

På opdagelse i gernerne

- DNA (molekyle): arvemateriale
- Alle vore celler er genetisk set identiske
- DNA: genetiske opskrifter - kokebog for cellerne = genregulering
 - Opskrift på forskellige proteiner
 - Vejledninger til cellen: hvilke opskrifter hvornår etc.

Kromosomerne

- DNA kan farves med forskellige farvestoffer og undersøges med lysmikroskop
 - Her ser man kromosomerne
- Kromosom betyder 'farvet legeme'
- Består af dobbeltstrengt DNA-molekyle vilket omkring histoner (proteiner), se fig 228b
- Når en celle deler sig i to får den nye celle den samme DNA som den oprindelige celle
 - Når delingen skal finde sted er DNA-molekylet spiraliseret, dvs. snoet op omkring sig selv
 - Deler sig og kommer til at ligne et X
- De to identiske arme kaldes søsterkromatider+p
- Vha. mitose deler cellen sig i to, og kromosomet deler sig også i to
- Mennesker er diploide = i hver cellekerne har de to sæt kromosomer (forældre)
- Æg- og sædcellerne er haploide (kun ét sæt kromosomer)
- Når æg- og sædcelle mødes og danner en zygote bliver den diploid
- Menneskets 22 kromosompar (44 kromosomer, dem alle har) kaldes autosomer - gener på disse kromosomer nedarves autosomt
- En kvinde har desuden to X-kromosomer, mens en mand har et X og et Y
- Y-kromosomet nedarves udelukkende fra far til søn
- Ploiditet
 - Haploid: n: en celle har 23 kromosomer - kønsceller, der deler sig ved meiose
 - Diploid: 2n: en celle med to sæt kromosomer, altså 46 kromosomer, somatiske celler, der deler sig med mitose

DNA

- Deoxyribose Nucleic Acid - deoxyribonukleinsyre
- Består af to enkelt DNA-strengte viklet om hinanden
- DNA-strengen er opbygget af skiftevis fosfat og et sukkerstof (deoxyribose), hvorpå der er bundet fire kvælstofholdige baser
 - Adenin, cytosin, guanin og thymin (A, C, G og T)
- Nukleotid: en enhed af fosfat og deoxyribose bundet til en af de fire baser (4 mulige)
- DNA-streng kan bestå af flere hundrede millioner nukleotider - den indbyrdes rækkefølge bestemmer en celleds genetiske opskrift (dermed egenskaber)
- De to DNA-strengte er viklet om hinanden således, at strengenes baser peger ind mod hinanden og danner svage hydrogenbindinger
- A sidder altid over for T (2 bindinger), C altid over for G (3 bindinger) (=baseparringsprincippet)
 - De to strengte er komplementære

Cellens livscyklus (24 h)

- Hvis der opstår fejl i reguleringen af cellens livscyklus kan det medføre alvorlige konsekvenser - evt. udvikler cellen sig til en kræftcelle
- Cyklussen består af to overordnede faser, der gennemløbes flere gange (interfasen og delingsfasen)

Interfasen

- Her er cellerne det meste af deres levetid
- Udfører de fleste af dens funktioner
- Kopierer DNA - gør sig klar til deling
- Inddeles i fire underordnede faser:
 - G1 - vækstfasen (13 h)
 - Vokser, danner mitokondrier, ribosomer, andre nødvendige cellestrukturer
 - Særlige signalstoffer får cellen til at skifte til næste fase
 - G0 - den funktionelle fase
 - Udfører sine særlige funktioner i kroppen
 - Størstedelen af en voksen persons celler er i denne fase det meste af tiden
 - Ændring af udefrakommende signaler kan få cellen til at skifte til:
 - S - forberedelsesfasen (7 h)
 - Cellen laver en komplet kopi af sit DNA (vha. DNA-replikation)
 - Det X-formede kromosoms to identiske kopier kaldes i denne form kromatider
 - G2 - kontrolfasen (3 h)
 - Cellen kontrollerer, at kopieringen af DNA'et er sket korrekt
 - Cellen forsøger at reparere evt. fejl
 - Hvis den ikke kan reparere fejlen begår den selvmord (ved apoptose)
 - Hvis cellen godkendes skifter den fra interfasen til delingsfasen (M-fasen - 1 h)

DNA-replikation

- De to komplementære DNA-strengene i molekylet splittes i to, og vha. baseparringsprincippet dannes en ny komplementær streng

