

I satelliti di Giove
che cosa ha veramente visto Galileo?

Galileo incontra il cannocchiale

G. nel 1609 si trova a Padova (l'anno successivo tornerà a Firenze).

Viene a sapere che in Olanda un occhialaio ha costruito un “occhiale” che permette d'ingrandire le cose lontane.

Riesce a procurarsene un esemplare, lo studia e ne costruisce altri, progressivamente migliori.

(G. era capace di fabbricare da sé delle ottime lenti, ma le sue conoscenze di ottica erano scarse, a differenza di Keplero.)

Il cannocchiale di G. era *galileiano*, ossia con una lente convergente (obiettivo) e una divergente (oculare). Il migliore ingrandiva 30 volte.

G. presenta il cannocchiale — come sua invenzione — al Senato di Venezia, che lo accoglie con grande interesse, per la sua utilità in mare.

Gli viene rinnovato a vita il contratto di docente presso l'Università di Padova, con stipendio raddoppiato (da 500 a 1000 fiorini).

G. costruisce diversi esemplari di cannocchiale, che manda in dono a principi e scienziati in Europa.

Le prime osservazioni astronomiche

Comincia a guardare il cielo alla fine del 1609, e scopre tante cose nuove.

Sente quindi il bisogno di renderle subito note (anche per assicurarsi la priorità).

Nasce così il *Sidereus Nuncius* (in latino).

L'*imprimatur* è datato 1° marzo 1610, la prefazione 12 marzo, e contiene osservazioni dei satelliti di Giove fino al 2 marzo.

S I D E R E V S
N V N C I V S

MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Spectacula pandens, suspiciendaque proponens
vnicuique, præsertim verò

PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, qua à

G A L I L E O G A L I L E O
P A T R I T I O F L O R E N T I N O

Patauini Gymnasij Publico Mathematico

P E R S P I C I L L I

*Nuper à se reperti beneficio sunt obseruata in LVN. ÆFACIE, FIXIS IN-
NUMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLOSIS,*

Apprime verò in

Q V A T V O R P L A N E T I S

*Circa IOVIS Stellam disparibus interuallis, atque periodis, celeri-
tate mirabili circumuolutis; quos, nemini in hanc vsque
diem cognitos, nouissimè Author depræ-
hendit primus; atque*

M E D I C E A S I D E R A
N V N C V P A N D O S D E C R E V I T .



VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M D C X.

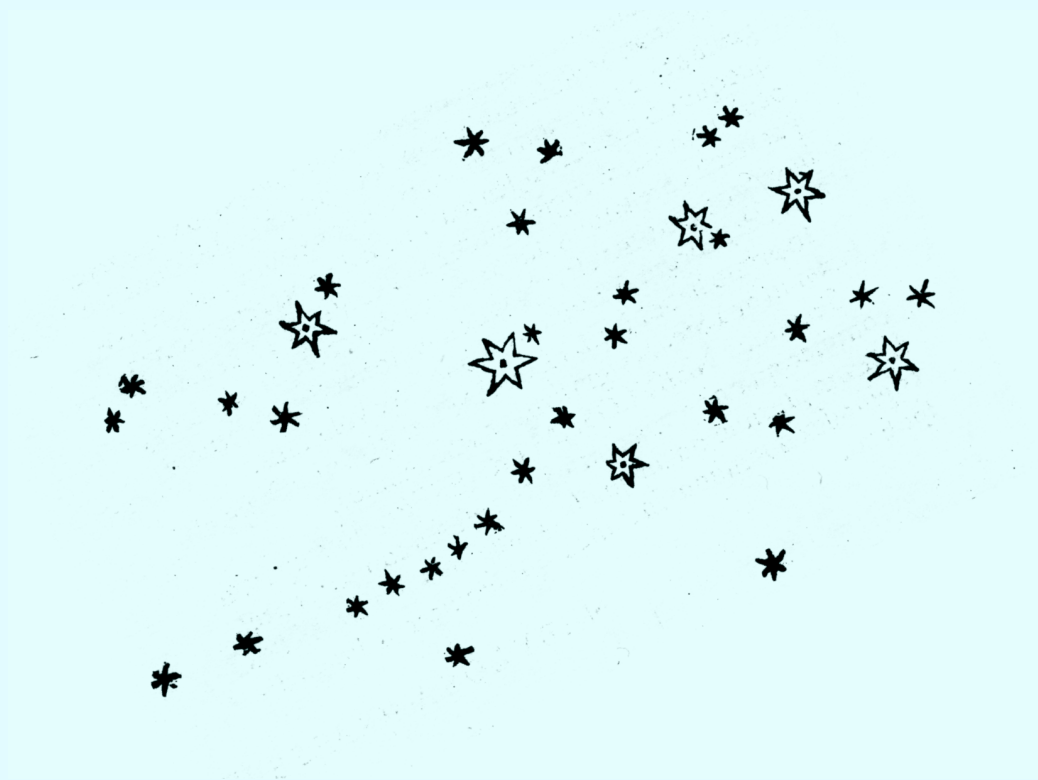
Superiorum Permissu, & Præuilegio.

Nel *Sidereus Nuncius* troviamo, nell'ordine:

- osservazioni della Luna: montagne, crateri
- le stelle sono molte di più di quelle visibili a occhio nudo
- la Via Lattea è formata di stelle
- così pure le “nebulose”
- la scoperta più importante: i satelliti di Giove.







La Via Lattea è fatta di stelle

“Ciò che in terzo luogo abbiamo osservato è l'essenza, ovvero la materia, della stessa Via Lattea, che con l'aiuto del cannocchiale può essere resa del tutto evidente: sì che dalla visione diretta verranno risolte tutte le controversie che travagliarono per tanti secoli i filosofi, e saremo così liberati da queste discussioni verbose.

È infatti la Galassia null'altro che una congerie d'innunmerevoli stelle raccolte insieme; e in qualunque regione di essa si diriga il cannocchiale, sempre si mostra un'ingente quantità di stelle, molte delle quali sono abbastanza grandi e luminose; ma la moltitudine di quelle più deboli è assolutamente insondabile.”

G. aggiunge che lo stesso vale per le “nebulose” (oggi “ammassi aperti”) come la “Testa di Orione” e il “Presepe”.

I satelliti di Giove

Veniamo ora alla scoperta più importante descritta nel *Sidereus Nuncius*:
intorno a Giove ruotano delle “lune”.

Seguiamo il racconto di G.:

“Il giorno sette gennaio, dunque, dell'anno milleseicentodieci, a un'ora di notte, mentre col cannocchiale osservavo gli astri mi si presentò Giove.”

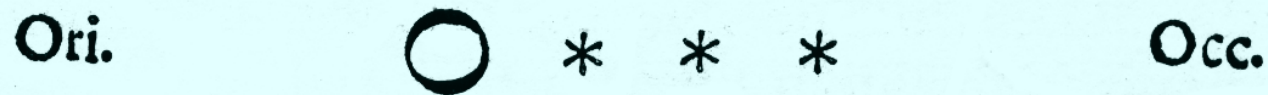
“Poiché mi ero preparato uno strumento eccellente, vidi (e ciò prima non mi era accaduto per la debolezza dell'altro strumento) che intorno gli stavano tre stelle piccole ma luminosissime; e quantunque le credessi del numero delle fisse, mi destarono una certa meraviglia, perché apparivano disposte esattamente secondo una linea retta e parallela all'eclittica, e più splendidi delle altre di grandezza uguale alla loro.”

Fra loro e rispetto a Giove erano in questo ordine:

Ori. * * ○ * Occ.

cioè due stelle erano a oriente, una a occidente. La più orientale e l'occidentale apparivano un po' maggiori dell'altra: non mi curai minimamente della loro distanza da Giove, perché, come ho detto, le avevo credute fisse.”

“Quando, non so da qual destino condotto, mi rivolsi di nuovo alla medesima indagine il giorno otto, vidi una disposizione ben diversa: le tre stelle infatti erano tutte a occidente rispetto a Giove, e più vicine tra loro che la notte antecedente e separate da eguali intervalli, come mostra il disegno seguente:



A questo punto, non pensando assolutamente allo spostamento delle stelle, cominciai a chiedermi in qual modo Giove si potesse trovare più ad oriente delle dette stelle fisse, quando il giorno prima era ad occidente rispetto a due di esse. Ed ebbi il dubbio che Giove non fosse per caso diretto, diversamente dal calcolo astronomico, ed avesse col proprio moto oltrepassato quelle stelle. Per questo con gran desiderio aspettai la notte successiva: ma la mia speranza fu resa vana, perché il cielo fu tutto coperto di nubi.”

OBSERVAT. SIDEREAE

Ori.



Occ.

Stella occidentaliori maior, ambæ tamen valdè conspicuæ, ac splendida: vtra quæ distabat à Ioue scrupulis primis duobus; tertia quoque Stellula apparere cepit hora tertia prius minime conspecta, quæ ex parte orientali Iouem ferè tangebatur, eratque admodum exigua. Omnes fuerunt in eadem recta, & secundum Eclipticæ longitudinem coordinatæ.

Die decimatertia primum à me quatuor conspectæ fuerunt Stellulæ in hac ad Iouem constitutione. Erant tres occidentales, & vna orientalis; lineam proximè

Ori.



Occ.

rectam constituebant; media enim occidentaliū paululum à recta Septentrionem versus deflectebatur. Aberrat orientaliōr à Ioue minuta duo: reliquarum, & Iouis intercapedines erant singulæ vnius tantum minuti. Stellæ omnes eandem præ se ferebant magnitudinem; ac licet exiguam, lucidissimæ tamen erant, ac fixis eiusdem magnitudinis longe splendidiōres.

Die decimaquarta nubilosa fuit tempestas.

