

# VÝZNAM MUTAGENEZE U BAKTERIÍ

- Vyhledání genu a stanovení jeho funkce
- praktické využití modifikovaných kmenů (biotechnologie)
- příprava vakcín
  
- **Výhody mikroorganismů při mutagenezi**
  - vysoká přirozená variabilita
  - haploidní genom (malá velikost)
  - velký počet potomstva za krátkou dobu
  - snadný přenos genů
  - snadná selekce
  
- **Způsoby mutageneze**
  - **klasická mutageneze (chemomutageny, fyzikální faktory)**
  - transpozonová mutageneze (biologické mutageny)
  - mutátorové kmeny (mutace v reparačních mechanismech)
  - mutageneze *in vitro*

# NOMENKLATURA

- **Genotyp**: třípísmenový kód (zkratka) psaný kurzívou
- **Gen** je označen zkratkou *trpA*, alely *trpA1*
  - a) **Standardní alely** se označují znaménkem +, např. *trp+*
  - b) **Mutantní alely** se označují znaménkem -, např. *trp-*
- **Fenotyp**: Velké písmeno na začátku ne kurzívou, např. Trp. Standardní fenotyp se označí +, např. Trp+, mutantní -. Symbol není vždy totožný s označením genotypu. Např. fenotyp Nif- může mít podstatu v *nifX-* nebo *nodX-* (různé geny).
- **Rezistence**: r (R), s (S), uváděné jako exponenty (**Tet<sup>R</sup>**)
  - delece =  $\Delta$
  - inserce =  $::$
  - plazmid, profág = *E. coli* (RP4,  $\phi$ 80)

TcR x TetR

# ZÁKLADNÍ TYPY MUTACÍ U BAKTÉRIÍ

- se změnou v morfologii kolonií
- se změnou citlivosti (k antibiotikům, toxickým látkám, záření, fágům aj.)
- v požadavcích na růstové faktory (auxotrofní)
- se změnou v produkci látek (např. pigmentů)
- supresorsenzitivní (citlivé k supresorům)
- supresorové (vedoucí ke vzniku supresorů)
- ovlivňující reparační a rekombinační schopnosti
- vedoucí ke vzniku mutátorových kmenů
- se změnou citlivosti k teplotě – vysoké nebo nízké (teplotně senzitivní)

**Mutace letální x kondicionálně (podmíněně) letální**

| <b>Typ mutace</b>               | <b>Podstata změny</b>   | <b>Detekce mutant</b>  |
|---------------------------------|---|--|
| <b>Ztráta pohyblivosti</b>      | <b>Ztráta bičíku, nefunkční bičík</b>   | <b>Kompaktní kolonie namísto plochých</b>                                |
| <b>Ztráta kapsuly</b>           | <b>Ztráta nebo modifikace povrchových kapsulárních struktur</b>                                 | <b>Malé drsné kolonie namísto velkých a hladkých kolonií</b>             |
| <b>Drsné kolonie</b>            | <b>Ztráta nebo změna lipopolysacharidové vnější vrstvy</b>                                      | <b>Nepravidelné granulární kolonie namísto hladkých lesklých kolonií</b> |
| <b>Změna ve výživě</b>          | <b>Ztráta enzymu biosyntetické dráhy</b>  | <b>Neschopnost růstu na mediu postrádajícím daný růstový faktor</b>      |
| <b>Zkvašování cukrů</b>         | <b>Ztráta enzymu katabolické dráhy</b>  | <b>Nedochází ke změně barvy v mediu obsahujícím cukr a pH indikátor</b>  |
| <b>Rezistence k antibiotiku</b> | <b>Zábrana vstupu do buňky, změna cílové molekuly (složky ribozomu), detoxikace antibiotika</b> | <b>Růst na mediu obsahujícím inhibiční koncentraci antibiotika</b>       |
| <b>Rezistence k fágu</b>        | <b>Ztráta receptoru</b>   | <b>Růst v přítomnosti fága</b>   |
| <b>Citlivost k teplotě</b>      | <b>Změna struktury esenciálního proteinu</b>  | <b>Neschopnost růstu při zvýšené teplotě</b>                             |
| <b>Citlivost k chladu</b>       | <b>Změna struktury esenciálního proteinu</b>  | <b>Neschopnost růstu při nízké teplotě</b>                               |

Table 16. Genotypes of Frequently Used Bacterial Strains.

| Strain          | Genotype   |
|-----------------|--|
| C600 (1)        | F <sup>-</sup> , <i>thi-1</i> , <i>thr-1</i> , <i>leuB6</i> , <i>lacY1</i> , <i>tonA21</i> , <i>supE44</i> , λ <sup>-</sup>  |
| C600Hfl (1)     | F <sup>-</sup> , <i>thi-1</i> , <i>thr-1</i> , <i>leuB6</i> , <i>lacY1</i> , <i>tonA21</i> , <i>supE44</i> , λ <sup>-</sup> , <i>hflA150</i> , [ <i>chr:Tn10</i> ]   |
| DH1 (2)         | F <sup>-</sup> , <i>recA1</i> , <i>endA1</i> , <i>gyrA96</i> , <i>thi-1</i> , <i>hsdR17</i> ( <i>r<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>K</sub></i> <sup>+</sup> ), <i>supE44</i> , <i>relA1</i> <sup>-</sup> , λ <sup>-</sup>  |
| DH5α            | F <sup>-</sup> , φ80d, <i>lacZΔM15</i> , <i>endA1</i> , <i>recA1</i> , <i>hsdR17</i> ( <i>r<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>K</sub></i> <sup>+</sup> ), <i>supE44</i> , <i>thi-1</i> , <i>d</i> <sup>-</sup> , <i>gyrA96</i> , Δ( <i>lacZYA-argF</i> ), U169                           |
| DH5αF'          | φ80d, <i>lacZΔM15</i> , <i>endA1</i> , <i>recA1</i> , <i>hsdR17</i> ( <i>r<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> ), <i>supE44</i> , <i>thi-1</i> , <i>d</i> <sup>-</sup> , <i>gyrA96</i> , Δ( <i>lacZYA-argF</i> ), U169  |
| HB101 (3)       | F <sup>-</sup> , <i>hsdS20</i> ( <i>r<sub>S</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>S</sub></i> <sup>-</sup> ), <i>supE44</i> , <i>recA13</i> , <i>ara14</i> , <i>proA2</i> , <i>rpsL20</i> ( <i>str</i> <sup>+</sup> ), <i>xyl-5</i> , <i>mlt-5</i> , <i>supE44</i> , λ <sup>-</sup>                |
| JM83 (4)        | <i>ara</i> , Δ( <i>lac-proAB</i> ), <i>rpsL</i> , φ80, <i>lacZΔM15</i>   |
| JM101 (4)       | <i>thi</i> , Δ( <i>lac-proAB</i> ), [F', <i>traD36</i> , <i>proAB</i> , <i>lacI</i> <sup>°</sup> ZΔM15]  |
| JM103 (2)       | <i>endA1</i> , <i>hsdR</i> , <i>supE</i> , <i>sbcb15</i> , <i>thi-1</i> , <i>strA</i> , Δ( <i>lac-pro</i> ), [F', <i>traD36</i> , <i>proAB</i> , <i>lacI</i> <sup>°</sup> ZΔM15]   |
| JM105 (4)       | <i>endA1</i> , <i>thi</i> , <i>rpsL</i> , <i>sbcb15</i> , <i>hsdR4</i> , Δ( <i>lac-pro</i> ), [F', <i>traD36</i> , <i>proAB</i> , <i>lacI</i> <sup>°</sup> ZΔM15]  |
| JM107 (4)       | <i>endA1</i> , <i>thi</i> , <i>syrA96</i> , <i>hsd17</i> , λ <sup>-</sup> , <i>relA1</i> , <i>supE44</i> , Δ( <i>lac-pro</i> ), [F', <i>traD36</i> , <i>proAB</i> , <i>lacI</i> <sup>°</sup> ZΔM15]  |
| JM108 (4)       | <i>endA1</i> , <i>recA1</i> , <i>syrA96</i> , <i>thi</i> , <i>hsdR17</i> , <i>relA1</i> , <i>supE44</i> , Δ( <i>lac-pro</i> )  |
| JM109 (4)       | <i>endA1</i> , <i>recA1</i> , <i>syrA96</i> , <i>thi</i> , <i>hsdR17</i> ( <i>r<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>K</sub></i> <sup>+</sup> ), <i>relA1</i> , <i>supE44</i> , λ <sup>-</sup> , Δ( <i>lac-proAB</i> ), [F', <i>traD36</i> , <i>proAB</i> , <i>lacI</i> <sup>°</sup> ZΔM15] |
| JM109 (DE3) (4) | <i>endA1</i> , <i>recA1</i> , <i>syrA96</i> , <i>thi</i> , <i>hsdR17</i> ( <i>r<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>K</sub></i> <sup>+</sup> ), <i>relA1</i> , <i>supE44</i> , Δ( <i>lac-proAB</i> ), [F', <i>traD36</i> , <i>proAB</i> , <i>lacI</i> <sup>°</sup> ZΔM15], λ(DE3)          |
| JM110 (4)       | <i>rpsL</i> , <i>thr</i> , <i>leu</i> , <i>thi</i> , <i>lacY</i> , <i>galK</i> , <i>galT</i> , <i>ara</i> , <i>tonA</i> , <i>tsx</i> , <i>dam</i> , <i>dcm</i> , <i>supE44</i> , Δ( <i>lac-proAB</i> ), [F', <i>traD36</i> , <i>proAB</i> , <i>lacI</i> <sup>°</sup> ZΔM15]                    |
| LE392 (5)       | F <sup>-</sup> , <i>hsdR574</i> ( <i>r<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>K</sub></i> <sup>+</sup> ), <i>supE44</i> , <i>supF58</i> , <i>lacY1</i> , or Δ( <i>lac1ZY</i> )6, <i>galK2</i> , <i>galT22</i> , <i>metB1</i> , <i>trpR55</i> , λ <sup>-</sup>                                 |

| Strain    | Genotype   |
|-----------|--|
| KW251     | F <sup>-</sup> , <i>supE44</i> , <i>galK2</i> , <i>galT22</i> , <i>metB1</i> , <i>hsdR2</i> , <i>mcrB1</i> , <i>mcrA</i> <sup>-</sup> , <i>argA81</i> : Tn10, <i>recD1014</i>  |
| NM522 (6) | <i>supE</i> , <i>thi</i> , Δ( <i>lac-proAB</i> ), Δ <i>hsd5</i> ( <i>r</i> <sup>-</sup> , <i>m</i> <sup>-</sup> ), [F', <i>proAB</i> , <i>lacI</i> <sup>°</sup> ZΔM15]   |
| NM538 (7) | <i>supF</i> , <i>hsdR</i> ( <i>r<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>K</sub></i> <sup>+</sup> )  |
| NM539 (7) | <i>supF</i> , <i>hsdR</i> ( <i>r<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>K</sub></i> <sup>+</sup> ) (P2)   |
| RR1 (3)   | F <sup>-</sup> , <i>hsdS20</i> ( <i>r<sub>S</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>S</sub></i> <sup>-</sup> ), <i>supE44</i> , <i>ara14</i> , <i>proA2</i> , <i>rpsL20</i> ( <i>str</i> ), <i>xyl-5</i> , <i>mlt-5</i> , <i>supE44</i> , λ <sup>-</sup>   |
| X1776 (3) | F <sup>-</sup> , <i>tonA53</i> , <i>dapD8</i> , <i>minA1</i> , <i>glnV44</i> , ( <i>supE44</i> ), Δ( <i>gal-uvrB</i> ) 40, λ <sup>-</sup> , <i>min82</i> , <i>rfb-2</i> , <i>gyrA25</i> , <i>thyA142</i> , <i>oms-2</i> , <i>metC65</i> , <i>oms-1</i> , ( <i>tte-1</i> ), Δ( <i>bioH-asd</i> ) 29, <i>cyc82</i> , <i>cycA1</i> , <i>hsdA2</i> |
| Y1088 (8) | Δ( <i>lacU169</i> ), <i>supE</i> , <i>supF</i> , <i>hsdR</i> ( <i>r</i> <sup>-</sup> , <i>m</i> <sup>+</sup> ), <i>metB</i> , <i>troR</i> , <i>tonA21</i> , <i>proC</i> :Tn5 (pMC9)  |
| Y1089 (8) | Δ( <i>lacU169</i> ), <i>proA</i> <sup>+</sup> , Δ( <i>lon</i> ), <i>araD139</i> , <i>strA</i> , <i>hflA150</i> [ <i>chr</i> :Tn10], (pMC9)   |
| Y1090 (8) | Δ( <i>lacU169</i> ), <i>proA</i> <sup>+</sup> , Δ( <i>lon</i> ), <i>araD139</i> , <i>strA</i> , <i>supF</i> , [ <i>trpC22</i> :Tn10], (pMC9), ( <i>r<sub>K</sub></i> <sup>-</sup> , <i>m<sub>K</sub></i> <sup>+</sup> )  |

References:

- Jendrisak, J., Young, R.A., and Engel, J. (1987) in: *Guide to Molecular Cloning Techniques*, Eds. Berger, S. and Kimmel, A., Academic Press, 359-371.
- Hanahan, D. (1983) *J. Mol. Biol.* **F126B166**, 557-580.
- Maniatis, T., Fritsch, E.F., and Sambrook, J. (1982) in: *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*, Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor, NY.
- Yanisch-Perron, C., Viera, J., and Messing, J. (1985) *Gene* **33**, 103-119.
- Murray, N. (1977) *Mol. Gen. Genet.* **150**, 53-58.
- Gough, J. and Murray, N. (1983) *J. Mol. Biol.* **166**, 1-19.
- Frischauf, A., et al. (1983) *J. Mol. Biol.* **170**, 827-842.
- Huynh, T., Young, R.A., and Davis, R. (1985) in: *DNA Cloning Volume 1*, Eds. Glover, D., IRL Press Ltd, 56-110.

## Důležité genotypy:

- auxotrofie
- suprese
- restrikce
- lacZ
- přítomnost plazmidů
- přítomnost profágů
- přítomnost Tn a IS
- reparace
- rekombinace
- rezistence k fágům

**Table 15. Descriptions of Common Host Mutations.**

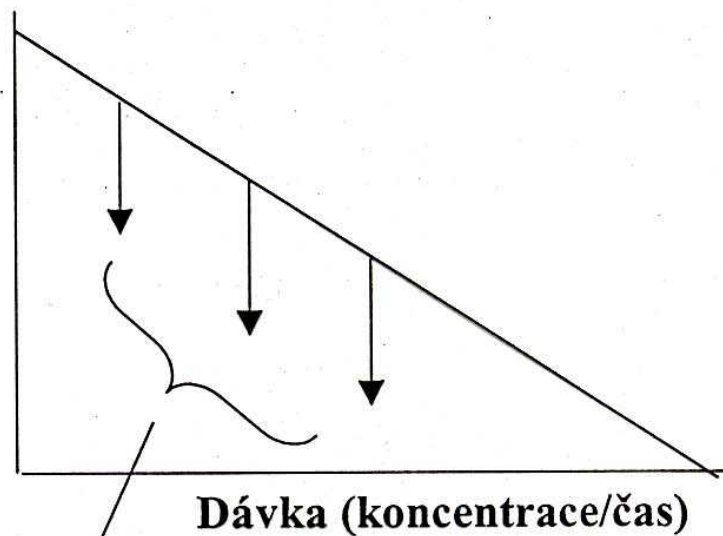
| Gene symbol    | Mnemonic        | Phenotypic trait affected  | Gene symbol  | Mnemonic   | Phenotypic trait affected  |
|----------------|-----------------|--|--|--|--|
| <i>araA</i>    | Arabinose       | L-Arabinose isomerase  | <i>recA</i>  | Recombination  | general recombination, repair of radiation damage and induction of phage lambda              |
| <i>araC</i>    | Arabinose       | regulatory gene: activator and repressor protein   | <i>recB</i> and <i>recC</i>  | Recombination  | recombination and repair of radiation damage exonucleaseV subunit                            |
| <i>dapD</i>    | Diaminopimelate | Succinyl-diaminopimelate aminotransferase  | <i>recE</i>  | Recombination  | locus of rac prophage exonuclease VIII   |
| <i>endA</i>    |                 | DNA specific endonuclease  | <i>recF</i>  | Recombination  | recombination and repair of radiation damage   |
| <i>galK</i>    | Galactose       | galactokinase  | <i>relA</i>  | Relaxed  | regulation of RNA synthesis: stringent factor, ATP:GTP 3' pyrophosphotransferase             |
| <i>galU</i>    | Galactose       | Glucose-1-phosphate uridylyltransferase  | <i>rpsL</i>  | Ribosomal protein, small   | 30S ribosomal subunit protein S12  |
| <i>gyrA</i>    | Gyrase          | subunit A, resistance or sensitivity to nalidixic acid   | <i>supB, supC, supG, supL, supM, supN, and supO</i>  | Suppressor   | suppressors of ochre (UAA) and amber (UAG) mutations   |
| <i>Hfl</i> (1) |                 | $\lambda$ phages with a normal repressor ( <i>cl</i> ) gene are inhibited from the lytic cycle. The lysogeny frequency is greatly enhanced | <i>supD, supE, and supF</i>  | Suppressor   | supressor of amber mutations   |
| <i>hisS</i>    | Histidine       | Histidyl-tRNA synthetase   | <i>thiA</i>  | Thiamine   | Thiamine thiazole requirement  |
| <i>lacI</i>    | Lactose         | regulator gene; repressor protein of <i>lac</i> operon   | <i>tonA</i>  | T-one  | outer membrane protein receptor for ferrichrome, colicin M, and phages T1, T5, and $\phi$ 80 |
| <i>lacY</i>    | Lactose         | galactoside permease   | <i>tonB</i>  | T-one  | uptake of chelated iron and cyanobalamin   |
| <i>lacZ</i>    | Lactose         | $\beta$ -D-galactosidase   | <i>xylA</i>  | Xylose   | D-xylose isomerase   |
| <i>leuA</i>    | Leucine         | $\alpha$ -Isopropylmalate synthase   | Miscellaneous  |  |  |
| <i>leuB</i>    | Leucine         | $\beta$ -Isopropylmalate dehydrogenase   | F <sup>-</sup>   | host does not contain an episome   |  |
| <i>metA</i>    | Methionine      | homoserine transsuccinylase  | F <sup>'</sup>   | host contains episome with stated features                               |  |
| <i>metB</i>    | Methionine      | cystathionine $\alpha$ -synthase   | $\lambda$ <sup>-</sup>   | bacteriophage lambda DNA is not integrated into genome of bacterial host |  |
| <i>mtlA</i>    | Mannitol        | Mannitol-specific enzyme II of phosphotransferase system   | <b>References:</b>   |  |  |
| P2 (2)         |                 | $\lambda$ phages containing the <i>red</i> and <i>gam</i> genes of $\lambda$ are growth inhibited by P2 lysogens                           | 1. Hoyt, A., (1982) <i>Cell</i> <b>31</b> , 565-569.   |  |  |
| <i>proA</i>    | Proline         | $\alpha$ -glutamyl phosphate reductase   | 2. Kaiser, K. and Murray, N. in <i>DNA Cloning</i> Vol. 1, Eds. Glover, D., IRL Press Ltd. 1-47. |  |  |
| <i>proB</i>    | Proline         | $\alpha$ -glutamyl kinase  |  |  |  |

