

บทที่ 3 พันธุศาสตร์ตามหลักของ Mendel

1. ประวัติของ Mendel

Johann Mendel เป็นบุตรของ Anton Mendel ซึ่งเป็นชาวนาที่ยากจน เขาเกิดเมื่อปี ค.ศ.1822 ที่เมือง Brunn ในประเทศ Austria ชีวิตสมัยเด็กเหมือนกับลูกชาวนาโดยทั่วไป คือ ช่วยบิดาทำไร่และปลูกผลไม้ แต่เขามีความสนใจเกี่ยวกับธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตมาตั้งแต่เล็กๆ เมื่อเติบโตขึ้นได้ไปอาศัยอยู่ที่วัด Augustinian เมื่อ ค.ศ.1843 อีกสี่ปีต่อมาจึงบวชเป็นพระและได้รับนามใหม่ว่า Gregor Mendel ในปี ค.ศ.1851 ได้ไปศึกษาธรรมชาติวิทยาในมหาวิทยาลัยกรุงเวียนนา ระหว่างการศึกษาเขาไม่ได้แสดงออกให้เห็นความเป็นเลิศทางวิชาคณิตศาสตร์และฟิสิกส์เลย หลังจากกลับมาเป็นครูสอนวิทยาศาสตร์ในปี ค.ศ.1854 จึงได้แสดงออกให้เห็นถึงอัจฉริยะในการเป็นนักวิทยาศาสตร์ที่ยิ่งใหญ่



ภาพที่ 3-1

Gregor Johann Mendel

(ค.ศ.1822-1884)

ผู้เป็นบิดาของวิชาพันธุศาสตร์

ปี ค.ศ.1857 Mendel ได้เริ่มรวบรวมพันธุ์ถั่วลันเตา (*Pisum sativum*) จำนวน 34 พันธุ์ และได้ปลูกเพื่อศึกษาดูเป็นระยะเวลาสองปี ในที่สุดเขาเลือกไว้เพียง 22 พันธุ์เพื่อใช้ในการทดลอง ในจำนวน 22 พันธุ์ดังกล่าวนี้มีลักษณะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดถึง 7 ลักษณะ ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ที่เขาต้องการศึกษา Mendel ใช้เวลาค้นคว้าทดลองเกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะของถั่วเป็นเวลาเจ็ดปีจึงสรุปผลการทดลอง และเรียบเรียงรายงานเสนอต่อที่ประชุม Natural Society of Brunn ในปี ค.ศ.1865 วิทยานิพนธ์ที่เขาเรียบเรียงขึ้นนั้นมีหัวข้อเรื่องชื่อว่า "Experiments in Plant Hybridization" ทางสมาคมได้นำไปลงพิมพ์ในวารสารประจำปีวารสารดังกล่าวนี้ได้ถูกแจกจ่ายไปยังห้องสมุดทางภาคพื้นยุโรปและอเมริกาใน ค.ศ.1866 ในระยะเวลาต่อมา Mendel ได้เบนความสนใจไปทางด้านพืช แมลง และการศึกษาเกี่ยวกับอุตุนิยมวิทยา ต่อมาในปี ค.ศ.1868 Mendel ได้รับแต่งตั้งให้เป็นสมภารของวัดที่เขาอยู่และมียานด้านบริหารมากขึ้น ทำให้มีการทดลองค้นคว้าน้อยลง ในที่สุดเขาถึงแก่กรรมเมื่อปี ค.ศ.1884 โดยที่ตนเองไม่ทราบว่าผลงานของเขาที่สร้างขึ้นมานั้นมีความสำคัญยิ่งใหญ่แค่ไหน

ในปี ค.ศ.1900 ผลงานของ Mendel จึงถูกเปิดเผยออกมาให้โลกทราบ นักวิทยาศาสตร์ที่ทำการค้นคว้าอย่างอิสระในประเทศต่างๆ 3 คน คือ De Vries ชาว Holland , Correns ชาว German และ Tchermak ชาว Austria ต่างก็ได้ทดลองและค้นพบกฎการถ่ายทอดลักษณะของสิ่งมีชีวิตเช่นเดียวกับ Mendel และเมื่อค้นคว้าเอกสารประกอบการทดลองจึงพบผลงานของ Mendel ซึ่งตีพิมพ์ในวารสารดังกล่าวข้างต้น นักวิทยาศาสตร์ทั้งสามคนจึงยกย่องให้เกียรติ Mendel ในฐานะผู้ที่ได้ทำการทดลองค้นคว้าและได้รับผลสำเร็จเป็นคนแรก พร้อมกับประกาศเกียรติคุณเกี่ยวกับผลงานอันยิ่งใหญ่ของ Mendel ให้ทั่วโลกได้ทราบ และในที่สุด Mendel ได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาแห่งพันธุศาสตร์

ความสำคัญของการทดลองของ Mendel

การที่นักชีววิทยา 3 คน ได้ค้นพบผลงานของ Mendel ซึ่งได้เสนอต่อสมาคมไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1865 ทำให้ความรู้เรื่องกฎเกณฑ์การถ่ายทอดลักษณะของสิ่งมีชีวิตกระจ่างชัด และต่อมาในระยะเวลาอันรวดเร็ว วิทยาการด้านการถ่ายทอดลักษณะได้แยกตัวเองออกมาเป็นศาสตร์สาขาอิสระ ความจริงแล้วงานทดลองค้นคว้าเกี่ยวกับด้านการถ่ายทอดลักษณะของสิ่งมีชีวิตนั้นมีนักชีววิทยาหลายคนได้ค้นคว้าทดลองมาก่อนเมเนเดล แต่ไม่สามารถสรุปกฎเกณฑ์เกี่ยวกับ

การถ่ายทอดลักษณะได้สำเร็จ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเหตุผลหลายประการ สาเหตุสำคัญได้แก่ การทดลองศึกษาที่ไม่มีระเบียบแบบแผน จึงเป็นสาเหตุอันหนึ่งที่ทำให้การทดลองดังกล่าวไม่สามารถสรุปออกมาเป็นกฎเกณฑ์ได้ สาเหตุประการที่สองคือ ในสมัยก่อนนักชีววิทยาส่วนใหญ่ นั้นต่างคนต่างทำการทดลองอย่างอิสระ ไม่มีการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นซึ่งกันและกัน จึงเป็นสาเหตุให้ไม่สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทดลองของบุคคลอื่นในวงการเดียวกันมาประกอบกันเข้าเพื่อเป็นแนวทางในการทดลองค้นคว้าแก้ไขความผิดพลาดต่าง ๆ ปี ค.ศ. 1865 ก่อนที่ Mendel จะเสนอผลการทดลองของเขานั้น ความรู้เกี่ยวกับการข่มและการถูกข่ม (dominance and recessiveness) และการแยกลักษณะ (segregation) นั้นถูกค้นพบแล้ว และอัตราส่วนการกระจายตัวของลูกชั่วที่ 2 ก็มีการจัดบันทึกอย่างละเอียดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1854 สมมติฐานต่าง ๆ ที่เสนอขึ้นมาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะถูกหักล้างไปจนหมดสิ้น แต่สำหรับผลงานของ Mendel นั้นไม่มีผู้ใดสามารถคัดค้านโต้แย้งได้ ต่อมาจึงมีการพิสูจน์ทดลองมากเท่าไรก็ยังทำให้กฎการถ่ายทอดลักษณะของ Mendel นั้นมีความกระจ่างชัดมากขึ้น

การทดลองของ Mendel

เมนเดลได้คัดเลือกสิ่งที่จะใช้ในการทดลอง คือ ถั่วลันเตา (*Pisum sativum*) และได้ศึกษาลักษณะต่าง ๆ ของถั่วอย่างละเอียด ในที่สุดก็ตัดสินใจใช้ถั่วลันเตาด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

- 1) ควบคุมการผสมเกสรได้ง่าย ตามธรรมชาติถั่วลันเตาเป็นพืชผสมตัวเอง (self-fertilized) แต่ก็สามารถทำการผสมข้ามได้สะดวก
- 2) เป็นพืชล้มลุกปลูกง่าย อายุสั้น ทำให้สามารถศึกษาการถ่ายทอดลักษณะของลูกหลานในแต่ละชั่วได้ในระยะเวลาอันสั้น
- 3) มีลักษณะตรงกันข้ามที่แตกต่างกันชัดเจน ซึ่งในการทดลองดังกล่าวนี้ Mendel ใช้ลักษณะต่าง ๆ 7 ลักษณะ ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ผลการทดลองของ Mendel

Parental Characters ลักษณะของพ่อแม่		First Generation ลูกชั่วรุ่นที่ 1		Second Generation ลูกชั่วรุ่นที่ 2	Ratio อัตราส่วน
Yellow seeds เมล็ดสีเหลือง	× green seeds เมล็ดสีเขียว	all yellow ทุกต้นเมล็ดเหลือง	6,022	yellow : 2,001 green เหลือง : 2,001 เขียว	3.01 : 1
Round seeds ผิวเมล็ดเรียบ	× wrinkled seeds ผิวเมล็ดย่น	all round ทุกต้นเมล็ดเรียบ	5,474	round : 1,850 wrinkled เรียบ : 1,850 ย่น	2.96 : 1
Green pods ฝักสีเขียว	× yellow pods ฝักสีเหลือง	all green ทุกต้นฝักสีเขียว	428	green : 152 yellow เขียว : 152 เหลือง	2.82 : 1
Long stems ต้นสูง	× short stems ต้นเตี้ย	all long ทุกต้นต้นสูง	787	long : 277 short สูง : 277 เตี้ย	2.84 : 1
Axial flowers ออกดอกกลางต้น	× terminal flowers ออกดอกปลายยอด	all axial ทุกต้นออกดอกกลางต้น	651	axial : 207 terminal กลางต้น : 207 ปลายยอด	3.14 : 1
Inflated pods ฝักตรง	× constricted pods ฝักคอด	all inflated ทุกต้นฝักตรง	882	inflated : 299 constricted ฝักตรง : 299 ฝักคอด	2.95 : 1
Red flowers ดอกสีแดง	× white flowers ดอกสีขาว	all red ทุกต้นดอกสีแดง	705	red : 224 white แดง : 224 ขาว	3.15 : 1

