

**Model meiózy**

Kat. číslo 1037492

**Meióza**

Meióza neboli redukční dělení je zvláštní forma dělení buněk. V závislosti na organismu a typu buňky může trvat několik dní až let a vede k vytvoření pohlavních buněk (gamet). Z každého gametocyty vzniknou redukčním dělením čtyři gamety. Obecně se rozlišují dva druhy gamet. Velké nepohyblivé buňky se nazývají vaječné buňky neboli oocyty a malé pohyblivé gamety jako samčí buňky neboli spermatocyty.

Vaječné buňky vznikají meiotickým dělením z gametocytů ve vaječnících (ovariích). Dozrávání lidských vaječných buněk začíná již v embryu (3. – 8. měsíc těhotenství), přičemž buňky zůstanou až do pohlavní zralosti v meiotickém mezistadiu. Od tohoto okamžiku dokončí některé z nezralých vaječných buněk v periodických intervalech a pod kontrolou hormonů meiotické dělení. Dozrávání lidských samčích buněk probíhá po zahájení puberty v pravidelných intervalech ve varlatech (testes). Kompletní meiotické dělení trvá v tomto případě 20-24 dní.

Tělesné buňky (např. gametocyty) obvykle obsahují dvojitou (diploidní) sadu chromozómů, přičemž jedna polovina chromozómů pochází od matky a druhá polovina od otce. Každý chromozóm se proto vyskytuje jako dvojitá kopie, to znamená jako odpovídající (homologní) pár chromozómů. Gamety naproti tomu obsahují jen jednoduchou (haploidní) sadu chromozómů. Jinak řečeno, vaječné buňky nebo spermie obsahují jen polovinu genotypu matky nebo otce, takže splynutím obou buněk může vzniknout nová buňka (zygota) s kompletní, diploidní sadou chromozómů.

Smysl meiózy tak spočívá v tom, že se obvykle diploidní sada chromozómů gametocytu redukuje na haploidní sadu, aby byl zaručen předpoklad sexuálního rozmnožování. Další důležitou funkcí meiózy je smíchání genotypu, kterého je dosaženo pomocí dvou mechanismů: náhodného dělení chromozómů matky a otce na vznikající pohlavní buňky a výměny genů mezi homologními chromozómy (genetická rekombinace).

(Základní procesy obou mechanismů budou vysvětleny později v rámci popisu jednotlivých stádií.)

U člověka, s počtem 23 chromozómů v haploidní sadě, vyplývá z vlastního náhodného dělení chromozómů  $2^{23}$ , tzn. cca  $8,4 \times 10^6$ , různých možností genetických variací. Rozmanitost variací se přitom podstatně zvyšuje na základě výměny genů mezi chromozómy.

Před meiotickým dělením se gametocyty nacházejí ve stadiu interfáze, která definuje období mezi dvěma děleními buněk (miotickými nebo meiotickými). Interfázi můžeme rozdělit na tři stádia:

- **G1 fáze (presyntetická fáze):** V tomto stadiu roste buňka.
- **S fáze (syntetická fáze):** Zde se začínají zdvojovat centrioly a DNA (kyselina deoxyribonukleová).
- **G2 fáze (postsyntetická fáze):** Tato fáze odděluje konec syntézy DNA od fáze dělení. V této fázi je navíc ukončeno zdvojování centriol.

Meiózu, která navazuje na interfázi, lze rozdělit na dvě po sobě následující zrací dělení, která jsou od sebe oddělena krátkou speciální interfází (interkinezí). Stejně jako u mitózy se při každém zracím dělení rozlišují různá stádia dělení:

### **Zrací dělení I**

- Profáze I (čtyři dílčí úseky: leptoten, zygoten, pachyten a diploten s diakinezí)
- Metafáze I
- Anafáze I
- Telofáze I
- Cytokineze I

## Interkineze

### Zrací dělení II

- Profáze II
- Metafáze II
- Anafáze II
- Telofáze II
- Cytokineze II

Modely meiózy řady 3B Scientific® (číslo výrobku R02) nebo nástěnná mapa meiózy (V2051M, V2051U) ukazuje typickou buňku savce v cca 10 000násobném zvětšení. Ve spodní třetině modelů/obrázků jsou znázorněny otevřené buněčné organely.

