The Physical Society of Japan (JPS)

系の結合エネルギーはこれにより改善されるが，電荷形状因子は改善されないことを示した．

7. New experimental techniques and nuclear sizes: F. Bosch (GSI) は現在 GSI で建設が進められている重イオン蓄積リング (ESR) の内容と，それを用いた原子及び原子核の実験計画について報告した．電子冷却を利用して高精度のビームを得る事が考えられており，このセッションで報告されたDaresbury研その他のグループによるレーザー分光実験を拡張した計画も考えられている．

8–9. Subnucleon physics and subthreshold mesons and photoproduction: N. Isgur (Toronto) と A.W. Thomas (Adelaide) は共に核物理の将来において QCD に基礎を置いた研究の重要性を主張した．前者は QCD の概説のあとで，通常用いられる核物理の取り扱いで QCD の立場からは必ずしも正当化されない幾つかの例などをあげ，後者は核子のクォーク模型の概説のあとで核内の 3q–3q と 6q 系との相転移等について論じた．I. Sick (Basel) はサクレーでの ^{3}H(e, e′) 散乱の実験結果から核内における中間子の自由度が及ぼす効果を論じた．運動量移行の大きい領域での実験が将来CEBAF 加速器などで行われることが期待される．また K. Rith (Freiburg) は EMC 効果の問題について実験結果の現状を紹介し，様々な理論的解釈についてコメントしながらレビューした．さらに詳細な実験が必要であり，核内クォークグルオンの存在様相を明らかにする実験を期待すると述べた．

10. Fundamental interactions: D. Schwalm (Heidelberg) は GSI における重イオン衝突による陽電子放出の実験の最近までの結果を報告した．幅の狭い陽電子ピークが一本以上観測されたことを示し，axion などの素粒子との関係を否定した．W. Haxton (Washington) は原子核を使って基本的対称性をテストする問題を，パリティ混合の核準位，E1 モーメント，太陽ニュートリノのパズルに関連した Mikheyer–Smirnov の機構の三つに集中してレビューした．W. Kündig (Zürich) は ^{3}H のベータ崩壊における電子のエネルギー分布の測定から，電子ニュートリノの質量の上限が 18 eV と求められたことを報告した．

最後に D. M. Brink (Oxford) は会議全体を，4 項目に再整理した形でまとめて，summary talk を行った．異なる話の共通的な様相を指摘するなど，興味ある事柄の要領の良いまとめであった．

以上が会議における主な講演の概要であるが，多岐にわたった話題に対して表面的で偏った記述に止っている事が多いのをお許し頂きたい．会議全体の印象として，中高エネルギー領域の話題が招待講演では多く，この傾向は前2回の会議からさらに助長されたものであることが挙げられる．この方向での最近の成果は種々のプローブによる GT 強度の探索や巨大共鳴の発見などであろう．デルタやクォークなどの新しい自由度に対する研究は，今後の高エネルギー加速器の稼動と共に着実な形で進展することが期待される．一方ではしかし，Daresbury での superdeformed band の発見に見られるように，従来からの低エネルギー領域において着実な実験技術の進展にともなう大きな成果が得られていることも強調すべき事実であると思われる．重イオン加速器の充実と実験技術の向上によって，高励起・高スピン状態の核構造研究，drip line 近くまでの exotic 核の研究等が今後さらに進展することが予想される．

最後に，この報告を書くにあたり，会議参加者の，秋山佳己 (日大文理)，五十嵐正道 (都立大理)，上村正康 (九大理)，横山厚 (東工大理) の諸氏に講演の一部についての意見を頂いたことを感謝致します．

第2回「量子力学の基礎と新技術」国際シンポジウム

学習院大理 江 沢 洋

1983年8月の第1回に引き続く標記の会議が1986年9月1日～4日にわたり東京の日立製作所・中央研究所で開かれた．この研究所の後援，文部省と日本物理学会の協賛を得て，この会議の組織委員会が主催したもので，委員長は前回と同じく中嶋貞雄がつとめた．

会の趣旨も前回と同じで，英語名 Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New

NII-Electronic Library Service

The Physical Society of Japan (JPS)

Technologyが示すように‘量子力学の基礎に関して，近年の理論的分析の深まりを踏まえつつ，最近の技術の進歩によって可能となった実験の含意をさぐり，近い将来に可能となるであろう実験を模索し検討すること’である．第1回の会議は，世界の各地に同種の会議や研究会を誘発し，先駆けの役をした．今回も参加希望者が多く会議を議論のしやすいサイズに抑える苦労があった．

