

●故 A.D.サハロフ博士生誕70年記念論文*

長さの素量は存在するか？

A.D.サハロフ／小島英夫（静岡大学）訳

■素粒子物理学の特徴

全世界の科学者が素粒子物理学に期待する非常に重要な結果の一つは、実用的にも一般哲学的な意味でも、たぶん空間、時間および因果律に関する基本的理解の一層の正確化であろう。基本原理のその種の変更は、その他のどの物理学分野においても期待できない。

またわれわれは次のことを確信している：その他の分野の任意の現象は、たぶんより強力な数学的手段と新しい実験データ（たとえば、近年における超流動や超伝導現象にたいして起こったような）をつかうことによって、既知の原理を基礎にして最終的に解決できるであろう。

しかし物理学が、素粒子自身の質量、電荷およびその他の性質、その相互転換と相互作用を説明しようと試みるとすぐに、現在知られている基礎原理は物理学のこの領域では不十分なのだ、という印象が起る。素粒子加速器と天然の加速器——宇宙線——とを用いた実験的研究は、絶えず予期しない現象を発見している。最近の10年間だけでも、非常に奇妙な性質をもった数十個の素粒子が発見された。その中には2種のニュートリノ（電子ニュートリノと μ ニュートリノ）の存在の確認、鏡映の際と粒子の反粒子への転換の際、および物理的過程の流れの向きを反転した際の自然法則の対称性の乱れの発見がある。

最後の対称性の乱れは、特に注目値する：それは、これまで現象論的な記述においてさえ起らなかった。

筆者は、自分が素粒子物理学の専門家だと思うにはかなりの拡大解釈が必要だが、それにもかゝ

わらず、この論文で素粒子論の基本問題の一つである、いわゆる長さの素量 elementary length の問題を取上げることにした。空間と因果律に関する現代科学の基本概念（すなわち、相対性理論と量子論）の適用領域には、原理的な限界が存在するか、その限界の外に横たわる“小尺度”の現象を何らかの新しい、一層抽象的で深遠な物理的概念と数学的方法を用いて記述する必要があるかどうか、が問題である。

■長さの素量の問題

この論文では、何らかの新しい、目を見張るような発見が話されるのではない。こゝでの基本的な主張は、否定的なものである。筆者の立場は次のように要約できる。科学の原理的な基礎（今まで確固としていた、長さや時間間隔の概念のような）についての問題においては、何らかの前進と意味の正確化が、専門家以外の人々にも興味をひくに違いない。それゆえ、状況が完全に明瞭である訳ではないにもかゝらず、現代理論物理学の最先端の話題から、思想の苦闘の一つのドラマを、筆者の考えに従って述べることは意味があるに違いない。

量子論が成立する前に、電子を点状の粒子として取扱おうとしたとき、点電子の静電エネルギーの値に困難が生じた。表面に電荷をもった小球の

* この論文は、故サハロフ博士（1989年12月逝去）によって1968年に書かれたものであるが、彼の生誕70年を記念してKbafim誌（1991、5月）に多少手を加えて再録された。この論文の現代的意義について、末尾にアカデミー会員D.A.キルジュニツの注釈（訳者が要約して掲載）が付されている。なお、筆者のサハロフ博士については、B.ファイネルクの回想が、本誌1990年6月号に掲載されている（訳者）

静電エネルギーは $W=e^2/2r$ に等しい。ここで e は電荷、 r は半径である (cgs 静電単位)。一般に電荷密度が半径方向に任意の分布をしていても、 W は e^2/r のオーダーである。点状の電子では $r \rightarrow 0$ であるから、 $W \rightarrow \infty$ となる。アインシュタインの関係は、エネルギー W と静止質量 m の間に $m=W/c^2$ の関係があることを示し、点電子の質量は無限大になる。もし $m=e^2/rc^2$ とおいて、 m に実験的に得られた電子質量を用いると、 $r=2.8 \times 10^{-13}$ cm が得られる。この長さ r を“古典電子半径”と呼ぶ。

量子論が生れると、状況は一層複雑になった。まず量子論によれば電子の電磁エネルギーの式は変わり、同じ r に対してずっと小さな数値を与える。古典の場合と同様に $r \rightarrow 0$ のとき $W \rightarrow \infty$ という困難は残るが、 W は r^{-1} ではなく $\ln(r^{-1})$ に比例する。さらに、電子を点と考えると、理論的に計算される他の基本量——粒子の相互作用力や散乱と崩壊過程の確率など——にも原理的困難が生ずる。ところが、点状でない粒子の考えは、相対性理論の原理と齊合せることが非常に難しいのである——大きさのある荷電粒子では、信号を光速より速く伝搬させることができない。

