



Ο ρόλος των ηλεκτρονικών υπολογιστών στη σύγχρονη γαλαξιακή έρευνα

Π.Α. Πάτσης
ΚΕΑΕΜ, Ακαδημίας Αθηνών

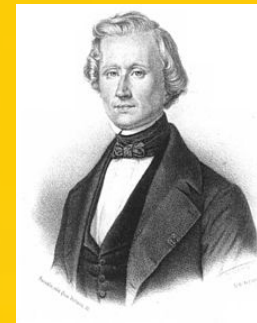
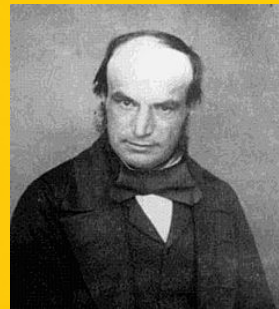
- Η ομιλία χρησιμοποιείται ως αφορμή για να καταδειχτεί η αλληλένδετη πορεία της αστρονομικής έρευνας γενικά και της δημιουργικής χρήσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- Αστρονομία $\leftrightarrow$ Υπολογιστική (Αστρο)-Φυσική

Αστρονομία: Μια πειραματική επιστήμη

- **Θεωρία (...-1950):**

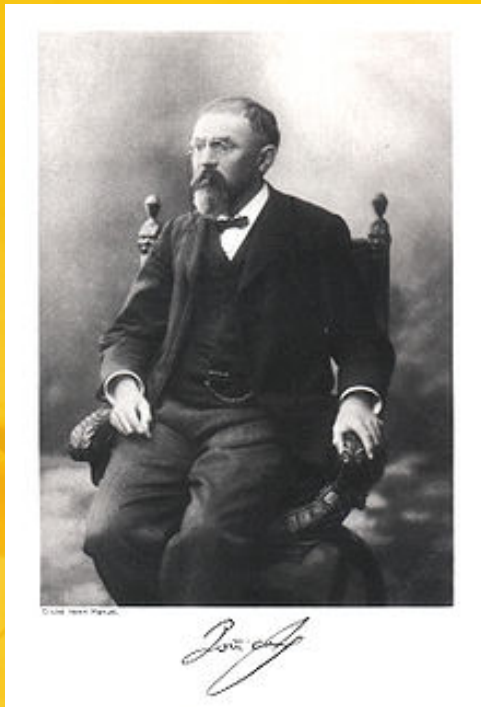
Διατύπωση αρχών, π.χ. 2^{ος} νόμος του Newton, $\mathbf{F} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt}$
αλλά πειραματική επαλήθευση μόνο όταν το
επέτρεπε η απλότητα των νόμων και η ακρίβεια
των υπολογισμών.

π.χ. η πρόβλεψη της ύπαρξης και ο υπολογισμός της θέσης του
Ποσειδώνα (1846) από τους Adams και Le Verrier (υπολογισμοί
χρονικής διάρκειας ετών).



Πολύπλοκοι υπολογισμοί και νέοι νόμοι

- Το πρόβλημα των $n=3$ σωμάτων. Henri Poincaré (1887) → Θεωρία του Χάους. Η Θεωρία του Χάους άνοιξε νέους δρόμους στην Ουράνια Μηχανική και τη Γαλαξιακή Δυναμική.

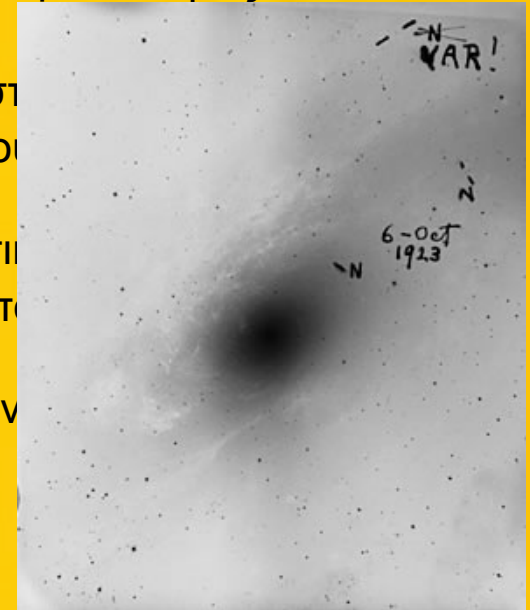
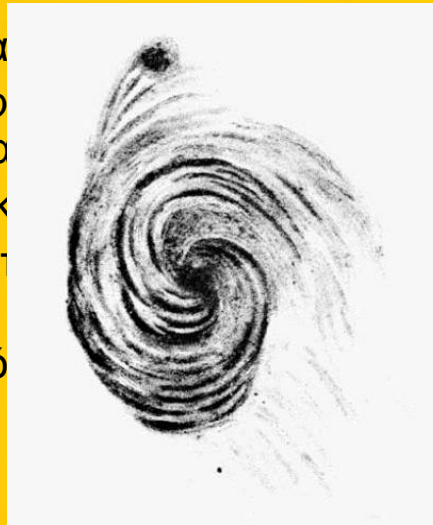


$$m_j \ddot{\mathbf{x}}_j = G \sum_{k \neq j} \frac{m_j m_k (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_j)}{|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_j|^3}$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

Παρατηρησιακή Αστρονομία

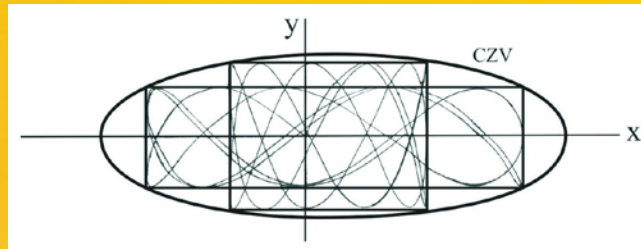
- Το ανθρώπινο μάτι
 - Κατά το μεγαλύτερο μέρος της ιστορίας ο μόνος αισθητήρας ήταν ο οφθαλμός.
 - Περιορισμένη ευαισθησία.
 - Περιορισμοί λόγω ανθρώπινης φυσιολογίας και υποκειμενικότητας.



by William Parsons, 3rd earl of Rosse
~1840

Αστρονομία: Ένας κλάδος της υπολογιστικής Φυσικής

- Θεωρία: Η εποχή των πολύπλοκων υπολογισμών (1950-...) και των αριθμητικών μοντέλων/πειραμάτων (1970-...)



(Contopoulos 1958, Stockholm Ann. 20, no5)

- Παρατηρήσεις: Η εποχή των CCDs (1969*, 1985-...). Αποθήκευση της πληροφορίας.



Απάντηση θεωρητικών ερωτημάτων

- Οι τροχιές των αστέρων σε αστρικά συστήματα (αστρικά σμήνη και γαλαξίες) – Αστρική Δυναμική.
 - Πλήθος τροχιών
 - Ακρίβεια υπολογισμών
 - Μη-γραμμικά φαινόμενα (θεωρία του Χάους)
 - Συστήματα N -σωμάτων
 - Η ροή του αερίου και η γέννηση των αστέρων στους γαλαξίες

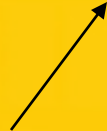


NGC 1097

Επιφάνεια τομής

- Αυτόνομο Χαμιλτονιανό Σύστημα 2D

$$H \equiv H(x, y, p_x, p_y) = h$$

Επιλύουμε π.χ. ως προς p_y 

Όλες οι τροχιές με σταθερή ενέργεια h παραμένουν πάνω στην 3D επιφάνεια του 4D φασικού χώρου (x, y, p_x)

Επιφάνεια τομής

- Ορίζουμε μια επιφάνεια τομής $y=0$
Poincaré surface of section
Τα σημεία επί της $S(x,y,p_x,p_y)=c$
consequents

Αυτά ορίζουν επί της S ένα Poincaré map

Poincaré 1899,

Birkhoff 1927

Επιφάνεια τομής

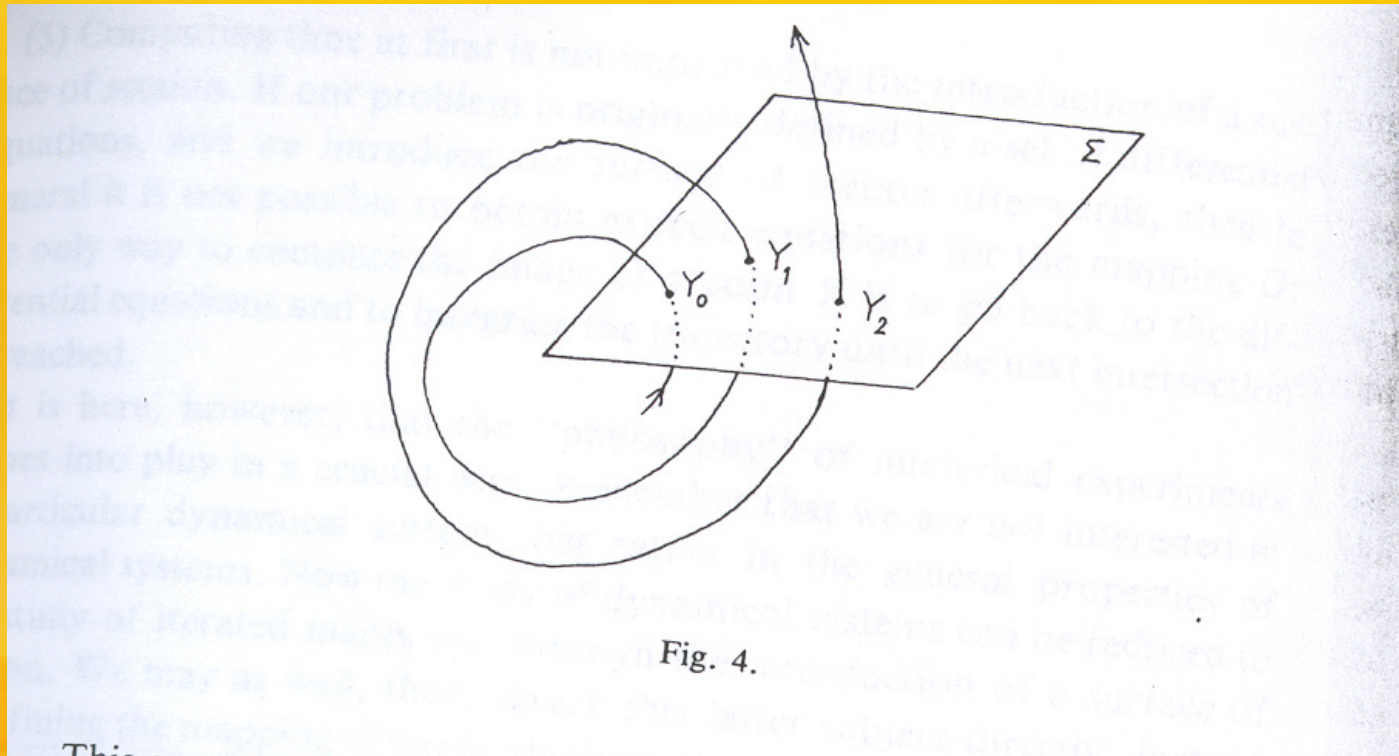
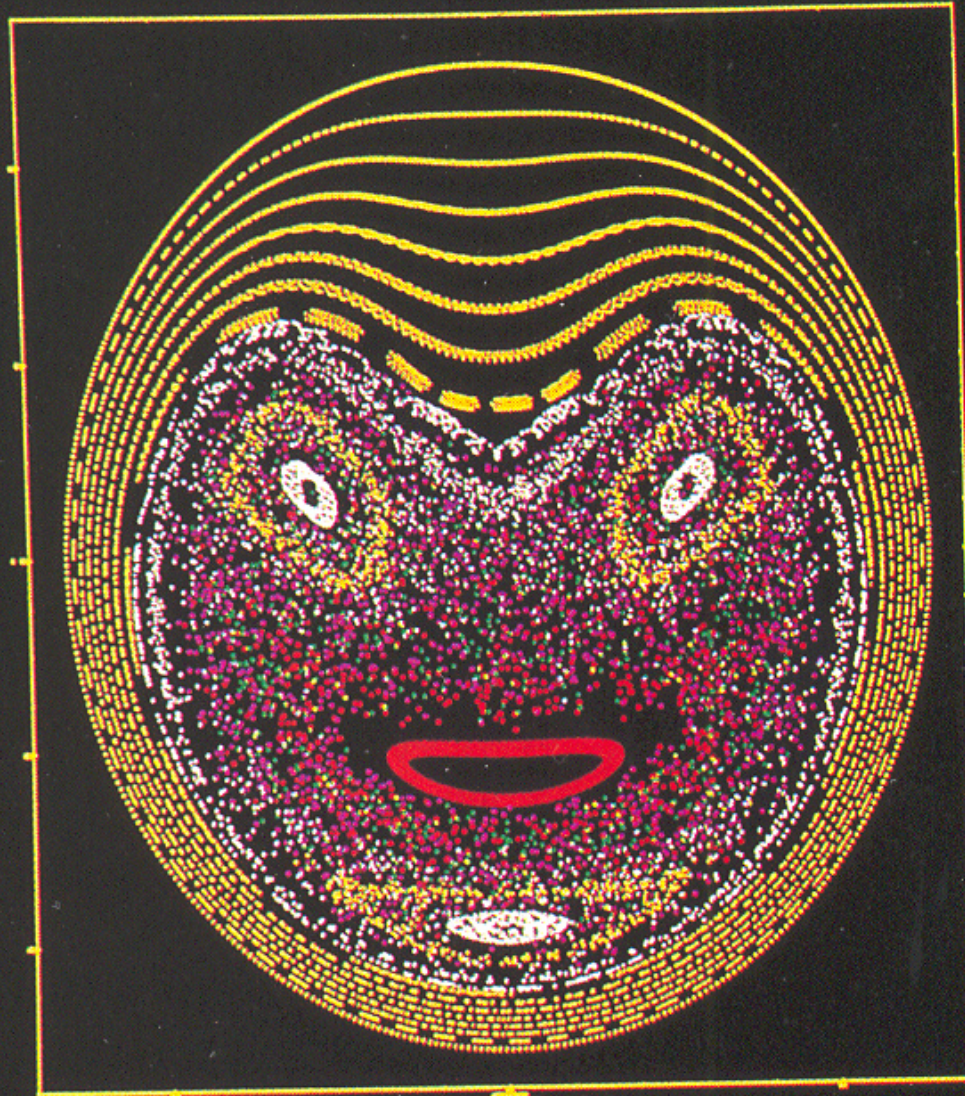


Fig. 4.