以下に講演の概要を記す．

1. Aharonov-Bohm効果

実験：電磁場の基本的実在が力ではなくてポテンシャルであることを示すAB効果(Y. Aharonov と D. Bohm (1959) の予言) の決定的実証を外村彰(日立基礎研)が果した．彼は前回の会議で次の検証実験を報告していた．すなわち，パーマロイを外径数 μm の環状に切り出して環に沿って磁化し，(1) その外に磁束がほとんど洩れ出さず，(2) その中に電子線がほとんど滲み込まない状況をつくり，他方鋭い針先からの電界放射により干渉性の高い電子線をつくって，電子線の波面をホログラフィーの手法で見た．今回の報告は，パーマロイの環を超伝導体で覆って (1) の洩れをなくし，さらに銅の膜をかけて (2) の滲み込みを抑えた，というもの．見事な実験である．

理論：大貫義郎(名大理)は，前回に一部の人が問題にした波動関数の一価性が，電子の入れない領域をもつ多重連結な空間でもなりたつべきことを示した．他方，関根克彦(明星大理工)は，この場合の正準交換関係がリー代数に留り，リー群の表現にはできないことを注意した．両者の関係には，なお検討の余地がある．

正常金属におけるAB効果　これは以前にもD. Yu. & Yu. V. Sharvin (1981) により直径 1 μm，直さ1 mm のマグネシウム円筒で電気抵抗の磁束に関する周期 ‘$h/2e$’ の振動として検出されていたが，今回，R. A. Webb ら(IBM, Yorktown H.) は直径 0.784 μm，幅 0.04 μm，厚さ 0.038 μm の金(多結晶)の輪の直径の両端に電極をつけ，その間の電気抵抗が輪を貫く磁束密度に関し周期 0.0076T で振動することを報告した．この周期は磁束にすればAB効果に特有の h/e になる．金環の温度は 0.003 K だが抵抗は 29.4 Ω あって，電子は半周の間に 10^4 回は散乱されているはずなのに位相の記憶を失わない！　この事実は観測理論への示唆も含むであろう．

この実験では，磁束は電子の位置まで滲透しており，そのため電気抵抗にはランダムに見えながら何度でも再現可能な振動が重なる．この振動は輪の材料や抵抗値によらず普遍性をもつというが，海老沢丕道ら (東北大工) の理論は否定的だ．D. Stone (Stony Brook) の解釈は印象的であった．非周期的で再現可能な振動が細線の磁気抵抗にも見られることを難波進(阪大工)らが報告した．この細線はSeでドープしたGaAs，厚さ 200 Å，長さ 2 μm，幅 0.3 μm で，先行する同種の実験(W. J. Skocpol (1986) ほか) の試料より大きい．

量子ホール効果との関連　AB効果が量子ホール効果の理論的証明に手がかりとなることを青木秀夫(筑波大物質工)が論じた．Laughlin型の配置を考えてトポロジカルな不変量に引き寄せるこの論法は，その先駆をなした石川健三(北大理)も述べた．

2. 巨視レベルの量子力学

D.F. Walls ら(Waikato U., ニュージーランド)は，**光の圧搾状態** (squeezed state) の生成を報告した．これは一つのモードの光子の消滅演算子を $\hat{a}$ とし電場 $\hat{E}=2\lambda(\hat{a}\,e^{i(\omega t+\theta)}+\text{h.c.})$ を

$$\hat{E}=\lambda\,[\hat{X}_\theta\cos(\omega t+\theta)+\hat{X}_{\theta+\pi/2}\sin(\omega t+\theta)]$$

と書くとき，ゆらぎ $\Delta X_\theta, \Delta X_{\theta+\pi/2}$ は積が $\geqq 1$ で(不確定性原理)コヒーレント状態ではともに1であるのに対して，一方が1より小さい状態をいい，非線形媒質を含む光学過程により生成する．会議のときまでに $\Delta X_\theta=1/2$ が達成されたという．圧搾状態の概念は高橋秀俊の量子的通信理論(1965)に既に現われており，これを利用すれば信号の増幅に伴うノイズを抑えることができる(cf. 高橋：数理と現象(岩波，1975))．

1個の原子がだす巨視量の輻射　原子1個からの輻射は大きく揺らぐだろうと誰しも思うが，R. G. Brewer (IBM, San Jose) は俄か雨のような巨視的回数の輻射が間欠的におこる機構を示した．既に3カ所で観測されているという．いま，原子

NII-Electronic Library Service

The Physical Society of Japan (JPS)

