

# **Сцепленное наследование. Генетика пола**

**Кафедра медицинской биологии ХНМУ  
Автор: д.мед.н., проф. В.В.Мясоедов**

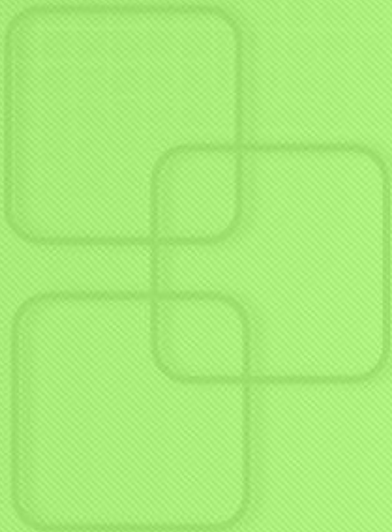
**2012**

## Вопросы лекции:

1. Хромосомная теория наследственности
2. Генетические и цитологические карты хромосом. Методы исследования генома человека
3. Генетика пола. Сцепленное с полом наследование



# Хромосомная теория наследственности



- В начале XX столетия исследователи сделали вывод, что **законы Менделя не всегда выполняются**
- Под вопросом оставалась природа **«наследственных факторов» Менделя**
- Исследователи искали **органеллы, в которых хранятся «наследственные факторы»**



- Хромосомы видели различные исследователи, работавшие в разных странах, в разное время и с разными объектами

**Период с 1874 по 1879 гг.**

И.Д. Чистяков (Россия)

Э. Штрассбургер (E. Strassburger, Германия)

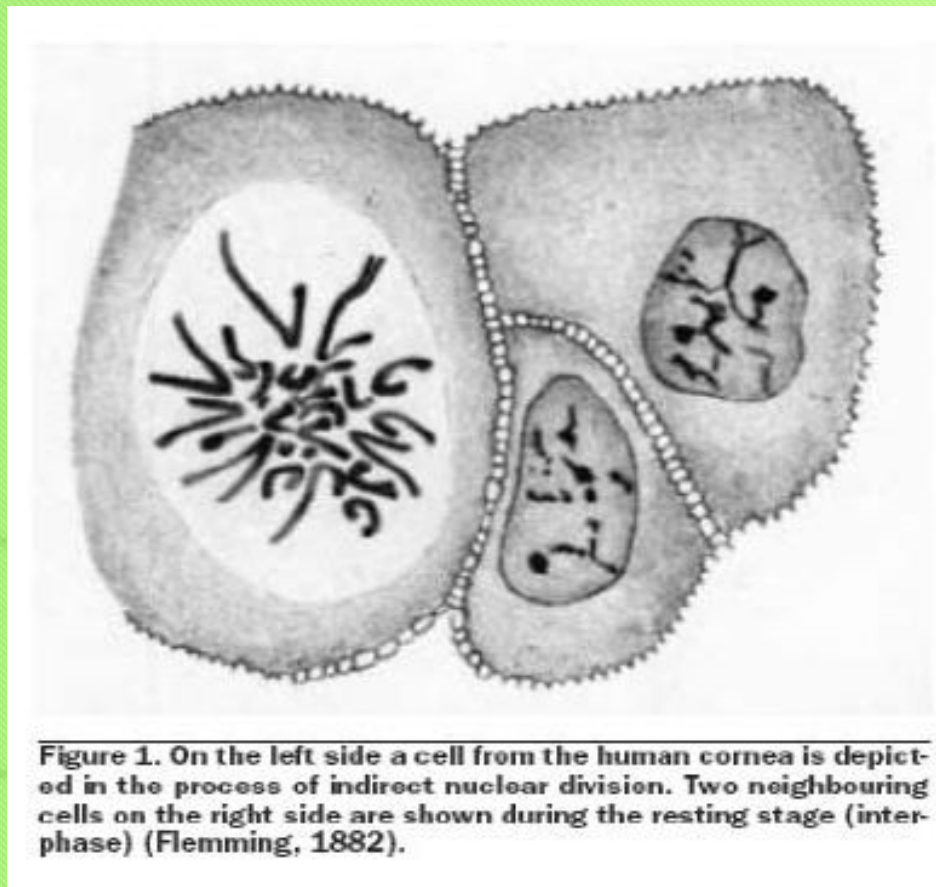
Э. ван Бенеден (E. Van Beneden, Бельгия)

В. Флемминг (W. Flemming, Германия)

и другие у различных видов растений и животных описывали определенные нитевидные структуры, образующиеся на месте ядра при делении, их расхождение и формирование новых ядер у дочерних клеток

- **1873 Ф. Шнайдер (F. Schneider)** наблюдал при делении ядра сложную последовательность необычных явлений, названных «непрямое деление ядра»

- **1882 р. Вальтер Флемминг (Flemming)** издал книгу *Zellsubstanz, Kern und Zelltheilung* (*Клеточное вещество, ядро и деление клетки*), в которой описал непрямо́е деление ядра и привел много детальных рисунков. Ввел термины **ХРОМАТИН** и **МИТОЗ**



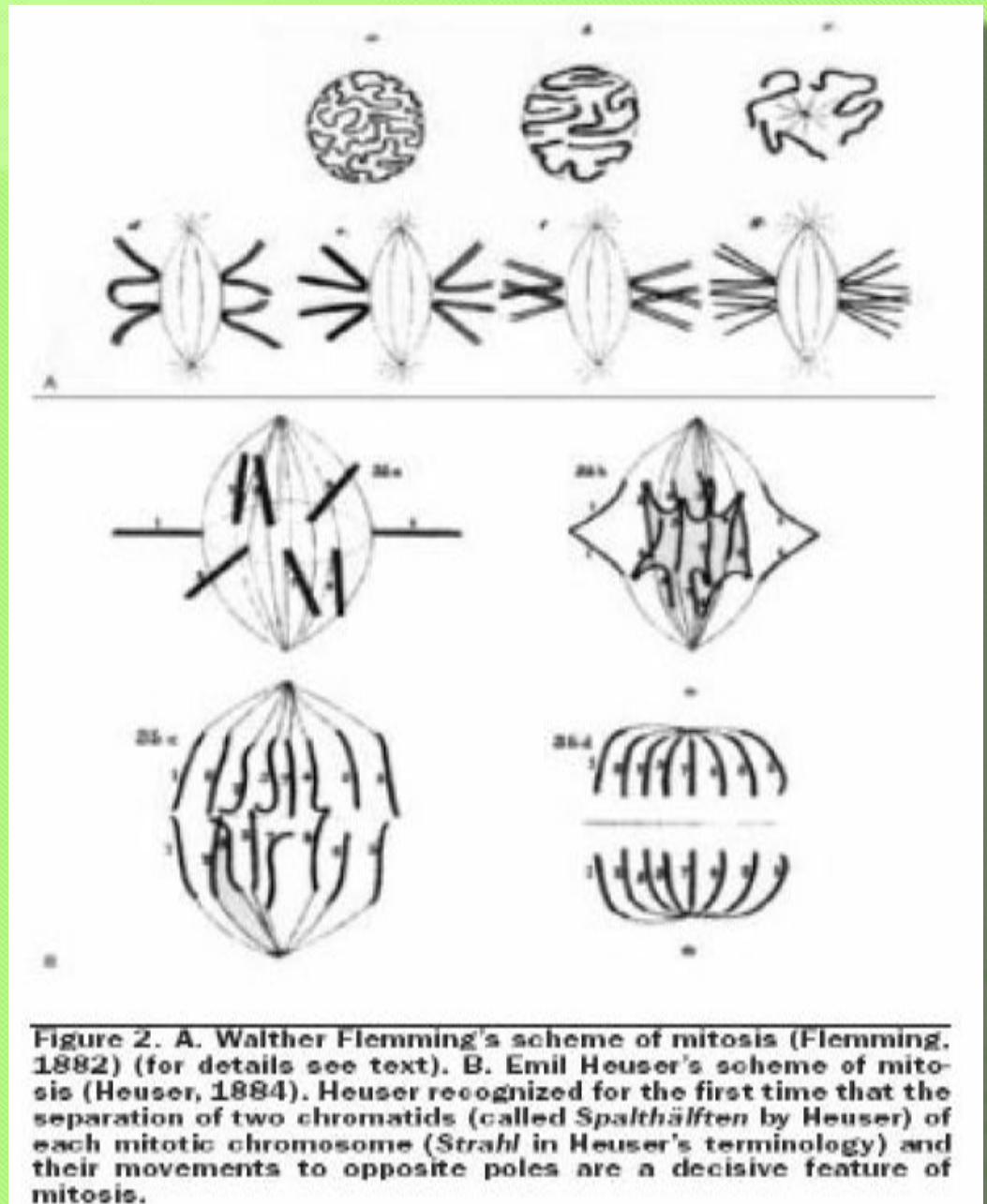


**1882 г. Вальтер  
Флеминг**

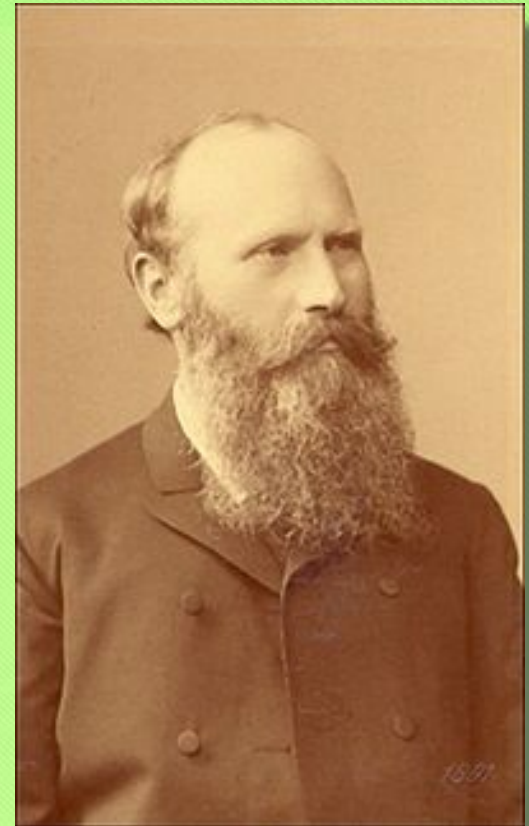
Наблюдал, что  
многие из  
митотических  
хромосом явно  
состоят из двух  
половинок, но не  
придал этому  
значения

**1884 г. Emil Heuser**

Заметил точное  
расхождение двух  
хроматид каждой  
хромосомы к разным  
полюсам веретена



- Термин «**хромосома**» предложил в **1888 г.** немецкий морфолог **Вильгельм Вальдейер** для обозначения внутриядерных структур эукариотической клетки, окрашиваемых **основными красителями** (от греч. *хрома* — цвет, краска, и *сома* — тело)





# Роль хромосом в передаче наследственной информации была доказана благодаря:

1. Определению групп сцепления признаков, которые соответствовали числу хромосом
2. Построению генетических, а потом и цитологических карт хромосом
3. Открытию генетического определения пола

# Соответствие законов Менделя поведению хромосом

- Г. Мендель **считал**, что признаки передаются из поколения в поколение как отдельные «факторы», расположенные в половых клетках
- Г. Мендель **не знал** места расположения этих факторов в клетках, так как в то время
  - не было известно о существовании хромосом
  - неизвестной была роль ядра в процессе размножения
  - не были открыты процессы митоза и мейоза

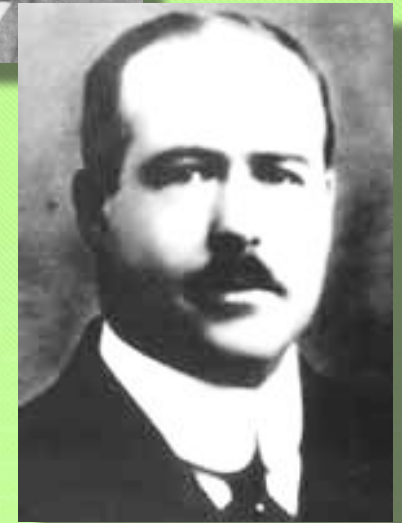


- К началу XX ст. углубленное **изучение поведения хромосом**


- в ходе деления клетки,
- при созревании половых клеток,
- при оплодотворении и
- раннем развитии зародыша

**выявило строго закономерные изменения их организации**

- Это привело немецкого цитолога и эмбриолога **Теодора Бовери (1902—1907)** и американского цитолога **Уолтера Сэттона (1902—1903)** к установлению **связи наследственного материала с хромосомами**, что легло в основу **хромосомной теории наследственности**



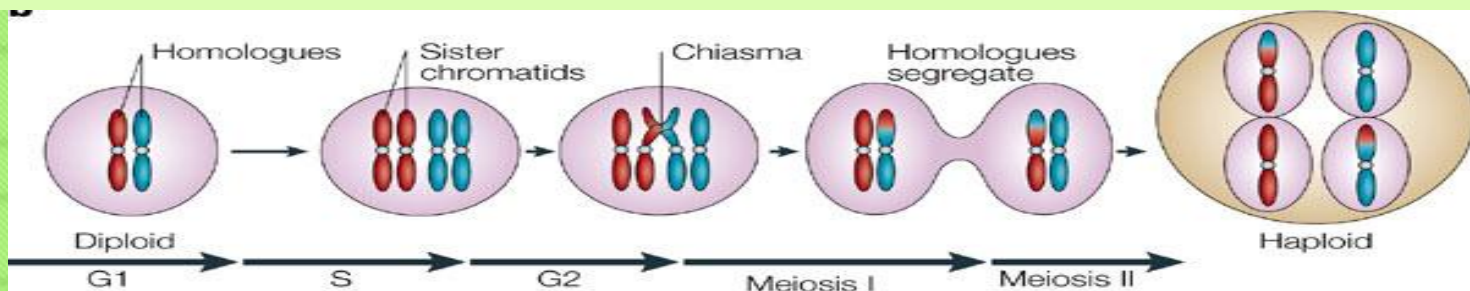




**Бовери и Сэттон отметили взаимосвязь между  
менделевским наследованием признаков  
и  
поведением хромосом при образовании  
гамет и оплодотворении**

