

ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΑΘΗΝΩΝ

Π Ρ Α Κ Τ Ι Κ Α  
ΤΗΣ  
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΕΤΟΣ 2011: ΤΟΜΟΣ 86ος

ΤΕΥΧΟΣ ΠΡΩΤΟΝ  
ΤΑΞΙΣ ΤΩΝ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΕΝ ΑΘΗΝΑΙΣ  
ΓΡΑΦΕΙΟΝ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

2011







# Π Ρ Α Κ Τ Ι Κ Α

ΤΗΣ

ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΕΥΧΟΣ ΠΡΩΤΟΝ

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ Σ. ΓΕΩΡΓΙΑΔΗ

ΑΚΑΔΗΜΙΑ

ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΑΘΗΝΩΝ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΥΚΟΥΤΡΗΣ

137395/2012.....



ΑΘΗΝΩΝ

ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΑΘΗΝΩΝ  
ΓΡΑΦΕΙΟΝ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΑΤΩΝ  
Πανεπιστημίου 28, 10679 Αθήναι  
[www.academyofathens.gr](http://www.academyofathens.gr)  
[dim@academyofathens.gr](mailto:dim@academyofathens.gr)

ISSN 0369-8106

Π Ρ Α Κ Τ Ι Κ Α  
ΤΗΣ  
Α Κ Α Δ Η Μ Ι Α Σ Α Θ Η Ν Ω Ν

ΕΤΟΣ 2011: ΤΟΜΟΣ 86ος

ΤΕΥΧΟΣ ΠΡΩΤΟΝ  
ΤΑΞΙΣ ΤΩΝ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΕΝ ΑΘΗΝΑΙΣ  
ΓΡΑΦΕΙΟΝ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

2011





## ΠΙΝΑΞ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

τοῦ 86ου Τόμου τῶν Πρακτικῶν τοῦ ἔτους 2011

### ΤΕΥΧΟΣ ΠΡΩΤΟΝ

	Σελ.
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 3ΗΣ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ 2011 .....	9
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 8ΗΣ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ 2011 .....	29
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 3ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ 2011 .....	55
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 17ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ 2011 .....	65
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 10ΗΣ ΜΑΪΟΥ 2011 .....	67
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 26ΗΣ ΜΑΪΟΥ 2011 .....	83
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 31ΗΣ ΜΑΪΟΥ 2011 .....	91
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 2ΑΣ ΙΟΥΝΙΟΥ 2011 .....	107
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 21ΗΣ ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2011 .....	109
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 8ΗΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2011 .....	129
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 15ΗΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2011 .....	141
ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 20ΗΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2011 .....	195
ΕΚΘΕΣΗ ΠΕΠΡΑΓΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΕΡΕΥΝΩΝ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΗΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ .....	217
ΕΚΘΕΣΗ ΠΕΠΡΑΓΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΕΡΕΥΝΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΚΑΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ .....	239
ΕΚΘΕΣΗ ΠΕΠΡΑΓΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΕΡΕΥΝΩΝ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΦΗΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ .....	251
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟΝ ΚΑΤΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ .....	255



# ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 3ΗΣ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ 2011

---

## ΧΑΟΤΙΚΟΙ ΓΑΛΑΞΙΕΣ

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ  
ΤΩΝ κ.κ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΥ ΚΑΙ ΠΑΝΟΥ ΠΑΤΣΗ

ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ κ. ΓΕΩΡΓΙΟ ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

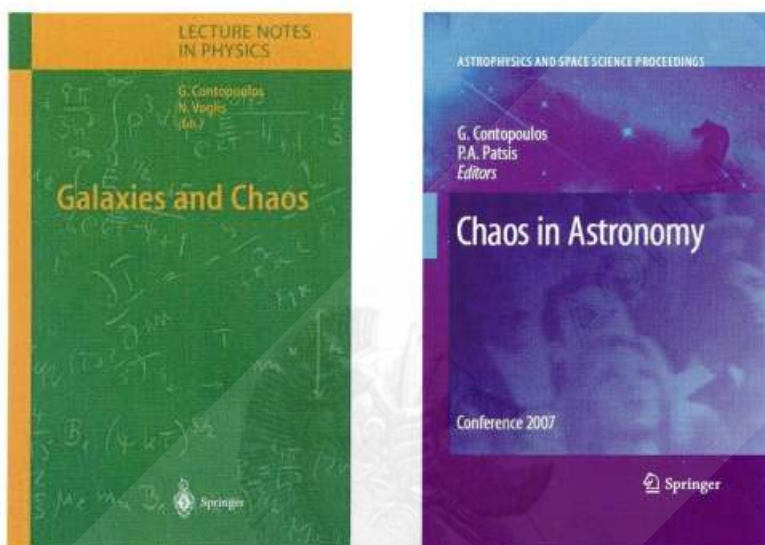
Οι σπειρες των γαλαξιών είναι κύματα πυκνότητας, δηλαδή οι αστέρες διέρχονται δια μέσου των σπειρών αλλά παραμένουν περισσότερο χρόνο πλησίον τους, ούτως ώστε οι σπειρες αποτελούν πάντοτε μέγιστα πυκνότητας. Οι τροχιές των αστέρων είναι εν γένει οργανωμένες στους συνήθεις σπειροειδείς γαλαξίες, αλλά είναι εν πολλοίς χαοτικές στους ραβδωτούς σπειροειδείς γαλαξίες. Οι σπειρες των ραβδωτών γαλαξιών που ξεκινούν από τα άκρα της ράβδου ακολουθούν τις ασταθείς ασυμπτωτικές καμπύλες των ασταθών περιοδικών τροχιών. Είναι κύματα πυκνότητας αποτελούμενα από χαοτικές τροχιές.

Οι αστέρες τους παραμένουν προσκολλημένοι στις σπειρες (φαινόμενο κολλητικότητας) για χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα της ηλικίας του Σύμπαντος, τελικά όμως οι περισσότεροι αστέρες θα διαφύγουν μακριά από τους γαλαξίες.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα πρόβλημα που άπασχόλησε ιδιαίτερα τους αστρονόμους τις τελευταίες δεκαετίες ήταν το αν υπάρχουν εκδηλώσεις χάους σε διάφορα αστρονομικά φαινόμενα. Για το θέμα αυτό, το Κέντρο Έρευνών Αστρονομίας της Ακαδημίας οργάνωσε δύο διεθνή συνέδρια τα προηγούμενα έτη, και

τὰ πρακτικά ἐκδόθηκαν σὲ δύο ὀγκώδεις τόμους ἀπὸ τὸ γνωστὸ ἐκδοτικὸ οἶκο Springer Verlag (Contopoulos and Voglis 2003, Contopoulos and Patsis 2009) (Σχ. 1).



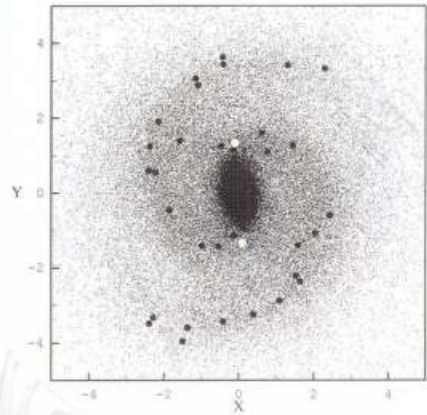
Σχ. 1. Πρακτικά Συνεδρίων τοῦ Κέντρου Ἐρευνῶν Ἀστρονομίας καὶ Ἐφαρμοσμένων Μαθηματικῶν τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν.

Ἕνα εἰδικότερο πρόβλημα στὸ ὁποῖο ἡ συμβολὴ τοῦ Κέντρου μας ὑπῆρξε σημαντικὴ ἦταν τὸ χάος σὲ γαλαξίες. Διαπιστώσαμε δηλαδή ὅτι οἱ σπείρες τῶν ραβδωτῶν γαλαξιῶν δημιουργοῦνται ἀπὸ ἀστέρες σὲ χαοτικὲς τροχιές (Σχ. 2α πραγματικὸς ραβδωτὸς γαλαξίας, Σχ. 2β προσομοίωση μὲ N-σώματα). Θὰ ἀναπτύξουμε τὸ θέμα αὐτὸ τονίζοντας ἰδιαίτερα τίς τελευταῖες ἐξελίξεις.

Εἶναι γνωστὸ ὅτι οἱ περισσότεροι γαλαξίες στὸ Σύμπαν ἔχουν σπείρες (Σχ. 3). Ἀπὸ τὸ ἄλλο μέρος εἶναι γνωστὸ ὅτι ἡ περιστροφή τῶν γαλαξιῶν εἶναι διαφορική, δηλαδή οἱ ἀστέρες ποὺ εἶναι κοντὰ στὸ κέντρο περιστρέφονται ταχύτερα ἀπὸ τοὺς μακρινούς ἀστέρες. Κατὰ συνέπεια, μετὰ ἀπὸ λίγο χρόνο οἱ ἀστέρες ποὺ ἀρχικὰ ἀνῆκαν σὲ ἓνα ἐπίμηκες μόρφωμα (Σχ. 4α) πολὺ σύντομα δημιουργοῦν μιὰ διπλὴ σπείρα μὲ τὴ διαφορική περιστροφή τους (Σχ. 4β, γ).



(α)



(β)

Σχ. 2α. Ραβδωτός γαλαξίας.

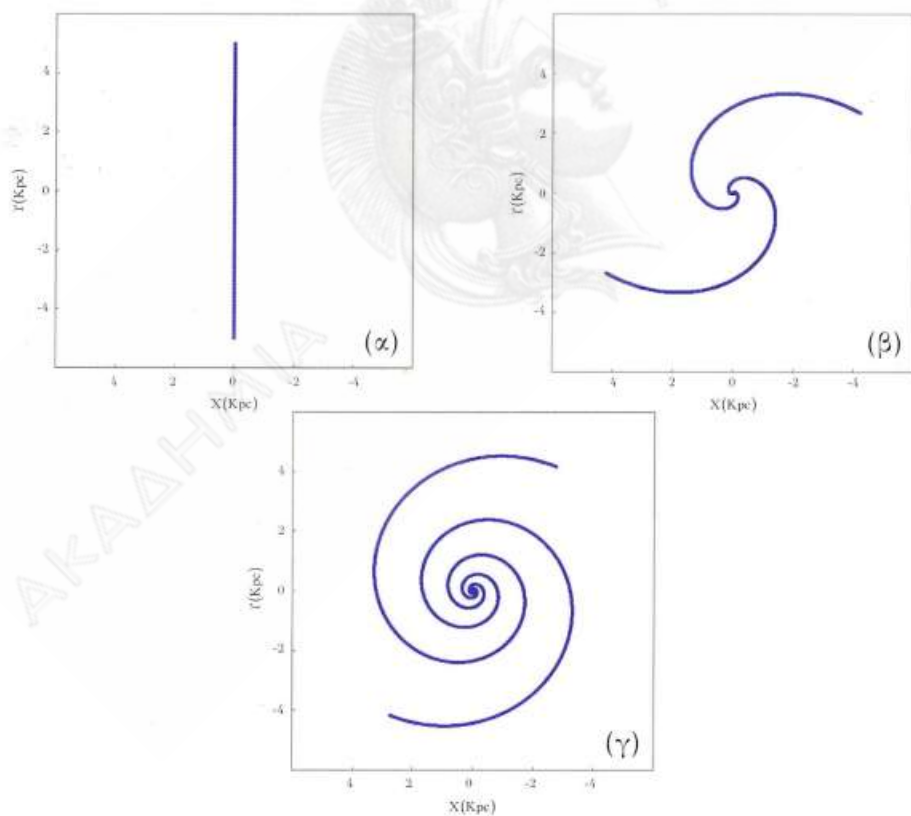
β. Προσομοίωση ραβδωτού γαλαξίου.

Οι σπειρες του τύπου αυτού ονομάζονται «ύλικές σπειρες» (material arms). Αυτές όμως οι σπειρες περιελίσσονται ταχύτατα και σύντομα καταστρέφονται, γιατί οι σπειρες γίνονται πολύστροφες και έρχονται ουσιαστικά σε έπαφή μεταξύ τους μετά από λίγες περιελίξεις, δηλαδή σε λιγότερο από ένα δισεκατομμύριο έτη. Οι γαλαξίες όμως που παρατηρούμε στον ουρανό έχουν πολύ πιο άνοιχτες σπειρες (Σχ. 3), άρα δεν είναι «ύλικές σπειρες».

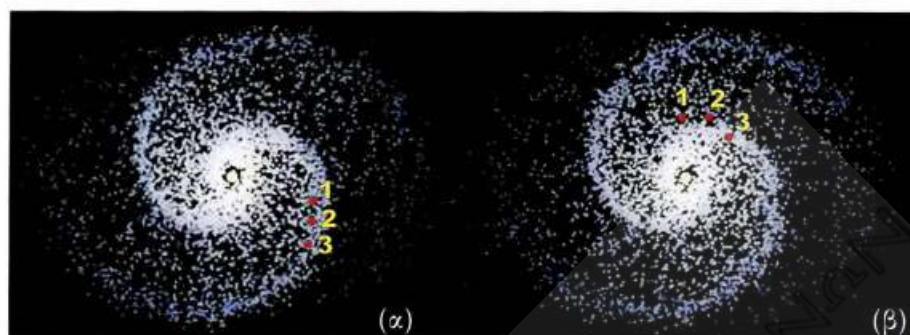
Η επικρατούσα θεωρία σήμερα είναι ότι οι σπειρες των γαλαξιών είναι κύματα πυκνότητας, δηλαδή δεν αποτελούνται πάντοτε από τους ίδιους αστέρες. Οι επιμέρους αστέρες πλησιάζουν τις σπειρες και περνούν μέσα από αυτές (Σχ. 5α, β), αλλά μένουν σχετικά μεγαλύτερο χρόνο κοντά στις σπειρες και έτσι τοπικά συμβάλλουν στην αυξημένη πυκνότητα της ύλης κοντά στις σπειρες. Μετά από ένα χρονικό διάστημα, οι αστέρες αυτοί φεύγουν μακριά από τις σπειρες αλλά νέοι αστέρες έρχονται και τους αντικαθιστούν, έτσι ώστε η πυκνότητα στις σπειρες είναι πάντοτε μεγαλύτερη από ό,τι στις γύρω περιοχές.



