Allele (หรือ Allelomorph) factors หรือ genes ที่เป็นคู่เดียวกัน เรียกว่ามันเป็น allelic ต่อกัน แต่ละตัวอาจเรียกว่า allele (an alternative form of a gene) การเป็น allelic ต่อกันระหว่าง alleles ต่าง ๆ ก็หมายความว่า alleles เหล่านั้นจะมีตำแหน่ง (locus) อยู่ที่เดียวกันบน homologous chromosomes เช่น T กับ t เป็น allelic กัน

ตำแหน่งของ gene ที่ควบคุมความสูง
allele T นำลักษณะสูง
allele t นำลักษณะเตี้ย

หมายเหตุ

ในการที่จะใช้อักษรตัวใดแทนลักษณะใดนั้น สามารถจะเลือกใช้ได้ตามใจชอบ แต่โดยมากแล้วก็ใช้ภาษาอังกฤษตัวใหญ่แทน dominant allele และใช้ตัวเล็กแทน recessive allele แต่ในบางครั้งอาจใช้ตัวเลขห้อยเข้าไปด้วยแทน allele ต่าง ๆ เช่น B^1, B^2, B^3 หรือในการทดลองกับแมลงหวี่นั้น ถือว่าเดิมแมลงหวี่ส่วนใหญ่จะเป็น wild type และลักษณะต่าง ๆ ของมันเป็น dominance เรามักจะเขียนเครื่องหมาย + แทน ซึ่งจะเป็นลักษณะอะไรก็ได้ของ wild type ส่วนลักษณะที่ผิดแผกออกไปถือว่าเกิดจาก mutation จะเขียนด้วยอักษรตัวเล็ก เช่น ลักษณะตาพวก wild type มีตาสีแดง มี mutant white eye เกิดจาก allele w ดังนั้น ++ และ +w หรือ WW และ Ww จะมีตาสีแดง ww มีตาสีขาว ลักษณะปีกกุด (vestigial wing) เกิดจาก mutation เขียนย่อ ๆ ว่า vg ดังนั้น ++ และ +vg หรือ VgVg และ Vgvg จะมีปีกยาว vgvg มีปีกกุด

Gamete หมายถึง egg หรือ sperm cell หรือ sex cell หรือโครงสร้างอื่น ๆ ที่ทำหน้าที่เช่นเดียวกันในพืช

Zygote เป็นผลจาก fertilization หรือการรวมกันของสอง gametes

Homozygote หมายถึง zygote ที่มี factors หรือ genes หรือ alleles เหมือนกันอยู่ด้วยกัน เช่น TT หรือ tt คำ adjective เป็น homozygous

Heterozygote หมายถึง zygote ที่มี alleles ที่แตกต่างกันมาอยู่ด้วยกัน เช่น Tt หรือ Rr คำ adjective เป็น heterozygous

Genotype หมายถึง genes หรือ genetic makeup ที่ควบคุมลักษณะของสิ่งมีชีวิตแต่ละลักษณะ เช่น TT หรือ Tt หรือ tt ที่ควบคุมความสูงในต้นถั่ว ส่วน genotypic ratio หมายถึงอัตราส่วนระหว่าง genotypes ต่าง ๆ ที่จะเกิดจากการผสม เช่น

Tt x Tt ⟶ 1TT : 2Tt : 1tt หรือ genotypic ratio = 1:2:1

Phenotype หมายถึงลักษณะที่ปรากฏออกมา ซึ่งเป็นผลจากการแสดงออกของ genotype เช่น Tt และ TT แม้จะเป็นคนละ genotype แต่จะให้ phenotype ออกมาเหมือน ๆ กันคือถั่วต้นสูง ส่วน phenotypic ratio ก็หมายถึงอัตราส่วนระหว่าง phenotypes ต่าง ๆ ที่จะได้จากการผสม เช่น Tt x Tt ⟶ 3 สูง : 1 เตี้ย หรือ phenotypic ratio = 3:1

Backcross เป็นการผสมระหว่าง hybrid กับ parental genotype อันใดอันหนึ่ง เช่น

P_1: TT x P_2: tt

↓

F_1: Tt

Backcross

F_1: Tt x P_1: TT หรือ F_1: Tt x P_2: tt

↓ ↓

1TT : 1Tt 1Tt : 1tt

ลูกที่ได้จาก backcross เรียก backcross generation หรือ backcross progeny

Testcross เป็นการผสมระหว่างลูกชั่วใดก็ได้ กับ recessive parental type ซึ่งก็ถือได้ว่าเป็น backcross แบบหนึ่ง หรือเป็นการผสมระหว่าง unknown genotype กับ recessive tester เพื่อต้องการจะทราบว่ามันเป็น homozygous หรือ heterozygous genotype เช่น

