جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة القادسية

كلية: العلوم

الفوليرينات

Fullerenes

الطلاب:

مخلد كريم محمد , محمد خضر جواد

بحث مقدم كجزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في علوم الكيمياء

بأشراف

أ. م. د. قحطان عدنان يوسف

1438 هـ **2017 م**

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿وَيَسْأَلُونَكَ عَنِ الرُّوحِ ۖ قُلِ الرُّوحُ مِنْ أَمْرِ رَبِّي وَمَا أُوتِيتُمْ مِنَ الْعِلْمِ إِلَّا قَلِيلًا﴾

صدق الله العظيم

سورة الاسراء

الآية (٨٥)

الاهداء

الى من غرسا الايمان والحق وحب الخير في اعماق نفسي

يامن تعجز عن وصفهم الكلمات وكل الكلمات

امـي وابـي حبـا وتقـديراً والى اخـوتي محبـة واعتـزاز

.الى كل من قدم لي النصح والعون

عرفانا واحتراماً

كلمة شكر

الحمد والشكر لله رب العالمين على النعم الكثيرة التي من بها علي والصلاة والسلام على

سيدنا محمد وعلى اله واصحابه ومن دعا بدعوته الى يوم الدين .

ت	المحتوى	
	الآية	

يسرني ان اتقدم بالشكر والتقدير للأستاذ المشرف الدكتور المساعد (قحطان عدنان يوسف) لتفضله بالأشراف على البحث ومتابعته المستمرة التي ساعد بإخراجه بشكله الحالي ولا يفوتني ان اتقدم بالشكر الى اساتذتي في كلية العلوم لما قدموه من معرفة علمية واخيرا شكري وتقديري الى جميع من ساعدني في اعداد هذا البحث وفاتني ذكر اسمه

	الاهداء	
	الشكر والتقدير	
	الفصل الاول **النانو تكنولوجي**	1
1-1	المقدمة	1
2-1	الخواص المعتمدة على الحجم	1
3-1	كيمياء النانو Nano chemistry	1
4-1	اشكال المواد النانويه	1
5-1	تصنيف المواد النانوية وفقا لعدد الأبعاد النانوية للمادة	2
6-1	استخدامات النانو	3
7-1	التأثيرات الصحية :	4
8-1	التأثيرات البيئية	4
9-1	التأثيرات الاجتماعية	4
	الفصل الثاني الفولرين	5
1-2	الفولرينات	5
2-2	الاكتشافات والسنوات الاولى لجزيئات الفولرين	6
3-2	التسمية	8
4-2	اشكال المواد النانوية	9
5-2	تركيب وتقنية الفولرين	11
6-2	المطيافية الكتلية والتفاعلات الايونية / الجزيئية	12

7-2	كيمياء الفوللين في الطور المكثف	13
8-2	بنية جزيء للفورلين	14
9-2	بنية جزيءc60	15
10-2	تصنيف الفولرينات	16
11-2	الفوليرينات الكروية	16
12-2	أنابيب الكربون النانوية	17
13-2	أيصال النانوية	17
14-2	طرق تصنيع الفولرينات	17
15-2	طريقة التذرية اليزرية	18
16-2	خصائص وصفات الفولرينات	20
17-2	الخواص	20
18-2	بالاضافة لبعض الخواص الكيميائية	22
19-2	تطبيقات الفوليرينات	23

الفصل الاول

1.1 مقدمة:-

النانوتكنولوجي Nano technology مصطلح من كلمتين ، الكلمة الاولي نانو Nano وهي مأخوذة من كلمة نانوس Nanos اليونانية وتعني القزم Dwarf او الشيء المتناهي في الصغر ، والثانية تكنولوجي Technology وتعني التطبيق العملي للمعرفة في مجال معين .

النانو تكنولوجي : هو تكنولوجيا المواد المتناهية في الصغر ، ويختص بمعالجة المادة على مقياس النانو لإنتاج نواتج جديدة مفيدة وفريدة في خواصها .

النانو وحدة قياس فريدة

من وجهة النظر الرياضية والفزيائية النانو يساوي جزء واحد علي مليار (٠,٠٠٠٠٠٠٠٠١) من الوحدة المقاسة ، فالنانو متر يعادل جزء من مليار جزء من المتر أي إنها ١٠-٩ متر . وكذلك هناك النانو ثانية والنانو جرام والنانو مول والنانو جول وهكذا . ويستخدم النانو كوحدة قياس للجزيئات المتناهية الصغر .

2.1 الخواص المعتمدة على الحجم .

الفريد في مقياس النانو Nano scale هو أن خواص المادة في هذا البعد كاللون والشفافية ، والقدرة على التوصيل الحراري والكهربي والصلابة والمرونة ونقطة الإنصهار وسرعة التفاعل الكيميائي وغيرهامن الخواص ، تتغير تماماً وتصبح المادة ذات خواص جديدة وفريدة وقد اكتشف العلماء ان هذه الخواص تتغير بإختلاف الحجم النانوي من المادة فيما يسمي بالخواص المعتمدة على الحجم .

الحجم النانوي الحرج : هو الحجم الذ تظهر فيه الخواص النانوية الفريدة للمادة ويقع بين (١-١٠٠ nm)

3.1 كيمياء النانو Nano chemistry

كيمياء النانو Nano chemistryهو احد افرع علوم النانو

اهميته (١)يتعامل مع التطبيقات الكيميائية للمواد النانوية

(٢)ويتضمن دراسة ووصف وتخليق المواد ذات الأبعاد النانوية

(٣)ويتعلق بالخواص الفريدة المرتبطة بتجميع الذرات والجزيئات بأبعاد نانوية

4.1 اشكال المواد النانوية

المواد النانوية لها متعددة الأشكال ، قد تكون على شكل حبيبات أو أنابيب أو أعمدة أو شرائح دقيقة أو أشكال أخري ، ويمكن تصنيف المواد النانوية وفقا لعدد الأبعاد النانوية للمادة كمال يلي :

5.1 تصنيف المواد النانوية وفقا لعدد الأبعاد النانوية للمادة

(١)المواد النانوية أحادية الأبعاد

هي المواد ذات البعد النانوي الواحد الذي يتراوح ما بين (100- 1) nm ، ومن امثلتها الأغشية الرقيقة Thin Films التي تستخدم في طلاء الأسطح لحمايتها من الصدأ والتآكل ، وفي تغليف المنتجات الغذائية بهدف وقايتها من التلوث والتلف . والأسلاك النانوية NanO wires التي تستخدم في الدوائر الالكترونية والألياف النانوية التي تستخدم في عمل مرشحات الماء .(١)

(٢)المواد النانوية ثنائية الأبعاد

وهي المواد النانوية التي تمتلك بعدين يتراوح ما بين (100-1) nm ، ومن امثلتها أنابيب الكربون النانوية Carbon nanotubes أحادية ومتعددة الجدر .

الخواص المميزة لأنابيب الكربون النانوية :

١)موصل جيد للكهرباء والحرارة

٢) فدرجة توصيلها للكهرباء أعلي من النحاس

٣) أما توصيلها للحرارة فهو أعلي من درجة توصيل الماس.

٤)أقوي من الصلب بسبب قوي الترابط بين جزيئاتها ، وأخف منه

وبذلك فإن سلك انابيب النانو ، والذي يساوي حجم شعرة الإنسان يمكنه بسهولة ان يحمل قاطرة هذه القوة ألهمت العلماء لعمل أحبال ذات متانة يستخدمونها لعمل مصاعد الفضاء .

٥)ترتبط بسهولة بالبروتين وبسبب هذه الخاصية ، يمكن استخدامها كأجهزة استشعار بيولوجية لأنها حساسة لجزيئات معينة .

٣)المواد النانوية ثلاثية الأبعاد

وهي المواد التي تمتلك ثلاثة أبعاد نانوية يتراوح ما بين (100-1) nm ، مثل صدفة النانو وكرات البوكي Bucky Balls .

تركيب كرة البوكي تتكون كرة البوكي من ٦٠ ذرة من ذرات الكربون ويرمز لها بالرمز C_{60} ، ولها مجموعة من الخصائص المميزة والتي تعتمد على تركيبها . ونلاحظ ان النموذج الجزيئي لكرات البوكي يبدو ككرة قدم مجوفة ، وبسبب شكل الكرة المجوف يختبر العلماء الآن فاعلية استخدام كرة البوكي كحامل للأدوية في الجسم ، فالتركيب المجوف يمكنه أن يتناسب مع جزيء من دواء معين داخله بينما الجزء الخارجي لكرات البوكي مقاوم للتفاعل مع جزيئات أخرى داخل

6.1 استخدامات النانو

(١) مجال الطب

- التشخيص المبكر للأمراض وتصوير الأعضاء والانسجة .
- توصيل الدواء بدقة الى الانسجة والخلايا المصابة مما يزيد من فرص الشفاء ويقلل من الأضرار الجانبية للعلاج التقليدي الذي لا يفرق بين الخلايا المصابة والخلايا السليمة .
- إنتاج أجهزة متناهية الصغر للغسيل الكلوي يتم زراعتها في جسم المريض .
- إنتاج ربوتات نانوية يتم إرسالها الى تيار الدم حيث تقوم بإزالة الجلطات الدموية من جدار الشرايين دون تدخل جراحي .(٢)

(٢) مجال الزراعة

- التعرف على البكتريا في المواد الغذائية وحفظ الغذاء .
- تطوير مغذيات ومبيدات حشرية وأدوية للنبات والحيوان بمواصفات خاصة .

(٣) مجال الطاقة جال الطاقة

- إنتاج خلايا شمسية باستخدام نانو السيليكون تتميز بقدرة تحويلية عالية للطاقة فضلاً عن عدم تسرب الطاقة الحرارية .
- إنتاج خلايا وقود هيدروجيني قليلة التكلفة وعالية الكفاءة .

(٤) مجال الصناعة

- إنتاج جزيئات نانوية غير مرئية تكسب الزجاج والخزف خاصية التنظيف التلقائي .
- تصنيع مواد نانوية من اجل تنقية الاشعة فوق البنفسجية بهدف تحسين نوعية مستحضرات التجميل والكريمات المضادة لأشعة الشمس .
- تكنولوجيا التغليف بالنانو على شكل طلاءات وبخاخات تعمل على تكوين طبقات تغليف تحمي شاشات الأجهزة الالكترونية من الخدش .
- تصنيع أنسجة طاردة للبقع وتتميز بالتنظيف الذاتي .

(٥) مجال وسائل الاتصالات

- أجهزة النانو اللاسلكية والهواتف المحمولة والأقمار الصناعية .
- تقليص حجم الترانزستور.
- تصنيع شرائح إلكترونية تتميز بقدرة عالية على التخزين .

(٦) مجال البيئة

- مثل المرشحات النانوية التي تعمل على تنقية الهواء والماء ، وتحلية الماء وحل مشكلة النفايات النووية ، إزالة العناصر الخطيرة من النفايات الصناعية .

التأثيرات الضارة المحتملة للنانو تكنولوجي

7.1 التأثيرات الصحية :

تتمثل في ان جزيئات النانو صغيرة جداً يمكن أن تتسلل من خلال أغشية خلايا الجلد والرئة لتستقر داخل الجسم أو داخل اجسام الحيوانات وخلايا النباتات ما قد يتسبب عنه مشكلات صحية .

