



1

## Radicali

- Specie chimiche con elettroni spaiati
  - occupano da soli un orbitale atomico o molecolare
- Molto instabili e reattivi verso le altre molecole per compensare tale squilibrio
- Autopropagazione per reazioni a catena
- Pericolosità inversamente proporzionale all'emivita

2

## Meccanismi di formazione di radicali

- Perdita di un elettrone:
 
$$X \rightarrow X^{\bullet+} + e^-$$

$$ChI^* + A \rightarrow ChI^{\bullet+} + A^{-(\bullet)}$$
- Acquisto di un elettrone:
 
$$X + e^- \rightarrow X^{\bullet-}$$

$$O_2 + e^- \rightarrow O_2^{\bullet-}$$
- Scissione omolitica di un legame covalente:
 
$$X-Y \rightarrow X^{\bullet} + Y^{\bullet}$$

$$Cl_2 \rightarrow 2Cl^{\bullet}$$
- Astrazione di un atomo di idrogeno (H<sup>•</sup>) da parte di un'altra specie radicalica:
 
$$CH_4 + Cl^{\bullet} \rightarrow CH_3^{\bullet} + HCl$$

$$Lipide-H + OH^{\bullet} \rightarrow Lipide^{\bullet} + H_2O$$

$$R-SH + R-O_2^{\bullet-} \rightarrow R-S^{\bullet-} + R-O_2H$$

gs © 2001-2020 ver 4.4

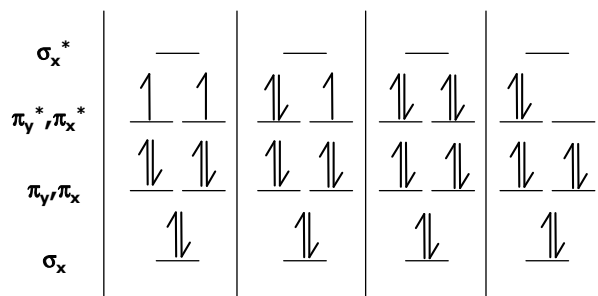
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 3 -

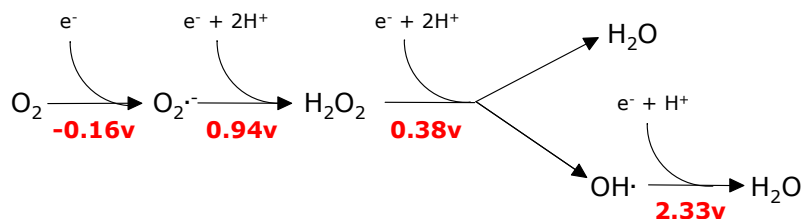
3

## Ossigeno

- Orbitali molecolari dell'ossigeno



- Potenziali di riduzione



gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 4 -

4

## Specie Reattive dell'Ossigeno (ROS)

- Specie non radicaliche

$H_2O_2$	<i>acqua ossigenata (perossido di idrogeno)</i>
$HOBr$	<i>acido ipobromoso</i>
$HOCl$	<i>acido ipocloroso</i>
$O_3$	<i>ozono</i>
$O_2 \ ^1\Delta_g$	<i>ossigeno singoletto</i>
$LOOH$	<i>perossido lipidico</i>
$ONOOH$	<i>perossinitrito</i>

gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 5 -

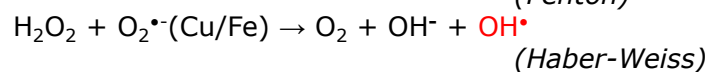
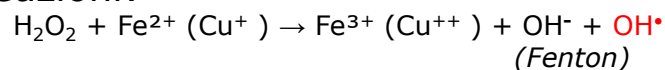
5

## Specie Reattive dell'Ossigeno (ROS)

- Radicali prodotti per riduzione ad un elettrone

$\cdot O-O\cdot + e^- \rightarrow \cdot O-O\cdot^-$	<i>anione superossido</i>
$O_2^{\cdot-} + \cdot OH \rightarrow \ ^1O_2 + OH^-$	<i>ossigeno singoletto</i>
$2O_2^{\cdot-} + 2H^+ \rightarrow H_2O_2 + \ ^3O_2$	<i>perossido</i>
$O_2^{\cdot-} + H_2O \rightarrow HOO\cdot$	<i>idroperossiradicale</i>
$H_2O_2 + e^- \rightarrow OH^- + OH\cdot$	<i>radicale idrossido</i>
$L + O_2^{\cdot-} \rightarrow LOO^{\cdot-}$	<i>anione lipoperossido</i>

- Reazioni:



gs © 2001-2020 ver 4.4

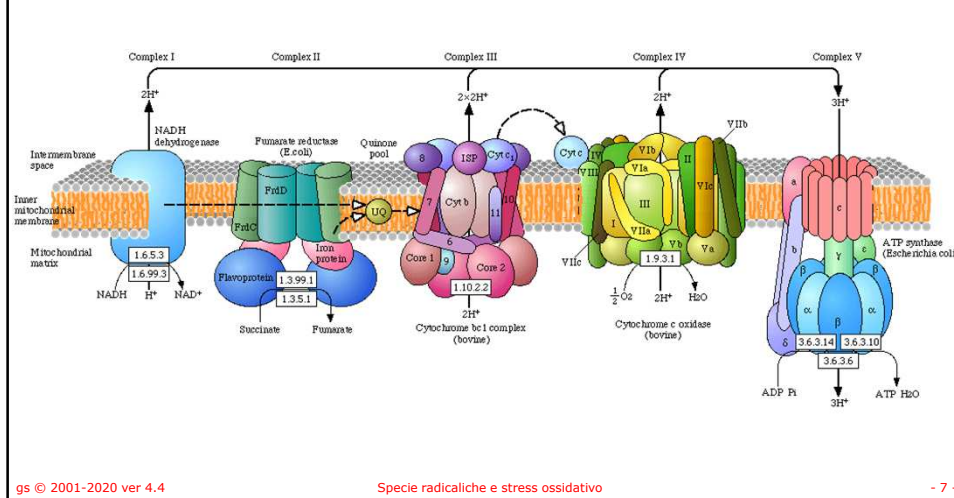
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 6 -