P_1: TT x P_2: tt

↓

F_1: Tt

↓ ⊗

F_2: 1TT : 2Tt : 1tt

สูง เตี้ย

Testcross

F_2: TT x P_2: tt และ F_2: Tt x P_2: tt

↓ ↓

testcross progenies: Tt (สูงหมด); 1Tt : 1tt (1 สูง : 1 เตี้ย)

ระดับของ dominance

Complete dominance หมายถึงการข่มของ dominant allele ต่อ recessive allele จะเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ทำให้ homozygous dominant genotype และ heterozygous มี phenotype เหมือนกัน เช่น TT = Tt = คนสูง

Incomplete or partial dominance หมายถึงการที่ allele หนึ่งแสดงการข่ม allele ที่เป็นคู่ของมันได้ แต่เป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ ทำให้ genotype ที่เป็น heterozygous มี phenotype คล้อยไปทาง homozygous dominance จะได้ genotypic ratio เท่ากับ phenotypic ratio

No dominance or absence of dominant or intermediate เป็นกรณีที่ alleles ข่มกันไม่ลง heterozygote จะมีลักษณะกึ่งกลางระหว่าง homozygotes ทั้งสอง ทำให้แต่ละ genotype มี phenotype ของมันเอง และ genotypic ratio จะเท่ากับ phenotypic ratio

Over dominance เป็นกรณีที่ heterozygote จะมี phenotype เหนือกว่า phenotype ของพ่อแม่ที่เป็น homozygotes เช่น

TT x tt

สูง 3 ฟุต สูง 1 ฟุต

↓

Tt

สูง 5 ฟุต

Co-dominance หมายถึงการที่ alleles แต่ละตัวจะแสดง phenotype ของมันออกมารวมกันใน heterozygote เช่น ในกรณีของหมู่เลือดคน I^A = หมู่ A > i = หมู่ O I^B = หมู่ B > i = หมู่ O แต่ I^A กับ I^B จะเป็น co-dominant alleles

I^AI^A และ I^Ai ให้หมู่เลือด A

I^BI^B และ I^Bi ให้หมู่เลือด B

I^AI^B ให้หมู่เลือด AB

ii ให้หมู่เลือด O

การคำนวณหาจำนวนชนิดและอัตราส่วนของ gametes, genotypes และ phenotypes เมื่อมียีนส์เกี่ยวข้องหลายคู่

Monohybrid cross เป็นการผสมที่เกี่ยวข้องกับลักษณะเดียวหรือมียีนส์เกี่ยวข้องเพียงคู่เดียว จากกฎข้อที่หนึ่งของเมนเดลที่ว่า alleles จะมีการแยกตัวออกจากกันเมื่อมีการสร้าง gametes ขึ้นมา ดังนั้น heterozygote สามารถจะสร้าง gametes ได้สองชนิดในอัตราส่วนเท่า ๆ กัน

ตัวอย่าง แสดงถึงผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการผสมระหว่างพ่อแม่ที่มี genotypes แบบต่าง ๆ

Cross	Gametic frequency		Progeny		
			Genotypic frequency	Phenotypic ratio	
P_1 P_2	P_1	P_2		Complete dominant	Intermediate
AA aa	1(A)	1(a)	all Aa	all dominant	all inter
Aa Aa	$\frac{1}{2}$(A), $\frac{1}{2}$(a)	$\frac{1}{2}$(A), $\frac{1}{2}$(a)	$\frac{1}{4}$AA, $\frac{1}{2}$Aa, $\frac{1}{4}$aa	3:1	1:2:1
Aa AA	$\frac{1}{2}$(A), $\frac{1}{2}$(a)	1(A)	$\frac{1}{2}$AA, $\frac{1}{2}$Aa	all dominant	1:1
Aa aa	$\frac{1}{2}$(A), $\frac{1}{2}$(a)	1(a)	$\frac{1}{2}$Aa, $\frac{1}{2}$aa	1:1	1:1

ในกรณีของ intermediate หรือ no dominance หรือ co-dominance นั้น phenotypic ratio กับ genotypic ratio จะเท่ากัน