Table IIIA. Mutagens Used for Bacteria

| Mutagen   | Apparent <i>in vivo</i> specificity  | Additional advantages   | Disadvantages   |
|---|--|---|---|
| 2-AP<br>(2-aminopurine)                           | transitions A:T $\rightleftharpoons$ G:C   |   | in some cases a weak mutagen  |
| 5-BU<br>(5-bromouracil)                           | transitions A:T $\rightleftharpoons$ G:C   |   | must depress normal thymine incorporation; weak mutagen                             |
| NH <sub>2</sub> OH<br>(hydroxylamine)             | transitions A:T $\rightleftharpoons$ G:C   |   | in some cases a weak mutagen  |
| Sodium bisulfite                                  | specific transition<br>G:C $\rightarrow$ A:T   |   | weak mutagen  |
| Mutator gene<br>( <i>mutT</i> )                   | specific transversion<br>A:T $\rightarrow$ C:G   | no treatment required   | genetic construction required   |
| EMS<br>(ethylmethane sulfonate)                   | transitions and transversions  | powerful mutagen  | dangerous to handle   |
| NG<br>(nitrosoguanidine)                          | transitions and transversions; induces small deletions at low rate   | very powerful mutagen   | dangerous to handle; frequent secondary mutations                                   |
| ICR 191   | frameshifts; small insertions and deletions  | powerful mutagen  | compound difficult to obtain  |
| Nitrous acid                                      | transitions and probably transversions; deletions  |   | high amount of killing required for good mutagenesis                                |
| UV (ultraviolet radiation)                        | transitions and probably transversions; deletions; possibly stimulates insertions and chromosomal rearrangements |   | high amount of killing required for good mutagenesis; certain strains too sensitive |
| Mu-1 phage<br><i>a datsi</i><br><i>transposon</i> | insertions; some deletions   | random induction of non-leaky, polar, non-reverting mutations           |   |
| Spontaneous<br>(no mutagen)                       | transitions; transversions; insertions; deletions (frameshifts)  | wide spectrum of mutations; no complications due to secondary mutations | low level of mutants; many siblings in each culture                                 |

## Stanovení křivky přežití bakteriálních buněk po působení mutagenu

Počet  
buněk



Stanovení počtu mutant v jednotlivých intervalech působení mutagenu



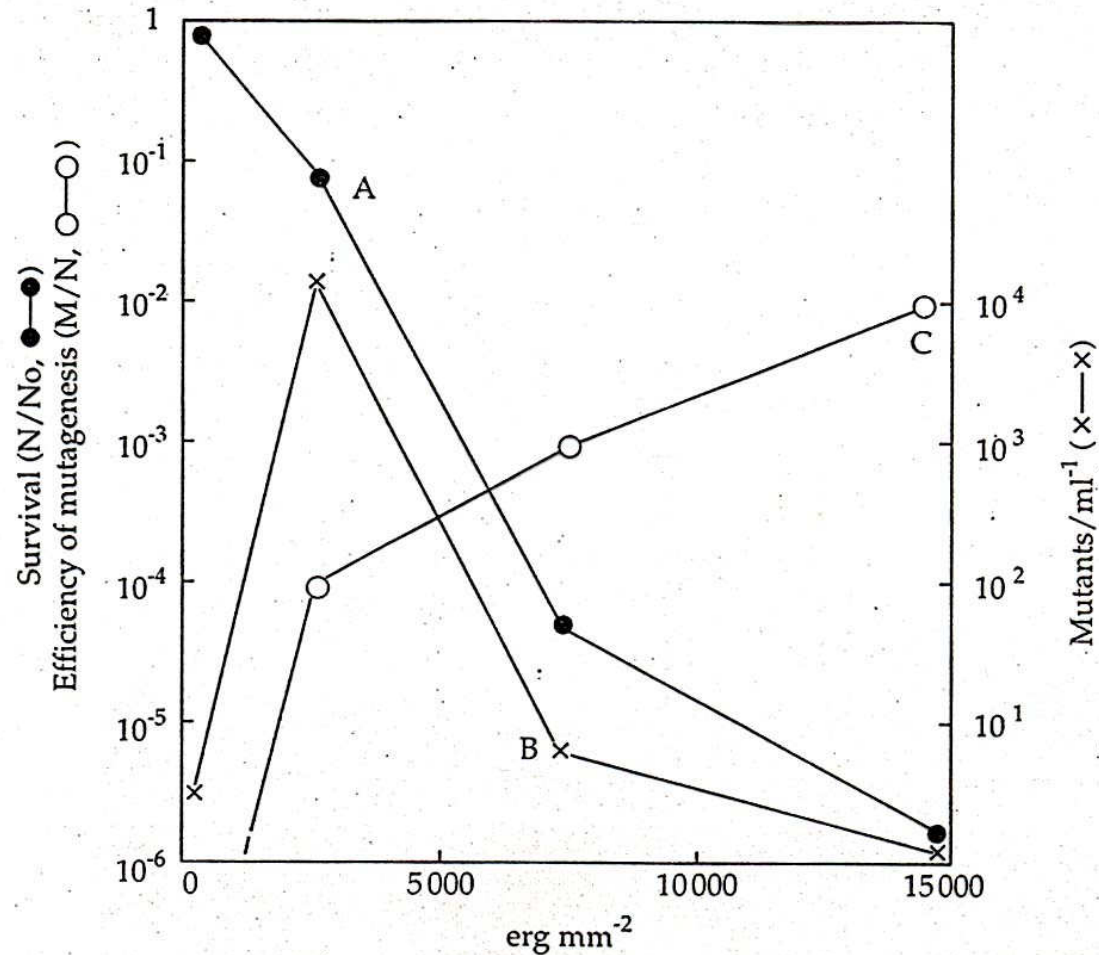
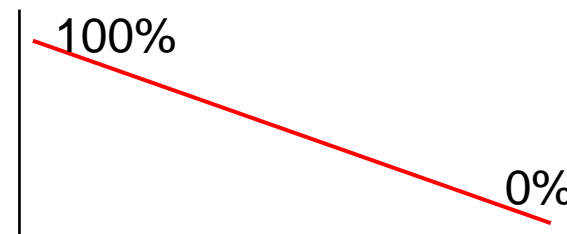
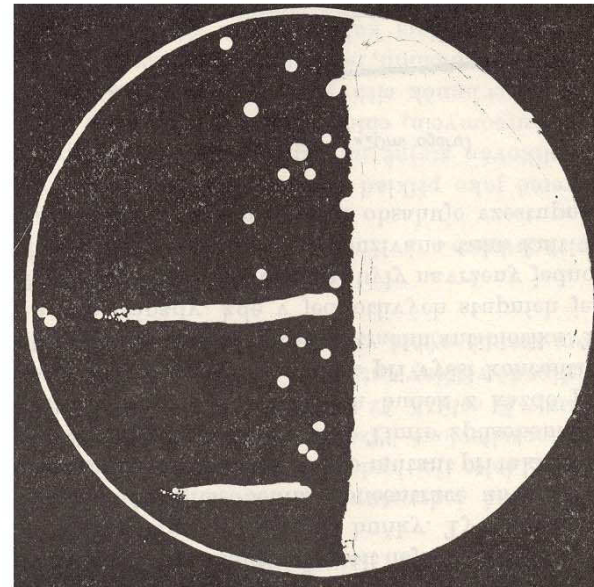
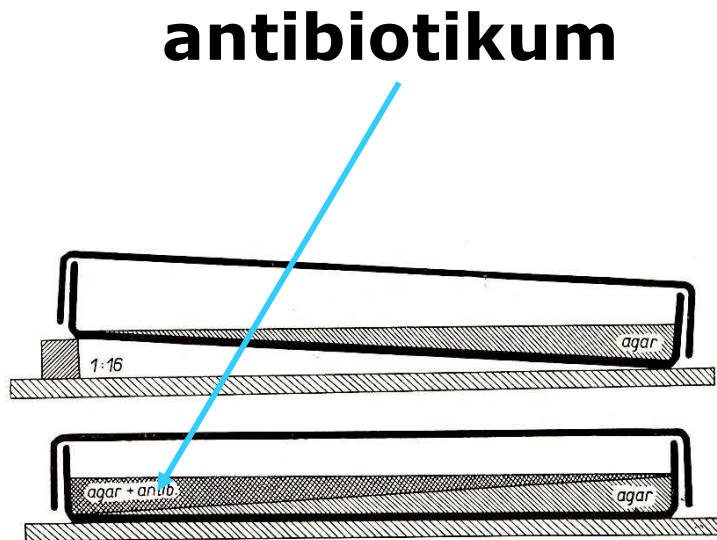


Fig. 7.5 A dose-response curve after treatment by a mutagen. A suspension of the cyanobacterium *Synechocystis* PCC6714 was irradiated with UV light for increasing doses (i.e. increasing lengths of time). Aliquots were then plated on normal medium (measure of survival, curve A) and on the same medium complemented with pF-phenylalanine, a toxic analogue of phenylalanine, to determine the induction of pF-phenylalanine resistant mutants. These are expressed as their concentration (/unit volume) in each sample (curve B) and in proportion of total viable cells in each sample (curve C). (After Astier *et al.*, 1979) N, N<sub>0</sub> = viable cells; M = mutants.

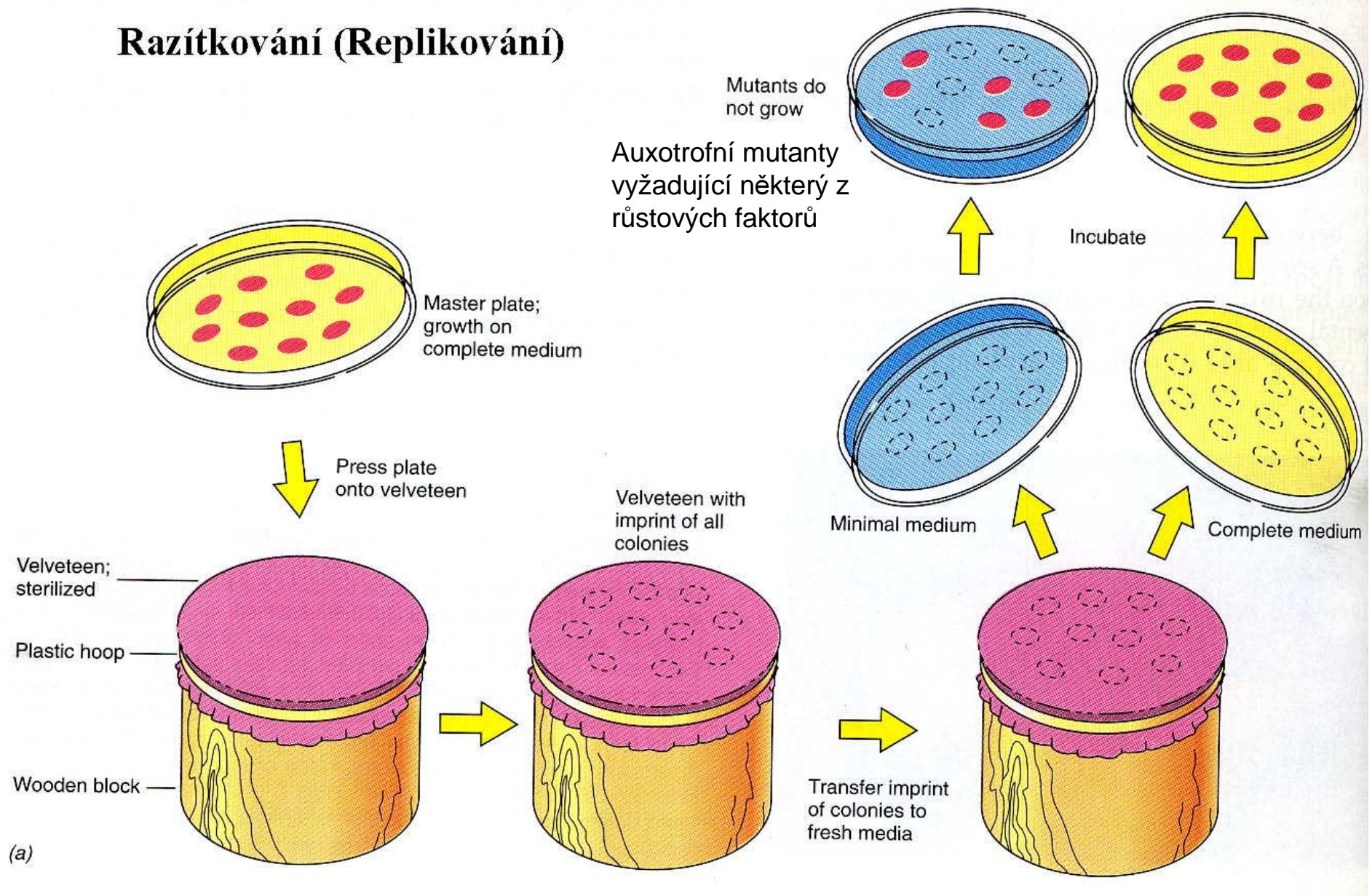
# POSTUPY PŘI IZOLACI MUTANT

- **Skríning** (vyhledání mutant na základě pozorovatelné změny fenotypu: Růst na indikátorových mediích (utilizace cukrů – tvorba kyselin - změna pH – změna barvy) – podobně jako při odlišování druhů)
- **Obohacování** (zvyšování počtu mutant)
  - penicilinová metoda.
  - inkorporace radioaktivního prekursoru (radioaktivní sebevražda)
  - 5-BU + UV
- **Selekce** (růst za podmínek, při nichž roste jen mutanta, buňky standardního typu nepřežívají nebo nerostou /**pozitivní (přímá) selekce**/, nebo nerostou mutanty, ale buňky standardního typu ano /**negativní (nepřímá) selekce**/ - např. rezistence/citlivost k vnějším faktorům)
- **Replikování (razítkování)** (přenos kolonií na medium s odlišným složením: chybění živin n. růstových faktorů, přítomnost inhibitorů růstu (aminokyseliny, antibiotika, bakteriofágy, aj))