Σχ. 3. Συνήθης σπειροειδής γαλαξίας.

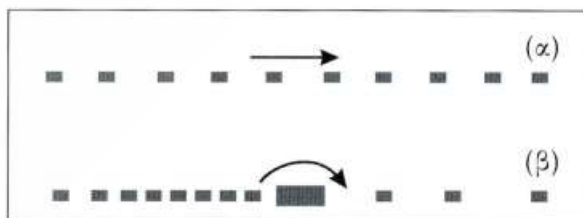


Σχ. 4α, β, γ. Οι άστέρες που βρίσκονται αρχικά επί μίας ευθείας δημιουργούν σπείρες σε σύντομο χρονικό διάστημα λόγω διαφορετικής περιστροφής.



Σχ. 5α, β. Κύματα πυκνότητας σε ένα γαλαξιακό μοντέλο. Οι αστέρες διέρχονται μέσα από τις σπειρες αλλά παραμένουν επί σχετικά μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα πλησίον των σπειρών.

Ένα παράδειγμα ενός άπλοῦ κύματος πυκνότητας είναι ἡ κυκλοφορία πολλῶν αὐτοκινήτων σε ἕνα σχετικά στενὸ αὐτοκινητόδρομο. Τὰ αὐτοκίνητα κινοῦνται μὲ περίπου σταθερὴ ταχύτητα καὶ ἡ πυκνότης τῶν αὐτοκινήτων εἶναι περίπου σταθερὴ (Σχ. 6α). Ὄταν ὅμως τὰ αὐτοκίνητα συναντήσουν μίαν νταλίκα ποὺ κινεῖται βραδέως, συνωστίζονται πίσω ἀπὸ τὴ νταλίκα, καὶ ἄρα ἡ πυκνότης τῶν αὐτοκινήτων εἶναι ἐκεῖ μεγαλύτερη, ἐνῶ ὅταν προσπεράσουν τὴ νταλίκα ἀναπτύσσουν ταχύτητα καὶ ἡ κατανομὴ τους ἀραιώνει (Σχ. 6β). Τὰ μικρὰ αὐτοκίνητα κάθε τόσο προσπεροῦν τὴ νταλίκα, ἀλλὰ νέα αὐτοκίνητα πλησιάζουν καὶ συνωστίζονται πίσω ἀπὸ αὐτήν. Ἐπομένως ἡ μεγάλῃ πυκνότης αὐτοκινήτων πίσω ἀπὸ τὴ νταλίκα διατηρεῖται, ἀλλὰ τὸ πλῆθος ἀποτελεῖται ἀπὸ διαφορετικὰ αὐτοκίνητα κάθε φορά. Ἔτσι ἡ νταλίκα δημιουργεῖ ἕνα κύμα πυκνότητας πίσω της ποὺ συνεχῶς ἀνανεώνεται ἀπὸ νέα αὐτοκίνητα ποὺ τὴν πλησιάζουν καὶ τὴν προσπεροῦν.



Σχ. 6. Κυκλοφορία αὐτοκινήτων σε αὐτοκινητόδρομο:

α. ὁμαλὴ κυκλοφορία,

β. κυκλοφορία ὅταν ὑπάρχει μίαν βραδυκίνητη νταλίκα. Ἡ πυκνότης τῶν αὐτοκινήτων πίσω ἀπὸ τὴ νταλίκα αὐξάνει (δημιουργεῖται ἕνα κύμα πυκνότητας).

## 2. Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΟΣ

Κάτι παρόμοιο γίνεται και με τις σπεῖρες τῶν γαλαξιδῶν. Ἡ θεωρία τῶν κυμάτων πυκνότητος διατυπώθηκε ἀπὸ τὸν Σουηδὸ καθηγητὴ Bertil Lindblad τὸ 1941 (Lindblad 1941), ἀλλὰ ἡ σύγχρονη μορφή τῆς θεωρίας αὐτῆς ὀφείλεται στὸν καθηγητὴ C.C. Lin τοῦ MIT (Massachusetts Institute of Technology) καὶ τὸν τότε βοηθὸ του Frank Shu (Lin and Shu 1964).

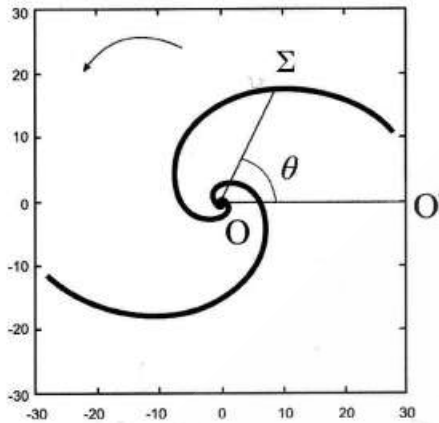
Θυμᾶμαι ὅτι βρισκόμουν στὸ MIT τὸ 1962, καὶ ὁ κ. Lin μοῦ εἶπε ὅτι σκόπευε νὰ ἐργασθεῖ πάνω στὴ θεωρία τῶν κυμάτων πυκνότητος στοὺς γαλαξίες. Τοῦ εἶπα ὅτι τὸ θέμα αὐτὸ τὸ εἶχε ἤδη ἀναπτύξει ὁ καθηγητὴς Lindblad ἀπὸ τὴ Στοκχόλμη. Κατεβήκαμε λοιπὸν μαζὶ στὴ βιβλιοθήκη τοῦ MIT καὶ ὁ κ. Lin δανείστηκε κάμποσους ὀγκώδεις τόμους τοῦ Ἄστεροσκοπίου τῆς Στοκχόλμης ποὺ περιεῖχαν τὶς ἐργασίες τοῦ Lindblad. Κουβαλήσαμε μαζὶ τοὺς τόμους αὐτοὺς στὸ γραφεῖο τοῦ κ. Lin. Λίγες ἡμέρες ὅμως μετὰ, ὁ κ. Lin μοῦ εἶπε ὅτι ἦταν πολὺ δύσκολο γιὰ αὐτὸν νὰ παρακολουθήσει τὴ θεωρία τοῦ Lindblad καὶ θὰ προτιμοῦσε νὰ ἀναπτύξει τὴ θεωρία ἀπὸ τὴν ἀρχὴ μὲ τὸ δικό του τρόπο. Καὶ πράγματι αὐτὸ ἔκανε. Ἐκτοτε ἡ θεωρία τῶν κυμάτων πυκνότητος εἶχε μεγάλη ἀνάπτυξη καὶ πολλὲς ἐπιτυχίες. Ἐγίναν πολλὲς θεωρητικὲς ἐργασίες καὶ ἀριθμητικὲς προσομοιώσεις, καθὼς καὶ ἐφαρμογὲς τῆς θεωρίας αὐτῆς σὲ πολλοὺς γνωστοὺς γαλαξίες ποὺ ἐπιβεβαίωσαν τὴ σημασία της.

Ἡ βασικὴ μορφή τῆς θεωρίας αὐτῆς εἶναι γραμμικὴ. Δηλαδή θεωροῦμε ὅτι ἡ πυκνότης  $\sigma$  στὸ ἐπίπεδο συμμετρίας τοῦ γαλαξίου ἀποτελεῖται ἀπὸ μία κατανομὴ  $\sigma_0(r)$  ποὺ ἔχει ἀξονικὴ συμμετρία ὡς πρὸς τὸ κέντρο τοῦ γαλαξίου, σὺν μία μικρὴ διαταραχὴ  $\sigma_1$  ποὺ ἔχει σπειροειδῆ μορφή, δηλαδή:

$$\sigma(r, \vartheta) = \sigma_0(r) + \sigma_1(r, \vartheta) \quad (1)$$

ὅπου  $\theta$  εἶναι ἡ γωνία τῆς εὐθείας  $OS$  μὲ ἓναν ἄξονα  $OO'$  ποὺ περιστρέφεται μὲ τὴν ἴδια γωνιακὴ ταχύτητα  $\Omega_s$  μὲ τὶς σπεῖρες (Σχ. 7). Σὲ αὐτὸ τὸ σύστημα ἀξόνων ἡ μορφή τῆς σπείρας εἶναι ἀμετάβλητη ἀλλὰ οἱ ἐπιμέρους ἀστέρες κινοῦνται μὲ διάφορες ταχύτητες γύρω ἀπὸ τὸ κέντρο  $O$ .

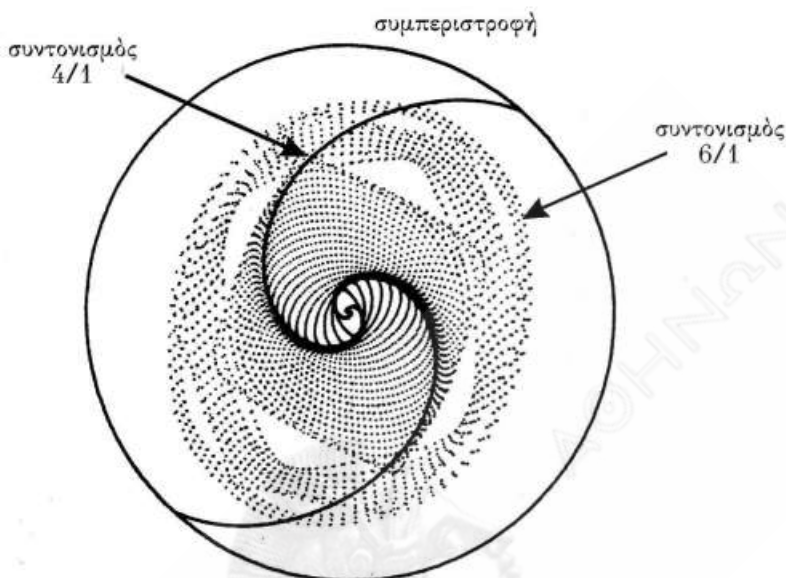




Σχ. 7. Οι σπείρες σε ένα γαλαξία είναι περίπου συμμετρικές ως προς το κέντρο και συρόμενες (trailing), δηλαδή η απόσταση  $r$  ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η γωνία  $\theta$ .

Η δική μας συμβολή στη θεωρία των κυμάτων πυκνότητας ήταν στη διατύπωση της μη γραμμικής θεωρίας (Contopoulos 1970, 1973, 1979). Διαπιστώθηκε ότι σε όρισμένες περιπτώσεις συντονισμού, η διαταραχή πυκνότητας  $\sigma_1$  δεν είναι μικρή αλλά γίνεται μεγαλύτερη από την άξισυμμετρική πυκνότητα  $\sigma_0$ . Οι συντονισμοί προκύπτουν όταν οι συχνότητες ταλαντώσεων άκτινικά (κατά την ακτίνα  $r$ ) και περιστροφικά (κατά τη γωνία  $\theta$ ) έχουν ρητό λόγο. Π.χ. όταν έχουμε δύο άκτινικές ταλαντώσεις σε μία περιστροφή έχουμε το συντονισμό  $2/1$  και οι τροχιές είναι έλλειπτικές. Στις περιπτώσεις των συντονισμών χρειάζεται μία μη γραμμική θεωρία, η οποία είναι απαραίτητο συμπλήρωμα της γραμμικής θεωρίας στις περιοχές των συντονισμών.

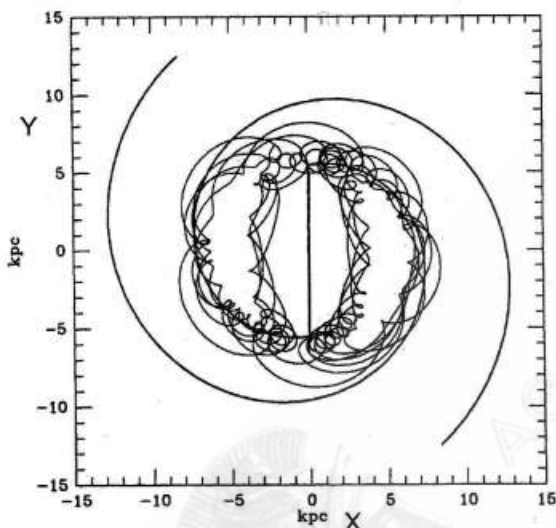
Θα δείξω μόνο μία εφαρμογή της μη γραμμικής θεωρίας. Στο Σχήμα 8 έχουμε πολλές περιοδικές τροχιές οι οποίες έχουν διάφορους προσανατολισμούς και δημιουργούν δύο σπειροειδείς συμπυκνώσεις. Οι τροχιές αυτές στην κεντρική περιοχή είναι περίπου έλλειψεις. Πιο έξω, όμως, οι τροχιές τείνουν να γίνουν τετράγωνες. Έχει βρυσκεται ο συντονισμός  $4/1$ . Μέχρι το συντονισμό  $4/1$  οι τροχιές ενισχύουν τις σπείρες. Πιο έξω, ο προσανατολισμός των τροχιών αλλάζει απότομα και οι τροχιές δεν ενισχύουν πλέον τις σπείρες. Αυτό οφείλεται στα μη γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται κοντά και έξω από το συντονισμό  $4/1$ . Έπομένως οι σπείρες τερματίζονται περίπου στο συντονισμό  $4/1$ , και αυτό φαίνεται να επαληθεύεται σε συνήθεις γαλαξίες που έχουν σημαντικές σπείρες αλλά δεν έχουν ράβδο (Contopoulos 1985, Patsis et al. 1994).



Σχ. 8. Οι περιοδικές τροχιές σε ένα γαλαξία έχουν τέτοιους προσανατολισμούς, ώστε να δημιουργούν δύο σπείρες μέχρι το συντονισμό  $4/1$ . Μετά το συντονισμό αυτό, οι περιοδικές τροχιές δεν ενισχύουν τις σπείρες.