M. Hénon: in "Chaotic Behaviour in Deterministic Systems" pg. 55-170
G.Ioos, R.H.G. Helleman, R. Stora (eds)

U



U

ES
0
+

MIDAS
92NOV

User: ppatsis

Table:
F10

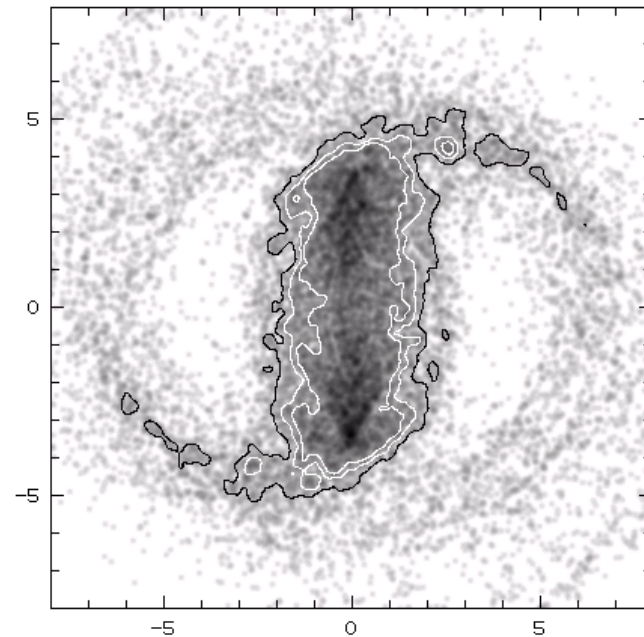
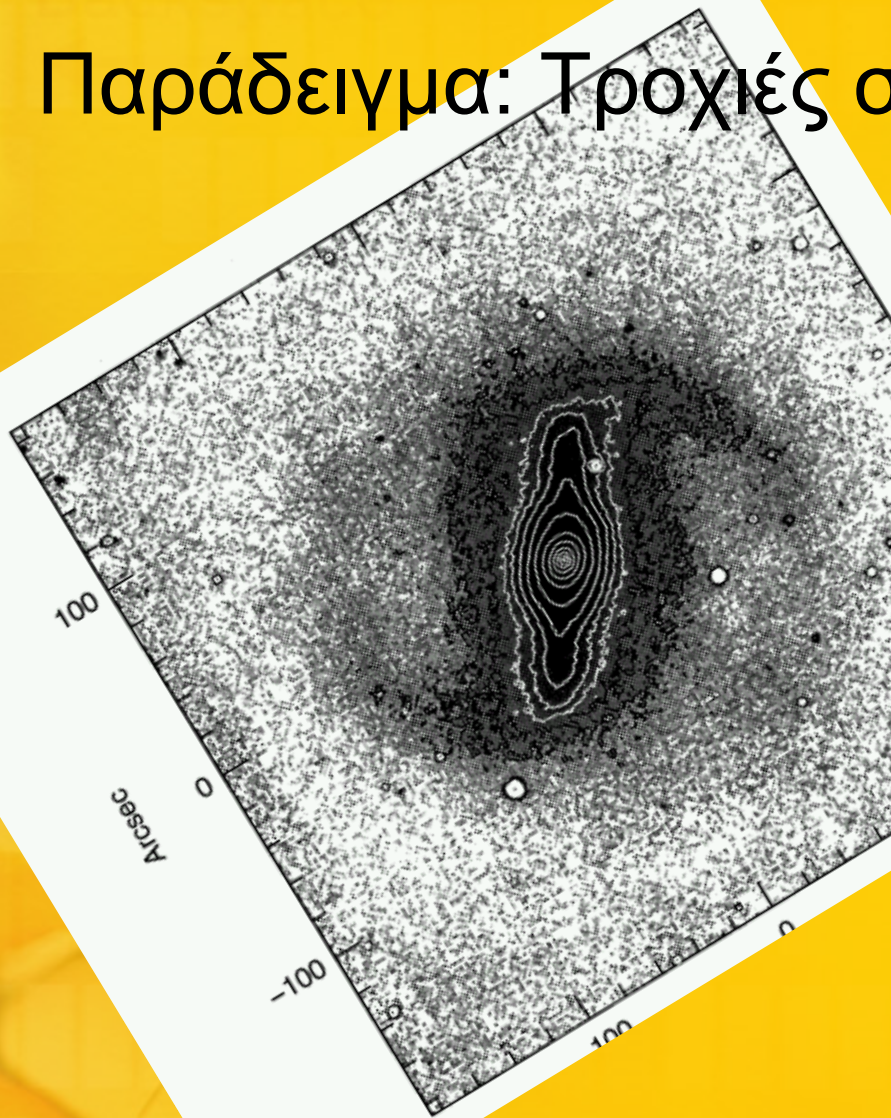
Columns:
X: #2
Y: :n

Scales:
X: 0.175000
Y: 0.122222

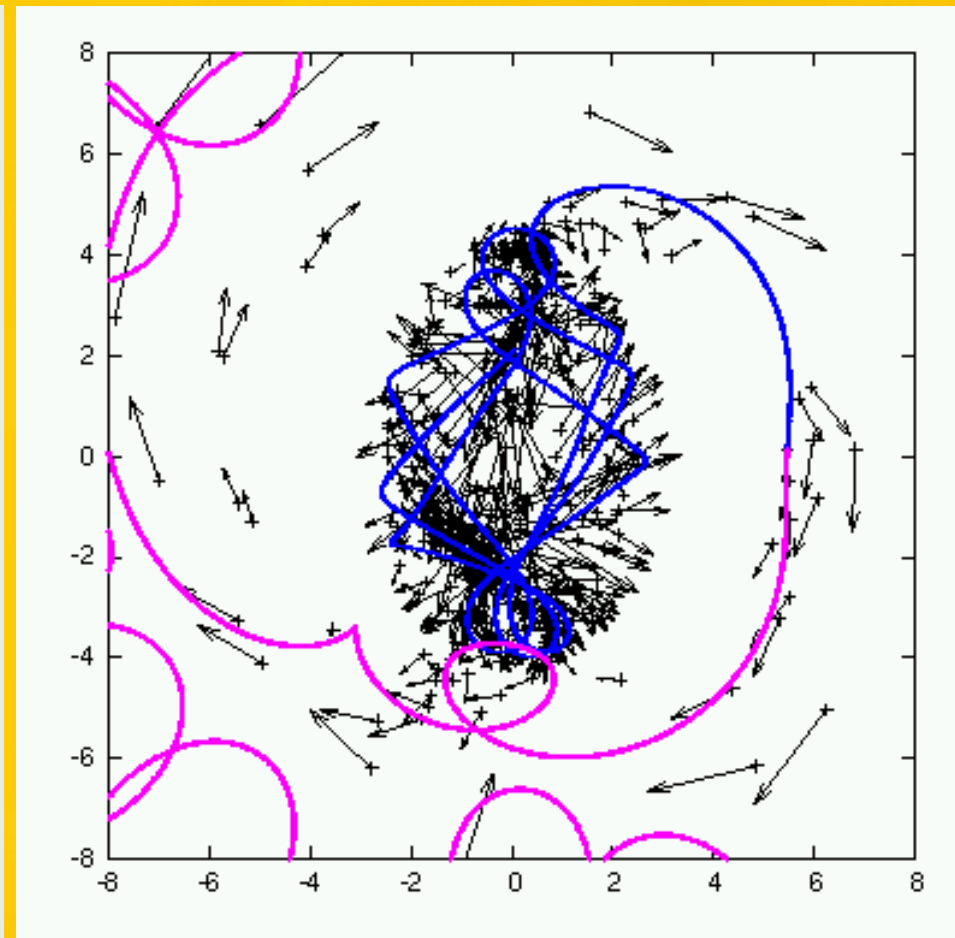
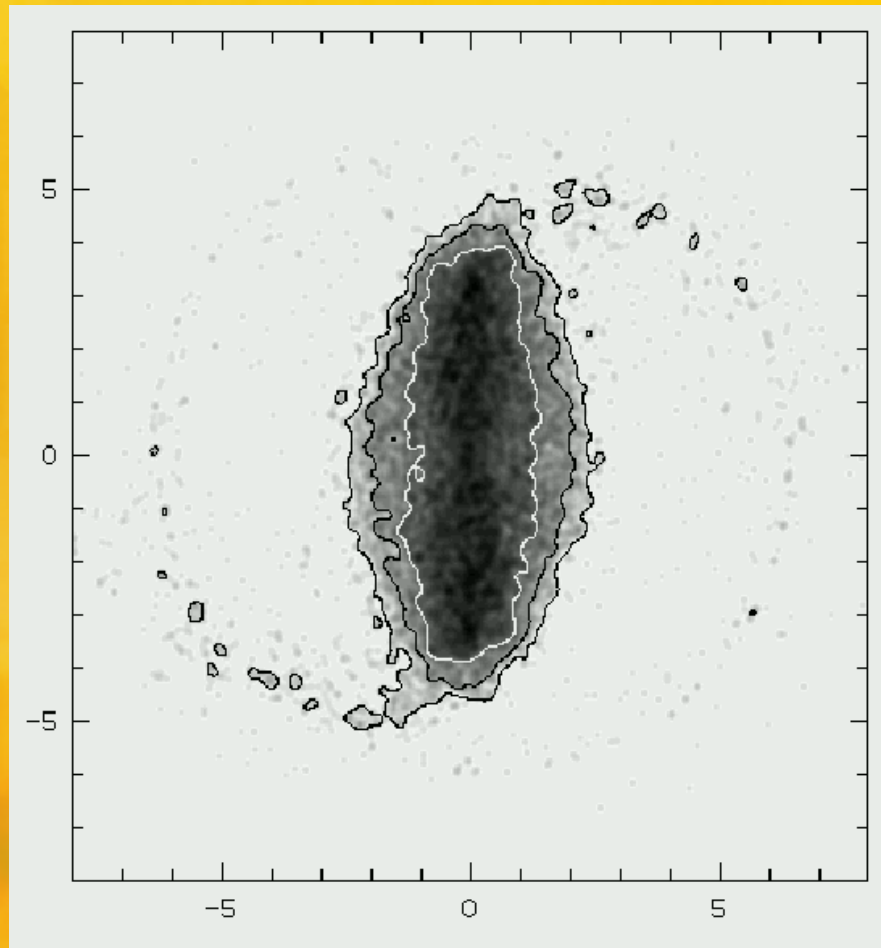
Selection:
all

