

Otázka: Cytologie

Předmět: Biologie

Přidal(a): Skopalová

BUNĚČNÝ CYKLUS

- Genom = soubor všech genů a všechna DNA buňky; kompletní genetický materiál organismu
 - buňka člověka má DNA dlouhou 3m!
- Chromozómy - (chromo=zbarvený; soma=tělo) = struktura nesoucí geny na proteinovém lešení
- chromatin = komplex DNA a proteinů tvořící chromosom
- po té, co se obsah DNA zdvojnásobil (před mitózou) se chromatin kondenzuje a činí tak chromozom mnohem kratší a tlustší
- sesterské chromatidy = každý duplikovaný (zdvojený) chromosom má dvě sesterské chromatidy, které obsahují identické kopie DNA. Chromatidy jsou původně proteiny poutány po celé délce, později pouze v úzkém „pasu“ chromosomu zvaným centromera
- v průběhu mitózy se sesterské chromatidy nakonec od sebe zcela oddělí; z každé se stane nový chromosom na opačném konci buňky
- po mitóze (=rozdělení jádra) následuje obvykle cytokinese (=rozdělení cytoplasmy,

vznik nové buňky)

- **Buněčný cyklus**

- Lze rozdělit na
 - mitotická fáze M fázi (mitóza)
 - interfáze - 90% celého buněčného cyklu
- Interfázi můžeme rozdělit na G_1 , S, G_2 fázi
- Interfáze
- G_1 (postmitotická fáze) („first gap“) - metabolická aktivita (transkripce, translace)
- S - fáze - probíhá zdvojení (replikace) DNA
- G_2 (premitotická fáze) („second gap“) - metabolická aktivita
- Obecně v interfázi probíhá:
 - Tvorba buněčné stěny
 - Růst buňky na původní velikost
 - Tvorba cytoplazmy, dělí se mitochondrie a plastidy, vznikají membrány atd.

- Ploidie a číslo N

- ploidie = počet kopií každého *chromosomu* přítomného v buněčném jádru
- číslo N = počet každé dvoušroubovicové *molekuly DNA* v jádru
- Ploidie a číslo N
- somatické buňky mají dvě kopie každého typu chromosomu a jsou tedy zvané diploidní
- gamety mají jen jednu kopii každého typu chromosomu a jsou zvané haploidní
- gamety mají v každém chromosomu jednu molekulu DNA a jsou tedy 1N
- v některých fázích buněčného cyklu (G_1) mají somatické buňky v každém chromosomu jednu molekulu DNA jsou tedy 2N
- ve fázi G_2 a v raných fázích mitosy a meiosis však každý chromosom diploidní buňky obsahuje dvě molekuly DNA a buňka je tedy 4N

- **Mitóza**

- Je souvislý, kontinuální proces. Konvenčně se ale dělí do pěti fází:
 - profáze
 - prometafáze
 - metafáze
 - anafáze
 - telofáze
- = jaderné dělení, při kterém vznikají dceřinná jádra o stejném počtu chromozómů jako mateřské jádro. Obvykle trvá cca 1 hod.
- Chromozóm = tyčinkovitý či pentlicovitý útvar, tvořený DNA(až několik cm dlouhou) a bílkovinami. Velikost, tvar a počet chromozómů je různý, ale pro daný druh vždy shodný. Uprostřed nebo na okraji se vytváří tzv. centromera
- Centromera = nebarvitelný, zaškrčený útvar, ke kterému se připojují při mitóze vlákna dělicího vřeténka
- Karyotyp = soubor chromozómů, charakteristický pro daný druh
- postmitotická buňka = buňka, která se již nikdy nebude dělit
 - většina velmi specializovaných buněk (neurony, buňky pokrývající villy v tenkém střevu, svalové buňky) se po svém vzniku již nikdy nedělí a jsou tedy postmitotické
 - o postmitotických buňkách přitom nelze říci, že jsou ve fázi G nula, neboť z této fáze se buňka může opět dostat zpět do buněčného cyklu. Postmitotická buňka se zpět do buněčného cyklu již nikdy nedostane
- V každém z nás proběhne za život 10^{16} mitóz!
- Pokud počítáme, že naše těla se skládají z cca 3×10^{13} buněk
- ... pak se v průběhu života buňky našeho těla kompletně vymění nejméně 100x!
 - všechny buňky samozřejmě ne, jsou zde buňky, které se nedělí