■ハイゼンベルクの問題提起

素粒子の量子論は、論理的にも数学的にも完全ではないに違いない、という予想が生れた。この予測は (1930年代に)、量子力学の建設者の一人である W. ハイゼンベルクによって明確に表明された。彼の考えの筋道は次のようにまとめられる：素粒子論の困難は深く原理的な性格のものであり、基本原理に関係している。それはちょうど相対性理論の誕生以前の、運動物体の電磁現象の理論や、量子論の生まれるまでの原子現象の理論の困難のようなものである。

電磁気学の困難は、同時性のような自明に思える概念を考え直し、正確にすることなしには克服できなかった。相対的理論の新しい公式は、そのような概念の、認識論的な再検討の2次的な産物にすぎない。“粒子—波動の2重性”の困難も、より深い概念——相補性原理、波動関数の総計的解釈など——を要求する。ハイゼンベルクによれ



ば、素粒子を点と見ることの困難は、現在の理論に素粒子の質量と電荷の値を決定する規律がないことと同時に、“小尺度”の現象に対する空間、時間および因果律に関する概念自体が、不完全で不正確であることにすべての原因がある。

ハイゼンベルクは、アインシュタインの相対性理論がガリレイ—ニュートンの空間—時間 (時空) に関する考え方と相違する点に着目する。相対性理論では、速さの絶対的な単位として、相互作用が伝搬する最大の速さが導入され、その値は真空中の光の速さに等しい ($c=3 \times 10^{10}$ cm/s)。 c より非常に小さい速さでは、相対論以前の考えが成立する。同様に、量子論と古典論 (“非量子的”の意味で) の境界は、[エネルギー×時間]の次元をもつ、もう一つの基本定数、プランクの \hbar で決められる。 \hbar は二つの“量子準位”のエネルギー差と量子遷移の振動数 (“脈動”の振動数) の間の比例係数である：

$$E_1 - E_2 = \hbar \omega$$

(ω を角度単位 rad/s で測ると \hbar の数値は 1.05×10^{-27} erg·s である；プランク自身は振動数 $\nu = \omega/2\pi$ を s^{-1} で測り、定数を $h=2\pi\hbar=6.6 \times 10^{-27}$ erg·s と決めた)*

古典的な記述はマクロな過程を研究する際に成り立つ。例えば、アンテナからの電波の送信の場合で、このとき送信エネルギー W は1個の量子のエネルギー $\hbar\omega$ より、とてつもなく大きい。励起された原子から1個の光子が放射され

*) ふつう物理学者は、一般に使われる単位系 SI の代りに cgs 系を好む。この系ではエネルギーの単位は erg であり、 $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$ の関係がある。もし、ある量をこの単位系で測って、その単位に特別の名前がないときには cgs 単位と書く。(cgs は centimeter, gram, second の頭文字)

る場合の研究には、古典的な記述は適用できない。

ハイゼンベルクはさらに、1個の粒子から他の粒子に大きな運動量、したがって大きなエネルギーの伝達が起るときに、すなわち非常に短いド・ブロイ波長をもつ粒子の近距離衝突において、素粒子論の困難が生ずることに着目した。それゆえ彼は、次のような命題を提起した：ある長さの素量 (elementary length) l_0 において、われわれが既に知っている量子論と相対論の法則は成り立たなくなり、そこから先ではそれらの理論より一層抽象的な、新しい概念が導入されねばならない。彼は自分の仮定の第1段階として、 l_0 に古典電子半径 $r = e^2/mc^2 = 2.8 \times 10^{-13}$ cm をとった (m : 電子の静止質量)。

彼によれば、まさに長さ l_0 が素粒子の特性的な尺度を与える。質量単位として $h/cl_0 = 70 \text{ MeV}/c^2$ をとると、次のような素粒子の静止質量が、良い精度で表現される (表は最近のデータで補ってある)。