8.1 التأثيرات البيئية:

منها التلوث النانوي Nano pollution ونقصد به التلوث بالنفايات الناجمة عن عملية تصنيع المواد النانوية ، والتي يمكن ان تكون على درجة عالية من الخطورة ، ذلك بسبب حجمها . حيث تستطيع ان تعلق في الهواء وقد تخترق بسهولة الخلايا الحيوانية والنباتية فضلاً عن تأثيرها على كل من المناخ والماء والهواء والتربة .

9.1 التأثيرات الاجتماعية :

يري المعينون بالآثار الاجتماعية للنانو تكنولوجي إنها ستفسر عن تفاقم المشكلات الناجمة عن عدم المساواة الاجتماعية والاقتصادية القائمة بالفعل ومنها التوزيع غير المصنف للتكنولوجيا والثروات .(٣)

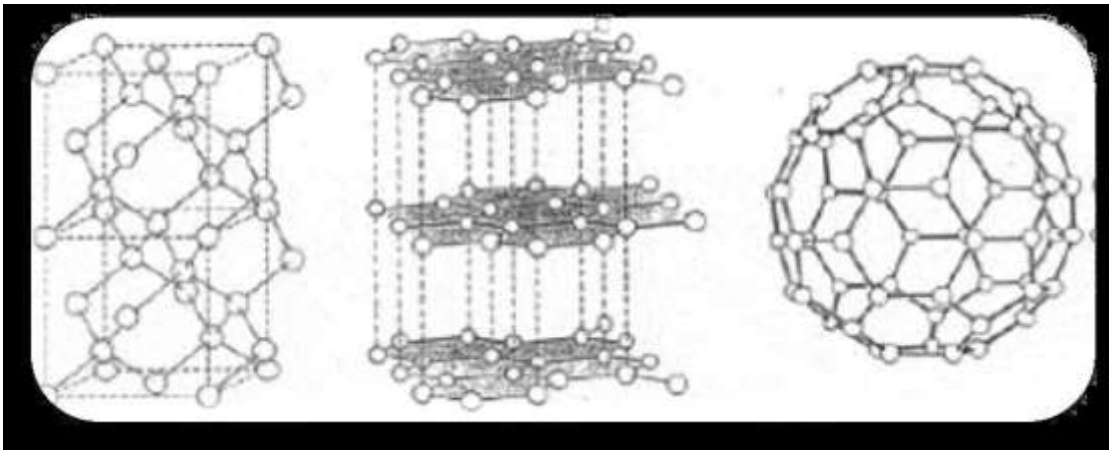
الفصل الثاني

1.2 **الفولرينات**:-

فولرين Fullerene هو أي جزيء مكون بالكامل من الكربون، على شكل كرة مجوفة أو سطح ناقص أو أنبوب. الفولرينات الكروية تسمى أيضا كرات بكي buckyballs، أما الأسطوانية فتدعى أنابيب النانو الكربونية أو أنابيب بكي. الجرافين هو مثل صفحة فولرينية مسطحة. ويشبه الفولرين في تركيبه الگرافيت، الذى يتكون من صحائف مكدسة من الگرافين لحلقات سداسية الأضلاع مترابطة؛ إلا أنها قد تتضمن أيضا حلقات خماسية الأضلاع (وأحياناً ثمانية الأضلاع). تلك الحلقات من شأنها الحيلولة دون تحول الصفحات الى شكل مسطح.(٤)

أول فولرين تم اكتشافه، وأعطى اسمه للعائلة كلها، كان بكمنسترفولرين (C60) الذي حضرَّه في عام ١٩٨٥ ريتشارد سمالي وروبرت كرل وجيمس هيث وشون اوبراين وهارولد كروتو في جامعة رايس. الاسم كان لتكريم ريتشارد بكمنستر فولر، المصمم المعماري الشهير، الذي صمم القبة الجيوديسية التي تشبه الفولرين. ومنذ ذلك الحين فقد أُكتشِف أن الفولرين يتواجد (ولو بندرة) في الطبيعة.(٤)

زاد اكتشاف الفولرين بقدر هائل عدد الأشكال المتآصلة المعروفة من الكربون، والتي كانت حتى ذلك الحين مقصورة على الگرافيت والألماس والكربون اللا بلوري مثل السناج (الهباب) والفحم النباتي. وقد كانت كرات وأنابيب بكي موضع بحث مكثف، وذلك لما يتميزون به من كيمياء فريدة ولتطبيقاتهم التكنولوجية، وخصوصاً في علم المواد والإلكترونيات والتقانة النانوية.



الشكل (١): الفوليرين _ الغر فيت _ الألماس

لا بد ان نعترف بدور مايمكن تسميته السير دبية اي موهبه اكتشاف الاشياء السارة مصادفة وان قصة الفلرين ليست استثناء نتيجة لحماسهم في فه الكيمياء الجزيئات البين النجمية صادف العلماء اكتشاف غير عادي في تاريخ الكيمياء ان الجزيء الذي كتشفوه له ستون ذرة كاربون مكافئة والتي تشكل نموذج مشابه لشكل كرة القدم وبتناظر عال في الواقع لقد دلت الدراسات النظرية على وجود بنا كهاذه منذ العام ١٩٧٠في الكيمياء لايوجد اي جزء مشكل بنفس الذرة والتي حجمها بحجم الفولرين منذ الف عام لقد عرف ان الكربون العنصري يتواجد وفق شكلين اثنين الغرافيت ولاالماز يمتلك الالماز طبقتين ثنائية البعد من ذرات الكاربون

المهجنة ومترابطة بقوة فاندرفالز الضعيفة هذا بما ان بداخله البين طبقات الضعيف يستخدم الغرافيت كميزة او مزلق او مشحم علما ان الالماز هوة واحد من اقصى المواد التي عرفها الانسان تنشا هذه الخاصية من الترابط القوي الثلاثي الابعاد في الالماز حيث كل ذرة مهجنة فيه تترابط مع اربع ذرات اخرى متشابهة يتألف الفلورين من شكل متآصر اخر من الكربون والذي على الارجح يعتبر الشكل المتأصل الاول لأي عنصر قد اكتشف في الازمان الحديثة توجد ايضا جزيئات كربونية اخرى مشابهة للكربون C60 ولكنها بنية قفصيه تسمى بمجموعها جزيئات الغلوين نسبة الى المعمار الامريكي باكي منستر والذي شكلت قبة الجيود جزية نقاط اعلام ارضة في الهندسة المعمارية في قرن العشرين هناك ايضا اشكال اخرى من الكربون على شكل حلقات كربونية ولقد لقيت ايضا اهتمام ملحوظ.(٥)

من الطبيعي الجزيئي من هذا المجال الهائل ولذلك نجد ان بنية التحليل الطيفي والكيمياء وعلم المواد وتطبيقاتها على هذا الجزيء قد بحثت وفحصت على هذا النحو مكثف وواسع .وعليه فقد اصبحت جزيئات Buckminester fuller مادة لتسع اوعشر من اشهر الورقات العلمية في الكيمياء في عام ١٩٩١ وبلغت شهرت هذه الجزيئات في عام ١٩٩٢ اشدها واستنادا الى الاحصائيات نجد ان كل اسبوع تنشر ورقة علمية في هذ المجال مابين العامين ١٩٨٥-١٩٩٠حتى وصل الامر مابعد العام ١٩٩٠ الى درجة انه تنشر كل يوم ورقة علمية بهذا الخصوص وفي العام ١٩٩٥ وصل النشر حتى ورقتين في اليوم الواحد كما تشير الاحصائيات الحديثة بهذا الشائن ان موضوع جزيئات الفلورين استمر في جذب الاهتمام المكثف بلغ عدد الاوراق العلمية في الاعوام

2-2 الاكتشافات والسنوات الاولى لجزيئات الفولرين

كما اشرنا على اوجد البحث عن بعض الجزيئات الكاربونية الخطية في المنطقة البن النجمية المسمات نقطة البداية للبحث في مجال الفولرين بعض هذه الجزيئات النموذج HC5Nاو H-C=C-C=C-C=N قد ركبت في المختبر وهذه الجزيئات تحوي من سبع الى تسع وحتى٣٣ ذرة كربون وكان ذلك في زمن البروفسور Smalley وفريقه في هيوستون حيث عملوو على منبع عنقودي طورة حديثا في ذلك الوقت والذي اي المنبع استخدم الليزرات من اجل التبخير وتمدد الحزمة الجزيئية الفوق الصوتية من اجل عملية العقدة والمطيافية الكتلية للتأين الفوتونية وذلك من اجل اكتشاف المنتجات في نهاية المطاف .هناك دراسة مشابهة انجزت بواسطة كل من كالدور وكوكس Dr.coxوDr.kaldor t في اكسون Exxonوقد اظهرت دراستهما التي سبقتها دراسات Smalley اظهرت وجود عناقيد كاربونية اثقل من C_{33} علما انه وبشكل مثير الاهتمام لم يلحض اي عدد فردي للعناقيد بعيدا عن هذه الدراسات واثر بدايه القياسات لوحض ان انواع مثل HC9Nو HC7N قد شكلت نتيجة لتفاعل CNحيث N2,H2مع$n<30$.لاكن الاكتشاف الاعظم لم يكن اكتشاف وانما الانواع الغزيرة الغير اعتيادية للكاربون C_{60}والتي سيطرت على طيف الكتلة تحت شروط العقدة الخاصة بالاضافة الاوجود عناقيد اخرى اثقل .لقد وجد ايضا ان هذه العناقيد كانت بشكل خاص غير تفاعلية بالمقارنة مع عناقيد الخافض لقد بينت الدراسات التفاعلية والانشطار الفوتونية ان العقود ذي الذره الستين هو مستقر للغاية . تستطيع

الكيمياء الملحوظة انتشرت في ما لو تم افتراض ان اللوحات الغرافتية تتحول الى قفص قضبان الشواء ومفرغ بحيث يكون مشابه لقبب Buckninester fuller في حالت قفص قضبان او اسلاك مشابه لكنه مغلق .(٦)

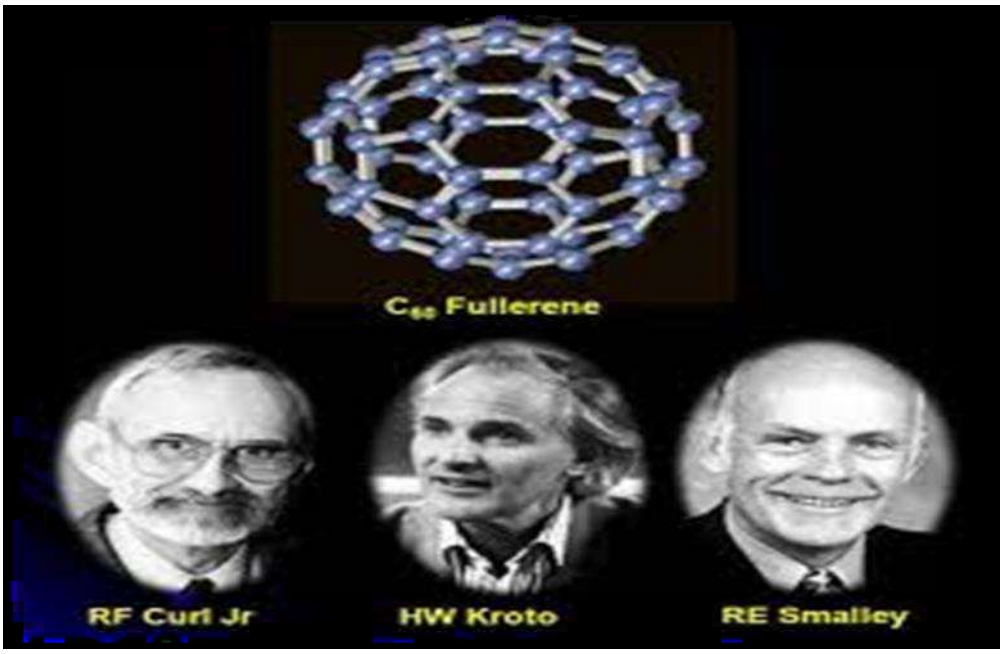
ان الفلورين وفقا لفئة الجزيئات القفص المغلق تملك بشكل عام الصيغة C_{20+2n_6}علما ان الكاربون C_{60}يملك فقط ذرت كاربون مميزة مع ذلك في الكاربون C_{70}يوجد خمس ذرات كربون مميزة في جزيئات الفلورين الكبيرة هناك امكانية وجود مركبات كيميائية Isomersوبعض جزيئات الفلورين هي ايضا شيرالية chiral كما ان الفلورين تملك عديد من المركبات الايزمرية بشكل اكبر مما يعتقد ولاكن بسبب قاعدة المخمس المعزول (كما يلاحظ دوما) حيث تكون فيها المخمسات منفصلة بواسطة المسدسات يكون عدد مركبات الايزومرية محدودا .

