

1.はじめに

最近の新聞や雑誌で、C₆₀、バックミンスターフラレン(Buckminster Fullerene)、サッカーボール分子、フラレン(Fullerene)、またはバッキー(Bucky)などと呼ばれる記事を見かけるようになった。これらの名前は、1985年にC₆₀が図1のような構造を持つことを提案したSmalleyらによって付けられた⁽¹⁾。彼らは、レーザー蒸発・超音速膨張法によってC₆₀および一連の炭素クラスターの特殊性を観察し、その分裂実験等から、ちょうどサッカーボール形状に炭素原子が配置すると考え、その幾何学形状が一見してBuckminster Fullerの設計したドームと似ていることから、この名前を採用した。炭素クラスターはC₆₀に限らずC₃₂から始まって少なくともC₆₀₀程度の大きさまでC₆₀と同様の閉じたケージ状の幾何学構造をとるのでこれらをまとめてフラレンと呼ぶ。実は、炭素原子が60個集まってサッカーボール形状となると安定であるという発想は、世界に先駆け1970年に日本の論文で紹介されている。大沢⁽²⁾は、夢の芳香族分子として、C₆₀を考えHückel法によってその安定性を調べている。

フラレンの発見以来、真空チャンバー中で気体状態(Gas Phase)での実験的研究が続けられ、内部にK, Laなどの金属を含むC₆₀やC₇₀の発見、レーザー分裂、紫外光電子分光(UPS)実験などが続けられたが、1990年にKr tschmerと Huffmanら⁽³⁾によってフラレン(C₆₀, C₇₀)を生成・単離できることが分かり、フラレンの研究は新しい段階に入った。純粋な炭素は、その幾何学構造によりダイヤモンドと黒鉛との外見のまったく異なる固体になるが、これにC₆₀あるいはC₇₀などを含めた広義のフラレンが3番目の固体として発見されたことになる。ただし、黒鉛やダイヤモンドと違いフラレンは決まった大きさを持つ分子である。グラム単位のフラレンを実験の試料として準備する方法⁽⁴⁾およびフラレンの大きさごとに分離する方法⁽⁵⁾が示された後の研究の進み方は目を見張るものがあり、紫外・可視分光、赤外分光、ラマン分光、NMR、各種の化学反応、X線解析による結晶構造の同定に続いて、Hebardら⁽⁶⁾はK₃C₆₀薄膜の超伝導特性(T_c=18K)をみいだした。一方、C₆₀の空洞の中にLa, Kなどの金属が入った分子の単離が示唆されるとともに⁽⁷⁾、気体状態ではケージを形成する炭素原子をホウ素で置き換えることにも成功している。

今後、一連の僅かに性質の異なるフラレンが次々に用意できるとともに超伝導以外にもフラレン応用が進むことになるであろう。例えば、電池、マイクロ潤滑あるいはダイヤモンドを作る為の中間体等の応用の可能性がある。単離されたフラレンの研究はまだ始まったばかりであるが、現在の研究のペースはめざましく一ヶ月に50編以上の論文が発表されている⁽⁸⁾。本論文においては、気体状態(Gas Phase)に重点を置いてフラレンの研究を概観する。