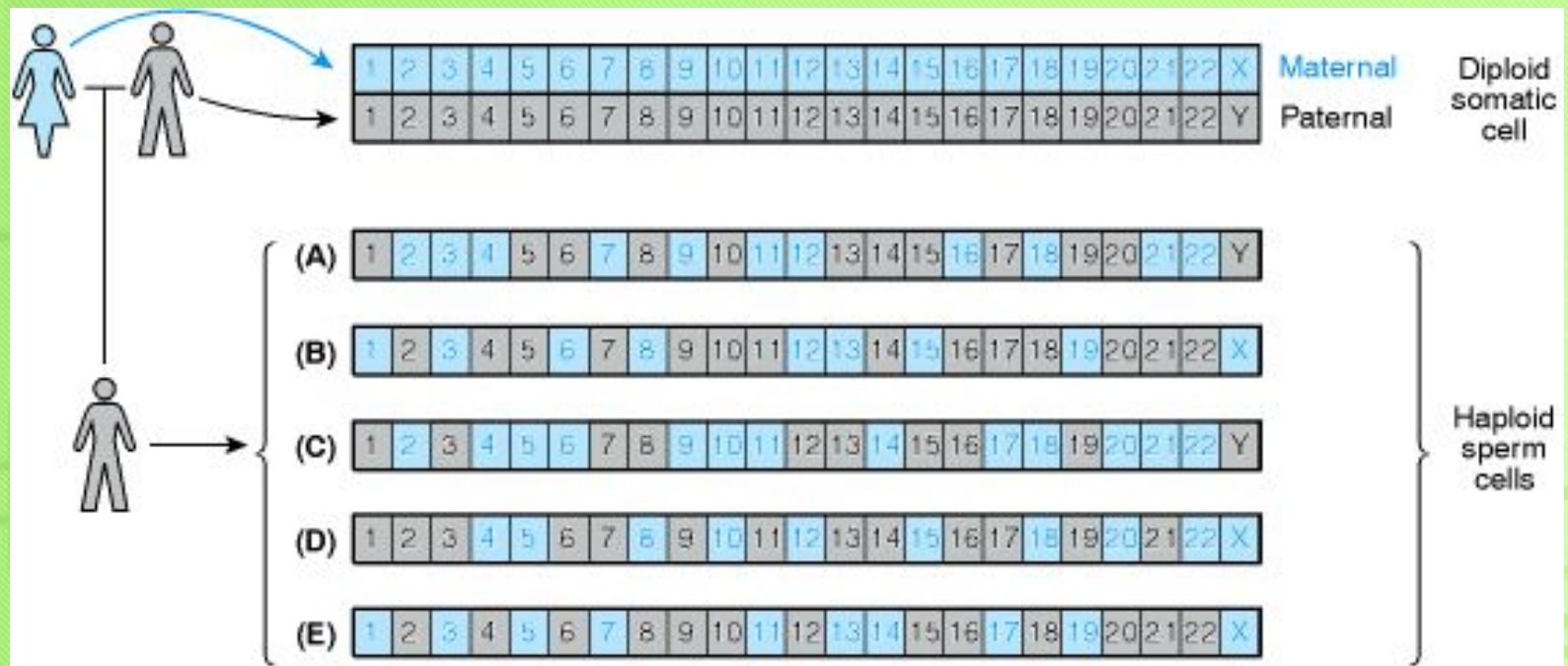
- **В частности, они отметили:**

- хромосомы существуют как гомологичные пары (*Мендель считал, что наследственные факторы существуют в парах*)
- гомологичные хромосомы распределяются при мейозе таким образом, что гаметы получают только одну хромосому из пары (*Мендель считал, что при образовании гамет в каждую гамету попадает только один фактор из пары*)

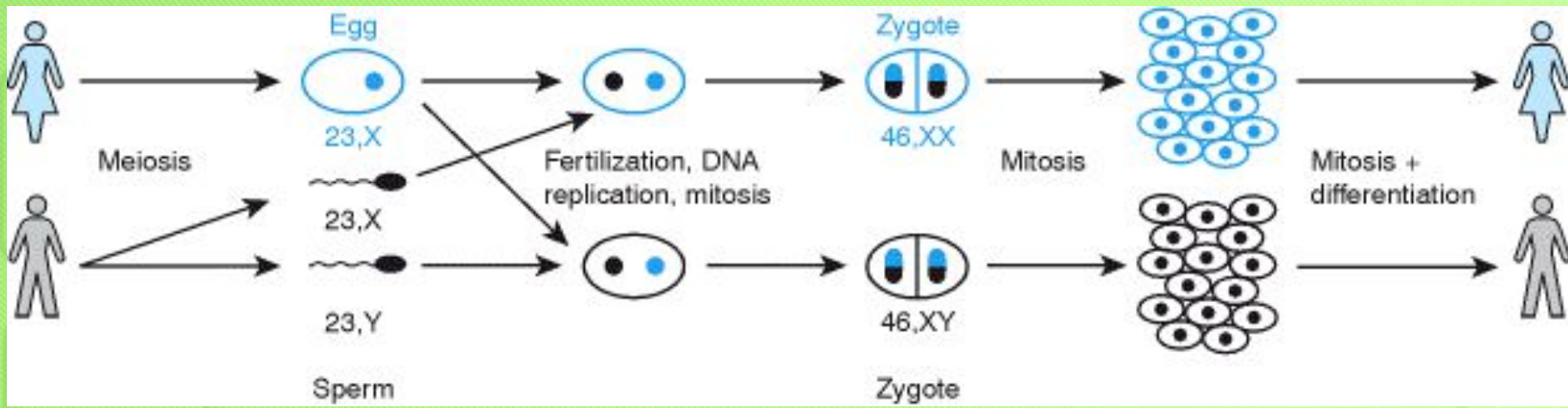




- хромосомы различных гомологичных пар группируются случайным образом при мейозе и распределяются по гаметам независимо от любой другой пары (*Мендель считал, что факторы каждой пары являются независимыми от любой другой пары при их распределении по гаметам*)



- гомологичные хромосомы от двоих родителей встречаются вместе в зиготе в результате слияния мужской и женской гамет, при этом восстанавливается диплоидное число у потомков (*Мендель считал, что мужские и материнские факторы смешиваются во время оплодотворения*)






- хромосомы сохраняют свою структуру, индивидуальность и генетический состав в течение жизненного цикла индивидуума  
*(Мендель считал, что признаки не исчезают, даже если они не проявляются)*
- Установление соответствия поведения хромосом и факторов Менделя было предпосылкой формулирования **хромосомной теории наследственности**

- Стало очевидным, что **основой Менделевских законов наследования является наличие генов в хромосомах и их поведение при мейозе и оплодотворении**



- В 1902 г. **Бовери** и **Сэттон** сформулировали основные положения ***хромосомной теории наследственности*** – учения о локализации наследственных факторов в хромосомах:

- гены расположены в хромосомах
- в каждой гомологичной хромосоме находится по одному аллельному гену
- гомологичные хромосомы и вместе с ними аллельные гены объединяются в зиготе во время оплодотворения

- 
- Детальная разработка этой теории была осуществлена в начале XX ст. школой американских генетиков, которую возглавлял **Томас Морган**



- В первые десятилетия XX ст. в генетике основные усилия были направлены на установление статистических закономерностей наследования в ущерб биологической составляющей - **искали средние показатели количественных признаков и отклонений от них**
- Позже выяснили, что **количественные признаки определяются большим числом генов** и их анализ методами классической генетики крайне ограничен

- Но в 1908 г. это еще не было известно, и Карл Пирсон, основатель биометрической школы в Англии, заявил, что нет окончательных доказательств возможности применять законы Менделя к какой-либо из существующих форм жизни
- Появились несоответствия и в других областях
- В 1906 г. Бэтсон и его сотрудник Пеннет установили, что распределение парных признаков не согласуются с 3-им законом Менделя – наблюдается «взаимное притяжение генов»



Карл Пирсон  
(1857-1936)



## Молодая наука генетика попала в кризисную ситуацию!

- **Сэттон** в **1903 г.**, пытаясь объяснить противоречие, допустил, что *каждая хромосома содержит больше, чем 1 ген, и все гены, расположенные в одной хромосоме, наследуются вместе*
- Но он не смог подтвердить это экспериментально!

- Все эти противоречия легли в основу нового открытия, сделанного профессором экспериментальной зоологии Колумбийского университета в Нью-Йорке – **Томасом Хантом Морганом**
- Он сумел объединить данные статистики и результаты исследования процессов, происходящих в клетках



**Томас Хант Морган  
(1866-1945)**



- Морган начал генетические эксперименты в **1909 г.**
- Объектом исследований была избрана плодовая мушка - ***Drosophila melanogaster***
  - очень плодовита (25 поколений в год )
  - от яйца до взрослой особи - 10 дней
  - мало хромосом (4 пары)
  - имеет много признаков (цвет глаз, форма крыльев, окраска тела)



- Морган выявил то же самое «взаимное притяжение генов», которое наблюдали в 1906 г. Бэтсон и Пеннет
- Было установлено, что наследственные признаки дрозофилы можно разделить на три связанные между собой группы, которые наследуются как единое целое
- Морган назвал этот феномен **сцеплением генов**





- Как цитолог он знал о существовании в клетках дрозофилы **трех больших хромосом**
- Существует и **четвертая, небольшая хромосома**
- В **1914 г. Герман Джозеф Мёллер**, работавший у Моргана, открыл четвертую группу генов (очень малочисленную)

- Таким образом Морган установил, что **гены действительно находятся в хромосомах**. Это открытие объяснило противоречие, выявленное Бэтсоном и Пеннетом

**Вскоре, однако, возникли новые проблемы!**

- **Гены, принадлежащие к одной группе, в следующих поколениях неожиданно оказывались в различных группах**



- Морган сделал **предположение, что происходит обмен генетическим материалом между различными хромосомами**. Ему даже удалось наблюдать этот процесс под микроскопом: две хромосомы сближались и перекрещивались, обмениваясь фрагментами. Этот процесс получил название **кроссинговера**

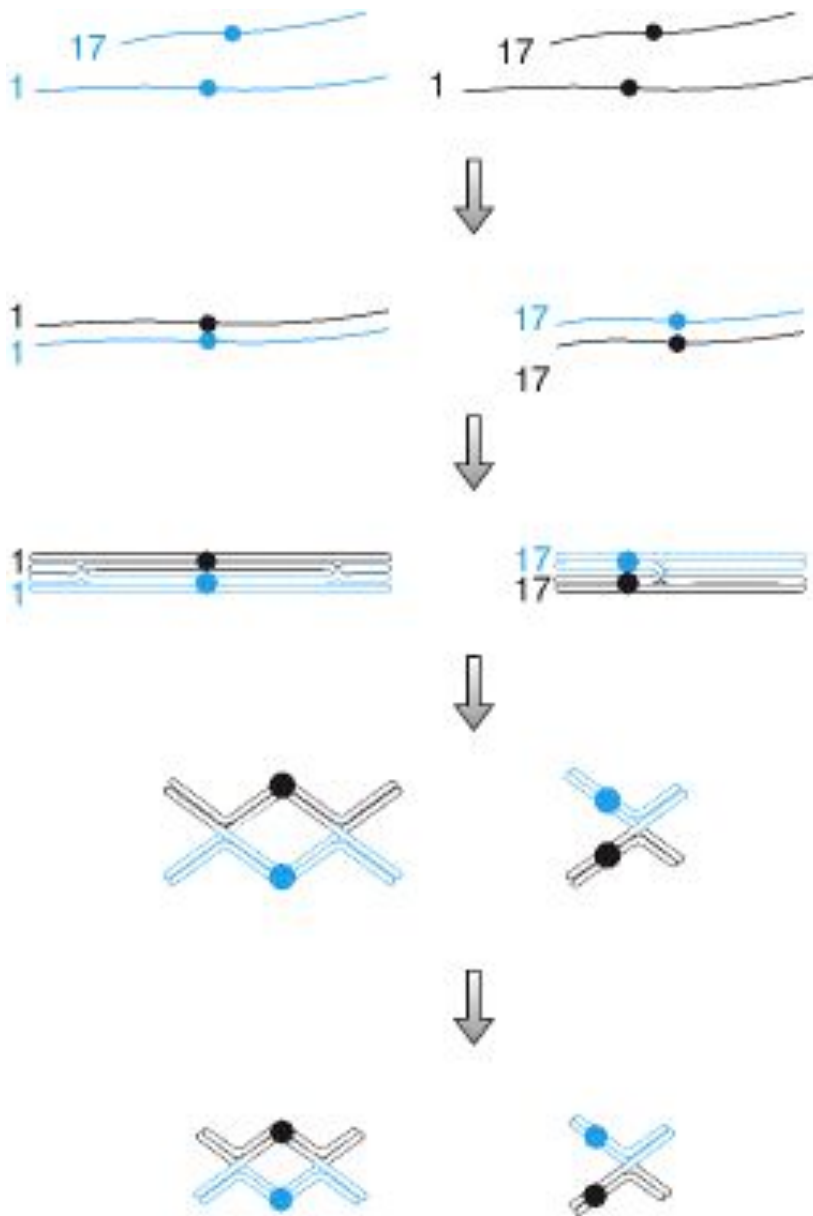
# Кроссинговер

- **Если сцепление является неполным, то в профазе мейоза I в стадии пахитены может происходить обмен идентичными участками гомологичных хромосом – *кроссинговер (перекрест)***
- Это явление изучалось Т. Морганом на дрозофилах
- ***Кроссинговер*** – это обмен гомологичными участками гомологичных хромосом, который может сопровождаться обменом аллельных генов



- Кроссинговер может происходить в одном или в нескольких участках хромосом
- **Кроссинговер – генетически обусловленный процесс.** У большинства организмов кроссинговер **характерен как для самок, так и для самцов**, но у некоторых (например, дрозофилы) он происходит только у гомогаметного пола (самок)

# Профаза I



## Лептотена (тонкие нити)

Гомологичные хромосомы не спарены, состоят из двух тесно прилегающих связанных сестринских хроматид

## Зиготена

Материнские и отцовские гомологи объединяются в пары (**синапсис**) и образуют **биваленты**

