

บทที่ 4

ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน และผลสังเกตการณ์ที่แก้ไขสำหรับการวิเคราะห์

ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน และผลสังเกตการณ์ที่แก้ไขสำหรับการวิเคราะห์ ประกอบด้วย 2 หัวข้อ คือ 4.1 ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน, และ 4.2 ผลสังเกตการณ์ที่แก้ไขสำหรับการวิเคราะห์ สำหรับการถ่ายภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี (β Lyrae หรือ Sheliak) จากวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2543 ถึง 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543 เมื่อตำแหน่งของดาวคู่บีตา ไลรี ตามระบบพิกัดเส้นศูนย์สูตรฟ้าอยู่ที่ $\alpha = 18$ ชั่วโมง 50 นาที 06 วินาที และ $\delta = +33^{\circ}22'07''$ เมื่อ α , δ เป็นค่าไรต์แอสเซนชันและเดคลิเนชันของปีสังเกตการณ์ พ.ศ. 2543, และตำแหน่งลองจิจูดและละติจูดของหอดูดาวสิรินธร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ คือ $98^{\circ}56'08''$.07 ตะวันออก และ $18^{\circ}47'$ เหนือ ตามลำดับ

4.1 ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน

หัวข้อ 4.1 นี้ ประกอบด้วย 4.1.1 ตัวอย่างผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน, และ 4.1.2 ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐานทั้งหมด

4.1.1 ตัวอย่างผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน

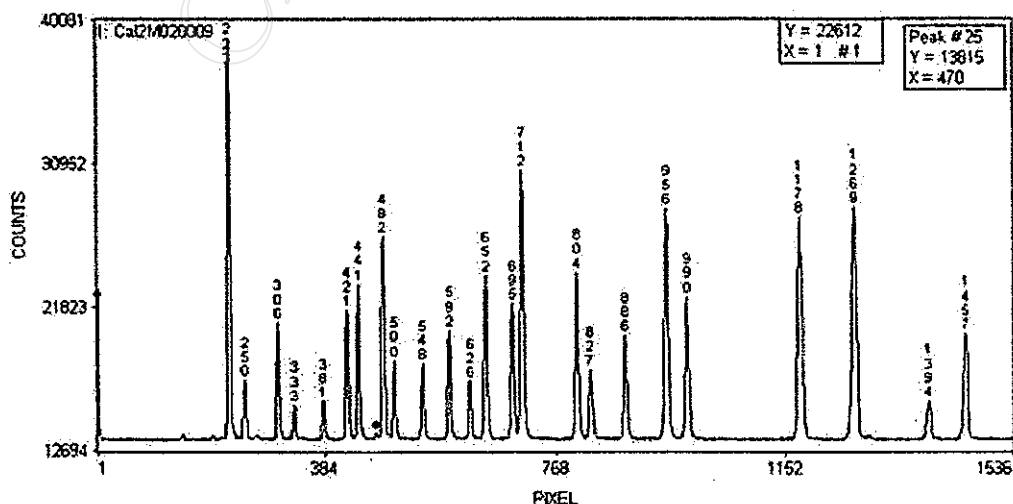
ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน คือ ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์หรือทดลองในเบื้องต้น ตามวิธีการสังเกตการณ์ที่เหมาะสมของ หัวข้อที่ 3.3.2 โดยผู้เขียนเลือกใช้วิธีการไม่ปกติในการถ่ายภาพสเปกตรัม ได้แก่ กรณีที่ 1 ไม่ใช้ Auto Flat-Field Correction และ Auto Background Subtraction, และ กรณีที่ 2 ไม่ใช้ Auto Flat-Field Correction แต่ใช้ Auto Background Subtraction เป็น Dynamic Background Image เท่านั้น ซึ่งผลสังเกตการณ์จะอยู่ในรูปของภาพสเปกตรัมที่ได้มาจากทั้งสองกรณี ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะแวดล้อมรอบๆ หอดูดาวสิรินธร ในขณะดำเนินการสังเกตการณ์ เช่น สถานะแวดล้อมดีจะใช้กรณีที่ 1, และถ้าสถานะแวดล้อมไม่ดีจะใช้กรณีที่ 2 เป็นต้น โดยมีรายละเอียดตามที่อธิบายในข้อที่ (3) ของหัวข้อที่ 3.3.1.2

ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐานของดาวคู่บีตา ไลรี เหล่านี้ แสดงเป็น 2 รูปแบบ คือ 1. ข้อมูลของภาพสเปกตรัมในหน่วยพิกเซล (เช่น ตัวอย่างใน หัวข้อที่ 3.3.3), และ 2. ข้อมูลของภาพสเปกตรัมในหน่วยนาโนเมตร สำหรับ non Calibrated Spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี (ในหัวข้อนี้) พบว่า รูปแบบที่ 2 จะให้ข้อมูลในแนวแกน x เป็นความยาวคลื่นแท้จริงในหน่วยนาโนเมตรของเส้นสเปกตรัมหรือแต่ละพิกเซลของภาพ ที่เหมาะสมจะนำไปวิเคราะห์ความผันแปรของค่าความยาวคลื่นต่อไป สำหรับกรณี Resolution ของเกรตติงต่ำ (600 ช่องต่อมิลลิเมตร) มีข้อสังเกตว่า ถ้าเราทำ Renormalize ภาพสเปกตรัมเหล่านี้ให้มี linear dispersion ของความยาวคลื่น นาโนเมตรต่อพิกเซล ให้เท่ากัน จะส่งผลกระทบต่อให้เกิดการเลื่อน (shift) ของค่าความยาวคลื่นหรือเส้นสเปกตรัมจากผลการคำนวณหรือดำเนินการ Renormalize นี้ ซึ่งจะไม่ถูกต้องหรือขาดความแม่นยำ หากว่าจะนำค่าความยาวคลื่นจากการทำ Renormalized แล้วนี้ไปวิเคราะห์ ดังนั้น ค่าความยาวคลื่นสำหรับการวิเคราะห์ ควรเป็นความยาวคลื่นแท้จริงจากการกำหนดสเกลโดยสเปกตรัมเปรียบ

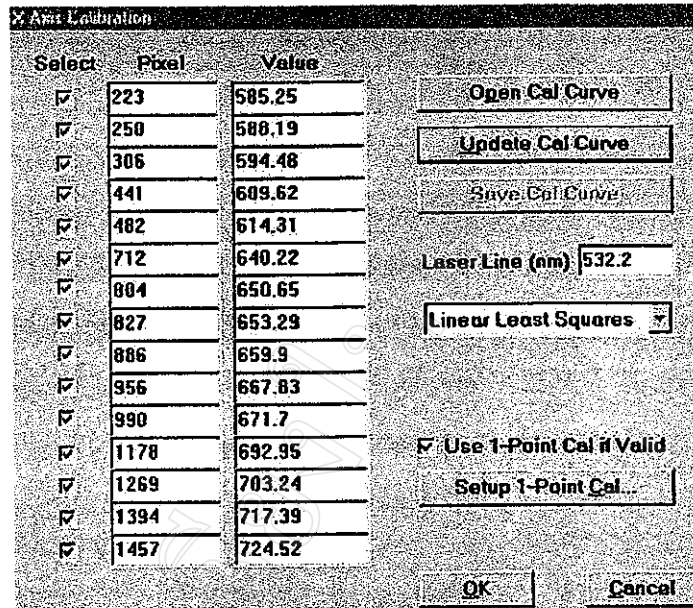
เทียบน็อนที่ใช้ค่าความยาวคลื่นมาตรฐานในภาคผนวก ข (ดังรูปที่ 3-6) โดยไม่ผ่านการ Renormalize และผลการคำนวณค่าความยาวคลื่นสำหรับเส้นสว่างของทุกภาพสเปกตรัมของดาวคูบีตา ไกรี สำหรับวิเคราะห์โดยไม่ผ่านการ Renormalize แสดงไว้ในคอลัมน์ความยาวคลื่นของตารางที่ 5-2 บทที่ 5 และมีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่า ถ้ากรณี resolution สูง หรือใช้เกรตติงที่มีจำนวนช่องต่อมิลลิเมตรมากกว่านี้ จะทำให้การ Renormalize ส่งผลกระทบต่อข้อมูลความยาวคลื่นสำหรับการวิเคราะห์น้อยมาก

ตัวอย่าง การแสดงข้อมูลของภาพสเปกตรัมให้อยู่ในหน่วยนาโนเมตรสำหรับ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไกรี ต่อเนื่องจากตัวอย่างใน หัวข้อที่ 3.3.3 (รูปที่ 3-8 ถึง 3-14) สำหรับภาพสเปกตรัมของดาวคูบีตา ไกรี ที่ดำเนินการถ่ายเมื่อ วันที่ 23 ตุลาคม พ.ศ. 2543 ที่เวลา 18:39:54 น. (หรือ 2451840.985 H.J.D.) และที่เวลา 18:43:29 น. (หรือ 2451840.988 H.J.D.) และผ่านการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลจากขบวนการการถ่ายภาพสเปกตรัมเหล่านี้แล้ว ดังรูปที่ 3-14(a) แต่ถ้าตรวจพบว่าให้ข้อมูลไม่ถูกต้อง เราจะต้องไม่นำข้อมูลหรือภาพสเปกตรัมทั้งขบวนการนี้ไปวิเคราะห์หรือคำนวณใดๆ แต่สำหรับขบวนการถ่ายภาพสเปกตรัมของตัวอย่างนี้มีความถูกต้อง ดังนั้น จึงสามารถนำไปวิเคราะห์ในลำดับต่อไป การคำนวณข้อมูลของภาพสเปกตรัมให้อยู่ในหน่วยนาโนเมตร มีลำดับดังนี้ คือ

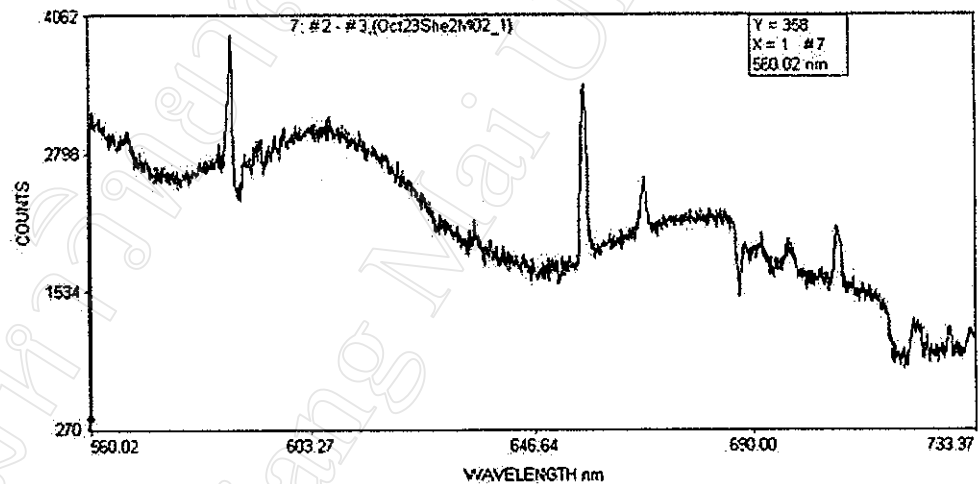
- (1). กำหนดสเกลบนภาพสเปกตรัมต่อขบวนการในแนวแกน x จากหน่วยพิกเซล (pixel) เป็นนาโนเมตร (nm) (ซึ่งดำเนินการเช่นเดียวกับ หัวข้อที่ 3.2.1.3.2 ดังรูปที่ 3-5) เริ่มจากแสดงภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบน็อน ดังรูปที่ 3-8 แล้วใช้คำสั่ง Peak Fider ที่ Control Palette เพื่อแสดงค่าพิกเซลบนเส้นสว่างต่างๆ ดังรูปที่ 4-1 เมื่อเราทราบค่าความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตรเหล่านี้แล้วโดยใช้ข้อมูลอ้างอิงตาม รูปที่ 3-6 หลังจากนั้นเรียกหน้าต่าง X-Axis Calibration เพื่อกำหนดสเกลบนทุกภาพสเปกตรัมของขบวนการนี้ (โดยใช้ข้อมูลของรูปที่ 4-1 และรูปที่ 3-6) ที่ Setup menu option: X Axis Calibration... แล้ว Update Cal Curve ดังรูปที่ 4-2
- (2). เมื่อผ่านขบวนการกำหนดสเกลตาม รูปที่ 4-2 แล้วจะได้ผลลัพธ์ของภาพสเปกตรัมของดาวคูบีตา ไกรี ที่อยู่ในหน่วยนาโนเมตร สำหรับ non Calibrated Spectrum สำหรับที่เวลา 2451840.985 H.J.D. และ 2451840.988 H.J.D. ดังรูปที่ 4-3 และ 4-4 ตามลำดับ



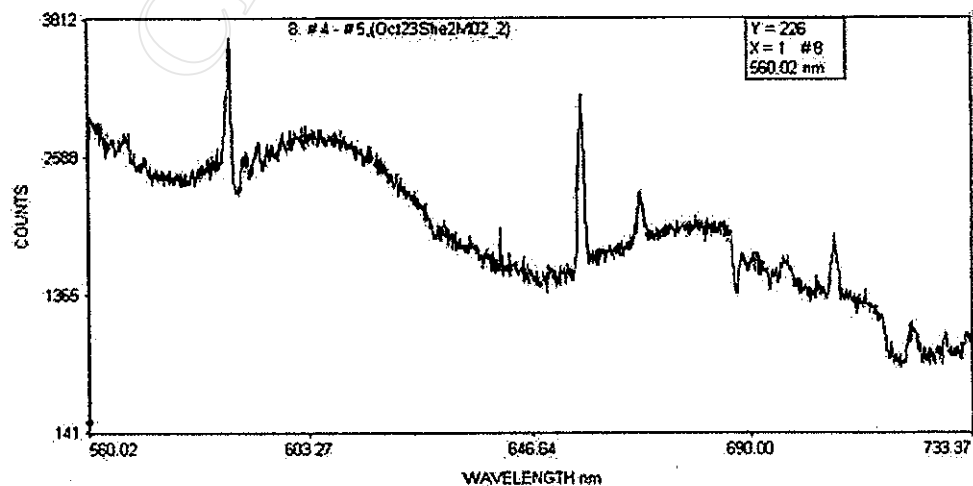
รูปที่ 4-1 ภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบน็อนของรูปที่ 3-8 ที่แสดงค่าพิกเซลบนเส้นสว่าง



รูปที่ 4-2 ภาพการกำหนดคสเกลบนแกน x ของภาพสเปกตรัมให้อยู่ในหน่วยนาโนเมตร โดยใช้ค่าความยาวคลื่นนาโนเมตรของเส้นสว่างจากรูปที่ 3-6 ที่ตรงกับค่าพิกเซลของเส้นสว่างจากรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-3 ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไกรี ที่ 2451840.985 H.J.D. ในหน่วยนาโนเมตร เมื่อใช้ภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบนิออนของรูปที่ 4-1 หรือ 3-8 เป็นตัวกำหนดสเกล



