

Gruppi del boro e del carbonio

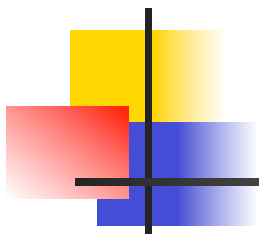
Proprietà generali degli elementi dei Gruppi 13 e 14

C, Al e Si sono abbondanti nella crosta terrestre.

La scarsità nel *cosmo* del **boro** (*come di Li e Be*) **discende dal fatto** che nella **nucleosintesi** questi elementi leggeri sono stati **aggirati**.

La scarsità degli elementi **più pesanti di entrambi i gruppi si accorda** con la generale progressiva diminuzione di stabilità degli elementi successivi al **ferro**.

Eccetto il Ge, tutti gli elementi del **gruppo del carbonio sono più abbondanti** dei termini **adiacenti dei gruppi del boro e dell'azoto**. Questa differenza deriva dalla maggior stabilità dei nuclei a **numero atomico pari**.



Proprietà fisiche e chimiche

Il **boro** presenta **somiglianze di** ordine fisico particolarmente con silicio e germanio. Tutti e tre sono **solidi duri e semiconduttori**.

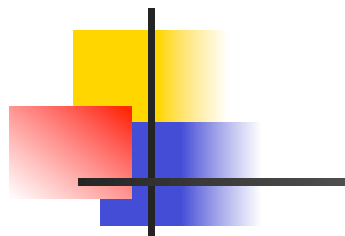
L'esistenza di due o più **forme polimorfe ben differenti** è caratteristica comune per gli elementi del **blocco p** (**vedi boro e carbonio elementari**).

I termini *più leggeri dei due gruppi* sono **non metalli e i più pesanti metalli**. **Solo Al, Tl e Pb però** cristallizzano nelle **strutture compatte tipiche dei metalli**.

B, C, Si e Ge sono decisamente **non-metalli**. Hanno elettronegatività vicina a quella dell'idrogeno.

Sono nettamente «**duri**», perchè forti ossofili e fluorofili: B, Al, C e Si.

Sono nettamente «**molli**», per l'affinità con I e S: Tl e Pb.



Proprietà degli elementi dei gruppi del boro e del carbonio

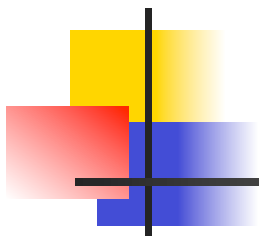
Elemento	$I/\text{kJ mol}^{-1}$	c_p	r_{cov}	r_{ion}	Aspetto e prop.	Num. ossid.
----------	------------------------	-------	------------------	------------------	-----------------	-------------

Gruppo 13/III

B	899	2,04	0,88	-	Semiconduttore scuro	3
Al	578	1,61	1,26	0,54	Metallo	3
Ga	579	1,81	1,26	0,62	Metallo p.f. 30 °C	1,3
In	558	1,78	1,44	0,80	Metallo tenero	1,3
Tl	589	2,04	1,47	0,89	Metallo tenero	1,3

Gruppo 14/IV

C	1086	2,55	0,77	-	Isolante duro (diam.)	4
					Semimetallo (grafite)	
Si	786	1,90	1,17	0,40	Semiconduttore duro	4
Ge	760	2,01	1,22	0,53	Semiconduttore duro	2,4
Sn	708	1,96	1,40	0,69	Metallo	2,4
Pb	715	2,33	1,46	0,92	Metallo tenero	2,4



Produzione

Boro, alluminio e silicio, chimicamente **duri**, sono diffusi in natura come **ossidi e ossoanioni**.

Di conseguenza gli elementi si possono ottenere **solo in condizioni fortemente riducenti**.

Boro

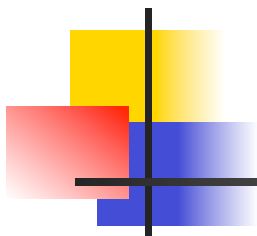
1. Riduzione dell'ossido con magnesio



o con altri metalli **elettropositivi (è generalmente amorfo**, parzialmente contaminato da impurità refrattarie come boruri metallici).

2. Riduzione elettrolitica di borati fusi in KCl/KF fusi (boro in polvere, 95%).

3. Riduzione di composti volatili del boro (es. **BBr₃**) con **H₂** (boro ad alta purezza >99.9%; il carattere cristallino cresce con la temperatura del processo).

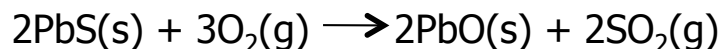


Produzione

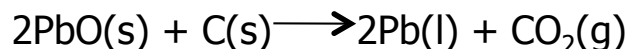
La produzione del silicio avviene per riduzione della silice con carbone in forno elettrico, o da SiCl_4 con idrogeno per semiconduttori e dell'alluminio col processo elettrolitico Hall-Heroult.

Gli ossidi degli elementi pesanti dei due gruppi si riducono più facilmente di quelli degli elementi leggeri, e questo permette di utilizzare il carbone per ridurne i minerali.

Es. lo stagno dalla cassiterite, SnO_2 . Gli elementi pesanti molli sono diffusi come minerali a base di solfuri, es. la galena, PbS . Il piombo si estrae *arrostando il solfuro all'aria, onde ottenerne l'ossido di piombo*

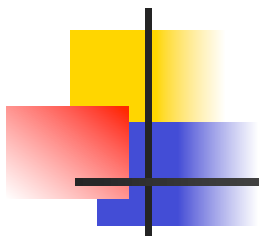


L'ossido viene poi ridotto con carbone in altoforno:



La tossicità del piombo, che dà accumulo nell'organismo, ha fatto bandire il metallo da molti prodotti di consumo, e attualmente il suo impiego principale è nelle batterie ad acido.

Gli elementi più rari si estraggono come sottoprodotti di metalli più comuni. Il gallio si ricava dalla produzione dell'alluminio; il germanio e il tallio si recuperano dalle scorie dello zinco e del piombo.



Gruppo del boro

E' notevole il fatto che il boro esista in due isotopi stabili ^{10}B e ^{11}B presenti nel boro naturale in rapporto abbastanza diverso a seconda della fonte: ^{10}B 19.10-20.31% e ^{11}B 80.90-79.69% così che il peso atomico non può essere espresso in modo più preciso di 10.81 uma.

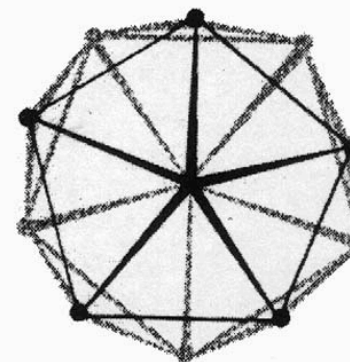
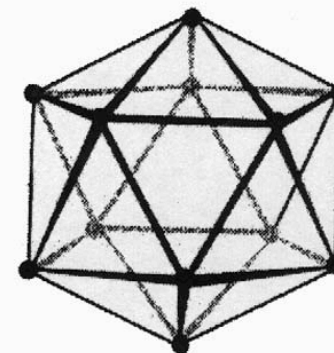
Il boro si presenta in parecchi forme polimorfe dure e refrattarie.

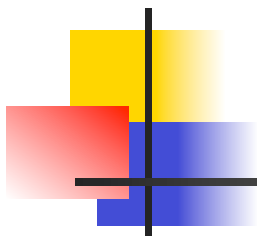
Le tre fasi solide che si riesce ad ottenere in forma cristallina contengono come blocco costruttivo l'unità B_{12} icosaedrica (20 facce triangolari).

