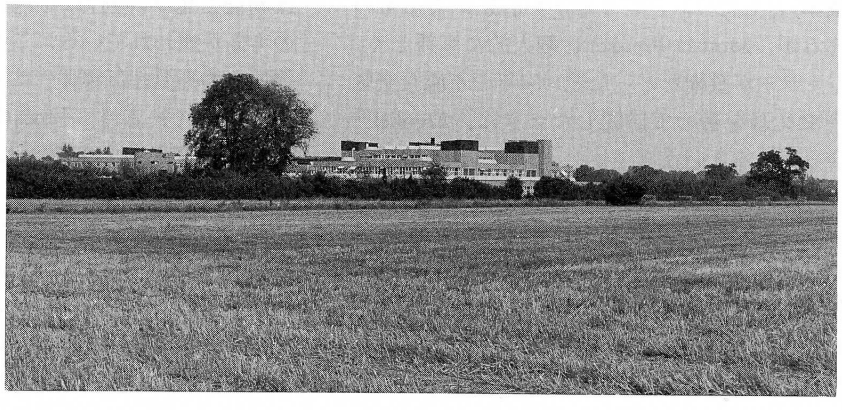
さて，1954年にMottはCavendish Professorとなる．これは，Cavendish研究所を代表する職名であり，歴代には80年前(1871)の初代Maxwellに始まりRayleigh, Thomson, Rutherfordという錚々たる名が連なっている．この研究所については，古くは中谷宇吉郎の随筆[20]にも「現代物理の発祥の地」としてRutherford時代の様子が描かれているが，新しくは文献21)に描かれている．Dysonの名エッセー'The future of physics'[22]で解説されているように，Rutherfordがこの研究所を核物理学のセンターにしたあと，Braggは全く趣向を変えて分子生物学のメッカにした(関与した人々はPerutz, Kendrew, Watson, Crickら)．Braggの後任としてこのポストをオファーされたMottは，光栄に思うと共に驚いたという．というのも，Cavendish研究所は，正式には実験物理学科だからである[23]．そもそも，Devonshire公William Cavendishが1870年に寄付したのは「実験物理学の研究所」の資金であった．Mottは就任を受諾したが，体勢をどのようにするかが問題だと思い，結局，分子生物学を組織からはずし，表面物理学のBowdenのグループを物理化学科から導入したという．ここには，固体物理をやるには物理と化学の両方が必須である，というMottの考えが表われている．この観点は，最近でも，銅酸化物高温超伝導体[24]に関して人々が銘記させられた点であろう．MottはCavendishの幾つかのグループの中でもPCSに属し，活動することになる．

一方，素粒子原子核に関しては，Cockroft generatorのような古い機器を撤去して，高エネルギー物理のグループを(CERNと協力しながら)作った．理論関係では数学者を呼びたかったが，同時期に起きた理論物理応用数学科(今では

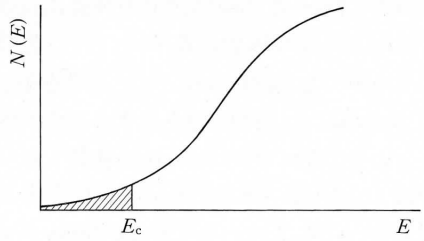
Hawkingがいることで有名)の設立とかちあって実現しなかったという．また，任期の終わりの方で，Cambridge旧市街にある建物が手狭になり，郊外に移転することを決めたという．実際の引っ越しは後任のPippardの時代となる．新Cavendish(**第4図**)は，広々とした野原の中に，獣医学部に隣接してあり，市街からはリスの遊ぶ林の中にある天文学科を通って行く．また，Ryleのために電波天文台の場所も見つけた．Cavendish Prof.任期(1954–71)中に，キース・カレッジの学長に選ばれ，administrationに疲れ果てたあと物理に復帰し，アモルファス(非晶質)系の研究に入る．Mottは結局この仕事で1977年のノーベル物理学賞を受ける．

