

能性が指摘された。今回の会議では、より測定精度が向上した $\check{C}$ 光観測とミューオン、電子の観測結果を総合すると、 $10^{18}\sim 10^{19}$ eV では平均核種に大きな変化は無いと考えられるようになった。結論を得るには、平均的 t_m のみならず、シャワー毎の N_0 の遷移カーブの測定がより重要である。チャカルタヤ山での $\check{C}$ 光波形の観測は、高空での異常に発達早い(多重度が大きい)現象の存在を示唆し、ユタ大学の AS からのシンチレーション光による遷移カーブの測定は、破砕領域でスケールリング則が成立しているとしている。このような方向での測定は、一次宇宙線核種及び相互作用を調べる有力なものとして、進歩が期待される。

その他の主なトピックスをあげると、(i) p-Air 衝突の非弾性散乱の断面積は 10^{18} eV まで $290E^{0.08}$ mb (E: TeV) で増加、(ii) 20 年来のダブル・コアの頻度及び p_T 分布は QCD によるジェット生成として説明出来ること、(iii) EC と AS アレイの連動による相互作用の研究、(iv) 電子成分、ミューオン成分、ハドロン成分の到着時間分布の中の 2 山構造、等である。

OG セッションでの 1×10^{19} eV 以上の一次宇宙線について附言する。シドニー大学の新しい報告によると、エネルギー分布はやはり 1×10^{19} eV 以上でフラットになり、3K の輻射による 3×10^{19} eV での cut off を示さずに 10^{20} eV 迄のびており、等方性を否定する程の異方性は無い。従って、北半球での観測で見られた銀河系北極方向の異方性に基づく Virgo cluster 起源説は再検討を要すると共に、 10^{19} eV 以上での統計をあげることが重要である。

ミューオン・ニュートリノ (MN)

地上のミューオン・エネルギー分布については、20 TeV まで Artyomovsk 100 トンシンチレーターによるバースト測定結果も Mutron の結果に一致して、 $\gamma_{\pi,K}=2.7$ の指数関数分布で説明された。従って、一次宇宙線は 100 TeV 迄 1 TeV 領域とほぼ同じエネルギー分布及び核種の存在比をもつと結論される。

加速器のエネルギー領域で発生断面積が知られているチャーム粒子の崩壊からのミューオンが、どのエネルギー領域から地上のミューオン・エネルギー分布に寄与してくるかの問題については、幾つかの計算が一致して大体 100 TeV 以上しか寄与が無いことを示した。また、この種のミューオンのパイオンに対する比

は実験データ解析からは 10 TeV 迄は 0.1% 以下であり、KGF グループもそれ以上のエネルギー領域で 0.1% 以下とした。Utah, Homestake, KGF のミューオン束のデータをモンテカルロ計算と比較して、 $10^{14}\sim 10^{15}$ eV の一次宇宙線は通常の組成でよいとする報告があった。また、ミューオンの核相互作用については、Mutron カロリメーターと Artyomovsk 100 トンシンチレーターのデータから、転移エネルギー TeV 領域で断面積のエネルギー依存度はほぼ一定であり、 $A^{0.9}$ の shadowing の影響が見られる。

おわりに

会議中に IUPAP 宇宙線委員会の会議が 3 回持たれ、1985 年はアメリカ・サンディエゴで 8 月 10 日～23 日に、1987 年はソヴィエトまたは英国で、1989 年はオーストラリアで開催することが決まった。また委員会は引き続き国際共同研究としての ECC 実験計画及び DUMAND 計画を支持することを決めた。

バンガロールは標高約 900m にあるため意外に涼しく、エクスカーションでは、KGF の陽子崩壊観測装置、郊外の古い寺院等を訪ねる機会に恵まれた。しかし、日本からの参加者の多くが、下痢、風邪による発熱に悩まされたのも事実である。

本稿は、XG-吉森、OG-近藤、MG-和田、SP-桜井、HE-長谷川、EA-永野、MN-北村による原稿を、菅がまとめたものである。

「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

標記の会議が 1983 年 8 月 29 日～31 日の 3 日間にわたり東京の日立製作所・中央研究所を会場に開かれた。この研究所と仁科記念財団、日本万国博覧会記念協会の後援、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、その委員長は中嶋貞雄(東大物性研)がつとめた。