### 3. ΧΑΟΤΙΚΟΙ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΕΙΣ ΓΑΛΑΞΙΕΣ

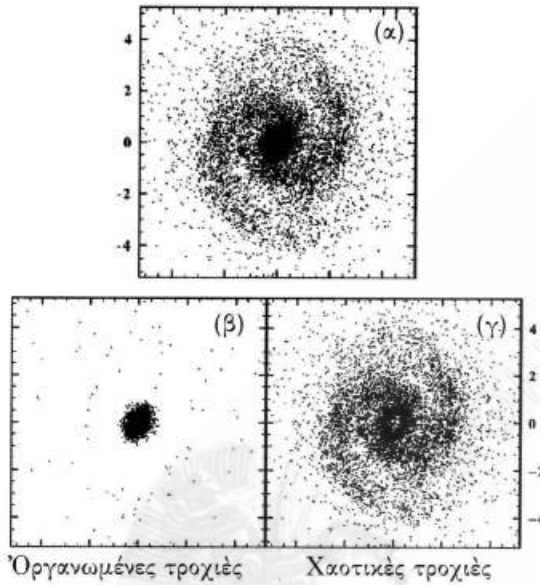
Σε όλα τα προηγούμενα παραδείγματα γαλαξιών το χάος είναι συνήθως άμελητέο. Υπάρχουν μὲν λίγες χαοτικές τροχιές στους διαφόρους συντονισμούς, αλλά αυτές δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στη δυναμική των γαλαξιών. Αυτό οφείλεται στο ότι στους συνήθεις σπειροειδείς γαλαξίες (normal spirals) οι διαταραχές είναι μικρές, της τάξεως του 2-10%. Στους ραβδωτούς όμως γαλαξίες (barred spirals), οι διαταραχές είναι της τάξεως του 50-100% και πολλές τροχιές είναι χαοτικές. Μία από τις πρώτες χαοτικές τροχιές που υπολογίστηκαν σε ένα ραβδωτό γαλαξία δίδεται στο Σχήμα 9 (Kaufmann and Contopoulos 1996). Παρατηρούμε ότι η τροχιά ενισχύει σε αρκετή έκταση τις δύο σπείρες αλλά και το περιβλημα της ράβδου.



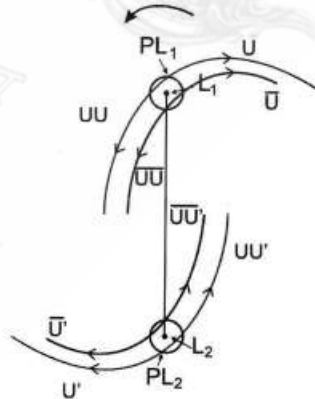
Σχ. 9. Μια χαοτική τροχιά που ένισχύει τις σπειρές και το περίβλημα της ράβδου σε ένα ραβδωτό γαλαξία.

Άργότερα όμως διαπιστώθηκε, κυρίως από τον Βόγλη (Voglis and Stavroulous 2005, Voglis et al. 2006), ότι η μεγάλη πλειοψηφία των τροχιών που αποτελούν τις σπειρές είναι χαοτικές (Σχ. 10). Οι σπειρές εξακολουθούν να είναι κύματα πυκνότητας, δηλαδή η μεγάλη πυκνότης κατά μήκος των σπειρών οφείλεται σε διαφορετικούς άστρες κατά διαφορετικά χρονικά διαστήματα.

Οι σπειρές αυτές δημιουργούνται κοντά στις άσταθεις ασυμπτωτικές καμπύλες που εκφύονται από όρισμένες άσταθεις περιοδικές τροχιές που εμφανίζονται κοντά στα άκρα της ράβδου και ονομάζονται περιοδικές τροχιές  $PL_1$ ,  $PL_2$ . Οι τροχιές αυτές περιβάλλουν τα λεγόμενα άσταθη σημεία ισορροπίας του Lagrange  $L_1$ ,  $L_2$  στα άκρα της ράβδου. Από το σημείο  $PL_1$  εκφύονται δύο άσταθεις ασυμπτωτικές καμπύλες, η  $U$  κατά μήκος της σπείρας και η  $UU$  που περιβάλλει τη ράβδο (Σχ. 11). Αντίστοιχα υπάρχουν δύο ευσταθεις ασυμπτωτικές καμπύλες  $S$  και  $SS$ . Οι τροχιές που αρχίζουν πάνω στις καμπύλες  $U$ ,  $UU$  είναι χαοτικές, αλλά επανέρχονται σε σημεία των ίδιων καμπυλών, έλο και πιο μακριά από το  $PL_1$ , όταν η άκτινική ταχύτητα  $\dot{r}=dr/dt$  μηδενίζεται, δηλαδή στα άποκεντρα και στα περίκεντρα των τροχιών. Αντιθέτως, οι τροχιές που αρχίζουν στις καμπύλες  $S$ ,  $SS$  πλησιάζουν συνεχώς το σημείο  $PL_1$ .

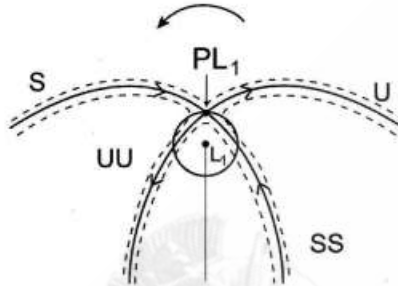


Σχ. 10α. Η κατανομή των αστέρων σέ ένα μοντέλο ραβδωτού γαλαξίου.  
 β. Οι όργανωμένες τροχιές δημιουργούν τό κύριο σώμα τής ράβδου.  
 γ. Οι χαοτικές τροχιές δημιουργούν τίς σπειρές και τό περίβλημα τής ράβδου.

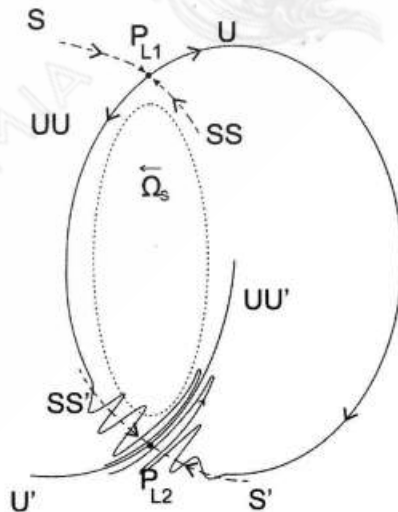


Σχ. 11. Γύρω από τά σημεία ίσορροπίας του Lagrange  $L_1, L_2$ , στα άκρα τής ράβδου, υπάρχουν οί ασταθείς περιοδικές τροχιές  $PL_1, PL_2$ . Από αυτές έκφύονται οί ασταθείς ασυμπτωτικές καμπύλες  $U, \bar{U}, U', \bar{U}'$  κατά μήκος τών σπειρών, και  $UU, \bar{U}\bar{U}, UU', \bar{U}\bar{U}'$  στην περιφέρεια τής ράβδου. Οί καμπύλες  $U, UU, U', UU'$  αντίστοιχούν στα απόκεντρα τών τροχιών, και οί  $\bar{U}, \bar{U}\bar{U}, \bar{U}', \bar{U}\bar{U}'$  στα περίκεντρα.

Ἡ γενική κυκλοφορία τῶν ἀστέρων στὴν εὐρύτερη περιοχὴ γύρω ἀπὸ τὸ  $PL_1$  εἶναι ὡς ἐξῆς: Τὰ διαδοχικὰ σημεῖα  $i = 0$  τῶν ἀστέρων τῆς περιοχῆς προσεγγίζουν τὸ σημεῖο  $PL_1$  κατὰ μῆκος καμπυλῶν παράλληλων πρὸς τὸ  $S$  ἢ τὸ  $SS$ , καὶ ὅταν φθάσουν κοντὰ στὶς καμπύλες  $U$  ἢ  $UU$  ἀπομακρύνονται ἀπὸ τὸ  $PL_1$  σχεδὸν παράλληλα πρὸς τὰ  $U$  καὶ  $UU$  (Σχ. 12).

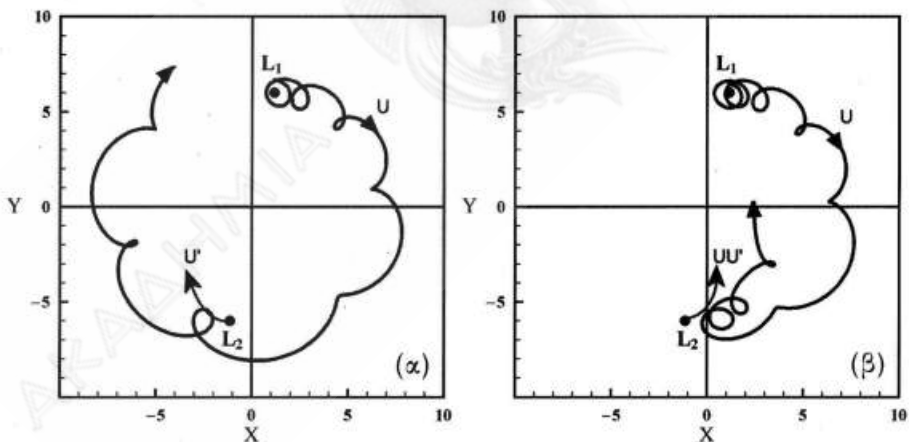


Σχ. 12. Οἱ κινήσεις τῶν ἀστέρων πλησίον τοῦ ἄνω σημείου  $PL_1$  πλησιάζουν πρὸς τὸ  $PL_1$  σχεδὸν παράλληλα πρὸς τὶς εὐσταθεῖς ἀσυμπτωτικὲς καμπύλες  $S, SS$ , καὶ κατόπιν ἐκτρέπονται σχεδὸν παράλληλα πρὸς τὶς ἀσταθεῖς ἀσυμπτωτικὲς καμπύλες  $U, UU$ .



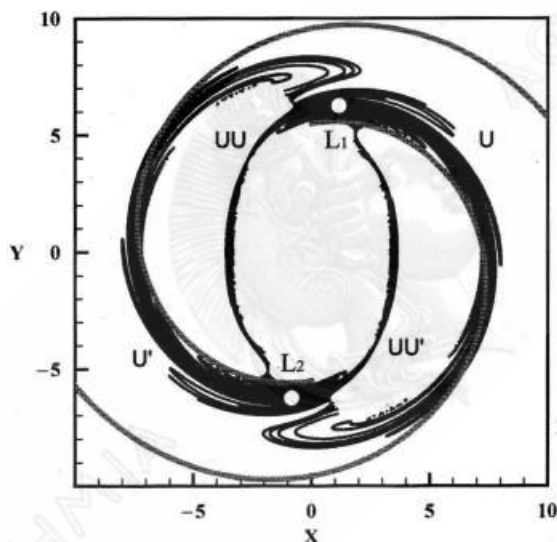
Σχ. 13. Οἱ ἀσυμπτωτικὲς καμπύλες  $U, UU$  ἀπὸ τὸ σημεῖο  $PL_1$  πλησιάζουν τὸ σημεῖο  $PL_2$  σχηματίζοντας ταλαντώσεις παράλληλες πρὸς τὶς καμπύλες  $U', UU'$  ἀπὸ τὸ  $PL_2$ .

Ἡ ἀσυμπτωτική καμπύλη  $U$  ἀπὸ τὸ σημεῖο  $PL_1$  ἔχει σπειροειδή μορφή, μέχρις ὅτου φθάσει κοντὰ στὸ ἀντιδιαμετρικὸ σημεῖο  $PL_2$  (Σχ. 13). Καθὼς πλησιάζει τὸ σημεῖο  $PL_1$ , ἡ καμπύλη  $U$  κάνει ταλαντώσεις ὄλο μεγαλύτερου πλάτους παράλληλα καὶ κοντὰ στὶς ἀσυμπτωτικὲς καμπύλες  $U'$  καὶ  $UU'$  ἀπὸ τὸ σημεῖο  $PL_2$ . Κατὰ παρόμοιο τρόπο, ἡ ἀσυμπτωτικὴ καμπύλη  $UU$  ἀπὸ τὸ  $PL_1$  φθάνει κοντὰ στὸ σημεῖο  $PL_2$  καὶ ἐπίσης κάνει ταλαντώσεις παράλληλα καὶ κοντὰ στὶς καμπύλες  $U'$  καὶ  $UU'$ . Ἐπομένως, ἀστέρες ποὺ ἀρχικὰ βρίσκονται κοντὰ στὸ ἄκρο τῆς ράβδου (κοντὰ στὸ σημεῖο  $PL_1$ ) ἀκολουθοῦν εἴτε τὴ σπειροειδῆ καμπύλη  $U$  ἔξω ἀπὸ τὴ ράβδο, εἴτε τὴν καμπύλη  $UU$  ποὺ περιβάλλει τὴ ράβδο, καὶ φθάνουν κοντὰ στὸ κάτω ἄκρο τῆς ράβδου ( $PL_2$ ). Κατόπιν ἀπομακρύνονται ἀπὸ τὸ σημεῖο  $PL_2$  κατὰ μῆκος καὶ κοντὰ στὶς ἀσυμπτωτικὲς καμπύλες  $U'$  καὶ  $UU'$  καὶ φθάνουν πάλι κοντὰ στὸ ἀρχικὸ σημεῖο  $PL_1$ . Ἔτσι διατηρεῖται ἡ σπειροειδῆς δομὴ τῶν ραβδωτῶν γαλαξιῶν γιὰ μεγάλα χρονικὰ διαστήματα, παρ' ὅλον ὅτι οἱ τροχιῆς ποὺ ἀποτελοῦν τὶς σπεῖρες εἶναι χαοτικὲς.



Σχ. 14. Τροχιῆς ποὺ ξεκινοῦν πλησίον τῆς περιοδικῆς τροχιᾶς  $PL_1$ , στὴ συνέχεια φθάνουν κοντὰ στὸ  $PL_2$  καὶ κατόπιν κινοῦνται πρὸς τὸ  $PL_1$ :  
 α. πλησίον τῆς καμπύλης  $U'$  ἢ,  
 β. πλησίον τῆς καμπύλης  $UU'$ .

Στὰ Σχήματα 14α, β δίνουμε δύο παραδείγματα χασοτικών τροχιῶν ποὺ ξεκινοῦν κοντὰ στὸ σημεῖο  $PL_1$ . Οἱ τροχιές αὐτές κάνουν ἀρχικά μερικὲς περιστροφές γύρω ἀπὸ τὴν περιοδικὴ τροχιὰ  $PL_1$  ποὺ ἀρχίζει ἀπὸ τὸ σημεῖο  $PL_1$ , καὶ κατόπιν κινοῦνται πρὸς τὰ δεξιὰ, κοντὰ στὴ σπείρα  $U$ . Ὅταν φθάσουν κοντὰ στὸ  $PL_2$  ἡ πρώτη τροχιὰ (Σχ. 14α) προχωρεῖ πρὸς τὰ ἀριστερὰ τοῦ  $PL_1$  (βλ. Σχ. 11) κοντὰ στὴ σπείρα  $U'$  καὶ φθάνει κοντὰ στὸ  $PL_1$ . Ἡ δεύτερη τροχιὰ (Σχ. 14β) προχωρεῖ λίγο δεξιὰ καὶ πρὸς τὰ πάνω ἀπὸ τὸ  $PL_2$  καὶ πάλι φθάνει κοντὰ στὸ  $PL_1$ . Ἡ γενικὴ μορφή τῶν σπειρῶν ποὺ προκύπτουν ἀπὸ τὸ σύνολο τῶν τροχιῶν δίδεται στὸ Σχῆμα 15.