# IZOLACE MUTANT REZISTENTNÍCH K ANTIBIOTIKU NA GRADIENTNÍCH PLOTNÁCH



# Razítkování (Replikování)

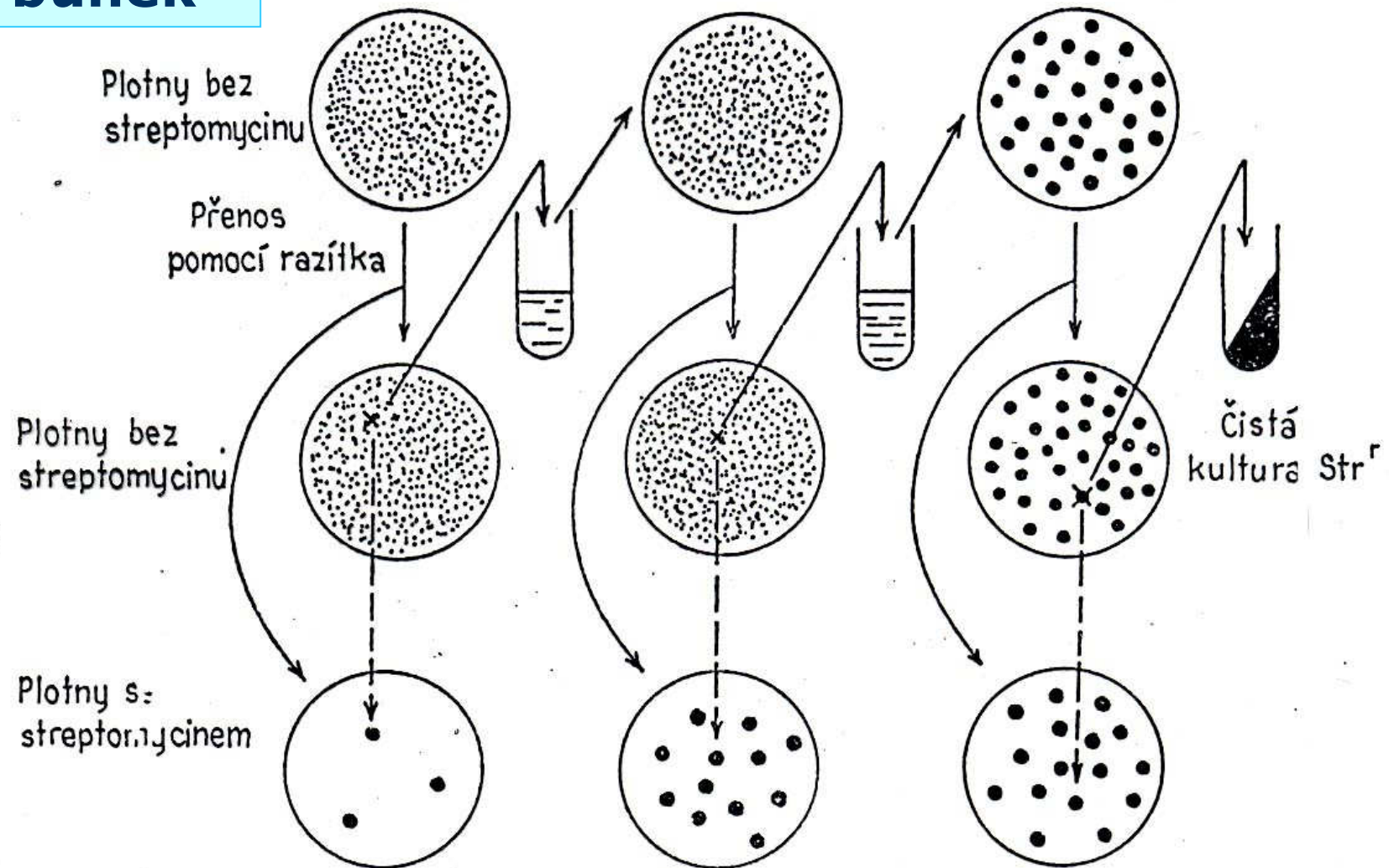


Počet  
buněk

$10^8$

$10^5$

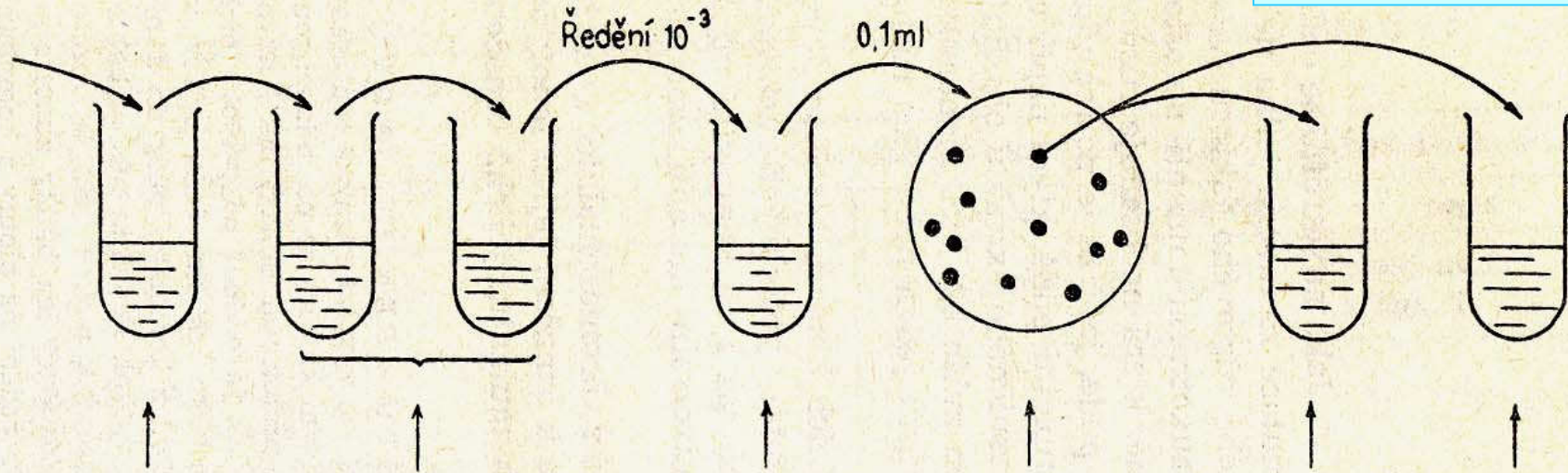
$10^2$



Obr. 293. Schéma postupu při nepřímé selekci mutantů razítkovou metodou.

# Izolace auxotrofních mutant penicilínovou metodou

auxanografie



Ozářená suspenze buněk prototrofního kmene se kultivuje v kompletní půdě 24 hodin.

Buňky vyrostlé v kompletní půdě se několikrát promyjí ve fyziologickém roztoku.

Zředěné inokulum promytých buněk se naočkuje do minimální půdy, která obsahuje 100 až 300mj. penicilinu v 1ml. V této půdě přežijí jen auxotrofní mutanti.

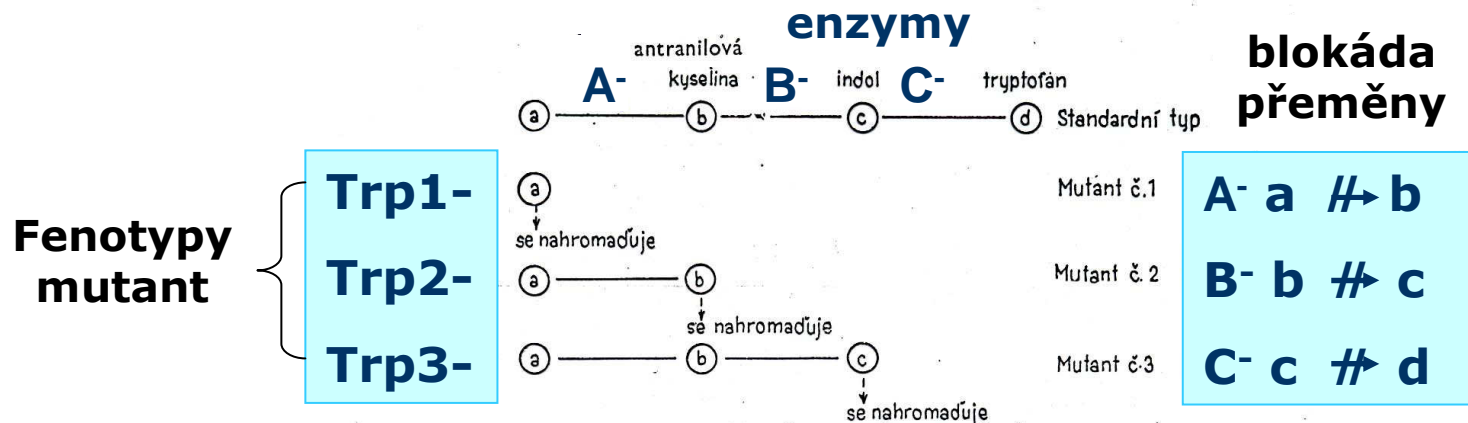
Z minimální půdy se provede rozsev na plotnu z kompletní půdy.

Kompletní půda      Minimální půda

Tatáž kolonie se naočkuje do kompletní i minimální půdy. Jestliže vyroste jen v kompletní půdě, znamená to, že představuje klon auxotrofního mutantu. Dalšími testy se zjistí, za přítomnosti které aminokyseliny roste na minimální půdě.

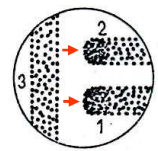
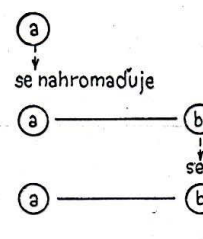
**Prototrofy rostou a tudíž hynou, auxotrofní mutanty nerostou a přežívají (negativní selekce)**

# SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ POSTUPU PŘI STANOVENÍ NÁSLEDNOSTI REAKCÍ PŘI BIOSYNTÉZE AMINOKYSELIN POMOCÍ AUXOTROFNÍCH MUTANT

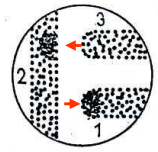


Fenotypy mutant

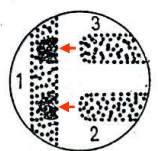
**Trp1-**  
**Trp2-**  
**Trp3-**



Mutanti skupiny č.3 stimuluji v růstu mutanty skupiny č.1 a 2. To znamená, že mutant č.3 syntetizuje produkt, který k růstu vyžadují mutanti skupiny č.1 a 2. Z toho je zřejmé, že u mutantů skupiny č.1 a 2 je mutací zastaven některý ze stupňů biosyntézy tryptofánu, který předchází stupni, který je zastaven u mutantů skupiny č.3.

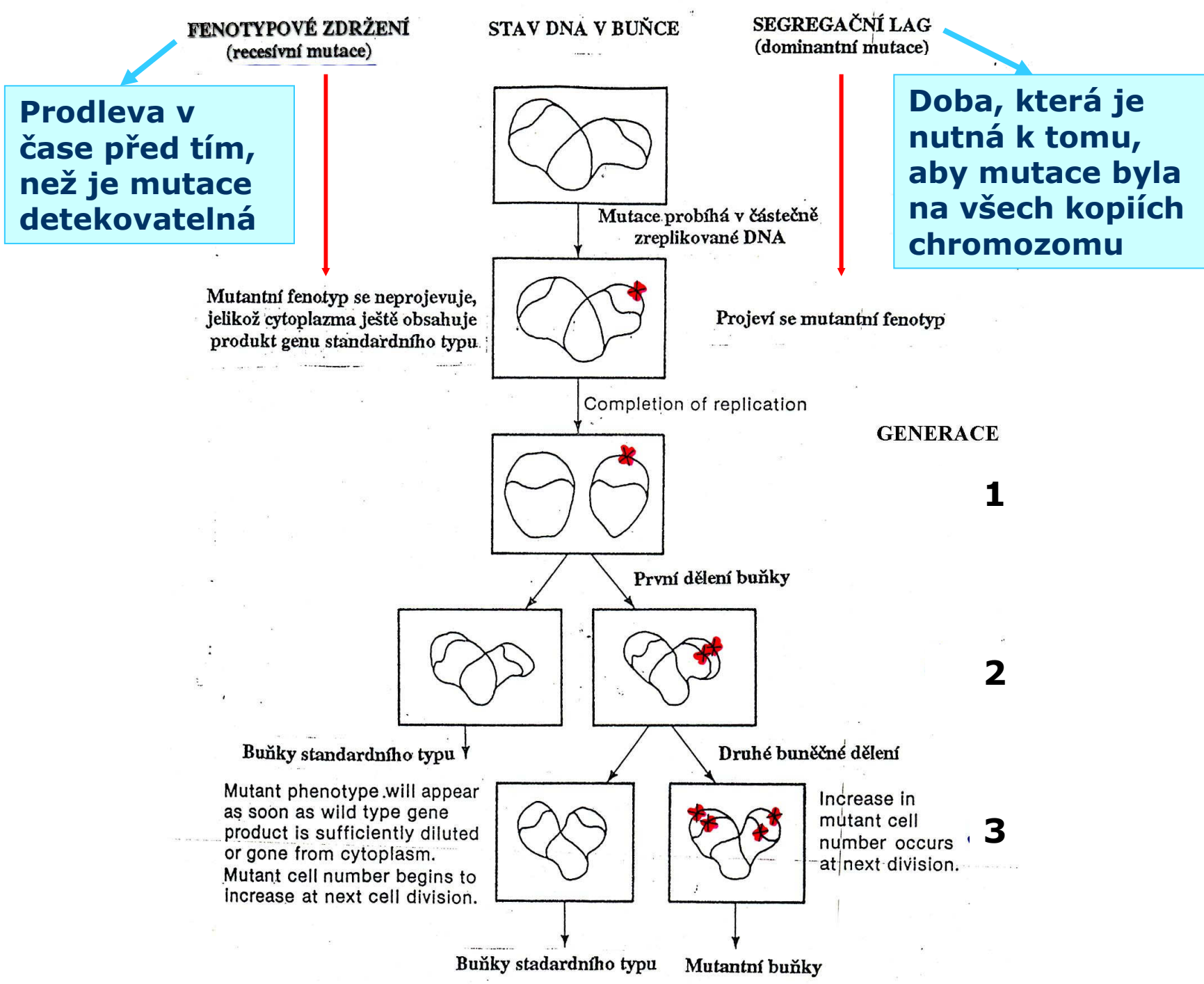


Tento test ukazuje, že mutanti skupiny č.1 jsou stimováni mutanty skupiny č.2 a tito opět mutanty skupiny č.3. To znamená, že u mutantů skupiny č.1 je zastaven některý z prvních stupňů biosyntézy tryptofánu, po kterém následuje stupeň reprezentovaný mutanty skupiny č.2 a pak skupiny č.3.



Tento test dokazuje, že mutanti skupin č.2 a 3 syntetizují meziproducty tryptofánu potřebné k růstu mutantů skupiny č.1.

Lze tedy uzavřít, že mutanti skupiny č.1 potřebují k růstu meziproduct syntetizovaný mutanty skupiny č.2 a tito potřebují meziproduct syntetizovaný mutanty skupiny č.3.





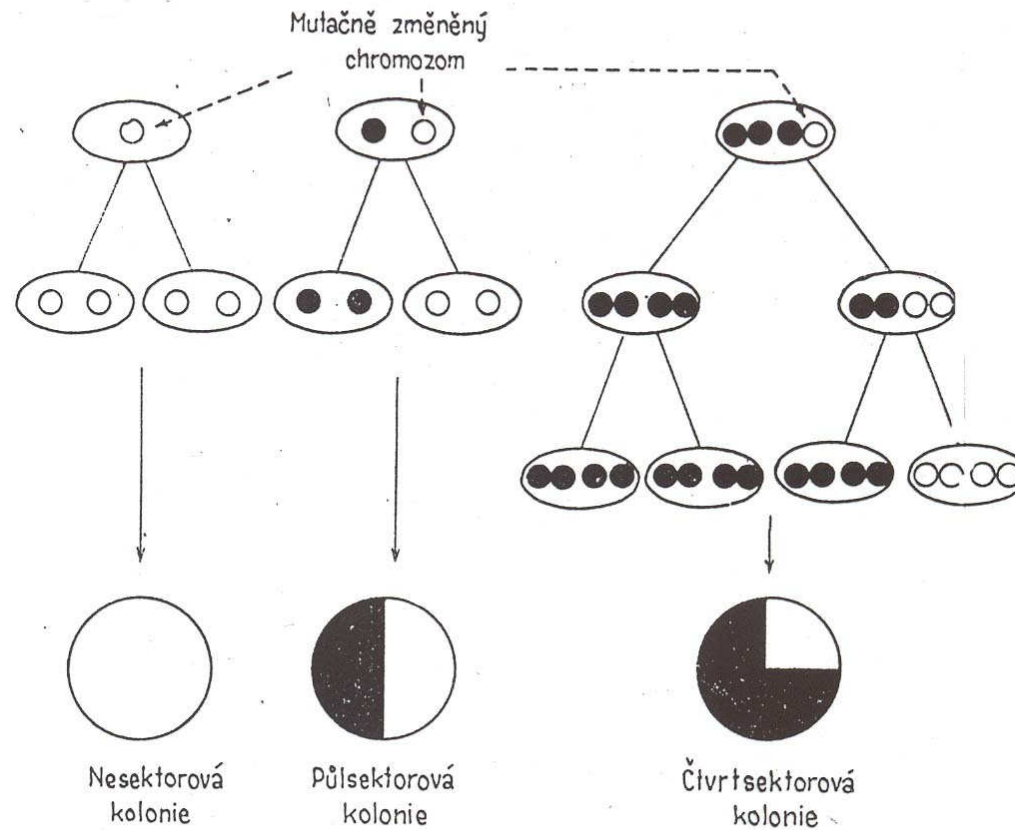
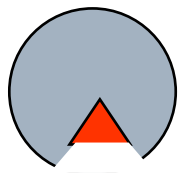
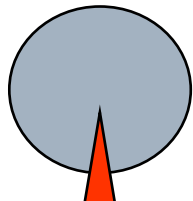
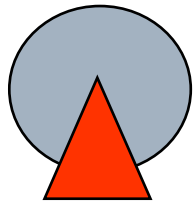
# VZNIK SEKTOROVÝCH KOLONIÍ JAKO DŮSLEDEK SEGREGAČNÍHO LAGU

Počet chromozomů na buňku

1

2

4



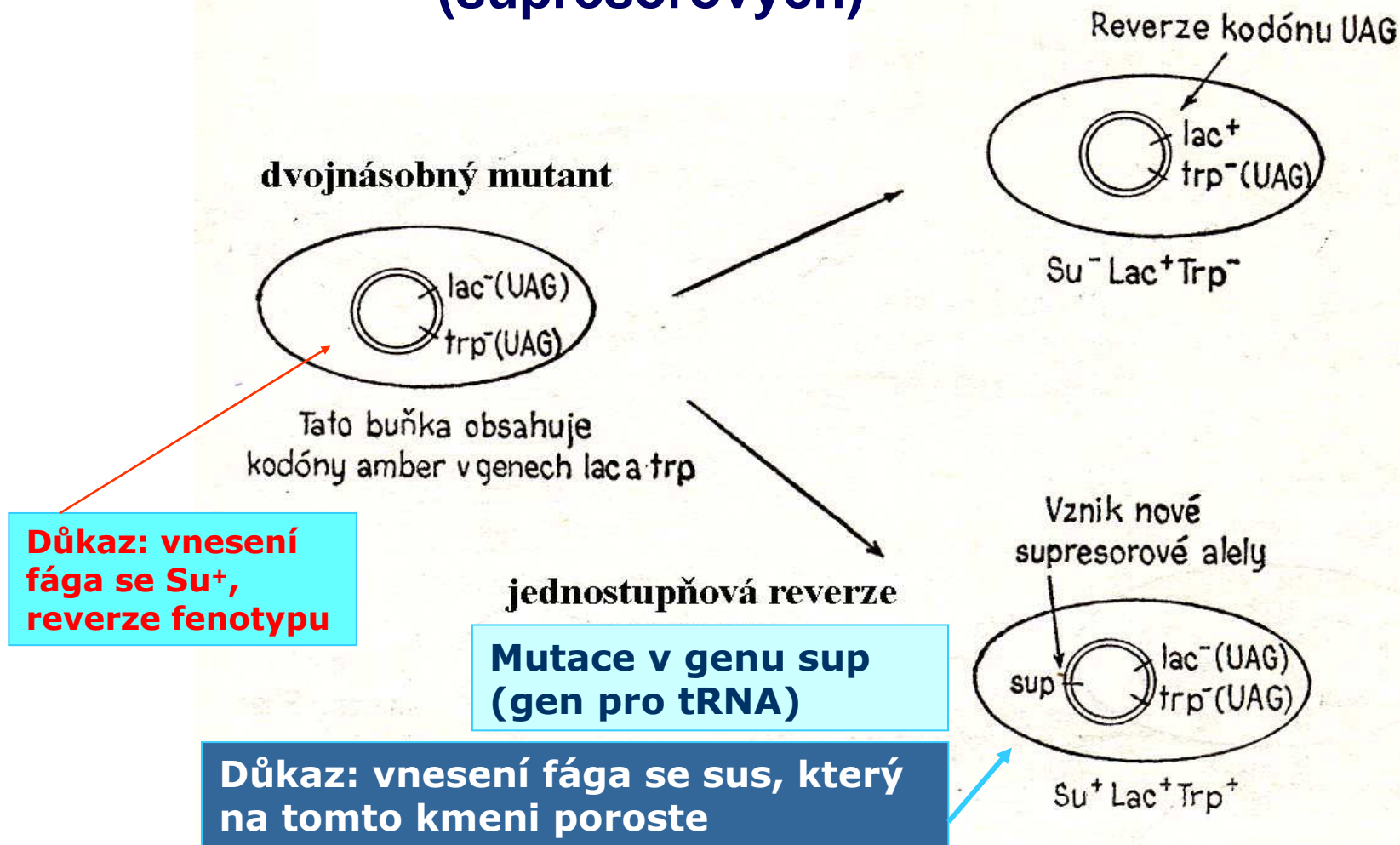
Jaderná segregace a vznik sektorových kolonií.

