

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

Fondamenti di chimica organica

A cura di Luca Zolia



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.



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 Zoa (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 (CLEARdi),
Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano
e-mail: autorizzazioni@clearedi.org e sito web: 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

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.

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/licenzeeductive

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

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

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/fuorcatalogo

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

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.

Lesperienza 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
sito web: 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

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 alogenli 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 <i>cis-trans</i> nei cicloalcani	53

11 Riepilogo sull'isomeria	54	14 L'addizione di idrogeno	92
12 Le reazioni degli alcani	55	15 Le addizioni ai sistemi coniugati	93
A L'ossidazione e la combustione: gli alcani come combustibili	55	A Le addizioni eletrofile ai dieni coniugati	93
GREEN CHEMISTRY		B Le cicloaddizioni ai dieni coniugati: la reazione di Diels–Alder	94
Energia alternativa, i vantaggi dell'idrogeno	56	16 Le addizioni radicaliche agli alcheni	96
B L'alogenazione degli alcani	57	A L'addizione radicalica di acido bromidrico	96
PER SAPERNE DI PIÙ		B La bromurazione allilica	96
Il metano, il gas di palude, e l'esperimento di Miller	58	C Il polietilene	96
13 Il meccanismo radicalico a catena dell'alogenazione	59	17 L'ossidazione degli alcheni	98
A La stabilità dei radicali	61	A L'ossidazione con permanganato: un saggio chimico	98
B Le reazioni di alogenazione: reattività e selettività	62	PER SAPERNE DI PIÙ	
Mappa del capitolo	63	L'etilene: materia prima e ormone delle piante	99
Esercizi	64	B L'ozonolisi degli alcheni	100
		C Altre ossidazioni degli alcheni	100

3 GLI ALCHENI E GLI ALCHINI

1 Definizione e classificazione	68
2 La nomenclatura	69
3 Alcune caratteristiche dei doppi legami	72
4 Il modello orbitalico del doppio legame: il legame pi-greco (π)	73
5 L'isomeria <i>cis-trans</i> negli alcheni	75
6 Le reazioni di addizione e di sostituzione a confronto	76

PER SAPERNE DI PIÙ

La chimica della visione	77
--------------------------	----

7 Le addizioni al doppio legame	78
A L'addizione di alogeni	78
B L'addizione di acqua (idratazione)	79
C L'addizione di acidi	79
8 L'addizione di reagenti asimmetrici ad alcheni asimmetrici: la regola di Markovnikov	80
9 Il meccanismo di addizione eletrofila agli alcheni	81
10 La spiegazione della regola di Markovnikov	84
11 L'equilibrio di reazione: che cosa rende possibile una reazione?	86
12 La reazione è veloce o è lenta?	87
13 L'idroborazione degli alcheni	90

14 L'addizione di idrogeno	92
15 Le addizioni ai sistemi coniugati	93
A Le addizioni eletrofile ai dieni coniugati	93
B Le cicloaddizioni ai dieni coniugati: la reazione di Diels–Alder	94
16 Le addizioni radicaliche agli alcheni	96
A L'addizione radicalica di acido bromidrico	96
B La bromurazione allilica	96
C Il polietilene	96
17 L'ossidazione degli alcheni	98
A L'ossidazione con permanganato: un saggio chimico	98
PER SAPERNE DI PIÙ	
L'etilene: materia prima e ormone delle piante	99
B L'ozonolisi degli alcheni	100
C Altre ossidazioni degli alcheni	100
18 Alcune caratteristiche dei tripli legami	101
19 Il modello orbitalico del triplo legame	101
20 Le reazioni di addizione agli alchini	102

PER SAPERNE DI PIÙ

Il petrolio, la benzina e il numero di ottani	103
---	-----

21 L'acidità degli alchini	105
Mappa del capitolo	106
Esercizi	109

4 I COMPOSTI AROMATICI

1 Il benzene	113
2 La struttura di Kekulé del benzene	115
3 La risonanza nel benzene	115
4 Il modello orbitalico del benzene	116
5 I simboli del benzene	117
6 La nomenclatura dei composti aromatici	117
7 L'energia di risonanza del benzene e la definizione di aromaticità	120
8 La sostituzione eletrofila aromatica	121
9 Il meccanismo della sostituzione eletrofila aromatica	122
A L'alogenazione	124
B La nitrazione	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	127
A I gruppi <i>orto</i> , <i>para</i> -orientanti	128
B I gruppi <i>meta</i> -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**Esercizi****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 <i>R-S</i>	145
4 La convenzione <i>E-Z</i> per gli isomeri <i>cis-trans</i>	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 <i>meso</i>	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**Esercizi****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 deidroalogenazione, 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**Esercizi****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
---	-----