1970年代は非晶質の研究の勃興期であり，大学院生であった私もアモルファス半導体の国際会議などの熱気を良く覚えている．そこでのキーワードはMott-CFO (CFOはCohen, Fritzsche, Ovshinskyの略)，Mott-Anderson転移，などであった．しかし，Mottがこの問題に至った背景を先ず説明する必要がある．Blochの定理により，普通の金属や半導体は理解できるが，この範疇の外にある可能性がある系が二通りある．一つは，Bloch定理が一体問題であるのに対して電子間相互作用が大事な系であり，もう一つは，Bloch定理が周期性をもつ結晶を仮定するのに対して不規則系である．Mottが1949年に示したのは，或る種の絶縁体において格子定数を縮めれば(たとえば高圧で結晶を圧縮すれば)金属化するであろう，ということであった．これは電子間相互作用のために発現する集団現象である．しかし，これを起こさせるほど極端な高圧は現実にはかけるのは難しい場合が多い．バナジウム酸化物や有機結晶では起させ得ると考えられているが，一般には難しい．しかし，より日常的な系が存在する．それは半導体デバイスでは定番である，不純物をドープされた半導体(いわゆるn型，p型半導体)である．というのも，たとえばシリコンの結晶に燐(P)を$10^{18}/cm^3$程度ドープすると，金属・絶縁体転移が起きる．燐は周期律表でSiの隣であるからドナーとなり，余分な電子はちょうど水素原子における電子のように振る舞う．平均ドナー間隔は1 $cm^3$当たり何個ドープするかによりコントロールできるから，Mott転移の舞台となるわけである．ところが，$10^{23}/cm^3$個程度あるSi原子の中に$10^{18}/cm^3$個のドナー(P原子)はランダムに入るから，この系はひどく乱れた系である．ここに，面白さと困難が同時に存在する[25]．

この問題を理論的に最初に正攻法で調べたのは，Andersonの1958年の論文である(ちなみにAndersonはMottに1953年の日本での国際会議で初対面との由である)．つまり，不規則系では波動関数は局在し得る，というAnderson局在の発祥である．これは，グリーン関数の解析性を議論した格調の高い数学的論文であるが，この真価に気づいて，これを不純物半導体や非晶質半導体に適用したのがMottである．特に，エネルギー軸で見たときに，ちょうど相転移のように局在領域と非局在領域が存在し，その境目をmobility edgeと呼ぶ，というのはMottの提唱した概念である



