

Spettroscopia a bassa e alta risoluzione di Saturno e dei satelliti Titano, Rhea e Thetys

Autori: (in ordine alfabetico)

Dal Maso Enrico, Lauro Nicola, Lotto M. Chiara, Zarantonello Laura, (Liceo G.B. Quadri – Vicenza)

Zuccolo Alberto (I.T.G. A. Canova – Vicenza).

Insegnante: Aldo Pegoraro (Liceo G.B. Quadri – Vicenza)

Riassunto: vengono presentati i risultati di osservazioni spettroscopiche di Saturno e di tre suoi satelliti: Titano, Rhea e Tethys. Lo scopo dello studio è:

- 1) mettere in evidenza la presenza o meno di atmosfera nei satelliti;
- 2) studiare la rotazione di Saturno attorno al proprio asse;
- 3) ottenere la stima della massa di Saturno.

Introduzione

L'indagine astronomica mediante l'uso della spettroscopia fornisce importanti informazioni, quali la composizioni chimica degli oggetti celesti e lo stato fisico della materia che emette la radiazione, compreso lo stato di moto, grazie all'effetto Doppler. Nel presente lavoro, tale tecnica è stata applicata allo studio di Saturno e dei satelliti Titano, Tethys e Rhea.

Noto fin dall'antichità, Saturno è il settimo pianeta del nostro sistema solare, il secondo tra i quattro giganti gassosi, di cui il maggiore è Giove. Si distingue per la presenza di un vistoso sistema di anelli, distinguibili anche da terra utilizzando un modesto telescopio. Fra le sue particolarità, una densità piuttosto bassa, inferiore a quella dell'acqua; la minore tra quelle di tutti i pianeti.

Strumentazione

Lo strumento usato è il telescopio di 122 cm di Asiago – Colle Pennar, in configurazione Cassegrain, al cui fuoco è installato lo spettrografo Boller & Chievens. Lo spettrografo può lavorare con reticoli di vario tipo, da 150 a 1200 tratti per millimetro. Alla data delle osservazioni, tale spettrografo è stato dotato di un nuovo CCD, le cui caratteristiche geometriche e di sensibilità lo valorizzano particolarmente (vedi appendice A).

Raccolta dei dati

I dati sono stati raccolti durante la notte del giorno 1 febbraio 2006. Utilizzando il reticolo da 150 tratti sono stati ottenuti gli spettri di Saturno Rhea Titano e Thetys; fenditura: 250 micron. Per la

stella standard spettrofotometrica, la fenditura è stata portata a 800 micron per ridurre le perdite di flusso e migliorare la calibrazione. Successivamente si è utilizzato il reticolo con 1200 tratti per millimetro, mentre la fenditura è stata inclinata di sette gradi circa, rispetto alla direzione est-ovest, in modo che risulti perpendicolare all'asse di rotazione del pianeta (parallela al piano degli anelli). Questo nuovo “setup” strumentale si è reso necessario per lo studio della rotazione del pianeta. Trattandosi di spettri con i quali si vogliono compiere solo misure di velocità radiale, questi ultimi non sono stati sottoposti a calibrazione fotometrica.

Riduzione dei dati

Tale processo e' stato portato a termine utilizzando il software IRAF (NOAO) seguendo la procedura standard che possiamo così riassumere:

- Stima e rimozione (sottrazione) del bias;
- eliminazione delle disomogeneità nella risposta dei vari pixel del CCD mediante immagini dette di flat field (divisione per flat field);
- calibrazione in lunghezza d'onda, grazie allo spettro di una lampada al Ferro – argon;
- calibrazione in flusso per confronto con lo spettro di una stella standard spettrofotometrica: la HD84937.

Il problema del “fringing”

Le osservazioni sono state eseguite con un nuovo CCD appena installato, ancora in parte in fase di studio e messa a punto. Esso è caratterizzato da buone doti di risposta al segnale, ma essendo un CCD del tipo “sottile”, presenta il disturbo detto “fringing”. Esso è ben visibile nei frame di flat field ed ha la forma di una “onda”. L'effetto è dovuto alla interferenza della luce, ed è più rilevante nella parte rossa dello spettro. Tuttavia, è da notare che il “fringing” viene ben rimosso utilizzando la procedura standard di riduzione su descritta, senza ricorrere a nessun accorgimento particolare, (necessario a rigore), come si può vedere dalle immagini sotto.