14 La sostituzione eletrofila aromatica sui fenoli	211	8 L'addizione di acqua: l'idratazione di aldeidi e chetoni	250
15 L'ossidazione dei fenoli	211	9 L'addizione di reagenti di Grignard e di acetiluri	250
16 I fenoli come antiossidanti	212	10 L'addizione di acido cianidrico: le cianidrine	253
17 I tioli, analoghi solforati degli alcoli e dei fenoli	213	11 L'addizione di nucleofili all'azoto	253
PER SAPERNE DI PIÙ		12 La riduzione dei composti carbonilici	255
I capelli: ricci o lisci?	214	13 L'ossidazione dei composti carbonilici	257
Mappa del capitolo	215	14 La tautomeria cheto-enolica	258
Esercizi	217	PER SAPERNE DI PIÙ	
		Tautomeria e fotocromismo	259
8 GLI ETERI E GLI EPOSSIDI		15 L'acidità degli idrogeni in alfa: l'anione enolato	260
1 La nomenclatura degli eteri	220	16 Lo scambio di deuterio nei composti carbonilici	261
2 Le proprietà fisiche degli eteri	221	17 La condensazione aldolica	262
3 Gli eteri come solventi	222	18 La condensazione aldolica mista	263
4 Il reagente di Grignard: un composto organometallico	222	19 Le sintesi industriali mediante condensazione aldolica	264
5 La preparazione degli eteri	225	PER SAPERNE DI PIÙ	
6 La scissione degli eteri	226	Il trattamento delle acque e la chimica degli enoli/etanoli	265
PER SAPERNE DI PIÙ		Mappa del capitolo	266
L'etero e l'anestesia	227	Esercizi	268
7 Gli epossidi (ossirani)	228		
8 Le reazioni degli epossidi	229		
9 Gli eteri ciclici	231		
GREEN CHEMISTRY		10 ACIDI CARBOSSILICI E DERIVATI	
MTBE: l'etero per la benzina senza piombo	233	1 La nomenclatura degli acidi	272
Mappa del capitolo	234	2 Le proprietà fisiche degli acidi	275
Esercizi	235	3 Acidità e costanti di acidità	276
9 LE ALDEIDI E I CHETONI		4 Perché gli acidi carbossilici sono acidi?	278
1 La nomenclatura delle aldeidi e dei chetoni	238	5 L'influenza della struttura sull'acidità: l'effetto induttivo rivisitato	279
2 Aldeidi e chetoni comuni	240	6 La trasformazione degli acidi in sali	280
3 I metodi di preparazione delle aldeidi e dei chetoni	242	7 I metodi di preparazione degli acidi	281
4 Le aldeidi e i chetoni in natura	243	A L'ossidazione degli alcoli primari e delle aldeidi	281
5 Il gruppo carbonilico	244	B L'ossidazione delle catene laterali dei composti aromatici	281
6 L'addizione nucleofila ai carbonili: considerazioni meccanicistiche	245	C La reazione dei reagenti di Grignard con diossido di carbonio	282
7 L'addizione di alcoli: la formazione di emiacetali e di acetali	246	D L'idrolisi dei cianuri (nitrili)	282
		8 I derivati degli acidi carbossilici	284

9 Gli esteri	284	8 La reazione delle ammine con gli acidi forti: i sali delle ammine	320
10 La preparazione degli esteri: l'esterificazione di Fischer	285	9 Le ammine chirali nella risoluzione delle miscele racemiche	322
11 Il meccanismo di esterificazione con catalisi acida: la sostituzione nucleofila acilica	286	10 L'acilazione delle ammine con i derivati degli acidi	322
12 I lattoni	288	11 I composti di ammonio quaternari	324
13 La saponificazione degli esteri	288	12 I sali di diazonio aromatici	325
14 L'ammonolisi degli esteri	289	13 La diazocupolazione: i coloranti azoici	328
15 La reazione degli esteri con i reagenti di Grignard	290	Mappa del capitolo	329
16 La riduzione degli esteri	291	Esercizi	331
17 I composti acilici attivati	291		
18 Gli alogenuri acilici	292		
19 Le anidridi degli acidi	294		
20 Le ammidi	296		

GREEN CHEMISTRY

I tioesteri, le funzioni che attivano i gruppi acilici in natura	296
21 Sommario delle reazioni dei derivati degli acidi carbossilici	298
22 Gli idrogeni in alfa degli esteri: la condensazione di Claisen	301
GREEN CHEMISTRY	
Chimica verde e ibuprofene: un caso di studio	303
Mappa del capitolo	304
Esercizi	306

11 LE AMMINE E ALTRI COMPOSTI AZOTATI

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

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

12 LA SPETTROSCOPIA

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

13 I COMPOSTI ETEROCICLICI

1 La piridina, un eterociclo aromatico	360
2 Le reazioni di sostituzione sulla piridina	362
3 Altri eterocicli a sei termini	365
4 Gli eterocicli a cinque termini: furano, pirrolo e tiofene	367
5 Le reazioni di sostituzione elettrofila del furano, del pirrolo e del tiofene	370