Nella chimica del boro tale unità ricorre frequentemente, e si ritrova nei boruri e negli idruri di boro.

Tale complessità strutturale deriva dal fatto che il boro ha meno elettroni degli orbitali disponibili.

Gli elementi in queste condizioni danno comunemente strutture metalliche (legame metallico), ma le piccole dimensioni e le alte energie di ionizzazione danno luogo a formazione di legami covalenti.





Tutti gli altri termini del gruppo sono metalli. Come l'alluminio, anche il gallio è buon conduttore dell'elettricità; l'aspetto è argenteo e le altre caratteristiche sono metalliche.

Il gallio, la cui esistenza era stata prevista da Mendeleev, fu scoperto dal chimico-spettroscopista francese Lecoq de Boisbaudran nel 1875. (Le fonti convenzionali narrano che egli lo denominò gallio dall'antico nome della Francia. C'è un'altra possibilità: *le coq*, il gallo, è *gallus in latino*).

La struttura del gallio differisce da quella di qualsiasi altro metallo, poiché il legame nel solido è fortemente direzionale.

Ogni atomo di gallio dista dal vicino più prossimo 2.47 Å; i sei immediatamente meno vicini distano fra 2.70 e 2.79 Å. E' notevole che quando il metallo fonde perdurano unità Ga_2 .

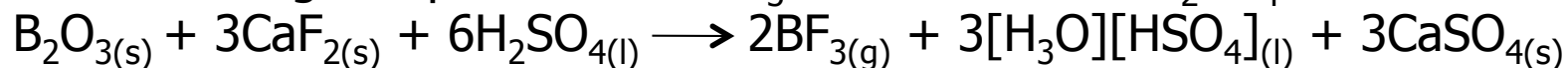
Fra le proprietà fisiche del gallio il suo punto di fusione bassissimo (30 °C) e il campo di esistenza dello stato liquido insolitamente ampio (2403 °C).

Composti del boro con gli elementi elettronegativi

Alogenuri

Tutti i trialogenuri del boro, eccettuato BI_3 si possono preparare per reazione diretta degli alogeni col boro elementare.

Il metodo migliore per ottenere BF_3 è la reazione in H_2SO_4

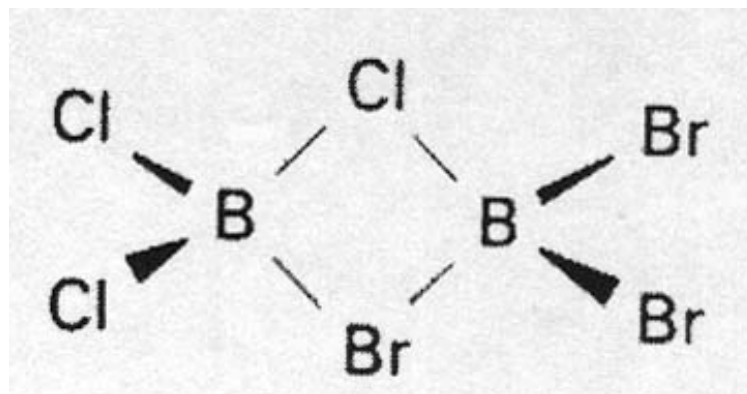


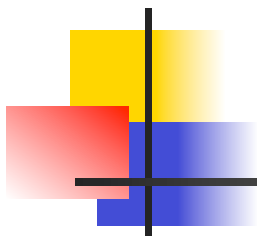
I trialogenuri di boro sono costituiti da molecole BX_3 non associate.

Mescolando alogenuri semplici, BX_3 con BY_3 , si verifica

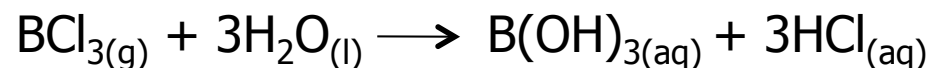
lo scambio rapido di alogeni a dare specie miste BX_2Y o BXY_2 (come evidenziato dalla spettroscopia vibrazionale e NMR del ^{11}B e ^{19}F).

Il processo *potrebbe passare* attraverso un dimero effimero, analogo agli alogenuri di alluminio allo stato gassoso.





Cloruri, bromuri e ioduri sono suscettibili di subire la protolisi ad opera di fonti deboli di protoni, quali acqua, alcoli e perfino ammine, es.:



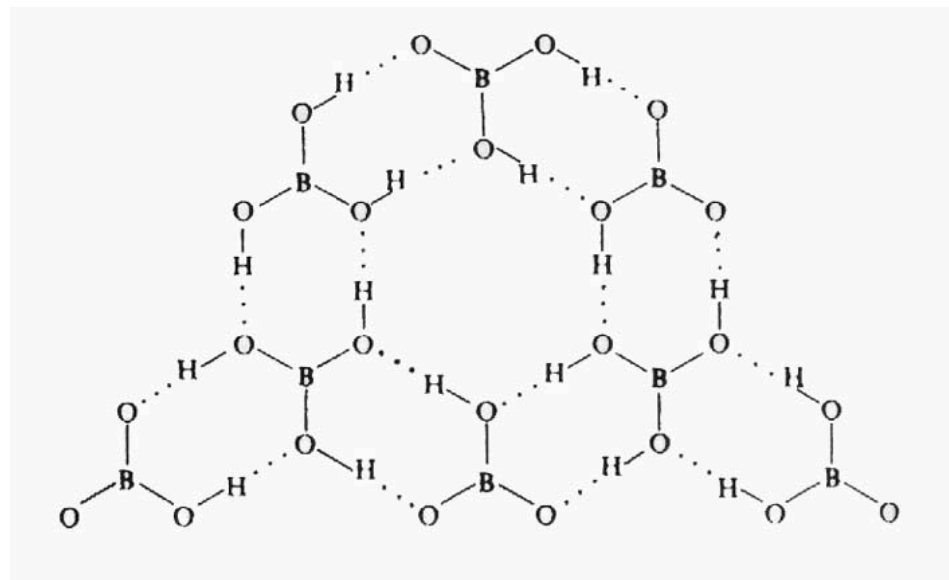
L'anione tetrafluoroborato $[\text{BF}_4]^-$ è una base di Lewis debolissima, adoperata in chimica preparativa quando occorre un anione non coordinante relativamente grande.

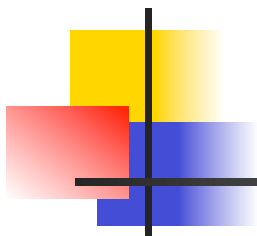
Gli altri anioni tetralogenoborato, come $[\text{BCl}_4]^-$ e $[\text{BBr}_4]^-$, si possono preparare in solventi non acquosi. Data la facilità con cui i legami B-Cl e B-Br subiscono l'idrolisi, essi non sono stabili né in acqua né in alcol.

L'ossido principale è B_2O_3 , sostanza difficilissima da cristallizzare, generalmente preparato per disidratazione controllata dell'acido borico $B(OH)_3$. L'ossido ha una struttura complessa (un network 3D di gruppi BO_3 trigonali).

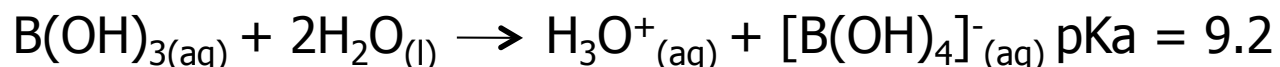
L'acido ortoborico $B(OH)_3$ cristallino ha una struttura a strati di unità BO_3 unite da legami a idrogeno asimmetrici.

