บทที่ ๕

แบบจำลองของการลุกจ้าบนดวงอาทิตย์

๕.๑ สมบัติทั่วไปของการลุกจ้า

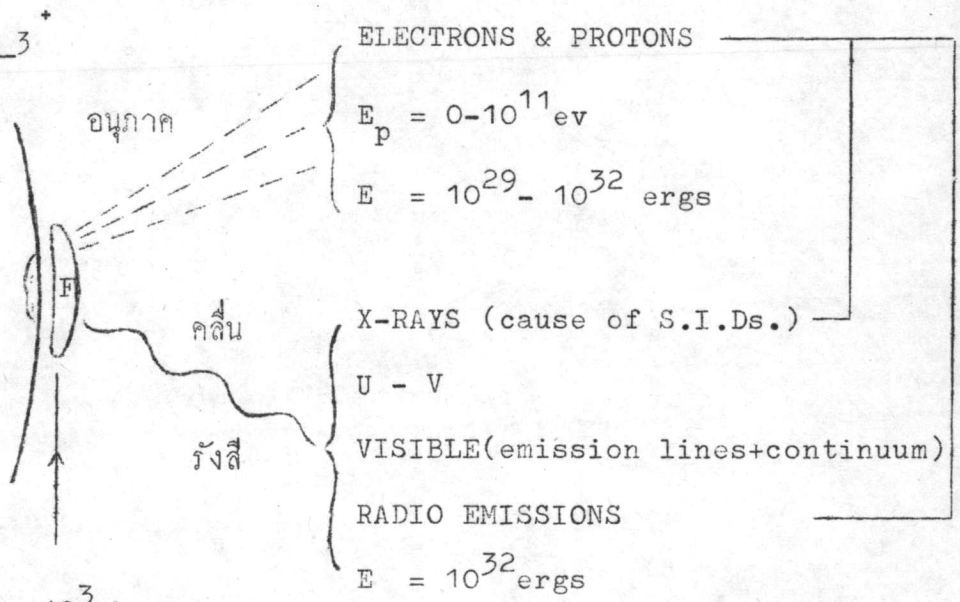
การลุกจ้า เป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจมากในอาณาบริเวณกัมมันต์บนดวงอาทิตย์ การลุกจ้าเป็นการเพิ่มความสว่างอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาอันสั้น ในบริเวณเล็ก ๆ บนตัวดวงและสามารถมองเห็นการลุกจ้าได้ดีในแสงไฮโดรเจนอัลฟา การที่ไม่ค่อยพบเห็นการลุกจ้าในแสงสีขาว ชี้ให้เห็นว่า การลุกจ้าไม่เป็นปรากฏการณ์ในระดับโฟโตสเฟียร์ เราอาจจะตั้งปัญหาถามว่า การลุกจ้าเป็นปรากฏการณ์ในระดับโครโมสเฟียร์หรือ? เมื่อศึกษาภาพถ่ายในแสงไฮโดรเจนอัลฟา ดูเหมือนว่า ระดับล่างของโครโมสเฟียร์ไม่ถูกรบกวน แต่ระดับบนของโครโมสเฟียร์เป็นส่วนที่มักจะพบการลุกจ้าเสมอ ๆ จากการศึกษาการลุกจ้าที่เด่น ๆ ที่ขอบดวง ส่วนสูงที่สุดของการลุกจ้าจะอยู่ในระดับสูงระหว่าง ๒๐,๐๐๐ ถึง ๕๐,๐๐๐ กม จากระดับโฟโตสเฟียร์ (Kiepenheuer, 1965) และความสูงเฉลี่ยของการลุกจ้าจะมีค่าระหว่าง ๗,๐๐๐-๑๕,๐๐๐ กม เหนือระดับโฟโตสเฟียร์ (C. de Jager, 1965) ดังนั้น พอจะสรุปได้ว่า การลุกจ้าอาจจะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนล่างของชั้นคอโรนาและส่วนบนของชั้นโครโมสเฟียร์ หรือสรุปว่า การลุกจ้าอาจจะเกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบรรยากาศระดับโครโมสเฟียร์-คอโรนา อุณหภูมิของการลุกจ้ามีค่าประมาณ $๑๐^{๔}$ เคลวิน ความหนาแน่นของอิเลกตรอน $Ne \sim 10^{13}$ ซม$^{-3}$ ($\log Ne \sim 13$-13.5; C. de Jager, 1965)

จากข้อมูลที่ได้แสดงว่า สมบัติเฉพาะของการลุกจ้าก็คือ การลุกจ้ามีความหนาแน่นมาก มีความหนาแน่นมากกว่าคอโรนาถึง $๑๐^{๔}$- $๑๐^{๕}$ เท่า และมีความหนาแน่นมากกว่าโครโมสเฟียร์ถึง $๑๐^{๓}$- $๑๐^{๔}$ เท่า (ความหนาแน่นของคอโรนา $\log Ne \sim 9$, ความหนาแน่นของโครโมสเฟียร์ $\log Ne \sim 10$) อุณหภูมิของการลุกจ้าน้อยกว่าอุณหภูมิของคอโรนาที่ล้อมรอบถึง $๑๐^{๒}$ เท่า แต่ความดันของการลุกจ้ามากกว่าความดันของคอโรนาที่ล้อมรอบถึง $๑๐^{๒}$ เท่า ด้วยเหตุนี้เอง การลุกจ้าจึงไม่มีการเสถียรภาพทางพลศาสตร์ (dynamically

unstable) มันจะเกิดกระบวนการแพร่เพื่อให้มีความดันเท่ากัน ดังนั้น การลุกจ้าจึงมีอายุสั้น เนื่องจากอุณหภูมิของการลุกจ้ามีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของคอโรนาที่ล้อมรอบ สิ่งนี้อาจจะเนื่องจากกลไกการเย็นลงก็อาจเป็นได้ แต่เรายังไม่ทราบแน่ชัด

๕.๒ ปัญหาเกี่ยวกับพลังงานของการลุกจ้า

ปัจจุบันนี้รู้สึกว่าจะมีความเข้าใจแจ่มชัดเกี่ยวกับการลุกจ้าบนดวงอาทิตย์ว่า เป็นเหตุวิบัติเกี่ยวกับพลังงาน พลังงานเหล่านั้นได้สะสมทีละน้อย ๆ อย่างช้า ๆ ในสนามแม่เหล็กของโครโมสเฟียร์ ถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นและอนุภาครังสีทันทีทันใด มีข้อมูลหลายอย่างจากการลุกจ้าที่สำคัญ ๆ และ รังสีที่ให้ออกมาจากการลุกจ้า ดังแสดงในรูป ๕.๑



รูป ๕.๑ แสดงลักษณะเฉพาะของการลุกจ้าขนาด 3^+ (Ellison, 1963)

หอสมุดกลาง

คลื่นและอนุภาค เราสามารถสังเกตและวัดได้ด้วยเครื่องมือทางฟิสิกส์ แต่การสะสมพลังงานระยะแรกในสนามแม่เหล็ก และกลไกในการปลดปล่อยพลังงานเหล่านั้น ยังเป็นเรื่องที่ได้มาจากข้อพิสูจน์อื่น ทั้งนี้เนื่องจาก สนามแม่เหล็กภายในบริเวณการลุกจ้าไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรง

