บทที่ 10
เอกภพและจักรวาลวิทยา

คำว่าเอกภพเราหมายถึงสิ่งต่าง ๆ ทางกายภาพทั้งหมดที่มีอยู่หรือเคยมีอยู่ในทุกหนทุกแห่ง ไม่เพียงแต่รวมถึงสสารทั้งหมด เช่น ดาวเคราะห์ ดาวฤกษ์ ดาราจักร หลุมดำ และพลังงานรังสีทั้งหมด เช่น แสงสว่าง ความร้อน คลื่นรังสีเอกซ์ รังสีกัมมันต์ และ ฯลฯ แต่ยังรวมถึงอวกาศและเวลาอีกด้วย หรือกล่าวอย่างสั้น ๆ ก็คือ ทุกสิ่งทุกอย่างที่ปรากฏออกมาให้เห็นทางกายภาพ ในบทนี้เราจะศึกษาสมบัติของเอกภพที่เราสังเกตได้ รวมทั้งพิจารณาทฤษฎีต่าง ๆ ของเอกภพและวิวัฒนาการของเอกภพ

10.1 การขยายตัวและอายุของเอกภพ

เมื่อนักดาราศาสตร์ได้สร้างกล้องดูดาวขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นิ้วขึ้นที่เมาท์วิลสันในแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้ฮับเบิลนักดาราศาสตร์ชาวอเมริกันได้ศึกษาเนบิวลาชื่อแอนโดรเมดาอย่างละเอียด และได้พบว่าเนบิวลานั้นประกอบด้วยดวงดาวมากมาย ดังนั้นนักดาราศาสตร์จึงทราบความจริงว่า เนบิวลาแอนโดรเมดาก็คือ ดาราจักรอันหนึ่งซึ่งมีขนาดพอ ๆ กับดาราจักรทางช้างเผือก ในปัจจุบันนักดาราศาสตร์ได้ค้นพบดาราจักรอีกนับพันล้านดาราจักร และในแต่ละดาราจักรประกอบด้วยดาวฤกษ์นับพันล้านดวง บางดาราจักรอยู่ห่างจากเราออกไปนับพันล้านปีแสง ซึ่งเราจะมองเห็นเป็นแสงสว่างจาง ๆ แม้จะใช้กล้องดูดาวขนาดใหญ่ส่องดูก็ตาม ดังนั้นเอกภพจึงมีอาราจักรกว้างใหญ่ไพศาลมาก

การศึกษาสมบัติของเอกภพที่สำคัญยิ่งอีกเรื่องหนึ่งก็คือ การศึกษาเรื่องคุณภาพของแสงที่มาจากดาราจักรที่อยู่ห่างไกลออกไปจากดาราจักรทางช้างเผือกมาก ๆ ในปี ค.ศ.1912 นักดาราศาสตร์ชื่อ **สไลเฟอร์ (V.M. Slipher)** ได้ค้นพบว่า แสงสว่างที่มาจากดาราจักรอื่นส่วนใหญ่มีเส้นสเปกตรัมเลื่อนไปทางสีแดง นั่นแสดงว่าดาราจักรส่วนใหญ่นั้นกำลังวิ่งหนีออกจากดาราจักรของเรา ต่อมาในปี ค.ศ.1920 **ฮับเบิลและฮิวเมสัน (M. Humason)** ได้ค้นพบว่า แสงสว่างที่มาจากดาราจักรที่มีแสงจาง ๆ มีเส้นสเปกตรัมเลื่อนไปทางสีแดงมากกว่าแสงที่มาจากดาราจักรที่มีความสว่างกว่าหรืออยู่ใกล้กว่า ความสัมพันธ์นี้เรียกว่ากฎของฮับเบิล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเลื่อนไปทางสีแดงของสเปกตรัมกับระยะทางของดาราจักร และความเร็วที่ดาราจักรวิ่งห่างออกไป แสดงให้เห็นว่าเอกภพกำลังขยายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทุกทิศทาง

ให้เรามาพิจารณาดาราจักรอันหนึ่งซึ่งอยู่ห่างจากเราเป็นระยะทาง r ถ้าหากดาราจักรนี้ให้เส้นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น λ_0 แต่เรารับแสงได้เป็นที่ความยาวคลื่น λ $(\lambda > \lambda_0)$ ดังนั้นเราจะกำหนดให้แสงมีการเลื่อนไปทางสีแดง z เป็น

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \qquad (10.1)$$

ถ้าหากการเลื่อนของเส้นสเปกตรัมเป็นปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ เราจะได้ความเร็วของดาราจักรที่วิ่งหนีออกจากเราเป็น

$$v = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right) c$$

$$v = zc \qquad (10.2)$$

เมื่อ c คือความเร็วแสง

ฮับเบิลได้พบว่า ความเร็วของดาราจักรจะขึ้นกับระยะห่างของดาราจักร ดังนั้น

$$zc = Hr \qquad (10.3)$$

เมื่อ H คือค่าคงที่ฮับเบิล

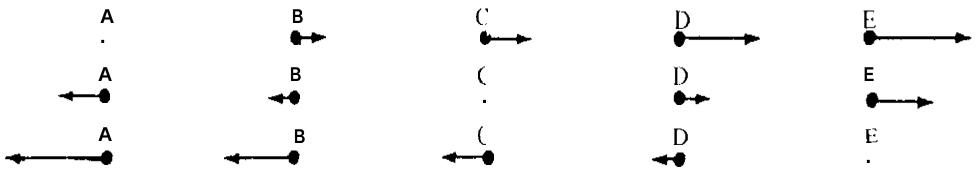
จากสมการ (10.2) และ (10.3) กฎของฮับเบิลจึงเขียนได้เป็น

$$v = Hr \qquad (10.4)$$

ถ้าเราทราบค่า H เราก็อาจหาค่าระยะทางของดาราจักรได้จากค่าการเลื่อนที่ z ของเส้นสเปกตรัม ค่าของ H มีหน่วยของความเร็วต่อระยะทางคือ กิโลเมตร/วินาที/เมกะพาร์เซ็ก (km/s/Mpc) โดยที่ Mpc = 10^6 pc สำหรับค่าของ H ที่ยอมรับกันในปัจจุบันอยู่ระหว่าง 50 ถึง 125 กม./วินาที/เมกะพาร์เซก ค่าที่น่าเชื่อถือที่สุดคือ 55 ± 7 กม./วินาที/เมกะพาร์เซก หรือประมาณ 50 กม./วินาที/เมกะพาร์เซก เมื่อเราเปลี่ยน Mpc เป็น km และ s เป็น yr เราจะเห็นได้ว่า H มีหน่วยเป็นต่อปี (yr^{-1})

การที่ดาราจักรทุกดาราจักรต่างก็วิ่งหนีออกจากเรา (ยกเว้นดาราจักรในกลุ่มท้องถิ่น) แสดงว่าเอกภพกำลังขยายตัว แต่การที่ดาราจักรกลุ่มท้องถิ่นไม่ขยายตัวตามเอกภพโดยส่วนรวมก็เพราะว่า สมาชิกในกลุ่มต่างมีความเร็วเฉพาะตัวของตัวเอง ดังนั้นกฎของฮับเบิลจึงใช้ได้กับดาราจักรที่มีระยะทางตั้งแต่ประมาณ 10^6 พาร์เซกขึ้นไป การที่ดาราจักรทุกดาราจักรวิ่งหนีออกจากเราตามที่ฮับเบิลค้นพบ ไม่ได้หมายความว่าโลกเราหรือดาราจักรของเราเป็นจุดศูนย์กลางของการวิ่งหนีไปหรือเป็นจุดศูนย์กลางของเอกภพ เพราะว่าความเป็นจริงแล้วผู้สังเกตในทุกดาราจักรต่างก็จะเห็นดาราจักรอื่น ๆ ทุกดาราจักรต่างก็วิ่งหนีออกจากผู้สังเกตเหมือนกันหมด ดังนั้นเอกภพจึงไม่มีจุดศูนย์กลางดังที่ได้แสดงในรูป 10.1