2. 気体状態(Gas Phase)のC₆₀

2-1. フラレンの幾何学構造と分裂

図2にレーザー蒸発法によって炭素クラスターを生成する超音速ノズルの例を示す⁽⁹⁾。黒鉛のディスクにNd:YAGの二次高調波を照射して炭素を蒸発さ

せるとともに，上下のノズルからのヘリウムの超音速膨張によって冷却してクラスタービームを作る．この方法で生成された炭素クラスターの質量スペクトルは，例えば図3の様に特異な分布となる⁽¹⁾．奇数個の原子によるクラスターが存在せず， C_{60} のみが卓越している．同様の方法で半導体材料^(10, 11)や，各種遷移金属⁽¹²⁾についても実験を行っているが，このように特異な質量スペクトルを示すのは炭素のみである．さらに，図3(a)のように冷却の条件を変えると観察されるのはほとんど C_{60} のみである．この実験結果をもとにSmalleyが紙で作った模型が図1(a)に示す C_{60} の構造である．これは，正二十面体の頂点を切り落とした切頭二十面体(Truncated Icosahedron)であり，五角形が12面，六角形が20面で頂点が60個である．この頂点に炭素原子が位置し[図1(b)]，図1(a)のように六角形間の結合を2重結合と考えれば，炭素原子のすべての最外殻電子は結合に与れる．Smalleyら⁽¹⁾は，12個の五角形とn個の六角形を組み合わせて五・六多面体を作ると頂点の数は $(2n+20)$ 個となり，次々に原子数偶数個のクラスターを考えられる(C_{60} が完全に球形であるのに対してゆがんだ形となる)ことに着目して図3の質量分布を説明した． C_{60} 全体の直径はおよそ7.1 Å，原子間の距離は一重結合が1.445 Å，二重結合が1.405 Åと計算され⁽¹³⁾，NMRによる測定でも⁽¹⁴⁾ 1.45 ± 0.015 Å， 1.40 ± 0.015 Åの2通りの結合長が識別されている．

フラーレンを強力なレーザーで励起してみると C_2 ， C_4 ， C_6 等偶数個の原子を失っていくことが実験的に確かめられた⁽¹⁵⁾．この分裂過程のモデルを図4に示す．図4(a)の C_2 分裂では，隣接する五角形の C_2 を失って六角形となり，外側の2つの六角形が五角形になり，結局六角形が1つ減る．このように再構成することによって比較的小さなエネルギーでフラーレンの縮小が起こる．さて，幾何学的には順に六角形を減らして行けば， C_{20} (正十二面体)まで小さくできるが，実験の結果ではフラーレンとしてケージ状の形を保てるのは C_{32} までである⁽¹⁵⁾．ちなみに，紫外光電子分光(UPS)の結果によれば， C_{10}^- 以下ではチェーン， C_{10}^- から C_{30}^- まではリング状の形状となる⁽¹⁶⁾．

さて，大きい方はどうであろうか．大きなクラスターの質量分析には，図5に示すようなフーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴装置⁽¹¹⁾(FT-ICR)が不可欠となる．図5の左隅に図2と同じ原理のクラスター生成部があり，クラスターイオンを中央の超伝導磁石の磁場に閉じこめ，サイクロトロン周波数が質量に逆比例することに基づく質量分析や質量選択，イオンを磁場内で数分間保持し続けるの化学反応やレーザー放射の実験ができる．これによる質量分析の例を図6(a)に示す．現在計測されている C_{600} 程度までの範囲では^(17, 18)，偶数サイズのクラスターしか観測されず閉じたケージ構造となっていると考えられる．ただし，現在までに正確な形状が明らかとなったフラーレンは，球形の C_{60} と楕円体の C_{70} のみであり，大きなフラーレンが1重のケージ状であるか，中空の部分に小さなケージを含むオニオン構造⁽¹⁹⁾であるか，あるいは小さいケージがいくつか合体したグレイブ構造であるかも分からない．このため，強力なエキシマレーザーで励起実験を試みた結果が図6(b-e)である．フラーレンは C_2 単位の分裂によって順に縮小して比較的安定な C_{60} やC

C_{70} を經由して C_{32} となったところで崩壊する．オニオンやグレーブ構造であったとすれば起こるであろう不連続な分裂はまったく観察されない．ここで、 C_{50} から C_{150} の部分で、奇数サイズのクラスターができていたのように見えるが、実際には C_{100}^{++} から C_{300}^{++} であり高安定性の炭素クラスターが固体同様の熱電子放出を起こしたものである⁽¹⁷⁾．

