

Harold Hart Christopher M. Hadad  
Leslie E. Craine David J. Hart

# Fondamenti di chimica organica

A cura di Luca Zoia



Ebook



Guarda!



CHIMICA **ZANICHELLI**

Harold Hart Christopher M. Hadad  
Leslie E. Craine David J. Hart

# Fondamenti di chimica organica

A cura di Luca Zoia

## Se vuoi accedere alle risorse online riservate

1. Vai su **my.zanichelli.it**
2. Clicca su *Registrati*.
3. Scegli *Studente*.
4. Segui i passaggi richiesti per la registrazione.
5. Riceverai un'email: clicca sul link per completare la registrazione.
6. Cerca il tuo codice di attivazione stampato sull'etichetta in questa pagina.
7. Inseriscilo nella tua area personale su **my.zanichelli.it**

Se hai già effettuato la registrazione, per accedere ai contenuti riservati ti serve solo il codice di attivazione.



la **Z**

## Guarda!

Il digitale del tuo libro,  
sul tuo device

SCARICA LA APP



DA:



1

Sul libro, inquadra l'icona



2

Sullo schermo,  
tocca le icone

3

Guarda i video e gli altri contenuti digitali

Titolo originale: *Organic Chemistry, A Short Course, 13th Edition* by Harold Hart, Christopher M. Hadad, Leslie E. Craine, David J. Hart  
© 2012, 2007 Cengage Learning, Inc.  
© 2025 Zanichelli editore S.p.A., via Irnerio 34, 40126, Bologna [79939]  
*Revisione e integrazioni:* Luca Zoia (basata sulla traduzione di Silvia Cacciari per *Chimica organica*, ottava edizione, 2019, a sua volta basata sulla traduzione della dodicesima edizione americana di Paolo De Maria per *Chimica organica*, sesta edizione, 2008)  
Le schede *Per saperne di più* e *Green chemistry* sono di Fabio Fava, Massimiliano Lanzi, Giulia Pavarelli; gli esercizi integrativi rispetto all'edizione originale sono di Silvia Soresi

**Diritti riservati**  
I diritti di pubblicazione, riproduzione, comunicazione, distribuzione, trascrizione, traduzione, noleggio, prestito, esecuzione, elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale e di adattamento totale o parziale su supporti di qualsiasi tipo e con qualsiasi mezzo (comprese le copie digitali e fotostatiche), sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

**Fotocopie e permessi di riproduzione**  
Le fotocopie per uso personale (cioè privato e individuale, con esclusione quindi di strumenti di uso collettivo) possono essere effettuate, nei limiti del 15% di ciascun volume, dietro pagamento alla S.I.A.E. del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.  
Tali fotocopie possono essere effettuate negli esercizi commerciali convenzionati S.I.A.E. o con altre modalità indicate da S.I.A.E.

Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico, commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume.

Le richieste vanno inoltrate a:  
Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali (CLEARedi),  
Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano  
e-mail: [autorizzazioni@clearedi.org](mailto:autorizzazioni@clearedi.org) e sito web: [www.clearedi.org](http://www.clearedi.org)

L'autorizzazione non è concessa per un limitato numero di opere di carattere didattico riprodotte nell'elenco che si trova all'indirizzo [www.zanichelli.it/chi-siamo/fotocopie-e-permessi](http://www.zanichelli.it/chi-siamo/fotocopie-e-permessi)

L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale. La loro fotocopia per i soli esemplari esistenti nelle biblioteche è consentita, anche oltre il limite del 15%, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, né le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche. Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei e archivi, la facoltà di cui all'art. 71-ter legge diritto d'autore.  
Per permessi di riproduzione, diversi dalle fotocopie, rivolgersi a [ufficiocontratti@zanichelli.it](mailto:ufficiocontratti@zanichelli.it)

**Licenze per riassunto, citazione e riproduzione parziale a uso didattico con mezzi digitali**  
La citazione, la riproduzione e il riassunto, se fatti con mezzi digitali, sono consentiti (art. 70 bis legge sul diritto d'autore), limitatamente a brani o parti di opera, a) esclusivamente per finalità illustrative a uso didattico, nei limiti di quanto giustificato dallo scopo non commerciale perseguito. (La finalità illustrativa si consegue con esempi, chiarimenti, commenti, spiegazioni, domande, nel corso di una lezione); b) sotto la responsabilità di un istituto di istruzione, nei suoi locali o in altro luogo o in un ambiente elettronico sicuro, accessibili solo al personale docente di tale istituto e agli alunni o studenti iscritti al corso di studi in cui le parti di opere sono utilizzate; c) a condizione che, per i materiali educativi, non siano disponibili sul mercato licenze volontarie che autorizzano tali usi.  
Zanichelli offre al mercato due tipi di licenze di durata limitata all'anno accademico in cui le licenze sono concesse:  
A) licenze gratuite per la riproduzione, citazione o riassunto di una parte di opera non superiore al 5%. Non è consentito superare tale limite del 5% attraverso una pluralità di licenze gratuite,  
B) licenze a pagamento per la riproduzione, citazione, riassunto parziale ma superiore al 5% e comunque inferiore al 40% dell'opera. Per usufruire di tali licenze occorre seguire le istruzioni su [www.zanichelli.it/licenzeeducative](http://www.zanichelli.it/licenzeeducative)  
L'autorizzazione è strettamente riservata all'istituto educativo licenziatario e non è trasferibile in alcun modo e a qualsiasi titolo.

**Garanzie relative alle risorse digitali**  
Le risorse digitali di questo volume sono riservate a chi acquista un volume nuovo: vedi anche al sito [www.zanichelli.it/contatti/acquisti-e-recesso](http://www.zanichelli.it/contatti/acquisti-e-recesso) le voci *Informazioni generali su risorse collegate a libri cartacei e Risorse digitali e libri non nuovi*.  
Zanichelli garantisce direttamente all'acquirente la piena funzionalità di tali risorse.  
In caso di malfunzionamento rivolgersi a [assistenza@zanichelli.it](mailto:assistenza@zanichelli.it)  
La garanzia di aggiornamento è limitata alla correzione degli errori e all'eliminazione di malfunzionamenti presenti al momento della creazione dell'opera.  
Zanichelli garantisce inoltre che le risorse digitali di questo volume sotto il suo controllo saranno accessibili, a partire dall'acquisto, per tutta la durata della normale utilizzazione didattica dell'opera.  
Passato questo periodo, alcune o tutte le risorse potrebbero non essere più accessibili o disponibili: per maggiori informazioni, leggi [my.zanichelli.it/fuoricatalogo](http://my.zanichelli.it/fuoricatalogo)

**Soluzioni degli esercizi e altri svolgimenti di compiti assegnati**  
Le soluzioni degli esercizi, compresi i passaggi che portano ai risultati e gli altri svolgimenti di compiti assegnati, sono tutelate dalla legge sul diritto d'autore in quanto elaborazioni di esercizi a loro volta considerati opere creative tutelate, e pertanto non possono essere diffuse, comunicate a terzi e/o utilizzate economicamente, se non a fini esclusivi di attività didattica.

**Diritto di TDM**  
L'estrazione di dati da questa opera o da parti di essa e le attività connesse non sono consentite, salvi i casi di utilizzazioni libere ammessi dalla legge.  
L'editore può concedere una licenza. La richiesta va indirizzata a [tdm@zanichelli.it](mailto:tdm@zanichelli.it)

**Intelligenza artificiale e copyright**  
Nessuna parte di questo libro, incluse le espansioni digitali, può essere immessa in sistemi di intelligenza artificiale (siano essi chatbot o piattaforme che utilizzano l'IA per la creazione di materiali didattici o di altro tipo) senza il consenso scritto dell'editore.

*Ricerca iconografica:* Donata Cucchi  
*Indice analitico:* Matilde Soligno  
*Disegni:* Chialab srl, Bologna; Claudia Angela Capelli  
*Impaginazione:* Claudia Angela Capelli  
*Copertina:*  
– *Progetto grafico:* Falcinelli & Co., Roma  
– *Immagine di copertina:* Julia Garan/iStockphoto

Prima edizione italiana: novembre 2025

Ristampa: **prima tiratura**

5    4    3    2    1                      2025    2026    2027    2028    2029

Realizzare un libro è un'operazione complessa, che richiede numerosi controlli: sul testo, sulle immagini e sulle relazioni che si stabiliscono tra essi. L'esperienza suggerisce che è praticamente impossibile pubblicare un libro privo di errori. Saremo quindi grati ai lettori che vorranno segnalarceli.  
Per segnalazioni o suggerimenti relativi a questo libro scrivere al seguente indirizzo:

Zanichelli editore S.p.A.  
Via Irnerio 34  
40126 Bologna  
fax 051293322  
e-mail: [linea\\_universitaria@zanichelli.it](mailto:linea_universitaria@zanichelli.it)  
sito web: [www.zanichelli.it](http://www.zanichelli.it)

Prima di effettuare una segnalazione è possibile verificare se questa sia già stata inviata in precedenza, identificando il libro interessato all'interno del nostro catalogo online per l'Università.

Per comunicazioni di tipo commerciale: [universita@zanichelli.it](mailto:universita@zanichelli.it)

Stampa:

per conto di Zanichelli editore S.p.A.  
Via Irnerio 34, 40126 Bologna

# INDICE GENERALE

Le risorse digitali XII

Presentazione XIV

## 1 IL LEGAME CHIMICO E L'ISOMERIA

1 La disposizione degli elettroni negli atomi	1
2 Il legame ionico e il legame covalente	3
A I composti ionici	3
B Il legame covalente	5
3 I legami deboli	6
A Il legame dipolo-dipolo	6
B Il legame idrogeno	7
C Il legame ione-dipolo	7
D Le forze di dispersione di London	7
4 Il carbonio e il legame covalente	8
5 I legami semplici carbonio-carbonio	9
6 I legami covalenti polari	10
7 I legami covalenti multipli	12
8 La valenza	13
9 L'isomeria	14
10 Come si scrivono le formule di struttura	15
11 Le formule di struttura semplificate	17
12 La carica formale	19
13 La risonanza	21
14 Il significato delle frecce	22
15 Gli orbitali e il legame chimico: il legame sigma	24

16 Gli orbitali ibridi  $sp^3$  del carbonio 25

17 Il carbonio tetraedrico: i legami nel metano 26

18 La classificazione in base alla struttura molecolare 28

    A I composti aciclici 28

    B I composti carbociclici 29

    C I composti eterociclici 29

19 La classificazione in base ai gruppi funzionali 30

### GREEN CHEMISTRY

La chimica sostenibile 32

Mappa del capitolo 33

Esercizi 34

## 2 GLI ALCANI E I CICLOALCANI

1 La struttura degli alcani 37

2 La nomenclatura dei composti organici 39

3 Le regole IUPAC per la nomenclatura degli alcani 40

4 Alchili e alogeni come sostituenti 42

5 L'applicazione delle regole IUPAC 43

6 Le fonti di alcani 44

7 Le proprietà fisiche degli alcani e le interazioni intermolecolari di non legame 45

8 Le conformazioni degli alcani 47

9 La nomenclatura e le conformazioni dei cicloalcani 49

10 L'isomeria *cis-trans* nei cicloalcani 53

<b>11</b>	<b>Riepilogo sull'isomeria</b>	54
<b>12</b>	<b>Le reazioni degli alcani</b>	55
	A L'ossidazione e la combustione: gli alcani come combustibili	55
	<b>GREEN CHEMISTRY</b>	
	Energia alternativa, i vantaggi dell'idrogeno	56
	B L'alogenazione degli alcani	57
	<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
	Il metano, il gas di palude, e l'esperimento di Miller	58
<b>13</b>	<b>Il meccanismo radicalico a catena dell'alogenazione</b>	59
	A La stabilità dei radicali	61
	B Le reazioni di alogenazione: reattività e selettività	62
	<b>Mappa del capitolo</b>	63
	<b>Esercizi</b>	64