の基底状態0と励起状態1, 2が2→0は許容遷移で寿命がたとえば10^{-8} s, 1→0は禁止で寿命が1sだとする．この原子を0→1, 0→2に当る二つのレーザー光で励起すると，当然2→0の輻射が頻繁におこるが，たまたま原子が1に'棚上げ'されると輻射は止むだろう．この予想は原子が常に定常状態をとることを前提にしている．もし励起により1と2の重ね合わせが実現するものなら輻射は絶え間なく続くはずだ．理論は前者を支持する．

超伝導トランジスタ　超伝導体ではさんだMOS反転層へのクーパー対のトンネル効果を利用するトランジスタの試みが成功した．西野寿一ら(日立中研)と高柳英明ら(NTT通研)との2グループ独立の実験．

ジョセフソン結合における電流の量子化　この結合の両側におけるクーパー対の位相の差$\hat{\phi}$と電荷の差$\hat{n}e$とは，バイアス電流Iを流すときハミルトニアン

$$\hat{\mathscr{H}}=(e^2/2C)\hat{n}^2-E_J\cos\hat{\phi}-(\hbar/2e)I(t)\hat{\phi}$$

をもち，交換関係$[\hat{\phi},\hat{n}]=-\mathrm{i}$に従う量子系として振舞うとの考えが前回から話題になっている(Leggettの講演の項を参照)．ここにCは結合の容量，E_Jは臨界電流の$\hbar/2e$倍である．吉広和夫ら(電総研)は，この系に周波数fのマイクロ波を照射すると量子化された電流$\Delta I=2mef\,(m=1,2,\cdots)$が生ずるというK.K. LikharevとA.B. Zorinの予想(1984)を実証した．成功の鍵は(a)スズの微粒子(平均直径30 nm, 高さ20 nm)の—薄い酸化膜を介した—ランダムな単層配列(幅0.83 nm, 電極間距離4.55 mm)で実現した微粒子間ジョセフソン結合でCを小さくし($\sim10^{-6}$ F), ハミルトニアンにおいて$e^2/2C>E_J$としたこと，(b)微粒子のランダム配列のため導通経路が少なく電極間の抵抗が大きくて電流の量子飛躍($2ef\sim2.6$ nA)に伴うV–I特性の段差が検出できたこと．しかし，この段差の高さは導通経路上にあって励起された結合の数できまるので，まだ制御できていないようである．

巨視状態の重ね合わせ　この存在を証明するには巨視的変数Xで波動関数$\psi(X)$でもって記述されるものをさがせとA.J. Leggettはいう．波動関数は演算子$\hat{X}$の固有状態の重ね合わせだから——．巨視レベルの量子力学の現状を綜合報告した彼が注目するのはSQUIDである．そのcos型ポテンシャル(前出の$\hat{\mathscr{H}}$を見よ)の隣合う井戸の間のトンネル効果を見たとされているR. Ouboterの実験(1983)は，かなめのパラメタが決定できていないので結論は定性的でしかない．SQUIDにバイアス電流Iを流し井戸の間に落差をつけてトンネル電流を見たJ. Clarkeらの実験(1985)は独立にパラメタの決定がなされており，理論との一致もよい．この場合は減衰を小さくしてあるが，反対にこれを大きくしたD. B. Schwartzらの実験(1985)では理論との一致がWKB近似の指数関数部分に留る．

これらとは別に，SQUIDの一方の井戸の中にできる離散的エネルギー準位の存在がマイクロ波の共鳴吸収により証明されている．この励起で隣の井戸へのトンネル確率が増すことをJ. Clarkeら(1985)が検出したのである．

Einstein-Podolsky-Rosenの遠距離相関　これを実証したとされているA. Aspectの実験(1982)は不十分だとLeggettは述べた．理由は，装置の中央で原子が二つの光子をカスケード放出するには5 nsほどしか要しないから，装置の両端での偏光子の向きのランダムな設定は互いに'空間的'に分離されているが，その後で光子を検出する光電子増倍管の作動は長時間にわたるので相互の情報の交換が不可能とはいえないから——．

局所リアリズム　この立場からEPRの相関が古典的波動論で説明できるとしたT. Marshall (Manchester)らの説をここにはさむ．彼等は真空中に'零点振動'が存在するため，光の検出器の前に偏光子をおいたほうが置かないよりも検出確率が高くなると仮定するのだ．この説の中身はともかく，enhancementとかlocal realistとかいう新語が欧米からの参加者の間に定着しているかに見え，彼等の間での討論を窺わせた．局所リアリズムの主張に対してH. Kleinpoppen (Stirling, スコットランド)がBellの不等式やenhancementに関する実験を報告しつつ反論した．