การขยายตัวของเอกภพตามที่ฮับเบิลได้ค้นพบมีลักษณะที่แปลกมาก คือ ดาราจักรที่อยู่ไกลจากเรามากเท่าใด จะยิ่งมีอัตราการวิ่งหนีออกไปเร็วมากเท่านั้น และดาราจักรที่อยู่ห่างจากเราเป็นระยะทางหลายพันล้านปีแสงจะวิ่งห่างจากเราไปด้วยความเร็วเกือบเท่ากับความเร็วแสง เมื่อเราสำรวจอวกาศลึกเข้าไปมากเท่าใด การเกิดเส้นสเปกตรัมเลื่อนที่ไปทางสีแดงมากขึ้นและมีอย่างไม่สิ้นสุด ดาราจักรจะค่อย ๆ หายไปกลายเป็นดาราจักรไร้แสง จน



รูป 10.1 แสดงการขยายตัวของเอกภพ เมื่อเรามองจาก A, C และ E จะเห็นว่าดาราจักรต่างก็วิ่งหนีออกจากกันด้วยความเร็วที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างและไม่ขึ้นกับตำแหน่งของผู้สังเกต ดังนั้นดาราจักรทั้งสามแห่งจึงไม่มีจุดใดอยู่ที่จุดศูนย์กลางหรือขอบของการเคลื่อนที่ การขยายตัวของเอกภพจึงเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วกันหมด

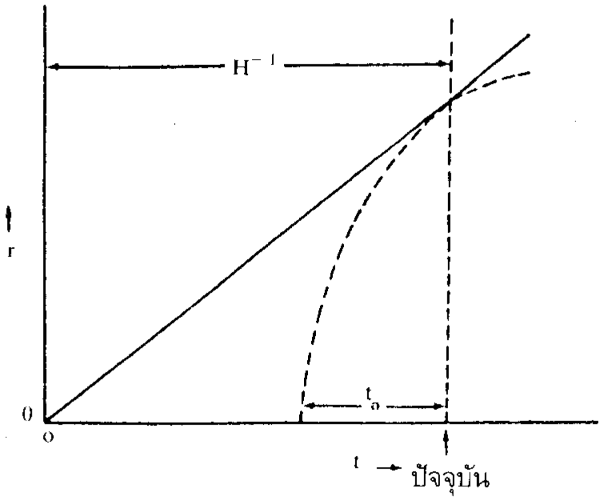
กระทั่งสเปกตรัมของดาราจักรได้เลื่อนไปจนมีค่า $\lambda = \infty$ หรือ $\nu = 0$ และอัตราเร็วของดาราจักรที่วิ่งหนีออกจากเรามีค่าเท่ากับความเร็วแสง นั่นคือความเข้มของแสงจะลดลงเป็นศูนย์ และเราจะมองไม่เห็นดาราจักรในบริเวณนั้นเลย เพราะว่าไม่มีแสงสว่างเดินทางกลับมาหาเราจากบริเวณที่อยู่นั้นเลย ดังนั้นเราถือว่าดาราจักรที่มีค่าอัตราเร็ว $v = c$ เป็นดาราจักรที่อยู่ตรงบริเวณตรงขีดจำกัดของการขยายตัวของเอกภพและเป็นจุดแบ่งแยกระหว่างอาณาจักรของเอกภพที่เราสามารถมองเห็นได้กับบริเวณที่อยู่เลยออกไปซึ่งเราไม่สามารถมองเห็นอะไรได้อีกแม้จะใช้เครื่องมือค้นหาที่มีความไวมากเท่าใดก็ตาม นักดาราศาสตร์เรียกว่าเส้นสุดขอบของอวกาศ แต่ไม่ได้หมายความว่าบริเวณนั้นคือขอบของเอกภพ นักดาราศาสตร์มีความเห็นว่าเอกภพไม่มีขอบเขต เพราะว่าเมื่อเรามองออกไปรอบ ๆ ในอวกาศ เราจะมองเห็นเพียงส่วนเฉลี่ยของจักรวาลเหมือนกับผู้สังเกตการณ์ในดาราจักรอื่น ๆ มองเห็น นั่นคือดาราจักรที่เรามองเห็นว่าอยู่ที่บริเวณสุดขอบของอวกาศนั้น ความจริงอาจจะตั้งอยู่ในบริเวณหนึ่งของเอกภพ เช่นเดียวกับโลกของเราตั้งอยู่ในบริเวณส่วนหนึ่งของเอกภพ ดังนั้นการเคลื่อนที่ในจักรวาลจึงเป็นการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ซึ่งขึ้นกับตำแหน่งของผู้สังเกตการณ์ ระยะทางของสุดขอบอวกาศนี้ เราอาจหาได้จากสมการ (10.4) เมื่อให้ $v = c$ และถ้าเราใช้ค่า $H = 50$ กิโลเมตร/วินาที/เมกะพาร์เซก จะได้

$H^{-1} = 2 \times 10^{10}$ ปี

และระยะทางสุดขอบอวกาศ $r = cH^{-1}$

$= 2 \times 10^{28}$ ซม.

เนื่องจาก H^{-1} มีหน่วยเป็นเวลา (ปี) ดังนั้นค่าคงที่ของฮับเบิลจึงน่าจะมีความสัมพันธ์กับอายุของเอกภพ จึงทำให้นักดาราศาสตร์สามารถคำนวณอายุของเอกภพว่า เริ่มเกิดขึ้นมาเมื่อใดโดยวิธีการง่าย ๆ คือ สมมติว่าอัตราเร็วของการขยายตัวของเอกภพมีค่าคงที่ เราจะได้ว่าระยะทางของดาราจักร (r) เป็นศูนย์เมื่อเวลา $H^{-1} = 2 \times 10^{10}$ ปีมาแล้ว ดังนั้นเอกภพจะต้องเกิดขึ้นจากการระเบิดครั้งใหญ่ (Big Bang) เมื่อ 2 หมื่นล้านปีมาแล้ว เมื่อ H^{-1} เป็นขีดจำกัดสูงสุดของอายุเอกภพ ดังนั้นนักดาราศาสตร์จึงได้ตรวจสอบดูร่องรอยหลงเหลือที่อาจ



รูป 10.2 แสดงอายุของเอกภพกับระยะทาง r ของดาราจักร ถ้าดาราจักรมีอัตราเร็วคงที่ (เส้นประ) เราจะได้ $r = o$ เมื่อ $H^{-1} = 2 \times 10^{10}$ ปีในอดีต แต่ความจริงสสารในเอกภพมีความโน้มถ่วงเหนี่ยวรั้งการขยายตัว (เส้นทึบ) ทำให้อายุจริงของเอกภพเป็น t_o ซึ่ง $t_o < H^{-1}$

จะเป็นหลักฐานสำคัญในการศึกษาเรื่องราวในอดีตของเอกภพ โดยการวัดอายุของสสารด้วยสารกัมมันตรังสี และพบว่าวัตถุบนโลกที่มีอายุเก่าแก่ที่สุดประมาณ 3.5×10^9 ปี ส่วนหินบนดวงจันทร์ที่นำกลับมาโดยยานอวกาศอพอลโล 12 มีอายุประมาณ 4.6×10^9 ปี ซึ่งเท่ากับอายุของอุกกาบาต และเราจะถือว่าอายุของระบบสุริยะเท่ากับ 4.6×10^9 ปีด้วย สำหรับดาวที่เก่าแก่ที่สุดในกระจุกดาวทรงกลม มีอายุราว $(15 \pm 5) \times 10^9$ ปี ดังนั้นเมื่อเราถือว่าค่า H^{-1} อาจผิดพลาดไปได้ 2 เท่า จะเห็นได้ว่าอายุของเอกภพ (H^{-1}) สอดคล้องกับอายุของวัตถุต่าง ๆ

10.2 จักรวาลวิทยา

จักรวาลวิทยาเป็นวิชาที่ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงและการวิวัฒนาการของเอกภพ จากการค้นพบของฮับเบิลที่ว่า เอกภพกำลังขยายตัว ทำให้นักดาราศาสตร์มีลู่ทางศึกษาถึงโครงสร้างในอดีตของเอกภพ รวมทั้งพฤติกรรมทั่ว ๆ ไปและอนาคตของเอกภพ เพียงแต่เข้าใจอย่างละเอียดว่าในอดีตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างใด ก็จะทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถพยากรณ์อนาคตของเอกภพได้