粒子	静止質量 (h/cl_0 単位)
μ 粒子	3/2
π メソン	2
K メソン	7
η メソン	8
陽子, 中性子	13.5
Λ ハイペロン	16
Σ ハイペロン	17
Ξ ハイペロン	19
電子	1/137
フォトン, ニュートリノ, グラヴィトン	0

■自然単位系

少し横道にそれるが、次の事実に注目しよう。現代の素粒子論における二つの“自然”単位 c と \hbar (その次元は $[c] = \text{長さ}/\text{時間}$, $[\hbar] = \text{エネルギー} \times \text{時間}$ である) では、任意の測定単位系の基礎にある3個の基本単位 (例えばSI系では m, s, kg) のうち、長さ (例えば、長さの単位 L) だけが任意に選べる、と考えられる。 L が決まれば、時間の単位は $T = L/c$ で、質量の単位は $M = \hbar/Lc$ で、エネルギーの単位は $W = \hbar c/L$ で決まる、など。理論物理学においては、通常 $\hbar = c =$

1 をとり、すべての量を長さのべき (何乗か) で測る；そうすると公式は非常に簡単になり、公式から係数 \hbar と c とが消えてしまう。運動量 p , 質量 m およびエネルギー W は、長さの逆数の単位 (例えば cm^{-1}) で表される。そして、エネルギーと運動量にたいする相対論的な表式は次のようになる：

$$W = m/\sqrt{1-v^2} = \sqrt{m^2 + p^2},$$

$$p = mv/\sqrt{1-v^2}.$$

磁気モーメントは、長さの単位、すなわち質量の単位の逆数で表される。例えば、電子の磁気モーメント (いわゆる単位モーメント、すなわち“ボーア磁子”) は $e/2m$ に等しい。残りのすべての物理量が同様に表される。この“1次元”単位系をつかうと、質量あるいは長さの単位として、研究対象に個有の量 (例えば質量に \hbar/cl_0) を選ぶときに都合がよい。今後はこの単位系を使うことにして、ハイゼンベルクの理論に戻ろう。

■現代素粒子物理学の状況

彼がその考えを発展させた当時、素粒子のリストにはわずかに電子 (とその反粒子—陽電子)、陽子、中性子およびフォトンしか無かった。現在、そのリストは数十個の粒子を含むまでに拡大されている。 μ 粒子と2“種”のニュートリノが加わり、それに電子とそれらの反粒子を加えたグループは、弱い相互作用をする粒子としてレプトン族を構成する。また一連の新しい、強い相互作用をする粒子が発見された；その中で非常に短い寿命をもつ粒子は共鳴粒子と呼ばれるようになった (例えば上表の η メソン)。強い相互作用をする粒子、すなわちハドロンは二つの大きなグループに分けられる。バリオンと呼ばれる粒子は、陽子および中性子と似た性質を持ち (長寿命のバリオン Λ , Σ , Ξ はハイペロンと呼ばれる。表参照)、メソンと呼ばれる粒子には、核力に関与する π メソンと ρ メソンおよび表に示した K および η メソンが属する。

もはや、これら自然に存在するすべての粒子の質量が $1/l_0 = 70 \text{ MeV}$ のオーダーでなければならないと考える根拠は何もない ($\hbar = c = 1$ としているので、1 MeV はエネルギーの単位である

と同時に、質量、運動量および長さの逆数の単位でもある)。例えば、極めて大きな質量をもつ(たぶん安定でない)粒子が存在することを予想することも正当化される。したがって、ハイゼンベルクが用いた長さの素量の数値の“経験的な”論拠にも意味がないだろう。上に注意したように、量子論ではその値が一層小さくなるので、電磁質量の古典的評価についての論拠も意味を失う。この事情はわれわれにとって重要である。

ハイゼンベルクは $1/\hbar = 70 \text{ MeV}$ より大きなエネルギー領域では、素粒子の相互作用法則に現在の理論からの顕著なずれが見出される筈だと予想した。宇宙線の中に透過能の大きな粒子が発見された時、それが大きなエネルギーを持つ電子で、それゆえ量子電気力学に“従わない”ためだという予想がなされた。しかし間もなく、それは質量が電子の200倍のふつうの粒子 (μ 粒子と名づけられた)であることがわかり、透過能は単純に説明された。今のところ、現在の理論が崩壊することを示す現象は知られていない。その状況を少し詳しく見てみよう。