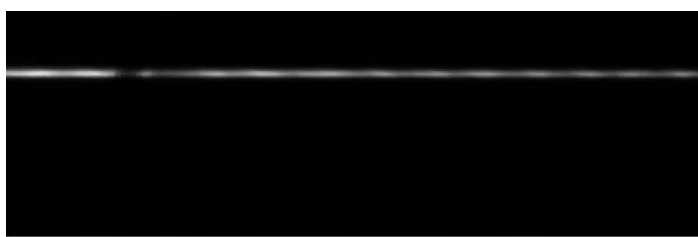


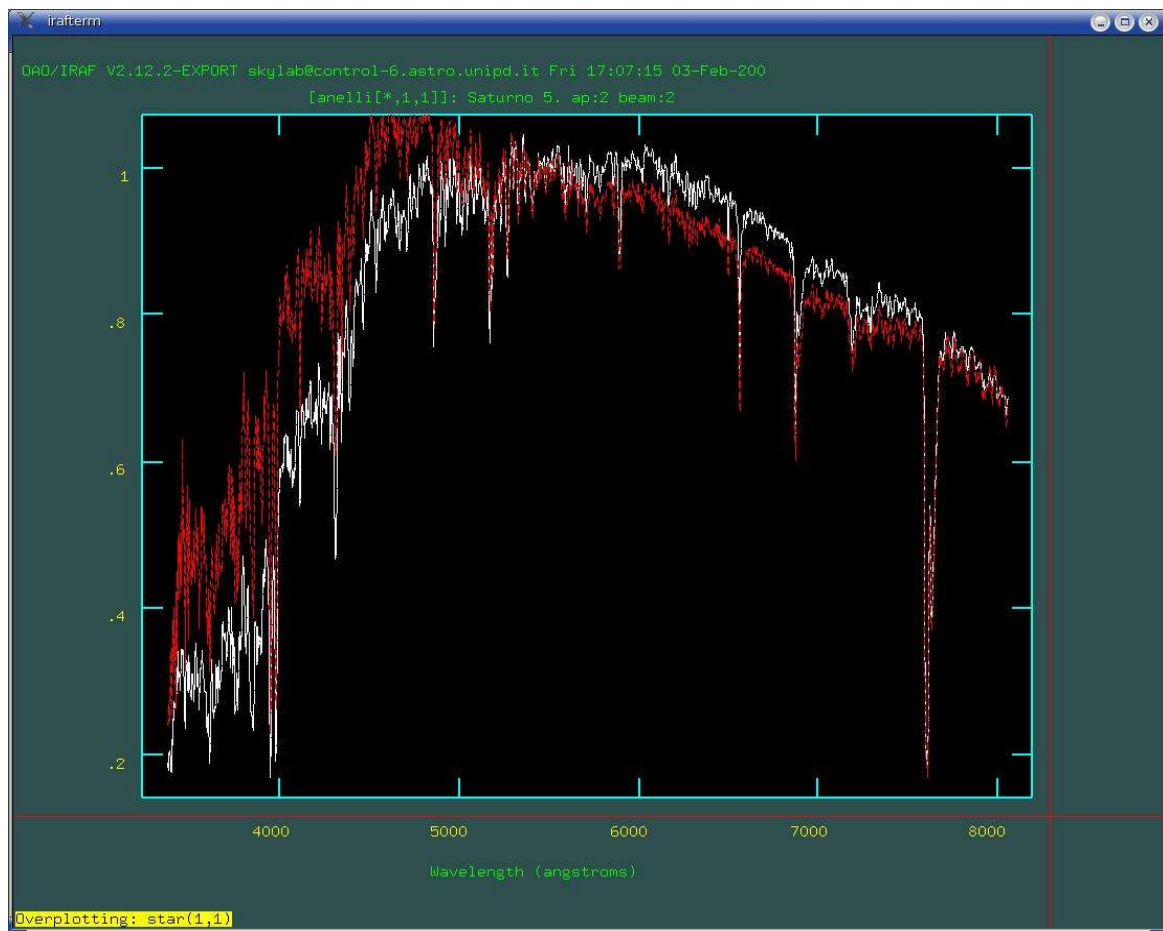
Immagine di Titano non corretta per bias e flat field



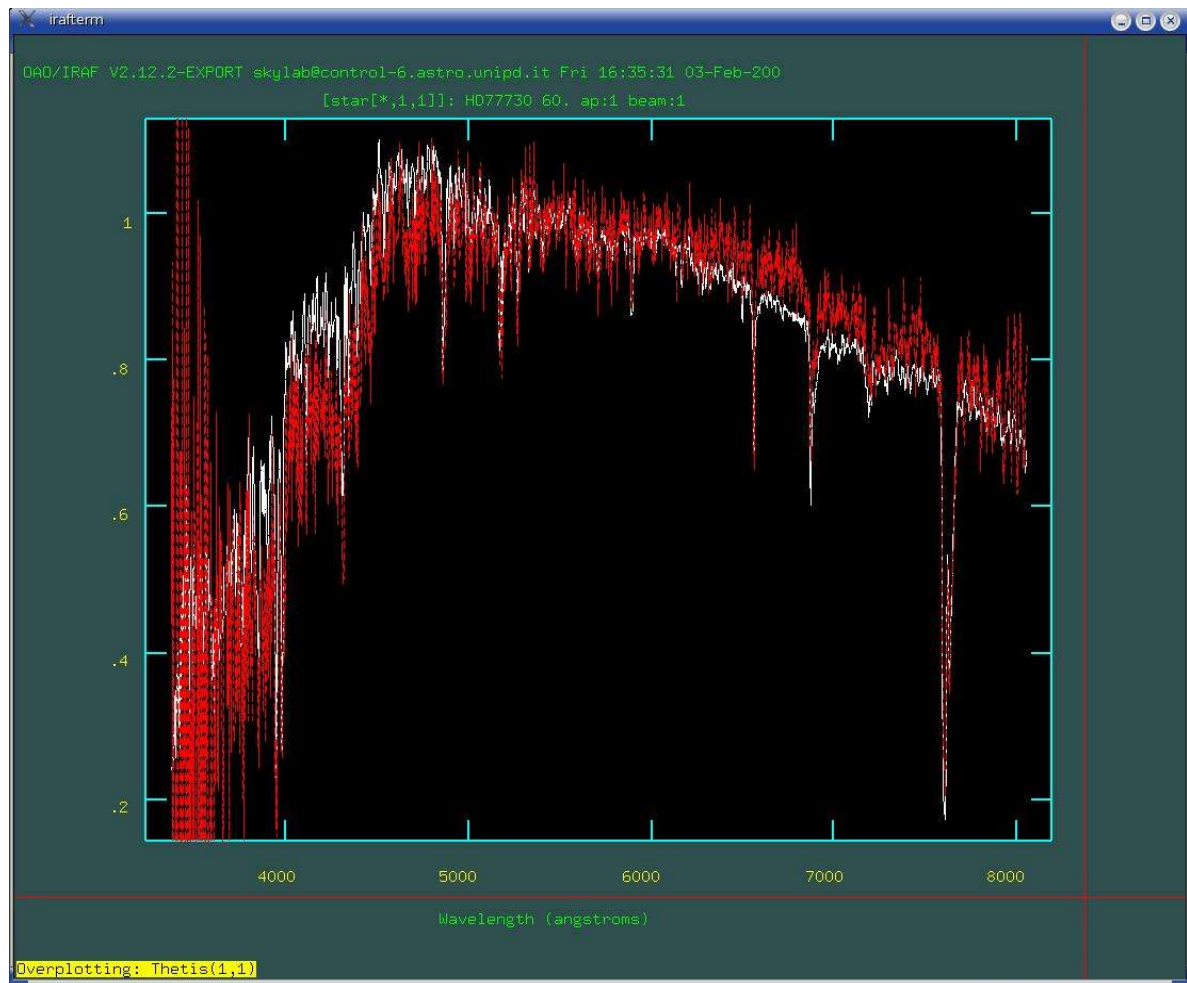
Immagine di Titano corretta per bias e flat field