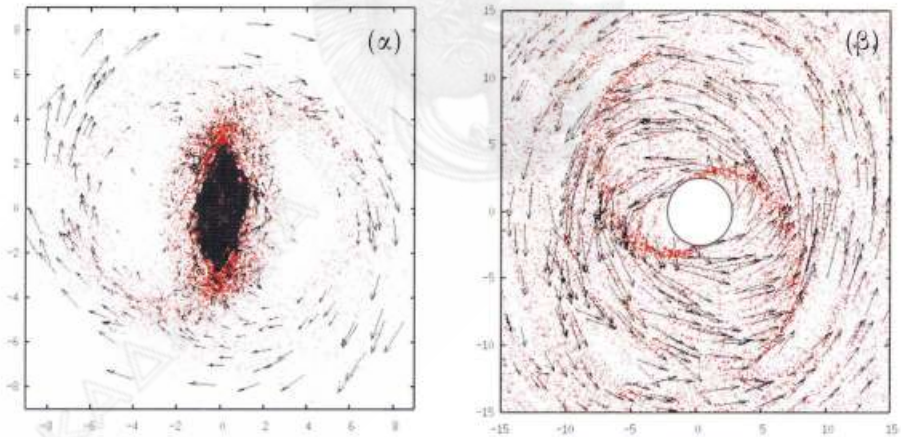
Σχ. 15. Σπείρες ποὺ δημιουργοῦνται ἀπὸ πολλὲς τροχιές ποὺ ἀρχίζουν κοντὰ στὸ  $L_1$ .

#### 4. ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ

Μιά ἄλλη παρατήρηση ποὺ χαρακτηρίζει τὶς σπείρες τῶν ραβδωτῶν γαλαξιῶν εἶναι ἡ κατανομὴ τῶν ταχυτήτων κατὰ μῆκος τῶν βραχιόνων. Στὴν περίπτωση τῶν ραβδωτῶν σπειροειδῶν γαλαξιῶν, οἱ χασοτικὲς τροχιές τῶν σωματιῶν ποὺ βρίσκονται ἐπὶ τῶν βραχιόνων διαμορφώνουν ἕνα πεδίο ταχυτήτων ποὺ εἶναι ἐν γένει κατὰ μῆκος τῶν σπειρῶν (Σχ. 16α). Αὐτὴ ἡ εἰκόνα εἶναι διαφορετικὴ ἀπὸ τὴ ροῆ ὑλικοῦ στὶς σπείρες τῶν κανονικῶν σπειροειδῶν γαλαξιῶν ποὺ προκύπτει ἀπὸ τὴ συνήθη θεωρία τῶν κυμάτων πυκνότητος (Visser 1980) (Σχ. 16β). Στὸ σχῆμα αὐτὸ βλέπου-

με ότι η ροή του ύλικου ακολουθεί περίπου ελλειπτικές τροχιές γύρω από το κέντρο του γαλαξίου. Οι σπείρες βρίσκονται στα απόκεντρα αυτής της «ελλειπτικής ροής» και οι αστέρες διέρχονται μέσα από τις σπείρες παραμένοντας όμως περισσότερο χρόνο κοντά στις σπείρες.

Αντιθέτως, στην περίπτωση των ραβδωτών σπειροειδών γαλαξιών έχουμε χαοτικές τροχιές των αστερων που κινούνται κατά μήκος των σπειρών. Τέτοια πεδία ταχυτήτων κατά μήκος των σπειρών έχουν παρατηρηθεί σε μοντέλα πραγματικών ραβδωτών σπειροειδών γαλαξιών, όπως ο NGC 4314. Στο Σχήμα 17α βλέπουμε την εικόνα του γαλαξίου αυτού στο έγχρωμο υπέρυθρο. Παρατηρήσεις σε αυτά τα μήκη κύματος μας επιτρέπουν την ακριβή εκτίμηση του πεδίου των βαρυτικών δυνάμεων και την κατασκευή αξιόπιστων μοντέλων. Στο Σχήμα 17β δίδεται ένα μοντέλο που αναπαριστά τη ράβδο και τις σπείρες του γαλαξίου αυτού (Patsis 2006). Η ροή κατά μήκος αυτών των σπειρών είναι όπως στο Σχήμα 16α.

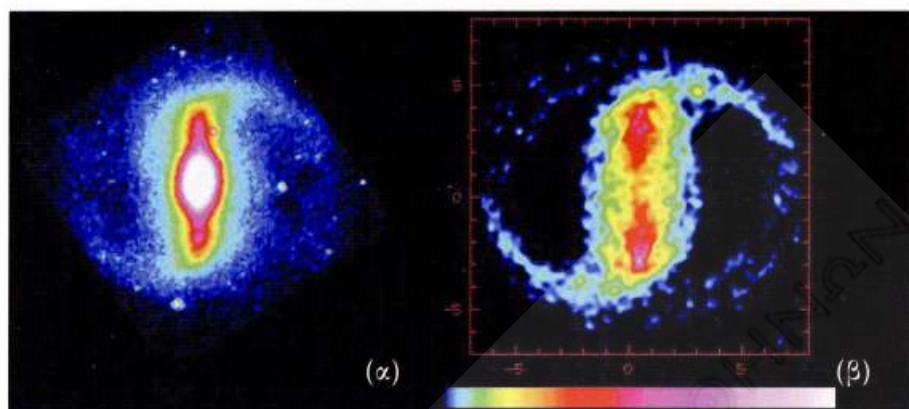


Σχ. 16. Πεδία ταχυτήτων:

α. σε ραβδωτό σπειροειδή γαλαξία, και

β. σε κανονικό σπειροειδή γαλαξία. Στην πρώτη περίπτωση η ροή του ύλικου είναι κατά μήκος των σπειρών, ενώ στη δεύτερη οι αστέρες διέρχονται δια μέσου των σπειρών.





Σχ. 17α. Η εικόνα του γαλαξίου NGC 4314 στο έγγυος υπέρυθρο, όπου βλέπουμε την κατανομή του παλαιού αστρικού πληθυσμού που αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του γαλαξίου.

β. Ένα μοντέλο του γαλαξίου αυτού, που αναπαριστά τη ράβδο και τις (χαοτικές) σπειρές.

##### 5. ΔΙΑΦΥΓΕΣ ΑΣΤΕΡΩΝ ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΟΛΛΗΤΙΚΟΤΗΤΟΣ

Η ενέργεια ενός αστέρα στο περιστρεφόμενο σύστημα (το σύστημα συντεταγμένων που περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα της ράβδου και των σπειρών) καθορίζει τα όρια της περιοχής όπου είναι επιτρεπτή η κίνηση. Όταν η ενέργεια είναι σχετικά μικρή, οι αστέρες κινούνται είτε κοντά στο κέντρο και δεν φεύγουν μακριά, είτε έξω από μια δεύτερη καμπύλη, ώστε δεν μπορούν να έλθουν κοντά στο κέντρο (Σχ. 18). Αν όμως η ενέργεια των αστέρων είναι μεγάλη, τότε αυτοί οι αστέρες μπορούν να κινηθούν από το κέντρο απεριόριστα προς τα έξω, μέχρι το άπειρο. Οι σπειρές των ραβδωτών γαλαξιών εύρισκονται στην εξωτερική περιοχή του γαλαξίου, οπότε οι αστέρες μπορούν να απομακρυνθούν στο άπειρο. Και πράγματι, ένα ποσοστό αστέρων συνεχώς διαφεύγει από το γαλαξία.

Έντούτοις, οι σπειρές ζούν έως πολλά δισεκατομμύρια έτη και οι διαφυγές είναι μικρές. Αυτό οφείλεται σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται «κολλητικότητα». Δηλαδή οι αστέρες παραμένουν κολλημένοι κατά κάποιον τρόπο στις σπειρές και διαφεύγουν μόνο μετά από πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.

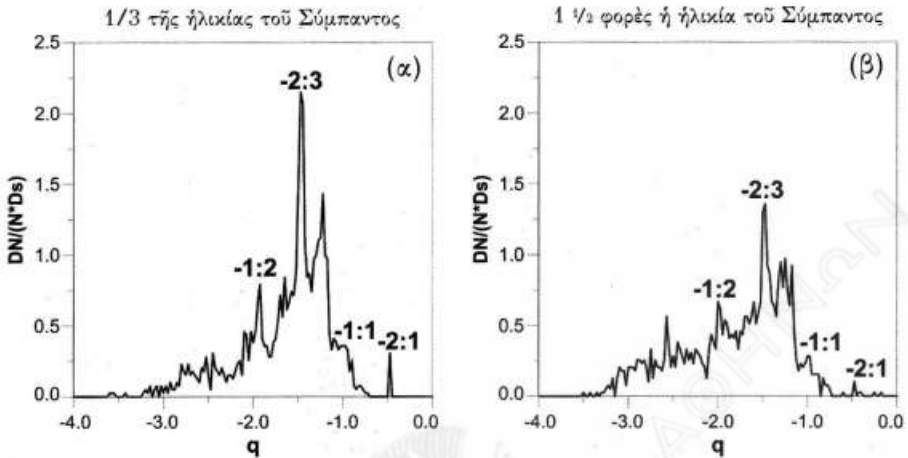
Η πρώτη γνωστή περίπτωση κολλητικότητας διαπιστώθηκε το 1971 (Contopoulos 1971). Προσπαθούσαμε τότε να βρούμε τα όρια μεταξύ όργα-



Σχ. 18. Για μικρές σχετικά ενέργειες στο περιστρεφόμενο σύστημα, οι κινήσεις γίνονται είτε εντός της εσωτερικής καμπύλης, είτε εκτός της εξωτερικής καμπύλης.

νωμένων και χαοτικών τροχιών, αλλά τα όρια αυτά ήταν άσαφη. Υπήρχαν τροχιές που φαίνονταν οργανωμένες για μεγάλα χρονικά διαστήματα, αλλά αργότερα ακολουθούσαν χαοτικές διαδρομές. Στην αρχή νομίσαμε ότι δεν ήταν καλή ή ακρίβεια των υπολογισμών μας. Αλλά όταν αύξησαμε την ακρίβεια πάρα πολύ διαπιστώσαμε ότι το φαινόμενο αυτό ήταν πραγματικό. Δηλαδή κοντά στα όρια των οργανωμένων τροχιών υπήρχαν χαοτικές τροχιές που συμπεριφέρονται ως οργανωμένες, ενώ αργότερα απομακρύνονται από τις άλλες οργανωμένες τροχιές κατά χαοτικό τρόπο. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε «κολλητικότητα». Μια έκτεταμένη μελέτη των διαφορών περιπτώσεων κολλητικότητας δημοσιεύθηκε στο περιοδικό *International Journal of Bifurcation and Chaos* (Contopoulos and Harsoula 2010).

Αργότερα διαπιστώθηκαν πολλές περιπτώσεις κολλητικότητας. Μία σημαντική περίπτωση είναι οι σπειρες των ραβδωτών γαλαξιών. Παρ' όσον ότι οι άστερες των σπειρών αυτών ακολουθούν χαοτικές τροχιές, εντούτοις παραμένουν κοντά στις σπειρες για μεγάλα χρονικά διαστήματα και δεν διαφεύγουν σε μεγάλες αποστάσεις. Οι χρόνοι κολλητικότητας υπερβαίνουν το «χρόνο Hubble», που είναι ίσος με την ηλικία του Σύμπαντος. Στο Σχήμα 19α, β παρουσιάζεται η κατανομή των αστερών σε διάφορους συντονισμούς στα εξωτερικά μέρη ενός γαλαξίου, όπως προκύπτει από μία προσομοί-



Σχ. 19. Κατανομή τών αστέρων κοντά σε διάφορους συντονισμούς στα έξωτερα μέρη ενός γαλαξίου (για  $E_j = -1.250.000 \text{ (km/sec)}^2$  και  $\Omega_s = 25 \text{ km/(sec-kpc)}$ ):  
 α. σε χρόνο 1/3 τής ηλικίας του Σύμπαντος,  
 β. σε χρόνο 1 1/2 φορές τήν ηλικία του Σύμπαντος.

ωση N-σωμάτων. Το δεξιό άκρο του σχήματος (όπου  $q=0.0$ ) αντιστοιχεί στο άριστο άκρο τής ράβδου, ή οποία είναι οριζόντια. Έπομένως, όλοι οι αστέρες του σχήματος αυτού είναι στα έξωτερα τμήματα του γαλαξίου και μπορούν να διαφύγουν από το γαλαξία στο άπειρο (ουσιαστικά σε μεγάλη απόσταση άριστερά). Για μικρούς σχετικά χρόνους, οι αστέρες είναι κατανεμημένοι σε διάφορους συντονισμούς που σημειώνονται στο Σχήμα 19α. Το σχήμα αυτό αντιστοιχεί σε χρόνο 1/3 τής ηλικίας του Σύμπαντος. Όταν ο υπολογιζόμενος χρόνος φθάσει μιάμιση φορά τήν ηλικία του Σύμπαντος (Σχ. 19β), ένα μέρος τών αστέρων έχουν διαφύγει αλλά πολλοί αστέρες παραμένουν ακόμη κοντά στους συντονισμούς και φεύγουν μόνο μετά από πολύ μεγαλύτερο χρόνο. Ο λόγος είναι ότι οι αστέρες παραμένουν κοντά στις περιοχές τών συντονισμών λόγω κολλητικότητας. Αυτή η κολλητικότητα συμβάλλει στη διατήρηση τών σπειρών τών γαλαξιών επί πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα, καιτοι οι τροχιές τών αστέρων είναι χαοτικές.