Frequency อาจแสดงเป็นเศษส่วนหรือเป็นเลขทศนิยมก็ได้ ผลคูณระหว่าง frequencies ของ gametes จากทั้งสองฝ่ายจะเท่ากับ frequency ของ genotype ที่จะเกิดจากการรวมของ gametes คู่นั้น ๆ เช่น ในข้าวโพด ลักษณะ starchy ถูกควบคุมโดย allele Wx จะเป็นลักษณะข่มต่อ waxy ซึ่งถูกควบคุมโดย allele wx ในการผสมระหว่าง heterozygote จะได้ผลดังนี้

Starchy Wxwx $\frac{1}{2}$(Wx), $\frac{1}{2}$(wx) x Starchy Wxwx $\frac{1}{2}$(Wx), $\frac{1}{2}$(wx)

$\frac{1}{4}$WxWx + $\frac{1}{4}$Wxwx + $\frac{1}{4}$Wxwx + $\frac{1}{4}$wxwx

or $\frac{1}{4}$WxWx + $\frac{1}{2}$Wxwx + $\frac{1}{4}$wxwx

or 0.25WxWx + 0.50Wxwx + 0.25 wxwx } genotypic ratio = 1:2:1

and $\frac{1}{4}$ starchy + $\frac{1}{4}$ starchy + $\frac{1}{4}$ starchy + $\frac{1}{4}$ waxy

or $\frac{3}{4}$ starchy + $\frac{1}{4}$ waxy

or 0.75 starchy + 0.25 waxy } phenotypic ratio = 3:1

หรือในการผสมระหว่าง heterozygote กับ homozygous recessive

Starchy Wxwx $\frac{1}{2}$(Wx), $\frac{1}{2}$(wx) x Waxy wxwx 1(wx)

$\frac{1}{2}$Wxwx + $\frac{1}{2}$wxwx ⟶ genotypic ratio = 1:1

$\frac{1}{2}$ starchy + $\frac{1}{2}$ waxy ⟶ phenotypic ratio = 1:1

Dihybrid cross เป็นการผสมที่เกี่ยวข้องกับสองลักษณะหรือยีนส์สองคู่ที่อยู่บนคนละโครโมโซม ปกติแล้วถ้าทำการผสมระหว่างพ่อแม่ที่มีลักษณะตรงข้ามกันอยู่สองลักษณะ ซึ่งเป็น complete dominance ในชั่ว F_2 จะได้ phenotypic ratio = 9:3:3:1

ในการหา genotypic และ phenotypic ratio ที่ได้จากการผสมระหว่าง genotypes ต่าง ๆ ที่มียีนส์เกี่ยวข้องหลายคู่นั้นมีวิธีหาอยู่ 2 แบบ คือ

1. **Checkerboard or Punnett square** โดย Punnett แนะนำให้ทำตารางขึ้นมาแล้วเรียง gametes ที่สร้างขึ้นจากฝ่ายหนึ่งตาม columns และ gametes ของอีกฝ่ายตาม rows ผลรวมของ gametes ทั้งสองฝ่ายในแต่ละช่องจะเป็น genotype ที่ได้จากการปฏิสนธิ หลังจากนั้นก็นำ genotype หรือ phenotype ที่เหมือนกันมารวมกันเพื่อหาอัตราส่วนอีกที

จากตัวอย่างการทดลองของ เมนเดลที่เกี่ยวข้องกับสองลักษณะซึ่งถูกควบคุมโดยยีนส์ที่แสดง complete dominance

R dominant กับ r

Y dominant กับ y

P: RRYY x rryy

round, yellow | wrinkled, green

F_1: RrYy

round, yellow

male gametes

F_2:

Female gametes	RY	Ry	rY	ry
RY	RRYY	RRYy	RrYY	RrYy
Ry	RRYy	RRyy	RrYy	Rryy
rY	RrYY	RrYy	rrYY	rrYy
ry	RrYy	Rryy	rrYy	rryy

จะได้ 9 genotypes ในอัตราส่วน 1:2:1:2:4:2:1:2:1 และ 4 phenotypes ในอัตราส่วน 9:3:3:1 ดังนี้

1/16 RRYY + 2/16 RrYY + 2/16 RRYy + 4/16 RrYy = 9/16 round, yellow

1/16 RRyy + 2/16 Rryy = 3/16 round, green

1/16 rrYY + 2/16 rrYy = 3/16 wrinkled, yellow

1/16 rryy = 1/16 wrinkled, green

วิธีนี้ค่อนข้างช้า เพราะต้องทำตารางหาชนิดของ gametes ก่อน แล้วจึงหา genotypes และ phenotypes ที่เหมือน ๆ กันมารวมกันเข้าอีกที จะทำให้สับสนได้ง่าย