## Izolace supresorsenzitivních mutant

Tyto mutanty mají nesmyslný kodon v některém z genů. Vyskytují se v množství 1-1,5% mezi mutanty jakéhokoliv znaku. Detekují se tak, že se do mutantů vnese transdukujícím fágem alela supresorového genu (sup-) – lze vnést též na plazmidu.

Jestliže se kolonie **mutant daného znaku** (tj. různých mutant v tomto znaku, nejen sus!) přerazítávají na selektivní plotny s fágem, který obsahuje supresor, **vyrostou jen ty, které nesou mutaci podmíněnou vznikem nesmyslného kodonu, nikoliv ty, které mají jiný defekt v příslušném genu.**

# IZOLACE SUPRESORPOZITIVNÍCH MUTANT (Su+) (supresorových)



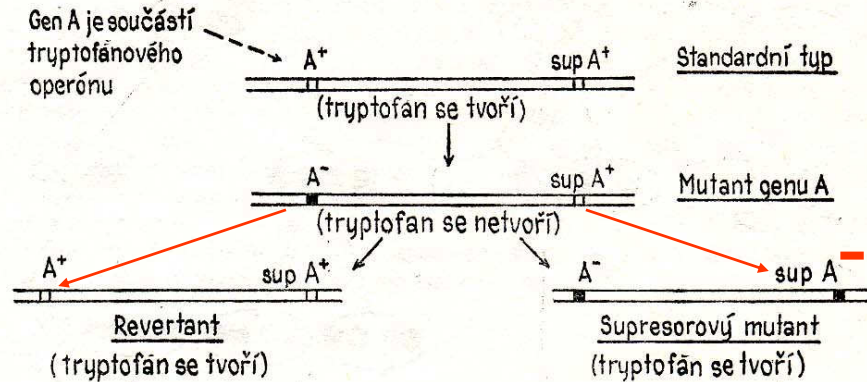
Buňka vlevo má amber mutaci v genech lac a trp. Vpravo jsou znázorněny dva typy revertantů Lac<sup>+</sup>. Jeden se vytvořil vznikem nové supresorové alely a druhý vznikl reverzí v kodónu amber.

# PŘÍKLAD SUPRESOROVÉ MUTACE A JEJÍ DŮKAZ KŘÍŽENÍM

mutace

reverze

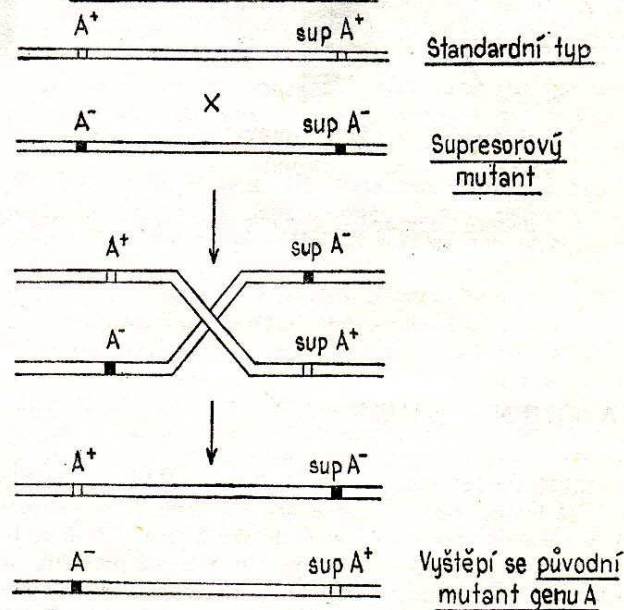
I  
Mutace, reverze a supresorová mutace genu A



Vznik supresorové mutace ( $Su^+$ )

II

Důkaz supresorové mutace



$supA^-$  = mutantní alela genu pro tRNA schopná suprimovat

# TEORETICKÉ PŘEDPOKLADY FLUKTUAČNÍHO TESTU (LURIA A DELBRÜCK 1943)

- Pravděpodobnost mutace je velmi nízká, ale stejná pro každou buňku ( $10^{-6}$ - $10^{-10}$  b/generaci)
- Uvažujeme-li určitou kulturu, pocházejí z jedné buňky, pak na konci kultivace bude počet mutant odrážet dobu, ve které mutace vznikla (tj. ve které generaci). Vzhledem k nízké pravděpodobnosti mutace lze předpokládat, že i počty mutant v jednotlivých klonech budou rozděleny podle Poissonovy řady - to proto, že záleží na generaci, ve které k mutaci došlo. Proto se budou významně lišit počty mutant v jednotlivých kulturách a v kultuře, kde byly buňky pěstovány dohromady.
- Při fyziologické adaptaci reagují buňky na přítomnost látky v prostředí - to působí jako indukční agens, které indukuje adaptivní odpověď (např. tvorbu enzymů apod). Počet reagujících buněk z různých kultur (klonů) je zhruba stejný.

# Fluktuální test

Změna znaku  
StrS → StrR

Mutace?

Adaptace?

Stejný počet buněk

Zásobní kultura  
Str<sup>S</sup>

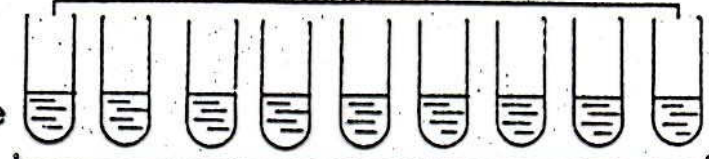
Bujónová kultura

Kontrola: důkaz citlivosti  
výchozí kultury ke  
streptomycinu

zředěno na  $1 \cdot 10^3$  buněk/ml

10ml

0,5 ml  
v každé  
zkumavce  
**20x**

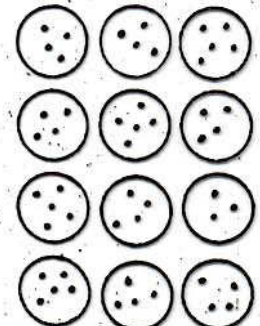


Inkubace 24-36 hod.

Počet kolonií  
na plotně bez  
streptomycinu

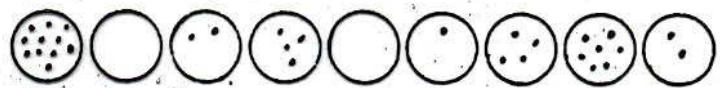
Agarová plotna  
se streptomycinem

0,5 ml na každou  
plotnu se strep-  
tomicinem



Přibližně stejné  
počty kolonií

Obsah zkumavek vylit na  
plotny se streptomycinem

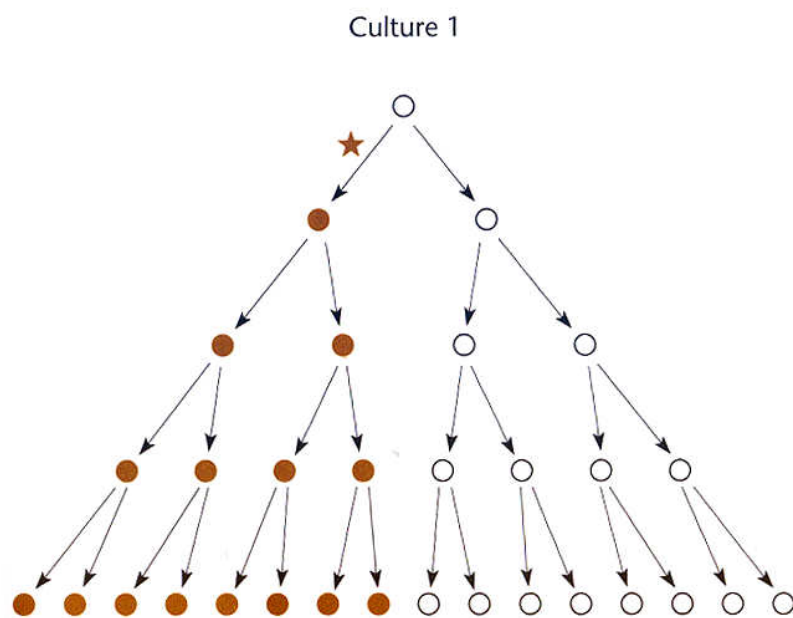


Průkazné rozdíly v počtech  
kolonií na jednotlivých plotnách

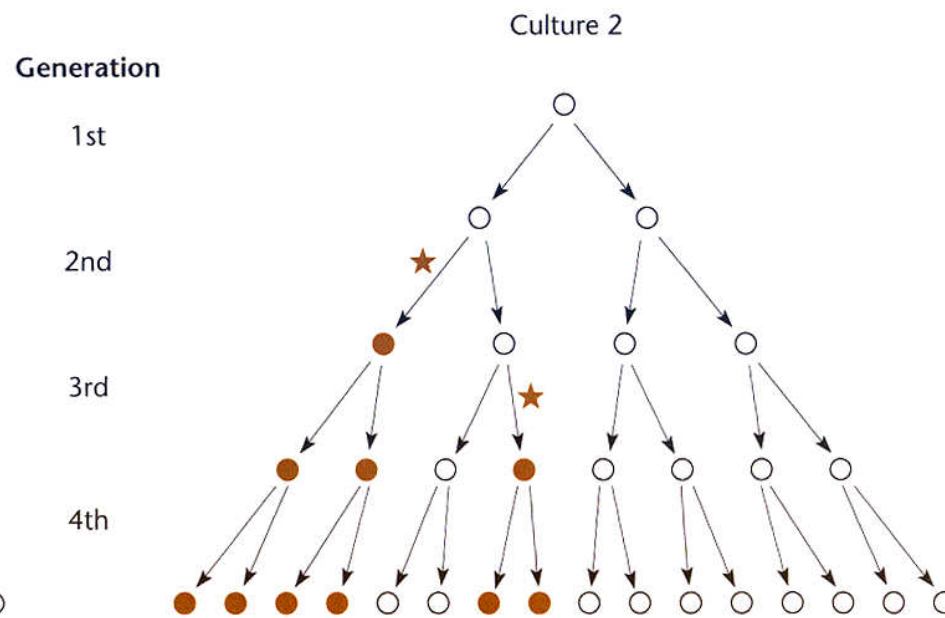
Rozsev pro stanovení  
celkového počtu buněk

Výpočet chi-kvadrátu a stanovení průkaznosti rozdílů

## Závislost konečného počtu mutantů na době, v níž mutace proběhla



**1 mutace: celkem 8 kolonií**



**2 mutace: celkem 6 kolonií**

## Počty rezistentních bakterií z nerozdělené kultury a samostatných kultur

| <b>Alikvoty z nerozdělené kultury</b> |                                  | <b>Samostatné kultury</b> |                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| <b>Aliquot no.</b>                    | <b>No. of resistant bacteria</b> | <b>Culture no.</b>        | <b>No. of resistant bacteria</b> |
| 1                                     | 14                               | 1                         | 1                                |
| 2                                     | 15                               | 2                         | 0                                |
| 3                                     | 13                               | 3                         | 3                                |
| 4                                     | 21                               | 4                         | 0                                |
| 5                                     | 15                               | 5                         | 0                                |
| 6                                     | 14                               | 6                         | 5                                |
| 7                                     | 26                               | 7                         | 0                                |
| 8                                     | 16                               | 8                         | 5                                |
| 9                                     | 20                               | 9                         | 0                                |
| 10                                    | 13                               | 10                        | 6                                |
|                                       |                                  | 11                        | 107                              |
|                                       |                                  | 12                        | 0                                |
|                                       |                                  | 13                        | 0                                |
|                                       |                                  | 14                        | 0                                |
|                                       |                                  | 15                        | 1                                |
|                                       |                                  | 16                        | 0                                |
|                                       |                                  | 17                        | 0                                |
|                                       |                                  | 18                        | 64                               |
|                                       |                                  | 19                        | 0                                |
|                                       |                                  | 20                        | 35                               |



## PROVEDENÍ FLUKTUAČNÍHO TESTU

- **Má se rozhodnout, zda rezistence ke streptomycinu je výsledkem adaptace nebo mutace (zda jsou mutanty přítomny v kultuře před vystavením buněk selekčnímu agens nebo se objevují až poté)**
  - 1. Ověří se, zda je výchozí kultura citlivá k streptomycinu
  - 2. Řada zkumavek s médiem bez streptomycinu se naočkuje malým a stejným množstvím buněk
  - 3. Stejně množství buněk se naočkuje do Erlenky s objemem, který je součtem objemů v jednotlivých zkumavkách
  - 4. Kultury se ponechají inkubovat 24 hod
  - 5. Kultury se vysejí ve stejném množství na plotny se streptomycinem
  - 6. Vyhodnotí se počty kolonií na jednotlivých plotnách a srovnají se
  - 7. Vypočte se  $\chi^2$  a stanoví se, zda existují průkazné rozdíly v počtech kolonií na plotnách
  - 8. Průkazný rozdíl v počtu kolonií na plotnách z jednotlivých kultur ve srovnání s počty na plotnách z jedné kultury svědčí o tom, že rezistence ke streptomycinu vznikla mutací.

# REPARACE MUTAČNĚ POŠKOZENÉ DNA

## A. Přímé reparační

- 1. fotoreaktivace
- 2. dealkylace

## B. Nepřímé reparační

- 1. Excizní reparační
  - bázová
  - nukleotidová
  - řízená metylací
- 2. rekombinační /postreplikační/
- 3. reparační kroslinků

## C. Inducibilní reparační

- 1. SOS-odpověď
- 2. adaptivní odpovědi
  - na alkylační poškození
  - na environmentální stres

### Genetický aparát pro reparační DNA

- velmi konzervativní
- asi 100 genů
- distinktní dráhy, které se mohou prolínat

# TYPY REPAROVATELNÝCH POŠKOZENÍ NA DNA

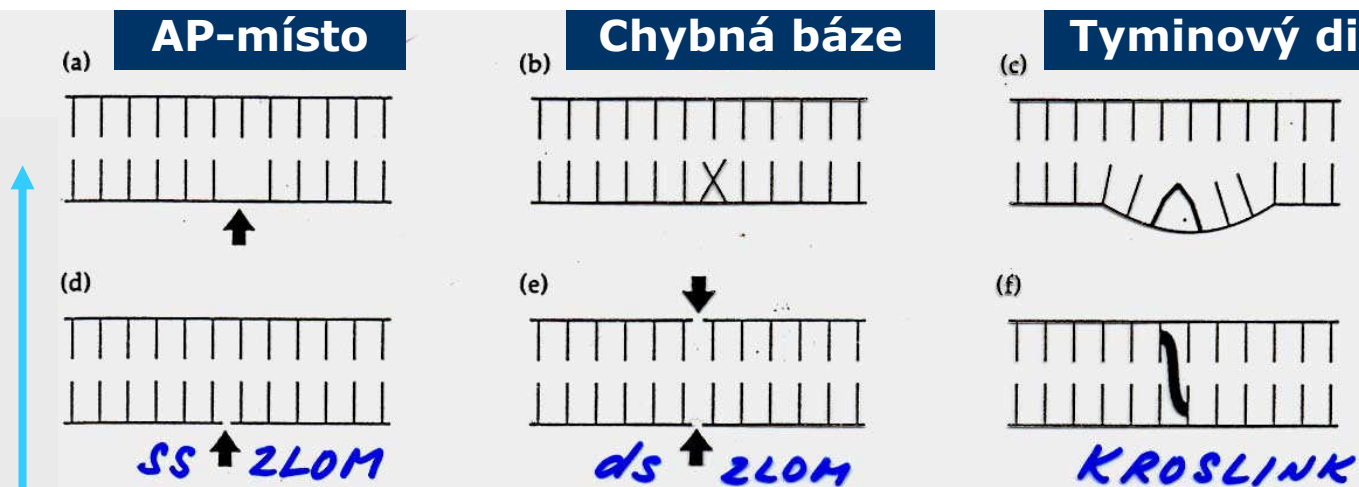
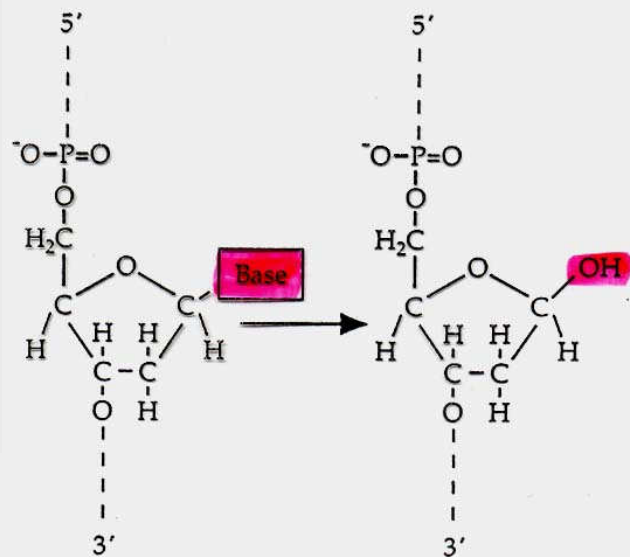


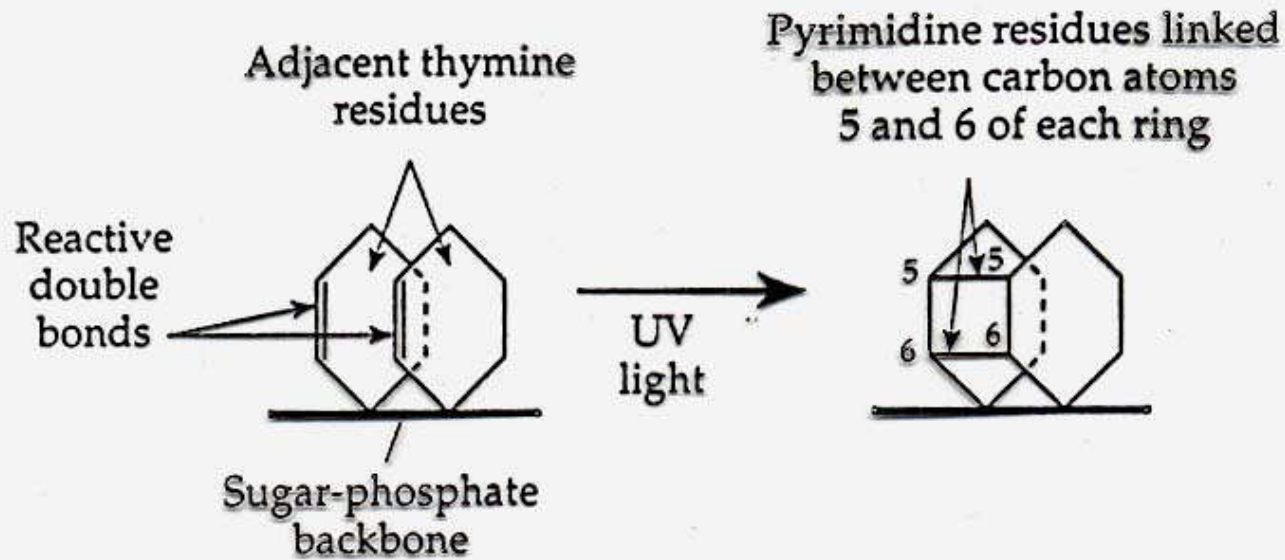
Fig. 8.1 Classification of repairable lesions. (a) Missing base; (b) incorrect base; (c) modified base (distorting the double helix); (d) single-strand break; (e) double-strand break; (f) interstrand cross-link.