Πάντως, μετά από μερικές δεκάδες φορές τήν ηλικία του Σύμπαντος, οι αστέρες αυτοί θα διαφύγουν και οι γαλαξίες θα συρρικνωθούν δραστικά. Τέλος, μετά από μερικές χιλιάδες φορές τήν ηλικία του Σύμπαντος, όλοι οι αστέρες τών γαλαξιών θα φύγουν. Έτσι και ο δικός μας Γαλαξίας θα διαλυθεί, και το ηλικικό μας σύστημα θα παραμείνει απομονωμένο σε ένα τεράστιο

κενό [πάντως ο Ήλιος μας θα έχει σβήσει πολύ πιο γρήγορα, σε μερικά δισεκατομμύρια έτη, δηλαδή σε χρονικό διάστημα μικρότερο από μία φορά τη σημερινή ηλικία του Σύμπαντος, επεκτεινόμενο στο μέλλον].

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διαπιστώσαμε ότι στους γαλαξίες συνυπάρχει η τάξη και το χάος. Υπάρχουν, δηλαδή, οργανωμένες και χαοτικές τροχιές αστερών σε κάθε γαλαξία. Στους συνήθεις σπειροειδείς γαλαξίες το ποσοστό του χάους είναι μικρό. Όμως στους ραβδωτούς γαλαξίες, που αποτελούν περίπου το  $\frac{1}{2}$  του συνολικού αριθμού των γαλαξιών, το χάος είναι πολύ σημαντικό.

Οι χαοτικές τροχιές περιβάλλουν τη ράβδο του γαλαξίου και δημιουργούν τις εξωτερικές σπειρές. Οι υπολογισμοί μας δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος των τροχιών στις σπειρές των ραβδωτών γαλαξιών είναι χαοτικές.

Αυτές οι χαοτικές τροχιές συγκεντρώνονται κυρίως σε όρισμένες καμπύλες σπειροειδούς μορφής που ονομάζονται άσταθεές ασυμπτωτικές καμπύλες. Οι τροχιές είναι κατά κάποιον τρόπο κολλημένες στις καμπύλες αυτές. Το φαινόμενο της κολλητικότητας εξηγεί τη μακροβιότητα των σπειρών. Παρ' όλον ότι οι αστερές διαφεύγουν συνεχώς από τον κάθε γαλαξία προς το άπειρο, εντούτοις, λόγω της κολλητικότητας, οι σπειροειδείς γαλαξίες θα εξακολουθούν να υπάρχουν επί χρονικά διαστήματα πολύ μεγαλύτερα από την ηλικία του Σύμπαντος.

## SUMMARY

### Chaotic Galaxies

The spiral arms of galaxies are density waves, i.e. the stars pass through the spirals, but they stay for longer times close to them, so that the spirals are always the maxima of density. The orbits of stars are in general organized in the normal spiral galaxies, but they are mostly chaotic in the barred spiral galaxies. The spirals of the barred galaxies follow the unstable asymptotic curves of the unstable periodic orbits. They are density waves composed of chaotic orbits. Their stars remain stuck on the spirals (stickiness phenomenon) for time intervals larger than the age of the Universe, but finally most stars will escape from the galaxies.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Contopoulos, G.: 1970, *Astrophys. J.* 160, 113.
- Contopoulos, G.: 1971, *Astron. J.* 76, 147.
- Contopoulos, G.: 1973, *Astrophys. J.* 181, 657.
- Contopoulos, G.: 1979, *Astrophys. J.* 201, 566.
- Contopoulos, G.: 1985, *Comments Astrophys.* 11, 1.
- Contopoulos, G. and Harsoula, M.: 2010, *Int. J. Bif. Chaos* 20, 2005.
- Contopoulos, G. and Patsis, P. A. (eds): 2009, *Chaos in Astronomy*, Springer Verlag.
- Contopoulos, G. and Voglis, N. (eds): 2003, *Galaxies and Chaos*, Springer Verlag.
- Kaufmann, D. E. and Contopoulos, G.: 1996, *Astron. Astrophys.* 309, 381.
- Lin, C. C. and Shu, F. H.: 1964, *Astrophys. J.* 140, 646.
- Lindblad, B.: 1941, *Stockholm Obs. Ann.* 13, no 10; 14, no 1, 1942; 15, no 4, 1948; 16, no 1, 1950.
- Lindblad, B. and Langebartel, R.: 1953, *Stockholm Obs. Ann.* 17, no 6.
- Patsis, P. A.: 2006, *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 369L, 56.
- Patsis, P. A., Hiotelis, N., Contopoulos, G. and Grosbol, P.: 1994, *Astron. Astrophys.* 286, 46.
- Visser, H. C. D.: 1980, *Astron. Astrophys.* 88, 149.
- Voglis, N. and Stavropoulos, I.: 2005, in Solomos, N. (ed.) *Recent Advances in Astronomy and Astrophysics*, *AIP Conf. Proceedings* 848, 647.
- Voglis, N., Stavropoulos, I. and Kalapotharakos, C.: 2006, *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 372, 901.
-



ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 8ΗΣ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ 2011

ΦΩΣ: ΕΝΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΣΟ  
ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΟΜΙΛΙΑ ΤΟΥ ΑΝΤΕΠΙΣΤΕΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕΛΟΥΣ  
κ. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ε. ΓΔΟΥΤΟΥ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο τής παρούσας εργασίας αποτελεί ή χρησιμοποίηση τοῦ φωτός για τήν επίλυση προβλημάτων Μηχανικής. Μετά από μία σύντομη αναφορά στο πνευματικό φῶς, τὸ φῶς τής πίστεως, παρουσιάζονται περιληπτικά οἱ βασικές θεωρίες για τὸ ὕλικό φῶς, με ἔμφαση στην Ἡλεκτρομαγνητική Θεωρία. Περιγράφεται τὸ πολωμένο φῶς, τίθεται τὸ βασικό πρόβλημα τής Μηχανικής τοῦ Παραμορφωσίμου Σώματος ποὺ ἐγχείται στὸν ὑπολογισμό τῶν ἐσωτερικῶν δυνάμεων (τάσεων) τῶν σωμάτων, ὅταν αὐτὰ ὑποβάλλονται σὲ ἐξωτερικά φορτία, καὶ ἀναπτύσσονται οἱ λογισμοὶ Stokes καὶ Jones για τήν περιγραφή τοῦ φωτός. Ἀναφέρεται ὁ Φωτοτασεοπτικός Νόμος, ὁ ὁποῖος συνδέει τὴ μεταβολή τῶν δεικτῶν διαθλάσεως στις διευθύνσεις τῶν κυρίων τάσεων σώματος ποὺ ὑποβάλλεται σὲ ἐντατική κατάσταση, καὶ χρησιμοποιοῦνται οἱ λογισμοὶ Jones καὶ Mueller για τήν ἀνάλυση τοῦ ὀπτικοῦ ἀποτελέσματος σώματος εὐρισκομένου ἐντὸς ἐπιπέδου καὶ κυκλικῶ πολωσισκοπίου. Τὸ ὀπτικό αὐτὸ ἀποτελεσμα, τὸ ὁποῖο συνίσταται σὲ κροσσοὺς συμβολῆς, χρησιμοποιεῖται για τὸν προσδιορισμὸ τοῦ πεδίου τῶν τάσεων τοῦ σώματος. Τέλος, ἀναφέρονται ἐφαρμογές τής φωτοελαστικότητας για τήν ἀνάλυση τής ἐντατικῆς καταστάσεως τῶν σωμάτων καὶ διατυπώνονται συμπεράσματα.

## 1. ΤΟ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟ ΦΩΣ

Τὸ φῶς ἀποτελεῖ ἀπαραίτητο στοιχεῖο τῆς ζωῆς στὸν πλανήτη μας. Τὸ φῶς τοῦ Ἥλιου παρέχει τὴ θερμότητα ποὺ ἀπαιτεῖται γιὰ νὰ ζήσουμε ἑμεῖς καὶ τὰ ζῶα, νὰ ἀναπτυχθοῦν τὰ φυτά. Ἀποτελεῖ τὴ βάση πολλῶν τεχνολογικῶν ἐφαρμογῶν, ὅπως π.χ. οἱ τηλεπικοινωνίες, ἡ ραδιοφωνία, ἡ τηλεόραση, ἡ φωτογραφία, ἡ ἀκτινογραφία, τὸ παγκόσμιο σύστημα ἐντόπισης (GPS), τὸ διαδίκτυο, οἱ ἀκτίνες λέιζερ, ἡ μετάδοση δεδομένων. Τὸ φῶς εἶναι ὠραῖο καὶ θαυμαστό. Πέρα ὅμως ἀπὸ τὸ ὕλικό φῶς, τὸ ὁποῖο ἀντιλαμβανόμαστε μὲ τὰ μάτια μας, τὸ «κτιστὸ φῶς», ὅπως χαρακτηρίζεται ἀπὸ πατέρες τῆς ὀρθοδόξου ἀνατολικῆς ἐκκλησίας, ὑπάρχει τὸ «ἄκτιστο φῶς», τὸ πνευματικὸ φῶς, τὸ φῶς τῆς πίστεως, τὸ ὁποῖο ἀντιλαμβανόμαστε μὲ τὰ μάτια τῆς καρδιάς. Ὅπως ἀναφέρει ὁ Ἀκαδημαϊκὸς Λ. Γ. Χριστοφόρου «Μὲ τὸ φῶς τῆς φύσης ἀπεικονίζεται ἄμεσα ἢ ἔμμεσα ὁ φυσικὸς κόσμος στὰ μάτια καὶ στὴ διανόησή μας. Μὲ τὸ φῶς τῆς πίστεως ἐπιτυγχάνεται ἡ ἐπικοινωνία μας μὲ τὸν Θεό» [1]. Τὸ φῶς πρῶτα ἀγάπησε ὁ Θεός, ὅταν δημιούργησε τὸν κόσμο. Ἀναφέρουμε ἀπὸ τὸ βιβλίο τῆς Γενέσεως:

«[...] καὶ εἶπεν ὁ Θεός. γενηθήτω φῶς. καὶ ἐγένετο φῶς. καὶ εἶδεν ὁ Θεός τὸ φῶς, ὅτι καλόν. καὶ διεχώρισεν ὁ Θεός ἀνὰ μέσον τοῦ φωτός, καὶ ἀνὰ μέσον τοῦ σκότους. καὶ ἐκάλεσεν ὁ Θεός τὸ φῶς ἡμέραν, καὶ τὸ σκότος ἐκάλεσε νύκτα. καὶ ἐγένετο ἑσπέρα, καὶ ἐγένετο πρωΐ, ἡμέρα μία».

Ἰδιαίτερη σημασία ἔδωσε στὸ φῶς ὁ χριστιανισμός. Μὲ τὸ φῶς χαρακτηρίζεται ὁ Θεός, ὁ Χριστός, οἱ χριστιανοί. Ἀναφέρουμε ἐνδεικτικὰ μερικές περικοπές ἀπὸ τὴ χριστιανικὴ λατρεία:

«Δόξα Σοι τῷ δεῖξαντι τὸ φῶς [...] Ἐν τῷ φωτί Σου ὀφόμεθα φῶς» (Δοξολογία).

«Φῶς ἐκ φωτός» (Σύμβολο τῆς Πίστεως).

«Εἶδομεν τὸ φῶς τὸ ἀληθινόν» (Θεία Λειτουργία).

«Ἐκ Σοῦ τοῦ Πατρὸς τῶν φώτων» (Εὐχὴ Θείας Λειτουργίας).

«[...] Τὴν Θεοτόκον καὶ Μητέρα τοῦ Φωτός ἐν ὕμνοις τιμῶντες μεγαλύνομεν» (Ἀκολουθία τοῦ Ὁρθρου).

«Φῶς ἰλαρόν» (Ἐπιλύχνιος Εὐχαριστία).

Ἡ λέξη φῶς ἐμφανίζεται ἔξι φορές στὸ Εὐαγγέλιο τοῦ Εὐαγγελιστῆ Ματθαίου, ἐνῶ ἀνάλογες ἀναφορὲς γίνονται καὶ στοὺς δύο ἄλλους συνοπτικούς Εὐαγγελιστές. Ἀναφέρουμε τίς ἀναφορὲς αὐτές, χωρὶς περαιτέρω σχολιασμούς, δεδομένου ὅτι ἡ σημασία τῆς λέξεως τοῦ φωτός εἶναι προφανής:



«Ὁ λαός, ὁ καθήμενος ἐν σκότει, εἶδε φῶς μέγα· καὶ τοῖς καθημένοις ἐν χώρᾳ καὶ σκιᾷ θανάτου, φῶς ἀνέτειλεν αὐτοῖς» (Ματθ. 4:16).

«Ὑμεῖς ἐστε τὸ φῶς τοῦ κόσμου» (Ματθ. 5:14).

«[...] οὕτω λαμψάτω τὸ φῶς ὑμῶν ἔμπροσθεν τῶν ἀνθρώπων» (Ματθ. 5:16).

«[...] εἰ οὖν τὸ φῶς τὸ ἐν σοί, σκότος ἐστί, τὸ σκότος πόσον;» (Ματθ. 6:23).

«Καὶ μετεμορφώθη ἔμπροσθεν αὐτῶν, καὶ ἔλαμψε τὸ πρόσωπον αὐτοῦ ὡς ὁ ἥλιος· τὰ δὲ ἰμάτια αὐτοῦ ἐγένετο λευκὰ ὡς τὸ φῶς» (Ματθ. 17:2).

Στὸ Εὐαγγέλιο τοῦ Εὐαγγελιστῆ Ἰωάννη ἡ λέξις φῶς ἀναφέρεται δεκαεπτὰ φορές, ὡς ἐξῆς:

«[...] καὶ ἡ ζωὴ ἦν τὸ φῶς τῶν ἀνθρώπων» (Ιω. 1:4).

«[...] καὶ τὸ φῶς ἐν τῇ σκοτίᾳ φαίνει, καὶ ἡ σκοτία αὐτὸ οὐ κατέλαβεν» (Ιω. 1:5).

«Ἐγένετο ἄνθρωπος ἀπεσταλμένος παρὰ Θεοῦ, ὄνομα αὐτῷ Ἰωάννης. Οὗτος ἦλθεν εἰς μαρτυρίαν, ἵνα μαρτυρήσῃ περὶ τοῦ φωτός, ἵνα πάντες πιστεύσωσι δι' αὐτοῦ» (Ιω. 1:6-7).