Mitose

- Cellerne deler sig mange gange
- I løbet af en graviditet deler barnets celler sig mange milliarder gange - zygoten omdannes til en baby
- Et voksent menneske består af 10-100 bio. celler
- De to identiske kopier af kromosomerne hænger sammen i centromeret (i midten)

Mitosens fire faser

- Profase
 - DNA-molekylerne spiraliseres - X-formede kromosomer bliver synlige i cellekernen
 - Uden for cellekernen findes to centrioler, der i profasen bevæger sig mod hver sin ende af cellen
- Metafasen

- Kerne membranen opløses - kromosomerne ligger frit i cellens cytoplasma
- Mellem centriolerne og centromerområdet dannes tynde elastiske proteintråde (=tentråde). Disse placerer kromosomerne på en lang række
- Anafasen
 - Tentrådene trækker sig langsomt sammen
 - De to identiske kromatider adskilles
- Telofasen
 - Starter når begge celler indeholder et komplet sæt kromatider
 - To nye kernemembraner dannes
 - Cellens midterplan indsnævres, så cellen til sidst deler sig i to
 - De to nye celler starter nu i interfasen

Arvematerialet indeholder gener

- Genom: organismens genom - den samlede mængde arvemateriale i en haploid kønscelle
- Hos mennesket: 3 mia. basepar fordelt på 23 kromosomer
- Somatiske celler (kropsceller) indeholder to udgaver af genomet - diploide
- Samspillet mellem de to ikke helt ens udgaver af genomet bestemmer et individs genetiske egenskaber

Genet

- Før DNA blev opdaget blev genet betragtet som en afgrænset arvelig enhed, der giver en organisme en bestemt egenskab
- Et gen er en afgrænset del af et DNA-molekyle - indeholder opskriften på et bestemt protein - giver organismen en bestemt egenskab
- Genom: en genetisk kokebog i 23 bind
- Hver somatisk celle: indeholder to udgaver - to udgaver af alle opskrifter

Proteiner og det centrale dogme

- Proteiner udfører mange opgaver i organismen
- En menneskecelles arvemateriale indeholder ca 20.000 forskellige proteinkodende gener
 - 20.000 opskrifter på unikke proteiner
 - Hvordan skal et protein opbygges? Hvornår? Hvor? Hvor meget?
- Proteinsyntesen foregår altid på samme måde
 - DNA'et aflæses i cellekernen
 - Genet kopieres i form af et RNA-molekyle = transskription
 - RNA er magen til DNA, blot er thymin udskiftet af uracil og deoxyribose er erstattet af ribose. RNA er enkeltstrenget, DNA er dobbeltstrenget.
 - RNA-kopien fragtes ud af cellekernen til ribosomet - afkodes og bestemmer rækkefølgen af aminosyrer i det færdige protein = translation
- Ovenstående kaldes **det centrale dogme** fordi det er så vigtigt i biologien

Proteinsyntesen

- Proteinsyntesen aflæser og oversætter de opskrifter, der findes i arvematerialet til proteinerne
- Først transskription, dernæst translation

Transskription og splejsning

- Betyder: afskrivning
- Enzymet RNA-polymerase aflæser og kopierer genet
- DNA-molekylet åbnes i området for det pågældende gen
- Genet findes kun på den ene af de to strenge, og den pågældende streng kaldes for den kodende streng
- Den komplementære streng kaldes for skabelonstrengen
- RNA-polymerase bevæger sig hen af strengen og påsætter de komplementære baser
- Den nye RNA-streng kaldes for det primære transskript
- Til sidst: ikke kodende dele - introns - skæres ud ved splejsning
- Det splejsede RNA kaldes messenger RNA = mRNA - fragtes ud af cellekernen til ribosomerne klar til næste trin