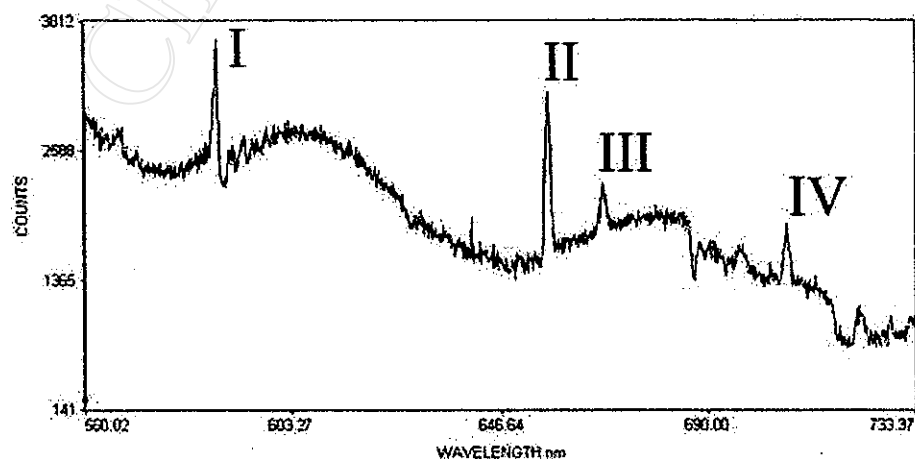
รูปที่ 4-4 ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไกรี ที่ 2451840.988 H.J.D. ในหน่วยนาโนเมตร เมื่อใช้ภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบนิออนของรูปที่ 4-1 หรือ 3-8 เป็นตัวกำหนดสเกล

มีข้อสังเกต 2 ข้อ คือ 1. รูปที่ 4-3 และ 4-4 ใช้สเปกตรัมเปรียบเทียบนีออนจากภาพเดียวกัน เพราะว่าภาพสเปกตรัมทั้งสองนี้อยู่ในขบวนการถ่ายภาพสเปกตรัมชุดเดียวกัน, และ 2. รูปที่ 4-2 สำหรับการกำหนดสเกลบนแกน x ควรจะกำหนดสเกลด้วยระยะห่างระหว่างเส้นสว่างอย่างสม่ำเสมอที่คลุมช่วงความยาวคลื่นทั้งหมดและให้ครบทุกคู่ (pixel, nm) ที่ช่องว่างของหน้าต่าง X Axis Calibration ทุกครั้ง เพราะว่า การอ่านค่าความยาวคลื่นของพื้นที่รับภาพของซีซีดีรีฟในหน่วยนาโนเมตร มี linear dispersion ไม่เท่ากัน

ทำนองเดียวกัน ชุดของภาพสเปกตรัมต่อขบวนการอื่นๆ ก็สามารถกำหนดสเกลบนแกน x หรือ X-Axis Calibration โดยใช้วิธีการเดียวกันกับตัวอย่างข้างต้น โดยใช้ภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบนีออนในขบวนการนั้นๆ เป็นตัวกำหนดสเกล ที่ Setup menu option: X Axis Calibration แต่มีข้อสังเกตว่า ถ้าหากเรานำภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบนีออนที่ไม่ได้อยู่ในขบวนการถ่ายภาพสเปกตรัมชุดเดียวกันมาเป็นตัวกำหนดสเกลให้กับภาพสเปกตรัมทั้งหมดในขบวนการนั้น จะทำให้ข้อมูลที่คำนวณออกมาผิดพลาด เพราะว่า เราไม่สามารถควบคุมให้ระบบอุปกรณ์สังเกตการณ์มี alignment หรือ มีค่าเริ่มต้น เหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ตลอดระยะเวลาสังเกตการณ์หรือแม้แต่ในช่วงวันหรือเวลาสังเกตการณ์สั้นๆ ก็ตาม ดังนั้น จึงควรจะต้องดำเนินการถ่ายภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบนีออนสำหรับหนึ่งขบวนการถ่ายใดๆ ทุกครั้ง ซึ่งสาเหตุที่ทำให้การวัดผิดพลาดอาจเกิดจากการเคลื่อนตัวของอุปกรณ์สังเกตการณ์ เช่น ระบบเลนส์, เกรตติง, และการบิดเบี้ยวของซีซีดีรีฟที่เป็นจากรับภาพ (หมายเลข 26) อันเนื่องมาจากการผันแปรในอุณหภูมิของอุปกรณ์ Thermoelectric Cooler ที่ทำความเย็นที่ระดับ -10 องศาเซลเซียส (หรือต่ำกว่า) ของเครื่องมือซีซีดีสเปกโตรกราฟ, และอื่นๆ

4.1.2 ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐานทั้งหมด

การหาผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐานของภาพสเปกตรัมของดาวคูบีตา ไลรี ทั้งหมด ตลอดระยะเวลาสังเกตการณ์จาก วันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2543 ถึง 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543 สามารถดำเนินการได้ในลักษณะเดียวกันกับตัวอย่างใน หัวข้อที่ 4.1.1 ซึ่งให้ข้อมูลที่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ทันที คือ ความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร เมื่อผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐานนี้ ถือว่าเป็นข้อมูลดิบที่ยังไม่ได้แก้ไข



รูปที่ 4-5 ภาพสเปกตรัมของดาวคูบีตา ไลรี สำหรับกำหนดหรือนิยามสัญลักษณ์ของเส้นสว่าง แทนด้วย ตัวเลขโรมัน I (~587.57nm), II (~656.28nm), III (~667.82nm), และ IV (~706.52nm) ดังในรูป

รูปที่ 4-5 นี้ ผู้เขียนต้องการกำหนดหรือนิยามสัญลักษณ์กำกับเส้นสว่างในภาพสเปกตรัมของดาวคูบีตา ไลรี เพื่อให้ง่ายในการกล่าวถึงหรืออ้างอิง โดยกำหนดให้ ตัวเลขโรมัน I แทนเส้นสว่างที่ค่าความยาวคลื่น ประมาณ 587.57 nm, II แทนเส้นสว่างที่ค่าความยาวคลื่น ประมาณ 656.28 nm, III แทนเส้นสว่างที่ค่าความยาวคลื่น ประมาณ 667.82 nm, และ IV แทนเส้นสว่างที่ค่าความยาวคลื่น ประมาณ 706.52 nm เมื่อค่าความยาวคลื่นเหล่านี้มีการผันแปรตามเวลาสังเกตการณ์ แต่ตัวเลขกำกับจะถูกใช้แทนเส้นสว่างเหล่านี้ที่แน่นอน สำหรับภาพสเปกตรัมของดาวคูบีตา ไลรี

ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐานของค่าความยาวคลื่น ในหน่วยนาโนเมตร ของเส้นสเปกตรัมที่ I, II, III, และ IV ของภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ทั้งหมดตลอดช่วงเวลาสังเกตการณ์ ตามวิธีการคำนวณข้างต้น ได้ผลลัพธ์แสดงไว้ใน ตารางที่ 5-2 ของบทที่ 5

4.2 ผลสังเกตการณ์ที่แก้ไขสำหรับการวิเคราะห์

เนื่องจากข้อมูลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐานเกิดจากการใช้กล้องซีซีดีที่ยังไม่ผ่านการทำ Calibration เพื่อให้สามารถวัดและอ่านออกมาอย่างถูกต้อง ดังนั้น จึงทำให้ข้อมูลของภาพสเปกตรัมที่ถ่ายได้ยังไม่ถูกต้องในส่วนของฟลักซ์หรือความเข้มแสงของแต่ละค่าความยาวคลื่น ซึ่งแก้ไขได้โดยหา Sensitivity Correction ของกล้องซีซีดี (ซีซีดีซีฟ) จากขบวนการเปรียบเทียบข้อมูลมาตรฐานกับข้อมูลสังเกตการณ์ แล้วสามารถนำไปแก้ไขเครื่องมือของเราให้วัดหรืออ่านข้อมูลออกมาอย่างถูกต้อง หรือ อาจนำไปแก้ไขที่ตัวข้อมูลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐานของเราโดยตรงจาก non Calibrated Spectrum ให้เป็น Calibrated Spectrum ก็ได้ ซึ่งผู้เขียนเลือกใช้วิธีหลังโดยแก้ไขที่ตัวข้อมูลสังเกตการณ์ แต่วิธีการหลังนี้ยังไม่ดีพอเพราะว่าข้อมูลสเปกตรัมมาตรฐานของดาวเซตาเพกาซีที่พอหามาได้นั้นมี resolution ต่ำกว่าสเปกตรัมจากการสังเกตการณ์ของผู้เขียน จึงทำให้ต้องทำการ Renormalize ข้อมูลเพื่อให้มี linear dispersion เท่ากันสำหรับข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งเป็นสาเหตุให้พีคหรือเส้นสเปกตรัมอาจเลื่อนไปตกอยู่ในค่าสเกลความยาวคลื่นอื่นที่ใกล้เคียง เพราะฉะนั้น ผู้เขียนจึงเลือกข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์ในส่วน of ค่าความยาวคลื่นมาจากภาพสเปกตรัมขั้นพื้นฐาน หรือ non Calibrated Spectrum แต่สำหรับค่าฟลักซ์ของแต่ละความยาวคลื่นนั้นต้องนำไป Calibrate เพื่อให้ได้ค่าออกมาถูกต้องเสียก่อนจึงจะนำไปวิเคราะห์ได้

คุณสมบัติของวัตถุคือให้สเปกตรัมแบบต่อเนื่องทุกความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2-1 แต่เนื่องจากดาวไม่ได้เป็นวัตถุอย่างสมบูรณ์อันเนื่องมาจากบรรยากาศของดาว จึงทำให้แสงบางความยาวคลื่นถูกดูดกลืนตามชนิดของธาตุในบรรยากาศของดาวนั้น หรืออาจเห็นเส้นสว่าง ดังนั้น ฟิสิกส์ของดาวจากการศึกษาสเปกตรัมของดาวคือ การพิจารณาเส้นสเปกตรัมสว่างหรือดูดกลืนเหล่านี้กับสเปกตรัมต่อเนื่อง จึงทำให้ต้องมีการวิเคราะห์ Normalized Spectrum เมื่อการทำ Normalized spectrum คือการทำให้สเปกตรัมต่อเนื่องในช่วงสเปกตรัมทั้งหมด มีค่าหนึ่งหน่วย ยกเว้นเส้นสว่างหรือดูดกลืนที่ลดตามสัดส่วน ดังรูปที่ 2-10

หัวข้อ 4.2 นี้ ประกอบด้วย 4.2.1 หา Sensitivity Correction ของกล้องซีซีดีโดยใช้สเปกตรัมมาตรฐานของดาวเซตาเพกาซี, 4.2.2 หา Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี, 4.2.3 หา Normalized Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี, และ 4.2.4 ประมวลผลภาพ Normalized Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ต่อวันสังเกตการณ์

4.2.1 หา Sensitivity Correction ของกล้องซีซีดีโดยใช้สเปกตรัมมาตรฐานของดาวเซตาเพกาซี

การหา Sensitivity correction หรือ การแก้ไขค่าความไวของกล้องซีซีดี โดยใช้สเปกตรัมมาตรฐาน (calibrated spectrum) ของดาวเซตาเพกาซี จากขบวนการเทียบค่าสเปกตรัมสังเกตการณ์กับค่าสเปกตรัมมาตรฐาน ของดาวเซตาเพกาซี มีวิธีการดังนี้ คือ

หาอัตราส่วนฟลักซ์ของรังสีที่แต่ละค่าความยาวคลื่น (หรือพิกเซล) ของสเปกตรัมมาตรฐานหรือ Calibrated spectrum กับ non calibrated spectrum จะได้

$$A_i = \frac{F_{C,i}}{F_{nonC,i}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 1536 \quad (4.1)$$

เมื่อ $F_{C,i}$ เป็นฟลักซ์ของ calibrated spectrum ที่ความยาวคลื่น i , $F_{nonC,i}$ เป็นฟลักซ์ของ non calibrated spectrum ที่ความยาวคลื่น i , และ A_i เป็นอัตราส่วนของ $F_{C,i}$ และ $F_{nonC,i}$ ที่ความยาวคลื่น i และมีข้อสังเกตว่า ถ้าพื้นที่รับภาพของซีซีดีที่แต่ละพิกเซลมีความไว (sensitivity) ถูกต้อง เราจะได้อัตราส่วนที่ทุกๆ ค่า i เท่ากันค่าหนึ่ง เทียบกับมาตรฐาน ($F_{C,i}$) แล้วนำค่า A_i ที่คำนวณได้ ไปแก้ไขค่าความไวของฟลักซ์ของแต่ละพิกเซล ซึ่งผู้เขียนเลือกแก้ไขที่ภาพสเปกตรัมขั้นพื้นฐานโดยตรง และเรียก A_i นี้ว่า Sensitivity correction ซึ่งมีวิธีการหาดังนี้ คือ

(1). เตรียมสเปกตรัมมาตรฐาน หรือ Calibrated Spectrum

สเปกตรัมมาตรฐาน หรือ Calibrated Spectrum เลือกเป็นดาวเซตาเพกาซี ได้มาจาก Hamuy et al., 1992 ประกอบด้วย ความยาวคลื่นหน่วยนาโนเมตร และค่าแมกนิจูดปรากฏ ในตารางที่ ค-1 ด้วย linear dispersion ของค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 1.6 นาโนเมตร แต่เนื่องจากเครื่องซีซีดีสเปกโตรกราฟของเราสามารถให้ linear dispersion ของภาพสเปกตรัม ประมาณ 0.10 ถึง 0.11 นาโนเมตร ซึ่งเห็นว่า resolution ต่างกันมากกับข้อมูลที่เราต้องการนำไปเทียบหรือ calibrate และจากที่ผู้เขียนวิเคราะห์อย่างละเอียด พบว่าการปรับให้ linear dispersion ของ Calibrated Spectrum จาก 1.6 นาโนเมตร เป็น 0.11 คี่ที่สุด เพราะว่า วัตถุประสงค์สำคัญในการวิเคราะห์สเปกตรัมคือ การวิเคราะห์ถึงการเลื่อนคอปเพลอร์ของความยาวคลื่นเป็นต้น ซึ่งต้องการความละเอียดสูง ดังนั้น การปรับลด resolution ของข้อมูลสังเกตการณ์ของเราให้ต่ำลงนั้นจะไม่มีประโยชน์เลย

เนื่องจากข้อมูลความสว่างของเราวัดเป็นฟลักซ์ของรังสี ดังนั้น จึงทำการเปลี่ยนค่าแมกนิจูดของแต่ละค่าความยาวคลื่นไปเป็นฟลักซ์สัมบูรณ์ โดยใช้สมการ(ค.1) [Kannappan and Fabricant, July 2000] และเมื่อทำการสร้างกราฟระหว่างค่าความยาวคลื่นกับฟลักซ์สัมบูรณ์เราก็จะได้ภาพสเปกตรัมมาตรฐานหรือ Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี ดังรูปที่ 4-6 ยกตัวอย่าง การคำนวณฟลักซ์สัมบูรณ์บางค่า เช่น ที่ค่าความยาวคลื่น 563.6 นาโนเมตร มีแมกนิจูดเท่ากับ 3.44 ดังนั้น สามารถเปลี่ยนเป็นค่าฟลักซ์สัมบูรณ์ได้โดยแทนค่าความยาวคลื่นและค่าแมกนิจูดที่สอดคล้องกันนี้ลงในสมการ(ค.1) นั่นคือ

$$F_\lambda = 5.5 \times 10^6 \times \left(\frac{1}{\lambda} \right) \times 10^{-0.4m_\lambda}$$