Presenza di atmosfera

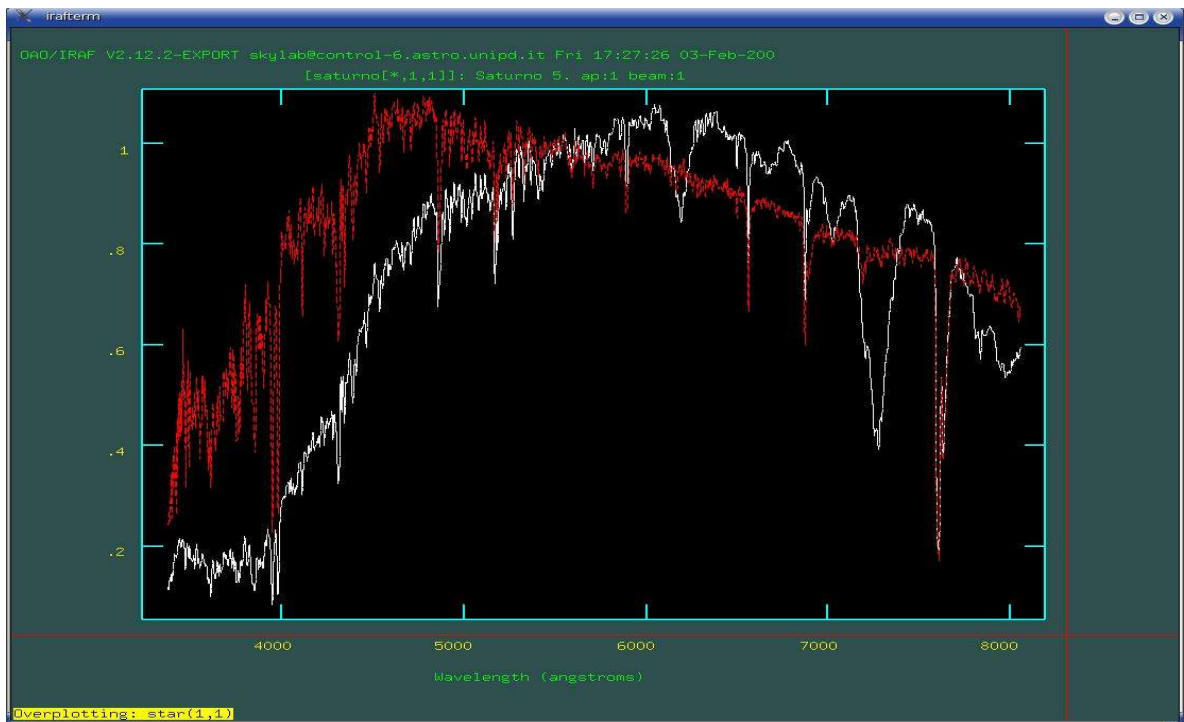
Per quanto riguarda il rilevamento dell'atmosfera di saturno ed eventualmente presente nei tre satelliti presi in esame, si è proceduto raccogliendo lo spettro di questi oggetti e di una stella di tipo solare: la HD77730. Dal loro confronto, è emerso che mentre per Rhea e Tethys, come pure per gli anelli, si è ottenuto uno spettro non dissimile dalla stella di confronto, nello spettro di Saturno e Titano compaiono le righe delle molecole di metano, segno della presenza di atmosfera.



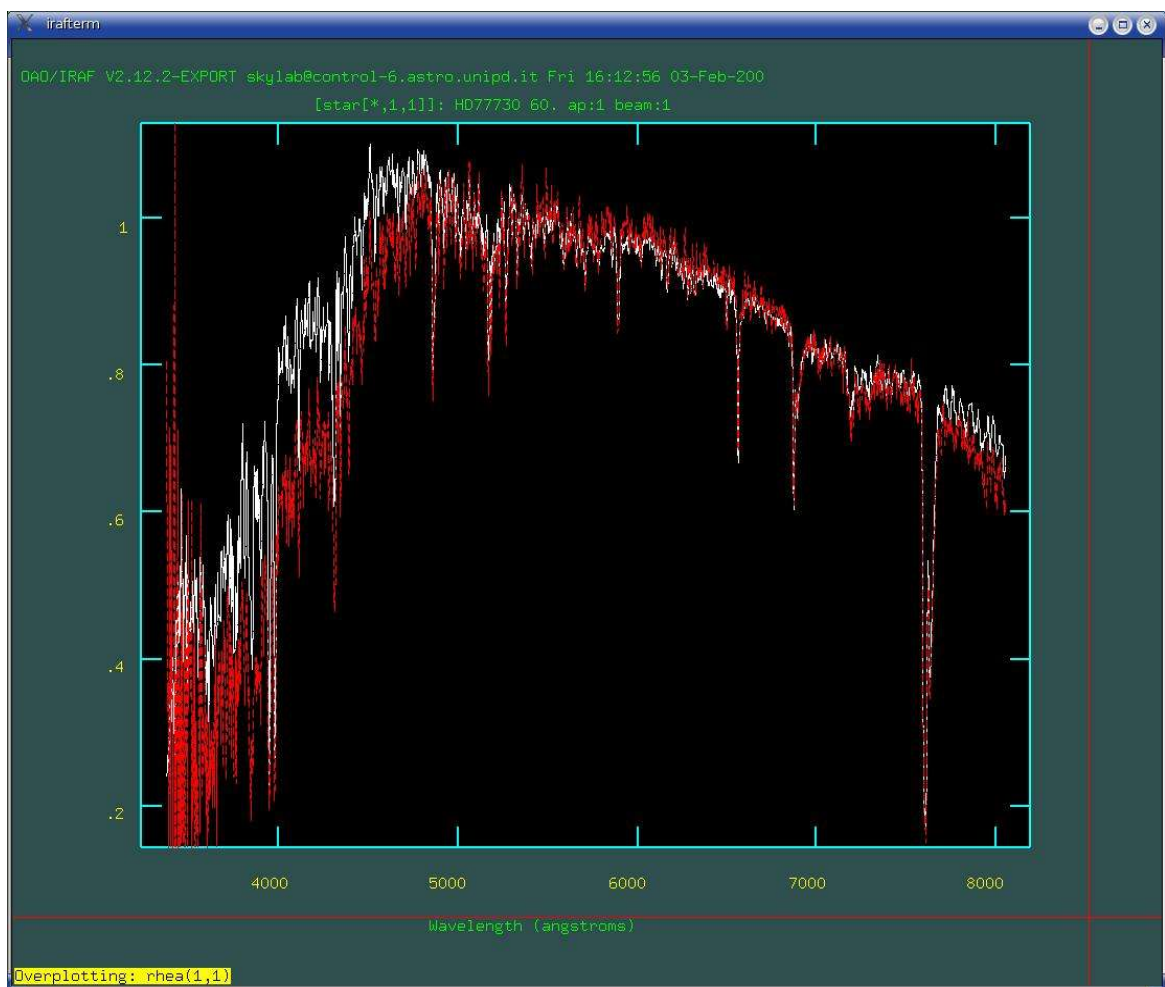
In colore bianco, lo spettro degli anelli di saturno. In colore rosso lo spettro della stella di tipo solare