6

## Specie Reattive dell'Ossigeno (ROS)

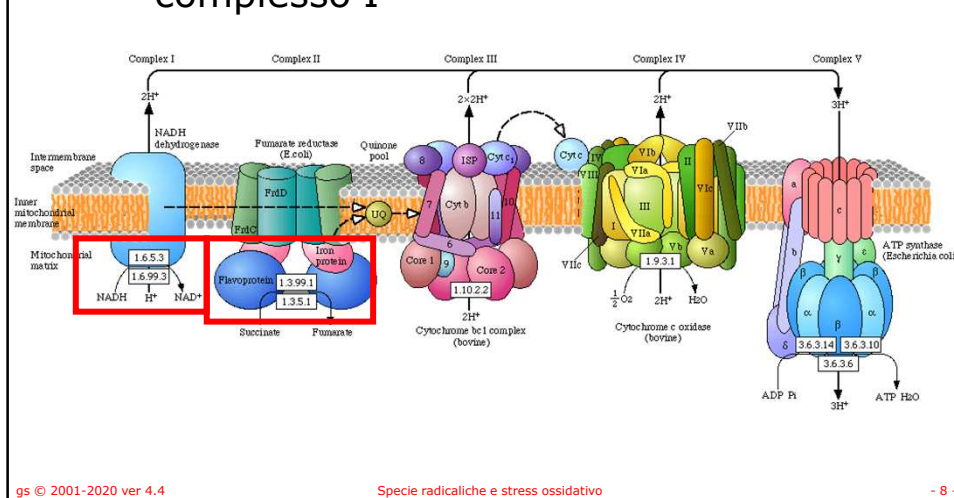
- Prodotte dalla catena respiratoria



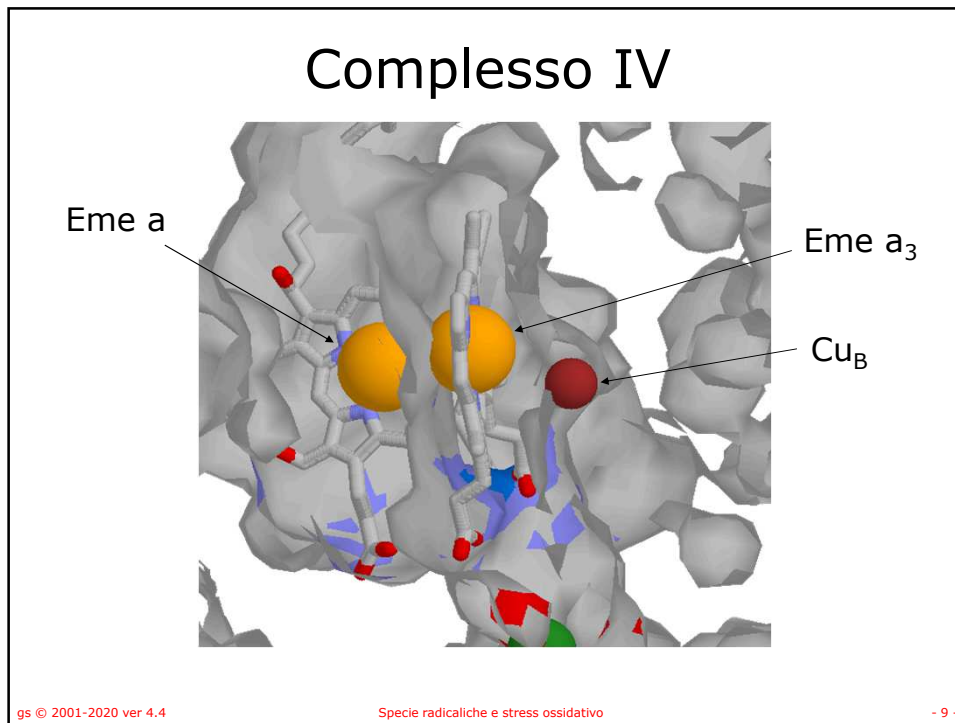
7

## Specie Reattive dell'Ossigeno (ROS)

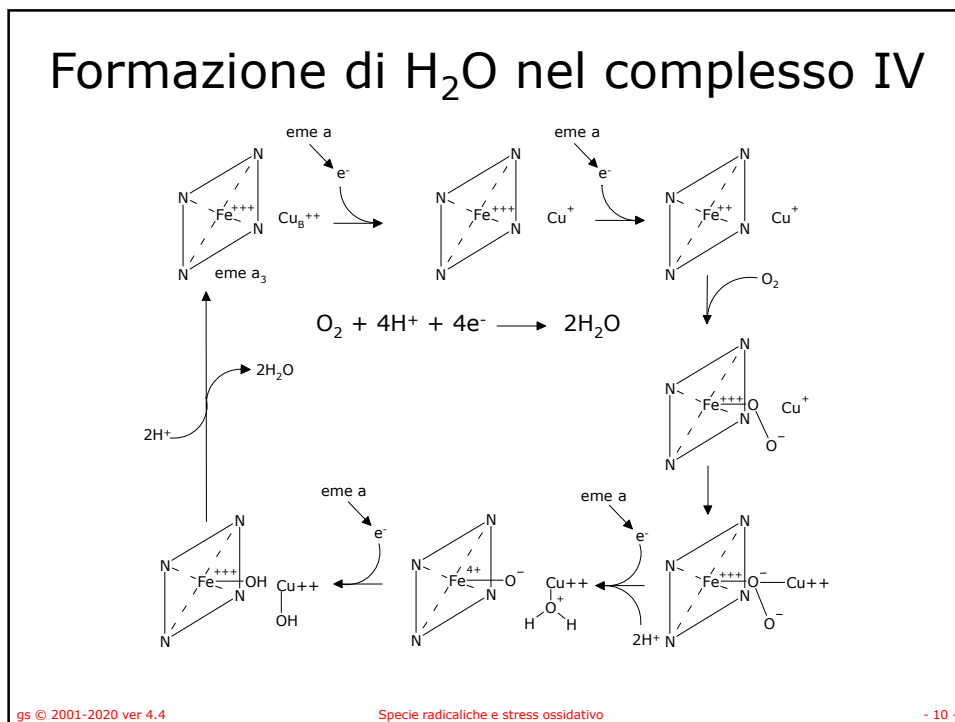
- Prodotte dalla catena respiratoria nel complesso I