Translation

- Betyder: oversættelse
- Opskriften skal omsættes til et protein
- Gen-opskriften er skrevet med A, C, G og U, men proteinerne er opbygget af op til tyve byggeklodser: aminosyrer
- mRNA'et bindes til ribosomet og trækkes igennem det
- Tre baser aflæses ad gangen - tripletter eller codons
- Hver codon koder for en af de 20 aminosyrer
- Aminosyrerne bindes løbende sammen til en voksende polypeptid-streng
- Den første aminosyre i polypeptid-kæden er methionin - oversættelsen starter når ribosomet finder et startcodon i mRNA - startcodon (ATG) koder for methionin
- Før startcodonet sidder der en promotor (sørger for at RNA polymerase og strengen mødes) - indeholder en TATA-boks
- Processen fortsætter et codon ad gangen indtil der kommer et stopcodon (UAG, UGA, UAA)
- Resultatet er et pre-mRNA og består af exons (kodende DNA) og introns (ikke-kodende DNA)
 - Alle introns fjernes så man får et modent mRNA, som kun består af exons
- Så frigives den færdige polypeptidkæde fra ribosomet og den foldes så proteinet får sin endelige 3d-struktur
- tRNA (transfer RNA)-molekyler kobler et bestemt codon og en bestemt aminosyre
- De kan oversætte en bestemt codon til en bestemt aminosyre
- To aminosyrer danner en peptidbinding så rækken bindes sammen
- Et anticodon kan binde til kun et codon
- Hvert tRNA bærer en bestemt aminosyre og dens anticodon bestemmer, hvornår den kan påsættes polypeptidkæden
- Der kan dannes 64 forskellige codons og tilsvarende anticodons
- tRNA-molekylet kan genbruges gang på gang idet de efter brug sendes ud i cellen igen og bliver sammenkoblet med den samme type aminosyre som før

Genetik og genetiske egenskaber

- Genetik: opstille simple modeller - forudsigelse af hvordan egenskaber nedarves => sandsynlighedsregning
- Gregor Mendel: udviklede den klassiske genetik i midten af 1800-tallet

- kendte ikke til DNA, kromosomer eller proteiner
- Klassisk genetik: kan forudsige, men ikke forklare
- Vi har alle to udgaver af vores genom
 - Én undtagelse: Mænd har to forsk. kønskromosomer - kun én udgave af gener på X- og Y-kromosomerne
- Arvegangen for gener på kromosom 1-22: autosomal nedarvning - de kromosomerne kaldes "autosomer"
- Variant af bestemt gen: *allel* - arvet en kopi af hvert gen fra far og mor - to alleler i hvert genpar
- Kombinationen af de to alleler: et individs genotype i dette genpar
- To ens alleler: homozygot modsat: heterozygot
- En egenskab, der skyldes en given genotype: fænotype
 - Ex: blodtype, øjenfarve, hårfarve
- I de fleste heterozygote tilfælde vil den ene allel (dominant) dominere over den anden (recessiv)
- Dominerende allel bestemmer fænotype

Øjenfarve - et eksempel på en genetisk egenskab

- Kromosom 15: gen: OCA2 (to alleler) - påvirker produktionen af brunt farvestof i øjets iris
 - Den ene allel: normal produktion - brune øjne
 - Den anden allel: nedsat produktion - blå øjne
- Brune øjne: dominant, kaldes B. Blå øjne: recessiv, kaldes b
- Tre mulige genotyper: BB, Bb, bb
 - BB + Bb: Brune øjne
 - bb: blå øjne

Nedarvningsmønstre for monogene egenskaber

- Hvis en egenskab eller en genetisk sygdom kun bestemmes af ét gen: monogen egenskab/sygdom
- Øjenfarve, hårfarve, hårtype, tungerulning, fregner m.fl. er IKKE NØDVENDIGVIS monogene
- Laktoseintolerans - monogen egenskab
 - >50 % af verdens befolkning kan ikke nedbryde laktose
 - Mange europæere: særlig variant af genet MCM6 (kromosom 2) - laktosetolerans
 - Laktoseintolerans: nedarves autosomt recessivt: t
 - Laktosetolerans: dominant: T
 - Tre muligheder: TT, Tt, tt
 - To laktosetolerante forældre med heterozygote MCM6-gener: 25 % chance for l.intolerant barn
 - Mendel arbejdede med ærteplanter og regnede sandsynligheder

Mendels 1. lov - kønscelleloven

- Der dannes lige mange kønsceller med hver af de to alleler
- Hun- og hankønsceller forenes tilfældigt ved befrugtning
- En kønscelle indeholder kun én allel
- Der produceres lige mange celler med t og T
- Der er 50 % for t i sæd og 50 % for t i æg

- Sandsynelighed for tt: $50 \% * 50 \% = 25 \%$
- tilsva.: TT = 25 %
- Sandsynelighed for homozygot (tt eller TT): 50 % ==> heterozygot (Tt): 50 %
- TT og Tt = l.tolerans = 75 %