‘量子力学の基礎’と‘新技術’をつないだ会議の意図は英語の標題 Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology がよく表現している。すなわち、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。’これは時代の動き—素子の微細化により種々の量子効果に出会いつつある新技術と、それを利用して従来は思考実験でのみ扱われてきた基本的問題を直接に実験にかけようとする努力—をとらえ、それに初めて明確な形をあたえたもので、この着眼を評価する声は会場でもしばしば聞かれた。事実、予想を越える講演申し込みで過密となったスケジュールのなかで、外国からの46名を含む166名の参加者が終始一会議の後にインフォーマルな討論集会を開いてまで一熱心な討論を続けたのである。

1984年には、‘巨視系の量子力学’長期研究集会がサンタバーバラの理論物理学研究所で開かれ、また‘量子力学の基礎’のシンポジウムがアメリカとヨーロッパで計画されている。日立での会議は、こうした動きを期せずして先どりすることになった。

さて、‘新技術に照らして’を標榜した今度の会議がとりあげた主題は：(1)アインシュタイン—ポドルスキー—ローゼン(EPR)の相関、(2)アハロノフ—ボーム(AB)効果、(3)中性子線の干渉、(4)巨視的トンネル効果、(5)量子光学、(6)量子力学的非破壊測定、(7)観測の理論、(8)量子論理、(9)量子力学の哲学、(10)量子ホール効果、(11)基礎的諸問題、これに(12)微細加工技術および情報処理の基本問題の特別講演が加わり、(13)将来への展望でしめくくられた。以上、3日間の直列配列、そして会議後にAB効果と中性子線干渉のインフォーマル討論会が開かれた。主題のほとんどは技術の近年の進歩に負うところが多い。ことに(2)に対して82年、日立中研の外村彰らが自ら開発した電子線ホログラフィーの技術により定量的にして決定的な証明をあたえており、これが会議のきっかけになったことは多くの人のびとの想像するところであった(T’s beautiful experiment has brought us here...).

そのAB効果とは、電子線が断面の有界な静磁場 B をまたいで $-B$ の両側に二手に分かれ B に触れずに通る場合にも、2本の電子線の間にそれらが囲む磁束に比例した位相差が生ずる現象である。電子の1体波動関数に対してシュレーディンガーの波動方程式をかけば、そこにベクトル・ポテンシャル A が入り、これの線積分として電子線の位相差は自然に得られる。しかし、電子の位置 $\hat{r}$ に対するハイゼンベルクの運動方程

式には電子の位置における磁場 $B(\hat{r})$ しか現れずこれはいま0だから、磁場は電子の運動には影響し得ないように思われる。実際これを根拠に A. Loinger はAB効果の非存在を強く主張していた。しかし、磁場が‘離れた位置の’電子に影響するというAB効果の‘非局所性’は電子の位置と運動量の非可換性からくるのであって、このことは C.N. Yang と Y. Aharonov とがそれぞれ講演のなかで指摘した。高林武彦は量子力学の流体力学形式によるAB効果の説明をあたえた。AB効果の非存在をいう主張は、ここに述べたものの以外の論点も含めて、すべて今度の会議で払拭された。南部陽一郎は、磁束の柱が格子状に配列された場合のAB効果は如何、という問題をだした。

巨視的トンネル効果の実験は、超伝導磁束計 SQUID における凝縮電子対の巨視的な量子挙動に着目してシュレーディンガーの猫に相当する巨視的‘重ね合わせ’状態を実現しよう、という A.J. Leggett の野心的な企てから派生したものである。超伝導状態はクーパー電子対の数 $\hat{n}$ とそれに共役な位相 $\hat{\theta}$ で記述される。超伝導体の輪を1点で切り開いてジョゼフソン接合するとその両側の位相の差 $\hat{\theta}_{12}$ に応じて電流 $\hat{i} = I \sin \hat{\theta}_{12}$ が流れ、系のエネルギーが $\hat{U}_0 = -(I\hbar/2e) \cos \hat{\theta}_{12} + (1/2)L\hat{i}^2$ だけ変化する。ただし L は輪のインダクタンス。輪の囲む磁束 $\hat{\Phi} = L\hat{i}$ はAB効果に似た位相差 $\hat{\theta}_{12} = (2e/\hbar)\hat{\Phi} + 2\nu\pi$ ($\nu=0, 1, \dots$) を生む。接合部の静電容量 C は、 $\hat{\theta}_{12}$ に共役な $\hat{n}_{12} = (\hat{n}_1 - \hat{n}_2)/2$ に応じてエネルギー $\hat{K} = 2(\hat{n}_{12}e)^2/C$ をもつので、この系のハミルトニアンは $\hat{\mathcal{H}}_0 = \hat{K} + \hat{U}_0$ 。いま輪に外から磁場をかけ磁束 $\Phi_{\text{外}}$ を通すとポテンシャルは