PER SAPERNE DI PIÙ

Le porfirine: perché il sangue è rosso e l'erba è verde?	371
--	-----

6 Altri eterocicli a cinque termini: gli azoli	372	A L'idrogenazione degli oli vegetali	409
7 Eterocicli a cinque termini con anelli condensati: gli indoli e le purine	373	B L'ossidazione dei trigliceridi	410
PER SAPERNE DI PIÙ		C La saponificazione dei grassi e degli oli	410
La morfina e altri farmaci azotati	375	3 Come agiscono i saponi?	411
Mappa del capitolo	376	4 I detergenti sintetici (detersivi)	412
Esercizi	377	PER SAPERNE DI PIÙ	
		I detergenti in commercio	415
14 I POLIMERI SINTETICI		5 I fosfolipidi	416
1 La classificazione dei polimeri	379	6 Prostaglandine, leucotrieni e lipossine	416
2 La polimerizzazione per addizione radicalica	380	7 Le cere	417
3 La polimerizzazione per addizione cationica	385	8 I terpeni e gli steroidi	418
4 La polimerizzazione per addizione anionica	386	Mappa del capitolo	422
5 I polimeri stereoregolari: la polimerizzazione di Ziegler–Natta	387	Esercizi	423
GREEN CHEMISTRY		16 I CARBOIDRATI	
Le microplastiche	389	1 Definizione e classificazione	426
PER SAPERNE DI PIÙ		2 I monosaccaridi	427
Poliacetilene e polimeri conduttori	390	3 La chiralità nei monosaccaridi: le proiezioni di Fischer e gli zuccheri D,L	428
6 I polimeri dienici: la gomma naturale e la gomma sintetica	390	4 Le strutture emiacetaliche cicliche dei monosaccaridi	431
7 I copolimeri	392	5 Anomeria e mutarotazione	433
8 La polimerizzazione per condensazione: il Dacron® e il nylon	393	6 Le strutture piranosiche e furanosiche	435
GREEN CHEMISTRY		7 Le conformazioni dei piranosi	436
I polimeri degradabili	395	8 Esteri ed eteri da monosaccaridi	437
PER SAPERNE DI PIÙ		9 La riduzione dei monosaccaridi	437
Le poliammidi più recenti: le arammidi	396	10 L'ossidazione dei monosaccaridi	438
9 I poliuretani e altri polimeri di condensazione	397	11 La formazione di glicosidi dai monosaccaridi	439
Mappa del capitolo	400	12 I disaccaridi	440
Esercizi	402	A Il maltosio	440
15 I LIPIDI E I DETERGENTI		B Il cellobiosio	441
1 Le caratteristiche dei lipidi	405	C Il lattosio	441
A I grassi e gli oli	406	D Il saccarosio	442
B La nomenclatura dei trigliceridi	407	13 I polisaccaridi	443
2 Le reazioni dei trigliceridi	409	A L'amido e il glicogeno	443
PER SAPERNE DI PIÙ		PER SAPERNE DI PIÙ	
Sapore dolce e dolcificanti		Sapore dolce e dolcificanti	444
B La cellulosa		B La cellulosa	446
C Altri polisaccaridi		C Altri polisaccaridi	447
14 I fosfati degli zuccheri		14 I fosfati degli zuccheri	447

GREEN CHEMISTRY	
Impieghi alternativi dei carboidrati	448
15 I deossi zuccheri	449
16 Gli ammino zuccheri	449
17 L'acido ascorbico (vitamina C)	449
Mappa del capitolo	451
Esercizi	453
17 AMMINOACIDI, PEPTIDI E PROTEINE	
1 Gli amminoacidi naturali	455
2 Le proprietà acido-base degli amminoacidi	457
3 Le proprietà acido-base degli amminoacidi con più di un gruppo acido o basico	460
4 L'elettroforesi	462
5 Le reazioni degli amminoacidi	462
6 La reazione della ninidrina	463
7 I peptidi	464
PER SAPERNE DI PIÙ	
Alcuni peptididi origine naturale	465
8 Il legame di solfuro	466
9 Le proteine	466
10 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
11 La logica dell'analisi sequenziale	470
12 La sintesi peptidica	472
13 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
14 La struttura terziaria: proteine fibrose e proteine globulari	478
15 La struttura quaternaria delle proteine	481
PER SAPERNE DI PIÙ	
Il sequenziamento delle proteine e l'evoluzione	481
Mappa del capitolo	482
Esercizi	484
18 I NUCLEOTIDI E GLI ACIDI NUCLEICI	
1 La struttura generale degli acidi nucleici	486
2 I componenti dell'acido deossiribonucleico	487
3 I nucleosidi	487
4 I nucleotidi	489
5 La struttura primaria del DNA	490
6 Il sequenziamento degli acidi nucleici	491
PER SAPERNE DI PIÙ	
DNA e crimine	491
7 La sintesi di laboratorio degli acidi nucleici	492
8 La struttura secondaria del DNA: la doppia elica	493
9 La replicazione del DNA	495
10 Gli acidi ribonucleici	496
11 Il codice genetico e la biosintesi delle proteine	498
12 Altri nucleotidi biologicamente importanti	500
PER SAPERNE DI PIÙ	
Il genoma umano	502
Mappa del capitolo	504
Esercizi	505
Tabelle	507
Crediti fotografici	510
Indice analitico	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.zanicheli.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 colonnaio, è indicato quali approfondimenti e video sono disponibili per comprendere o approfondire l'argomento trattato.