2-2 分光学的性質

気体状態で調べられた代表的な性質は、図7に示すようなUPSである⁽⁹⁾．図7は、 C_{60}^- をArFレーザー(6.4 eV)で励起し、飛び出した光電子のエネルギーから求めた結合エネルギーの分布である．最初のピーク(2.7 eV程度)が C_{60} LUMOの電子を取り出すエネルギーに対応し(EA ~ 2.7 eV)、次のピーク(4.4 eV)が C_{60} HOMOの電子に対応する．これらのエネルギー差1.7 eVは中性の C_{60} の基底状態と最低の励起3重項状態とのエネルギー差に対応する． C_{60}^- 、 C_{70}^- は極めて大きなHOMO-LUMOギャップを持ち、電子親和力(EA)が小さい．EAについては C_{60}^- を紫外レーザーの代わりに可変波長のレーザーで励起して正確に 2.65 ± 0.05 eVと見積もられており⁽²⁰⁾、Ros nら⁽²¹⁾のLDAによる計算値EA=2.7 eV、IP=7.8eVと合う．イオン化ポテンシャル(IP)についてはVriesら⁽²²⁾のシンクロトロン光による1光子イオン化実験によって $7.58 + 0.04/-0.02$ eVと計測されている．

3. ドープされたフラレン

C_{60} の中央には大きな空間があり、ここに別の原子を入れられないかと考えるのは自然であろう．実際、 C_{60} の発見の直後にLaを内部に含有した C_{60} が作られ、 C_{60} が閉じた殻であること的有力な証拠となった⁽²³⁾．その後、内部にはLa, Ca, Ba, Sr, Na, K, Cs, Uが入ることが実証されている⁽²⁴⁾．金属原子が内部にあることは以下の2通りの実験で確かめられる．適当な化学反応を試みれば金属原子は比較的容易に反応するはずであるが、フラレンケージの内部にあると反応しない．また、レーザーで励起すれば金属原子が外側に吸着していれば簡単に分裂するが、金属原子が内部にあると次々に C_2 分裂しフラレンが縮んですきまが金属原子の大きさ程度になり、ついにはフラレン自身が崩壊する．後者の実験の例を図8に示す⁽²⁵⁾．図8(a)の場合は、FT-ICRで C_{64}^+ と $(K@C_{60})^+$ とを選んで、レーザーによって励起した結果である．Kを含むフラレンは、 $(K@C_{44})^+$ まで C_2 分裂して崩壊してしまう．一方、より大きいCsを含むフラレンは最小で $(Cs@C_{48})^+$ までしかケージ構造を保てない[図8(b)]．ここで、@を含む記号は、ドープされたフラレンの構造を簡明に表すためにSmalleyらが提案⁽⁷⁾したものであり、括弧の中で@の前はケージ内部、@の後はケージを形成する原子、括弧の外はケージの外側に結合した原子を表す．例えば、 C_{60} の炭素原子を1つBで置き換えたケージの内部にK原子があり、外側にK原子が2つ吸着していれば、 $K_2(K@C_{59}B)$ と表す．実際、ケージを成す炭素の内の1つあるいは2つをBで置き換えたフラレンも作れる．図9(a)は黒鉛と窒化ホウ素とを混合した材料を使ってレーザー蒸発・超音速膨張法でできるクラスターをFT-ICRによって観察したものである⁽²⁶⁾．図9(a)のクラスターに NH_3 を反応させると図9(b)となる．反応後の720 amu近傍のピークは ^{13}C が1.1%とした場合の C_{60}^+ の同位体分布と一致し(注：720 amu以下のピークが無い)、純粋な C_{60}^+ である．一方、Bを含む C_{60} はLewis酸としてBの数だけの NH_3 を吸着することから、Bはケージの内部

にないことが分かる．さらに，レーザー励起実験をすると単純な C_2 分裂をすることからBがケージの一部であることが実証される．すでに， $(La@C_{82})$ については後述のフラレン生成法で黒鉛と La_2O_3 の混合物を固めた材料を用いることによって生成でき，トルエンで抽出できることが報告されている⁽⁷⁾．