巨視的リアリズム　Leggettにかえろう．'仮にSQUIDなどの実験結果が量子力学にあうとわかっても'と彼はいう．'だから量子力学でなければ

NII-Electronic Library Service

The Physical Society of Japan (JPS)

ならないとは結論されない.' 彼は次の2条件で巨視的リアリズムを定義し，それにもとづいて不等式を提出した. 'これが成立したら量子力学は巨視レベルに外挿できない.' その2条件とは，(i) 巨視系は短い過渡期を除けば常に巨視的に区別できる状態のどれか一つにあり，重ね合わせはあり得ない. (ii) 巨視系がどの巨視状態にあるかは，系の以後の時間発展になんら影響しない観測により決定できる. 彼の不等式は，±1 の値のみをとる巨視変数の時刻 $t_1<\cdots<t_4$ における測定値の集団平均 $\langle\cdots\rangle$ に対し，

$$\langle Q(t_1)Q(t_2)\rangle+\langle Q(t_2)Q(t_3)\rangle+\langle Q(t_3)Q(t_4)\rangle-\langle Q(t_1)Q(t_4)\rangle\leqq 2$$

をいう. 量子力学に従えば時刻 t_i の観測は一般に t_{i+1} の観測に影響するが，$Q(t_{i+1})=\pm Q(t_i)$ となる確率が $(1\pm\varepsilon)/2$ であれば上式の左辺は $2\sqrt{2}$ にできる. この議論は，なお検討を要する.

3. 中性子線回折

シリコン単結晶から切り出した山の字形の3枚の歯を透過させて干渉を見る実験で，歯の間隔は5 cm もあるから，これも巨視レベルの量子力学に属する. 第1回の会議から引き続く話題だ.

H. Rauch (Wien) は第1の歯を通過して2手に分かれた中性子線 I, II のそれぞれを振動磁場にさらして光子を吸収させても干渉性が失われないことを報告. この実験は J.P. Vigier らの要請 (1984) に応えたものと見られるが，I と II の吸収エネルギーの差に敏感で，わずか 2.7×10^{-19} eV の差でも干渉模様に唸りを生ずる. 振動磁場を一方だけにかけても同じ. いずれも山形の中に同時に二つ以上の中性子がいないような弱いビームを用いるので，光子の吸収で中性子の径路が知れた上の干渉か，という疑いをよぶ. Rauch は振動磁場の位相が定まっているため光子数は不確定で，吸収がおこったか否かもいえないとしている.

消える観測　D. Greenberger (CUNY) は，相互に剛体的に結合した2枚の板 A, B を全体では可動とした場合，中性子が A で全反射した後には板の運動 (観測!) のため中性子の波動関数の干渉性が失われるが，次に B で全反射すると板が静止に戻り干渉性も戻るだろう (haunted measurement) と推測している.

遅い決断の実験　J. Wheeler (Princeton) が第1回の会議で提起した delayed choice experiment は，2手に分かれた中性子 (または光) が検出装置の直前まできてから一方を遮る (経路の確定, 粒子性の観測) か否か (干渉させる，波動性の観測) を決断する. C.O. Alley (Maryland) は波長 532 nm のパルス・レーザー光 (長さ 5 cm のガウス型波束, 直線偏光) を極端に弱めて実験し，遅れたランダムな決断でも光が量子力学に忠実に従うことを実証した.

4. 非破壊測定

量子力学的な観測量に触れはじめた通信技術のために，また重力波の検出のためにも非破壊 (non-demolition) 測定が注目されている. 系 S の量 A_S の値を知るため S と相互作用させたプローブの量 A_P を測るものとし，それらが Heisenberg の運動方程式

$$i\hbar dA_S/dt=0,\ i\hbar dA_P/dt=[A_P,\ \mathscr{H}_P+\mathscr{H}_I]$$

に従うとしよう. A_S は運動の定数で，その値が A_P の値に影響こそすれ，系 S の状態は A_P を観測しても変わらないから，A_S の値が系 S をかき乱すことなく知れることになる. これが M. Caves の非破壊測定である.

山本喜久 (NTT通研) の実験では，光の波束の光子数 n_S を測定したいとし，これを別のレーザーからのプローブ光と一緒にシリカ・ファイバー (減衰率 0.16 dB/km), $L=1$ km に通しカー効果で相互作用 $\hat{\mathscr{H}}_I\propto\hat{n}_P\hat{n}_S$ をさせ，後者の位相にあたる

$$\hat{A}_P=(2i)^{-1}[(\hat{n}_P+1)^{-1/2}\hat{a}_P+\hat{a}_P^{\dagger}(\hat{n}_P+1)^{-1/2}]$$

を測定する. これから算出した $\hat{n}_S$ の値は通常の破壊的測定で得た値と正確に比例することが確かめられた.