### 3 GLI ALCENI E GLI ALCHINI

<b>1</b>	<b>Definizione e classificazione</b>	68
<b>2</b>	<b>La nomenclatura</b>	69
<b>3</b>	<b>Alcune caratteristiche dei doppi legami</b>	72
<b>4</b>	<b>Il modello orbitalico del doppio legame: il legame pi-greco (<math>\pi</math>)</b>	73
<b>5</b>	<b>L'isomeria <i>cis-trans</i> negli alcheni</b>	75
<b>6</b>	<b>Le reazioni di addizione e di sostituzione a confronto</b>	76
	<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
	La chimica della visione	77
<b>7</b>	<b>Le addizioni al doppio legame</b>	78
	A L'addizione di alogeni	78
	B L'addizione di acqua (idratazione)	79
	C L'addizione di acidi	79
<b>8</b>	<b>L'addizione di reagenti asimmetrici ad alcheni asimmetrici: la regola di Markovnikov</b>	80
<b>9</b>	<b>Il meccanismo di addizione elettrofila agli alcheni</b>	81
<b>10</b>	<b>La spiegazione della regola di Markovnikov</b>	84
<b>11</b>	<b>L'equilibrio di reazione: che cosa rende possibile una reazione?</b>	86
<b>12</b>	<b>La reazione è veloce o è lenta?</b>	87
<b>13</b>	<b>L'idroborazione degli alcheni</b>	90

<b>14</b>	<b>L'addizione di idrogeno</b>	92
<b>15</b>	<b>Le addizioni ai sistemi coniugati</b>	93
	A Le addizioni elettrofile ai dieni coniugati	93
	B Le cicloaddizioni ai dieni coniugati: la reazione di Diels–Alder	94
<b>16</b>	<b>Le addizioni radicaliche agli alcheni</b>	96
	A L'addizione radicalica di acido bromidrico	96
	B La bromurazione alillica	96
	C Il polietilene	96
<b>17</b>	<b>L'ossidazione degli alcheni</b>	98
	A L'ossidazione con permanganato: un saggio chimico	98
	<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
	L'etilene: materia prima e ormone delle piante	99
	B L'ozonolisi degli alcheni	100
	C Altre ossidazioni degli alcheni	100
<b>18</b>	<b>Alcune caratteristiche dei tripli legami</b>	101
<b>19</b>	<b>Il modello orbitalico del triplo legame</b>	101
<b>20</b>	<b>Le reazioni di addizione agli alchini</b>	102
	<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
	Il petrolio, la benzina e il numero di ottani	103
<b>21</b>	<b>L'acidità degli alchini</b>	105
	<b>Mappa del capitolo</b>	106
	<b>Esercizi</b>	109

### 4 I COMPOSTI AROMATICI

<b>1</b>	<b>Il benzene</b>	113
<b>2</b>	<b>La struttura di Kekulé del benzene</b>	115
<b>3</b>	<b>La risonanza nel benzene</b>	115
<b>4</b>	<b>Il modello orbitalico del benzene</b>	116
<b>5</b>	<b>I simboli del benzene</b>	117
<b>6</b>	<b>La nomenclatura dei composti aromatici</b>	117
<b>7</b>	<b>L'energia di risonanza del benzene e la definizione di aromaticità</b>	120
<b>8</b>	<b>La sostituzione elettrofila aromatica</b>	121
<b>9</b>	<b>Il meccanismo della sostituzione elettrofila aromatica</b>	122
	A L'alogenazione	124
	B La nitratura	124
	C La solfonazione	125
	D Alchilazione e acilazione	125



**PER SAPERNE DI PIÙ**

La vitamina E: tocoferoli e tocotrienoli 126

**10 Effetti dei sostituenti nelle sostituzioni elettrofile** 127A I gruppi *orto*, *para*-orientanti 128B I gruppi *meta*-orientanti 130**11 L'importanza degli effetti orientanti nella sintesi** 132**12 Gli idrocarburi policiclici aromatici** 132**PER SAPERNE DI PIÙ**

Gli idrocarburi policiclici aromatici e il cancro 134

**Mappa del capitolo** 135**Esercizi** 136**5 LA STEREOISOMERIA****1 La chiralità e gli enantiomeri** 140**2 I centri stereogenici e l'atomo di carbonio stereogenico** 142**3 La configurazione e la convenzione *R-S*** 145**4 La convenzione *E-Z* per gli isomeri *cis-trans*** 149**5 La luce polarizzata e l'attività ottica** 150**6 Le proprietà degli enantiomeri** 153**7 Le proiezioni di Fischer** 154**8 I composti con più di un centro stereogenico** 156**9 I composti *meso*** 158**10 Riepilogo delle definizioni di stereochimica** 159**PER SAPERNE DI PIÙ**

Enantiomeria e attività biologica 161

**11 Il decorso stereochimico delle reazioni** 162**12 La risoluzione delle miscele racemiche** 163**GREEN CHEMISTRY**

La sintesi della L-DOPA 164

**Mappa del capitolo** 165**Esercizi** 166**6 COMPOSTI ORGANICI ALOGENATI****1 La sostituzione nucleofila** 170**2 Esempi di sostituzioni nucleofile** 171**3 I meccanismi di sostituzione nucleofila** 174**4 Il meccanismo  $S_N2$**  175**5 Il meccanismo  $S_N1$**  177**6 I meccanismi  $S_N1$  ed  $S_N2$  a confronto** 180**PER SAPERNE DI PIÙ**Le reazioni  $S_N2$  in natura: le metilazioni biologiche 181**7 La deidrogenazione, una reazione di eliminazione. I meccanismi  $E2$  ed  $E1$**  182**8 La competizione tra sostituzione ed eliminazione** 184

A Gli alogenuri terziari 184

B Gli alogenuri primari 185

C Gli alogenuri secondari 185

**9 I composti alifatici polialogenati** 186**PER SAPERNE DI PIÙ**

I CFC, lo strato di ozono e il mercato 188

**Mappa del capitolo** 189**Esercizi** 191**7 GLI ALCOLI, I FENOLI E I TIOLI****1 La nomenclatura degli alcoli** 193**PER SAPERNE DI PIÙ**

Gli alcoli prodotti industrialmente 195

**2 La classificazione degli alcoli** 196**3 La nomenclatura dei fenoli** 196**4 Il legame idrogeno negli alcoli e nei fenoli** 197**5 Acidità e basicità rivisitate** 198**6 L'acidità degli alcoli e dei fenoli** 200**7 La basicità degli alcoli e dei fenoli** 203**8 La disidratazione degli alcoli ad alcheni** 203**9 La reazione degli alcoli con gli acidi alogenidrici** 205**10 Altri metodi di preparazione degli alogenuri alchilici a partire dagli alcoli** 206**11 Alcoli e fenoli a confronto** 207**12 L'ossidazione degli alcoli ad aldeidi, chetoni e acidi carbossilici** 208**13 Gli alcoli con più di un ossidrile** 209**PER SAPERNE DI PIÙ**

Alcoli e fenoli di importanza biologica 210

<b>14</b>	La sostituzione elettrofila aromatica sui fenoli	211
<b>15</b>	L'ossidazione dei fenoli	211
<b>16</b>	I fenoli come antiossidanti	212
<b>17</b>	I tioli, analoghi solforati degli alcoli e dei fenoli	213

**PER SAPERNE DI PIÙ**

I capelli: ricci o lisci?	214
---------------------------	-----

<b>Mappa del capitolo</b>	215
---------------------------	-----

<b>Esercizi</b>	217
-----------------	-----

**8 GLI ETERI E GLI EPOSSIDI**

<b>1</b>	La nomenclatura degli eteri	220
<b>2</b>	Le proprietà fisiche degli eteri	221
<b>3</b>	Gli eteri come solventi	222
<b>4</b>	Il reagente di Grignard: un composto organometallico	222
<b>5</b>	La preparazione degli eteri	225
<b>6</b>	La scissione degli eteri	226

**PER SAPERNE DI PIÙ**

L'etere e l'anestesia	227
-----------------------	-----

<b>7</b>	Gli epossidi (ossirani)	228
<b>8</b>	Le reazioni degli epossidi	229
<b>9</b>	Gli eteri ciclici	231

**GREEN CHEMISTRY**

MTBE: l'etere per la benzina senza piombo	233
---	-----

<b>Mappa del capitolo</b>	234
---------------------------	-----

<b>Esercizi</b>	235
-----------------	-----

**9 LE ALDEIDI E I CHETONI**

<b>1</b>	La nomenclatura delle aldeidi e dei chetoni	238
<b>2</b>	Aldeidi e chetoni comuni	240
<b>3</b>	I metodi di preparazione delle aldeidi e dei chetoni	242
<b>4</b>	Le aldeidi e i chetoni in natura	243
<b>5</b>	Il gruppo carbonilico	244
<b>6</b>	L'addizione nucleofila ai carbonili: considerazioni meccanicistiche	245
<b>7</b>	L'addizione di alcoli: la formazione di emiacetali e di acetali	246

<b>8</b>	L'addizione di acqua: l'idratazione di aldeidi e chetoni	250
----------	--	-----

<b>9</b>	L'addizione di reagenti di Grignard e di acetiluri	250
----------	--	-----

<b>10</b>	L'addizione di acido cianidrico: le cianidrine	253
-----------	--	-----

<b>11</b>	L'addizione di nucleofili all'azoto	253
-----------	-------------------------------------	-----

<b>12</b>	La riduzione dei composti carbonilici	255
-----------	---------------------------------------	-----

<b>13</b>	L'ossidazione dei composti carbonilici	257
-----------	--	-----

<b>14</b>	La tautomeria cheto-enolica	258
-----------	-----------------------------	-----

**PER SAPERNE DI PIÙ**

Tautomeria e fotocromismo	259
---------------------------	-----

<b>15</b>	L'acidità degli idrogeni in alfa: l'anione enolato	260
-----------	--	-----

<b>16</b>	Lo scambio di deuterio nei composti carbonilici	261
-----------	---	-----

<b>17</b>	La condensazione aldolica	262
-----------	---------------------------	-----

<b>18</b>	La condensazione aldolica mista	263
-----------	---------------------------------	-----

<b>19</b>	Le sintesi industriali mediante condensazione aldolica	264
-----------	--	-----

**PER SAPERNE DI PIÙ**

Il trattamento delle acque e la chimica degli enoli/etanoli	265
---	-----

<b>Mappa del capitolo</b>	266
---------------------------	-----

<b>Esercizi</b>	268
-----------------	-----

**10 ACIDI CARBOSSILICI E DERIVATI**

<b>1</b>	La nomenclatura degli acidi	272
----------	-----------------------------	-----

<b>2</b>	Le proprietà fisiche degli acidi	275
----------	----------------------------------	-----

<b>3</b>	Acidità e costanti di acidità	276
----------	-------------------------------	-----

<b>4</b>	Perché gli acidi carbossilici sono acidi?	278
----------	---	-----

<b>5</b>	L'influenza della struttura sull'acidità: l'effetto induttivo rivisitato	279
----------	--	-----

<b>6</b>	La trasformazione degli acidi in sali	280
----------	---------------------------------------	-----

<b>7</b>	I metodi di preparazione degli acidi	281
----------	--------------------------------------	-----

A	L'ossidazione degli alcoli primari e delle aldeidi	281
---	--	-----

B	L'ossidazione delle catene laterali dei composti aromatici	281
---	--	-----

C	La reazione dei reagenti di Grignard con diossido di carbonio	282
---	---	-----

D	L'idrolisi dei cianuri (nitrili)	282
---	----------------------------------	-----

<b>8</b>	I derivati degli acidi carbossilici	284
----------	-------------------------------------	-----

<b>9</b>	<b>Gli esteri</b>	284
<b>10</b>	<b>La preparazione degli esteri: l'esterificazione di Fischer</b>	285
<b>11</b>	<b>Il meccanismo di esterificazione con catalisi acida: la sostituzione nucleofila acilica</b>	286
<b>12</b>	<b>I lattoni</b>	288
<b>13</b>	<b>La saponificazione degli esteri</b>	288
<b>14</b>	<b>L'ammonolisi degli esteri</b>	289
<b>15</b>	<b>La reazione degli esteri con i reagenti di Grignard</b>	290
<b>16</b>	<b>La riduzione degli esteri</b>	291
<b>17</b>	<b>I composti acilici attivati</b>	291
<b>18</b>	<b>Gli alogenuri acilici</b>	292
<b>19</b>	<b>Le anidridi degli acidi</b>	294
<b>20</b>	<b>Le ammidi</b>	296