4. 単離されたフラレン

4-1 フラレンの生成法

発見されてみれば C_{60} の生成と単離は簡単である．

Kratschmerら⁽³⁾が最初，抵抗発熱によって黒鉛を蒸発させる方法に成功すると，すぐにSmalleyら⁽⁴⁾によりグラム単位のフラレンが生成できる簡単な装置が紹介された．図10はその生成装置の概略図である．原理的には，真空チャンバーに100 Torrのヘリウムを封入して，向かい合う黒鉛の棒を電極としてアーク放電をさせるだけであり，電源は通常の溶接器である．黒鉛の棒をすべて蒸発させると，チャンバーの壁面には10%程度のフラレンを含むススができる．これを集めて，トルエンに溶かせばフラレンのみが溶解赤紫色になる．トルエンを蒸発させれば， C_{60} が80%程度 C_{70} が15%その他 C_{76} ， C_{78} ， C_{82} ， C_{84} ， C_{90} 等を含むフラレンの混合物ができる．これをアルミナカラムのクロマト（ヘキサン・ベンゼン混合溶液）で分離すると容易に C_{60} ， C_{70} が単離できる．それ以外の大きなフラレンも注意深いクロマトで単離可能である⁽²⁷⁾．これらを結晶とするには，最も簡単には適当な固体表面上でフラレン溶液（トルエン，ベンゼン）を蒸発させてフラレンを析出させればよい．あるいは，真空中で昇華させて(500-600 °C)この蒸気を固体壁に蒸着させる．後者の方法で固体材料を選び条件を整えれば，エピタキシャル成長をさせることができる⁽²⁸⁾．

純粋な C_{60} の常温での結晶は，生成法によって面心立方(fcc)と六方細密(hcp)が混合した構造となるが，アニールすれば面心立方となる．図11は C_{60} 結晶の概念図であり，格子定数14.20⁽²⁹⁾の面心立方格子に直径7.1 の C_{60} を描いた．ファンデルワールス力によるすき間の大きい結晶であり，それぞれの C_{60} は常温ではおよそ $10^8 \sim 10^9$ (1/s)で高速回転をしている．図11の結晶より，密度は 1.67 g/cm^3 と計算でき [実測⁽³⁾値 $1.65 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ と一致]，黒鉛(2.25 g/cm^3)やダイヤモンド(3.51 g/cm^3)と比べて非常に軽い．

4-2 分光学的性質

C_{60} が単離されるとその構造の同定のために種々の分光学的手法が試みられた．最初に，ベンゼン溶液中でのNMRの計測($^{13}\text{C-NMR}$)により142.68 ppmに一本だけピークが見られ，60個の炭素原子がすべて等価な状態にあることから図1の構造が裏付けられた⁽⁵⁾．一方， C_{70} の場合には5本のピークが得られ， C_{60} の赤道上に5つの六角形を配置したラグビーボール型の形状と対応する．

紫外・可視範囲の電子スペクトルは，常温で溶媒に溶かした状態で簡単に計測でき， C_{60} ， C_{70} 同定の標準的手法の一つである．例えばヘキサン中の C_{60} は紫外に広い吸収帯があり，可視光の吸収は比較的小さい(211(nm)s, 256vs, 328m, 404w, 450-640vw；ここでvw, w, mw, m, ms, s, vsの順でスペクトル強度の程度を表す)⁽³⁰⁾． C_{70} の方がやや込み入った構造で650vw, 544w, 469w,

378ms, 359mw, 331m, 236vs, 215vsにピークを持つ。一方，超音速ビームの C_{60} および C_{70} に対する2光子イオン化法(R2PI, 図12(a);最初の励起3重項状態の寿命は40 μ s程度)や溶液中でも77Kまで冷却すると[図12(b)]常温溶媒中では識別できない構造が見えてくる⁽³¹⁾。