จะได้

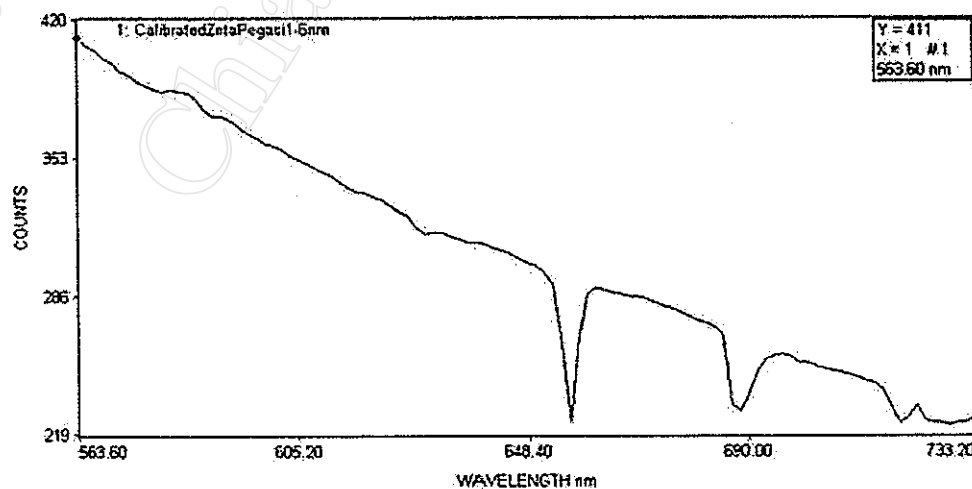
$$F_{563.6} = 5.5 \times 10^6 \times \left(\frac{1}{563.6} \right) \times 10^{-0.4(3.44)}$$

$$= 410.5742 \quad \text{photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ nm}^{-1}$$

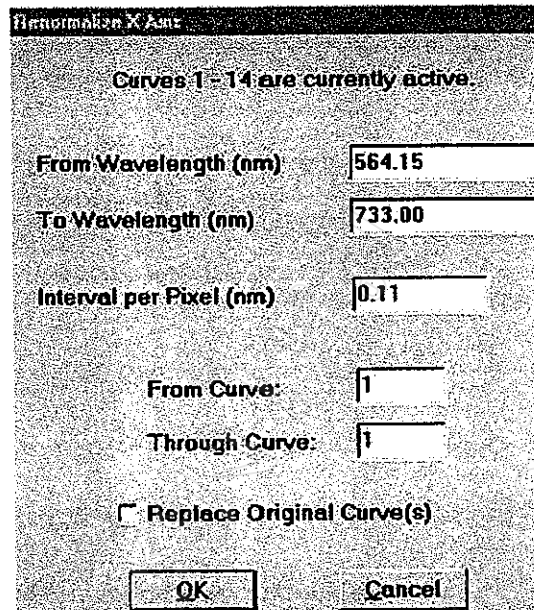
และสำหรับการคำนวณฟลักซ์สัมบูรณ์ที่ค่าความยาวคลื่นอื่นๆ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งให้ผลลัพธ์ดังใน ตารางที่ ค-1 และดำเนินการปรับ linear dispersion ของ Calibrated Spectrum จาก 1.6 nm เป็น 0.11 nm ด้วยขั้นตอนดังนี้ คือ

1. นำข้อมูลค่าความยาวคลื่น (nm) และฟลักซ์สัมบูรณ์ ($\text{photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ nm}^{-1}$) ของ Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี ในตารางที่ ค-1 ให้แสดงอยู่ในรูปของไฟล์สกุล .txt แล้วสร้างเป็น กราฟบนโปรแกรมเคสเทรลสเปกด้วยคำสั่ง File menu option: Import: Text File to Curve(s) ซึ่ง จะได้กราฟ ดังรูปที่ 4-6
2. ถัดต่อไป เราปรับ linear dispersion [หรือ Interval per pixel (nm)] ของ รูปที่ 4-6 จาก 1.6 nm เป็น 0.11 nm พร้อมกับเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ทำการศึกษาเป็น 564.15 nm (พิกเซลที่ 1) ถึง 733.00 nm (พิกเซลที่ 1536) ได้ที่คำสั่ง Process menu option: Renormalize Curve X Axis.. ดังรูปที่ 4-7(a) และจะได้ผลลัพธ์เป็นภาพสเปกตรัมตามการทำ Renormalize ดังรูปที่ 4-7(b) ซึ่ง พบว่า ค่าฟลักซ์ของสเปกตรัมไม่เรียบ ซึ่งเราแก้ปัญหานี้โดยการเฉลี่ยค่า ฟลักซ์ระหว่าง ค่าความยาวคลื่นเพื่อให้เรียบโดยใช้คำสั่ง Process menu option: Curve: Smooth ซึ่งดำเนินการใช้ คำสั่งนี้หลายครั้ง (จำนวน 11 ครั้ง) จนกระทั่งได้โปรไฟล์ของสเปกตรัมออกมาเรียบ ดังรูปที่ 4-8

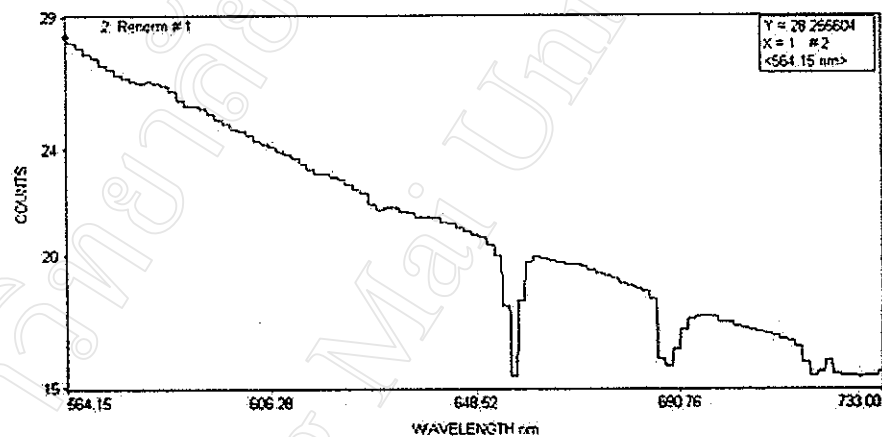
ซึ่งต่อไป เราจะใช้ภาพสเปกตรัมของ รูปที่ 4-8 นี้ เป็นสเปกตรัมมาตรฐานหรือ Calibrated Spectrum ในการ เทียบกับข้อมูลสังเกตการณ์ของเราเพื่อให้อ่านหรือแปลความหมายข้อมูลของภาพสเปกตรัมของเราออกมา อย่างถูกต้อง



รูปที่ 4-6 ภาพ Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี ด้วย linear dispersion = 1.6 nm

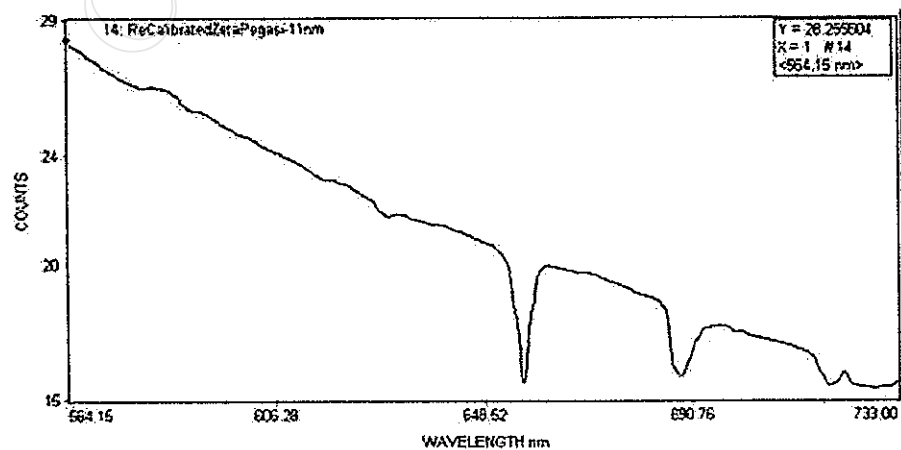


(a)



(b)

รูปที่ 4-7 (a). หน้าต่างแสดงการ Renormalize ภาพสเปกตรัมของรูปที่ 4-6 ด้วย Interval per pixel = 0.11 nm และเลือกช่วงความยาวคลื่นเป็น 564.15 nm (พิกเซลที่ 1) ถึง 733.00 nm (พิกเซลที่ 1536), และ (b). ภาพสเปกตรัมที่เกิดจากการ Renormalize ภาพสเปกตรัมของรูปที่ 4-6 ด้วย Interval per pixel = 0.11 nm และเลือกช่วงความยาวคลื่นเป็น 564.15 nm (พิกเซลที่ 1) ถึง 733.00 nm (พิกเซลที่ 1536)

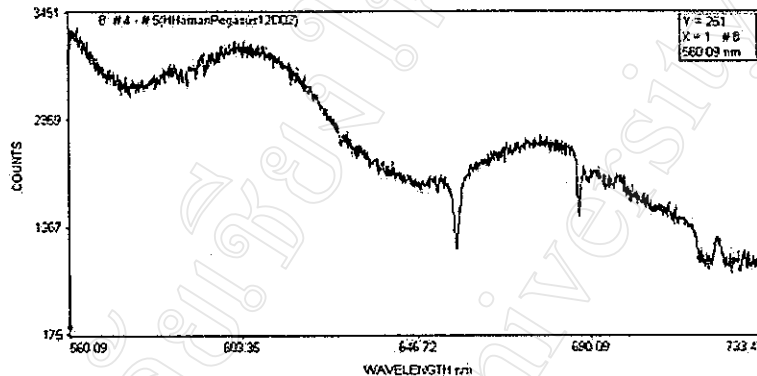


รูปที่ 4-8 ภาพ Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี สำหรับเทียบมาตรฐาน ด้วย linear dispersion = 0.11 nm ซึ่งเป็นผลลัพธ์สุดท้ายที่เกิดจากการทำ Smooth บนกราฟของรูปที่ 4-7(b)

(2). ถ่ายภาพสเปกตรัมดาวเซตาเพกาซี ด้วยเครื่องมือซีซีดีสเปกโตรกราฟของเรา

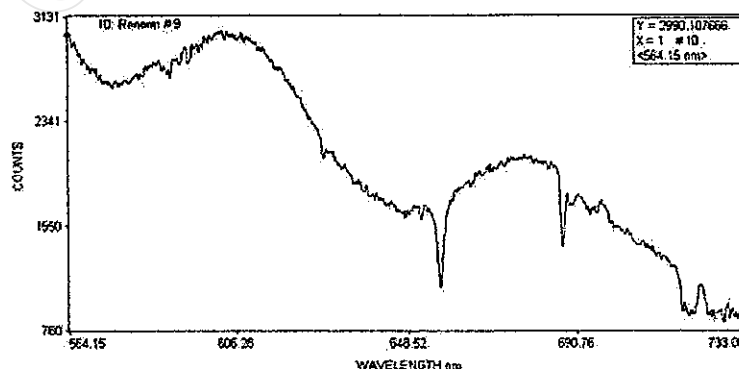
ดาวเซตาเพกาซี (HR8634) มีตำแหน่งบนระบบเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้าที่ $\alpha = 22$ ชั่วโมง 41 นาที 28 วินาที และ $\delta = +10^{\circ}49'.9$ มีแมกนิจูด 3.4 มีชนิดสเปกตรัม B8V เป็นสมาชิกในกลุ่มดาวเพกาซัส (Pegasus)

ดำเนินการถ่ายภาพสเปกตรัมดาวเซตาเพกาซีตามวิธีไม่ปกติในการถ่ายภาพสเปกตรัมของหัวข้อ 3.3.2.2 เมื่อถ่ายภาพตามขบวนการดังกล่าวและกำหนดสเกลเป็นหน่วยนาโนเมตร (ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.1.1) จะได้ non Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี ดังรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี ที่ถ่ายโดยกล้องซีซีดีของเรา ณ วันที่ 12 พ.ย. 2543 เวลา 19:15:11 น. ด้วย Exposure Time = 60 วินาที ที่ยังไม่ผ่านการ Renormalize

ลำดับต่อไป ให้ตรวจสอบช่วงความยาวคลื่นต่อพิกเซล (interval per pixel) ซึ่งแน่นอนว่าจะไม่ได้ linear dispersion ของความยาวคลื่นต่อพิกเซลคงที่ เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น ความหนาแน่นของเกรตติงต่ำ (600 ช่องต่อมิลลิเมตร), ความละเอียดและ alignment ของพื้นที่รับภาพของซีซีดีชิพ [array(pixel) = 1536 × 1024], และขนาดของพิกเซล 9 ไมโครเมตร เป็นต้น ซึ่งอาจทำให้บางพิกเซลวัดได้เป็น 0.10 และ 0.11 nm และเนื่องจากว่า ต้องการนำภาพสเปกตรัมของดาวเซตาเพกาซีที่ถ่ายโดยกล้องซีซีดีของเรา มาเทียบกับค่ามาตรฐานของสเปกตรัมมาตรฐานของดาวเซตาเพกาซี (ดังรูปที่ 4-8) เพื่อหา Sensitivity Correction ดังนั้น เราจะต้องทำการ Renormalize ภาพสเปกตรัมของเราให้มี linear dispersion, และช่วงความยาวคลื่นตรงกันกับสเปกตรัมมาตรฐานก่อนที่จะนำไปเทียบมาตรฐาน โดยใช้เงื่อนไขเดียวกัน คือ linear dispersion ของรูปที่ 4-9 เป็น 0.11 nm และช่วงความยาวคลื่นเป็น 564.15 nm (พิกเซลที่ 1) ถึง 733.00 nm (พิกเซลที่ 1536) ที่ Process menu option: Renormalize Curve X Axis.. จะได้ผลลัพธ์ ดังรูปที่ 4-10



รูปที่ 4-10 ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี ที่ถ่ายโดยกล้องซีซีดีของเรา ณ วันที่ 12 พ.ย. 2543 เวลา 19:15:11 น. ด้วย Exposure Time = 60 วินาที ที่ผ่านการ Renormalize ด้วย linear dispersion = 0.11 nm จากรูปที่ 4-9 และผ่านการ Smooth 1 ครั้ง

(3). คำนวณหา Sensitivity Correction ของกล้องซีซีดี

หา Sensitivity correction ของกล้องซีซีดีหรือซีซีดีชิฟ จากสมการ(4.1) $A_i = F_{C,i} / F_{nonC,i}$ เมื่อให้ $F_{C,i}$ เป็นฟลักซ์ของ calibrated spectrum ของดาวเซตาเพกาซีที่ความยาวคลื่น i ที่เรานำมาเป็นมาตรฐาน (รูปที่ 4-8), และ $F_{nonC,i}$ เป็นฟลักซ์ของ non calibrated spectrum ที่ความยาวคลื่น i ที่เรานำไปเทียบมาตรฐาน (รูปที่ 4-10) จะได้ผลลัพธ์ A_i ที่ $i=1,2,...,1536$ pixel หรือ ที่ $i=564.15, 564.26, ..., 733.00$ nm

