

12. 天体と地球の内部構造

大阪大学 基礎工学部 川井 直 人
都賀谷 素 宏

大分昔の話だが、Bernal は、固体水素が超高圧力下で圧縮される時、原子間距離が極端に減少し、電子が自由になって、格子中を流動すると考えた。ウイグナーとハンテントン (Wigner-Huntington)⁽¹⁾ が、この物質の金属状態をはじめて理論的に考察したことは、有名である。木星などの巨大な jovian 遊星は、大量の水素を有し、これらは星の大きい重力場の下に超高圧になっているので、彼等は全く自然に、金属状態の水素が、天体の核になるものと考えた。

次いで、Ramsey⁽²⁾ は、地球内部でも同様の超高圧力場が存在し、例えば、地下 2900 Km のところでは、硅酸塩鉱物を主とする金属酸化物絶縁体の s-p 混成軌道と、そのオープンバンドの重なりが、格子間距離のちぢちによって誘発され、今にして思えば、いわゆるモット転移が実現し、金属的地球核が形成すると思ったのである。

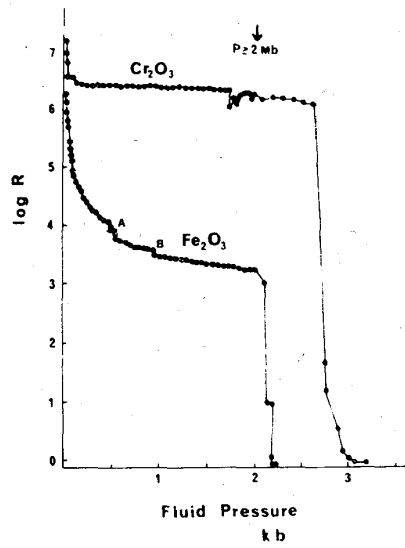
地球をはじめ、天体核は磁場をもっているばかりか、流体であることが必要であるので、この金属状態が圧力の下に生じる他に、固体-液体変態も伴わねばならない。しかし、1930年代の物理学は、物質の金属変態を確かめる高度の技術が存在せず、この種のミステリーは、紙の上に展開される理論上のものにすぎない。

戦後、Bridgman の、ノーベル賞受賞を契機として、圧力発生の研究が始められ、超高圧の世界が拓かれたことは申すまでもないが、後、間もなく、衝撃波を利用して、数メガバール (数百万気圧) の高圧が、マイクロセカンドとまだ極めて瞬間的ではあるが、この地上に実現した。一方、各種の高圧容器の改良から、静的圧力発生技術も最近急速に進展して、二百万気圧に近い超高圧力が半無限時間、実験室中に確保されつつある。

メガバールの領域では、絶縁体も数多く金属化することがわかり、川井等⁽³⁾⁽⁴⁾ は α -Fe₂O₃、Cr₂O₃、NiO、TiO₂ など、3d 遷移金属酸化物や、いくつかの III-V 化合物、VI 属元素等が、金属または半金属となることを確かめている (実例図 1, 2, 3)。

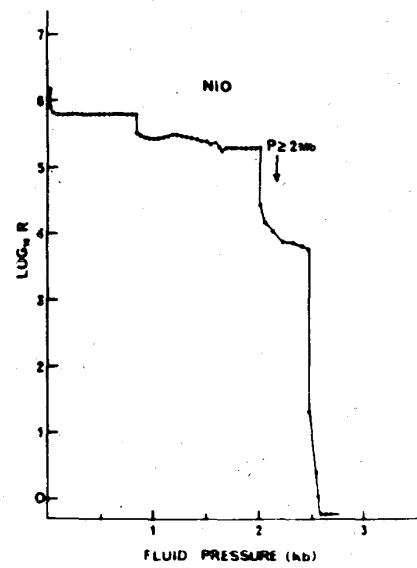
このような超高圧を発生するためには、大きいプレスと、特種な高圧容器を必要とするが、後者は研究者によってそれぞれ相異なり、特徴的である。私達のグループは、多段式

OSAKA UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
TOYONAKA, OSAKA, JAPAN