Die decimaquinta, hora noctis tertia in proximè depicta fuerunt habitudine quatuor Stellæ ad Iouem;

Ori.



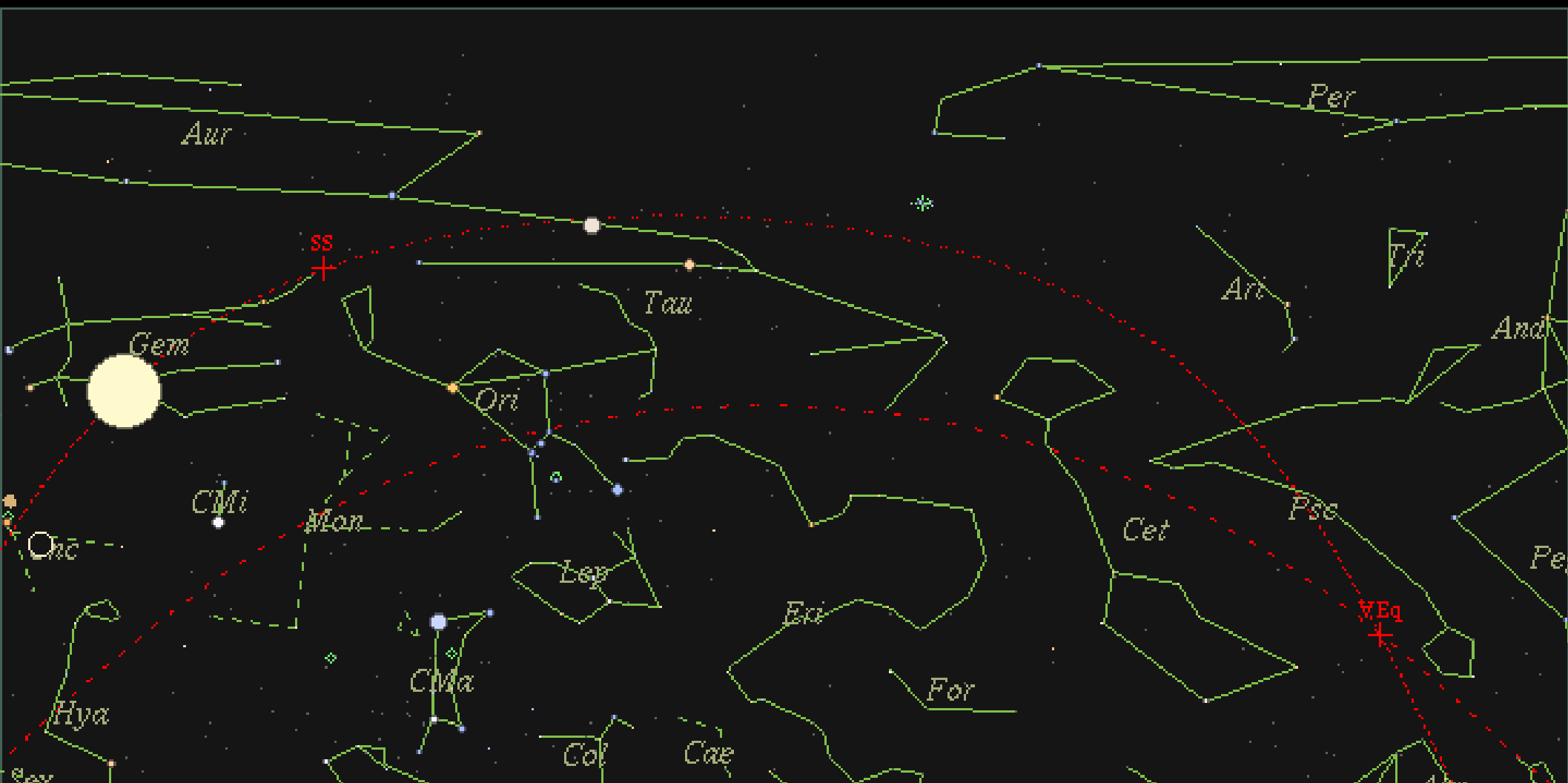
Occ.

occidentales omnes: ac in eadem proximè recta linea dispositæ; quæ enim tertia à Ioue numerabatur paululum

Il cielo di Galileo

La prossima animazione mostra il cielo come lo vide G., tra il 1609 e il 1610.

I fotogrammi sono presi a intervalli di 5 giorni siderali, dal luglio 1609 all'aprile 1610.



6/07/1809 11:40:20 CEDTT

Si vede bene che Giove è in moto *diretto* fino a metà ottobre 1609, poi inizia il moto *retrogrado*, che dura fino ai primi del febbraio 1610, e poi riprende il moto *diretto*. Ecco che cosa intendeva G. quando scriveva:

“Ed ebbi il dubbio che Giove non fosse per caso diretto, diversamente dal calcolo astronomico, ed avesse col proprio moto oltrepassato quelle stelle.”

Riprendiamo dunque il racconto di G.

Il 7 gennaio ha visto Giove con tre stelline:

Ori. * * ○ * Occ.

L'8 invece appaiono così:

Ori. ○ * * * Occ.

“Per questo con gran desiderio aspettai la notte successiva: ma la mia speranza fu resa vana, perché il cielo fu tutto coperto di nubi.”

“Ma il giorno dieci le stelle mi apparvero in questa posizione rispetto a Giove:

Ori.

*

*



Occ.

cioè ve n'erano due soltanto, ed entrambe orientali: la terza, come supposi, era nascosta sotto Giove. Erano come prima sulla stessa retta con Giove, e poste esattamente secondo la linea dello Zodiaco.

Quando vidi questo e compresi che in alcun modo potevano attribuirsi a Giove simili spostamenti, sapendo inoltre che le stelle osservate eran sempre le stesse (nessun'altra precedente o seguente ve n'era entro grande intervallo sulla linea dello Zodiaco), mutando la perplessità in meraviglia, compresi che *l'apparente mutazione non era di Giove ma delle stelle da me scoperte*; e per questo pensai di dovere da allora in poi osservare a lungo il fenomeno attentamente e scrupolosamente.”

Ma le figure del *Sidereus Nuncius* sono vere, o sono inventate?

Magari vi sembrerà una domanda iconoclasta, ma questione è stata discussa seriamente, anche in tempi recenti.

Si è detto (e anche scritto, nei libri): il cannocchiale di G. era assai imperfetto, e non è plausibile che G. potesse vedere tutti quei dettagli. Potrebbe aver visto quello che *voleva* vedere, o peggio, potrebbe aver barato per confortare la sua tesi eliocentrica.

Come possiamo risolvere la questione?

Con i mezzi di oggi (computer) la risposta è facile: anche se sono trascorsi 4 secoli, possiamo calcolare *accuratamente* quale era la posizione dei satelliti di Giove nei giorni in cui G. puntò il suo cannocchiale sul pianeta.

Ecco il risultato:

Ori.

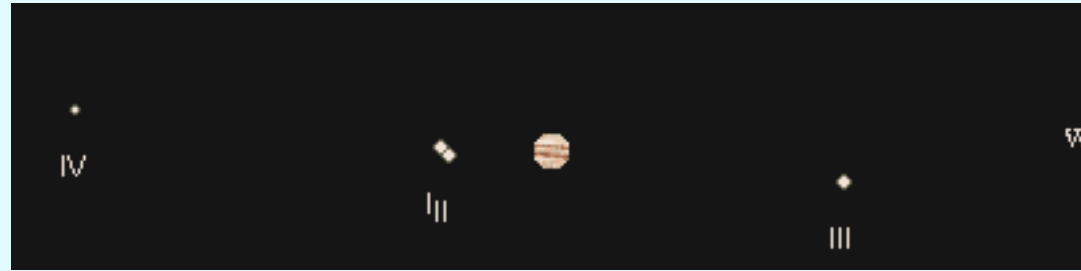
*

*



*

Occ.



Ori.

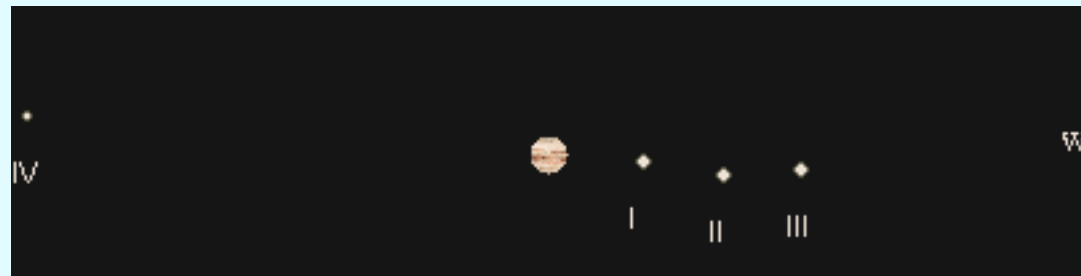


*

*

*

Occ.



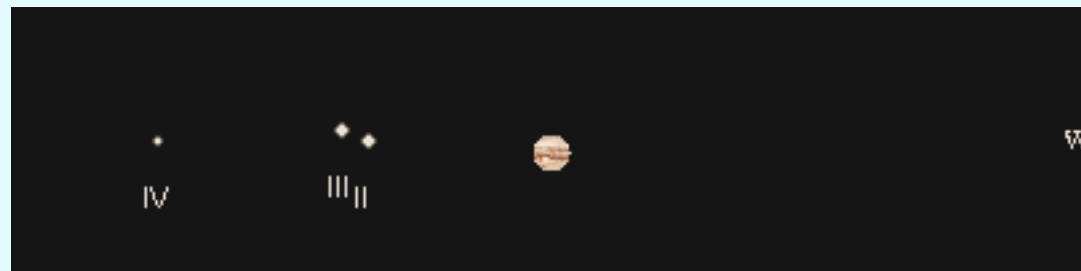
Ori.