ان التجهيزات التجريبية المستخدمة في اكتشاف الكاربون C_{60} مع الاشارة الى ان هذا المشهد متوفرة تجاريا ويمكن دراسة تنوع من العناقيد في هذا المشهد يتم تشليع قرص دوار من الغرافيت بواسطة ليزر قوي لتبخير الكاربون .بما ان الليزر يسقط على القرص ,يمر تيار من غاز الهليوم فوق القرص بتحرير الصمام. يحمل الغاز معه انواع الكاربون التبخر وخلال مروره نحوه فوهة فان انواع الكاربون الموجودة في حلة تبخر تخضع لعملية العنقدة Clusteringان حزمة العناقيد القادمة من الفوهة يتم انتقائه ها بواسطة مقشدة ومن ثم تخضع العناقيد الى تحليل كتلي بواسطة المحلل الطيفي الكتلي لذرة الطيران .تحت بعض الشروط التجريبية ,كان الطيف الكتلي مشابه جدا الى الطيوف المذكورا سابقا ,مبين توزع انواع معددة فردية. لاكن تغير الشروط التجريبية بشكل خاص عندة ادخال كأس الادماج , تتزايد شدة العنقود ذي الستين ذرة الى نقطة نجد فقط الكاربون C_{60}والكاربون C_{70}في بعض التجارب في الوقت نفسة تتجزءا التجارب باستخدام جهاز الطنين السايكلو تروني الايوني لتحويل فورية fourier.في هذه لمجموعة من التجارب تخضع ايونات عنقود الكتلة المختار الى التفاعلات مع تنوع من الغازات, علما ان C_{60} هو غير تفاعلي والى حد بعيد مع غاز مثل No, NH_3, O_2.بالمقابل ,ان عنقودا من العناصر الاخرى Siيظهر تفاعلية عالية .في الواقع, لا يوجد برهان لبيان فيما اذا كان Si_{60} خاصا .هناك كتلة من البيانات التجريبية الاخرى التي جمعت من قبل فريق هويسون حول الفيزياء الفوتونية , الانفصال الفوتونية ,والطيف البصري للكاربون C_{60},لكن ولا واحدة منها تناقضت مع البنية المقترحة. خلال ما يقارب خمس سنوات , كان الكاربون C_{60}فعلا ارضية خصبة للفيزيائيين الكيميائيين ,حيث نجد عدد ضخما من المقالات النظرية قد نشرت حول البنية الالكترونية والتفاعلية ولا لا مغناطيسية وعدد من الخواص الاخرى للكاربونC_{60}وهذه الدراسات قد خلصت الى التناظر العالية للبنية المقترحة في الواقع هناك تشابه قريب بين الذرات الملحوظة او البنية في الطيف تحت الاحمر IR لسخام Sootالكاربون المتبخرة والترددات النظرية جعلت كراتشمر وزملائه يبحثون عن الكاربون (٦٠)في السخام وقد عملوا على سخام الكاربون المنتج مختبريا من اجل فهم الطيف البنائي النجمي للمواد الغنية بالكاربون ان السخام الذي يتم الحصول عليه بعد تبخير الجرافيت في جو من الهيليوم يحتوي على اربع نطاقات في المنطقة التحت الحمراء وهي ترددات الامتصاص المرتبطة بشكل جيدة مع النطاقات المقترحة للكاربون C_{60}يؤدي تطبيق الاستخلاص المذيب

من السخام الى كميات معتبرة من الفو للرين ون جملة من التقنيات قد طبقت في عملية التميز هذا النوع الجديد من اشكال الكاربون .

بعد هذا الاكتشاف نال كل من العلماء هارولد كروت(Kroto Harold) و روبرت كورل (Robert Curl) وريتشارد سمولي (Smalley Richard) جائزة نوبل عام ١٩٩٦لاكتشافهم الفوليرين في جامعة رايس

ذلك الاكتشاف كان له أثرهام في تطوير تكنولوجيا المستقبل فمنذ اكتشافهم الأول ،أصبح للفوليرين دور رئيسي في الأوساط العلمية



الشكل (٢) العلماء الثلاثة الذين اكتشفوا ال C_{60}

3-2 التسمية

بكمنستر فلورين (C_{60}) تم تسميتها نسبة الى ريتشارد بكمنستر فلورين, مصمم نماذج معمارية بارز الذى جعل القبة الجيوديسية أكثر شعبية. وحيث أن بكمنستر فلورين لها شكل مشابه لهذا الشكل من القباب, فالإسم بدا أكثر من مناسب. و حيث أن إكتشاف عائلة الفولرين جاء بعد بكمنستر فولرين, فإن الإسم المختصر 'فولرين' أستخدم للإشارة الى عائلة الفولرينات.

كميات ضئيلة, من C_{60}, C_{70}, C_{76}, و C_{84} جزيئات تنتج في الطبيعة متخفية في السخام وتتكون من نواتج الإحتراق في الغلاف الجوى .(٧) وفى الوقت الحالى, فوليرينات باكمنستر وجدت في عائلة من المعادن يطلق عليها الشينجايتات في كارليا، روسيا.

إن وجود C_{60} كان قد تنبأ به إيجي أوساوا تابع لجامعة تويوهاشى للتكنولوجيا في مجلة يابانية (٨) . و هو قد لاحظ أن تركيب جزيء كورانيولين كان مرادفا لشكل كرة القدم, ووضع فرضية تفيد أن الشكل الكامل للكرة يمكن أيضا أن يوجد. و نشر هذا التقرير في مجلة يابانية, و لكن لم يصل الى أوروبا أو أمريكا.

4-2 اشكال المواد النانوية

1-الكمية النقاط Quantum Dots

وهى عبارة عن مواد نانوية شبه موصله ثلاثيه البعد ، تتراوح أبعادها ما بين ٢ إلى ١٠ نانومتر. وعندما يكون قطر النقطة الكمية ١٠ نانومتر فإنه يمكن صف ٣ ملايين نقطة كمية بجوار بعضها البعض بطول يساوى عرض إصبع إبهام الإنسان

2-الفولورين Fullerene

جزيئات نانوية مكونة من ذرات كربون مترابطة ثلاثيا تعطي شكل كريات لها بناء يماثل الجرافيت , ولكن بدلاً من الشكل السداسي النقي, فإنها تحتوى على أشكال خماسية (و احتمال سباعية) من ذرات الكربون, مما يؤدى لانثناء الطبقات إلى كريات أو أسطوانات ، و يعد أكثر الفولورينات شهرة هو الجزيء C_{60} ، حيث تترتب الـ٦٠ ذرة كربون على رؤوس مجسم عشريني ناقص . وشكل المجسم العشريني الناقص يشبه كرة القدم قدرا عام ١٩٤٤، و يتميز بأنه جزيء ممغنط و غير قابل للاحتكاك . وتم اكتشاف الفولـ رين و عندما لاحظ أوتوهان وجود سلاسل من الكربون أثناء إجرائه لتجارب كانت تستهدف تكوين ذرات ثقيلة من ذرات أخف عن طريق امتصاصها للنيوترونات . إذ أن بحثه كان منصباً في الكشف عن الفروق الصغيرة في الوزن بين بعض ذرات العناصر الثقيلة التي يقوم بتبخيرها في قوس كربوني .

وأثناء مشاهدته لتلك النتائج ، لاحظ أن القوس أنتج أيضا سلاسل من الكربون كان لها نفس الوزن الجزيئي للمعدن، وحيث أنه لم يكن مهتما بسلاسل الكربون فقد دون ملاحظاته بشأنها في نهاية تقريره ثم انطلق وراء الهدف الرئيسي من بحثه ولم تتم متابعة النتائج التي توصل إليها بشأن سلاسل الكربون إلا فى عام ٦ ١٩٨٥م عن طريق هارولد كروتو و معه كل من روبرت كيرل و ريتشارد سمالي الذين توصلوا إلى أن سلاسل الكربون تلك ما هي إلاّ صورة جديدة من صور الكربون .

3- الكرات النانوية Nanoballs

تنتمى الكرات النانوية إلى فئة الفلورينات (C_{60}), مع الاختلاف فى التركيب شيئا قليلا وذلك لأنها متعددة القشرة، وخاوية المركز ، وبسبب تركيبها الذي يشبه البصل فقد أطلق عليها العلماء اسم bucky أى البصل. وقد يصل قطرها إلى ما يزيد عن ٥٠٠ نانومتر

4 -الجسيمات النانوية Nanoparticles

في تقنية النانو يعرف انه جسم يتصرف يتصرف بوصفه وحده كامله من حيث انتقاله وخصائصه وتصنف ايضا وفق الحجم من حيث القطر.الجسيمات الدقيقه تتراوح مابين ١٠٠و٢٥٠نانومترفي حين تصنف الجسيمات المتناهيه في الصغر بين ١ إلى ١٠٠ نانومتر

5 -الأنابيب Nanotubes

المواد المستخدمة في تقنية النانو تخضع لشرط أساسي ، هذا الشرط هو مقياس النانو ١-١٠٠ نانومتر لذلك فإن المواد المستخدمة يجب أن يتم تقطيعها إلى أجزاء لا تزيد أقطارها عن ١٠٠ نانومتر . فالأنابيب النانوية تتكون من خليط من مواد موصلة ومواد أشباه موصلة أسطوانية الشكل مجوفة يتراوح قطر الأنبوب بين ١ إلى ١٠٠ نانومتر . ويمكن إدخال عدة أنابيب ذات أنصاف أقطار متدرجة فى الصغر وكل أنبوبة من هذه الأنابيب تؤدى وظيفة مختلفة عن الأخرى. وأشهر الأنابيب النانوية أنابيب الكربون متناهية الصغر Nanotubes Carbon ، والتى سوف نفرد لها مقالاً العلمية و التطبيقية . خاصاً لأهميتها العلمية والتطبيقية.(٩)

6- الأسلاك النانوية Nanowires

وهى عبارة عن أسلاك ذات بعد واحد ،أقطارها تقل عن نانومتر واحد وبأطوال مختلفة ، تكون فى الغالب نسبة طولها إلى عرضه ا أكثر من ١٠٠٠ . مرة وتتميز عن الأسلاك العادية (ثلاثية البعد) بقوة التوصيل الكهربائية ، نتيجة لحصر الإلكترونات كمياً فى اتجاه جانبي واحد مما يجعلها تحتل مستويات طاقة محددة تختلف عن المستويات العريضة فى المادة الحجمية .(١٠)

7- الألياف النانوية Nano fibers

من أشهر الألياف النانوية الألياف المصنوعة من البوليمرات. ويكون عدد ذرات سطح الألياف كبير مقارنة بالعدد الكلى ، وهذا يكسب الألياف خواص ميكانيكية (كالشدة ' والصلابة،...) تؤهلها للاستخدام كمرشحات فى تنقية السوائل والغازات ، وفى العديد من التطبيقات الطبية والعسكرية.