Krydsningsskemaer

- Viser det forventede udfald af en krydsning ml. to individer

Fregner

- Regnes for nemhedens skyld som monogen
- Styres af MC1R (kromosom 16)
- Fregner: F, ikke fregner: f
- Ved to alleler og et gen: 4 mulige kombinationer, FF, Ff, Ff, ff
- $\frac{1}{4}$ FF, $\frac{1}{2}$ Ff, $\frac{1}{4}$ ff => 1 FF : 2 Ff : 1 ff => 1:2:1 - det genotypiske udspaltningsforhold
- $\frac{3}{4}$: fregner, $\frac{1}{4}$: ingen fregner => 3:1 - det fænotypiske udspaltningsforhold

Stamtavler

- Stamtavle viser de enkelte individers fænotyper i en familie
- Mænd: firkanter, kvinder: cirkler (side 189). Generationer benævnes med romertal, ældste først

Føllings sygdom

- Føllings sygdom: defekt i genet PAH (kromosom 12)
- PAH koder et enzym, der omdanner fenylalanin til andre vigtige stoffer
- Uden dette enzym ophobes giftige mængder af fenylalanin i kroppen => mental retardering tidligt i livet
- Ved analyse af stamtavler leder man efter den simpleste genetiske model, der nogenlunde sandsyneligt kan forklare arvegangen
- Føllings sygdom nedarves autosomt recessivt

Kønsbundne egenskaber

- = genet for denne egenskab ligger på X- eller Y-kromosomet
- Ikke så relevant med Y-kromosomet, da det kun nedarves fra far til søn
- En recessiv egenskab hos mænd kan ikke skjules når den sidder på X-kromosomet, fordi de kun har én kopi af X.
- Recessive X-bundne egenskaber kommer oftere til udtryk hos mænd end hos kvinder, fx farveblindhed eller hæmofili

Nogle egenskaber bestemmes af flere gener

- ... langt de fleste egenskaber
- Mendels 2. arvelov: Gener for forskellige egenskaber fordeles uafhængigt af hinanden ved dannelsen af kønsceller

Blodtyper

- På oversiden af røde blodlegemer: glykoproteiner - molekyle sammensat af protein

- og kulhydrat
- Flere forskellige typer - genetisk bestemte
- Flere forskellige blodtypesystemer

ABO-systemet

- Type bestemmes af et gen på kromosom 9
 - Findes i tre udgaver I^a, I^b og i (nul)
 - I^a og I^b koder for hver deres specielle glykoprotein, i for intet glykoprotein
 - i er recessiv mens I^a og I^b er co-dominante
- Glykoproteinerne bruges af immunforsvaret til at adskille fremmede celler fra egne celler
 - Kaldes derfor også for antigener
- Fænotyper (blodtyper):
 - A
 - Genotyper: I^a I^a, I^a i
 - B
 - Genotyper: I^b I^b, I^b i
 - AB
 - Genotyper: I^a I^b
 - 0
 - Genotyper: ii

Rhesus-systemet

- Rhesusgenet sidder på kromosom 1 - to varianter
- Dominant: rhesus positiv (D)
- Fænotyper (blodtyper):
 - Rh+
 - Genotyper: DD, Dd
 - Rh-
 - Genotyper: dd

Jeg har: A+

Blodtypebestemmelse og -genetik

- Kan beregne de forventede geno- og fænotypiske udspaltningsforhold for afkom
- Mendels 1. og 2. lov => fordelingen af det ene gens alleler har ingen indflydelse på fordelingen af det andet gens alleler

De grønne øjne

- Øjenfarve: flere gener
- Modellen for monogene egenskaber udvides med et ekstra gen, G el. g
- Genotypen i de to gener påvirker hinanden - den resulterende fænotype afhænger af begge gener på én gang
- Dominansforhold for øjenfarve: brun > grøn > blå
- Brune øjne: BBGG, BBGg, BBgg, BbGG, BbGg, Bbgg (samlet: B- - -)
- Grønne øjne: bbGG, bbGg (samlet: bbG-)
- Blå øjne: bbgg