振動スペクトルについては， C_{60} が最初に発見されて以来，星間の未知の吸収帯(DILS⁽³²⁾, diffuse interstellar line spectrum)との関連で早くから着目されていた⁽³³⁾。早速， C_{60} , C_{70} , C_{60}^+ , $C_{60}H_{60}$ 等のイオンや化合物がこの候補となった。図13にHareら⁽³⁴⁾が実測したスペクトルとNegriら⁽³³⁾が計算したものの(QCFF/PI)とを比較して示す。 C_{60} , C_{70} の場合とも未知のDILSとは一致しないが，よく似たパターンでありこれらのイオンあるいは化合物が宇宙に大量に存在している可能性を示唆する。

図14にBethuneら⁽³⁵⁾が昇華法によって準備した薄膜にアルゴンイオンレーザー(514 nm)を照射して測定した C_{60} 及び C_{70} によるラマン散乱スペクトルを示す。 C_{60} については，図中に示したNegriら⁽³³⁾の計算結果と良く対応し，最低エネルギーの273 cm^{-1} が C_{60} 球を押しつぶす H_g モード，次の497 cm^{-1} は全対称に伸縮する A_g モード，最も強く現れる1469 cm^{-1} は一重結合と二重結合とが逆位相で伸縮する A_g モード(五角形が伸縮; 図1(a)参照)と同定される。

4-3 化学反応

C_{60} の単離にともない各種の化学反応が観測された。Smalleyら⁽³⁶⁾がバッチ還元によって $(@C_{60})H_{36}$ を作り，かつ逆に水素を取り除く反応も示したのを初めとして，完全にフッ素化された $(@C_{60})F_{60}$ ⁽³⁷⁾，Pt, Pdの金属錯体⁽³⁸⁾，オスmium酸 C_{60} ⁽³⁹⁾などが報告されている⁽⁴⁰⁾。

5. C_{60} の応用

数個の電子の授受によっても分子構造は極めて安定であることから新しい電池の材料として，黒鉛に代わる安定なマイクロな潤滑材として，ダイヤモンド生成の中間体として⁽⁴⁰⁾，等の応用が模索されたが，最も脚光を浴びているのは有機高温超伝導材としての応用である。Hebardら⁽⁶⁾が C_{60} 結晶にKをドーピングする事によって $K_3(@C_{60})$ のマイスナー効果を観察したのを皮切りに，次々にKよりイオン半径の大きいアルカリ金属をドーピングすることによる超伝導現象が観察された。Kのドーピングによって臨界温度 $T_c=18K$ であったが，ルビジウムをドーピング $Rb_3(@C_{60})$ すると $T_c=28K$ ⁽⁴¹⁾となり，さらにRbとCsを混合して $Cs_2Rb(@C_{60})$ とすることによって現在の最高臨界温度 $T_c=33K$ ⁽⁴²⁾が得られた。 $M_x(@C_{60})$ (MはKかRbを表す)は， $x \leq 3$ のとき安定なfcc格子となり⁽⁴³⁾， $M_6(@C_{60})$ ではbcc格子となる。超伝導特性は $M_3(@C_{60})$ の結晶構造相に特徴的に観察され， $(@C_{60})$ や $M_6(@C_{60})$ の結晶相は絶縁体となる。イオン半径の大きいCsの場合， $Cs_3(@C_{60})$ がbcc格子となり超伝導性を示さないが前述のようにRbを混入した $Cs_2Rb(@C_{60})$ は恐らくfcc格子を保ち超伝導体となる。