5-2 تركيب وتقنية الفولرين

في عملية تركيب الفولورين ,كلما يحتاجه الامر , هو محول لحام وغرفة موصلة الى مضخة تفريخ (حتى يمكن ان تكون مضخة دورانية بمرحلة واحدة)وبعض قضبان الغرافيت. توضع الكترودات الغرافيت في حالة تلامس قريب مع بعضها بعض وان قوسا ينطلق في الجو من ١٠٠-٢٠٠Torrمن الهليوم او الارغون ولاستدامة هذا القوس . نحتاج الى توتر من الرتبة ٢٠V(مستمر اومتقطع).هذا ومن اجل قضيب الغرافيت وقطر 6nm,يمكن ان نستهلك قرابة

٥٠-٢٠٠انغلستروم. بشكل عام ,يستخدم الغرافيت ذو المسامية العالية والنقي من وجهة نظر التحليل الطيفي ,من اجل تحقيق معدل تبخر عال .ان السخام المتولد يتجمع على السطوح المبردة بالماء والتي يمكن ام يتواجد في الجدران الداخلية لغرفة الفراغ .هذا وبعد ديمومة القوس لعدة دقائق ,يتحطم الفراغ والسخام ويتم تجميعه ومن ثم يستخرج السوك سليت Soxhletفي فترة من٥-٦ساعات في التولوون Tolueneاو البنزين, الذي يؤدي الى محلول بني –احمر مظلم والذي هو خليط من الفو للرين تتطلب جزيئات الفولرين العالية مثل C_{82},C_{76},C_{78}الى اخره Hplc من اجل التقنية .ان الخواص الظاهرة في التحليل الطيفي للعديد من جزيئات الفوللرين هي معروفة الان .بشكل اعتيادي ,يحتاج اغرام واحد من الكاربون C_{60}من الغرافيت قرابة خمس ساعات من العمل .لكن قد يأخذ زمن بحدود٢٥٠ساعة لصنع (mg١)في حالت الفو للرين العالية علما ان جزيئات الكاربون C_{60},C_{70} هي متوفرة تجاريا من عدة مصادر .يكلف C_{60} قرابت ٢٥دولارللغرام الواحد ,لكن الكاربون C_{70}ليس تحت سيطرت الكيميائيين التركيبيين .لذلك نجد العديد من الدراسات قد نشرت عن الكاربون C_{60}.ان جزيئات الفوللرين المتبلورة Crystallizedمن اجراء المحاليل المشبعة ,تحتفظ بالجزيئات المذيبة،وتدع التي تتطلب ساعات طويلة من التجفيف الفراغي. تعتبر طريقة تنمية الكريستال بنقل البخار،طريقة ممتازة لتنمية الكريستالات ذات أحجام ميلي مترية خالية من المحلول من أجل القياسات الحساسة في قياسات التحليل الطيفي للحالة الصلبة ،انه من الافضل استخدام افلام فوللرين متبخرة في فراغ عال أو فرط عال لتجنب تلوين المذيب .التبخير يستخدم أيضا كطريقة تنقية طالما توجد فروقات جوهرية في مستهل التبخر بين الكربون C_{60}وC_{70}

ان التبخير القوسي ليس هو الطريقة الوحيدة لصنع الكربون C_{60},فقد وجد الفوللرين في ألسنة اللهب (١١-١٢) بعيد ترسب البخار الكيميائي المستخدم لإنتاج الماس (١٣),وهو ناشئ عن تأثير نيزك قديم عمره ١,٨٥مليار سنة , يتواجد في مكان سقوطه (١٤),يمكن ايضا صنع الفوللرين من الماس. مع ذلك , لم يصنع احد الفوللرين من خلال التفاعلات الكيميائية على الرغم من انها كانت امكانية او احتمالا اثار الكثير من الكيميائيين العضويين (١٥), ويقال ايضا انه يمكن تركيب الفوللرين من الكافور (١٥),لقد بين التحليل الطيفي الكتلي ان عناقيد الكربون العليا يمكن تشكيلها من خلال تبخير الليزرية للبوليمرات,بعيد التبخير الليزري ,تنتج المنظومات الحلقية الغنية بالكربون غير مشبعة ,تنتج الكربون C_{60}, علما انه توجد عدة وسائط غريبة اخرى لأنتاج الكربون C_{60}, على كل , ان التركيب الاجمالي قد يشكل بالفعل نقطة علام في الكيمياء على الرغم من ان المقاربات في هذا الخصوص يجب ان تدرس وتنجز

ان عمليتي التنقية والتركيب تتبعا بتمييز الفوللرين من خلال تقنيات التحليل الطيفي . ان الدور الفعلي المفصلي الذي تؤديه المطيافية الكتلية في تمييز الفوللرين , لا يمكن التأكيد عليه .هناك تقنيات اخرى مثل NMRتبين خطا وحيدا يتناسب مع تكافؤ الذرات الكربون , وبنية الشعاع Xللكريستال الوحيد الذي يبين الاوضاع الذرية , والتميز بواسطة -(UV/VIS),والمحللات الطيفية رامان وتحت الاحمر (١٦) جاءت بعدها بمدة قصيرة ان البنية الالكترونية المتوقعة تأكدت بواسطة المحللات الالكترونية الفوتوالكترونية HEL,HELL

6-2 المطيافية الكتلية والتفاعلات الايونية / الجزيئية

بعد استخدام طريقة التركيب المايكروسكوبي للكربون انجزت في هذا السياق العديد من الدراسات الخاصة بالتفاعل الجزيئي /الايوني ولقد كان الفولورين في ايامه الاولى ,غالي الثمن وكان يعتبر المحلل اليفي الكتلي وعاء مثاليا للتفاعل وعليه فقد كان ينتج كل من C_{60}و$C_{60}H$بواسطة التأين الكيميائي CL مع الميثان . لقد كان يظهر ان C_{60}اكبر بخمسة عشرة مرة غزارة من $C_{60}H$وبشكل متلائم او منسجم مع شراهته العالية الالكترونية .اظهر طيف التأين الكيميائي CLللميثان وجود فوللين بروتوني وتقارب الفوللين مع C2H5لقد اظهر التصادم المحرض للتفكك CLDللكربون في المجال Kevمع الهيليوم الاجزاء المتوقعة من C_{58}وC_{56}ولقد ظهر ذلك خاصة في الدراسات الاولى للتشظي الفوتوني .ادى تشظي C60الىCnوليس Cnعلى عكس الهيدروكربونات العطرية PAHوالتي تخضع الى تفاعلات انفصال الشحنة .بالإضافة الى التقادم المحرض للتفكك CLD ,يحدث ايضا الانفكاك المحرض السطحي .حسب (١٧).يؤدي ذلك الى تصادم الايون مع سطح اخر وذلك لنقل الطاقة, علما ان هذا التصادم هو اكثر فعالية من التصادم CLD .لقد دل التصادم على سطوح الغرافيت والسيلكون ان الكربون C_{60}لا يتفكك بشكل معتبرعند طاقات الاصطدام في المجال ٢٠٠-٣٠٠Ev.هناك عدد من الدراسات اكد هذا الاستقرار غي الاعتيادي للكربون والذي نسب الى مرونة او خضوعيه الجزيء ,كما بينت الدراسات خواصا مشابه تم توقعها لهجائن .يقود ايضا اصطدام الكربون الى تأين متأخر واصدار او انبعاث ايوني –حراري. كما اشارت التجارب الى وجود فوللين عال وفوللين معدني ايضا .في هذا السياق ,ينبغي الاشارة الى ان المطيافية الكتلية تستخدم لدراسة الخواص الترمو ديناميكية للفوللين.

بالإضافة الى التشظي , لوحظ ايضا تشكيل معقد اندوهيدرال (فوللين متعددة الأوجه داخليا)وذلك عندما تحصل اصطدامات عالية الطاقة . في هذا السياق ادى اصطدام بطاقة ٨Kevللهيليوم مع الكربون الى انتاج عدد من الذري الكتلية للكربون .عندما يتغير غاز الاصطدام الى He, تبين الذرى المزاحة بواسطة واحدة الكتلة ان الذروة تنشأ بسبب اضافة ذرات الهيليوم الى الكربون وهناك عدد من العلميين اثبتو ذلك من خلال تجارب نفذوها بأنواع مختلفة من المحللات الطيفية الكتلية الترادفية الهجينة .دلت الطاقة الحركية للايون وقياسات الClDبشكل لابئس فيه ان $He@C_{60}$(الترميز @يعني ان المكونات ما قبل الرمز هي في داخل قفص الفوللين الذي هو بعد الترميز),هو مركب اندوهيدرال . اعيدت قياسات مشابه على C60وc60,بينما تم مشاهدة ان C_{70}وc_{84}قد شكلا اندوهيدرال ولوح انه من الصعب رصد كل من Ne@c60وAr@C60بالمحللات الطيفية التقليدية وذلك بسبب مفاقيد الطاقة الكبيرة. لكن مع ذلك يمكن رؤيتها بتجهيزات مصممة خصيصا لذلك (انظر الفقرة ٣-٦ في مركبات الاندوهيدرال).

هذا وبالإضافة الى الاعمال المنفذة على الكربون النقي ,فأن المحلل الطيفي الكتلي قد استخدم بشكل موسع للتعرف على مشتقات الكربون المشكلة بالتفاعلات (١٨). في هذا السياق ,ان التعرف على منتجات برتش المرجعة للكربون قد انجزت بواسطة المحلل الطيفي الكتلي للاصطدام الالكتروني EI.وعليه فقد جري دراسة منتجات الكربون بمساعدة التقنية EIآنفة الذكر . كما ان منتجات التفاعل مع الفليورين اظهرت الذرى الكتلية في $C_{70}F_{40}$و$F_{36}CC_{60}$. هذه المنتجات تتشظى مع اقصاء كل من FوCF_3وC_2F_3.من المفيد ان نذكر ان الكربون (الميثيلي) قد اظهر

منتجات لمجموعات مثيليه من ١وحتى ٢٤.اخيرا يجب القول ان C_{60}وc_{70} قد وجد للتأسيس لجزيئات (اروماتية)عطرية مثل البنزين والتوليين و الأنيسول و البرومو بنزين.