การผสมข้ามระหว่างถั่วที่มีลักษณะตรงกันข้ามทั้งเจ็ดลักษณะได้ผลออกมาดังนี้ คือ

1. การผสมระหว่างพ่อแม่ที่มีลักษณะเมล็ดกลมกับเมล็ดย่น ลูกชั่วแรก (F_1 - first filial generation) จะมีเมล็ดลักษณะกลมทั้งหมด ต้นถั่วเมล็ดสีเหลืองผสมถั่วเมล็ดสีเหลือง ลูกชั่วแรกจะให้เมล็ดสีเหลือง การผสมระหว่างพ่อแม่ที่มีลักษณะตรงกันข้ามอื่น ๆ ก็ได้ผลออกมาเช่นเดียวกัน คือ ลูกชั่วแรกมีลักษณะเดียวเท่านั้น
2. เมื่อปล่อยให้ต้น F_1 ผสมตัวเอง แล้วนำเมล็ดที่ได้จากต้น F_1 มาปลูกเป็นลูกชั่วที่ 2 (F_2 - second filial generation) ปรากฏว่าลักษณะของพ่อและลักษณะของแม่ได้ปรากฏออกมาให้เห็นในชั่วที่ 2 ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้พ่อมีลักษณะเมล็ดกลมและแม่มีลักษณะเมล็ดย่น ลักษณะทั้งสองนี้จะปรากฏให้เห็นอีก โดย F_2 มีลักษณะเมล็ดกลม 5,474 ต้น และเมล็ดย่น 1,850 ต้น หรือคิดเป็นอัตราส่วนจะได้เมล็ดกลม : เมล็ดย่น ใกล้เคียงกับ 3 : 1 ในลักษณะอื่น ๆ ก็ได้ผล

เช่นเดียวกัน คือ ลักษณะทั้งสองที่ปรากฏในชั่วพ่อและแม่จะปรากฏออกมาให้เห็นในลูกชั่วที่สองในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับ 3 : 1

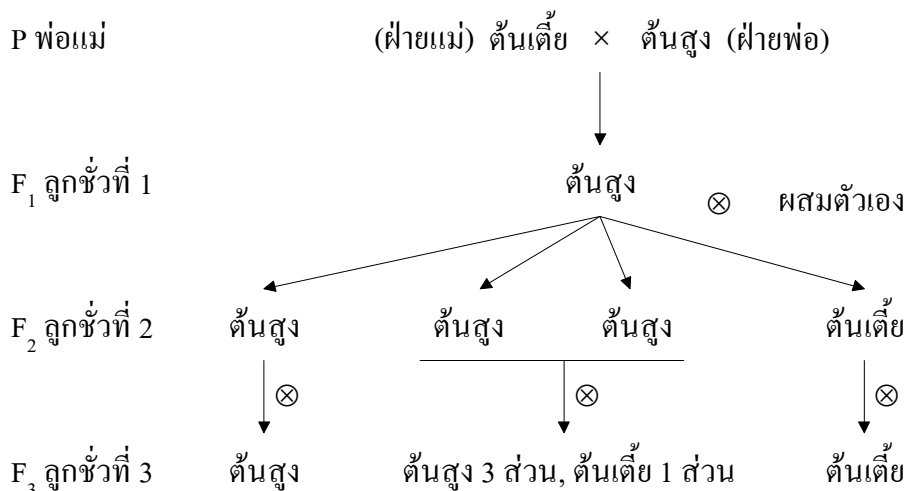
จากผลการทดลองในลักษณะทั้งเจ็ดนั้นสรุปได้ดังนี้

1. การผสมข้ามระหว่างพ่อแม่ที่มีลักษณะตรงกันข้าม ลักษณะของลูกชั่วที่หนึ่งจะมีเพียงหนึ่งลักษณะเท่านั้น ตัวอย่างเช่น พ่อลักษณะต้นสูงผสมกับแม่ลักษณะต้นเตี้ย ลูกชั่วแรกจะมีเฉพาะลักษณะต้นสูงลักษณะเดียว
2. ไม่ว่าต้นถั่วฝ้ายใดเป็นตัวให้ละอองเกสรตัวผู้ ลักษณะของลูกชั่วแรกจะมีลักษณะเหมือนกันหมด ตัวอย่างเช่น การผสมข้ามโดยให้ฝ้ายพ่อมีลักษณะสูงให้ละอองเกสรแก่ฝ้ายแม่ลักษณะเตี้ย กับการผสมโดยใช้ฝ้ายต้นพ่อเตี้ยให้ละอองเกสรแก่ฝ้ายแม่ต้นสูง ลูกชั่วแรกของการผสมทั้งสองแบบจะมีลักษณะสูงเหมือนกัน
3. ลักษณะของฝ้ายพ่อหรือฝ้ายแม่ที่ไม่ปรากฏในลูกชั่วที่หนึ่ง จะปรากฏออกมาให้เห็นในชั่วที่ 2 และจะมีอยู่ในอัตราส่วนหนึ่งในสี่ของลูกทั้งหมด ตัวอย่าง ในกรณีต้นสูงผสมกับต้นเตี้ย ลูกชั่วแรกนั้นสูงทั้งหมด ลักษณะต้นเตี้ยไม่ปรากฏในชั่วแรก แต่ในชั่วที่สองลักษณะต้นเตี้ยจะปรากฏออกมาในอัตราส่วนหนึ่งในสี่ของลูกทั้งหมด ที่เหลือสามในสี่นั้นมีลักษณะสูง

2. กฎการข่มของ gene (law of dominance)

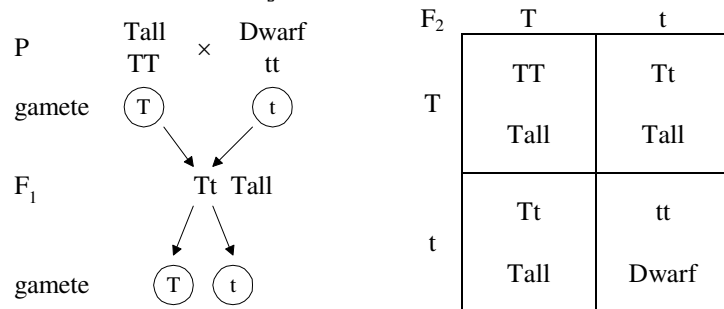
Mendel เรียกตัวที่ควบคุมลักษณะแต่ละลักษณะว่า "factor" จากลูกชั่วรุ่นแรกและชั่วรุ่นที่สอง ตัวควบคุมลักษณะไม่หายไปไหน ตามตัวอย่างที่กล่าวมานั้น ตัวควบคุมลักษณะเดียวนั้นไม่ได้หายไปไหน ยังคงแฝงอยู่และไม่แสดงลักษณะออกมาในลูกชั่วแรก การที่ตัวควบคุมลักษณะหนึ่งสามารถแสดงออกมา ในขณะที่ตัวควบคุมลักษณะตรงข้ามไม่แสดงออกมา ทั้ง ๆ ที่ตัวควบคุมลักษณะทั้งสองนั้นปรากฏอยู่ร่วมกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า "dominance" จากตัวอย่างที่ลักษณะสูงผสมกับลักษณะเตี้ยนั้น ตัวควบคุมลักษณะสูงสามารถข่มไม่ให้ลักษณะเตี้ยแสดงออก เรียกตัวควบคุมลักษณะสูงนี้ว่า dominant และลักษณะเตี้ยที่ถูกลักษณะสูงข่มไว้ไม่ให้แสดงออกว่า recessive สัญลักษณ์ที่ใช้กับตัวควบคุมลักษณะที่ข่มลักษณะตรงข้ามไม่ให้แสดงออกนั้นนิยมใช้ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่แทน ดังนั้นลักษณะสูงนั้นเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้คือ T ส่วนลักษณะเตี้ยที่เป็น recessive นั้นเขียนด้วย t ในลักษณะอื่นๆ ก็เช่นกัน ในพวกลักษณะเมล็ดกลมที่ข่มลักษณะเมล็ดย่นก็ใช้ S แทนลักษณะเมล็ดกลมและเมล็ดย่นก็ใช้ s

จากสัญลักษณ์ที่กำหนดให้กับลักษณะต่าง ๆ นั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมระหว่างต้นสูงกับต้นเตี้ยนั้น ลูกชั่วรุ่นแรกจะมีตัวควบคุมลักษณะประกอบด้วย T และ t ทั้งนี้ก็เพราะลูกชั่วรุ่นแรกมีลักษณะสูง และลักษณะสูงข่มไม่ให้ลักษณะเตี้ยแสดงออก และตัวควบคุมลักษณะเตี้ย t นี้จะปรากฏออกมาให้เห็นในลูกชั่วรุ่นที่สอง



Mendel พบว่า ถั่วที่มีลักษณะต้นเตี้ยนั้น เมื่อผสมตัวเองลูกที่ได้จะมีลักษณะต้นเตี้ยทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็ลนลูกชั่วรุ่นที่เท่าไร และไม่เคยมีลักษณะต้นสูงปรากฏในลูกหลานที่มาจากพ่อแม่ที่มีลักษณะเตี้ยเลย ดังนั้น ถั่วที่มีลักษณะเตี้ยจะไม่มีตัวนำลักษณะสูงแฝงอยู่ ในทางตรงกันข้ามลูกชั่วรุ่นแรกที่มีลักษณะสูงเมื่อผสมตัวเองให้ลูกชั่วรุ่นที่ 2 ที่มีทั้งสูงและเตี้ยในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 และเมื่อปล่อยให้ถั่วในชั่วรุ่นที่ 2 ที่มีลักษณะสูงนั้นผสมตัวเองต่อไป ปรากฏว่า ถั่วต้นสูงพวกหนึ่งซึ่งมีอยู่ 1 ใน 3 นั้นให้ลูกชั่วรุ่นที่ 3 ที่มีลักษณะสูงทั้งหมด และอีก 2 ใน 3 ที่เหลือนั้นให้ลูกที่มีลักษณะสูงต่อลักษณะเตี้ยในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 ซึ่งแสดงว่าถั่วในชั่วรุ่นที่ 2 ที่มีลักษณะสูงนั้นประกอบด้วย 2 พวกด้วยกัน คือ พวกหนึ่งซึ่งมีอยู่ 1 ใน 3 นั้นเป็นพันธุ์แท้ เมื่อผสมตัวเองก็จะได้ลูกที่สูงทั้งหมด ส่วนอีก 2 ใน 3 ที่มีลักษณะสูงนั้นเป็นลูกผสมระหว่างสูงกับเตี้ย เมื่อผสมตัวเองจึงให้ลูกที่มีทั้งต้นสูงและต้นเตี้ย