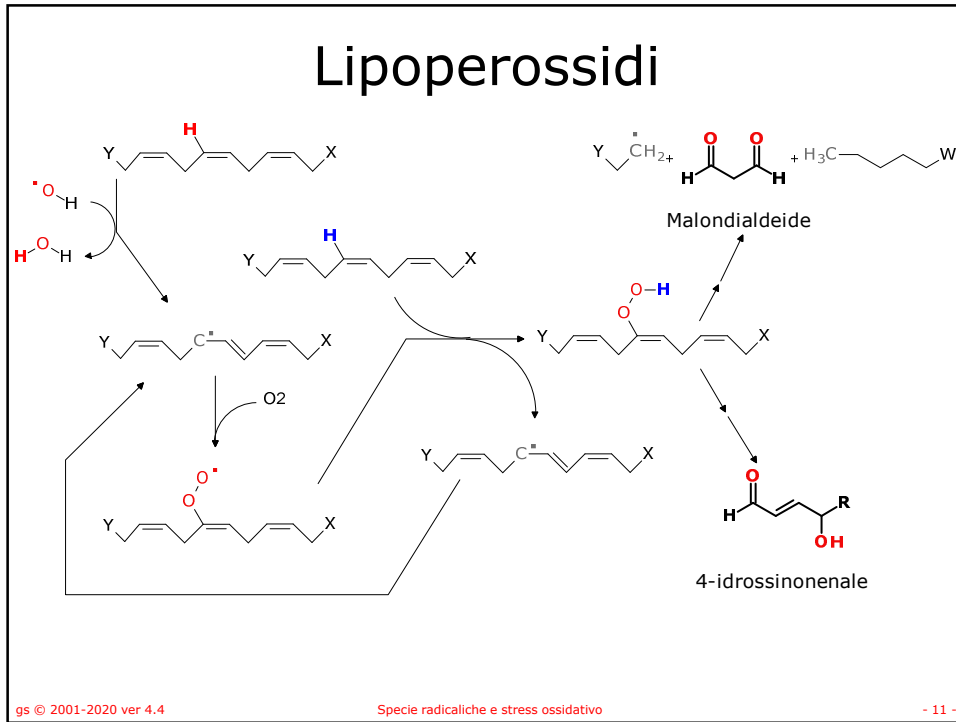
8



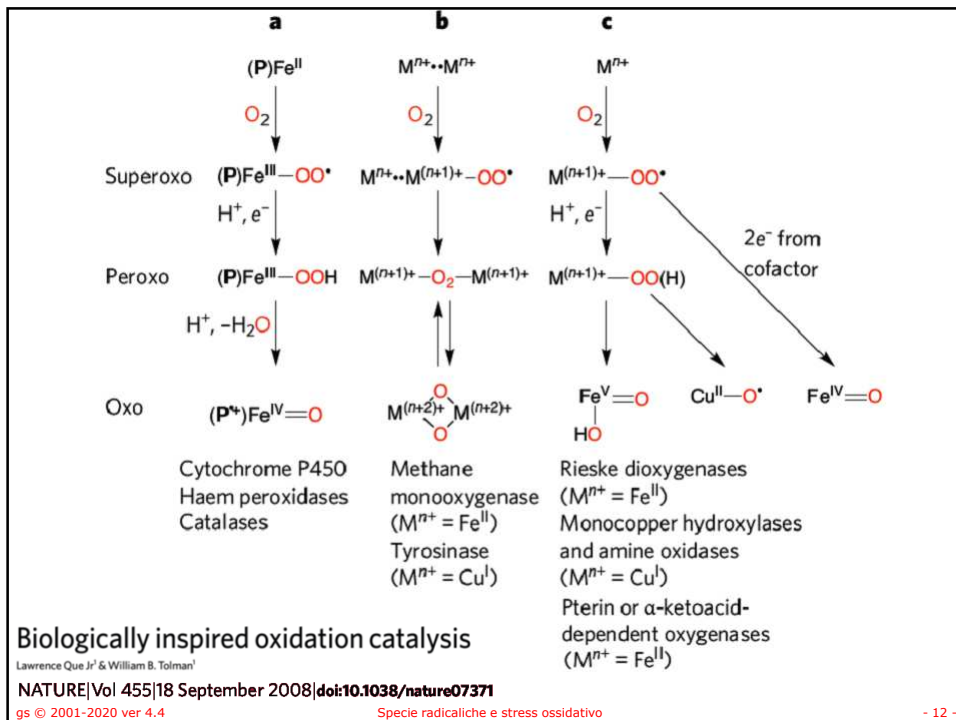
9



10



11



12

## Specie Reattive dell'Azoto (RNS)

- Prodotti prevalentemente dallo smog fotochimico
- Specie non radicaliche
  - $\text{HNO}_2$  *acido nitroso*
  - $\text{NO}^+$  *catione nitrosile*
  - $\text{NO}^-$  *anione nitrosile*
  - $\text{N}_2\text{O}_4$  *tetrossido di diazoto*
  - $\text{N}_2\text{O}_3$  *triossido di diazoto*
  - $\text{NO}_2^+$  *nitrile*
  - $\text{ROONO}$  *alchilperossinitrito*
  - $\text{NO}_2\text{Cl}$  *cloruro di nitrile*
- Specie radicaliche
  - $\text{O}_2 + \text{L-arginina} \rightarrow \text{NO}^\bullet + \text{L-citrullina}$  *ossido d'azoto*
  - $\text{O}_2^{\bullet-} + \text{NO}^\bullet \rightarrow \text{ONOO}^-$  *perossinitrito*
  - $\text{ONOO}^- + \text{CO}_2 \rightarrow \text{ONOOCO}_2^-$  *nitroperossicarbonato*
  - $\text{ONOOCO}_2^- \rightarrow \text{NO}_2^\bullet + \text{CO}_3^{\bullet-}$  *biossido d'azoto*

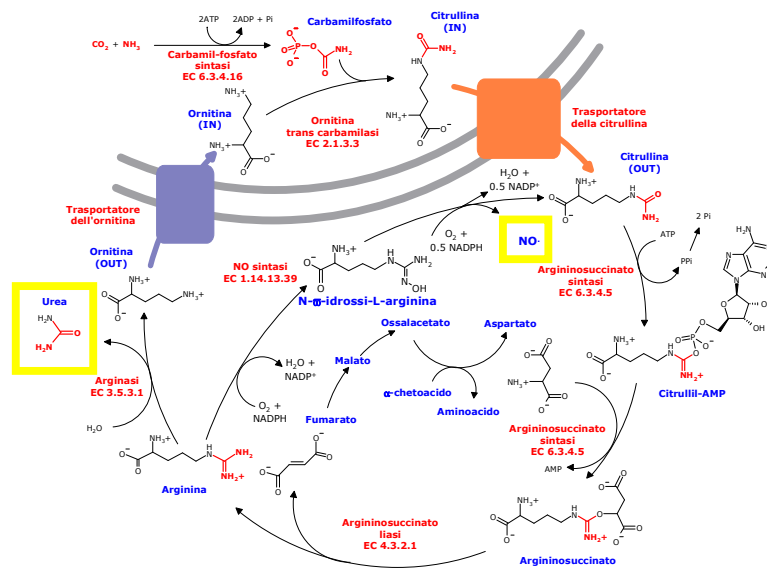
gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 13 -