## Пахитена (толстые нити)

Хромосомы утолщаются, видны хроматиды (**тетрады**), начинается **кроссинговер**

## Диплотена

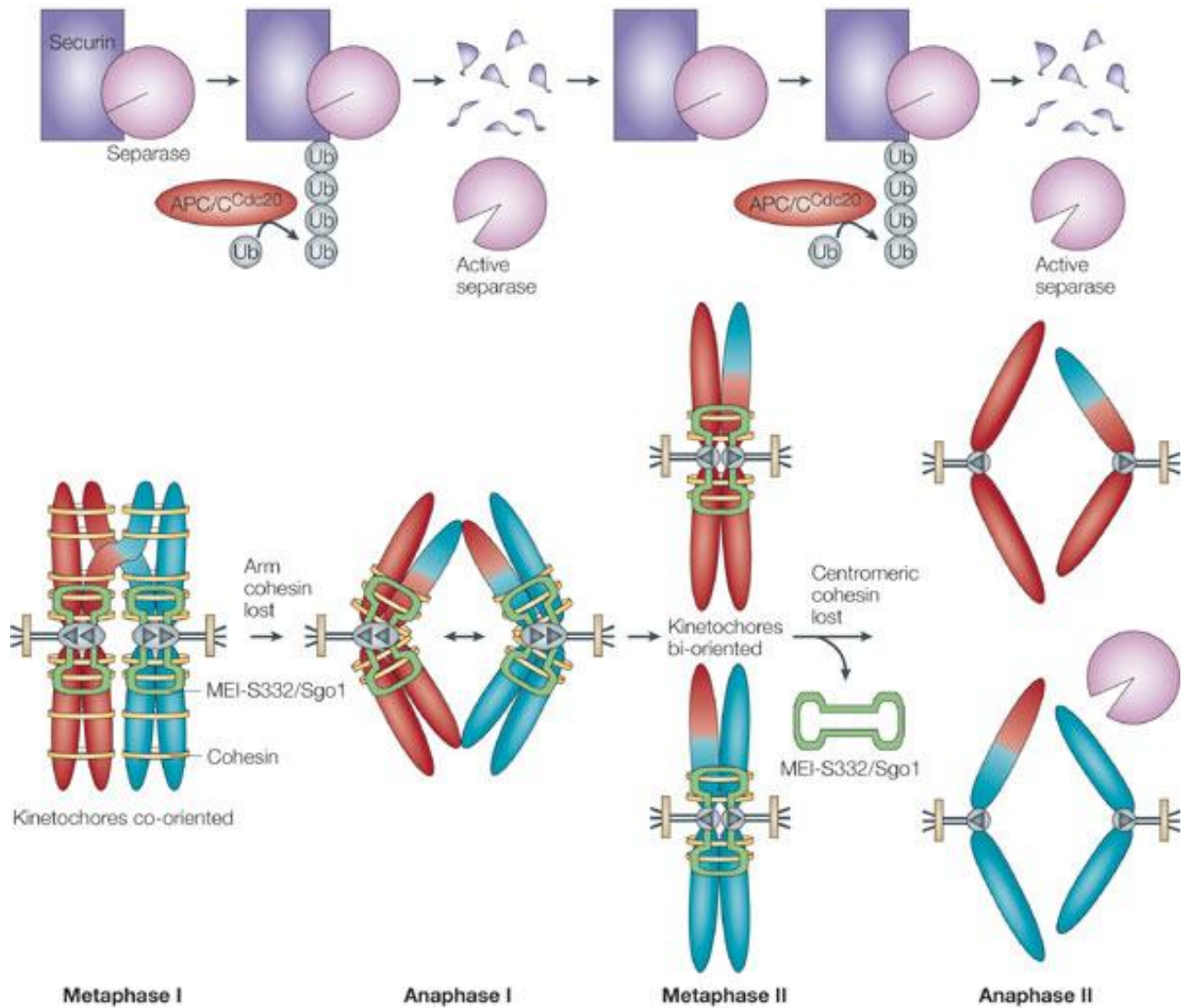
Гомологи разделяются, но удерживаются вместе в области **хиазм (кроссинговер)**

## Диакинез

Хромосомы реконденсируются, хиазмы скользят по длине бивалентов.

**Разрушение ядерной оболочки, формирование веретена деления**





## Разделение хромосом в мейозе

# Типы кроссинговера

- Различают **кроссинговер**:
  - **мейотический**
  - **митотический (соматический)**
- Соматический кроссинговер впервые был выявлен у дрозофилы **Куртом Стерном**. Происходит со значительно меньшей частотой, чем при мейозе. Генетического значения не имеет. Индивидуумы с митотическим кроссинговером - **мозаики**

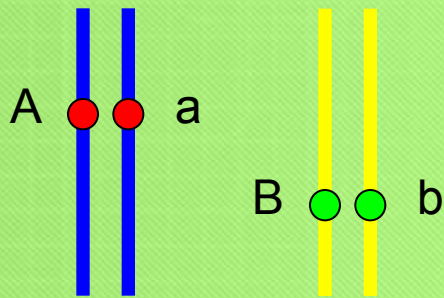


- В зависимости от количества появившихся хиазм:
  - **одиночный кроссинговер** – образуется только одна хиазма, что приводит к обмену только одним участком ДНК гомологичных хромосом. *Это наиболее распространенный тип кроссинговера*
  - **двойной кроссинговер** - образуются две хиазмы. Этот тип кроссинговера приводит к обмену двумя участками ДНК гомологичных хромосом
  - **множественный кроссинговер** - образуется более, чем две хиазмы между несестринскими хроматидами гомологичных хромосом. Далее они могут быть классифицированы как **тройные** (3 хиазмы), **четвертные** (4 хиазмы) и т.д.

# Гены

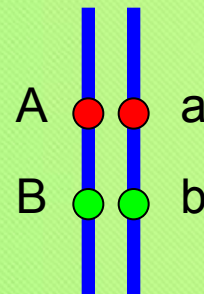
30 000 генов  
46 хромосом

Несцепленные  
(в разных хромосомах)

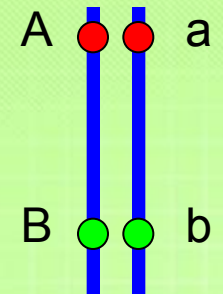


Сцепленные  
(в одной хромосоме)

Полное (абсолютное)  
сцепление



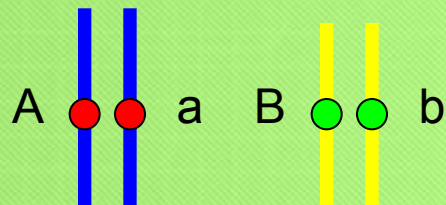
Неполное  
сцепление





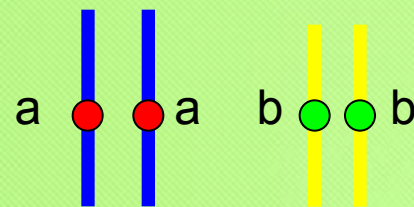
# Наследование несцепленных генов

**P:** AaBb



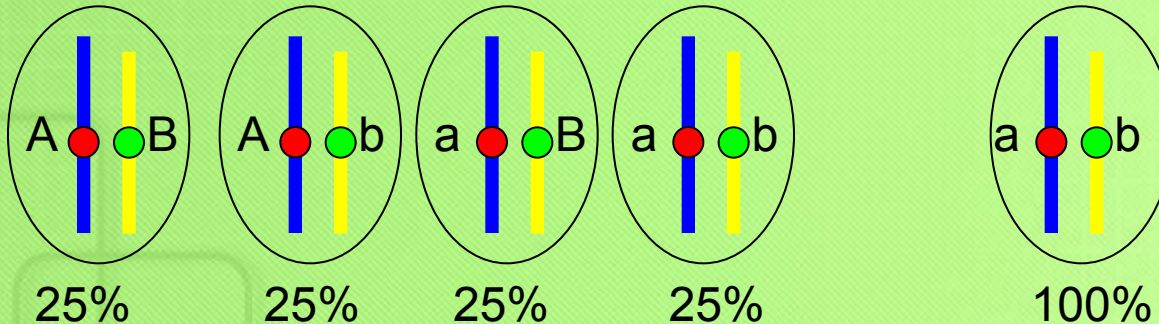
**x**

**aabb**



**Анализирующее скрещивание**

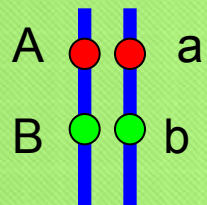
**G:**



**F<sub>1</sub>: AaBb, Aabb, aaBb, aabb**  
25%      25%      25%      25%

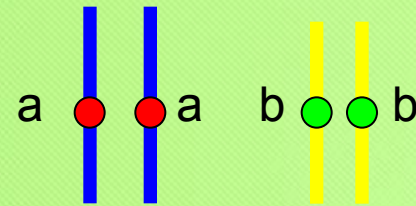
# Наследование при полном (абсолютном) сцеплении генов

**P: AaBb**



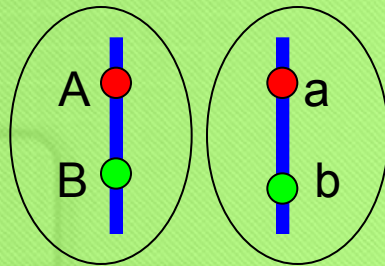
**x**

**aabb**



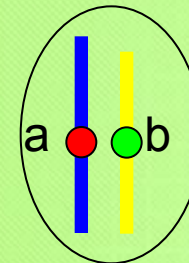
**Анализирующее скрещивание**

**G:**



50%

50%



100%

**F<sub>1</sub>: AaBb, aabb**

50%

50%



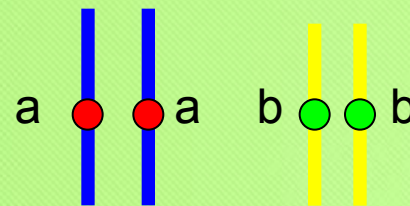
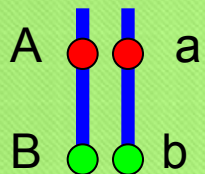
# Наследование при неполном сцеплении генов

**P: AaBb**

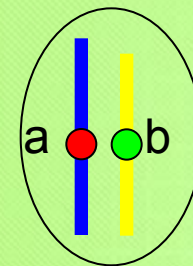
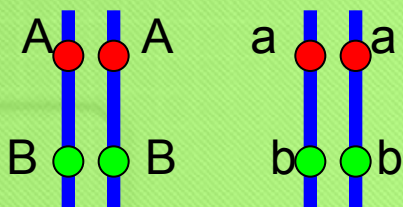
**x**

**aabb**

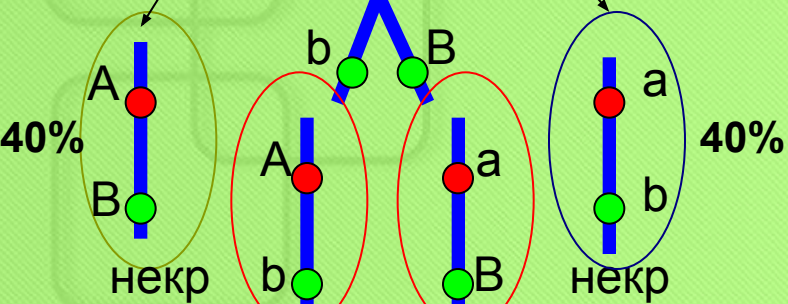
**Анализирующее скрещивание**



**G:**



100%



$F_1$ :	<b>AaBb,</b>	<b>Aabb,</b>	<b>aaBb,</b>	<b>aabb</b>
	<b>40%</b>	<b>10%</b>	<b>10%</b>	<b>40%</b>
	<b>некр.</b>	<b>кросс.</b>	<b>кросс.</b>	<b>некр.</b>

**Некроссоверные** >>> **Кроссоверные**  
**гаметы** **гаметы**



# Определение частоты кроссинговера

- *Установлено, что вероятность кроссинговера между определенными сцепленными генами зависит от расстояния между ними в хромосоме*
- Т. Морган установил, что чем дальше расположены гены в хромосоме, тем более вероятным является кроссинговер
- Для близко расположенных генов кроссинговер менее вероятен
- ***Частота кроссинговера выражается в процентах кроссоверных (рекомбинантных) генотипов, полученных после анализирующего скрещивания***

- Частота кроссинговера (расстояние между генами):

***число кроссоверных  
организмов***

$$= \frac{\quad}{\quad} * 100\%$$

***общее число потомков***



- Эта частота строго пропорциональна расстоянию между сцепленными генами и измеряется в ***морганидах***
- ***1 морганида соответствует 1% рекомбинантных гамет или генотипов, полученных при анализирующем скрещивании***

$F_1$ :    **AaBb,**    **Aabb,**    **aaBb,**    **aabb**  
           **80**            **20**            **20**            **80**  
           некр.        **кросс.**        **кросс.**        некр.