2. <u>Branching or Forked-Line Method</u> เมื่อมียีนส์เกี่ยวข้องหลายคู่ ให้นำยีนส์แต่ละคู่มาทำ monohybrid cross หา genotypic ratio หรือ phenotypic ratio แยกกันก่อน เสร็จแล้วจึงนำผลที่ได้จากแต่ละ cross มาคูณกันอีกที

จากตัวอย่างเดิมหา genotypes และ genotypic ratio ของ F_2

P: RRYY x rryy

F_1: RrYy

F_2:

1/4 RR → 1/4 YY → 1/16 RRYY
1/4 RR → 2/4 Yy → 2/16 RRYy
1/4 RR → 1/4 yy → 1/16 RRyy

2/4 Rr → 1/4 YY → 2/16 RrYY
2/4 Rr → 2/4 Yy → 4/16 RrYy
2/4 Rr → 1/4 yy → 2/16 Rryy

1/4 rr → 1/4 YY → 1/16 rrYY
1/4 rr → 2/4 Yy → 2/16 rrYy
1/4 rr → 1/4 yy → 1/16 rryy

genotypic ratio 1:2:1:2:4:2:1:2:1

หา phenotypes และ phenotypic ratio ของ F_2

P: RRYY x rryy

F_1: RrYy

F_2: (x)

3/4 R- → 3/4 Y- → 9/16 round, yellow
3/4 R- → 1/4 yy → 3/16 round, green
1/4 rr → 3/4 Y- → 3/16 wrinkled, yellow
1/4 rr → 1/4 yy → 1/16 wrinkled, green

} phenotypic ratio 9:3:3:1

No dominance in dihybrid cross ถ้าไม่มีการข่มกันของ alleles แต่ละ genotype จะมี phenotype ของมันเอง และ phenotypic ratio จะเท่ากับ genotypic ratio เช่น ตัวอย่างในพวกดอกสิ้นมังกร ถ้าให้ B นำลักษณะใบกว้าง, B' นำลักษณะใบแคบ, R นำลักษณะสีแดง, R' นำลักษณะสีขาว

BB = ใบกว้าง BB' = ใบปานกลาง $B'B'$ = ใบแคบ

RR = แดง RR' = ชมพู $R'R'$ = ขาว

ถ้าผสมระหว่าง

P: BBRR x $B'B'R'R'$

ใบกว้าง, แดง | ใบแคบ, ขาว

F_1: $BB'RR'$ ใบปานกลาง ชมพู

F_2:

1 BBRR	กว้าง	แดง
2 $BBRR'$	กว้าง	ชมพู
1 $BBR'R'$	กว้าง	ขาว
2 $BB'RR$	ปานกลาง	แดง
4 $BB'RR'$	ปานกลาง	ชมพู
2 $BB'R'R'$	ปานกลาง	ขาว
1 $B'B'RR$	แคบ	แดง
2 $B'B'RR'$	แคบ	ชมพู
1 $B'B'R'R'$	แคบ	ขาว

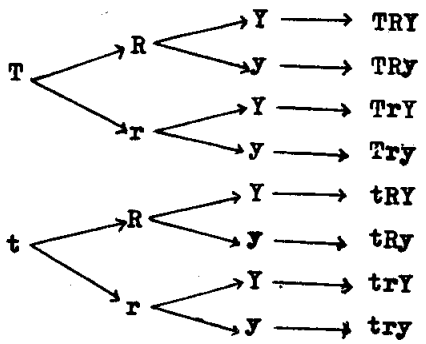
Phenotypic ratio = genotypic ratio = 1:2:1:2:4:2:1:2:1

Trihybrid cross เป็นการผสมที่เกี่ยวข้องกับสามลักษณะหรือยีนส์ 3 คู่ ก็ใช้หลักการในการหาจำนวนชนิดของ gametes, genotype และ phenotype เช่นเดียวกับใน **dihybrid cross** ถ้าเป็น **complete dominance** ในการผสมระหว่างพ่อแม่ที่มีลักษณะต่างกันสามลักษณะ ใน F_2 จะได้ genotypic ratio = (1:2:1)(1:2:1)(1:2:1)= (1:2:1:2:4:2:1:2:1)(1:2:1) = (1:2:1:2:4:2:1:2:1:2:4:2:4:8:4:2:4:2:1:2:1: 2:4:2:1:2:1) และจะได้ phenotypic ratio = (3:1)(3:1)(3:1) = (9:3:3:1)(3:1) = (27:9:9:3:9:3:3:1)