4.2.2 หา Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี

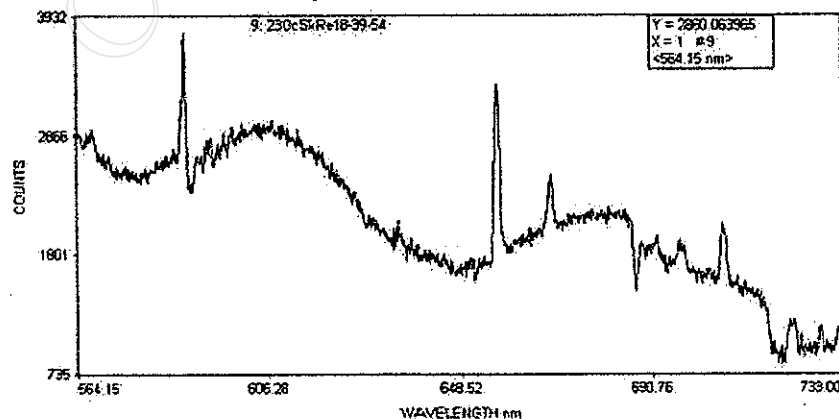
เริ่มจากทำ Renormalize ภาพสเปกตรัมดาวคูบีตา ไลรี ที่จะเทียบมาตรฐาน ด้วยเงื่อนไขเดียวกันกับ สเปกตรัมมาตรฐาน (ของรูปที่ 4-8) คือ linear dispersion = 0.11 nm และช่วงความยาวคลื่นเป็น 564.15 nm (พิกเซลที่ 1) ถึง 733.00 nm (พิกเซลที่ 1536) ที่ Process menu option: Renormalize Curve X Axis... หลังจากนั้น ใช้ Sensitivity correction A_i จากหัวข้อที่ 4.2.1 ไปหารค่าฟลักซ์ของ non calibrated spectrum ของ ดาวคูบีตา ไลรี ที่ Renormalized แล้วที่ i ตรงกัน ตลอดช่วงความยาวคลื่นทั้งหมด จะได้ค่าฟลักซ์สัมพัทธ์ที่ ความยาวคลื่น i ตรงกัน ซึ่งเป็นฟลักซ์ของ Calibrated spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี คือ

$$F_{C,\beta Lyrae,1} = \frac{F_{nonC,\beta Lyrae,1}}{A_1}, F_{C,\beta Lyrae,2} = \frac{F_{nonC,\beta Lyrae,2}}{A_2}, \dots, F_{C,\beta Lyrae,1536} = \frac{F_{nonC,\beta Lyrae,1536}}{A_{1536}} \quad \text{หรือ}$$

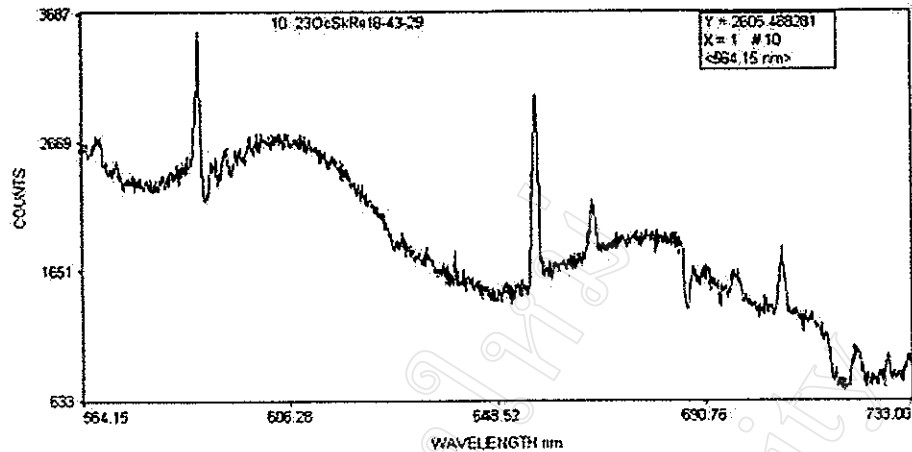
$$F_{C,\beta Lyrae,i} = \frac{F_{nonC,\beta Lyrae,i}}{A_i}, \quad i = 1, 2, \dots, 1536 \text{ pixel} \quad (4.2)$$

เมื่อ $F_{C,\beta Lyrae,i}$ เป็นผลลัพธ์ของฟลักซ์ของรังสีของดาวคูบีตา ไลรี ที่ความยาวคลื่น i ที่เป็น calibrated spectrum แล้ว, $F_{nonC,\beta Lyrae,i}$ เป็นฟลักซ์ของรังสีของ non calibrated spectrum (raw data) ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ความยาวคลื่น i ที่วัดโดยใช้กล้องซีซีดีของเรา, และ A_i เป็นอัตราส่วนของ $F_{C,i}$ และ $F_{nonC,i}$ ของดาว เซตาเพกาซี ที่ความยาวคลื่น i ซึ่งแสดงค่าความไวของแต่ละพิกเซล

ตัวอย่าง การหา Calibrated spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ต่อเนื่องจากตัวอย่างในหัวข้อที่ 4.1.1 ของ รูปที่ 4-3 และ 4-4 เริ่มด้วยการทำ Renormalize ภาพทั้งสองนี้ ด้วย linear dispersion = 0.11 nm และช่วง ความยาวคลื่นจาก 564.15 nm (พิกเซลที่ 1) ถึง 733.00 nm (พิกเซลที่ 1536) ที่ Process menu option: Renormalize Curve X Axis... จะได้ผลลัพธ์ ดังรูปที่ 4-11 และ 4-12 ตามลำดับ

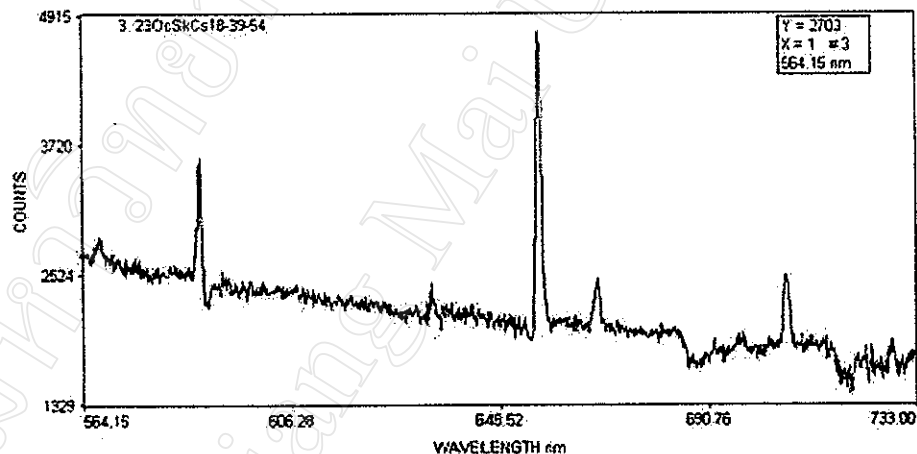


รูปที่ 4-11 ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ในหน่วยนาโนเมตร ที่ 2451840.985 H.J.D. ที่ผ่านการ Renormalize ด้วย linear dispersion = 0.11 nm

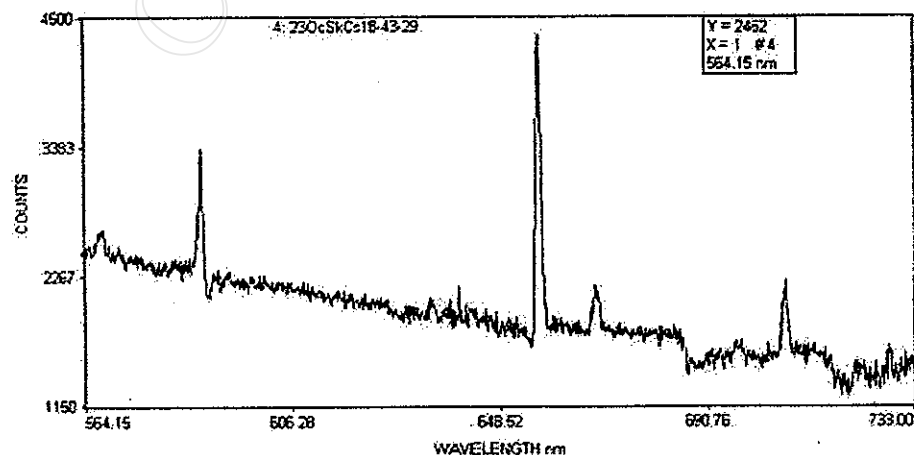


รูปที่ 4-12 ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ในหน่วยนาโนเมตร ที่ 2451840.988 H.J.D. ที่ผ่านการ Renormalize ด้วย linear dispersion = 0.11 nm

จากสมการ(4.2) ทำการหาค่าฟังก์ชันของ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ Renormalized ตรงกันแล้ว $F_{nonC, \beta Lyrae, i}$ (รูปที่ 4-11 หรือ 4-12) ด้วยค่า A_i ที่คำนวณได้ที่ i ตรงกัน จะได้ผลลัพธ์เป็นค่าฟังก์ชันสัมพันธ์ของ Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี $F_{C, \beta Lyrae, i}$ สำหรับภาพสเปกตรัมที่เวลา 2451840.985 H.J.D. และ 2451840.988 H.J.D. ดังรูปที่ 4-13 และ 4-14 ตามลำดับ



รูปที่ 4-13 ภาพ Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ในหน่วยนาโนเมตร ที่ 2451840.985 H.J.D. ด้วย linear dispersion = 0.11 nm



รูปที่ 4-14 ภาพ Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ในหน่วยนาโนเมตร ที่ 2451840.988 H.J.D. ด้วย linear dispersion = 0.11 nm

มีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่า การหาค่า $A_1, A_2, \dots$ ที่ถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น จะต้องดำเนินการถ่ายภาพสเปกตรัมของดาวเป้าหมายจำนวนหลายๆ ชุด สำหรับนำไปเทียบมาตรฐานที่ Exposure Time เดียวกัน นั่นคือ

$$A_{ij} = \frac{F_{C,i}}{F_{nonC,ij}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 1536; \quad j = 1, 2, \dots \quad (4.3)$$

เมื่อ $F_{C,i}$ เป็นฟลักซ์ของ calibrated spectrum ที่ความยาวคลื่น i , $F_{nonC,ij}$ เป็นฟลักซ์เฉลี่ยของ non calibrated spectrum ที่ความยาวคลื่น i จากจำนวนภาพทั้งหมด j รูป, และ A_{ij} เป็นอัตราส่วนของ $F_{C,i}$ และ $F_{nonC,ij}$ ที่ความยาวคลื่น i เมื่อภาพสเปกตรัมเหล่านี้ผ่านการ Renormalize ให้มี linear dispersion และช่วงความยาวคลื่นเดียวกันแล้ว และทำการเฉลี่ย จะได้ค่าแก้ไขความไวเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น i คือ

$$A_{i,ave} = \frac{\sum_{j=1}^n A_{ij}}{n} \quad (4.4)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนภาพสเปกตรัมของดาวดวงเดียวกันที่ถ่ายเมื่อเวลาต่างๆ กันด้วย Exposure Time เดียวกัน จะได้ $A_{i,ave}$ เพื่อนำไปแก้ไขค่าความไวของภาพสเปกตรัมของดาวที่ความยาวคลื่นเดียวกัน i สำหรับการสังเกตการณ์ที่ใช้เครื่องมือเดียวกัน และรวมถึงยังสามารถนำไปแก้ไขโปรแกรมเคสเทรลสเปกให้อ่านผลการวัดจากกล้องซีซีดีออกมาอย่างถูกต้องได้ ซึ่งเป็นการแก้ไขโดยอัตโนมัติ

4.2.3 หา Normalized Spectrum ของดาวฤกษ์ใด ๆ

Normalized spectrum เป็นภาพสเปกตรัมที่แก้ไขสเปกตรัมต่อเนื่อง (continuous spectrum) ของ Calibrated spectrum ให้มีค่าคงที่เดียวกันและเท่ากับ 1 โดยเส้นสเปกตรัมดูดกลืนหรือสว่างถูกลดทอนความเข้มที่ความยาวคลื่นนั้นตามสัดส่วนของฟลักซ์ของเส้นฐานที่นำไปหาร เช่น รูปที่ 2-10

Normalized spectrum นี้ให้การวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโคปี ได้แก่ ความแรงของเส้นเทียบกับสเปกตรัมต่อเนื่อง, องค์ประกอบของสารในบรรยากาศของดาว เป็นต้น เมื่อเราทราบโดยทฤษฎีของหัวข้อที่ 2.1.2 แล้วว่า วัตถุจะทำให้สเปกตรัมแบบต่อเนื่องตามฟังก์ชันของแพลงค์ ดังรูปที่ 2-1 จากการสมมติให้ความเป็นวัตถุดำ แต่แท้จริงแล้วดาวไม่ได้เป็นวัตถุดำอย่างสมบูรณ์ เพราะว่า ถ้าแบ่งองค์ประกอบของสสารของดาวเป็น 2 ส่วน คือ (1).สสารที่อยู่ต่ำกว่าระดับ optical depth $\tau = 2/3$ (หรือ $>\tau = 2/3$), และ (2).สสารที่อยู่เหนือระดับ $\tau = 2/3$ (หรือ $<\tau = 2/3$) เมื่อระดับความลึกเฉลี่ย $\tau = 2/3$ เป็นตำแหน่งที่นิยามให้อุณหภูมิของก๊าซที่ความลึกนี้มีค่าเดียวกันกับอุณหภูมิสัมฤทธิ์ (effective temperature) หรือ $T_{\tau=2/3} = T_e$ และเป็นตำแหน่งที่ฟลักซ์ของรังสีให้สเปกตรัมต่อเนื่อง และเป็นนิยามของชั้นโฟโตสเฟียร์ (photosphere) เพราะฉะนั้น อาจสรุปได้ว่า เนื้อดาวภายในและรวมถึงที่ $\tau = 2/3$ เป็นวัตถุดำให้สเปกตรัมต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2-1 และส่วนของบรรยากาศดาวที่อยู่ด้านนอกออกมาจากที่ $\tau = 2/3$ จะเป็นสาเหตุให้เกิดเส้นสว่างและเส้นดูดกลืนซ้อนทับกับสเปกตรัมต่อเนื่องที่มาจากระดับลึกกว่า แต่เราสนใจสสารที่อยู่ในบรรยากาศของดาว ดังนั้น การทำ Normalized spectrum เพื่อเปรียบเทียบความแรงของเส้นเทียบกับสเปกตรัมต่อเนื่อง หรือแม้แต่ว่าความแรงของเส้นเดียวกันที่ผันแปรตามการเปลี่ยนแปลงของดาวหรือระบบดาวเนื่องจากการโคจร เช่น ในกรณีดาวคู่