Расстояние между генами =

$$20+20$$

---


$$80+20+20+80$$

$$* 100\% = 20\% = 20 \text{ морганид}$$



# Факторы, влияющие на частоту кроссинговера

- **Температура** – высокая и низкая температура **повышает** частоту
- **Рентгеновские лучи** – **повышают**
- **Возраст** – **снижает**
- **Мутагены** – **повышают** или **снижают**
- **Пол** – у самцов дрозофилы кроссинговер не происходит, у самцов млекопитающих интенсивность кроссинговера незначительна
- **Расстояние между генами**
- **Пищевые эффекты** – Са и Mg могут **повышать** или **снижать**
- **Центромерные эффекты** – гены в области центромеры **менее способны** к кроссинговеру

# Значение кроссинговера

- Кроссинговер — широко распространенное явление
- Происходит практически у всех организмов, которые размножаются половым путем
- Этот процесс является молекулярной основой **комбинативной изменчивости**
- В результате рекомбинации генов **могут появляться новые полезные признаки и их сочетания**. Поэтому кроссинговер имеет большое значение для выживания и размножения
- Этот процесс также **увеличивает генетическое разнообразие потомков**, что очень важно для приспособления и эволюции
- **Определение частоты кроссинговера лежит в основе картирования генов хромосом**, то есть определения места расположения разных генов в хромосоме




# Хромосомная теория сцепления Моргана и Кастла

- Гены, проявляющие сцепление, расположены в одной и той же хромосоме
- Гены расположены в линейной последовательности в хромосоме, то есть сцепление генов – линейное
- Расстояние между сцепленными генами обратно пропорционально силе сцепления
- Сцепленные гены остаются в своей комбинации во время наследования

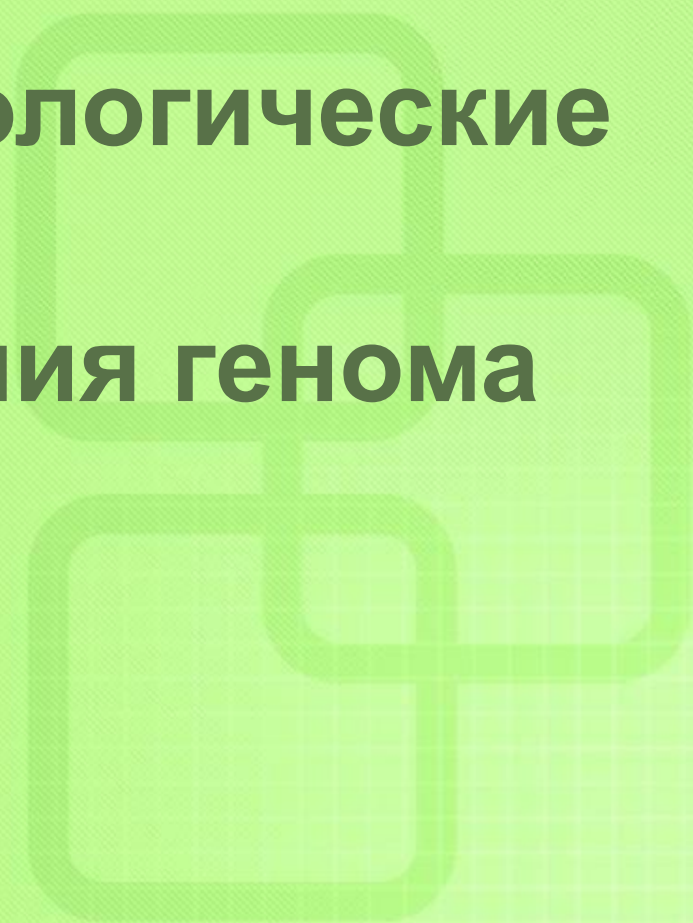
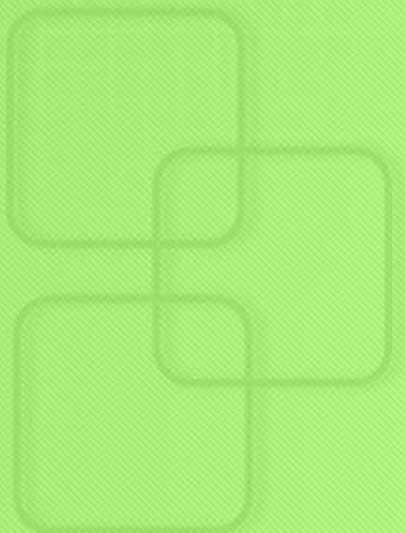
- Гены, локализованные в одной хромосоме, передаются вместе (сцепленно) и составляют одну **группу сцепления**
- **Количество групп сцепления равно гаплоидному числу хромосом**
- Так, у мухи дрозофилы 8 хромосом — 4 группы сцепления, у каждого человека 46 хромосом — 23 группы сцепления (но теоретически 24 группы сцепления)



- Работы Т. Моргана и его сотрудников подтвердили
  - значение хромосом как основных носителей генов
  - установили линейность расположения их по длине хромосомы
- В **1933 г. Нобелевская премия** по физиологии и медицине была присуждена Моргану **«за открытия, связанные с ролью хромосом в наследственности»**



**Генетические и цитологические  
карты хромосом.  
Методы исследования генома  
человека**






- Морган представлял себе гены упорядоченными по длине хромосом, как бусинки в ожерелье




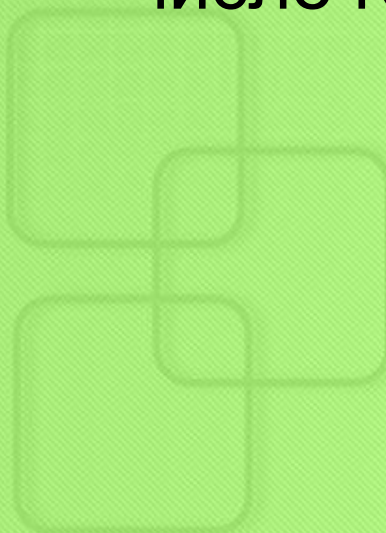
- Экспериментальные данные привели его к идее создания **генетических карт хромосом**
- Очевидно, что *чем дальше находятся два гена друг от друга, тем больше вероятность разрыва нити, связывающей их, и получения новых сочетаний генов*
- Стало возможным *определить относительное расстояние между генами в хромосоме путем простого расчета процента кроссинговера*

- 
- **Карты хромосом** – это графическое представление относительного расположения и расстояния между генами в группе сцепления (хромосоме)



# Генетические и физические карты хромосом

- **Генетическое картирование** основывается на использовании генетических методов для построения карт, указывающих позиции генов и других последовательностей в геноме.
  - Генетические методы включают гибринологические эксперименты или, в случае с людьми, генеалогический метод (анализ родословных)

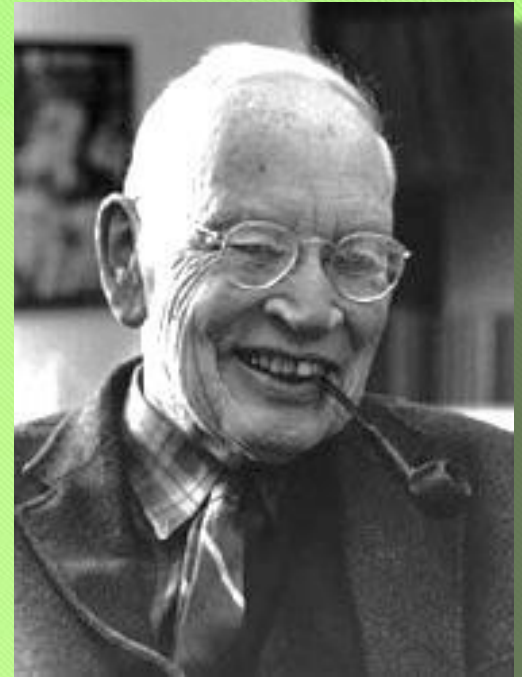
- 
- **Физическое картирование** использует молекулярно-биологические методы для непосредственного исследования молекул ДНК и создания карт, обозначающих позиции определенных последовательностей, в том числе генов
- 



# Опорные точки карт хромосом – гены и ДНК-маркеры

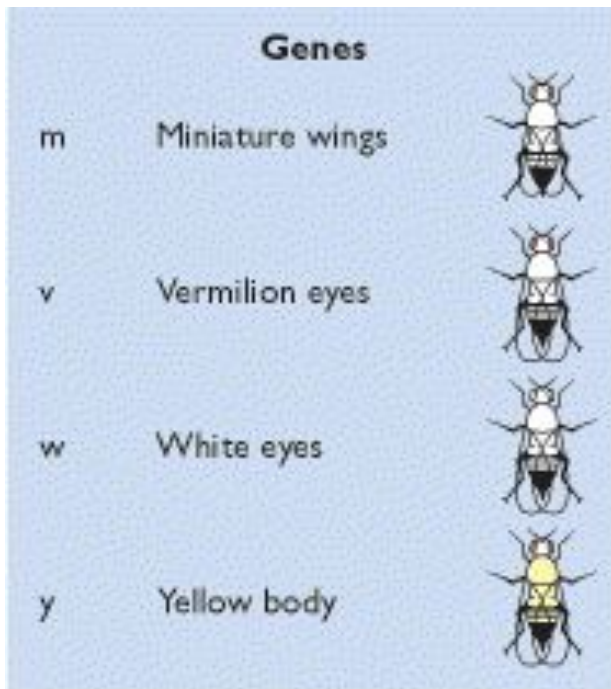
- Гены – часто используемые маркеры, но они не идеальны. Одна из проблем (особенно для больших геномов позвоночных) - карты, основанные на генах, не очень детализованы
- Необходимы другие типы маркеров
- **Опорные точки карт, не являющиеся генами, называются ДНК-маркерами**
- **Основные типы ДНК-маркеров:**
  - полиморфизм длины рестрикционных фрагментов (RFLPs)
  - полиморфизм длины простой последовательности (SSLPs)
  - однонуклеотидный полиморфизм (SNPs)

- **А. Стертевант в 1913 г.** составил первую генетическую карту локализации генов в X-хромосоме дрозофилы
- Генетические карты уже разработаны для дрозофилы, мыши, нейроспоры; для высших растений: кукурузы, риса, ячменя и др.



**Альфред Стертевант  
(1891-1970)**





**Recombination frequencies**

Between m and v = 3.0%  
 Between m and y = 33.7%  
 Between v and w = 29.4%  
 Between w and y = 1.3%

Deduced map positions



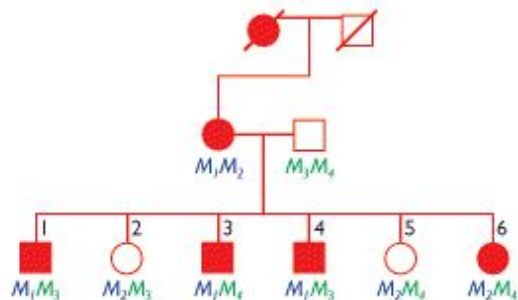
- **Построение генетической карты на основании частот рекомбинации.** Пример показывает реальные эксперименты, выполненные Артуром Стуртевантом на плодовой мушке. Все 4 гена находятся в X-хромосоме плодовой мушки. Показаны частоты рекомбинации между генами и относительное разморасположение генов на карте

# Генеалогический анализ в составлении генетических карт человека

- Для человека невозможно заключение экспериментальных браков с целью создания генетических карт
- Данные для расчета частот рекомбинации могут быть получены исследованием генотипов членов поколений существующих семей
- Это значит, что доступными являются только ограниченные данные, и их интерпретация часто усложняется, т.к. браки людей редко приводят к необходимым «скрещиваниям», а часто генотипы одного или большего числа членов семьи являются недоступными в связи со смертью или отказом от сотрудничества



(A) The pedigree



(B) Possible interpretations of the pedigree

		MOTHER'S CHROMOSOMES	
		<b>Hypothesis 1</b>	<b>Hypothesis 2</b>
		<u>Disease <math>M_1</math></u>	<u>Healthy <math>M_1</math></u>
		<u>Healthy <math>M_2</math></u>	<u>Disease <math>M_2</math></u>
CHILD 1	<u>Disease <math>M_1</math></u>	Parental	Recombinant
CHILD 2	<u>Healthy <math>M_2</math></u>	Parental	Recombinant
CHILD 3	<u>Disease <math>M_1</math></u>	Parental	Recombinant
CHILD 4	<u>Disease <math>M_1</math></u>	Parental	Recombinant
CHILD 5	<u>Healthy <math>M_2</math></u>	Parental	Recombinant
CHILD 6	<u>Disease <math>M_2</math></u>	Recombinant	Parental
Recombination frequency		1/6 = 16.7%	5/6 = 83.3%

(C) Resurrection of the maternal grandmother



## Пример анализа родословной человека

(A) Родословная показывает наследование генетической болезни в семье двух живых родителей и 6 детей, а также при наличии информации о родителях матери. Аллель болезни является доминантным по отношению к аллелю здоровья. Реальным является определение степени сцепления между геном болезни и микросателлитом M типированием аллелей для этого микросателлита ( $M_1$ ,  $M_2$ , и т.п.) у живых членов семьи.

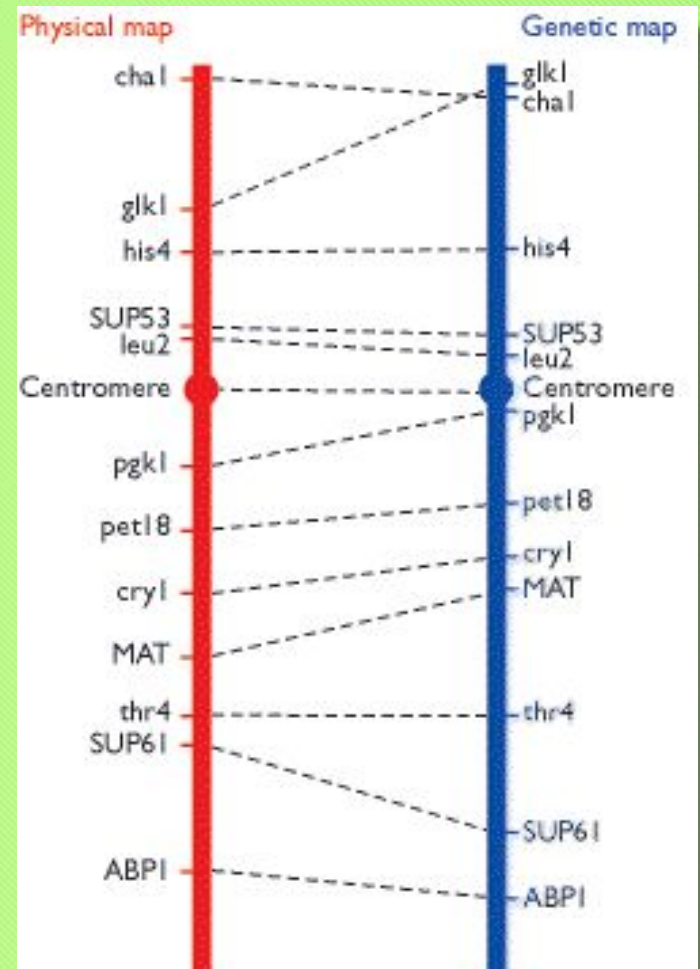
(B) Родословная может быть интерпретирована двумя разными путями: Гипотеза 1 дает низкую частоту рекомбинации и свидетельствует, что ген болезни сильно сцеплен с микросателлитом M; Гипотеза 2 подтверждает, что ген и микросателлит менее прочно сцеплены