จะเห็นว่าลูกผสมในชั่วรุ่นที่ 1 นั้นต้องประกอบด้วยตัวนำลักษณะ 2 อย่างด้วยกัน คือ ตัวนำลักษณะสูง T และตัวนำลักษณะเตี้ย t และฝ่ายพ่อที่มีลักษณะสูงก็ประกอบด้วยตัวนำลักษณะ T สองตัว ฝ่ายแม่ที่มีลักษณะเตี้ยก็ประกอบด้วยตัวนำลักษณะ t สองตัวเช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าฝ่ายพ่อที่มีลักษณะสูงพันธุ์แท้ TT เมื่อผสมตัวเองให้ลูกหลานไม่ว่ากี่ชั่วรุ่นก็ตามก็จะมีลักษณะสูงทั้งหมด ฝ่ายแม่มีลักษณะเตี้ยพันธุ์แท้ tt เมื่อผสมตัวเองไม่ว่ากี่ชั่วรุ่นก็ตามจะได้ลูกที่มีลักษณะเตี้ยทั้งหมด เมื่อนำถั่วลักษณะสูงพันธุ์แท้กับถั่วต้นเตี้ยพันธุ์แท้มาผสมกัน ฝ่ายถั่วต้นสูงจะให้ตัวนำลักษณะสูง คือ T และฝ่ายต้นเตี้ยจะให้ตัวนำลักษณะเตี้ย t แก่ลูกผสมชั่วรุ่นที่ 1 ดังนั้น ลูกผสมชั่วรุ่นที่ 1 จะมีตัวนำลักษณะอยู่ 2 ตัว คือ T และ t แต่ T ซบไม่ให้ t แสดงออก ลูกชั่วรุ่นที่ 1 จึงมีลักษณะสูง เมื่อลูกชั่วรุ่นที่ 1 ผสมตัวเอง ลูกชั่วรุ่นที่ 1 จะให้ตัวนำลักษณะ 2 ชนิดด้วยกัน คือ ตัวนำลักษณะ T และ t ในการสร้าง gamete ในฝ่ายเพศผู้จะสร้างละอองเกสรตัวผู้ ในละอองเกสรที่สร้างขึ้นมามีตัวนำลักษณะ T และ t อยู่ในอัตราส่วนเท่ากัน ส่วนฝ่ายเพศเมียก็จะสร้างไข่ ซึ่งทำนองเดียวกันในไข่ก็จะมีตัวนำลักษณะ T และ t อยู่ในอัตราส่วนเท่ากัน การผสมระหว่างไข่กับละอองเกสรตัวผู้เป็นไปอย่างอิสระ ละอองเกสรตัวผู้ที่มีนำลักษณะ T มีโอกาสที่จะรวมกับไข่ที่นำลักษณะ T หรือ t ได้เท่า ๆ กัน ในทำนองเดียวกัน ละอองเกสร t ก็มีโอกาสที่จะรวมกับไข่ T หรือ t ได้เท่า ๆ กัน เมื่อผสมกันแล้วก็จะเกิดลูกที่มีลักษณะต้นสูงและลูกที่มีลักษณะต้นเตี้ยในอัตราส่วน ต้นสูง : ต้นเตี้ย = 3 : 1



3. กฎการแยกตัวของ gene (law of segregation)

Mendel ได้แสดงให้เห็นว่า การผสมระหว่างลูกผสมชั่วรุ่นที่หนึ่งซึ่งเป็นแบบผสมตัวเองหรือผสมระหว่างลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งด้วยกัน และลูกผสมชั่วรุ่นที่หนึ่งนั้นประกอบด้วยตัวนำลักษณะที่แตกต่างกันที่มาจากฝ่ายพ่อและฝ่ายแม่ เมื่อลูกผสมสร้างเซลล์สืบพันธุ์ (gamete) ตัวนำลักษณะที่ได้มาจากฝ่ายพ่อจะแยก (segregate) จากตัวนำลักษณะที่ได้มาจากฝ่ายแม่ โดยต่างก็แยกกันไปอยู่ในเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์ที่เกิดจากการแบ่งเซลล์แบบ meiosis การแยกตัวของตัวนำลักษณะนี้เองที่ Mendel ได้ตั้งเป็นกฎแห่งการถ่ายทอดลักษณะอันหนึ่งให้ชื่อว่า Principle of segregation ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ปรากฏในทุก ๆ ชั่วรุ่นของการผสมพันธุ์

ตัวนำลักษณะที่ Mendel เรียกว่า factor นั้น ในปัจจุบันเรียกว่า gene ในพืชหรือสัตว์ซึ่งมี chromosome อยู่เป็นคู่ (diploid) นั้น gene จะปรากฏอยู่เป็นคู่ และบางทีก็ส่งผลแสดงลักษณะออกมาให้เห็นภายนอก. gene 2 ตัวที่อยู่เป็นคู่กันนั้นเรียกว่า allele ในบางครั้ง allele จะเหมือนกัน เช่นถั่วลักษณะต้นเตี้ยจะประกอบด้วย allele ที่เหมือนกัน คือ t กับ t ถั่วต้นสูงพันธุ์

แต่จะประกอบด้วย allele T และ t ส่วนลูกผสมที่เกิดจากการผสมระหว่างถั่วต้นสูงพันธุ์แท้กับถั่วต้นเตี้ยนั้นจะประกอบด้วย allele T และ t ดังนั้น คำว่า allele หรือ gene สามารถใช้แทนกันได้ แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ว่า คำว่า allele นั้นหมายถึง gene ที่ประกอบกันหรืออยู่เป็นคู่กันเฉพาะลักษณะหนึ่ง ๆ เท่านั้น เช่น gene T นั้นเป็น allele ของ gene t แต่ไม่ได้เป็น allele ของ gene ที่นำลักษณะอื่น เช่น gene S ที่นำลักษณะเมล็ดกลมหรือ s ที่นำลักษณะเมล็ดย่น ส่วนคำว่า gene นั้นใช้เรียกตัวนำลักษณะได้ทั้งลักษณะสูง ลักษณะเตี้ย ลักษณะเมล็ดกลม ลักษณะเมล็ดย่น หรือตัวนำลักษณะอื่น ๆ ได้ ในสิ่งมีชีวิต gene ที่เป็น allele กันจะปรากฏอยู่เป็นคู่ หาก gene ดังกล่าวที่เป็นคู่กันนั้นเหมือนกัน เช่น T กับ T ปรากฏอยู่ด้วยกัน เราเรียกสภาพของ gene คู่กันนั้นว่า homozygous ในทำนองเดียวกัน t กับ t ปรากฏอยู่ด้วยกันก็เรียกว่า gene อยู่ในสภาพ homozygous เช่นกัน พืชหรือสัตว์ดังกล่าวที่มี gene อยู่ในสภาพ homozygous เรียกว่า homozygote หาก gene คู่กันประกอบด้วย allele ที่แตกต่างกัน เช่น T กับ t ปรากฏอยู่ด้วยกัน เราเรียกสภาพดังกล่าวว่า heterozygous พืชหรือสัตว์ที่มี gene อยู่ในสภาพ heterozygous นั้นเรียกว่า heterozygote

ลักษณะที่ปรากฏออกมาให้เห็นนั้นเป็นผลที่เกิดจากการแสดงออกของ gene ที่ประกอบกันอยู่ในสิ่งมีชีวิตนั้น ลักษณะที่แสดงออกมาเรียกว่า phenotype ส่วนตัวควบคุมลักษณะที่ประกอบกันนั้น เรียกว่า genotype ถั่วที่มี phenotype ต้นเตี้ยนั้นจะมี genotype เป็น tt ถั่วที่มีลักษณะต้นสูงที่เป็น homozygote จะมี genotype เป็น TT ส่วนต้นสูงที่เป็น heterozygote จะมี genotype เป็น Tt ตามความหมายกว้างๆ phenotype คือ ลักษณะที่ปรากฏในพืชหรือสัตว์นั่นเอง อาจเป็นรูปร่าง สี สารเคมีที่สิ่งมีชีวิตนั้นสามารถสร้างขึ้น หรือลักษณะอื่นก็ได้ ส่วน genotype นั้นเกิดจาก gene ที่ได้รับการถ่ายทอดมาจากฝ่ายพ่อและฝ่ายแม่มาประกอบกันเป็นสิ่งมีชีวิตนั้น

4. การทดสอบ genotype

สิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะ recessive เช่น ลักษณะต้นเตี้ยหรือเมล็ดย่นในถั่วลันเตา ในการทดลองของ Mendel นั้น เราสามารถทราบ genotype ได้โดยการดูจาก phenotype เช่น ถั่วต้นเตี้ยมี genotype เป็น tt ถั่วเมล็ดย่นมี genotype เป็น ss

แต่ในกรณีที่ถั่วต้นสูงหรือถั่วที่มีลักษณะเมล็ดกลมนั้น genotype อาจเป็นไปได้ 2 แบบ คือ ถั่วต้นสูงอาจจะมี genotype เป็น homozygous dominant TT หรือ heterozygous Tt ส่วนถั่วเมล็ดเรียบอาจจะมี genotype เป็น homozygous dominant SS หรือ heterozygous Ss

การที่สิ่งมีชีวิตสามารถมี genotype ได้ 2 แบบนี้เนื่องมาจาก gene ที่เป็น dominant สามารถข่ม gene ที่เป็น recessive ไม่ให้แสดงออก ทำให้พวกที่มี genotype เป็น heterozygous แสดงลักษณะ dominant ออกมาเหมือนกับพวกที่เป็น homozygous dominant

ดังนั้นการสังเกตแต่เพียงลักษณะที่ปรากฏจึงไม่อาจทราบ genotype ได้ว่าเป็น homozygous dominant หรือ heterozygous กันแน่

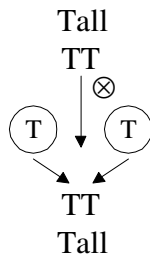
การที่จะทราบว่าถั่วดังกล่าวมี genotype เป็น homozygous หรือ heterozygous นั้น Mendel ใช้วิธีทดสอบ 2 วิธีด้วยกัน คือ

วิธีที่ 1

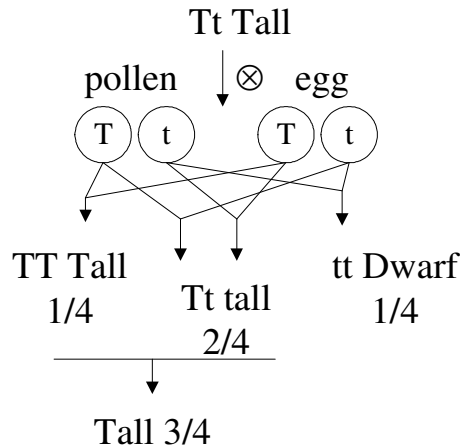
ปล่อยให้ต้นถั่วที่ต้องการรู้ genotype ผสมตัวเอง

หากลูกที่ได้จากการผสมตัวเองนั้นสูงทั้งหมดก็แสดงว่า ถั่วต้นที่ผสมตัวเองนั้นมี genotype เป็น homozygous dominant TT

หากลูกที่ได้จากการผสมตัวเองนั้นมีทั้งต้นสูงและต้นเตี้ยในอัตราส่วน 3 : 1 ก็แสดงว่า ถั่วต้นที่ผสมตัวเองนั้นมี genotype เป็น heterozygous Tt



ภาพที่ 3-2 กรณีที่เป็น homozygous dominant

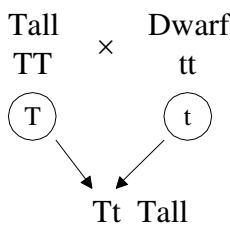


ภาพที่ 3-3 กรณีที่เป็น heterozygous

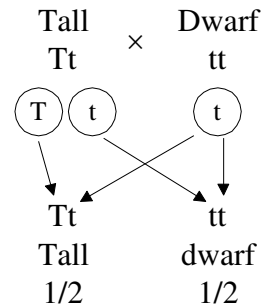
วิธีที่ 2

ทำการผสมกลับ (backcross) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าผสมเพื่อทดสอบ (testcross) โดยนำพืชที่ต้องการทราบ genotype ผสมกับพืชที่มีลักษณะ recessive ตัวอย่างเช่น นำถั่วต้นสูงที่ไม่ทราบ genotype ผสมกับถั่วต้นเตี้ยที่มี genotype เป็น tt ถ้าหากลูกที่ได้จากการผสมดังกล่าวนี้มีลักษณะสูงทั้งหมด ก็แสดงว่าถั่วต้นสูงนั้นมี genotype เป็น homozygous dominant TT