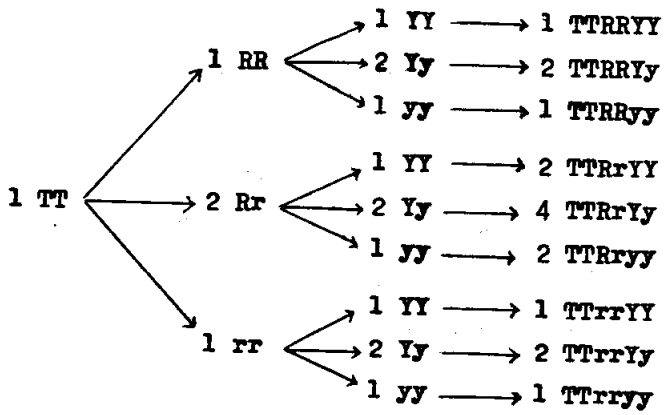
P: ต้น TTRRYY x ต้น ttrryy
ต้นสูง, เมล็ดกลม, สีเหลือง | ต้นเตี้ย, เมล็ดย่น, สีเขียว

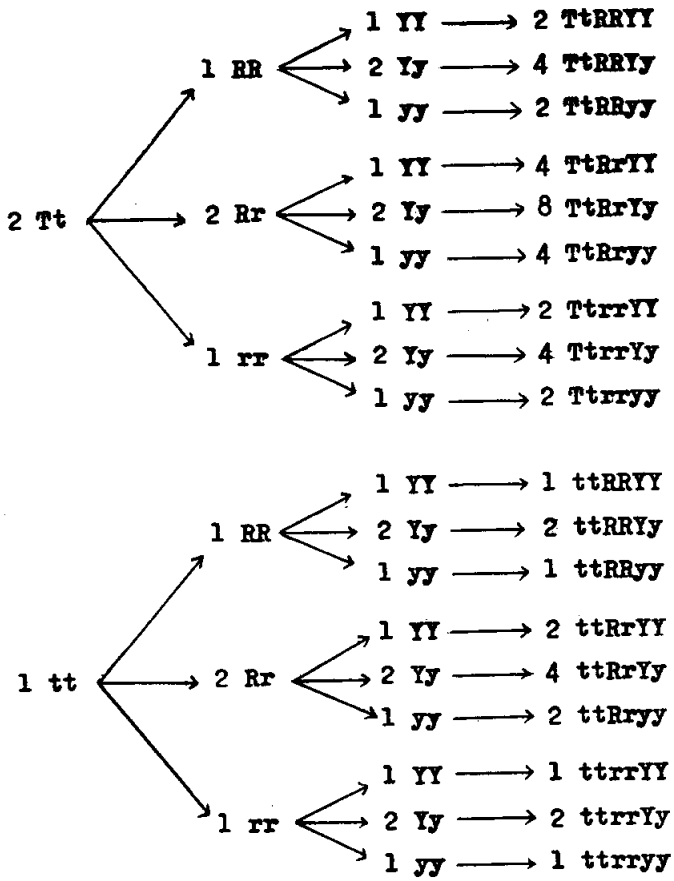
F_1: TtRrYy ต้นสูง, เมล็ดกลม, สีเหลือง

Gametic genotypes

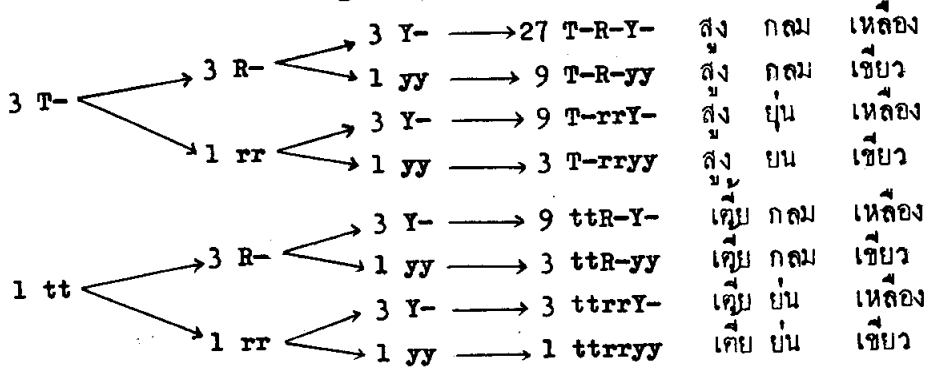


Genotypic ratio ของ F_2





Phenotypic ratio ของ F_2



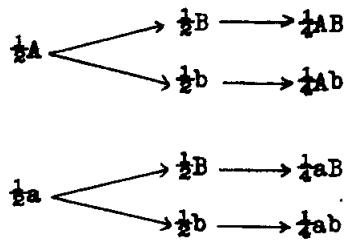
ในการทำโจทย์ต่าง ๆ ที่เขากำหนด genotypes พ่อแม่มาให้แล้ว ให้หาชนิดของ gametes, genotypes และ phenotypes ที่จะเกิดขึ้น หรือถามถึงบาง genotypes และ phenotypes ว่าจะมีอยู่ในสัดส่วนเท่าใดนั้น ขอให้สังเกตดูว่ายีนส์แต่ละคู่มันมีระดับ dominance เป็นแบบไหน เพราะ phenotypic ratio อาจเท่าหรือไม่เท่ากับ genotypic ratio ก็ได้ วิธี branching จะมีประโยชน์มาก