現代物理学には、4種の相互作用が知られている：

1. “強い”相互作用。その典型的な例は核力である。
2. 電磁相互作用
3. “弱い”相互作用。 β 崩壊の過程に関与する。
4. 重力相互作用

最も完全な定量的理論と最も完全な実験データが電磁相互作用に対して存在し、それゆえ現在の理論からのずれを見出すには、正にこの領域が最も適当だと思われている。今までになされたすべての試みは、否定的な結果を与えている。こゝでそのいくつかを説明する。このような重要な問題では、否定的な結果でさえ意味がある。またこの問題は現代物理学の他の分野とも関連をもち、それ自体の興味もある。

■異常磁気モーメント

素粒子の電磁的性質の中で、現在最もよく研究されているのは磁気モーメントである。1925年にウーレンベックとハウシュミットは、電子が小さなこまに似て力学的回転モーメントを持ち、その

値は $1/2$ (\hbar 単位で) に等しい、と仮定した。さらに電子は $e/2m$ に等しい磁気双極子モーメントを持っている。この仮定は、分光学と磁気現象の研究において、正しいことが検証された。イギリスの物理学者ディラックは、この仮定が相対論と量子論の方程式に従う、点状の荷電粒子としての電子の性質と一致することを示した。

しかし、1930年に次のことが明らかになった。陽子の磁気モーメントは $e/2m_p$ の2.9倍である (m_p は陽子の質量)。さらに、中性子に磁気モーメントが存在することを、ソヴィエトの理論物理学者タムとアルトシュールが予言し、アメリカの科学者アルパレスが実験的に見出した。中性子は電氣的に中性で、上の公式によれば磁気モーメントはない筈であった。現在 $\mu_0 = e/2m$ (m は粒子の質量) という量は正常磁気モーメントと呼ばれ、それ以外の値は異常磁気モーメントと呼ばれる。陽子と中性子における異常磁気モーメントは、その内部構造にもとづくと考えられている。強い相互作用をする粒子の一般論の成功にもかかわらず、この結果の満足な理論はない。

1947年までは、電子には異常磁気モーメントが存在しないと考えられていた。しかし、電子の磁気モーメントと陽子のその相互作用エネルギー^{*)}の研究は、一定の不一致が存在することを示した：それゆえ、アメリカの理論物理学者プライトが予想し、まもなくカッシュとフォリが実験的に明らかにしたように、電子には非常に小さな異常磁気モーメントが存在する。その相対値 $(\mu - \mu_0)/\mu_0 = a$ は約 1.2×10^{-3} である。電子の異常磁気モーメントの理論は、アメリカの物理学者シュウインガー (1948年) をはじめ幾人かの物理学者により考えられ、量子電気力学の数学的手法の完成による秀れた成果である。

シュウインガーによれば、相対異常磁気モーメントは

$$a = (\mu - \mu_0)/\mu_0 = e^2/2\pi = 1/(2\pi \times 137.03) \\ = 1.16 \times 10^{-3}$$

であり、電子または μ 粒子と真空の電磁的量子ゆらぎ (ゼロ点振動) との相互作用により決定される。

^{*)} このエネルギーは宇宙の原子状水素の波長21 cmの電波に対応する：この電波の研究が電波天文学の発達に重要な役割を果たしたことは、よく知られている。

場の量子論によれば、真空は単なる空虚ではない。よく知られているように、量子論は各々の系にエネルギー準位の概念(ボアの仮定)を導入する。この概念を真空に拡張すると、光子は真空の電磁振動の自由度の一つが励起された状態と考えられる。各自由度の基底状態は、光子が存在しない状態で、そこでは各時刻における電場の量子力学的平均値はゼロであるが、電磁場は存在する。なぜならば、考えている自由度に対応する場の振動はゼロにならず、量子的ゼロ点振動(量子的ゆらぎ)を行い、平均値(平衡値)のまわりに“確率の雲”を形成している。真空のゼロ点振動と荷電粒子の全相互作用エネルギーは、種々の波長のゼロ点振動との相互作用を含み、“外部”磁場が存在するときのこのエネルギーの変化が、異常磁気モーメントをひき起すと解釈される。

真空のゼロ点振動と電子の相互作用エネルギーは、この振動の運動量(波長の逆数)の可能な値に関する積分で表され(p_0 を積分限界として)、次の値に比例すると考えられる:

$$m_{e1} \sim e^2 \int_0^{p_0} m dp / \sqrt{p^2 + m^2} \approx \int_m^{p_0} e^2 m dp / p \\ = me^2 \ln(p_0/m).$$