*

*



Occ.



Ripartiamo dal “Sidereus Nuncius”

Sappiamo che G. tentò a lungo e faticosamente di ricavare le leggi del moto dei satelliti da lui scoperti, con difficoltà derivanti prima di tutto dalla mancanza degli strumenti matematici e concettuali necessari per trattare il problema.

Perché dunque non riprendere *ex-novo* il tentativo galileiano, ma usando la matematica e le tecniche di calcolo oggi disponibili?

Più esattamente, l'idea è questa: prendiamo le osservazioni del *Sidereus Nuncius* come punto di partenza, e applichiamo a quelle osservazioni (e misure) le moderne tecniche di “fitting”, per ricavarne i periodi e i raggi orbitali dei quattro satelliti.

Se i risultati del fit concorderanno coi valori oggi noti (che non verranno mai usati nel lavoro) avremo dato una prova indipendente che le osservazioni galileiane erano accurate.

Questo lavoro che vi racconto fu fatto, da me e da un mio giovane collaboratore, oggi purtroppo scomparso, oltre 30 anni fa. Dato il progresso degli strumenti di calcolo, ripeterlo oggi è assai più semplice.

Inizio dell'analisi dei dati

G. osserva i satelliti dal 7 gennaio al 2 marzo, tutti i giorni in cui il tempo glielo consente.

Talora compie anche più osservazioni nel corso della notte, per cui abbiamo un totale di 64 osservazioni.

In ogni caso riporta delle figure, come quelle che abbiamo già viste. Man mano che raffina la sua tecnica comincia a riportare anche misure angolari delle distanze dei satelliti da Giove.

Il primo problema che ci si pose fu: come utilizzare questi dati?

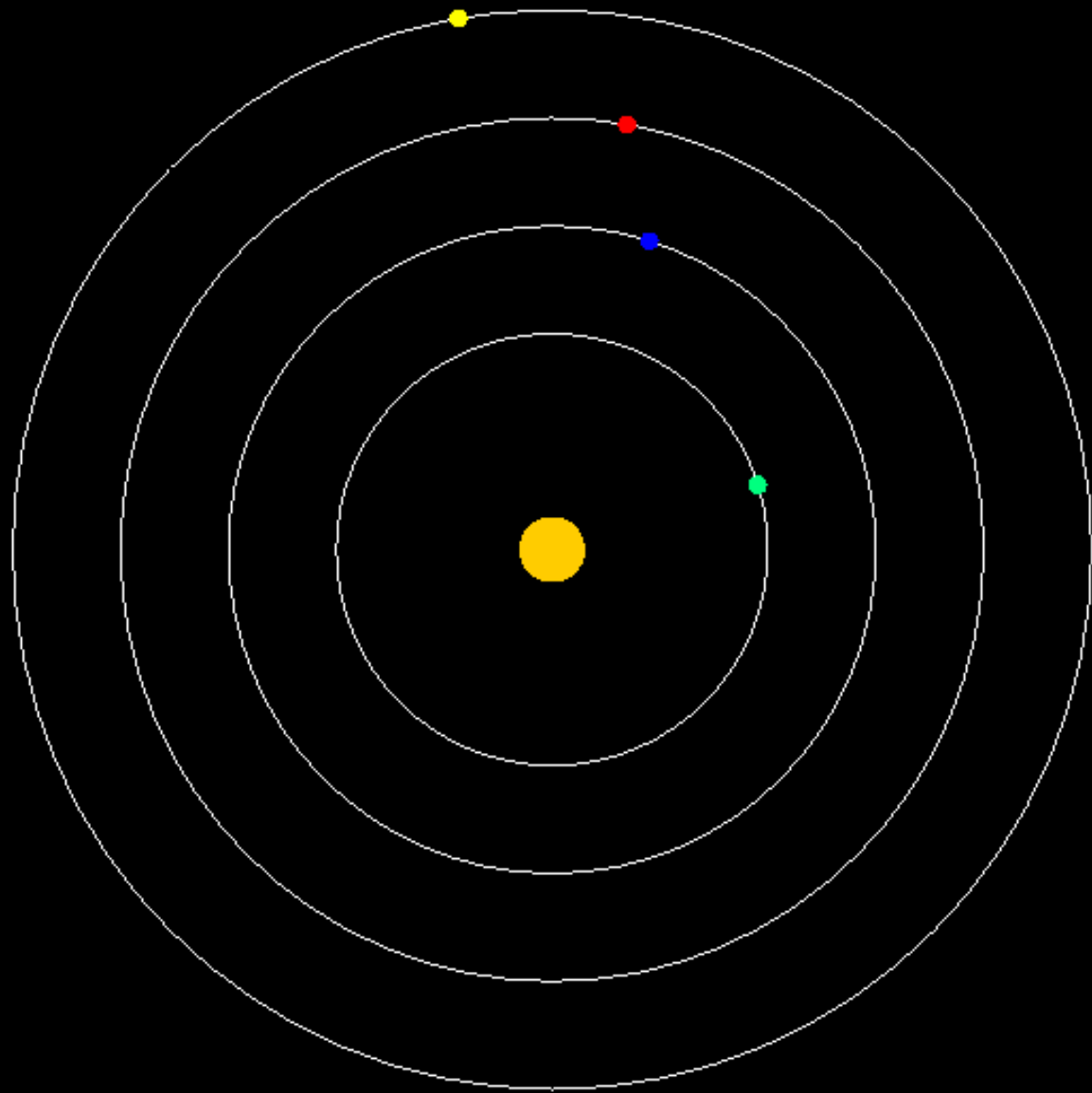
Per varie ragioni decidemmo di fondarci sui disegni, non sui dati numerici; misurammo perciò i disegni e costruimmo un file di misure, che sarebbe stato la base del lavoro successivo.

Perché i satelliti si vedono allineati?

Nei disegni di Galileo i satelliti appaiono sempre ben allineati con Giove; questo si spiega assumendo che le orbite siano complanari, e che noi dalla Terra le vediamo “di profilo”.

Assumendo per semplicità che le orbite siano circolari, avremo la situazione mostrata nell'animazione che segue.

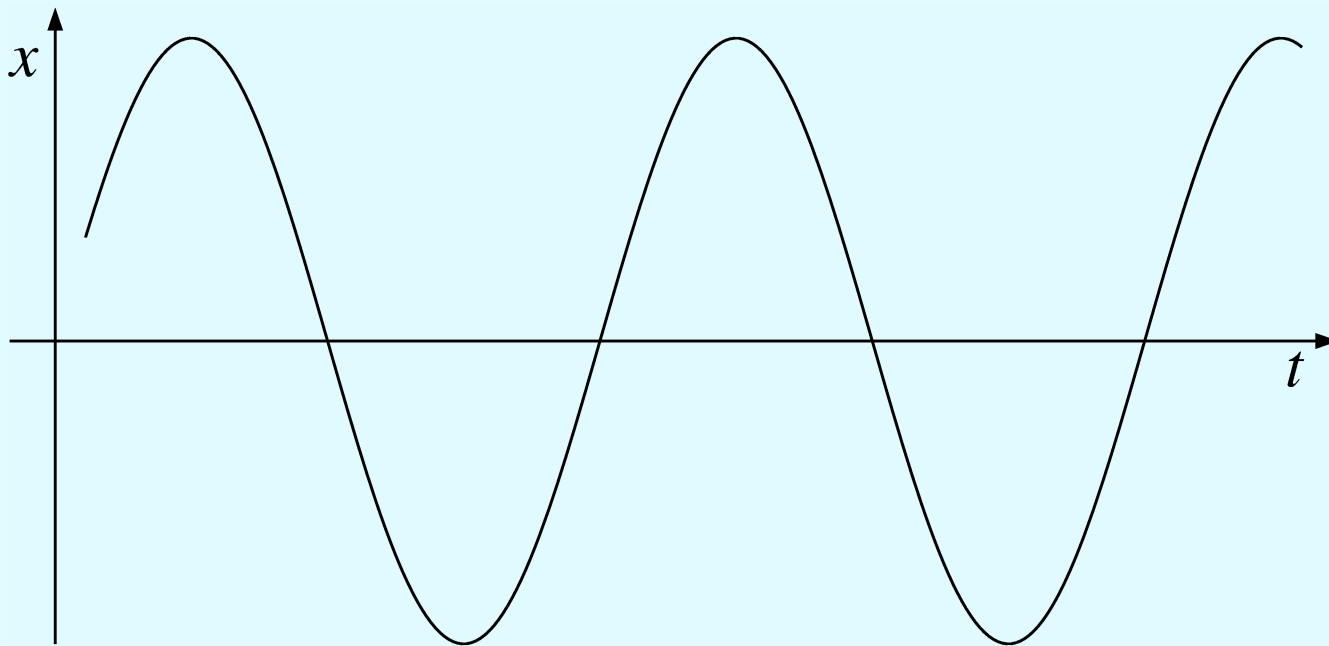
(È una fortunata circostanza che le orbite dei satelliti di Giove sono davvero circolari, con ottima approssimazione!)



Moto armonico e senoide

Sappiamo che la proiezione di un moto circolare uniforme è un *moto armonico*: quindi questo è il moto come deve apparire dalla Terra.

Se riportiamo in un diagramma cartesiano la posizione di un satellite in ordinata, col tempo in ascissa, avremo un *diagramma orario* che sarà una *senoide*.



Trovare 4 sinusoidi...

Ciascuna sinusoide sarà caratterizzata da un *periodo* (il periodo del satellite) da un'*ampiezza* (il raggio dell'orbita) e da una *fase* (la posizione del satellite a un istante iniziale).