หากลูกที่ได้จากการผสมมีลักษณะสูงจำนวนครึ่งหนึ่ง และอีกจำนวนครึ่งหนึ่งมีลักษณะเตี้ย ก็แสดงว่าถั่วที่มีลักษณะสูงที่สงสัยนั้นมี genotype เป็น heterozygous Tt



ภาพที่ 3-4 กรณีที่เป็น homozygous dominant



ภาพที่ 3-5 กรณีที่เป็น heterozygous

5. กฎการเข้าชุดอย่างอิสระของจีน (Law of Independent Assortment)

จากการศึกษาเรื่องการถ่ายทอดลักษณะโดยการผสมระหว่างต้นถั่วที่มีลักษณะแตกต่างกันเพียงหนึ่งลักษณะ เป็นผลให้ Mendel ค้นพบกฎอันสำคัญเกี่ยวกับการแยกตัวของ gene (Law of Segregation)

การค้นคว้าของเขามีได้หยุดยั้งเพียงแค่นั้น เขาได้ศึกษาต่อไปอีกโดยผสมต้นถั่วที่มีความแตกต่างถึงสองลักษณะ เช่น ลักษณะผิวเมล็ด กับลักษณะสีเมล็ด โดยการผสมระหว่างต้นถั่วที่มีลักษณะเมล็ดเรียบสีเหลืองกับต้นถั่วที่มีลักษณะเมล็ดย่นสีเขียว

ลูกชั่วรุ่นแรก (F₁) มีลักษณะเมล็ดเรียบสีเหลือง เพราะลักษณะเมล็ดเรียบข่มลักษณะเมล็ดย่นและลักษณะสีเหลืองข่มลักษณะสีเขียว

เมื่อปล่อยให้ลูกชั่วรุ่นแรกผสมตัวเอง ได้ลูกชั่วรุ่นที่สอง (F₂) จำนวน 556 ต้น โดยสามารถจำแนกออกเป็น 4 พวกดังนี้

เมล็ดเรียบ สีเหลือง	315 ต้น	=	9.84375 ส่วน
เมล็ดเรียบ สีเขียว	108 ต้น	=	3.375 ส่วน
เมล็ดย่น สีเหลือง	101 ต้น	=	3.15625 ส่วน
เมล็ดย่น สีเขียว	32 ต้น	=	1.00 ส่วน

เมื่อเทียบอัตราส่วนของลูกชั่วรุ่นที่สองจะใกล้เคียงกับอัตราส่วน 9 : 3 : 3 : 1 มาก อัตราส่วนนี้เองเป็นที่มาของการค้นพบกฎที่สำคัญของ Medel เกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะคือ Law of Independent Assortment

เพื่อให้ง่ายขึ้นจึงอธิบายที่ละลักษณะแยกกัน อันดับแรกพิจารณาเฉพาะลักษณะผิวของเมล็ดเท่านั้น ต่อไปจึงพิจารณาเฉพาะสีของเมล็ด

ลักษณะที่ 1 ลักษณะผิวของเมล็ด

พ่อแม่ (P)

เมล็ดเรียบ × เมล็ดย่น

↓

ลูกชั่วรุ่นที่ 1 (F₁)

เมล็ดเรียบ

↓ ⊗

ลูกชั่วรุ่นที่ 2 (F₂)

423 เมล็ดเรียบ : 133 เมล็ดย่น = 3.180451128 : 1
หรือเป็นอัตราส่วนโดยประมาณ คือ เมล็ดเรียบ : เมล็ดย่น = 3 : 1

ลักษณะที่ 2 สีของเมล็ด

พ่อแม่ (P)

สีเหลือง × สีเขียว

↓

ลูกชั่วรุ่นที่ 1 (F₁)

สีเหลือง

↓ ⊗

ลูกชั่วรุ่นที่ 2 (F₂)

416 เมล็ดสีเหลือง : 140 เมล็ดสีเขียว = 2.971428571 : 1
หรือเป็นอัตราส่วนโดยประมาณ คือ เมล็ดสีเหลือง : เมล็ดสีเขียว = 3 : 1

จากลักษณะผิวของเมล็ดในชั่วรุ่นที่ 2 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของเมล็ดเรียบต่อเมล็ดย่นนั้นใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่ได้จากการผสมระหว่างพ่อแม่ที่มีลักษณะตรงกันข้ามหนึ่งลักษณะ และแสดงการขมอย่างสมบูรณ์ คืออัตราส่วนประมาณ 3 : 1

ทำนองเดียวกัน ลักษณะสีของเมล็ดในชั่วรุ่นที่ 2 ก็แสดงอัตราส่วนของเมล็ดสีเหลืองต่อเมล็ดสีเขียวใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่ได้จากการผสมระหว่างพ่อแม่ที่มีลักษณะตรงกันข้ามหนึ่งลักษณะ และแสดงการขมอย่างสมบูรณ์ คืออัตราส่วนประมาณ 3 : 1 เช่นเดียวกับลักษณะผิวเมล็ดเช่นกัน

เมื่อรวมผลการศึกษาของสองลักษณะเข้าด้วยกัน จะพบว่าลักษณะผิวของเมล็ดเป็นอิสระจากลักษณะสีของเมล็ด

หมายความว่าต้นถั่วที่มีเมล็ดเรียบมีโอกาสจะมีเมล็ดสีเหลืองหรือสีเขียวก็ได้

ทำนองเดียวกัน ต้นถั่วที่มีเมล็ดย่น สีของเมล็ดอาจจะเหลืองหรือเขียวก็ได้เช่นกัน

ดังนั้น โอกาสที่ลูกชั่วรุ่นที่สองจะมีลักษณะทั้งสอง คือลักษณะผิวเมล็ดและลักษณะสีเมล็ดอยู่ในต้นเดียวกัน ในแบบต่าง ๆ นั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

3/4 เมล็ดเรียบ	×	3/4 สีเหลือง	=	9/16 เมล็ดเรียบ สีเหลือง
3/4 เมล็ดเรียบ	×	1/4 สีเขียว	=	3/16 เมล็ดเรียบ สีเขียว
1/4 เมล็ดย่น	×	3/4 สีเหลือง	=	3/16 เมล็ดย่น สีเหลือง
1/4 เมล็ดย่น	×	1/4 สีเขียว	=	1/16 เมล็ดย่น สีเขียว

จะเห็นได้ว่าลูกในชั่วรุ่นที่สองที่ได้จากการทดลอง มีอัตราส่วนใกล้เคียงกันกับอัตราส่วนที่ได้ตามทฤษฎี คือ 9 : 3 : 3 : 1

อัตราส่วน 9 : 3 : 3 : 1 เป็นอัตราส่วนทาง phenotype ของลูกชั่วรุ่นที่สองที่ได้จากการผสมต้นถั่วที่มีความแตกต่างกันสองลักษณะ

ต่อไปจะได้พิจารณาถึงอัตราส่วนของ genotype จากการทดลองดังกล่าวจากการทดลองของ Mendel

ให้ S เป็น gene ที่ควบคุมลักษณะเมล็ดเรียบ

s เป็น gene ควบคุมลักษณะเมล็ดย่น

S ซ่ม s อย่างสมบูรณ์

Y เป็น gene ที่ควบคุมลักษณะเมล็ดสีเหลือง

y ซึ่งเป็น gene ควบคุมลักษณะเมล็ดสีเขียว

Y ซ่ม y อย่างสมบูรณ์

ต้นถั่วพ่อแม่ที่ใช้ผสมเป็นพันธุ์แท้ ฝ่ายหนึ่งมีลักษณะเมล็ดเรียบสีเหลือง จึงมี genotype เป็น homozygous dominant SSYY

และอีกฝ่ายหนึ่งมีลักษณะเมล็ดย่นสีเขียวจึงมี genotype เป็น homozygous recessive ssyy

gamete ที่ได้จาก SSYY คือ SY และ gamete ที่ได้จาก ssyy คือ sy เมื่อ gamete จากทั้งสองฝ่ายมารวมกันจะได้ลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งมี genotype SsYy และมี phenotype เป็นเมล็ดเรียบสีเหลือง เพราะลักษณะเมล็ดเรียบซ่มลักษณะเมล็ดย่น และสีเหลืองซ่มสีเขียว

เมื่อลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งซึ่งมี genotype SsYy สร้าง gamete ชนิดของ gamete ก็เป็นไปตามกฎการแยกตัวของ gene (Law of Segregation)

นั่นคือ สำหรับคู่ของ gene Ss gamete จำนวนครึ่งหนึ่งจะมี S และอีกครึ่งหนึ่งจะมี s และสำหรับคู่ของ gene Yy gamete ครึ่งหนึ่งจะมี Y และอีกครึ่งหนึ่งจะมี y

เนื่องจาก gene ที่นำลักษณะเมล็ดเรียบ S และ gene ที่นำลักษณะเมล็ดย่น s นั้นเป็นอิสระจาก gene ที่นำลักษณะสีเหลือง Y และ gene ที่นำลักษณะสีเขียว y ดังนั้น gene S จึงสามารถไปรวมกับ gene Y หรือ y ใน gamete ได้

ในทำนองเดียวกัน gene s ก็สามารถจะไปรวมกับ gene Y หรือ y ใน gamete ได้เช่นกัน

อัตราส่วนของ gamete แต่ละชนิดของลูกชั่วรุ่นที่หนึ่ง SsYy อาจคำนวณได้ดังนี้

$$1/2 S \times 1/2 Y = 1/4 SY$$

$$1/2 S \times 1/2 y = 1/4 Sy$$

$$1/2 s \times 1/2 Y = 1/4 sY$$

$$1/2 s \times 1/2 y = 1/4 sy$$

จะเห็นได้ว่ามี gamete 4 ชนิดในอัตราส่วนเท่ากัน ดังนั้นเมื่อลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งสร้าง gamete ฝ่ายเพศผู้และเพศเมียจะสร้าง gamete 4 ชนิดในอัตราส่วนดังกล่าว

gamete จากฝ่ายเพศผู้แต่ละชนิดมีโอกาสเท่ากันที่จะผสมกับ gamete จากฝ่ายเพศเมียแต่ละชนิด ดังตารางต่อไปนี้