7-2 كيمياء الفوللين في الطور المكثف

اساسيا كان يعتقد ان الكربون هو جزئي آرماتي عطري لا نه يمتلك قرابة ١٢٥٠٠بنية طينية محتملة .عل كل يجب التذكر ان في الانظمة تكون المخمسات قريبه من المسدسات تتجنب هذه الانظمة الروابط المضاعفة في المخمسات .يعود السبب في ذلك الى وجود الروابط المضاعفة بالمخمسات التي تقلل من مسافات الروابط,مما يزيد من الانفعال .هذا وفي حالة الكربون توجد فقد بنية واحدة تتجنب الروابط المضاعفة في المخمسات .وهذا يعني ان عملية نزع الالكترونات هي ضعيفة وان الكربون هو قليل العطرية,بناء على هذا التصنيف اي العطرية الفقيرة او الارماتية الفقيرة يمكن اقتراح نوع معين من الكيمياء ,بمعنى انه يمكن مشاهدة الكربون وفق وحدات فرعية للكورانولين وذلك بروابط كيميائية متمايزة وعددها اثنان .ان الروابط٦-٦٠(بين المسدسات)مع طول رابطة بحدود ١,٣٨انغستروم لها ميزة الرابطة المظاعفة اكثر منها في حالة الروابط ٥-٦٠٦(بين المسدسات والمخمسات)ذات طول رابطة ١,٤٥انغستروم ,والتي هي على الارجح ذات روابط وحيدة مضاعفة في الحلقة ٥-٦يمكن ان يسبب استقرارا في التناغم ذي ٥١٨,٥)Kcal/mol)مع ذلك ,ان وصف كيميائيتها على شكل بنى تحتية او هياكل تحتية مثل الراديالين وباراسيكلين (انظر المشهد٣-١)

لا يعكس الحقيقة الكيميائية بشكل كامل طالما ان هذه الهياكل التحتية هي مسطحة بينما الفوللين ذات بنية كروية. وعليه, فأن الفوللين هي منفعلة ومستمرة ووصف كيميائيتها على شكل جزيء عطري ضعيف منفعل ربما يكون مناسبا.

هذا وبما ان الفوللين تملك فقد ذرات كربون ,لا يمكن استخدامها لانجاز تفاعلات تبادلية ,بينما يمكن اجراؤها بواسطة مشتقاتها. يتألف القفص من ذرات كربون مهجنة SPوالتي لها اثر استقرائي -١.لذلك,فأن الفولورين يجذب بقوة الذرات ويتفاعل بسرعة مع النيكلوفيل .تشبه هذه التفاعلات تلك التي تخص (اولكين) المرافقه . هناك مشكلة كبرى تخص عددا من منتجات الاضافية المتولدة من قبل كل كاشف ,كما ان منتجا ما يمكن ان يمتلك عددا من الايزميرات الهيكلية .

بالأضافة الى ذلك , فأن لها محلولية جدا ضعيفة في المذيبات العضوية العديد منها لا يمتلك استقرارا عاليا بسبب الانفعال الناشئ عن اضافة منتجات اخرى وبالتالي ربما ترتد الى الفوللين قريبة لهاوذلك تحت الفحص المطيافي الكتلي .نجد فقد القليل منها يتبلور بسهولة وذلك لتيسير فحص الكريستال الوحيد بالاضافة الى ذلك ,يمكن لدراسة هذا الموضوع ان تتجز بكمية صغيرة جدا من المواد, من رتبة الملغرامات ,مع ان الوضع قد تحسن بشكل ملحوظ في السنوات الاخيرة في بعض الاحيان تترك اجراءات التنقية كميات صغيرة فقط من المركب النقي في النهاية في اكثر من مرة اصبحت تنقية الايزوميرات صعبة جدا وهي التي تقدم فهما تاما للكيمياء التي تستهلك وقتا كبيرا وربما تكون مستحيلة ,وعليه نجد عددا كبيرا من التفاعلات التي لم تدرس بشكل كامل مع ذلك , هناك بعض البحوث التي اجريت وادت الى خلق منتجات فريدة هذا وبسبب توافره الميسر وتناظريته الفريدة اخضع الكربون الى الكثير من الفحوص التفصيلية.

في هذا السياق اقترحت الدراسات الكهروكيميائية ان الكاربون يمكن ان يخضع الى ستة ارجاعات عكوسة تناسب الملء التام ل LUMO.وعليه نجد ان الكيمياء المبكرة للكربون C_{60}كانت تدور حول الانجذاب الالكتروني العالي للقفص في هذا السياق .اشارت التقاريرالى ان الكاربون تتقارب نحو الجذور والنيكلوفيل والكاربيل والدينوفيل .

كما اشير ايضا الى عمل في الكيمياء العضوية المعدنية في هذا الصدد والتي قادت الى مركبات او معقدات للمعادن الانتقالية (١٩)هناك جهود تابعها فريق عمل وودل وروبين وديدريتش في مجال الالكلة

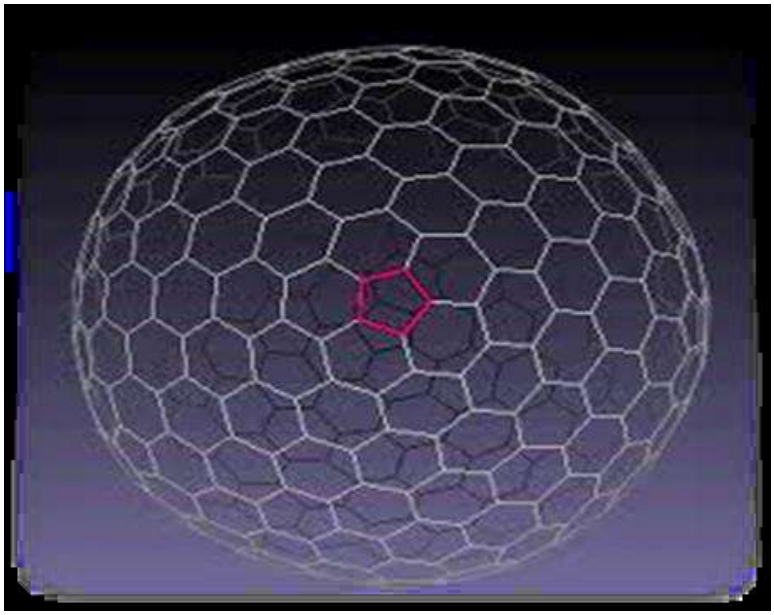
8-2 بنية جزيء الفورلين

تعرف الفوليرينات بأنها عبارة عن جزيئات ضخمة _ مقارنة ببقية الجزيئات الأخرى_ تتكون فقط من ذ ا رت الكربون التي تتجمع على شكل أقفاص كربونية مكونة من مضلعات خماسية وسداسية على شكل حلقات مفرغة متصلة مع بعضها البعض انظر للشكل (٤) , وتشكل كل ذرة كربون نقطة تلاقي كل ثلاثة حواف لسداسيين و خماسي أو لثلاثة سداسيات متجاورة ، أي

أنها توجد عند رؤوس المضلعات الخماسية والسداسية .

إن الرابطة المتشكلة بين كل سداسيين ترابطة مزدوجة , بينما تكون الرابطة بين كل خماسي وسداسي ا ربطة أحادية , و طبقاً لنظرية العالم أويمر ، فإن أي سطح مغلق مكون من حلقات خماسية وسداسية يضم بالضبط ١٢ شكل خماسي و عدداً n من الأشكال السداسية , ويتحدد " عددها وفقاً للقانون : عدد حلقات السداسية= عدد ذرات الكربون _ ٢٠

٢



الشكل (٤) حلقات الكربون الخماسية والسداسية التي تكون الفوليرينات

للوهلة الأولى قد يعتقد البعض أن الفوليرينات تشبو الغرافيت إلى حد كبير ، إلا أن

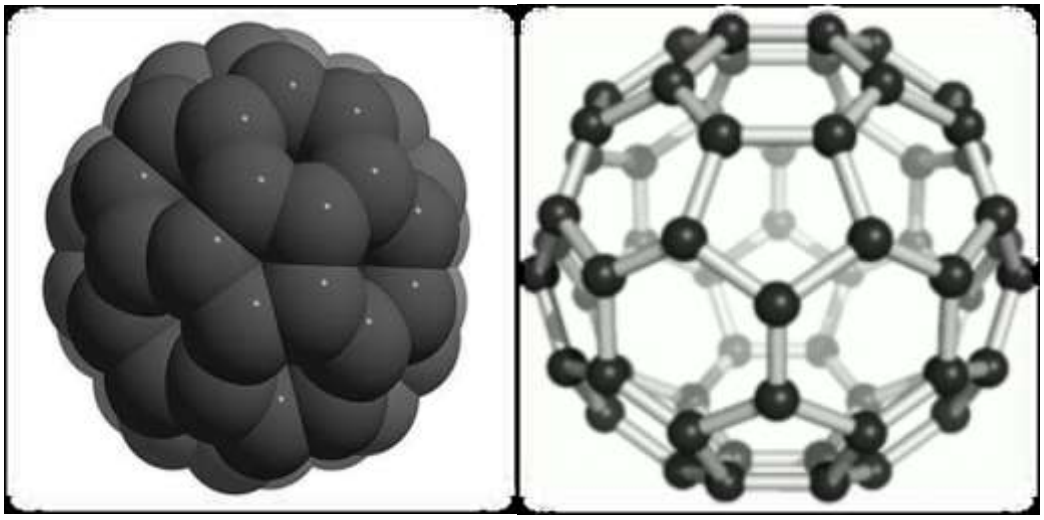
الفوليرينات تتكون من حلقات خماسية بالإضافة لوجود الحلقات السداسية مما يعطيها الشكل الكروي بعكس الغرافيت الذي يكون عمى شكل طبقات متتالية

9-2 بنية جزيء c60

اتضح للعلماء تركيب جزيء الكربون العملاق الأول " كرة البوكي"، الذي نتج من التحام ٦٠ ذرة كربون مع بعضها البعض لتكوين هيكل كروي الشكل ذي ١٢ مضلعا خماسيا و ٢٠ مضلعا سداسيا على سطحح يشبه كرة القدم المجوفة.

وتبعد كل ذرة كربون مسافة قدرها) ٣,٥٥ Å) عن مركز الجزيء ,و الطول الوسطي لرابطه

C —C-يقدر ب (١,٤٤ Å) , وهو مقارب لطول الرابطة في الغرافيت



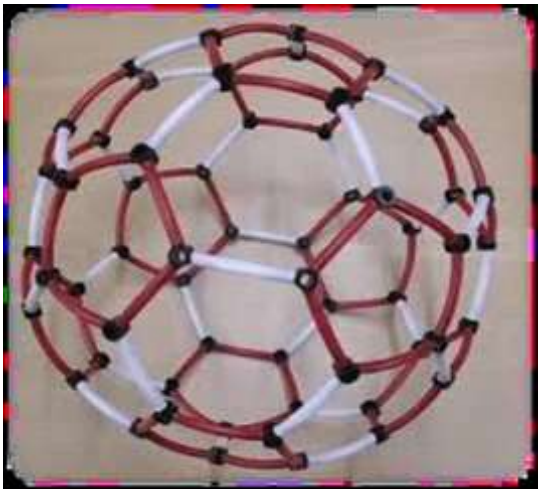
الشكل (٥) جزيء الفولرينية الأول

10-2 تصنيف الفولرينات

تصنف الفوليرينات بحسب المجسم الفراغي الذي تشكلة مضلعات الكربون المكونة للفولرين، فإذا كان المجسم الذي تكون ذرات الكربون كروي تدعى الفوليرينات بالفوليرينات الكروية أو بكرات بوكي وتدعى الفوليرينات الأسطوانية بأنابيب الكربون النانوية أو بأنابيب بوكي.....(٢٠)

11-2: الفوليرينات الكروية

تشكل فيها مضلعات الكربون شكلا كرو يا وتدعى بكرات بوكي وذلك لأنيا تشبه الكرات المستخدمة في كرة القدم التي تتالف مركب فوليرين كرويه هو مركب الفوليرين C_{60} الذي يتألف من ٦٠ ذرة من الكربون وهو يشبه كرة القدم التي تتألف من اثنتي عشر وجو خماسي وعشرين وجه سداسي



