

ฟิสิกส์นอกเหนือจากแบบจำลองมาตรฐาน

จนถึงปี 2012 แบบจำลองมาตรฐาน (Standard Model: SM) ได้รับการพัฒนาครบถ้วนในทางทฤษฎีด้วยการยืนยันการมีอยู่ของโบซอนฮิกส์ (Higgs Boson) ในเครื่องเร่งอนุภาคนขนาดใหญ่ (Large Hadron Collider: LHC) ที่ CERN อนุภาคทุกตัวที่ถูกทำนายไว้ถูกค้นพบ สมการของมันผ่านการทดสอบทุกครั้งด้วยความแม่นยำที่น่าทึ่ง

ถึงกระนั้น บรรดาฟิสิกส์ในวงการฟิสิกส์ไม่ได้รู้สึกถึงความสมบูรณ์ แต่เป็นความรู้สึกว่ายังขาดอะไรบางอย่าง เช่นเดียวกับกฎของนิวตันก่อนหน้าไอน์สไตน์ หรือฟิสิกส์คลาสสิกก่อนหน้าควอนตัมเมคานิกส์ แบบจำลองมาตรฐานนั้นประสบความสำเร็จเกินไปในระดับที่เราสามารถทดสอบได้ แต่ไม่สามารถตอบคำถามที่ลึกซึ้งกว่าได้ มันเหมือนแผนที่ที่เกือบสมบูรณ์แบบ — แต่ครอบคลุมเพียงส่วนเล็ก ๆ ของภูมิทัศน์เท่านั้น

แรงโน้มถ่วง: แรงที่ขาดหายไป

ข้อบกพร่องที่ชัดเจนที่สุดคือแรงโน้มถ่วง

- แบบจำลองมาตรฐานอธิบายสามในสี่แรงพื้นฐานที่รู้จัก: แม่เหล็กไฟฟ้า, แรงนิวเคลียร์อ่อน, และแรงนิวเคลียร์เข้ม
- แรงโน้มถ่วง ซึ่งอธิบายโดย **ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป (General Relativity: GR)** ของไอน์สไตน์ ไม่ถูกรวมอยู่ในแบบจำลองเลย

ไม่ใช่แค่การมองข้ามเล็กน้อย ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปมองว่าแรงโน้มถ่วงคือการโค้งงอของกาลอวกาศ ซึ่งเป็นสนามเรขาคณิตที่ราบรื่น ในขณะที่แบบจำลองมาตรฐานมองว่าแรงเป็นสนามควอนตัมที่ถูกถ่ายทอดโดยอนุภาค ความพยายามในการทำให้แรงโน้มถ่วงเป็นควอนตัมในลักษณะเดียวกันต้องเผชิญกับความไม่มีที่สิ้นสุดที่ไม่สามารถทำให้เป็นปกติได้

แบบจำลองมาตรฐานและ GR เหมือนระบบปฏิบัติการสองระบบที่แตกต่างกัน — ยอดเยี่ยมในขอบเขตของตัวเอง แต่เข้ากันไม่ได้โดยพื้นฐาน การประสานทั้งสองนี้อาจเป็นความท้าทายที่ยิ่งใหญ่ที่สุดของฟิสิกส์ในปัจจุบัน

มวลของนิวตริโน

แบบจำลองมาตรฐานทำนายว่านิวตริโนไม่มีมวล แต่การทดลอง เริ่มจากเครื่องตรวจจับ Super-Kamiokande ในญี่ปุ่น (1998) และได้รับการยืนยันทั่วโลก แสดงว่านิวตริโนมีการสั่น (oscillation) ระหว่างรสชาติ (flavors) ต่าง ๆ (อิเล็กตรอน, มิวออน, เทา) การสั่นนี้ต้องใช้มวล

นี่คือหลักฐานแรกที่ได้รับการยืนยันสำหรับฟิสิกส์นอกเหนือจากแบบจำลองมาตรฐาน การค้นพบนี้ทำให้คาจิตะ และแมคโดนัลด์ได้รับรางวัลโนเบลในปี 2015

นิวตริโนมีน้ำหนักเบามาก อย่างน้อยหนึ่งล้านเท่าเบากว่าelectron มวลของมันไม่ได้ถูกอธิบายโดยแบบจำลองมาตรฐาน — แต่อาจบ่งชี้ถึงฟิสิกส์ใหม่ เช่น **กลไก seesaw**, นิวตริโนที่เป็นหมัน (sterile neutrinos), หรือความเชื่อมโยงกับจักรวาลยุคแรก ในบางสถานการณ์ นิวตริโน seesaw ที่นักทฤษฎี **leptogenesis** เป็นไปได้

ซึ่งเกิดความไม่สมดุลของเลปตอนในจักรวาลยุคแรก และต่อมาแปลงเป็น **ความไม่สมดุลของสสารและปฏิสสาร** ที่สังเกตเห็น

สสารมืด

สสารที่มองเห็นได้ ซึ่งอธิบายโดยแบบจำลองมาตรฐาน ประกอบด้วยน้อยกว่า 5% ของจักรวาล ส่วนที่เหลือมองไม่เห็น

- **สสารมืด** (~27% ของจักรวาล) ปรากฏเฉพาะผ่านแรงโน้มถ่วง: กาแล็กซีหมุนเร็วกว่าที่สสารที่มองเห็นได้ อนุญาต, กระจุกกาแล็กซีบิดแสงมากกว่าที่คาด, และพื้นหลังไมโครเวฟของจักรวาลต้องการมวลที่มองไม่เห็นเพิ่มเติม
- ไม่มีอนุภาคใดในแบบจำลองมาตรฐานที่สามารถอธิบายได้ นิวตริโนเบาและเร็วเกินไป สสารธรรมดาหายากเกินไป

ทฤษฎีเสนออนุภาคใหม่: WIMPs (อนุภาคที่มีมวลมากและมีปฏิริยาอ่อน), แอ็กเซียน (axions), นิวตริโนที่เป็นหมัน, หรือสิ่งที่แปลกประหลาดกว่านั้น แต่ถึงแม้จะค้นหากันมาหลายทศวรรษ — เครื่องตรวจจับใต้ดิน, การทดลองในเครื่องเร่งอนุภาค, การสังเกตทางดาราศาสตร์ — สสารมืดยังคงเข้าใจยาก

พลังงานมืด

ยิ่งลึกกลับกว่าคือ **พลังงานมืด**, แรงที่ขับเคลื่อนการขยายตัวอย่างเร่งของจักรวาล

- ค้นพบในปี 1998 ผ่านการสังเกตซูเปอร์โนวา พลังงานมืดคิดเป็นประมาณ 68% ของจักรวาล
- ในหลักการ มันอาจถูกอธิบายเป็น “พลังงานสุญญากาศ” ของสนามควอนตัม แต่การคำนวณง่าย ๆ ในทฤษฎีสถานะควอนตัมทำนายความหนาแน่นของพลังงานสุญญากาศที่ใหญ่เกินไปถึง 120 ลำดับ — การทำนายที่แย่ที่สุดในฟิสิกส์

ปัญหานี้ **ปัญหาค่าคงที่จักรวาล** อาจเป็นการปะทะที่รุนแรงที่สุดระหว่างทฤษฎีสถานะควอนตัมและแรงโน้มถ่วง แบบจำลองมาตรฐานไม่ได้กล่าวอะไรเกี่ยวกับพลังงานมืด นี่คือช่องว่างมหาศาลในความเข้าใจของเราเกี่ยวกับจักรวาล

ปัญหาโครงสร้างชั้น

ปริศนาอีกประการหนึ่งอยู่ในโบซอนฮิกส์เอง

มวลของฮิกส์ที่วัดได้คือ 125 GeV แต่การแก้ไขควอนตัมควรผลักดันให้มันไปถึงระดับของแพลนค์ (10^{19} GeV) เว้นแต่จะมีการยกเลิกอย่างมหัศจรรย์ ทำไมมันถึงเบาขนาดนี้เมื่อเทียบกับระดับพลังงานธรรมชาติของแรงโน้มถ่วง?