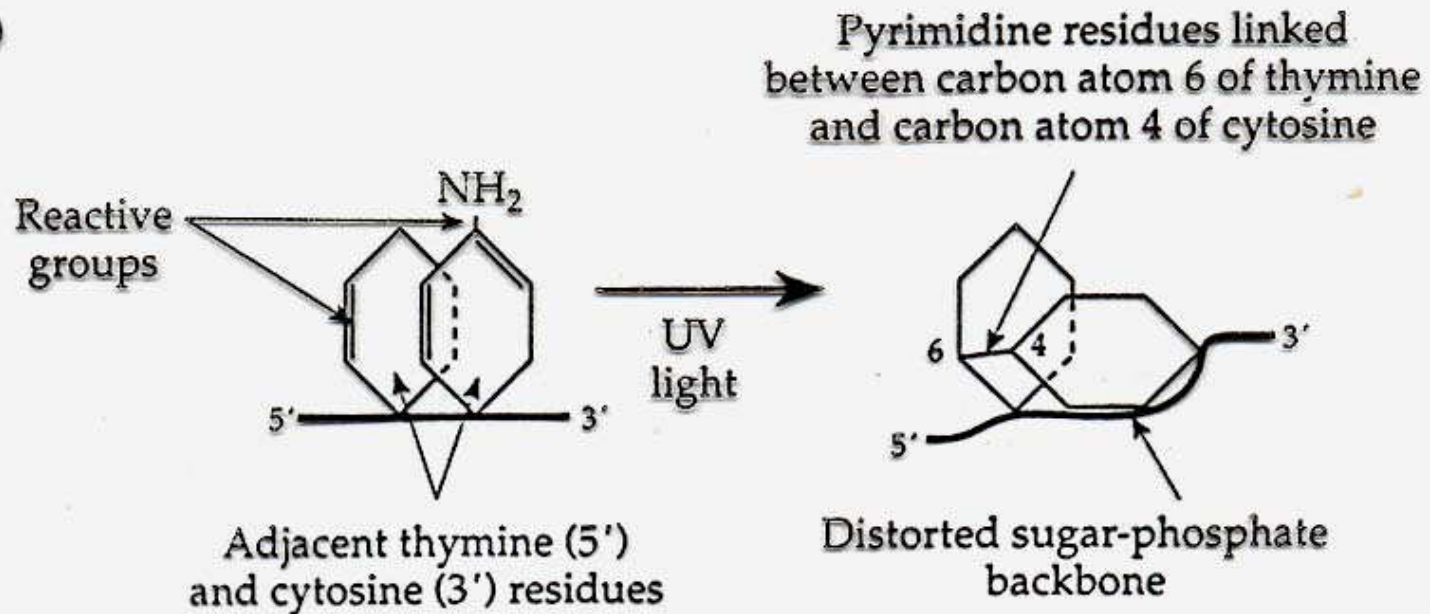
**Vznik AP míst = nejčastější spontánní mutace (depurinace je 100x častější než depyrimidinace)**

Fig. 8.2 Formation of an AP (apurinic/apyrimidinic) site.

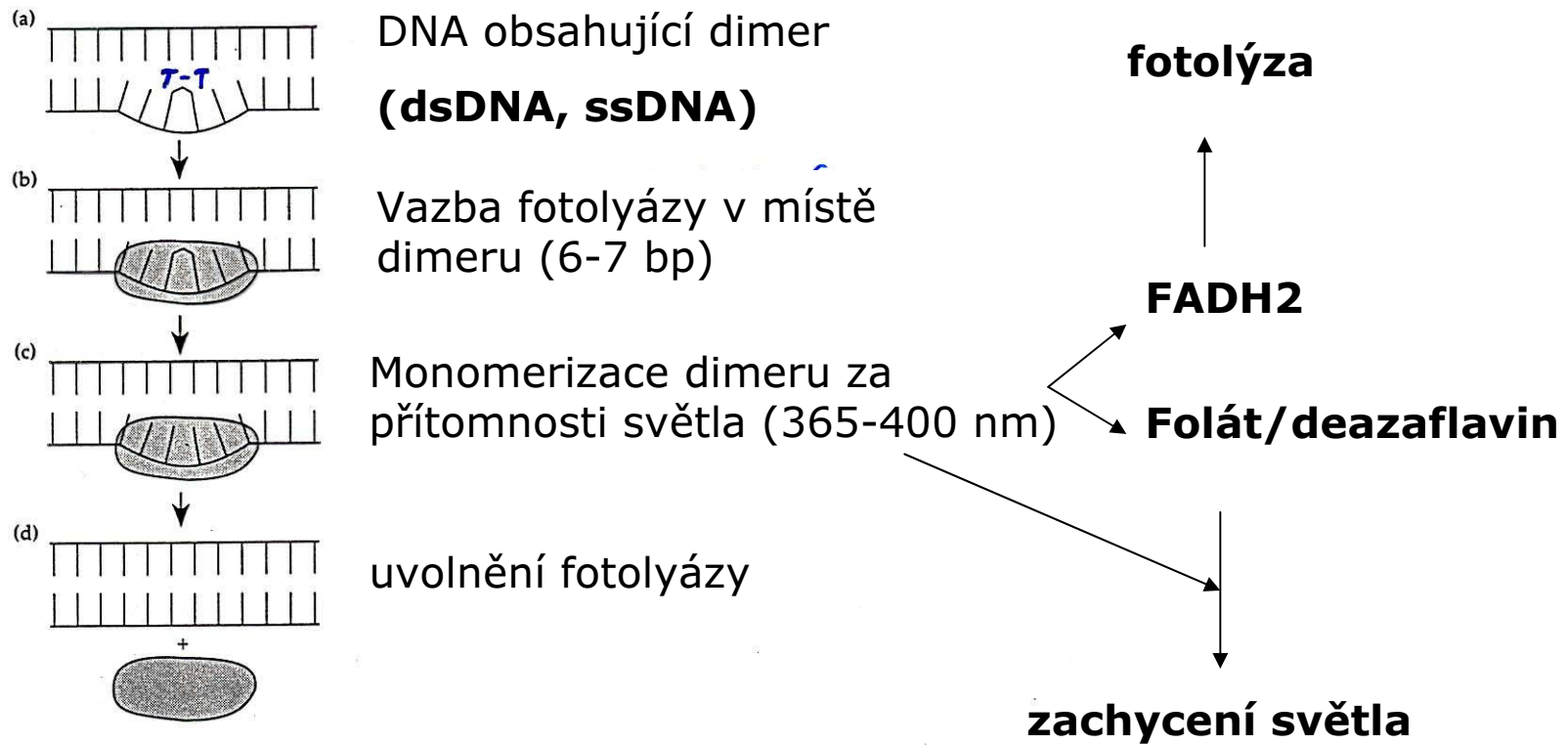
(a)

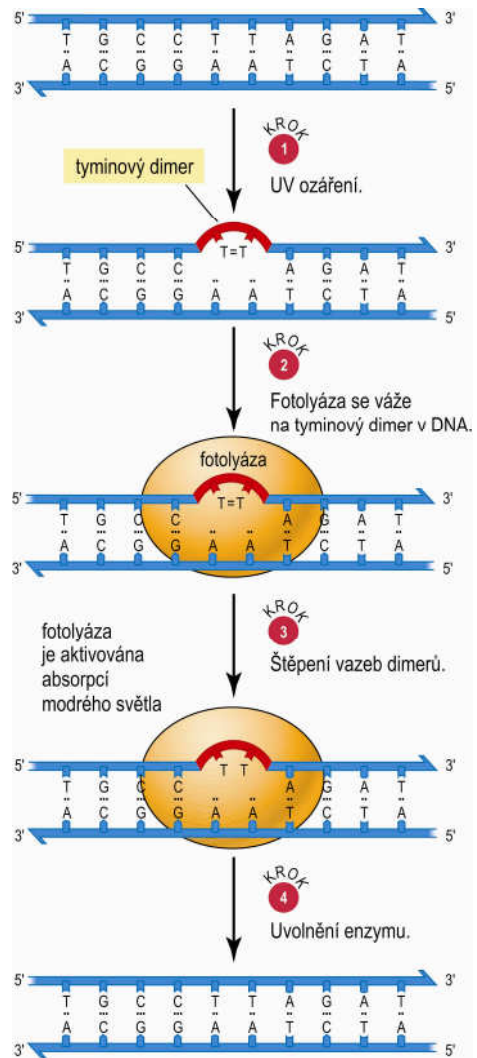


(b)



# STÁDIA FOTOREAKTIVACE

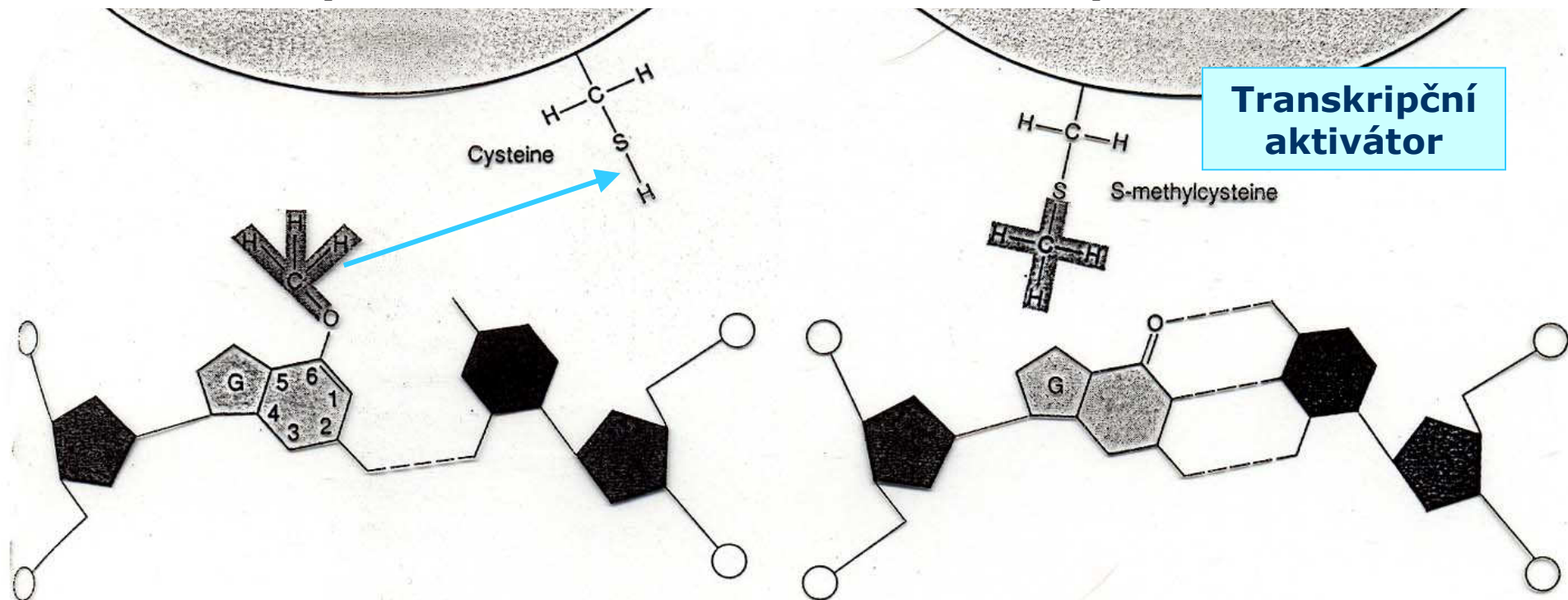




# Alkyltransferáza: <sup>6</sup>O-Metylguanin-DNA-metyltransferáza (<sup>6</sup>O-MGT= Ada-protein)

nemetylovaná forma

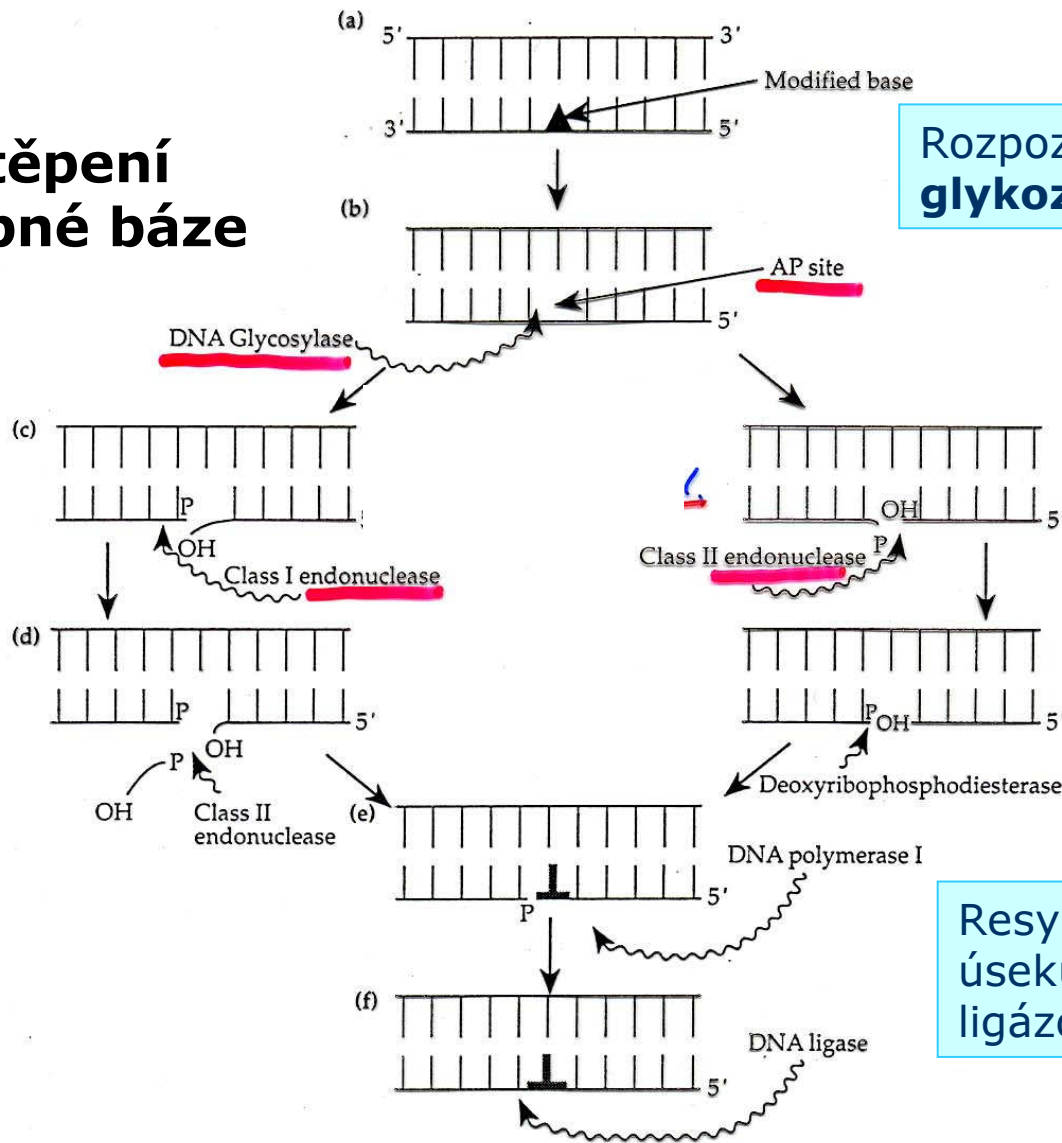
metylovaná forma



**Figure 19-29** Direct reversal of DNA damage by an alkyltransferase. Methylation of a guanine residue by nitrosoguanidine (NG) is repaired by this novel process. The NG adds a methyl group (CH<sub>3</sub>) at various sites in the DNA, including an oxygen atom at position 6 of guanine (*left*). This disrupts the hydrogen bonding of guanine to a cytosine. The repair is accomplished by a methyl-acceptor protein, one of the enzymes known as *alkyltransferases*. A cysteine residue on the protein acts as the methyl acceptor: it binds the CH<sub>3</sub> group, thereby restoring the guanine to its original state (*right*). (From P. Howard-Flanders, "Inducible Repair of DNA." Copyright © 1981 by Scientific American, Inc. All rights reserved.)