(C) Реконструкция генотипа микросателлита бабушки подтверждает справедливость Гипотезы 1

### KEY

○ Unaffected female   ● Affected female   □ Unaffected male   ■ Affected male   / Dead

- На генетической карте хромосом обозначают: номер группы сцепления, сокращенные названия генов, расстояние между генами
- С помощью генетических карт можно предвидеть характер наследования признаков, определяемых нанесенными генами: теоретически рассчитывать вероятность их расщепления у потомков



**Физические карты - более точны!**



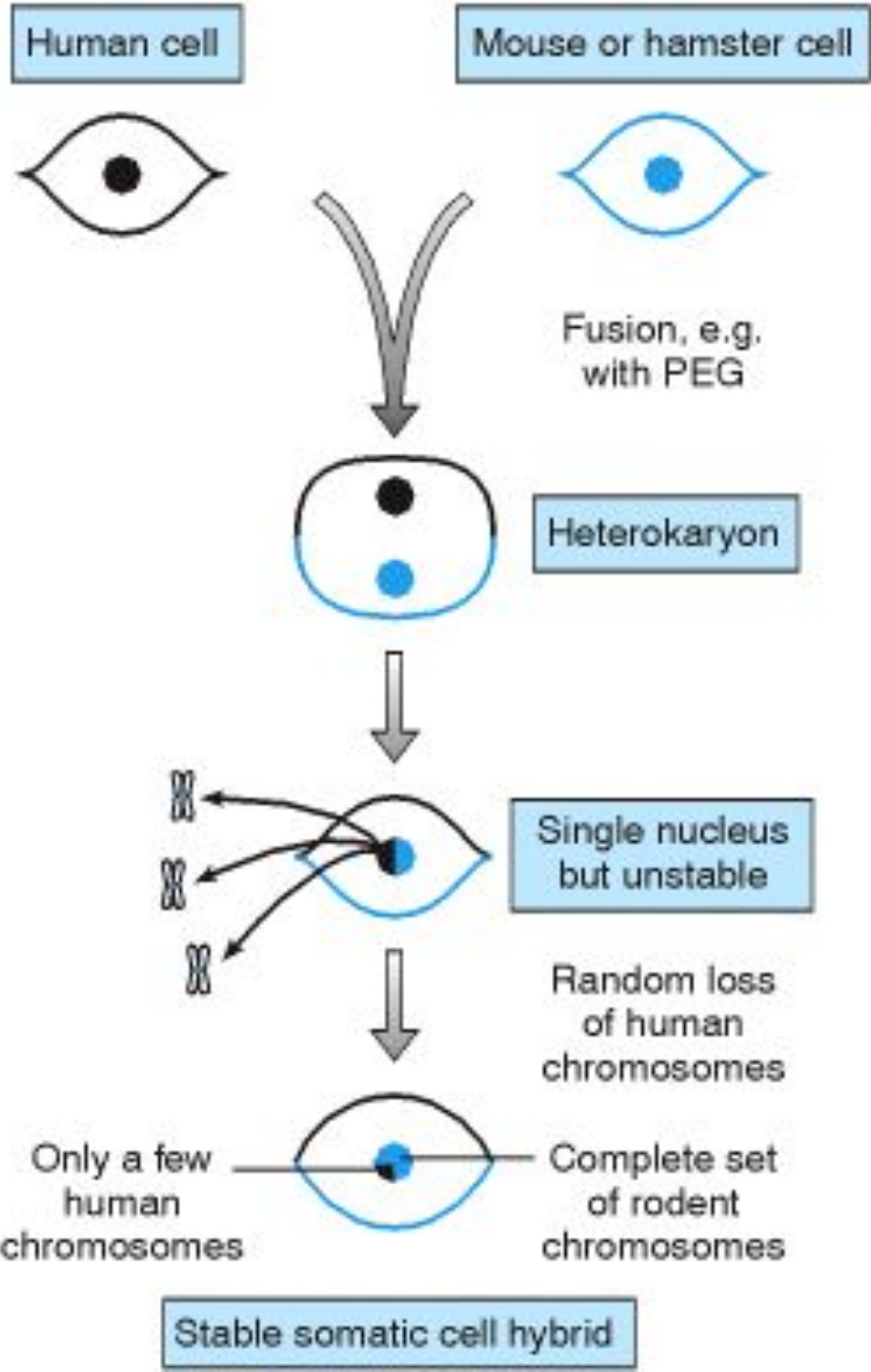
# Методы физического картирования хромосом

- Большое число методов физического картирования хромосом основано на 3 главных подходах:
  - **Рестрикционное картирование**, устанавливающее относительные позиции на молекуле ДНК последовательностей узнавания для рестрикционных эндонуклеаз
  - **Флуоресцентная *in situ* гибридизация (FISH)**, при которой расположение маркера картируется гибридизацией образца, который содержит маркер с интактными хромосомами
  - **Картирование последовательностями маркерных сайтов (STS-картирование)**, при котором позиции коротких последовательностей картируются ПЦР и/или гибридизационным анализом фрагментов генома

# Методы картирования хромосом человека

- В связи с невозможностью картирования хромосом человека традиционными методами анализирующего скрещивания, приемлемыми для других организмов, с этой целью применяют другие методы
- Например, **метод гибридизации соматических клеток грызунов и человека в культуре тканей**
- Если изолировать из тела и смешать клетки мыши и человека в культуре, то в результате их слияния можно получить **гибридные клетки, содержащие хромосомы одного или другого вида**. Клетки мыши имеют 40 хромосом, а клетки человека - 46. Суммарное число хромосом гибридных клеток должно составлять 86, но обычно это не происходит и чаще всего гибридные клетки содержат от 40 до 50 хромосом





- Пример показывает как стабильные «человек-мышь» гибридные соматические клетки могут получаться применением ПЭГ
- По понятным причинам хромосомы человека избирательно утрачиваются первичным продуктом слияния
- Утрата хромосом человека приводит к образованию большого разнообразия гибридных клеток по набору хромосом человека
- Эти клетки могут быть клонированными для получения отдельных клеточных линий со специфическим набором хромосом человека
- Идентификация хромосом человека может проводиться методами, основанными на ПЦР с применением хромосом-специфических маркеров

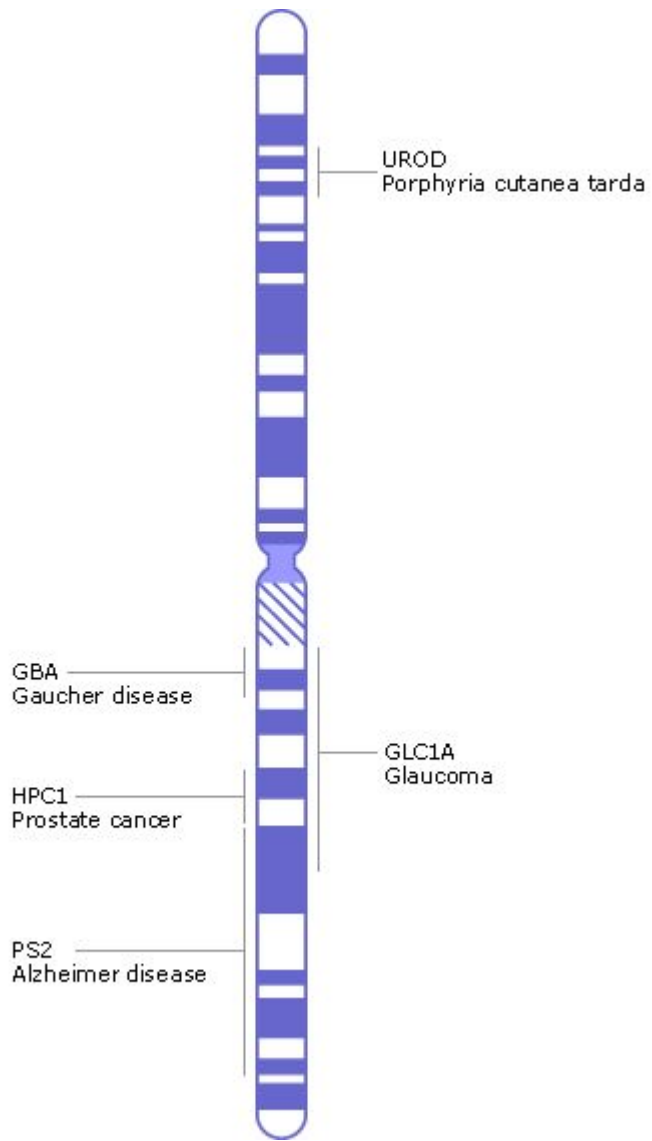
- После размножения интересующих клеток можно провести **анализ ферментов**, активность которых связана с наличием именно этой хромосомы
- Использование **методов дифференцированной окраски** хромосом позволяет связать гены с определенными локусами хромосом, так как в гибридных клетках довольно частыми являются хромосомные разрывы, перестройки, присутствие не целых хромосом, а отдельных фрагментов



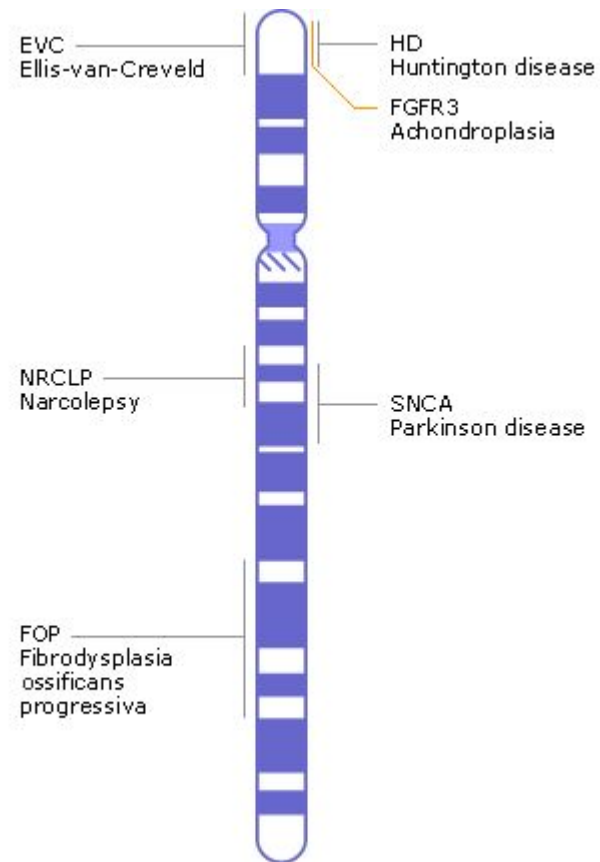
- В данное время для картирования генов хромосом человека применяются также другие методы:
  - *Биохимические методы* — сравнение аминокислотных последовательностей белков и нуклеотидной последовательности ДНК отдельных хромосом
  - *Цитологические методы* — сопоставление изменений морфологии хромосомного участка с характерным фенотипом, анализ «ломких» участков хромосом
  - *Молекулярно-генетические методы* и др.

- **Благодаря картированию удалось установить локализацию многих генов в хромосомах человека**
- Гены располагаются в хромосомах довольно скученно, образуя группы, между которыми могут находиться большие незанятые участки (пустыни)
- В различных хромосомах находится различное число генов
- Наибольшее число генов - свыше 3 000 в наибольшей из аутосом - первой
- В X-хромосоме их известно свыше 1400

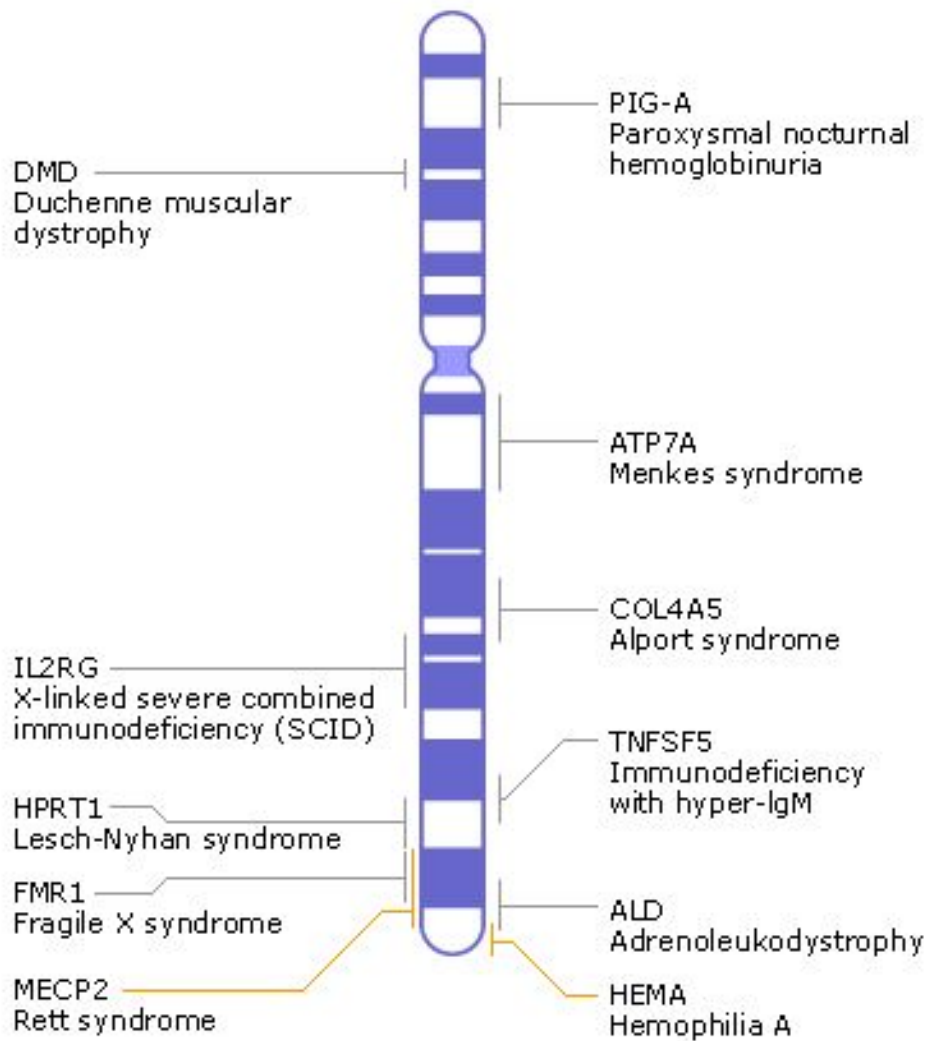




**Хромосома 1**



**Хромосома 4**



## X-хромосома

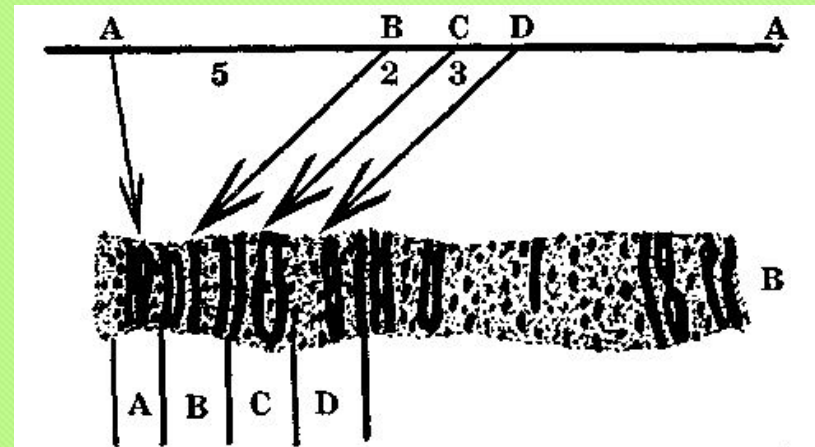


## • Аллели

- группы крови по системе АВ0, находятся в 9-й хромосоме
- группы крови по системе MN - во 2-й
- системы резус-фактора (Rh) - в 1-й хромосоме
- главного комплекса гистосовместимости – в 6-й хромосоме
- Свыше 200 генов напрямую унаследованы нами от бактерий
- Повторяющиеся последовательности ДНК, которые ранее считались **лишними**, могут оказаться «черным ящиком» эволюции и рассказать о предыдущих 800 млн. годах развития органического мира