$$U_1(\hat{\Phi}) = -(I\hbar/2e) \cos(2e\hat{\Phi}/\hbar) + (\hat{\Phi} - \Phi_{\text{外}})^2/(2L)$$

に変わる。ただし、変数を‘輪を貫く全磁束’ $\hat{\Phi}$ に変えた。これに共役な変数は $\hat{N} = -2e\hat{n}_{12}$ 。このとき

$$\hat{\mathcal{H}}_1 = (1/2C)\hat{N}^2 + U_1(\hat{\Phi})$$

がハミルトニアンで、交換関係 $[\hat{N}, \hat{\Phi}] = -i\hbar$ から直ちに $\hat{\Phi}$ の運動方程式が得られる。この状況は質量 C の粒子がポテンシャル U_1 のなかを運動する場合と完全に対応している。

ここでは、 U_1 が底の近くで2カ所の谷をもつ W 型になり、その形は $\Phi_{\text{外}}$ を加減して変えられることに注意する。谷底の間隔はほぼ磁束量子 $h/2e = 2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ に等しい。もし上の‘粒子の量子力学’との類比が完全なら、すなわち SQUID を貫く磁束の時間変化が干渉

性を維持する波動関数 $\phi_i(\Phi)$ によって記述されるならば、ポテンシャルの二つの谷の間を—— NH_3 分子における N 原子のように——波束 $\phi_i(\Phi)$ が振動するだろう。 Φ を変えて片側の谷を深くして波束を集めてから、つぎに両側の谷を対称にしてやることで振動がおこせるだろう。その周期は 50 ms くらいにできる。ただし、 Φ の観測をすると波束の収縮がおこり振動は新規まきなおしになるから、時刻 0 に波束がどちらの谷にいるかを観測し、次には時間 t の後に観測して同じ谷にいる確率 $P(t)$ をもとめる。期待どおり振動がおこれば $P(t) = \cos^2(\Gamma t)$ の形になるはずだ。

R. de Bruyn Ouboter の報告した実験は、たいへんに興味ぶかく多くの情報をもたらしたが、しかし期待された振動は見出されず、 $P(t)$ は $(1 + e^{-t/\tau})/2$ となった。これはポテンシャルの一方の谷から他方への‘巨視的トンネル効果’と解釈される。実は SQUID の接合部に抵抗 R があって、上の $\hat{\mathcal{H}}_1$ から導かれる運動方程式にマサツ力の項 $R^{-1}d\hat{\Phi}/dt$ を加える。Leggett は、これが‘環境’による絶え間ない観測を意味し干渉性を壊しているのだ(番犬—watchdog—効果)と考え、環境を調和振動子の無数の集まりとするモデルで解析している。中嶋は SQUID の系を 2 準位系としてスピノンで表わし、同様の問題を調べてコメントした。

W.H. Zurek は、巨視的な系が古典的に見えるのも番犬効果によると主張した。

このように対象の状態を変えてしまうのが量子力学的観測の特徴であって、重力波の検出のように極微の振動(振幅 $\sim 10^{-18}$ m)を測らねばならない場合には特別の考慮が必要になる。既に 1968 年に B. Braginski は振動子 M の主量子数に観測を限って擾乱を避ける‘非破壊(non-demolition)測定’を提唱したが、今度の会議では M. Caves がその変形たる‘反作用逃れ(back action evading)の測定’を詳細に論じた。重力波のような振動的な外力を精度よく測るには、それが作用しているあいだ試験体振動子 M の運動を繰り返し測定しなければならない。そこで観測を M の位置座標 $x(t)$ に限るのだが、測定による M の運動量の不確定から以後の座標 $x(t)$ にくるはねかえりが不可避とはいえ‘ M の振動の半周期ごとに 0 となること’を利用する。