นี่คือ **ปัญหาโครงสร้างชั้น**: ฮิกส์ดูเหมือนถูกปรับแต่งอย่างไม่เป็นธรรมชาติ นักฟิสิกส์สงสัยว่ามีฟิสิกส์ใหม่ เช่น **ซูเปอร์ซิมเมทรี (SUSY)**, ที่อาจทำให้มวลของฮิกส์มีเสถียรภาพโดยการแนะนำอนุภาคคู่หูที่ยกเลิกการแก้ไขที่เป็นอันตราย (การสนทนาเกี่ยวกับ **ความเป็นธรรมชาติ** รวมถึงแนวคิดจากวิธีแก้ปัญหาแบบไดนามิกไปจนถึงการให้เหตุผลแบบ **มนุษย์นิยม** ใน “ภูมิทัศน์” ที่เป็นไปได้ของสุญญากาศ)

ความไม่สมดุลของสสารและปฏิสสาร

แบบจำลองมาตรฐานมีการละเมิด CP บางส่วน แต่ไม่เพียงพอที่จะอธิบายว่าทำไมจักรวาลในปัจจุบันจึงเต็มไปด้วยสสารมากกว่าสสารและปฏิสสารในปริมาณที่เท่ากัน ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น กลไกเช่น **leptogenesis** (มักเกี่ยวข้องกับต้นกำเนิดของมวลนิวตริโนผ่าน seesaw) เสนอวิธีที่น่าสนใจที่ฟิสิกส์นอกเหนือจากแบบจำลองมาตรฐาน รบวงวนความสมดุล

ภาพที่สวยงามแต่ไม่สมบูรณ์

แบบจำลองมาตรฐานบางครั้งถูกเรียกว่า “ทฤษฎีที่ประสบความสำเร็จที่สุดในฟิสิกส์” การทำนายของมันสอดคล้องกับการทดลองด้วยความแม่นยำถึง 10-12 ทศนิยม มันอธิบายเกือบทุกอย่างที่เราเห็นในเครื่องเร่งอนุภาคและห้องปฏิบัติการ

แต่มันไม่สมบูรณ์:

- มันไม่สนใจแรงโน้มถ่วง
- มันไม่สามารถอธิบายมวลของนิวตริโน
- มันไม่สามารถอธิบายสสารมืดหรือพลังงานมืด
- มันทิ้งปริศนาอีกซึ่ง เช่น ปัญหาโครงสร้างชั้นและความไม่สมดุลของสสารและปฏิสสารไว้โดยไม่ได้รับการแก้ไข

นักฟิสิกส์กำลังเผชิญกับช่วงเวลาที่คุณเคยในประวัติศาสตร์ เช่นเดียวกับที่กลศาสตร์นิวตันต้องหลีกทางให้กับสัมพัทธภาพ และฟิสิกส์คลาสสิกต้องหลีกทางให้กับควอนตัมเมคานิกส์ แบบจำลองมาตรฐานในที่สุดต้องหลีกทางให้กับสิ่งที่ลึกซึ้งกว่า

จอกศักดิ์สิทธิ์: ทฤษฎีรวม

เป้าหมายสูงสุดคือ **ทฤษฎีรวมใหญ่ (Grand Unified Theory: GUT)** หรือแม้แต่ **ทฤษฎีของทุกสิ่ง (Theory of Everything: ToE)**: กรอบที่รวมทั้งสี่แรง, อธิบายทุกอนุภาค, และทำงานอย่างสอดคล้องจากระดับที่เล็กที่สุด (ควอนตัมกราวิตี) ไปจนถึงระดับที่ใหญ่ที่สุด (จักรวาลวิทยา)

นี่คือจอกศักดิ์สิทธิ์ของฟิสิกส์สมัยใหม่ นี่คือเหตุผลที่นักวิจัยผลักดันเครื่องเร่งอนุภาคไปสู่พลังงานที่สูงขึ้น, สร้างเครื่องตรวจจับนิวตริโนขนาดใหญ่, ทำแผนที่จักรวาลด้วยกล้องโทรทรรศน์, และประดิษฐ์คณิตศาสตร์ใหม่ที่กล้าหาญ

บทต่อไปจะสำรวจผู้สมัครชั้นนำ:

- **ซูเปอร์ซิมเมทรี (SUSY)** — ความสมมาตรระหว่างอนุภาคของสสารและแสง
- **ทฤษฎีสตริงและ M-ทฤษฎี** — ที่อนุภาคเป็นสตริงที่สั่นสะเทือน และกราวิตอนปรากฏขึ้นอย่างเป็นธรรมชาติ
- **มิติเพิ่มเติม** — จากแนวคิดเริ่มต้นของ Kaluza-Klein ไปจนถึงโมเดล Randall-Sundrum สมัยใหม่
- **แนวทางอื่น ๆ** — เช่น ควอนตัมกราวิตีแบบลูปและความปลอดภัยเชิงแอสิมโทติก

แต่ละแนวคิดเหล่านี้เกิดขึ้นไม่ใช่ในฐานะหลักความเชื่อ แต่เป็นวิทยาศาสตร์ในรูปแบบที่ดีที่สุด: การสังเกตข้อบกพร่อง, สร้างทฤษฎีใหม่, และทดสอบมันกับความเป็นจริง

ซูเปอร์ซิมเมทรี: ความสมมาตรใหญ่ต่อไป?

ฟิสิกส์ก้าวหน้าผ่านการรวมกันโดยความสมมาตร สมการของแมกซ์เวลรวมไฟฟ้าและแม่เหล็ก ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษรวมอวกาศและเวลา ทฤษฎีอิเล็กโตรวีครวมสองในสี่แรงพื้นฐาน แต่ละก้าวกระโดดเกิดจากการค้นพบความสมมาตรที่ซ่อนอยู่ในธรรมชาติ

ซูเปอร์ซิมเมทรี — หรือ SUSY, ตามที่นักฟิสิกส์เรียกอย่างรักใคร่ — เป็นข้อเสนอที่กล้าหาญว่าความสมมาตรใหญ่ต่อไปเชื่อมโยงสองประเภทที่ดูเหมือนแตกต่างกัน: **สสาร** และ **แรง**

เฟอร์มิออนและโบซอน: สสารปะทะแรง

ในแบบจำลองมาตรฐาน อนุภาคแบ่งออกเป็นสองตระกูลใหญ่:

- **เฟอร์มิออน (สปิน 1/2):** รวมถึงควาร์กและเลปตอน ซึ่งเป็นหน่วยพื้นฐานของสสาร สปินครึ่งจำนวนเต็มของมันหมายความว่ามันปฏิบัติตามหลักการกีดกันของพอลี: เฟอร์มิออนที่เหมือนกันสองตัวไม่สามารถอยู่ในสถานะเดียวกันได้ นี่คือเหตุผลที่อะตอมมีเปลือกที่มีโครงสร้างและสสารมีความเสถียร
- **โบซอน (สปินจำนวนเต็ม):** รวมถึงโฟตอน, กลูออน, W และ Z โบซอน, และฮิกส์ โบซอนถ่ายทอดแรงต่างจากเฟอร์มิออน พวกมันสามารถรวมตัวกันในสถานะเดียวกันได้ จึงมีเลเซอร์ (โฟตอน) และคอนเดนเสทของโบส-ไอน์สไตน์

โดยสรุป: เฟอร์มิออนสร้างสสาร, โบซอนถ่ายทอดแรง

สมมติฐานซูเปอร์ซิมเมทรี

ซูเปอร์ซิมเมทรีเสนอความสมมาตรที่เชื่อมโยงเฟอร์มิออนและโบซอน สำหรับทุกเฟอร์มิออนที่รู้จัก จะมีโบซอนคู่หู สำหรับทุกโบซอนที่รู้จัก จะมีเฟอร์มิออนคู่หู

- ควาร์ก → **สควาร์ก**
- เลปตอน → **สเลปตอน**
- กลูออน → **กลูอิโน**
- ภาควิทย/ฮิกส์ → **นิวทราลิโน** (ส่วนผสมของบีโน, วีโน, ฮิกส์โน; เป็นกลาง) และ **ชาร์จิโน** (ส่วนผสมของวีโน, ฮิกส์โน; มีประจุ)

(“โฟติโน” และ “ซิโน” เป็นชื่อเล่นเก่าสำหรับสถานะเอกบางอย่าง; การทดลองจริง ๆ ค้นหา **สถานะมวล** ที่กล่าวถึงข้างต้น)

ทำไมถึงเสนอการเพิ่มจำนวนอนุภาคเป็นสองเท่าอย่างสุดโต่ง? เพราะ SUSY นำเสนอวิธีแก้ปัญหาลึกลับที่สง่างามสำหรับปัญหาที่ลึกซึ้งที่สุดที่แบบจำลองมาตรฐานทิ้งไว้

การแก้ปัญหาคอนสตรัคชัน

หนึ่งในจุดดึงดูดที่ใหญ่ที่สุดของ SUSY คือความสามารถในการแก้ **ปัญหาคอนสตรัคชัน**: ทำไมโบซอนฮิกส์ถึงเบาขนาดนี้เมื่อเทียบกับระดับแพลนค์?