Date: 03 Sep 1993
Time: 12:05:08

Παράδειγμα: Τροχιές σε ράβδο



Τροχιές σε ένα μοντέλο ράβδου

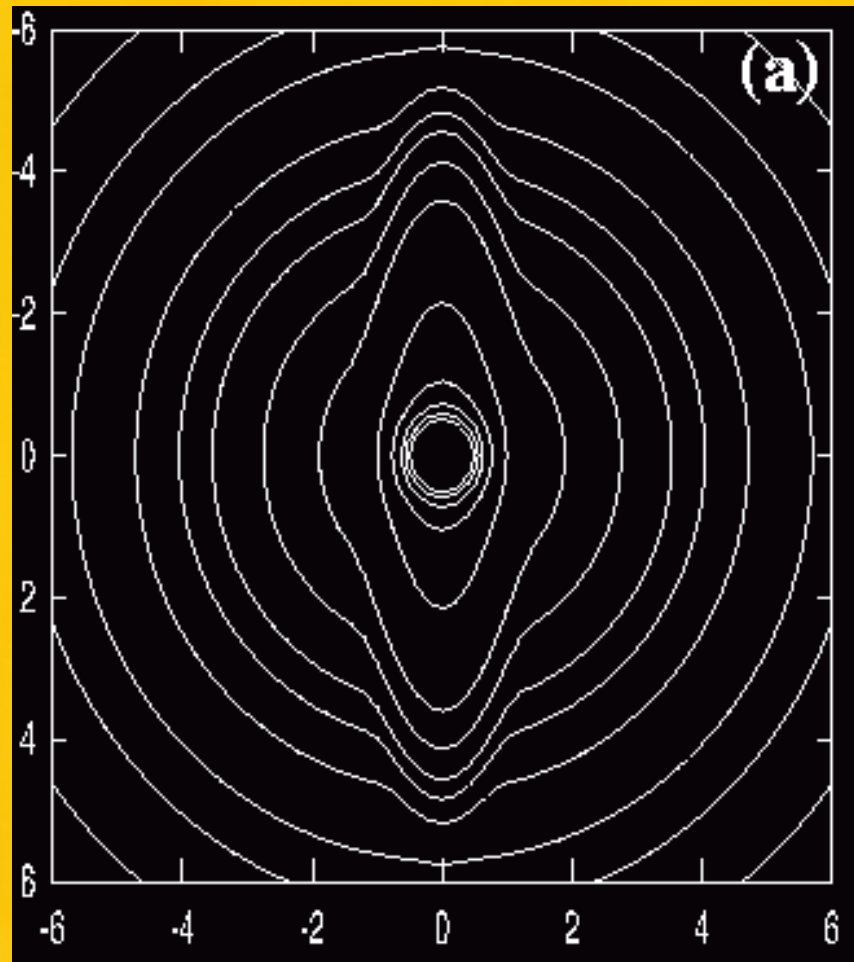


Παράδειγμα (συνέχεια)

$$H \equiv \frac{1}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + V(x, y) = h$$

- V άρτιο ως προς y

ισοδυναμικές



Παράδειγμα (συνέχεια)

$$H \equiv \frac{1}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + V(x, y) = h$$

- V άρτιο ως προς y

Επιφάνεια τομής $y = 0$ δηλ. $(x, \dot{x})$

Τροχιές εντός της ZVC $V(x, y) = h$ με $\dot{y}_0 > 0$

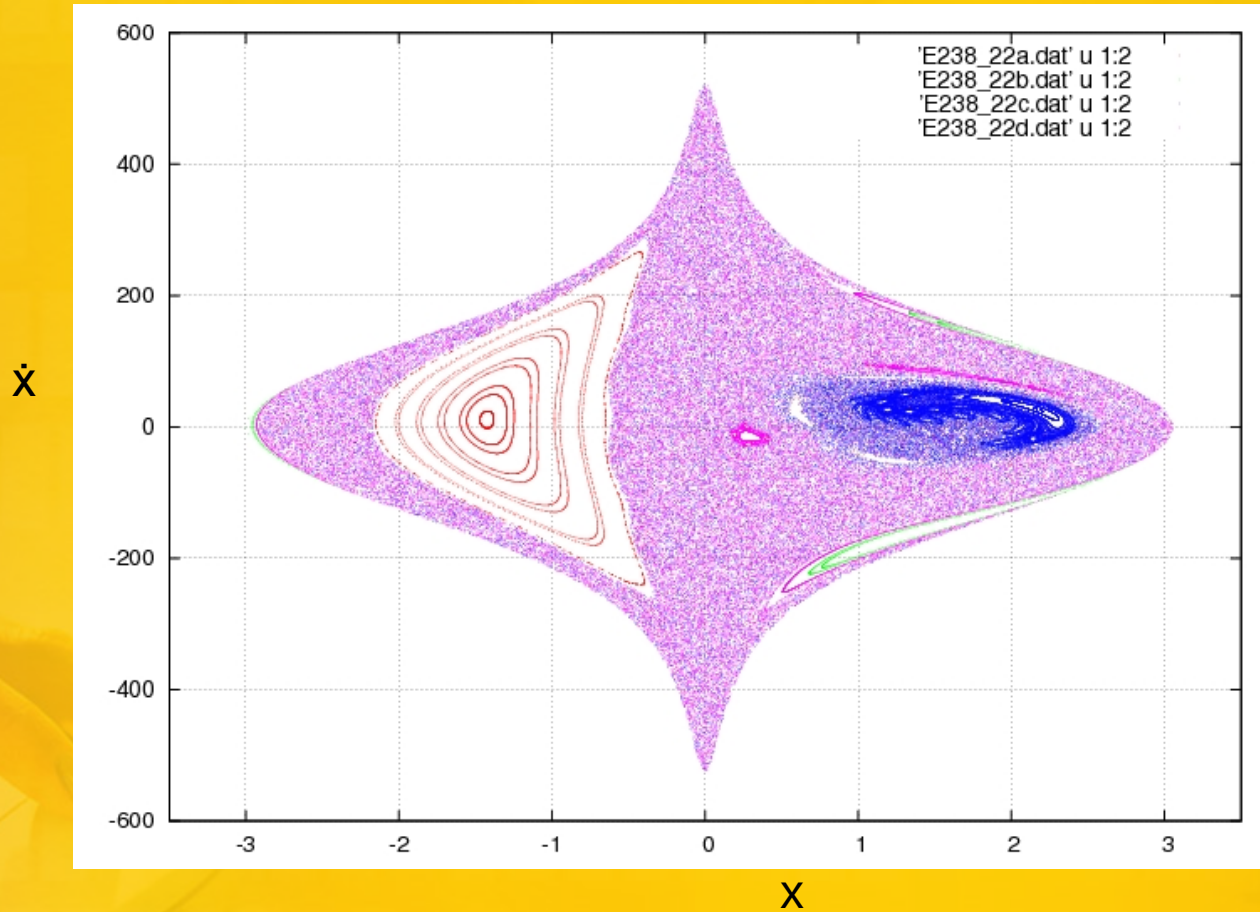
τέμνουν το επίπεδο $y = 0$ άπειρες φορές
(αν δεν πρόκειται
για τροχιές διαφυγής)

κλειστή CZV

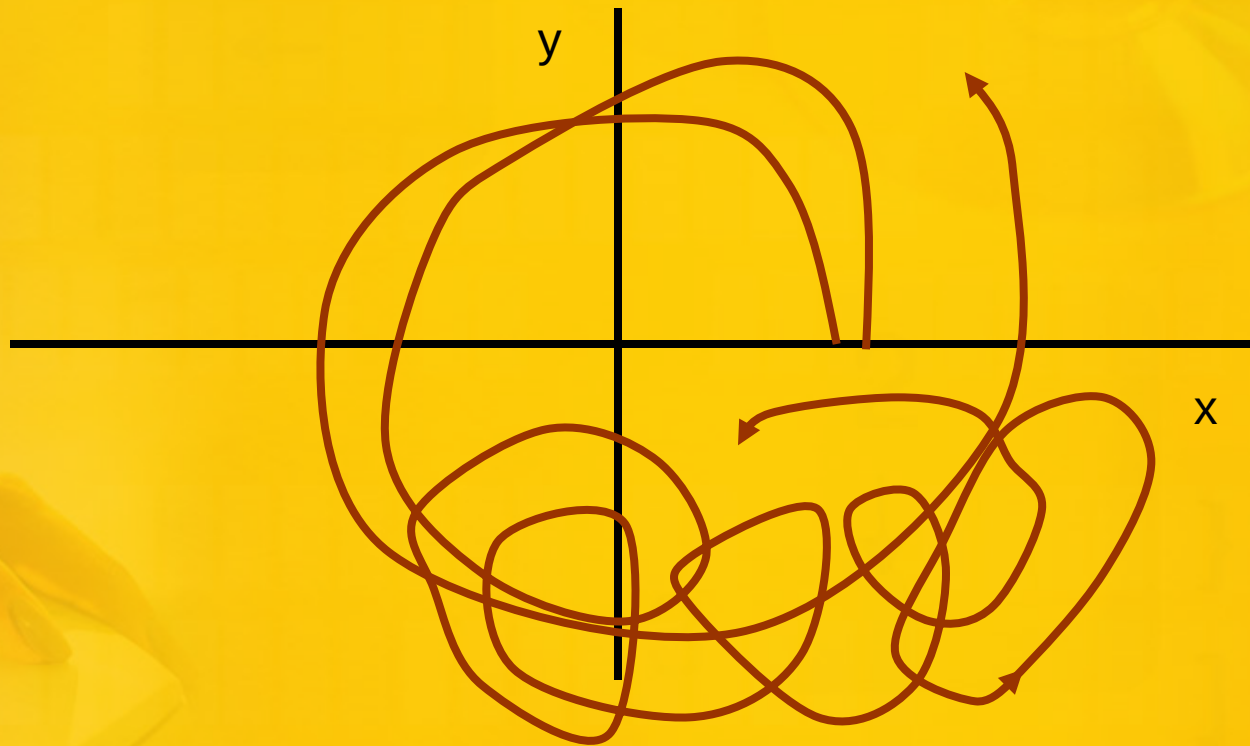
$$\frac{1}{2} \dot{x}^2 + V(x,0) = h$$

Αν το αρχικό σημείο εντός της καμπύλης τότε όλα τα υπόλοιπα θα είναι εντός της ίδιας καμπύλης.

κλειστή CZV



Τοπικές ε.τ. και επιφάνειες μη-τομης



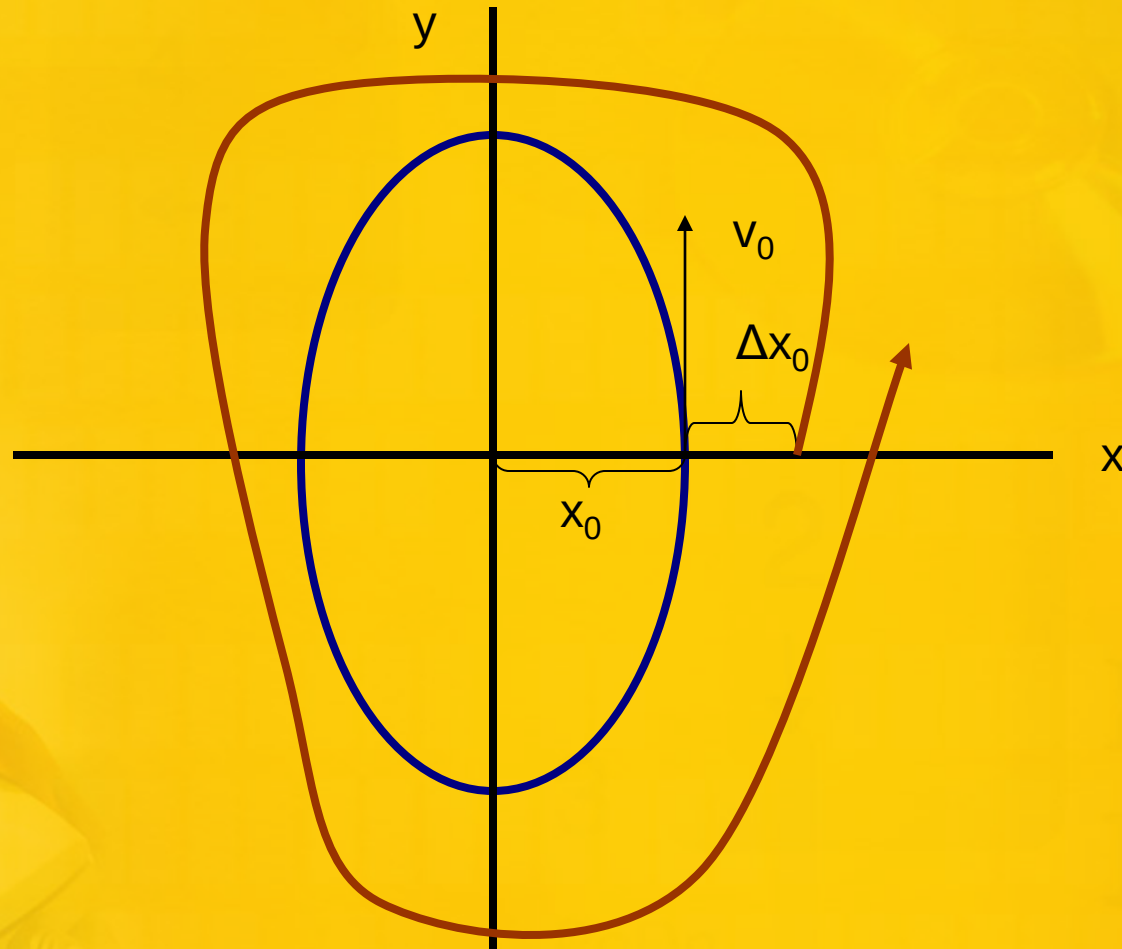
Μη-ολοκληρώσιμα συστήματα

Τροχιές

- Τροχιές: περιοδικές – μη περιοδικές
- Περιοδικές τ. : Ευσταθείς - Ασταθείς

$$x = x_0(t) + \xi$$

Ευστάθεια περιοδικών τροχιών



Τάξη και Χάος σε μια επιφάνεια τομής

- Ένας αριθμητικός κώδικας περίπου 100 γραμμών (ανάλογα με την πολυπλοκότητα του βαρυτικού δυναμικού) – άσκηση για έναν μεταπτυχιακό φοιτητή.
- Κυρίως μια αριθμητική ολοκλήρωση ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων (εξισώσεων κίνησης).
- π.χ. 10^5 σημεία σε ένα πολύπλοκο δυναμικό ραβδωτού γαλαξία (Ferrers, 1887 Q.J. Pure Appl. Math. 14,1) – 8 ώρες (πραγματικού χρόνου) υπολογισμών συνολικά με ένα σύνηθες PC. Εν γένει πολύ λιγότερο.