«Οὐκ ἦν ἐκεῖνος τὸ φῶς, ἀλλ' ἵνα μαρτυρήσῃ περὶ τοῦ φωτός» (Ιω. 1:8).

«Ἦν τὸ φῶς τὸ ἀληθινόν, ὃ φωτίζει πάντα ἄνθρωπον ἐρχόμενον εἰς τὸν κόσμον» (Ιω. 1:9).

«Αὕτη δὲ ἐστὶν ἡ κρίσις· ὅτι τὸ φῶς ἐλήλυθεν εἰς τὸν κόσμον, καὶ ἡγάπησαν οἱ ἄνθρωποι μᾶλλον τὸ σκότος, ἢ τὸ φῶς· ἦν γὰρ πονηρὰ αὐτῶν τὰ ἔργα» (Ιω. 3:19).

«Πᾶς γὰρ ὁ φαῦλα πράσων, μισεῖ τὸ φῶς· καὶ οὐκ ἔρχεται πρὸς τὸ φῶς, ἵνα μὴ ἐλεγχθῇ τὰ ἔργα αὐτοῦ» (Ιω. 3:20).

«Ὁ δὲ ποιῶν τὴν ἀλήθειαν, ἔρχεται πρὸς τὸ φῶς» (Ιω. 3:21).

«Ἐγὼ εἰμι τὸ φῶς τοῦ κόσμου· ὁ ἀκολουθῶν ἐμοί, οὐ μὴ περιπατήσει ἐν τῇ σκοτίᾳ, ἀλλ' ἔξει τὸ φῶς τῆς ζωῆς» (Ιω. 8:12).

«Ὅταν ἐν τῷ κόσμῳ ᾶ, φῶς εἰμι τοῦ κόσμου» (Ιω. 9:5).

«Οὐχὶ δώδεκά εἰσιν ὥραι τῆς ἡμέρας; ἐάν τις περιπατῇ ἐν τῇ ἡμέρᾳ, οὐ προσκόπτει· ὅτι τὸ φῶς τοῦ κόσμου τούτου βλέπει» (Ιω. 11:9).

«Ἐὰν δὲ τις περιπατῇ ἐν τῇ νυκτί, προσκόπτει· ὅτι τὸ φῶς οὐκ ἔστιν ἐν αὐτῷ» (Ιω. 11:10).

«[...] Ἔτι μικρὸν χρόνον τὸ φῶς μεθ' ὑμῶν ἐστί· περιπατεῖτε ἕως τὸ φῶς ἔχετε, ἵνα μὴ σκοτία ὑμᾶς καταλάβῃ· καὶ ὁ περιπατῶν ἐν τῇ σκοτίᾳ, οὐκ οἶδε ποῦ ὑπάγει» (Ιω. 12:35).

«Ἔως τὸ φῶς ἔχετε, πιστεύετε εἰς τὸ φῶς, ἵνα υἱοὶ φωτός γένησθε» (Ιω. 12:36).

«Εγὼ φῶς εἰς τὸν κόσμον ἐλήλυθα, ἵνα πᾶς ὁ πιστεύων εἰς ἐμὲ ἐν τῇ σκοτίᾳ μὴ μείνη» (Ιω. 12:46).

Κλείνοντας τὴ σύντομη ἀναφορά μας στὸ πνευματικό, τὸ ἄκτιστο, στὸ φῶς τῆς πίστεως, μποροῦμε νὰ ποῦμε ὅτι τὸ φῶς εἶναι ἡ ζωὴ, ἡ δύναμη, ἡ ὁδός, ἡ ἀλήθεια, ἡ χαρά, ἡ ἄρμονία. Αὐτὸ τὸ φῶς ὁδηγεῖ τὸν ἄνθρωπο στὴν τελειότητα, στὴν ἀγνότητα, στὴν ἀγάπη, στὸ ἀγαθό, στὴν ἐπιστημονικὴ ἀναζήτηση.

## 2. ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΦΩΣ

Ἡ φύση τοῦ φωτός, τοῦ ὑλικοῦ ἢ κτιστοῦ φωτός, ἀποτελέσει ἀντικείμενο διατυπώσεως διαφόρων θεωριῶν ἀπὸ ἀρχαιοτάτων χρόνων. Τὸ φῶς ἀποτελεῖ χαρακτηριστικὸ παράδειγμα τῆς Φυσικῆς, ὅπου οἱ διάφορες θεωρίες ποὺ διατυπώθηκαν κατὰ καιροὺς ἀνασκευάστηκαν διαδοχικὰ μὲ τὸ χρόνο καὶ τὴν ἀνακάλυψη νέων φαινομένων, τὰ ὁποῖα δὲν ἦταν δυνατὸν νὰ ἐρμηνευθοῦν μὲ τὶς προηγούμενες θεωρίες. Σήμερα ἡ κυριαρχοῦσα ἄποψη εἶναι ὅτι τὸ φῶς ἔχει δυαδικὸ χαρακτήρα, ἀποτελεῖ δηλαδὴ ἠλεκτρομαγνητικὸ κύμα καὶ σωματίδιο. Καὶ ὁ μὲν ἠλεκτρομαγνητικὸς χαρακτήρας τοῦ φωτός ἐξηγεῖ τὰ φυσικὰ φαινόμενα ποὺ συναντῶνται κατὰ τὴ διάδοση τοῦ φωτός, ὁ δὲ σωματιδιακὸς χαρακτήρας ἐξηγεῖ τὰ φαινόμενα ποὺ συναντῶνται κατὰ τὴν ἀλληλεπίδραση τοῦ φωτός καὶ τῆς ὕλης. Θὰ ἀναφέρουμε στὴ συνέχεια τὶς κυριότερες θεωρίες ποὺ ἔχουν διατυπωθεῖ γιὰ τὴ φύση τοῦ φωτός [2].

Πρῶτοι οἱ ἀρχαῖοι Ἕλληνες φιλόσοφοι, στὴν προσπάθειά τους νὰ ἐρμηνεύσουν τὰ ὀπτικά φαινόμενα, διατύπωσαν διάφορες ὑποθέσεις γιὰ τὴ φύση τοῦ φωτός. Ὁ Εὐκλείδης, τὸ 300 π.Χ., στὸ βιβλίον του Ὀπτική, ὑπέθεσε ὅτι τὸ φῶς διαδίδεται σὲ εὐθεῖες γραμμὲς καὶ περιέγραψε τοὺς νόμους τῆς ἀνακλάσεως μὲ μαθηματικὸ τρόπο. Ὁ Ἀριστοτέλης προσπάθησε νὰ ἐξηγήσει τὸ μηχανισμό τῆς αἰσθήσεως τῆς ὁράσεως, καὶ πῶς τὸ φῶς ἔρχεται στὴ Γῆ ἀπὸ τοὺς ἀστέρες καὶ τὸν Ἥλιο. Οἱ ὑποθέσεις τῶν ἀρχαίων Ἑλλήνων φιλοσόφων περὶ τῆς φύσεως τοῦ φωτός, λόγῳ ἐλλείψεως πειραμάτων, ἦταν φιλοσοφικοῦ περιεχομένου, καὶ δὲν κατόρθωσαν νὰ δημιουργήσουν μία συστηματικὴ θεωρία ποὺ νὰ μπορεῖ νὰ ἐξηγήσει τοὺς νόμους διαδόσεως τοῦ φωτός καὶ τῆς ἀλληλεπιδράσεώς του μὲ τὴν ὕλη.

Ἡ πρώτη συστηματικὴ θεωρία περὶ τοῦ φωτός ὀφείλεται στὸν Νεύτωνα, ὁ ὁποῖος ὑποστήριξε ὅτι τὰ φωτεινὰ σώματα ἐκπέμπουν σωματίδια τὰ ὁποῖα κινοῦνται εὐθύγραμμα καὶ μὲ τὴν ταχύτητα τοῦ φωτός. Ἔτσι ὁ Νεύτων διατύπωσε τὴ λεγόμενη Σωματιδιακὴ Θεωρία τοῦ Φωτός. Μὲ τὴ θεωρία αὕτη

κατόρθωσε να έρμηνεύσει το φαινόμενο της ανακλάσεως του φωτός, άπέτυχε όμως στην έρμηνεία του φαινομένου της διαθλάσεως (: εξηγεί το φαινόμενο ότι η φωτεινή ακτίνα πλησιάζει προς την κάθετη σε διεπιφάνεια, όταν το φως διαδίδεται από σῶμα με μικρό δείκτη διαθλάσεως σε σῶμα με μεγαλύτερο δείκτη διαθλάσεως, καταλήγει όμως στο συμπέρασμα ότι η ταχύτητα του φωτός στο δεύτερο σῶμα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο πρώτο σῶμα, πράγμα που αντιβαίνει στο πείραμα).

Το 1678 ο Huygens διατύπωσε την Κυματική Θεωρία, σύμφωνα με την οποία το φως διαδίδεται μέσα σε ένα μέσο με τη μορφή έγκαρσιων κυμάτων, προκειμένου να έρμηνεύσει το φαινόμενο της πολώσεως του φωτός. Ο Huygens υπέθεσε ότι ο χῶρος διά του οποίου το φως διαδίδεται πληροῦται με ένα ιδιαίζον μέσο το οποίο ονόμασε αἰθέρα. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας διάδοσης του φωτός, ο αἰθέρας θα έπρεπε να έχει μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και πολύ μικρή πυκνότητα. Τέτοιο μέσο, όμως, δεν υπάρχει. Η Κυματική Θεωρία του Huygens πέτυχε να έρμηνεύσει τὰ φαινόμενα της ανακλάσεως, διαθλάσεως, πολώσεως, συμβολῆς και περιθλάσεως του φωτός, προσκρούει όμως στην παραδοχή ενός άνυπαρκτου υποθετικού μέσου, του αἰθέρα. Επίσης, δεν εξηγεί τὴ διάδοση του φωτός στο κενό, αφού δεν υπάρχει αἰθέρας.

Μετά την Κυματική Θεωρία, διατυπώθηκε από τον Maxwell το 1864 ἡ Ἡλεκτρομαγνητική Θεωρία, σύμφωνα με την οποία ἡ φωτεινή ενέργεια διαδίδεται με τη μορφή ἡλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων. Θεωρώντας ένα κινούμενο ἡλεκτρικό και ένα κινούμενο μαγνητικό πεδίο, τὰ διανύσματα τῶν οποίων είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα προς τὴ διεύθυνση διάδοσεως του κύματος, τότε ἡ συνθήκη ὥστε το μαγνητικό πεδίο να γεννᾶται από τὴ μεταβολή του ἡλεκτρικού πεδίου και αντίστροφα ὡδηγεῖ στο συμπέρασμα ότι ἡ ταχύτητα διάδοσης του κύματος είναι ἴση με τὴν ταχύτητα διάδοσης του φωτός. Το συμπέρασμα αὐτό συνηγορεῖ ὑπὲρ τῆς απόψεως τῆς ἡλεκτρομαγνητικῆς φύσης τῶν φωτεινῶν κυμάτων.

Νεότερα πειραματικά δεδομένα που ἀφοροῦν στην ἀλληλεπίδραση του φωτός με τὴν ὕλη, ὅπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (: όταν το φως προσπίπτει σε μεταλλική ἐπιφάνεια ἀποσπῶνται ἡλεκτρόνια, ἡ ἐνέργεια τῶν οποίων δεν ἐξαρτᾶται από τὴν ἔνταση του φωτός ἀλλὰ από τὴ συχνότητα του κύματος), δεν ἦταν δυνατὸν να ἐξηγηθοῦν με τὴν Ἡλεκτρομαγνητική Θεωρία. Για τὴν ἐξήγηση του φωτοηλεκτρικοῦ φαινομένου, ὁ Einstein (Nobel 1921) υπέθεσε ότι ἡ φωτεινή ἐνέργεια είναι κβαντισμένη σε πακέτα ἐνέργειας και ἴση με  $E = hf$ , ὅπου  $h$  είναι ἡ σταθερά του Planck ἴση με  $6.63 \times 10^{-34}$  Js, και  $f$  είναι

ή συχνότητα του φωτεινού κύματος. Τα «πακέτα» ή «δέματα» αυτά ενέργειας ονομάζονται κβάντα ή φωτόνια. Η Θεωρία των Φωτονίων συμπληρώθηκε από την Κυματομηχανική Θεωρία, σύμφωνα με την οποία σε κάθε κινούμενο υλικό σωματίο είναι δυνατόν να προσδώσουμε χαρακτήρα κύματος, το μήκος  $\lambda$  του οποίου παρέχεται από την άπλη σχέση του De Broglie (Nobel 1929)  $\lambda = h/p = h/\sqrt{2ME} = (h/mv) \sqrt{1-v^2/c^2}$ , όπου  $p$  είναι η όρμη,  $E$  ή κινητική ενέργεια,  $m$  ή μάζα σε άκίνησια και  $M$  ή μάζα σε κίνηση. Κλασική εφαρμογή της Κυματομηχανικής Θεωρίας του Φωτός είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρόνια αντί φωτός για την παρατήρηση μικρών αντικειμένων. Τα ηλεκτρόνια έχουν μεγαλύτερη όρμη από τα φωτόνια, το μήκος κύματός τους είναι μικρότερο (100.000 φορές μικρότερο από το φως), με συνέπεια να έχουμε μεγαλύτερη μεγέθυνση και ανάλυση στο ηλεκτρονικό από το κοινό μικροσκόπιο (μεγέθυνση 2.000.000/ανάλυση 0.2 nm για το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, και μεγέθυνση 2.000/ανάλυση 200 nm για το κοινό μικροσκόπιο).

Το φως, επομένως, έχει δυαδικό χαρακτήρα, κύματος και σωματιδίου, και είναι δυνατόν να περιγραφεί από την Ήλεκτρομαγνητική Θεωρία και τη Σωματιδιακή Θεωρία. Στη μελέτη της χρησιμοποιήσεως του φωτός για την ανάλυση προβλημάτων Μηχανικής ύπαισέρχονται μόνο φαινόμενα που συνδέονται με την ανάκλαση, διάθλαση, πόλωση, περίθλαση και συμβολή του φωτός. Τα φαινόμενα αυτά είναι δυνατόν να ερμηνευθούν από την Κυματική ή την Ήλεκτρομαγνητική Θεωρία του Φωτός. Και οι δύο αυτές θεωρίες βασίζονται στην αρχή του διανύσματος του φωτός, το οποίο παριστά το μέγιστο εύρος της δονήσεως του υλικού σωματιδίου κατά τη διεύθυνση και φορά της δονήσεως στην Κυματική Θεωρία, ή το διάνυσμα του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου στην Ήλεκτρομαγνητική Θεωρία. Το διάνυσμα του φωτός παρέχει μία άπλη και έποπτική ερμηνεία των φαινομένων που συναντώνται κατά τη διάδοση του φωτός και θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα έργασία.