Modely meiózy řady 3B Scientific® dodáváme v úložném systému, který je vybaven závěsným zařízením. Modely této řady tak můžete také snadno a skladně zavěsit na zeď. Modely jsou na zadní straně opatřeny magnety a dají se pro vyučování umístit na magnetické tabule ve třídě.

Na konci tohoto popisu najdete obrázky 10 vyobrazených stádií, které můžete použít jako kopírovací předlohu pro Vaše vyučování. Vymalováním, popsáním a správným seřazením jednotlivých stádií si mohou Vaši žáci osvojit a prohloubit naučenou látku.

Barevné obrázky jednotlivých stádií získáte také zdarma na internetu na adrese [www.3bscientific.com](http://www.3bscientific.com).

### 1. Interfáze, stádium G<sub>1</sub> fáze

Uvnitř buňky můžete vidět buněčné jádro s nukleolem (jadérkem) (1) a obalem jádra (2). V buněčném jádru se nachází dosud despiralizovaná DNA (3) s genetickou informací.

Stabilitu a tvar samotné buňky zajišťují velmi tenké trubičky, takzvané mikrotubuly (4), které protkávají buněčnou plazmu. Mikrotubuly řídí mimo jiné pohyb buňky a vnitrobuněčné transportní procesy.

V buněčné plazmě lze rozeznat endoplazmatické retikulum (5). Je to propletený systém trubic, který slouží převážně k syntéze lipidů, jako zásobník iontů a k přeměně a přepravě určitých proteinů. Na membráně drsného endoplazmatického retikula se nacházejí ribozomy, které syntetizují proteiny, jež pronikají endoplazmatickým retikulem.

Golgiho aparát (6) můžeme označit také jako určitý druh „buněčné žlázy“. Je to soustava na sobě navrstvených dutých tělísek (Golgiho cisteren), které se nafukují do malých váčků a odštěpují se (Golgiho vezikuly) (7). Endoplazmatické retikulum dodává do Golgiho

aparátu stavební prvky membrány a enzymy. Hlavním úkolem Golgiho aparátu je shromažďování, balení a transport sekretů a tvorba lyzozomů (trávicích vakuol) (8). Hlavním úkolem lyzozomů je odbourávání buněčných složek (=vnitrobuněčné trávení). Získávání energie u buněk zajišťují mitochondrie (9). Úkolem centriol (10) je vybudovat dělicí vřeténko. Jsou to duté válce, které jsou vytvořeny z podélných trubic (mikrotubulů).

## **2. Profáze I**

Profáze prvního zracího dělení představuje nejdelší časový úsek meiózy. V průběhu této fáze mění chromozómy a chromatin v určitém pořadí svoji strukturu a uspořádání v buněčném jádře. Proto se profáze I člení na čtyři dílčí úseky (leptoten, zygoten, pachyten a diploten s diakinezí). Na rozdíl od mitotické profáze, která trvá několik hodin, může meiotická profáze I potřebovat celé dny, týdny, měsíce nebo roky.

### **Leptoten**

Na začátku profáze I (leptoten) lze rozeznat nukleoly (buněčná tělíska) (1) a obal jádra (2). Chromozómy (3) jsou nyní viditelné jako jednotlivá dlouhá, tenká vlákna. Jejich konce jsou ukotveny do jaderné membrány. Každý chromozóm byl již replikován (zdvojen) v interfázi a skládá se ze dvou sesterských chromatid, které však leží tak těsně vedle sebe, že je nelze od sebe rozlišit. Centrioly byly rovněž v interfázi zdvojeny. Oba páry (4) se začnou od sebe vzdalovat ve směru k druhému pólu buňky. Mezi nimi se začne vytvářet takzvané dělicí vřeténko (5), které sestává z mnoha mikrotubul.

## **3. Zygoten a pachyten**

Jako zástupce ostatních chromozómů je v různých barvách zobrazen vždy jeden homolog matky (1) a jeden homolog otce (2) (sestavující ze dvou sesterských chromatid) jednoho páru chromozómů (celkem 2 x 23).