- **Interfáze**

pozdní interfáze, před profází

- Jádro je dobře formované, obaleno membránami
- jádro obsahuje jedno či více jadérek (nucleoli)

- mimo jádro se nachází dva centrosomy, vzniklé replikací původně jednoho centrosomu
- mikrotubuly rostou z těchto centrosomů všemi směry a vytvářejí tzv. aster („hvězda“)
- chromosomy jsou již dlouho, od S fáze, zreplikovány, ale nejsou ještě pozorovatelné

- *Profáze*

- Chromozomy se kondenzují a spiralizují, stávají se viditelné a barvitelné
- každý chromozóm se objevuje jako útvar ze dvou sesterských chromatid, spojených k sobě
- Mizí jaderná blána a jadérko
- V cytoplazmě se u opačných pólů jádra vytváří tzv. hyalinní čepičky, které obsahují základy mikrotubulů dělicího vřeténka

- *Prometafáze*

- Jaderná membrána se začíná rozpadat
- v oblasti centromery se objevuje struktura zvaná kinetochor
- mikrotubuly začínají prorůstat oblast jádra; objevuje se kinetochor a napojuje se na mikrotubuly dělicího vřeténka
- Chromozómy se začínají přemísťovat do ekvatoriální roviny

- *Metafáze*

- nejdelší část mitózy, trvá cca 20 min
- Jaderná blána a jadérko zcela zmizely
- Chromozómy se dostávají do rovníkové (ekvatoriální) roviny dělicího vřeténka – nebo, jsou-li velké, tak alespoň jejich centromery
- Na kinetochor se připojují mikrotubuly dělicího vřeténka z obou protilehlých centrosomů
- Chromozómy jsou rozštěpeny na dvě identické poloviny s výjimkou centromery
- Metafáze, Anafáze, Telofáze

- *Anafáze*

- nejkratší část mitózy, trvá jen několik minut
- Rozdělí se i centromery každého chromosomu, relativně náhle
- Díky zkracování mikrotubulů se chromozómy rozcházejí k pólům dělicího vřeténka (rychlostí $1\mu\text{m}/\text{min}$)
- celá buňka se protahuje, jak nekinetochorové mikrotubuly rostou
- Na konci anafáze jsou na opačných pólech dvě ekvivalentní skupiny chromozómů

- *Telofáze*

- Nonkinetochorové mikrotubuly se protahují ještě více, a dceřinná jádra vznikají na opačných pólech buňky
- již v telofázi začíná zpravidla cytokineze
- Telofáze
- Chromozómy se začínají despiralizovat a ztrácejí barvitelnost
- Vytvářejí se jadérka a z membrán endoplazmatického retikula vzniká i jaderná blána
- Takto vzniklá jádra mají stejný počet chromozómů ale poloviční obsah DNA než mateřské jádro

- *Dělicí vřeténko*

- Je tvořené z mikrotubulů a dalších proteinů
- jak se dělicí vřeténko formuje, začínají se rozpadat mikrotubuly cytoskeletu, pravděpodobně proto, aby poskytly materiál pro tvorbu dělicího vřeténka (tubuliny)
- mikrotubuly začínají růst z centrosomů
- centrosom živočišných buněk obsahuje dvě centrioly
- centrosom většiny rostlin nemá centrioly
- Během interfáze se centrosom replikuje za vzniku dvou centrosomů
- při začátku mitózy se oba centrosomy nacházejí u sebe a v blízkosti jádra
- během profáze a prometáfáze se oddalují a začínají z nich růst mikrotubuly; na konci

prometafáze jsou již na opačných pólech buňky

- *Kinetochor*

- = struktura složená z proteinů a specifických sekvencí DNA v centromeře
- chromosom má dva kinetochory orientovaných v opačných směrech
- během prometafáze se některé mikrotubuly dělicího vřeténka napojí na kinetochory
- jak se mikrotubuly připojí ke kinetochoru, začnou si celý chromosom přitahovat ke svému pólu
- tento pohyb je ovšem vyrovnán mikrotubuly z opačného centrosomu, které činí totéž
- V následném přetahování se chromosom pohybuje sem a tam; výsledkem je remíza
- mikrotubuly opačných centrosomů, které se nenapojily na kinetochor, se překrývají a snad spojují
- v metafázi se tak díky tomuto přetahování dostávají všechny centromery do ekvatoriální roviny
- Anafáze začíná náhle, tak, že proteiny, které drží pohromadě sesterské chromatidy jsou inaktivovány
- podle pravděpodobné hypotézy kinetochor v sobě obsahuje protein, který umí „kráčet“ podél mikrotubulového vlákna, které se vzápětí rozpadá