ในแบบจำลองมาตรฐาน การแก้ไขควอนตัมจากอนุภาคเสมือนควรผลักดันมวลของฮิกส์ไปสู่ค่ามหาศาล ซูเปอร์ซิมเมทรีแนะนำอนุภาคคู่หูที่ยกเลิกการเบี่ยงเบนเหล่านี้ ผลลัพธ์: มวลของฮิกส์มีเสถียรภาพตามธรรมชาติ โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งอย่างละเอียด (อย่างน้อยในสเปกตรัม SUSY ที่ “เป็นธรรมชาติ”)

SUSY และการรวมใหญ่

แรงจูงใจอีกประการสำหรับ SUSY มาจากการรวมแรง

- การประมาณค่าคงที่การเชื่อมโยงของแรงเข้ม, แรงอ่อน, และแม่เหล็กไฟฟ้าไปสู่พลังงานที่สูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าในแบบจำลองมาตรฐาน พวกมันเกือบ แต่ไม่สมบูรณ์มาบรรจบกันที่จุดเดียว
- ใน SUSY ด้วยการมีส่วนร่วมของอนุภาคคู่หู ค่าคงที่เหล่านี้มาบรรจบกันอย่างสวยงามที่ประมาณ 10^{16} GeV

นี่บ่งชี้ว่าในพลังงานที่สูงมาก สามแรงนี้อาจรวมกันเป็น **ทฤษฎีรวมใหญ่ (GUT)**

SUSY เป็นผู้สมัครสำหรับสสารมืด

ซูเปอร์ซิมเมทรียังเสนอผู้สมัครตามธรรมชาติสำหรับ **สสารมืด**

หาก SUSY ถูกต้อง หนึ่งในอนุภาคคู่หูต้องมีเสถียรภาพและเป็นกลางทางไฟฟ้า ผู้สมัครชั้นนำคือ **นิวทราลิโนที่เบาที่สุด**, ส่วนผสมของบิโน, วิโน, และฮิกซิโน

นิวทราลิโนมีปฏิสัมพันธ์อ่อนเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับโปรไฟล์ของ WIMPs (อนุภาคที่มีมวลมากและมีปฏิสัมพันธ์อ่อน) หากพบ พวกมันอาจอธิบาย 27% ของมวลที่ขาดหายไปของจักรวาล

การค้นหาด้วยการทดลองสำหรับ SUSY

เป็นเวลาหลายทศวรรษ นักฟิสิกส์หวังว่าอนุภาคซูเปอร์ซิมเมทรีจะปรากฏขึ้นเหนือระดับพลังงานที่ได้รับการสำรวจแล้ว

- **LEP (CERN, 1990s):** ไม่พบอนุภาค SUSY ถึง ~ 100 GeV
- **Tevatron (Fermilab, 1990s-2000s):** ไม่พบอนุภาคคู่หู
- **LHC (CERN, 2010s-2020s):** การชนกันของโปรตอน-โปรตอนถึง **13.6 TeV** (ออกแบบ: **14 TeV**) แม้จะมีการค้นหาอย่างกว้างขวาง ไม่พบหลักฐานของสควาร์ก, กลูอิโน, หรือนิวทราลิโนถึงระดับหลาย TeV

การไม่พบ SUSY ที่ LHC เป็นความผิดหวัง รูปแบบที่ง่ายที่สุดของ SUSY เช่น “แบบจำลองซูเปอร์ซิมเมทรีขั้นต่ำ” (MSSM) ถูกจำกัดอย่างมาก สเปกตรัมที่ “เป็นธรรมชาติ” หนักขึ้น บ่งชี้ถึงการปรับแต่งที่มากขึ้นหาก SUSY อยู่ใกล้ระดับ TeV

ถึงกระนั้น SUSY ยังไม่ถูกตัดออก รูปแบบที่ซับซ้อนกว่าทำนายอนุภาคคู่หูที่หนักกว่าหรือละเอียดกว่า อาจอยู่นอกเหนือการเข้าถึงของ LHC หรือมีปฏิสัมพันธ์ที่อ่อนเกินไปที่จะตรวจจับได้ง่าย

ความงามทางคณิตศาสตร์ของ SUSY

นอกเหนือจากแรงจูงใจเชิงปรากฏการณ์ SUSY มีความงามทางคณิตศาสตร์ที่ลึกซึ้ง

- มันเป็นการขยายเพียงอย่างเดียวที่เป็นไปได้ของความสมมาตรของกาลอวกาศที่สอดคล้องกับสัมพัทธภาพและควอนตัมเมคานิกส์
- ทฤษฎีซูเปอร์ซิมเมทรีมักคำนวณได้ง่ายกว่า: พวกมันควบคุมความไม่มีที่สิ้นสุดและเผยให้เห็นโครงสร้างที่ซ่อนอยู่ในทฤษฎีสนามควอนตัม

- ในทฤษฎีสตริง SUSY จำเป็นสำหรับความสอดคล้อง: หากไม่มีมัน ทฤษฎีจะมีทาคิออนและพยาธิวิทยาอื่น ๆ

แม้ว่าธรรมชาติจะไม่นำ SUSY มาใช้ในระดับพลังงานที่เข้าถึงได้ คณิตศาสตร์ของมันก็ได้เสริมสร้างฟิสิกส์แล้ว

สถานะของซูเปอร์ซิมเมทรี

ในปัจจุบัน SUSY อยู่ในสถานะที่แปลกประหลาด

- มันยังคงเป็นหนึ่งในกรอบที่ดึงดูดใจที่สุดสำหรับฟิสิกส์นอกเหนือจากแบบจำลองมาตรฐาน
- มันแก้ปัญหาคอนสตรัคชัน, สนับสนุนการรวม, และเสนอผู้สมัครสำหรับสสารมืด
- แต่ยังไม่มีหลักฐานจากการทดลอง

หาก LHC และผู้สืบทอดของมันไม่พบอะไร SUSY อาจเกิดขึ้นในระดับที่อยู่เหนือการเข้าถึงของเรา — หรือบางทีธรรมชาติอาจเลือกเส้นทางที่แตกต่างไปโดยสิ้นเชิง

วิธีการ ไม่ใช่ความเชื่อ

ซูเปอร์ซิมเมทรีแสดงให้เห็นถึงวิธีการทางวิทยาศาสตร์ในที่ทำงาน

นักฟิสิกส์ระบุปัญหา: ปัญหาคอนสตรัคชัน, การรวม, สสารมืด พวกเขาเสนอความสมมาตรใหม่ที่กล้าหาญที่แก้ปัญหานั้นทั้งหมด พวกเขาออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบมัน จนถึงตอนนี้ผลลัพธ์เป็นลบ — แต่ไม่ได้หมายความว่าแนวคิดนั้นสูญเปล่า SUSY ได้ปรับปรุงเครื่องมือของเรา, ทำให้ชัดเจนว่าเรากำลังมองหาอะไร, และสร้างแรงบันดาลใจให้การวิจัยหลายรุ่น