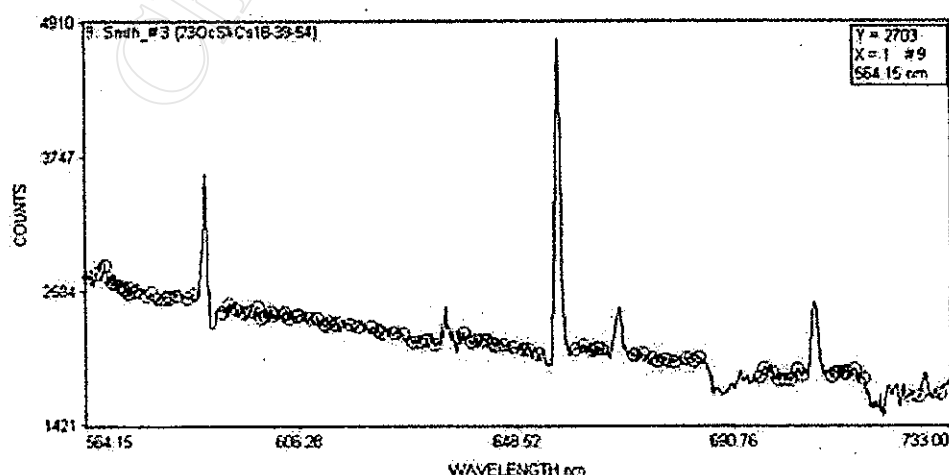
การหา Normalized spectrum จากภาพสเปกตรัมมาตรฐานหรือ Calibrated spectrum สามารถสร้างได้จากการสร้างเส้นฐาน (baseline) แทนสเปกตรัมต่อเนื่อง โดยอาศัยทฤษฎีเส้นฐานใน ภาคผนวก ก.3 โดยสร้างเส้นฐานที่ Process menu option: Curve: Create Baseline...จากภาพสเปกตรัมที่เราต้องการทำ Normalized และเมื่อได้เส้นฐานแล้ว ลำดับต่อไปให้นำเส้นฐานไปหาร Calibrated spectrum จะได้ผลลัพธ์การคำนวณเป็นภาพ Normalized spectrum ด้วยระดับสเปกตรัมต่อเนื่องมีค่าเท่ากับ 1 โดยเส้นสว่างและดูดกลืนมีค่าฟลักซ์เป็นสัดส่วนกับสเปกตรัมต่อเนื่องขนาดหนึ่งหน่วยนี้ นั่นคือ

$$F_{Normalized\beta Ly\alphae,i} = \frac{F_{C\beta Ly\alphae,i}}{F_{Baseline,i}} \quad (4.5)$$

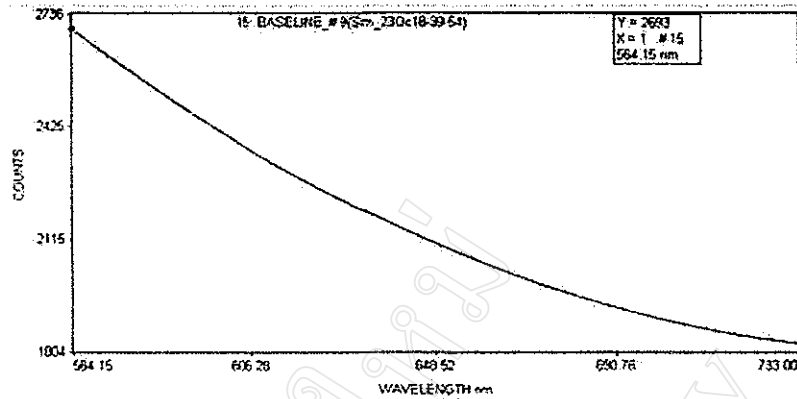
เมื่อ $F_{Normalized\beta Ly\alphae,i}$ เป็นฟลักซ์ของ Normalized spectrum ที่ค่าความยาวคลื่น i ของดาวคู่บีตา ไถรี, $F_{C\beta Ly\alphae,i}$ ฟลักซ์ของ Calibrated spectrum ที่ค่าความยาวคลื่น i ของดาวคู่บีตา ไถรี, และ $F_{Baseline,i}$ เป็นฟลักซ์ของเส้นฐานที่ค่าความยาวคลื่น i ของ Calibrated spectrum ของมันเอง

ตัวอย่าง การหา Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไถรี สำหรับ Calibrated Spectrum ที่ได้จากหัวข้อที่ 4.2.2 ที่ถ่ายเมื่อ 2451840.985 H.J.D. (รูปที่ 4-13) และ 2451840.988 H.J.D. (รูปที่ 4-14) ด้วย Exposure Time = 60 วินาที โดยวิธีการและความหมายข้างต้น สามารถแสดงผลการคำนวณ ตามลำดับ ดังนี้

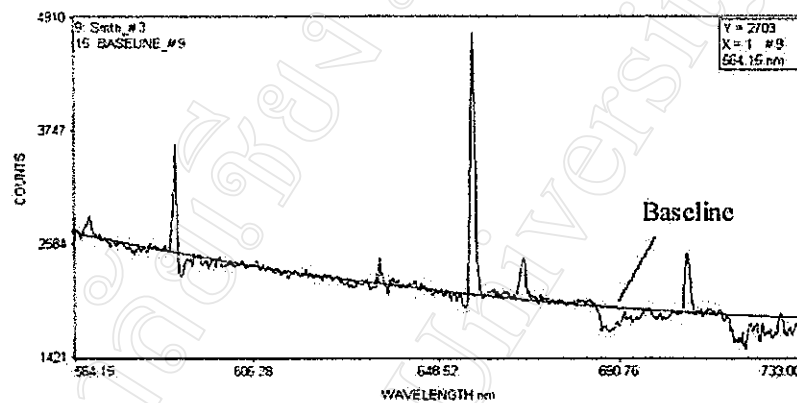
- (1). สร้างเส้นฐานจากสเปกตรัมต่อเนื่องของภาพ Calibrated spectrum ของรูปที่ 4-13 ด้วยคำสั่ง Process menu option: Curve: Create Baseline...ตามทฤษฎีการสร้างเส้นฐานในภาคผนวก ก.3 โดยใช้โพลีโนเมียล (polynomial) ออร์เดอร์ เท่ากับ 2 แล้วเลือกจุดบนสเปกตรัมต่อเนื่องให้มากที่สุด 100 จุด และกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงของสเปกตรัมต่อเนื่อง ยกเว้นที่เส้นสว่างหรือดูดกลืน ดังรูปที่ 4-15 สำหรับภาพสเปกตรัมที่ 2451840.985 H.J.D. และให้ผลลัพธ์เป็นเส้นฐาน ดังรูปที่ 4-16(a) และ ถ้านำภาพเส้นฐานและ Calibrated spectrum ของมันแสดงในกราฟเดียวกัน จะเห็นว่า เส้นฐานซ้อนทับในแนวเดียวกันกับสเปกตรัมต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4-16(b)
- (2). ถื่อนำเส้นฐานของรูปที่ 4-16(a) ไปหารภาพ Calibrated Spectrum ของรูปที่ 4-13 ตามความสัมพันธ์ของสมการ(4.5) จะได้ผลลัพธ์เป็น Normalized Spectrum ดังรูปที่ 4-17



รูปที่ 4-15 ภาพการสร้างเส้นฐาน สำหรับ Calibrated Spectrum ของดาวคู่บีตา ไถรี ที่ 2451840.985 H.J.D., และ linear dispersion = 0.11 nm

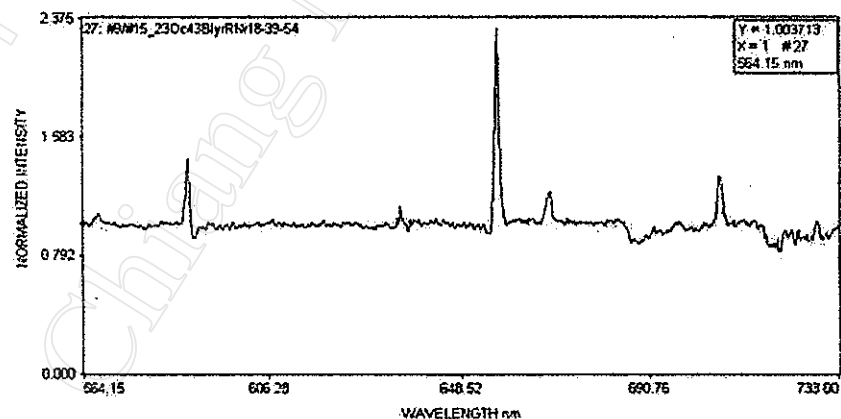


(a)



(b)

รูปที่ 4-16 (a).ภาพสเปกตรัมเส้นฐานที่สร้างจาก Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 2451840.985 H.J.D., และ linear dispersion = 0.11 nm, และ (b).ภาพแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเส้นฐานกับสเปกตรัมเดิมของรูปที่ 4-15 (หรือ 4-13)

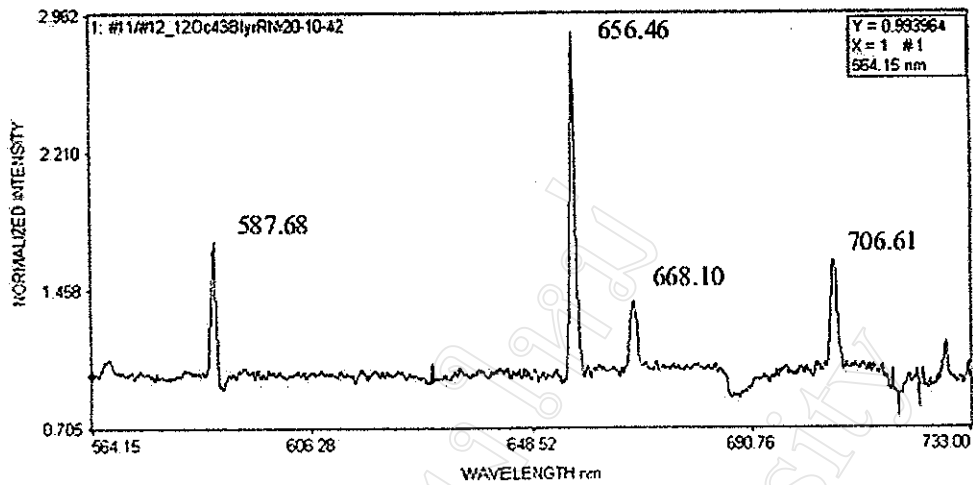


รูปที่ 4-17 ภาพ Normalized Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 2451840.985 H.J.D., และ linear dispersion = 0.11 nm

และสำหรับการทำ Normalized spectrum ของภาพ Calibrated spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 2451840.988 H.J.D. ของรูปที่ 4-14 ก็ทำได้ในทำนองเดียวกัน

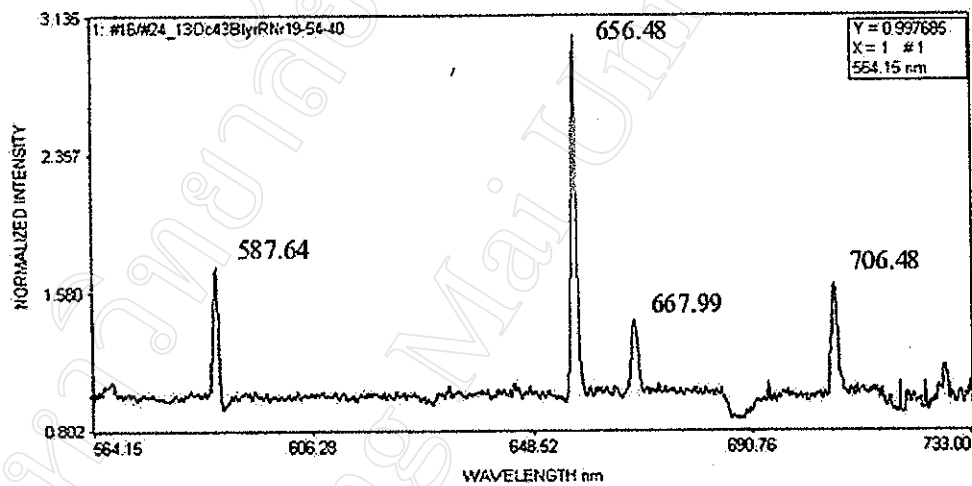
4.2.4 ประมวลภาพ Normalized Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ต่อวันสังเกตการณ์

ภาพ Normalized spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ต่อวันสังเกตการณ์นี้จากจำนวน 187 รูป จากวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2543 ถึง 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543 สำหรับใช้วิเคราะห์ความผันแปรของรูปร่างโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัม พร้อมกับแสดงค่าความยาวคลื่นของเส้นสว่างที่ผันแปรกับเวลาสังเกตการณ์ ดังนี้



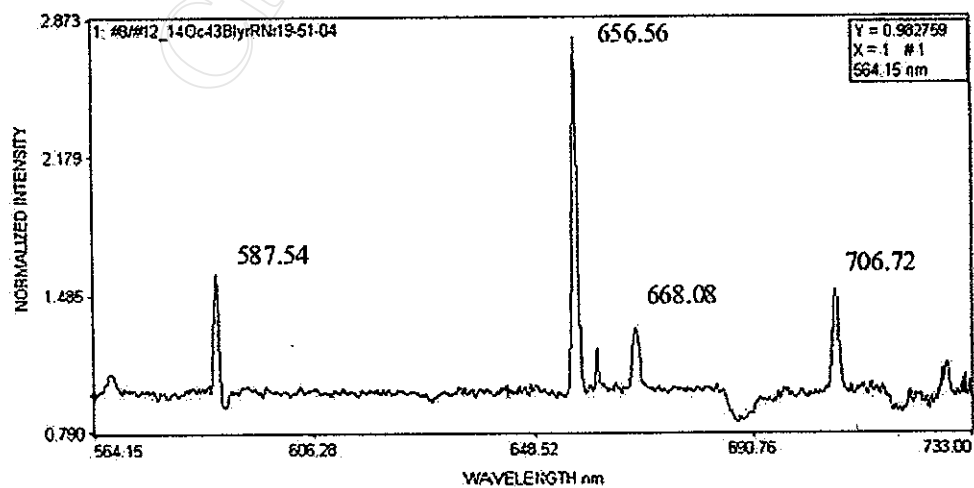
รูปที่ 4-18 Normalized spectrum ของควาตู้บีตาไลรี ที่ 12 ค.ค.2543 ณ 20:10:42 น.