- *Nonkinetochorové mikrotubuly*

- Se proplétají a zřejmě za pomoci motorových proteinů se na sebe napojují a způsobují protahování buňky

- *Cytokinese*

- U živočichů se buňka zaškrucuje díky aktinovým vláknům mikrofilament, které jsou uspořádány do kruhu
- u rostlin se během telofáze vezikly Golgiho aparátu posunují díky mikrotubulům doprostřed buňky, kam vylévají svůj obsah a svými membránami se spojují za vzniku

tzv. cell plate

- membrány se nakonec spojí s plasmalemou a jejich obsah vytvoří střední lamelu buněčné stěny

- *Dělení bakterií*

- Místa *ori* se dostávají na opačné strany buňky
- protože ale bakterie nemají mikrotubuly ani molekulární motory, pohyb míst *ori* zůstává tajemstvím
- jak replikace pokračuje, bakterie roste – po skončení replikace je bakterie cca dvojnásobně velká a může se rozdělit

- *Regulace buněčného cyklu*

- Některé buňky, např. buňky kůže se dělí v průběhu celého života
- většina buněk našeho těla je ve fázi G_0
- jiné, jako např. buňky jater, jsou připraveny se dělit, ale dělí se pouze v případě zranění
- některé buňky dospělého člověka zřejmě ztratily schopnost se dělit (dříve se uváděly neurony a buňky svalů)
- mechanismus regulace buněčného cyklu je klíčový pro pochopení vzniku rakoviny
- Regulace buněčného cyklu
- Je zřejmě řízena chemickými látkami
- Pokusy s buňkami v tkáňové kultuře“
 - pokud spojíme buňku v S-fázi s buňkou v G_1 fázi, jádro z G_1 fáze se bezprostředně dostane také do S-fáze
 - pokud spojíme buňku v M-fázi s buňkou v G_1 fázi, u G_1 jádra okamžitě dojde k mitóze, i když je DNA ještě nezreplikovaná (VIZ obr. na dalším snímku)
- Je zřejmě řízena hladinou určitých chemických látek v buňce, které následující krok rozběhnou až je minulý ukončen
- analogie s mechanismem pračky: jsou zde zřejmě vnější a vnitřní stimuly. Vnější (nastavení programu) a vnitřní (sensory kontrolují množství vody atd.)

- *Kontrolní body („checkpoints“)*
 - Jsou tři: ve fázi G1, G2, M
 - u buněk savců je zřejmě bod v G1 fázi nejdůležitější
 - pokud buňka nedostane signál „vpřed“ v G1 fázi, dostane se do fáze G₀ V této fázi je většina buněk našeho těla
-
- *Cykliny a cyklin-dependentní kinázy*
 - Kinázy = enzymy, které aktivují či inaktivují jiné enzymy připojením fosfátové skupiny. Kinázy jsou v rostoucí buňce ve stále stejné koncentraci, ale po většinu času jsou neaktivní
 - cykliny = proteiny, jejichž koncentrace v buňce se cyklicky mění
 - aby se kináza stala aktivní, musí se spojit s cyklinem
 - *Cykliny a cyklin-dependentní kinázy*
 - ...aby se kináza stala aktivní, musí se spojit s cyklinem
 - proto se těmto kinásám říká cyklin-dependentní kinázy (Cdk)
 - aktivita Cdk roste a klesá s koncentrací cyklinu v buňce
 - tento první objevený komplex dostal název MPF (maturation-promoting factor)
 - během G2 fáze přibývá cyklinů , které se spojují s Cdk za vzniku MPF - výsledkem je nastartování mitosy
-
- *Regulace buněčného cyklu*
 - Na konci mitosy dojde k hromadné destrukci cyklinů
 - takto zřejmě není řízen jen tento G2 point, ale zřejmě i důležitější G1 point
-
- *Interní signály: APC*
 - Anafáze nezačne, pokud nejsou na všechny kinetochory připevněny mikrotubuly