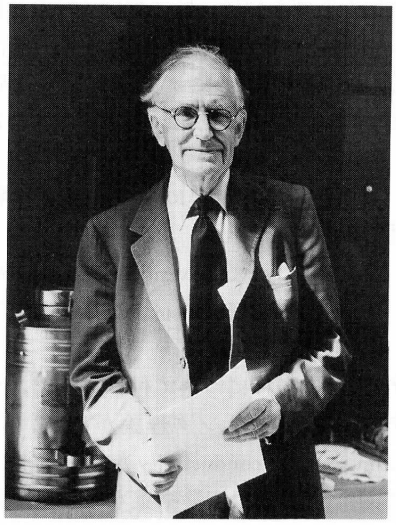
**第4図**
Cavendish研究所
(筆者撮影)．



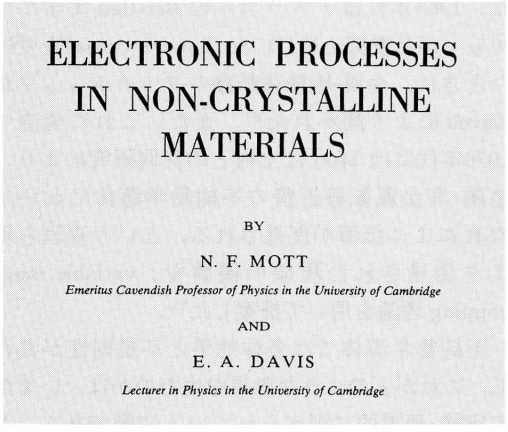

**第5図** Mobility edgeの概念図，横軸はエネルギー，縦軸は状態密度，斜線部分は局在状態領域．

(**第5図**)．また，局在した波動関数の間を電子が跳び移るのが伝導の素過程となるが，この際になるべくエネルギー的に近い状態に跳び移りたいが，近いものを探すために遠くまで跳ぼうとすると跳び移り積分は局在中心の間隔の指数関数のように減衰するので，両者の兼ね合いで結局伝導度は$\exp[-(T_0/T)^{1/4}]$のように奇妙な温度依存をする．これはvariable range hoppingと呼ばれ，やはりMottが提唱したものであり，不規則系の重要な特徴の一つである．さらに，歴史的には古参であるカルコゲナイド系非晶質半導体と新参のシリコンなどⅣ族非晶質半導体における伝導の素過程の違いも含めて理論を立てたのがMottやMott-CFOである．1975年頃には，SpearとLeComberによって，水素化アモルファス・シリコン(元来欠陥を減らすために水素化された)においてp型，n型のドーピングができるようになったことから，アモルファス半導体はさらに隆盛を見て，太陽電池への応用もされるようになる[26]．アモルファス半導体国際会議のシリーズがこれらの発表の舞台となり，Harvard(1979)，Grenoble(1981)，東京(1983)と続いたわけである[27]．**第6図**の写真はHarvardでのものである．Mottが自伝を書いた直後の1985年のローマでの会議では，彼がplenary lectureを行っている[28]．Mottが亡くなった直後の1997年のブダペスト会議のアナウンスメントには，Davis(Leicester大学)による弔辞が添えられている．また，Mott-CFO時代の雰囲気は，「不規則系における金属·非金属転移」をテーマとした1978年のScottish Universities Summer School録[29]にも良く現れている．

Mottは1971年に停年退官を迎えるが，その後



**第6図** 1978年，ボストンでの非晶質半導体国際会議でのスナップ(筆者撮影)．


ELECTRONIC PROCESSES IN NON-CRYSTALLINE MATERIALS

BY

N. F. MOTT

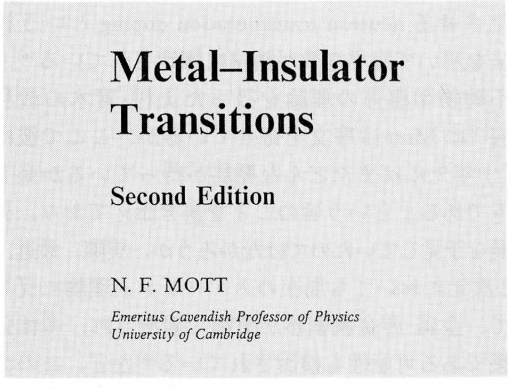
*Emeritus Cavendish Professor of Physics in the University of Cambridge*

AND

E. A. DAVIS

*Lecturer in Physics in the University of Cambridge*

**第7図** "Mott-Davis"の教科書．


Metal–Insulator Transitions

Second Edition

N. F. MOTT

*Emeritus Cavendish Professor of Physics*
*University of Cambridge*

**第8図** "*Metal-Insulator Transitions*"の教科書．

も精力的な研究を続け，特に外国では名誉教授もオフィスをもち続けられる場合が多い例にもれず，CavendishのPCSにオフィスをもち研究をたゆまず続けていた．また，教科書も，1971年にDavisと共著で「非晶質の電子過程」(第2版は1979，**第7図**)[30]，1974年に「金属絶縁体転移」(**第8図**)[31]が出版された．1977年にはノーベル賞を受けたが，これでCavendish Professorは5代続けて(Rayleigh, Thomson, Rutherford, Bragg, Mott)授賞したことになる．

金属·非金属転移について付言すると，1980年代に局在のスケーリング理論が出て，Mottのminimum metallic conductivityなどが疑問に付された時期に，Mottは実験結果もつぶさに眺めながらこれを検討するとともに，Kavehとの共同研究により(通常の指数関数的局在に対して)巾的局在の概念を出したりしてこの問題をフォローした．1983年にはイスラエルのBar-Ilan大学にてモットが名誉博士号(D. Sc. honoris causa)を受けたときに，金属-絶縁体転移のワークショップがKavehにより開かれた[32]．また，これに先立つ1970年代にはMottは上村との共同研究により，金属·非金属転移近傍の不純物半導体においてESRにより伝導が促進される，という森垣らにより発見された現象の機構を，variable range hopping理論を用いて提案した[33]．

不純物半導体では多体効果と不規則性が共存し，これがどのような効果を生むのかは，いまだに実験·理論的に調べられている問題である．たとえば最近，不純物が不均一に分布するのを回避するために，$^{70}$Geに中性子を照射して$^{71}$Gaに変化させるneutron transmutation dopingという技法を用いて臨界指数が精密に測定されている[34]．不純物半導体の理論を扱った上村·青木の教科書[25]にMottは序文を寄せているが，ここで彼は「十年先にはまたどんな発展が待っているか楽しみである」という旨のことを書き添えており，発展を予見していたのではなかろうか．実際，最近，2次元においても局在のスケーリング理論に反して，金属·非金属転移が実験で観測され，多体効果である可能性も検討されている[35]など，このテーマはホットであり続けている．