หรือ H.J.D. = 2451830.049 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.920798902



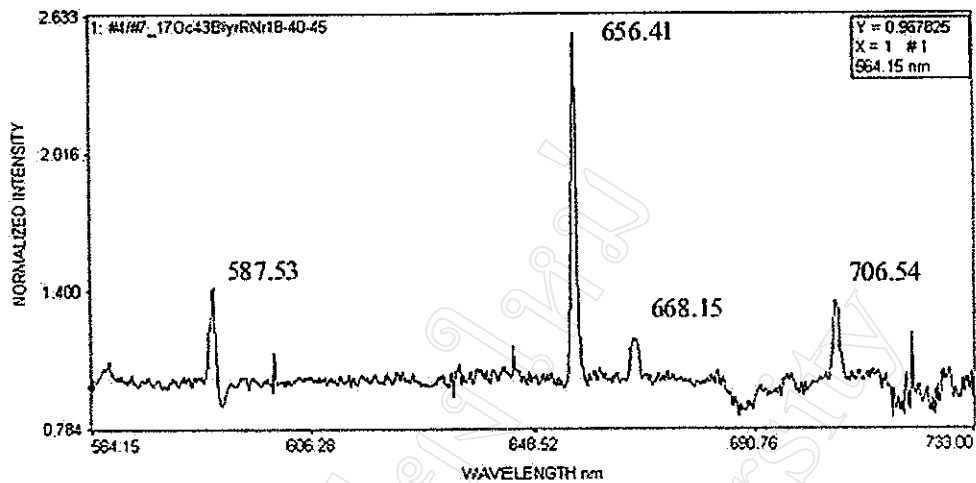
รูปที่ 4-19 Normalized spectrum ของควาตู้บีตาไลรี ที่ 13 ค.ค.2543 ณ 19:54:40 น.

หรือ H.J.D. = 2451831.038 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.997272098

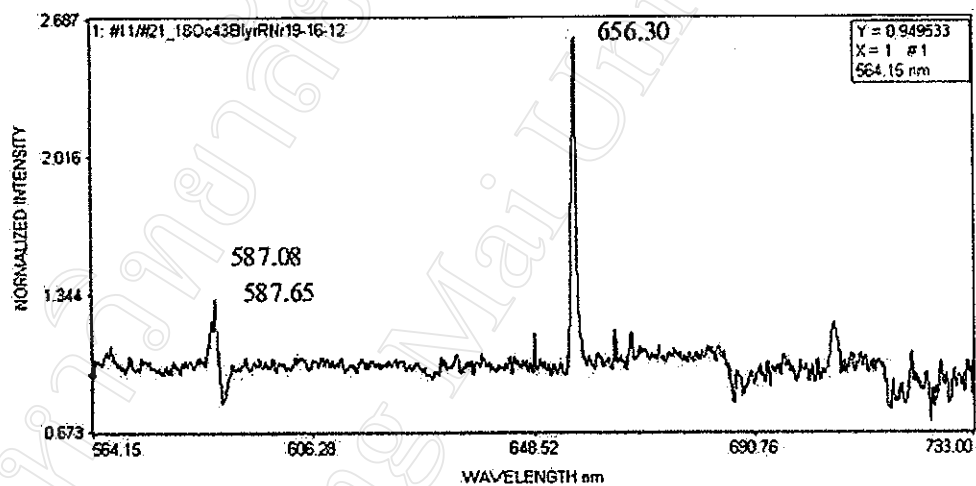


รูปที่ 4-20 Normalized spectrum ของควาตู้บีตาไลรี ที่ 14 ค.ค.2543 ณ 19:51:04 น.

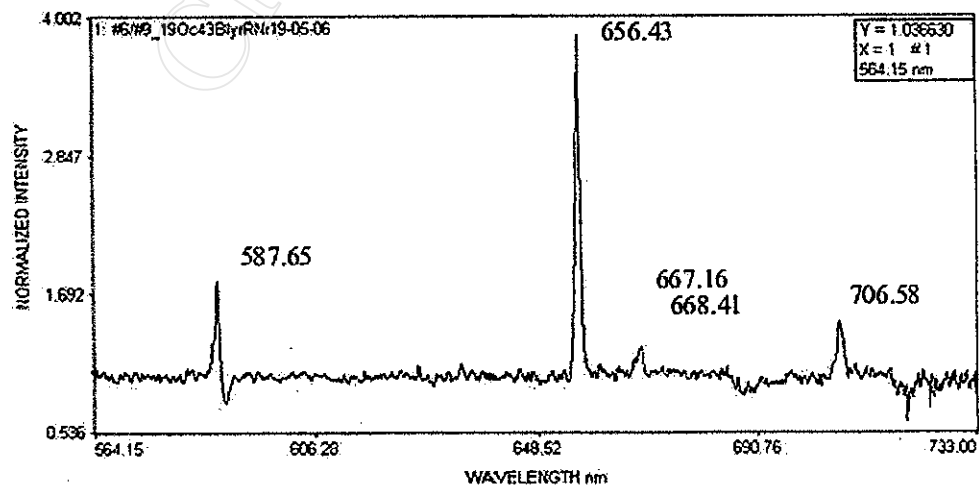
หรือ H.J.D. = 2451832.035 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.074413018



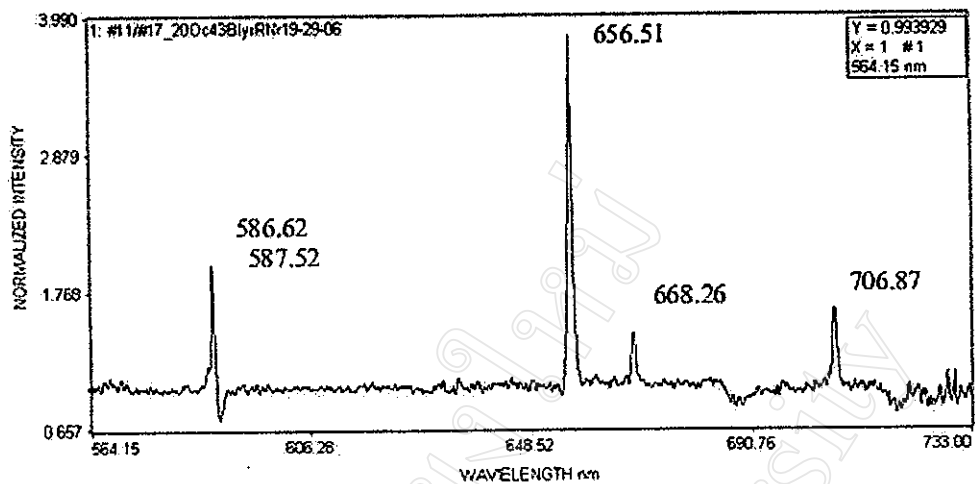
รูปที่ 4-21 Normalized spectrum ของดาวคู่บีตาไลรี ที่ 17 ค.ค.2543 ณ 18:40:45 น.
หรือ H.J.D. = 2451834.986 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.302639491



รูปที่ 4-22 Normalized spectrum ของดาวคู่บีตาไลรี ที่ 18 ค.ค.2543 ณ 19:16:12 น.
หรือ H.J.D. = 2451836.011 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.381877582

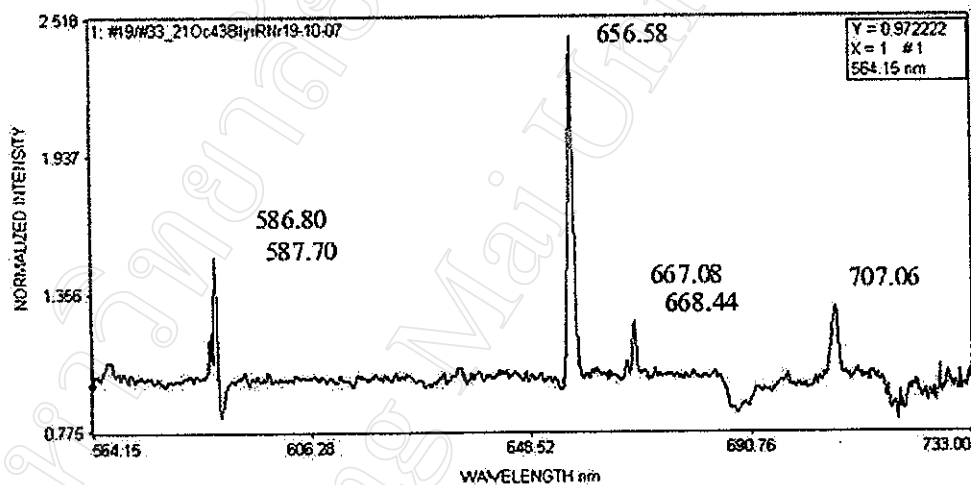


รูปที่ 4-23 Normalized spectrum ของดาวคู่บีตาไลรี ที่ 19 ค.ค.2543 ณ 19:05:06 น.
หรือ H.J.D. = 2451837.003 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.458615742



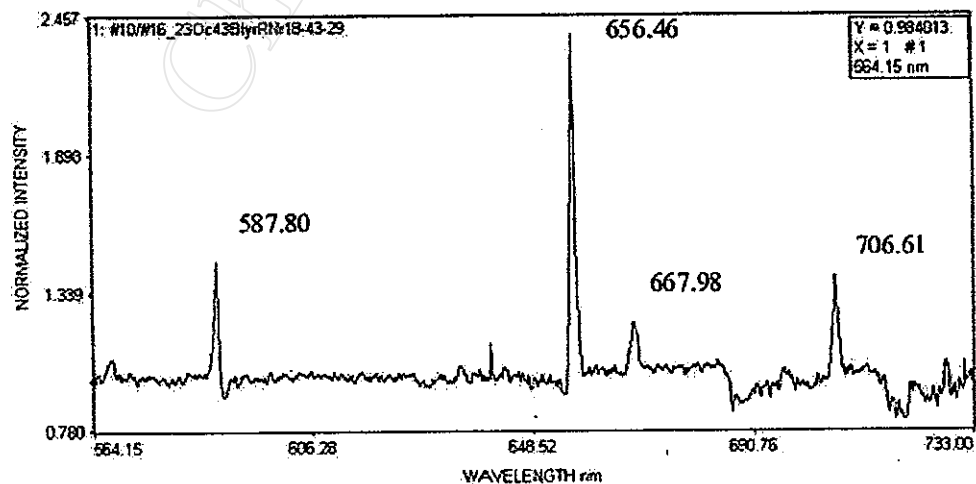
รูปที่ 4-24 Normalized spectrum ของดาวคู่บีตาไลรี ที่ 20 ต.ค.2543 ณ 19:29:06 น.

หรือ H.J.D. = 2451838.02 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.537238934



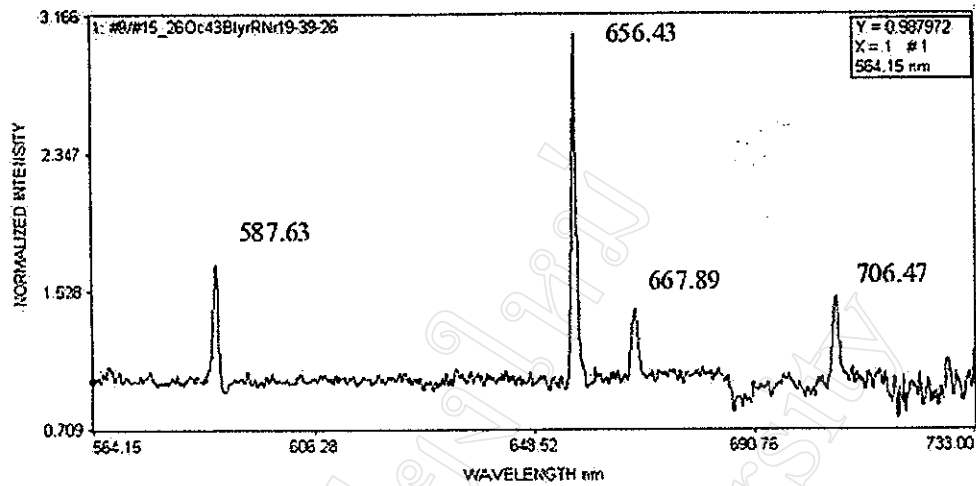
รูปที่ 4-25 Normalized spectrum ของดาวคู่บีตาไลรี ที่ 21 ต.ค.2543 ณ 19:10:07 น.

หรือ H.J.D. = 2451839.007 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.613553743

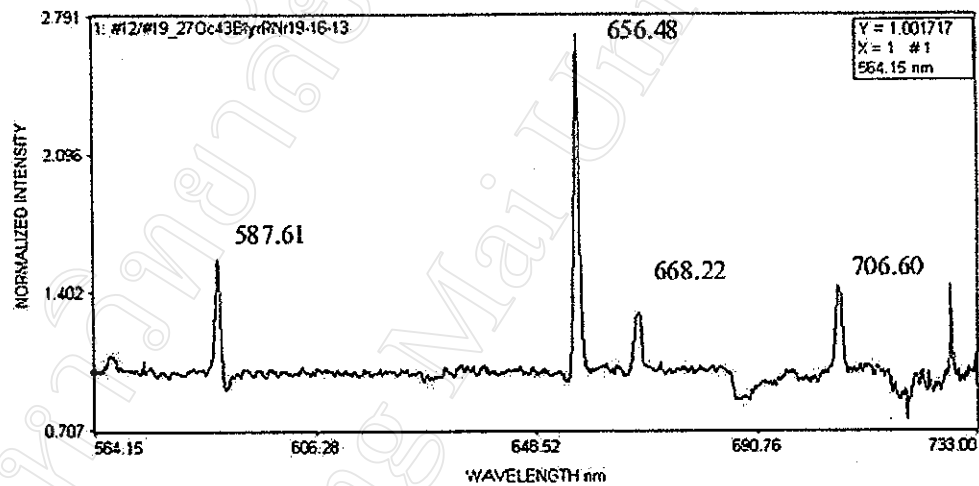


รูปที่ 4-26 Normalized spectrum ของดาวคู่บีตาไลรี ที่ 23 ต.ค.2543 ณ 18:43:29 น.