現実には試験体の振動数 ω に幅 $\Delta\omega$ があるので測定誤差 $\Delta x \geq (\Delta\omega/\omega)^{1/2}a$ は避けられない。 a は M の零点振動の振幅。他方 M に力 $F_0 \cos \Omega t$ が共鳴的に ($\Omega \sim \omega$)

時間 $\tau_F \geq 1/\omega$ だけはたれば、 M の振幅に $F_0\tau_F/2M\omega$ の変化を生ずる。したがって検出可能な力の最小値は

$$(F_0)_{\min} \cong (2M\hbar\omega)^{1/2}\tau_F^{-1}(\Delta\omega/\omega)^{1/2}$$

となる。ただし、振動子の減衰時間 τ_* は十分に長く $\omega^{-1} \leq \{\tau_F, (\Delta\omega)^{-1}\} \leq \tau_*(\Delta\omega/\omega)$ が成り立つとしている。後の不等式は、測定時間 τ が後の二項の間に入るべきことと、減衰をもたらす環境との接触による揺らぎが無視できるとの要求からくる。この不等式から $\Delta\omega$ の下限がきまり $(F_0)_{\min}$ は振動子の減衰時間により、したがって Q 値により制約されることになる。 Q の大きい合金が東大の平川グループにより発見されたことを講演者 Caves も述べていた。あと数年で測定は量子限界に到達できるという。この種の測定を電気回路で手習いする実験の計画を B. Yurke が報告した。

A. Aspect の報告した EPR 相関の実験は、A. Einstein と P. Podolsky, N. Rosen が 1935 年に提出したパラドックスを‘原子の $4p^2\ ^1S_0 \rightarrow 4s4p\ ^1P_1 \rightarrow 4s^2\ ^1S_0$ なるカスケード遷移で反対方向に出た光子を遠く離れた二人の観測者 A, B がそれぞれ観測するとき、A が置く偏光板の方向 a により B の偏光板 b の透過確率が変わる’という形で検証したもの。詳しくいおう。方向 a, b の偏光板をそれぞれの光子が透過する確率を $P_{++}(a, b)$ と書くなどすれば、量子力学は奇妙にも強い相関を予言する：

$$P_{++}(a, b) = \frac{1}{2} \cos^2(a, b), \quad P_{+-}(a, b) = \frac{1}{2} \sin^2(a, b)$$

等々。そして、これは観測者 A, B の距離 L がどんなに大きくても成り立つはずなのだ。Aspect の実験では L は光のコヒーレンス長の 4 倍あるから、偏光板を通るとき二つの波束はすっかり分離している。それでも量子力学の予言どおりの相関が認められた。いま

$$E(a, b) = [P_{++} + P_{--} - P_{+-} - P_{-+}](a, b)$$

から

$$S = E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b')$$

を定義すると、もし相関が‘局所的な’隠れた変数によるのなら、いわゆる‘一般化されたベルの不等式’

$$-2 \leq S \leq 2$$

が成り立つ。いま、Aspect に従い a, b, a', b' が同一平面上でこの順に 22.5° の角をなす場合をとれば、量子力学の予言は $S_{QM} = 2\sqrt{2}$ をあたえ、ベルの不等式を破る。したがって、この不等式の成立を示せば‘局所的’という制限つきにもせよ隠れた変数の存在を排除

できることになる。Aspectの実験結果は、 P_{++} 等で既に量子力学に合っていたから不等式は破るのだが

$$S_{\text{exp}} = 2.70 \pm 0.015.$$

破れが標準偏差の40倍以上あるのは印象的だ。因に1976年のE.S. Fryらの実験では $S'_{\text{exp}} = 2.046 \pm 0.008$. (a, b 等はちがう。) なお量子力学の予言 S_{QM} は偏光板の条件を考慮すると多少とも修正され2.70になる由。