Si tratta dunque di trovare 4 sinusoidi, di periodi, ampiezze e fasi diverse, che si adattino bene ai punti osservati.

Non dimenticate che questo approccio non era possibile per G.: non conosceva i diagrammi cartesiani (non erano ancora stati inventati: la *Géométrie* di Descartes è del 1637) non conosceva le sinusoidi... Senza contare che non aveva un computer!

I dati grezzi

Il grafico seguente mostra i dati grezzi misurati dal Sidereus Nuncius.
In ascissa ci sono i tempi, in ordinata le distanze dei satelliti dal centro di Giove.



Problema: come identificare i satelliti?

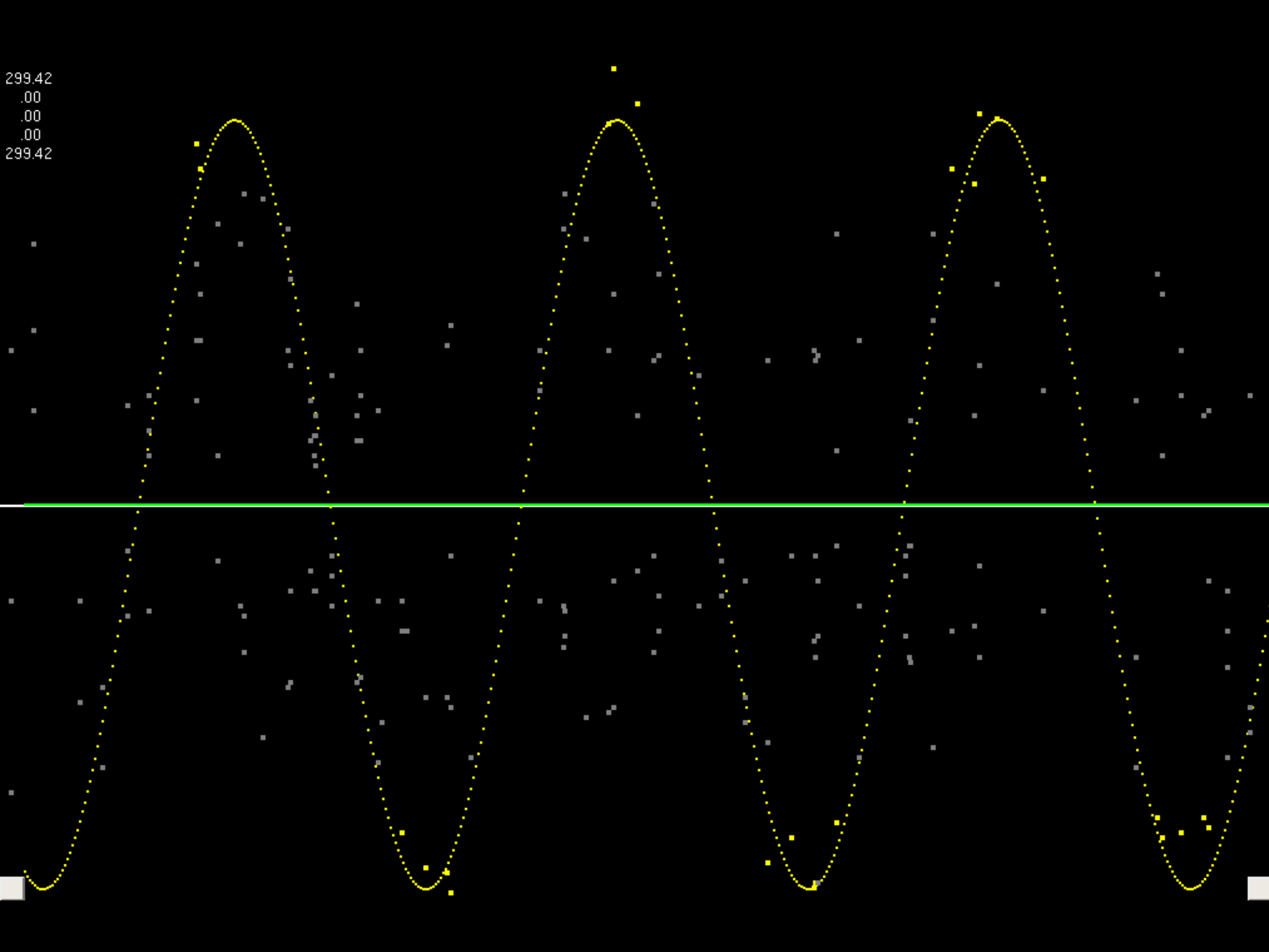
Il problema principale è che non c'è modo di riconoscere un satellite dall'altro...

Non sembra quindi possibile un algoritmo automatico: l'unica soluzione è di procedere in modo *interattivo* e *iterativo*: vediamo come.

Nel grafico si vedono dei punti nettamente più distanti degli altri da Giove: si può assumere che questi punti appartengano al satellite più esterno (Callisto) nei suoi momenti di massima elongazione.

Procediamo quindi a una prima assegnazione di quei punti a uno stesso satellite, e a un primo fit con questi dati.

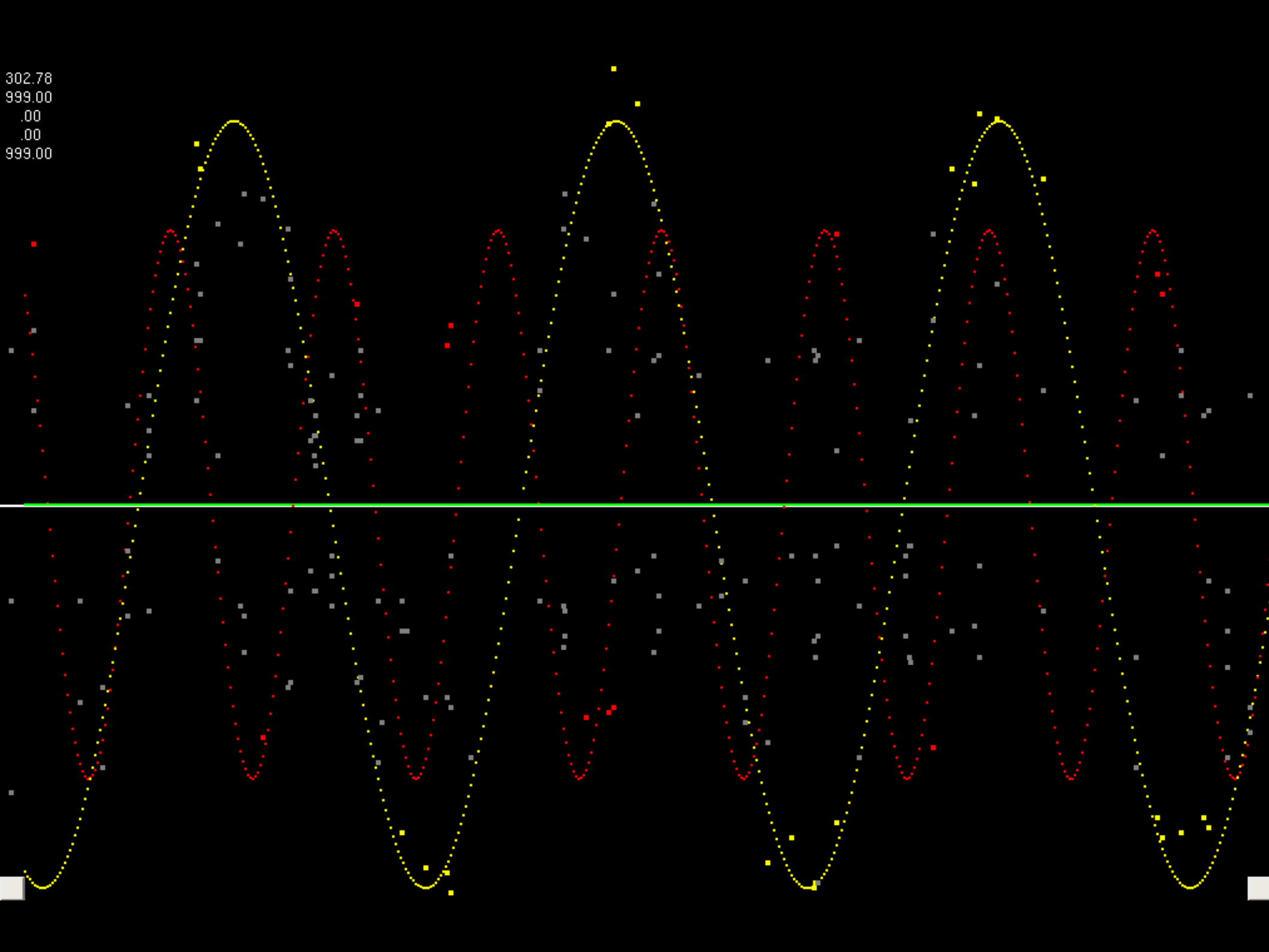
299.42
.00
.00
.00
299.42



Il secondo satellite

Si vedono ora dei punti che pur essendo distanti da Giove non possono appartenere al primo satellite: possiamo assegnarli al secondo e ottenere una seconda sinusoide.