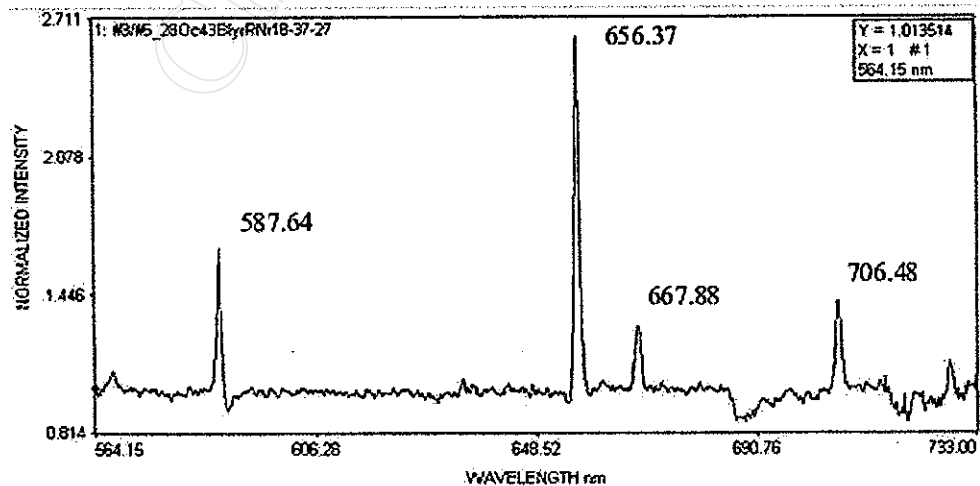
หรือ H.J.D. = 2451840.988 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.766792044



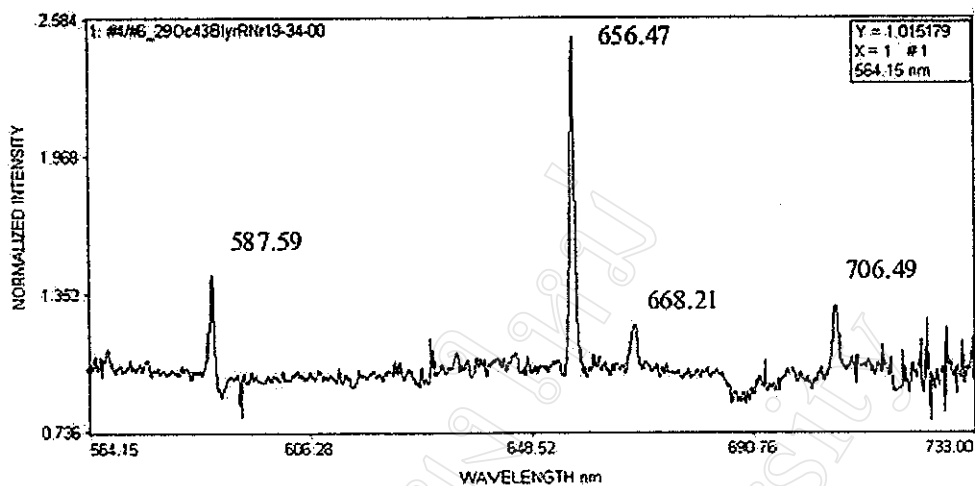
รูปที่ 4-27 Normalized spectrum ของดาวคู่บีตาไลรี ที่ 26 ต.ค.2543 ณ 19:39:26 น.
หรือ H.J.D. = 2451844.027 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.001799855



รูปที่ 4-28 Normalized spectrum ของดาวคู่บีตาไลรี ที่ 27 ต.ค.2543 ณ 19:16:13 น.
หรือ H.J.D. = 2451845.01 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.0778874

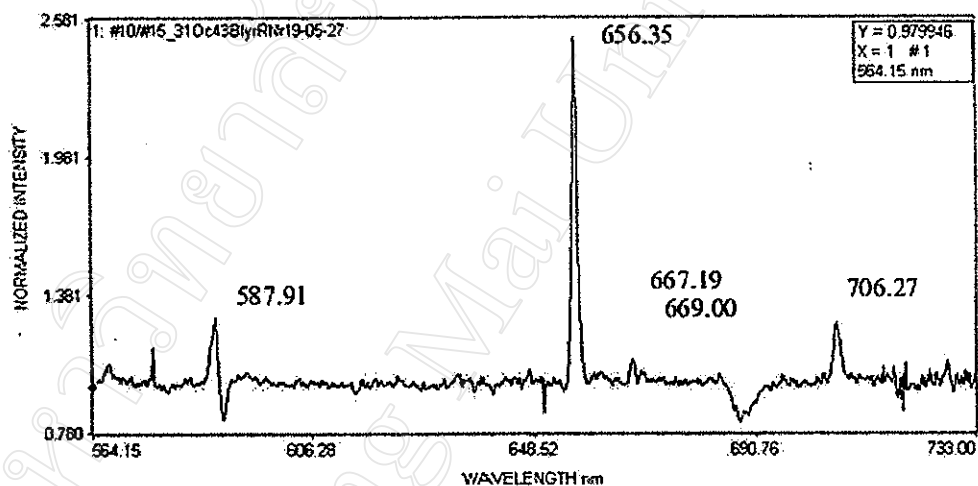


รูปที่ 4-29 Normalized spectrum ของดาวคู่บีตาไลรี ที่ 28 ต.ค.2543 ณ 18:37:27 น.
หรือ H.J.D. = 2451845.983 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.153139859



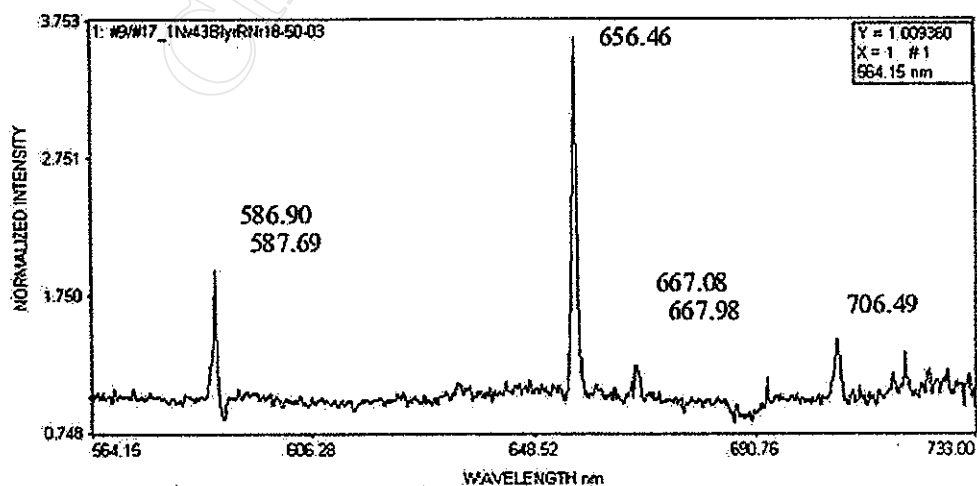
รูปที่ 4-30 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไลรี ที่ 29 ค.ศ.2543 ณ 19:34:00 น.

หรือ H.J.D. = 2451847.023 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.233511267



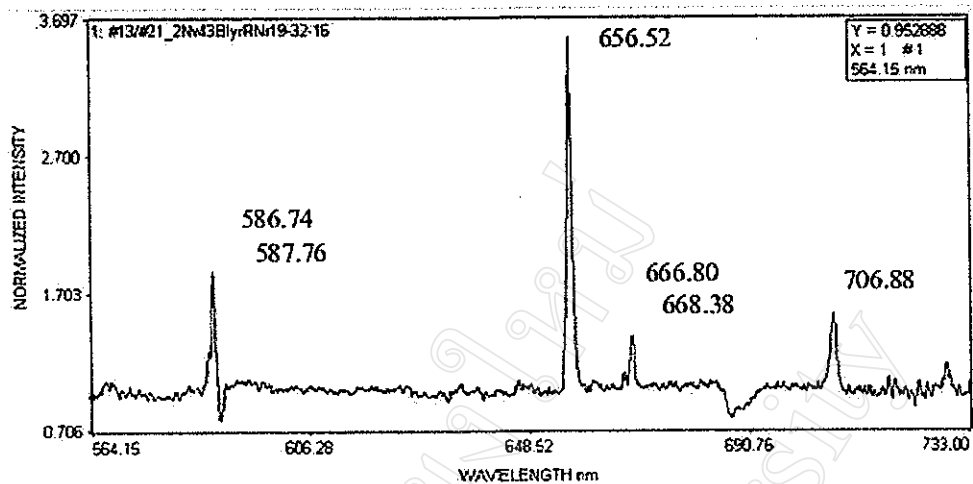
รูปที่ 4-31 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไลรี ที่ 31 ค.ศ.2543 ณ 19:05:27 น.

หรือ H.J.D. = 2451849.003 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.386646913



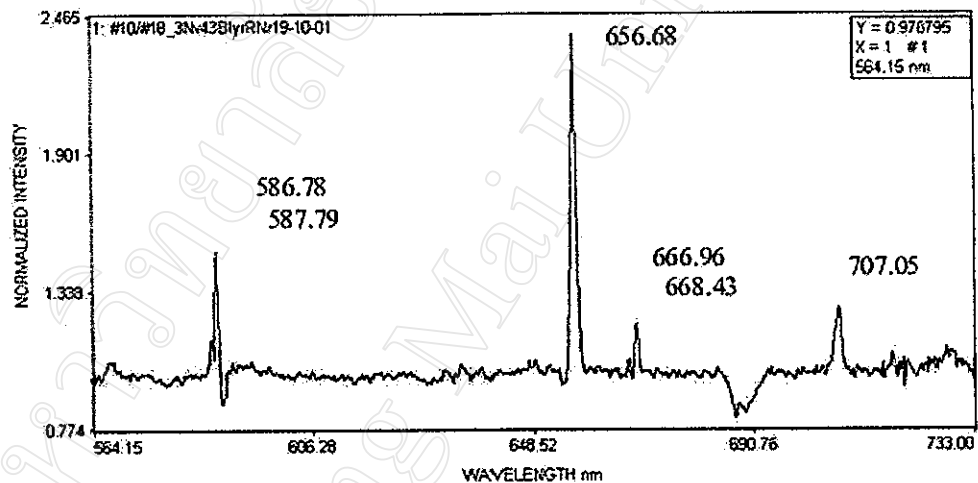
รูปที่ 4-32 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไลรี ที่ 1 พ.ย.2543 ณ 18:50:03 น.

หรือ H.J.D. = 2451849.992 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.463154352



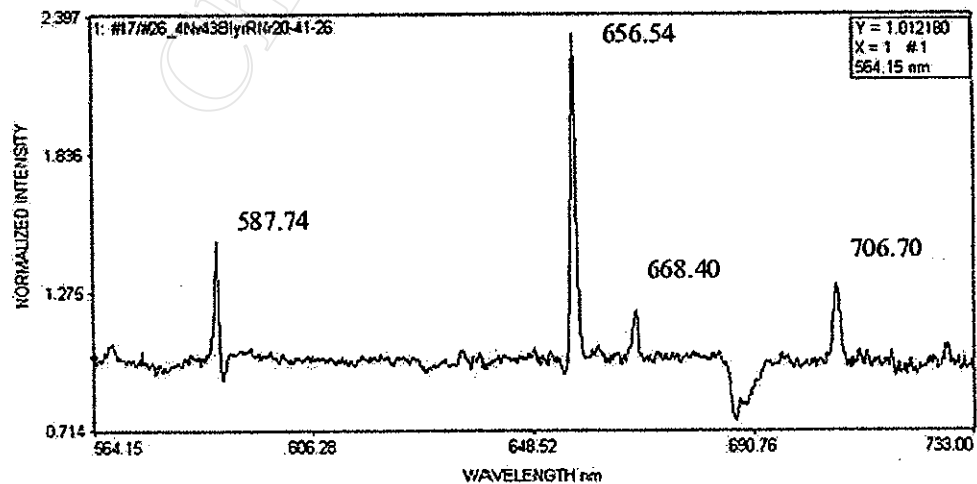
รูปที่ 4-33 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไลรี ที่ 2 พ.ย.2543 ณ 19:32:16 น.

หรือ H.J.D. = 2451851.021 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.542756093



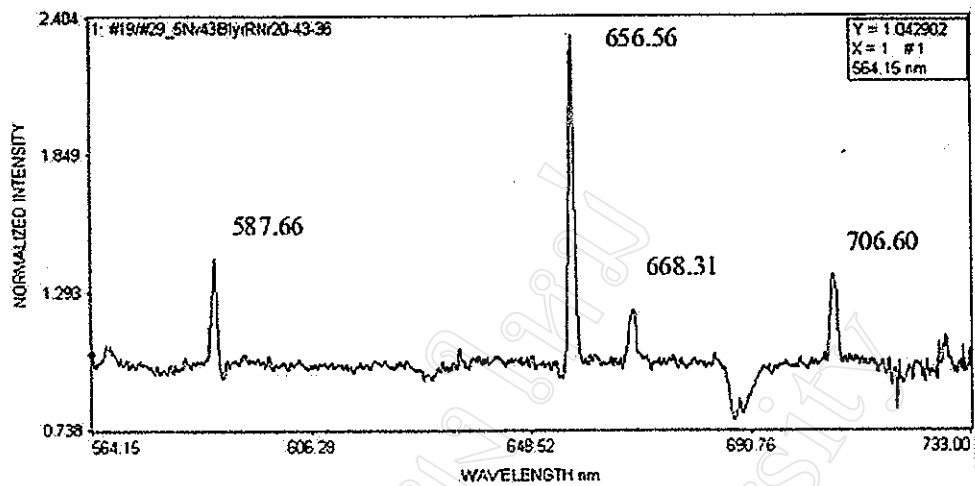
รูปที่ 4-34 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไลรี ที่ 3 พ.ย.2543 ณ 19:10:01 น.

หรือ H.J.D. = 2451852.006 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.618895707



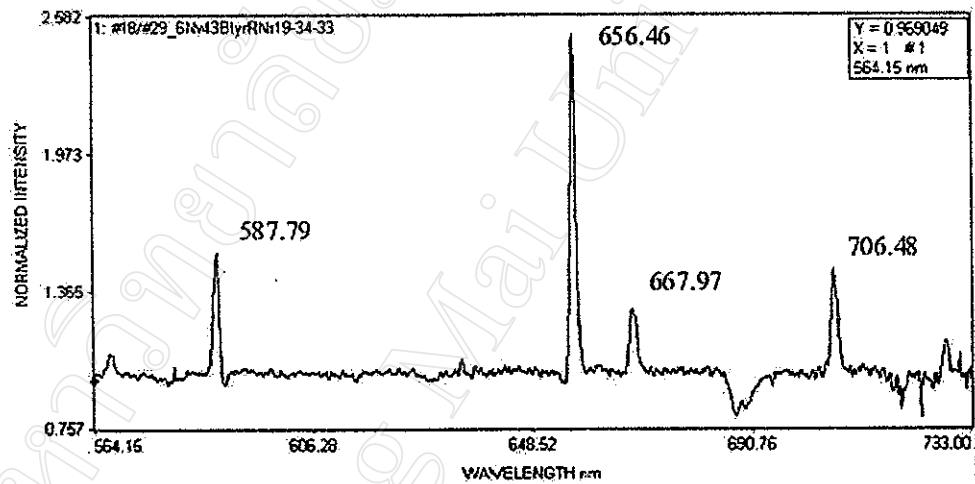
รูปที่ 4-35 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไลรี ที่ 4 พ.ย.2543 ณ 20:41:26 น.

หรือ H.J.D. = 2451853.069 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.701139769



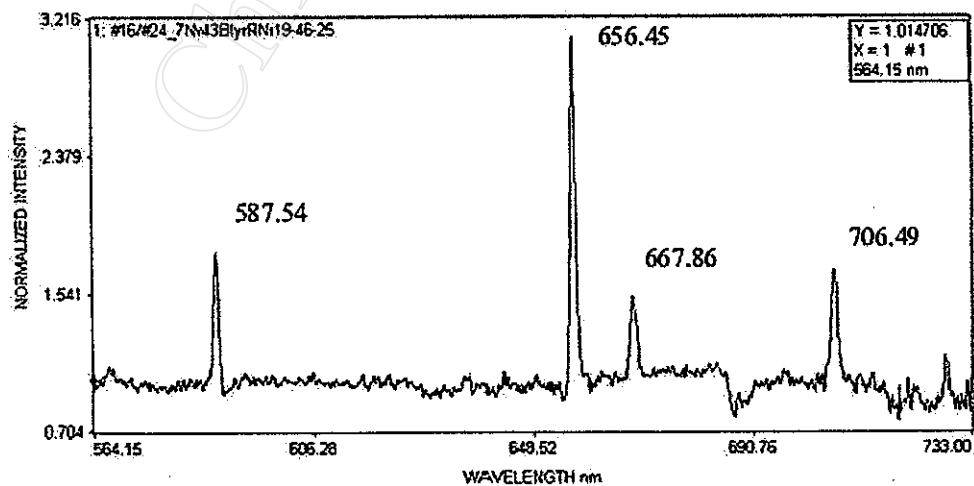
รูปที่ 4-36 Normalized spectrum ของดาวฤกษ์ที่ 5 พ.ย.2543 ณ 20:43:36 น.