1052 *G. Contopoulos and P. A. Patsis*

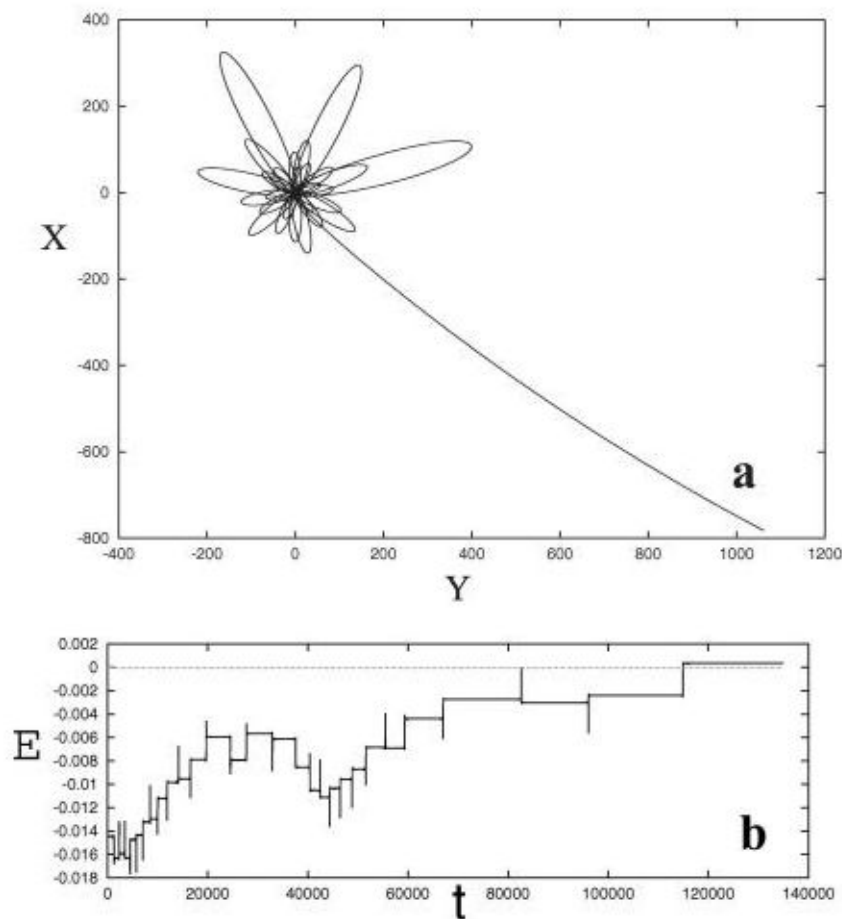
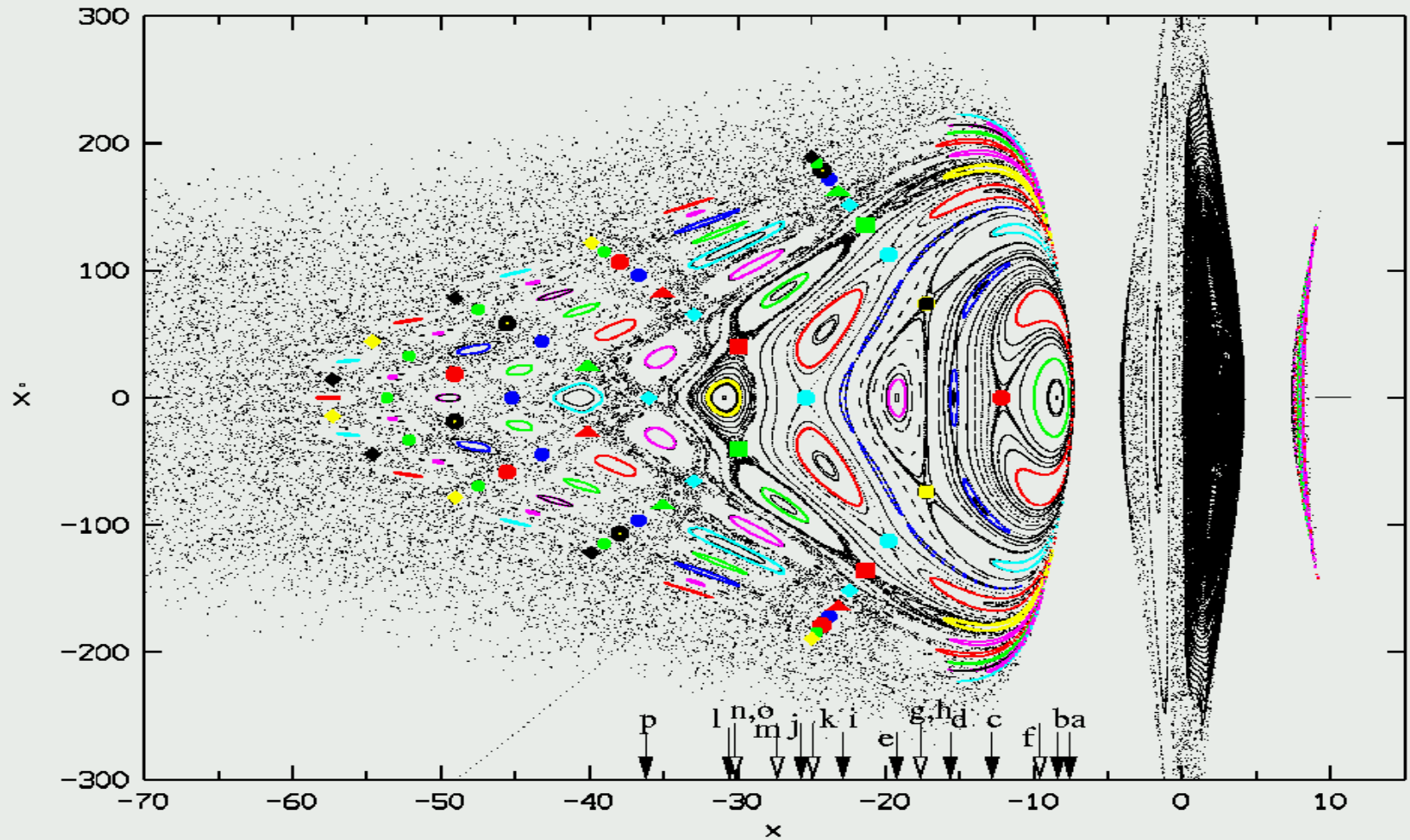
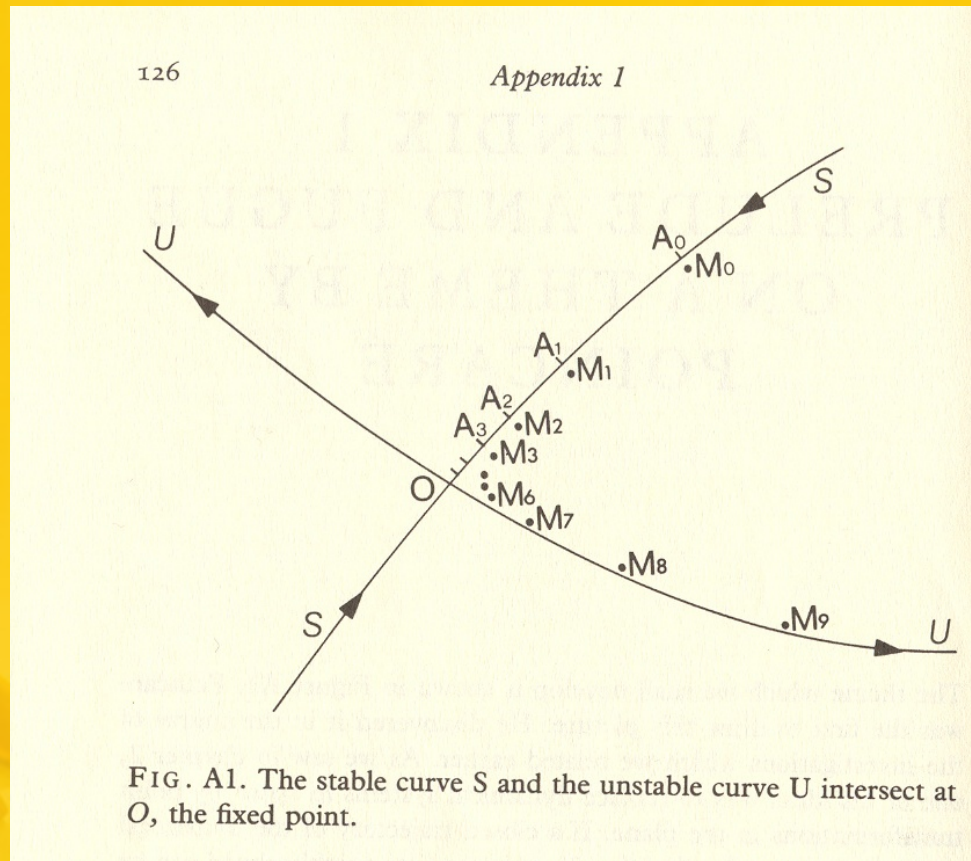


Figure 18. (a) The orbit described in Fig. 17 plotted in a non-rotating frame of reference. (b) The corresponding variation of the energy with time.

Τάξη και Χάος σε μία επιφάνεια τομής



Σημεία αστάθειας – Ασταθείς περιοδικές τροχιές



Κανόνες χαοτικής συμπεριφοράς

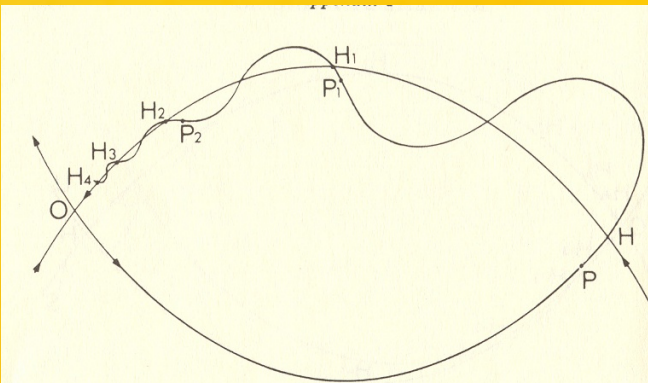


FIG. A6. First attempt at continuing U beyond H.

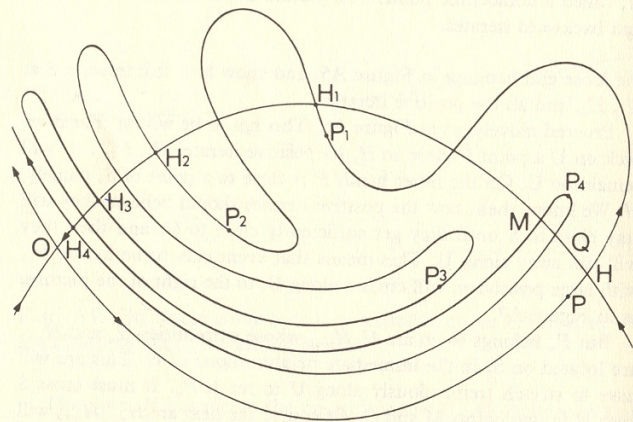


FIG. A7. Second attempt at continuing U.