อย่างไรก็ตาม มีหลักฐานยืนยันที่แข็งแรงว่า พลังงานที่ให้ออกมาจากการลุกจ้านั้นได้มาจากสนามแม่เหล็กเฉพาะแหลง (local magnetic field) ในระดับที่เกิดการลุกจ้า เราสังเกตพบว่า ฟิลาเมนต์สว่างของการลุกจ้าขนาดใหญ่ จะอยู่ในระดับสูงประมาณ ๒๐,๐๐๐ กม เหนือบริเวณเมืดของจุดบนดวงอาทิตย์ซึ่งมีสนามแม่เหล็กที่ซับซ้อน ความซับซ้อนของสนามแม่เหล็กของจุดหรือกลุมจุดบนดวงอาทิตย์ที่เกี่ยวข้องกับการลุกจ้า เป็นรูปลักษณ์ที่เดนชัด (outstanding feature) เช่น กลุมจุดแบบ γ หรือ $\beta\gamma$ มีโอกาสที่จะเกิดการลุกจ้าขนาดใหญ่ พร้อมกับส่งคลื่นวิทยุแบบ IV (Type IV radio emission; cm, dm, C. de Jager 1965) มากกวากลุมจุดแบบ β หรือ α ซึ่งมีขนาดเดียวกันถึง ๕ เท่า เราพบว่าการลุกจ้าขนาดใหญ่พร้อมกับส่งคลื่นวิทยุแบบ IV เกิดขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงริ้วรอยกระสวนในแสงไฮโดรเจนอัลฟา ($H\alpha$ striation patterns) ริ้วรอยกระสวนในแสงไฮโดรเจนอัลฟาเชื่อว่า เป็นตัวชี้แนะอย่างดีให้เรารู้ถึงการจัดวางตัวของสนามแม่เหล็กในโครโมสเฟียร์ ซีเวอร์นี (Severny, 1958 อ้างในเอลลิสัน 1963) และอีแวน (Evans, 1959 อ้างในเอลลิสัน 1963) ได้สังเกตพบว่า การลุกจ้ามีความเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กในระดับโฟโตสเฟียร์ ซึ่งบางส่วนของสนามแม่เหล็กถูกทำลายไปและบางส่วนมีการจัดวางตัวใหม่

ขอให้พิจารณาพลังงานที่ให้ออกมาจากการลุกจ้า ขนาด 3^+ เพื่อเป็นพื้นฐานประกอบในหัวข้อ ๕.๒.๑, ๕.๒.๒ และ ๕.๒.๓

๕.๒.๑ <u>พลังงานในช่วงคลื่นแสงที่ให้ออกมาจากการลุกจ้าขนาด 3^+</u>

เอลลิสัน (1963) ได้พิจารณาพลังงานที่ให้ออกมาจากการลุกจ้าขนาด 3^+ เขาได้แยกพิจารณาพลังงานที่ให้ออกมาเป็น ๒ พวก คือ พลังงานที่ให้ออกมาในรูปของเส้นสว่าง

(profiles of the emission lines) และพลังงานที่ให้ออกมาในรูปของแสงขาว (the white light continuum emission) ซึ่งมีค่าดังนี้

พลังงานที่ให้ออกมาในรูปของเส้นสว่าง ประมาณ ๕ x ๑๐^{๓๑} เออร์ก

พลังงานที่ให้ออกมาในรูปของแสงสว่าง ประมาณ ๘ x ๑๐^{๓๑} เออร์ก

รวมพลังงานทั้งหมดที่การลุกจ้าขนาด 3^+ ให้ออกมา ประมาณ ๑.๓ x ๑๐^{๓๒} เออร์ก ค่าพลังงานค่านี้อาจเป็นค่าพลังงานอย่างต่ำ เนื่องจากพลังงานที่ให้ออกมาในรูปของเส้นสว่างนอกขอบเขตที่มองเห็นได้ตัดทิ้งไป ควรสังเกตว่า ค่าพลังงานจากการลุกจ้าขนาด 3^+ ทั้งหมดประมาณ ๑.๓ x ๑๐^{๓๒} เออร์กนี้มีค่าประมาณ ๑/๓๐ ของพลังงานที่ดวงอาทิตย์ให้ออกมาทั้งหมดต่อวินาที (= ๓.๘ x ๑๐^{๓๓} เออร์ก/วินาที) ค่าตัวเลขเปรียบเทียบนี้ แสดงให้เห็นว่า พลังงานจากการลุกจ้าขนาด 3^+ นั้นมีค่าจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่ดวงอาทิตย์ให้ออกมา ต่อ วินาที

๕.๒.๒ <u>พลังงานของอนุภาคที่ให้ออกมาจากการลุกจ้า</u>

อนุภาคที่ถูกเร่งออกมาจากการลุกจ้าขนาดใหญ่ อาจแยกพิจารณาได้เป็น ก. อนุภาคที่ทำให้เกิดพายุแม่เหล็ก (magnetic storm particles -electrons) ข. รังสีคอสมิคโปรตอนที่มีพลังงานต่ำ (low-energy cosmic ray -protons) และ ค. โปรตอนที่มีพลังงานสูง (protons with relativistic energies) อนุภาคเหล่านี้อาจมีพลังงานอยู่ในย่านจาก ๐ ถึง ๑๐^{๑๑} ev

ค่าปริมาณพลังงานที่การลุกจ้าให้ออกมาในรูปของอนุภาคที่มีพลังงานสูง กะประมาณว่าแปรค่าระหว่าง ๑๐^{๒๙}- ๑๐^{๓๒}เออร์ก ค่านี้เป็นค่าที่ไม่แน่นอนเพราะอนุภาคเหล่านั้นอาจจะมีการชนกัน สูญเสียพลังงานไป ในสนามแม่เหล็กของอาณาบริเวณกัมมันต์ และในระหว่างการเดินทางมาถึงโลก

๕.๒.๓ <u>แหล่งพลังงานของการลุกจ้า</u>

เราได้เห็นแล้วว่า พลังงานที่การลุกจ้าขนาด 3^+ ให้ออกมาทางแสงทั้งหมด(optical

emission) มีค่าประมาณ $๑๐^{๓๒}$ เออร์ก พลังงานค่านี้มีค่ามากกว่าพลังงานทั้งหมดที่มีในบรรยากาศของดวงอาทิตย์เหนือระดับโฟโตสเฟียร์ เมื่อการลุกจ้ามีพื้นที่ ประมาณ $๑๐^{๒๐}$ ซม^{๒} และมีความลึกประมาณ $๑๐^{๙}$ ซม จะได้ปริมาตรของการลุกจ้า ประมาณ $๑๐^{๒๙}$ ซม^{๓} ปริมาตรค่านี้ถือว่าเป็นค่ากำหนดสูงสุดของการลุกจ้าขนาด 3^{+} ปริมาตรที่ให้พลังงานออกมาจริง ๆ อาจจะมีค่าน้อยกว่าค่ากำหนดนี้ ดังนั้น พลังงานที่การลุกจ้าให้ออกมามีค่าอย่างน้อย $๑๐^{๓}$ เออร์ก/ซม^{๓} ค่านี้เรียกว่า ความหนาแน่นพลังงาน (energy density) ของการลุกจ้า

ความหนาแน่นพลังงานของโครโมสเฟียร์สงบโดยปกติ มีค่าประมาณ ๑–๑๐ เออร์ก/ซม^{๓} (Smith & Smith , 1963) เราจะได้ว่า อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นพลังงานของการลุกจ้า ต่อ ความหนาแน่นพลังงานของบริเวณที่ไม่มีการลุกจ้าในโครโมสเฟียร์ มีค่าประมาณ $๑๐^{๒}$ - $๑๐^{๓}$ พลังงานจากการเคลื่อนที่ (dynamics energy) แทบจะไม่ต้องกล่าวถึง เพราะว่าต้องการการเคลื่อนที่ในโครโมสเฟียร์ที่มีอัตราเร็วถึง ๑๐๐ กม/วินาที การเกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ในบรรยากาศของดวงอาทิตย์ อาจจะเป็นแหล่งพลังงานให้แก่การลุกจ้า ถ้าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นก็น่าจะได้พบหลักฐาน จากการผิดปกติของสเปกตรัม และการให้นิวตรอนจากการลุกจ้า แต่จากการตรวจวัดก็ไม่พบนิวตรอนจากการลุกจ้า รวมทั้งการพิจารณาในแง่ของอุณหภูมิของการลุกจ้า จึงเชื่อว่า แหล่งพลังงานจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ในบรรยากาศของดวงอาทิตย์ ไม่น่าจะมีได้