Si prepara (industrialmente) per acidificazione di soluzioni acquose di borace.

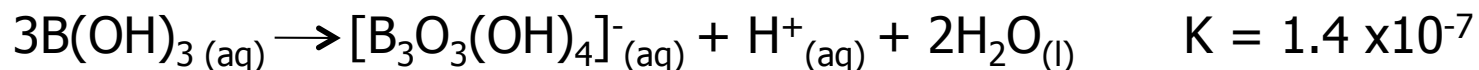




In soluzione acquosa, B(OH)_3 è un acido di Brönsted assai debole. Esso è piuttosto un acido di Lewis, e la fonte effettiva di protoni è il complesso che forma con l'acqua:

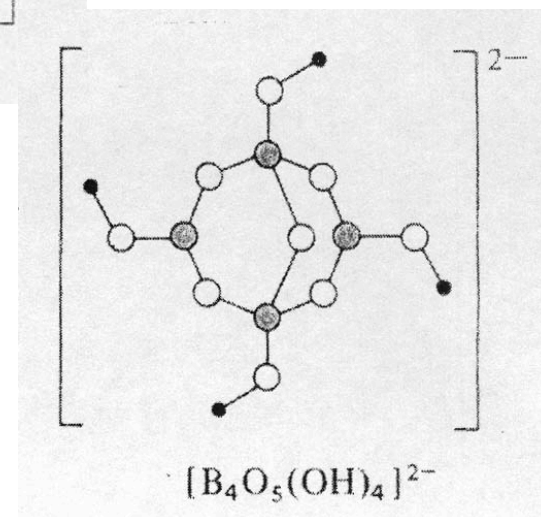
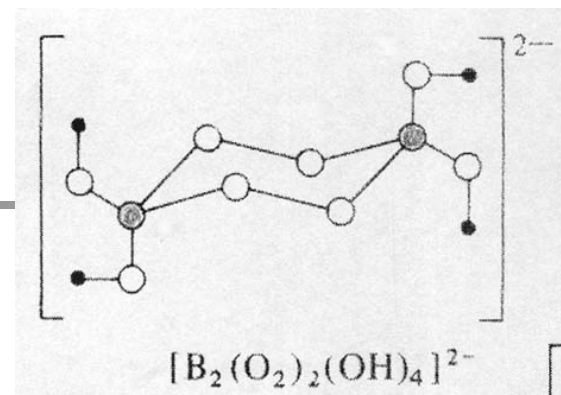


L'anione ha tendenza a polimerizzare per condensazione, con perdita di H_2O . Es. in soluzione concentrata, neutra o basica, si verificano equilibri come:



Per moderata perdita d'acqua sopra i 100°C B(OH)_3 si trasforma nell'acido metaborico HBO_2 , in diverse modificazioni cristalline: una è costituita da unità trimere $\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_3$ unite in strati mediante legami a idrogeno.

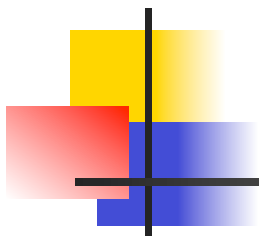
Nell'ampia varietà di borati ricordiamo il "perborato di sodio", usato nei detersivi, $\text{NaBO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, che in realtà deve essere indicato come contenente un perosso anione dinucleare $\text{Na}_2[\text{B}_2(\text{O}_2)_2(\text{OH})_4] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, e il borace, formulato normalmente come $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ma che in realtà contiene una unità tetramera e va formulato come $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.



La reazione dell'acido borico con un alcol in presenza di acido solforico porta alla formazione degli esteri dell'acido borico, che sono composti di tipo $\text{B}(\text{OR})_3$:

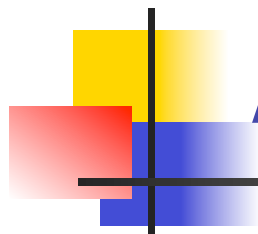


Gli esteri sono acidi di Lewis molto più deboli dei triallogenuri di boro, presumibilmente perché gli atomi di ossigeno agiscono da basi p intramolecolari, come gli atomi di F in BF_3 . Per effetto di chelazione, gli 1,2-dioli manifestano tendenza particolarmente forte a formare esteri dell'acido borico, dando un estere ciclico.



Raffreddando velocemente B_2O_3 o i borati metallici si verifica spesso la formazione di vetri al borato.

Questi vetri hanno poca importanza tecnologica, mentre gli analoghi ottenuti per fusione di borati di sodio e silice, vetri ai borosilicati (come il Pirex) hanno scarsa dilatazione termica e, quindi, bassa tendenza a rompersi per effetto di riscaldamento o raffreddamenti rapidi (vetreria da cucina e da laboratorio).



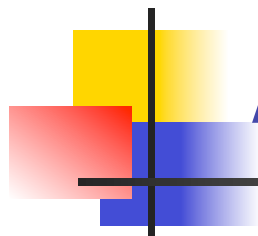
Alluminio e gallio

Con numero di ossidazione +3, alluminio e gallio presentano caratteristiche simili. Mentre non si conoscono composti di Al(I) semplici, sono noti composti semplici di Ga(I), in solventi non acquosi e allo stato solido. In tali stati di ossidazione bassi il gallio possiede molte proprietà in comune con l'indio e con il tallio.

Proprietà di alcuni alogenuri di alluminio e di gallio

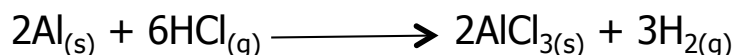
Alogenuro	Struttura	N.C.	p.f./°C	p.e./°C
AlF ₃	Ionica	6	1291*	-
AlCl ₃	Stratificata	6	190*	-
AlBr ₃	Molecolare	4	97	263
AlI ₃	Molecolare	4	191	360
GaF ₃	FeF ₃	6	1000	950*
GaCl ₃	Molecolare	4	78	210
GaBr ₃	Molecolare	4	122	278
GaCl ₂ [§]	Ga[GaCl ₄]		164	537

*Sublima. § Stati di ossidazione misti



Alogenuri

La sintesi più conveniente è:



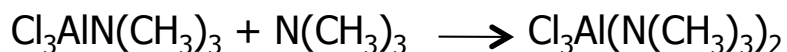
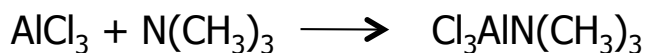
E' possibile preparare gli alogenuri di Ga(I)-Ga(III) provocando il comproporzionamento dell'alogenuro di Ga(III) per riscaldamento con Ga metallico:



Essendo lo ione F^- assai piccolo, i fluoruri AlF_3 e GaF_3 sono solidi duri ionici, con punto di fusione elevato e scarsa solubilità. A dispetto della scarsa reattività nei confronti della maggior parte dei donatori, AlF_3 e GaF_3 danno origine a sali come Na_3AlF_6 ed Na_3GaF_6 , che contengono gli ioni complessi $[\text{MF}_6]^{3-}$.

Gli alogenuri più pesanti si sciolgono in una vasta serie di solventi polari e si comportano da eccellenti acidi di Lewis.