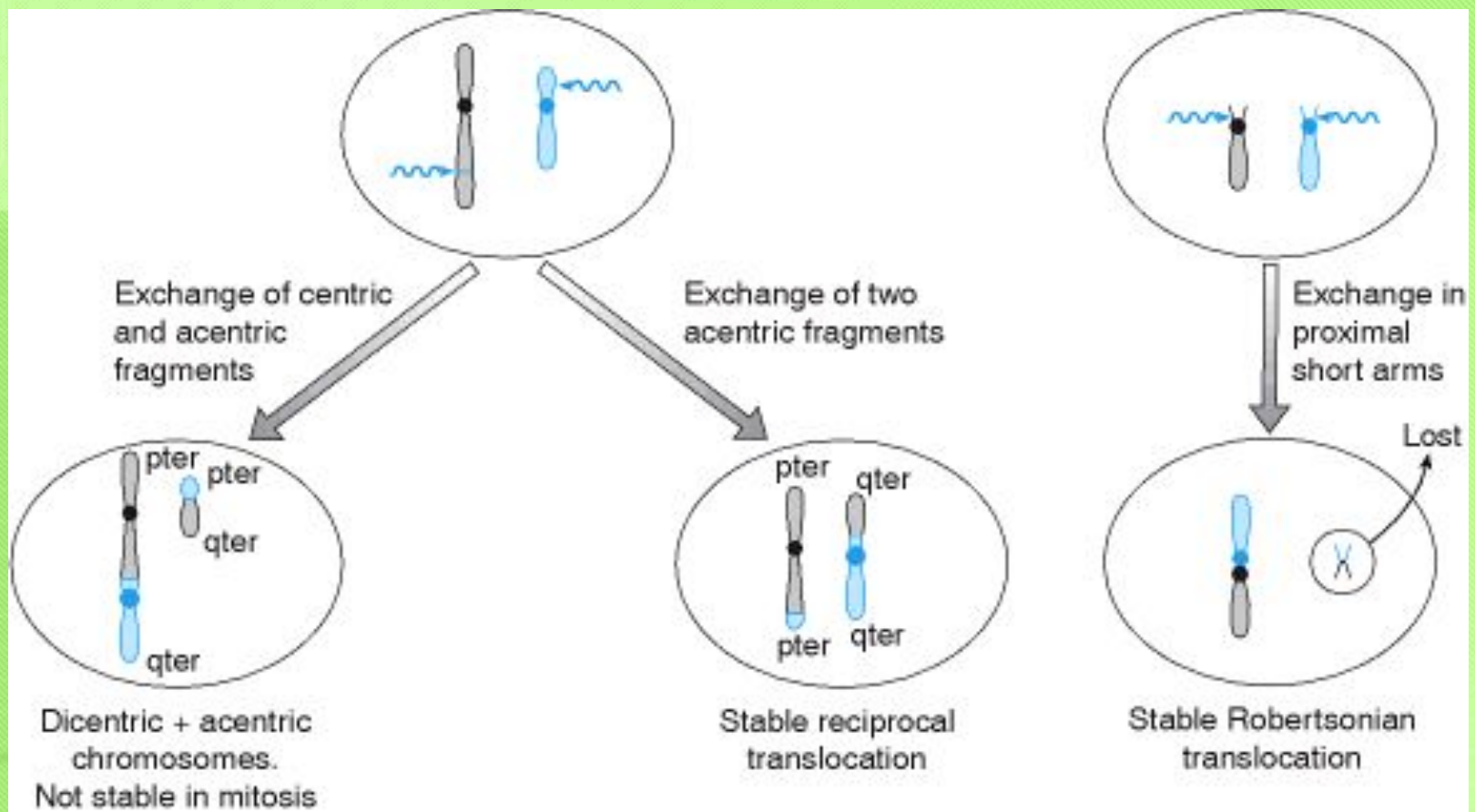
- **Цитологические карты** представляют собой фотографию или точный рисунок хромосомы, на котором обозначается последовательность расположения генов
- Расположение генов на цитологических картах определяется с помощью транслокации
- **Транслокация** – тип хромосомной перестройки
- Во время транслокации происходит обмен негомолотичными участками хромосом
- С помощью микроскопии потом изучают размеры, локализацию хромосомных перестроек

Генетическая карта хромосомы




Цитологическая карта хромосомы



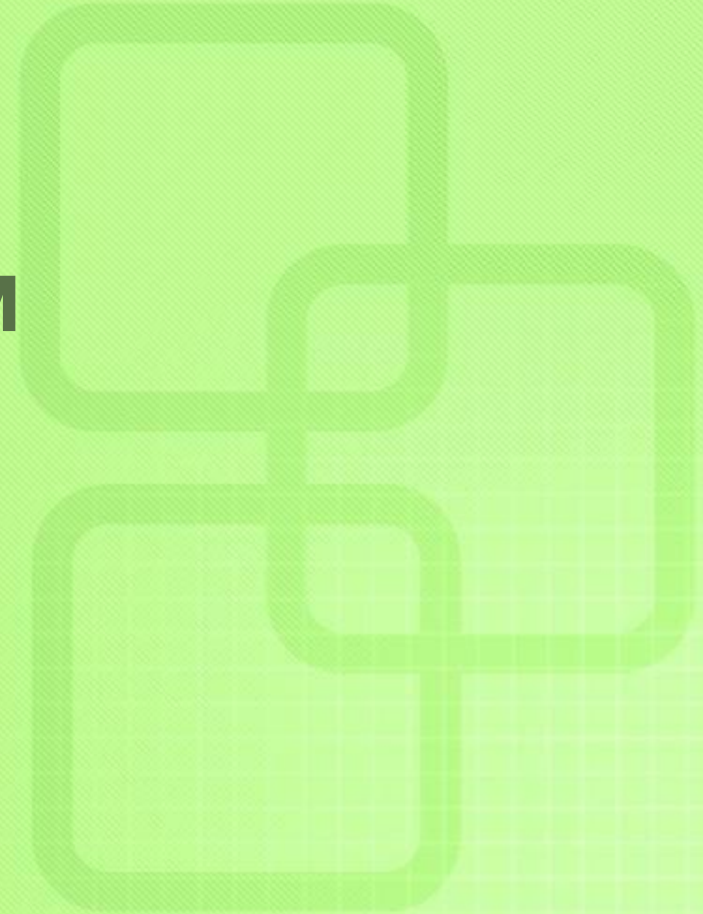
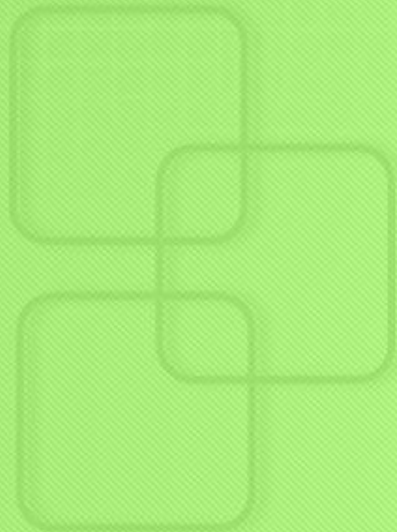


**Транслокации.** Дицентрические и ацентрические хромосомы являются нестабильными во время митоза. Робертсоновские транслокации образуются обменом между проксимальными короткими плечами акроцентрических хромосом 13, 14, 15, 21 и 22. Несмотря на наличие двух центромер, эти хромосомы функционируют как одна и они являются стабильными. Малый ацентрический фрагмент утрачивается, но это не имеет патологических последствий, т.к. он содержит только повторяющиеся последовательности ДНК и которые также представлены в других акроцентрических хромосомах

- 
- Дальнейшее картирование хромосом человека будет иметь практическое значение: станет возможным с помощью методов генной инженерии проводить профилактику и лечение многих наследственных болезней



**Генетика пола.  
Сцепленное с полом  
наследование**



# Определение пола

- Биологически, **пол** – это совокупность морфологических, физиологических и поведенческих характеристик, которые отличают женские организмы (которые продуцируют яйцеклетки) от мужских организмов (продуцирующих сперматозоиды)



- У раздельнополых животных особи с разным полом рождаются в соотношении 1:1
- Это картина наследования при анализирующем скрещивании:

P: Aa x aa

F: Aa, aa

1:1

- **Пол наследуется как менделирующий признак**

# Механизмы определения и дифференциации пола

1. **Хромосомные механизмы**
2. Мужская гаплоидия или гапло-диплоидный механизм
3. Механизм генного баланса
4. Эффект одного гена
5. Цитоплазматическое определение пола



# Хромосомная теория определения пола

- У большинства диплоидных половых животных выявлена пара **половых хромосом**, ответственных за определение пола. Они обозначаются как **X** и **Y**
- **X-хромосома** была впервые выявлена немецким биологом **Германом Хенкингем** в **1891 г.** при исследовании сперматогенеза у самца жука рода ***Lygaeus***



- Хромосомная теория определения пола была разработана **Вилсоном** и **Стивенсом** (1902-1905)
- Они назвали **X** и **Y** хромосомы – **половыми хромосомами** или **аллососомами**, а другие хромосомы – **аутосомами**
- Согласно этой теории:
  - половые хромосомы содержат гены пола. X-хромосома несет гены, определяющие женский пол, а Y-хромосома – гены, ответственные за мужской пол
  - число X- и Y-хромосом определяют пол индивидуума
  - аутосомы содержат гены соматических признаков. Они не связаны с полом



# Типы хромосомных механизмов определения пола

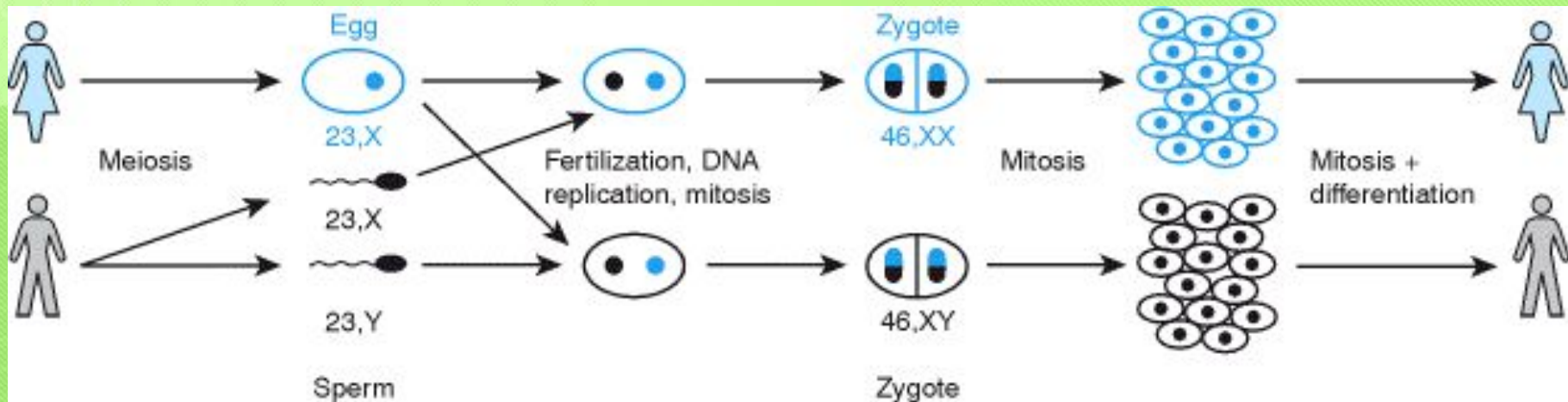
- **Недифференцированные половые хромосомы** У примитивных форм половые хромосомы (X или Y) не идентифицированы. Гены, определяющие пол, возможно, локализованы в аутосомах. Это наиболее примитивный тип половой детерминации

## XX-XY тип

- Данный тип определения пола был впервые изучен на жуке *Lygaeus turcicus* Вильсоном и Стивенсом
  - самки имеют набор половых хромосом XX
  - самцы имеют набор половых хромосом XY
- Этот тип определения пола выявлен у человека, дрозофилы, ряда насекомых
- Модификация этого типа определения пола: XY у самок (куры, птицы, некоторые рыбы, бабочки)