磁場 H (磁場強度) が存在すると、被積分関数の表式は $e^3 H / p^2$ (次元の考察により) に比例した量に変る。それゆえ、磁場中の電子のエネルギー変化、

$$me^3 H \int_m^{p_0} dp / p^3$$

を $\mu - \mu_0$ に等しいとおいて(シュウインガーに従い)、

$$\mu - \mu_0 \sim me^3 (1/m^2 - 1/p_0^2)$$

(比例係数はシュウインガーによれば $1/4\pi$ に等しい)。

上の式で、 $p_0 \rightarrow \infty$ に対応して乗数 $(1 - m^2/p_0^2)$ を省略すると

$$\mu - \mu_0 = (e^2/2\pi)\mu_0 = e^3/4\pi m.$$

$p_0 \neq \infty$ のときには、異常磁気モーメントに m^2/p_0^2 に比例した補正が加わる。 a_{th} で理論値を表すと、現在の理論でその値は確かめられており、次の値をもつ:

$$\delta \equiv (a - a_{th})/a_{th} \approx m^2/p_0^2,$$

あるいは

$$p_0 = m/\sqrt{\delta}.$$

この式から、次のことがわかる。量子電気力学からのずれを研究するための最も“有望な”対象は、その異常磁気モーメントがゆらぎ的性格をもち、現在知られているうちで最も重い粒子である μ 粒子である(ソ連邦の物理学者ベレステッキーの意見)。

電子の異常磁気モーメントを研究するための最初の実験は、分子線の方法でなされた。この方法の発明は、古典的なシュテルン-ゲルラッハの実験に起源をもち、アメリカの物理学者ラビの功績が大きい。そして最も正確な a の値の決定(相対精度は電子に対し $\delta = 2 \times 10^{-5}$, μ 粒子に対し $\delta = 4 \times 10^{-3}$) がなされ、その後他の方法での実験が多くのアメリカの研究所でなされた。

それらの実験において、次の結果が得られた:
 $a = 1.162 \times 10^{-3} \pm 0.004 \times 10^{-3}$ (結果は μ^- 粒子のもので、 μ^- 粒子に対してはファルリとブラウにより同様の結果が得られた)。理論値 a_{th} はすべての補正をした結果 1.1654×10^{-3} であり、測定精度の範囲で実験値と一致する。

すなわち、このように決定された量 $\delta = (a - a_{th})/a_{th}$ は無条件に 4×10^{-3} より小さい。それゆえ、量子電気力学は $p_0 = m/\sqrt{4 \times 10^{-3}}$ より小さなエネルギーと運動量に対して、すなわち数 GeV より小さなエネルギーと運動量に対して、無条件に正しい ($1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV} = 10^9 \text{ eV}$)。

■対向粒子線の実験

量子電気力学を検証するもう一つの方法は、対向粒子線と呼ばれる、電子-電子および電子-陽電子衝突の実験である。対向粒子線はなぜ必要なのか? 相対性理論は、粒子の運動量ベクトル \vec{p} とエネルギー W を結びつけて、いわゆる 4 元ベクトルにする。3 次元ベクトルは座標系の回転の際にベクトルのスカラー積 ($\vec{a} \cdot \vec{b}$) が保存するという性質をもつ。しかし座標系のより一般的な変換であるローレンツ変換では、座標系の回転だけではなく、他の慣性系への変換も考慮され、アインシュタイン-ミンコフスキの 4 元スカラー積という、より一般的な量が不変量になる。2 個の衝突する粒子に対しては、エネルギー・運動

量ベクトルの4元スカラー積は次の形をもつ。

$$I = W_1 W_2 - p_{1x} p_{2x} - p_{1y} p_{2y} - p_{1z} p_{2z}.$$

明らかに、すべての定性的な主張、とくに現在の理論からのずれの効果は、不変量にだけ関係している。静止した電子 ($p_1=0$) に運動量 $p_2 = \vec{p}$ の電子が衝突する場合は、

$$I_1 = m \sqrt{m^2 + p^2}.$$

他方、 $\vec{p}_1 = \vec{p}$ 、 $\vec{p}_2 = -\vec{p}$ をもつ対向電子線の場合には、

$$I_2 = m^2 + 2p^2.$$

もし、 $p = 10^3 m$ (エネルギー 500 MeV) とすると、 $I_2 = 2 \times 10^3 I_1$ 。この値 I_1 と I_2 を比較すれば、対向粒子線の利点は明らかである。