# BÁZOVÁ EXCIZNÍ REPARACE

## Vyštěpení chybné báze



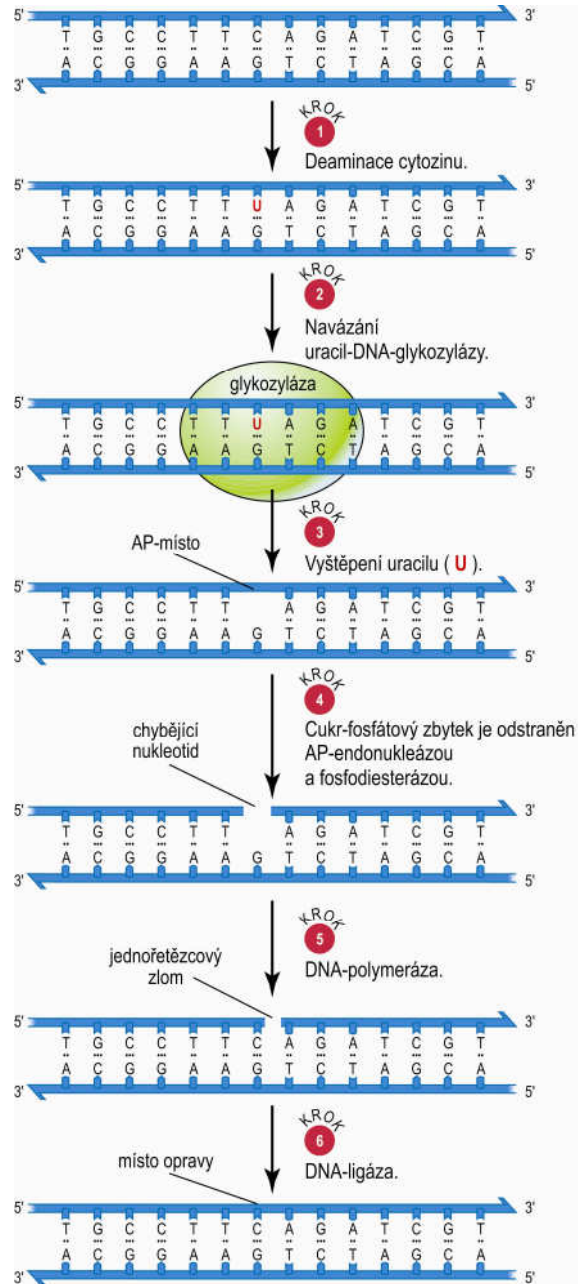
Rozpoznání chybné báze  
**glykozylázou**, vznik AP-místa

Přerušení cukr-  
fosfátových vazeb  
**AP-endonukleázami**

Odstranění dR  
s chybějící bází

Resyntéza chybějícího  
úseku, spojení mezery DNA-  
ligázou



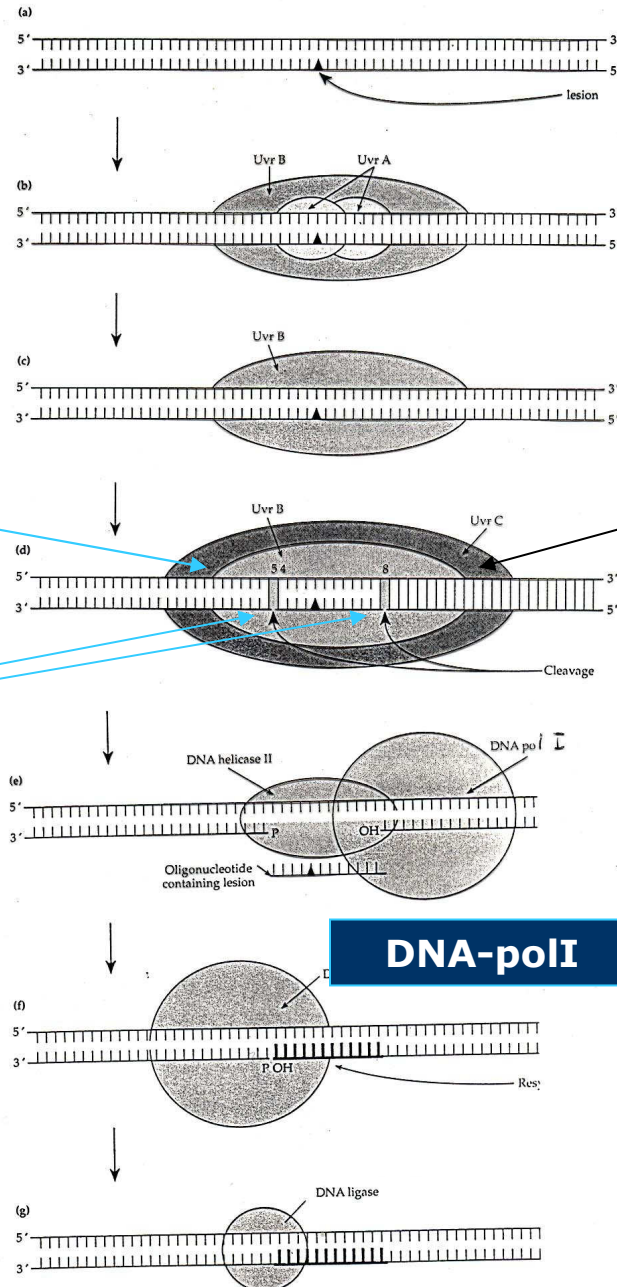


# DNA-GLYKOZYLÁZY PŮSOBÍCÍ NA POŠKOZENÉ DNA

| Enzyme                                    | Substrate   | Products   |
|---|---|--|
| Ura-DNA glycosylase                       | DNA containing uracil   | Uracil + AP sites  |
| Hmu-DNA glycosylase                       | DNA containing hydroxymethyluracil                                  | Hydroxymethyluracil + AP sites   |
| 5-mC-DNA glycosylase                      | DNA containing 5-methylcytosine                                     | 5-methylcytosine + AP sites  |
| Hx-DNA glycosylase                        | DNA containing hypoxanthine   | Hypoxanthine + AP sites  |
| Thymine mismatch-DNA glycosylase          | DNA containing G-T mispairs   | Thymine + AP sites   |
| MutY-DNA glycosylase                      | DNA containing G-A mispairs   | Adenine + AP sites   |
| 3-mA-DNA glycosylase I                    | DNA containing 3-methyladenine                                      | 3-Methyladenine + AP sites   |
| 3-mA-DNA glycosylase II                   | DNA containing 3-methyladenine, 7-methylguanine, or 3-methylguanine | 3-Methyladenine, 7-methylguanine, or 3-methylguanine + AP sites                      |
| FaPy-DNA glycosylase                      | DNA containing formamidopyrimidine moieties, or 8-hydroxyguanine    | 2,6-Diamino-4-hydroxy-5-N-methylformamido-pyrimidine and 8-hydroxyguanine + AP sites |
| 5,6-HT-DNA glycosylase (endonuclease III) | DNA containing 5,6 hydrated thymine-moieties                        | 5,6-Dihydroxydi-hydrothymine or 5,6 dihydrothymine + AP sites                        |
| PD-DNA glycosylase                        | DNA containing pyrimidine dimers                                    | Pyrimidine dimers in DNA with hydrolyzed 5' glycosyl bonds + AP sites                |

SOURCE: E. C. Friedberg, G. C. Walker, and W. Siede, *DNA Repair and Mutagenesis*. ASM Press, Washington, D.C.

# NUKLEOTIDOVÁ EXCIZNÍ REPARACE (SHORT PATCH REPAIR)



DNA obsahující poškození (T-T, chybný pár bazí aj)

Vazba UvrA2B1 } **SOS**  
 disociace UvrA

vytvoření **preincizního komplexu**

vazba UvrC  
 vytvoření **incizního komplexu** štěpení  
 cukr-fosfátové kostry

vyštěpení krátkého oligonukleotidu o  
 délce 11-13 b

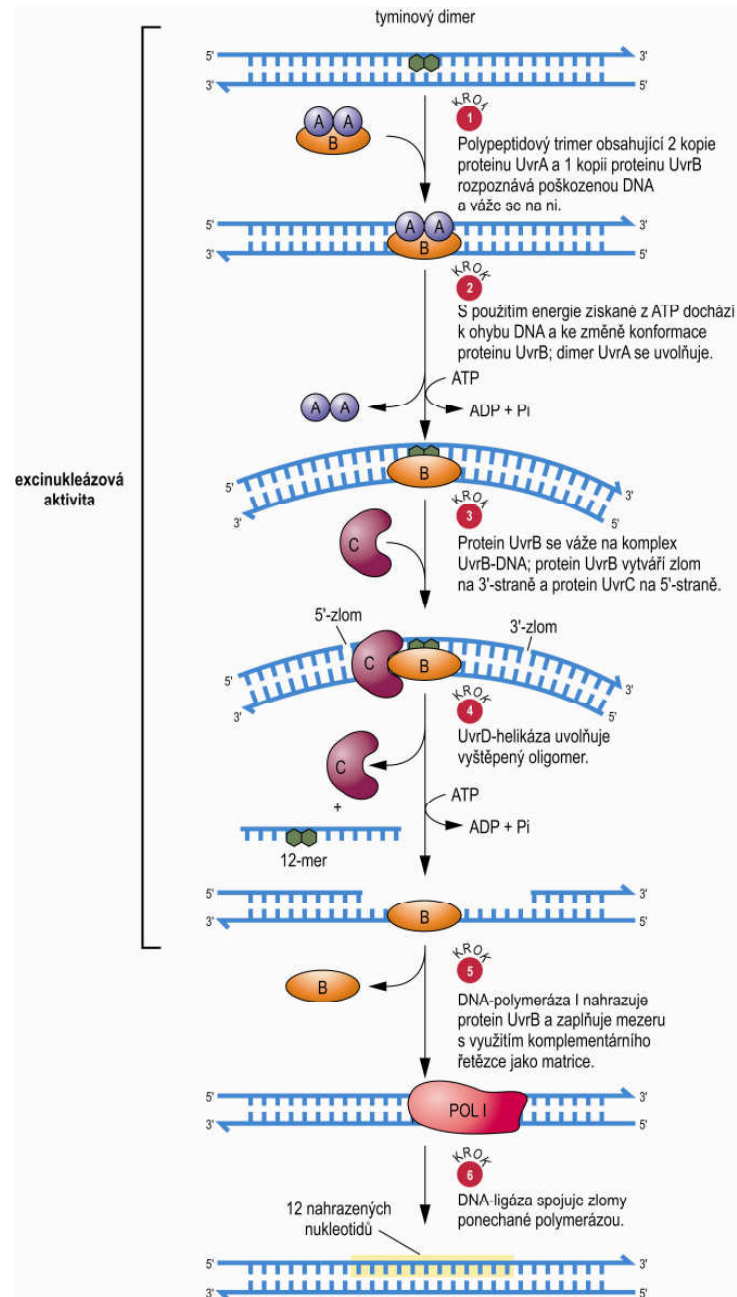
resyntéza chybějícího úseku DNA - jako  
 templát slouží řetězec bez poškození

spojení mezery DNA-ligázou

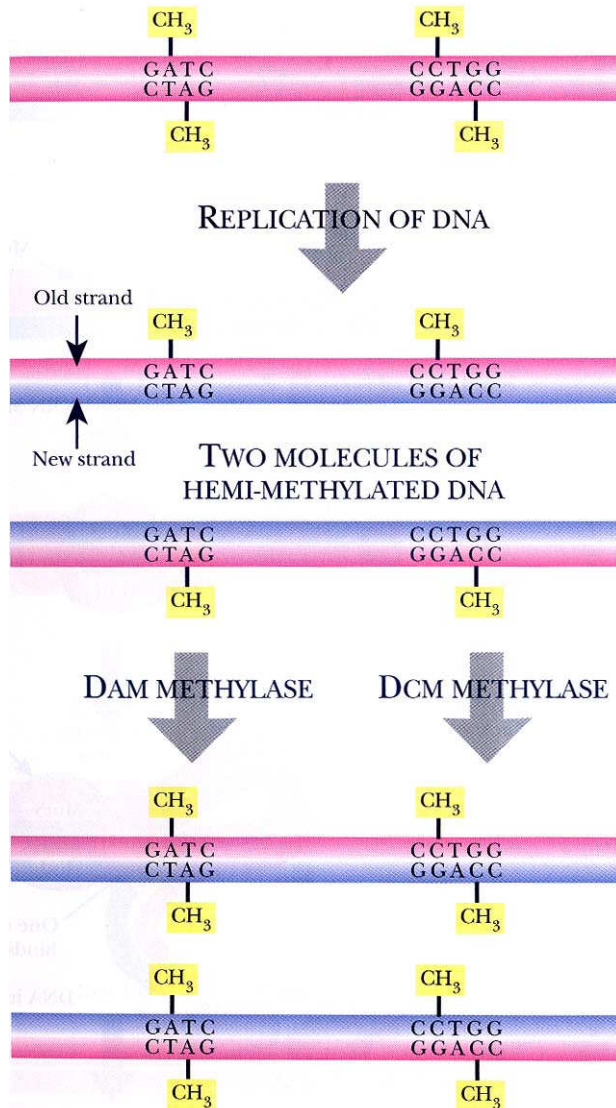
**UvrABC  
 excinukleáza**

**4-5b -x-- 8b**

**DNA-pol I**



# Metylace DNA místně-specifickými metylázami

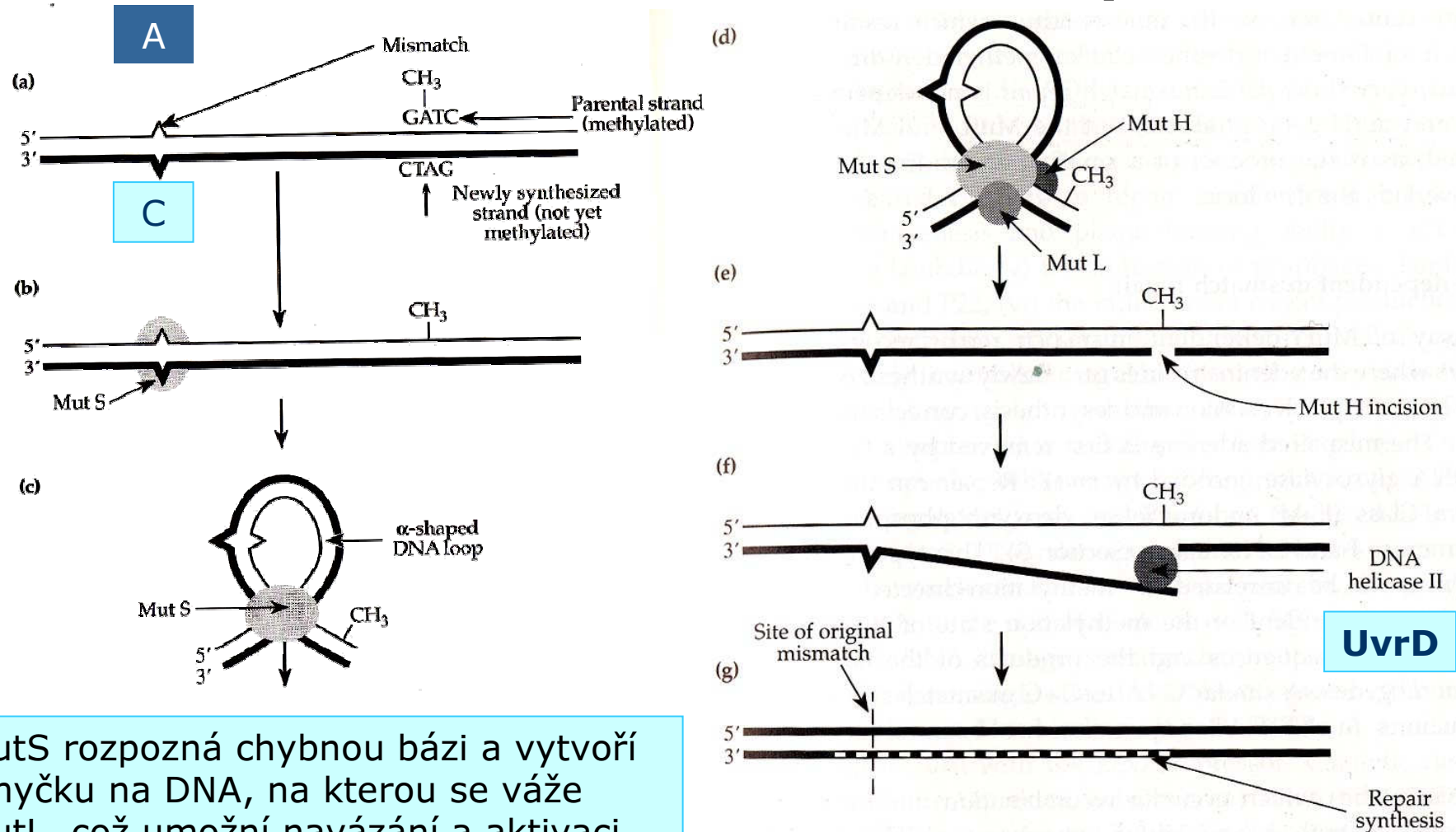


Rodičovská molekula

Dceřiné molekuly DNA  
krátce po replikaci

Plně metylované dceřiné  
molekuly DNA

# REPARACE ŘÍZENÁ METYLACÍ (REPARACE NA DLOUHOU VZDÁLENOST)



MutS rozpozná chybnou bázi a vytvoří smyčku na DNA, na kterou se váže MutL, což umožní navázání a aktivaci MutH, která štěpí G v GATC - poté DNA-helikáza odmotá jednořetězec a ten je nahrazen reparační syntézou