الشكل(٦) جزيء الفوليرين

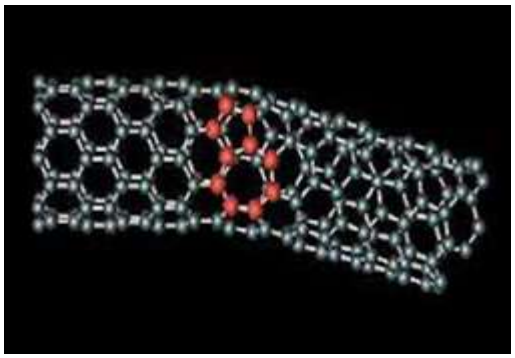
الشكل (٧) كرة القدم

بالإضافة إلى مركب C_{60} هناك فولرينات كروية أخرى هامة وهي المركبات C_{20} و C_{70} و C_{72} و C_{74} و C_{76} و C_{80} و C_{86} و C_{540} بالإضافة إلى فولرينات كروية أخرى ولكنها أقل أهمية من المركبات المذكورة

وتجدر الإشارة إلى أن أقل عدد من ذ ا رت الكربون في كرة الفوليرين هو عشرين ذرة كربون وبالتالي فإن مركب الفوليرين C_{20} وهوأصغر كرة فوليرين من كرات بوكي ممكن الحصول عليهاوهو يتألف من عشرين ذرة كربون ترتبط ببعضيا البعض بمضلعات خماسية منتظمة فقط تحتل فيها ذرات الكربون رؤوس هذة المضلعات

12-2 : أنابيب الكربون النانوية

سميت بهذا الاسم لانهاعبارة عن أنابيب ذات بنية أسطوانية

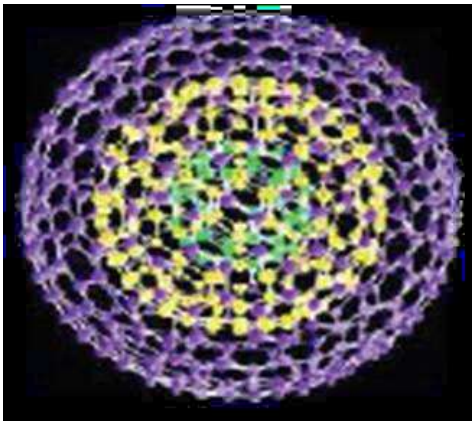


الشكل(٥) أنابيب الكربون النانوية

مجوفة ورقيقه جد اً ولها سطوح مؤلفة من حلقات كربونية خماسية وسدّاسية الشكل كخلية النحل ،وذات أقطار متناهية في الصِغر قد تصل إلى أقل من النانومتر الواحد ويمتد طول الأنبوب الواحد إلى أطول من ذلك بمئات المرات وحتى آلاف المرات ليُشكل بذلك سمكا أو أنبوبا نانويًا أحد أبعاده من مرتبة النانومتر وهذه الجزيئات وزنيا خفيف إلا أنها قد تكون أمتن نسيج صنع(٢١)

2-13أيصال النانوية

وهي عبارة عن جسيمات نانوية كروية مبنية على طبقات كربونية متعددة محيطة بكرات البوكي وتتميز هذه الكرات بأنها خاوية المركز، و يدعى هذا الصنف من الفوليرينات بالأيصال النانوية لأن تركيبها الداخلي يشبه البصلة



الشكل(٦) البصمة النانوية الفوليرنية

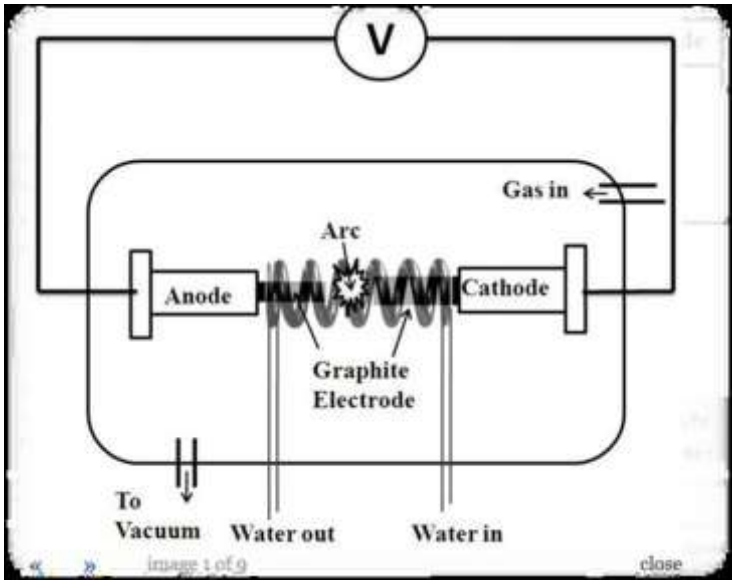
2-14 طرق تصنيع الفولرينات

طريقة التفريغ بالقوس الكهربائي أو التفريغ القوسي) Arc Discharge

تعتمد هذه الطريقة على تبخير الكرافيت في ظل درجات حرارة مرتفعة لتحويلها إلى بخار يعود لتكاثف ويتجمع على شكل فوليرينات معينة.(٢٢)

يتم في هذه الطريقة تطبيق فرق جيد منخفض وتيار مستمر مرتفع بين قضيبين مغلفين بطبقة من الغرافيت ، تفصل بينهما مسافة صغيرة، أحد القضيبين يوصل بالقطب الموجب لمولد كهربائي ويدعى بالمصعد والآخر يوصل بالقطب السالب لمولد ويدعى بالمهبط , يمكن أن يكون كلا القضيبين من الغرافيت أو أن يكونا من معدنين قادرين عل تحمل درجات الحرارة العالية التي قد تصل ما بين ١٠٠٠ درجة حتى ٤٠٠٠ درجة مئوية , وفي حال استخدمنا قضيبين من مادة غير الغرافيت , يمكننا حينها تمرير قضيب من الغرافيت بينهما بحيث يتبخر بدرجات الحرارة العالية.

بعد وصل القضيبين يتم تمرير التيار الكيربائي المرتفع جداً مولداً درجات حرارة عالية و حدوث تفريغ كهربائي بين القطبين عمى شكل شرارة كهربائية , مما يؤمن الطاقة اللازمة



الشكل(٧) طريقة التفريغ بالقوس الكهربائي

و تجدر الإشارة الاهمية اجراء هذه العملة في جو من الغاز الخامل ك "الهليوم " كي لا تتفاعل جزيئات الغاز مع بخار الغرافيت .

وبعد تبخير الغرافيت يتم إبعاد البخار عن منطقة القوس وحمله في محمول غير قطبي , ثم يتم تجفيف المحلول وفصل جزيئات C_{60} و C_{70} عن بقية المحلول .

وتعد طريقة التفريغ بالقوس الكهربائي الطريقة الرئيسية في صناعة بعض أنواع الفوليرينات

15-2 طريقة التذرية اليزرية :

حيث يتم فيها تسليط شعاع من الليزر على هدف مكون من مزيج من الغرافيت موضوع في أنبوبة من الكوارتز مُخلاة تخلية عالية من الهواء , وتحتوي على غاز خامل . مما يؤدي إلى توليد سحابة من البلازما من غاز الكربون الذي يتكاثف بدوه على بيئة فوليرينات معينة(٢٣)

الشكل(٨) طريقة التذرية الليزرية

وتصنع كرات بوكي عندما تصطدم ذرات كربون ساخنة جدا وشظايا الغرافيت بعضها بالبعض . وتلتف شظايا الغرافيت لأن الذرات الموجودة في الحواف المتآكلة لطبقاتها الرقيقة،تكون متليفة للالتصاق بأي شيء. فإذا قُدّر لأي ذرة كربون واحدة أن تصطدم بالحافة،

فيمكنها أن ترتبط بطرفين سائبين لتكوين شكل خماسي. وهذه الأشكال الخماسية تميل لجعل السطح أكثر تقوسا

16-2 خصائص وصفات الفولرينات

إن الفولرينات أو " كرات البوكي" تملك خصائص فيزيائية وكيميائية استثنائية ، تساعد على خلق العديد من التطبيقات الجديدة في مختلف المجالات و التي تعتمد على الفوليرين ،وأهم هذه الخواص

17-2

أولاً :ًالخواص ألفيزيائية

تبدي بعض مركبات الفوليرينات مثل K3C60 و CS2C60 و C60CHBr3 مقاومه فائقة عند درجات حرارة مرتفعة كما تبدي بعض الفوليرينات النقية مثل فوليرين بوكمنستر وأنابيب الكربون النانويةمقاومه فائقة عند درجات الحرارة المنخفضة

تبدي الفوليرينات ظواهر كمومية معينة وهذا ما يجعل دراستها تكون ضمن مكانيك الكم وذلك عائد لمبنية النانوية لهذه المركبات حيث أن الأبعاد الفاصلة بين ذرات الكربون في الحلقات الفوليرينية الخماسية والسداسية بحدود النانومتر

تتمتع الفوليرينات بخصائص ميكانيكية فريدة مثل خفة الوزن والمرونة المرتفعة في نفس الوقت(٢٤)

بالإضافة قابلية الثني والتشكيل وفي احدى تجارب الصدم التي أجريت على جزيء الكربون C60 تبين مدى المرونة العالية التي يتمتع بها هذا الجزئ ، فقد تم إطلاق هذه الجزئ بسرعة تساوي 24000 km/h عمى جدار مرتفع الصلابة وارتد الجزئ نحو الخلف دون أن يغير أي شيء من صفاته ومن ثم اتضح أن الفوليرينات مرنة أكثر من أي جزيئات أخرى معروفة حتى الوقت الحاضر. وهذه الخاصية تجعمها صالحة لاستخدامها وقوداً للصواريخ ومركبات الفضاء، حيث يمكنها أن تتحمل ضغوطا هائلة .

تعد كرات البوكي جزيئات قوية جداً , قادرة على تحمل ضغط هائل ; إذ بإمكان هذه الجزيئات العودة لشكميا و حالتها الأصلية حتى بعد إخضاعها لضغط ٣٠٠٠ ATM ، هذه المرونة تفيد .

استخدام الفوليرينات لصنع أدوات متينة قادرة على تحمل الضغط .

يمكن أن تتفكك بعض الفوليرينات في درجات الحرارة المرتفعة قليلا كما يمكن لبعض الفوليرينات أن تتبخر عند درجات الحرارة المرتفعة وتعد هذه الخاصة أحد الخواص السيئة للفوليرينات (٢٥)

 ثانيا : ًالخواص ًالبنيوية

تتصف بعض الفوليرينات بخاصة التراكب الضوئي وهذا يعود إلى وجود ايزومرات مختلفة لهذه الفوليرينات ومن الفوليرينات التي تبدي خاصة التراكب الضوئي فوليرين الكربون C_{40} .