13

## Ciclo dell'urea e NO

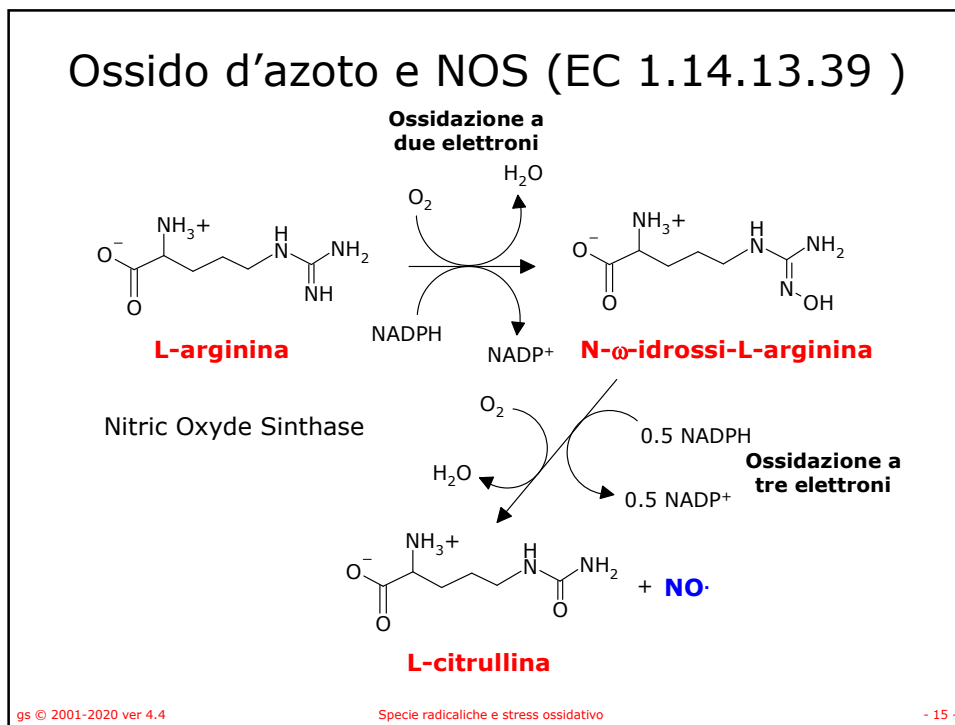


gs © 2001-2020 ver 4.4

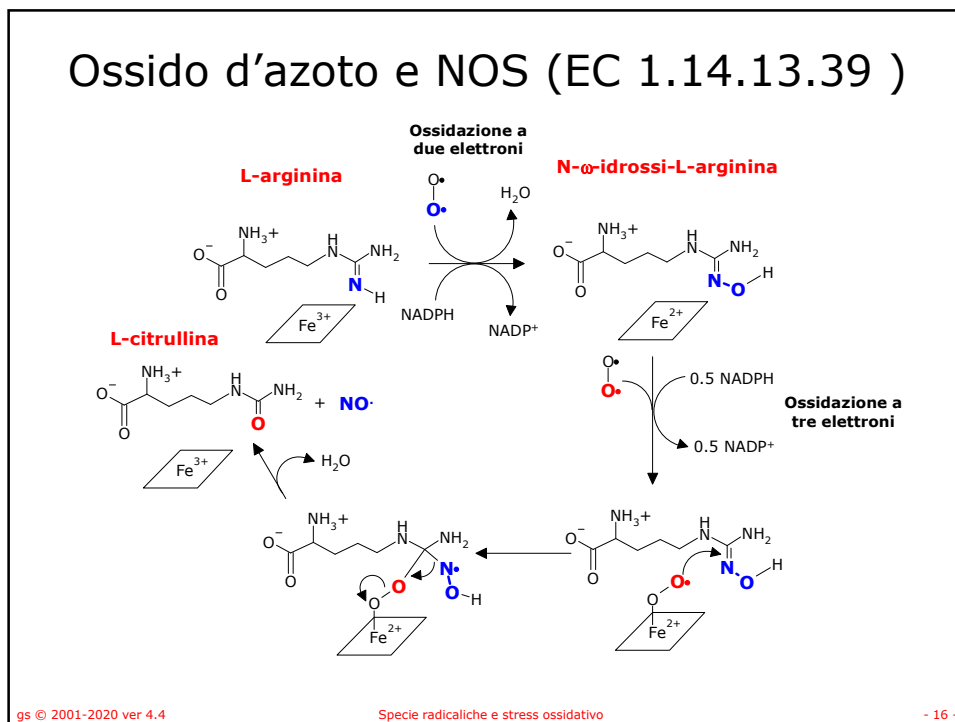
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 14 -

14

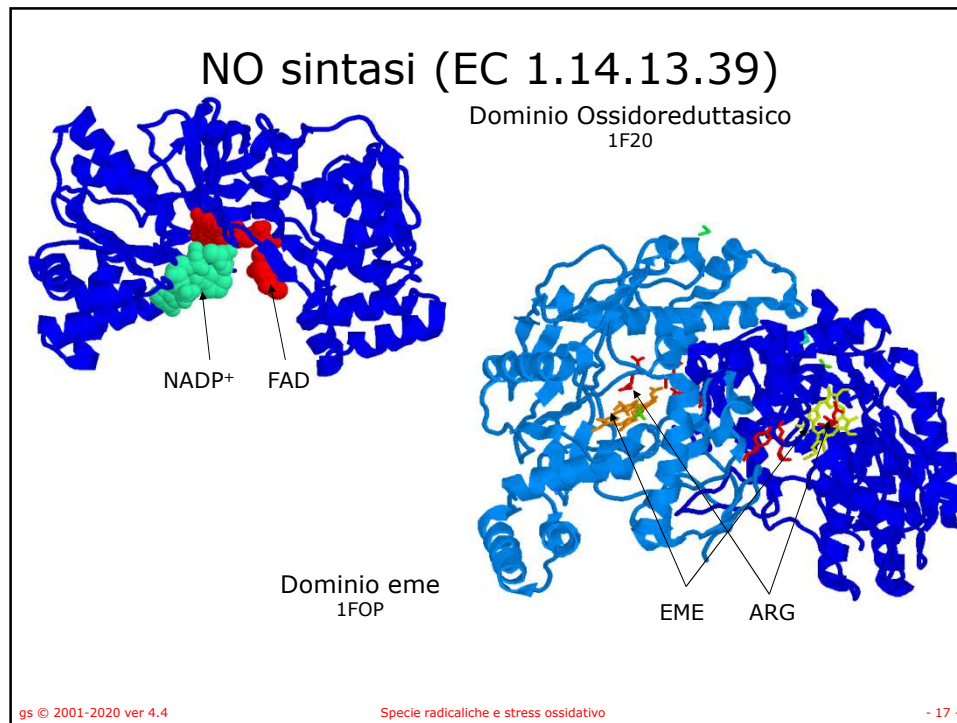


15



16





17

## Specie reattive del cloro (RCS)

- Radicali
  - $\text{Cl}^\bullet$
- Non radicaliche
  - HOCl acido ipocloroso (ROS)
  - $\text{NO}_2\text{Cl}$  cloruro di nitrile (RNS)
  - Cloramine
  - $\text{Cl}_2$  cloro

gs © 2001-2020 ver 4.4

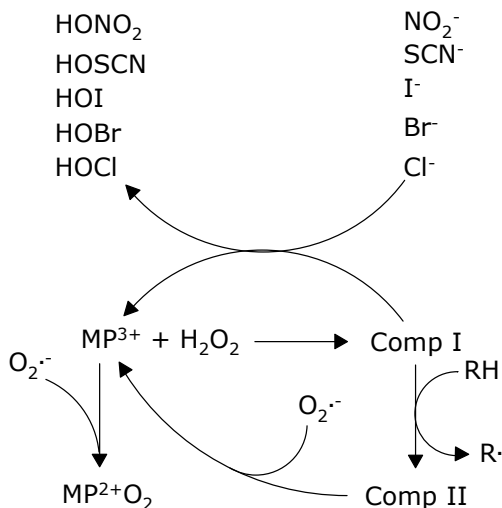
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 18 -

18

## Mieloperossidasi (EC 1.11.1.7)

- La mieloperossidasi (MP<sup>3+</sup>) è un enzima perossidasi presente nei granuli dei neutrofili.
- Si ritiene che produca HOCl nei fagosomi.
- Può usare anche altri ioni oltre il cloruro.