J.A. Wheeler は偏光板の方向設定を光の波束が到着する直前まで遅らせる遅延選択 (delayed choice) の実験を提案して言う: 量子力学が正しければ 'A phenomenon is no phenomenon if it is not observed.' もし遅延選択の実験でも相関が残るなら、一方の選択の影響が他方に超光速で伝わることになる。この実験を Aspect は '偏光板の方向 a, b を互いに独立に自己相関時間 $< L/c$ でランダムに変える' ことで行いたいという。現在は A, B それぞれに方向の異なる2枚の偏光板をおき '超音波 (25 MHz) の定在波と光の相互作用で動かす光スイッチ' で切りかえている。その間隔は 10 ns で $L/c = 40$ ns の $1/4$ 。会議のときまでの10時間の実験でベルの不等式は標準偏差の5倍まで破れていることが確かめられた。

ところで、光より速く伝わる相関があるなら超光速の通信が可能ではないか? 否。EPRの現象は確率的で制御不能だから——。A. Shimony は、ベルの不等式の J. Jarret による分析にもとづき、これが成り立たない '非局所的' 隠れた変数の理論 (D. Bohm, J.-P. Vigiér) のなかに制御可能な場合のあり得ることを論じた。

なお、長沢信方のエキシトンに関する実験の中山正敏による理論は EPR 相関と深く関わっている。この会議のなかでは極めて自然に受け入れられたようだ。

H. Rauch の中性子干渉実験は原子炉からの中性子線から運動量のそろった部分 (波長 $\Delta\lambda/\lambda \leq 0.5\%$, 方向の開き $\leq 1^\circ$) を 'Si 単結晶 (長さ 10 cm, 直径 5 cm) から3枚の壁が山形に立つ形を切りだした' 干渉計に通す。中性子は高々 1.3×10^8 個/cm²・s にすぎず、入射間隔 0.78 ms は干渉計内滞在時間 35 μ s よりはるかに長いから、干渉は確実に1体のものである。中性子の波は干渉計の第一の壁で一部ラウエ反射 (見かけは屈折?) されて二手に分かれ、第二の壁による反射により第三の壁の上Aで合流する。波が二分されている場所で一方に (a) 薄板を通過させて位相をずらし、あ

るいは (b) 磁場をかけスピンを回転させる等ができる。(b)により 'スピンの 4π の回転で初めて中性子の波動関数はもとに戻る' などスピンの性質が直接に検証された。興味ぶかいのは、干渉計を静磁場 B_0 内におき、二手に分かれた一方の波に高周波をかけて磁気共鳴でスピンを反転させる実験。いまのところこれで干渉性が失われないことの確認に止まっているが、光子の吸収・放出を観測すれば中性子の径路が知れA点での干渉は消えるはずである。

紙数がつきた。興味ぶかい実験を積み残し、また町田茂・並木美喜雄の観測論など理論に触れ得なかったのは残念至極。町田・並木、外村、中山の仕事は、この会誌や雑誌・科学などにも発表されているので参照を! 会議のプロシーディングスは1984年3月までには物理学会から発行される。既に出た報告は、1983年に高林武彦: 自然12月号, 江沢洋: 科学11月号, 1984年に並木美喜雄: 蟻塔1-2月号。

第16回電離気体現象国際会議 (ICPIG-16)

慶大理工 真 壁 利 明
徳島大工短 森 一 郎

1. はじめに

標記国際会議 (International Conference on Phenomena in Ionized Gases) が1983年8月29日から9月2日にわたって西独 Duesseldorf 市郊外の University of Duesseldorf で開催された。会議はポスターセッション (398件), 招待講演 (一般講演8件, 課題講演27件), 討論セッションの形で進行され, 見学会, ディナー, コンサートが催された。参加者は34カ国から500余人を数えた。一般投稿論文は16のトピックスに分類され, Grenoble (1979年), Minsk (1981年) 会議と同様全てポスター形式で発表された。それらのトピックスを列記すると, 1. General plasma properties, 2. Wave in plasma, 3. Plasma-beam interaction, 4. Plasma in astrophysics, 5. Physical bases of plasma chemistry, 6. Nonideal plasmas, 7. Elementary processes in gases and plasmas, 8. Electrode and surface effects, 9. Breakdown, spark development, Townsend and corona discharges, 10. Glow and arcs, microwave discharges, 11.