謝辞

著者のクラスターに関する研究はRice大学のRick E. Smalley教授と共同で行なわれた。また，小沢国夫博士にコメントを頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, and R. E. Smalley: *Nature* 318, p. 162 (1985).
- 2) 大沢映二: *化学* 25, p. 854 (1970).
- 3) W. Kr tschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, and D. R. Huffman: *Nature* 347, p. 354 (1990).
- 4) R. E. Haufler, Y. Chai, L. P. F. Chibante, J. Conceicao, C. Jin, L.-S. Wang, S. Maruyama, and R. E. Smalley: *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 206, p. 627 (1991).
- 5) R. Taylor, J. P. Hare, A. K. Abdul-Sada, and H. W. Kroto: *J. Chem. Soc. Chem. Communications* 1423, p. 1425 (1990).
- 6) A. F. Hebard, M. J. Rosseinsky, R. C. Haddon, D. W. Murphy, S. H. Glarum, T. T. M. Palstra, A. P. Ramirez, and A. R. Kortan: *Nature* 350, p. 600 (1991).
- 7) Y. Chai, T. Guo, C. Jin, R. E. Haufler, L. P. F. Chibante, J. Fure, L. Wang, J. M. Alford, and R. E. Smalley: *J. Phys. Chem.*, submitted.
- 8) R. E. Smalley: "Buckminster Fullerene Bibliography"; available upon request to R. E. Smalley, Department of Chemistry, Rice University, PO Box 1892, Houston, Texas 77251, U. S. A., E-mail: res@bucku.rice.edu, FAX: 713-285-5320, TEL: 713-527-4845.
- 9) R. E. Haufler, L.-S. Wang, L. P. F. Chibante, C. Jin, J. J. Conceicao, Y. Chai, and R. E. Smalley: *Chem. Phys. Lett.* 179, p. 449 (1991).
- 10) S. Maruyama, L. R. Anderson, and R. E. Smalley: *J. Chem. Phys.* 93, 7, p. 5349 (1990).
- 11) S. Maruyama, L. R. Anderson, and R. E. Smalley: *Rev. Sci. Instrum.* 61, 12, p. 3686 (1990).
- 12) S. Maruyama, T. Guo, C. Chen, R. T. Laaksonen, and R. E. Smalley: *Chem. Phys. Lett.*, submitted.
- 13) M. H ser, J. Alml f, and G. E. Scuseria: *Chem. Phys. Lett.* 181, p. 497 (1991).
- 14) C. S. Yannoni, P. P. Bernier, D. S. Bethune, G. Meijer and J. R. Salem: *J. Am. Chem. Soc.* 113, p. 3190 (1991).
- 15) S. C. O'Brien, J. R. Heath, R. F. Curl, and R. E. Smalley: *J. Chem. Phys.* 88, p. 220 (1988).
- 16) S. Yang, K. J. Taylor, M. J. Craycraft, J. Conceicao, C. L. Pettiette, O. Cheshnovsky, and R. E. Smalley: *Chem. Phys. Lett.* 144, p. 431 (1988).
- 17) S. Maruyama, M. Y. Lee, R. E. Haufler, Y. Chai, and R. E. Smalley: *Z. Phys. D* 19, p. 409 (1991).
- 18) H. Y. So and C. L. Wilkins: *J. Phys. Chem.* 93, p. 1184 (1989).
- 19) S. Iijima: *J. Phys. Chem.* 91, p. 3466 (1987).
- 20) L.-S. Wang, J. Conceicao, C. Jin, and R. E. Smalley: *Chem. Phys. Lett.* 182, p. 5 (1991).
- 21) A. Ros n and B. W stberg: *J. Am. Chem. Soc.* 110, 26, p. 8701 (1988).
- 22) J. de Vries, H. Steger, B. Kamke, C. Menzel, B. Weisser, W. Kamke, and I. V. Hertel: *Chem. Phys. Lett.*, submitted.
- 23) J. R. Heath, S. C. O'Brien, Q. Zhang, Y. Liu, R. F. Curl, H. W. Kroto, and R. E. Smalley: *J. Am. Chem. Soc.* 107, p. 7779 (1985).
- 24) R. F. Curl and R. E. Smalley: *Science* 242, p. 1017 (1988).