**GREEN CHEMISTRY**

I tioesteri, le funzioni che attivano i gruppi acilici in natura 296

<b>21</b>	<b>Sommario delle reazioni dei derivati degli acidi carbossilici</b>	298
<b>22</b>	<b>Gli idrogeni in alfa degli esteri: la condensazione di Claisen</b>	301

**GREEN CHEMISTRY**

Chimica verde e ibuprofene: un caso di studio 303

<b>Mappa del capitolo</b>	304
<b>Esercizi</b>	306

## 11 LE AMMINE E ALTRI COMPOSTI AZOTATI

<b>1</b>	<b>Classificazione e struttura delle ammine</b>	309
<b>2</b>	<b>La nomenclatura delle ammine</b>	310
<b>3</b>	<b>Le proprietà fisiche e le interazioni intermolecolari delle ammine</b>	312
<b>4</b>	<b>La preparazione delle ammine: l'alchilazione dell'ammoniaca e delle ammine</b>	313
<b>5</b>	<b>La preparazione delle ammine: la riduzione di composti azotati</b>	315
<b>6</b>	<b>La basicità delle ammine</b>	317
<b>7</b>	<b>Il confronto delle basicità e acidità delle ammine e delle ammidi</b>	319

<b>8</b>	<b>La reazione delle ammine con gli acidi forti: i sali delle ammine</b>	320
<b>9</b>	<b>Le ammine chirali nella risoluzione delle miscele racemiche</b>	322
<b>10</b>	<b>L'acilazione delle ammine con i derivati degli acidi</b>	322
<b>11</b>	<b>I composti di ammonio quaternari</b>	324
<b>12</b>	<b>I sali di diazonio aromatici</b>	325
<b>13</b>	<b>La diazocopolazione: i coloranti azoici</b>	328
	<b>Mappa del capitolo</b>	329
	<b>Esercizi</b>	331

## 12 LA SPETTROSCOPIA

<b>1</b>	<b>I principi della spettroscopia</b>	333
<b>2</b>	<b>La spettroscopia di risonanza magnetica nucleare (NMR)</b>	335
	<b>A</b> La registrazione di uno spettro NMR	335
	<b>B</b> Il chemical shift e l'area dei picchi	336
	<b>C</b> La separazione (splitting) spin-spin dei segnali	340
<b>3</b>	<b>La spettroscopia <math>^{13}\text{C}</math> NMR</b>	343
	<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
	L'NMR in biologia e in medicina	345
<b>4</b>	<b>La spettroscopia infrarossa</b>	346
<b>5</b>	<b>La spettroscopia visibile e ultravioletta</b>	350
<b>6</b>	<b>La spettrometria di massa</b>	352
	<b>Mappa del capitolo</b>	356
	<b>Esercizi</b>	357

## 13 I COMPOSTI ETEROCICLICI

<b>1</b>	<b>La piridina, un eterociclo aromatico</b>	360
<b>2</b>	<b>Le reazioni di sostituzione sulla piridina</b>	362
<b>3</b>	<b>Altri eterocicli a sei termini</b>	365
<b>4</b>	<b>Gli eterocicli a cinque termini: furano, pirrolo e tiofene</b>	367
<b>5</b>	<b>Le reazioni di sostituzione elettrofila del furano, del pirrolo e del tiofene</b>	370
	<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
	Le porfirine: perché il sangue è rosso e l'erba è verde?	371



<b>6</b>	<b>Altri eterocicli a cinque termini: gli azoli</b>	372
<b>7</b>	<b>Eterocicli a cinque termini con anelli condensati: gli indoli e le purine</b>	373
<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>		
	La morfina e altri farmaci azotati	375
<b>Mappa del capitolo</b>		376
<b>Esercizi</b>		377

14

I POLIMERI SINTETICI

<b>1</b>	<b>La classificazione dei polimeri</b>	379
<b>2</b>	<b>La polimerizzazione per addizione radicalica</b>	380
<b>3</b>	<b>La polimerizzazione per addizione cationica</b>	385
<b>4</b>	<b>La polimerizzazione per addizione anionica</b>	386
<b>5</b>	<b>I polimeri stereoregolari: la polimerizzazione di Ziegler–Natta</b>	387
<b>GREEN CHEMISTRY</b>		
	Le microplastiche	389
<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>		
	Poliacetilene e polimeri conduttori	390
<b>6</b>	<b>I polimeri dienici: la gomma naturale e la gomma sintetica</b>	390
<b>7</b>	<b>I copolimeri</b>	392
<b>8</b>	<b>La polimerizzazione per condensazione: il Dacron® e il nylon</b>	393
<b>GREEN CHEMISTRY</b>		
	I polimeri degradabili	395
<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>		
	Le poliammidi più recenti: le arammidi	396
<b>9</b>	<b>I poliuretani e altri polimeri di condensazione</b>	397
<b>Mappa del capitolo</b>		400
<b>Esercizi</b>		402

15

I LIPIDI E I DETERGENTI

<b>1</b>	<b>Le caratteristiche dei lipidi</b>	405
	A I grassi e gli oli	406
	B La nomenclatura dei trigliceridi	407
<b>2</b>	<b>Le reazioni dei trigliceridi</b>	409

	A L'idrogenazione degli oli vegetali	409
	B L'ossidazione dei trigliceridi	410
	C La saponificazione dei grassi e degli oli	410
<b>3</b>	<b>Come agiscono i saponi?</b>	411
<b>4</b>	<b>I detergenti sintetici (detersivi)</b>	412
<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>		
	I detergenti in commercio	415
<b>5</b>	<b>I fosfolipidi</b>	416
<b>6</b>	<b>Prostaglandine, leucotrieni e lipossine</b>	416
<b>7</b>	<b>Le cere</b>	417
<b>8</b>	<b>I terpeni e gli steroidi</b>	418
<b>Mappa del capitolo</b>		422
<b>Esercizi</b>		423

16

I CARBOIDRATI

<b>1</b>	<b>Definizione e classificazione</b>	426
<b>2</b>	<b>I monosaccaridi</b>	427
<b>3</b>	<b>La chiralità nei monosaccaridi: le proiezioni di Fischer e gli zuccheri D,L</b>	428
<b>4</b>	<b>Le strutture emiacetaliche cicliche dei monosaccaridi</b>	431
<b>5</b>	<b>Anomeria e mutarotazione</b>	433
<b>6</b>	<b>Le strutture piranosiche e furanosiche</b>	435
<b>7</b>	<b>Le conformazioni dei piranosidi</b>	436
<b>8</b>	<b>Esteri ed eteri da monosaccaridi</b>	437
<b>9</b>	<b>La riduzione dei monosaccaridi</b>	437
<b>10</b>	<b>L'ossidazione dei monosaccaridi</b>	438
<b>11</b>	<b>La formazione di glicosidi dai monosaccaridi</b>	439
<b>12</b>	<b>I disaccaridi</b>	440
	A Il maltosio	440
	B Il cellobiosio	441
	C Il lattosio	441
	D Il saccarosio	442
<b>13</b>	<b>I polisaccaridi</b>	443
	A L'amido e il glicogeno	443
<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>		
	Sapore dolce e dolcificanti	444
	B La cellulosa	446
	C Altri polisaccaridi	447
<b>14</b>	<b>I fosfati degli zuccheri</b>	447

<b>GREEN CHEMISTRY</b>	
Impieghi alternativi dei carboidrati	448
<b>15</b> I deossi zuccheri	449
<b>16</b> Gli ammino zuccheri	449
<b>17</b> L'acido ascorbico (vitamina C)	449
<b>Mappa del capitolo</b>	451
<b>Esercizi</b>	453

**17**

**AMMINOACIDI, PEPTIDI  
E PROTEINE**

<b>1</b> Gli amminoacidi naturali	455
<b>2</b> Le proprietà acido–base degli amminoacidi	457
<b>3</b> Le proprietà acido–base degli amminoacidi con più di un gruppo acido o basico	460
<b>4</b> L'elettroforesi	462
<b>5</b> Le reazioni degli amminoacidi	462
<b>6</b> La reazione della ninidrina	463
<b>7</b> I peptidi	464
<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
Alcuni peptididi origine naturale	465
<b>8</b> Il legame di solfuro	466
<b>9</b> Le proteine	466
<b>10</b> La struttura primaria delle proteine	467
A L'analisi degli amminoacidi	467
B La determinazione della sequenza	468
C La scissione selettiva dei legami peptidici	469
<b>11</b> La logica dell'analisi sequenziale	470
<b>12</b> La sintesi peptidica	472
<b>13</b> La struttura secondaria delle proteine	476
A La geometria del legame peptidico	476
B La formazione di legami idrogeno	476
C L'α-elica e il foglietto pieghettato	477
<b>14</b> La struttura terziaria: proteine fibrose e proteine globulari	478

<b>15</b> La struttura quaternaria delle proteine	481
<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
Il sequenziamento delle proteine e l'evoluzione	481
<b>Mappa del capitolo</b>	482
<b>Esercizi</b>	484

**18**

**I NUCLEOTIDI  
E GLI ACIDI NUCLEICI**

<b>1</b> La struttura generale degli acidi nucleici	486
<b>2</b> I componenti dell'acido deossiribonucleico	487
<b>3</b> I nucleosidi	487
<b>4</b> I nucleotidi	489
<b>5</b> La struttura primaria del DNA	490
<b>6</b> Il sequenziamento degli acidi nucleici	491
<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
DNA e crimine	491
<b>7</b> La sintesi di laboratorio degli acidi nucleici	492
<b>8</b> La struttura secondaria del DNA: la doppia elica	493
<b>9</b> La replicazione del DNA	495
<b>10</b> Gli acidi ribonucleici	496
<b>11</b> Il codice genetico e la biosintesi delle proteine	498
<b>12</b> Altri nucleotidi biologicamente importanti	500
<b>PER SAPERNE DI PIÙ</b>	
Il genoma umano	502
<b>Mappa del capitolo</b>	504
<b>Esercizi</b>	505
<b>Tabelle</b>	507
<b>Crediti fotografici</b>	510
<b>Indice analitico</b>	511

# LE RISORSE DIGITALI

Al libro è associato un sito contenente numerosi contenuti digitali per comprendere meglio quanto studiato, per approfondire aspetti applicativi della disciplina e per mettersi alla prova con esercizi che aiutano a prepararsi all'esame.

Il sito del libro è raggiungibile digitando questo indirizzo:

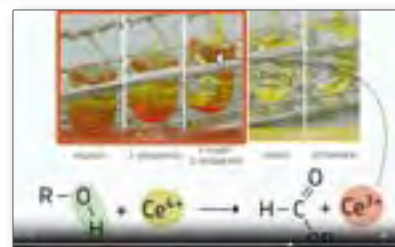
**universita.zanichelli.it/hart-fond**

Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su **myzanichelli.it** e inserire il codice di attivazione personale che si trova sull'etichetta nella prima pagina del libro.

Dal sito del libro è possibile:

- leggere gli approfondimenti **Per saperne di più** e **La storia della scienza**;
- guardare numerosi **video**;
- consultare le **soluzioni** degli esercizi proposti nel libro;
- trovare il link per accedere a centinaia di **test interattivi di autovalutazione**;
- esplorare la **tavola periodica interattiva**;
- accedere direttamente alla versione **Ebook**.

All'interno dei capitoli, nel colonnino, è indicato quali approfondimenti e video sono disponibili per comprendere o approfondire l'argomento trattato.



Il video, in particolare, spiegano in modo semplice ma approfondito alcuni concetti complessi. Per esempio, alcuni di essi spiegano le strutture delle molecole e la stereoisomeria. Altri invece permettono di approfondire le reazioni chimiche mediante lo svolgimento di esperimenti di laboratorio; altri ancora illustrano l'impatto della disciplina per la vita umana.