Gli alogenuri di alluminio e congeneri più pesanti possono assumere più di una base di Lewis e agire da ipervalenti:



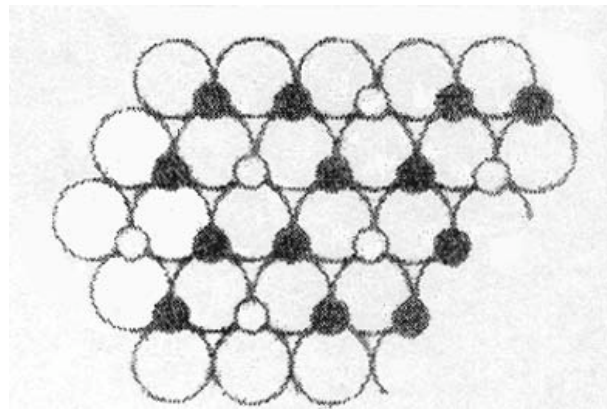
Ossidi

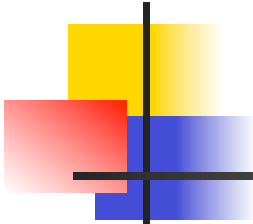
La forma stabile di Al_2O_3 , α -allumina, è un materiale durissimo e refrattario. Nella forma minerale è nota come corindone e, fra le pietre preziose, come zaffiro. La colorazione azzurra di quest'ultimo si deve ad una transizione di trasferimento di carica dall'impurezza Fe^{2+} a quella Ti^{4+} .

La struttura dell'allumina α e della gallia, Ga_2O_3 , è costituita da un assetto hcp di ioni O^{2-} , nel quale gli ioni del metallo occupano due terzi delle cavità ottaedriche a dare un arrangiamento ordinato.

Il rubino è allumina α nella quale una minuscola percentuale di Al^{3+} è sostituita da Cr^{3+} . Il Cr(III) assume una colorazione rossa, anziché quella normale violetta, caratteristica di $[\text{Cr}(\text{OH}_2)_6]^{3+}$ o di Cr_2O_3 , perché Cr^{3+} che sostituisce lo ione più piccolo Al^{3+} vede i leganti O compressi intorno a sé.

Questa compressione fa aumentare il parametro del campo dei leganti D_0 , e sposta verso la regione blu dello spettro la prima banda d-d permessa.



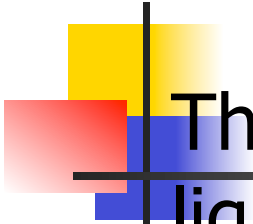


Group 3. In, Tl

In, and Tl are actually post-transition elements (they are close to Au), so have much higher electronegativity and a very different chemistry from B and Al. They form trivalent cations that form very strong complexes:

Metal ion:	Al(III)	Ga(III)	In(III)	Tl(III)
ionic radius (Å):	0.58	0.62	0.80	0.89
$\log K_1(\text{OH})^-$	9.0	11.4	10.6	13.4
$\log K_1(\text{EDTA})$:	16.4	20.4	25.0	35.3

→
increasing electronegativity



The Tl(III) ion is stabilized by complexation with ligands, and is an extremely powerful Lewis acid. Because of its high electronegativity, Tl(III) is classified as soft in HSAB, as reflected by its $\log K_1$ values with halide ions:

Metal ion:	Al ³⁺	Ga ³⁺	In ³⁺	Tl ³⁺
$\log K_1$ (F ⁻):	6.42	4.47	3.74	2.6
$\log K_1$ (Cl ⁻):	-1.0	0.01	2.32	6.72
	<u>HARD</u> ←		→ <u>SOFT</u>	

The inert pair effect in Thallium(I):

For the first time we have to consider the **inert pair** effect. Thus, for Tl, the most stable oxidation state is not Tl(III) but Tl(I). The Tl(I) ion has an ionic radius of 1.50 Å, and so resembles K^+ and Rb^+ to some extent in its chemistry. It does have some tendency towards covalence (it is soft), and so forms many complexes where it is bound to soft donors such as S. At right is seen the complex of Tl(I) with the sulfur-donor macrocycle 9-ane- S_3 .

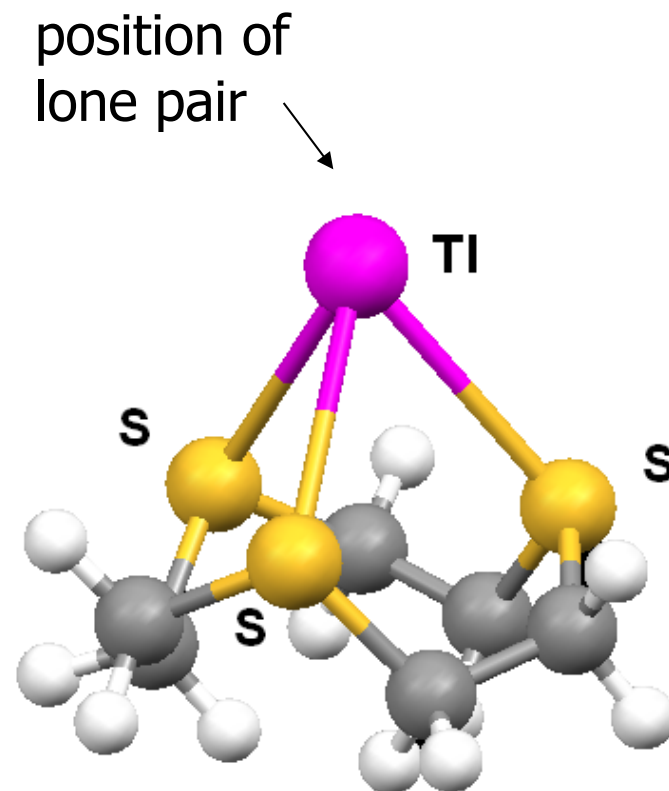
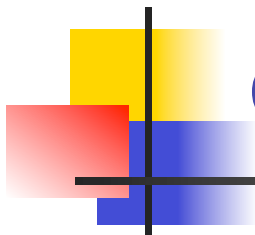


Figure 8. Structure of the Tl(I) complex with the S-donor macrocycle 9-ane- S_3 .



Gruppo del carbonio

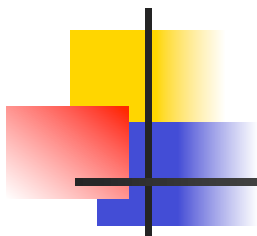
Tutti gli elementi del gruppo, eccettuato Pb, presentano almeno una fase solida avente la struttura del diamante.

Diamante e grafite

Le due forme cristalline comuni del carbonio elementare, sono sorprendentemente diverse.

Il diamante è un isolante elettrico, è la più dura fra le sostanze note e, quindi, l'abrasivo per eccellenza. Grazie alla limpidezza e all'elevato indice di rifrazione, è una delle pietre preziose di maggior pregio.

La grafite è buon conduttore, è scivolosa e in virtù di ciò trova diffusamente impiego come lubrificante, è tenera e nera, con una debole lucentezza metallica, non è durevole né particolarmente bella. L'origine di queste proprietà talmente differenti è la grande diversità della struttura e del legame che caratterizzano le due forme polimorfe (**allotropia**).