เช่นเดียวกับอีเธอร์หรือวงโคจรก่อนหน้า SUSY อาจเป็นก้าวไปสู่ความจริงที่ลึกซึ้งกว่า ไม่ว่ามันจะเป็นคำสุดท้ายหรือไม่

ทฤษฎีสตริงและ M-ทฤษฎี

ฟิสิกส์นอกเหนือจากแบบจำลองมาตรฐานมักถูกขับเคลื่อนด้วยการแก้ไข: การแก้ปัญหาคอนสตรัคชัน, การอธิบายสสารมืด, การรวมค่าคงที่เกจ ทฤษฎีสตริงแตกต่างออกไป มันไม่ได้เริ่มต้นจากปริศนาเฉพาะ แต่เริ่มจากคณิตศาสตร์ — และจบลงด้วยการเขียนแนวคิดทั้งหมดของเราเกี่ยวกับอวกาศ, เวลา, และสสารใหม่

ต้นกำเนิด: ทฤษฎีที่เกิดจากความล้มเหลว

ที่น่าประหลาดใจ ทฤษฎีสตริงไม่ได้เริ่มต้นเป็นทฤษฎีของทุกสิ่ง แต่เป็นความพยายามที่ล้มเหลวในการเข้าใจแรงนิวเคลียร์เข้ม

ในช่วงปลายทศวรรษ 1960 ก่อนที่ QCD จะพัฒนาครบถ้วน นักฟิสิกส์พยายามอธิบายส่วนสั่นของแฮดรอน พวกเขาสังเกตเห็นรูปแบบในข้อมูลการกระเจิงที่บ่งชี้ว่ารีโซแนนซ์สามารถจำลองได้ด้วยสตริงที่สั่นสะเทือน

“โมเดลรีโซแนนซ์คู่” ที่นำเสนอโดย Veneziano ในปี 1968 อธิบายปฏิกิริยาเข้มนราวกับว่าแฮดรอนเป็นการกระตุ้นของสตริงเล็ก ๆ มันสง่างาม แต่ถูกทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อ QCD กลายเป็นทฤษฎีที่แท้จริงของแรงเข้ม

ถึงกระนั้น ทฤษฎีสตริงปฏิเสธที่จะตาย ในสมการของมันซ่อนคุณสมบัติที่น่าทึ่งที่บ่งบอกเกินกว่าฟิสิกส์นิวเคลียร์

การค้นพบที่น่าประหลาดใจ: กราวิตอน

เมื่อนักทฤษฎีควอนไทซ์การสั่นของสตริง พวกเขาค้นพบว่าสเปกตรัมต้องมี **อนุภาคที่ไม่มีมวลและมีสปิน 2**

ที่น่าตกใจ ทฤษฎีสนามควอนตัมแสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่ไม่มีมวลและมีสปิน 2 นั้นไม่เหมือนใคร: มันต้องเป็นควอนตัมของแรงโน้มถ่วง, **กราวิตอน**

ดังที่จอห์น ชวาร์ซกล่าวในภายหลัง: “**แต่ข้อเท็จจริงที่น่าประหลาดใจปรากฏขึ้น: คณิตศาสตร์ของทฤษฎีสตริงต้องมีอนุภาคที่ไม่มีมวลและมีสปิน 2 — กราวิตอน**”

สิ่งที่เริ่มต้นเป็นทฤษฎีของแฮดรอนได้สร้างหน่วยพื้นฐานของควอนตัมกราวิตีโดยบังเอิญ

แนวคิดหลัก: สตริง ไม่ใช่จุด

ในหัวใจของทฤษฎีสตริง อนุภาคจุดถูกแทนที่ด้วยวัตถุหนึ่งมิติขนาดเล็ก: สตริง

- สตริงสามารถเป็น **เปิด** (มีสองปลาย) หรือ **ปิด** (เป็นวง)
- สถานะการสั่นที่แตกต่างกันของสตริงสอดคล้องกับอนุภาคที่แตกต่างกัน
 - การสั่นหนึ่งอาจปรากฏเป็นโฟตอน
 - อีกอันเป็นกาวออน
 - อีกอันเป็นควาร์ก
 - และหนึ่งสถานะ, โดยหลักเลี้ยวไม่ได้, เป็นกราวิตอน

การเปลี่ยนแปลงง่าย ๆ นี้ — จากจุดเป็นสตริง — แก้ปัญหาความไม่มีที่สิ้นสุดหลายอย่างที่รบกวนควอนตัมกราวิตี ขนาดที่จำกัดของสตริงกระจายปฏิกิริยาที่มีจะนั้นจะระเบิดในระยะห่างศูนย์

ซูเปอร์ซิมเมทรีและซูเปอร์สตริง

รุ่นแรกของทฤษฎีสตริงมีปัญหา: มีทาคิออน (ความไม่เสถียร) และต้องการคุณสมบัติที่ไม่สมจริง ความก้าวหน้าคือการแนะนำ **ซูเปอร์ซิมเมทรี**, ซึ่งในทศวรรษ 1970 และ 1980 นำไปสู่ **ทฤษฎีซูเปอร์สตริง**

ซูเปอร์สตริงกำจัดทาคิออน, รวมถึงเฟอร์มิออน, และนำมาซึ่งความสอดคล้องทางคณิตศาสตร์ใหม่

แต่มีข้อจำกัด: ทฤษฎีสตริงทำงานได้เฉพาะในมิติที่สูงขึ้น โดยเฉพาะ **10 มิติกาลอวกาศ**

- สี่มิติที่เราเห็น (สามมิติอวกาศ, หนึ่งมิติเวลา)
- อีกหกมิติ ถูกบีบอัดหรือม้วนในระดับเล็ก ๆ มองไม่เห็นในการทดลองปัจจุบัน

แนวคิดนี้ แม้จะดูสุดโต่ง แต่ไม่ใช่เรื่องใหม่ทั้งหมด ในทศวรรษ 1920 **ทฤษฎี Kaluza-Klein** ได้แนะนำว่ามิติเพิ่มเติมอาจรวมแรงโน้มถ่วงและแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎีสตริงฟื้นแนวคิดนี้และขยายมันอย่างมหาศาล

ทฤษฎีสตริงห้าประเภท

ในช่วงกลางทศวรรษ 1980 นักฟิสิกส์พบว่าทฤษฎีสตริงไม่ใช่เอกลักษณ์ แต่มี **ห้าประเภทที่แตกต่างกัน**:

1. **ประเภท I** — สตริงเปิดและปิด รวมถึงสตริงที่มีการวางแนวและไม่มีวางแนว
2. **ประเภท IIA** — สตริงปิด, มีการวางแนว, ไม่ใช่ไครัล
3. **ประเภท IIB** — สตริงปิด, มีการวางแนว, ไครัล
4. **Heterotic SO(32)** — สตริงปิดที่มีโครงสร้างแบบผสม
5. **Heterotic $E_8 \times E_8$** — รุ่นที่มีความสมมาตรสูง ซึ่งต่อมากลายเป็นสำคัญในการเชื่อมโยงกับฟิสิกส์อนุภาคที่แท้จริง

แต่ละประเภทดูเหมือนสอดคล้องทางคณิตศาสตร์ แต่ทำไมธรรมชาติถึงเลือกหนึ่ง?