I 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!**.

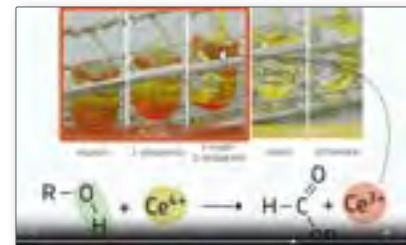
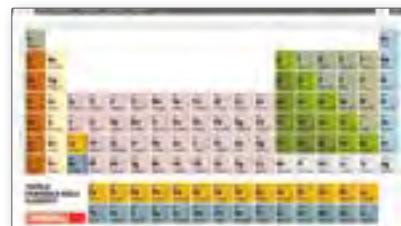
L'app laZ Guarda!

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.



10 ACIDI CARBOSSILICI E DERIVATI

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

Gli acidi carbossilici sono acidi organici caratterizzati dal gruppo funzionale carbossile (gruppo carbossilico)

La nomenclatura degli acidi
Il sapore aspro dell'aceto, le punzicce delle formiche, il cattivo odore del burro rancido, il sollievo dal dolore dato dall'acido acetilsalicilico o dall'Asprofene dopo un taglio: questi sono solo alcuni esempi delle proprietà dei primi acidi organici della classificazione. Il gruppo funzionale degli acidi carbossilici è il gruppo carbossile (carbossile). Il nome di questo gruppo è una contrazione dei nomi delle due parti che lo compongono, il carbonile e l'ossidrile. La formula generale degli acidi carbossilici può essere scritta in forma estesa o in forma abbreviata:

$\text{R}-\text{C}(=\text{O})-\text{OH}$ oppure RCOOH oppure RCO_2H
tra modi di scrivere un acido carbossilico

Per la loro abbondanza in natura, molti hanno nomi comuni, derivati da piante, animali o greci che fanno riferimento alla sostanza o alla molecola (Figura 1). La Tabella 1 riporta i primi dieci acidi carbossilici e i loro nomi non rifiutata con i loro nomi comuni e IUPAC. Per assegnare il nome IUPAC a un acido carbossilico, al posto della lettera finale -o del nome dell'alcano corrispondente si mette il suffisso -oico e si antepongono le parole acido. Nel caso degli acidi sosti-

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 C₆₀, 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'eposido 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 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 decriptato 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.

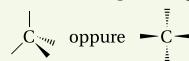
La disposizione dei quattro gruppi legati a un centro stereogenico si chiama **configurazione** di quel centro.

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.

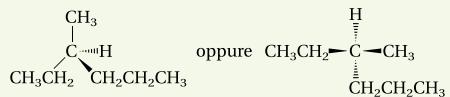
ESERCIZIO SVOLTO 2

Rappresentiamo i due enantiomeri del 3-metilesano.

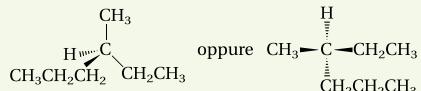
RISOLUZIONE Si possono rappresentare in vari modi. Ne riportiamo due. Per prima cosa scriviamo il carbonio 3 con i suoi quattro legami tetraedrici:



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.

GREEN CHEMISTRY

Chimica verde e Ibuprofene: un caso di studio

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.

PER SAPERNE DI PIÙ La vitamina E: tocoferoli e tocotrienoli

La famiglia della vitamina E comprende otto molecole strutturalmente simili, quattro isomeri (TCT) isomeri 1, 4, 8 e 12 e quattro isomeri (TCTP) isomeri 1, 4, 8, 12 e 16. La C12 è troppo instabile per essere trovata in natura, così come la famiglia dei TCT e TCTP contengono l'anello aromatico del cumino. La vitamina E naturale (TCTP) e la vitamina E sintetica (TCTP) possiedono una catena laterale isopropenile, ma quella del TCT è lineare con tre doppi legami, mentre il TCT ha una catena allilica.

TCTP si trova prevalentemente nel miele, nei semi di soia, e nell'olio di cumino. La vitamina E naturale (TCTP) è più resistente al risciacquo di quella sintetica.

Nonostante la famiglia della vitamina E è stata studiata molto più intensamente del gruppo dei TCT, è quello dei TCT, i cui sviluppi nella ricerca sulla vitamina E mostrano però le caratteristiche più promettenti per la cura di alcune malattie e le patologie peculiari. I ricercatori hanno scoperto che se TCT, in particolare TCTP, è aggiunto a una soluzione di colesterolo, si è dimostrato che l'«e-TCT ha proprietà antiossidanti più forti di TCT». Si è stato accertato che TCT possiedono una più ampia capacità di riduzione del colesterolo, e sono più efficaci nella diminuzione del colesterolo. I TCT sono altamente efficaci nella riduzione del colesterolo.

Tuttavia, la regione della maggiore attività biologica del TCT non sembra essere la ricettazione stessa attivamente indagando sugli effetti.