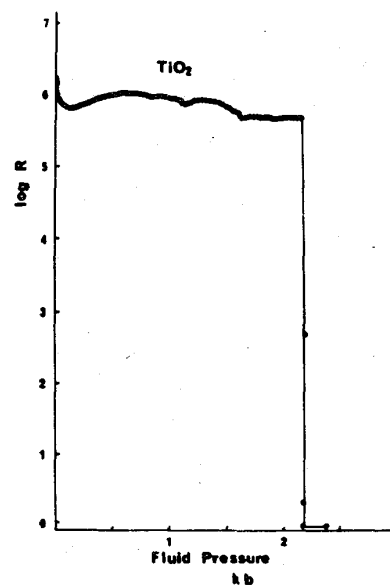
第1図

OSAKA UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
TOYONAKA, OSAKA, JAPAN



第2図

OSAKA UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING SCIENCE
TOYONAKA, OSAKA, JAPAN



第3図

分割球体という容器を試作した。第4～7図にその代表例を紹介するが，球体を径方向及び，それに直角にいくつにも分割し，中心部先端を切載してのち，再集合させる方法を研究した。この時，中心部に空間が形成されるが，これに嵌合する，或るいはより大きい体積をもつ試料を入れ，球の外表面から圧力を加えると，それが中心部の微小体積中に集中するように設計してある。現在のところ，圧力増巾率が極めて大きい上に，球体中には圧縮応力が高まっても，剪断応力が増大しない特徴が出て，球体の構成材料の選定にかなり無神経でも，加圧中または，その後に容器が破壊しない。

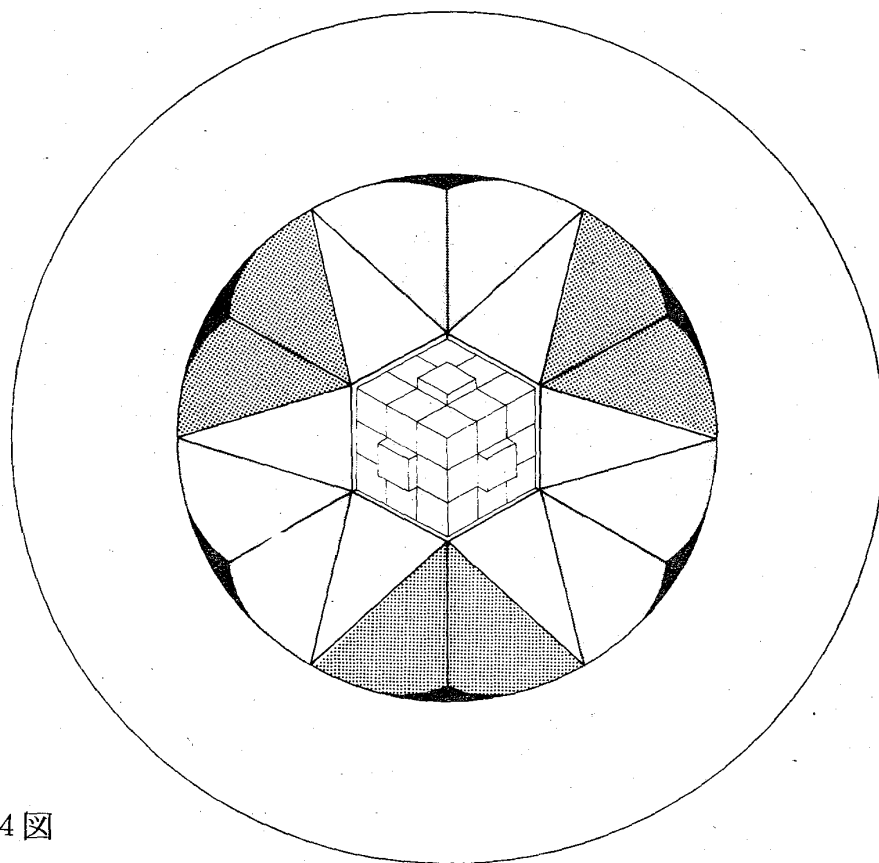
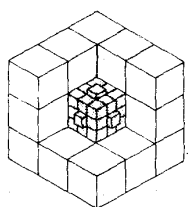
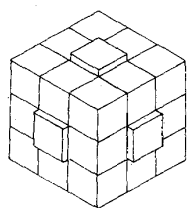
分割球の使用方法は，大別して2つに分かれる。その一つは，各分割片を均等な間隔を隔てて隣接分割片から分離しておき，圧延性の電気絶縁物スペーサーを介在させるのである。球を収縮させると，このスペーサーは，容易に薄くなり，これに対応して，中心部試料体の体積が減少する。しかし，間隙が初めから存在しているため，試料体の一部は必ずこれをぬって流出する性質があるが，流出物は間隙を満たし，分割片側面に強く圧縮されるため，強力な摩擦力が発生して，更に生じんとする流出が防止され，いわゆる圧力シールが，自動的に発生するというメリットがある。