การปฏิวัติซูเปอร์สตริงครั้งแรก

ในปี 1984 ไมเคิล กรีนและจอห์น ซวาร์ซแสดงให้เห็นว่าทฤษฎีสตริงสามารถยกเลิกความผิดปกติควอนตัมโดยอัตโนมัติ — สิ่งทฤษฎีสตริงนามควอนตัมต้องออกแบบอย่างระมัดระวัง การค้นพบนี้จุดประกาย **การปฏิวัติซูเปอร์สตริงครั้งแรก**, ซึ่งนักฟิสิกส์หลายพันคนหันไปสู่อุทกฤษฎีสตริงในฐานะผู้สมัครสำหรับทฤษฎีรวมของทุกแรง

มันเป็นกรอบแรกที่ควอนตัมกราวิตีไม่เพียงแต่สอดคล้อง แต่ยังหลีกเลี่ยงไม่ได้

การปฏิวัติซูเปอร์สตริงครั้งที่สอง: M-ทฤษฎี

ในช่วงกลางทศวรรษ 1990 การปฏิวัติครั้งที่สองเกิดขึ้น เอ็ดเวิร์ด วิกเทนและคนอื่น ๆ พบว่าทฤษฎีสตริงทั้งห้าไม่ใช่คู่แข่ง แต่เป็นขอบเขตที่แตกต่างกันของทฤษฎีที่ลึกซึ้งกว่าหนึ่งเดียว: **M-ทฤษฎี**

เชื่อว่า M-ทฤษฎีมีอยู่ใน **11 มิติ** และรวมถึงไม่เพียงแต่สตริง แต่ยังรวมถึงวัตถุในมิติที่สูงกว่าเรียกว่า **เบรน** (ย่อมาจากเมมเบรน)

- เบรนหนึ่งมิติ = สตริง
- เบรนสองมิติ = เมมเบรน
- เบรนมิติสูงกว่าถึง 9 มิติอวกาศ

เบรนเหล่านี้เปิดโอกาสใหม่และหลากหลาย: จักรวาลทั้งใบอาจมีอยู่เป็นเบรนสามมิติ ลอยอยู่ในปริมาตรที่มีมิติสูงกว่า ซึ่งแรงโน้มถ่วงรั่วไหลออกไปในปริมาตรในขณะที่แรงอื่น ๆ ยังคงถูกผูกไว้ ภาพนี้เป็นแรงบันดาลใจให้กับโมเดลมิติเพิ่มเติมสมัยใหม่ เช่น **Randall-Sundrum**

ตัวอย่างที่น่าสนใจ: Kaluza-Klein และ Randall-Sundrum

- **Kaluza-Klein (1920s):** เสนอมิติที่ห้าเพื่อรวมแรงโน้มถ่วงและแม่เหล็กไฟฟ้า แนวคิดนี้ถูกทิ้งมานานหลายทศวรรษ แต่ทฤษฎีสตริงฟื้นมันในระดับที่ใหญ่กว่ามาก มิติเพิ่มเติมที่ถูกบีบอัดยังคงเป็นคุณสมบัติหลักของโมเดลสตริง
- **Randall-Sundrum (1999):** เสนอ “มิติเพิ่มเติมที่บิดเบี้ยว” ซึ่งจักรวาลของเราเป็นเบรนสามมิติที่ฝังอยู่ในมิติที่สูงกว่า แรงโน้มถ่วงกระจายไปในปริมาตร ซึ่งอธิบายว่าทำไมมันถึงอ่อนกว่าแรงอื่น ๆ โมเดลดังกล่าวทำนายสัญญาณที่เป็นไปได้ในเครื่องเร่งอนุภาคหรือการเบี่ยงเบนจากกฎของนิวตันในระยะทางสั้นมาก

หลักฐานจากการทดลองและความท้าทาย

ทฤษฎีมาตรฐานทำการอ้างที่กล้าหาญ แต่การทดสอบมันนั้นยากอย่างไม่น่าเชื่อ

- **มิติเพิ่มเติม:** อาจปรากฏผ่านสัญญาณพลังงานที่หายไปหรือ **การกระตุ้น Kaluza-Klein** — อาจเป็นสำหรับ **กราวิตอนหรือแม้แต่สนามแบบจำลองมาตรฐาน**, ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่า ขั้วจำกัดของเครื่องเร่งอนุภาคมาถึงระดับ **หลาย TeV**
- **กราวิตอน:** ทำนายอนุภาคที่ไม่มีมวลและมีสปิน 2 แต่การตรวจจับกราวิตอนตัวเดียวนั้นอยู่นอกเหนือเทคโนโลยีที่จินตนาการได้ ผลกระทบทางอ้อม เช่น การเบี่ยงเบนในคลื่นโน้มถ่วง เป็นไปได้
- **ซูเปอร์ซิมเมทรี:** ทฤษฎีมาตรฐานต้องการ SUSY ในระดับใดระดับหนึ่ง แต่ LHC ยังไม่พบอนุภาคคู่หู
- **จักรวาลวิทยา:** จักรวาลยุคแรก, การพองตัว, และพื้นหลังไมโครเวฟของจักรวาลอาจมีร่องรอยของฟิสิกส์ที่ผิดเพี้ยน แม้ว่าผลลัพธ์จนถึงตอนนี้ยังไม่แน่นอน

ถึงแม้จะมีความท้าทาย ทฤษฎีมาตรฐานได้ให้พื้นฐานที่อุดมสมบูรณ์สำหรับคณิตศาสตร์ และสร้างแรงบันดาลใจให้กับความก้าวหน้าในเรขาคณิต, โทโพโลยี, และความเป็นคู่ เช่น AdS/CFT (ซึ่งเชื่อมโยงแรงโน้มถ่วงในมิติที่สูงกว่ากับทฤษฎีสนามควอนตัมที่ไม่มีแรงโน้มถ่วง)

ความงามและข้อถกเถียง

ผู้สนับสนุนอ้างว่าทฤษฎีมาตรฐานเป็นเส้นทางที่มีแนวโน้มมากที่สุดสู่ทฤษฎีรวม: มันรวมควอนตัมกราวิตี, รวมทุกแรง, และอธิบายว่าทำไมกราวิตอนต้องมีอยู่

นักวิจารณ์โต้แย้งว่าโดยปราศจากการยืนยันจากการทดลอง ทฤษฎีมาตรฐานมีความเสี่ยงที่จะหลุดจากวิทยาศาสตร์เชิงประจักษ์ “ภูมิทัศน์” ขนาดใหญ่ของโซลูชันที่เป็นไปได้ (ถึง 10^{500}) ทำให้ยากต่อการให้การทำนายที่ไม่เหมือนใคร

ทั้งสองฝ่ายเห็นด้วยในสิ่งหนึ่ง: ทฤษฎีมาตรฐานได้เปลี่ยนวิธีที่เราคิดเกี่ยวกับฟิสิกส์และให้ภาษาใหม่สำหรับการรวม

สู่ทฤษฎีของทุกสิ่ง

หากซูเปอร์ซิมเมทรีเป็นก้าวต่อไปนอกเหนือจากแบบจำลองมาตรฐาน ทฤษฎีมาตรฐานคือก้าวถัดไป: ผู้สมัครสำหรับ **ทฤษฎีของทุกสิ่ง** ที่รอคอยมานาน

การอ้างที่กล้าหาญที่สุดของมันไม่ใช่ว่ามันรวมเฉพาะแบบจำลองมาตรฐานและแรงโน้มถ่วง แต่ทั้งสองนี้เป็นผลลัพธ์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ของสิ่งที่สันตะกอนในมิติที่สูงกว่า กราวิตอนไม่ใช่ส่วนเสริม — มันถูกฝังอยู่ในนั้น

ว่าธรรมชาติเลือกเส้นทางนี้หรือไม่ ยังคงต้องรอการค้นพบ

การสำรวจขอบเขต: การทดลองนอกเหนือจากแบบจำลองมาตรฐาน

ทฤษฎีคือสายเลือดของฟิสิกส์ แต่การทดลองคือหัวใจที่เต้น ซูเปอร์ซิมเมทรี, ทฤษฎีมาตรฐาน, และมิติเพิ่มเติมเป็นโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ที่สวยงาม แต่พวกมันจะอยู่หรือตายด้วยหลักฐาน หากต้องการเป็นมากกว่าการคาดเดา พวกมันต้องทิ้งร่องรอยในข้อมูล

นักฟิสิกส์ได้พัฒนาวิธีที่ชาญฉลาดในการค้นหาร่องรอยเหล่านี้ — ในเครื่องเร่งอนุภาค, ในจักรวาล, และในโครงสร้างของกาลอวกาศเอง