Video, test e approfondimenti sono consultabili direttamente anche sullo smartphone scaricando l'app **laZ Guarda!**.

## L'app laZ Guarda!

Con l'app **laZ Guarda!** si può accedere ai contenuti digitali in modo immediato usando un device portatile, come lo smartphone o il tablet.

Per visualizzare le risorse disponibili, è sufficiente avviare l'app e inquadrare con lo smartphone le icone presenti nella prima pagina di ogni capitolo.

L'app **laZ Guarda!** si scarica da App Store (sistemi operativi Apple) e da Google Play (sistemi operativi Android).

*Le risorse digitali protette sono disponibili per chi acquista il libro nuovo. L'accesso all'Ebook e alle risorse digitali protette è personale, non condivisibile e non cedibile, né autonomamente né con la cessione del libro cartaceo.*

Scarica **laZ GUARDA!** e inquadra per vedere le risorse digitali di questo capitolo

## 10 ACIDI CARBOSSILICI E DERIVATI

**1 La nomenclatura degli acidi**




Il sapore aspro dell'aceto, le punture delle formiche, il cattivo odore del burro rancido, il sollievo dal dolore dato dall'acido acetilsalicylico o dall'ibuprofene dipendono da composti che appartengono alla classe più importante di acidi organici: quella degli **acidi carbossilici**. Il gruppo funzionale degli acidi carbossilici è il **gruppo carbossilico** (**carbossile**). Il nome di questo gruppo è una contrazione dei nomi delle due parti che lo compongono, il carbonile e l'idrossile. La formula generale degli acidi carbossilici può essere scritta in forma estesa o in forma abbreviata.

$$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} \end{array} \quad \text{oppure} \quad \text{R}-\text{C}(=\text{O})\text{OH} \quad \text{oppure} \quad \text{RCO}_2\text{H}$$



Per la loro abbondanza in natura, molti hanno nomi comuni, derivati di solito da parole latine o greche che fanno riferimento alla fonte originale dell'acido (Figura 2). La Tabella 1 riporta i primi dieci acidi carbossilici e come non ramificati con i loro nomi comuni e IUPAC. Per assegnare il nome IUPAC a un acido carbossilico, al posto della lettera finale -e del nome dell'alcano corrispondente si mette il suffisso -oico e si antepone la parola acido. Nel caso degli acidi sostituiti

# Elenco dei video e degli approfondimenti digitali




## Capitolo 1

-  **La storia della scienza** Gilbert Newton Lewis
-  **Video** Come si forma il legame covalente?
-  **Video** Qual è l'ibridazione del carbonio?





## Capitolo 2

-  **Video** Come si riconoscono gli alcani e i cicloalcani?
-  **Per saperne di più** Isomeri possibili e isomeri impossibili



## Capitolo 3

-  **Video** Come vanno nominati gli idrocarburi alifatici?
-  **Video** Come si riconoscono gli alcheni?
-  **Video** Qual è l'ibridazione del carbonio?





## Capitolo 4

-  **La storia della scienza** Michael Faraday
-  **Video** Che cosa sono i composti aromatici?
-  **Per saperne di più** Il  $C_{60}$ , una sfera aromatica: i fullereni
-  **Video** Quale effetto ha il fumo di tabacco sul nostro corpo?

## Capitolo 5

-  **Video** Che cos'è la stereoisomeria?
-  **Per saperne di più** Gli esperimenti di Pasteur, interpretati da van't Hoff e Le Bel




## Capitolo 7

-  **Video** Come si riconoscono gli alcoli?
-  **Video** Come si distinguono alcoli primari, secondari e terziari?
-  **Per saperne di più** I chinoni e il coleottero bombardiere
-  **Video** Come si riconoscono i fenoli?




## Capitolo 8

-  **Per saperne di più** L'epossido della *Lymantria Dispar*




## Capitolo 9

-  **Video** Come si riconoscono aldeidi e chetoni?
-  **Video** Come si distinguono aldeidi e chetoni?
-  **La storia della scienza** Stanislao Cannizzaro

## Capitolo 10

-  **Video** Come si riconoscono gli acidi carbossilici?
-  **Video** Come si riconoscono gli esteri?
-  **Per saperne di più** La sintesi dell'urea e l'industria dei fertilizzanti


## Capitolo 11

-  **Video** Come si distinguono le ammine primarie, secondarie e terziarie?
-  **Video** Come si riconoscono le ammine?
-  **Per saperne di più** Gli alcaloidi e le rane delle frecce avvelenate






## Capitolo 12

-  **Video** Come funziona lo spettrometro di massa?




## Capitolo 13

-  **Video** Quale effetto hanno le droghe sul nostro corpo?



## Capitolo 14

-  **Per saperne di più** Un po' di storia dei polimeri
-  **La storia della scienza** Giulio Natta
-  **Video** Come si ottiene il nylon in laboratorio?
-  **Per saperne di più** Le applicazioni dei polimeri in campo medico
-  **Per saperne di più** I polimeri biologici




## Capitolo 15

-  **Video** Che cosa sono i lipidi?
-  **Per saperne di più** Prostaglandine, Aspirina\* e dolore
-  **Video** Come funzionano i contraccettivi ormonali?












## Capitolo 16

-  **Video** Che cosa sono i carboidrati?
-  **Per saperne di più** I surrogati dei grassi da carboidrati

## Capitolo 17

-  **Video** Che cosa sono le proteine?
-  **La storia della scienza** Linus Pauling
-  **Video** Che cosa causa l'anemia falciforme?

## Capitolo 18

-  **Video** Che cosa sono gli acidi nucleici?
-  **Video** Come è stata scoperta la struttura del DNA?
-  **Video** Come avviene il sequenziamento del DNA?
-  **Video** Come si fa il DNA fingerprinting?
-  **Video** Come avviene la replicazione del DNA?
-  **Video** Come avviene la trascrizione del DNA?
-  **Video** Come avviene la traduzione?
-  **Video** Come è stato decrittato il codice genetico?
-  **Video** Come avviene la sintesi proteica?
-  **Per saperne di più** Gli acidi nucleici e i virus
-  **Video** Come è stata scoperta la relazione tra geni ed enzimi?

# PRESENTAZIONE

Alla base di ogni forma di vita, la **chimica organica** permette di spiegare e mettere in relazione i molteplici fenomeni che caratterizzano gli esseri viventi. Dalle reazioni che avvengono all'interno delle cellule, responsabili del metabolismo e della trasmissione dell'informazione genetica, fino alle applicazioni più avanzate della biotecnologia e della chimica farmaceutica, la chimica organica fornisce gli strumenti concettuali e pratici per comprendere la materia vivente. Ogni proteina, lipide, zucchero o acido nucleico che costituisce gli organismi biologici è, in fondo, il risultato dell'incredibile versatilità del carbonio e della sua capacità di formare legami stabili e complessi.

Questo manuale nasce con l'obiettivo di accompagnare studenti e studentesse in un percorso graduale e completo attraverso i principi della chimica del carbonio, offrendo una visione unitaria e integrata della disciplina. L'intento è quello di far emergere come la chimica organica non sia un insieme di regole astratte, ma un linguaggio per descrivere e interpretare il mondo biologico, le applicazioni farmacologiche e le implicazioni per l'ambiente. Attraverso collegamenti costanti con la biologia molecolare, la farmacologia, le scienze dei materiali e le più recenti applicazioni industriali, il testo mostra come le scoperte della ricerca contemporanea stiano cambiando profondamente la nostra quotidianità, dalla medicina personalizzata alle tecnologie verdi.

L'esposizione dei contenuti segue un andamento graduale, senza dare nulla per scontato. Le proprietà e la reattività dei diversi gruppi funzionali e dei principali composti organici – alcani, alcheni, alchini, alcoli, composti aromatici – vengono introdotte in modo chiaro e sistematico, con un'attenzione particolare al modo in cui la struttura delle molecole determina il loro comportamento chimico. Ampio spazio è dedicato alla rappresentazione grafica: disegni, modelli tridimensionali e schemi di reazione permettono di visualizzare con immediatezza i meccanismi attraverso cui gli atomi si riorganizzano e danno origine a nuove sostanze. Numerosi **Esercizi svolti**, esempi applicativi e domande di verifica guidano nella comprensione dei concetti e nella loro traduzione in pratica. Le **Note** a margine invitano a soffermarsi su aspetti chiave o su errori comuni da evitare, mentre i **box di glossario** richiamano definizioni essenziali per fissare il lessico tecnico della disciplina. Questo approccio integrato favorisce un apprendimento attivo, in cui la teoria e la pratica dialogano continuamente.

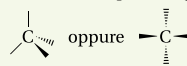
La disposizione dei quattro gruppi legati a un centro stereogenico si chiama **configurazione** di quel centro.

**NOTA** Il modo migliore per convincerci che, scambiando le posizioni di due gruppi qualsiasi legati a un centro stereogenico, si ottiene l'enantiomero, è quello di lavorare sui modelli molecolari.

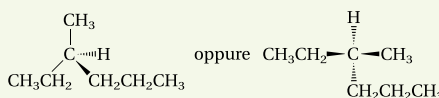
## ESERCIZIO SVOLTO 2

Rappresentiamo i due enantiomeri del 3-metilesano.

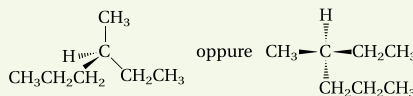
**RISOLUZIONE** Si possono rappresentare in vari modi. Ne riportiamo due. Per prima cosa scriviamo il carbonio 3 con i suoi quattro legami tetraedrici:



Poi leghiamo i quattro gruppi diversi in ordine casuale:



Infine disegniamo l'immagine speculare, oppure scambiamo la posizione di due gruppi qualsiasi:



Particolare attenzione è riservata ai temi della **Green Chemistry**, con schede di approfondimento che illustrano come la chimica organica possa contribuire in modo concreto a un futuro più sostenibile. Vengono presentati esempi di processi a basso impatto ambientale, materiali biodegradabili, solventi ecocompatibili e strategie per la riduzione dei rifiuti e delle emissioni. Altre schede, intitolate **Per saperne di più**, ampliano l'orizzonte della trattazione, collegando gli argomenti del capitolo alle scoperte più recenti o a casi di studio tratti dal mondo reale, come lo sviluppo di nuovi farmaci, i biopolimeri o le fonti rinnovabili di energia.

Per favorire il consolidamento dei contenuti, ogni capitolo si chiude con una **mappa concettuale** che riassume in modo visuale i punti principali e le relazioni tra i concetti affrontati. Seguono un **riepilogo delle reazioni** e una sintesi dei **meccanismi di reazione** che spiegano come e perché le trasformazioni chimiche avvengono, due strumenti indispensabili per lo studio e il ripasso.

GREEN CHEMISTRY

Chimica verde e ibuprofene:  
un caso di studio

La chimica verde (Green Chemistry) lascia molta via alla sintesi organica, anche a una **metodo classico** che sta per ora a produrre oltre un **milione di tonnellate** all'anno di **ibuprofene** (il principio attivo di un comune analgesico da banco) e che oggi forse è soltanto un po' più verde.

Ma per un **procedimento** (e basta così) che è **semplice**, **non** è **difficile** che una **reazione** (e infatti anche **semplice**) **definita come antica e tradizionale**, **arrivando** a **produrre** **ibuprofene** **in** **un** **modo** **più** **verde** **rispetto** **alla** **via** **classica** **per** **ottenere** **questo** **farmaco** **più** **comune** **del** **mondo** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la** **salute** **umana** **e** **per** **la** **sicurezza** **dei** **processi** **industriali** **e** **dei** **prodotti** **di** **uso** **quotidiano** **dei** **farmaci** **per** **la** **gestione** **della** **dolore** **e** **della** **febbre** **anche** **alla** **calcolazione** **dei** **costi** **e** **dei** **rischi** **per** **l'ambiente** **e** **per** **la</**

## PER SAPERNE DI PIÙ

## e la vitamina E: tocoferoli e tocotrienoli

La famiglia della **vitamina E** comprende otto molecole strutturalmente simili, quattro **tocotrienoli** (TCT) e quattro **tocotferoli** (TCT) somari. In **Fig. 1** si è visto che la **vitamina E** che si trova in commercio è sostanzialmente un TCT (gli atteri composti della famiglia dei TCT e TCT sostengono l'attività antiossidante del coenzima Q, con dei tocoferoli presenti in diverse posizioni. Sui TCT più TCT possiedono una catena laterale idrocarbonata, ma quella del TCT è sostituita con tre doppi legami, mentre il TCT ha una catena alifatica senza il TCT).