ถ้าหากพิจารณาปัญหาของเอกภพว่ามีพฤติกรรมทางกลศาสตร์เช่นเดียวกับวัตถุอื่น ๆ เราก็จะทราบได้ว่า กฎทางฟิสิกส์ที่เป็นตัวกำหนดและควบคุมการเคลื่อนที่ของเอกภพก็คือแรงโน้มถ่วง นักวิทยาศาสตร์รู้ดีว่า แม้แรงเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความแรงมากกว่าแรงโน้มถ่วงนับพันล้านเท่า แต่แรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะดึงดูดกันระหว่างอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเท่านั้น ในขณะที่แรงโน้มถ่วงจะดึงดูดระหว่างวัตถุในอวกาศ จากเหตุผลข้อนี้ เทห์วัตถุขนาดใหญ่โดยปกติจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า และจะไม่มีผลกระทบกับแรงแม่เหล็กไฟฟ้า แต่จะมีผลต่อแรงโน้มถ่วง ถึงแม้ว่าแรงโน้มถ่วงจะมีผลต่ออะตอมแต่ละตัวน้อยมากก็ตาม แต่กลับเป็นแรงที่มีผลกระทบอย่างมากต่อเทห์วัตถุต่าง ๆ บนฟากฟ้า

10.2.1 ประวัติวิชาจักรวาลวิทยา

เซอร์ไอแซค นิวตัน เป็นคนแรกที่เสนอทฤษฎีแรงโน้มถ่วงอย่างละเอียดและได้นำกฎของการเคลื่อนที่และกฎแห่งความโน้มถ่วงของเขามาอธิบายการเคลื่อนที่ของเทห์วัตถุในระบบสุริยะ (ดูบทที่ 6) ต่อมานิวตันได้ศึกษาโครงสร้างของเอกภพโดยใช้หลักคณิตศาสตร์ประกอบ ในยุคของนิวตันนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่า เอกภพมีขนาดไม่จำกัดธรรมชาติและตำแหน่งของดวงดาวไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ความเห็นเช่นนี้จึงทำให้เกิดปัญหาสำคัญให้กับนิวตัน เพราะตามทฤษฎีความโน้มถ่วงของนิวตันแล้ว ดวงดาวที่เรียงตัวกันท่ามกลางความว่างเปล่าของอวกาศ แรงโน้มถ่วงจะทำให้ดาวทุกดวงดึงดูดซึ่งกันและกัน และจะเข้าหากันตรงจุดหนึ่ง ระบบของจักรวาลที่เรามองเห็นอยู่จะต้องพังทะลายไปแล้ว

ดังนั้นนิวตันจึงเสนอว่า การกระจายตัวของดาวจะต้องมีความหนาแน่นสม่ำเสมอเป็นระยะทางไกลออกไปในอวกาศอย่างไม่มีที่สิ้นสุด โดยการเรียงตัวของดาวจะไม่มีส่วนใดเป็นจุดศูนย์กลางและจุดขอบของเอกภพ ด้วยเหตุนี้ดาวจึงไม่สามารถเคลื่อนตัวไปยังข้างใดข้างหนึ่งได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นการทำให้ดาวทุกดวงได้รับแรงดึงดูดเท่า ๆ กันในทุกทิศทาง ไม่มีทิศทางใดได้รับแรงมากกว่า ดังนั้นเอกภพตามทฤษฎีของนิวตันจึงเป็นเอกภพหยุดนิ่ง ไม่มีการเคลื่อนที่ขยายขอบเขตออกไปอีก

ในปี ค.ศ.1826 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ โอลเบอรส์ (H.W.M. Olbers) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่ขัดกับความเชื่อทางจักรวาลวิทยาดังกล่าว ซึ่งกลายเป็นปัญหาที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์แปลกใจอยู่เป็นเวลานาน ปัญหาที่ว่าคือเหตุใดท้องฟ้าจึงมืดในยามกลางคืน ปัญหานี้ดูเผิน ๆ เป็นปัญหาง่าย ๆ จนเกือบจะไม่มีผู้ใดสนใจ แต่มีคำตอบอยู่ในส่วนลึกของจักรวาล ทุกคนทราบดีว่าแสงสว่างในเวลากลางวันเป็นแสงมาจากดวงอาทิตย์ และในเวลากลางคืนเราจะมองไม่เห็นแสงจากดวงอาทิตย์ แต่ดวงอาทิตย์ก็เป็นดาวฤกษ์ดวงหนึ่งที่อยู่ท่ามกลางดาวฤกษ์จำนวนหลายพันล้านดวงในดาราจักรทางช้างเผือก โอลเบอรส์ได้สมมติว่าเอกภพอยู่นิ่งและมีขนาดไม่จำกัด ประกอบด้วยดวงดาวกระจายตัวอย่างหนาแน่นสม่ำเสมอในทุกทิศทางและทุกระยะทางของจักรวาลตามทฤษฎีของนิวตัน ปริมาณของแสงสว่างทั้งหมดจากดวงดาวเหล่านี้จะต้องมีความเข้มมากพอ ๆ กับดวงอาทิตย์ แต่ความจริงแล้วท้องฟ้าในเวลากลางคืนมีแต่ความมืด! ข้อขัดแย้งนี้เรียกว่า ข้อขัดแย้งของโอลเบอรส์ (Olbers's Paradox) ซึ่งโอลเบอรส์ได้ยกเหตุผลดังนี้

ถ้าหากว่ามีดาวอยู่ทั่วไปทุกแห่งหนในเอกภพที่มีขนาดไม่จำกัดแล้ว ไม่ว่าเราจะมองไปในท้องฟ้าทางไหน เส้นสายตาของเราก็จะต้องมุ่งไปชนกับผิวของดาวดวงใดดวงหนึ่งอย่างแน่นอน ทำให้ผิวทรงกลมท้องฟ้าทั้งหมดถูกปกคลุมด้วยผิวดาวส่วนเล็ก ๆ เต็มไปหมด โดยไม่เว้นที่ว่างเลย ดังนั้นท้องฟ้าทุก ๆ จุดจะมีความสว่างเท่าผิวดาว ถึงแม้ว่าที่ว่างระหว่างดาวจะเต็มไปด้วยฝุ่นจำนวนมากบดบังไม่ให้เราเห็นไปได้ไกลมากก็ตาม แต่เมื่อฝุ่นถูกแสงสว่างของดาวนาน ๆ เข้าฝุ่นก็จะร้อนขึ้นจนในที่สุดมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิผิวดาวเช่นเดียวกัน แต่ถ้าหากดาวมีการเรียงตัวอยู่ในจำนวนจำกัดห้อมล้อมอวกาศ ความร้อนจากดาวก็จะกระจายตัวออกสู่ความว่างเปล่า ท้องฟ้าก็จะมีแต่ความมืด ถ้าเป็นเช่นนี้ดวงดาวก็จะมีแรงดึงดูดกันทำให้วิ่งชนกันตามกฎแห่งความโน้มถ่วงของนิวตัน ดังนั้นจึงมองเห็นได้ชัดว่าจะต้องมีอะไรผิดพลาดอยู่ถ้าหากเอกภพเป็นไปตามทฤษฎีของนิวตัน

หลังจากการค้นพบของฮับเบิลเกี่ยวกับการขยายตัวของเอกภพ ปัญหาข้อขัดแย้งของโอลเบอรส์จึงหมดไป ทั้งนี้เพราะว่าแสงจากดาราจักรที่อยู่ไกลออกไปจะเลื่อนไปทางสีแดงยิ่งขึ้น จนทำให้พลังงานโฟตอนและความเข้มของแสงลดลงจนไม่อาจมองเห็นได้ แม้กระทั่งใช้เครื่องวัดแสงที่มีความไวมากที่สุดวัดก็จะพบว่ามีแสงสว่างบนฟากฟ้าในยามกลางคืนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เอกภพตามทฤษฎีของนิวตันจึงได้ยกเลิกไป แต่กฎของการเคลื่อนที่และทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของนิวตันยังคงใช้ได้จนถึงปัจจุบัน

การค้นพบของฮับเบิลทำให้เกิดทฤษฎีใหม่ในเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งทำให้มองเห็น