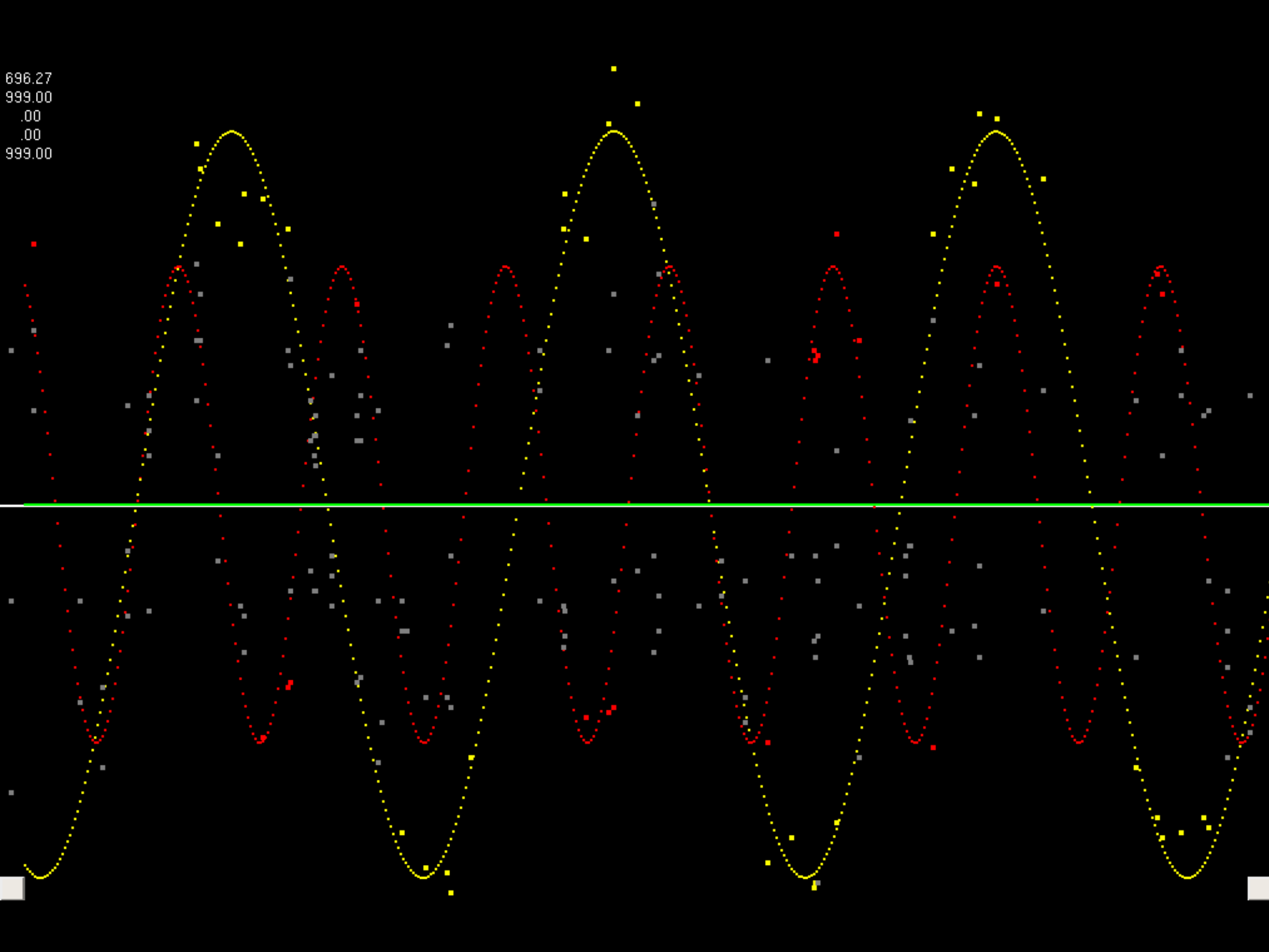
302.78
999.00
.00
.00
999.00



Iteriamo...

La presenza della seconda sinusoide permette di assegnare altri punti al primo satellite e poi anche al secondo.

696.27
999.00
.00
.00
999.00



Correggere la scala?

Come si vede, l'accordo non è molto buono.

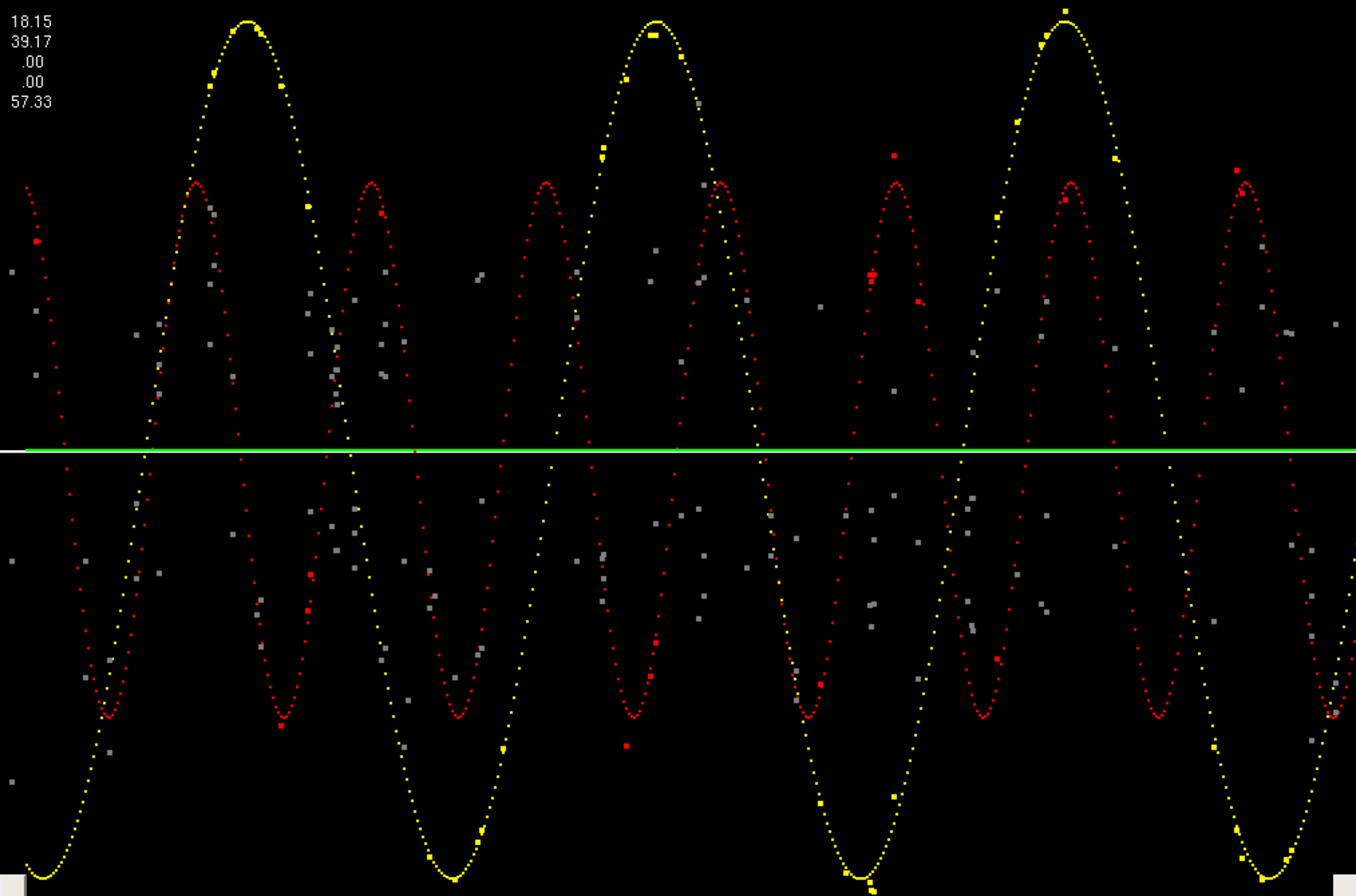
Ma a questo punto nasce un'idea: come possiamo essere sicuri che i diversi disegni di G. siano stati tracciati esattamente alla stessa scala?

Non dimentichiamo che nessuno aveva fatto questo tipo di misure prima di lui, che lavorava in condizioni difficili, che stava imparando...

Decidiamo quindi d'introdurre un nuovo parametro libero: un fattore di scala variabile per ciascuna osservazione.

Ecco il risultato.