ソ連邦における対向粒子線をつかした実験は、G.I. ブドケルの指導の下にノボシビルスクで行われ、素晴らしい成果をあげた。この実験でも (実験精度の限度内で) 現在の理論からのずれは見出されなかった。

このようにして、ハイゼンベルクによって提起された理論の限界 $l_0 = r$ は、はるかに大きなエネルギーの方へ押しやられた。この結果は、否定的なものであるとはいえ、現代の素粒子物理学にとって非常に重要である。

■プランク波長

ずっと以前に、アメリカの理論物理学者ウィグナーは、非常に小さな長さ $\Delta x \leq L_0 = 10^{-33} \text{ cm}$ 、 $\Delta t \leq L_0/c = 10^{-44} \text{ s}$ の測定という考え自体が、もし重力現象と同時に量子論効果を考慮すると、原理的な困難に出会うということに注意を向けていた。

アインシュタイン—ミンコフスキ空間の任意の2点間の (すなわち二つの“事象”の間の) 距離と時間間隔は、すべての他の物理量と同様に、量子ゆらぎ、ゼロ点量子振動を受けるはずである。この関係において、重力場は電磁場や他の任意の場と定性的に違う筈がない。 L_0 の大きさの評価は、次元解析により得られる。M.プランクはかつて次のように語った：重力定数の数値 $G = 6.67 \times 10^{-8} \text{ cgs 単位}$ と定数 \hbar および c をつかって、すべての量にたいする“自然”単位系をつくること (すなわち、上に述べた“1次元”単位

系から“無次元”単位系への移行) ができる。すなわち、長さの単位 L_0 は次のように決められる：

$$L_0 = G^{1/2} \hbar^{1/2} c^{-3/2} = 1.61 \times 10^{-33} \text{ cm}.$$

この長さ (プランク波長) に対応する時間の単位は、

$$T_0 = L_0/c = G^{1/2} \hbar^{1/2} c^{-5/2} = 5.35 \times 10^{-44} \text{ s}.$$

エネルギーの単位は、

$$W_0 = \hbar/T_0 = G^{-1/2} \hbar^{1/2} c^{5/2} = 2 \times 10^{16} \text{ erg} \\ = 10^{28} \text{ eV},$$

質量の単位は、

$$M_0 = W_0/c^2 = G^{-1/2} \hbar^{1/2} c^{+1/2} = 2.18 \times 10^{-5} \text{ g}.$$

上に述べたウィグナーの考えは、 L_0 と T_0 の大きさを空間と時間の記述の限界値に選んだことに相当する。一連の科学者、とくにソ連邦の A.S. カンパニエーツは、次のことを示した。量子電気力学で得られている電磁質量の値 $m(r^{-1})$ を用いるならば、電子の有効半径として L_0 の値をとっても電磁質量として大きすぎる値を導入することにはならない (古典電気力学におけるように)。

最近、ソ連邦のもう一人の科学者 M.A. マルコフは、次のような仮説を提案した。長さ L_0 (とそれに対応する質量 $M_0 = 1/L_0$) は、素粒子の最大の可能な質量を決定する：その粒子を彼は“マクシモン”と呼んでいる。よく知られているように、それ自体は不安定でありうる組成粒子から安定な粒子を構成するときには、全質量の減少が起る (プラウトの法則への小さな補正の形の質量の“欠損”は、核物理学において現れる)。それゆえ、マルコフの考えによれば、発見されている安定な粒子 (電子、陽子、その他) が質量の“自然”単位 $M_0 \approx 2 \times 10^{-5} \text{ g}$ より著しく小さい質量を持つことに戸惑う必要はない。

現在、ほとんどの物理学者は、まさに長さ L_0 がわれわれの認識における基本的な限界を決めている、という考えに傾いている。

しかしそれでも、 $r = 2.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$ と $L_0 = 1.61 \times 10^{-33} \text{ cm}$ の間に、何らかの中間的な特性長がある基本的な役割を演じていないかどうかを確かめることは大切である。この点に関しては今のところ、わずかな間接的な理論的根拠しかない。こゝにその種の議論の一つを紹介しよう。それは一般相対性理論の基礎の解析に関係してい