ยังมีแหล่งพลังงานที่เหมาะสมอีกแหล่งหนึ่ง คือ สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มจุดบนดวงอาทิตย์ ซึ่งจะเป็นแหล่งที่สะสมพลังงานเอาไว้ จากการศึกษาวิจัยของ เอลลิสัน (1963) ได้ให้ข้อสังเกตเกี่ยวกับแหล่งพลังงานของการลุกจ้า ซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้

๑. จากการสังเกต พบว่าไม่มีมวลสารไหลเข้าไปในบริเวณที่เกิดการลุกจ้า และจากสเปกตรัม ก็พบว่าไม่มีการเคลื่อนที่ของมวลสารเกิดขึ้นในบริเวณนั้นก่อนที่จะเกิดการลุกจ้า

๒. พลังงานความร้อนทั้งหมดในบรรยากาศของดวงอาทิตย์เหนือระดับโฟโตสเฟียร์ มีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ปลอยออกมาจากการลุกจ้า แม้ว่าพลังงานเหล่านั้นจะมารวมอยู่ในบริเวณที่เกิดการลุกจ้า

๓. พลังงานจะต้องถูกสะสมภายในบริเวณที่จะเกิดการลุกจ้าอย่างช้า ๆ จนกระทั่ง

ถึงการปลดปล่อยพลังงานออกมาอย่างทันทีทันใด ซึ่งก็คือ เฟสวาบ

๔. พลังงานดูเหมือนว่า จะสะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กเฉพาะแหล่ง ถ้าพลังงานของการลุกจ้าได้มาจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้น $H^2/8\pi$ มีค่าประมาณ ๑๐^{๓} เออร์ก/ซม^{๓} และสนามแม่เหล็กที่ถูกทำลายจะมีค่า ประมาณ ๑๕๐ เกาส์

จากแนวความคิดนี้ เราพอจะมองเห็นได้ว่า พลังงานของการลุกจ้าไม่ได้มาจากภายนอกปริมาตรของการลุกจ้า แหล่งพลังงานของการลุกจ้า น่าจะมาจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นตัวกลางในการสะสมพลังงาน และจะต้องมีกลไกพิเศษในการปลดปล่อยพลังงานเหล่านั้น จากตัวเลขค่าความหนาแน่นพลังงานของการลุกจ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับสนามแม่เหล็กที่มีความแรง ๑๕๐ เกาส์ ได้ถูกทำลายไป สนามแม่เหล็กขนาดนี้ เป็นสนามแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มจุดบนดวงอาทิตย์ใหญ่ ๆ และมีอยู่โดยทั่วไป แนวความคิดนี้ก็น่าจะเป็นไปได้

๕.๓ การลุกจ้าที่เกิดซ้ำเดิม และความสำคัญต่อกลไกการเกิดการลุกจ้า

เคยมีความคิดว่า ไม่มีการลุกจ้า ๒ อันที่เหมือนกันเลย และในทำนองเดียวกัน ก็ไม่มีจุดบนดวงอาทิตย์ ๒ จุด ที่มีรูปร่างเหมือนกัน จากการศึกษาของ เอลลิสัน และ คณะ (Ellison et al, 1960) และ เอลลิสัน (1963) เขาได้พบกลุ่มของการลุกจ้าที่เกิดต่อเนื่องกัน เมื่อ วันที่ ๑๐-๑๓ เมษายน ค.ศ. ๑๙๕๙ จากการศึกษาฟิล์มของการลุกจ้าจากเคปทาวน์ (Capetown flare films) ซึ่งเป็นการลุกจ้าขนาด 3^+ การลุกจ้าเหล่านี้มีความคล้ายคลึงกันอย่างมากที่สุด การลุกจ้าเหล่านี้เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน ในอาณาบริเวณกัมมันต์เดียวกัน ซึ่งพูดได้ว่าเกิดขึ้นเหนือกลุ่มจุดบนดวงอาทิตย์ที่สนามแม่เหล็กมีรูปร่างแบบเดียวกัน (unique magnetic field configuration) สนามแม่เหล็กนี้เป็นข้อยืนยันว่า สนามแม่เหล็กสามารถที่จะสะสมพลังงานครั้งแล้วครั้งเล่า ในรูปแบบความเข้มเหมือนกันได้ และสามารถปลดปล่อยพลังงานซ้ำแล้วซ้ำเล่า ชั่วระยะเวลาหลายวัน

การเกิดการลุกจ้าต่อเนื่องกันเช่นนี้มีน้อยมาก แต่โดยแท้จริงแล้วก็สามารถจะมีได้ ปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นหลักฐานที่สำคัญยิ่งสำหรับทฤษฎีทางแม่เหล็กของการลุกจ้า เราเรียกการลุกจ้าที่เกิดต่อเนื่องกันว่า การลุกจ้าที่เกิดซ้ำเดิม(homologous flare) ซึ่งให้คำ

จำกัดความว่า "การลุกจ้าที่เกิดซ้ำเดิม คือ การลุกจ้าที่เกิดติดต่อกันไปในอาณาบริเวณกัมมันต์เดียวกัน ในตำแหน่งสัมพัทธ์กับจุดบนดวงอาทิตย์แบบเดียวกันในอาณาบริเวณกัมมันต์นั้น แสดงกระสวนโครงสร้างและมีการพัฒนาแบบเดียวกัน"

เรื่องการลุกจ้าที่เกิดซ้ำเดิมนี้ ผู้ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะคนแรก คือ วาล์ดเมียร์(1938) ดอดสัน และ เฮคีแมน (1949)ก็ได้ศึกษาเรื่องนี้ โดยศึกษาอาณาบริเวณกัมมันต์ ๓ แห่ง พบว่า การลุกจ้าที่เกิดขึ้นในวันถัดไปเกิดในตำแหน่งเดิมจริง ๆ สมิธ (H.J.Smith, 1962c) ก็ได้ศึกษาเรื่องนี้จากการลุกจ้าขนาด ๒ และ ๓ ก็พบว่ามีการลุกจ้าเกิดซ้ำที่เดิม

จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการลุกจ้าที่เกิดซ้ำเดิมนี้ เอลลิสัน ได้ให้ข้อเสนอแนะไว้ดังนี้

๑. เนื่องจากการลุกจ้านั้นเกิดซ้ำเดิม เป็นหลักฐานยืนยันว่า สนามแม่เหล็กสามารถสะสมพลังงาน และปลดปล่อยพลังงานออก โดยอาศัยการกระทำของกลไกการกระทำซ้ำบางอัน

๒. ความคล้ายคลึงของตำแหน่งแหล่งเกิด และโครงสร้างของการลุกจ้าที่เกิดต่อเนื่องกัน ชี้ให้เห็นว่า หลังจากการระเบิดทำลายสนามแม่เหล็กแต่ละครั้ง สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นใหม่ โดยมีรูปร่างและความเข้มเหมือนเดิม คือ เหมือนกับก่อนเกิดภาวะลุกจ้าอันก่อน

๓. เวลาในการสะสมพลังงานเป็นช่วง ๆ ระหว่างการลุกจ้าที่เกิดต่อเนื่องกัน มีค่าประมาณ ๑๐ เท่า ของช่วงเวลาของการลุกจ้าแต่ละอัน ช่วงเวลานี้ อาจจะแปรค่าไปประมาณ ๑/๒ ชั่วโมง สำหรับการลุกจ้าขนาดเล็ก จนถึง ๒๔ ชั่วโมง สำหรับการลุกจ้าขนาด ๒+ และ ๓