### **Zygoten**

Fáze zygotenu je zahájena, jakmile se homologní chromozómy začnou usazovat těsně vedle sebe, aby vytvořily synaptonemální komplex (3) (paralelní uspořádání homologních partnerů). Tento proces většinou začíná na koncích chromozómů a pokračuje, na podobném principu jako zip, na druhý konec. Párování chromozómů (synapse) probíhá s vysokou přesností, takže příslušné geny homologních chromozómů leží přímo naproti sobě. To je důležitým předpokladem pro rekombinovanou výměnu úseků genů (crossing over). Každý homologní pár chromozómů v meiotické profázi I se obvykle nazývá bivalent; protože však každý homologovaný chromozóm tvoří těsně vedle sebe ležící sesterské chromatidy, hovoříme zde také o tetradách.

### **Pachyten**

Jakmile jsou zcela vytvořeny všechny synaptonemální komplexy, tzn. homologní chromozómy se zcela navrství na sebe, je dosažena fáze pachytenu. Na

synaptonemálních komplexech jsou nyní v rozestupech viditelné rekombinační uzly (4), v nichž probíhá výměna úseků genů.

#### **4. Diploten**

Po výměně některých úseků genů se homologní chromozómy (1) stále více od sebe odlučují, zůstanou však nejprve spojeny v jednom nebo více bodech překřížení (chiazmatické můstky nebo chiazmata) (2). Na chiazmatických můstcích proběhla nejprve genetická rekombinace (výměna genetické informace matky a otce). Vaječné buňky mohou ve stavu diplotenu setrvávat měsíce až roky.

#### **5. Diakineze**

Konec meiotické profáze I je zahájen uvolněním chromozómů z obalu jádra (1). Chromozómy se zhušťují a sesterské chromatidy, které jsou spojeny pomocí centromerů (krátké sekvence DNA bohaté na AT), jsou viditelné. Nesesterské chromatidy, v nichž proběhla výměna úseků genů, jsou i nadále vzájemně spojeny chiazmatickými můstky (3). Profáze I přechází do metafáze I. Nyní ještě zbývající meiotické fáze vyžadují méně než 10 % potřebného celkového času kompletní meiózy.

#### **6. Metafáze I**

Na přechodu z profáze I do metafáze I doputovaly páry centriol (1) na oba protilehlé póly buňky. Vytvořilo se ústřední vřeténko a obal jádra (2) se rozpadl. Chromozómy se seřadí do ekvatoriální roviny. Vytvoří takzvanou metafázní desku. Při pohledu shora vypadají chromozómy jako hvězdicové útvary (monaster nebo „mateřská hvězda“). Kinetochory (3) jsou proteinové komplexy, které se již vytvořily na centromerech. Zvláštností meiotické metafáze I je, že kinetochory každého páru sesterských chromatid vypadají jako splynuté. Mikrotubuly (4) dělicího vřeténka, které jsou nyní napojeny přesně na kinetochorech každého páru sesterských chromatid (5), proto mají všechny stejný směr. Chiazmatické můstky (6) jsou stále ještě zachovány. Hrají důležitou roli pro správné seřazení homologních chromozómů v ekvatoriální rovině.

Endoplazmatické retikulum (7) a Golgiho aparát (8) jsou nyní téměř zcela odštěpené.

#### **7. Anafáze I**

V anafázi I meiózy se od sebe odlučují homologní chromozómy (1) a nikoliv sesterské chromatidy jako v mitóze. Chiazmatické můstky, které držely pohromadě homologní chromozómy matky a otce, se přitom uvolní.

Některé mutantní organizmy, u nichž dochází k meiotickému překřížení (crossing over) jen v omezené míře, mají páry chromozómů bez chiazmatických můstků. Tyto páry se od sebe většinou neoddelují správně (nondisjunction) a výsledné dceřiné buňky obsahují o jeden chromozóm méně nebo více. Takovou chybnou tvorbu nazýváme numerická chromozomální aberace, která vede k chybným tvorbám.