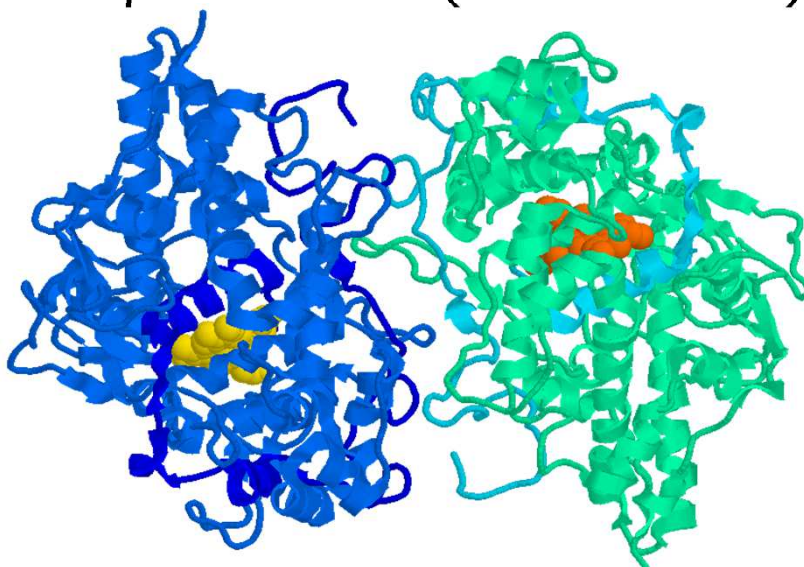
gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 19 -

19

## Mieloperossidasi (EC 1.11.1.7)



gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 20 -

20

## Stabilità dei radicali

RADICALE		TEMPO DI VITA
Radicale idrossido	$\cdot\text{OH}$	$10^{-9}$ s
Radicale alcossido	$\cdot\text{OR}$	$10^{-6}$ s
Ossigeno singoletto	$^1\text{O}_2$	$10^{-5}$ s
Anione perossinitrito	$\text{ONOO}^-$	0.05-1.0 s
Ossido di azoto	$\cdot\text{NO}$	1-10 s
Radicale perossido	$\text{ROO}\cdot$	7 s
Anione superossido	$\text{O}_2^{\cdot-}$	$10^3$ - $10^4$ s

gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 21 -

21

## Sorgenti di Radicali

- Endogene:
  - Catena respiratoria,
  - Fotosintesi,
  - Sintesi di prostaglandine,
  - Metabolismo dei nucleotidi
  - Perossisomi,
  - Autossidazione,
  - Fagocitosi,
  - Ossiemoglobina,
  - Enzimi ossidativi...
- Esogene:
  - Xenobiotici,
  - Radiazioni
    - Ionizzanti (raggi X)
    - Non ionizzanti (UV)
  - Calore,
    - Infezione,
    - Iperossia,
    - Inquinamento

gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 22 -

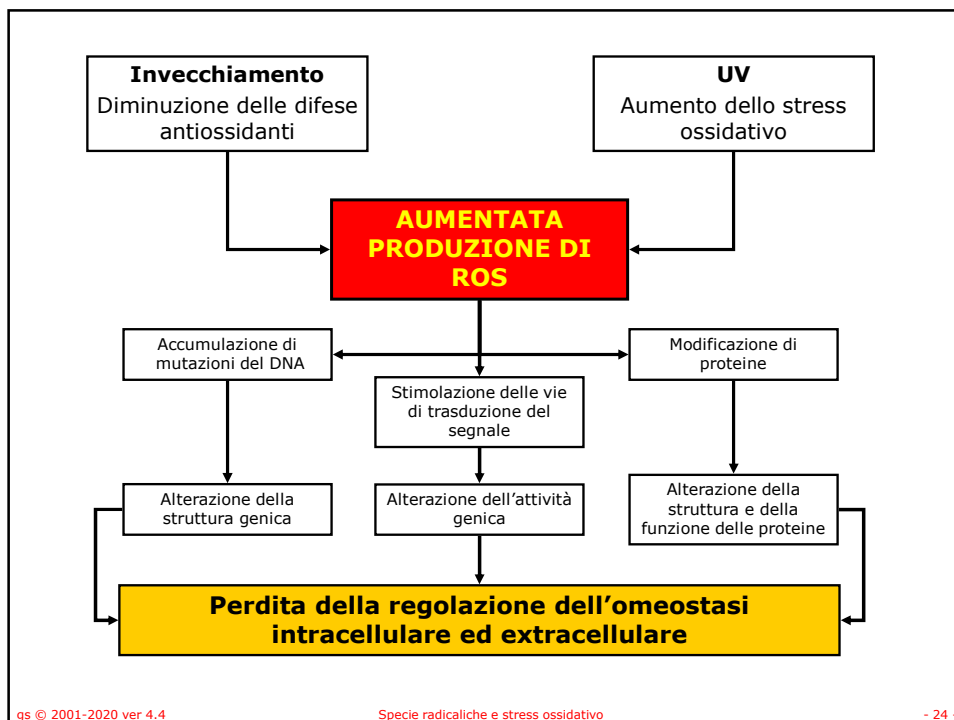
22

## Sorgenti di Radicali

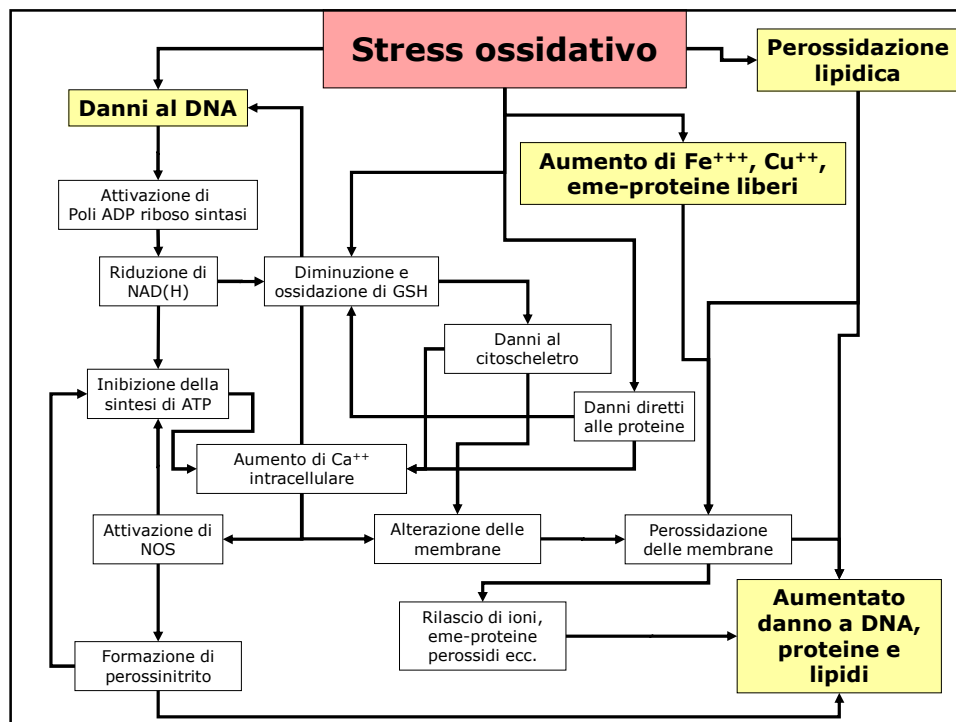
- Endogene:
  - Catena respiratoria,
  - Fotosintesi,
  - Sintesi di prostaglandine,
  - Metabolismo dei nucleotidi
  - Perossisomi,
  - Autossidazione,
  - Fagocitosi,
  - Ossiemoglobina,
  - Enzimi ossidativi...
- Esogene:
  - ❖ **Xenobiotici**,
  - Radiazioni
    - Ionizzanti (raggi X)
    - Non ionizzanti (UV)
  - Calore,
  - Infezione,
  - Iperossia,
  - ❖ **Inquinamento**