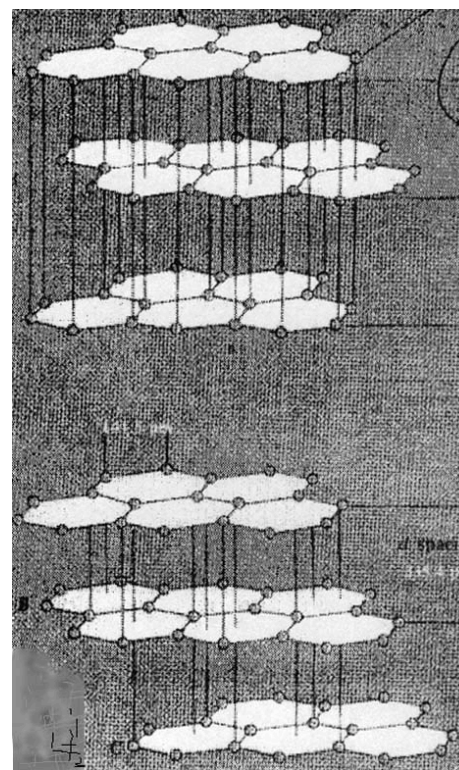
La grafite è costituita da strati piani impilati, nei quali ogni atomo di C dista 1.42 Å dai tre più vicini. I legami s fra i vicini giacenti sul medesimo piano si formano per sovrapposizione di ibridi sp^2 , e gli orbitali p rimanenti, perpendicolari, si sovrappongono formando legami p delocalizzati sull'intero piano. I piani, in quanto tali, risultano ben separati l'uno dall'altro (3.35 Å). Fra di essi esistono forze deboli, tipo forze di van der Waals e la regione intermedia si dice intervallo (gap) di van der Waals.

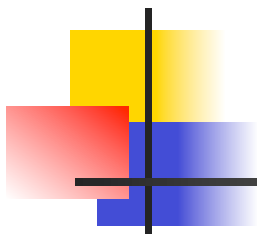
Esistono due forme di grafite che differiscono per il modo di sovrapporsi degli strati di esagoni: nella forma normale a-grafite si ha una sequenza *ababab* (*esagonale*) mentre nella b-grafite la sequenza è *abcabc* (*romboedrica*).

I piani della grafite possono facilmente scorrere parallelamente (grazie anche alla presenza di impurezze tra i piani); ciò ne giustifica le proprietà.

Anche il diamante si può tagliare, ma quest'arte antica del gioiello esige considerevole perizia, dato il carattere più simmetrico delle forze agenti nel cristallo.

La trasformazione del diamante in grafite a temperatura e pressione ordinarie è spontanea ($\Delta G^\circ = - 2.90 \text{ kJ mol}^{-1}$) ma non si verifica a velocità osservabile.



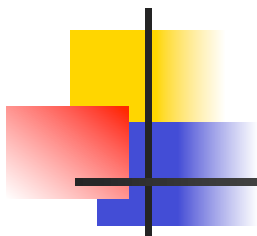


Il diamante è la fase più densa: la sua esistenza è favorita a pressioni elevate. Grandi quantitativi di abrasivi a base di diamante si fabbricano industrialmente con un processo ad alte temperatura e pressione (1800 °C e 70 kbar) catalizzato da metalli d. In tali condizioni il metallo d (tipicamente Ni) scioglie il carbonio grafite, mentre la fase diamante, meno solubile, cristallizza. Anche la sintesi di diamanti di qualità è possibile, ma non ancora economica. Sarebbe auspicabile un processo a bassa pressione, meno costoso

E' noto da tempo che depositando atomi di C vaporizzato su una superficie calda si possono formare cristalli microscopici di diamante misti a grafite.

Gli atomi di C si producono mediante pirolisi del metano, e l'idrogeno atomico che si forma favorisce il diamante rispetto alla grafite. Un'ipotesi è che H reagisca con la grafite, a dare idrocarburi volatili, più velocemente che con il diamante.

Le pellicole di diamante troverebbero applicazioni molteplici, dall'indurimento di superfici soggette ad usura alla fabbricazione di dispositivi elettronici.



La conduttività elettrica e molte proprietà chimiche della grafite derivano dalla natura dei suoi legami p coniugati.

La conduttività in direzione perpendicolare ai piani è bassa (5 S cm^{-1} a 25°C) e cresce con T , come nei semiconduttori; molto più elevata è la conduttività in direzione parallela ai piani ($3 \times 10^4 \text{ S cm}^{-1}$ a 25°C), che diminuisce al crescere di T (carattere metallico). Più precisamente, la grafite si comporta *in tale direzione da semimetallo*.

L'anisotropia della conduttività si accorda con un semplice modello a bande nel quale gli elettroni mobili occupano una banda p semipiena estesa ai piani. La banda è articolata in due zone distinte, ma senza soluzione di continuità.

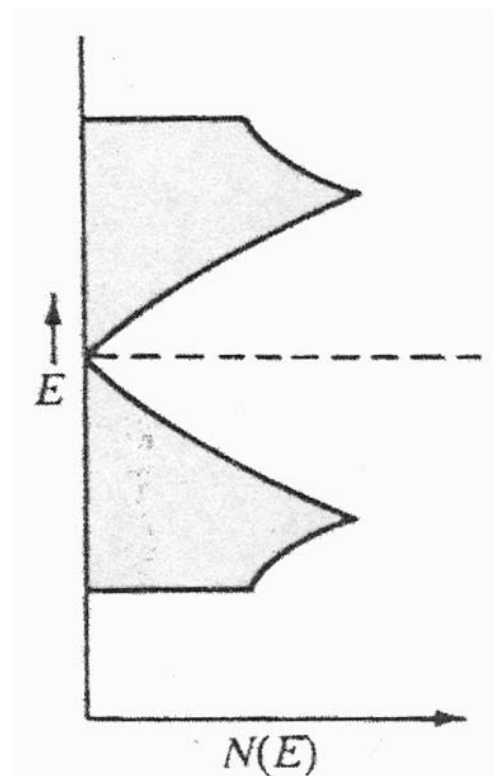
La bassa DOS vicino al livello di Fermi rende la conduttività inferiore a quella dei metalli.

Una conseguenza chimica della sua struttura elettronica è che la grafite può fungere da donatore o da accettore di elettroni nei confronti di atomi intercalati fra i suoi piani.

Atomi di K riducono la grafite donando i propri elettroni di valenza alla banda p superiore, e gli ioni K^+ penetrano fra gli strati.

Si ha ossidazione per astrazione di elettroni dalla banda p inferiore occupata con formazione di sostanze dette bisolfati di grafite, quando si riscalda la grafite con una miscela di acidi nitrico e solforico. Ioni HSO_4^- penetrano fra gli strati fornendo sostanze aventi formula approssimata $(\text{C}_{24})^+\text{SO}_3(\text{OH})^-$.

In entrambi i casi, il mutamento di popolazione elettronica causa una modifica delle proprietà elettriche della grafite.



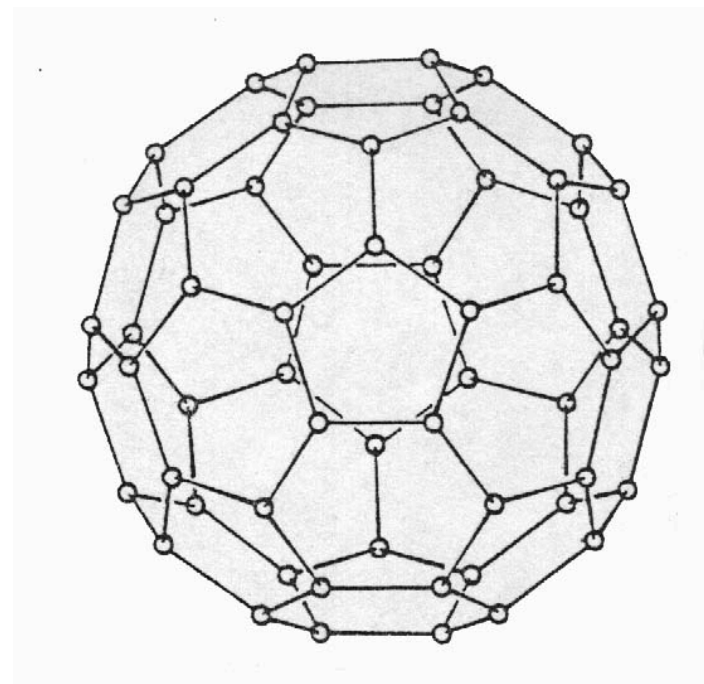
Fullereni

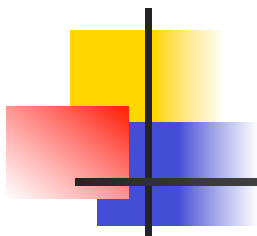
E' stata scoperta una nuova forma del carbonio costituita da entità distinte C_{60} a forma di pallone da football.