_ خاصية التناظر

تناظر جزيء C_{60}

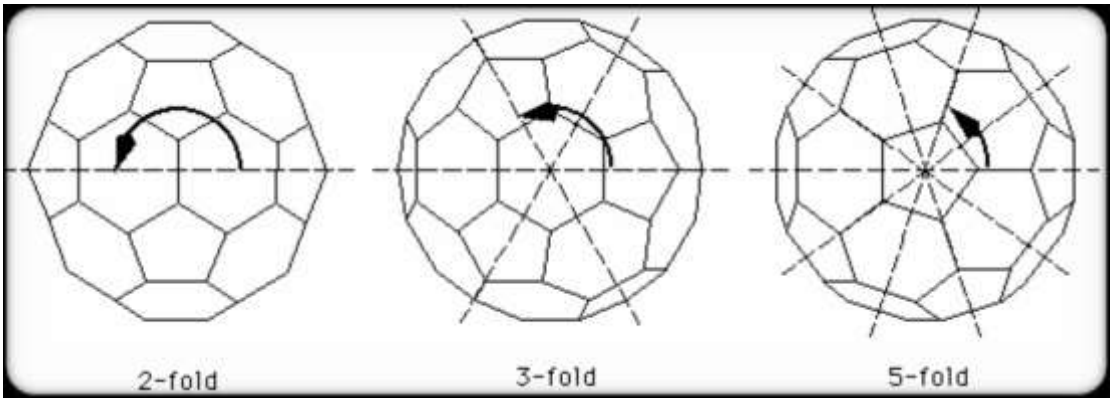
إن عمليات التماثل(التناظر) لجزيء C_{60} تقوم على عمليات المطابقة للأوجه الخماسية و السداسية ، ونتيجة لذلك يوجد للجزيء العديد من محاور الدوران التي إذا دار الجزيء وفقها بزوايا معينة يعود لينطبق على نفسه .

نلاحظ في الشكل (٩) انه يوجد لجزيء C_{60} أنواع لمحاور الدوران :

النوع الأول ٥ محاور لأضلاع كل وجين خماسين متقابلين و تمر من مركزيهما , فإذا نظرنا - ٣٦٠ درجة لينطبق /٥ = لأحد الأوجه الخماسية نجد أن الجزيء يدور بزاوية مقدارها ٧٢ الجزيء على نفسه

النوع الثاني عبارة عن ٣ محاور لأضلاع كل سداسيين متقابلين وتمر من مركزيهما , وهنا - ٣٦٠ درجة لينطبق الجزيء على نفسه. /٣ = يدور الجزيء ب ا زوية مقداربا ٧٢

و النوع الثالث هو محور لضلعي سداسيين متجاورين ويمر من مركزيهما بحيث يدور الجزيء -بزاوية١٨٠ درجة لينطبق على نفسه



الشكل (٩) الأنواع الثلاث لمحاور الدو ا رن في جزيء C_6

وبما أنة يوجد ١٢ وجو خماسي فهذا يعني أنه لجزيء 6 C_{60}(محاور دوران لأضلاع الأوجه) (الخماسية) لأن كل محور يمر بضلعي خماسين (، و كذلك لدينا ٢٠ وجه سداسي أي) ١٠ محاور لأضلاع سداسيين متقابلين ، وبما أن كل سداسي مجاور لثلاثة سداسيات أخرى فهذا ٢٠ (لأنه توجد ضلع *٣/ ٢ = يعني أن عدد الأضلاع)الروابط(بين السداسيات هو ٣٠
مشتركة بين سداسيين (، مما عني أن المحاور المارة من ضلعي سداسيين متجاورين هي ١٥) لأنه يوجد محور واحد لكل ضلعين متقابلين

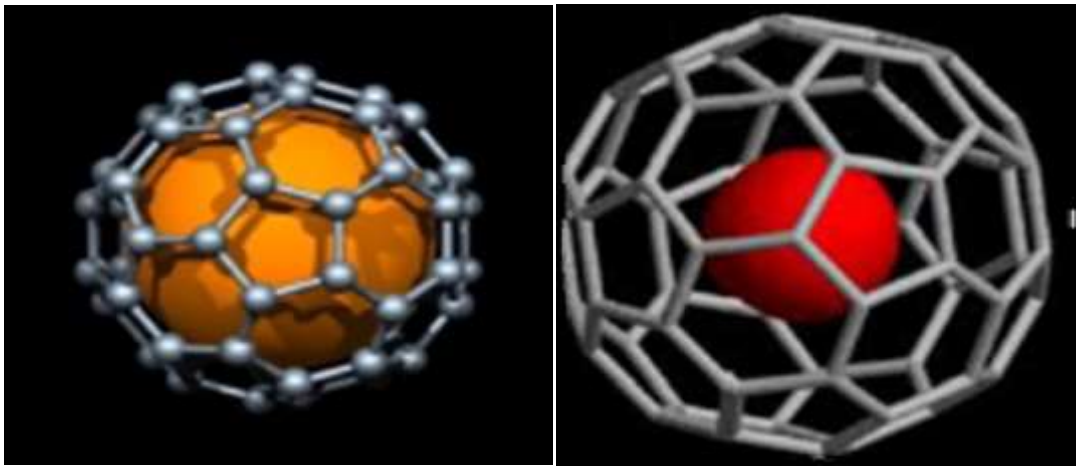
إن هذا العدد الكبير من محاور الدو ا رن يعني وجود العديد من عمليات التماثل مما يجعل جزيء C60 الجزيء المعروف الوحيد مع كل هذا العدد لعمليات التماثل

تتمتع بعض الفوليرينات الكروية بدوران ذاتي سريع للغاية، وكمثال على ذلك تبين أن فوليرين بوكمنستر يدور حول نفسو بسرعة زاوية هائلة جدا إذ يدور بمعدل مليار مرة في الثانية الواحدة.(٢٦)

يمكن لبعض الذرات أن توضع داخل الفوليرينات فيتشكل مركب جديد يدعى بمركب القفص الفوليريني وتدعى الذرة التي تتوضع داخله بالذرة الحبيسة، ويرمز لهذه المركبات بالرمز M@CN حيث M تشير إلى الذرة الحبيسة , وكمثال على هذا النوع من المركبات مركب $N@C_{60}$ وهو مركب يتألف من ذرة من الآزوت تتوضع داخل كرة بوكي C_{60}

يتم استخدام هذه الطريقة لتعديل خواص الفوليرينات , خاصة خواصها الكيربائية , إذ أن الذرة الحبيسة تستطيع تغيير الخواص الفيزيائية والمغناطيسية للفوليرين (الذرة الحبيسة قادرة على تقديم الكترونات لمجزيء).

وهنالك عدة طرق لتكوين الأقفاص الفوليرينية, في إحدى هذه الطرق يتم إضافة أيون من معدن من المعادن القلوية أو معادن الأتربة النادرة إلى جزيء الفوليرين ، ويجب أن يتم ذلك أثناء عملية تشكل الجزيء , بحيث لا تتمكن الذرة الحبيسة من اخت ا رق القفص الفوليريني المكتمل حولها , تسهم هذه العملية في زيادة ملحوظة في ناقلية الجزيء الفوليريني ، كما أنيا تساعد على
جعله قابلاً للانحلال في الماء .



الشكل(١٠) مركبات الأقفاص الفولرينية

18-2 بالإضافة لبعض الخواص الكيميائية منها

الفوليرينات قابلة للانحلال في بعض الزيوت وفي بعض المحللات العطرية كال تولولين والبنزين

وتعد الفوليرينات المركبات الوحيدة للكربون النقي التي تنحل في بعض المحللات عند درجة حرارة الغرفة "وتبدي محاليل الفوليرينات الألوان المميزة ليلاً فمثلاً

C_{60}: ارجواني

C_{70}: أحمر قرميدي

C_{76}: الأصفر الفاتح ، الأخضر

C_{84}: بني"

كذلك فإن العديد جزيئات الفوليرين يمكن أن ترتبط مع بعضها مكونة البوليمرات الفوليرينية وهي عبارة عن سلاسل بوليميرية تتشكل بدرجات حرارة وضغوط مرتفعة جدا وتعد دراسة البوليمرا ت الفوليرينية أحد الفروع الهامة في علم الفوليرينات(٢٦)

19-2 تطبيقات الفوليرينات(٢٧)

تعد الفوليرينات أحد المواد النانوية الهامة في علم وتقانة النانو سواء من حيث الأهمية التاريخية وعلاقتها بتطور التقانة النانوية وآليات اصطناع المواد النانوية من حيث التطبيقات الهامة التي تتمتع بها هذه المواد.

للفوليرينات تطبيقات هامة في مختلف الميادين وهذه التطبيقات ناتجة طبعا عن صفاتها وخصائصها المميزة وأهم تطبيقات الفوليرينات في الميادين المختلفة

أولاً: تطبيقات في الطب

أجريت عدة دراسات وبحوث على الفوليرينات لاستخدامها في الطب فمنذ العام ٢٠٠٧ أجريت

دراسات على فوليرين بوكمنستر لمعالجة الخلايا السرطانية ولاتزال هذه الدراسات مستمرة حتى الآن .
كما يمكن استخدامها في بعض أجهزة التشخيص الطبي إذ يمكن إرسال بعض أنواع الفوليرينات إلى بعض الخلايا داخل جسم الإنسان كالمعدة والأمعاء الدقيقة حيث تشكل أداة دقيقة تصل خليه الهدف بشكل تام ، كذلك يمكن إرسال جزيء فوليرين صغير لإيصال الدواء مباشرة إلى الخلية المصابة دون التأثير على الخلايا السليمة،وذلك بالاعتماد على خاصية تشكيل الأقفاص الفوليرينية والسبب في ذلك هو الصغر الشديد في قطر أقفاص جزيئات الفوليرين النانوية التي يمكنها احتواء الدواء والمرور خلال أغشية الخلايا بسيولة.
وقد أجريت دراسه على فوليرين بوكمنستر لاستخدامه في امتصاص الأشعة الكهرطيسية الصادرة عن الأجهزة المحمولة والتي قد تؤذي بعض الخلايا الحية أثناء استخدام تلك الأجهزة .
بالإضافة إلى دراسات بينت إمكانية استخدام بعض الفوليرينات كمضادات حيوية واستخدام بعض الفوليرينات ضد فيروس HIV الذي يسبب مرض الإيدز إذ ما ت ا زل الدراسات قائمة في هذا المجال لإيجاد علاج محتمل لمرض الإيدز

ثانياً: تطبيقات في الفضاء

للفوليرينات علاقة هامة في عموم الفضاء ; فقد تبين عام ٢٠١٠ وجود آثار لبعض الفوليرينات في الغبار و الأشعة الكونية القادمة من أحد النجوم ومن دراسة هذه المواد المرصودة يمكن التعرف على بعض خواص ذلك النجم

ثالثاً: تطبيقات في الالكترونيات

يمكن استخدام بعض أنواع الفوليرينات في بناء الدائرات الالكترونية المدمجة لصناعة ثنائيات وترانزستورات نصف ناقمة والاستفادة من صغر حجميا كبديل عن دائرات السيلكون التقليدية" وتجري دراسات على استخدامات الفوليرينات في صنع خلايا شمسية ذات فعالية أكبر من الخلايا العادية

ربعاً: تطبيقات في الصناعة:

تجري دراسات على استخدام بعض أنواع الفوليرينات التي تتمتع بخواص ميكانيكية فريدة كخفة الوزن والمرونة المرتفعة في تصنيع الطائ ا رت والسيا ا رت والمركبات الفضائية . كما تضاف بعض
أنواع الفوليرينات إلى بعض البوليمرات الصناعية لإكسابها صفات ميكانيكية جديدة وصفات كهربائية جديدة كالناقلية الضوئية . وتستخدم حاليا بعض أنواع الفوليرينات في صناعة عدد من الأدوات الرياضية مثل كرات السلة ومضارب التنس