RIEPILOGO DELLE REACTIONS

- a. Combustione (par. 52B)**
 $C_nH_{2n+2} + \frac{1}{2}(3n+1) O_2 \rightarrow n CO_2 + (n+1) H_2O$
 Esempio:
 $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$
- b. Allargamento (par. 52B)**
 $(R-CH_2) + X_2 \xrightarrow{\text{cat. SnCl}_4} R-CH_2-X$
 Esempio:
 $CH_3 + Cl \xrightarrow{\text{cat. SnCl}_4} CH_3Cl +$

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 professioniste e professionisti consapevoli delle potenzialità della chimica organica e del suo ruolo nel contribuire a costruire un mondo migliore.



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 asfissiati 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

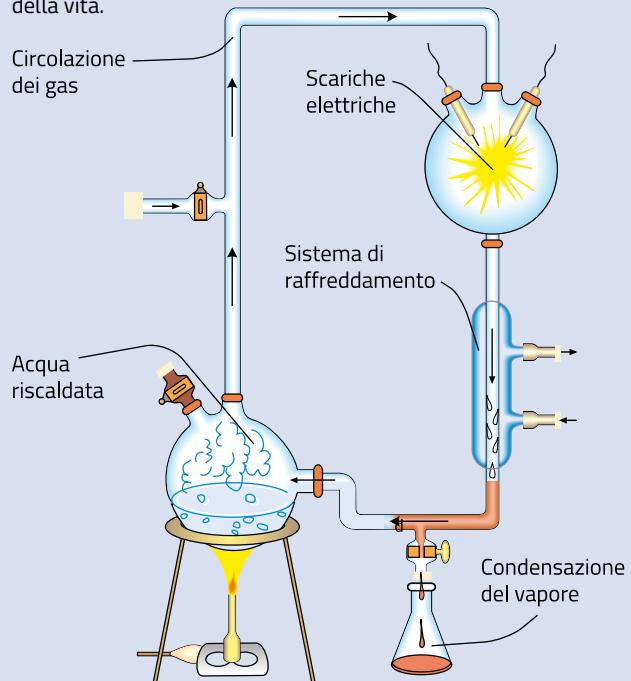
venivano sottoposte a scariche elettriche (per simulare i lampi), si formavano alcuni composti organici (amminoacidi, per esempio) importanti in biologia e fondamentali per la vita (Figura). Risultati analoghi sono stati ottenuti in seguito usando il calore o la luce ultravioletta al posto delle scariche 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.

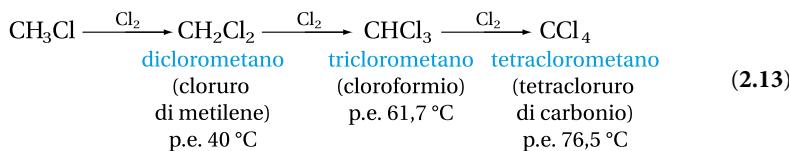
L'esperimento di Miller fornì il modello per una grande mole di lavoro nel campo della scienza che oggi si chiama **evoluzione chimica** o **chimica prebiotica**. Queste ricerche si occupano dello studio degli eventi chimici che probabilmente si verificarono sulla Terra, e in altre parti dell'Universo,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

Figura

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



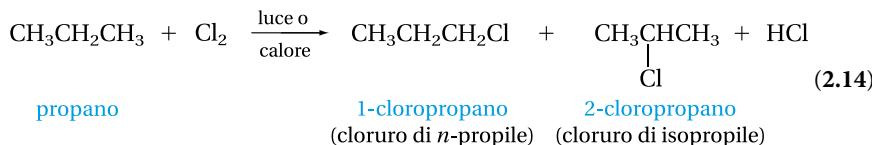
Se è presente un eccesso di alogeno, la reazione può proseguire per dare prodotti polialogenati. Dal metano e da un eccesso di cloro si possono ottenere molecole contenenti due, tre o quattro atomi di cloro.



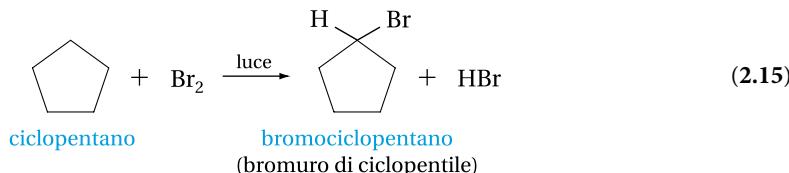
Controllando le condizioni di reazione e il rapporto tra il cloro e il metano è possibile favorire la formazione di uno solo di questi prodotti.

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 *monoclorurazione* 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 *monoclorurazione* dell'ottano? E del cicloottano?

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

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

NOTA Si noti che, come nell'equazione 2.13, a volte per comodità si scrive la formula di uno dei reagenti (in questo caso Cl_2) *sopra la freccia*. Inoltre, a volte, si trascurano i prodotti inorganici la cui formazione è ovvia (in questo caso HCl).

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.