Il TCT è l'isomero prevalentemente nel nostro, nei semi di soia, e nell'olio di semi di TCT. Tocoferolo altamente puro viene fornito, in forma di rosso e di cristallo di TCT.

Nel mondo della famiglia della **vitamina E**, è stata messa una grande attenzione alla proprietà antiossidante che si agita da quella dei TCT e i tocoferoli recenti nella ricerca sulla vitamina E (molte prove che ci sono le funzioni biologiche della famiglia di questa vitamina ha funzione biologica periferica). I ricercatori hanno scoperto che il TCT, in particolare il TCT, ha una attività antiossidante molto più alta rispetto a quella dimostrata che il TCT ha proprietà antiossidante, e come antiossidante, e sono più efficaci nella dimostrazione del coenzima Q. TCT sono anche dotati di proprietà anticancerogene e antiangiogeniche. Tuttavia, la dimostrazione della maggiore attività biologica dei TCT non sono note e i ricercatori stanno attivamente indagando sull'argomento.

Figura 1. Strutture degli isomeri di un tocoferolo e di un tocotrienolo.

126

## ESERCIZI

### Nomenclatura e formule di struttura degli alcoli

1. A questi gruppi alchilici differenti porta da origine il gruppo:

- ☐ **Thio**    ☐ **Tri**    ☐ **Quaterni**

2. Un composto aente formula bruta  $C_4H_{10}O$  può essere:

- a. un alcano;
- b. un alcano e un cicloalcano;
- c. non è un alcano e non è un cicloalcano;

3. Elencare gli alcoli per assegnare la nomenclatura IUPAC agli alcoli.

- a. Semplice la differenza tra un gruppo n-butile e un gruppo iso-butile.

4. Scrivere la formula di struttura dei seguenti composti:

- a. 1-metilpropano
- b. 2,4-dimetilpentano
- c. 4-etil-2,2-dimetilpentano
- d. 1-etil-2,2-dimetilpentano
- e. 1,1,2,2-tetrafluoropropano

5. Scrivere per esteso la formula di struttura dei seguenti composti e dare loro il nome secondo il sistema IUPAC:

- a.  $CH_3CH_2CH_2CH_2CH_3$
- b.  $CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$
- c.  $CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$
- d.  $CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$
- e.  $CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$

7. Assegnare il nome comune a ogni alcole (IUPAC è uguale) composti:

- a.  $CH_3OH$
- b.  $CH_3CH_2OH$
- c.  $CH_3CH_2CH_2OH$
- d.  $CH_3CH_2CH_2CH_2OH$
- e.  $CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2OH$

8. Scrivere la formula di struttura dei composti seguenti. Spiegare perché il nome riportato è sbagliato e scriverne per ogni composto il nome corretto.

- a. 2,3-dimetilpropano
- b. 1-metilbutano
- c. 2-etilbutano
- d. 1,3,3-trimetilpentano
- e. 4-cloro-3-metilbutano
- f. 1,2,3,3-tetrametilpropano

9. Scrivere la formula di struttura di tutti gli isomeri (il loro numero è indicato tra parentesi) dei seguenti composti e assegnare a ciascun isomero il nome o il base al sistema IUPAC:

- a.  $C_4H_{10}$  (2)
- b.  $C_5H_{12}$  (4)
- c.  $C_6H_{14}$  (5)
- d.  $C_7H_{16}$  (9)
- e.  $C_8H_{18}$  (18)

10. Scrivete il nome IUPAC delle seguenti strutture:

- a.
- b.

### Le proprietà degli alcoli e le interazioni intermolecolari

11. La temperatura di ebollizione di un alcano dipende:

- a. dalla massa molecolare;
- b. dalla forma della molecola;
- c. dalle interazioni intermolecolari;
- d. da tutti i precedenti fattori.

12. Tra le molecole degli alcoli si possono instaurare:

- a. legami a idrogeno;
- b. legami covalenti puri;
- c. legami presenti come tutti di tipo ioni;
- d. forze di van der Waals;

13. Indicare l'affermazione sbagliata riguardante gli alcoli:

- a. Sono composti apolari.
- b. Legami a idrogeno sono presenti anche nei glicoli, negli alcoli a catena corta.
- c. Sono solubili in solventi polari.
- d. Sono poco reattivi.

14. Indicare la frase sbagliata riferita agli alcoli:

- a. Tutti gli alcoli di carbonio sono idrofili  $sp^3$ .
- b. I glicoli presenti sono tutti di tipo ioni.
- c. Gli alcoli non possono passare attraverso la membrana.
- d. La solubilità è determinata dalla polarità dei legami.

64

Completano il volume una ricca sezione di **esercizi** – di difficoltà crescente, pensati per l'autovalutazione – e un ampio corredo di risorse digitali. Come spiegato nelle pagine XII e XIII, nel **sito del libro** sono disponibili le soluzioni degli esercizi, molte schede di approfondimento, diversi video che rendono più facile capire, e molti **test interattivi** per verificare in tempo reale la propria comprensione. Tutti i materiali digitali sono accessibili anche da smartphone tramite l'app **laZ Guarda!**

In sintesi, questo manuale non si limita a insegnare la chimica organica: invita a scoprirne la logica interna, la bellezza e le sue innumerevoli applicazioni. È un percorso che unisce rigore scientifico, chiarezza didattica e attenzione ai grandi temi del presente – sostenibilità, salute, innovazione – con l'obiettivo di formare una nuova generazione di professionisti e professionisti consapevoli delle potenzialità della chimica organica e del suo ruolo nel contribuire a costruire un mondo migliore.



## PER SAPERNE DI PIÙ Il metano, il gas di palude, e l'esperimento di Miller



Il **metano** è reperibile in natura ovunque si verifica, ad opera di particolari batteri, la *decomposizione di materiale organico in assenza di ossigeno*, e dunque nelle paludi, negli acquitrini o nei sedimenti fangosi dei laghi. Da qui deriva il nome comune di *gas di palude*. In Cina questo gas viene tuttora raccolto dal fango che sta sul fondo degli acquitrini e impiegato per cucinare e per illuminare le case. In modo analogo il metano si forma a opera dei batteri presenti nell'apparato digerente dei ruminanti (per esempio, le mucche).

La quantità di metano prodotta dai batteri è notevole; l'atmosfera terrestre ne contiene in media una parte per milione. Poiché il nostro pianeta è relativamente piccolo e il metano è leggero rispetto alla maggior parte degli altri componenti dell'aria ( $O_2$ ,  $N_2$ ), questo gas in massima parte dovrebbe sfuggire dall'atmosfera terrestre e si è calcolato che la concentrazione all'equilibrio dovrebbe essere molto più bassa di quella in realtà osservata. La concentrazione relativamente elevata di metano è dovuta al fatto che questo gas viene prodotto in continuazione dalla decomposizione batterica di sostanze vegetali e viene così compensata la quantità che sfugge dall'atmosfera.

Nelle città, la quantità di metano nell'atmosfera raggiunge livelli molto più elevati, fino a parecchie parti per milione. Le concentrazioni più alte si osservano al mattino e nel tardo pomeriggio, e sono strettamente collegate al traffico automobilistico. Fortunatamente il metano, che costituisce circa il 50% di tutti gli idrocarburi che inquinano l'atmosfera urbana, sembra non avere effetti dannosi diretti sulla salute umana.

Questo gas a volte si accumula nelle *miniere di carbone* dove, mescolato con il 5-14% di aria, costituisce un pericolo, essendo la miscela (*grisou*) altamente esplosiva. Inoltre i minatori possono rimanere asfissati a causa della mancanza di una quantità sufficiente di ossigeno. Esiste oggi una varietà di dispositivi di sicurezza in grado di rilevare la presenza di concentrazioni pericolose di metano.

L'**idrogeno** è l'elemento più comune del sistema solare (costituisce circa l'87% della massa del Sole), ed è ragionevole ritenere che, quando i pianeti si sono formati, gli altri elementi dovessero essere presenti nei loro composti in forma ridotta (invece che ossidata): il carbonio come metano, l'azoto come ammoniaca e l'ossigeno come acqua. Infatti alcuni dei pianeti più lontani, come Saturno e Giove, hanno ancora atmosfere ricche di metano e ammoniaca.

Un esperimento compiuto da Stanley L. Miller (1930-2007) che lavorava nel laboratorio di Harold C. Urey (1893-1981) alla Columbia University, confermerebbe l'ipotesi secondo cui la vita avrebbe avuto origine in un'*atmosfera riducente*. Miller scoprì che, quando miscele di metano, ammoniaca, acqua e idrogeno

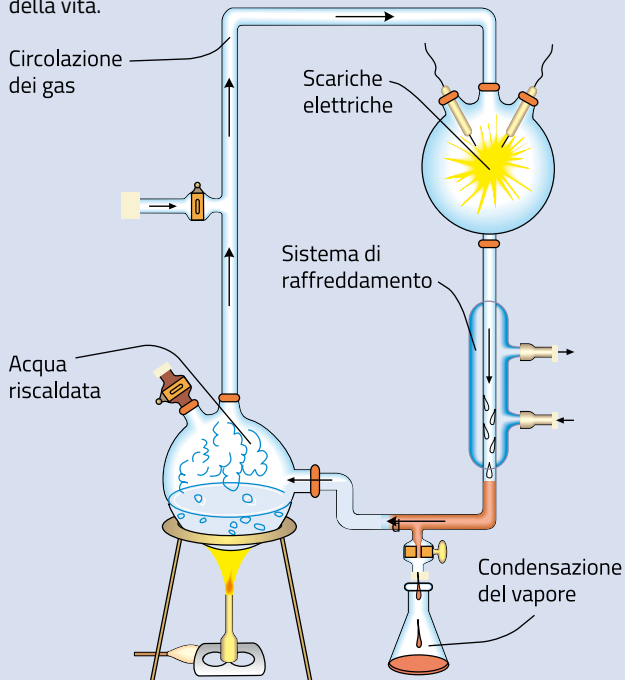
venivano sottoposte a scariche elettriche (per simulare i lampi), si formavano alcuni composti organici (amminoacidi, per esempio) importanti in biologia e fondamentali per la vita (**Figura**). Risultati analoghi sono stati ottenuti in seguito usando il calore o la luce ultravioletta al posto delle scariche elettriche (sembra infatti che l'atmosfera primordiale della Terra ricevesse una quantità di radiazioni ultraviolette molto maggiore di quella che riceve ora). Aggiungendo ossigeno a questa atmosfera primordiale simulata, non si ottengono amminoacidi, a conferma del fatto che l'atmosfera originale della Terra *non* conteneva ossigeno libero.

Dai tempi dell'esperimento di Miller le idee sulla chimica dell'origine della vita si sono fatte più precise, grazie a una grande quantità di dati sperimentali e anche grazie all'esplorazione dello spazio. Oggi sappiamo che l'atmosfera primordiale della Terra era costituita prevalentemente da gas emessi dalle sostanze fuse di origine interna, anziché da acquisizioni esterne dal sistema solare. Inoltre sembra probabile che le principali fonti di carbonio in quell'atmosfera fossero  $CO_2$  e CO e *non* il metano, come supposto da Miller, e che l'azoto fosse presente soprattutto come  $N_2$  e non come ammoniaca. Ripetendo esperimenti del tipo di quello di Miller, modificati in accordo con questi nuovi orientamenti circa la composizione dell'atmosfera primordiale, si è osservata ancora la produzione di biomolecole.