การเกิดและการขยายตัวของเอกภพเป็นไปในแนวทางใหม่ วิชาจักรวาลวิทยาจึงเริ่มเป็นวิทยาศาสตร์ที่แท้จริง เมื่อไอน์สไตน์ได้ตีพิมพ์ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ (Special Relativity) ในปี ค.ศ. 1905 และทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป (General Relativity) ในปี ค.ศ.1915 ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของไอน์สไตน์ได้กล่าวถึงอวกาศและเวลารวมเข้าเป็นสิ่งเดียวกันเรียกว่า กาลาวกาศต่อเนื่อง 4 มิติที่ไม่อาจแบ่งแยกได้ ทฤษฎีนี้สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุในเอกภพได้ทุกวัตถุ สำหรับทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเป็นส่วนที่ขยายออกไปจากทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ ซึ่งได้รวมปรากฏการณ์ของความโน้มถ่วง จึงถือได้ว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเป็นทฤษฎีของความโน้มถ่วงทฤษฎีหนึ่ง ในทฤษฎีนี้เรื่องความโน้มถ่วงก็คือโครงสร้างทางเรขาคณิตของกาลาวกาศ แทนที่จะถือว่าเป็นเพียงแรงดึงดูดอย่างเดียวตามทฤษฎีเดิม นอกจากนี้กาลาวกาศจะมีความโค้ง กล่าวคือ เมื่อมีเทห์วัตถุซึ่งมีแรงดึงดูดอยู่ในที่ใดจะทำให้กาลาวกาศในบริเวณนั้นโค้งตัว และเทห์วัตถุจะมีทางเดินไปตามความโค้งของกาลาวกาศนั้น

นอกจากทฤษฎีจักรวาลวิทยาของไอน์สไตน์แล้ว ยังมีทฤษฎีอื่น ๆ อีก แต่ทฤษฎีอื่นเหล่านี้โดยมากจะต้องอาศัยทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ทั้งสิ้น หรือไม่ก็ต่อเติมทฤษฎีสัมพัทธภาพออกไป

10.2.2 ทฤษฎีจักรวาลวิทยาในปัจจุบัน

ทฤษฎีจักรวาลวิทยาในปัจจุบันจะมีลักษณะของสัมพัทธภาพทั้งสิ้น ซึ่งทฤษฎีเหล่านี้ต่างก็ตั้งอยู่บนฐานชุดเดียวกันที่เรียกว่า หลักจักรวาลวิทยา (Cosmological Principle) ในทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ได้กล่าวถึงหลักจักรวาลวิทยานี้ว่า (1) เอกภพมีความสม่ำเสมอในทุกแห่ง (Homogeneous) กล่าวคือ ณ เวลาหนึ่งเวลาใด ผู้สังเกตการณ์ทุกคนจะมองเห็นเอกภพมีลักษณะเหมือนกันหมด (2) เอกภพมีความสม่ำเสมอในทุกทิศทาง (Isotopic) นั่นคือ ณ เวลาหนึ่ง ๆ ผู้สังเกตการณ์ทุกคนจะเห็นเอกภพเหมือนกันหมดในทุกทิศทาง และ (3) ปรากฏการณ์ของเอกภพจะขึ้นอยู่กับเวลาเท่านั้น (คือไม่ขึ้นกับตำแหน่งและทิศทาง) สำหรับทฤษฎีอื่น ๆ เช่น ทฤษฎีสม่ำเสมอของบอนดิ-ฮอยล์ (Steady-State Theory of Bondi-Hoyle) ยอมรับเฉพาะหลักข้อ (1) และข้อ (2) ส่วนหลักข้อ (3) ของบอนดิ-ฮอยล์ได้เปลี่ยนไปเป็นเอกภพมีปรากฏการณ์คงที่ในเวลา กล่าวคือไม่ขึ้นกับเวลาที่ทำการสังเกต หลักจักรวาลวิทยา 3 ข้อ ของทฤษฎีสภาวะสม่ำเสมอเรียกว่า หลักจักรวาลวิทยาสมบูรณ์

(ก) ทฤษฎีการระเบิดครั้งใหญ่

ในปี ค.ศ.1927 นักดาราศาสตร์ชาวเบลเยียม **แลไมตรี** (G. Lamaitre) ได้เสนอความเห็นว่า เมื่อเอกภพขยายตัวออกไปตามการค้นพบของฮับเบิลดังกล่าว ดาราจักรที่วิ่งห่างออก

ไปจากกันทุกทิศทางในขณะนี้ เมื่อย้อนไปดูอดีตของมันแล้วมันจะต้องมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่จุดเดียวกัน ตามทฤษฎีของแลไมตรีหมายความว่า ในสมัยอดีตนานมาแล้วเอกภพจะมีสารจำนวนมหาศาลเรียกว่า อะตอมดึกดำบรรพ์ (Primeral Atom) อยู่ แลไมตรีได้เสนอว่าด้วยสาเหตุบางประการทำให้สารจำนวนมหาศาลของอะตอมดึกดำบรรพ์เกิดระเบิดขึ้นมา เหวี่ยงสารให้กระจายตัวออกไปเพราะแรงระเบิดมหาศาล ดังนั้นแนวความคิดของแลไมตรีจึงกลายมาเป็นทฤษฎีการระเบิดครั้งใหญ่ (Big Bang Theory) ของจักรวาล

ในปัจจุบันนักดาราศาสตร์ได้ค้นพบหลักฐานที่สนับสนุนทฤษฎีการระเบิดครั้งใหญ่จำนวนมาก หลักฐานที่สำคัญมากที่สุดได้จากการค้นพบครั้งสำคัญในปี ค.ศ.1965 ของนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันสองนายชื่อ **อาร์โน เพนไซอัส (Arno Pensias)** และ **โรเบิร์ต วิลสัน (Robert Wilson)** ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญวิชาอิเล็กทรอนิกส์ เขาทั้งสองได้ค้นพบพลังงานรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งวิ่งปกคลุมอยู่ทั่วไปในอวกาศ มีอุณหภูมิประมาณ 2.7 K พลังงานรังสีดังกล่าวนี้ นักดาราศาสตร์เชื่อว่า คือความร้อนที่หลงเหลือจากการระเบิดครั้งใหญ่ของจักรวาล

(ข) ทฤษฎีสภาวะสม่ำเสมอของบอนดิ–ฮอยล์

ในปี ค.ศ.1952 นักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษคือ **บอนดิ** และ **ฮอยล์** ได้เสนอทฤษฎีจุดกำเนิดของเอกภพขึ้นมาอีกทฤษฎีหนึ่ง เรียกว่าทฤษฎีสภาวะสม่ำเสมอ ซึ่งในทฤษฎีนี้ยอมรับการขยายตัวของเอกภพที่ฮับเบิลได้ค้นพบ โดยกล่าวว่า สมบัติโดยเฉลี่ยของเอกภพจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และสถานที่ตามหลักจักรวาลวิทยาสมบูรณ์ หมายความว่าเอกภพย่อมมีอยู่เหมือนอย่างที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน ไม่มีจุดเริ่มต้นและไม่มีจุดอวสาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากดาราจักรต่างวิ่งหนีออกจากกัน ทำให้ความหนาแน่นทั้งหมดของมวลสารในอวกาศลดลงไปตามเวลาที่ผ่านไป ดังนั้นจะต้องมีสสารใหม่เกิดขึ้นมาจากที่ว่างเปล่าเพื่อแทนที่สสารเดิม และสสารใหม่นี้ก็จะขยายตัวออกไปตามการขยายตัวของเอกภพเรื่องไป ด้วยเหตุนี้กฎการคงตัวของสสารและพลังงานจะใช้ไม่ได้ โดยจะมีสสารเกิดขึ้นใหม่ในอัตราประมาณ 10^{-35} กรัม/ซม.^{3}/วินาที หรือประมาณหนึ่งอะตอมไฮโดรเจนต่อลูกบาศก์เซนติเมตรในเวลาทุก ๆ 10^4 ปี ทฤษฎีนี้ยังขาดหลักฐานสนับสนุนที่ดี นอกจากนี้ยังมีจุดอ่อน คือทำนายสิ่งที่ขัดกับสังเกตการณ์ โดยทำนายว่าเอกภพกำลังขยายตัวด้วยความเร่ง แต่ความเป็นจริงเอกภพกำลังขยายตัวด้วยความหน่วง และทฤษฎีนี้ยังไม่สามารถอธิบายความมีอยู่ของรังสีพื้นหลังที่อุณหภูมิ 2.7 K ได้ ดังนั้นในปัจจุบันนักดาราศาสตร์จึงไม่เชื่อถือทฤษฎีสภาวะสม่ำเสมออีกต่อไป