18.15
39.17
.00
.00
57.33

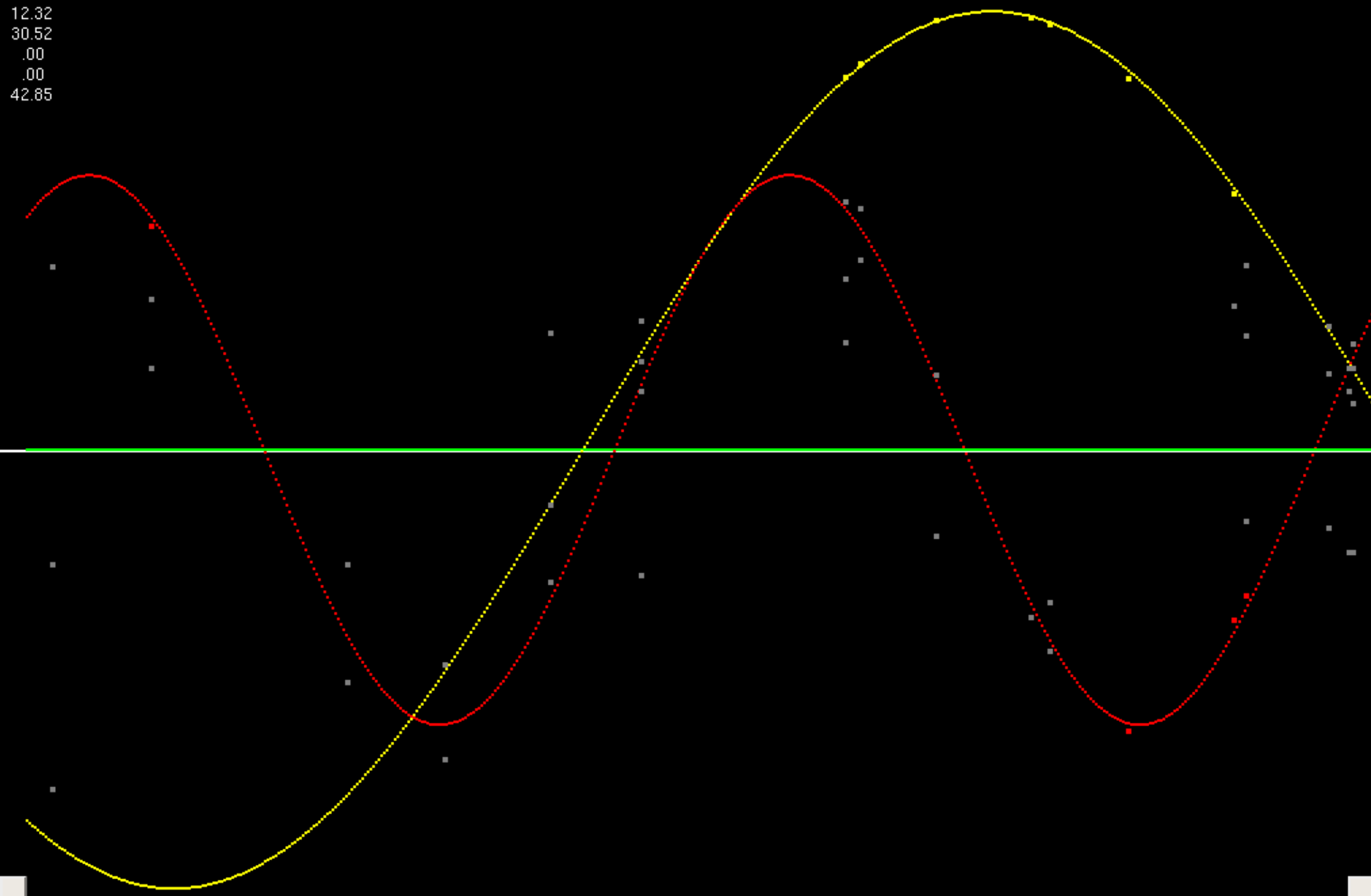


Dilatiamo la scala dei tempi

Tutti i diagrammi sono stati disegnati in modo da entrare completamente nello schermo, ma risultano troppo affollati, specialmente quando G. ha fatto più osservazioni in una stessa notte.

Conviene quindi dilatare l'asse dei tempi: il prezzo è che il diagramma non entra tutto nello schermo, ma si guadagna molto in leggibilità.

12.32
30.52
.00
.00
42.85



Si vede bene che molte altre assegnazioni appaiono possibili.

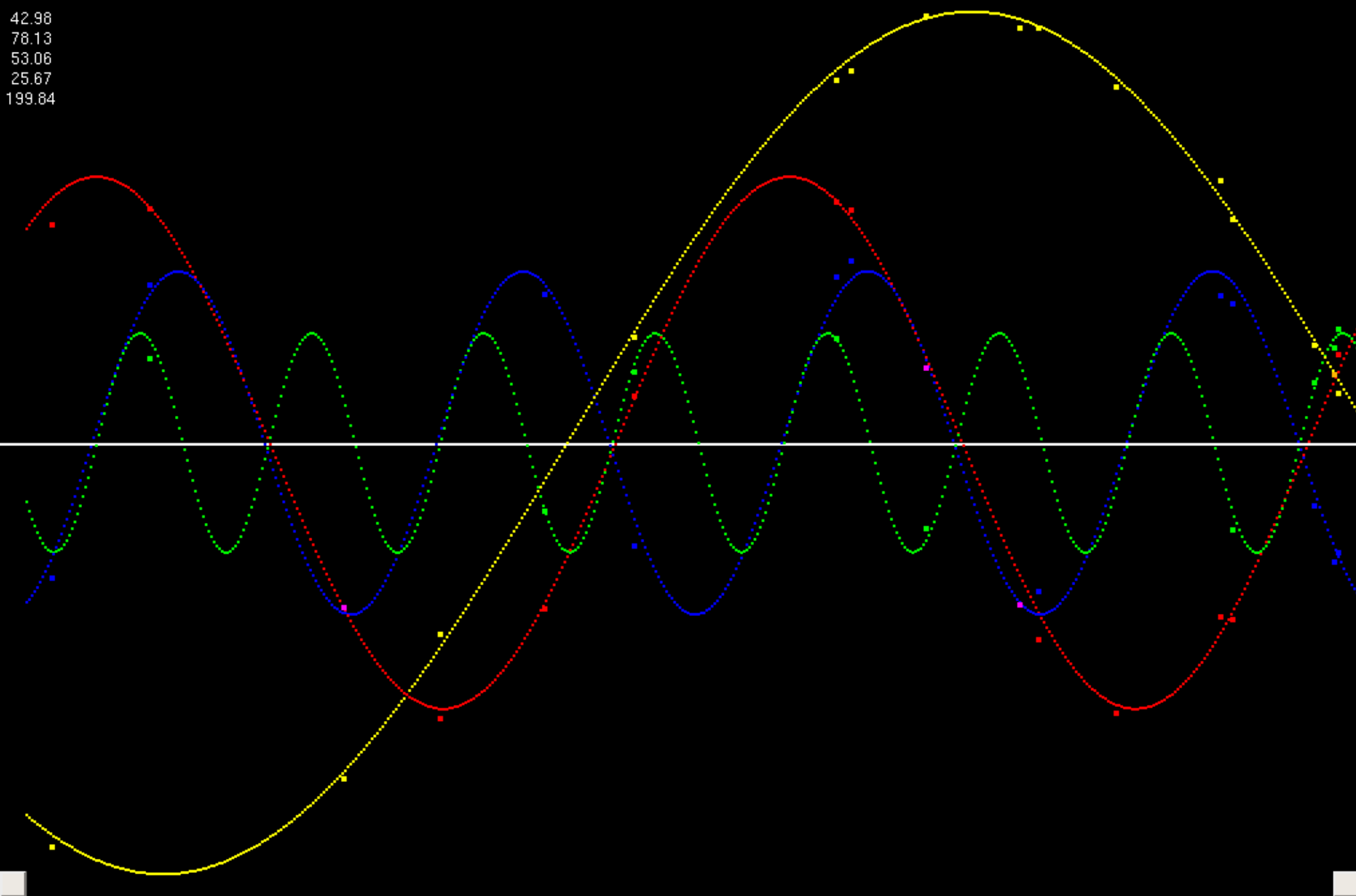
È poi chiaro come si può procedere, assegnando anche gli altri satelliti.

In certi casi una della “stelline” di G. risulta corrispondere a due satelliti, che G. non riusciva a risolvere col suo cannocchiale.

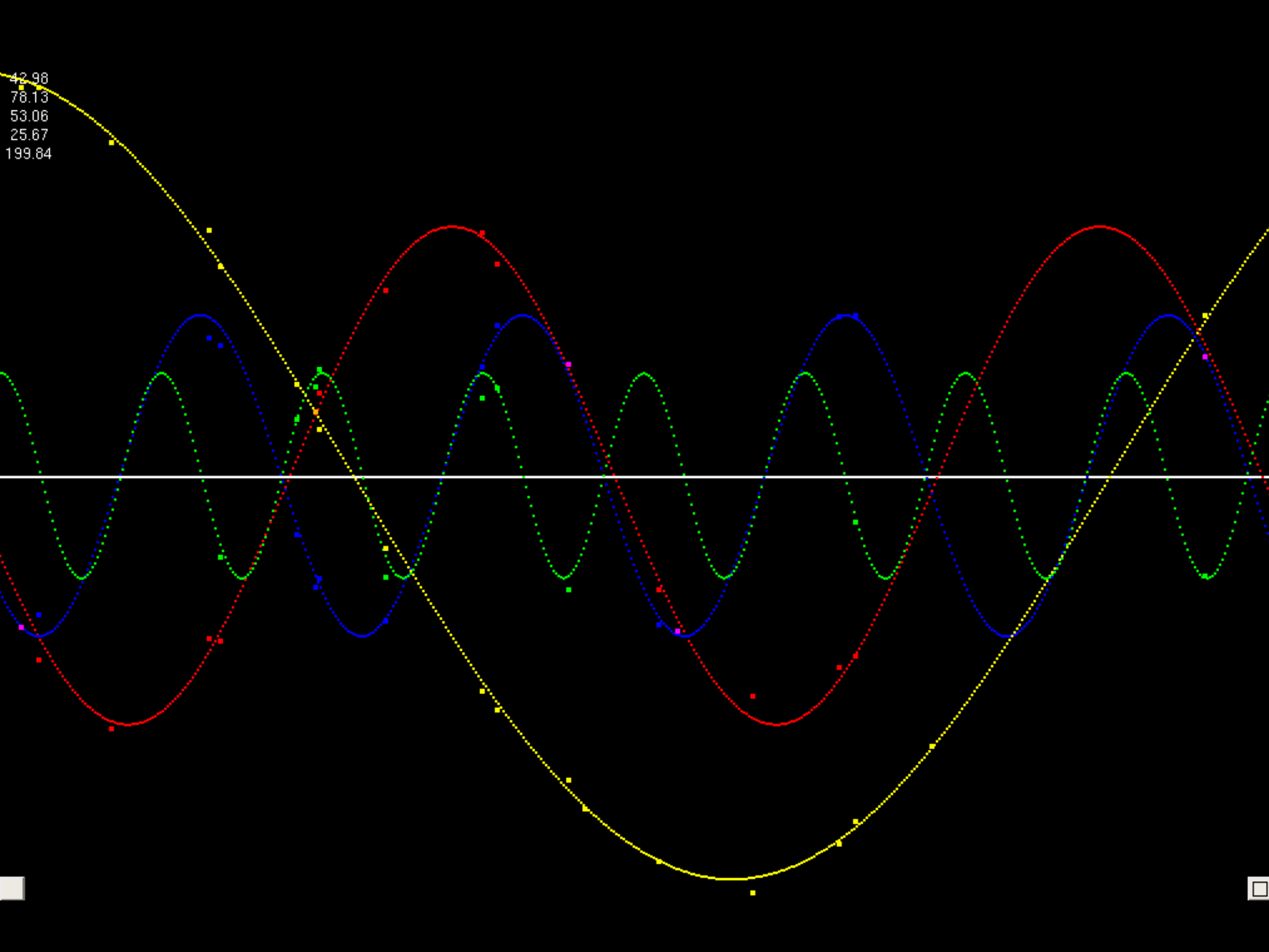
Queste sovrapposizioni sono indicate nel diagramma con colori diversi.