### 3. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ

Βασικό πρόβλημα της Μηχανικής του Παραμορφωσίμου Σώματος αποτελεί ο ύπολογισμός των έσωτερικών δυνάμεων (τάσεων) που αναπτύσσονται στα σώματα, όταν σε αυτά εφαρμοστεί ένα σύστημα έξωτερικών φορτίων. Για τον ασφαλή σχεδιασμό των κατασκευών, οι τάσεις δέν πρέπει να υπερβαίνουν κάποια κρίσιμη τιμή που ύπαγορεύεται από το υλικό της κατασκευής.

Γιὰ τὸν ὑπολογισμὸ τῶν τάσεων στὶς κατασκευές χρησιμοποιοῦνται θεωρητικές, ἀναλυτικές (ὅπως οἱ μέθοδοι τῶν πεπερασμένων καὶ τῶν συνοριακῶν στοιχείων), καὶ πειραματικές μέθοδοι (ὅπως μετρητὲς παραμορφώσεως, ἠλεκτρομηκυσιόμετρα, μὴ καταστροφικὲς μέθοδοι). Μεταξὺ τῶν πειραματικῶν μεθόδων, ιδιαίτερη σημασία ἔχουν οἱ ὀπτικές μέθοδοι ποὺ βασίζονται στὸ φῶς. Οἱ βασικότερες ὀπτικές μέθοδοι εἶναι ἡ φωτοελαστικότητα, οἱ φωτο-ελαστικὲς ἐπικαλύψεις, ἡ ὀπτικὴ συμβολή, ἡ ὀλογραφία, ἡ μέθοδος τῶν καυστικῶν, ἡ μηχανικὴ συμβολή (μοιγέ), ἡ ψηφιακὴ ἀνάλυση εἰκόνας, οἱ ὀπτικὲς ἴνες. Στὴν παρούσα ἐργασία θὰ ἀναπτύξουμε συνοπτικὰ τὴ μέθοδο τῆς φωτοελαστικότητας γιὰ τὴν ἀνάλυση διδιάστατων ἐντατικῶν προβλημάτων. Πρὶν τὴν ἀνάπτυξη τῆς μεθόδου θὰ ἀναφερθοῦμε στὸ πολωμένο φῶς καὶ στὴν περιγραφή του μὲ τοὺς λογισμοὺς Stokes καὶ Jones.

#### 4. ΤΟ ΠΟΛΩΜΕΝΟ ΦΩΣ

Σύμφωνα μὲ τὴν Ἠλεκτρομαγνητικὴ Θεωρία, κοινὸ ἢ μὴ πολωμένο φῶς εἶναι τὸ φῶς στὸ ὁποῖο τὸ ἀκραῖο σημεῖο τοῦ ἠλεκτρικοῦ καὶ τοῦ μαγνητικοῦ διανύσματος, καὶ ἐπομένως καὶ τοῦ διανύσματος τοῦ φωτός, κινεῖται στὸ χῶρο ἀκανόνιστα καὶ δὲν παρουσιάζει προτιμητέα διεύθυνση. Ὄταν εἰσαχθεῖ κάποια τάξη στὴν ἀκανόνιστη κίνηση τοῦ διανύσματος τοῦ φωτός, τὸ φῶς ὀνομάζεται πολωμένο. Τὸ ἀκραῖο σημεῖο τοῦ διανύσματος τοῦ φωτός στὸ πολωμένο φῶς κινεῖται σὲ πλήρως καθορισμένες τροχιές μὲ καθορισμένη διεύθυνση. Οἱ διάφορες μορφές τοῦ πολωμένου φωτός ὀρίζονται ἀπὸ τὴν καμπύλη στὴν ὁποία κινεῖται τὸ ἀκραῖο σημεῖο τοῦ διανύσματος τοῦ φωτός. Οἱ ἀπλούστερες μορφές καμπυλῶν εἶναι ἡ εὐθεία, ὁ κύκλος καὶ ἡ ἔλλειψη, ποὺ ὀρίζουν ἀντίστοιχα τὸ γραμμικὰ, τὸ κυκλικὰ καὶ τὸ ἐλλειπτικὰ πολωμένο φῶς. Στὸ γραμμικὰ πολωμένο φῶς, τὸ διάνυσμα τοῦ φωτός δὲν ἀλλάζει διεύθυνση μὲ τὸ χρόνο, παρὰ μόνον μέγεθος. Στὸ κυκλικὰ πολωμένο φῶς, τὸ μέγεθος τοῦ διανύσματος τοῦ φωτός παραμένει σταθερὸ μὲ τὸ χρόνο, ἐνῶ ἡ γωνία κλίσεώς του μεταβάλλεται συνεχῶς μεταξὺ 0 καὶ 2π. Τὸ φῶς μπορεῖ νὰ παρασταθεῖ σὲ μία συγκεκριμένη χρονικὴ στιγμή μὲ κυκλικὴ κυλινδρική ἕλικά, ἐνῶ ἡ ἐγκάρσια μορφή του, ὅταν τὸ φῶς παρατηρεῖται κατὰ τὴ διεύθυνση διαδόσεως τοῦ κύματος μὲ κατεύθυνση πρὸς τὴ φωτεινὴ πηγὴ, εἶναι κύκλος. Μποροῦμε νὰ διακρίνουμε τὸ δεξιόστροφο καὶ τὸ ἀριστερόστροφο κυκλικὰ πολωμένο φῶς, ἀνάλογα μὲ τὸ ἂν ἡ κίνηση τοῦ διανύσματος τοῦ φωτός, καθὼς παρατηρεῖται ἀπὸ παρατηρητὴ ποὺ βλέπει κατὰ τὴ διεύθυνση διαδόσεως τοῦ κύματος πρὸς τὴ φωτεινὴ πηγὴ, εἶναι

κατά τή διεύθυνση τῶν δεικτῶν τοῦ ρολογιοῦ ἢ κατά τήν ἀντίθετη διεύθυνση, ἀντίστοιχα. Ἀνάλογα ὀρίζεται τὸ ἐλλειπτικὰ πολωμένο φῶς, στὸ ὁποῖο τὸ διάνυσμα τοῦ φωτός κινεῖται σὲ ἐλλειπτικὴ κυλινδρική ἔλικα.

Γιὰ τήν περιγραφή τοῦ πολωμένου φωτός, εἶναι δυνατόν νὰ χρησιμοποιηθεῖ ὁ διανυσματικὸς λογισμὸς. Ἔτσι, ἓνα μονοχρωματικὸ γραμμικὰ πολωμένο φῶς κατὰ τή διεύθυνση τοῦ ἄξονα  $x$ , τὸ ὁποῖο γεννᾶται ἀπὸ διαταραχὴ πού μεταβάλλεται ἡμιτονοειδῶς μὲ τὸ χρόνο καὶ τή διεύθυνση τοῦ ἄξονα  $z$ , μπορεῖ νὰ παρασταθεῖ ἀπὸ τὸ διάνυσμα τοῦ φωτός  $\alpha$ , πού δίδεται ἀπὸ τή σχέση [3],

$$\alpha = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} + \frac{z}{\lambda} \right) i = A \cos \left( \omega t + \frac{2\pi z}{\lambda} \right) i \quad (1)$$

ὅπου  $A$  εἶναι τὸ εὖρος,  $T$  ἡ περίοδος,  $\lambda$  τὸ μῆκος κύματος τοῦ μονοχρωματικοῦ φωτός,  $\omega = (2\pi/T)$  ἡ γωνιακὴ συχνότητα, καὶ  $i$  τὸ μοναδιαῖο διάνυσμα κατὰ τὸν ἄξονα  $x$ .

Τὸ κυκλικὰ πολωμένο φῶς εἶναι δυνατόν νὰ παρασταθεῖ ἀπὸ τὸ διάνυσμα τοῦ φωτός  $\alpha$ , πού δίδεται ἀπὸ τή σχέση:

$$\alpha = \alpha_x i + \alpha_y j \quad (2)$$

$$\alpha_x = A \operatorname{Re} \left[ e^{(i\omega t + 2\pi i z / \lambda + \delta_x) j} \right], \quad \alpha_y = A \operatorname{Re} \left[ e^{(i\omega t + 2\pi i z / \lambda + \delta_y) j} \right], \quad \delta = \delta_y - \delta_x = \pm 90 \text{ deg} \quad (3)$$

Ἀντίστοιχα, τὸ ἐλλειπτικὰ πολωμένο φῶς παρίσταται ἀπὸ τὸ διάνυσμα τοῦ φωτός  $\alpha$ , ὅπου οἱ συνιστώσες  $\alpha_x$  καὶ  $\alpha_y$  δίδονται ἀπὸ τὶς σχέσεις:

$$\alpha_x = A_x \operatorname{Re} \left[ e^{(i\omega t + 2\pi i z / \lambda + \delta_x) j} \right], \quad \alpha_y = A_y \operatorname{Re} \left[ e^{(i\omega t + 2\pi i z / \lambda + \delta_y) j} \right] \quad (4)$$

Ἀπαλείφοντας ἀπὸ τὶς ἐξισώσεις (4) τήν ποσότητα  $(\omega t + 2\pi z / \lambda)$ , καταλήγουμε στὴν ἀκόλουθη ἐξίσωση, ἡ ὁποία παριστᾷ ἔλλειψη:

$$\left( \frac{\alpha_x}{A_x} \right)^2 + \left( \frac{\alpha_y}{A_y} \right)^2 - \frac{2\alpha_x \alpha_y}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (5)$$

## 5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΟΛΩΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ ΜΕ ΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ STOKES ΚΑΙ JONES

Ἡ ἀρχὴ τοῦ διανύσματος τοῦ φωτός ἔχει χρησιμοποιηθεῖ μὲ ἐπιτυχία σὲ πολλὰ προβλήματα Ὀπτικῆς ποὺ πραγματεύονται τὴ δίοδο πολωμένου φωτός μέσω διπλοθλαστικῶν μέσων ἢ ἄλλων ὀπτικῶν στοιχείων. Ἡ κατάσταση πολώσεως τοῦ φωτός περιγράφεται πλήρως, ὅταν σὲ κάθε θέση κατὰ μῆκος τῆς τροχιάς διαδόσεως τὸ διάνυσμα τοῦ φωτός εἶναι γνωστό. Ἐντούτοις, ὅταν ὁ ἀριθμὸς τῶν ὀπτικῶν στοιχείων εἶναι μεγάλος, οἱ ἀπαιτούμενοι ὑπολογισμοὶ εἶναι μακροσκελεῖς καὶ εἶναι δυνατὸν νὰ ὑπείσθουν σφάλματα. Γιὰ τὸ σκοπὸ αὐτὸ ἔχουν ἀναπτυχθεῖ προσφορότερες μέθοδοι γιὰ τὴν περιγραφή τοῦ φωτός καὶ τῶν ἀντίστοιχων μετασχηματισμῶν, ὅταν τὸ φῶς διέρχεται μέσω σειρᾶς ὀπτικῶν στοιχείων. Στὸ ἐδάφιο αὐτὸ θὰ περιγράψουμε τὶς μεθόδους ποὺ βασίζονται στὰ διανύσματα Stokes καὶ Jones [3]. Τὰ διανύσματα αὐτὰ μπορεῖ νὰ θεωρηθοῦν ὡς τὰ στοιχεῖα μητρώων στήλης, καὶ εἶναι δυνατὸν νὰ συνδυαστοῦν μὲ μητρωικὸ λογισμὸ γιὰ τὴν ἐπίλυση προβλημάτων Ὀπτικῆς. Δεδομένου ὅτι ὁ μητρωικὸς λογισμὸς εἶναι ἰδιαίτερα πρόσφορος στὸν ἠλεκτρονικὸ ὑπολογιστῆ, οἱ μητρωικὲς μέθοδοι περιγραφῆς τοῦ φωτός προσφέρονται γιὰ τὴν ταχεία ἐπίλυση προβλημάτων Ὀπτικῆς μέσω ἠλεκτρονικοῦ ὑπολογιστῆ.