- 25) F. D. Weiss, S. C. O'Brien, J. L. Elkind, R. F. Curl, and R. E. Smalley: *J. Am. Chem. Soc.* 110, p. 4464 (1988).
- 26) T. Guo, C. Jin, and R. E. Smalley: *J. Phys. Chem.* 95, p. 4948 (1991).
- 27) 阿知波洋次: 第一回C₆₀総合シポ°シ`ム講演要旨集, p. 61 (1991).
- 28) 桜井正敏, 多田博一, 斉木幸一郎, 小間篤: 第一回C₆₀総合シポ°シ`ム講演要旨集, p. 83 (1991).
- 29) R. M. Fleming, T. Siegrist, P. M. Marsh, B. Hessen, A. R. Kortan, D. W. Murphy, R. C. Haddon, R. Tyco, G. Dabbagh, A. M. Mujsce, M. L. Kaplan, and S. M. Zahurak: *Mat. Res. Soc. Proc.* 206, p. (1991).
- 30) R. L. Whetten, M. M. Alvarez, S. J. Anz, K. E. Schriver, R. D. Beck, F. N. Diederich, Y. Rubin, R. Ettl, C. S. Foote, A. P. Darmanyan, and J. W. Arbogast: *Mat. Res. Soc. Proc.* 206 p. (1991).
- 31) R. E. Haufler, Y. Chai, L. P. F. Chibante, M. R. Faelich, R. B. Weisman, R. F. Curl, and R. E. Smalley: *J. Chem. Phys.* 95, p. 2197 (1991).
- 32) A. Webster: *Nature* 352, p. 412 (1991); E. Herbig: *Astrophys. J.* 196, p. 129 (1975).
- 33) F. Negri, G. Orlandi, and G. Zerbetto: *Chem. Phys. Lett.* 144, 1, p. 31 (1988).
- 34) J. P. Hare, T. J. Dennis, H. W. Kroto, R. Taylor, A. W. Allaf, S. Balm and D. R. M. Walton: *J. Chem. Soc. Chem. Comm.* 6, p. 412 (1991).
- 35) D. S. Bethune, G. Meijer, W. C. Tang, and H. J. Rosen: *Chem. Phys. Lett.* 174, p. 219 (1990).
- 36) R. E. Haufler, J. Conceicao, L. P. F. Chibante, Y. Chai, N. E. Byrne, S. Flanagan, M. M. Haley, S. C. O'Brien, C. Pan, Z. Xiao, W. E. Billups, M. A. Ciufolini, R. H. Hauge, J. L. Margrave, L. J. Wilson, R. F. Curl, and R. E. Smalley: *J. Phys. Chem.* 94, p. 8634 (1990).
- 37) J. W. Bausch, G. K. S. Prakash, G. A. Olah, D. S. Tse, D. C. Lorents, Y. K. Bae, and R. Malhortra: *J. Am. Chem. Soc.* 113, p. 3205 (1991).
- 38) B. Chase and P. Fagan, *J. Am. Chem. Soc.* (communication), submitted.
- 39) J. M. Hawkins, T. A. Lewis, S. D. Loren, A. Meyer, J. R. Heath, Y. Shibato, and R. J. Saykally: *J. Org. Chem.* 55, p. 6250 (1990).
- 40) J. S. Miller: *Advanced Materials* 3, 5, p. 262 (1991).
- 41) M. J. Rosseinsky, A. P. Ramirez, S. H. Glarum, D. W. Murphy, R. C. Haddon, A. F. Hebard, T. T. M. Palstra, A. R. Kortan, S. M. Zahurak, and A. V. Makhija: *Phys. Rev. Lett.* 66, p. 2830 (1991).
- 42) S. P. Kelty, C.-C. Chen, and C. M. Lieber: *Nature* 352, p. 223 (1991).
- 43) K. Tanigaki, T. W. Eddesen, S. Saito, J. Mizuki, J. S. Tsai, Y. Kubo, and S. Kuroshima: *Nature* 352, p. 222 (1991).
- 44) P. W. Stephens, L. Mihaly, P. L. Lee, R. L. Whetten, S.-M. Huang, R. B. Kaner, F. Diederich and K. Holczer: *Nature* 351, p. 632 (1991).