分割球のもう一つの使用法は，各分割片を1個ずつ，均等間隙を隔てて分離するのではなく，例えば，6分割の場合には，3つつ2組に分け，3つを初めから1ブロックに結合しておく。そして，結合された2組のブロックを，相対的に移動させることで，中心部につくられる立方体試料室を均等に縮める方法を実行することができる訳である。

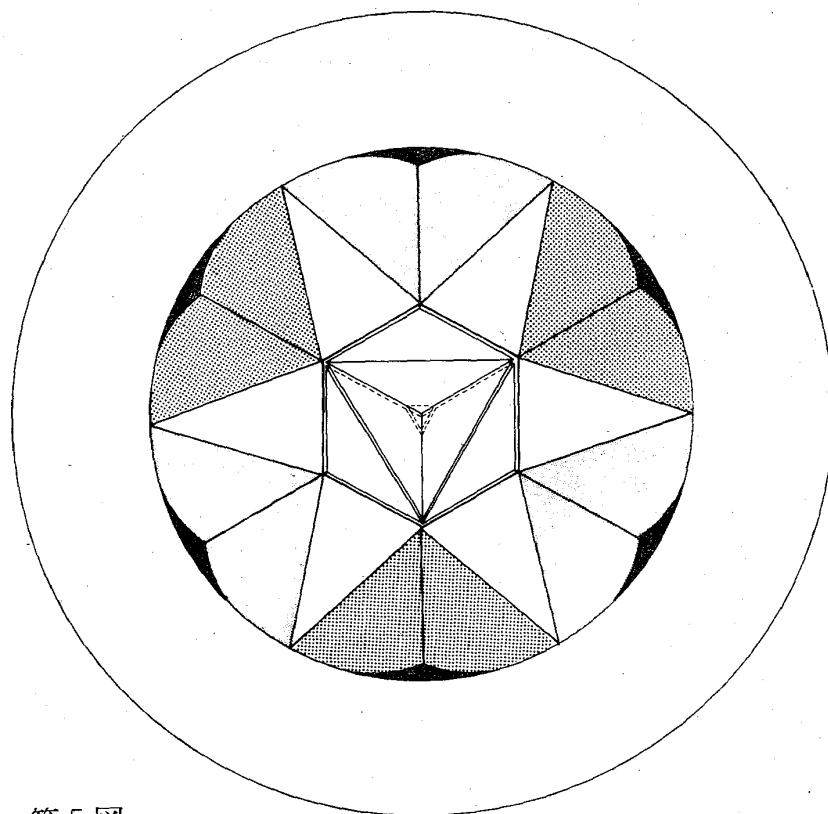
立方体は， 8 ， 27 ， 64 ， 5^3 ， 6^3 …… n^3 ，更に小さいディメンションをもつ立方体の集合体にもできるし，多段式配列も可能である。この場合たとえば27個の中心部の立方体，第4図の左に示すように分割して，相似形の同数の小立方体の集合体にし，この操作を続けてくり返すのである。この種の組み合わせでは，アンビル相互が密着していて球の収縮中に間隙ができないので，有効な圧縮ができる。

4分割球体では2個ずつ相互に密着させて2組にするし，8分割では2個ずつ4組か，4個ずつ2組にする。また，12分割片では3個ずつ4組，あるいは6個ずつまとめて2組にし，各ブロックを相互に接近させる。