ผลการผสมระหว่างถั่วเมล็ดเรียบสีเหลืองกับถั่วเมล็ดย่นสีเขียว

ผลการผสม		Male gametes			
		SY	Sy	sY	sy
Female gametes	SY	SSYY	SSYy	SsYY	SsYy
	Sy	SSYy	SSyy	SsYy	Ssyy
	sY	SsYY	SsYy	ssYY	ssYy
	sy	SsYy	Ssyy	ssYy	ssyy

genotype ชนิดต่างๆ ของลูกข้าวรุ่นที่สองมีอยู่ในอัตราส่วนดังนี้

genotype	อัตราส่วน	phenotype
SSYY	1	เมล็ดเรียบ สีเหลือง
SSYy	2	เมล็ดเรียบ สีเหลือง
SSyy	1	เมล็ดเรียบ สีเขียว
SsYY	2	เมล็ดเรียบ สีเหลือง
SsYy	4	เมล็ดเรียบ สีเหลือง
Ssyy	2	เมล็ดเรียบ สีเขียว
ssYY	1	เมล็ดย่น สีเหลือง
ssYy	2	เมล็ดย่น สีเหลือง
ssyy	1	เมล็ดย่น สีเขียว
รวม	16	

phenotype ชนิดต่างๆ ของลูกข้าวรุ่นที่สองมีอยู่ในอัตราส่วนดังนี้

phenotype	อัตราส่วน
เมล็ดเรียบ สีเหลือง	9
เมล็ดเรียบ สีเขียว	3
เมล็ดย่น สีเหลือง	3
เมล็ดย่น สีเขียว	1
รวม	16

การที่ลูกข้าวรุ่นที่หนึ่งซึ่งมีลักษณะเมล็ดเรียบสีเหลืองผสมตัวเอง ปรากฏว่าได้ลูกข้าวรุ่นที่สองส่วนหนึ่งมี phenotype เมล็ดย่นสีเขียว แสดงว่าลูกข้าวรุ่นที่หนึ่งมี genotype เป็น SsYy

เพื่อทดสอบว่าจะเป็นเช่นนั้นจริงหรือไม่ Mendel ได้ทำการทดลอง

1. ผสมกลับลูกข้าวรุ่นที่หนึ่งกับต้นถั่วที่เป็นพ่อแม่ โดยผสมกับต้นถั่วเมล็ดย่นสีเขียว
2. ให้ลูกข้าวรุ่นที่หนึ่งผสมกับต้นถั่วเมล็ดเรียบสีเหลืองพันธุ์แท้

ในการทดลองที่ 1

ลูกข้าวรุ่นที่หนึ่งจะสร้าง gamete 4 ชนิดในอัตราส่วนเท่ากันคือ SY, Sy, sY และ sy ในอัตราส่วน 1:1:1:1

ส่วนต้นถั่วที่มีลักษณะเมล็ดย่นสีเขียวจะสร้าง gamete ชนิดเดียว คือ sy ตามทฤษฎีผลจากการผสมจะได้ลูกดังต่อไปนี้

gamete ของลูกข้าวรุ่นที่ 1	gamete ของ ssyy คือ sy		
	ผลการผสม		
	genotype	phenotype	อัตราส่วน
SY	SsYy	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	1/4
Sy	Ssyy	เมล็ดเรียบ สีเขียว	1/4
sY	ssYy	เมล็ดย่น สีเหลือง	1/4
sy	ssyy	เมล็ดย่น สีเขียว	1/4

จากผลการทดลองของ Mendel ปรากฏว่า จากลูกข้าวรุ่นที่สองจำนวน 200 ต้น สามารถจำแนก phenotype และจำนวนดังนี้

genotype	phenotype	จำนวน
SsYy	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	55
Ssyy	เมล็ดเรียบ สีเขียว	51
ssYy	เมล็ดย่น สีเหลือง	49
ssyy	เมล็ดย่น สีเขียว	52

จะเห็นได้ว่าผลการทดลองของ Mendel อัตราส่วนของลูกข้าวรุ่นที่สองใกล้เคียงกับอัตราส่วนทางทฤษฎี คือ 1:1:1:1 มาก

ในการทดลองที่สอง

ลูกข้าวรุ่นที่หนึ่งผสมกับตัวที่มีเมล็ดเรียบสีเหลือง SSYY ลูกข้าวรุ่นที่หนึ่งสร้าง gamete สี่ชนิดเหมือนกับในการทดลองที่ 1 ส่วนตัวที่มีเมล็ดเรียบสีเหลืองจะสร้าง gamete ชนิดเดียวคือ SY

ตามทฤษฎีลูกที่ได้จากการผสมดังกล่าวจะมีดังนี้คือ

gamete ของลูกข้าวรุ่นที่ 1	gamete ของ SSYY คือ SY		
	ผลการผสม		
	genotype	phenotype	อัตราส่วน
SY	SSYY	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	1/4
Sy	SSYy	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	1/4
sY	SsYY	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	1/4
sy	SsYy	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	1/4

จากการผสมดังกล่าวจะได้ genotype 4 ชนิดในอัตราส่วน 1:1:1:1 แต่มี phenotype เป็นเมล็ดเรียบ สีเหลือง ทุกต้น

ส่วนผลการทดลองของ Mendel มีดังนี้

genotype	phenotype	จำนวน (ต้น)
SSYY	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	45
SSYy	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	42
SsYY	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	47
SsYy	เมล็ดเรียบ สีเหลือง	43

อัตราส่วนที่ได้จากการทดลองจึงใกล้เคียงกับอัตราส่วนทางทฤษฎีมาก คือ genotype ของลูกทั้ง 4 ชนิดมีอัตราส่วนโดยประมาณเท่ากับ 1:1:1:1

ความสัมพันธ์กันระหว่าง factor และ chromosome

ในสมัยที่ Mendel ยังมีชีวิตอยู่ ความรู้ต่างๆ เกี่ยวกับ chromosome และพฤติกรรมของ chromosome ที่เกิดในการแบ่ง cell แบบ meiosis ยังมีน้อยมาก จนกระทั่งประมาณ ค.ศ. 1900 นักชีววิทยาได้แสดงให้เห็นว่า cell ประกอบด้วย chromosome มีการเพิ่มจำนวน chromosome และการแยกตัวของ chromosome ที่เกิดขึ้นในระยะ meiosis

การค้นพบ Law of Segregation จึงสอดคล้องกับพฤติกรรมของ chromosome ที่ค้นพบในภายหลังเป็นอย่างดี

จะเห็นได้ว่า factor หรือตัวนำลักษณะ ซึ่งต่อมารู้จักกันในคำว่า gene นั้นมีตำแหน่งอยู่บน chromosome chromosome อยู่เป็นคู่ใน cell chromosome อันหนึ่งมาจากฝ่ายแม่และอีกอันหนึ่งมาจากฝ่ายพ่อ factor ที่ Mendel กล่าวถึงก็อยู่เป็นคู่เช่นกัน และ factor ตัวหนึ่งมาจากฝ่ายแม่ อีกตัวหนึ่งมาจากฝ่ายพ่อ

chromosome ซึ่งอยู่เป็นคู่ มีการแยกตัวในระยะ metaphase I

factor ที่อยู่เป็นคู่ก็มีการแยกตัวออกจากกันไปอยู่ใน gamete เช่นกัน

เมื่อพิจารณาถึงการผสมที่ฝ่ายพ่อและฝ่ายแม่มีลักษณะแตกต่างกันมากกว่าหนึ่งลักษณะ และลักษณะแต่ละลักษณะเป็นอิสระต่อกัน นั่นก็หมายความว่าแต่ละลักษณะอยู่บนแต่ละ chromosome ซึ่งไม่ได้เป็นคู่กัน (non-homologous chromosome)

chromosome แต่ละคู่จะประกอบด้วย chromosome หนึ่งมาจากฝ่ายแม่ และอีก chromosome หนึ่งมาจากฝ่ายพ่อ

เมื่อถึงขั้นตอนการแบ่งเซลล์ในระยะ Metaphase I จะมีการจัดเรียง chromosome ที่มาเข้าคู่กันอย่างสุ่ม (random) นั่นคือ ข้างหนึ่งของ cell จะมี chromosome จากฝ่ายพ่อและจากฝ่ายแม่ประกอบกัน หรืออาจจะจะมี chromosome ของฝ่ายแม่หรือฝ่ายพ่อล้วนๆ ก็ได้

เพื่อความเข้าใจง่ายขึ้น ขอยกตัวอย่างการผสมระหว่างลักษณะเมล็ดเรียบสีเหลืองกับลักษณะเมล็ดย่นสีเขียว ลักษณะเมล็ดเรียบ S อยู่บน chromosome ที่เป็นคู่กับลักษณะเมล็ดย่น s ลักษณะสีเหลือง Y อยู่บน chromosome ที่เป็นคู่กับลักษณะสีเขียว y

ใน cell สืบพันธุ์ของลูกข้าวรุ่นที่หนึ่งที่จะสร้าง gamete chromosome ที่มาจากฝ่ายพ่อและฝ่ายแม่จะมาเข้าคู่กัน การจัดเรียง chromosome ในระยะ metaphase I เป็นไปได้สองแบบ

แบบที่ 1 chromosome ที่มี S อาจอยู่ข้างเดียวกับ chromosome ที่มี Y

แบบที่ 2 chromosome ที่มี S อาจอยู่ข้างเดียวกับ chromosome ที่มี y

จากนั้น spindle fiber จะดึงเอา chromosome แต่ละอันที่เป็นคู่ ให้แยกออกจากกัน ผลที่ได้คือ gamete ชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีความแตกต่างกันเท่าที่จะเป็นไปได้ 4 ชนิด

จากการเรียงตัวแบบที่หนึ่ง gamete มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่มี chromosome ประกอบด้วย S และ Y ส่วนอีก gamete หนึ่งมี s และ y gamete ทั้งสองดังกล่าวนี้มีความคล้ายคลึงกับ gamete ที่มาจากฝ่ายพ่อหรือฝ่ายแม่

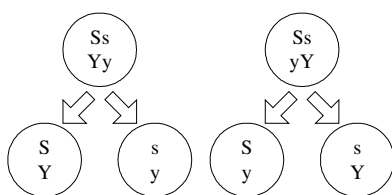
ส่วนการเรียงตัวแบบที่สอง จะได้ gamete 2 ชนิดเช่นกัน คือ ชนิดหนึ่งมี chromosome ประกอบด้วย S และ y ส่วนอีก gamete หนึ่งมี chromosome ประกอบด้วย s และ Y gamete ทั้งสองชนิดนี้เป็นการรวมกันระหว่าง chromosome ที่มาจากฝ่ายพ่ออันหนึ่งและที่มาจากฝ่ายแม่อีกอันหนึ่ง

อัตราส่วนของ gamete ทั้งหมดที่มาจาก การเรียงตัวทั้งสองแบบจะมีอยู่เท่ากัน คือ 1:1:1:1

การเกิด gamete 4 ชนิดในอัตราส่วนเท่ากัน แสดงว่า chromosome ที่มี S มีอิสระที่จะไปอยู่ร่วมกับ chromosome ที่มี Y หรือไปอยู่ร่วมกับ chromosome ที่มี y ใน gamete ในทำนองเดียวกัน chromosome ที่มี s ก็มีอิสระที่จะไปอยู่ร่วมกับ chromosome ที่มี Y หรือไปอยู่ร่วมกับ chromosome ที่มี y ใน gamete เช่นกัน