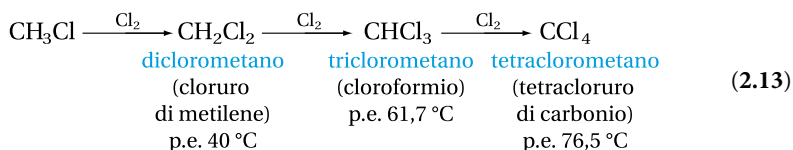
L'esperimento di Miller fornì il modello per una grande mole di lavoro nel campo della scienza che oggi si chiama **evoluzione chimica** o **chimica prebiotica**. Queste ricerche si occupano dello studio degli eventi chimici che probabilmente si verificarono sulla Terra, e in altre parti dell'Universo, e che portarono alla comparsa della prima *cellula vivente*.

### Figura

La strumentazione utilizzata da Miller e Urey per studiare l'origine della vita.



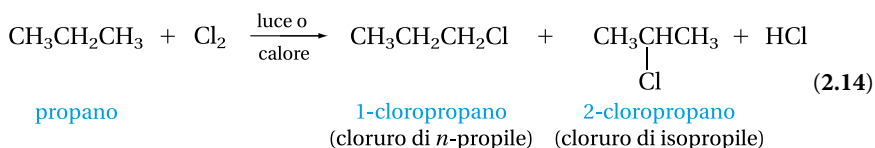
Se è presente un eccesso di alogeno, la reazione può proseguire per dare prodotti polialogenati. Dal metano e da un eccesso di cloro si possono ottenere molecole contenenti due, tre o quattro atomi di cloro.



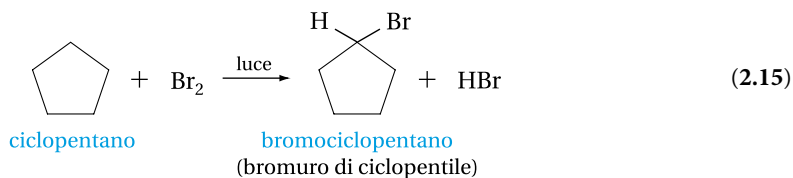
Controllando le condizioni di reazione e il rapporto tra il cloro e il metano è possibile favorire la formazione di uno solo di questi prodotti.

**PROBLEMA 19** Scrivete i nomi e le strutture di tutti i prodotti che è possibile ottenere dalla bromurazione del metano.

Nel caso di alcani a catena più lunga si possono ottenere miscele di prodotti fin dal primo passaggio. Per esempio, dal propano:



Quando si alogenano alcani superiori, la miscela di prodotti diventa più complessa e risulta difficile separare e ottenere allo stato puro i singoli isomeri. In questo caso l'alogenazione è poco utile come metodo di sintesi degli alogenuri alchilici. Invece nel caso dei *cicloalcani* non sostituiti, dove tutti gli idrogeni sono equivalenti, si può ottenere un solo prodotto organico puro:



**PROBLEMA 20** Scrivete le strutture di tutti i prodotti di monoclaurazione del pentano. Notate la complessità della miscela di prodotti, in confronto con quella ottenuta dalla corrispondente reazione sul *ciclopentano* (eq. 2.14).

**PROBLEMA 21** Quanti composti organici si possono ottenere dalla monoclaurazione dell'ottano? E del cicloottano?

**PROBLEMA 22** Pensate che la clorurazione del 2,2-dimetilpropano possa essere utile come metodo di sintesi?

**NOTA** Si noti che, come nell'equazione 2.13, a volte per comodità si scrive la formula di uno dei reagenti (in questo caso  $\text{Cl}_2$ ) sopra la freccia. Inoltre, a volte, si trascurano i prodotti inorganici la cui formazione è ovvia (in questo caso  $\text{HCl}$ ).

**NOTA** Spesso si scrivono equazioni non bilanciate, specialmente quando da un solo reagente organico si può formare più di un prodotto. Al secondo membro dell'equazione sono invece riportate le strutture di tutti i prodotti organici importanti, come nell'equazione 2.14.

## 13 Il meccanismo radicalico a catena dell'alogenazione

Ci si può chiedere quale sia il meccanismo con cui avviene l'alogenazione. Perché sono necessari la luce o il calore? Le equazioni 2.10 e 2.11 rappresentano la reazione complessiva di alogenazione, in quanto riportano le strutture dei reagenti

Un **meccanismo di reazione** è una descrizione, passaggio per passaggio, dei processi di rottura e di formazione dei legami che avvengono quando i reagenti reagiscono tra loro per dare i prodotti.

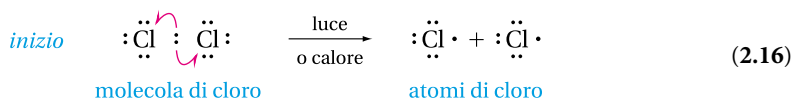
Una reazione a **catena radicalica** comprende uno **stadio di inizio**, **stadi di propagazione della catena** e **stadi di terminazione della catena**.

**NOTA** Si ricordi che, una freccia con una sola aletta (ad amo  $\curvearrowright$ ) indica il movimento di *un* solo elettrone; mentre una freccia completa ( $\rightarrow$ ) si riferisce al movimento di una *coppia* di elettroni.

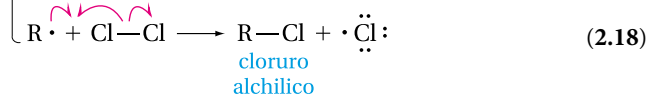
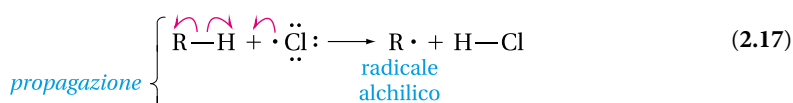
e dei prodotti, e le condizioni di reazione o i catalizzatori sopra la freccia. Esse però *non* ci dicono con precisione in che modo i prodotti si formano a partire dai reagenti.

Il **meccanismo di reazione** è una descrizione, passaggio per passaggio, dei processi di rottura e di formazione dei legami che avvengono quando i reagenti si trasformano nei prodotti. Nel caso dell'alogenazione molte evidenze sperimentali indicano che la reazione decorre in vari passaggi e non in un passaggio solo. Essa procede tramite una **catena radicalica** di reazioni.

Lo **stadio di inizio della catena** consiste nella rottura della molecola di alogeno in due atomi.



Il legame Cl—Cl è più debole sia del legame C—H sia del legame C—C (si confrontino le energie di legame riportate nell'Appendice in fondo al volume) ed è quello che si rompe più facilmente quando si somministra energia termica. Quando la fonte di energia è la luce, è il cloro molecolare ( $\text{Cl}_2$ ) che assorbe le radiazioni visibili, non l'alcano, ed è sempre il legame Cl—Cl quello che si rompe per primo. Gli **stadi di propagazione della catena** sono:



Gli atomi di cloro sono molto reattivi, perché hanno il guscio di valenza incompleto (sette elettroni anziché gli otto richiesti). Essi possono ricombinarsi per formare di nuovo molecole di cloro (l'inverso dell'equazione 2.16) o, se collidono con una molecola di alcano, possono estrarre un atomo di idrogeno per formare acido cloridrico e un radicale alchilico,  $\text{R}\cdot$ . Abbiamo visto (Capitolo 1, paragrafo 5) che un *radicale* è un frammento con un numero dispari di elettroni non condivisi. Dai modelli molecolari a spazio pieno della Figura 1 appare evidente che gli alcani sembrano avere un rivestimento di atomi di idrogeno che copre il loro scheletro carbonioso. Per questa ragione è estremamente probabile che un atomo di alogeno, quando collide con una molecola di alcano, colpisca un atomo di idrogeno situato all'estremità di un legame C—H.

Come l'atomo di cloro, anche il radicale alchilico che si forma nel primo stadio della catena (eq. 2.17) è molto reattivo (infatti il radicale alchilico, così come il radicale dell'alogeno, ha un otetto incompleto). Per collisione con una molecola di cloro ( $\text{Cl}_2$ ), può formare una molecola di cloruro alchilico e un atomo di cloro (eq. 2.18). L'atomo di cloro, così formatosi, può a sua volta reagire per ripetere la sequenza. Da notare che, sommando le equazioni 2.17 e 2.18, si ottiene l'equazione complessiva di clorurazione (eq. 2.10). In entrambi gli stadi di propagazione della catena si consuma un radicale (o un atomo), ma si forma anche un altro radicale (o atomo), in grado di propagare la catena. È in questi due stadi che si consuma la massima parte dei reagenti e si forma la massima parte dei prodotti.

# GREEN CHEMISTRY

## MTBE: l'etere per la benzina senza piombo

Il motore a scoppio è stato inventato nel 1876 dall'ingegnere tedesco Nikolaus August Otto, ma applicato ai veicoli soltanto un decennio dopo, alimentato a **benzina**. In questi motori la combustione della miscela carburante-aria è innescata da una scintilla, cioè in condizioni di funzionamento corretto l'accensione della miscela avviene dopo l'innesco, in particolare nel momento di massima compressione dei gas. Quando però i gas si trovano a pressione elevata può verificarsi una combustione anomala, cioè la miscela si può auto-accendere per effetto dell'alta pressione: questa auto-ignizione è detta **detonazione**.

Nei primi motori a scoppio la combustione incontrollata generava il cosiddetto «battito in testa», un malfunzionamento che provocava problemi al motore e un suo indesiderato surriscaldamento. Agli inizi del Novecento, però, non si era ancora capito quale fosse la vera causa della detonazione, tanto che lo si attribuiva a un problema di natura meccanica.

Thomas Midgley, un ingegnere statunitense, fu il primo a capire agli inizi degli anni Venti che la causa della combustione anomala era legata alle caratteristiche della benzina. Ci si rese conto che la benzina era una miscela complessa la cui composizione doveva essere studiata in stretta relazione con il funzionamento del motore. Si iniziarono così ad aggiungere additivi per migliorare il potere antidetonante del carburante.

Come abbiamo visto (scheda «Il petrolio, la benzina e il numero di ottani», pag. 103), il potere antidetonante di una benzina è misurato dal *numero di ottani*: maggiore è questo numero, maggiore è la resistenza alla detonazione. In questa scala è *attribuito* valore zero a una molecola di riferimento con pessimo potere antidetonante (*n*-pentano) e valore 100 a un composto con ottimo potere antidetonante (isooctano).

Dopo aver testato migliaia di sostanze, nel 1921 Midgley trovò un additivo che permetteva di raggiungere le prestazioni desiderate a concentrazioni molto basse: si trattava del piombo tetraetile  $\text{Pb}(\text{CH}_2-\text{CH}_3)_4$ . Dopo la sua scoperta, la produzione industriale aumentò esponenzialmente fino ad arrivare, alla fine degli anni Settanta del secolo scorso, a 400 000 tonnellate/anno soltanto negli Stati Uniti.

Già pochi anni dopo il suo utilizzo, ci si accorse che il piombo tetraetile causava seri problemi sanitari a causa della sua tossicità. Che il piombo fosse un metallo nocivo era noto già dall'antichità, soprattutto nelle sue forme di intossicazione acuta, il cosiddetto *saturismo*. Il piombo, infatti, è un metallo pesante che si accumula sia nei tessuti minerali (ossa) sia nei tessuti molli (reni, fegato, cervello), causando diverse patologie. Nonostante la sua tossicità, il piombo tetraetile continuò a essere utilizzato fino agli anni Ottanta del secolo scorso provocando seri danni all'ambiente e alla salute pubblica.

In seguito, il piombo tetraetile venne progressivamente eliminato dalle benzine e contemporaneamente furono introdotte le **marmitte catalitiche**. Oltre al suo effetto nocivo, infatti, il piombo impediva l'utilizzo dei filtri per l'abbattimento degli inquinanti perché ne andava a compromettere la funzione catalitica. Per riuscire a mettere sul mercato la **benzina senza piombo** l'eliminazione del piombo tetraetile venne compensata con l'aggiunta di altri componenti antidetonanti. Vennero introdotti alcuni composti ossigenati (etanolo, metanolo, isobutanolo, eteri) e alcuni idrocarburi ramificati e aromatici (etilbenzene, toluene).