- některé proteiny zřejmě udržují tzv. APC (anaphase promoting complex) v inaktivním stavu
 - teprve až jsou všechny kinetochory napojeny na mikrotubuly, APC se stane aktivní a rozbije jak spojení centromer tak i cykliny
-
- *Externí signály: růstové faktory*
 - I když má savčí buňka v tkáňové kultuře dostatek živin, nezačne se dělit, pokud nejsou splněny důležité fyzikální či chemické předpoklady
 - Růstový faktor = protein vytvářený jednou buňkou, který způsobí, že se jiná buňka začne dělit
 - jedním z příkladů růstového faktoru je tzv. PDGF (platelet-derived growth factor), který je vytvářen krevními destičkami
-
- **Rakovina**
 - = selhání regulace buněčného cyklu
 - nádorové buňky možná nepotřebují růstové faktory
 - nebo si je možná vytváří samy
 - nebo je možná celý kontrolní systém buněčného dělení abnormální
 - pokud se přestanou dělit, činí tak v náhodných místech buněčného cyklu, a ne na „checkpoints“
 - HeLa buňky = dnes velmi známá buněčná linie, izolovaná v roce 1951 z nádoru pacientky Henrietta Lacks
 - v kultuře, mají-li dostatek živin, jsou zřejmě tyto buňky „nesmrtelné“ (nesmrtelné samoreplikující se automaty)
 - normální savčí buňky se v kultuře rozdělí 20-50x, pak zestárnou a zemřou
 - Transformace = proces měnící zdravou buňku v nádorovou
 - za normálních podmínek imunitní systém člověka transformovanou buňku rozezná a zničí ji
 - pokud imunitní systém selže, vznikne nádor
 - Léčba: chemoterapie či ozařování ničí především dělící se buňky

- **Benigní tumor** – masa abnormálních buněk v jinak normální tkáni – dá se zcela odstranit chirurgicky
- **Maligní tumor** – dává vznik rakovině. Často abnormální počet chromosomů, abnormální extracelulární matrix – jednotlivé buňky se snadno dostávají krví nebo lymfou na další místa v organismu a dají vznik metastázám

- **Úvod do dědičnosti**

- Gamety (spermie či oocyty) je možno chápat jako vozidla převážející geny z jedné generace do druhé
- na každém chromosomu jsou stovky či tisíce genů lineárně seřazených
- místo na chromosomu, kde se vyskytuje určitý gen, se nazývá **lokus** (mn.č. loci)

- *Nepohlavní rozmnožování*

- Jedinec je jediným rodičem potomstva a předává mu **všechny** své geny
- eukaryotičtí prvoci se mohou nepohlavně rozmnožovat mitózou
- i někteří mnohobuněční (nezmar) se mohou rozmnožovat tzv. pučením

- *Pohlavní rozmnožování*

- Potomek má novou skladbu genů, neshoduje se ani s jedním rodičem, ani se žádným ze sourozenců

- *Karyotyp*

- V somatické buňce člověka lze v jádře nalézt celkem 46 chromosomů
- tyto chromosomy se odlišují svou velikostí a postavením centromery
- podrobnější zkoumání však prozradí, že každý typ chromosomu se vyskytuje v jedné

buňce dvakrát

- pokud seřadíme všechny chromosomy podle velikosti, vznikne tzv. **karyotyp**
- Dvojice totožných chromosomů se nazývají **homologické chromosomy**
- homologické chromosomy obsahují geny kontrolující tytéž dědičné kvality
- pokud například je na jednom chromosomu lokus obsahující gen ovlivňující barvu očí, pak na homologickém chromosomu bude na témže místě rovněž gen ovlivňující barvu očí

- *Pohlavní chromosomy*

- Důležitou výjimkou jsou pohlavní chromosomy
- ženy mají dva homologické chromosomy označované písmenem X, píšeme tedy XX
- muži mají jeden chromosom typu X a druhý typu Y, píšeme XY
- jen malá část chromosomu Y je homologická s chromosomem X
- většina genů na chromosomu X nemá své protějšky na chromosomu Y
- většina genů na chromosomu Y nemá své protějšky na chromosomu X
- Chromosomy X a Y nazýváme pohlavní chromosomy (gonosomy)
- ostatní chromosomy nazýváme autosomy
- 46 chromosomů v našich buňkách je pozůstatkem našeho sexuálního vzniku: 23 chromosomů jsme zdělili od maminky, 23 chromosomů máme od otce
- gamety (spermie a oocyty) obsahují pouze 23 chromosomů
- Všechny oocyty ženy mají konstelaci 22X
- polovina spermií má konstelaci 22X; druhá polovina má konstelaci 22Y. Spermie se tedy vyskytují ve dvou typech
- pokud je v buňce člověka pouze 23 chromosomů, hovoříme o **haploidní** buňce (n)
- v somatické buňce našeho těla je 46 chromosomů, hovoříme o **diploidní** buňce (2n)