その後，Mottは高温超伝導の理論に没頭するようになる．彼の理論は電子-フォノン機構であり，その中でもbipolaron(フォノンの着物を着た電子(polaron)が二個束縛されたもの)が凝縮する，という理論である．Mottが強調したことの一つは，超伝導の$T_c$はbipolaronが形成される温度あるいはボゾンとしてのbipolaronがボーズ凝縮する温度ととらえ得るが，後者であろう，という点であった[36]．晩年は居室をCavendish内の超伝導学際センターに移し，polaronを長年やってきた理論家のAlexandrovと共に悠々自適という感じの研究三昧であった．AlexandrovはMottの論文選集“*65 Years in Physics*”[37]の編集にも協力したが，Mottの超伝導理論はこの本の最後の方にも納められているとともに，二人はpolaronの本も出版している[38]．ただし，万人周知のように，高温超伝導の世界は百家騒鳴の世界であり，Mott理論も厳しい批判にさらされる例外ではありえなかった．たとえばノーベル賞を共同授賞したAndersonもMottの超伝導理論を批判し，この反論ならびに再批判が英国物理学会誌(Physics World)に載った[39]．もっともAndersonの高温超伝導理論自身も厳しい批判にさらされており[40]，何が正しいかは歴史が判定することになろう．また，たとえ銅酸化物に対しては適用できなくとも将来別の系に思いがけず適用されるアイディアもあろう．

そういう前置きの元に，このMott-Anderson論争が何だったのかを一言コメントしておこう．Andersonの主張は，最近の電子相関の物理の発展を見ていると革命としか呼びようのないものであり，非フェルミ液体などの新概念の宝庫である．だから，銅酸化物も含めて電子相関の発展を謳歌しようではないか，という主張である．Mottは，それは重い電子系に対しては確かにそうかもしれないが，簡単にすべてをひっくるめてしまうのは‘profoundly wrong’である，と主張する．このように，この論争はbipolaron超伝導が良いか悪いかというような具体的な論争の前に，革命的な概念を(はずれることを恐れずに)どんどん適用した後取捨選択すべきなのか，もっと地道に伝統的概念の可能性を探るべきか，という姿勢

に関する(高尚な)論争となっている．Andersonは様々な新概念の提案(歴史的に取捨選択も受けたものも多いが残ったものは光っている)で一家をなした物性物理学者であり，このような論争は起きても不思議はない，と感じられる．私には，この両姿勢は車の両輪のようなものであり，二者択一されるべきものではないように思われるが，こういう姿勢の議論を真剣にすること自体が科学において何百年(どころか何ミレニア)という伝統をもつ西欧の凄さではなかろうか．Andersonが次に(1996年秋に)同じPhysics Worldに寄稿したのは，Mottへの追悼文であった．

## 3 展望

こうして，Mottの物理を軸に20世紀の固体物理を振り返ってみて，それでは21世紀の固体物理はどうなると予想されるであろうか．あるいはどうすべきであろうか．そもそも学問の真の進歩は，思いがけないbreakthroughやserendipity[41]で起きるものであるから，「どんな進歩が予言できるか」と問うこと自体が自己矛盾している．たとえば1970年代に誰が高温超伝導や量子ホール効果を予測したであろうか．しかし，breakthroughの起きる舞台がどのあたりにありそうか，と問うことは意味があろう．たとえば，Mottと密接な関係を保っていたPepperも発見者の一人であった量子ホール効果がなぜ発見されたかを振り返ってみると[42]，これも突然出現したのではなく，2次元電子系の物理の長い地道な蓄積の賜物に他ならなかった．整数量子ホール効果の劇的な精度や夢にも予測されなかった分数量子化[43]は，実験で見つかった真の驚きであったが，その舞台は長年の研究蓄積の延長線上にあった．