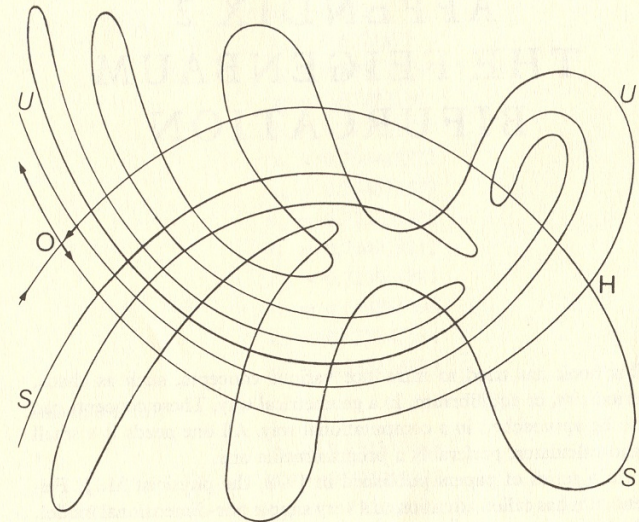


FIG. A8. Third and last attempt at continuing U. The drawing is incomplete: the curve U must fold and accumulate indefinitely along the arc OH of S, so that a host of new homoclinic points appears.

that come earlier, $H_{n-1}H_n$ or H_0H_1 , for instance, cannot meet S between O and H. So S has to meet them at some point later than H, that is, the curve S has to fold back along itself to intersect all the earlier arcs.

From the modest beginning of Figure A1, the stable and unstable curves have knitted a web, intricate beyond our wildest imagination. As Poincaré put it: "The reader will be struck by the complexity of this figure, which I am not even attempting to draw. Nothing could be more intricate than the trajectory of the three body problem, and

H. Poincaré: ,

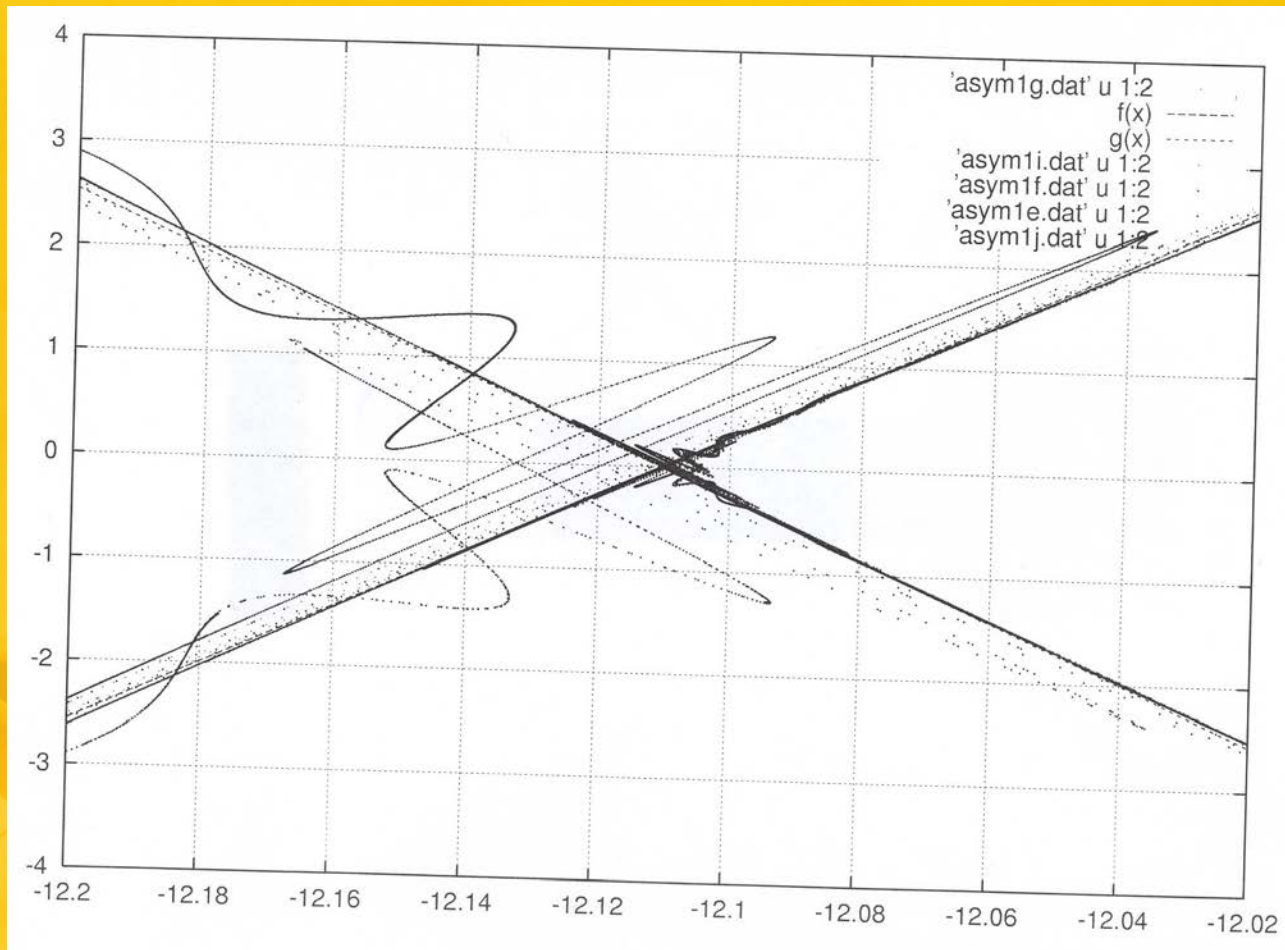
Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste (1899)
vol.3, chap. 3, sec. 397.

- The reader will be struck by the complexity of this figure, which I am not even attempting to draw.

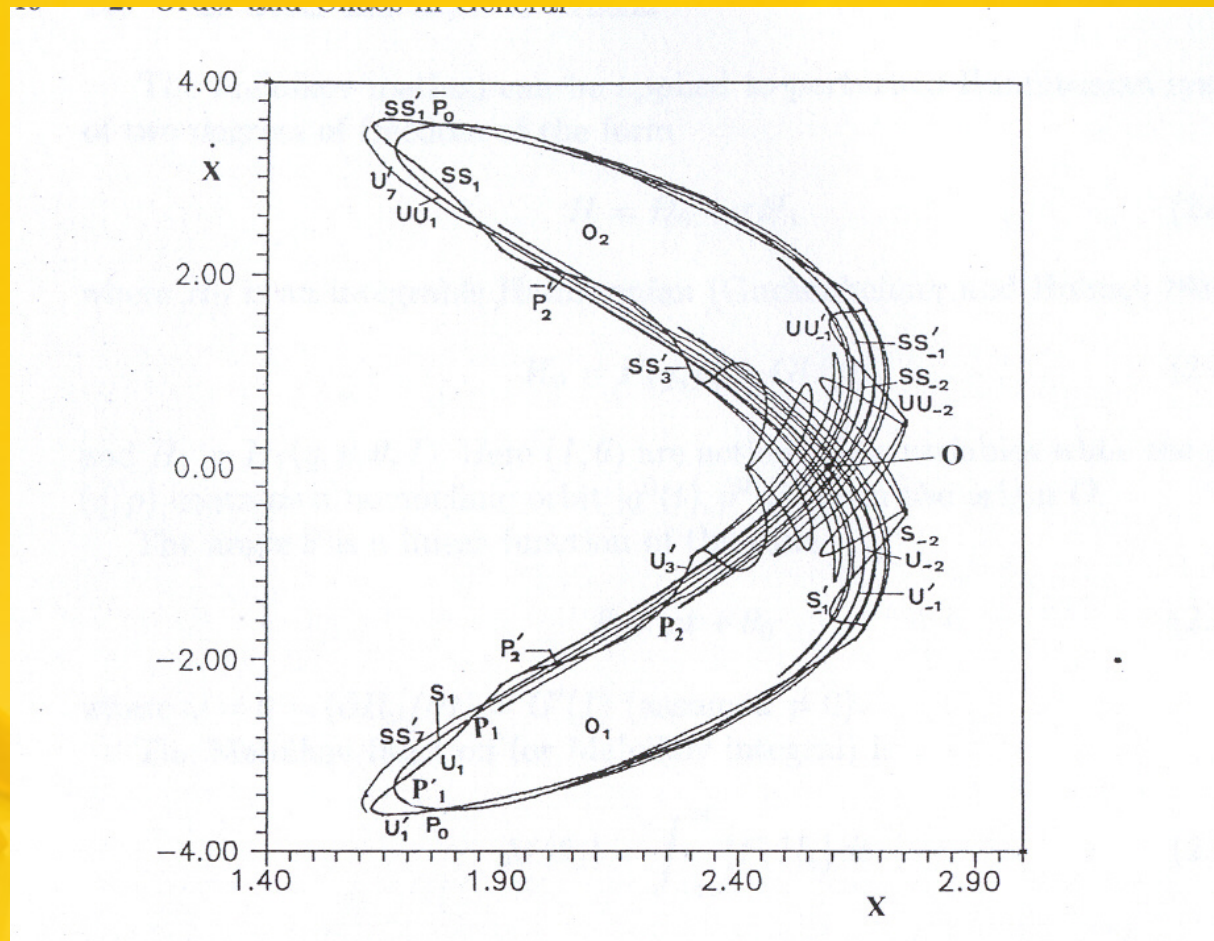
Nothing could give us a better idea of the intricacy of the 3-body problem, and of most problems of dynamics

βλ. Ivar Ekeland (1988). *Mathematics and the unexpected* Chicago, IL,: University Of Chicago Pres

Ένας υπολογισμός 5 λεπτών



Παραδείγματα



Η δομή του φασικού χώρου σε 3-διάστατα Χαμιλτονιανά συστήματα

$$H(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) = \frac{1}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \Phi(x, y, z) - \frac{1}{2}\Omega_b^2(x^2 + y^2)$$

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΩΝ ΤΡΟΧΙΩΝ

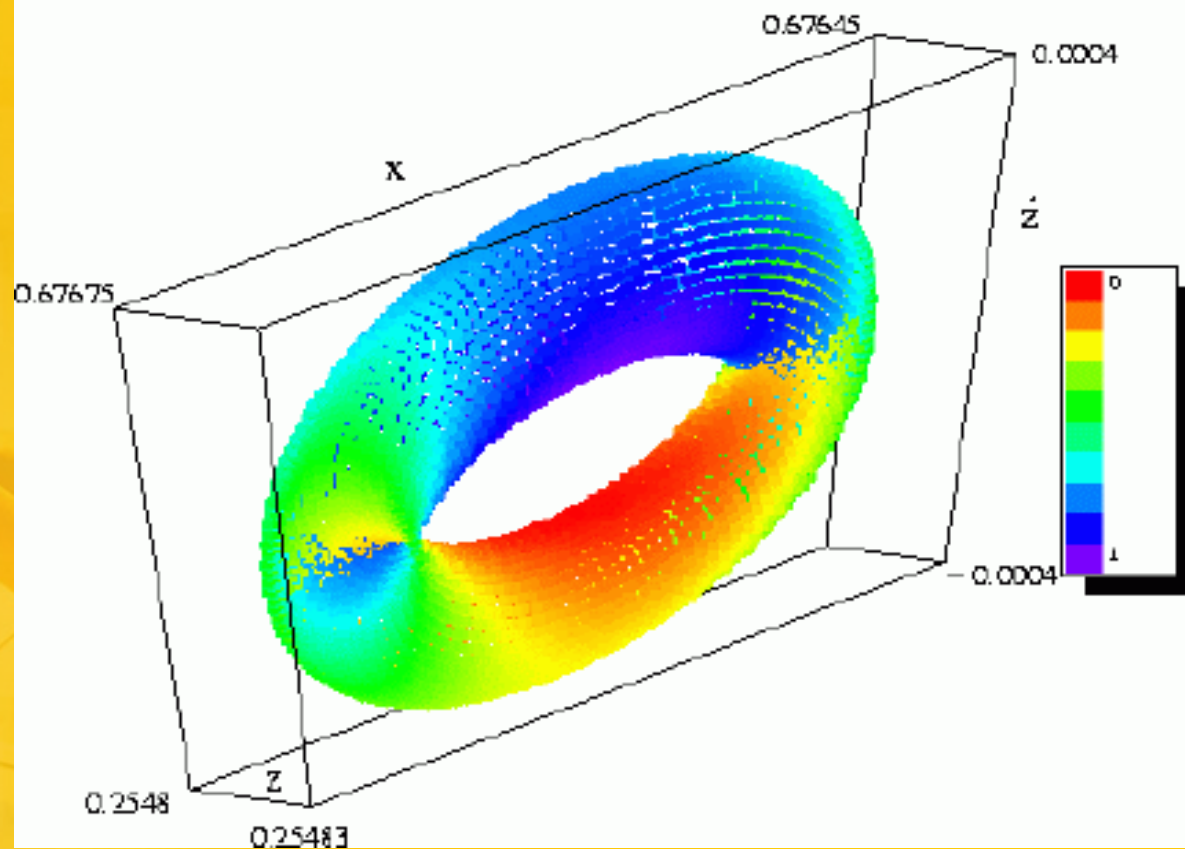
- Ο υπολογισμός της ευστάθειας περιοδικών τροχιών βασίζεται στην μέθοδο Broucke (Broucke 1969, Hadjidemetriou 1975). Έστω ότι έχουμε μία περιοδική τροχιά σε μία δοσμένη τιμή της ενέργειας:

$$H(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) = E_j$$

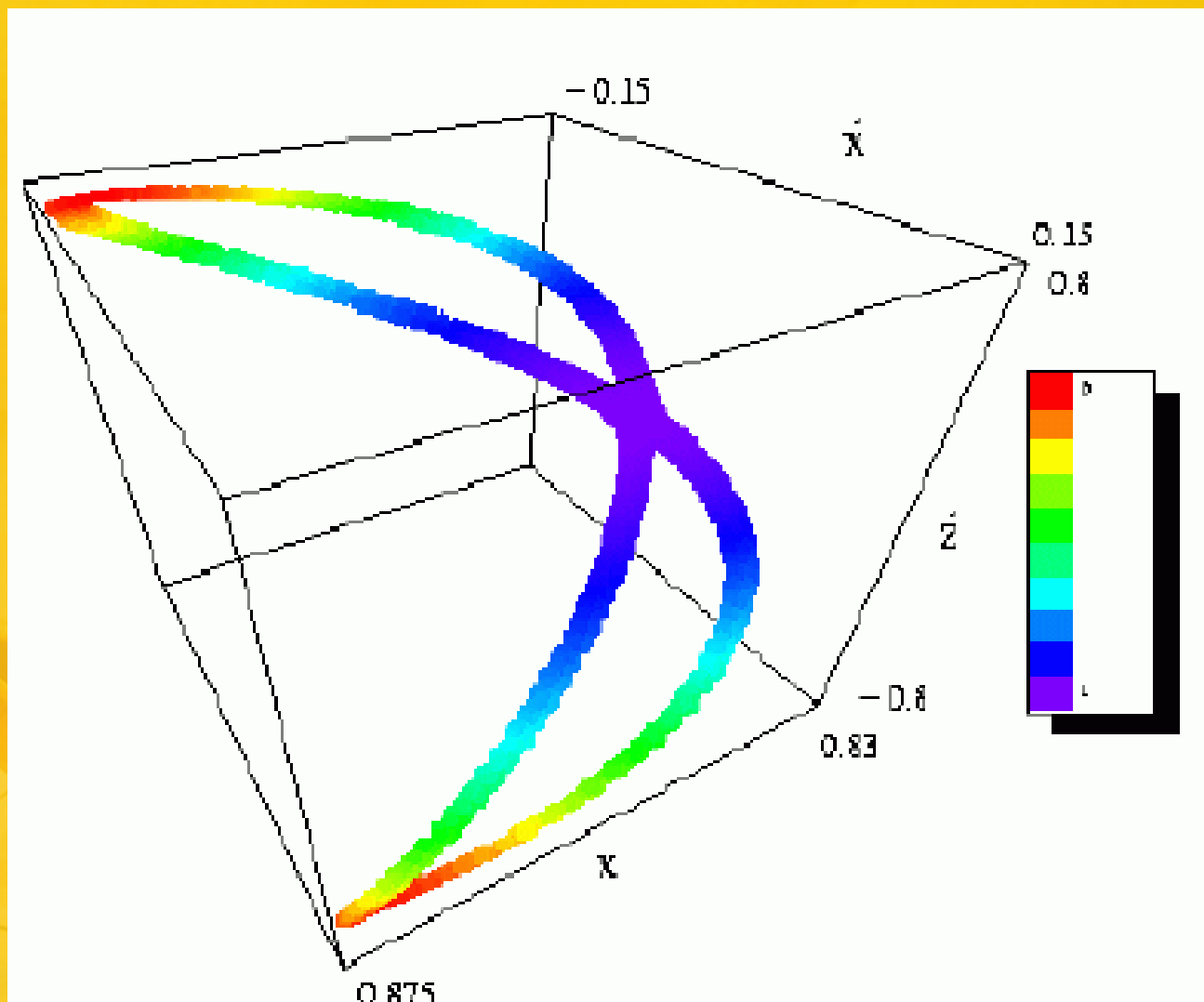
Επιλέγουμε την επιφάνεια τομής $y = 0$ με $\dot{y} > 0$.

Η επιφάνεια αυτή $(x, z, \dot{x}, \dot{z})$ είναι 4D. Κατόπιν διαταράσσουμε το σημείο της περιοδικής τροχιάς στην επιφάνεια τομής. Ορίζεται έτσι ένας μετασχηματισμός $T : R^4 \rightarrow R^4$ που συνδέει το αρχικό σημείο με το πρώτο σημείο στην επιφάνεια τομής.

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ



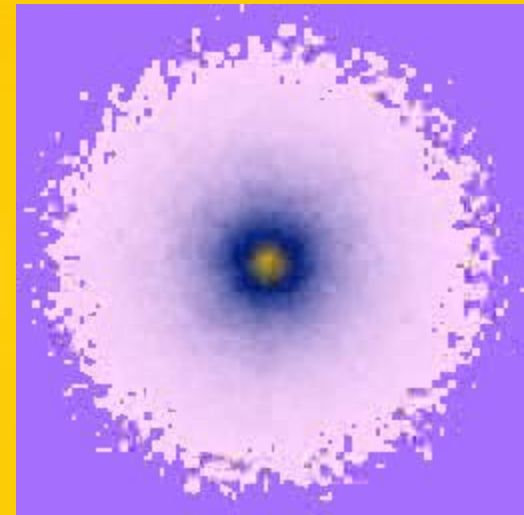
ΑΠΛΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΓΙΑ $E_j = -4.19$



Το πρόβλημα των N σωμάτων

$$m_j \ddot{\mathbf{x}}_j = G \sum_{k \neq j} \frac{m_j m_k (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_j)}{|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_j|^3}$$

Οι γαλαξίες έχουν $10^{10} - 10^{11}$
αστέρες $j = 1, 2, \dots, n$

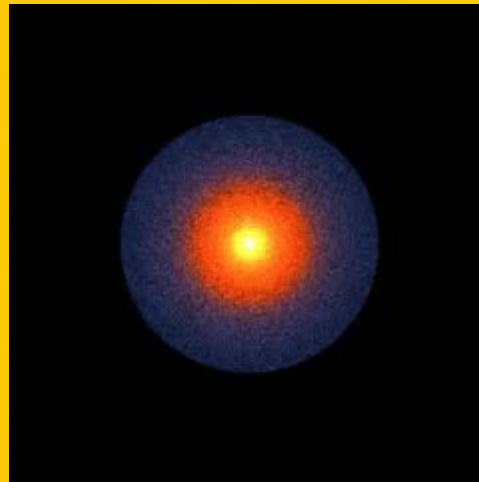


Patsis & Kaufmann
1999, A&A 352, 469

10^5 σωμάτια

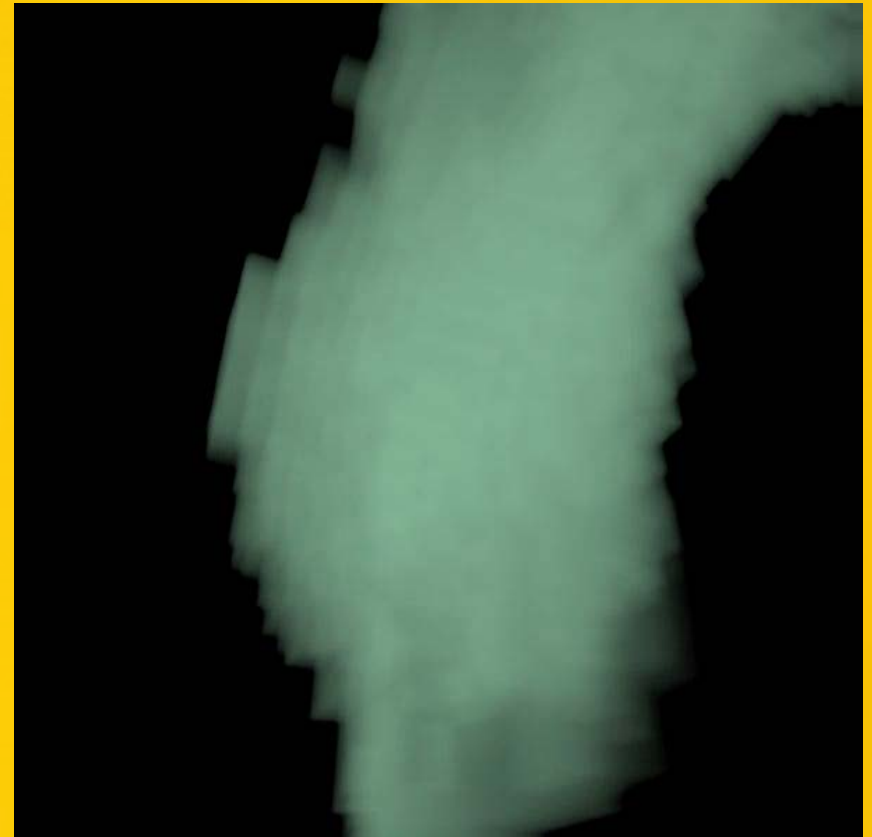
5×10^5 σωμάτια

<http://www.youtube.com/watch?v=DYp9NptNYdY&NR=1>



Σχηματισμός παλαιών

- Από τις μονολιθικές καταρρεύσεις (Το μοντέλο ELS. -Olin Eggen, Donald Lynden-Bell, Allan Sandage, 1960) στα ιεραρχικά σενάρια.
- Ο ρόλος των συγκρούσεων πολύ σημαντικός, ιδιαίτερα σε παλαιότερες εποχές.
- **Ειδικό software**
 - Κώδικες πλέγματος
 - Κώδικες tree $O(N \log N)$ πράξεις



Ειδικό hardware (Με άξονα το πρόβλημα των N -σωμάτων) Σχέσεις κόστους - υπολογισμών

- GRAPE (GRAVity riPE) (Makino & Taiji 1996, Comp. in Phys. 10, 352)
 $O(N^2)$ δυνάμεις + $O(N)$ υπόλοιπες πράξεις στον κώδικα
(βλ. Patsis 1998, in ASTRONOMY 2000+, Kontizas et al., ΓΓΕΤ)
- GPUs (Programmable Graphics Processing Units)
Παράλληλοι υπολογισμοί συνδυάζοντας μονάδες μνήμης

CCDs και επεξεργασία εικόνας

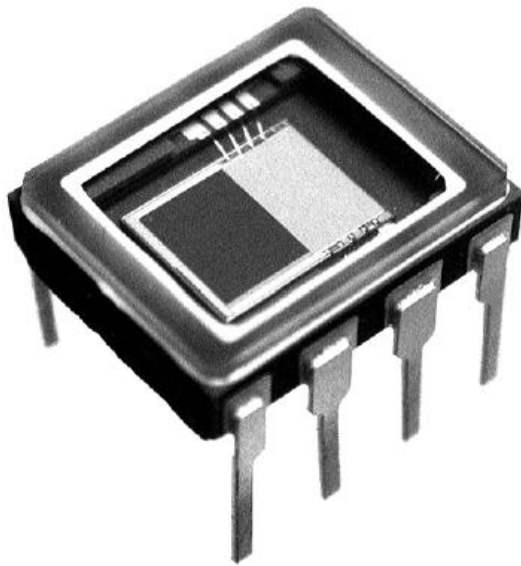


Figure 1.8 Electronic detectors have revolutionized astronomy. They are compact, highly sensitive to light, and—unlike a photographic emulsion—an electronic sensor can be used over and over again. Shown here is a Texas Instruments TC237, a 640x480-pixel CCD in a package just half-an-inch long.