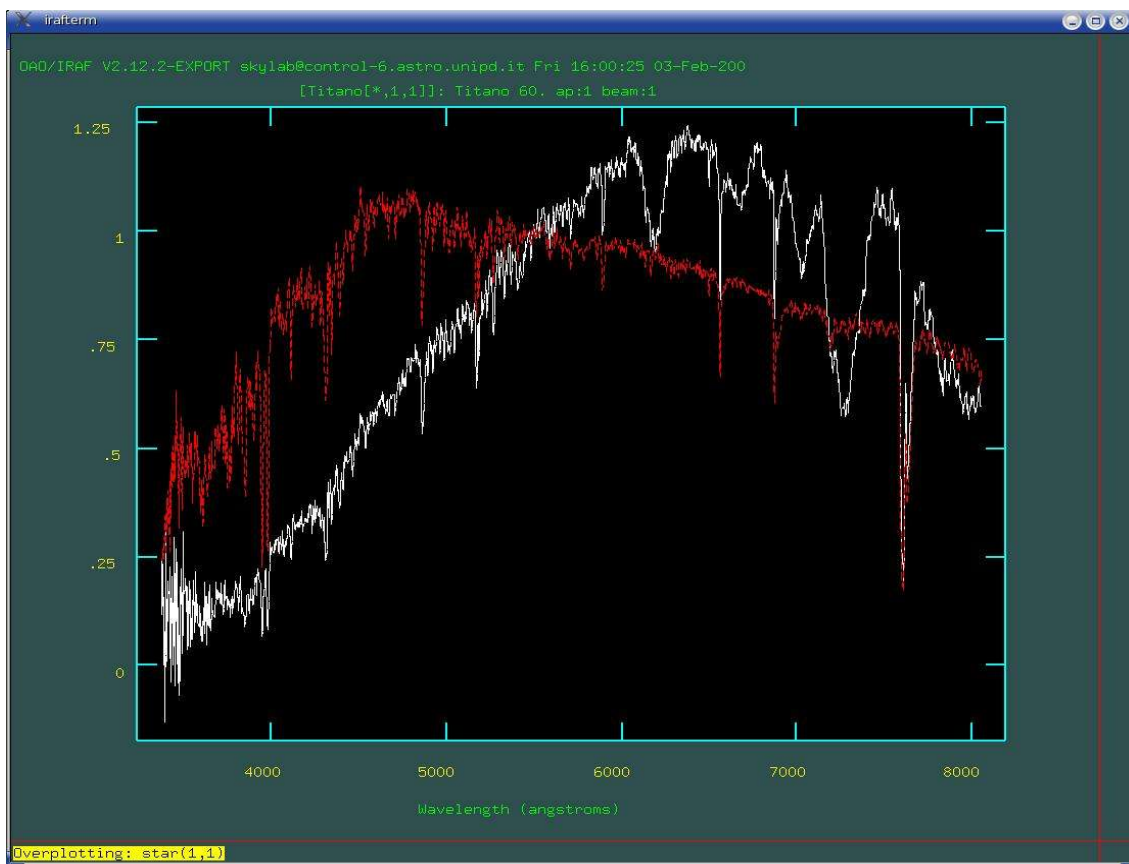
In colore rosso, lo spettro di Thetis. In colore bianco lo spettro della stella di tipo solare



In colore bianco lo spettro di saturno. In colore rosso lo spettro della stella di tipo solare



In colore rosso lo spettro di Rhea; in colore bianco quello della stella di tipo solare



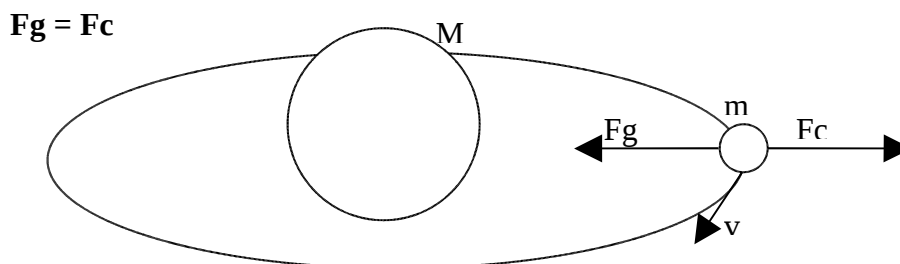
In colore bianco lo spettro di Titano. In colore rosso lo spettro della stella di tipo solare

La semplice ispezione visuale rivela una evidente sovrapponibilità fra gli spettri della stella campione e gli spettri di Rhea, Thetis, e degli anelli di Saturno. Questo si spiega facilmente se si ammette che questi oggetti essenzialmente riflettano la luce solare, e che quindi sia assente o trascurabile la presenza di atmosfera. Diversamente, gli spettri di Saturno e di Titano rivelano importanti righe di assorbimento nella parte rossa dello spettro, che non sono presenti nello spettro della stella campione. Abbiamo identificato le righe del metano (CH_4) di lunghezza d'onda 6199 e 7299 Å. Questi corpi hanno quindi una atmosfera propria, e la luce che da essi ci giunge e che li rende visibili non è semplicemente luce solare riflessa.

Determinazione della massa di Saturno

Consideriamo un satellite di Saturno. Questo si muove intorno al pianeta seguendo la sua orbita; su di esso agiscono contemporaneamente la forza di attrazione gravitazionale prodotta da Saturno e la forza centrifuga.

Affinché il satellite mantenga la sua orbita, è necessario che forza gravitazionale e forza centrifuga si bilancino, dunque:



varrà quindi la relazione

$$GMm/R^2 = mV^2/R$$

dove **G** è costante di gravitazione universale, **m** la massa del satellite, **M** la massa di Saturno, **R** la distanza del satellite da Saturno, ed infine **V** è la velocità tangenziale del satellite.