สูตรการคำนวณหาชนิดและอัตราส่วนของ gametes, genotypes, phenotypes และจำนวน possible combinations ของการรวมกันระหว่าง gametes ชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะเกิดจากการผสมตัวเอง หรือจากการผสมระหว่าง F_1 หรือ heterozygous genotype ที่เหมือนกัน

กำหนดให้ n = จำนวนคู่ของยีนส์ที่อยู่ในสภาพ heterozygous

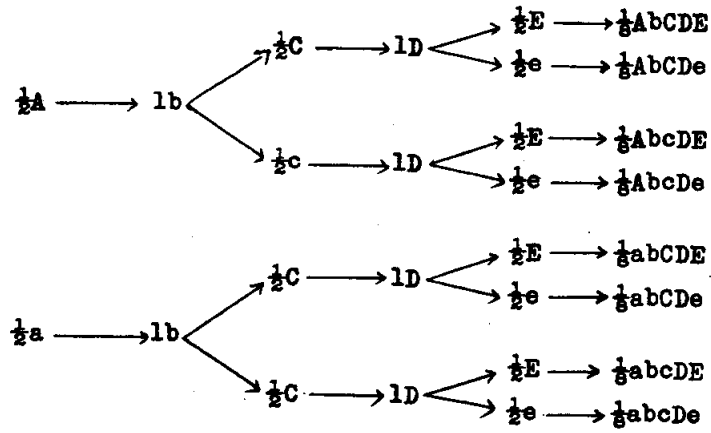
1. จำนวนชนิดของ gametes ที่จะสร้างขึ้น = 2^n

ตัวอย่าง F_1 genotype AaBb จะสร้าง gametes ได้ = 2^2 = 4 ชนิด



Gametic ratio = 1:1:1:1

ตัวอย่าง genotype AabbCcDDEe จะสร้าง gametes ได้ = 2^3 = 8 ชนิด



Gametic ratio = 1:1:1:1:1:1:1:1

2. จำนวนชนิดของ genotypes ที่จะได้จากการที่ F_1 ผสมตัวเองหรือได้จากการผสมระหว่าง genotype ที่เหมือนกัน = 3^n

ตัวอย่าง F_1 genotype AaBb ผสมตัวเองใน F_2 จะมี genotypes เกิดขึ้น $3^2 = 9$ ชนิด