山本らは，また'制御された波束の収縮'により最小不確定積 $\Delta n_S\Delta\phi_S$ の波束を得る方法を論じた. これを非破壊測定と組み合わせると'1個の光子が無限の情報を無限個の独立な受信器に届けることができる'由である.

5. その他

以上のほかに量子ホール効果，非平衡系の統計

NII-Electronic Library Service

The Physical Society of Japan (JPS)

力学，場の量子論，観測の理論が論じられたが，紙数が尽きたので割愛する．

9月3日には会議の後にAB効果について特別会議があり，会議後の9月5日には早稲田大学で‘中性子線干渉実験の将来’についてのパネル・ディスカッションを含むサテライト会議がもたれた．

以上，不完全な報告であるが，量子力学の基礎に関してまだ興味ぶかい問題が残っていること，それらが新技術の開発と相互に強く関連していることを感じとっていただければ幸である．

会議のプロシーディングズは，いずれ物理学会から刊行される．前回の会議の報告が会誌の**39** (1984) 2月号にのっていることを付記する．

第11回 IAEA プラズマ物理・制御核融合研究に関する国際会議

原研　吉川允二
京大ヘリオトロン　伊藤公孝
阪大レーザー研　山中千代衛
原研　東稔達三

標記の会議は，隔年に開催されるプラズマ・核融合の分野における最も重要な国際会議であり，今回11月13～20日にわたり，国立京都国際会館において開催された．参加者は647名(うち，国外から292名)であり，提出論文数は181件(国別には米国59件，日本42件，ソ連19.5件の順)であった．以下，主要項目ごとにこの会議の概要について報告したい．

§1. 磁気閉込め実験

磁気閉込めでは，高温プラズマを磁力線で囲み，磁気圧力でプラズマを押さえ込むとともに磁場によって熱伝達も抑制する．多くの方式の中で性能的にも，理解度においても最も進歩しているのがトカマク方式であり，現在，TFTR(米)，JET(EC)とJT-60(原研)の3台の大型装置が臨界プラズマ条件(炉心をエネルギー増幅器と見做したとき，増幅度が1となるようなプラズマの条件)を目指す加熱実験を進めており，加熱パワーは20 MW，あるいはそれに近いレベルに達している．TFTRとJETはすでに2～3年にわたる加熱実験を続けており，いろいろ工夫しながらプラズマの性能を高めることに成功している．TFTRでは，比較的薄いプラズマに強力な重水素中性粒子(原子や分子)のビームを打込んで加熱し，2億度を越える記録的な高温を達成した．一方，JETでは最近プラズマを磁気セパラトリクスで囲む方式の実験を開始し，0.5秒という閉込め時間(熱損失の時定数のこと)のトップデータを得た．JT-60は，加熱実験を開始してまだ3カ月であり，十分な条件探しが出来ていないが，温度で7,000万度，閉込め時間で0.12秒という結果を得ており，今後さらに性能向上の工夫を続ける予定である．閉込め時間の向上には，JT-60やJETで試みているように磁気セパラトリクスを用いる方法が最も有力視されているが，JFT-2M(原研)ではこれを用いなくても同レベルの改善を実現する方法を発見し注目された．

プラズマ加熱については，中性粒子入射法やイオンサイクロトロン加熱法による実験が大型トカマクにおいて核融合炉レベルで行われるようになった．その一方，中型トカマクを用いて，従来にない特徴のある加熱法の研究も進められている．例えば，周波数が比較的高く導波管アンテナが使いうるイオン・バーンステイン波加熱の研究がJIPPT-IIU(名大)，PLT(米)等で開始された．不純物の混入の抑制も磁気閉込めの基本課題の一つである．一つの有望な成果は不純物抑制装置であるダイバータを用いたJT-60の実験において不純物放射によるエネルギー損失が加熱パワーの5%に抑えられたという結果であろう．JT-60のプラズマは核融合炉プラズマにそう遠くないレベルにあるだけに，これはトカマクに限らず，磁気閉込め方式全体に係わる朗報といえよう．JT-60でのもう一つの成果は，波長15 cmのマイクロ波入射による低域混成波電流駆動に関する実験結果である．これはトカマクの一つの制約である電流継続時間の制限を解消することを目標としたものであり，1 MW程度の入力で低密度プラズマ中に1.7 MAの電流を永久駆動しうることを実証した．これは従来の記録値の4倍に達するものであり，また，その駆動効率もまた従来のものを上廻るも

NII-Electronic Library Service