Dopo alcune semplificazioni si ottiene:

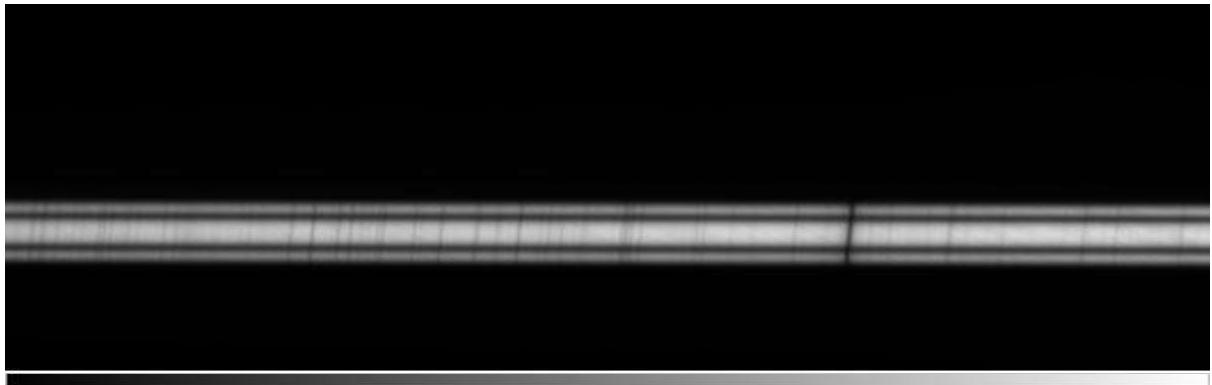
$$M = RV^2/G \quad (1)$$

Questa in sintesi la teoria (semplificata). Al posto di un satellite di Saturno abbiamo considerato i suoi anelli. Per il calcolo della velocità radiale **V** bisogna tener conto che la luce che riceviamo è luce riflessa, per cui essa subisce un doppio effetto Doppler. La relazione che fornisce la velocità di rotazione del materiale che costituisce gli anelli risulta essere la seguente:

$$V = [(I_1 - I_2)c]/(4 I_0) \quad (2)$$

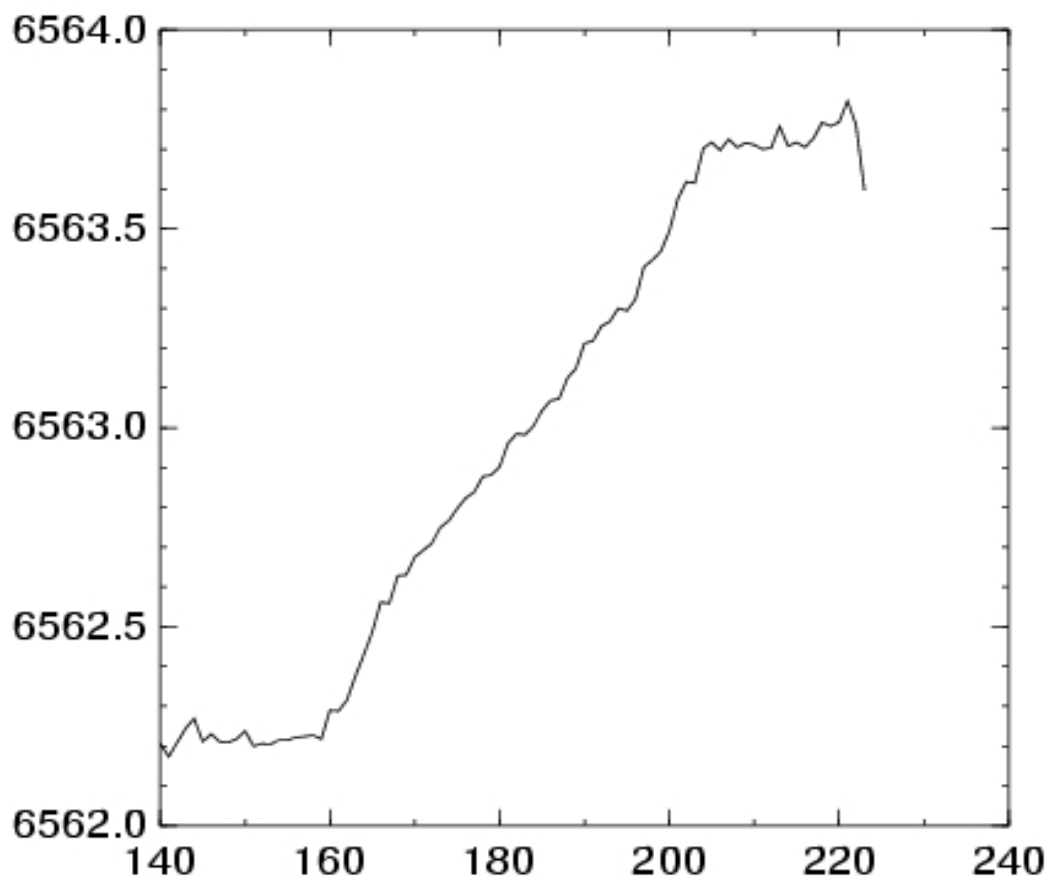
dove **c** è la velocità della luce, **I₀** è la lunghezza d'onda della riga a riposo, e **I₁** e **I₂** sono le lunghezze d'onda della luce riflessa dagli anelli, da una parte e dall'altra rispetto al pianeta. Per la dimostrazione della formula precedente vedi l'appendice B.

Consultato l'Astronomical Almanac, abbiamo ruotato lo spettrografo di quasi 7 gradi rispetto alla direzione est-ovest in modo che la fenditura dello spettrografo fosse il più possibile perpendicolare all'asse di rotazione (parallela al piano degli anelli). Lo spettro che ne risulta è qui sotto riportato. La riga più intensa è la H α (656,2817 nm). E' su questa riga che abbiamo effettuato le misure.