このようなポテンシャルをもつ候補として，(i) material scienceの的には新奇な物質と，(ii) 理論的には多体系，というのがやはり面白い舞台であり続けると思われる．ここにも，物性物理学が多彩な世界でありながら，統一原理に貫かれている，という両面性が大事であろう．つまり，多彩という意味では，Schrödinger方程式がわかった瞬間に固体物理は解けたも同然，というDiracの極論は見当違いもはなはだしく，予想もつかない白雲未在の豊かな世界が存在している．もしDirac流を押し進めれば，元素の周期律表がわかった瞬間に化学は終わりであり，有機化学ができた瞬間に生物学は終焉する，というナンセンス極まりないことになってしまう．固体物理においても，無限自由度から生じる相転移や対称性自発的破れ，それに伴う巨視的量子現象の面白さ，また有限自由度で生じるメゾスコピック系の物理の面白さは云うまでもない．また，むしろ予想をつけようという観点からは「物質設計」という概念が提唱されていて，うまく行っている部分もあるが今のところ画餅のような面もあり，これを実際に食べられる餅にすることももちろん興味深い．

ただしここで胆に銘ずべきことは，「物性は多彩」という表現は誤解を招き易い．他分野からは常に，物性はゴチャゴチャしていて何が統一的なものかわからない，という批判を受けがちだからである．しかし，云うまでもなく物性は統一原理に貫かれている．その一つは，相転移や対称性破れといえるであろう．また，場の理論が実効的に実現されている舞台となっていて，しかも物性では各種の場の理論が実現しており，かつ素粒子の世界より何桁も低いエネルギー・スケールで実現している．このように，物性は多重な統一原理がネットワークをなしている．このような意味での「多彩の中の統一」をキーワードとして，新しい物性を探れよう．

ここで二つの選択肢(二者択一ではないが)が思い浮かぶ．

- 単純系か複雑系か．

昨年Andersonが日本で‘Emergence, reductionism, seamless web——When and why is science right?’という題で講演したとき——これは非常に面白かった——，講演の後で聴衆からの質問の中に「Anderson先生，もし今あなたが20才の学生だったら，何を専攻しますか」というのがあった．答は，「物性では面白いことはあらかた出てしまったから，今なら生物学(enzymeなど)をやるだろうね」というものであった．生物学が面白い，というのは物理学者により繰り返し強調されてきた．Dysonも上で触れた随筆[22]でkeep in touch

with biology と云っている．確かに生物には面白い現象に満ちており，たとえば植物の光合成の反応中心を人工的に作る，というのは光化学の夢の一つである．だからといって，物性で面白いことは出尽くしたと私は思わない．これは1930年代にWilsonのバンド理論を聴いた人が，「あなるほど，じゃ固体物理はもうやること無いんだ」というようなものであろう．たとえばフラレンやナノチューブのような簡潔な構造をもったものでも豊富な物性を秘めている．また，新奇物質を極端条件や新ルートで合成する道もますます面白いであろう．たとえば超高圧で結晶は他の結晶構造に転移することがあり，典型的な半導体であるシリコンが高圧では金属化し低温で超伝導になるのは良く知られた例である．新奇な相がquenchできれば(常圧に戻したとき元の構造に戻らなければ)これを準安定とみなせる[44]．素粒子の分野では予言されたのと異なる新粒子が加速器でみつかった例は多いが，極端条件でどのように意外な新物質や新物性が見つかるかは楽しみである．また，学際的な視点もますます重要であろう．たとえば，今引用した文献44)は，地球科学と固体物理学の学際的交流が実を結んだ例である．

• 一体か多体か

たとえばナノチューブは，ある意味で究極の量子細線という意味で，一体問題としても面白いが，これに電子間相互作用を入れれば朝永-Luttinger系になる(場合によっては超伝導)という提案[45]もある，などの面白さがある．多体問題は，普通の系でもまだまだ基本的な未解決の問題が残されている．たとえば教科書的な電子ガスの相図においては，電子密度が薄い極限の近くでWigner固体，強磁性，超伝導などの出現が予言されているが，完全にはわかっていない．薄い電子ガスは昔から$Sr_2TiO_3$が候補とされているが，最近ではドープされた$CaB_6$[46]のような新顔も提案されている．またこれを実験的に実現しようとすれば様々のアイディアが要る．さらに，多体問題と新奇な系とをカップルさせて面白い物理を狙うというのが面白かろう．