๔. ความเกี่ยวเนื่องกันของสนามแม่เหล็ก (magnetic linkage) ต้องมีอยู่ และเกี่ยวข้องกับการลุกจ้าในบริเวณที่ห่างออกไปถึง ประมาณ ๒๐๐,๐๐๐ กม

๕.๔ แบบจำลองการลุกจ้า

จากการศึกลักษณะและสมบัติต่าง ๆ ของการลุกจ้า นักดาราศาสตร์ก็พยายามที่จะสร้างแบบจำลอง เพื่อที่จะอธิบายกลไกการเกิดการลุกจ้า แต่เนื่องจากการลุกจ้านั้นมักจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความซับซ้อน จึงเป็นการยากที่จะใช้แบบจำลองอย่างง่าย ๆ มาอธิบาย

ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างครบถ้วน อย่างไรก็ดี นักดาราศาสตร์ก็พยายามสร้างแบบจำลองขึ้นมา แม้ว่าจะแก้ปัญหาได้ไม่หมด แต่ก็พอจะเป็นแนวทาง ปัญหาหลัก ๒ ประการที่นักดาราศาสตร์พยายามจะหาคำตอบ ก็คือ อะไรคือแหล่งกำเนิดของการลุกจ้า และด้วยกระบวนการกลไกอะไรที่ผลิตพลังงานและส่งออกมาให้สังเกตได้

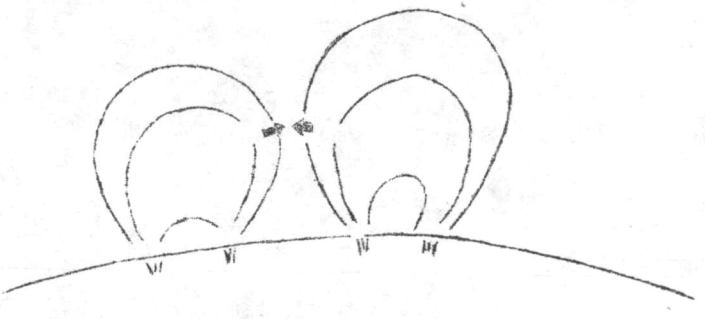
แนวทางที่จะพิจารณาในการสร้างแบบจำลองอธิบายการเกิดการลุกจ้าก็คือ พิจารณาในแง่พลังงาน ความหนาแน่น อุณหภูมิ อายุ ความสว่างทันทีทันใด คลื่นวิทยุ รังสีต่าง ๆ และการลุกจ้าเกิดขึ้นในบริเวณกลุมจุดบนดวงอาทิตย์ที่มีความซับซ้อน ได้มีนักดาราศาสตร์คิดตั้งทฤษฎีขึ้นมาหลายทฤษฎี เช่น ทฤษฎีการถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electrical Discharge Theory) ซึ่งตั้งโดยโจวาเนลลี (1946, 1947, 1948 อ้างใน สมิธ และ สมิธ 1963) แบบจำลองแมกนีโตไฮโดรไดนามิกส์ของการลุกจ้า (Magnetohydrodynamic Model) ซึ่งตั้งโดย พิดดิงตัน (1958 อ้างใน สมิธ และ สมิธ 1963) ทฤษฎีการลุกจ้าและจุดสะเทินในสนามแม่เหล็ก (Flares and Magnetic Neutral Point) ซึ่งตั้งโดย ซีเวอร์นี (1958 อ้างใน สมิธ และ สมิธ 1963) เป็นต้น ทฤษฎีที่ได้กล่าวถึงเหล่านั้นมีความเกี่ยวพันกันเพื่อที่จะปรับปรุงแก้ไขให้ได้มาซึ่งทฤษฎีที่สมบูรณ์ แต่ปัจจุบันวงการดาราศาสตร์ยังไม่บรรลุเป้าหมายอันนี้

ในที่นี้ เราลองพิจารณาในแง่ทั่ว ๆ ไป เพื่อเป็นแนวทางในทางความคิด ทั้งนี้เพราะว่าในเรื่องการลุกจ้านี้ยังไม่มีทฤษฎีใดที่สมบูรณ์

แนวความคิดเกี่ยวกับแหล่งพลังงานของการลุกจ้านั้น ปัจจุบันนักดาราศาสตร์เชื่อว่าได้มาจากสนามแม่เหล็กในบริเวณที่เกิดการลุกจ้า ทั้งนี้เนื่องจากการลุกจ้า มีความสัมพันธ์กับกลุมจุดบนดวงอาทิตย์ ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ ๕.๒.๓ ส่วนกระบวนการกลไกในการผลิตพลังงานนั้น ยังไม่เป็นที่แน่นอน ยังมีปัญหาขัดแย้งกันอยู่ บางก็ว่า การลุกจ้าเกิดจากการที่สนามแม่เหล็กยุบตัว (collapsing magnetic field) เปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กเป็นพลังงานจลน์ รังสี และ อนุภาคที่มีพลังงานในบริเวณเล็ก ๆ

ปัญหาความหนาแน่นที่มีค่ามากในบริเวณการลุกจ้า ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นอาจจะเนื่องมาจากการอัดตัวของสนามแม่เหล็ก แนวความคิดนี้ได้มาจากข้อเสนอแนะของ ซีเวอร์นี