ตัวนำลักษณะ หรือ factor ที่ Mendel กล่าวถึงก็มีพฤติกรรมแบบเดียวกับ chromosome factor ที่นำลักษณะหนึ่งมีอิสระในการไปรวมกับ factor ที่นำลักษณะอื่นเพื่อเกิดเป็น gamete การค้นพบดังกล่าวนี้เป็นที่มาของ Law of Independent Assortment

ในสมัยต่อมาเพียง 10 ปีหลังจาก Mendel มรณภาพแล้ว นักวิทยาศาสตร์หลายคนได้ชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง chromosome กับ factor หรือ gene ว่ามีความสอดคล้องกันจริง



ภาพที่ 3-7

แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง factor และ chromosome ในการกระจายตัวเพื่อก่อรูปเป็น cell เพศ

6. วิธีคำนวณอัตราส่วนลูก F₂

ในพืชหรือสัตว์นั้น มีหลายลักษณะที่แสดงความเป็นอิสระต่อกัน เช่น ในหนูตะเภา ลักษณะขนสีดำ ซึ่งถูกควบคุมโดย gene B เป็นลักษณะเด่นข่มลักษณะขนสีขาว ซึ่งถูกควบคุมโดย gene b และมีอีกลักษณะหนึ่งที่ไม่ได้อยู่บน chromosome เดียวกับลักษณะสีของขน คือ ลักษณะขนสั้น ซึ่งถูกควบคุมโดย gene L ข่มลักษณะขนยาว ซึ่งถูกควบคุมโดย gene l หากผสมระหว่างหนูตะเภาสีดำขนยาว (BBll) กับหนูตะเภาสีขาวขนสั้น (bbLL) ลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งจะมีลักษณะสีดำขนสั้น และมี genotype BbLl ลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งจะสร้าง gamete 4 ชนิด คือ

B	➡ ไปเข้าชุดกับ	L	ได้ gamete ชนิด	BL	ในอัตราส่วน 1/4
	➡ ไปเข้าชุดกับ	l	ได้ gamete ชนิด	Bl	ในอัตราส่วน 1/4
b	➡ ไปเข้าชุดกับ	L	ได้ gamete ชนิด	bL	ในอัตราส่วน 1/4
	➡ ไปเข้าชุดกับ	l	ได้ gamete ชนิด	bl	ในอัตราส่วน 1/4

เมื่อลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งผสมกันเองจะได้ลูกชั่วรุ่นที่สอง การคำนวณอัตราส่วนของลูกชั่วรุ่นที่สองอาจทำได้หลายวิธี คือ

6.1. การใช้ตาราง Punnett's square

gamete ของลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งมี 4 ชนิดในอัตราส่วนเท่ากัน ตัวเมียจะสร้าง gamete 4 ชนิด ตัวผู้จะสร้าง gamete 4 ชนิดเช่นกัน การรวมกันของ gamete จากสองฝ่ายทำได้โดยใช้ตาราง 4 × 4 ช่อง ดังตารางข้างล่าง แถวบนเป็น gamete ของตัวผู้มี 4 ชนิด และแถวตั้งเป็น gamete ของตัวเมีย มี 4 ชนิดเช่นกัน ช่องต่างๆ 16 ช่องเป็น genotype และ phenotype ของลูกชั่วรุ่นที่สองแต่ละตัว ที่เกิดจากการผสมระหว่าง gamete จากฝ่ายพ่อและฝ่ายแม่ ดังนั้น จะได้ลูกชั่วรุ่นที่สอง 16 ตัว แต่บางตัวมี phenotype เหมือนกัน บางตัวมี genotype เหมือนกัน จึงจำเป็นต้องสรุปผลออกมาอีก คือ นับจำนวน genotype และ phenotype ที่เหมือนกันว่ามีเท่าไร แล้วบอกอัตราส่วนกำกับ

parent	แม่ BBll	×	bbLL พ่อ
	สีดำขนยาว	↓	สีขาวขนสั้น
ลูกชั่วรุ่นที่ 1 (F ₁)		BbLl	
		สีดำขนสั้น	
ลูกชั่วรุ่นที่ 1 (F ₁)		BbLl	
		สีดำขนสั้น	
		↓ ⊗	

ลูกชั่วรุ่นที่สอง (F ₂)	BL	Bl	bL	bl
BL	BBLL สีดำขนสั้น	BbLl สีดำขนสั้น	BbLL สีดำขนสั้น	BbLl สีดำขนสั้น
Bl	BbLl สีดำขนสั้น	BBll สีดำขนยาว	BbLl สีดำขนสั้น	Bbll สีดำขนยาว
bL	BbLL สีดำขนสั้น	BbLl สีดำขนสั้น	bbLL สีขาวขนสั้น	bbLl สีขาวขนสั้น
bl	BbLl สีดำขนสั้น	Bbll สีดำขนยาว	bbLl สีขาวขนสั้น	bbll สีขาวขนยาว

สรุปอัตราส่วนของลูกชั่วรุ่นที่สอง

อัตราส่วนของ genotype

BBLL	1/16
BBLl	2/16
BBll	1/16
BbLL	2/16
BbLl	4/16
Bbll	2/16
bbLL	1/16
bbLl	2/16
bbll	1/16

อัตราส่วนของ phenotype

สีดำ ขนสั้น	9/16
สีดำ ขนยาว	3/16
สีขาว ขนสั้น	3/16
สีขาว ขนยาว	1/16

6.2. การคำนวณจากแต่ละลักษณะ

อัตราส่วนของ genotype และ phenotype ของลูกชั่วรุ่นที่สอง เมื่อคิดเฉพาะลักษณะเดียว เช่น $Bb \times Bb$ ลูกชั่วรุ่นที่สองมี genotype และ phenotype ในอัตราส่วนดังต่อไปนี้

genotype	อัตราส่วน	phenotype	อัตราส่วน
BB	1/4	ขนสีดำ	3/4
Bb	2/4		
bb	1/4	ขนสีขาว	1/4

ในทำนองเดียวกัน $Ll \times Ll$ ลูกชั่วรุ่นที่สองมี genotype และ phenotype ดังนี้

genotype	อัตราส่วน	phenotype	อัตราส่วน
LL	1/4	ขนสั้น	3/4
Ll	2/4		
ll	1/4	ขนยาว	1/4

เมื่อคำนวณอัตราส่วนทาง genotype และ phenotype ของแต่ละลักษณะแล้ว ก็นำอัตราส่วนดังกล่าวมาคูณกัน

อัตราส่วน genotype ของลูกชั่วรุ่นที่สอง

	1/4 BB	2/4 Bb	1/4 bb
1/4 LL	1/16 BBLL	2/16 BbLL	1/16 bbLL
2/4 Ll	2/16 BBLl	4/16 BbLl	2/16 bbLl
1/4 ll	1/16 BBll	2/16 Bbll	1/16 bbll

อัตราส่วน phenotype ของลูกชั่วรุ่นที่สอง

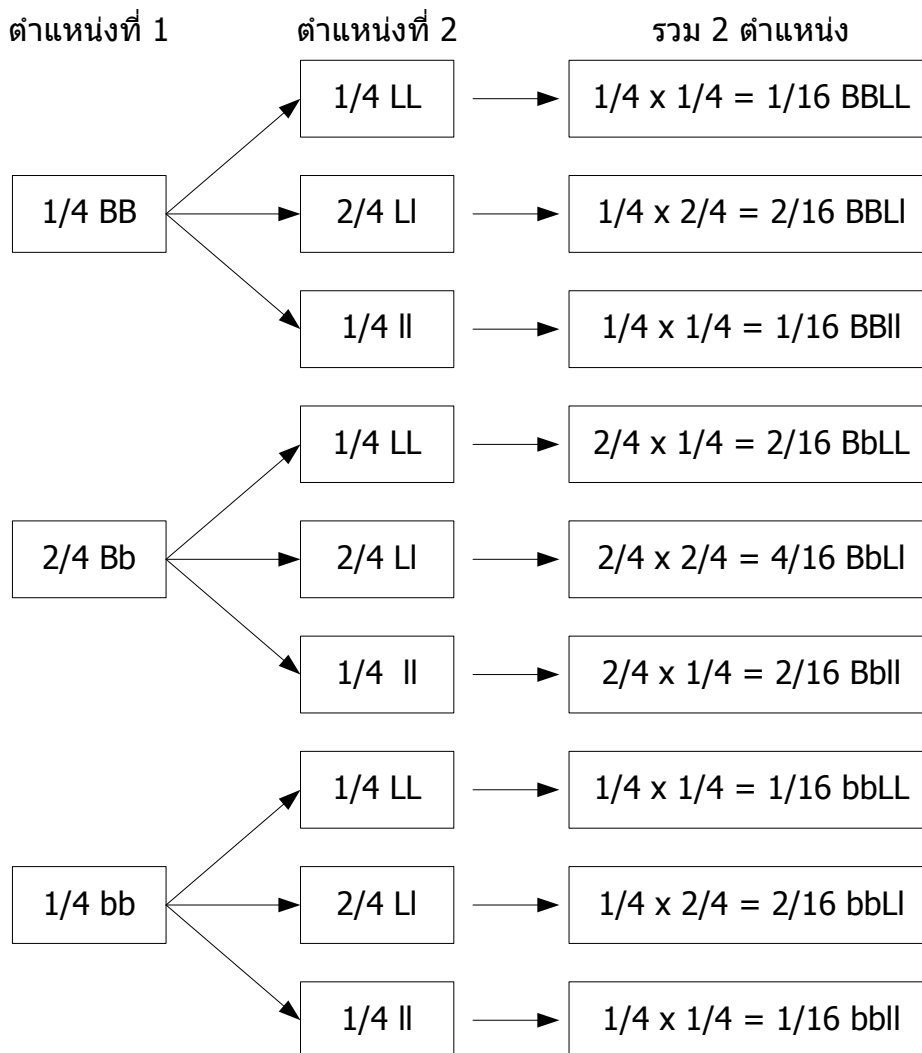
	3/4 สีดำ	1/4 สีขาว
3/4 ขนสั้น	9/16 สีดำ ขนสั้น	3/16 สีขาว ขนสั้น
1/4 ขนยาว	3/16 สีดำ ขนยาว	1/16 สีขาว ขนยาว