また典型的な多体効果である超伝導については，室温超伝導という，酸化物超伝導発見の当初から皆が実現を目指したものも，社会へのaccountabilityも含めて大きな目標であり続けるであろう．

## 4 おわりに

Mottの生涯·業績の節で私がimplicitに強調しようとしたことは，Mottは第一に，物理をやることは喜びである，という姿勢を体現していること，第二に彼はある意味で高温超伝導の物理の先駆者であった，ということである．彼自身，人を育て科学者として世に送り出すことに喜びを覚える，といっている．アモルファス半導体のコミュニティーがここまで育ったのも，彼なくしては考えにくい．また，酸化物についても，銅にかぎらず$V_2O_3$[47]や$Ti_2O_3$[48]のバンド構造は現在に至るまで研究されているホットな問題である．モット転移は，転移の概念自身は確立しているが，それを理論的にどう扱うか，斥力からの超伝導[24]をMott絶縁化は援助するのか阻害するのか，などは未だに理解が望まれるし，別のカテゴリーの物質として金属水素[49]が存在するか否か，などは現在でも最前線の問題である．つまり，高温超伝導と金属水素という現在最もホットな固体物理の話題の二つがモットに端を発することになる．不純物半導体や酸化物は，わが国の様々な人々によるオリジナルな貢献も大きな分野であり，Mottの物理と直接間接に関わってきたことになる．

世の中との関わりという点でも，アモルファスシリコンを用いた太陽電池は現代生活の重要な一部となっている．家電だけでなく，ソーラーハウスと称して，個人住宅でも屋根に太陽電池を置けば(瓦と一体化したものもある)，年間必要電力の約半分まではまかなえるようになっている．また，アモルファスchalcogenideも，書き込み可のDVDに用いられようとしている．

私自身がMott先生と邂逅することができたのは，そもそも私の指導教官であった上村洸先生がMott先生の知遇を得て，1974/75の一年間Cavendishに滞在されたことに端を発している[2,4]．その頃の局在問題の生々しい息吹を，当時修士の院生であった私も未だに覚えているし，後に，整数

量子ホール効果に局在問題を私が安藤氏と導入する礎ともなった．量子ホール効果が発見された頃には，私自身 Cavendish に博士研究員として2年間滞在した．毎週のように PCS の Mott のオフィスにお邪魔しては，局在問題や Mott-Hubbard 転移の問題をはじめとして，局在転移近傍での thermopower, X 線吸収端とか，分子性結晶における polaron 等々を議論したことを鮮やかに覚えている．当時 Mott は，上述のように局在のスケーリング理論の是非を検討していた．私自身も，スケーリング理論が正しく局在·非局在転移が相転移と思えるのであれば，転移点で状態はスケール不変なフラクタルになるのではないか，などということを考えていた．Mott のかばんには局在関連以外にも液体金属，アモルファス半導体，酸化物などの実験の論文がぎっしり詰まっていた．

2年間の滞在中，私は Cavendish の物理の秘密は何であろうか，といろいろ考えた．私なりに得た結論は，(i) アイディアを大切にすること(それも，使い古しの封筒の裏にでもちょこちょこっと書ける程度の簡にして要を得たもの，英語で back of envelope と云う)．(ii) 他の目は気にせず自分が面白いと思ったテーマを追う．そういう人々同士が廊下で立ち話的に議論を交わす．(iii) ゆったりすること．お茶の時間は最優先事項である．精神的には豊かであるが物質的には質素であり，Mott 先生がときどき見てくれと渡していただいた論文の下書きは，使用済みの紙の裏に書かれていることが多かった．最近 Cavendish を訪れると，流石に時代の流れに応じている部分もあり，たとえば凝縮系理論グループは大規模な第一原理数値計算をしたり，現 Cavendish Professor の Richard Friend(高分子)が研究所一般公開の指揮に立っていたりするが．

しかしそれでも，自然科学は喜び，という彼らの姿勢を良く象徴していると感じられるのは，研究所の入り口に，「主の御業は大いなり，すべてその事跡を喜ぶ者は之を考え究む」という，詩編111からの言葉が(旧 Cavendish ではラテン語で，新 Cavendish では英語で)掲げられていることである．そして，後半で強調したかったのは，固体物理学が多くの夢を秘めていることである．