- *Zygota*

- Během pohlavního rozmnožování splývá haploidní spermie s haploidním oocytem za vzniku diploidní zygoty – první buňky nového dítěte
- tato zygota se mitózou rozdělí na dvě, 4,8,16... až dojde k narození dítěte. Proces pak

bude stále pokračovat

- v každé tělní buňce dítěte je tedy přesná kopie genů, které vytvořily zygotu

- *Meióza*
- Jediné buňky v našem těle, které nevznikají mitózou, jsou gamety, které vznikají ve specializovaných orgánech (spermie ve varlatech a oocyty ve vaječnících)
- zatímco mitóza uchovává původní počet chromosomů, meióza redukuje původní počet chromosomů na polovinu
- výsledkem meiosis u člověka je buňka se 23 chromosomy, po jednom z každého homologického páru

- *Pohlavní rozmnožování: opakování*
- Chromozómy jsou v buněčných jádrech somatických (tělových) buněk přítomny vždy v párech. Každý chromozom je tedy v jádře somatické buňky obsažen 2x (1x od „otce“, 1x od „matky“)
- Párové chromozómy nazýváme homologické chromozómy
- Párová přítomnost chromozómů v jádře se nazývá diploidie (2n)
- Pohlavní rozmnožování: opakování
- V jádrech specializovaných pohlavních buněk (gamet) je však z každého páru homologických chromozómů přítomen jen 1 chromozóm. Počet chromozómů je tak snížen oproti somatickým buňkám na polovinu
- Gamety jsou tzv. haploidní (n)
- Ke snížení počtu chromozómů z diploidního stavu na haploidní stav dochází v průběhu tzv. meiózy.

- *Typy pohlavního rozmnožování*
- Člověk (a většina savců): jediné haploidní buňky jsou gamety. Gamety vznikají meiózou a před oplozením již nepodléhají žádnému dalšímu dělení. Diploidní zygota se

rozmnožuje mitózou a vzniká mnohobuněčný diploidní organismus

- Většina hub (Fungi), někteří prvoci (Protista), některé řasy: ihned po vytvoření zygoty následuje meióza. Touto meiózou nevznikají gamety, ale vznikají haploidní buňky, které se dále rozmnožují mitózou. Haploidní organismus pak produkuje gamety mitózou. Jediným diploidním stadiem je zygota
- Pozn. Jak haploidní, tak i diploidní buňka se může rozmnožovat mitózou. Pouze diploidní buňka však, samozřejmě, může podstoupit meiózu
- Rostliny a některé řasy: střídání generací neboli **rodozměna**. Je zde mnohobuněčné haploidní stadium i mnohobuněčné diploidní stadium. Mnohobuněčné diploidní stadium se nazývá **sporofyt**. Sporofyt produkuje meiosou haploidní buňky zvané **spory**. Na rozdíl od gamet je spora schopna se dělit mitózou a dát vznik mnohobuněčnému individuu zvanému **gametofyt**. Haploidní gametofyt tvoří mitózou **gamety**. Splynutím gamet vzniká diploidní zygota, která se dále dělí mitózou za vzniku mnohobuněčného sporofytu.