6.3.การใช้วิธีแตกสาขา

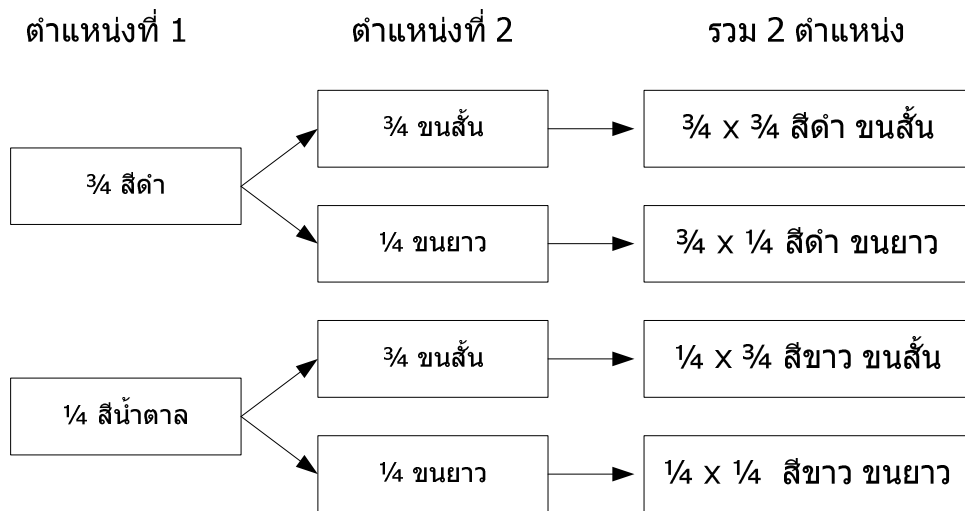
วิธีนี้นิยมใช้กันมากเพราะสะดวกรวดเร็วและมีข้อผิดพลาดน้อย

นำ genotype แต่ละแบบอันเป็นผลจากการผสมของ gene ตำแหน่งที่ 1 และจำนวนสัดส่วนของแต่ละแบบนั้น ตั้งไว้เป็นจุดตั้งต้น แล้วนำ genotype แต่ละแบบอันเป็นผลจากการผสมของ gene ตำแหน่งที่ 2 และจำนวนสัดส่วนของแต่ละแบบนั้น มาเขียนแตกแขนงออกไปจาก genotype แต่ละแบบของจุดตั้งต้นอันเป็นผลจากการผสมของ gene ตำแหน่งที่ 1 จากนั้นรวม gene ทั้ง 2 ตำแหน่ง ในทุก ๆ แขนง จะได้เป็น genotype รวมทั้ง 2 ตำแหน่ง gene ในแต่ละแบบนั้น

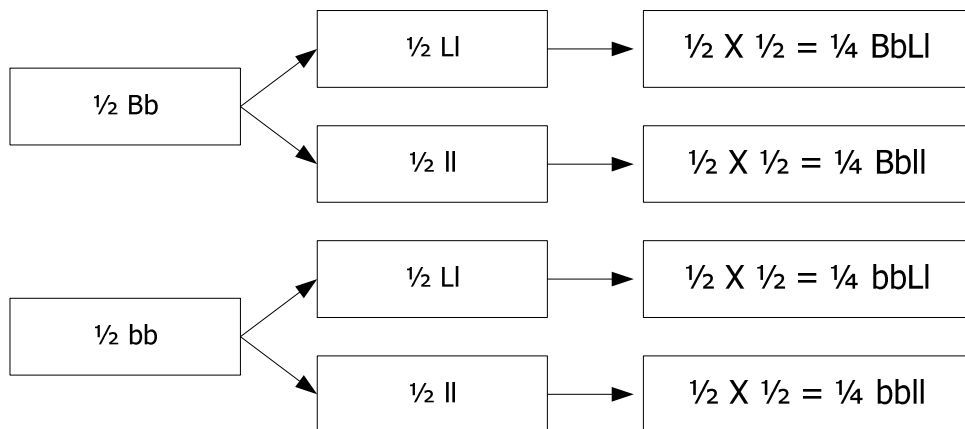
และในแต่ละแขนง นำจำนวนสัดส่วนของ genotype แต่ละตำแหน่ง gene มาคูณกัน ก็จะได้เป็นจำนวนสัดส่วนของ genotype รวมทั้ง 2 ตำแหน่ง gene ในแต่ละแบบนั้น



สำหรับ phenotype ก็ทำในลักษณะเดียวกัน



การคำนวณโดยวิธีแตกสาขานี้ใช้ได้กับอัตราส่วนของลูกที่เกิดจากการผสมระหว่าง genotype อื่นๆ เช่น $Bbll \times bbLl$ ในกรณีนี้ $Bb \times bb$ จะได้ $Bb = 1/2$ และ $bb = 1/2$ ส่วน $ll \times Ll$ จะได้ $Ll = 1/2$ และ $ll = 1/2$ ดังนั้น



การระบุ phenotype โดยใช้ gene

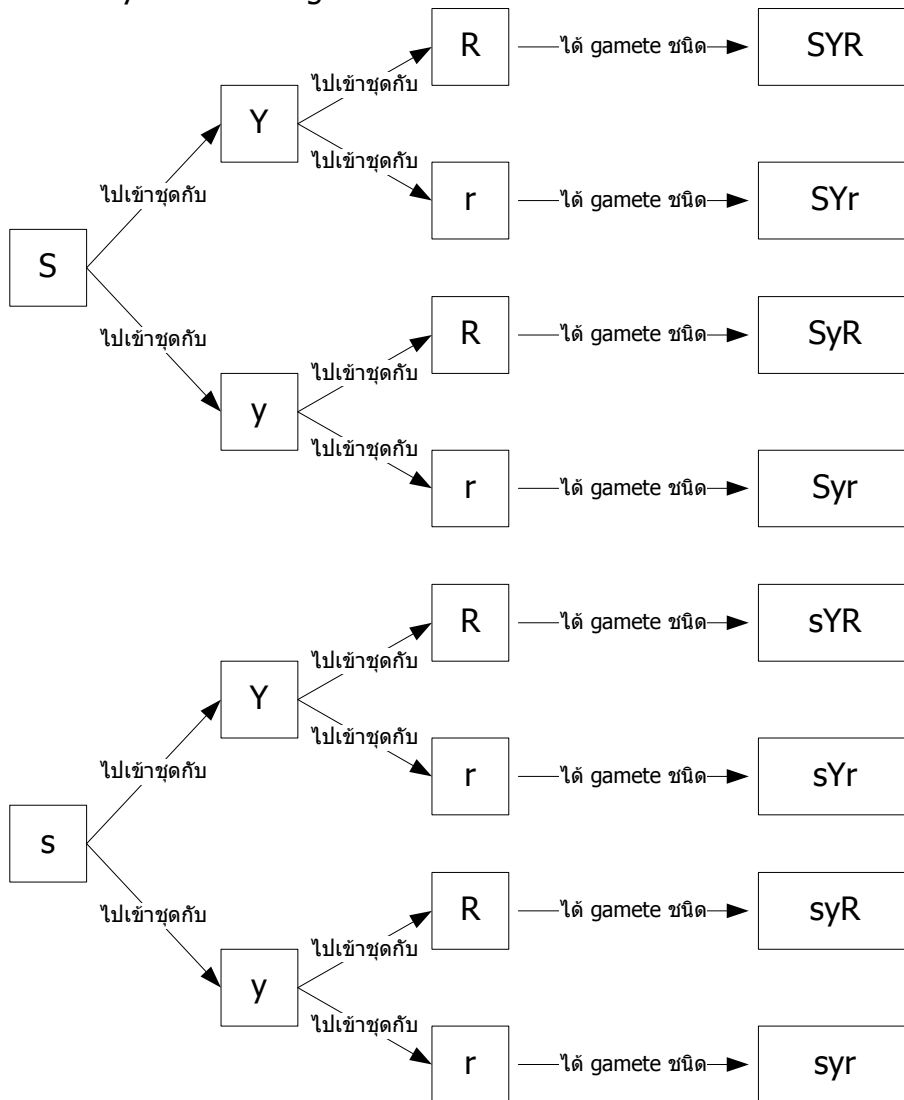
ลักษณะต่างๆ หรือ phenotype ของสิ่งมีชีวิต อาจเขียนอย่างย่อได้ในกรณีที่ gene แสดงการข่มอย่างสมบูรณ์ เช่น ลักษณะเมล็ดเรียบ S ข่มลักษณะเมล็ดย่น s การเขียน phenotype ก็ใช้ dominant gene หนึ่งตัวและขีดต่อท้ายลงเอาไว้ ดังนั้น phenotype ของต้นถั่วที่มีเมล็ดเรียบคือ S- ซึ่งหมายความว่าต้นถั่วที่มีเมล็ดเรียบอาจมี genotype เป็น SS หรือ Ss ก็ได้ เพราะในลูกผสมหากมองเฉพาะลักษณะภายนอก คือ phenotype เราไม่สามารถบอกได้ว่าต้นถั่วเป็น homozygous หรือ heterozygous นอกจากจะมีการทดสอบ genotype เสียก่อน ส่วน homozygous recessive ก็เขียนตามแบบ genotype เพราะเมื่อเรารู้ phenotype เราก็มารู้ genotype ด้วย

จากตัวอย่างของหนุตะเกา phenotype ชนิดต่างๆ ของลูกชั่วรุ่นที่สองอาจเขียนได้ดังนี้

สีดำ ขนสั้น 9 ส่วน	อาจเขียนเป็น	B-L- 9 ส่วน
สีดำ ขนยาว 3 ส่วน	อาจเขียนเป็น	B-ll 3 ส่วน
สีขาว ขนสั้น 3 ส่วน	อาจเขียนเป็น	bbL- 3 ส่วน
สีขาว ขนยาว 1 ส่วน	อาจเขียนเป็น	bbll 1 ส่วน

7. อัตราส่วนลูกผสมที่เกี่ยวข้องมากกว่าสองลักษณะ

ในการผสมพันธุ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตที่มีความแตกต่างกันมากกว่าสองลักษณะขึ้นไป อัตราส่วนของลูกผสมในชั่วรุ่นที่สองมีความซับซ้อนมากขึ้น เพราะมีจำนวนคู่ของ gene มากขึ้น และชนิดของลูกชั่วรุ่นที่สองก็มีมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม เราสามารถใช้ Law of Independent Assortment เพื่อการคิดคำนวณได้ ตัวอย่าง ต้นถั่วลักษณะเมล็ดเรียบ สีเหลือง ดอกแดง มี genotype SSYYRR ผสมกับต้นถั่วลักษณะเมล็ดย่น สีเขียว ดอกขาว มี genotype ssyyrr แต่ละลักษณะแสดงการข่มที่สมบูรณ์ ลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งมีลักษณะเมล็ดเรียบ สีเหลือง ดอกแดง มี genotype เป็น SsYyRr และสร้าง gamete ได้ 8 ชนิด คือ



เมื่อลูกชั่วรุ่นที่หนึ่งผสมตัวเองจะมีเหตุการณ์ของการผสมเท่าที่เป็นไปได้ 64 เหตุการณ์