AaBb ⊗

1 AA
- 1 BB → 1 AABB
- 2 Bb → 2 AABb
- 1 bb → 1 AAbb

2 Aa
- 1 BB → 2 AaBB
- 2 Bb → 4 AaBb
- 1 bb → 2 Aabb

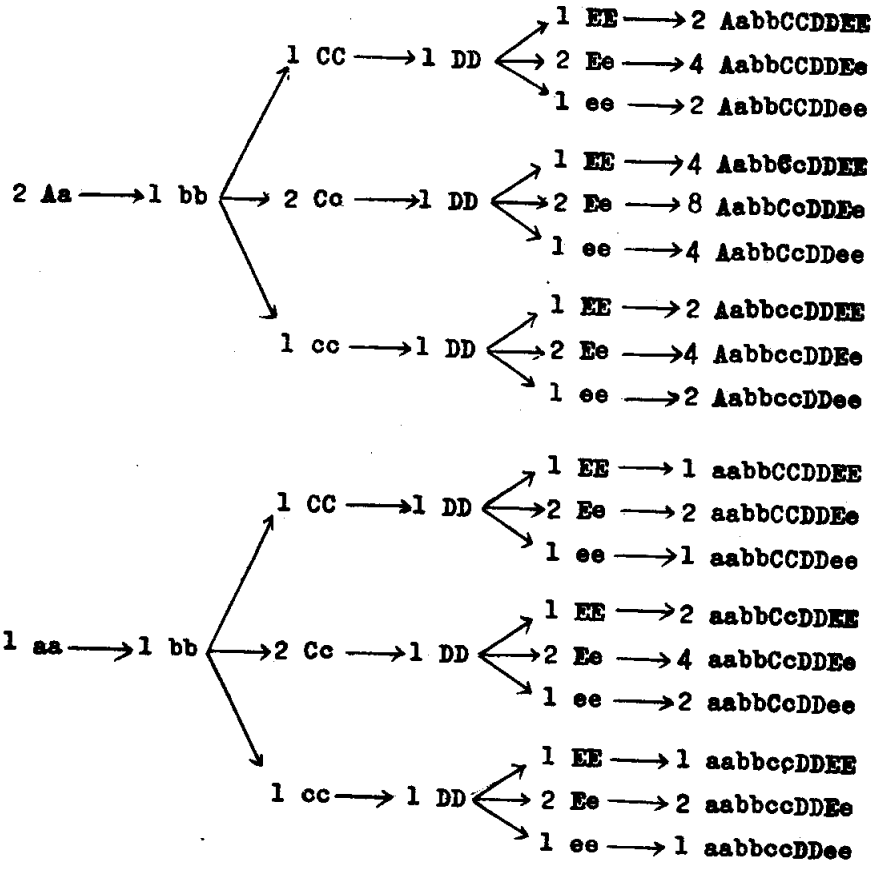
1 aa
- 1 BB → 1 aaBB
- 2 Bb → 2 aaBb
- 1 bb → 1 aabb

Genotypic ratio = 1:2:1:2:4:2:1:2:1

ตัวอย่าง genotype AabbCcDDEe ผสมกันเองในชั่วลูกจะได้ genotypes $3^3 = 27$ ชนิด

AabbCcDDEe x AabbCcDDEe

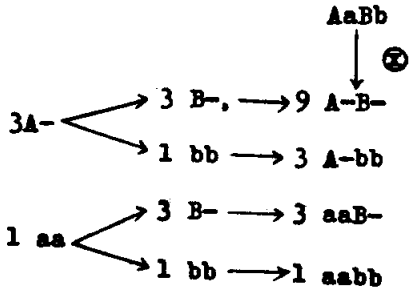
1 AA → 1 bb
- 1 CC → 1 DD
  - 1 EE → 1 AAbbCCDDEE
  - 2 Ee → 2 AAbbCCDDEe
  - 1 ee → 1 AAbbCCDDee
- 2 Cc → 1 DD
  - 1 EE → 2 AAbbCcDDEE
  - 2 Ee → 4 AAbbCcDDEe
  - 1 ee → 2 AAbbCcDDee
- 1 cc → 1 DD
  - 1 EE → 1 AAbbccDDEE
  - 2 Ee → 2 AAbbccDDEe
  - 1 ee → 1 AAbbccDDee



Genotypic ratio = 1:2:1:2:4:2:1:2:1:2:4:2:4:8:4:2:4:2:1:2:1:2:4:2:1:2:1

3. จำนวนชนิดของ phenotypes ที่จะได้จากการที่ F_1 ผสมตัวเอง หรือได้จากการผสมระหว่าง genotype ที่เหมือนกัน = 2^n ในกรณีของ complete dominance

ตัวอย่าง F_1 genotype AaBb ผสมตัวเองใน F_2 จะมี phenotypes เกิดขึ้น $2^2 = 4$ ชนิด