Si ottiene per effetto di un arco elettrico scoccato tra elettrodi di carbonio in atmosfera inerte, insieme a grandi quantità di fuliggine e a quantità molto minori di altri fullereni come C_{70} , C_{76} , e C_{84} . La specie principale C_{60} viene anche chiamata

buckminsterfullerene, per la somiglianza con le volte geodesiche progettate dall'architetto Buckminster Fuller.

I fullereni si sciolgono in idrocarburi e possono essere separati per cromatografia su colonna di allumina.

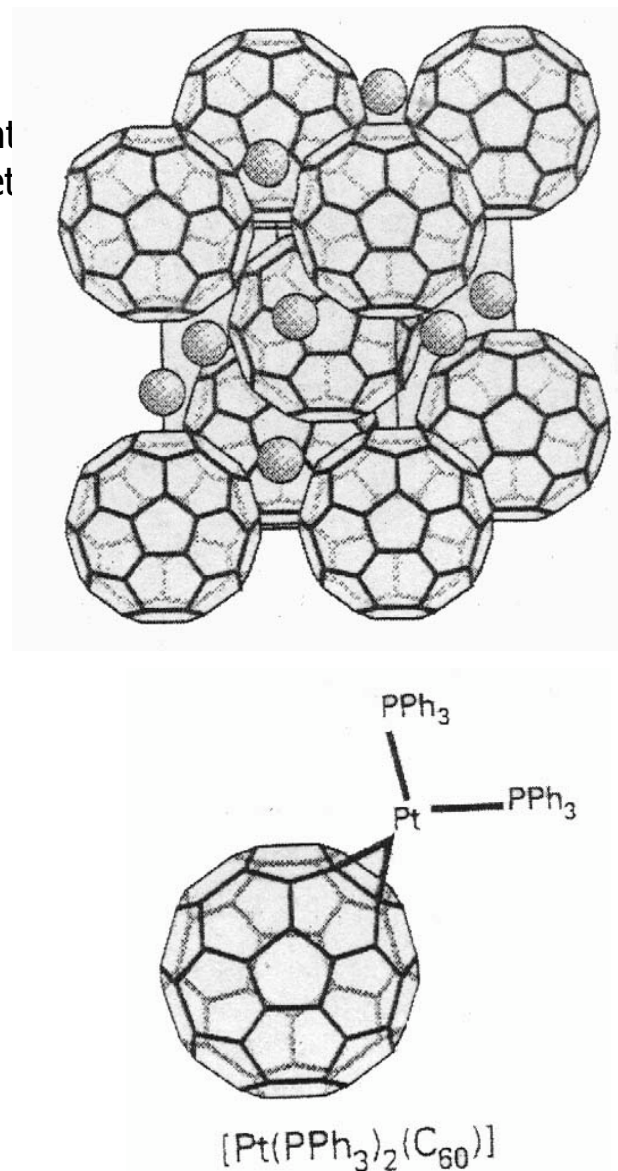


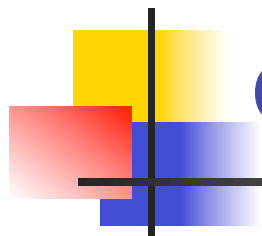


La struttura di C₆₀ è stata determinata mediante raggi X in solido a bassa T e per diffrazione elettronica (1991).

Il fullerene può essere ridotto, potendo ospitare elettroni in orbitali p antileganti facilmente accessibili e reagisce coi metalli alcalini (come visto per la grafite) a dare solidi del tipo K₃C₆₀. La struttura di K₃C₆₀ consiste di un arrangiamento fcc di cluster C₆₀ in cui ioni K⁺ occupano sia le cavità ottaedriche che le tetraedriche. Il composto è un superconduttore a T < 18 K. Molte reazioni di C₆₀ sono oggi note.

Complessi di platino possono interagire con due C del fullerene (in modo simile a quello osservato nei complessi Pt-etilene).





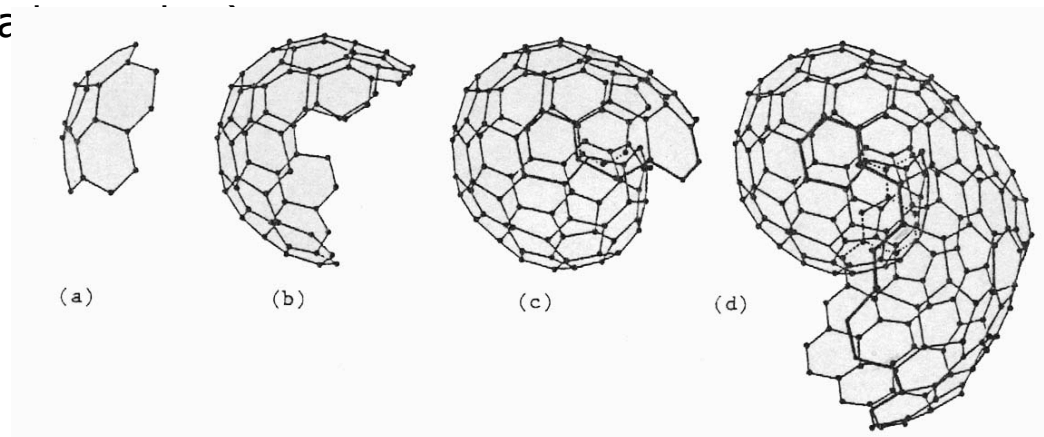
Carbonio parzialmente cristallino

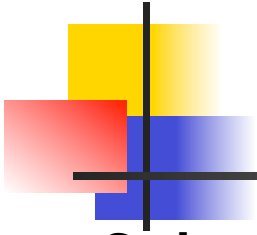
Esistono molte forme di carbonio che possiedono un basso grado di cristallinità. Questi materiali parzialmente cristallini hanno notevole importanza industriale, e comprendono il nerofumo, il carbone attivo e le fibre di carbonio.

La struttura è incerta, ma i dati sperimentali suggeriscono una certa similitudine con la grafite (strati), ma con basso grado di ordine e diversa forma delle particelle.

Nerofumo: forma di carbonio finemente suddivisa. Si prepara in grandi quantità per combustione di idrocarburi in difetto di ossigeno.

Le microfotografie elettroniche dicono che è costituito da particelle in una versione ripiegata della grafite. Impieghi: come pigmento, nell'inchiostro da stampa, e come eccipiente negli oggetti di gomma (pneumatici per automobili; ne aumenta grandemente la resistenza all'usura, proteggendo la gomma dalla



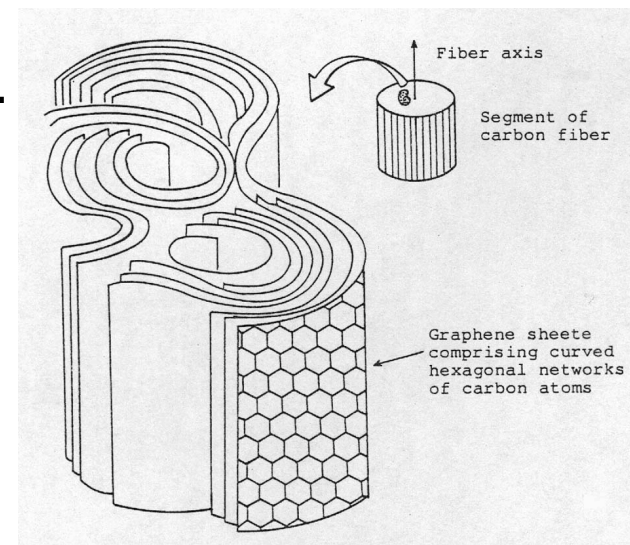


Carbone attivo: si prepara controllando la pirolisi di materiali organici. Si presenta in microparticelle di elevata area superficiale (anche $> 1000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$). Impieghi: è un adsorbente efficientissimo degli inquinanti organici dell'acqua potabile, dei gas nocivi dell'aria e di impurezze presenti nelle miscele di reazione.