gs © 2001-2020 ver 4.4 Specie radicaliche e stress ossidativo - 23 -

23



24



25

## Danni al DNA

- Danni endogeni
  - ROS prodotti dal metabolismo, portano alla deaminazione ossidativa
- Danni esogeni da:
  - Radiazioni: UV (200-400 nm), Raggi X, Raggi  $\gamma$
  - Idrolisi e degradazione termica
  - Tossine vegetali
  - Composti mutageni di origine antropica (intercalanti)
  - Virus

gs © 2001-2020 ver 4.4 Specie radicaliche e stress ossidativo - 26 -

26

## Tipi di danno

- Ossidazione delle basi: formazione di 8-osso-7,8-diidroguanine (8-oxoG)
- Alchilazione delle basi (in genere metilazione) con formazione di 7-metilguanina, 1-metiladenina, 6-O-Metilguanina
- Idrolisi delle basi (deaminazione, depurinazione e depirimidinazione)
- Formazioni di addotti con IPA e derivati
- Formazione di cross-link tra citosine e timine adiacenti formano dimeri di pirimidina da UV
- Depurinazione da temperatura

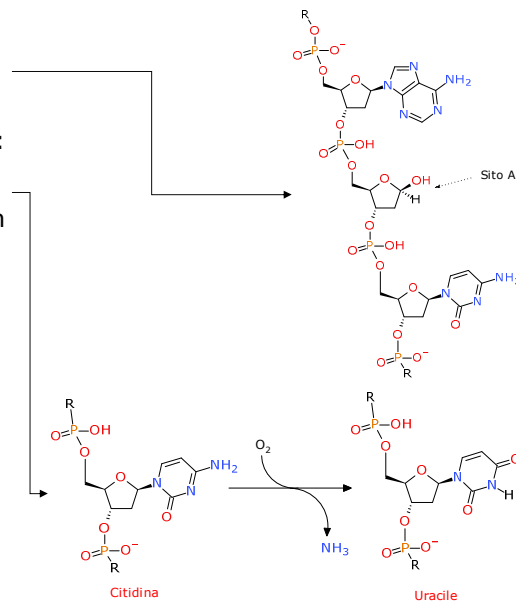
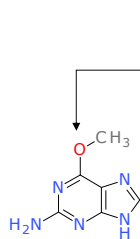
gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 27 -

27

- Perdita di basi: il legame glicosidico è labile sotto condizione fisiologiche (formazione di un sito AP).
- Deaminazione ossidativa: i gruppi amminici primari sono a volte instabili e possono venire convertiti in chetoni.
- Metilazione con formazioni di O-metilderivati



gs © 2001-2020 ver 4.4

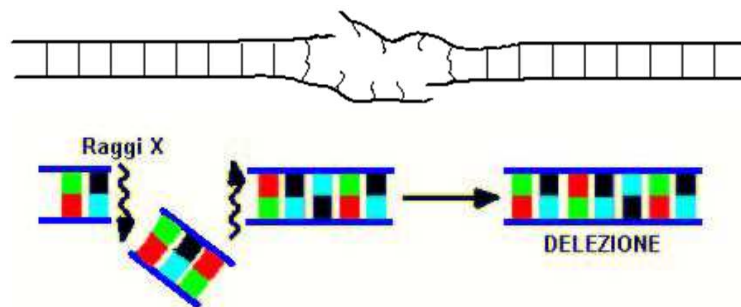
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 28 -

28

## Danni Fisici: Radiazioni Ionizzanti

- Danni diretti: *Single Strand Break*, *Double Strand Break*, *Mismatched bases*.
- Danni indiretti: produzione di ROS.



gs © 2001-2020 ver 4.4

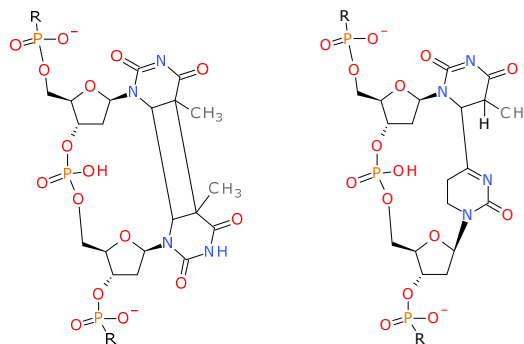
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 29 -

29

## Danni Fisici: Radiazioni UV

- Stress ossidativo: foto-carcinogenesi e foto-invecchiamento (UV-B)
- Foto-dimerizzazione: formazione di CPD e 6-4PP (UV-C).



gs © 2001-2020 ver 4.4

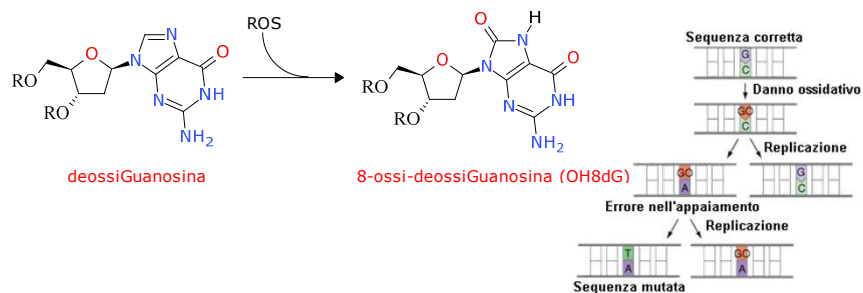
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 30 -

30

## Danni chimici: ROS

- Causano ossidazione delle basi e **amplificano** deamminazioni e depurinazioni.
  - o Un esempio di composto ossidato è OH8dG: causa trasversioni delle basi GC → TA



gs © 2001-2020 ver 4.4

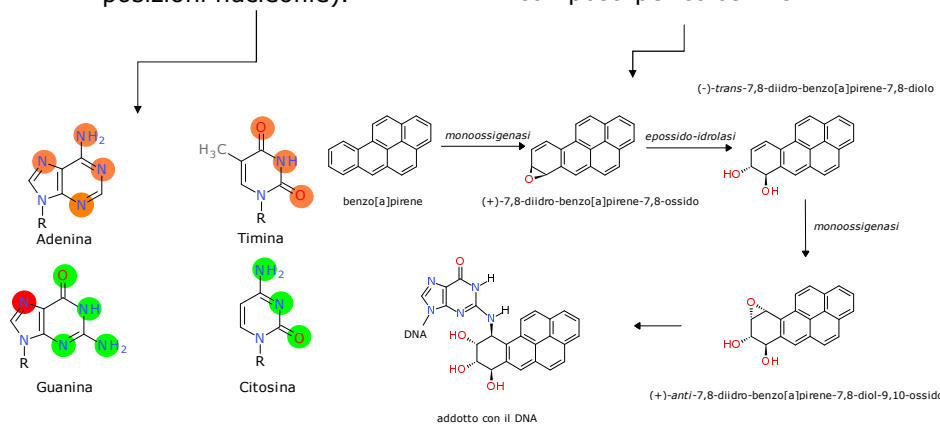
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 31 -