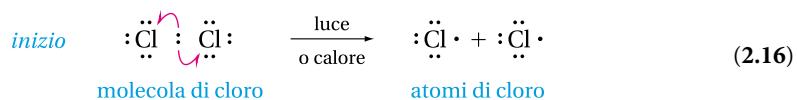
Una reazione a **catena radicalica** comprende uno **stadio di inizio, stadi di propagazione della catena e stadi di terminazione della catena**.

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

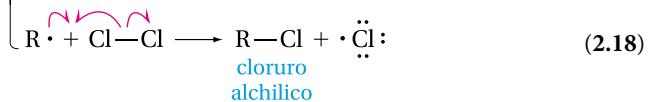
e dei prodotti, e le condizioni di reazione o i catalizzatori sopra la freccia. Esse però *non* ci dicono con precisione in che modo i prodotti si formano a partire dai reagenti.

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 (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, R. 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 (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.

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'innesto, 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.

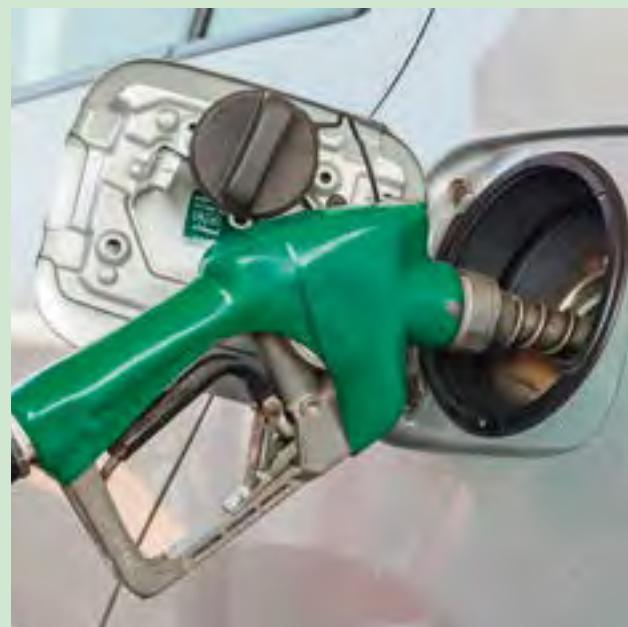
Thomas Midgley, un ingegnere statunitense, fu il primo a capire agli inizi degli anni Venti che la causa della combustione anomala era legata alle caratteristiche della benzina. Ci si rese conto che la benzina era una miscela complessa la cui composizione doveva essere studiata in stretta relazione con 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 $Pb(CH_2-CH_3)_4$. 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 *saturnismo*. 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).

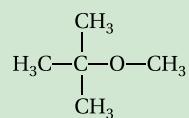


Tra i composti ossigenati più importanti, il **terz-butil metil etere** (MTBE, Figura) è l'etere che ha dato una svolta allo sviluppo della benzina «verde» **senza piombo**. Le sue proprietà antidetonanti sono dovute al fatto che il legame tra l'ossigeno e il gruppo *terz*-butilico si rompe per scissione 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%.

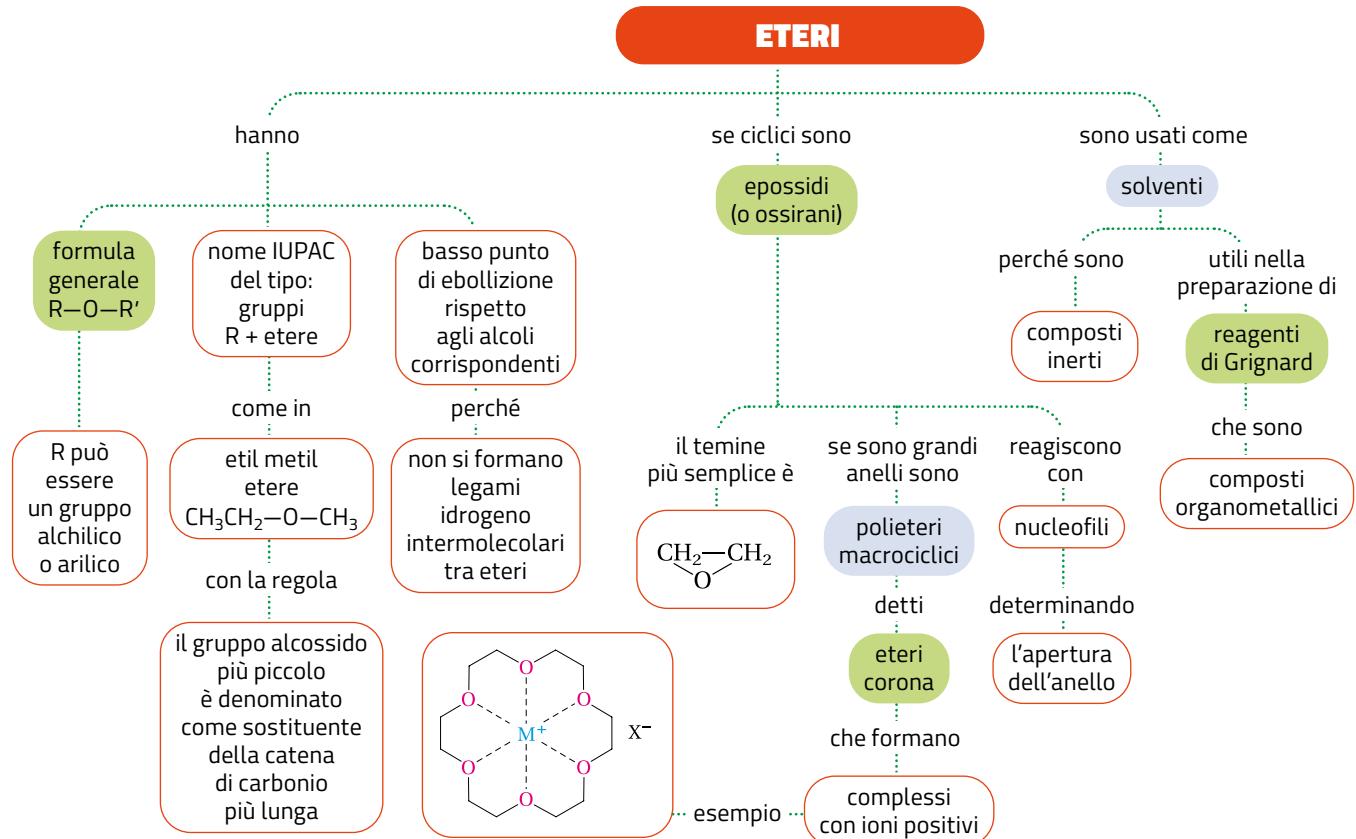
Tuttavia, anche se l'MTBE ha permesso di sostituire il piombo tetraetile, negli ultimi anni si sta monitorando il suo effetto sull'ambiente. Infatti, a causa della sua elevata solubilità in acqua, l'etere riesce a raggiungere le falde acquifere profonde e vi resta per lungo tempo a causa della sua scarsa 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).