Epistasi

- Nogle gange påvirker generne i ét locus generne i et andet locus, så de ikke bliver udtrykt
 - En recessiv egenskab kan fx overrule en dominant
- Labrador retriever:
 - Farvelocus 1: E: mørk, e: gul
 - Farvelocus 2: B: sort, b: brun
 - Hvis en hund er ee i 1. locus er det lige meget, hvad der står i 2. locus - den bliver gul alligevel
 -

Vi er alle forskellige

- Vi ligner vores søskende - men ikke 100%
- Årsag: celledelingsprocessen meiose

Meiose

- Kønselledannelse
- Generelt: stamceller deler sig så en diploid stamcelle (med 46 kromosomer) bliver til fire genetisk forskellige haploide kønsceller (23 kromosomer)
- DNA'et kopieres som ved mitose
- Der sker to celledelinger ved meiose, kontra mitosens ene deling

Første meiotiske deling

- Profase I:
 - DNA'et spiraliseres
 - 46 kromosomer med to identiske kopier af det oprindelige kromosom bliver synlige i cellen
 - Kernemembranen er opløst
 - De placeres tæt op ad hinanden parvis (så de passer sammen ift. type kromosom)
 - De udveksler dele af deres kromosomer med hinanden - overkrydsning
 - De fire kromatider, der før var ens, bliver nu forskellige fra hinanden
- Metafase I:
 - Kromosomerne arrangeres parvis i cellens midterplan vha. tetråde
 - Tentrådene binder sig fast på hvert kromosoms centromer
- Anafase I:
 - Kromosomparrene adskilles ved at tentrådene trækker sig sammen
 - Cellen indeholder et af hvert kromosompar
- Telofase I:
 - Cellen danner to kernemembraner der omkranser kromosomerne
 - Kromosomerne afspiraliseres og tentrådene opløses

Anden meiotiske deling

- Foregår på samme måde som mitose

Kvindens meiose er anderledes

- Der dannes kun én celle efter første meiotiske deling - den anden dattercelle går til grunde
- Efter anden meiotiske deling forkastes atter en af cellerne
- Kvinde: ét æg
- Mand: fire unikke celler pr. meiose

Når der sker fejl i meiosen

- Fejl kan resultere i forkert antal kromosomer - kromosomtalsmutation
 - Adskillelsen af kromosomerne i anafase I eller anafase II går galt
- Anafase I: et enkelt par kromosomer adskilles ikke korrekt: begge ender i én dattercelle
 - To celler med -1 og to celler med +1
 - KALDES non-disjunktion i første meiotiske deling
- Anafase II: To kromatider adskilles ikke korrekt: begge ender i én dattercelle
 - To normale celler, en med +1 og en med -1
 - KALDES non-disjunktion i anden meiotiske deling
- Langt de fleste kromosommutationer er så skadelige, at zygoten ikke udvikler sig til et levedygtigt foster

Kromosomtalsmutationer

- Nogle giver alvorlige problemer, andre giver små problemer
 - Ofte: sterilitet
- Kvinder med ekstra X-kromosom: sterile, lavere gns. højde, forsk. misdannelser (Turner-syndrom - 45,X0 - 1:2000)
- Kromosomtalsmutationer identificeres ved hjælp af karyotyping

Andre typer kromosommutationer

- Sker ofte i profase I: fejl i overkrydsningerne
 - Det ene af de to stykker, der udveksles, går tabt

Genmutationer

- Mindre mutationer, der gør os genetisk forskellige
- Punktmutation: et basepar bliver erstattet af et andet par
- Længdemutation: et eller flere basepar er enten faldet fra (delektion) eller kommet til (insertion)
- Genmutationer kan have meget forskellig effekt på det protein, der dannes
 - Spænder fra "ingen" til "dødelige"
 - Fx en mutation, der ender med at kode for samme stof, som det oprindelige kontra en mutation, der flytter startcodonet adskillige pladser
- Genmutationer opstår primært under DNA-replikation eller spontant pga. mutagener
 - Mutagen: noget i miljøet, der kan forårsage mutationer (UV, radioaktivitet, kemiske stoffer etc.)
- I cellen findes et reparationssystem, der løbende kontrollerer cellens DNA for og retter fejl
- Ikke alle fejl kan repareres => vores celler ophober mutationer gennem livet
- Kun mutationer, der opstår i vores kønsceller, videregives til vores børn

- Og testiklerne og æggestokkene er relativt godt beskyttede
- Når en mutation i en kønscelle videregives til et barn vil samtlige af barnets celler have den mutation