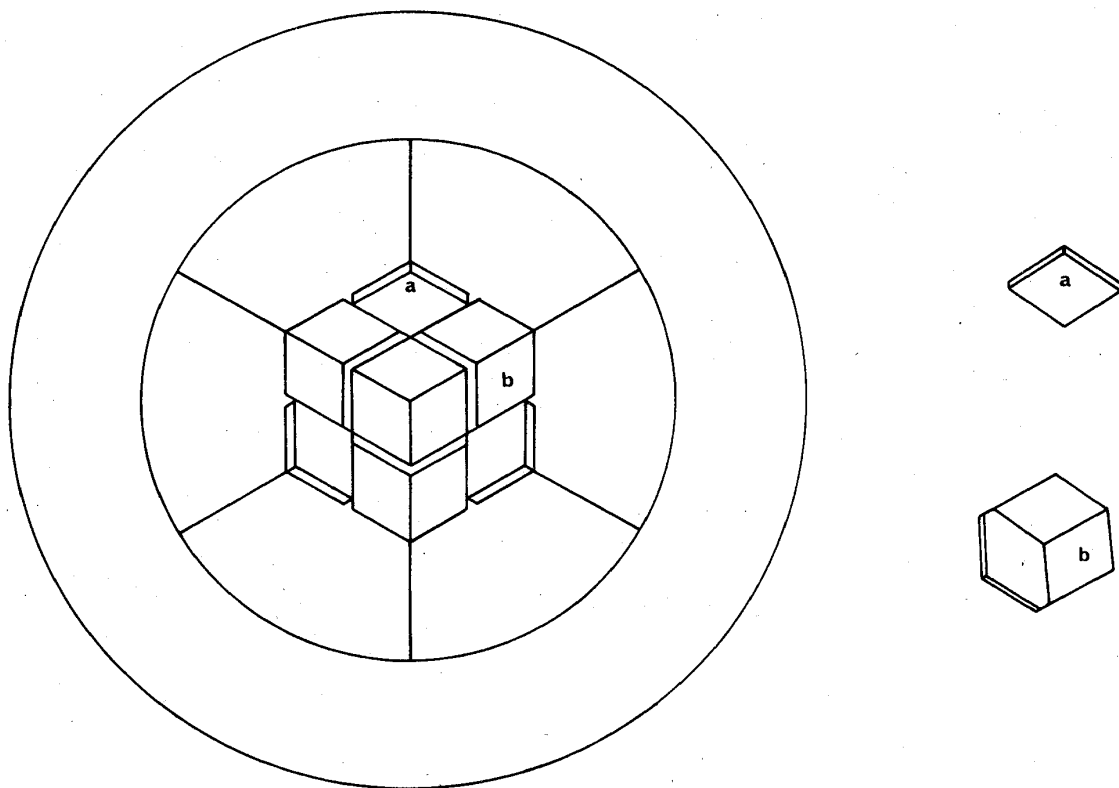
6分割の場合には分割片の3つを密着させ，各ブロックを上下2つの臼状内空間中に内蔵し，両者を相対的に近づけると良い。第4図には，上からこの組み合わせを見た時の図面が示されている。