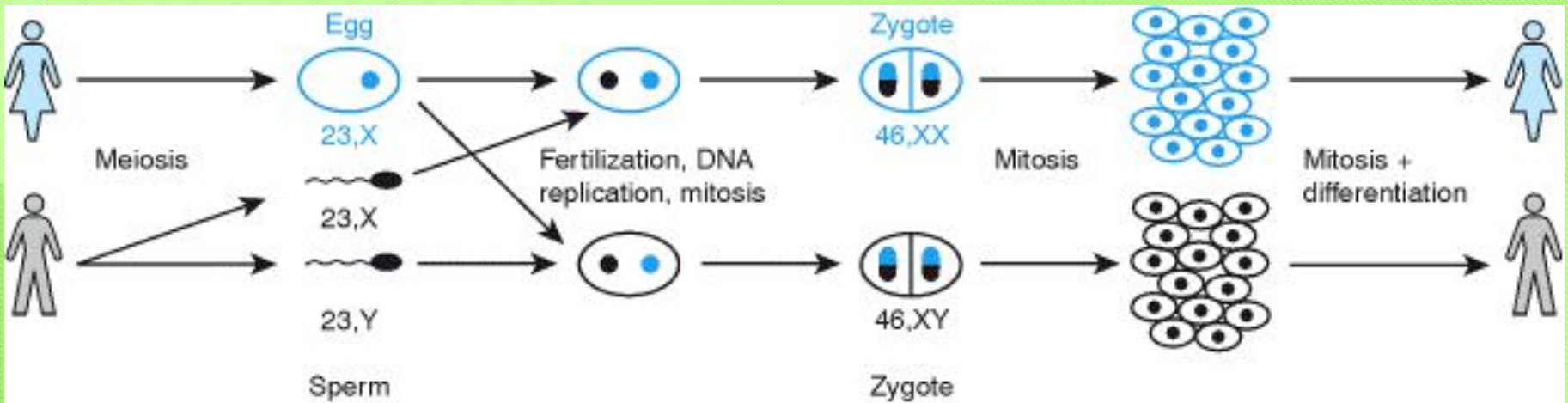
- Из 46 хромосом (23 пары) в кариотипе человека:
  - 22 пары одинаковы у мужчин и женщин (**аутосомы**)
  - а одна пара, имеющая название половых (**гетерохромосомы, гоносомы**), у различных полов отличается: у женщин — XX, у мужчин — XY
- Половые хромосомы представлены в каждой соматической клетке индивида



- При образовании гамет во время мейоза гомологичные половые хромосомы расходятся в разные половые клетки
- Таким образом, каждая яйцеклетка кроме 22 аутосом несет одну половую хромосому X (гаплоидный набор хромосом равняется 23)
- Все сперматозоиды также имеют гаплоидный набор хромосом, из которых 22 — аутосомы, а одна — половая. Половина сперматозоидов содержит X, вторая половина — Y хромосому



- Так как женские половые хромосомы одинаковы и все яйцеклетки несут X-хромосому, то женский пол у человека называют **гомогаметным**
- Мужской пол у человека в связи с отличием половых хромосом (X или Y) в сперматозоидах называется **гетерогаметным**



- **Пол человека определяется в момент оплодотворения.** Женщина имеет один тип гамет — X, мужчина — два типа гамет: X и Y
- При оплодотворении хромосомные наборы гамет объединяются. Зигота содержит 22 пары аутосом и одну пару половых хромосом
- Если яйцеклетку оплодотворил сперматозоид с X-хромосомой, то в зиготе пара половых хромосом будет XX, и из нее разовьется девочка. Если же оплодотворение произвел сперматозоид с Y-хромосомой, то набор половых хромосом в зиготе — XY. Такая зигота даст начало мужскому организму
- Таким образом, **пол будущего ребенка определяет гетерогаметный по половым хромосомам мужчина.** Соотношение полов при рождении, по данным статистики, составляет приблизительно 1:1



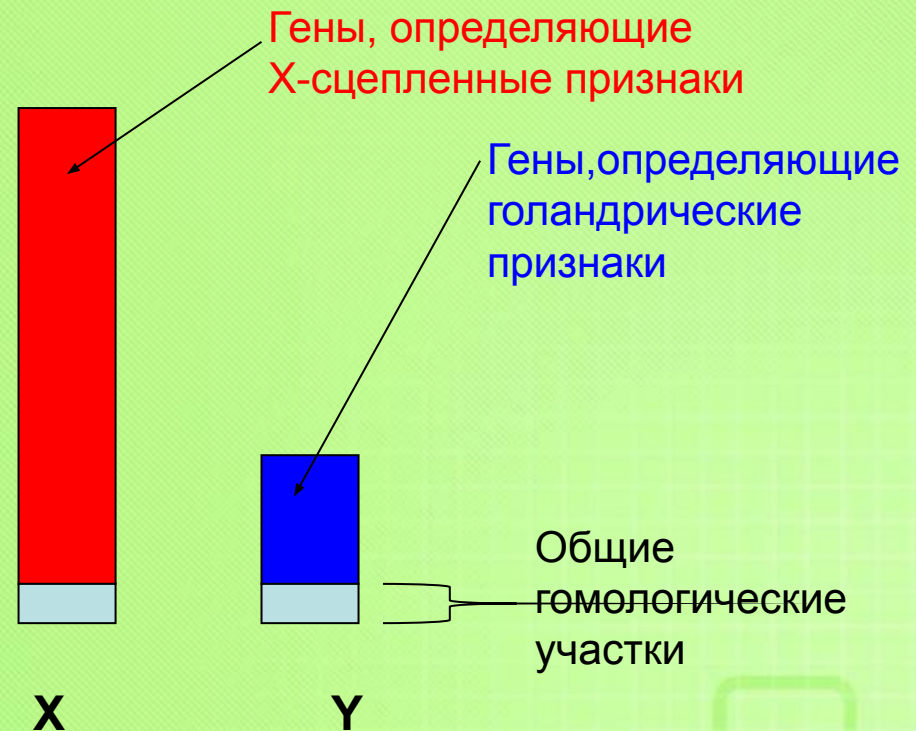
- *Хромосомное определение пола — не единственный уровень половой дифференцировки*
- У эмбрионов высших позвоночных развиваются признаки противоположного пола, вместе с признаками, определяемыми собственными половыми хромосомами
- То есть пол изменяется при определенных условиях! **Под действием половых гормонов**, синтезируемых половыми железами – **половая дифференцировка**

# Наследование, сцепленное с полом

- У млекопитающих пары гомологичных аутосомных хромосом являются структурно идентичными (**гомоморфными**). В то же время X и Y хромосомы человека и других видов млекопитающих являются **гетероморфными**
- **X-хромосома** человека представляет собой субметацентрическую хромосому, которая содержит около 165 Мб ДНК, тогда как **Y** – это акроцентрическая хромосома существенно меньших размеров (содержит около 60 Мб ДНК).
- **X-хромосома содержит значительное число (около 1400) важных генов.** В отличие от этого, **значительный объем Y-хромосомы человека является генетически инертным**, состоит из конститутивного гетерохроматина, который содержит разные типы некодирующей ДНК, которые высоко и умеренно повторяются. Только очень незначительное число функциональных генов выявлено на Y-хромосоме, часть из которых гомологична генам X-хромосомы, а другая часть является Y-специфической и такой, что экспрессируется в семенниках



- Несмотря на морфологические отличия, X- и Y-хромосомы **способны к спариванию во время мейоза** в мужских клетках и обмену информативными последовательностями. Обмен последовательностями происходит в небольших гомологичных регионах между X- и Y-хромосомами. **Эти регионы называют псевдоаутосомальными регионами**, т.к. ДНК-последовательности в этих регионах не проявляют строго сцепленного с полом наследования

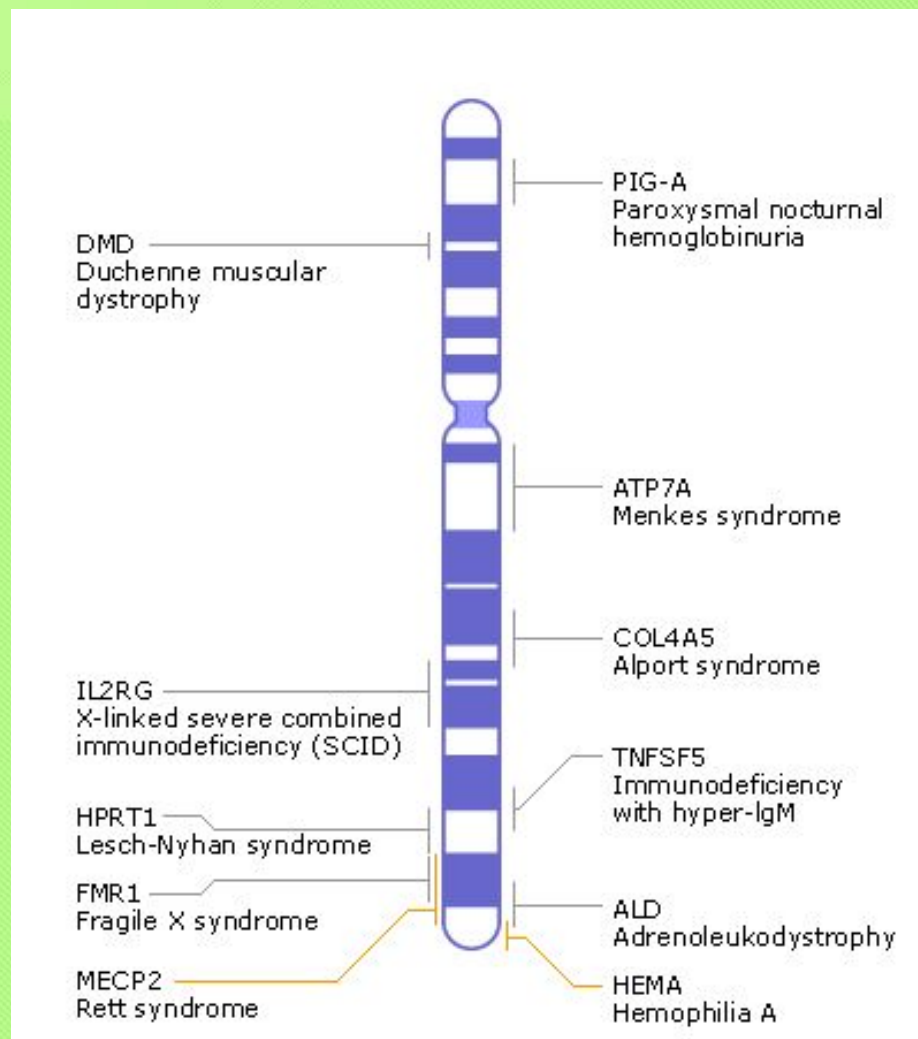


# Х-хромосома человека

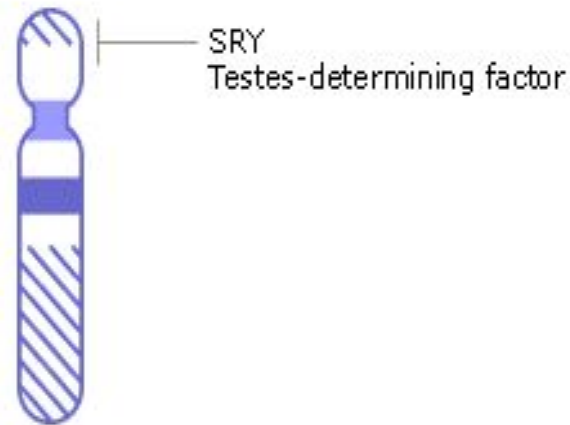
## Относительное расположение патологических генов

В Х-хромосоме располагаются гены, вызывающие болезни:

- пароксизмальную ночную гемоглобинурию
- миодистрофию Дюшенна
- синдром Менкеса
- синдром Альпорта
- синдром Леша-Нихана
- синдром ломкой Х-хромосомы
- гемофилию А







**Y-хромосома человека** Бедная генами. Одним из наиболее значимых генов является testes-determining factor или sex-determining factor (детерминирующий семенники фактор, определяющий пол фактор), известный как SRY

- У мужчин в половых хромосомах некоторые гены не имеют второго аллеля в гомологичной хромосоме
- В таком виде признак определяется не парой аллельных генов, как обычный менделирующий признак, а только одним аллелем
- *Подобное состояние гена называется **гемизиготным**, а признаки, развитие которых обусловлено одиночным аллелем, расположенным в одной из альтернативных половых хромосом получили название **сцепленных с полом***
- Признаки, сцепленные с полом, преимущественно развиваются у одного из двух **полов** и по-разному наследуются у мужчин и женщин



# Наследование

**Моногенное**

**Полигенное**

**Аутосомное**

**Гоносомное**

**Доминант-  
ное**

**Рецессив-  
ное**

**X-сцепленное**

**Y-сцепленное  
(голандрическое)**

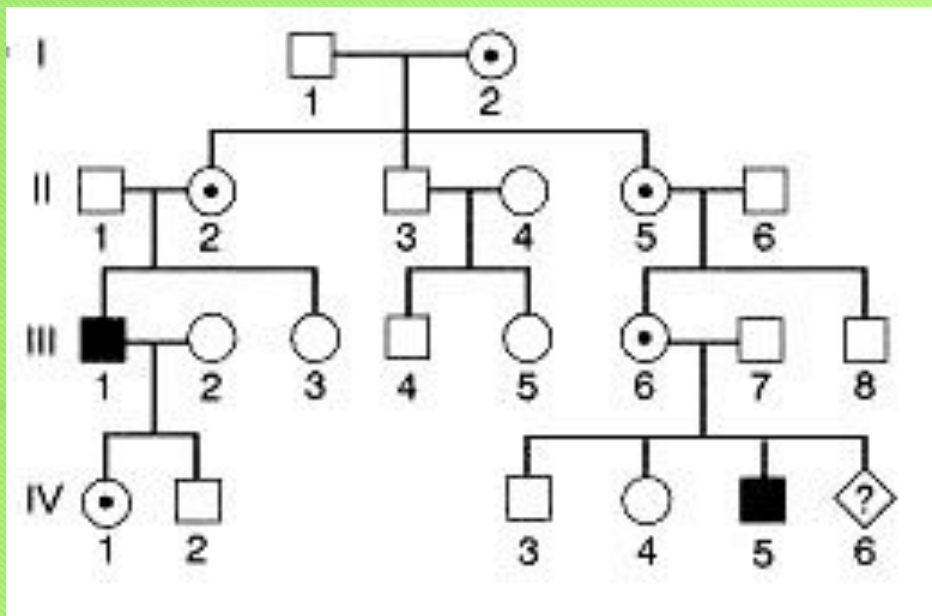
**Доминантное**

**Рецессивное**

витаминорезистентный  
рахит, темная эмаль  
зубов

гемофилия, дальтонизм,  
атрофия зрительного нерва,  
миопатия Дюшенна

# X-сцепленное рецессивное наследование



- Преимущественно поражаются мужчины
- Пораженные мальчики обычно рождаются от непораженных родителей
- Мать обычно является асимптоматичным носителем и может иметь пораженного отца
- Женщины могут быть пораженными, если их отец пораженный, а мать является носителем. Или очень редко в результате неслучайной X-инактивации
- При наследовании отсутствует передача от мужчины к мужчине