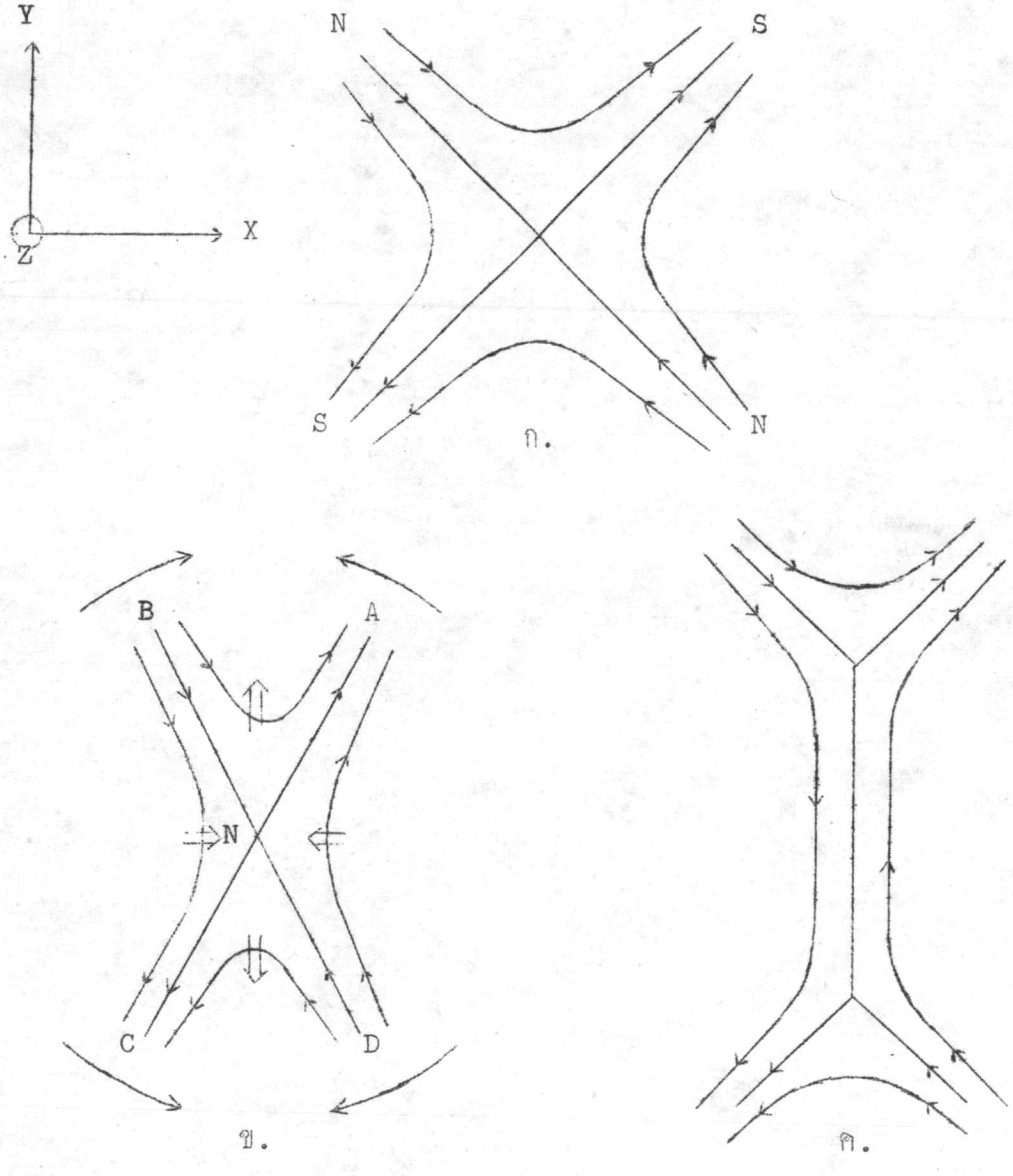
(๑๙๕๘)แห่งหอดูดาวไครมีน(Crimean Observatory) ซึ่งแสดงว่า แหล่งกำเนิดของการลุกจ้าเกี่ยวข้องกับการไม่เสถียรภาพของสนามแม่เหล็ก จากการสังเกตสนามแม่เหล็กในบริเวณที่เกิดการลุกจ้า ทั้งก่อนและหลัง แสดงว่าสนามแม่เหล็กแตกต่างกันไป และดูเหมือนว่าการลุกจ้าเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กที่ยุบตัว เนื่องจากพลาสมาในโครโมสเฟียร์และคอโรนาเส้นแรงแม่เหล็กฝังตัวอยู่ในสสาร เมื่อสนามแม่เหล็กยุบตัวลงสสารก็ยุบตัวลงด้วย ก็ทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โจวาเนลลี(๑๙๓๙ อ้างใน สมิธ และ สมิธ ๑๙๖๓) ได้ให้ข้อเสนอแนะว่า การลุกจ้าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก และการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของจุดบนดวงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กับการเกิดการลุกจ้า บรูเซค(๑๙๕๙ อ้างใน สมิธ และ สมิธ ๑๙๖๓) ได้สังเกตพบการแตกตัวของจุดบนดวงอาทิตย์ขนาดใหญ่ออกเป็นจุดเล็กหลายจุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แตกตัวออกเป็นกลุ่มจุดซึ่งมีสภาพขั้วตรงกันข้าม มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการลุกจ้า จากแนวความคิดเหล่านี้ เราพอจะมองเห็นกลไกการเกิดการลุกจ้าได้ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กยุบตัวลง ความหนาแน่นของพลาสมาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความดันภายในของพลาสมาจะเพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มน้อยกว่าความดันแม่เหล็ก (magnetic pressure) จะทำให้เกิดการไม่เสถียรภาพ และยุบตัวต่อไป ทำให้เกิดบริเวณเล็ก ๆ ที่มีความหนาแน่นสูง แต่เมื่อถึงจุดหนึ่ง เมื่อความหนาแน่นพลังงานจลน์ (kinetic energy density) ของพลาสมามีค่ามากกว่าความหนาแน่นพลังงานแม่เหล็ก (magnetic energy density) ก็จะเกิดการขยายตัว และคิดว่า คลื่นกระแทก (shock wave) เกิดขึ้นขณะที่พลาสมามีความหนาแน่นมากที่สุด และคิดว่า ปรากฏการณ์ทางพลศาสตร์ต่าง ๆ (dynamic phenomena) มีแหล่งกำเนิดหลังจากการเกิดการลุกจ้า และเนื่องจากการขยายตัวนี้



รูป ๕.๒ แสดงแหล่งกำเนิดของการลุกจ้า เนื่องจากสนามแม่เหล็ก ๒ สนามเข้ามาใกล้กัน ทำให้เกิดการไม่เสถียรภาพของพลาสมา

๕.๔.๑ <u>ทฤษฎีจุดสะเทินของการลุกจ้า</u>

ซีเวอร์นี และ คณะ (Severny et al, 1958) แห่งหอดูดาวไครมีน ได้วัดองค์ประกอบตามยาวของสนามแม่เหล็ก จากการสังเกตของเขา เขาย้ำถึงบทบาทของจุดสะเทิน และพบว่า ถ้าความชัน (gradient) ของสนามแม่เหล็กมีค่ามาก จะเป็นกลไกให้เกิดการลุกจ้า ชาทซ์มาน (Schatzman, 1960)ได้ให้แบบจำลองของจุดสะเทินที่เด่นชัด ดังรูป ๕.๓



รูป ๕.๓ แสดง จุดสะเทิน และการเกิดพินช์

รูป ๕.๓ก แสดงการจัดวางตัวของขั้วเหนือ ๒ ขั้ว และขั้วใต้ ๒ ขั้ว ทำให้เกิดเส้นที่แปลก (line of singularity) เชื่อมต่อระหว่างขั้วที่เหมือนกัน จุดตัดของเส้นที่แปลกนี้คือจุดสะเทิน ต่อไปสมมติว่า ขั้วเลื่อนไปในแนวที่ทำให้มุม $A\hat{N}B$ และ $C\hat{N}D$ ลดลง ดังรูป ๕.๓ข ในการเคลื่อนที่นั้น ทำให้มีกระแสไหลในแกน Z กระแสนี้จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กในทิศทางการเคลื่อนที่นั้น ผลก็คือ สสารและสนามจะถูกบีบอัดในทิศทาง X และยืดออกในทิศทาง Y สุดท้ายจะเป็นแบบรูป ๕.๓ค จุดสะเทินจะกลายเป็นพื้นผิวที่ล้อมรอบโดยสนามแม่เหล็กที่ขนานกันแต่มีทิศทางตรงกันข้าม กระแส แอนที-เลนซ์ (anti-Lenz current) ที่ไหลจะทำให้ดูดกัน เป็นการอัดพลาสมาที่อยู่ระหว่างกลาง

การบีบอัดในตัวเองในพลาสมา เรียกว่า ผลพินช์ (Pinch effect) ตามกฎของอัมแปร์ ถ้ากระแสไหลในทิศทางเดียวกันในเส้นลวด ๒ เส้น ที่ขนานใกล้กัน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำ จะดูดซึ่งกันและกัน และในทำนองเดียวกัน กระแสในตัวนำแต่ละเส้นจะทำให้เกิดแรงบีบอัดบนตัวนำนั้น ถ้ากระแสไหลในพลาสมาที่ถูกบีบอัดได้ ผลพินช์จะทำให้อุณหภูมิและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นมากมาย ทฤษฎีการไม่เสถียรภาพแบบนี้ยังไม่สมบูรณ์ เรายังไม่รู้ว่าผลพินช์สามารถเกิดขึ้นในบรรยากาศของดวงอาทิตย์หรือไม่ และมีความทนทานพอที่จะอธิบายผลทางการลุกจ้า นักทฤษฎีหลายคนหวังอย่างยิ่งว่า มันน่าจะเป็นไปได้ แต่ข้อสำคัญก็คือเรายังไม่รู้แน่