A-C → A-T

DNA polymeráza III

# POSTREPLIKAČNÍ REKOMBINAČNÍ REPARACE

Vznik mezery při syntéze DNA

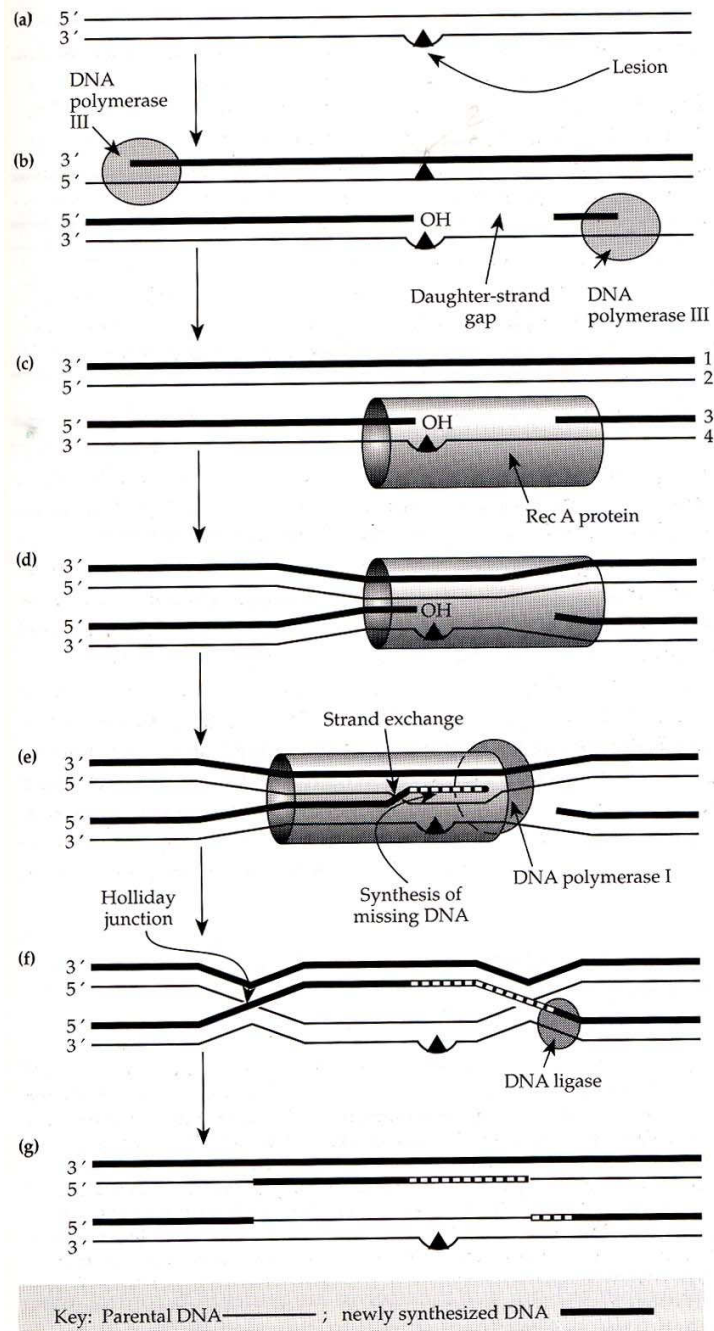
vazba proteinu RecA

navození homologního párování  
neporušeného a porušeného řetězce

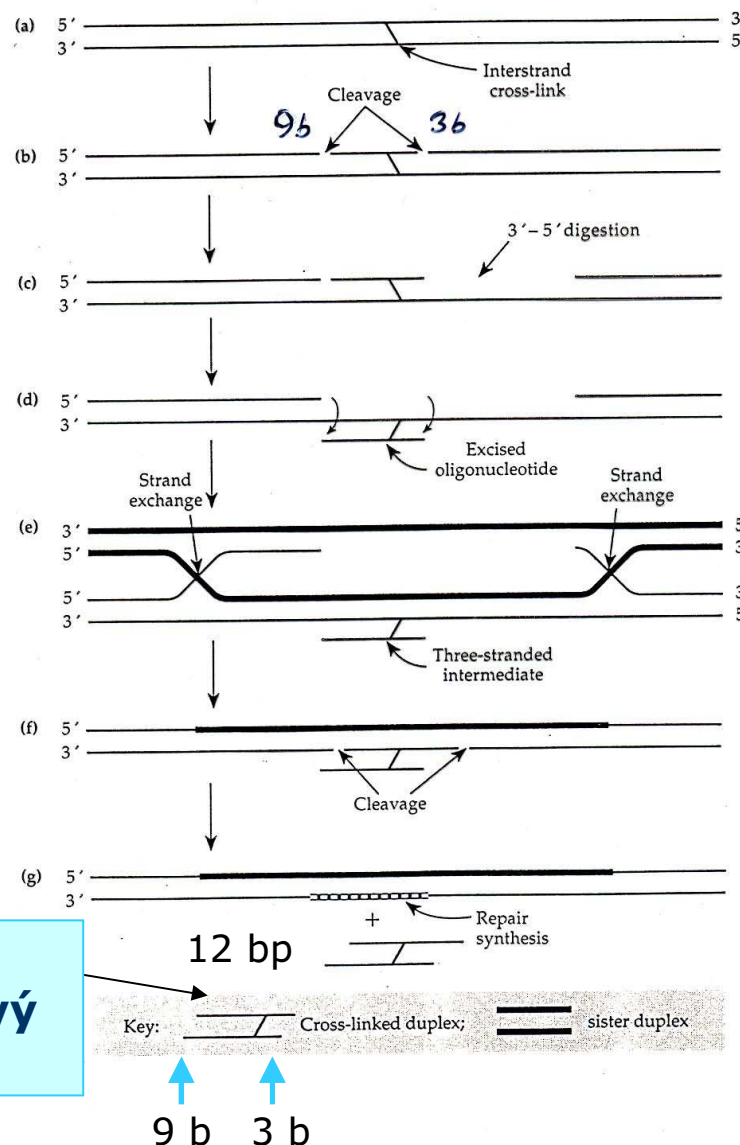
reparační syntéza DNA podle sesterského  
řetězce

rekombinace homologních řetězců

poškození zůstává v jedné z molekul a je  
opraveno později



# REPARACE MEZIŘETĚZCOVÝCH SPOJENÍ (CROSS-LINK)



**Vyštěpený  
dvouřetězcový  
fragment**

DNA obsahující cross-link

Komplex UvrABC  
(endonukleáza) rozštěpí cukr-  
fosfátovou kostru na jednom  
řetězci po obou stranách

DNA-polymeráza I rozšíří  
mezeru svou 5'-3'  
exonukleázovou aktivitou

Za účasti RecA dojde k  
výměně řetězců ze sesterského  
duplexu (rekombinační  
reparační náhrada)

Komplex UvrABC vyštěpí  
oligonukleotid obsahující cross-  
link

Mezera je zaplněna podobně  
jako při nukleotidové excizní  
reparaci (DNA-polI, DNA-  
helikáza, DNA-ligáza)

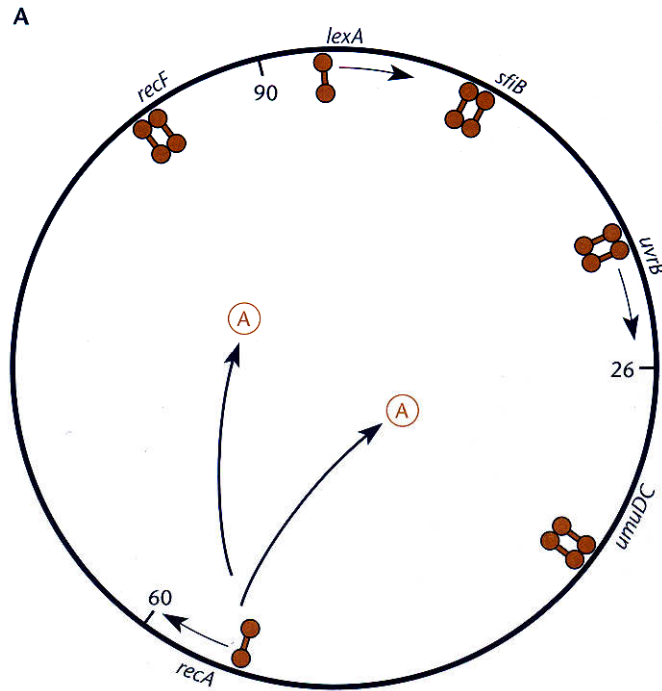


# SOS-ODPOVĚĎ

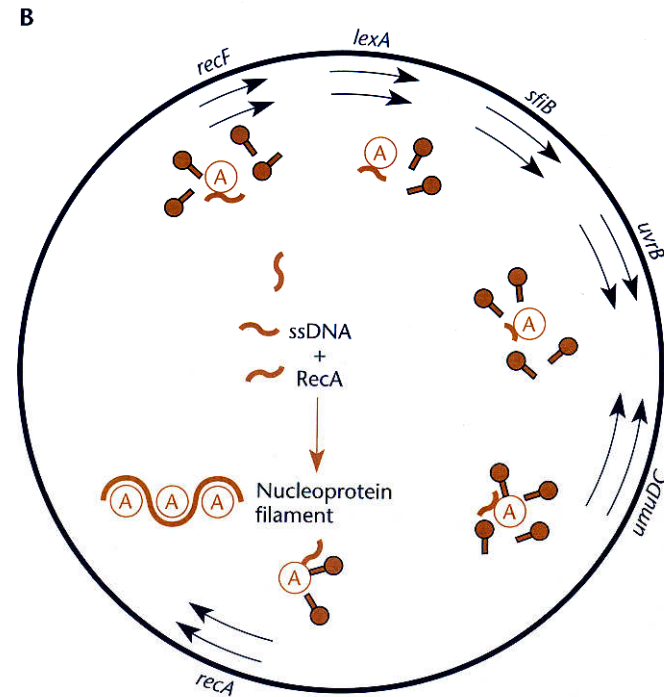
*geny  $din$  = damage induced, SOS-genes (31 genů u *E. coli*)*

- 1. Indukce SOS mutageneze
- 2. Excizní reparace dlouhých úseků
- 3. Zvýšená schopnost reparace ds zlomů
- 4. Indukce profágů ( $\lambda$ , P22, f80)
- 5. Indukce tvorby kolicinů
- 6. Zmírnění restrikce
- 7. Inhibice buněčného dělení

## SOS-odpověď u *E. coli*

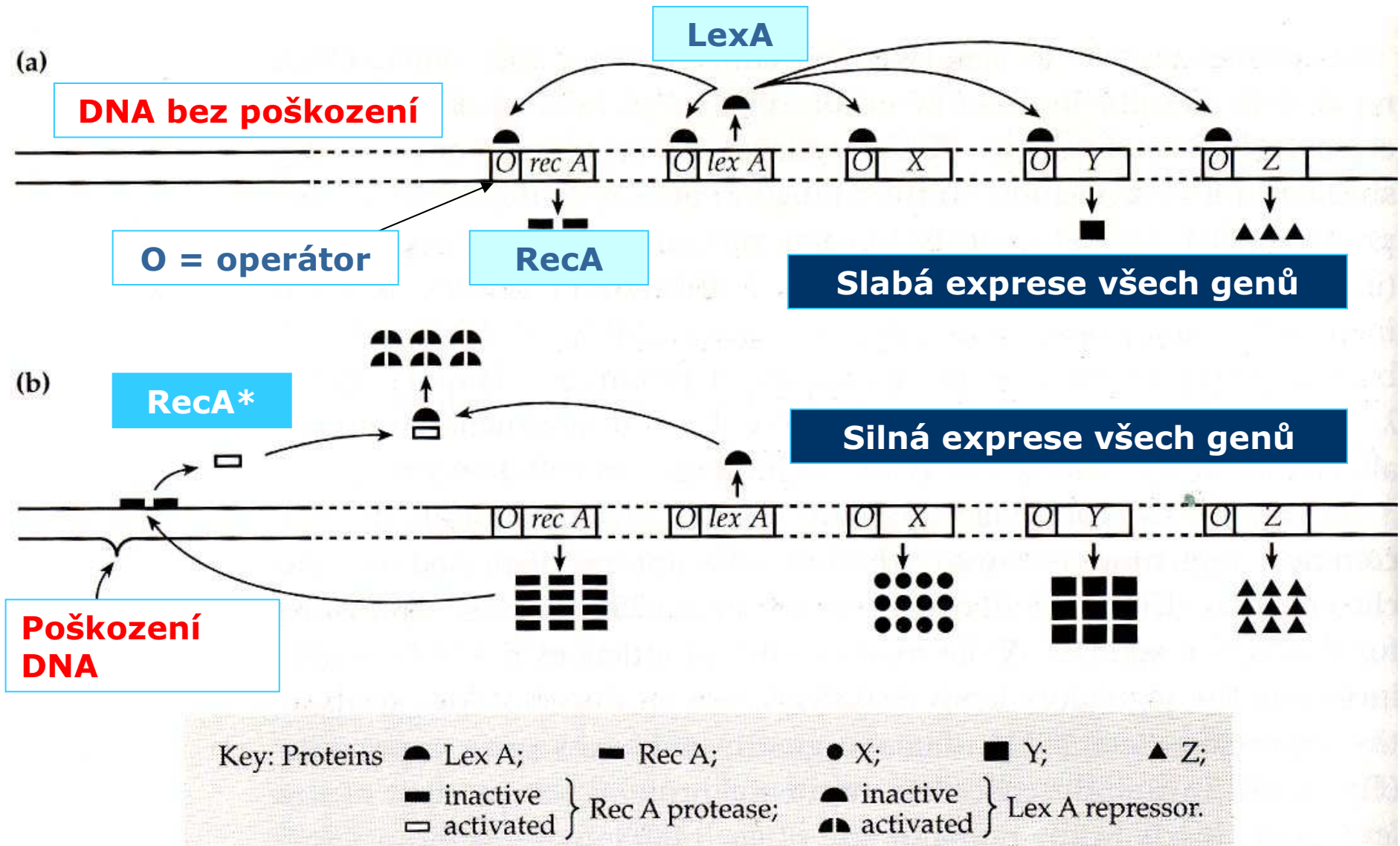


Neindukovaný stav: represor LexA se váže na operátory asi 30 SOS-genů a reprimuje jejich expresi



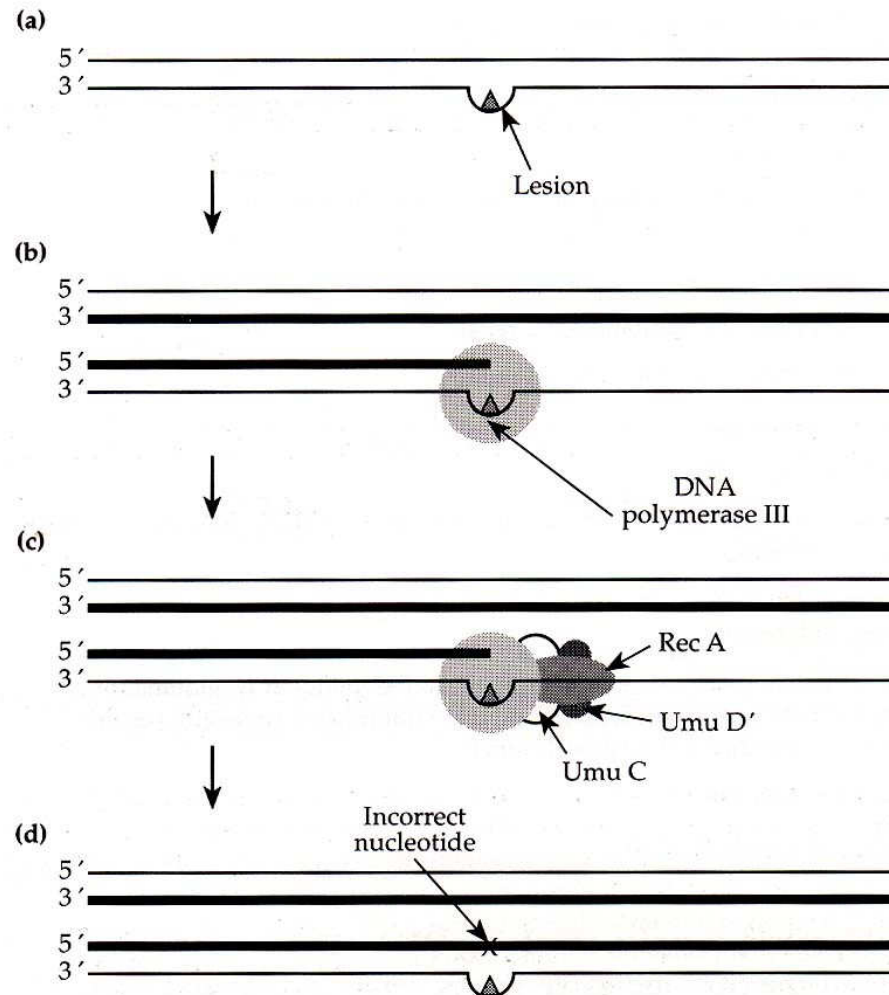
Po indukci: ssDNA se váže na RecA za tvorby **nukleoproteinového filamenta**, které váže LexA a štěpí ho, což vede k expresi SOS-genů

# PRŮBĚH SOS-REPARACE



LexA = dimer, podrobující se autokatalytickému štěpení za účasti RecA\* (koproteáza)  
**helikální filament RecA-DNA**

# SOS-MUTAGENEZE (ERROR-PRONE = CHYBY NAVOZUJÍCÍ) - POSLEDNÍ ZÁCHRANA



Key: Parental DNA ——— ; newly synthesized DNA ———

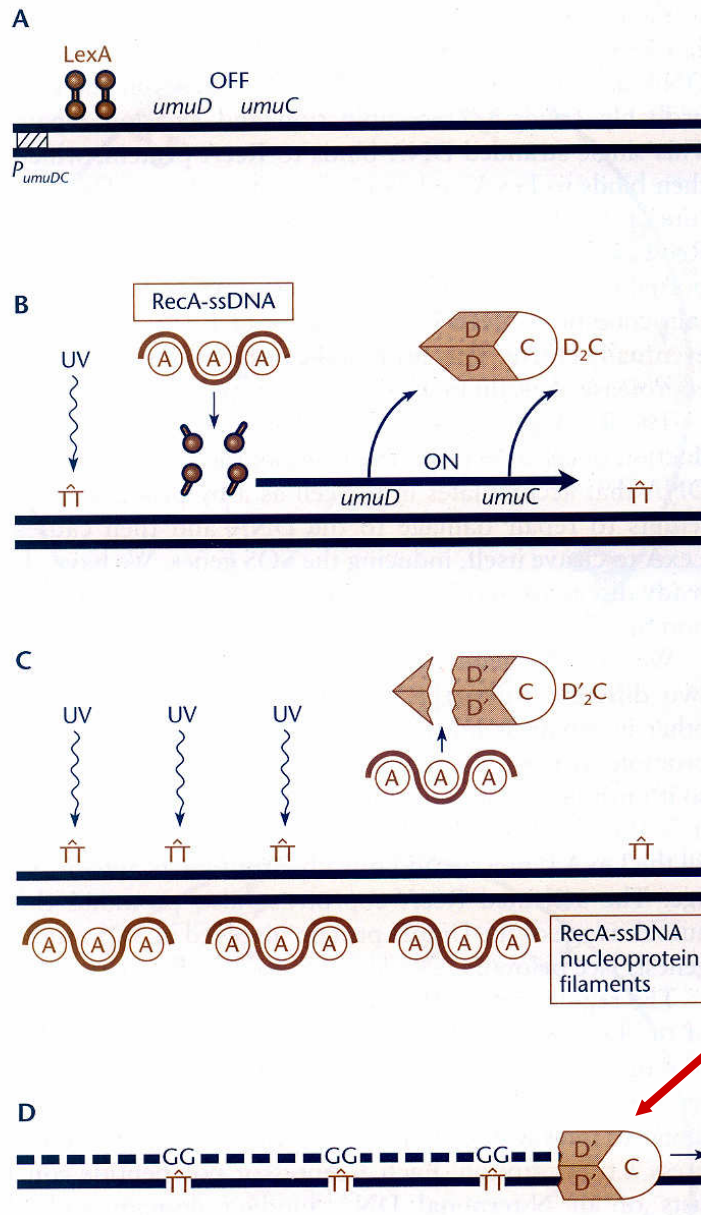
**umu** = UV-indukovaná mutagenese

DNA-polIII vytváří komplex s proteiny UmuC, UmuD a RecA, čímž dochází k inhibici opravy čtení