I margini dei piani di esagoni (tipo grafite) portano gruppi carbossile e ossidrilici, che potrebbero spiegare in parte l'attività superficiale.

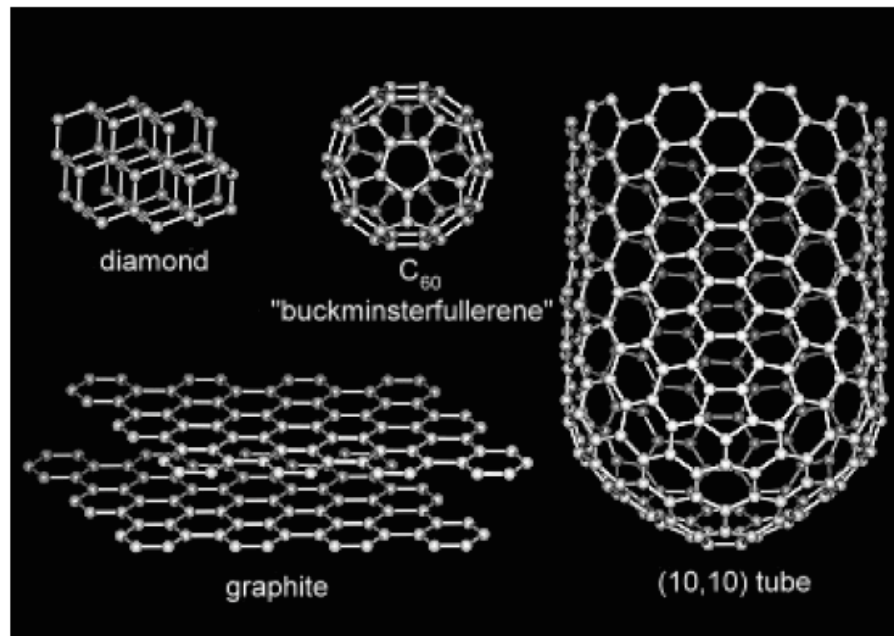
Fibre di carbonio: si ottengono controllando la pirolisi di fibre di asfalto o di fibre sintetiche; esse vengono incorporate in una varietà di prodotti plastici ad alta resistenza meccanica (racchette da tennis, componenti per aeroplani).

La struttura presenta piani grafitici a forma di nastri paralleli all'asse della fibra. La considerevole forza dei legami sui piani conferisce alla fibra elevata resistenza alla trazione.



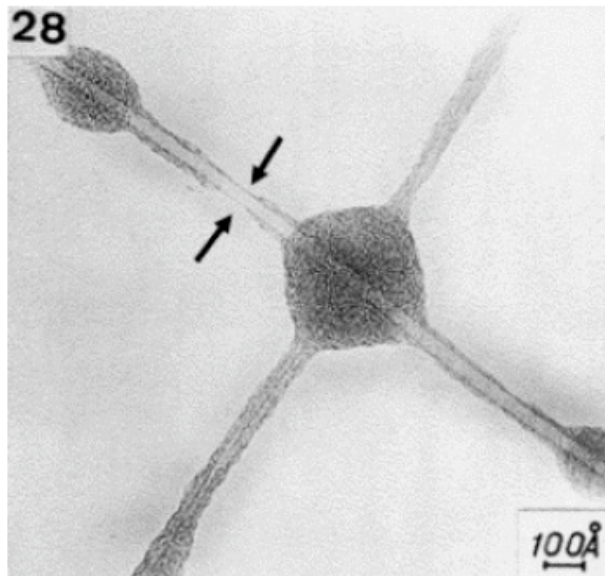


History of Carbon Nanotubes



- In 1985 a new class of molecules consisting of purely carbon was discovered, the Fullerenes.
- In 1990 Dr. Richard Smalley recognized that tubular Fullerenes should be possible.
- It was not until 1991 that Sumio Iijima of the NEC Laboratory in Tsukuba, Japan, observed that these fibers were hollow.

A “pity” to Oberlin et al.



“Carbon fibres have been prepared “

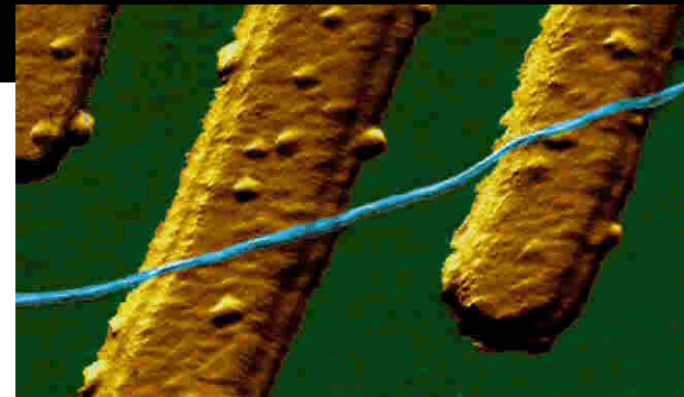
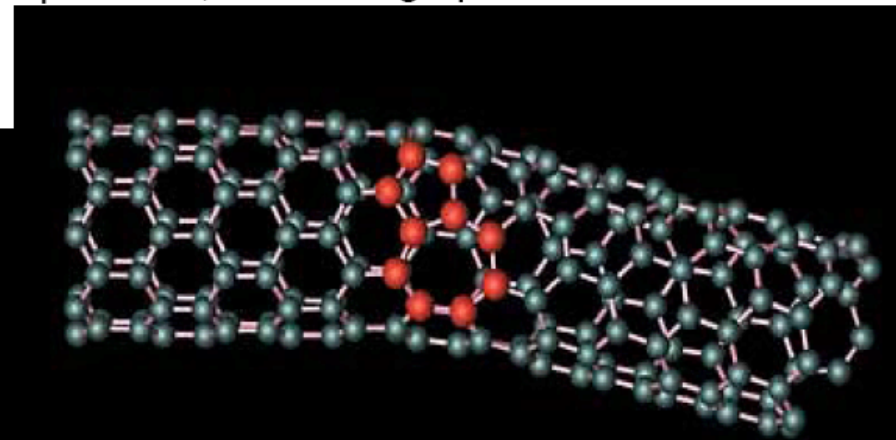
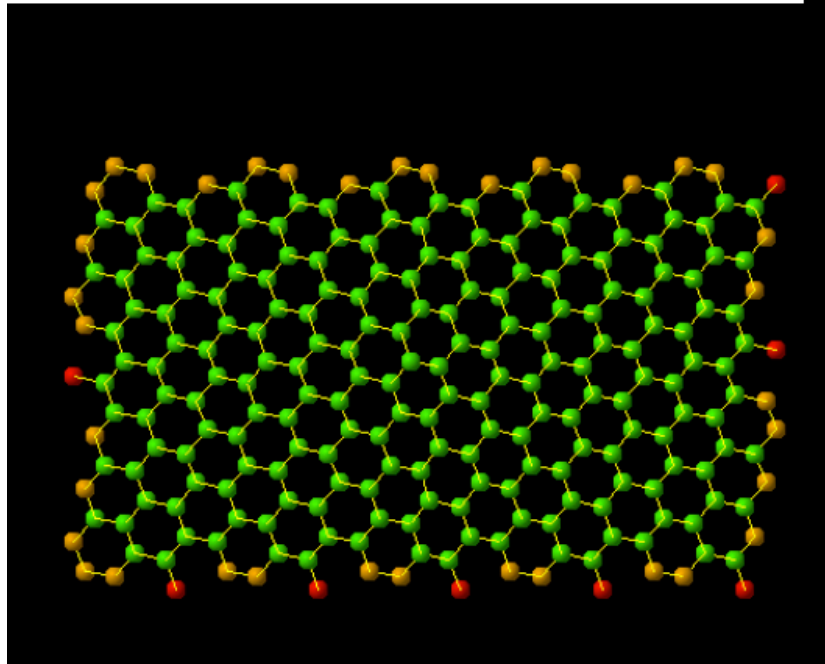
“They consist of turbostratic stacks of carbon layers, parallel to the fibre axis, and arranged in concentric sheets like the “annual ring structure of a tree”. “