เครื่องเร่งอนุภาค: การล่าอนุภาคคู่หูและกราวิตอน

เครื่องเร่งอนุภาคขนาดใหญ่ (LHC) ที่ CERN เป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่มีพลังมากที่สุดในโลก ซึ่งชนโปรตอนด้วยพลังงานถึง **13.6 TeV** (ออกแบบ: **14 TeV**) มันเป็นเครื่องมือหลักของมนุษยชาติในการสำรวจฟิสิกส์นอกเหนือจากแบบจำลองมาตรฐาน

ซูเปอร์ซิมเมทรีใน LHC

- **การค้นหอนุภาคคู่หู:** การทดลอง ATLAS และ CMS ได้วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อค้นหาสควาร์ก, กลูอิโน, และนิวทราลิโน/ชาร์จิโน ซึ่งมักปรากฏเป็นสัญญาณ “พลังงานที่หายไป” เพราะอนุภาค SUSY หลบเลี่ยงการตรวจจับ
- **ผลลัพธ์:** ไม่พบอนุภาค SUSY ที่ได้รับการยืนยันถึงระดับหลาย TeV ซึ่งได้ตัดรูปแบบที่ง่ายที่สุดของ SUSY ออกไปและผลักดันสเปกตรัมที่ “เป็นธรรมชาติ” ไปสู่พื้นที่ที่หนักกว่าและปรับแต่งมากขึ้น

กราวิตอนและมิติเพิ่มเติม

- **สถานะ Kaluza-Klein:** หากมีมิติเพิ่มเติม **กราวิตอนหรือแม้แต่สนามแบบจำลองมาตรฐาน** อาจปรากฏเป็นการกระตุ้น KK ที่หนัก ซึ่งสามารถตรวจจับได้เป็นรีโซแนนซ์ในช่องทาง di-lepton, di-photon หรือ di-jet
- **สัญญาณ Randall-Sundrum:** มิติเพิ่มเติมที่บิดเบี้ยวอาจสร้างรีโซแนนซ์ของกราวิตอนที่มีรูปแบบมุมของสปิน 2 ที่เป็นลักษณะเฉพาะ
- **ผลลัพธ์:** การค้นหาของ LHC จนถึงตอนนี้ไม่พบหลักฐาน แต่ได้กำหนดข้อจำกัดถึงระดับ **หลาย TeV**, จำกัดขนาด, การบิดเบี้ยว, และเรขาคณิตของมิติเพิ่มเติม

หลุมดำขนาดเล็ก

บางทฤษฎีบ่งชี้ว่าหากแรงโน้มถ่วงแข็งแกร่งในระดับ TeV หลุมดำขนาดเล็กอาจก่อตัวในการชนกันของ LHC และระเหยเป็นการระเบิดของอนุภาค เหตุการณ์ดังกล่าวยังไม่ถูกพบ

การทดลองที่มีความแม่นยำ: การทดสอบแรงโน้มถ่วงในระดับเล็ก

หากมีมิติเพิ่มเติม กฎแรงโน้มถ่วงของนิวตันอาจพังทลายในระยะทางสั้น

- **การทดลองสมดุลแรงบิด (“Eöt-Wash”):** ทดสอบกฎกำลังสองผกผันถึง **ระดับต่ำกว่ามิลลิเมตร** — ปัจจุบัน **หลายสิบไมโครเมตร (~50 μm)**
- **ผลลัพธ์:** ไม่พบการเบี่ยงเบน การทดลองเหล่านี้ **ตัดออก** สถานการณ์มิติเพิ่มเติมในวงกว้างที่มีความยาวลักษณะ **มากกว่า $\sim 10^{-4}$ เมตร** (ขึ้นอยู่กับโมเดล)

การทดลองบนโต๊ะเหล่านี้มีความไวที่น่าทึ่งและสำรวจระดับที่เครื่องเร่งอนุภาคไม่สามารถเข้าถึงได้

คลื่นโน้มถ่วง: หน้าต่างใหม่สู่ควอนตัมกราวิตี

การค้นพบคลื่นโน้มถ่วงโดย LIGO ในปี 2015 เปิดพรหมแดนใหม่

- **โพลาริเซชันเพิ่มเติม / การแพร่กระจายที่เปลี่ยนแปลง:** บางโมเดลควอนตัมกราวิตีหรือมิติเพิ่มเติมทำนายการเบี่ยงเบนจาก GR (โพลาริเซชันเพิ่มเติม, การกระเจิง, หรือการลดทอนที่เปลี่ยนแปลง)

- **การวิเคราะห์สเปกตรัมการสลายตัว:** “การสลายตัว” ของหลุมดำหลังการรวมอาจเผยให้เห็นการเบี่ยงเบนเล็กน้อยจาก GR
- **คลื่นโน้มถ่วงดั้งเดิม:** คลื่นจากบิกแบงอาจมีร่องรอยของฟิสิกส์สตริง ซึ่งตรวจจับได้โดยหอสังเกตการณ์ในอนาคต เช่น LISA หรือกล้องโทรทรรศน์ไอน์สไตน์

จนถึงตอนนี้ การสังเกตสอดคล้องกับ GR ภายในความไม่แน่นอนปัจจุบัน แต่ความแม่นยำที่สูงขึ้นอาจนำมาซึ่งความประหลาดใจ

จักรวาลวิทยา: จักรวาลเป็นห้องปฏิบัติการ

จักรวาลเองคือเครื่องเร่งอนุภาคขั้นสุดยอด

- **พื้นหลังไมโครเวฟของจักรวาล (CMB):** ความผันผวนเล็ก ๆ ทำแผนที่จักรวาลยุคแรก บางโมเดลสตริงทำนายสัญญาณเฉพาะ เช่น การกระจายที่ไม่ใช่เกาส์เซียนหรือคุณสมบัติการสั่น
- **การพองตัว:** การขยายตัวอย่างรวดเร็วของจักรวาลอาจถูกขับเคลื่อนโดยสนามที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีสตริง การตรวจจับโหมด B ดั้งเดิมใน CMB จะเป็นหลักฐานที่แข็งแกร่ง
- **การค้นหาสสารมืด:** นิวทราลิโนจาก SUSY เป็นผู้สมัครชั้นนำสำหรับสสารมืด การทดลอง เช่น XENONnT, LUX-ZEPLIN และ PandaX ค้นหา WIMPs ผ่านการกระเจิงของนิวเคลียส
- **แอกซิออน:** ทฤษฎีสตริงยังทำนายอนุภาคคล้ายแอกซิออน ซึ่งอาจตรวจจับได้ผ่านช่องเรโซแนนซ์หรือการสังเกตทางดาราศาสตร์

จนถึงตอนนี้ ท้องฟ้ายังเงียบ สสารมืดยังคงไม่ถูกตรวจจับ และข้อมูลจักรวาลวิทยาสอดคล้องกับโมเดล Λ CDM โดยไม่มีรอยนิ้วมือของสตริงที่ชัดเจน

สถานะปัจจุบัน: ข้อจำกัด ไม่ใช่การยืนยัน

การค้นหาหลายทศวรรษไม่ยืนยัน SUSY, มิติเพิ่มเติม, หรือสัญญาณสตริง แต่การขาดหลักฐานไม่ใช่หลักฐานของการขาด:

- SUSY อาจมีอยู่ในระดับที่อยู่เหนือการเข้าถึงของ LHC หรือในสเปกตรัมที่ไม่ชัดเจน; ผลลัพธ์เชิงลบจนถึงตอนนี้ **สนับสนุนรุ่นที่ปรับแต่งมากขึ้น (“น้อยกว่าธรรมชาติ”)** หาก SUSY อยู่ใกล้ระดับ TeV
- มิติเพิ่มเติมอาจเล็กลง, บิดเบี้ยวมากขึ้น, หรือถูกซ่อนจากโฟรบปัจจุบันในบางวิธี
- ทฤษฎีสตริงอาจทิ้งร่องรอยที่ตรวจจับได้เฉพาะในจักรวาลยุคแรก ซึ่งเข้าถึงได้เฉพาะผ่านจักรวาลวิทยา

ความผิดปกติที่แม่นยำบางอย่าง (เช่น การวัด $(g-2)$ ของมิวออนและความตึงเครียดบางอย่างในฟิสิกส์รสชาติ) ยังคง **น่าสนใจแต่ยังไม่ได้รับการแก้ไข**; พวกมันยังคงกระตุ้นการวิจัยโดยไม่ล้มล้างแบบจำลองมาตรฐานในตอนนี้