I prossimi diagrammi mostrano il risultato finale del fit, che ora dobbiamo commentare.

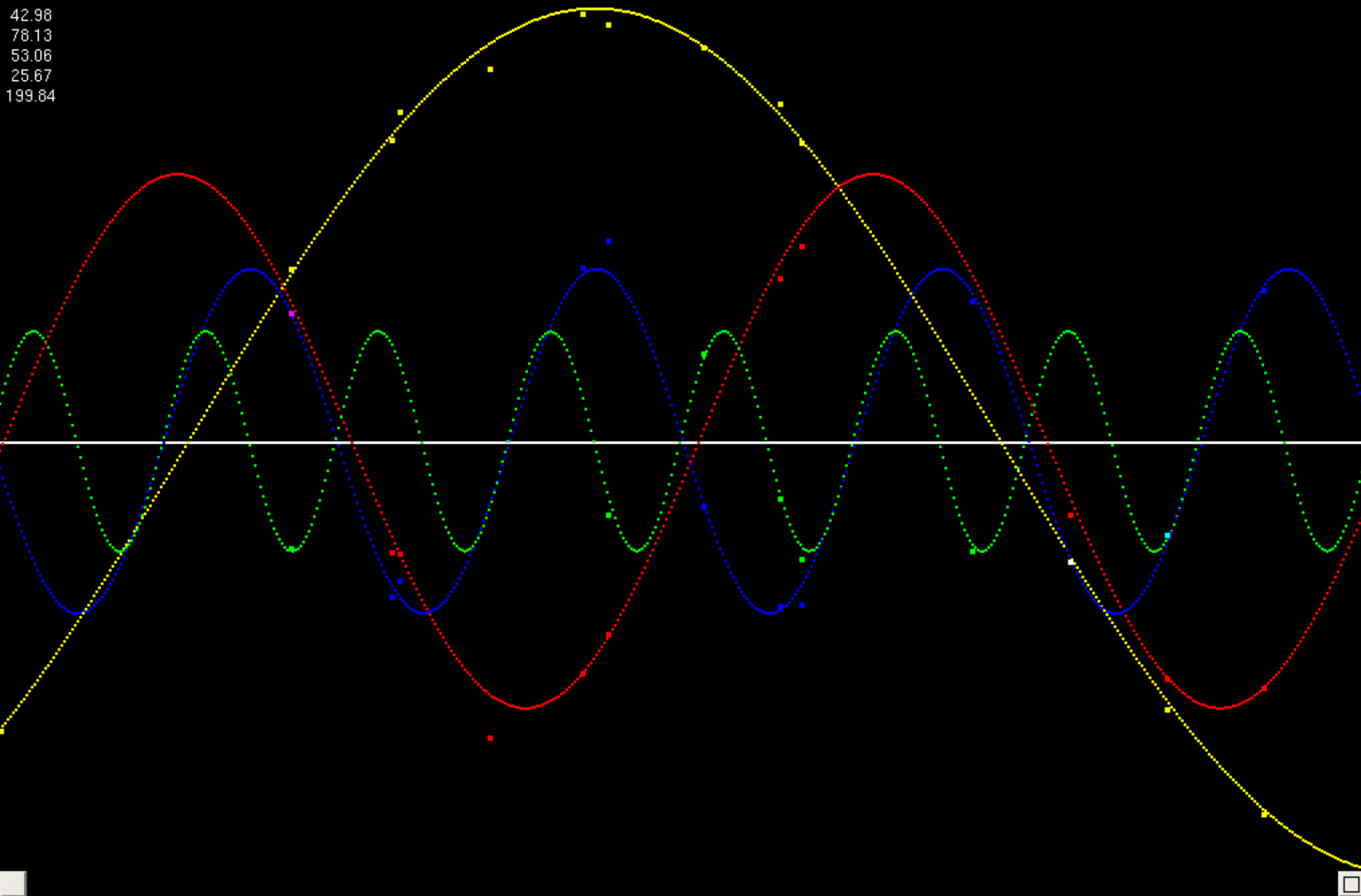
42.98
78.13
53.06
25.67
199.64



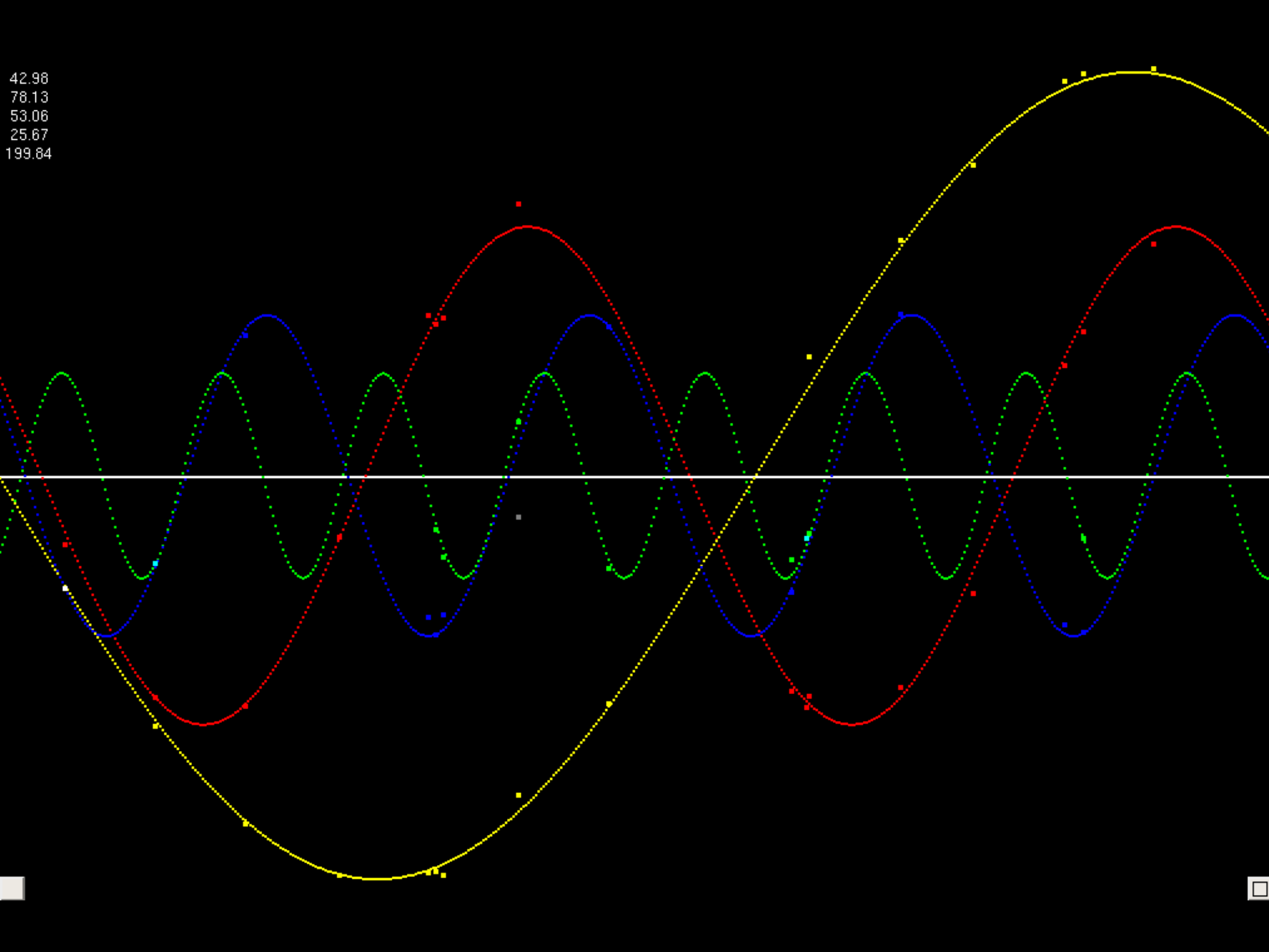
42.98
78.13
53.06
25.67
199.64



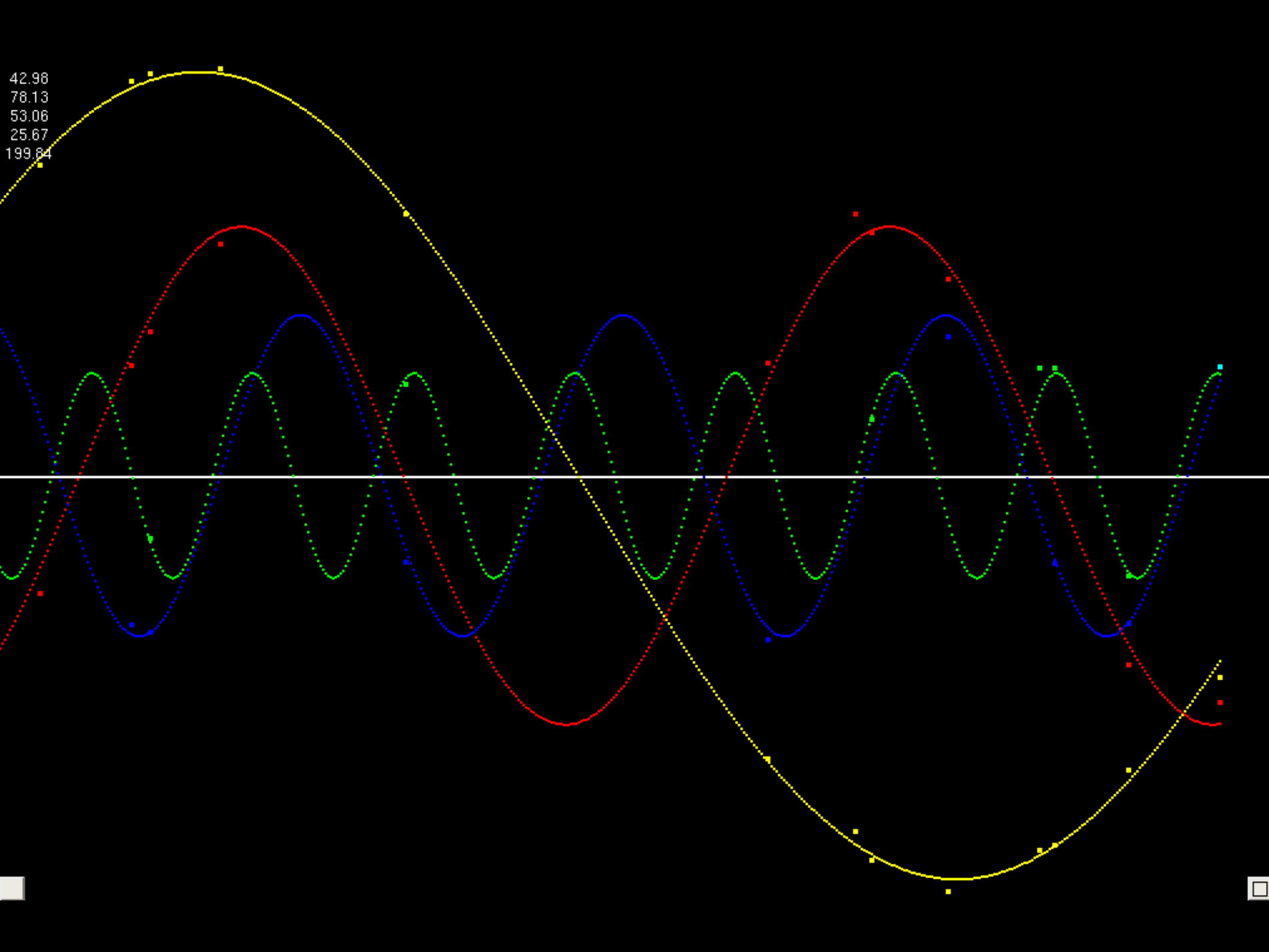
42.98
78.13
53.06
25.67
199.64



42.98
78.13
53.06
25.67
199.64



42.98
78.13
53.06
25.67
199.84



Alcuni commenti

È impressionante l'accordo generale, che già mostra l'accuratezza delle osservazioni di G.

Tuttavia non tutto torna perfettamente...

Per es. il giorno 8 gennaio (secondo giorno) G. ha mancato Callisto, forse perché non si aspettava di vedere 4 “stelline”.

Lo stesso è accaduto anche il 24, quando ormai sapeva che i satelliti sono 4. Callisto molto distante da Giove poteva sfuggire facilmente.

Il 10 gennaio vede due soli satelliti, mentre in realtà quelli visibili sono tre; Ganimede ed Europa sono però molto vicini.

Lo stesso accade il giorno 16, il 17, e poi anche il 24 (secondo diagramma) per Callisto e Ganimede.

Invece il 12 febbraio (quarto diagramma) G. segna un satellite in una posizione “impossibile”.

A mio parere questi “difetti” aggiungono credibilità alle osservazioni galileiane.

Infatti nessuna osservazione o misura sperimentale è esente da simili anomalie. Ci si sarebbe dovuti insospettare se tutto fosse tornato troppo bene...

Risultati quantitativi dell'analisi

Il primo confronto è ovviamente quello dei periodi. Ecco il risultato: nella prima colonna ci sono i valori trovati col fit (in giorni), nella seconda i valori moderni, nella terza i rapporti.

| | | | |
|----------|----------|----------|---------|
| Callisto | 16.66671 | 16.68902 | 0.99866 |
| Ganimede | 7.13059 | 7.15455 | 0.99665 |
| Europa | 3.55070 | 3.55118 | 0.99987 |
| Io | 1.76980 | 1.76914 | 1.00037 |

Si vede che lo scarto relativo non raggiunge mai il 4‰.

Secondo confronto: i raggi delle orbite. Qui la prima colonna dà il risultato del fit in mm (sul disegno di G.), la seconda i valori moderni in 10^{-3} UA, la terza i rapporti.

| | | | |
|----------|---------|---------|--------|
| Callisto | 35.9700 | 12.5871 | 2.8577 |
| Ganimede | 22.0882 | 7.1525 | 3.0881 |
| Europa | 14.3304 | 4.4854 | 3.1949 |
| Io | 9.1530 | 2.8209 | 3.2447 |

In questo caso gli scarti sono parecchio più grandi, e hanno andamento sistematico: tra Callisto e Io la differenza è oltre il 13%.

Non so darne la spiegazione, anche perché non è esattamente noto il procedimento per misurare le distanze e per la riproduzione tipografica dei disegni.

Conclusione

Appaiono chiari i seguenti fatti:

- le misure di G. si rappresentano bene con moti circolari uniformi di 4 satelliti
- dalle misure si ricavano i periodi con ottima precisione
- i raggi delle orbite riescono vicini a quelli oggi noti, ma con un errore sistematico non spiegato.

Si può concludere che le osservazioni e le misure di Galileo col suo “occhiale” sono genuine e anche molto accurate.

Adi 7. di Gennaio 1610 Giove si vedeva col Cannone ed
 3. stelle fisse. così *^{oni}⊙. delle quali se il cannone
 mirava iudeua. ^{oni}* a di 8. appariva così *^{oni}⊙* era dug