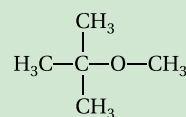


Tra i composti ossigenati più importanti, il **terz-butil metil etere (MTBE, Figura)** è l'etere che ha dato una svolta allo sviluppo della **benzina «verde» senza piombo**. Le sue proprietà antidetonanti sono dovute al fatto che il legame tra l'ossigeno e il gruppo *terz*-butilico si rompe per scissione omolitica generando dei radicali che bloccano l'auto-accensione della miscela benzina-aria. Come antidetonante l'MTBE presenta diversi vantaggi:

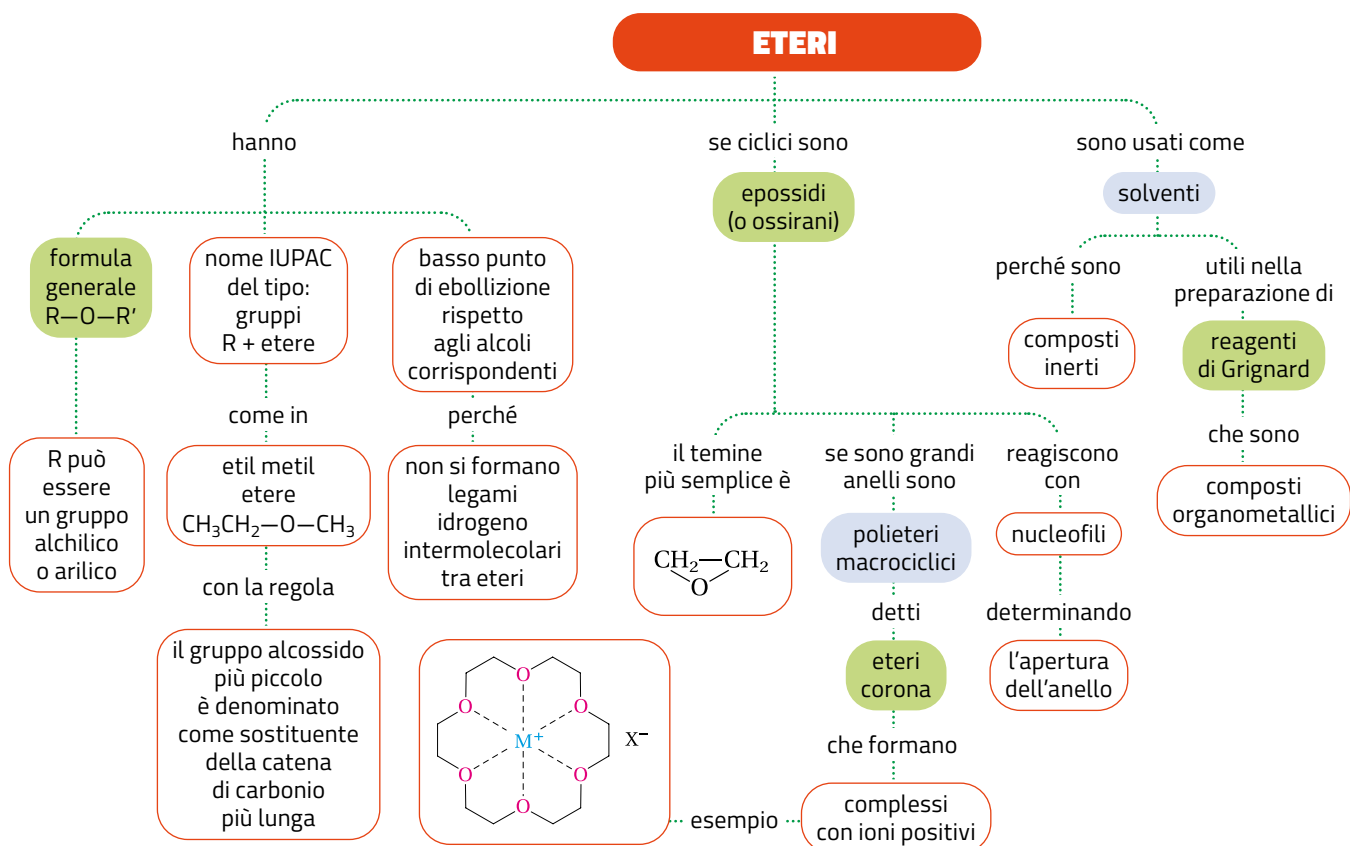
1. ha una tossicità molto bassa rispetto ad altri composti ottanizzanti come il piombo tetraetile e il benzene;
2. è compatibile con tutti i materiali utilizzati nel motore;
3. si riesce a produrre facilmente a basso costo;
4. non ha problemi di miscibilità con l'acqua;
5. riduce le emissioni di inquinanti organici presenti nei gas di scarico.

Per queste caratteristiche questo etere è considerato uno dei capostipiti dei composti chimici che, sostituendo componenti inquinanti e nocivi, permettono di «pulire» i carburanti e di ottenere *clean fuels*. Tuttora l'MTBE e l'ETBE (*terz*-butil etil etere) sono i principali componenti ottanizzanti della benzina verde, con un contenuto compreso tra il 7% e il 15%.

Tuttavia, anche se l'MTBE ha permesso di sostituire il piombo tetraetile, negli ultimi anni si sta monitorando il suo effetto sull'ambiente. Infatti, a causa della sua elevata solubilità in acqua, l'etere riesce a raggiungere le falde acquifere profonde e vi resta per lungo tempo a causa della sua scarsa degradabilità. Per questo, sono state emanate delle direttive nazionali (Decreto legislativo 152/2006) in cui si stabilisce un limite di 10 ng/L come concentrazione soglia di rischio dell'MTBE nelle acque sotterranee.



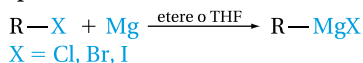
**Figura**  
La struttura del *terz*-butil metil etere (MTBE).



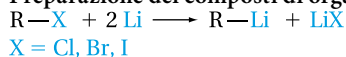
## RIEPILOGO DELLE REAZIONI

### 1. I composti organometallici

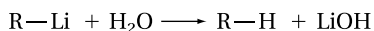
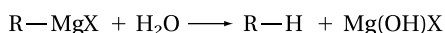
- a. Preparazione dei reagenti (o reattivi) di Grignard (par. 4)



- b. Preparazione dei composti di organolitio (par. 4)

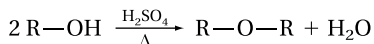


- c. Idrolisi dei reagenti organometallici ad alcani (par. 4)

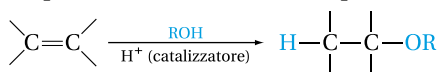


### 2. Gli eteri

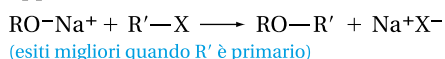
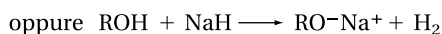
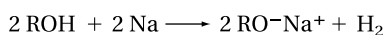
- a. Preparazione per disidratazione degli alcoli (par. 5)



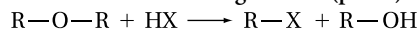
- b. Preparazione da alcheni e alcoli (par. 5)



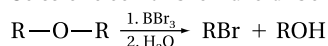
- c. Preparazioni da alcoli e alogenuri alchilici (par. 5)



- d. Scissione con acidi alogenidrici (par. 6)

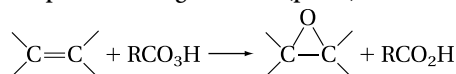


- e. Scissione con tribromuro di boro (par. 6)

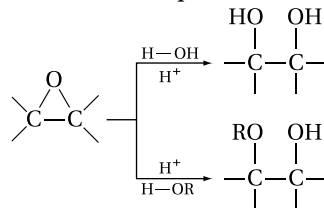


### 3. Gli epossidi

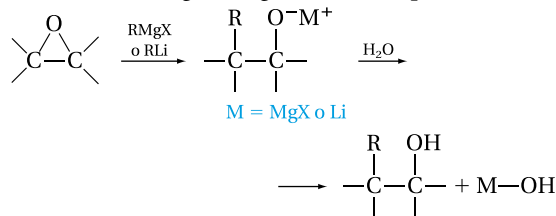
- a. Preparazione dagli alcheni (par. 7)



- b. Reazione con acqua e con alcoli (par. 8)



- c. Reazione con reagenti organometallici (par. 8)





## Eteri ed epossidi: struttura, nomenclatura e proprietà

1. Gli eteri presentano un angolo di legame di:

- ☐ A 180° ☐ C circa 109°  
☐ B circa 120° ☐ D circa 90°

2. Individuate la frase corretta relativa agli eteri.

- ☐ A Danno legame idrogeno tra loro.  
☐ B Hanno bassi punti di ebollizione.  
☐ C Sono molto reattivi.  
☐ D Hanno idrogeni acidi.

3. Qual è la frase corretta relativa agli eteri a basso peso molecolare?

- ☐ A Sono solubili in acqua.  
☐ B Sono solubili in alcol.  
☐ C Danno legami idrogeno con alcoli e acqua.  
☐ D Tutte le affermazioni precedenti sono corrette.

4. Qual è l'affermazione sbagliata relativa agli eteri?

- ☐ A Gli eteri non reagiscono con acidi e basi.  
☐ B Se sono presenti perossidi, questi possono essere distrutti per ossidazione con solfato ferroso.  
☐ C Solubilizzano tantissimi composti organici.  
☐ D A contatto con l'aria possono formare perossidi.

5. Qual è il numero corretto di eteri isomeri aventi formula  $C_5H_{12}O$ ?

- ☐ A Tre ☐ C Cinque  
☐ B Quattro ☐ D Sei

6. Indicate la frase sbagliata riferita agli epossidi.

- ☐ A Sono molto stabili.  
☐ B Si possono ottenere dagli alcheni con i peracidi.  
☐ C Industrialmente si ottengono dall'etilene.  
☐ D Dall'apertura dell'anello si possono formare i glicoli.

7. Quanti eteri chirali esistono con formula  $C_6H_{14}O$ ?

- ☐ A Due ☐ C Quattro  
☐ B Tre ☐ D Cinque

8. Perché si dice che gli eteri non hanno «idrogeni acidi»?

9. Spiegate perché gli eteri non possono formare legami idrogeno tra loro ma lo possono fare con acqua o alcoli.

10. Disponete in ordine di temperatura di ebollizione crescente i seguenti eteri spiegando il criterio seguito:

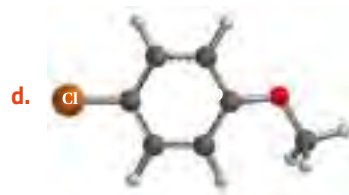
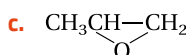
- a. etere etilico  
 b. etere propilico  
 c. etere isopropilico  
 d. etere butilico

11. Scrivete le formule di struttura dei seguenti composti:

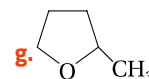
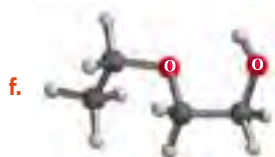
- a. dimetil etere  
 b. etil isopropil etere  
 c. 2-metossiesano  
 d. allil propil etere  
 e. *p*-clorofenil metil etere  
 f. *trans*-2-etossiciclopentanol  
 g. etilen glicole dietil etere  
 h. 1-metossipropene  
 i. ossido di propilene  
 j. *p*-etossianisolo

12. Assegnate il nome ai seguenti composti:

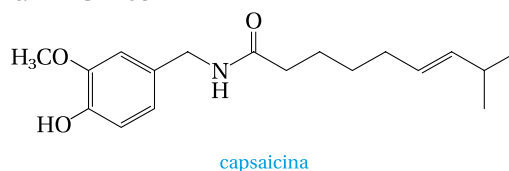
- a.  $CH_3CH_2CH_2OCH(CH_3)_2$  b.  $CH_3OCH_2CH_2CH_3$



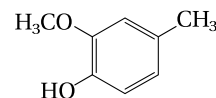
- e.  $CH_3CH_2CH(OCH_2CH_3)CH_2CH_3$



13. La capsaicina, alcaloide responsabile del sapore piccante del peperoncino *habanero*, trova impiego anche negli spray repellenti per allontanare dai giardini piccoli mammiferi nocivi.