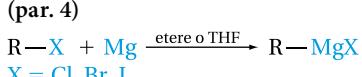
MAPPA DEL CAPITOLO 8 Gli eteri e gli epossidi



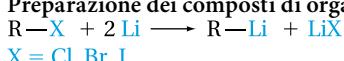
RIEPILOGO DELLE REAZIONI

1. I composti organometallici

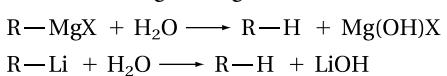
a. Preparazione dei reagenti (o reattivi) di Grignard



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

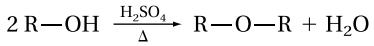


c. Idrolisi dei reagenti organometallici ad alcani (par. 4)

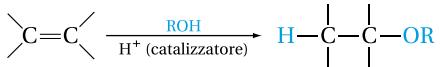


2. Gli eteri

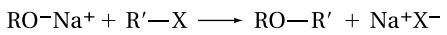
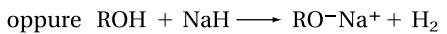
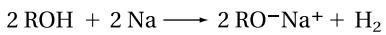
a. Preparazione per disidratazione degli alcoli (par. 5)



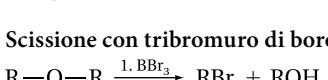
b. Preparazione da alcheni e alcoli (par. 5)



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

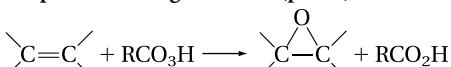


- d. Scissione con acidi alogenidrici (par. 6)

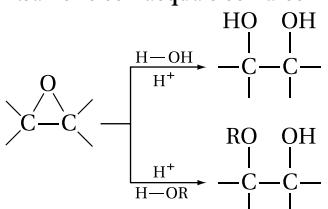


3. Gli epossidi

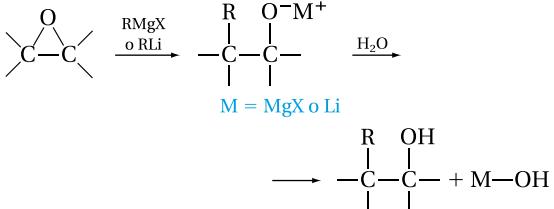
a. Preparazione dagli alcheni (par. 7)



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

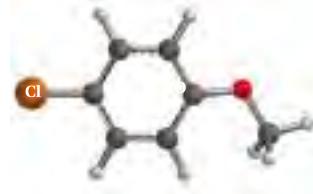
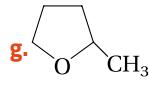
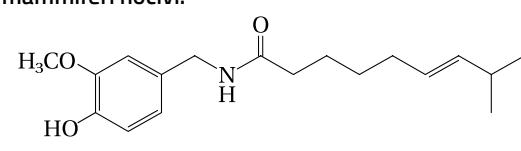


c. Reazione con reagenti organometallici (par. 8)



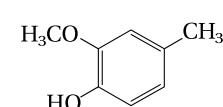
Eteri ed epossidi: struttura, nomenclatura e proprietà