ผลการวัดสนามแม่เหล็กในบริเวณที่เกิดการลุกจ้า ซีเวอร์นี พบว่า การลุกจ้าพัฒนาขึ้นที่จุดสะเทินหรือใกล้กับจุดสะเทิน ซึ่งสนามแม่เหล็กมีความชันมาก ในบริเวณจุดบนดวงอาทิตย์ไม่มีการกระจายของขั้วดังรูปที่ ๕.๓ และผลทางการสังเกตที่สนับสนุนแบบจำลองของเขา ก็คือการลุกจ้าบางอันมีผลทำให้สนามแม่เหล็กของกลุ่มจุดบนดวงอาทิตย์กระจายออกไปอีก และสนามแม่เหล็กรอบ ๆ จุดสะเทินก็อ่อนลง แต่เรื่องสนามแม่เหล็กนี้ยังมีความเห็นขัดแย้งกันอยู่ เกี่ยวกับว่าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนค่าหรือไม่

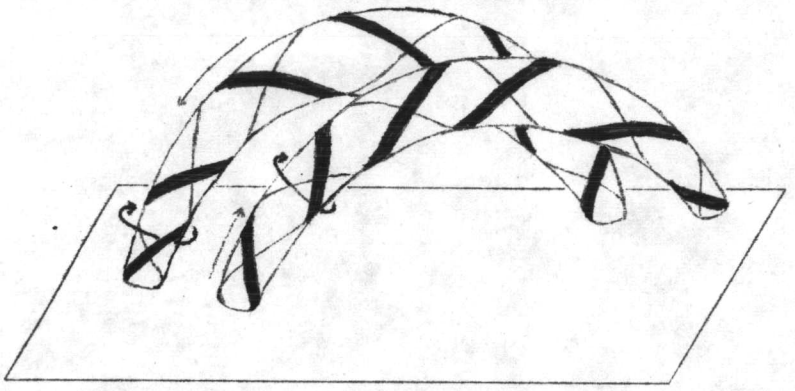
ซีเวอร์นี และ ชาบานสกี (Severny and Shabansky, 1960) ได้อธิบายแหล่งกำเนิดของการลุกจ้า ดังนี้ ใกล้กับจุดสะเทิน สนามแม่เหล็กอาจมีค่าสูงพอที่จะเอาชนะความต้านทานเนื่องจากความดันของพลาสมา และทำให้เกิดการอัดพลาสมาทันทีทันใด เมื่อความเร็ว

ของการอัดนั้นมีค่ามากกว่าความเร็วของเสียงในบริเวณนั้น(๒๐ กม/วินาที, ในบริเวณการลุกจ้า) คลื่นกระแทกก็จะเกิดขึ้น และลู่เข้าหาจุดสะเทิน หน้าคลื่นกระแทกจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ $๑๐^{๓}$กม/วินาที มากกว่าการส่งการรบกวนทางสนามแม่เหล็ก หน้าคลื่นกระแทกเหล่านี้จะชนกันที่จุดสะเทิน และสะท้อนกลับมายังพลาสมาที่ลู่เข้า เบื้องหลังของคลื่นสะท้อน ความหนาแน่นอาจจะเพิ่มถึง $๑๐^{๑๔}$ซม$^{-๓}$ และอุณหภูมิสูงถึง ๓ x $๑๐^{๗}$เคลวิน ในขณะที่คลื่นกระแทกปะทะกับบริเวณที่มีการอัด ซึ่งสนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นมากและมีสารที่มีสภาพความนำสูง คลื่นกระแทกก็จะหยุด โดยวิธีนี้ สนามแม่เหล็กที่ยุบตัว จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ การแผ่รังสี และอนุภาคที่มีพลังงาน ในบริเวณเล็ก ๆ นั้น

๕.๔.๒ <u>แบบจำลองการลุกจ้าของ โกล และ ฮอยล์</u>

โกล และ ฮอยล์ (1960 อ้างใน สมิธ และ สมิธ 1963) ได้พิจารณาการลุกจ้าว่ามีอะไรที่พิเศษออกไปจากธรรมดา เขาพิจารณาว่า ถ้าพลังงานของการลุกจ้าได้ออกมาจากสนามแม่เหล็ก กราฟทางแสงของการลุกจ้า แสดงว่าให้พลังงานออกมาทันทีทันใด ดังนั้น การจัดวางรูปร่างของสนามแม่เหล็กอย่างพิเศษจะต้องมีอยู่ เพื่อที่จะให้เกิดการระเบิดให้พลังงานในบริเวณเฉพาะแห่งได้

แบบจำลองของการลุกจ้าของโกลและฮอยล์ ได้มุ่งแก้ปัญหาเกี่ยวกับการจัดวางตัวของสนามแม่เหล็กที่พิเศษนี้ เขาพิจารณาว่า การลุกจ้าเป็นการแตกสลายของสนามแม่เหล็กที่มีการจัดวางตัวที่ไม่เสถียรภาพ พลังงานแม่เหล็กได้มาสะสมอยู่ในสนามนี้ การจัดวางตัวของสนามแม่เหล็กเช่นนั้นจะต้องเป็นสนามที่ไม่มีแรงกระทำ (force-free field) เพื่อป้องกันการไหลออกของพลังงานแม่เหล็ก โกล และ ฮอยล์ ได้เสนอแนะว่า มีฟิลาเมนต์สารแม่เหล็กที่บิด (twisted magnetized filament) เป็นตัวที่สะสมพลังงานและปลอยออกในโครโมสเฟียร์เป็นการลุกจ้า สนามที่ไม่มีแรงกระทำในโครโมสเฟียร์นั้น คิดว่าเป็นมัดของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีรูปชุ้มโค้ง (arch shaped) ปลายข้างหนึ่งโผล่ออกมาจากโฟโตสเฟียร์ และกลับลงสู่โฟโตสเฟียร์ที่ปลายอีกข้างหนึ่ง ดังแสดงในรูป ๕.๔



รูป ๕.๔ แสดงฟิลาเมนต์สารแม่เหล็กที่บิด ในแบบจำลองการลุกจ้าของ โกล และ ฮอยล์

โกล และ ฮอยล์ อธิบายลักษณะของรูปซุ้มโค้งนี้ว่า คล้ายกับไฟบริลของโครโมสเฟียร์ แม้ว่าเรายังไม่รู้อะไรเกี่ยวกับโครงสร้างทางแม่เหล็กของฟิลาเมนต์บิดแต่ละอัน กระแสไฟฟ้าที่แรงจะต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อเป็นไปตามเงื่อนไขของสนามที่ไม่มีแรงกระทำ วงจรจะต้องสมบูรณ์ในโฟโตสเฟียร์ ซึ่งเป็นแหล่งที่ให้แรงขับดัน การหมุนตามแนวราบในโฟโต-สเฟียร์เป็นกลไกมูลฐานที่ทำให้เกิดกระแสในโครโมสเฟียร์ ที่ปลายแต่ละอัน การหมุนจะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เพื่อที่จะขับดันกระแส การหมุนเช่นนั้นจะทำให้เกิดการบิดในเส้นฟลักซ์ และทำให้เกิดทอร์กกด (stress torque) ขณะที่รูปซุ้มโค้งนั้นปรากฏขึ้นในโครโมสเฟียร์ มันจะมีการบิดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโฟโตสเฟียร์ที่ราก พลังงานที่ต้องการที่จะเกิดการลุกจ้ามีค่า $๑๐^{๓๓}$ เออร์ก/ซม^{๓} สามารถสะสมภายในฟิลาเมนต์บิดระหว่าง ๑๐-๑๐๐ เส้น นี่คือข้อเสนอแนะเกี่ยวกับกลไกการเก็บสะสมพลังงานในแบบจำลองของโกลและฮอยล์ กระแสที่หอหุ้ม (shielding current) เพียงเล็กน้อยพอเพียงที่จะจำกัดขอบเขตของสนามที่ไม่มีแรงกระทำของฟิลาเมนต์บิด โกล และ ฮอยล์เสนอแนะว่า การลุกจ้าเป็นผลมาจากการโผล่ของฟิลาเมนต์บิดแบบนั้น ๒ อัน เรียงขนานกันไป ถ้ากระแสที่จำกัดขอบเขต (boundary current) ของฟิลาเมนต์บิดทั้งสองอันนั้นไหลในทิศทางเดียวกัน และถ้าการบิดนั้นบิดไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นกระแสภายในจะทำให้ฟิลาเมนต์บิด ๒ อันนั้นดูดกันและรวมกัน ผลที่ตามมาก็คือ ขณะที่ฟิลาเมนต์ ๒ อันแตะกันและเริ่มเข้าหากันกระแสภายในก็จะเพิ่มขึ้น นี่คือ เงื่อนไขสภาพการณ์ที่จำเป็นที่จะทำให้เกิดผลพินช์