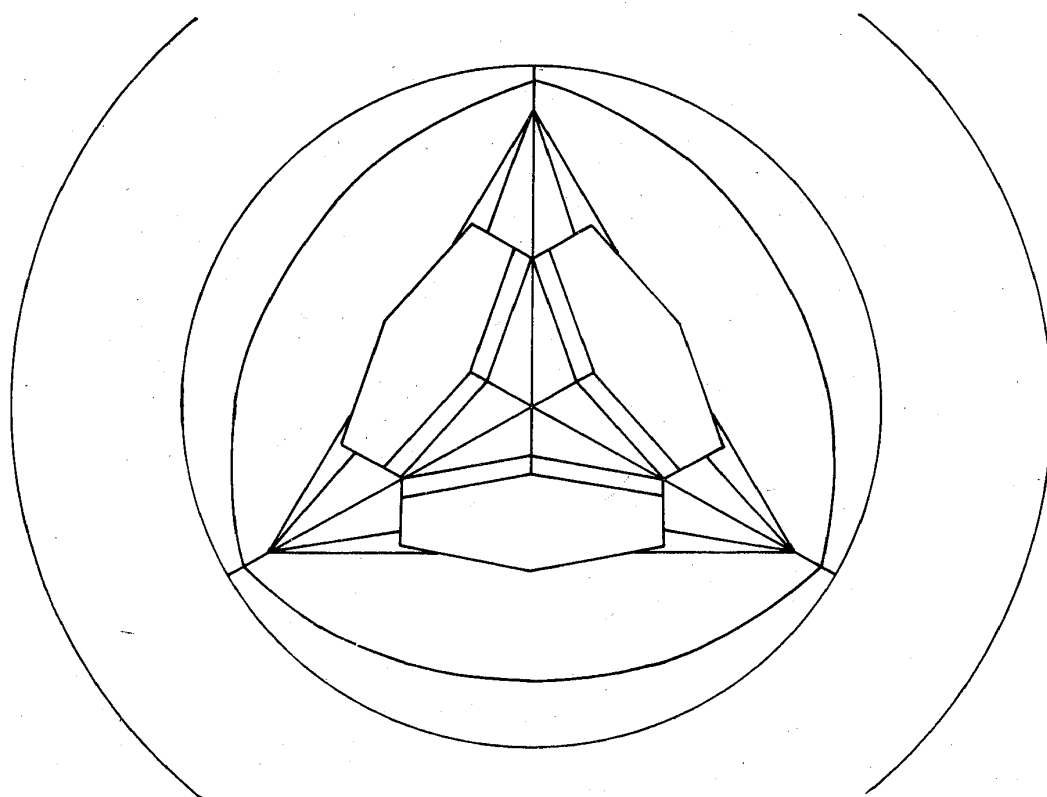
第4図



第5図



第 6 図



第 7 図

第7図は、4分割球体片の先端を平面で切載し、この上に6角柱4個、及び3つの3角平面でとり囲まれた12個のブロックで成る4面体が置かれたもので、球を完成するとき、中心部の試料空間を残して、間隙の全然無い立体ができる。

4面体表面に圧縮しやすい板を貼り合わせておき、球を圧縮すると、4つの6角柱は、中心部に前進し、試料体積が減少して、超高压が発生するが、間隙は初めから存在しないために、柔らかい試料でも逃げ出さない。

この組み合わせも、多段のオペレーションが可能である。第5図には、6分割球殻中に立方体を4分割したアンビル4個が入り、先端部に4面体の試料が形成される場合を書いておいた。6分割片と、試料の中間体は、外形が立方体で、これが4分割され、4面体試料空間をもつ。且つ、2個ずつ密着していて直交する立方体の $[111]$ 面に間隙があり、これが圧縮で狭くなりながら超高压力が発生する。

第6図は、12個の分割球片中に6つの菱形12面体と8つの $\frac{1}{4}$ 菱形12面体がすき間なくつまり、そのうち6つの12面体が中心部に進んで加圧出来る装置である。

さて再び話しを水素の問題にかえそう。最近 Gilman⁽⁵⁾ は、2水素弗化リチウム (LiH_2F) をつくり、これを圧縮すると格子中に高いプロトンの濃度が実現し容易に金属状態をつくることができるであろうと考えた。実験は、未だ成功していない。ソ連では、2年前から、また、最近は米国やフランスで、水素の金属化が大きいプロジェクトとしてとりあげられ出した。私はソ連の計画を、スコットランドにおける高压の国際学会の席で知ったし、米国のプロジェクトについては、メリーランド大学の Spain と、コーネル大学の Ashcroft の阪大訪問の際に知ることができた。いずれも常温または低温で水素を圧縮して、金属相を安定化するのが第一の目的である。米国のグループは、金属相が準安定な物質であると考えている。安定性は、ベリリウムのような金属パイプ中に入れておくと特に増加するという。ベリリウムの自由電子が水素の金属表面をとりまき、圧力が取り去られたあとでも、水素分子に戻る作用をおさえるのだという。水素の金属相は、固体水素の $\frac{1}{8}$ の体積で、ロケットの燃料に最適である。そのうえ、水素原子に解離する際、固体水素の4倍以上のエネルギーを放出する。エネルギーを圧縮して蓄積するには、極めて好ましい物質で、使いようでは強力な火力にもなる。金属水素の物性は、あまり知られていないが、大きい靱性と弾性定数をもつらしく、また臨界温度 (T_c) が異常に高い超電導体ではないかと期待されているし、常温では液体金属かも知れない。