- *Pohlavní rozmnožování u rostlin*
(užitečné termíny)
- Izogamety = gamety morfologicky nerozlišitelné (zejména u nižších rostlin). Jejich splynutí se označuje jako izogamie
- Anizogamety = gamety od sebe morfologicky odlišitelné. Splynutí anizogamet se označuje jako anizogamie
- Spermatozoidy = samčí pohlavní buňky, opatřené bičíkem a pohyblivé
- Spermatické buňky - nepohyblivé samčí pohlavní buňky
- Oplození samičí vaječné buňky se nazývá oogamie

- **Meióza**

= dvě po sobě následující dělení označované jako

meióza I. (heterotypické)

meióza II. (homeotypické)

V průběhu meiózy vzniknou z jedné diploidní buňky 4 buňky haploidní

- Podobně jako před mitózou, i před meiózou je S-fáze, ve které dojde k replikaci DNA a zdvojení chromosomů
 - tato replikace je ale následována dvěma děleními, zvanými meióza I a meióza II
 - výsledkem jsou 4 buňky, každá s polovičním počtem chromosomů než měla rodičovská
-
- Meióza I.-Interfáze
 - Každý chromosom se replikuje, jako při mitóze, za vzniku dvou geneticky identických sesterských chromatid, které zůstávají spojeny v centromerách
 - centrosomy se rovněž replikují
-
- Meióza I.-Profáze
 - Profáze I. (=profáze prvního meiotického dělení) trvá déle a je komplikovanější než u mitózy – trvá 90% celé meiosis
 - chromosomy se začínají kondenzovat, ale homologické chromosomy jsou těsně u sebe
 - vzniká tzv. **synaptonemální komplex**, který drží homologické chromosomy těsně u sebe.
 - Když v pozdní profázi synaptonemální komplex mizí, homologické chromosomy jsou v mikroskopu viditelné jako tzv. tetrády, shluk čtyř chromatid
 - Na různých místech jsou tyto chromatidy překříženy. Těmto překřížením se říká **chiasmata** (jedn.č.chiasma)
 - chiasmata drží homologické chromosomy těsně u sebe až do anafáze I.
 - V místě chiasmat si homologické chromosomy vyměnily části chromatid procesem zvaným crossing-over
 - vzniká dělicí vřeténko a jaderná membrána zaniká.
 - Mikrotubuly dělicího vřeténka se zachycují do kinetochorů.
 - Chromosomy se začínají přesouvat do ekvatoriální roviny

- profáze I. trvá obecně hodiny nebo i dny a typicky zabírá 90% času celé meiózy

- Meióza I.-Metafáze
- Chromosomy jsou nyní v ekvatoriální rovině, homologické chromosomy stále těsně u sebe
- mikrotubuly jednoho centrosomu jsou připevněny ke kinetochoru jednoho z homologických chromosomů, mikrotubuly druhého chromosomu jsou připevněny ke kinetochoru druhého z homologických chromosomů

- Meióza I.-Anafáze
- Chromosomy se oddělí a směřují k opačným pólům buňky
- sesterské chromatidy ale zůstávají u sebe a chromosom se nedělí, putuje celý k jednomu pólu buňky – jeho homolog putuje ke druhému pólu
- Poznámka: toto je rozdíl oproti mitóze, kde se v ekvatoriální rovině nachází chromozómy jako individua, nikoli v homologických párech. Při mitóze se také jeden chromosom rozdělí v místě centromery na dva, v meióze I. nikoli.

- Meióza I.-Telofáze a cytokinese
- Na každém pólu buňky je nyní jedna haploidní sada chromosomů. Z homologního páru se přesunul jeden chromosom k jednomu pólu buňky, druhý ke druhému
- každý z chromosomů je ovšem stále tvořen dvěma sesterskými chromatidami
- během telofáze I. následuje zpravidla cytokinese

- Meióza II.-Profáze
- Před meiózou II. není S-fáze (=replikace genetického materiálu)
- Vytváří se dělicí vřeténko a chromosomy migrují do ekvatoriální roviny

- Meióza II.-Metafáze
- Kinetochory sesterských chromatid jsou připevněny k mikrotubulům opačných centrosomů, podobně jako při mitóze
- Meióza II.-Anafáze
- Centromery sesterských chromatid se oddělují a sesterské chromatidy - nyní samostatné chromosomy - putují k opačným pólům buňky

- Meióza II.-Telofáze a cytokinese
- Na opačných pólech buňky se tvoří jádra
- výsledkem jsou tedy čtyři buňky, každá s haploidním počtem chromosomů