เหตุการณ์การผสม	Male gametes								
	SYR	SYr	SyR	Syr	sYR	sYr	syR	syr	
Female gametes	SYR	SSYYRR	SSYYRr	SSYyRR	SSYyRr	SsYYRR	SsYYRr	SsyYRR	SsYyRr
	SYr	SSYYRr	SSYYrr	SSYyRr	SSYyrr	SsYYRr	SsYYrr	SsyYRr	SsYyrr
	SyR	SSYyRR	SSYyRr	SSyyRR	SSyyRr	SsYyRR	SsYyRr	SsyyRR	SsyyRr
	Syr	SSYyRr	SSYyrr	SSyyRr	SSyyrr	SsYyRr	SsYyrr	SsyyRr	Ssyyrr
	sYR	SsYYRR	SsYYRr	SsYyRR	SsYyRr	ssYYRR	ssYYRr	ssYyRR	ssYyRr
	sYr	SsYYRr	SsYYrr	SsYyRr	SsYyrr	ssYYRr	ssYYrr	ssYyRr	ssYyrr
	syR	SsYyRR	SsYyRr	SsyyRR	SsyyRr	ssYyRR	ssYyRr	ssyyRR	ssyyRr
	syr	SsYyRr	SsYyrr	SsyyRr	Ssyyrr	ssYyRr	ssYyrr	ssyyRr	ssyyrr

แต่บางเหตุการณ์จะมี genotype ซ้ำกัน เมื่อรวม genotype ที่เหมือนกันไว้เป็นพวกเดียวกัน จะได้ 27 ชนิด ในอัตราส่วนดังนี้

Genotype	สัดส่วน	Phenotype		
SSYYRR	1 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกแดง
SSYYRr	2 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกแดง
SSYYrr	1 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกขาว
SSYyRR	2 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกแดง
SSYyRr	4 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกแดง
SSYyrr	2 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกขาว
SSyyRR	1 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเขียว	ดอกแดง
SSyyRr	2 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเขียว	ดอกแดง
SSyyrr	1 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเขียว	ดอกขาว
SsYYRR	2 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกแดง
SsYYRr	4 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกแดง
SsYYrr	2 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกขาว
SsYyRR	4 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกแดง
SsYyRr	8 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกแดง
SsYyrr	4 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเหลือง	ดอกขาว
SsyyRR	2 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเขียว	ดอกแดง
SsyyRr	4 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเขียว	ดอกแดง
Ssyyrr	2 ส่วน	เมล็ดเรียบ	สีเขียว	ดอกขาว
ssYYRR	1 ส่วน	เมล็ดย่น	สีเหลือง	ดอกแดง
ssYYRr	2 ส่วน	เมล็ดย่น	สีเหลือง	ดอกแดง
ssYYrr	1 ส่วน	เมล็ดย่น	สีเหลือง	ดอกขาว
ssYyRR	2 ส่วน	เมล็ดย่น	สีเหลือง	ดอกแดง
ssYyRr	4 ส่วน	เมล็ดย่น	สีเหลือง	ดอกแดง
ssYyrr	2 ส่วน	เมล็ดย่น	สีเหลือง	ดอกขาว
ssyyRR	1 ส่วน	เมล็ดย่น	สีเขียว	ดอกแดง
ssyyRr	2 ส่วน	เมล็ดย่น	สีเขียว	ดอกแดง
ssyyrr	1 ส่วน	เมล็ดย่น	สีเขียว	ดอกขาว

บางเหตุการณ์ก็มี phenotype ซ้ำกัน เมื่อรวม phenotype ที่เหมือนกันไว้เป็นพวกเดียวกัน จะได้ 8 ชนิด ดังนี้

Phenotype	จำนวน
เมล็ดเรียบ, สีเหลือง, ดอกแดง	27 ส่วน
เมล็ดเรียบ, สีเหลือง, ดอกขาว	9 ส่วน
เมล็ดเรียบ, สีเขียว, ดอกแดง	9 ส่วน
เมล็ดเรียบ, สีเขียว, ดอกขาว	3 ส่วน
เมล็ดย่น, สีเหลือง, ดอกแดง	9 ส่วน
เมล็ดย่น, สีเหลือง, ดอกขาว	3 ส่วน
เมล็ดย่น, สีเขียว, ดอกแดง	3 ส่วน
เมล็ดย่น, สีเขียว, ดอกขาว	1 ส่วน
รวม	64 ส่วน

จะเห็นได้ว่าหากฝ่ายพ่อและฝ่ายแม่มีจำนวนลักษณะต่างกันมากขึ้น จำนวน gamete ของลูกชั่วรุ่นที่ 1 จะเพิ่มขึ้น ชนิดของลูกชั่วรุ่นที่ 2 ก็เพิ่มขึ้น ตารางข้างบน แสดงถึงจำนวน

gamete ของลูกชั่วรุ่นที่ 1 จำนวน combination ที่ gamete สามารถผสมกันได้ ชนิดของ phenotype และ genotype ของลูกชั่วรุ่นที่ 2 จำนวนลูกชั่วรุ่นที่ 2 ที่เหมือนฝ่ายพ่อหรือฝ่ายแม่ ในการผสมระหว่างพ่อแม่ที่มีความแตกต่างกันหนึ่งลักษณะ เช่น $SS \times ss$ ได้ลูกชั่วรุ่นที่ 1 คือ Ss จำนวนคู่ของ gene ที่เป็น heterozygous เท่ากับ 1 คู่ ลูกชั่วรุ่นที่ 1 จะสร้าง gamete 2 ชนิด คือ S และ s หากลูกชั่วรุ่นที่ 1 มีจำนวนคู่ของ gene แตกต่างกัน 2 คู่ เช่น SsYy จำนวน gamete ที่ลูกชั่วรุ่นที่ 1 จะสร้างเท่ากับ 4 หรือ 2^2 หากเพิ่มเป็น 3 คู่ก็จะได้ gamete เท่ากับ 8 ชนิด หรือ 2^3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคู่ของ gene ที่เป็น heterozygous กับจำนวน gamete ชนิดต่างๆ นี้ เขียนออกมาเป็นสูตรได้คือ จำนวน gamete ชนิดต่างๆ ที่จะมี เท่ากับ 2^n เมื่อ n เท่ากับจำนวนคู่ของ gene ที่แตกต่างกัน

จำนวน combination ของลูกชั่วรุ่นที่ 2 ที่เกิดจาก gamete ของลูกชั่วรุ่นที่ 1 ผสมกันเอง จะเท่ากับจำนวน gamete ของลูกชั่วรุ่นที่ 1 ฝ่ายเพศเมีย คูณด้วยจำนวน gamete ฝ่ายเพศผู้ เช่น ในกรณีที่ลูกชั่วรุ่นที่ 1 Ss สร้าง gamete 2 ชนิด คือ S และ s ดังนั้นจำนวน combination ของลูกชั่วรุ่นที่ 2 เท่ากับ 2×2 หรือ 4^1 combination หากจำนวนคู่ของ gene มี 2 คู่ เช่น SsYy จำนวน gamete ของลูกชั่วรุ่นที่ 1 เท่ากับ 4 ชนิด ดังนั้น จำนวน combination ของลูกชั่วรุ่นที่ 2 จะเท่ากับ $4 \times 4 = 16$ หรือ 4^2 combination หากมี 3 คู่ จะได้ $4 \times 4 \times 4 = 64$ หรือ 4^3 combination หากมี n คู่ จะได้ 4^n ซึ่ง n คือจำนวนคู่ของ gene ที่แตกต่างกัน จำนวนชนิดของ phenotype ในลูกชั่วรุ่นที่ 2 มีความสัมพันธ์กับจำนวนคู่ของ gene ที่เป็น heterozygous เช่น ลูกชั่วรุ่นที่ 1 Ss มี gene ที่แตกต่างกัน 1 คู่ ลูกชั่วรุ่นที่ 2 มี phenotype 2 ชนิด คือ S- และ ss ดังนั้นลูกชั่วรุ่นที่ 2 ที่ gene แตกต่างกัน 1 คู่ มี phenotype เท่ากับ 2^1 ชนิด หากจำนวนคู่ของ gene แตกต่างกัน 2 คู่ เช่น SsYy จะมี phenotype ที่แตกต่างกัน 4 ชนิด คือ S-Y- , S-yy , ssY- และ ssyy ดังนั้นลูกชั่วรุ่นที่ 2 ที่ gene แตกต่างกัน 2 คู่ จะมี phenotype ได้เท่ากับ 2^2 ชนิด หาก 3 คู่ จะมีได้เท่ากับ 8 ชนิด หรือ 2^3 หากมีจำนวนคู่ของ gene ที่แตกต่างกัน n คู่ ลูกชั่วรุ่นที่ 2 จะมี phenotype แตกต่างกัน เท่ากับ 2^n ชนิด

จำนวนชนิดของ genotype ที่จะมีได้ในลูกชั่วรุ่นที่ 2 มีความสัมพันธ์กับจำนวน gene ที่แตกต่างกัน เช่น ลูกชั่วรุ่นที่ 1 มี gene แตกต่างกัน 1 คู่ Ss ลูกชั่วรุ่นที่ 2 มี genotype 3 แบบ คือ SS , Ss และ ss หากแตกต่างกัน 2 คู่ จะมี 9 แบบ หรือ 3^2 หากมี 3 คู่ จะมีได้ 27 ชนิด หรือ 3^3 หากมี n คู่ ลูกชั่วรุ่นที่ 2 จะมี genotype ได้ = 3^n ชนิด

จำนวนของลูกชั่วรุ่นที่ 2 ที่มี genotype เหมือนฝ่ายพ่อหรือฝ่ายแม่มีความสัมพันธ์กับจำนวนคู่ของ gene เช่น Ss มี gene แตกต่างกัน 1 คู่ ลูก F₂ ที่มี genotype เหมือนฝ่ายพ่อหรือฝ่ายแม่ คือ SS หรือ ss หรือ 1 ดัน จากลูกชั่วรุ่นที่ 2 ทั้งหมด 4 ดัน หรือในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 หากจำนวนคู่ของ gene เพิ่มเป็น 2 คู่ ลูกชั่วรุ่นที่ 2 ที่เหมือนพ่อหรือแม่จะมีได้ในอัตราส่วน 1 ใน 16 หรือ 1 ใน 4^2 หากมี 3 คู่จะเท่ากับ 1 ใน 64 หรือ 1 ใน 4^3 หากลูกชั่วรุ่นที่ 1 มี gene แตกต่างกัน n คู่ ลูกชั่วรุ่นที่ 2 ที่เหมือนฝ่ายพ่อหรือฝ่ายแม่เท่ากับ 1 ใน 4^n

ผลของจำนวนคู่ของ gene ที่แตกต่างกัน

	จำนวนคู่ของ gene					
	1	2	3	4	5	n
จำนวนชนิดของ gamete ใน F1	2	4	8	16	32	2^n
จำนวน combinations ใน F2	4	16	64	256	1,024	4^n
จำนวนชนิดของ phenotype ใน F2	2	4	8	16	32	2^n
จำนวนชนิดของ genotype ใน F2	3	9	27	81	243	3^n
จำนวน F2 ที่เหมือนพ่อหรือแม่	1/4	1/16	1/64	1/256	1/1,024	1/4 ⁿ

*