UmuD se působením RecA mění na UmuD', reakce je však pomalejší než štěpení LexA a proto je přednostně indukována standardní SOS-odpověď - ke štěpení UmuD dochází až při vysoké hladině RecA

Mutace fága lambda

## Regulace SOS-mutageneze u *E. coli*

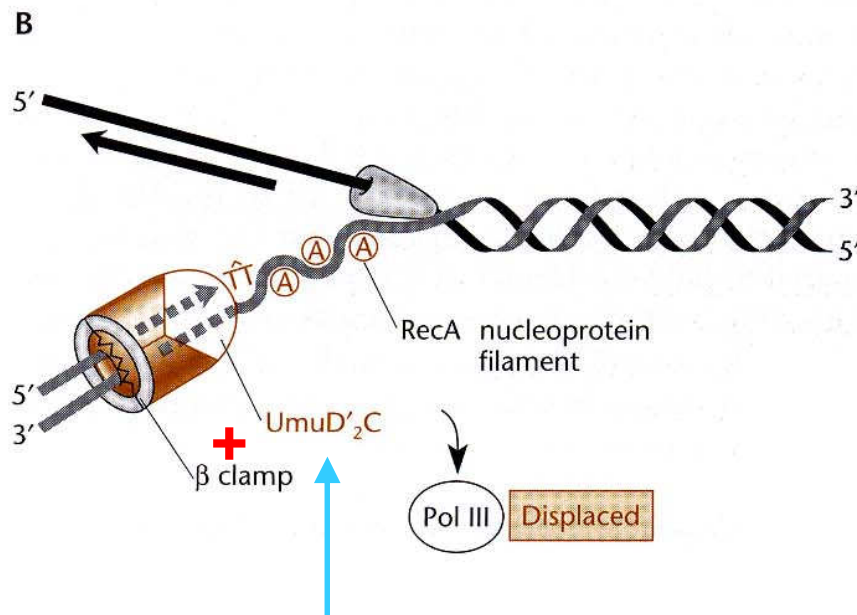
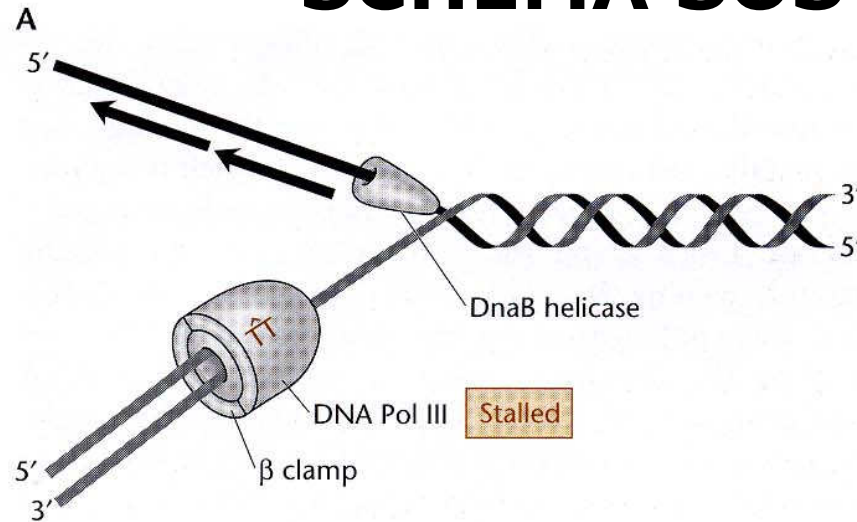


Před poškozením reprimuje LexA transkripci SOS-genů včetně operonu *umuDC*

Po mírném poškození DNA se RecA váže na ssDNA za tvorby RecA-nukleoproteinového filamenta, které se váže na LexA a ten je štěpen – dochází k expresi všech SOS-genů včetně *umuDC* (trimer  $UmuD_2C$ )

Po vysokém poškození se nahromadí RecA-np filamenta, která pak navodí štěpení UmuD a vytvoří se  $UmuD'_2C$ . **UmuC vázaný na  $UmuD'_2$  je mutagenní polymeráza, která je schopná replikovat místa s poškozením za vzniku chyb (vkládá náhodně nukleotidy).**

# SCHÉMA SOS MUTAGENEZE

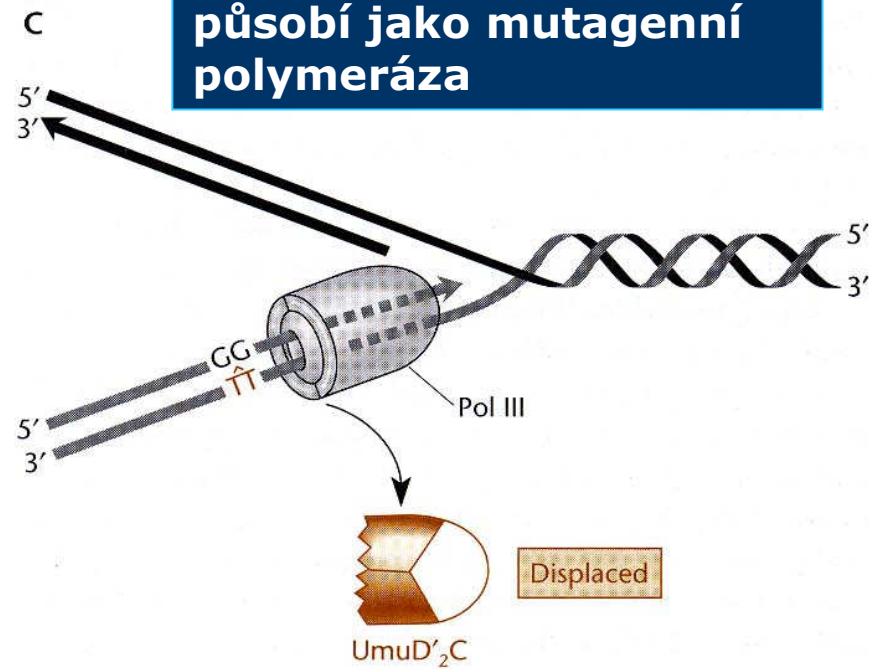


**DNA-polymeráza V**

Silné poškození DNA  
RecA-ssDNA (RecA\*)

UmuD → UmuD'

Komplex UmuD'<sub>2</sub>C  
působí jako mutagenní  
polymeráza



**TLS = translesion synthesis**

## Další mutagenní polymerázy u bakterií

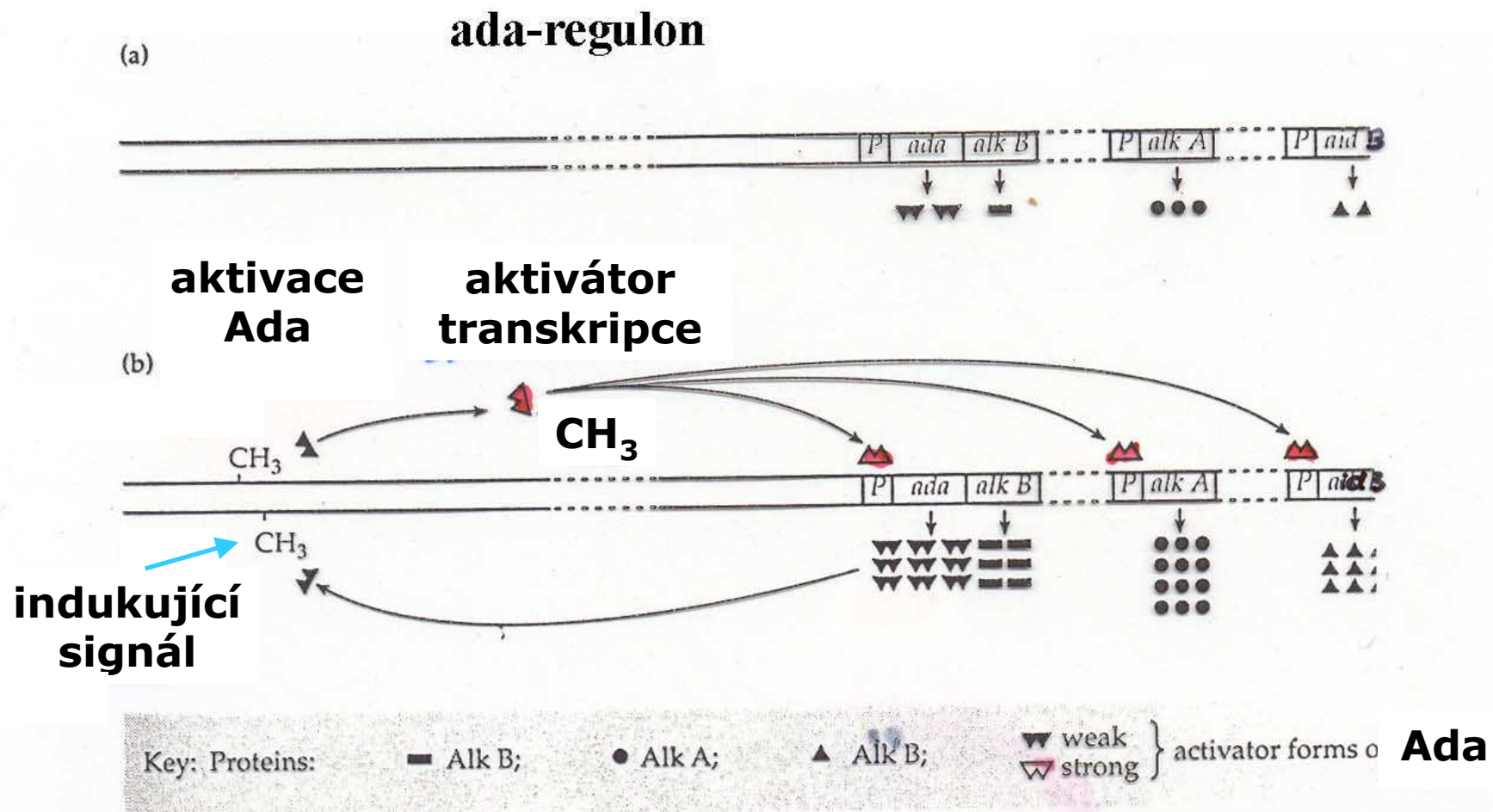
Polymeráza IV – produkt genu *dinB* u *E. coli* (jeden z SOS genů)

- Je příbuzná proteinu UmuC
- gen *dinB* je regulován represorem LexA
- při replikaci vytváří chyby i na nepoškozené DNA
- vytváří mutace v DNA infikujících fágů lambda

**untargeted mutagenesis (UTM)**

**Biologická funkce?? – umožňuje replikaci DNA poškozené jinými typy poškození než těmi, která způsobuje UV**

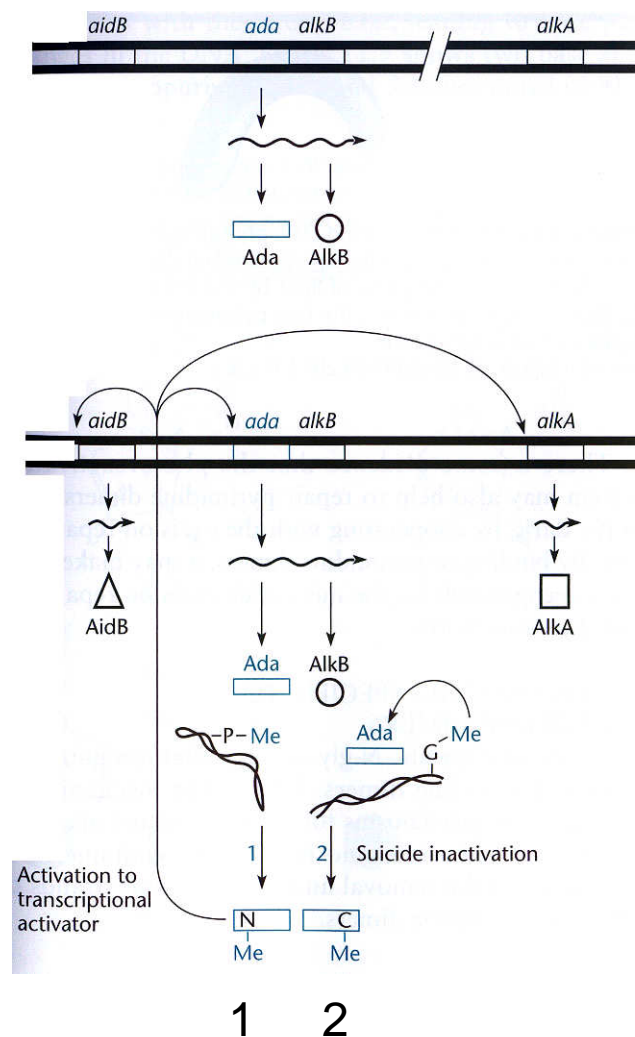
# REGULACE ADAPTIVNÍ ODPOVĚDI K POŠKOZENÍ VYVOLANÉMU ALKYLACÍ



**Ada-protein = alkytransferáza, Alk-proteiny = glykozylázy**



## Regulace adaptivní odpovědi



V buňce bez poškození se nachází jen několik molekul Ada proteinu. Po poškození DNA alkylační látkou přenáší Ada protein (metyltransferáza) alkylové skupiny z metylovaných fosfátů DNA na aminokyseliny umístěné na N- konci své vlastní molekuly, čímž se konvertuje na transkripční aktivátor (1), nebo přenáší alkylové skupiny z metylovaných bází na aminokyseliny na svém C-konci, což vede k inaktivaci Ada-proteinu (2).

**Ke vzniku (1) dochází jen při silném poškození DNA, při nízkém poškození jsou pouze odnímány metylové skupiny z bází a protein Ada se inaktivuje.**

- Vystavení *E. coli* netoxickým koncentracím peroxidu vodíku vede ke zvýšení následné schopnosti korigovat DNA poškození způsobované vyššími dávkami této látky.
- Adaptace k oxidativnímu stresu je nezávislá jak na alkylačním poškození, tak SOS odpovědi, a nevyžaduje *ada*, *lexA* nebo *recA* proteiny.
- V přítomnosti peroxidu je indukováno nejméně 30 proteinů ze dvou regulonů. *OxyR* funguje jako pozitivní regulátor devíti genů, z nichž čtyři byly identifikovány: kataláza/peroxidáza, glutationreduktáza, mangan superoxiddismutáza, a NAD(P)H-dependentní alkylhydroperoxidreduktáza.

**Table 4.3 Mutators in *E. coli***

| Locus                       | Map position (min) | Specificity                                  | Strength      | Defect (if known)   |
|-----------------------------|--------------------|--|---------------|---|
| <i>mutT</i>                 | 2                  | A:T→C:G transversions                        | Moderate      | Prevents incorporation of A:8-oxodG mispairs by hydrolyzing 8-oxodGTP |
| <i>mutH</i>                 | 61                 | G:C→A:T and A:T→G:C transitions; frameshifts | Strong        | Lacks methyl-directed mismatch repair system                          |
| <i>mutL</i>                 | 95                 | G:C→A:T and A:T→G:C transitions; frameshifts | Strong        | Lacks methyl-directed mismatch repair system                          |
| <i>mutS</i>                 | 59                 | G:C→A:T and A:T→G:C transitions; frameshifts | Strong        | Lacks methyl-directed mismatch repair system                          |
| <i>uvrD</i> ( <i>mutU</i> ) | 86                 | G:C→A:T and A:T→G:C transitions; frameshifts | Strong        | Lacks helicase II and the methyl-directed mismatch repair system      |
| <i>mutD</i>                 | 5                  | All base substitutions; frameshifts          | Very strong   | Altered ε subunit of DNA polymerase III                               |
| <i>mutY</i>                 | 64                 | G:C→T:A transversions                        | Moderate      | Lacks glycosylase that corrects G:A and 8-oxodG mispairs              |
| <i>mutM</i>                 | 82                 | G:C→T:A transversions                        | Moderate      | Fapy glycosylase (8-oxodG glycosylase)                                |
| <i>mutA</i>                 | 95                 | A:T→T:A, G:C→T:A, and A:T→C:G transversions  | Moderate      |   |
| <i>mutC</i>                 | 42                 | A:T→T:A, G:C→T:A, and A:T→C:G transversions  | Weak/moderate |   |
| <i>dam</i>                  | 74                 | G:C→A:T and A:T→G:C transitions; frameshifts | Moderate      | Lacks DNA adenine methylase   |
| <i>ung</i>                  | 56                 | G:C→A:T transitions                          | Weak/moderate | Lacks uracil-DNA glycosylase  |
| <i>sodA</i>                 | 88                 |  | Weak          | Lacks superoxide dismutase, manganese                                 |
| <i>oxyR</i>                 | 89                 |  | Weak          | Lacks positive regulator of oxidative damage genes                    |
| <i>polA</i>                 | 87                 | Frameshifts; deletions                       | Weak/moderate | Lacks DNA polymerase I  |