- Gli eteri presentano un angolo di legame di:
 - A 180°
 - C circa 109°
 - B circa 120°
 - D circa 90°
- 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.
- 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.
- 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.
- Qual è il numero corretto di eteri isomeri aventi formula $C_5H_{12}O$?
 - A Tre
 - B Quattro
 - C Cinque
 - D Sei
- 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.
- Quanti eteri chirali esistono con formula $C_6H_{14}O$?
 - A Due
 - B Tre
 - C Quattro
 - D Cinque
- Perché si dice che gli eteri non hanno «idrogeni acidi»?
- Spiegate perché gli eteri non possono formare legami idrogeno tra loro ma lo possono fare con acqua o alcoli.
- Disponete in ordine di temperatura di ebollizione crescente i seguenti eteri spiegando il criterio seguito:
 - etero etilico
 - etero propilico
 - etero isopropilico
 - etero butilico

- Scrivete le formule di struttura dei seguenti composti:
 - dimetil etero
 - etil isopropil etero
 - 2-metossiesano
 - allil propil etero
 - p*-clorofenil metil etero
 - trans*-2-etossiclopentanolo
 - etilen glicole dietil etero
 - 1-metossipropene
 - ossido di propilene
 - p*-etossianisolo
- Assegnate il nome ai seguenti composti:
 - $CH_3CH_2CH_2OCH(CH_3)_2$
 - $CH_3OCH_2CH_2CH_3$
 - $CH_3CH(OCH_3)CH_2$
 - 
 - $CH_3CH_2CH(OCH_2CH_3)CH_2CH_3$
 - 
 - 
- La capsaicina, alcaloide responsabile del sapore piccante del peperoncino *habanero*, trova impiego anche negli spray repellenti per allontanare dai giardini piccoli mammiferi nocivi.
 

capsaicina

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


- Gli eteri e gli alcoli possono essere tra loro isomeri. Scrivete le strutture e denominate tutti i possibili isomeri che hanno formula molecolare $C_4H_{10}O$.
- Scrivete le formule di struttura dei seguenti composti aventi all'incirca lo stesso peso molecolare: 1,2-dimetossietano, etil propil etero, esano e 1-pentanolo.

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 etero 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:

- | | |
|------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> A aldeidi | <input type="checkbox"/> D epossidi |
| <input type="checkbox"/> B chetoni | <input type="checkbox"/> E acidi carbossilici |
| <input type="checkbox"/> C eteri | <input type="checkbox"/> 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-heptanolo

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 etero e (2) successiva addizione di D_2O alla soluzione ottenuta.

- a. $CH_3CH_2CH_2CH_2I$
- b. $CH_3CH_2OCH_2CH_2Br$
- c. $C_6H_5CH_2Br$
- 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_N1 .
- 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_3 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, spiegatene il motivo.

- a. metil propil etere + HBr in eccesso (a caldo) —→
- b. dibutil etere + NaOH acquosa all'ebollizione —→
- c. etil etere + H_2SO_4 concentrato (a freddo) —→
- d. dipropil etere + Na —→
- e. 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.)

43. Tramite l'epossidazione 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 CO_2 .

45. Scrivete tutti i passaggi dei meccanismi delle reazioni dell'equazione 8.20 (pag. 230).

Preparazione e reazioni degli epossidi

37. In laboratorio gli epossidi si possono formare tramite le seguenti reazioni:

- A alchene + permanganato di potassio
- B alchene + peracido
- C alchene + ossigeno
- D alchene + acido

38. Indicate, tra le seguenti, la frase corretta.

- A La scissione degli epossidi avviene in ambiente acido.
- B La scissione degli epossidi avviene in ambiente basico.
- C La scissione degli epossidi può avvenire a opera di un reattivo di Grignard.
- D Tutte le precedenti affermazioni sono corrette.

39. Che cosa si ottiene dalla reazione tra bromuro di benzilmagnesio e ossido di etilene?

- A 1-fenilpropanolo
- B 2-fenilpropanolo
- C 3-fenilpropanolo
- D Non avviene alcuna reazione

40. Sintetizzate l'ossido di propilene e assegnate la nomenclatura IUPAC.

41. Completate la seguente reazione:
ossido di stirene + anilina —→

42. Scrivete le equazioni per le reazioni dell'ossido di etilene con i seguenti reagenti:

- a. 1 mole di HCl
- b. un eccesso di HCl
- c. fenolo + H^+
- d. bromuro di fenilmagnesio

Eteri ciclici

46. Qual è la frase sbagliata riferita al tetraidrofurano?

- A Solubilizza molti composti organici.
- B È poco reattivo perché stabile.
- C Non può dare legami idrogeno.
- D È solubile in acqua.

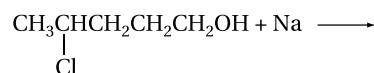
47. Nella nomenclatura degli eteri corona occorre indicare:

- A il numero di atomi di carbonio e il numero di atomi di ossigeno.
- B il numero di atomi totali e il numero di atomi di ossigeno.
- C il numero di atomi totali e il numero di atomi di carbonio.
- D 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:



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 Zolia



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 **IaZ 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 professore 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 89 0 1 2 3 4 5 (60G)