最近では，Davis により Mott の追悼文集[50]が出版されており，上村氏，森垣氏を含め，本稿に現れた多くの人々が，いかに Mott を慕っていたかが感じられる．最近では，Mott の遺族(Lady Mott および Mott の令妹，令嬢)の基金により the Mott prize というのが作られ，第一回には Pepper が受賞している．Mott ご夫妻と会食したことがあるが，音楽の話が出て，この令嬢はチェンバロを弾く由．また，Lady Mott の方は，これから教えに行かなくては，と中座されたので，何を教えていらっしゃるのですか，と聴くと，「ラテン語ですよ」というので，「そういえば Newton の時代は物理屋さんもラテン語を使っていたのでしたね」「そう，Kepler も」などと会話したことが思い出される．考えてみれば，Kepler は，固体が何らかの単位の規則的配列であることを示唆した最初の人である[51]．

この小文は多くの方との長年の研究や会話に負っている．特に上村洸，仁田昌二，黒部篤，澤岻英正，P. W. Anderson の各氏に感謝したい．

## 〔参考文献〕


1) Sir Nevill Mott: *A Life in Science* (Taylor & Francis, London, 1986).
2) 上村　洸：固体物理 **21** (1986) 275.
3) 森垣和夫：固体物理 **31** (1996) 836.
4) 上村　洸：日本物理学会誌 **52** (1997) 46.
5) N. F. Mott: Nature **377** (1995) 577.
6) Emilio Segrè: *From X-rays to Quarks* (Freeman, San Francisco, 1980).
7) Abraham Pais: *Inward Bound* (Clarendon Press, Oxford, 1986).
8) この研究所は William Cavendish(電気力の $1/r$ 則などで有名な Henry Cavendish は William の祖父の従兄弟)により寄付されたためにそう名付けられた．Debonshire 公家 Cavendish は，ダイアナ妃とも親戚関係のある Spencer 家に連なる貴族で，たとえば Amanda Foreman: *Georiana——Duchess of Devonshire* (Harper Collins, London, 1998)に詳しく描かれている．
9) E. A. Davis and I. Falconer: *J J Thomson and the Discovery of the Electron* (Taylor & Francis, 1997).
10) H. Jeffreys and B. Jeffreys: *Method of Mathematical Physics*, 3rd ed. (Cambridge Univ. Press, 1999).
11) この文章を執筆している最中に，Cambridge の知人から，Lady Jeffreys が昨年12月に亡くなったことを知らされた．
12) N. F. Mott and H. S. W. Massey: *The Theory of Atomic Collisions* (Clarendon Press, Oxford, 1933).

13) N. F. Mott and H. Jones: *The Theory of the Properties of Metals and Alloys* (Clarendon Press, Oxford, 1936).

14) この Robert Pohl の令息が，非晶質半導体における温度に比例する比熱を発見した R. O. Pohl である(北海道大学の中山恒義氏のご教示による).

15) N. F. Mott and R. W. Gurney: *Electronic Processes in Ionic Crystals* (Clarendon, Oxford, 1940).

16) たとえば M. D. Sturge in *Excitons*, ed. by E. I. Rashba and M. D. Sturge (North-Holland, Amdterdam, 1982) p. 3.

17) N. F. Mott: Trans. Faraday Soc. **34** (1938) 500.

18) Frenkel の伝記が彼の息子によって1966年に著されているが，これは最近ロシア語から英語に訳された(Victor Frenkel: *Yakov Ilich Frenkel——His Work, Life and Letters* (Birkhäuser, Basel, 1996).

19) E. A. Davis, A. D. Yoffe and M. Pepper (eds.): Phil. Mag. **B52** No. 3 (1985)——Nevill Mott Festschrift.

20) 中谷宇吉郎随筆集 第1巻(朝日新聞社)p. 107.

21) たとえば James D. Watson: *The Double Helix* (Weidenfeld and Nicolson, London, 1981). この本の叙述は多くの人に批判されているが，この研究所の雰囲気の一面は伝えている．一方の Crick も，「Cavendish には，十年間結果が得られなくても援助をしてくれる人たちがいました」といっている(三浦賢一：ノーベル賞の発想(朝日新聞社，1985)).

Cambridge については，小山慶太：ケンブリッジの天才科学者たち(新潮社，1995)もある.

22) F. J. Dyson: Physics Today, Sept. 1970, p. 23 (翻訳は自然 1971年2月号 p. 35).