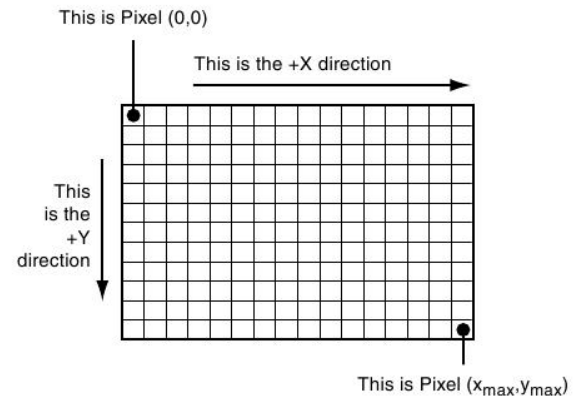
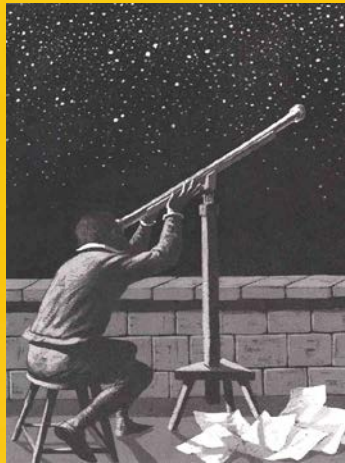


Figure 1.14 Each pixel in a digital image has an “address” corresponding its place in the image and the location of a photosite on the detector. The first pixel to be read from the detector is pixel (0,0) and the last is pixel $(x_{\max}, y_{\max})$. The image shown here is 16 pixels wide by 12 pixels high.

από το βιβλίο του Christian Buil, “CCD Astronomy”, Willmann-Bell, (1991)

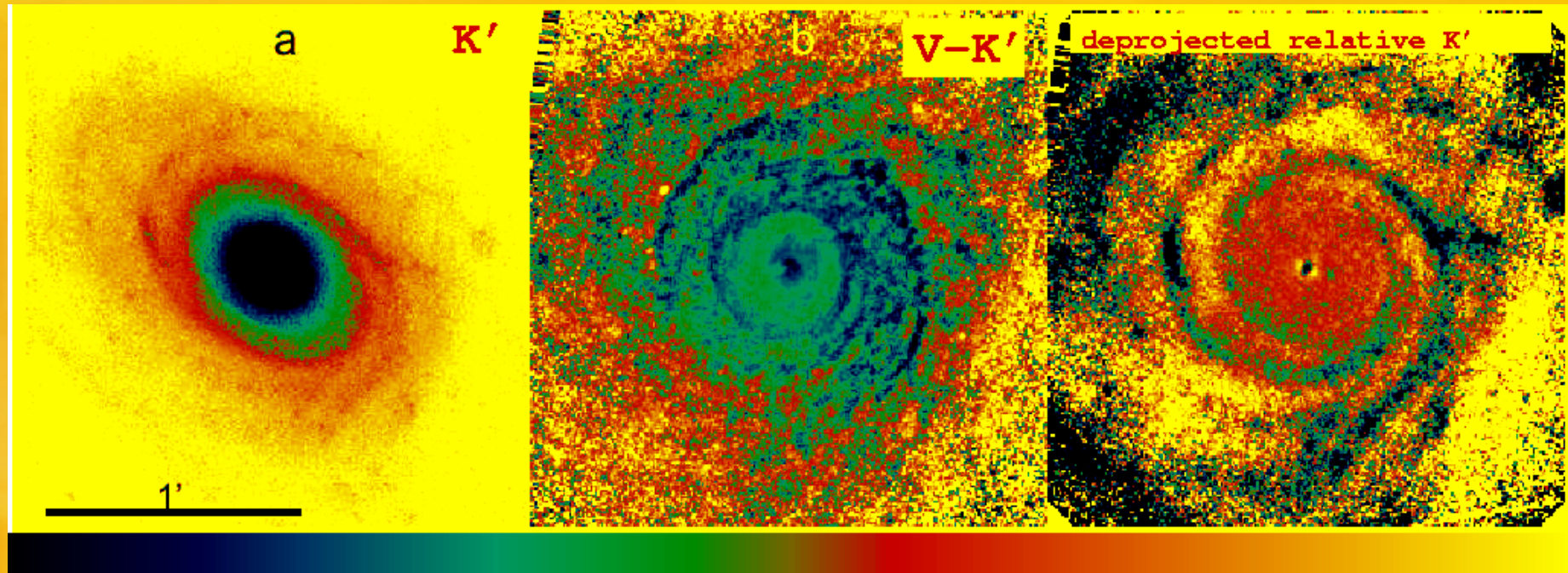
Αλλαγή τρόπου παρατήρησης



NGC 3223 in B (4400 Å)

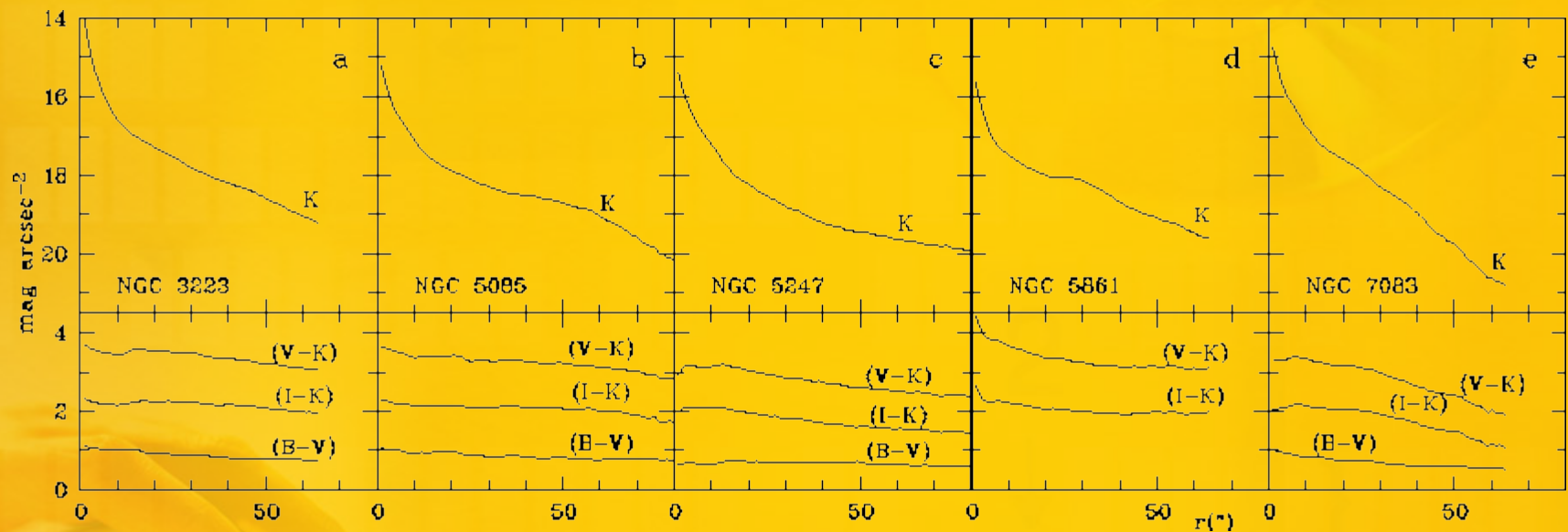


Αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων. Ο NGC 3223 στο εγγύς υπέρυθρο



Grosbol & Patsis 1998

Προφίλ επιφανειακής λαμπρότητας



Potentials of barred galaxies

The potential has been calculated using near-infrared observations in the J , H and K bands under the assumption of a constant mass-to-light (M/L) ratio. In the $z = 0$ plane it can be approximated by the function

$$\Phi(r, \theta) = \Phi_0(r) + \sum_{m>0} \Phi_{mc}(r) \cos(m\theta) + \Phi_{ms}(r) \sin(m\theta), \quad (1)$$

where $m = 2, 4, 6$.

The amplitudes of the various components in equation (1) are written in the form $\sum_{n=0}^8 \alpha_n r^n$. The values of the coefficients α_n in $(\text{km s}^{-1})^2$ can be found in table 1 of Quillen et al. (1994). Re-

Σφαιροειδή του πυρήνα σαν κουτιά



Κουτιά και φυστίκια



Η συμβολή της θεωρίας των τροχιών

Αν τα «κουτιά» αποτελούν μέρος των δίσκων...

- Μπορούν οι δίσκοι να υποστηρίξουν τροχιακά τα κουτιά;
- Ποια η σχέση μεταξύ κουτιών και ράβδων;
- Γιατί υπάρχουν σχηματισμοί «X» μέσα σε μερικά κουτιά;
- Ποια η αντιστοιχία μεταξύ χαρακτηριστικών που παρατηρούμε από το πλάι και της μορφολογίας “en face”;

Για να απαντήσουμε χτίζουμε 3-διαστατα μοντέλα δίσκων με τροχιές.

Building Edge-on profiles of disk galaxies

Panos Patsis (RCoA)

Charis Skokos (RCoA)

Lia Athanassoula (Observatoire de Marseille)

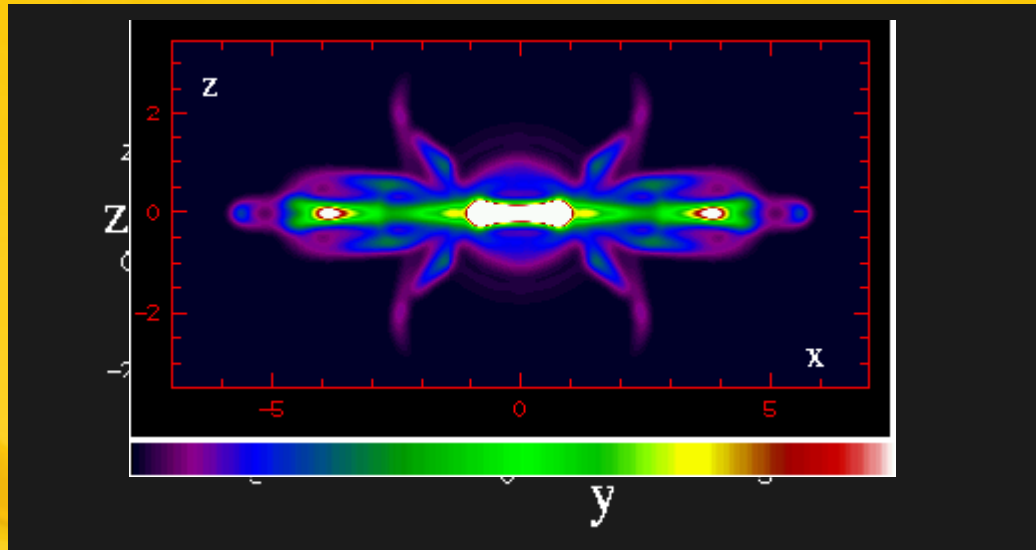
Preben Grosbøl (ESO)

(2002-2004)