Genteknologiske undersøgelser

- Simple molekylærbiologiske teknikker => genmutationer?
 - Kan fx målrette kræftbehandling bedre i fremtiden

PCR-teknikken

- Polymerase Chain Reaction
- Formål: opformere et stykke dobbeltstrenget DNA til et enormt antal identiske kopier
- Minder om cellens egen DNA-replikation
- Kræver: DNA, nukleotider, varmeresistens polymerase, primere (se herunder)
- PCR-reaktion: eksponentielt voksende antal kopier af det udvalgte DNA dannes
- Nukleotider: dNTP (deoxyribose, nukleotid, trifosfat). Bindingerne mellem fosfatgrupperne bruges af polymerasen når nukleotiderne bindes sammen til en DNA-streng
- Primere: et sæt korte stykker enkeltstrenget DNA, typisk 15-25 basepar. Binder til det sted i genomet, som man ønsker at opformere
- Polymerase: Taq-polymerase, meget varmestabil (optimum: 70-80°). Kopierer mindst 100 baser i sekundet

PCR-cyklus

- Tre trin (i alt ca 4 min.) - gentages 30-40 gange (altså ca 2 timer)
- Efter 2 timer: $2^{30} = 1.073.741.824$ kopier
- Den nu store mængde DNA farves og undersøges vha. gelelektroforese-teknikken

Gelelektroforese

- Fællesbetegnelse for type af analysemetoder
- Gel: plade af geleagtigt porøst materiale - benyttes til disse analyser
- Udnytter at DNA og proteiner er elektrisk ladede - vil bevæge sig mod den ene elektrode
 - Små DNA-stykker bevæger sig hurtigere gennem gelen end store - DNA bliver adskilt efter størrelse

Evnen til at smage bitterstoffet PTC

- Afgjort af genet TAS2R38 på kromosom 7
- Dominant allel indeholder GGCC-sekvens (smager), mens den recessive indeholder GGGC (ikke-smager)
- GGCC-sekvensen klippes over med restriktionsenzymet HaeIII - klipper kun ved GGCC
- Hvis man er smager klippes genet (221 basepar) over i hhv. 44 og 177, men hvis man er ikke-smager forbliver genet 122 basepar langt
- På gelelektroforesen kan man aflæse, om man er smager eller ej ved at se, hvor store båndene er (dvs. også homo- eller heterozygot)

DNA-sekventering

- For at undersøge et gen for punktmutationer undersøger man basernes rækkefølge
- Til DNA-sekventering skal bruges: DNA fra celle, Taq-polymerase, to primere, stort antal dNTP, lille antal særlige trifosfatnukleotider, ddNTP (fluorescerende farvet - lyser i mørke)
- Taq-polymerasen kan ikke binde noget til ddNTP
- Fire parallelle reaktioner, afhænger af hvilken type ddNTP
- Meget mere dNTP end ddNTP - processen kører derfor i ring indtil der opfanges noget ddNTP i stedet for dNTP
- De fire reaktioner tilføres nu i hver deres brønd i en polyacrylamidgel - gelelektroforese
- Polyacrylamidgel er mere fintmasket end agarosegel
- Ved UV-lys ser man de forskelligfarvede bånd - de aflæses

Det humane genom

- 2001: færdig med den første udgave af det msk.lige genom
- Vi kender menneskers genetiske forskellighed ned på nukleotidniveau

En personlig DNA-profil

- Snart muligt at få bestemt hele sit genom
- Genetisk variation inden for en art: polymorfi
- SNP (Single Nucleotide Polymorphism): et basepar, hvor basen varierer ml. mennesker
 - Fx smager/ikke-smager
 - TAS2R38 (skifter ml. G og C) => G/C-SNP
- Risikoprofil : risiko for forsk. sygdomme

Ophavsanalyser

- Mitokondriet indeholder mini-kromosom på 16.000 basepar
 - mitokondrie-DNA
- Ikke overkrydsninger i mitokondrie-DNA
- Nedarves udelukkende fra mor til barn
- = Direkte arv fra generation til generation
 - Eneste ændring: spontane mutationer
- Y-kromosomet nedarves fra far til søn
 - Kun lille overkrydsning
- Mitokondrie-DNA og Y-kromosomet kan bruges til at undersøge det genetiske ophav