る。

■真空の弾性とゆらぎ

よく知られているように、重力場中の物体の運動は、アインシュタインの理論により記述され、“曲がった”時空内の最短経路に沿って動く。時空の“曲がり”のために最短経路は“直線”ではなく、

$$x=f_1(t), y=f_2(t), z=f_3(t)$$

の形の時空の“曲線”である。ここに f_1, f_2, f_3 は1次関数ではない。

この理論において、空間の曲率の大きさは、定性的に次のように表現される条件により決められる。質量（あるいはエネルギー）をもつ物体のまわりでは、空間に曲げの“力”（ここでは“力”が、ある一般的な意味で使われている）が作用する。同時に、空間は“弾性的”性質を持ち、自分が曲がることに抵抗する。これら二つの“力”の平衡が、最終的な曲がりの状態を決定する。ユークリッド幾何学で記述される性質からの空間の性質のずれは、通常は非常に小さく、すなわち“空間の弾性”は非常に大きい。

真空の“弾性”は何によって決まるのだろうか？ 次のように仮定することができる；それは真空の量子ゆらぎの変化である。われわれはすでに、異常磁気モーメントのシュウインガー理論に関連して、真空のゆらぎについて述べた。ここでも時空の曲がりに際して、このゆらぎは“より密に”なり、“岸からあふれる”ように真空のエネルギーの増加をもたらす。この効果は、もし最も“短波長の”ゆらぎを考えると、形式的には無限大になる。重力定数の値は“空間の弾性係数”に反比例し、 $L_0 \sim 10^{-33}$ cm より大きな波長をもつゆらぎに限定すると、正しい数値を与える。将来この考えが正しいかどうか分かるだろう。

それでは、 L_0 の限界の外はどうなっているのか？ 10^{-33} cm より小さい領域に 10^{28} eV より大きなエネルギーで起る過程の記述に対して、理論にはどんな変更が必要なのだろうか(大体理論があり得るのか！)？ 今のところ誰にも分からない。たぶん深刻な原理的変更が必要だろうことが予想される。 10^{28} eV のエネルギーは、現在実施できる限界を遠くはなれており(セルブホフの

加速器のエネルギー $(\sim 10^{10}$ eV)、この問題の最終的解明は近い未来の課題ではない。

注釈 (D.A. キルジュニコフ) の要約。

この論文が発表されてからの四半世紀近い年月の間に、素粒子物理学には著しい進歩があったが、それにも拘らず、この論文の価値が本質的には失われていないことは驚くべきことである。

この論文が書かれていたとき、後にノーベル賞を授けられたS. ワインバーグとA. サラムの論文が現れた。彼らとS. グラشوウの理論は、ミクロの世界の物理学の理解に突破口を開き、古い理論に存在した一連の困難を解決し、第3の(相対性理論と量子論に続く)革命なしで済ませられる見通しを与えた。

かくてハイゼンベルクが予想したような(サハロフが本論文で紹介している)革命なしに、改良的な方法で危機は回避された。現在の理論の基本認識の適用限界に関する、長さの素量の問題は消滅したように思えるかもしれない。

しかし、それは早まった結論である。まず第一に、現在の素粒子論においてさえ、時空像はプランク波長 $L_0 \sim 10^{-33}$ cm のオーダーの尺度では、十分に根本的な変化が起っているように見える。大きな尺度の空間測定では隠れていた座標と時間の量子的ゆらぎが、小さな尺度には現れているらしい。 L_0 という長さには、何らかの物理的意味があるらしい。科学の進歩は、かくて、サハロフの言葉を支持している：“…まさに長さ L_0 がわれわれの認識における基本的限界を決めている。”

さらに、現在の理論は、それが成功しているように見えながら、未だ実験的検証を得ていない。その根底には長さ L_0 があり、直接の実験では $l = 10^{-17}$ cm より大きな領域しか研究されていない。 l_0 より小さいが L_0 より大きい領域のどこかで、予期しない、新しい現象を実験が示し、長さの素量の真の意味を決定する可能性は否定されていない。それゆえ、サハロフによるこの大きさについての考察は、今後も意味を持ち続けるだろう。

このようにして、素粒子論の発展は、長さの素量の問題の深刻さを軟らげこそすれ、それを議題から取り下げはしていないのである。

(訳 こじま ひでお)