๕.๔.๓ แบบจำลองการลุกจ้าแบบการระเหย

ธิรายามา (1974) ได้เสนอแนะแบบจำลองทางทฤษฎีของการลุกจ้า ให้ชื่อว่า แบบจำลองการลุกจ้าแบบการระเหย (Evaporating Flare Model) โดยอาศัยพื้นฐานว่า อนุภาคที่ออกไปจากโครโมสเฟียร์เป็นแบบการระเหย และความร้อนจากระดับสูงทำให้เกิดการลุกจ้าทางแสง โดยสมมติว่า การจัดวางตัวของสนามแม่เหล็กเป็นแบบแผ่นสะเทิน (neutral sheet type) ดังที่ เพทส์เชค (Petschek:1964) สเตอร์รอค(Sturrock, 1968) ไซโรวาทสกี (Syrovatsky, 1966) และ บรูเซค (Bruzek, 1969) ได้เสนอแนะเอาไว้

ทฤษฎีของเขาอาศัยสมมติฐานดังนี้ รูปร่างโดยทั่วไปของการลุกจ้า จะเป็นการลุกจ้าที่มีแถบสว่าง ๒ แถบ (two ribbon flare) ซึ่งวางตัวขนานกับเส้นสะเทินในสนามแม่เหล็กข้างละแถบ เขาได้ใช้ภาพถ่ายในแสงไฮโดรเจนอัลฟาของการลุกจ้า ๑๔ อัน จากหอดูดาวมิทากะ (Mitaka) เพื่อตรวจสอบสมมติฐานอันนี้ พบว่า ๑๐ อัน เป็นการลุกจ้าแบบ ๒ แถบ, ๔ อัน ไม่สามารถแยกแยะได้ชัดเจน เนื่องจากภาพทางการสังเกตการณ์ไม่ดีพอ และมีขนาดเล็ก เนื่องจากแผ่นที่สนามแม่เหล็กไม่มีการสังเกตเส้นสะเทินก็อาศัยโครงสร้าง ไฟบริล เทรด และฟิลาเมนต์หรือส่วนของฟิลาเมนต์ที่เหลืออยู่ และเขายังได้ศึกษาการลุกจ้าอีก ๔๓ อัน ซึ่งมีขนาด ๒ หรือมากกว่า โดยใช้ภาพยนต์ในแสงไฮโดรเจนอัลฟา คือ จากหอดูดาวแซกคราเมนโต พีค (Sacramento Peak observatory) จากการลุกจ้า ๓๓ อัน(ก.ค.๑๙๖๑ - ต.ค.๑๙๖๕) และจาก หอดูดวงอาทิตย์ลอคฮีด (Lockheed Solar Observatory) จากการลุกจ้า ๑๐ อัน (ก.ย. ๑๙๕๙ - มิ.ย. ๑๙๖๒) การลุกจ้า ๓๐ อัน แสดงว่าเป็นการลุกจ้าแบบ ๒ แถบ ๕ อัน มีแนวโน้มว่าจะเป็นการลุกจ้าแบบ ๒ แถบ ๘ อัน ไม่สามารถจะแยกแยะได้ เพราะภาพยนต์ไม่ได้แสดงระยะสุดท้ายและการลุกจ้ามีความซับซ้อนมาก มี ๒ แถบ เล็ก ๆ มากมาย หรืออาจจะเป็นปมภาพยนต์ที่ถ่ายส่วนใหญ่ถ่ายเมื่อมีสภาพทางการสังเกตการณ์ที่ดี แสดงให้เห็นว่าการลุกจ้าแบบ ๒ แถบอยู่ในอาณาบริเวณกัมมันต์ที่สว่าง โดยที่โครงสร้างที่มืดในแนวราบในแสงไฮโดรเจนอัลฟา เช่น ไฟบริล เทรด เป็นต้น ได้หายไป สิ่งนี้อาจหมายความว่า สนามแม่เหล็กไม่เป็นสนามในแนวราบ แต่อาจจะขยายตัวตรงออกไปยังคอโรนา

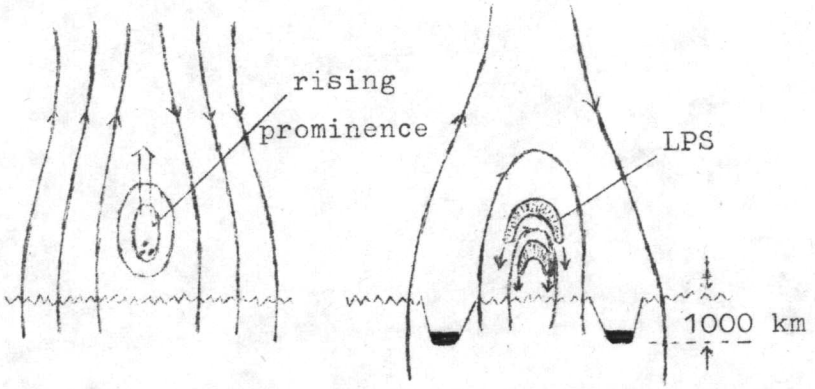
โพรมิเนนซ์ที่เคลื่อนที่ขึ้น และ/หรือการขยายตัวอย่างรวดเร็วของคอโรนาลอาช fast expanding coronal arches) อาจจะเป็นตัวจุดชนวนทำให้เกิดการลุกจ้า ประมาณครึ่งหนึ่งของการลุกจ้าขนาดใหญ่ พบว่ามีความสัมพันธ์กับฟิลาเมนต์ คือ มีฟิลาเมนต์เกิดขึ้นในบริเวณเส้นสะเทิน และฟิลาเมนต์จะหายไปก่อนที่จะเกิดการลุกจ้า (Smith and Ramsey, 1964) การเคลื่อนที่ลงซึ่งตรวจวัดโดย การเลื่อนดอปป์เลอร์ (Doppler shift) พบว่า เกิดขึ้นก่อนเกิดการลุกจ้าประมาณ ๒๐ นาที จากการศึกษาภาพยนต์ในแสงไฮโดรเจนอัลฟาของหอดูดาวแซกคราเมนโต พีค ก็ได้ข้อสรุปที่เหมือนกัน จากการลุกจ้า ๑๖ อัน ซึ่งมีฟิลาเมนต์มืดเกิดบนเส้นสะเทินก่อน พบว่า ๑๐ อัน มีการเปลี่ยนแปลง ๕ อัน ยังคงที่อยู่ และ ๑ อันมีการเปลี่ยนแปลงนิดหน่อย การลุกจ้าที่ไม่เกี่ยวข้องกับโพรมิเนนซ์ ก็จะพบการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ของคอโรนาลอาช ซึ่งสังเกตได้ในเส้นคอโรนาสีเขียว (Bruzek and Demastus 1970) เกิดขึ้นมาแทน