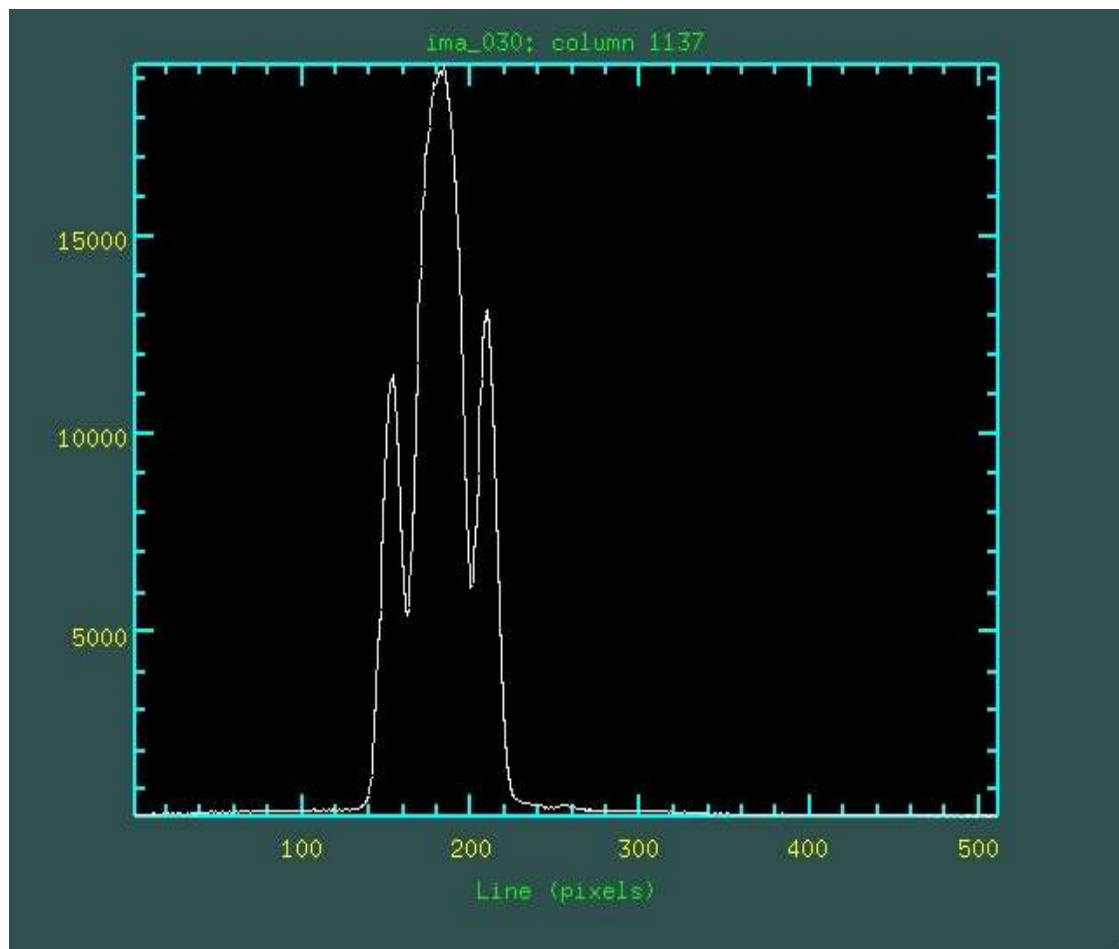
Spettro di Saturno. Reticolo da 1200 tr/mm. Si riconoscono gli anelli. La riga più intensa è la H_α

Il risultato delle misure di lunghezza d'onda effettuate sulla riga H_α è visualizzato dal seguente grafico:



Le ordinate riportano la lunghezza d'onda misurata, espressa in Angstrom, mentre le ascisse corrispondono al numero di riga nel CCD. Si noti l'andamento tipico di un corpo rigido in rotazione (parte centrale). Le misure di lunghezza d'onda sono state effettuate con il “task” *splot* di IRAF.

Va ricordato che Saturno si è trovato in opposizione il 28 gennaio 2006 mentre le nostre osservazioni sono state effettuate la notte del primo febbraio. Questo significa che la sua distanza dalla terra è minima (8,13 U.A.); inoltre, la componente della velocità radiale della terra è trascurabile, essendo il vettore di velocità orbitale terrestre praticamente perpendicolare alla linea di vista.



Plot della riga 1137 del “frame” dello spettro di Saturno.
Il picco centrale è dovuto al pianeta. I picchi laterali sono dovuti agli anelli

L'esame dello spettro ci permette di individuare la posizione degli anelli alle righe 154 ($\lambda_1 = 656,2217 \text{ nm}$) e 209 ($\lambda_2 = 656,3716 \text{ nm}$). La differenza, espressa in pixel fra la posizione del pianeta e quella degli anelli (considerando il pixel più intenso) è 28 pixel. La scala dello strumento è di $0,6''/\text{pixel}$; 28 pixel corrispondono quindi a $16,8''$ in cielo. Il raggio dell'orbita dei frammenti che costituiscono gli anelli vale quindi:

$$R = d \operatorname{tg}(x) = (d x_{\text{rad}}) = (d x'')/206265 \quad (3)$$

dove x'' vale appunto 16,8" mentre x è l'equivalente espresso in radianti. La (3) ci dice che 1" in cielo corrisponde a circa 5949 Km su Saturno ($d = 8,13$ U.A.)

Il raggio R risulta: 99062 Km. La velocità V dei frammenti che costituiscono gli anelli calcolata con la (2) e de-proiettata (vedi appendice C) risulta pari 18,26 Km/s. Utilizzando la (1), per la massa di Saturno si ottiene:

$$M = 5 \times 10^{26} \text{ Kg}$$

che è un valore prossimo alla stima oggi accettata (5.7×10^{26} Kg).

Calcolo della velocità di rotazione

Le osservazioni effettuate ci permettono di tentare anche la determinazione della velocità di rotazione di Saturno. Si può infatti applicare proprio la (2) dove però in questo caso l_1 e l_2 sono le lunghezze d'onda misurate al bordo del pianeta.

L'esame dello spettro mostra che tale bordo va dalla riga 165 ($l_2 = 656,2487$ nm) alla riga 195 ($l_1 = 656,3294$ nm). Il diametro apparente del pianeta vale 30 pixel ovvero 18" in cielo. Il valore della velocità, (de-proiettata) è:

$$V = 9,75 \text{ Km/s}$$

contro un valore attualmente accettato di 10,23 Km/s

Determinazione del periodo di rotazione

Il periodo di rotazione di un oggetto rotante si calcola facilmente grazie all'espressione

$$P = (6,28 R) / V$$

dove R è il raggio di Saturno e V la velocità di rotazione. Il raggio di Saturno può essere misurato sullo spettro, nota la distanza che ci separa. Utilizzando la (3) troviamo:

$$R = 53069 \text{ Km}$$

un po' sottostimato rispetto al valore di 60000 Km (raggio equatoriale), e forse sottostimato di un pixel ($53069 + 5896 = 58965$ Km).

Con questi valori, la formula precedente fornisce un periodo $P = 9^h 30^m$ prossimo a 10^h e 14^m che è valore oggi accettato.