 diretto et ad retrogrado come s'gono i calcolatori.

Adi 9. fu rugolo. a di 10. si uedeua così _____ *^{oni}⊙* cioè è di
 più o di più occidentale si che la occultava, quanto si può credere.

Adi 11. era in questa guisa ** ⊙ et la stella più vicina
 a Giove era Camela minore dell'altra, et vicinissima all'altra
 come che le altre sare erano le dette stelle apparse tutte tre
 di equal grandezza et tra di loro equalo lontore; dal che
 appare intorno a Giove esser 3. altre stelle errati invisibili ad
 ogniuno sito a questo tempo.

Adi 12. si uede in tale costituzione ^{oni}* ⊙ *^{oni} era la stella
 occidentale poco minor dello orientale, et giove era in mezzo lontano
 da l'una et dall'altra quanto il suo diametro è circa; et forte era
 una terza piccolissima et vicinissima a 7 verso oriente; anzi pur vi era
 un'amp. hancido io ed più diligente osservato, et essido più imbrunita la
 notte.

Adi 13. hauendo Giove formato lo Iunio. si ueddeuo vicinissima a Giove
 4. stelle in questa costituzione * ⊙ *^{oni} *^{oni} è meglio così * ⊙ *^{oni} *^{oni}
 e tutte apparivano della medesima grandezza, lo spazio delle 7. occidentali
 ad era maggiore del diametro di 7. et erano tra di loro notabilmente
 più vicine che le altre sare; ne erano in linea retta equidistante come
 si auà in la media delle 3. occidentali era un poco eleuata, i uero la
 più occidentale alquanto depressa; sono queste stelle tutte molto lucide bene
 piccolissime et altre più et appariscono della medesima grandezza ad sono
 così splendidi.

Adi 14. fu rugolo. Adi 15. era così ⊙ * * * *^{oni} *^{oni} a pross^a a
 24. era la minore et le altre di mano è mano maggiori: gl'interstizij
 tra 24 et la 3. ^{oni} *^{oni} *^{oni} erano, quanto il diametro di 4. ma la 4. era di
 tante dalla 3. il doppio circa; ad face

4 long 71 38 lat. 1.13
 a. 30 uano iteram linea retta, ma come mostra
 l'esempio, erano al solito qualità. se che più
 le, et niente sembravano come un'...

Perché sono così importanti i satelliti di Giove?

La risposta ce la dà lo stesso G.:

“Stabili dunque e conclusi fuor d'ogni dubbio che in cielo v'erano stelle vaganti attorno a Giove, come Venere e Mercurio attorno al Sole: cosa che finalmente fu osservata in maniera più chiara della luce meridiana in numerose altre osservazioni.”

E alla fine del libro:

“Abbiamo dunque un valido ed eccellente argomento per togliere ogni dubbio a coloro che, accettando tranquillamente nel sistema di Copernico la rivoluzione dei pianeti intorno al Sole, sono tanto turbati dal moto della sola Luna intorno alla Terra, mentre entrambi compiono ogni anno la loro rivoluzione attorno al Sole, da ritenere si debba rigettare come impossibile questa struttura dell'universo. Ora, infatti, non abbiamo un solo pianeta che gira intorno a un altro, mentre entrambi percorrono la grande orbita intorno al Sole, ma la sensata esperienza ci mostra quattro stelle erranti attorno a Giove, così come la Luna attorno alla Terra, mentre tutte insieme con Giove, con periodo di dodici anni si volgono in ampia orbita attorno al Sole.”

Insomma, i “pianeti medicei” sono un forte argomento a favore del *sistema copernicano*.