Un intermedio ragionevole per la sintesi della capsaicina potrebbe essere il fenolo mostrato di seguito. Qual è il nome IUPAC di questo fenolo?



14. Gli eteri e gli alcoli possono essere tra loro isomeri. Scrivete le strutture e denominate tutti i possibili isomeri che hanno formula molecolare  $C_4H_{10}O$ .

15. Scrivete le formule di struttura dei seguenti composti aventi all'incirca lo stesso peso molecolare: 1,2-dimetossietano, etil propil etere, esano e 1-pentanol.



## Preparazione e reazioni dei reagenti di Grignard

16. Indicate la frase sbagliata riferita alla preparazione dei reattivi di Grignard.
- ☐ A Bisogna operare in ambiente senza idrogeni acidi.
  - ☐ B Si deve utilizzare un alogenuro alchilico o arilico.
  - ☐ C È necessario operare in etere per stabilizzare il reattivo.
  - ☐ D I trucioli di magnesio vanno sciolti in una base.
17. I reattivi di Grignard, per formare gli alcoli possono reagire con:
- ☐ A aldeidi
  - ☐ B chetoni
  - ☐ C eteri
  - ☐ D epossidi
  - ☐ E acidi carbossilici
  - ☐ F alogenuri alchilici
18. Per ottenere 1-fenilpropanolo attraverso la sintesi di Grignard occorre utilizzare:
- ☐ A benzaldeide + bromuro di etilmagnesio
  - ☐ B propanale + bromuro di fenilmagnesio
  - ☐ C propanolo + bromuro di fenilmagnesio
  - ☐ D propanale + bromuro di benzilmagnesio
19. Per reazione del butanone con bromuro di isobutilmagnesio e successiva idrolisi, si ottiene:
- ☐ A 2,4-dimetil-4-esanolo
  - ☐ B 3,4-dimetil-3-esanolo
  - ☐ C 3,5-dimetil-3-esanolo
  - ☐ D 5-metil-3-eptanolo
20. Che cosa sono, dal punto di vista chimico, i *reagenti di Grignard* e quali avvertenze occorre applicare per realizzare la loro sintesi?
21. Scrivete la reazione tra il bromuro di fenilmagnesio e l'acqua.
22. Scrivete le equazioni per le reazioni dei seguenti composti con (1) Mg in etere e (2) successiva addizione di D<sub>2</sub>O alla soluzione ottenuta.
- a.  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{I}$
  - b.  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{Br}$
  - c.  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{Br}$
  - d. bromuro di allile

## La preparazione degli eteri

23. Qual è l'affermazione sbagliata?
- ☐ A Per sintetizzare eteri asimmetrici è necessaria la sintesi di Williamson.
  - ☐ B Per sintetizzare eteri asimmetrici si utilizza un alogenuro alchilico e un alcolato.
  - ☐ C Per sintetizzare eteri asimmetrici si fa avvenire una reazione S<sub>N</sub>1.
  - ☐ D Nella sintesi degli eteri, occorre operare in modo da evitare che avvenga anche l'eliminazione.
24. Individuate il completamento sbagliato. La preparazione degli eteri simmetrici si effettua:
- ☐ A con una reazione di condensazione.
  - ☐ B con una disidratazione tra due molecole di alcol.
  - ☐ C con alcol e acido solforico a 180°.
  - ☐ D con alcol e acido solforico a 140°.
25. Per sintetizzare il fenil propil etere è opportuno utilizzare:
- ☐ A cloruro di propile + fenato di sodio
  - ☐ B cloruro di fenile + propilato di sodio
  - ☐ C propanale + fenossido di sodio
  - ☐ D cloruro di propile + benzilato di sodio
26. Che cos'è l'*MTBE* e come viene prodotto?
27. A quale tipo di reazione appartiene la *sintesi di Williamson* degli eteri?
28. Se si trattasse con acido solforico una miscela di etanolo e 1-butanolo che cosa si otterrebbe?

## Il comportamento degli eteri in acidi e basi

29. Qual è la frase corretta?
- ☐ A Gli eteri reagiscono con le basi concentrate.
  - ☐ B Gli eteri si scindono con acidi concentrati (HI, HBr) ad alta temperatura.
  - ☐ C Gli eteri si scindono con acidi diluiti a bassa temperatura.
  - ☐ D Gli eteri reagiscono con le basi di Lewis.
30. Quale, tra le seguenti reazioni, non avviene?
- ☐ A Metil isopropil etere + HI
  - ☐ B Dietil etere + BBr<sub>3</sub> seguito da idrolisi
  - ☐ C Tetraidrofurano + NaOH
  - ☐ D Diossano + HBr
31. Per reazione tra etil isopropil etere e acido iodidrico a caldo, si otterrà:
- ☐ A ioduro di etile + alcol isopropilico
  - ☐ B ioduro di isopropile + etanolo
  - ☐ C ioduro di isopropile + etilene
  - ☐ D etanolo + propene
32. Gli eteri reagiscono sia con gli acidi, sia con le basi?
33. Quali prodotti si ottengono facendo reagire il propil *terz*-butil etere con HBr concentrato a caldo?
34. Quali prodotti si ottengono trattando con HI concentrato a caldo, l'etil fenil etere?

35. Scrivete le equazioni delle seguenti reazioni. Se la reazione non avviene, spiegate il motivo.
- metil propil etere + HBr in eccesso (a caldo)  $\longrightarrow$
  - dibutil etere + NaOH acquosa all'ebollizione  $\longrightarrow$
  - etil etere +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrato (a freddo)  $\longrightarrow$
  - dipropil etere + Na  $\longrightarrow$
  - etil fenil etere  $\xrightarrow[2. \text{H}_2\text{O}]{1. \text{BBr}_3}$
36. Quando un etere ciclico viene riscaldato in presenza di HBr in eccesso, si ottiene come unico prodotto organico 1,4-dibromobutano. Scrivete la struttura dell'etere e l'equazione di reazione. (Suggerimento: vedi il paragrafo 9 del Capitolo 7 e il paragrafo 6 del Capitolo 8.)

## Preparazione e reazioni degli epossidi

37. In laboratorio gli epossidi si possono formare tramite le seguenti reazioni:
- alchene + permanganato di potassio
  - alchene + peracido
  - alchene + ossigeno
  - alchene + acido
38. Indicate, tra le seguenti, la frase corretta.
- La scissione degli epossidi avviene in ambiente acido.
  - La scissione degli epossidi avviene in ambiente basico.
  - La scissione degli epossidi può avvenire a opera di un reattivo di Grignard.
  - Tutte le precedenti affermazioni sono corrette.
39. Che cosa si ottiene dalla reazione tra bromuro di benzilmagnesio e ossido di etilene?
- 1-fenilpropanolo
  - 2-fenilpropanolo
  - 3-fenilpropanolo
  - Non avviene alcuna reazione
40. Sintetizzate l'ossido di propilene e assegnate la nomenclatura IUPAC.
41. Completate la seguente reazione: ossido di stirene + anilina  $\longrightarrow$
42. Scrivete le equazioni per le reazioni dell'ossido di etilene con i seguenti reagenti:
- 1 mole di HCl
  - un eccesso di HCl
  - fenolo +  $\text{H}^+$
  - bromuro di fenilmagnesio

43. Tramite l'eossidazione di un alchene con un perossiacido e la successiva apertura dell'anello epossidico, progettate una sintesi in due passaggi dell'1,2-butandiolo a partire da 1-butene.
44. Scrivete l'equazione della reazione dell'ammoniaca con l'ossido di etilene. Il prodotto ottenuto è una base organica solubile in acqua, che viene impiegata nella fabbricazione del ghiaccio secco per assorbire e concentrare il  $\text{CO}_2$ .
45. Scrivete tutti i passaggi dei meccanismi delle reazioni dell'equazione 8.20 (pag. 230).

## Eteri ciclici

46. Qual è la frase sbagliata riferita al tetraidrofurano?
- Solubilizza molti composti organici.
  - È poco reattivo perché stabile.
  - Non può dare legami idrogeno.
  - È solubile in acqua.
47. Nella nomenclatura degli eteri corona occorre indicare:
- il numero di atomi di carbonio e il numero di atomi di ossigeno.
  - il numero di atomi totali e il numero di atomi di ossigeno.
  - il numero di atomi totali e il numero di atomi di carbonio.
  - Nessuna delle risposte precedenti è esatta.
48. Spiegate che cosa sono gli *eteri corona* e quali caratteristiche hanno.
49. Che cosa si ottiene trattando il tetraidrofurano con acido iodidrico a caldo?
50. Completate la seguente reazione:
- $$\text{CH}_3\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} + \text{Na} \longrightarrow$$
51. Quali prodotti alogenati si ottengono quando l'etere ciclico 1,4-diossano (par. 9, formula a pag. 231) viene riscaldato con un eccesso di HBr?



## TEST YOURSELF

52. Write the meaning of: *ether*, *alkoxy group*, *Grignard reagent*, *organolithium reagents*, *organometallic compound*, *ether cleavage*.
53. Compare the boiling points and solubilities in water of isomeric ethers and alcohols.

Harold Hart Christopher M. Hadad  
Leslie E. Craine David J. Hart

# Fondamenti di chimica organica

A cura di Luca Zoia



Inquadra e scopri  
i contenuti

La chimica organica governa ogni aspetto della vita, dai processi cellulari di base alle applicazioni biotecnologiche che stanno rivoluzionando medicina e industria. Partendo dai principi fondamentali della chimica del carbonio, questo manuale propone una visione a tutto tondo della materia, evidenziandone i collegamenti con la biologia, la farmacologia e le scienze ambientali attraverso esempi concreti e riferimenti alle recenti scoperte scientifiche.

Le proprietà e la reattività di alcani, alcheni, alchini, composti aromatici e, in generale, dei gruppi chimici, sono affrontate in modo graduale, senza dare nulla per scontato. Un ampio uso di disegni e schemi rende più semplice e immediato capire i meccanismi di reazione, mentre numerosi *Esercizi svolti* ed esempi applicativi permettono di comprendere in che modo le molecole organiche si combinino per formare le strutture che so-

stengono la vita. A fianco del testo, dei box contenenti voci di glossario richiamano i concetti fondamentali, mentre le *Note* pongono l'accento su aspetti a cui prestare attenzione.

Le schede *Green chemistry* e *Per saperne di più* illustrano come la chimica organica può contribuire a un futuro più sostenibile per l'ambiente, per la salute umana e per lo sviluppo economico.

Per favorire il ripasso e la visione di insieme, al termine di ogni capitolo, una mappa concettuale riassume in modo visuale gli argomenti principali, seguita dal riepilogo delle reazioni e dei meccanismi con cui avvengono. Completano il testo numerosi esercizi, le cui soluzioni sono disponibili nel sito del libro, insieme a video, schede di approfondimento e test interattivi, accessibili anche attraverso lo smartphone con l'app **laZ Guarda!**

**Harold Hart** è stato professore emerito presso la Michigan State University, East Lansing, MI, Stati Uniti.

**Christopher M. Hadad** è professore presso l'Ohio State University, Columbus, OH, Stati Uniti.

**Leslie E. Craine** è professoressa presso la Central Connecticut State University, New Britain, CT, Stati Uniti.

**David J. Hart** è professore emerito presso l'Ohio State University, Columbus, OH, Stati Uniti.

## Le risorse digitali

**universita.zanichelli.it/hart-fond**

A questo indirizzo sono disponibili le risorse digitali di complemento al libro.

Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su **my.zanichelli.it** inserendo il codice di attivazione personale contenuto nel libro.

## Libro con ebook

Chi acquista il libro nuovo può accedere gratuitamente all'Ebook, seguendo le istruzioni presenti nel sito.

L'accesso all'Ebook e alle risorse digitali protette è personale, non condivisibile e non cedibile, né autonomamente né con la cessione del libro cartaceo.

HART\*FONDAMENTI CHIMICA ORGANICA LUM

ISBN 978-88-08-79939-5



9 788808 799395  
7 8 9 0 1 2 3 4 5 (60G)