Una stima, pur grossolana, degli errori di misura può essere effettuata calcolando la differenza fra il valore trovato in letteratura e il valore misurato, diviso per il valore trovato in letteratura. Si trova per la massa un errore del 12 % mentre per il periodo di rotazione l'errore è del 7 %. Per la velocità di rotazione l'errore è inferiore al 5 %. I valori ottenuti risultano tutti sottostimati rispetto ai valori trovati in letteratura; questo può significare l'esistenza di errori sistematici nelle nostre misure.

Appendice A

TELESCOPIO E STRUMENTAZIONE

Il telescopio Galileo

Longitudine : E11° 31' 43" — Latitudine : +45° 51' 44.7" — Altitudine : 1045 m

Il telescopio di 122 cm dell'Osservatorio Astrofisico di Asiago fu costruito dalle Officine Galileo di Firenze fra il 1940 e il 1942 e dedicato a Galileo Galilei in occasione del terzo centenario della sua morte.

Lo specchio primario ha una forma parabolica con un diametro efficace di 120 cm e un foro centrale di 19.5 cm. Lo strato riflettente, originariamente ottenuto con l'argento, viene oggi realizzato in alluminio. La procedura di alluminatura è effettuata periodicamente usando la campana a vuoto, che si trova nell'officina della cupola del telescopio Copernico di 180 cm a Cima Ekar (Asiago). Lo specchio secondario può essere uno specchio piano di forma ellittica a 45° quando il telescopio è in configurazione Newton, oppure uno specchio convesso iperbolico quando si vuole ottenere la configurazione Cassegrain. In questo secondo caso l'immagine si forma circa 84 cm dietro la superficie riflettente dello specchio primario. Tutti gli specchi sono realizzati in pyrex. Il fuoco Newtoniano può essere raggiunto dall'osservatore mediante una piattaforma mobile fissata ai lati dell'apertura della cupola.

Montatura

La montatura equatoriale è di tipo inglese con due pilastri a nord e a sud che sostengono l'asse polare, il tubo del telescopio fuori asse e l'asse della declinazione corto. Il pilastro nord non consente la piena copertura del cielo attorno al Polo.

Il telescopio ha un tubo completamente chiuso; la parte anteriore finale del tubo può ruotare completamente attorno all'asse ottico per consentire una più agevole osservazione al fuoco Newtoniano. La parte posteriore finale del tubo contiene il sistema di regolazione per la cella dello specchio primario. Quest'ultimo è supportato in asse da 18 sostegni e radialmente da un sistema di 24 leve per il bilanciamento posizionate a distanze uguali attorno alla cella. La cella del primario è dotata di diaframma a iride, variabile.

La cupola del telescopio ha un diametro esterno di 15 m e uno interno di 14 m.

L'apertura della cupola è di 3.7 m.

Dati tecnici

	Diametro (mm)	Spessore (mm)	Peso (kg)	Lunghezza focale (mm)	Forma
Specchio primario	1200	206	600	6000	Parabolica
Specchio secondario	327	65	15		Iperbolica
specchio secondario	471 x 333	60	19	---	Piana
	Lunghezza focale (mm)		Rapporto focale		Scala ("/mm)
Newton	6000		f/5		34.4
Cassegrain	19130		f/16		10.8

Strumentazione al piano focale

Il fuoco Cassegrain del telescopio è equipaggiato con uno spettrografo **Boller & Chivens**. Lo spettrografo è stato realizzato dalla Perkin Elmer (mod 58770) e installato al telescopio Copernico di 180 cm a Cima Ekar.

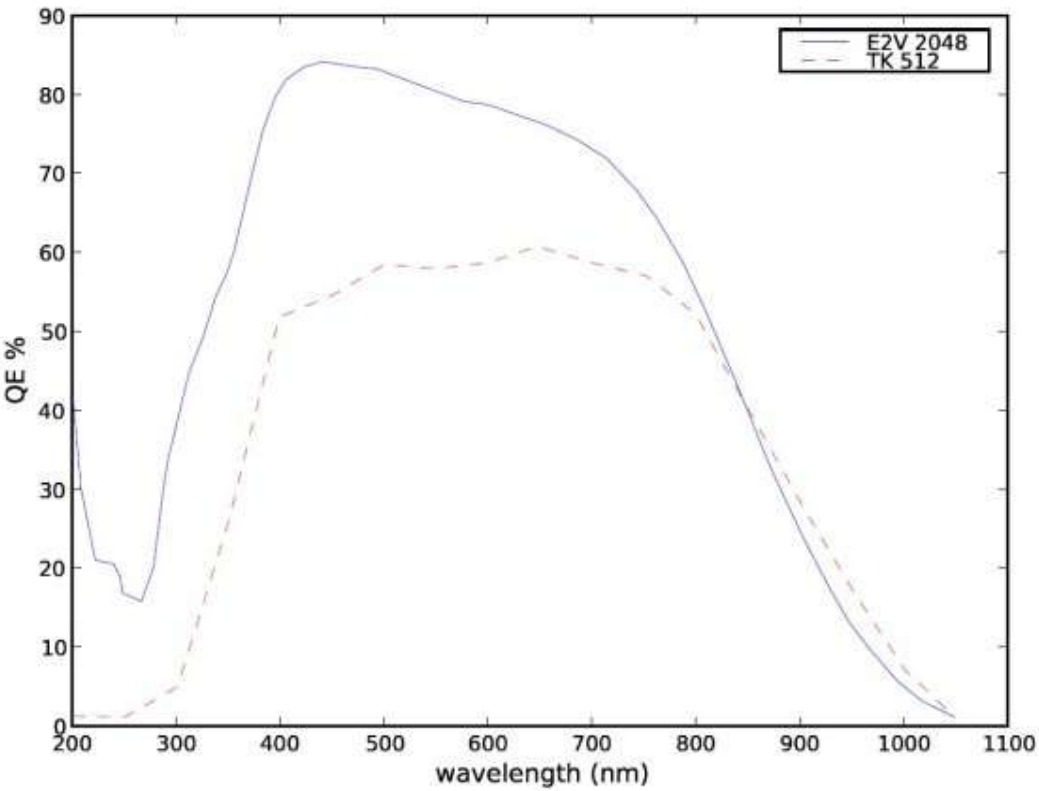
Nel 1998 il B&C è stato spostato al 122 cm.

Lo spettrografo B&C è costituito dalle seguenti componenti.