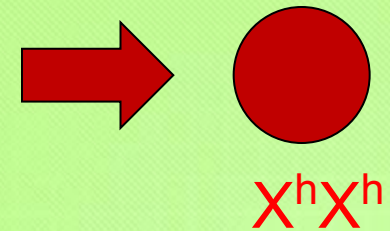
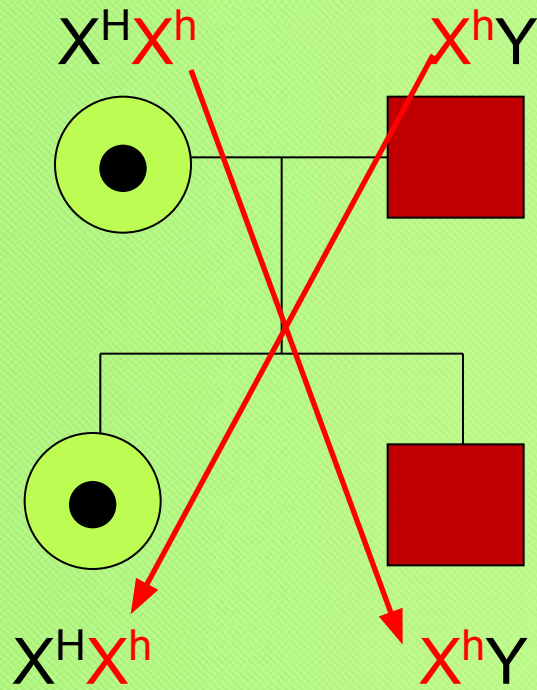


# Наследование гемофилии

$H$  — ген нормального свертывания крови,

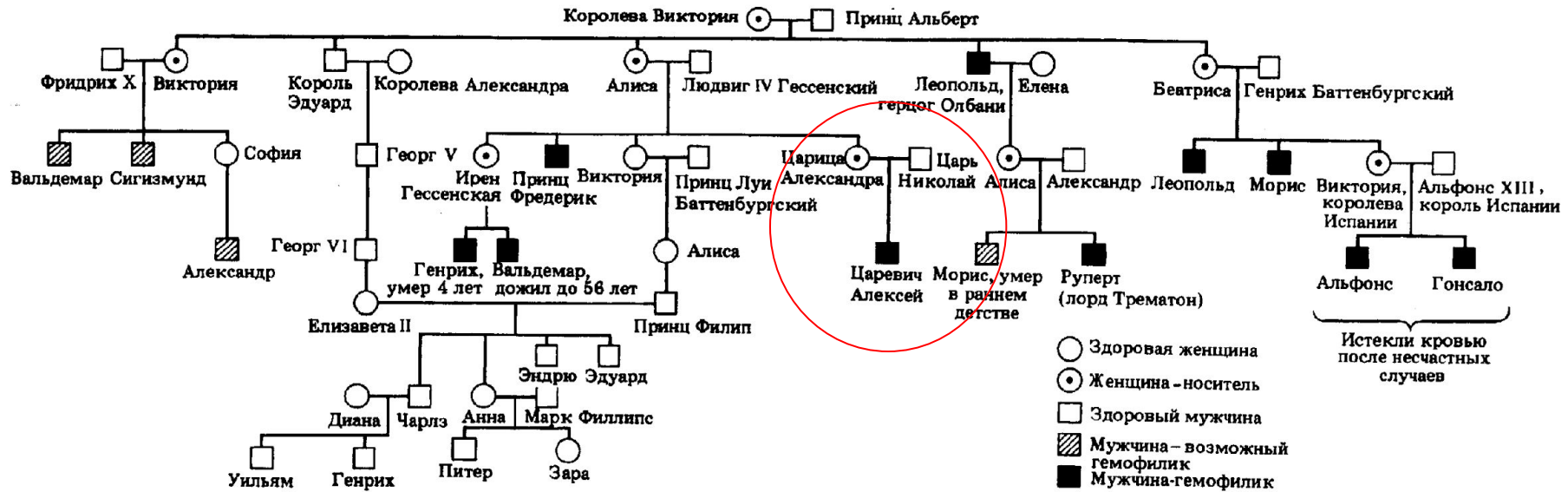
$h$  — ген гемофилии

- $X^hY$  — мужчина с гемофилией (гемизиготность)
- $X^HY$  — здоровый мужчина
- У женщин признак определяется парой аллельных генов в половых хромосомах  $XX$ , таким образом, гемофилия может проявиться только в ГОМОЗИГОТНОМ СОСТОЯНИИ:
  - $X^HX^H$  — женщина здорова
  - $X^HX^h$  — гетерозиготная женщина, носитель гена гемофилии, здорова
  - $X^hX^h$  — женщина с гемофилией



**Крис-кросс наследование при гемофилии**





Наследование гемофилии А у потомков королевы Виктории. На схеме обозначены только те потомки, которые участвовали в передаче гемофилии или были поражены ею.

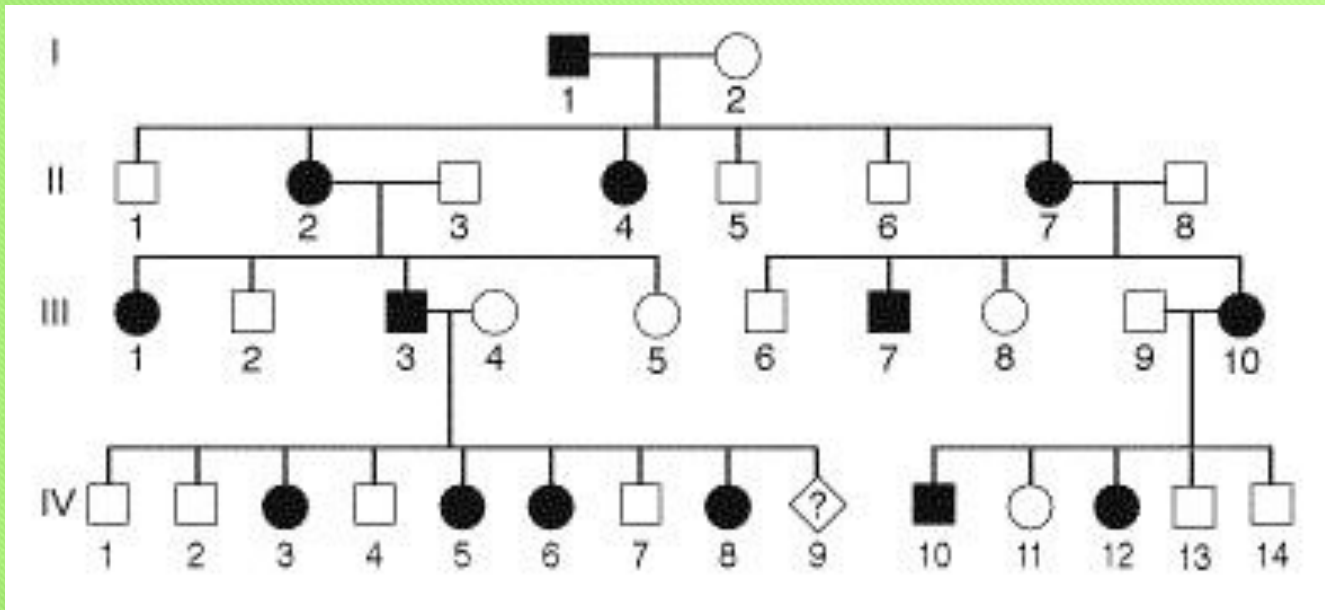
Родословная британского королевского двора продолжена, чтобы показать, почему гемофилия не проявилась здесь ни у одного из потомков королевы Виктории в течение 7 поколений

- Гемофилия – заболевание неоднородное. Различают несколько типов гемофилии
- **Гемофилия А** – классическая гемофилия, дефицит фактора VIII – антигемофильного глобулина. X-сцепленное заболевание, 1:10 000 живорожденных мальчиков
- Заболевание наследственное или вследствие мутации гена в сперматозоиде или яйцеклетке (при сперматогенезе в 5 раз чаще происходит мутация, чем при овогенезе)



- **Гемофилия В** (болезнь Кристмасса) – X-сцепленное заболевание, дефицит фактора IX (тромбопластина). Частота 1:30 000 живорожденных мальчиков
- Составляет 15% от всех случаев гемофилии
- **Гемофилия С** – дефицит фактора XI (предшественника тромбопластина). Часто встречается на Ближнем Востоке (Йемен, Израиль). 1% случаев гемофилии
- **Встречается и АУТОСОМНАЯ гемофилия!**

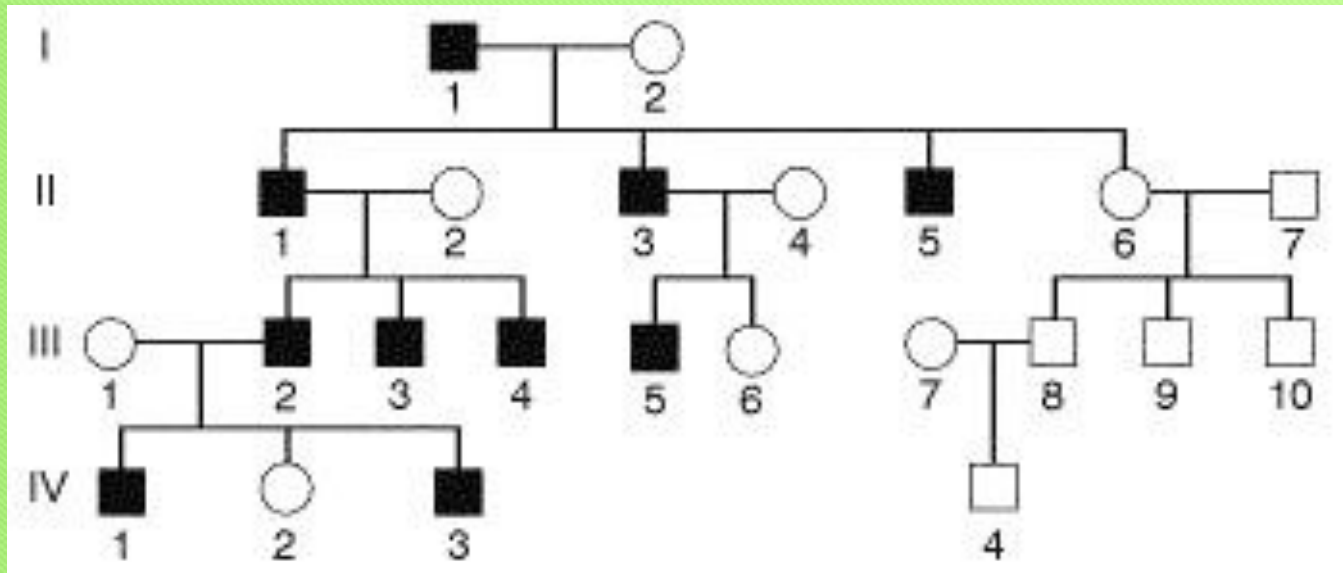
# X-сцепленное доминантное наследование



- Поражаются особи обоих полов, но чаще женщины
- Женщины поражаются более умеренно и разнообразнее, чем мужчины
- Ребенок пораженной женщины, независимо от пола, имеет 50% вероятность поражения
- Если поражен мужчина, то поражаются все его дочери и ни один из сыновей



# Y-сцепленное наследование



- Поражаются только мужчины
- Пораженные мужчины всегда имеют пораженного отца
- Все сыновья пораженного мужчины являются пораженными

**Голандрические признаки:** оволосение ушей (гипертрихоз), перетяжки между пальцами ног, ихтиоз (кожа имеет глубокую исчерченность и напоминает рыбью чешую)

# Признаки, ограниченные полом и зависимые от пола

- Признаки человека, наследование которых каким-то образом связано с полом, делятся на несколько категорий
- **Признаки, ограниченные полом.** Их развитие обусловлено генами, расположенными в аутосомах обоих полов, но проявляются только у одного пола
- Например, гены, определяющие **ширину таза женщины**, локализованы в аутосомах, унаследуются и от отца и от матери, но проявляются только у женщин
- То же самое касается **возраста полового созревания девушек**
- Среди мужских признаков, ограниченных полом - **количество и распределение волосяного покрова на теле**



- **признаки, контролируемые полом или зависимые от пола.** Развитие соматических признаков обусловлено генами, расположенными в аутосомах, **проявляются они у мужчин и женщин, но по-разному**
- Например, у мужчин **раннее облысение** — признак доминантен, проявляется как у доминантных гомозигот (AA), так и у гетерозигот (Aa). У женщин этот признак рецессивен, он проявляется только у рецессивных гомозигот (aa). Поэтому лысых мужчин значительно больше, чем женщин
- Другим примером может быть **подагра**, у мужчин ее пенетрантность выше: 80% против 12% у женщин. То есть, чаще подагрой болеют мужчины
- **Экспрессивность признаков, контролируемых полом, обусловлена половыми гормонами.** Например, тип певческого голоса (бас, баритон, тенор, сопрано, меццо-сопрано и альт) контролируется половой конституцией. Начиная с периода полового созревания, признак находится под влиянием половых гормонов