หรือ H.J.D. = 2451854.071 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.778590727



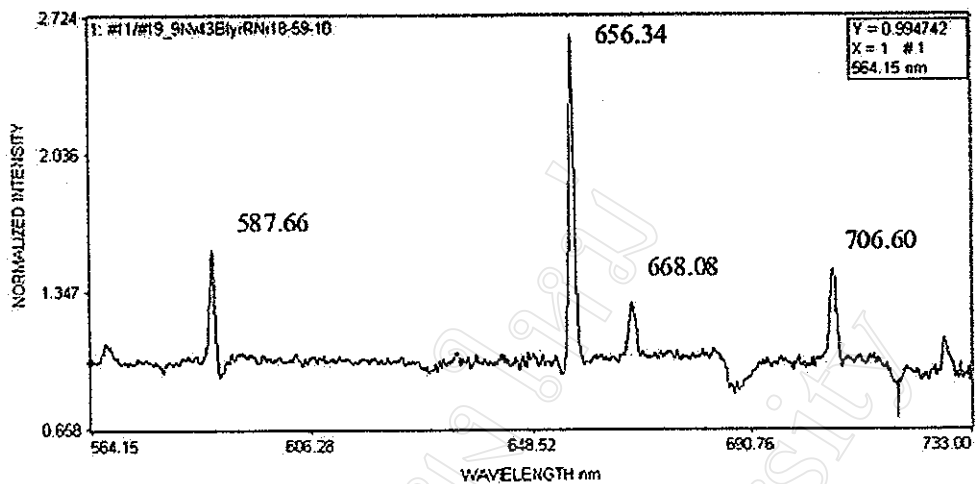
รูปที่ 4-37 Normalized spectrum ของดาวฤกษ์ที่ 6 พ.ย.2543 ณ 19:34:33 น.

หรือ H.J.D. = 2451855.023 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.852217053



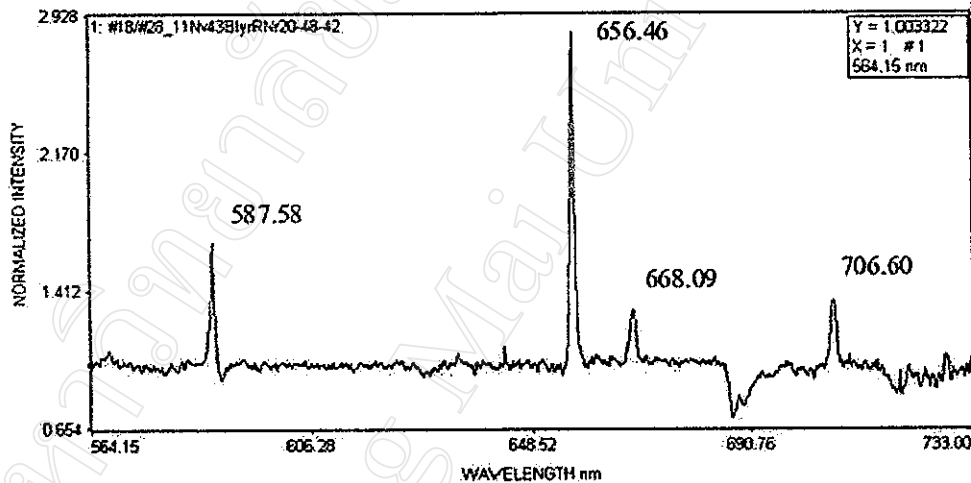
รูปที่ 4-38 Normalized spectrum ของดาวฤกษ์ที่ 7 พ.ย.2543 ณ 19:46:25 น.

หรือ H.J.D. = 2451856.031 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.930189007



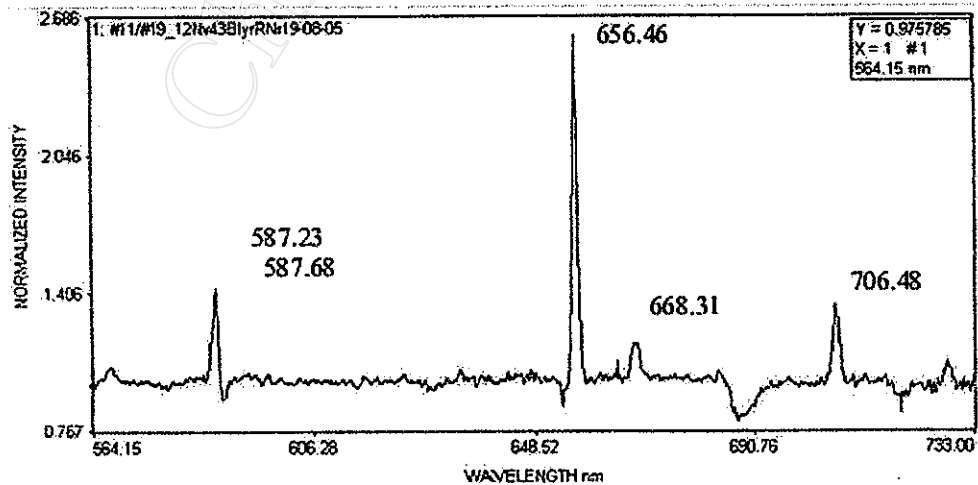
รูปที่ 4-39 Normalized spectrum ของดาวคู่ปีศาจที่ 9 พ.ย.2543 ณ 18:59:10 น.

หรือ H.J.D. = 2451857.998 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.082320877



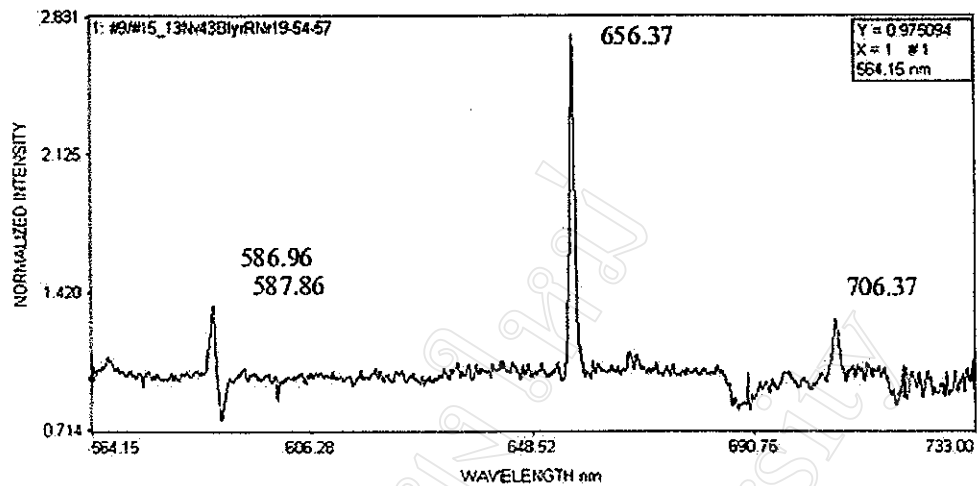
รูปที่ 4-40 Normalized spectrum ของดาวคู่ปีศาจที่ 11 พ.ย.2543 ณ 20:48:42 น.

หรือ H.J.D. = 2451860.074 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.24287289



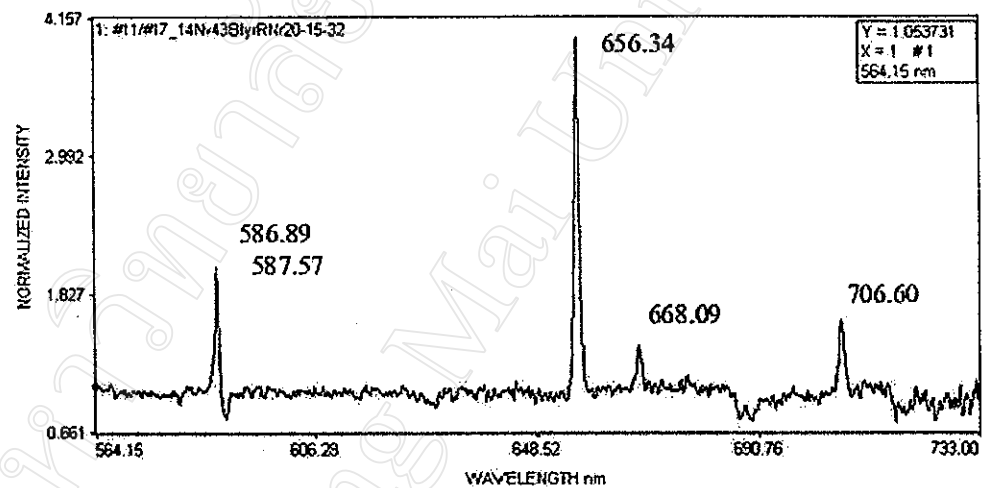
รูปที่ 4-41 Normalized spectrum ของดาวคู่ปีศาจที่ 12 พ.ย.2543 ณ 19:08:05 น.

หรือ H.J.D. = 2451861.004 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.314804131



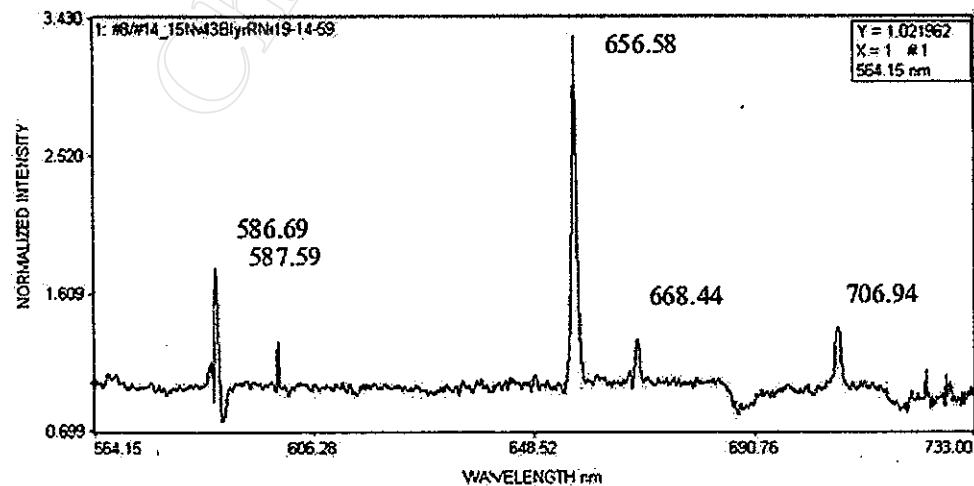
รูปที่ 4-42 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไลรี ที่ 13 พ.ย.2543 ณ 19:54:57 น.

หรือ H.J.D. = 2451862.036 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.394655966



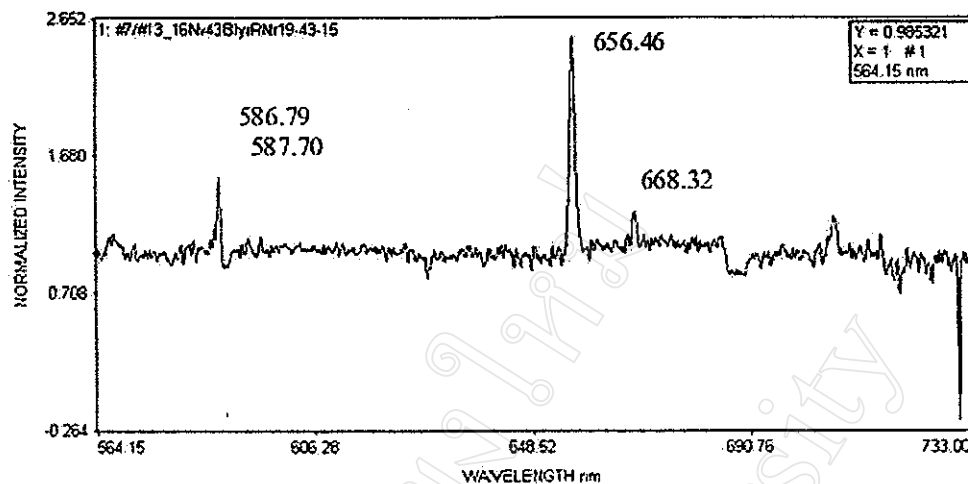
รูปที่ 4-43 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไลรี ที่ 14 พ.ย.2543 ณ 20:15:32 น.

หรือ H.J.D. = 2451863.051 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.473096302



รูปที่ 4-44 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไลรี ที่ 15 พ.ย.2543 ณ 19:14:59 น.

หรือ H.J.D. = 2451864.009 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.547179427



รูปที่ 4-45 Normalized spectrum ของดาวคูบีตาไกร ที่ 16 พ.ย.2543 ณ 19:43:15 น.

หรือ H.J.D. = 2451865.028 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.626032477

เมื่อภาพสเปกตรัมจากรูปที่ 4-18 ถึง 4-45 เหล่านี้เป็น Normalized spectrum ของดาวคูบีตา ไกร ที่มี Exposure Time = 60 วินาที ด้วย Normalized intensity บนแกน y และค่าความยาวคลื่นหน่วยนาโนเมตรบนแกน x พร้อมกับแสดงค่าความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตรกำกับที่แต่ละเส้นสว่างที่วัดได้ และถ้าเส้นใดเส้นหนึ่งระหว่าง I, II, III, หรือ IV (ย้อนดู รูปที่ 4-5) แสดงการแยกเป็น 2 เส้น อันเนื่องมาจากการเลื่อน (shift) ของเส้นสเปกตรัม จะแสดงค่ากำกับเป็น 2 ค่า ของเส้นแยกคู่นั้น โดยค่าด้านบนแทนเส้นสว่างที่เลื่อนอยู่ด้านซ้าย และค่าด้านล่างแทนเส้นสว่างที่เลื่อนอยู่ด้านขวา เมื่อค่าความยาวคลื่นที่กำกับบนเส้นสว่างแต่ละเส้นได้จากกรณี non Calibrated spectrum ที่ไม่ผ่านการทำ Renormalize ของหัวข้อที่ 4.1 และแสดงค่าวันจูเลียนศูนย์สุริยะ (H.J.D.) ที่สัมพันธ์กับเฟสการโคจร (Phase) ของดาวคูบีตาไกรที่แต่ละรูป ซึ่งวิธีการคำนวณวันจูเลียนศูนย์สุริยะและเฟสการโคจรได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 5 รวมถึงรูปเหล่านี้จะถูกใช้ในการวิเคราะห์ความผันแปรของรูปร่างโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมต่อวันสังเกตการณ์ด้วย

สำหรับภาพสเปกตรัมส่วนที่เหลือจำนวน 159 รูป ซึ่งไม่ได้แสดงในข้างต้น รวมถึงภาพสเปกตรัมที่แสดงเหล่านี้ (รูปที่ 4-18 ถึง 4-45) ด้วย จะถูกแสดงอยู่ในรูปข้อมูลเชิงตัวเลข ในตารางที่ 5-2 ของบทที่ 5 จากการคำนวณและวิเคราะห์ของบทที่ 4 และ 5