สิ่งที่การทดลองทำคือ **จำกัดพื้นที่พารามิเตอร์** พวกมันบอกเราว่า SUSY อยู่ที่ไหน, มิติเพิ่มเติมต้องเล็กแค่ไหน, และสสารมืดสามารถมีปฏิสัมพันธ์ได้มากหรือน้อยเพียงใด

หนทางข้างหน้า

การทดลองในอนาคตสัญญาว่าจะสำรวจลึกยิ่งขึ้น:

- **LHC ความสว่างสูง (HL-LHC):** จะรวบรวมข้อมูลมากขึ้น 10 เท่า, สำรอง SUSY ถึงมวลที่สูงขึ้นและกระบวนการที่หายาก
- **เครื่องเร่งอนุภาควงกลมในอนาคต (FCC-hh):** เสนอเครื่องเร่งอนุภาค 100 TeV ซึ่งมีพลังพอที่จะสำรวจระดับพลังงานที่ฟิสิกส์ GUT อาจปรากฏ
- **LISA (2030s):** หอสังเกตการณ์คลื่นโน้มถ่วงในอวกาศ, มีความไวต่อสัญญาณดั้งเดิมจากจักรวาลยุคแรก
- **เครื่องตรวจจับสสารมืดรุ่นต่อไป:** ด้วยความไวต่อสัญญาณที่อ่อน พวกมันอาจจับ WIMP หรือแอกซิออนในที่สุด

วิทยาศาสตร์คือการเดินทาง

เรื่องราวการทดลองของฟิสิกส์นอกเหนือจากแบบจำลองมาตรฐานไม่ใช่เรื่องของความล้มเหลว แต่เป็นเรื่องของกระบวนการ

- ผลลัพธ์เชิงลบตัดโมเดลที่ง่ายออกและปรับปรุงทฤษฎีของเรา
- ทุกข้อจำกัดนำเราไปสู่กรอบที่ละเอียดและทำนายได้มากขึ้น
- การขาด SUSY หรือมิติเพิ่มเติมในระดับ TeV ไม่ได้ทำลายแนวคิดเหล่านี้ — มันผลักดันพวกมันไปสู่ดินแดนใหม่

เช่นเดียวกับการทดลองฟอยล์ทองคำของราเธอร์ฟอร์ดที่ทำลายโมเดลพุดดิ้งลูกพลัม หรือ LIGO ที่กำจัดความสงสัยเกี่ยวกับคลื่นโน้มถ่วง การค้นพบครั้งใหญ่ต่อไปอาจมาถึงอย่างกะทันหัน — และเปลี่ยนทุกอย่าง

สู่ทฤษฎีของทุกสิ่ง

ตลอดหลายศตวรรษ ฟิสิกส์ก้าวหน้าผ่านการรวม นิวตันรวมท้องฟ้าและโลกภายใต้กฎแรงโน้มถ่วงเดียว แมกซ์เวลรวมไฟฟ้าและแม่เหล็ก โอน์สไตน์รวมอวกาศและเวลา ทฤษฎีอิเล็กโตรวีคแสดงให้เห็นว่าสองแรงที่แตกต่างกันมากเป็นด้านของแรงเดียว

ก้าวต่อไปที่เป็นธรรมชาติคือความกล้าหาญที่สุด: **การรวมทั้งสี่ปฏิกิริยาพื้นฐาน** — เข้ม, อ่อน, แม่เหล็กไฟฟ้า, และแรงโน้มถ่วง — ในกรอบที่สอดคล้อง นี่คือการออกศึกดิสุทธของฟิสิกส์: **ทฤษฎีของทุกสิ่ง (ToE)**

ทำไม ToE ถึงสำคัญ

การรวมที่สมบูรณ์ไม่ใช่แค่ความงามทางปรัชญา; มันจัดการกับปัญหาที่ลึกซึ้งทั้งในทางปฏิบัติและแนวคิด:

- **ควอนตัมกราวิตี:** ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปพังทลายในระดับพแลนค์ (10^{19} GeV) เฉพาะทฤษฎีควอนตัมกราวิตีเท่านั้นที่สามารถอธิบายหลุมดำและความเอกฐานของบิกแบง
- **ความเป็นธรรมชาติและการปรับแต่ง:** ปัญหาโครงสร้างชั้นและปัญหาค่าคงที่จักรวาลเรียกร้องการอธิบายที่ลึกซึ้งกว่า
- **พารามิเตอร์ของแบบจำลองมาตรฐาน:** ทำไมอนุภาคมีมวลและประจุที่พวกมันมี? ทำไมมีสามรุ่นของควาร์กและเลปตอน? ToE สามารถอธิบายปริศนาเหล่านี้
- **จักรวาลวิทยา:** สสารมืด, พลังงานมืด, และการพองตัวอาจทั้งหมดเกี่ยวข้องกับฟิสิกส์ในระดับการรวม

ToE ไม่เพียงแต่รวมแรง — มันรวมระดับ, จากสตริงที่เล็กที่สุดของทฤษฎีควอนตัมถึงโครงสร้างจักรวาลที่ใหญ่ที่สุด

ซูเปอร์ซิมเมทรีและการรวมใหญ่

ซูเปอร์ซิมเมทรี (SUSY), หากเกิดขึ้นในธรรมชาติ, เสนอก้าวไปสู่ ToE

- **ปัญหาโครงสร้างชั้นได้รับการแก้ไข:** อนุภาคคู่หูยกเลิกการแก้ไขที่แตกต่างกันในมวลของฮิกส์
- **ค่าคงที่เกอรวมกัน:** ด้วย SUSY ความแข็งแกร่งของสามแรงมาบรรจบกันอย่างสวยงามที่ประมาณ 10^{16} GeV, ชี้ไปที่ **ทฤษฎีรวมใหญ่ (GUT)**
- **ผู้สมัครสำหรับสสารมืด:** นิวทราลิโนเสนอคำอธิบายตามธรรมชาติสำหรับสสารมืดในจักรวาล

GUT ที่ได้รับแรงบันดาลใจจาก SUSY (เช่น SU(5), SO(10), หรือ E₆) จินตนาการว่าในพลังงานที่สูงมาก ควาร์ก และเลปตอนรวมกันเป็นมัลติเพล็ตที่ใหญ่ขึ้น และแรงรวมกันเป็นกลุ่มเกจเดียว

แต่ SUSY ยังไม่ปรากฏในการทดลอง หากมันมีอยู่ในระดับที่อยู่เหนือการเข้าถึงของเรา พลังการรวมของมัน อาจยังคงเข้ายวนแต่ถูกซ่อนไว้

ทฤษฎีสตริง: ควอนตัมกราวิตีและกราวิตอน

ทฤษฎีสตริงไปไกลกว่า แทนที่จะซ่อมแบบจำลองมาตรฐาน มันเขียนพื้นฐานใหม่:

- **สตริง ไม่ใช่จุด:** อนุภาคคือการสั่นของสตริงเล็ก ๆ
- **กราวิตอนปรากฏตามธรรมชาติ:** การกระตุ้นที่ไม่มีมวลและมีสปิน 2 เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งหมายความว่าควอนตัมกราวิตีถูกฝังอยู่ในนั้น
- **การรวม:** สถานะการสั่นที่แตกต่างกันสร้างอนุภาคที่รู้จัก — ควาร์ก, เลปตอน, เกจโบซอน, ฮิกส์ — ในกรอบเดียว
- **มิติเพิ่มเติม:** ทฤษฎีสตริงต้องการ 10 มิติกาลอวกาศ; M-ทฤษฎีต้องการ 11 มิติ, ด้วยมิติที่ซ่อนถูกบีบอัดหรือบิดเบี้ยว

ในมุมมองนี้ การรวมไม่ใช่เรื่องบังเอิญ — มันเป็นเรขาคณิต แรงแตกต่างกันเพราะสตริงสั่นในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งถูกกำหนดโดยโทโพโลยีของมิติเพิ่มเติม