超高圧相を安定に保つ方法は2つある。その一つは、極低温に冷凍すること、他は特種な高圧容器を、この目的のために特につくることである。宇宙空間は恒星からの副射熱を上手に遮断する限り、極めて低温であるから、つくった金属水素を、ロケットで地球外にうち出せば事は足りる。次いで、特種な高圧容器とは、金属水素を本格的につくる時、試料を含む容器を収縮させるが、この時、容器のメンブランス隣接面に、強い摩擦力が作用するようにしておき、収縮を強制してのち、メンブランスが元に戻ろうとしても、そうはさせないよう、工夫を少し加えればよい。例えば、第4図のような立方体の組み合わせや、第6～7図のようなブロック多段式積層容器をつくっておくと、この中心部では、金属水素を常温でも安定化しておくことができるはずである。この組み合わせ立体は、構成ブロック間に作用する摩擦力を、僅かの外力で増大することができるからである。プレス間にて加圧したのち、上下シリンダーをクランプ板で結合さえすれば、この伝導性水素を、ガスマイターの燃料のように、容易に貯蔵できる。

圧縮水素を6000気圧、約70°Kで、ベリリウムパイプ中に送り、先端の水素溜め自身が、分割球体の中心部試料にするとよいのであって、球が収縮して金属的になると、試料を通じる電流から判定し得る。

超高圧物理学は、地球深部の研究にも大変役に立つ。Ringwoodは、 Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 や MgSiO_3 - FeMgO_3 の研究を進め、地球マントルが隕石状物質でできるとすると、地震波の伝播から見出されている地球の径方向における密度の不連続性が、うまく説明できるとしている。最近伊藤等⁽⁶⁾は、 MgSiO_3 が、20万気圧1000°C程度で分解し、スピネル構造をもち γ 相と呼ばれる Mg_2SiO_4 と、ルチル構造のステショフ SiO_2 に分かれてしまうことを見出したが、この実験にも分割球体が使用された。

最近、 Mg_2SiO_4 が更に高い圧力下で、 $2\text{MgO} + \text{SiO}_2$ に分解する傾向を支持する実験が行なわれつつあり、 SiO_2 も終には金属化するのではないかと期待されている。

若しそうなら、地球の核は、鉄でできているのではなく、融解した石英で、甚だ重い比重8以上のガラス状物質である可能性が強くなる。

常温で石英ガラスを圧縮する実験を少し前に行った。ガラスの密度は、加圧中に上昇するのみならず、圧力を取り去った後でも、高い密度がガラスに残留する性質があり、Bridgman がこれを初めて発見した。後、RogやMackenzieが20万気圧まで実験をして、ガラスの高密度化が存在することを確かめてきたが、これ以上の実験がなく、私達⁽⁷⁾

が行なった。

衝撃波を利用して SiO_2 を加圧する研究は、米国の Wackerle と、ソ連の Altshuler 等で行なわれ、最高 200 万気圧まで加圧されている。私達は衝撃波でなく、静的圧力を作させたが、高密度化したガラス比重は、200 万気圧の圧縮状態に勝るとも決して劣らないであろうと考えられる。最高密度は、まだせいぜい 6 であって、地球核の比重には達していないが、密度推定は常温、常圧にとり出した被圧体を用いた。

物質は、如何に堅くても、有限の圧縮率をもっているのです、加圧中の密度は推定値よりもはるかに大きいに違いない。

また、この高密度化は、温度の増加函数で表わされると考えられている。実験は常温で行なったが、地球内部のような高温では、高密度化が増大するため、圧力が 2 Mb 以下でも 8 に近い密度が獲得されるであろう。

SiO_2 を中心核にもつ、新しい地球像をつくることも可能である。

文 献

- 1) E. Wigner and H. B. Huntington : J. chem. Phys. 3 (1935) 764.
- 2) W. H. Ramsey : Monthly Not. Roy. Astron. Soc.
Geophys. Suppl. 5 (1949) 409.
- 3) N. Kawai and S. Mochizuki : Phys. Letters 36A (1971) 54.
- 4) N. Kawai and S. Mochizuki : Solid State Communi. 9 (1971)
1393.
- 5) J. J. Gilman : Phys. Rev. Letters 26 (1971) 546.
- 6) E. Itoh, T. Matsumoto, K. Suito and N. Kawai
: Proc. Japan Acad., 48 (1972) 412.
- 7) N. Kawai, S. Mochizuki and H. Fujita
: Phys. Letters 34A No. 2 (1970) 107.