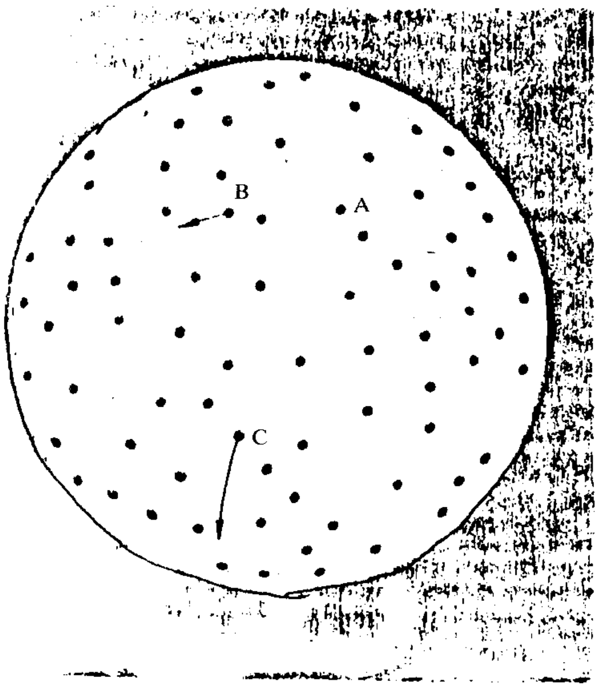
(ค) ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์

ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์ถือว่า กาลาวกาศเป็นส่วนหนึ่งของสิ่งเดียวกัน และความโน้มถ่วงคือความสัมพันธ์ระหว่างเรขาคณิตของกาลาวกาศกับสสารพลังงานในเอกภาพ ดังนั้นสมการหลักของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปก็คือ

ความโค้งของกาลาวกาศ α ความหนาแน่นของสสารพลังงาน (10.5)

ความโค้งนี้จะส่งผลกระทบถึงเส้นทางของเทห์วัตถุอื่น ๆ ที่เดินทางผ่านเข้ามาในอวกาศรอบ ๆ ที่มีเทห์วัตถุนั้น ส่งความโค้งไปถึง

นอกจากนี้ตาทฤษฎีของไอน์สไตน์ยังถือว่ากาลาวกาศมีความยืดหยุ่นซึ่งไม่เพียงแต่งอหรือโค้งตัวเมื่อมีเทห์วัตถุใหญ่ ๆ อยู่ใกล้เท่านั้น แต่ยังหดตัวและยืดตัวออกไปได้เหมือนแผ่นยาง อวกาศที่ยืดตัวออกไปเช่นนี้ถูกนำมาใช้อธิบายการขยายตัวของเอกภพว่าเป็นเพราะการยืดตัวของอวกาศเอง เพื่อให้เกิดความเข้าใจการยืดตัวของอวกาศจึงต้องเปรียบเทียบอวกาศในรูปแบบของสองมิติแทนที่จะเป็นสามมิติ โดยเปรียบเทียบอวกาศกับผิวของสองมิติ เช่น ผิวของลูกโป่ง และเปรียบเทียบว่าลูกโป่งก็คือเอกภพ จุดเล็ก ๆ จุดหนึ่งบนผิวของลูกโป่งก็คือดาราจักร แต่ไม่ถือว่าปริมาตรที่อยู่ภายในลูกโป่งและบริเวณนอกลูกโป่งเป็นส่วนหนึ่งของเอกภพ เพียงแต่ถือว่าบริเวณผิวยางของลูกโป่งแทนส่วนที่เป็นอวกาศซึ่งมีความโค้งเหมือนอวกาศจริง ๆ ถ้าหากลูกโป่งพองตัวบริเวณผิวยางของลูกโป่งก็จะยืดตัวออกไปหรือขยายตัวเช่นเดียวกับการขยายตัวของเอกภพ ตามรูป 10.3 จะเห็นได้ชัดเจนว่าไม่มีจุดศูนย์กลางหรือจุดขอบของเอกภพ ไม่ใช่ดาราจักรระเบิดออกไปข้างนอกจากจุดศูนย์กลางจุดหนึ่งแล้วจึงวิ่งหนีออกไปสู่ความว่างเปล่าของอวกาศ แต่ดาราจักรจะกระจายตัวตลอดทั่วอวกาศอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อแผ่นยางยืดตัวทุกจุดบนแผ่นยางต่างก็เคลื่อนตัวออกไปจากทุกจุด โดยไม่มีจุดใดเป็นจุดศูนย์กลางของการขยายตัว การเปรียบเทียบดังกล่าวได้ช่วยให้เกิดความเข้าใจถึงธรรมชาติของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของการขยายตัวของเอกภพในปัจจุบัน และเมื่อเราย้อนหลังกาลเวลาสภาพอวกาศก็จะมีลักษณะเหมือนกับลูกโป่งที่มีการขยายตัวน้อยกว่านี้ ดังนั้นเมื่อเราย้อนหลังกาลเวลาไปมาก ๆ ลูกโป่งก็จะหดตัวลงไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่งซึ่งไม่มีจุดอยู่บนผิวของมันเลย แนวความคิดเช่นนี้ก็คือทัศนะของวิทยาศาสตร์ปัจจุบันในการมองปัญหาของการขยายตัวของเอกภพ จึงจะเห็นได้ว่าไม่มีสสารเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดในความว่างเปล่าซึ่งมีอยู่ก่อนแล้ว ตามทฤษฎีนี้จึงมีอวกาศและเวลาเกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งของอดีต คือประมาณ 2 หมื่นล้านปีมาแล้ว นั่นคือเอกภพในอดีตมีขอบเขตอยู่อย่างจำกัดซึ่งไม่ใช่มีเพียงสสารถูกสร้างขึ้นเท่านั้นในเอกภพ แต่ยังรวมถึงกาลาวกาศด้วย



รูป 10.3 แสดงการขยายตัวของเอกภพซึ่งเราเปรียบเทียบได้กับผิวของลูกโป่ง โดยลูกโป่งขยายตัวจะทำให้ทุกจุดบนผิวลูกโป่งขยายตัวห่างจากกันอย่างสม่ำเสมอทั่วทุกทิศทาง

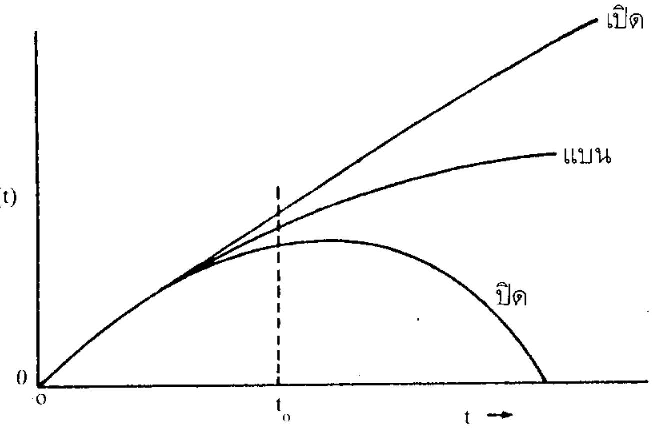
จากสมการ (10.5) จะเห็นได้ว่า เราอาจสร้างแบบจำลองของเอกภพได้ถ้าทราบปริมาณของสสารพลังงานในเอกภพ นักดาราศาสตร์สามท่านคือ ฟรีดมันน์ (A. Friedmann) โรเบิร์ตสัน (H.P. Robertson) และวอลเกอร์ (A.G. Walker) ต่างได้สร้างแบบจำลองของเอกภพที่มีพื้นฐานตั้งอยู่บนสังเกตการณ์จริง โดยสมมติว่า