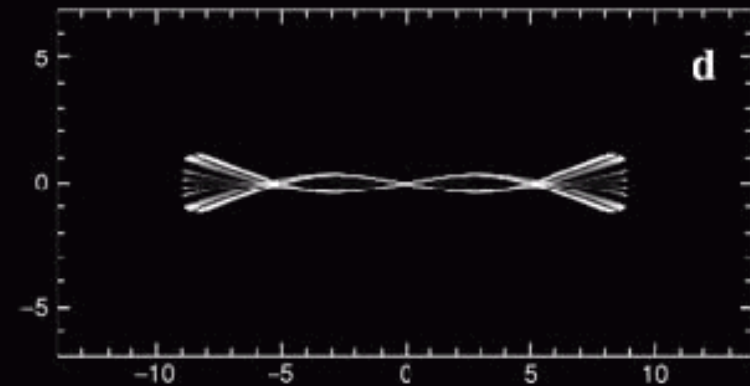
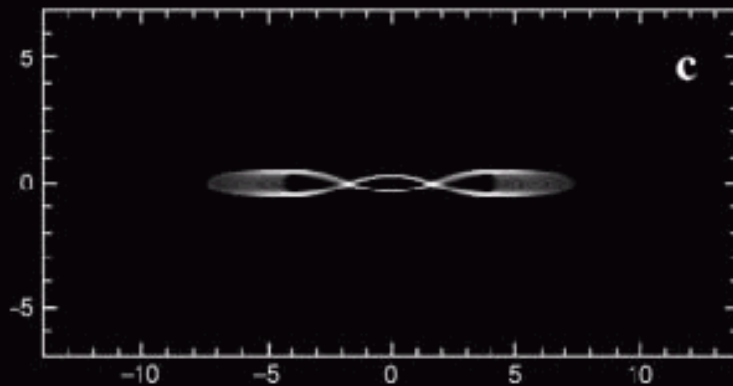
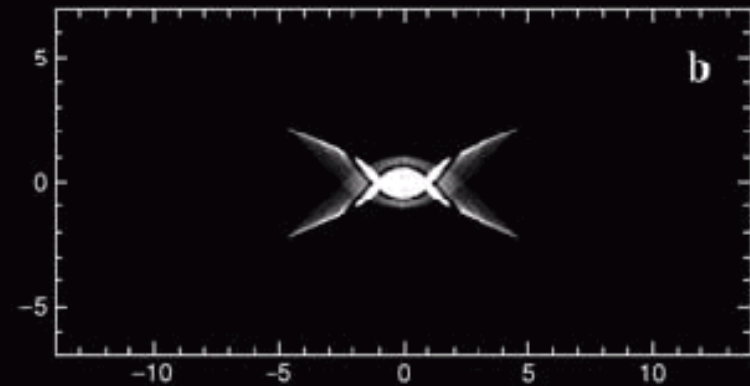
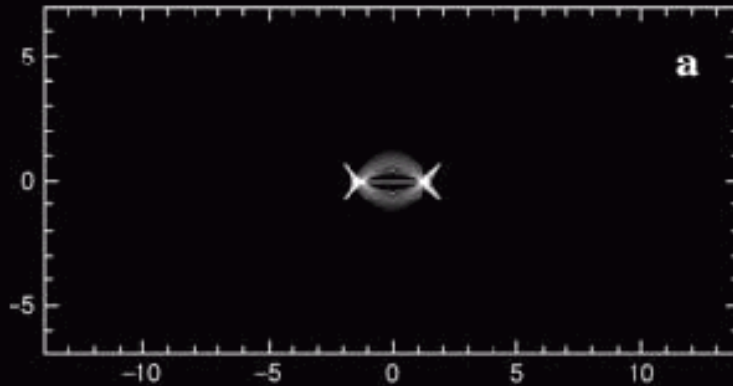


The relation between orbital shapes and morphological features

weighted profiles
(orbits from the stable parts of the families)



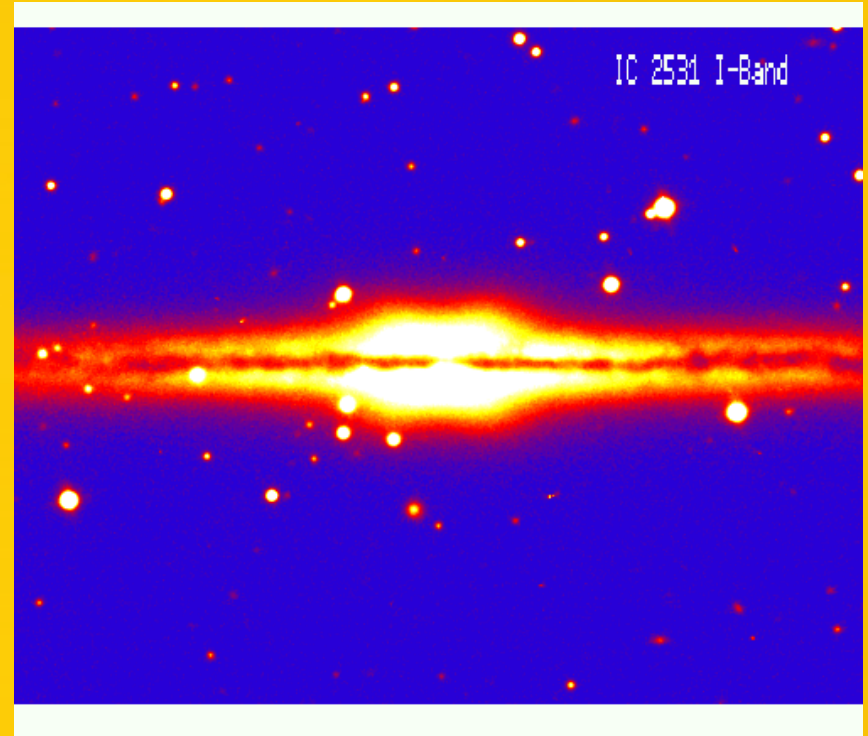
The relation between orbital shapes and morphological features



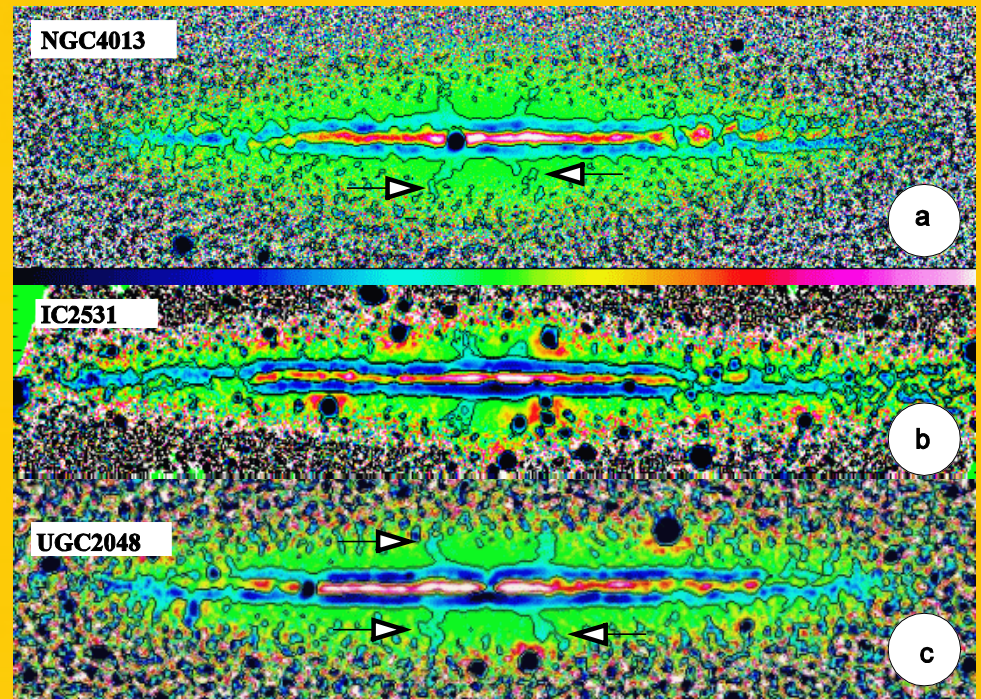
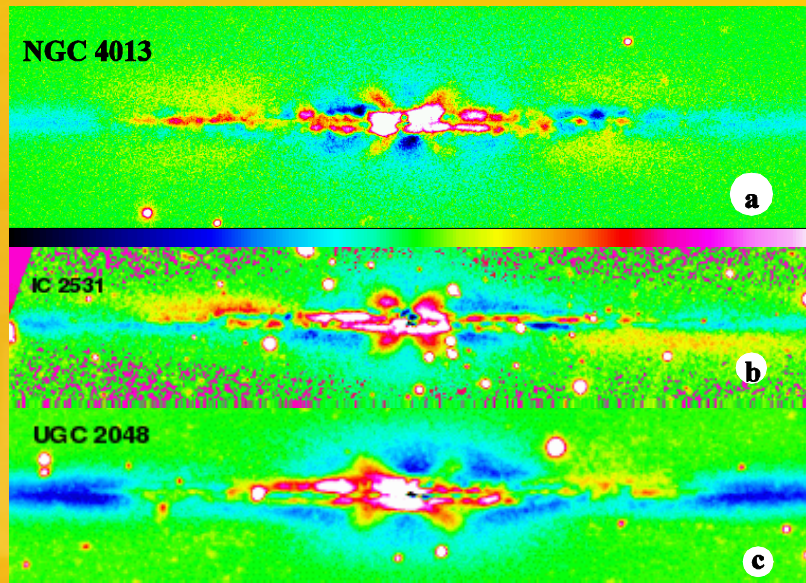
Ανακαλύπτοντας κρυμένες δομές



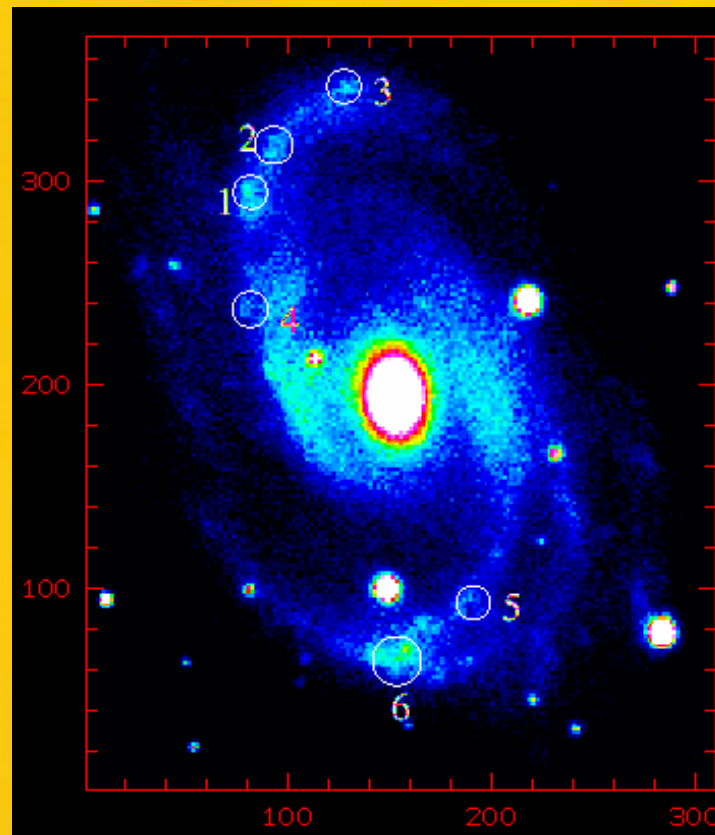
NGC 4013



Residual images (Patsis & Xilouris 2006, MNRAS 366, 1121)



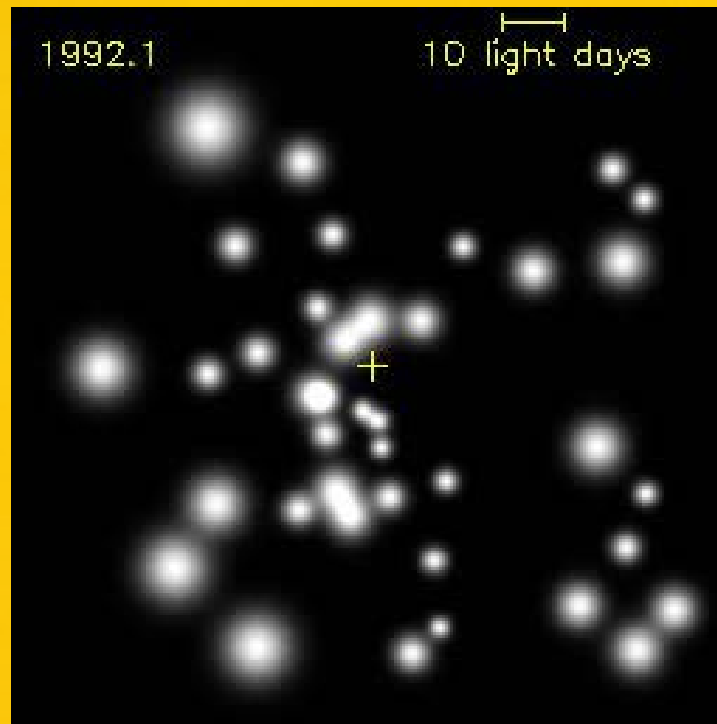
Αφαίρεση νεαρών αντικειμένων



Patsis, Heraudeau,
Grosbol 2001, A&A
370, 875

Σύγκριση θεωρίας με παρατηρήσεις: Ο νόμος του Newton ισχύει στο κέντρο του Γαλαξία.

- R. Genzel et al. (MPE)
<http://www.eso.org/public/news/eso0226/>



Αστρονομία. Η μητέρα της βασικής έρευνας.

- Από τον Γαλιλαίο στη Σύγχρονη Φυσική → Από τον Poincare στη θεωρία του Χάους (με εφαρμογές σε όλες τις επιστήμες)
- Από τις CCDs και την ανάλυση αστρονομικών παρατηρήσεων στις εφαρμογές στην ιατρική

Σχέση υπολογιστών και εκπαίδευσης νέων αστρονόμων.

- Ο σύγχρονος αστρονόμος – ένας ειδικός στα υπολογιστικά συστήματα.
- Ανάλυση αστρονομικής εικόνας
- Συγγραφή εξειδικευμένου λογισμικού
- Χρήση ειδικών πακέτων (π.χ. Mathematica, Maple κλπ)
- Ευρύτερη επαγγελματική αποκατάσταση