23) 同様に，Oxford 大学の Clarendon 研究所も実験物理学科である.

24) たとえば，黒木和彦，青木秀夫：「超伝導」(東京大学出版会，1999)； 日本物理学会誌 **54** (1999) 557.

25) H. Kamimura and H. Aoki: *Physics of Interacting Electrons in Disordered Systems* (Oxford Univ. Press, Oxford, 1989).

26) アモルファス半導体の最近の review にはたとえば，清水立生：応用物理 **68** (1999) 1111 がある.

27) この会議のシリーズの最近については，森垣和夫：固体物理 **35** (2000) 215.

28) F. Evangelisti and J. Stuke (eds.): *Proc. 11th Int. Conf. on Amorphous and Liquid Semiconductors* (North-Holland, Amsterdam, 1986).

29) L. R. Friedman and D. P. Tunstall (eds.): *The Metal Nonmetal Transition in Disordered Systems* (Scottish Univ. Summer School in Physics, 1978).

30) N. F. Mott and E. A. Davis: *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials* (Clarendon Press, Oxford, 1971, 1979).

31) N. F. Mott: *Metal-Insulator Transitions*, 2nd Ed. (Taylor & Francis, London, 1990).

32) この会議録は，Phil. Mag. **B50**, No. 2 (1984).

33) H. Kamimura and N. F. Mott: J. Phys. Soc. Jpn. **40** (1976) 1351.

34) K. M. Itoh *et al.*: Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 4058.

35) 青木秀夫：固体物理 **34** (1999) 49 でも紹介されている.

36) 引力が弱い場合の(BCS)状態から強い場合のボーズ凝縮状態へのクロスオーバーは昔から考えられている問題である．引力 Hubbard 模型のようなフェルミオン模型においては，クロスオーバーは連続的であるとされている；最近の文献はたとえば，M. Randeria: in *Bose-Einstein Condensation*, ed. by A. Griffin *et al.* (Cambridge Univ. Press, 1995) p. 355.

37) N. F. Mott and A. S. Alexandrov: *Sir Nevill Mott——65 Years in Physics* (World Scientific, Singapore, 1995). ここにも含まれている N. F. Mott: Rep. Prog. Phys. **47** (1984) 909 は非常に簡潔に彼の metal-nonmetal transition についての考えの流れを描いている.

38) A. S. Alexandrov and N. F. Mott: *Polarons and Bipolarons* (World Scientific, Singapore, 1996).

39) N. F. Mott and P. W. Anderson: Physics World, Jan. 1996, p. 16.

40) T. Leggett: Physics World, Oct. 1997, p. 51.

41) Serendipity に関しては，R. M. Roberts: *Serendipity* (John Wiley, New York, 1989)という本も出ている.

42) 青木秀夫：数理科学 **32**, No. 5 (1994) p. 17 (別冊数理科学「現代物理の展開——発見と創造のドラマ」(サイエンス社，1997) p. 117 に再録).

43) たとえば，中島龍也，青木秀夫：「分数量子ホール効果」(東京大学出版会，1999).

44) 高圧における結晶構造についてはたとえば，H. Aoki, Y. Syono and R. J. Hemley (eds.): *Physics Meets Mineralogy* (Cambridge Univ. Press, 2000)； R. J. Hemley and N. W. Ashcroft: Phys. Today Aug. 1998, p. 26 を参照.

45) 超伝導の proximity effect が nanotube において実験的に見えたという報告 A. Yu. Kasumov *et al.*: Science **284** (1999) 1508 および，そこで引用されている M. P. Fisher らの2バンド朝永·Luttinger 理論を参照.

46) D. P. Young *et al.*: Nature **397** (1999) 412.

47) L. F. Mattheiss: J. Phys. Condens. Matter **6** (1994) 6477.

48) L. F. Mattheiss: J. Phys. Condens. Matter **8** (1996) 5987.

49) 解説は，N. Ashcroft: Physics World, July 1995, p. 43; R. J. Hemley and N. Ashcroft: Nature **380** (1996) 671.

50) E. A. Davis (ed.): *Nevill Mott——Reminiscences and Appreciations* (Taylor & Francis, 1998).

51) Johannes Kepler: Harmonice Mundi (1619). 青木秀夫，固体物理 **21** (1986) 697 でも触れられている.