(1) เอกภพมีความสม่ำเสมอในทุกแห่งและในทุกทิศทาง (ตามหลักจักรวาลวิทยา)

(2) เอกภพประกอบด้วยฝุ่นอย่างสม่ำเสมอ โดยที่ฝุ่นแต่ละเม็ดก็คือ กระจุกดาราจักรกระจุกหนึ่ง

จากข้อสมมติฐานทั้งสองและทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปจะได้แบบจำลองเอกภพ 3 แบบที่มีการขยายตัว ซึ่งเรียกว่า เอกภพแบบปิด เอกภพแบบแบน และเอกภพแบบเปิด โดยเอกภพแต่ละแบบถูกกำหนดด้วยฟังก์ชั่น $R(t)$ ซึ่งเป็นรัศมีของเอกภพที่เปลี่ยนแปลงหรือวิวัฒนาการไปตามเวลา t เราสามารถแสดงวิวัฒนาการของเอกภพทั้งสามแบบดังในรูป 10.4 ซึ่งเราเห็นได้ว่าแบบจำลองทั้งสามแบบต่างก็กำลังขยายตัวตามที่ฮับเบิลค้นพบในปัจจุบัน และต่างก็กำลังขยายตัวด้วยความหน่วง เอกภพแบบปิดจะมีความหน่วงมากที่สุด ส่วนเอกภพแบบเปิดจะมีความหน่วงน้อยที่สุด ทฤษฎีนี้อธิบายว่า เมื่อเวลาเริ่มต้นที่ $t = 0$ แบบจำลองของ

เอกภพทุกแบบจะมีรัศมี $R = 0$ ทำให้สสารทั้งหมดในเอกภพอยู่รวมกันเป็นจุดเดียวกันที่มีความหนาแน่นและอุณหภูมิเป็นอนันต์ ต่อมาเอกภพได้ระเบิดออกตามทฤษฎีการระเบิดครั้งใหญ่เป็นลูกไฟดึกดำบรรพ์ (Primordial Fireball) ซึ่งเป็นที่มาของรังสีพื้นหลังอุณหภูมิ 2.7 K ความชันของเส้นโค้งในรูป 10.4 จะบวกถึงอัตราการขยายตัว H ซึ่งเป็นค่าคงที่ของฮับเบิล ให้สังเกตว่าที่ t_0 ซึ่งเป็นเวลาในปัจจุบันแบบจำลองของเอกภพแบบเปิดจะมีความชันมากที่สุด ส่วนเอกภพแบบปิดมีความชันค่าต่ำสุด และมีเฉพาะเอกภพแบบปิดเท่านั้นที่มีการขยายตัวถึงมากที่สุดแล้วกลับยุบตัวลงใหม่จนมีปริมาตรเป็นศูนย์ในเวลาจำกัดค่าหนึ่ง



รูป 10.4 แสดงแบบจำลองของเอกภพที่ฟรีดมันน์ โรเบิร์ตสันและวอลเกอร์ได้สร้างขึ้น แบบจำลองทั้งสามต่างเริ่มขึ้นที่เวลา $t = 0$ และในปัจจุบันเอกภพอยู่ที่เวลา t_0

เพื่อที่จะเข้าใจแบบจำลองต่าง ๆ ของเอกภพได้ดีขึ้น เราลองมาดูข้อเปรียบเทียบดังต่อไปนี้ ถ้าเราโยนก้อนหินขึ้นไปบนฟ้าด้วยความเร็วต่ำ ก้อนหินก็จะตกกลับลงมาสู่พื้นดินอีก เปรียบได้เหมือนกับเอกภพแบบปิด เพราะว่าในกรณีนี้ความหนาแน่นของเอกภพมีค่าสูงพอที่จะทำให้ความโน้มถ่วงสามารถหยุดยั้งการขยายตัวของเอกภพได้ และในที่สุดเอกภพจะกลับหดตัวจนกลับมาเหมือนกับลักษณะตอนเริ่มต้น ถ้าเราโยนก้อนหินด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วหลุดพ้น มันจะเคลื่อนที่ไปด้วยทางเดินรูปพาราโบลาและจะไปหยุดนิ่งที่ระยะอนันต์ เปรียบได้กับแบบจำลองของเอกภพแบบแบน และถ้าเราโยนก้อนหินด้วยความเร็วสูงมากกว่าความเร็วหลุดพ้น มันจะเคลื่อนที่ไปตามทางเดินรูปไฮเปอร์โบลาไปยังระยะอนันต์ ซึ่งเปรียบได้กับเอกภพแบบเปิด

เอกภพแบบแบนซึ่งอยู่ระหว่างเอกภพแบบเปิดและแบบปิดจะมีวิวัฒนาการไปด้วย $R(t)$ ซึ่งแปรตาม $t^{2/3}$ ดังนั้น

ความเร็ว $$v(t) = \frac{dR(t)}{dt}$$

$$\alpha \frac{2}{3} t^{-\frac{1}{3}} \qquad (10.6)$$

และค่าคงที่ของฮับเบิล $$H = \frac{v}{R} = \frac{2}{3} t^{-\frac{1}{3}}/t^{2/3}$$

$$= \frac{2}{3} t^{-1} \qquad (10.7)$$

เนื่องจากอายุของเอกภพในปัจจุบันเป็น t_0 ดังนั้น

$$t_0 = \frac{2}{3} H_0 \qquad (10.8)$$

H_0 คือค่าคงที่ของฮับเบิลในปัจจุบัน

$$\left.\begin{array}{l} \text{อายุของเอกภพ} \approx 13 \times 10^9 \text{ ปี} \\ \text{และความหนาแน่นของเอกภพในปัจจุบัน} \\ \rho_0 \approx 10^{-29} \text{ กรัม/ซม.}^3 \end{array}\right\} \qquad (10.9)$$

ให้สังเกตว่า t_0 และ ρ_0 ในสมการ (10.9) อาจมีค่าผิดพลาดไปได้ 2 เท่า เนื่องจาก H_0 มีค่าผิดพลาดได้ 2 เท่า ดังนั้นอายุของเอกภพ t_0 จึงเข้ากันได้ดีกับอายุของวัตถุต่าง ๆ ในเอกภพ สำหรับค่า ρ_0 เรียกว่าความหนาแน่นวิกฤต ซึ่งเป็นค่าที่จะตัดสินว่าเอกภพจะเป็นแบบเปิด แบบแบน หรือเป็นแบบปิด

สำหรับเอกภพแบบเปิดเราจะพบว่า

$$\left.\begin{array}{l} \frac{2}{3} H_0 \le t_0 \le \frac{1}{H_0} \\ \rho_0 \le 10^{-29} \text{ กรัม/ซม.}^3 \end{array}\right\} \qquad (10.10)$$

เราพบว่าอายุของเอกภพ (t_0) จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2×10^{10} ปี เมื่อ $\rho_0 \to 0$ ปัจจุบันนักดาราศาสตร์จำนวนมากเชื่อว่าเอกภพเป็นแบบเปิด เพราะว่าเอกภพแบบนี้มีอายุมาก และความหนาแน่นของสสารในเอกภพที่สังเกตได้จริงในปัจจุบันมีค่าน้อยกว่า 10^{-29} กรัม/ซม.^{3}

สำหรับเอกภพแบบปิด เราพบว่า

$$\left.\begin{array}{l} t_0 \le \frac{2}{3H_0} \\ \rho \ge 10^{-29} \text{ กรัม/ซม.}^3 \end{array}\right\} \qquad (10.11)$$

นั่นคือ อายุของเอกภพน้อยกว่า 13×10^9 ปี แต่ ρ_0 จะต้องมีค่าไม่เกิน 10^{-27} กรัม/ซม.^{3}

หรืออาจจะน้อยกว่า 10^{-28} กรัม/ซม.^{3} มิฉะนั้นเอกภพจะมีอายุน้อยกว่าอายุของโลกอีกเอกภพแบบปิดจะหยุดการขยายตัวและจะหดตัวกลับอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้มีอายุจำกัดและอาจจะเกิดใหม่ได้ภายหลัง เมื่อ $R \rightarrow 0$ เอกภพอาจจะตายแล้วเกิดใหม่เป็นวัฏจักร โดยขยายตัวและหดตัวเรื่อยไป