Oddělování začíná u kinetochorů (2), v místě uchycení tažných vláken dělicího vřeténka. Mikrotubuly (3), které se zkracují a vyvíjejí tím tah, odtud poté pomalu táhnou chromozómy k centriolám (4) ležícím na pólech buňky. Mikrotubuly (5), které nejsou spojeny s chromozómy, se nyní prodlužují, takže se vzdálenost mezi centriolami zvětšuje a buňka se roztahuje do délky. V ekvatoriální rovině lze rozeznat náznak šňěrovací rýhy (6).

Překřížením (crossing over) provedeným v profázi a případným rozdělením chromozómů matky a otce vždy na jeden z buněčných pólů dojde k variaci genotypu (viz úvod).

## **8. Telofáze I, cytokineze I, interkineze, profáze II a metafáze II**

### **Telofáze I a cytokineze**

V telofázi I zanikne ústrojí vřeténka a v ekvatoriální rovině vznikne zářez (1). Vytvoří se také tenká jaderná membrána (2). Tělo buňky se během navazující cytokineze rozdělí přesně uprostřed, na zářezu mezi oběma nově vznikajícími dceřinými jádry (3). Dceřiná jádra obsahují vždy sadu chromozómů matky nebo otce mírně změněnou překřížením, přičemž DNA je již zdvojená, to znamená, že chromozóm se skládá ze dvou sesterských chromatid (4).

Endoplazmatické retikulum (5) a Golgiho aparát (6) opětovně dosáhly svého počátečního tvaru a velikosti.

Na konci cytokineze je dokončeno první zrací dělení.

### **Interkineze**

První a druhé zrací dělení jsou od sebe vzájemně oddělena krátkou přestávkou (interfází). Zdvojení chromozómů sestávajících ze dvou chromatid však neproběhne (žádná S fáze). Díky centromerům (7) zůstanou obě sesterské chromatidy každého jednotlivého chromozómu vzájemně spojené.

### **Zrací dělení II**

Druhé zrací dělení probíhá stejně jako mitóza (běžné dělení jádra a buňky). Proto se nazývá také ekvační dělení. Protože se během předcházející interkineze chromozómy znovu nezdojnásobily, dochází při tomto druhém meiotickém dělení k redukci genotypu na haploidní sadu chromozómů.

### **Profáze II**

Profáze II odpovídá v podstatě profázi mitózy a probíhá ve všech organizmech velmi rychle. Propustnost povrchu buňky se zvětšuje, aby buňka mohla pohltnout kapalinu z okolí. Mikrotubulární aparát cytoskeletu se přeskupí. Jaderná membrána se uvolní a z nově uspořádaných mikrotubulů se vytvoří vřeténko.

**Metafáze II**

V metafázi II jsou chromozómy opět uspořádány v ekvatoriální rovině a oba konce vřeténka leží na protilehlých pólech (analogicky k metafázi I). Podstatný rozdíl oproti metafázi I spočívá v tom, že se na sesterských chromatidách vytvořily dva kinetochory, které tentokrát směřují k opačným pólům.

**9. Anafáze II**

V následné anafázi II se obě sesterské chromatidy (1) každého chromozómu od sebe vzájemně oddělí jako při mitóze.

Oddělování začíná u kinetochorů (2), v místě uchycení tažných vláken dělicího vřeténka. Mikrotubuly (3), které se zkracují a vyvíjejí tím tah, odtud poté pomalu táhnou chromozómy k centriolám (4) ležícím na pólech buňky. Mikrotubuly (5), které nejsou spojeny s chromatidami, se nyní prodlužují, takže se vzdálenost mezi centriolami prodlužuje a buňka se roztahuje do délky. V ekvatoriální rovině lze rozeznat náznak šňěrovací rýhy (6).

**10. Telofáze II a cytokineze II**

Vytvořením zářezu a dělením obou buněk vzniklých z prvního zracího dělení vzniknou nyní čtyři haploidní buňky (1) s různou kombinací genů způsobenou náhodným rozdělením chromozómů a překřížením. To vysvětluje, proč nejsou sourozenci úplně stejní: jedno dítě je podobné spíše otci, druhé dítě zase matce. Mohou se však vynořit také různé rysy předků.