وبسبب الخواص الكهربائية والحرارية التي تتمتع بها الفوليرينات فقد استخدمت في خطوط النقل الحديثة في بعض الدول الأوروبية .
وتجري دراسات حديثة على بعض أنواع الفوليرينات لاستخدامها في توليد الطاقة الكهربائية

وكذلك يمكن الاستفادة من قدرة الفولرينات على تشكيل أقفاص فولرينية في صنع مواد جديدة كلياً
مثلاً عندما يحقن الفوليرين بالبوتاسيوم أو الصوديوم داخل تجويفه فإنه يصبح مادة ذات ناقلية فائقة ممتازة .
وبسبب الخواص الضوئية التي تتمتع بها بعض الفوليرينات فقد استخدمت في مواد الوقاية من الأشعة الشمسية، فعندما يشع الضوء على محلول جزيء C_{60} يتحول ليصبح عاتماً فورا، وكلما زادت شدة الإضاءة أصبح عاتماً أكثر وهذا يخفض من حدة الإضاءة الشديدة لأقصى حد ممكن
بهذه الخاصية يمكن الاستفادة منيا في تصنيع نظا را ت واقية تستخدم عند التعرض لضوء شديد وضار (كالذين يستخدمون أشعة الليزر في مجال عملهم).
كذلك يتم تطوير أنواع من الفولرينات للحصول على خواص تزييت مميزة) أفضل من زيوت التشحيم (وتأتي أهمية هذه الخواص في تخفيف الاحتكاك الناتج عن حركة الأجزاء المعدنية في الآلات و في المفاصل الصناعية التي يتم تركيبها بعد العمليات التجريبية في الفخذ و الركبة.
و بالإضافة إلى التطبيقات المذكورة أعلاه ، فإن للفوليرينات تطبيقات عديدة أخرى
يجري حاليا التحقق من بعضها .

الخاتمة

_ لقد جاء اكتشاف نوع جديد من الكربون مفاجأة مذهلة للعلماء، فالكربون أكثر العناصر التي تعرضت لمبحث العلمي المكثف لأنه الأساس في معظم الجزيئات العضوية.

فالخواص المدهشة و العديدة لمركبات الكربون سواء أن كانت مكتشفة أو خاضعة لبحوث - العلماء حالياً تجعل المستقبل يحمل بين طياته - الكثير من الاحتمالات الجديدة المثيرة، سواء من حيث المعرفة العلمية الأساسية أو من حيث الاستخدامات التكنولوجية .

الفولرينات جزيئات كربونية ذات تركيب فريد تميزه الحلقات الخماسية و السداسية والشكل الكروي المنحني , ولها خواص عديدة تميزها عن غيرها من المركبات سوا أن كانت من حيث البنية أو من حيث الخواص الفيزيائية والكيميائية وغيرها ، وامكانات الفوليرين و خواصه المدهشة

دفعت العلماء إلى أن يصنفوا اكتشاف هذا الجزيء كأهم اكتشاف في الكيمياء ضمن سلسلة أعظم مئة اكتشاف كيميائي حتى الآن

إن العلماء منبهرون بإمكانات الفولرينات عموما، وأثناء دهشتهم يتحدث بعضهم عن التطبيقات المستقبلية، ومنها استخدام الجزيء الأقل انتظاما من كرات البوكي، وهو الجزيء C_{70}. إذ اتضح أن وضع طبقة رقيقة من هذه الجزيئات على سطح من السليكون، وتعريضها لغازي الميثان والهيدروجين الساخنين، يزيد من تحفيز نمو طبقة من الألماس، بمعدل ملايين المرات ومثل هذه الطبقة الألماسية تصمّد أسطح العُدد والأدوات أو تستخدم في عزل الدوائر الإلكترونية الدقيقة عن بعضها البعض، ومن الممكن أيضا صنع الألماس من الفولرينات مباشرة , ولكن لم يتحقق هذا عمليا حتى الآن

ولكن بعد كل تلك الخواص المدهشة والتطبيقات المفيدة للفوليرينات لا بد من الإشارة إلى أن

العلماء لم يتوقفوا عند هذا الحد فما تزال الدراسات و البحوث قائمة من اجل البحث عن مزيد من الخواص الجديدة لهذه الجزيئات , و استخدامها في التطبيقات المختلفة بهدف خلق تكنولوجيا المستقبل الحديثة

الخلاصـــــة

واسعة المجال وتدخل في الكثير قائمة تطبيقات تقنية النانو تعد تطبيقات تقنية النانو من المجالات الصناعية والعسكرية والطبية والزراعية وغيرها، على سبيل المثال ان مجموعة كبيرة من المواد الخام يتم تحسينها على إحداث تغيير في الخصائص الفيزيائية للأحجام الصغيرة أو النانوية. وتستفيد الجزيئات النانوية على سبيل المثال من الزيادة البينة في مساحة السطح إلى نسبة الحجم. ومن ثم تصبح خواصها وظيفة لقطر الجسيم. وعندما يتم دمجها في مادة كتلية، فإن البصرية ومنها الفلورية الجزيئات النانوية تؤثر بشدة على الخواص الميكانيكية للمادة، ومنها الصلابة أو التقليدية من خلال استخدام الليونة. وعلى سبيل المثال يمكن تدعيم البوليمرات الجزيئات النانوية الموجودة بالمواد الجديدة والتي قد تستخدم كبدائل خفيفة الوزن للمعادن. نتيجةً لذلك يمكن توقع زيادة الفائدة الاجتماعية للجسيمات النانوية.
وستُمَكن تلك المواد المدعمة نانوياً من تقليص الوزن المصاحب بزيادة في الثبات وتحسن في الوظيفية. هذا بالإضافة إلى أن تقانة النانو العملية تمثل بصورةٍ ضروريةٍ القدرة المتزايدة على التعامل بدقة مع المادة وفقاً للمقاييس المستحيلة – مسبقاً، موفرةً بذلك مجموعةً من الإمكانات والتي لم يكن للآخرين مسبقاً تخيلها ولذلك فمن غير المدهش أن مساحاتٍ قليلةٍ من التقانة البشرية استُثنت من الفوائد .الناجمة عن استخدام وتطبيق تقنيه النانو

المصادر

1- الفولرينات ، الدكتور ابراهيم الغريبي كلية العلوم جامعة دمشق

2- ENCYCLOPEDIA_____ الموسوعة العرب ةٌ الشاملة >> المجلد السادس عشر >> قسم الفيزياء والكيمياء, عنصر الكاربون

3-FULLERENE 5 , Mircea V. Diudea.

Faculty of chemistry and chemical engineering

Babes-Bolyai university, ROMANIA

4- Fullerene chemistry for materials science applicationsJ. Mater. Chem., 1997

5-Fullerenes, Nanotubes and Nobel Prizes ,Dr Jonathan Hare

The Creative Science Center, Sussex University. Vol. 115, No.8, September 2010

6-2007 Dove Medical Press Limited. All rights reserve

International Journal of Nanomedicine 2007:2(4) 639–649

7- PRISTINE C60 FULLERENES INHIBIT THE RATE OF TUMOR GROWTH AND METASTAS Experimental. Oncology 33, 162–164, 2011 (September)

S.V. Prylutska1, A.P. Burlaka2, Yu.I. Prylutskyy1, U.Ritter3, P. Scharff3.

8- Chemistry & Biology, Liposome Formulation of Fullerene-Based Molecular Diagnostic and Therapeutic Agents.

Vol. 12, 1127–1135, October, 2005, © 2005 Elsevier Ltd.

All rights reserved. DOI 10.1016/j.chembiol.2005.08.014 .

9- Medicinal applications of fullerenes.

© 2007 Dove Medical Press Limited. All rights reserved International Journal of Nanomedicine 2007:2(4) 639_649.

10-Structure, properties and applications of fullerenes

International Journal of Nanotechnology and Applications

ISSN 0973-631X Volume 2, Number 1 (2008), pp. 15–24 ,

© Research India Publications

written by : B.C. Yadav and Ritesh Kumar ,

Email : balchandra_yadav@rediffmail.com
11-□ CARBON NANOTUBES , First edition 1996
Edited by:
MORINUBO ENDO ,Shinshu University, Japan
SUM10 IIJIMA , NEC, Japan
MILDRED S. DRESSELHAUS
12- A National Historic Chemical Landmark The Discovery of Fullerenes.
October 11, 2010 , American Chemical Society.
13- Carbon Materials for Advanced Technologies
Edited by:
Timothy D. Burchell.
Oak Ridge, National Laboratory , TN 37831 -6088 U.S.A.
14- Electronic and Optical Properties of Fullerene Nanostructures.
© Yu.I. Prilutski, S.S. Durov .
Kiev Shevchenko University, 252033 Kiev, Ukraine.
E-mail: prilut@o_ce.ups.kiev.ua.

15-R. S. Ruoff, et al., "Radial deformation of carbon nanotubes by van der Waals forces" Nature 364, 514 (1993)
16- I. Palaci, et al. "Radial Elasticity of Multiwalled Carbon Nanotubes" Phys. Rev. Lett. 94, 175502 (2005)
17- M.-F. Yu, et al. "Investigation of the Radial Deformability of Individual Carbon Nanotubes under Controlled Indentation Force" Phys. Rev. Lett. 85, 1456-1459 (2000)
18- M. Popov et al. (2002). "Superhard phase composed of single-wall carbon nanotubes" (free download PDF). Phys. Rev. B 65: 033408.
doi:10.1103/PhysRevB.65.033408.
19- 07.23.2003 - Physicists build world's smallest motor using nanotubes and etched silicon
20- *Lu, X.; Chen, Z. (2005). "Curved Pi-Conjugation, Aromaticity, and the Related Chemistry of Small Fullerenes (<C60) and Single-Walled Carbon Nanotubes". Chemical Reviews 105 (10): 3643–3696. doi:10.1021/cr030093d.*
PMID 16218563.
21- Hong, Seunghun; Myung, S (2007). "Nanotube Electronics: A flexible approach to mobility". Nature Nanotechnology 2 (4): 207–208.
doi:10.1038/nnano.2007.89. PMID 18654263.
22- J. Haruyama et al. (2006). "Superconductivity in Entirely End-Bonded Multiwalled Carbon Nanotubes" (free download PDF). Physical Review Letters
96: 057001. doi:10.1103/PhysRevLett.96.057001.

23- J. A. Misewich et al. (2003). "Electrically Induced Optical Emission from a Carbon Nanotube FET". Science 300 (5620): 783–786.

doi:10.1126/science.1081294. PMID 12730598.

24- J. Chen et al. (2005). "Bright Infrared Emission from Electrically Induced Excitons in Carbon Nanotubes". Science 310 (5751): 1171–1174.

doi:10.1126/science.1119177. PMID 16293757.

25- M. Freitag et al. (2003). "Photoconductivity of Single Carbon Nanotubes".

Nano Letters 3 (8): 1067–1071. doi:10.1021/nl034313e.

26- Pop, Eric et al.; Mann, David; Wang, Qian; Goodson, Kenneth; Dai, Hongjie (2005-12-22). "Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature". Nano Letters 6 (1): 96–100.

doi:10.1021/nl052145f. PMID 16402794.

27- Sinha, Saion et al.; Barjami, Saimir; Iannacchione, Germano; Schwab, Alexander; Muench, George (2005-06-05). "Off-axis thermal properties of carbon nanotube films". Journal of Nanoparticle Research 7 (6): 651–657. doi:10.1007/s11051-005-8382-9.

.