10.3 วิวัฒนาการของเอกภพ

นักดาราศาสตร์เชื่อว่าเอกภพได้กำเนิดขึ้นมาแล้วเมื่อ 2 หมื่นล้านปีก่อน นักทฤษฎีจักรวาลวิทยาเรียกสภาพของเอกภพตอนถือกำเนิดว่า สภาพพิกลแรกเริ่ม (Initial Singularity) เพราะว่าขณะนั้นเอกภพมีปริมาตรเป็นศูนย์ และมีความหนาแน่นเป็นอนันต์ แบบจำลองของเอกภพทั้งสามแบบคือ แบบเปิด แบบแบน และแบบปิดจะไม่ต่างกันเมื่อเวลาเริ่มต้นเท่ากับศูนย์นี้ ต่อเมื่อเวลาได้ผ่านไปนานเข้า แบบจำลองแต่ละแบบจะมีวิวัฒนาการที่แตกต่างกันออกไป เพราะต่างก็มีความโค้งของกาลาวกาศไม่เท่ากัน ซึ่งในปัจจุบันข้อมูลจากการสังเกตของเรายังมีไม่เพียงพอที่จะตัดสินได้ว่า แบบจำลองของเอกภพแบบไหนถูกต้อง

ต่อไปเราจะพิจารณาวิวัฒนาการของเอกภพตั้งแต่ยุคกำเนิดจนถึงยุคปัจจุบัน และยุคอนาคตที่น่าจะเป็นไปได้ ดังนี้

(ก) ยุคกำเนิดเอกภพ

ดังได้กล่าวแล้วว่า เอกภพถือกำเนิดจากสภาวะความหนาแน่นและอุณหภูมิอนันต์เมื่อประมาณ 2 หมื่นล้านปีมาแล้ว และเราเรียกสภาวะเริ่มแรกว่าเป็นลูกไฟดึกดำบรรพ์ที่อุณหภูมิสูงมากขนาดนี้ อนุภาคต่าง ๆ จะมีความเร็วสูงมากเกือบเท่ากับความเร็วแสง ดังนั้นสสารเริ่มแรกจะเป็นพลาสมาที่ไร้ระเบียบ เต็มไปด้วยโฟตอนและอนุภาคมูลฐานวิ่งพล่านไปมา แต่ในขณะนั้นอนุภาคและปฏิยานุภาค (Antiparticle) จะอยู่ในสภาวะสมดุล ต่อมาเมื่อเอกภพขยายตัวออกไปอุณหภูมิจะลดลง อนุภาคหนัก เช่น ฮารเพอรอน และเมซอนจะสลายตัวกลายเป็นอนุภาคที่เบาลง และมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ได้แก่ โปรตอน นิวตรอน อิเล็กตรอน และนิวติโน เมื่อเอกภพมีอายุได้ 1 วินาที อุณหภูมิจะลดลงมาเป็น 10^{10} K เอกภพจะประกอบด้วยโฟตอนกับอนุภาคเสถียรเหล่านี้

(ข) ยุครังสีและการสังเคราะห์ธาตุ

หลังจากอุณหภูมิของเอกภพได้ลดลงจนต่ำกว่า 10^{10} K เอกภพส่วนใหญ่จะประกอบด้วยโฟตอนซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน และมีการแจกแจงตามกฎวัตถุดำของพลังค์ แก๊สโฟตอนเหล่านี้เองที่ในปัจจุบันได้เย็นตัวลงจนกลายเป็นรังสีพื้นหลัง 2.7 K ในช่วงเวลา 2,000 ปีแรกของเอกภพ ความหนาแน่นของรังสีหรือโฟตอนจะมีค่ามากกว่าความหนาแน่น

ของสสาร หลังจากนั้นความหนาแน่นของสสารจะมีค่ามากกว่า

เมื่ออุณหภูมิลดลงเหลือ $T \approx 10^9 - 10^8$ K เริ่มเกิดการสังเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ขึ้นในเอกภพ โดยเริ่มต้นสังเคราะห์ธาตุดิวทีเรียมดังนี้

$$H^1 + {}_0n^1 \rightarrow H^2 + \gamma$$

ต่อมาดิวทีเรียมจะรวมตัวกันเองกลายเป็นฮีเลียม และเมื่ออายุของเอกภพได้ 30 นาที การสังเคราะห์ธาตุฮีเลียมจะสิ้นสุดลง และในขณะนั้นเอกภพจะประกอบด้วยไฮโดรเจน ฮีเลียม และดิวทีเรียม ในอัตราส่วนของมวลเป็น 0.75:0.25:0.01 ตามลำดับ สำหรับธาตุที่หนักกว่าฮีเลียมยังไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากอุณหภูมิและความหนาแน่นได้ลดลงมากในขณะขยายตัวและอุณหภูมิขณะนั้นสูงไม่เพียงพอ

(ค) ยุคสสารและกำเนิดดาราจักร

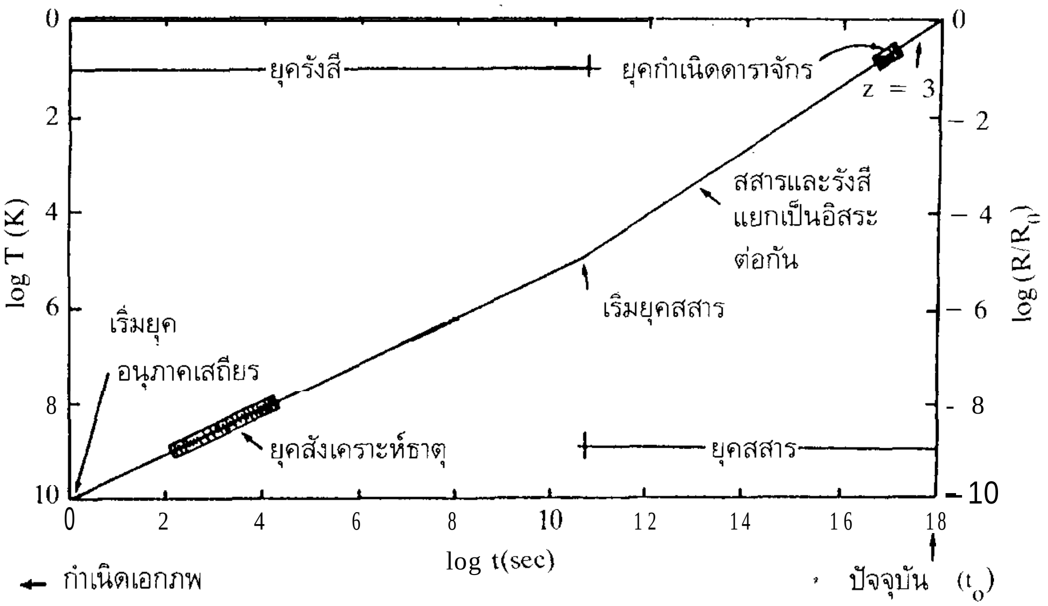
เมื่ออายุเอกภพมากกว่า 2,000 ปีเป็นต้นมา สสาร (ในที่นี้คือไฮโดรเจน และฮีเลียม) จะมีปริมาณมากกว่ารังสีเราเรียกว่ายุคสสาร โดยสสารเหล่านี้จะอยู่ในสภาพเป็นไอออนก่อนจนกระทั่งอุณหภูมิลดต่ำลงพอสมควร อิเล็กตรอนก็จะรวมตัวกับไอออนแล้วกลายเป็นอะตอม ซึ่งไอออนของฮีเลียมจะกลายเป็น HI ก่อนที่ไอออนของไฮโดรเจนจะกลายเป็น HI ที่อุณหภูมิ $T \approx 3{,}000$ K อายุของเอกภพประมาณ 10^6 เมื่อถึงขณะนี้สสารกับรังสีจะแยกออกจากกันเป็นอิสระ หมายความว่า สสารซึ่งเป็นทั้งแก๊สไฮโดรเจนและฮีเลียมจะยอมให้แสงสว่างเดินทางผ่าน ทำให้ดาราจักรมีความแจ่มใสขึ้น และจะมีแสงจำนวนมากเดินทางผ่านสสารไป หลังจากนั้นสสารและรังสีต่างก็จะวิวัฒนาการไปตามทางของมันเอง เมื่อเอกภพขยายตัวต่อไป รังสีจะเย็นลงจนมีอุณหภูมิ 2.7 K ในปัจจุบัน และพลังงานความร้อนที่ยังหลงเหลืออยู่ในขณะนี้ก็คือพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่แพลซีอัส และวิลสันค้นพบในปี ค.ศ.1965 นั่นเอง แต่สสารจะมีวิวัฒนาการที่สำคัญกว่านี้มาก