- *Mitóza a meióza srovnání*

- (1) Během profáze I. meiózy vyhledá každý chromosom svého homologa v procesu zvaném synapse. Vytváří se synaptonemální komplex, při kterém proteinový „zip“ spojí oba homologní chromosomy těsně k sobě podél celé jejich délky. V pozdní profázi synaptonemální komplex mizí a homologní páry jsou v mikroskopu vidět jako tetrády.
- ve světelném mikroskopu jsou rovněž patrné struktury ve tvaru písmene X zvané chiasmata
- chiasmata představují překřížení dvou nesesterských chromatid homologních chromosomů
- chiasmata představují „přeskládání“ genetické informace, známou jako crossing-over
- synapse, chiasmata, crossing-over se objevují pouze v profázi I. meiózy, a nikdy při mitóze
- (2) v metafázi I. meiózy se v ekvatoriální rovině formují dvojice homologních chromozómů, nikoli individuální chromosomy jako při mitóze
- (3) při anafázi I. meiózy se sesterské chromatidy neoddělují a k pólům buňky přesunují

celé chromosomy

- **Sex vytváří genetickou variabilitu**

- nezávislá segregace chromosomů
- crossing over
- náhodné oplození

- *Princip nezávislé segregace*

- v metafázi I. meiózy se homologní chromosomy seřazují v ekvatoriální rovině (z páru homologů máme jeden od otce, druhý od matky)
- orientace homologního páru vzhledem k pólům buňky je však náhodná
- konkrétní pól buňky tak má šanci „padesát na padesát“, že získá z daného páru chromosom od otce a „padesát na padesát“, že z jiného páru bude mít chromosom od matky
- protože jednotlivé homologní páry na sobě nezávisí, a mají různou orientaci, k pólu buňky, chromosomy původně otcovské a mateřské se náhodně segregují
- máme-li dva homologní páry, jsou možné 4 kombinace
- máme-li 23 homologních párů (jako u člověka), počet kombinací je 2^n , což je... 2^{23} , což je...
- ... přesně 8 388 608 možných kombinací!
- každá lidská gameta (spermie či vajíčko), tak představuje jednu z 8 388 608 možných uspořádání chromosomů

- *Crossing-over*

- při úvahách o nezávislé segregaci jsme přirozeně předpokládali, že z homologního páru chromosomů dědíme jeden od otce, jeden od matky
- nesmíme ovšem zapomínat, že při crossing-overu si jednotlivé nesesterské chromatidy homologních chromosomů vyměňují části chromatid...

- ...což počet možných kombinací ještě mnohonásobně zvyšuje
 - u člověka se počet crossing-overů odhaduje na 2 až 3 na jeden homologní pár
 - = asi jeden na oblast centromera - telomera
 - u mužů nastává asi 50 rekombinací na meiosu (na všech chromosomech dohromady), u žen 80 rekombinací
 - ...u žen je 1,65x víc rekombinací než u mužů!
 - rekombinace jsou častější u telomer
 - na nejmenších chromosomech jsou rekombinace (na počet pb) častější než na dlouhých chromosomech
 - existují „rekombinační hotspots“ a „rekombinační pouště“
 - (mezi nimi je asi 1000 násobný rozdíl v pravděpodobnosti rekombinace)
-
- *Náhodné oplození*
 - zygota ovšem vzniká kombinací dvou gamet, spermií a vajíčka
 - pokud existuje 8 388 608 možných kombinací jedné gamety, pak existuje $2^{23} \times 2^{23}$ možných kombinací - víc než 70 000 000)
 - proto není divu, že sourozenci vždycky budou od sebe odlišní
 - výsledek: *jsme jedineční*
 - ... a to jsme ještě neuvažovali mutace, které počet možných kombinací ještě zvyšují
-
- *Problém hepatocytů*
 - pokud dojde k poranění jater, či k odstranění části jater, játra znovu dorostou
 - játra jsou tak jediný orgán v dospělém těle, který umí dorůst do původní velikosti
 - ...na rozdíl od amputované ruky
 - jsou zde velmi specializované buňky zvané hepatocyty, které se v případě poranění začnou znovu dělit
 - jak ovšem hepatocyty poznají, že se mají dělit takto a ne dále je tajemstvím
 - existuje snad někde „v plánech“ trojrozměrný obraz jater, který buňky znají?

- *Erythrocyty*
- v jednom litru krve je cca 5×10^{12} erytrocytů
- jeden erytrocyt žije cca 120 dní
- počítejme že člověk má cca 10 litrů krve (o něco méně)
- pak nám vyjde, že každou hodinu vzniká $1,6 \times 10^{10}$ nových erytrocytů!