Oberlin et al, *J Cryst Growth* ,1976

Carbon Nanotubes



- Carbon nanotubes are cylindrical carbon molecules with novel properties that make them potentially useful in a wide variety of applications.
- Nanotubes are composed entirely of sp^2 bonds, similar to graphite.



What is a Carbon Nanotube?

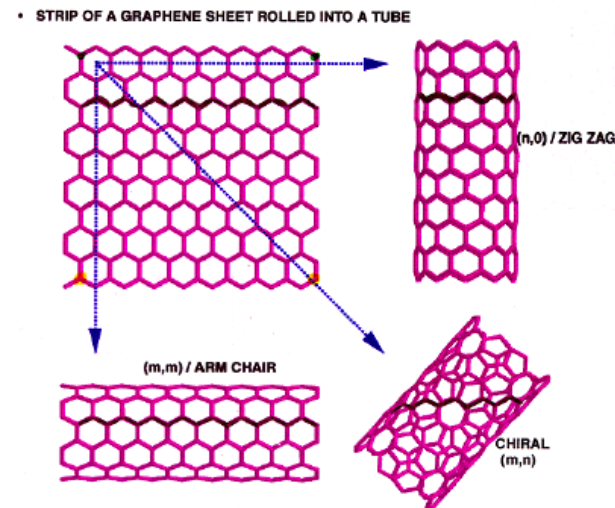
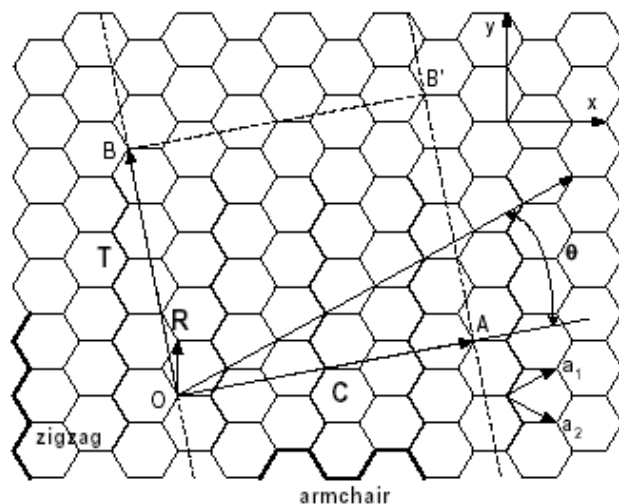
CNT is a tubular form of carbon with diameter as small as 1nm.

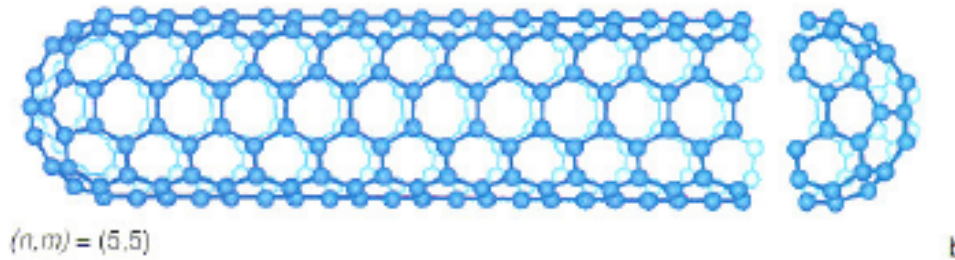
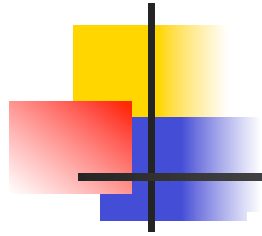
Length: few nm to microns.

CNT is configurationally equivalent to a two dimensional graphene sheet rolled into a tube.

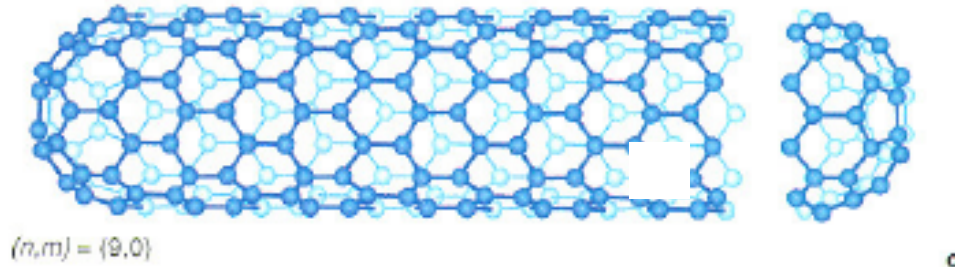
A CNT is characterized by its Chiral Vector: $\mathbf{C}_h = n \hat{a}_1 + m \hat{a}_2$,

$\theta \rightarrow$ Chiral Angle with respect to the zigzag axis.

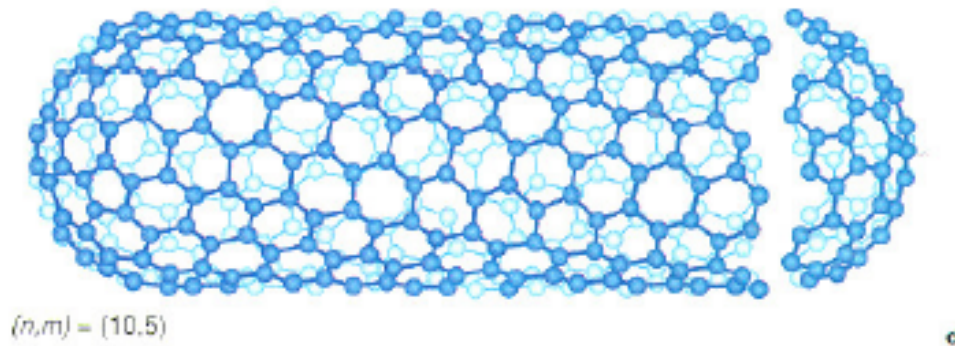




Armchair $(n,m) = (5,5)$
 $\theta = 30^\circ$



Zig Zag $(n,m) = (9,0)$
 $\theta = 0^\circ$



Chiral $(n,m) = (10,5)$
 $0^\circ < \theta < 30^\circ$