ก่อนที่สสารจะแยกตัวออกเป็นอิสระจากรังสี ไอออนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วเอกภพ และในขณะที่ไอออนรวมตัวกับอิเล็กตรอนเพื่อกลายเป็นอะตอม สสารก็จะเริ่มเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนด้วยแรงโน้มถ่วงกลายเป็นกลุ่มแก๊สที่เรียกว่า ดาราจักรในครรภ์ (Protogalaxy) แล้วจะวิวัฒนาการกลายเป็นดาราจักรต่อไปจนกระทั่งถึงปัจจุบันนี้ ซึ่งเราได้ศึกษาแล้วในบทก่อน ดาราจักรในครรภ์จะมีมวลอยู่ระหว่าง 10^5 ถึง 10^{15} เท่าของมวลดวงอาทิตย์ หรือมีมวลอยู่ระหว่างมวลของกระจุกดาวทรงกลมกับมวลของกระจุกดาราจักร

(ง) ยุคในอนาคต

จากการศึกษาวิวัฒนาการของเอกภพตั้งแต่เริ่มแรกจนถึงปัจจุบัน เราพอที่จะสรุปวิวัฒนาการของเอกภพทั้งหมดตั้งแต่เริ่มแรกจนถึงปัจจุบันด้วยแผนภาพดังแสดงในรูป 10.5

ในอนาคตเอกภพอาจจะเป็นแบบเปิดหรือแบบปิดก็ได้ ถ้าเป็นเอกภพแบบเปิด ดาวต่าง ๆ และดาราจักรทั้งหลายจะค่อย ๆ แก่และดับแสงไป จนในที่สุดจักรวาลจะมีแต่ความมืดที่ประกอบด้วยวัตถุที่เย็นของดาวที่อยู่ห่างกันเป็นระยะอนันต์ แต่ถ้าเอกภพเป็นแบบปิด เอกภพก็จะขยายตัวจนมีขนาดใหญ่สุดแล้วก็จะกลับยุบตัวลงจนมีสภาพพิกลเหมือนเริ่มแรกอีกครั้ง ต่อไปในอนาคตดาราจักรต่าง ๆ จะวิ่งกลับเข้าหาดาราจักรของเรา ทำให้เราเห็นการเคลื่อนที่ไปทางน้ำเงินของเส้นสเปกตรัม ในขณะเดียวกันดาวและดาราจักรก็จะวิวัฒนาการและแก่ลงไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดรังสีจะกลับมามีปริมาณมากกว่าสสาร และสสารจะสลายตัวเป็นอนุภาคมูลฐาน ดังที่เกิดขึ้นในการระเบิดครั้งใหญ่ตอนแรกเริ่ม แต่สำหรับคราวนี้เหตุการณ์ต่าง ๆ จะเกิดย้อนกลับ และเมื่อเอกภพยุบตัวลงจนเป็นจุดแล้ว หลังจากนั้นมันอาจจะระเบิดออกอีกครั้งกลายเป็นเอกภพใหม่ หรืออาจจะเป็นไปได้ว่าไม่มีเวลาอีกต่อไป และทุกสิ่งทุกอย่างจะไม่มีอยู่หรือไม่มีเอกภพอีกต่อไปนั่นเอง



รูป 10.5 แสดงวิวัฒนาการของเอกภพ ตั้งแต่เริ่มแรกจนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T) เทียบกับเวลา (t) ซึ่งเป็นขนาดของ (R)

แบบฝึกหัดที่ 10

10.1 สมการ (10.2) เมื่อ z มีค่ามากกว่าหนึ่งจะเห็นได้ว่า $v > c$ ซึ่งไม่น่าเป็นไปได้

(ก) จงหาความสัมพันธ์ระหว่าง v และ z โดยอาศัยจากทฤษฎีสัมพัทธภาพในบทที่ 1 ถ้าสมการ (10.2) แสดงปรากฏการณ์ดอปเปลอร์

(ข) จงหาค่า v เมื่อ $z = 3$

10.2 ดาราจักรหงส์เอ (Cygnus A) ส่งคลื่นวิทยุที่รับได้ที่ความถี่ 10^3 MHz ด้วยความเข้ม 2.18×10^{-23} w/m^2/Hz ดาราจักรนี้จะมีค่าการเลื่อนไปทางสีแดงเท่ากับ $\Delta\lambda/\lambda_0 = z = 0.17$

(ก) จงหาความถี่ของคลื่นวิทยุที่ถูกส่งออกมาจากดาราจักรหงส์ เอ

(ข) จงหาระยะทางของดาราจักรหงส์ เอ (ใช้ค่า $H = 50$ km/s/Mpc)

(ค) จงหากำลังของคลื่นวิทยุ (เอิร์ก/วินาที/ความถี่) ของหงส์เอที่ความถี่ 10^3 MHz

(ง) กำลังของคลื่นวิทยุรวมทั้งหมดของหงส์ เอ คือ ผลคูณของคำตอบในข้อ (ค) กับช่วงกว้างของความถี่ $\Delta\nu$ ของเครื่องรับวิทยุ ถ้าให้ $\Delta\nu = 10^4$ Hz จงหากำลังทั้งหมด

(จ) ถ้ากำลังในข้อ (ง) เกิดจากการหลอมตัวของไฮโดรเจนเป็นฮีเลียม จงหาอัตราการสูญเสียไฮโดรเจนในหน่วย $M_\odot$/s

(ฉ) ถ้าดาราจักรหงส์ เอ ส่งคลื่นวิทยุในอัตรานี้เป็นเวลา 10^8 ปี จงหามวลของไฮโดรเจนที่ต้องใช้ทั้งหมด เทียบกับมวลของดาราจักรของเรา ($\approx 10^{11}$ m)

10.3 ถ้าดาราจักรหนึ่งมีค่า $z = 2$ และโชติมาตรจักษุภาพปรากฏ $m_v = +18.2$ จงหา

(ก) อัตราเร็วของดาราจักรนี้ที่วิ่งหนีออกจากเรา

(ข) ระยะทางของดาราจักร

(ค) สภาพส่องสว่างของดาราจักรเมื่อเทียบกับดาราจักรของเรา

10.4 ถ้าที่ว่างระหว่างดาราจักรเต็มไปด้วย HII ที่อุณหภูมิ 10^6 K

(ก) จงหาอัตราเร็วและพลังงานจลน์เฉลี่ย (ต่ออนุภาค) ของโปรตอน

(ข) พลังจลน์ในข้อ (ก) สมนัยกับความยาวคลื่นเท่าไรของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

10.5 ตามกฎของพลังค์ ความเข้มของรังสีจากวัตถุดำเขียนได้เป็น

$$I_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda Kt} - 1}$$

เมื่อเอกภพขยายตัวด้วยรัศมี R(t) ความยาวคลื่นจะมีการแปรเปลี่ยนเป็น $\lambda \alpha R$ และความเข้มแปรเปลี่ยนเป็น $I_\lambda \alpha R^{-5}$

(ก) จงแสดงว่า $I \alpha R^{-1}$

(ข) รังสีพื้นหลังอุณหภูมิ 2.7 K จงหาความยาวคลื่น (λ_{max}) ที่รังสีนี้มีความเข้มสูงสุด

10.6 จากค่าคงที่ของฮับเบิล $H_0 = 75 \pm 30$ km/sMpc จงหา

(ก) ช่วงอายุของเอกภพ ($t_0 \approx H_0^{-1}$)

(ข) ช่วงขนาดของเอกภพ ($r_{edge} \approx cH_0^{-1}$)

(ค) ช่วงของความหนาแน่นวิกฤต ($\rho_0 \alpha H_0^2$) [ช่วงคือค่าตั้งแต่ต่ำสุดถึงสูงสุด]