31

## Danni chimici: inquinanti Organici

- Genotossici: danno diretto al DNA tramite formazione di addotti (alchilanti in posizioni nucleofile).
- Epigenetici: danno indiretto al DNA attraverso stress ossidativo o l'attivazione di composti pericolosi. Es. IPA.



gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 32 -

32



## Riparazione del danno single-strand

- Enzimi di riparazione del danno Single-strand (Uracil-DNA glicosilasi EC 3.2.2.)
- Uso dell'altro strand come template
- Base excision repair (BER) rimuove il danno da alchilazione, ossidazione, idrolisi, deaminazione. La base danneggiata è rimossa da una DNA glicosilasi. La base mancante è risintetizzata da una DNA polimerasi e reinserita da una DNA ligasi
- Nucleotide excision repair (NER), riconosce distorsioni dell'elica come la formazioni di dimeri di pirimidina
- Mismatch Repair (MMR) corregge errori di replicazione e ricombinazione dovuti a errori nell'accoppiamento delle basi non danneggiate.

gs © 2001-2020 ver 4.4

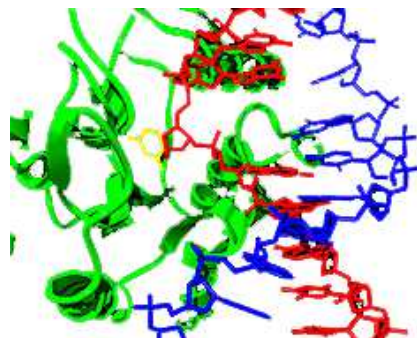
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 33 -

33

## Uracil-DNA glicosilasi (EC 3.2.2.X)

- Ripara il danno ossidativo C → U



gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 34 -

34

## Riparazione del danno double-strand

- Non-homologous end joining (NHEJ), microhomology-mediated end joining (MMEJ) e ricombinazione omologa
- L'enzima DNA ligasi ripristina il legame tra nucleotidi con la formazione di un legame estereo tra il fosfato e il nucleotide
- In NHEJ, DNA Ligasi IV, è una DNA ligasi specifica che forma un complesso con una proteina (XRCC4) che è coinvolta nelle interazioni con i promotori.

gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

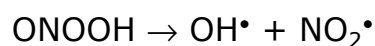
- 35 -

35

## Antiossidanti

- Gli antiossidanti non sono, in genere, dei radicali liberi. Quindi quando un antiossidante agisce si forma un radicale derivato dall'antiossidante.
- Se un radicale libero perde o guadagna un elettrone non è più un radicale libero:
 
$$\text{NO}^\bullet \rightarrow \text{e}^- + \text{NO}^+$$

$$\text{NO}^\bullet + \text{e}^- \rightarrow \text{NO}^-$$
- La reazione tra specie radicaliche porta alla perdita netta di radicali
 
$$\text{O}_2^{\bullet-} + \text{NO}^\bullet \rightarrow \text{ONOO}^-$$
- nello specifico lo ione perossinitrito può generare radicale idrossile.