ภาพพจน์ของแบบจำลองการลุกจ้า รูป ๕.๕ แสดงขั้นตอนของการเกิดการลุกจ้า รูป ๕.๕ก แสดงรูปร่างก่อนเกิดการลุกจ้า ซึ่งมีโพรมิเนนซ์ที่มีอุณหภูมิ $๑๐^{๔}$ เคลวิน หรือการขยายตัวอย่างรวดเร็วของคอโรนาลอาชที่มีอุณหภูมิ $๑๐^{๖}$ เคลวิน โครงสร้างเหล่านี้จะวางตัวอยู่ในเส้นสะเทิน เมื่อสนามมีความชันมากขึ้น สนามที่หุ้มโพรมิเนนซ์ก็จะเพิ่ม แสดงว่ากระแสที่ไหลขนานกับแกนของโพรมิเนนซ์ก็เพิ่ม เนื่องจากการไม่เสถียรภาพแบบคิงค์ (kink instability) กระแสก็จะเริ่มเบนโค้งและโพรมิเนนซ์ก็จะเริ่มเคลื่อนที่ขึ้น (Hirayama, 1974) สิ่งนี้จะเกิดก่อนเกิดการลุกจ้าประมาณ ๒๐ - ๓๐ นาที (Smith and Ramsey, 1974) ความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นตอนแรกมีค่าน้อย $\leq$ ๑๐ กม/วินาที เมื่อโพรมิเนนซ์เคลื่อนที่ขึ้นก็จะเกิดช่องว่างในสนามแม่เหล็กถัดจากโพรมิเนนซ์ลงไป การยุบตัวอาจจะเกิดขึ้นจากทั้งสองข้าง หลังจากการยุบตัว ความร้อนที่เกิดจากจุดที่ต่อกัน คือ จุด X เคลื่อนที่ลงไปในโครโมสเฟียร์ และทำให้ส่วนบนสุดของโครโมสเฟียร์สว่างขึ้นทันทีทันใดและระเหย(รูป๕.๕ข) รูป ๕.๕ข' แสดงด้านข้างของ รูป ๕.๕ข

อนุภาคจำนวนมากที่ระเหยหนีออกจะต้องผ่านจุด X ซึ่งยังคงให้พลังงานความร้อนเคลื่อนที่ลง หลังจากที่เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมต่อกัน อนุภาคไม่สามารถจะหนีออกไปจากบ่วงแม่เหล็ก(magnetic loop)ได้อีก สิ่งนี้จะสังเกตได้ว่าเป็นการลุกจ้าทางรังสีเอกซ์อย่างอ่อน

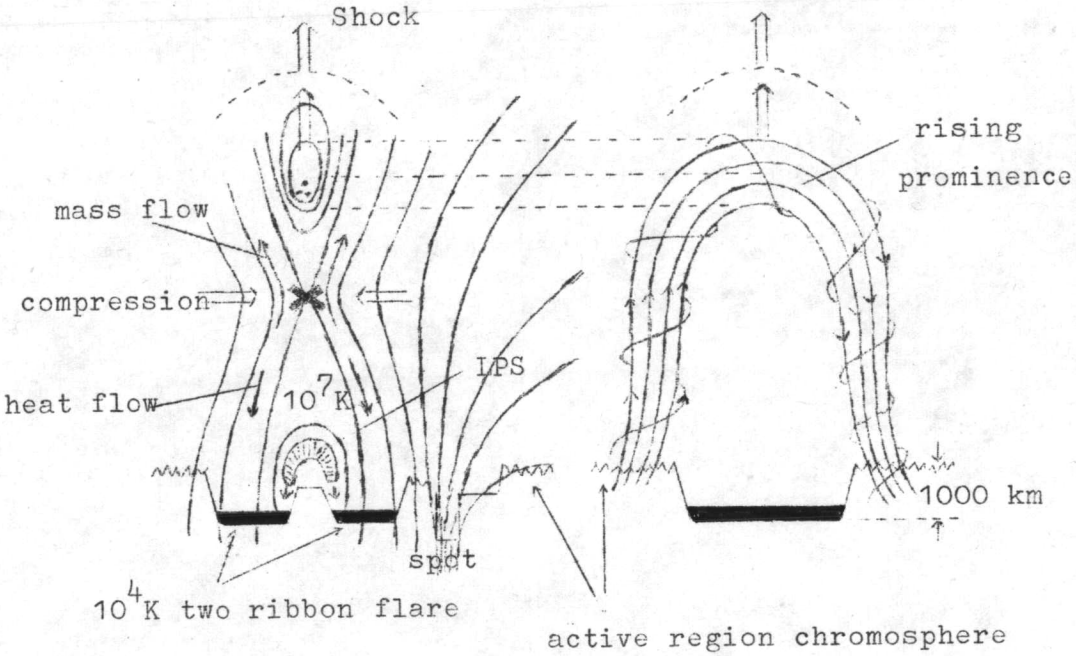
ก. Pre-flare

ค. Late phase



ข. Maximum phase

ฆ. Maximum side view



รูป ๕.๕ แสดงระยะต่าง ๆ ของการเกิดการลุกจ้า เส้นจางแสดงเส้นแรงแม่เหล็ก เส้นดำหนาแสดงการลุกจ้า โปรดสังเกตว่าการลุกจ้าในแสงไฮโดรเจนอัลฟ่าอยู่ต่ำกว่ายอดโครโมสเฟียร์ที่กัมมันต์ ๑๐๐๐ กม

(solf X-ray flare) ซึ่งมีอุณหภูมิ $๑๐^{๗}$ เคลวิน อุณหภูมิของการลุกจ้าประมาณ ๘,๐๐๐-๑๐,๐๐๐ เคลวิน (Švestka, 1972) การสมดุลย์ทางความดันระหว่าง การลุกจ้าทางรังสีเอกซ์อย่างอ่อนและการลุกจ้าทางแสงก็เกิดขึ้น ส่วนสูงสุดของโครโมสเฟียร์ขณะนี้เป็น ๑,๐๐๐ กม ต่ำกว่าส่วนยอดบนสุดของอาณาบริเวณกัมมันต์ก่อนเกิดการลุกจ้า

โพรมิเนนซ์เคลื่อนที่ขึ้นต่อไป จุด X ก็จะอยู่สูงขึ้นและความร้อนก็ยังคงไหลอยู่ ดังนั้น การขยายตัวของแถบสว่างก็จะสังเกตได้ ในส่วนล่างสุดอุณหภูมิจะลดลงจาก $๑๐^{๗}$ เป็น $๑๐^{๔}$ เคลวิน การที่สัณนิษฐานเช่นนี้ก็เพราะความหนาแน่นมีค่ามาก หรือเย็นลงโดยกระบวนการอื่นใดที่เกิดขึ้นก่อน และเมื่อระบบโพรมิเนนซ์แบบบ่วง (Loop Prominence System; L.P.S.) เคลื่อนที่สูงขึ้น ความกว้างของแถบสว่างก็จะแคบลง ดังรูป ๕.๕ค โปรดสังเกตว่า กระบวนการการระเหยไม่สามารถจะสังเกตได้ในแสงไฮโดรเจนอัลฟาเนื่องจากว่าแก๊สที่ระเหยนั้นร้อนมาก ส่วนบนของโพรมิเนนซ์อาจจะให้คลื่นกระแทกออกไป คลื่นกระแทกนี้เองอาจจะเป็นสาเหตุของการลุกจ้าทางคลื่นวิทยุ แบบ II หรือ แบบ IV