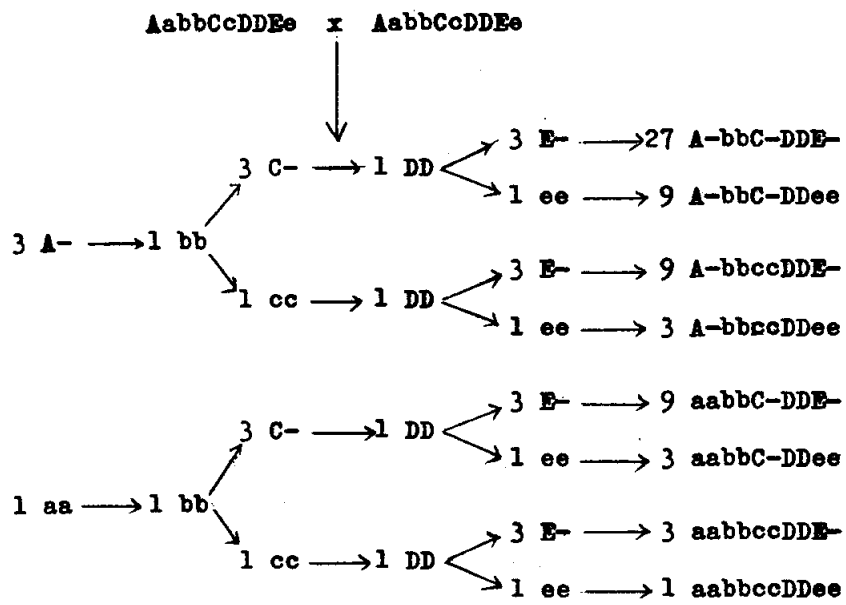


Phenotypic ratio = 9:3:3:1

A- หรือ B- หมายถึง genotypes ต่าง ๆ ที่จะแสดง dominant phenotypes ซึ่งทั้ง AA กับ Aa หรือ BB กับ Bb จะให้ phenotype เหมือนกัน

aa หรือ bb หมายถึง genotypes ที่แสดง recessive phenotypes

ตัวอย่าง genotype AabbCcDDEe ผสมกันเองในชั่วลูกจะได้ phenotypes $2^3 = 8$ ชนิด



Phenotypic ratio = 27:9:9:3:9:3:3:1

4. จำนวน possible combinations ของ gametes ที่จะมารวมกัน = 4^n

ตัวอย่าง F_1 genotype AaBb ผสมตัวเองจะมีการรวมของ gametes ได้ $4^2 = 16$ combinations

Male gametes

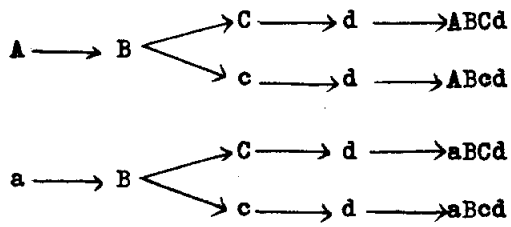
Female gametes	AB	Ab	aB	ab
AB	AABB	AABb	AaBB	AaBb
Ab	AABb	AAbb	AaBb	Aabb
aB	AaBB	AaBb	aaBB	aaBb
ab	AaBb	Aabb	aaBb	aabb

ตัวอย่างการคำนวณ

1. จงหาว่า genotype AaBBCcdd จะสร้าง gametes ได้กี่ชนิด และจะมี frequencies ของ genotypes aaBBccdd และ AABbCcdd เกิดขึ้นสักเท่าไรจากการผสมตัวเอง ?

จำนวนชนิดของ gametes = $2^n = 2^2 = 4$ ชนิด

หรือ



AaBBCcdd

↓ ⊗

Frequency ของ aaBBccdd = $\frac{1}{4} \times 1 \times \frac{1}{4} \times 1 = \frac{1}{16}$

Frequency ของ AABbCcdd = $\frac{1}{4} \times 0 \times \frac{1}{2} \times 1 = 0$

2. จงหา frequency ของ phenotype ABCd จากการผสมตัวเองของ genotype AaBbCCDd ถ้ายีนส์ทุกคู่แสดง complete dominance

AaBbCCDd

↓ ⊗

Frequency ของ phenotype ABCd = $(\frac{3}{4}A-)(\frac{3}{4}B-)(1CC)(\frac{1}{4}dd) = \frac{9}{64}$

3. ถ้าทำการผสมระหว่าง genotypes AaBbCcDDEe กับ AAbbCcddEe จงหา frequency ของ genotype AabbCCDdEE

AaBbCcDDEe x AAbbCcddEe

↓

Frequency ของ genotype AabbCCDdEE = $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} \times 1 \times \frac{1}{4} = \frac{1}{64}$