Una [fenditura lunga](#) con apertura variabile fino a oltre 1 mm e lunghezza di 28 mm, si trova in corrispondenza del piano focale del fuoco Cassegrain. Il lato della fenditura rivolto verso il fascio di luce entrante ha la superficie riflettente. Uno specchio parabolico fuori asse di diametro 90 mm e lunghezza focale di 810 mm (f/9) funge da [collimatore](#) del fascio verso il [reticolo](#). Vi è a disposizione un set di 4 reticoli con dispersione da 42 Å/mm fino a 339 Å/mm (dettagli nella tabella sotto). Il fascio di luce dispersa è diretto verso la [Dioptric Blue Galileo Camera](#) (vedi schema), che ha una lunghezza focale di 188 mm ed è attualmente in combinazione con il [CCD](#) Andor iDUS 440A-BU da 512 x 2048 px. In aggiunta, è possibile utilizzare alcuni filtri colorati, collocati fra la fenditura e il collimatore, per separare gli ordini nell'intervallo spettrale rosso. Una lampada di confronto di Fe - Ar è installata in modo permanente per consentire la calibrazione in lunghezza d'onda. Infine, la superficie riflettente della fenditura su cui si forma l'immagine prodotta dal telescopio viene monitorata da una [telecamera di guida](#) Proxitronic, che ha una sensibilità nominale di 1 μ lux e copre un campo di vista di 4' 50" x 3' 20". La scala spaziale dello strumento misurata sul CCD è di 0.6"/pixel.

Elenco dei reticoli utilizzabili e loro caratteristiche

Reticoli	Angolo di blaze	di blaze	Dispersione		Risoluzione		Curva di sensibilità
			$\text{\AA}/\text{mm}$	$\text{\AA}/\text{px}$	150	250	
150	2° 09'	5000	339				(1)
300	4° 18'	5000	169	2.30	1000	700	(2)
600	8° 38'	4500	85	1.17		1250	(3)
1200	26° 45'	6825	42	0.60	4250		(4)



efficienza quantica del nuovo e del vecchio CCD a confronto

Appendice B

Il doppio effetto Doppler

Si manifesta nel caso di radiazione riflessa da un corpo in movimento. Se l è la lunghezza d'onda emessa dal sole, il satellite “vedrà” radiazione di lunghezza d'onda $l' = l(1 - V/c)$. Tale radiazione viene riflessa verso l'osservatore, che quindi riceve radiazione di lunghezza d'onda $l'' = l'(1 - V/c)$ (caso del satellite che si allontana). Risulta alla fine:

$$l'' = l(1 - 2V/c + V^2/c^2)$$

trascurando termini dell'ordine di $(V/c)^2$ potremo scrivere:

$$l'' = l(1 - 2V/c)$$

ed infine

$$V = (l - l'')c/(2l)$$

l'' è la lunghezza d'onda osservata dalla terra; indicandola con l_1 ed l_2 per la materia che si avvicina e per la materia che si allontana sarà: $l_1 = l(1 - 2V/c)$ ed $l_2 = l(1 + 2V/c)$ e quindi: $l_2 - l_1 = 4lV/c$ da cui si ha $V = (l_2 - l_1)c/(4l)$.

Appendice C

Latitudine saturnocentrica del punto sub-terrestre

Il piano equatoriale del pianeta, sul quale giace il sistema di anelli, è inclinato di quasi 27 gradi rispetto all'orbita. Questo causa una variazione notevole dell'aspetto del pianeta da un'opposizione all'altra. Infatti, la posizione di Saturno e della Terra sulle rispettive orbite determinano l' "apertura" sotto la quale si mostrano gli anelli. Se questa varia poco nel corso di una singola apparizione, è invece soggetta a forti mutamenti col passare degli anni, man mano che il pianeta compie la sua rivoluzione intorno al sole. Nell'arco di metà del suo periodo siderale si passa da una situazione di invisibilità degli anelli (posti esattamente di taglio) alla massima apertura, e poi nuovamente all'invisibilità. Nella seconda metà dell'orbita il ciclo si ripete, mostrando però l' altra faccia degli anelli e l'altro emisfero del pianeta.

Il parametro che meglio rappresenta questa variazione è la *latitudine saturnocentrica del punto sub-terrestre* (indicata solitamente con B), ovvero l' angolo compreso tra il piano equatoriale di Saturno e la linea congiungente il centro di Saturno con la Terra, misurato con valori positivi verso Nord. Quindi, quando si ha $B = 0^\circ$ gli anelli sono esattamente di taglio, mentre con $B = -26^\circ$ si è nei pressi della massima apertura, con l'emisfero Sud rivolto verso la Terra. Il valore di B è reperibile sugli Almanacchi.

Nel nostro caso, consultando l'Astronomical Almanac abbiamo trovato per B un valore di 19 gradi. La velocità radiale misurata va de-proiettata dividendo per il coseno di questo angolo.

Tabella delle misure effettuate sulla riga H_a

Nr. di Lunghezza
riga d'onda (Å)

140	6562.207
141	6562.173
142	6562.209
143	6562.244
144	6562.269
145	6562.211
146	6562.23
147	6562.211
148	6562.209
149	6562.218
150	6562.238
151	6562.2
152	6562.206
153	6562.205
154	6562.215
155	6562.215
156	6562.222
157	6562.224
158	6562.227
159	6562.218
160	6562.29
161	6562.288
162	6562.315
163	6562.376
164	6562.43
165	6562.487
166	6562.562
167	6562.558
168	6562.628
169	6562.63
170	6562.675
171	6562.692
172	6562.709
173	6562.749
174	6562.766
175	6562.797
176	6562.823
177	6562.838
178	6562.877
179	6562.881
180	6562.902
181	6562.961
182	6562.985
183	6562.982
184	6563.004
185	6563.043
186	6563.068
187	6563.073
188	6563.125
189	6563.149
190	6563.212
191	6563.218
192	6563.255
193	6563.267
194	6563.3
195	6563.294
196	6563.322
197	6563.404
198	6563.421
199	6563.443
200	6563.493
201	6563.574
202	6563.618
203	6563.615
204	6563.702
205	6563.717
206	6563.697
207	6563.725
208	6563.704
209	6563.716
210	6563.711
211	6563.7
212	6563.703
213	6563.757
214	6563.708
215	6563.717
216	6563.705
217	6563.727
218	6563.767
219	6563.758
220	6563.767
221	6563.821
222	6563.762
223	6563.597

Bibliografia

The Astronomical Almanac

L. Rosino - Lezioni di Astronomia - Ed. Cedam