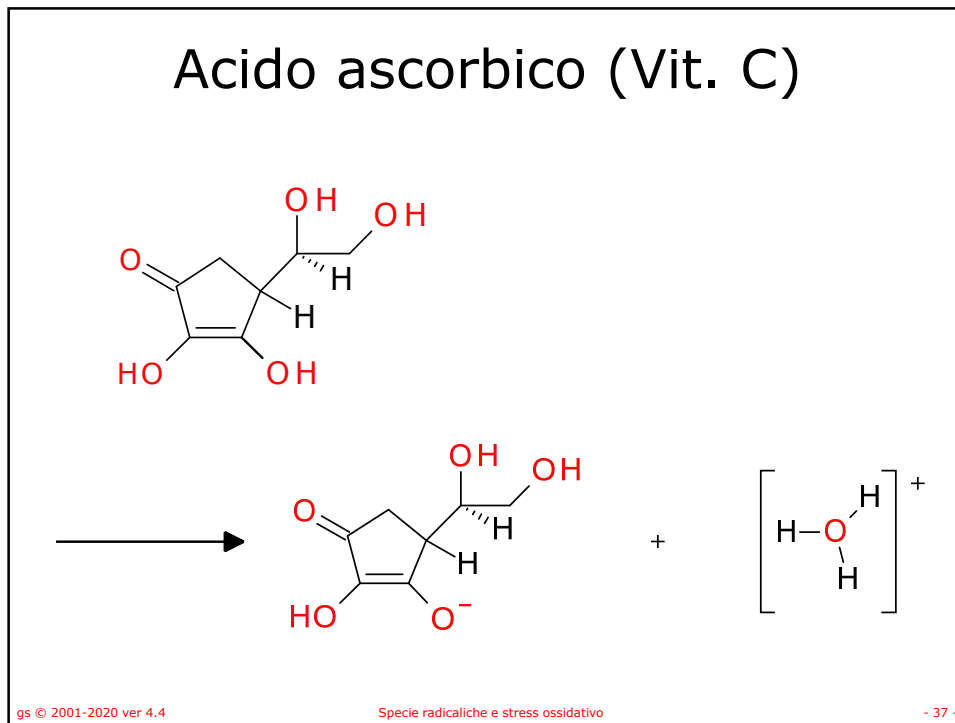


gs © 2001-2020 ver 4.4

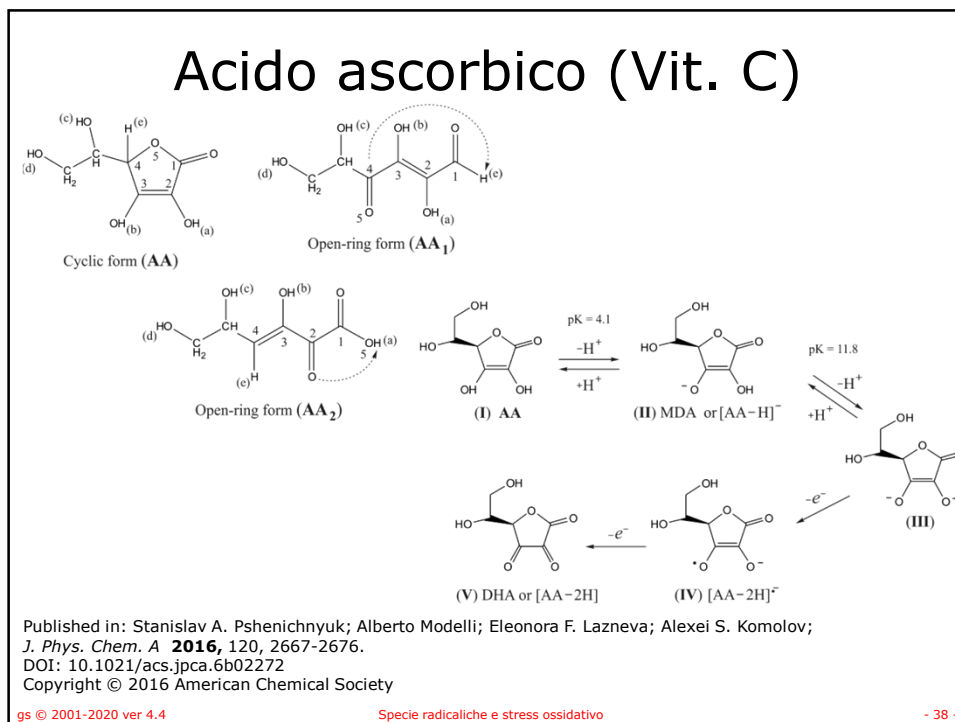
Specie radicaliche e stress ossidativo

- 36 -

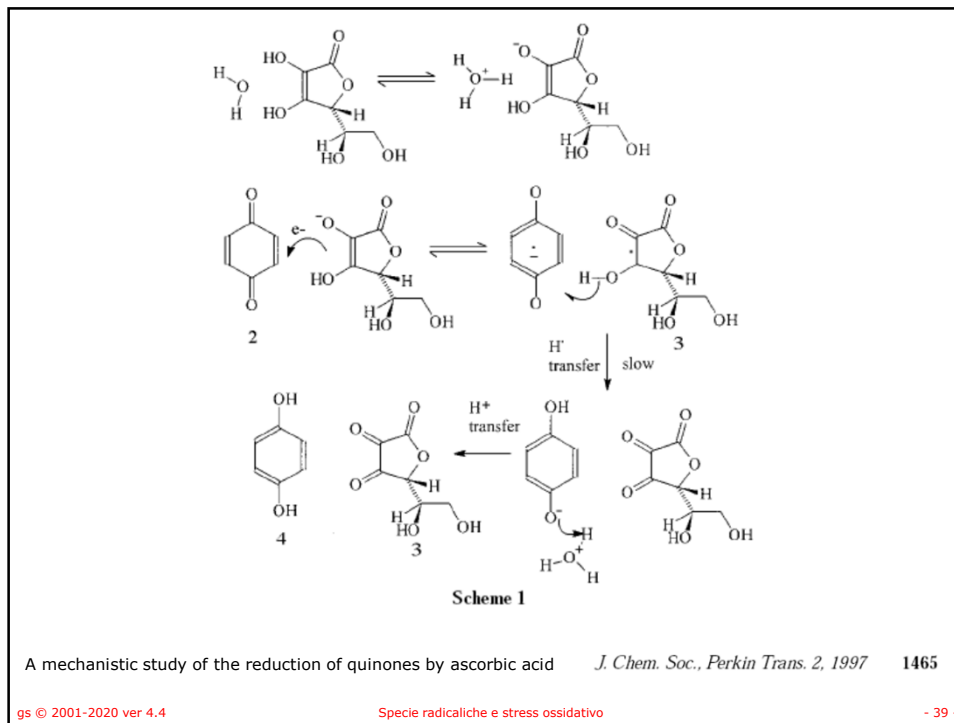
36



37



38



39

## Referenze sul WEB

- Vie metaboliche
  - KEGG: <http://www.genome.ad.jp/kegg/>
    - Degradazione degli xenobiotici: <http://www.genome.ad.jp/kegg/pathway/map/map01196.html>
- Struttura delle proteine:
  - Protein data bank (Brookhaven): <http://www.rcsb.org/pdb/>
  - Hexpasy
    - Expert Protein Analysis System: <http://us.expasy.org/sprot/>
    - Prosite (protein families and domains): <http://www.expasy.org/prosite/>
    - Enzyme (Enzyme nomenclature database): <http://www.expasy.org/enzyme/>
  - Scop (famiglie strutturali): <http://scop.berkeley.edu/>
- Enzimi:
  - Nomenclatura - IUBMB: <http://www.chem.qmw.ac.uk/iubmb/>
  - Proprietà - Brenda: <http://www.brenda.uni-koeln.de/>
  - Expsy (Enzyme nomenclature database): <http://www.expasy.org/enzyme/>
- Database di biocatalisi e biodegradazione: <http://umbdb.ahc.umn.edu/>
- Citocromo P450: <http://www.icgeb.org/~p450srv/>
- Metallotioneine: <http://www.unizh.ch/~mtpage/MT.html>
- Tossicità degli xenobiotici: Agency for Toxic Substances and Disease Registry <http://www.atsdr.cdc.gov>

gs © 2001-2020 ver 4.4

Specie radicaliche e stress ossidativo

- 40 -

40

## Crediti e autorizzazioni all'utilizzo

- Questo materiale è stato assemblato da informazioni raccolte dai seguenti testi di Biochimica:
  - CHAMPE Pamela , HARVEY Richard , FERRIER Denise R. LE BASI DELLA BIOCHIMICA [ISBN 978-8808-17030-9] - Zanichelli
  - NELSON David L. , COX Michael M. I PRINCIPI DI BIOCHIMICA DI LEHNINGER - Zanichelli
  - GARRETT Reginald H., GRISHAM Charles M. BIOCHIMICA con aspetti molecolari della Biologia cellulare - Zanichelli
  - VOET Donald , VOET Judith G , PRATT Charlotte W FONDAMENTI DI BIOCHIMICA [ISBN 978-8808-06879-8] - Zanichelli
- E dalla consultazione di svariate risorse in rete, tra le quali:
  - Kegg: Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes <http://www.genome.ad.jp/kegg/>
  - Brenda: <http://www.brenda.uni-koeln.de/>
  - Protein Data Bank: <http://www.rcsb.org/pdb/>
  - Rensselaer Polytechnic Institute: <http://www.rpi.edu/dept/bcbp/molbiochem/MBWeb/mb1/MB1index.html>
- Il materiale è stato inoltre rivisto e corretto dalla **Prof. Giancarla Orlandini** dell'Università di Parma alla quale va il mio sentito ringraziamento.

Questo ed altro materiale può essere reperito a partire da: <http://www.gsartor.org/pro>

- Il materiale di questa presentazione è di libero uso per didattica e ricerca e può essere usato senza limitazione, purché venga riconosciuto l'autore usando questa frase:

**Materiale ottenuto dal Prof. Giorgio Sartor**  
Università di Bologna

Giorgio Sartor  
Ufficiale: [giorgio\\_sartor@unibo.it](mailto:giorgio_sartor@unibo.it)  
Personale: [giorgio\\_sartor@gmail.com](mailto:giorgio_sartor@gmail.com)

Aggiornato il 13/05/2020 10:05:06