M-ทฤษฎีและโลกเบรน

การค้นพบว่าทฤษฎีสตริงทั้งห้าเชื่อมโยงกันด้วยความเป็นคู่ได้นำไปสู่ M-ทฤษฎี, กรอบที่ใหญ่กว่า:

- รวมถึงสตริง, เมมเบรน, และเบรนในมิติที่สูงกว่า
- เสนอว่าจักรวาลของเราอาจเป็นเบรนสามมิติ ลอยอยู่ในปริมาตรที่มีมิติสูงกว่า
- เสนอคำอธิบายตามธรรมชาติว่าทำไมแรงโน้มถ่วงถึงอ่อนกว่า (มันรั่วไหลออกไปในปริมาตร) และจักรวาลหลายใบอาจมีอยู่ใน “มัลติเวิร์ส”

M-ทฤษฎียังไม่สมบูรณ์ แต่เป็นก้าวที่กล้าหาญที่สุดสู่ ToE ที่เคยพยายาม

เส้นทางอื่นสู่ควอนตัมกราวิตี

ทฤษฎีสตริงและ M-ทฤษฎีไม่ใช่เส้นทางเดียว นักฟิสิกส์สำรวจกรอบหลายอย่าง, แต่ละอย่างมีจุดแข็งที่แตกต่างกัน:

- **ควอนตัมกราวิตีแบบลูป (LQG):** พยายามควอนไทซ์กาลอวกาศโดยตรง, ทำนายว่าอวกาศไม่ต่อเนื่องในระดับแพลนค์
- **ความปลอดภัยเชิงแอสิมโทติก:** เสนอว่าแรงโน้มถ่วงอาจทำงานได้ดีในพลังงานสูงเนื่องจากจุดคงที่ที่สำคัญ
- **การแบ่งสามเหลี่ยมเชิงเหตุผล (CDT):** สร้างกาลอวกาศจากหน่วยเรขาคณิตพื้นฐาน
- **ทฤษฎีทวิสเตอร์และแอมพลิจูดเฮตโรน:** กรอบคณิตศาสตร์ที่สร้างสรรค์ใหม่ที่พิจารณาอวกาศและแอมพลิจูดการกระเจิง

ถึงแม้ว่าจะไม่มีกรอบใดแข่งขันกับขอบเขตการรวมของทฤษฎีสตริง แต่พวกมันแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของการค้นหา

บทบาทของการทดลอง

ToE ในที่สุดต้องสามารถทดสอบได้ แม้ว่าระดับแพลนค์จะอยู่นอกเหนือการเข้าถึงของการทดลองปัจจุบัน นักฟิสิกส์ค้นหาหลักฐานทางอ้อม:

- **เครื่องเร่งอนุภาค:** อนุภาค SUSY, มิติเพิ่มเติม, หรือหลุมดำขนาดเล็ก
- **การทดสอบที่มีความแม่นยำ:** การเบี่ยงเบนจากกฎของนิวตันในระยะทางสั้น
- **คลื่นโน้มถ่วง:** โฟลาไรเซชันแปลกใหม่หรือการสะท้อนจากมิติที่สูงกว่า
- **จักรวาลวิทยา:** ร่องรอยของการพองตัว, ผู้สมัครสำหรับสสารมืด, หรือเอกซ็อนที่ทฤษฎีสตริงทำนาย

จนถึงตอนนี้ ToE ยังอยู่นอกเหนือการเข้าถึง แต่ทุกผลลัพธ์เชิงลบจำกัดความเป็นไปได้

ความงามและความท้าทาย

ToE ที่แท้จริงไม่เพียงแต่รวมฟิสิกส์ — มันรวม **ความรู้ของมนุษย์** มันเชื่อมโยงควอนตัมเมคานิกส์และสัมพัทธภาพ, ระดับเล็กและใหญ่, อนุภาคและจักรวาล

แต่มันเผชิญกับความขัดแย้ง: ระดับที่การรวมเกิดขึ้นอาจอยู่นอกเหนือการเข้าถึงของการทดลองตลอดไป เครื่องเร่งอนุภาค 100 TeV สำรวจเพียงส่วนหนึ่งของทางสู่ระดับแพลนค์ เราอาจต้องพึ่งพาจักรวาลวิทยา, ความสอดคล้องทางคณิตศาสตร์, หรือสัญญาณทางอ้อม

ความฝันยังคงอยู่ด้วยความงามอันลึกซึ้งของกรอบเหล่านี้ ดังที่วิกเท่นกล่าวไว้ว่า ทฤษฎีสตริงไม่ใช่แค่ “ชุดสมการ” แต่เป็น “กรอบใหม่สำหรับฟิสิกส์”

วิทยาศาสตร์คือวิธีการ ไม่ใช่ความเชื่อ

การค้นหา ToE ไม่ใช่การประกาศว่าทฤษฎีสตริง, SUSY, หรือแนวคิดใด ๆ เป็น “ความจริง” มันเกี่ยวกับ **วิธีการทางวิทยาศาสตร์**:

- การระบุข้อบกพร่องในทฤษฎีที่มีอยู่
- การเสนอกรอบใหม่ที่กล้าหาญ

- การทดสอบมันกับความเป็นจริง, ทิ้งหรือปรับปรุงตามความจำเป็น

เรื่องราวยังไม่จบ แต่ความเปิดกว้างนี้ — การปฏิเสธที่จะถือว่าทฤษฎีใดเป็นสิ่งศักดิ์สิทธิ์ — ทำให้ฟิสิกส์เป็นวิทยาศาสตร์ที่มีชีวิต ไม่ใช่ความเชื่อ

ขอบฟ้าข้างหน้า

ศตวรรษหน้าของฟิสิกส์อาจเผยให้เห็น:

- หลักฐานของซูเปอร์ซิมเมทรีหรือทางเลือกของมัน
- ข้อมูลจักรวาลวิทยาที่ยืนยันหรือหักล้างการทำนายของสตริง
- การเขียนใหม่ของกาลอวกาศเอง

หรือบางที ToE ที่แท้จริงคือสิ่งที่ยังไม่มีใครจินตนาการ

แต่การค้นหาเอง — ความปรารถนาที่จะรวม, อธิบาย, และเห็นธรรมชาติเป็นหนึ่งเดียว — เป็นส่วนหนึ่งของมนุษยชาติเช่นเดียวกับสมการเอง

อ้างอิงและการอ่านเพิ่มเติม

ซูเปอร์ซิมเมทรีและการรวมใหญ่

- Wess, J., และ Bagger, J. (1992). **Supersymmetry and Supergravity**. Princeton University Press.
- Baer, H., และ Tata, X. (2006). **Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events**. Cambridge University Press.
- Georgi, H., และ Glashow, S. L. (1974). "Unity of All Elementary Particle Forces." **Physical Review Letters**, 32(8), 438.

ทฤษฎีสตริงและ M-ทฤษฎี

- Green, M. B., Schwarz, J. H., และ Witten, E. (1987). **Superstring Theory** (เล่ม 1 และ 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). **String Theory** (เล่ม 1 และ 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). "String Theory Dynamics in Various Dimensions." **Nuclear Physics B**, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., และ Schwarz, J. H. (2006). **String Theory and M-Theory: A Modern Introduction**. Cambridge University Press.

ควอนตัมกราวิตีแบบลูปและทางเลือก

- Rovelli, C. (2004). **Quantum Gravity**. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). **Modern Canonical Quantum General Relativity**. Cambridge University Press.

- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., และ Loll, R. (2005). "Reconstructing the Universe." **Physical Review D**, 72(6), 064014.

ข้อจำกัดจากการทดลอง

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). "Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson." **Physics Letters B**, 716(1), 1–29.
- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV." **Physics Letters B**, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration และ Virgo Collaboration). (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." **Physical Review Letters**, 116(6), 061102.

รายงานที่เข้าถึงได้สำหรับสาธารณะ

- Green, B. (1999). **The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory**. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). **Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions**. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). **Seven Brief Lessons on Physics**. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). **The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces**. Basic Books.