Τὸ διάνυσμα Stokes ἀποτελεῖται ἀπὸ τέσσερα στοιχεῖα, τὰ ὁποῖα περιγράφουν πλήρως τὸ ἔλλειπτικὰ πολωμένο φῶς. Τὰ τέσσερα αὐτὰ στοιχεῖα  $s_0$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  καὶ  $s_3$  ὀρίζονται συναρτήσῃ τῶν εὐρῶν  $A_x$  καὶ  $A_y$  καὶ τῆς διαφορᾶς φάσεως  $\delta$  τῶν συνιστωσῶν  $\alpha_x$  καὶ  $\alpha_y$  τοῦ διανύσματος τοῦ φωτός, καὶ δίδονται ἀπὸ τὶς σχέσεις:

$$s_0 = A_x^2 + A_y^2, \quad s_1 = A_x^2 - A_y^2, \quad s_2 = 2A_x A_y \cos \delta, \quad s_3 = 2A_x A_y \sin \delta \quad (6)$$

Εἶναι προφανὲς ἀπὸ τὶς σχέσεις αὐτὲς ὅτι τὸ στοιχεῖο  $s_0$  παριστᾷ τὴν ἔνταση τοῦ πολωμένου φωτός, καὶ ὅτι τὰ ὑπόλοιπα στοιχεῖα  $s_1$ ,  $s_2$  καὶ  $s_3$  ἔχουν διαστάσεις ἐντάσεως τοῦ φωτός. Τὰ τέσσερα αὐτὰ στοιχεῖα, σὲ συνδυασμὸ μὲ τὸ λογισμὸ Mueller, διατάσσονται σὲ ἓνα διάνυσμα στήλης ὡς ἑξῆς:

$$S = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Τὰ στοιχεῖα  $s_0, s_1, s_2$  καὶ  $s_3$  τοῦ διανύσματος Stokes δὲν εἶναι ἀνεξάρτητα, ἀλλὰ ἱκανοποιῦν τὴν σχέσηιν:

$$s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 \quad (8)$$

Τὰ διανύσματα Stokes ποὺ ἀντιστοιχοῦν σὲ μία δεδομένη κατάστασι πολώσεως τοῦ φωτός εἶναι δυνατὸν νὰ ὑπολογιστοῦν εὐκόλα ἀπὸ τὰς σχέσεις (6). Τὰ διανύσματα αὐτὰ γιὰ τὰς περιπτώσεις τοῦ ὀριζόντιου γραμμικῶς πολωμένου φωτός, τοῦ δεξιόστροφου καὶ τοῦ ἀριστερόστροφου κυκλικῶς πολωμένου φωτός ποὺ ἔχουν ἔντασι ἴση μὲ τὴν μονάδα, δίδονται ἀπὸ τὰς ἀκόλουθες σχέσεις ἀντίστοιχα:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Τὸ διάνυσμα Stokes πληροῖ τὴν προσθετικὴν ιδιότητα, ἀν δηλαδή δύο δέσμες φωτός μὲ διανύσματα  $S'$  καὶ  $S''$  συμβάλλουν,

$$S' = \begin{bmatrix} s_0' \\ s_1' \\ s_2' \\ s_3' \end{bmatrix}, \quad S'' = \begin{bmatrix} s_0'' \\ s_1'' \\ s_2'' \\ s_3'' \end{bmatrix} \quad (10)$$

τότε τὸ διάνυσμα Stokes  $S$  τοῦ συνδυασμοῦ τῶν δύο δεσμῶν δίδεται ἀπὸ τὴν σχέσηιν:

$$S = S' + S'' = \begin{bmatrix} s_0' \\ s_1' \\ s_2' \\ s_3' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_0'' \\ s_1'' \\ s_2'' \\ s_3'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_0' + s_0'' \\ s_1' + s_1'' \\ s_2' + s_2'' \\ s_3' + s_3'' \end{bmatrix} \quad (11)$$

Πρέπει νὰ σημειώσουμε ὅτι τὸ διάνυσμα Stokes μπορεῖ νὰ χρησιμοποιηθῆ καὶ γιὰ τὴν περιγραφὴ μὴ πολωμένου ἢ μερικῶς πολωμένου φωτός.



Τò διάνυσμα Jones αποτελεί ένα διάνυσμα στήλης δύο μιγαδικών στοιχείων ως εξής:

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x e^{i(\nu+\delta_x)} \\ A_y e^{i(\nu+\delta_y)} \end{bmatrix}, \quad \nu = \omega t + \frac{2\pi z}{\lambda} \quad (12)$$

Η σχέση (12) μπορεί να γραφεί υπό τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \cos Be^{-i(\delta/2)} \\ \sin Be^{i(\delta/2)} \end{bmatrix}, \quad B = \left| \arctan \frac{A_y}{A_x} \right|, \quad \delta = (\delta_y - \delta_x) \quad (13)$$

Τὰ διανύσματα Jones για τὸ δεξιόστροφο καὶ ἀριστερόστροφο κυκλικὰ πολωμένο φῶς, δίδονται ἀντίστοιχα ἀπὸ τὶς σχέσεις:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ἡ ἔνταση τοῦ φωτὸς  $I$  δίδεται ἀπὸ τὴν σχέση:

$$I = \bar{\alpha} \alpha = \begin{bmatrix} A_x e^{-i\delta_x} & A_y e^{-i\delta_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x e^{i\delta_x} \\ A_y e^{i\delta_y} \end{bmatrix} = A_x^2 + A_y^2 \quad (15)$$

Τὸ διάνυσμα Jones, ὅπως καὶ τὸ διάνυσμα Stokes, ικανοποιεῖ τὴν προσθετικὴ ιδιότητα.

## 6. ΟΙ ΛΟΓΙΣΜΟΙ MUELLER ΚΑΙ JONES

Ὁ λογισμὸς Mueller γιὰ τὴν περιγραφή τῆς διόδου τοῦ πολωμένου φωτὸς διὰ σειρᾶς ὀπτικῶν στοιχείων βασίζεται στὸ μητρώο Stokes. Τὰ ὀπτικά στοιχεία περιγράφονται μὲ μητρώα  $4 \times 4$ . Ἐνδεικτικὰ ἀναφέρουμε ὅτι τὸ μητρώο Mueller γιὰ ἕνα γραμμικὸ πολωτὴ, τοῦ ὁποῦ οἱ κύριοι ἄξονες σχηματίζουν γωνία  $\theta$  μὲ τὸν ἄξονα  $x$ , δίδεται ἀπὸ τὴν σχέση [3],

$$P_\theta = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

ἐνῶ τὸ ἀντίστοιχο μητρώο γιὰ ἕνα γραμμικὸ ἐπιβραδυντὴ με ὀπτική ἐπιβράδυνση  $\delta$ , καὶ τοῦ ὁποῖου ὁ ταχὺς ἄξονας σχηματίζει γωνία  $\theta$  με τὸν ἄξονα  $x$ , δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση [3]:

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos \delta & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin 2\theta \sin \delta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \delta & \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \sin \delta & -\cos 2\theta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (17)$$

Σύμφωνα με τὸ λογισμό Mueller, ὅταν ἔχουμε ἕνα σύνολο ὀπτικῶν στοιχείων 1, 2, ..., n με μητρώα Mueller  $M_1, M_2, \dots, M_n$  ἀντίστοιχα, καὶ θεωρήσουμε ὅτι φωτεινὴ πηγὴ ποὺ ἐπέμπει φῶς ποὺ περιγράφεται ἀπὸ τὸ διάνυσμα Stokes  $S_0$  εἰσέρχεται πρῶτα στὸ ὀπτικὸ στοιχεῖο 1, στὴ συνέχεια στὸ στοιχεῖο 2, καὶ οὕτω καθεξῆς μέχρι τὸ στοιχεῖο n, τότε τὸ διάνυσμα Stokes  $S$  τοῦ φωτὸς τὸ ὁποῖο ἐξέρχεται ἀπὸ τὸ τελευταῖο στοιχεῖο n θὰ δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$S = M_n \dots M_2 M_1 S_0 \quad (18)$$

Ἀντίστοιχα, στὸ λογισμό Jones, τὰ ὀπτικὰ στοιχεῖα περιγράφονται με μητρώα  $2 \times 2$ , τὰ στοιχεῖα τῶν ὁποίων εἶναι μιγαδικοί ἀριθμοί. Ἐνδεικτικὰ ἀναφέρουμε ὅτι τὸ μητρώο Jones γιὰ ἕνα γραμμικὸ πολωτὴ τοῦ ὁποῖου ὁ κύριος ἄξονας σχηματίζει γωνία  $\theta$  με τὸν ἄξονα  $x$  δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση [3],

$$P_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (19)$$

ἐνῶ τὸ ἀντίστοιχο μητρώο γιὰ ἕνα γραμμικὸ ἐπιβραδυντὴ με ὀπτική ἐπιβράδυνση  $\delta$  καὶ τοῦ ὁποῖου ὁ ταχὺς ἄξονας σχηματίζει γωνία  $\theta$  με τὸν ἄξονα  $x$ , δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση [3]:

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} e^{i\delta} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta & (e^{i\delta} - 1) \sin \theta \cos \theta \\ (e^{i\delta} - 1) \sin \theta \cos \theta & e^{i\delta} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (20)$$

Ἀντίστοιχη σχέση με τὴ σχέση (18) ἰσχύει καὶ γιὰ τὸ λογισμό Jones. Μητρώα Mueller καὶ Jones γιὰ σωρεῖα ὀπτικῶν στοιχείων δίδονται στὸ βιβλίο [3].

## 7. Ο ΦΩΤΟΤΑΣΕΟΠΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Είναι γνωστό ότι όταν μία φωτεινή ακτίνα εισέρχεται σε ένα κρύσταλλο, διασπάζεται σε δύο ακτίνες, οι οποίες είναι γραμμικά πολωμένες σε κάθετες διευθύνσεις μεταξύ τους και διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες. Η ιδιότητα αυτή των κρυστάλλων είναι γνωστή ως οπτική διπλοθλαστικότητα.

Έχει παρατηρηθεί ότι, εκτός από τους κρυστάλλους, το φαινόμενο της διπλοθλαστικότητας συμβαίνει και σε όρισμένα μη κρυσταλλικά και άρχικα οπτικά ισότροπα σώματα, όταν αυτά υποβάλλονται σε καταπόνηση. Τα σώματα δηλαδή αυτά, υπό μηχανική καταπόνηση, συμπεριφέρονται ως κρύσταλλοι. Η κρυσταλλική φύση του σώματος διαρκεί μόνο κατά το χρόνο επιβολής των φορτίων, και εξαφανίζεται όταν τα φορτία απομακρυνθούν. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται προσωρινή ή τεχνητή διπλοθλαστικότητα, και ανακαλύφθηκε από τον Sir David Brewster το 1816.

Η ανακάλυψη του φαινομένου της προσωρινής διπλοθλαστικότητας άνοιξε το δρόμο για την ανάπτυξη μιās νέας μεθόδου πειραματικής ανάλυσεως των τάσεων, της φωτοελαστικότητας. Η ανάπτυξη της μεθόδου άρχισε στις αρχές του 20ού αιώνα και συνεχίζεται μέχρι των ημερών μας. Η φωτοελαστικότητα αποτελεί μιὰ δυναμική μέθοδο υπολογισμού των τάσεων στις κατασκευές.

Σύμφωνα με τις αρχές της Μηχανικής του Παραμορφώσιμου Σώματος, ή έντατική κατάσταση σε κάθε σημείο ενός σώματος είναι δυνατόν να παρασταθεί με έναν τανυστή δευτέρας τάξεως [4]. Ο τανυστής αυτός είναι δυνατόν να διαγωνιοποιηθεί, δηλαδή υπάρχουν τρεις διευθύνσεις ανά δύο κάθετες μεταξύ τους στις οποίες δεν αναπτύσσονται διαμητρικές τάσεις αλλά μόνον όρθες τάσεις. Σε δύο μάλιστα από τις διευθύνσεις αυτές, οι όρθες τάσεις λαμβάνουν τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή από τις όρθες τάσεις σε οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση στο σημείο. Οι διευθύνσεις αυτές και οι αντίστοιχες τάσεις ονομάζονται κύριες διευθύνσεις και κύριες τάσεις. Οι τάσεις σε ένα σώμα είναι δυνατόν να απεικονιστούν με το λεγόμενο έλλειψοειδές του Cauchy.

Αντίστοιχα, ή μεταβολή με τη διεύθυνση του δείκτη διαθλάσεως της μηχανικώς επιβαλλόμενης προσωρινής διπλοθλαστικότητας των σωμάτων είναι δυνατόν να παρασταθεί με έναν τανυστή δευτέρας τάξεως. Η μεταβολή του δείκτη διαθλάσεως είναι δυνατόν να απεικονιστεί με το λεγόμενο έλλειψοειδές του Fresnel.

Ο φωτοτασεοπτικός νόμος της προσωρινής διπλοθλαστικότητας των σωμάτων συνδέει τον τανυστή της τάσεως με τον τανυστή του δείκτη διαθλάσεως. Ο νόμος αυτός αναπτύχθηκε από τον Neumann το 1841, και ανεξάρτητα από τον Maxwell το 1853. Σύμφωνα με το νόμο αυτό:

1. Οί κύριοι άξονες τών ταχυστών τής τάσεως και του δείκτη διαθλάσεως συμπίπτουν.
2. Η διαφορά τών δεικτών διαθλάσεως στις κύριες διευθύνσεις είναι ανάλογη με τή διαφορά τών αντίστοιχων κυρίων τάσεων. Η ιδιότητα αυτή διατυπώνεται από τις ακόλουθες σχέσεις,

$$n_1 - n_2 = C_0(\sigma_1 - \sigma_2), \quad n_2 - n_3 = C_0(\sigma_2 - \sigma_3), \quad n_3 - n_1 = C_0(\sigma_3 - \sigma_1) \quad (21)$$

όπου  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  είναι οί κύριες τάσεις,  $n_1, n_2, n_3$  είναι οί κύριοι δείκτες διαθλάσεως, ενώ  $C_0$  αποτελεί σταθερά του ύλικού.

Η κατάλληλη έκμετάλλευση του φωτοτασεοπτικού νόμου έπιτρέπει τον άπευθείας προσδιορισμό τών διευθύνσεων τών κυρίων τάσεων και τών διαφορών τών κυρίων τάσεων από το όπτικό αποτέλεσμα, το όποιο λαμβάνεται όταν το διαφανές δοκίμιο υπό μηχανική καταπόνηση τοποθετηθεί έντός του επιπέδου ή του κυκλικού πολωσισκοπίου, όπως αναπτύσσεται στη συνέχεια.

## 8. Η ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΦΩΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

### 8.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η διδιάστατη φωτοελαστικότητα άσχολείται με τον προσδιορισμό διδιάστατων έντατικών πεδίων με τή χρήση πολωμένου φωτός. Η μέθοδος βασίζεται στο φαινόμενο τής προσωρινής ή τεχνητής διπλοδιαθλάσεως, που αναπτύχτηκε στο προηγούμενο έδάφιο. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, οί κύριοι άξονες διπλοδιαθλάσεως του δοκιμίου, το όποιο συμπεριφέρεται ως διπλοθλαστική πλάκα υπό μηχανική καταπόνηση, συμπίπτουν με τους κύριους άξονες του δημιουργούμενου έντατικού πεδίου. Για τήν περίπτωση διδιάστατων (έπίπεδων) έντατικών προβλημάτων, ή όπτική διπλοθλαστικότητα  $\delta$  (: διαφορά τών όπτικών δρόμων κατά τις διευθύνσεις τών κυρίων τάσεων), σύμφωνα με τή σχέση (21) του φωτοτασεοπτικού νόμου, δίδεται από τή σχέση,

$$\delta = C(\sigma_1 - \sigma_2)d \quad (22)$$

όπου  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  είναι οί δύο κύριες τάσεις,  $d$  το πάχος του δοκιμίου, και  $C$  ή φωτοτασεοπτική σταθερά του ύλικού του δοκιμίου.

### 8.2. ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΟΛΩΣΙΣΚΟΠΙΟ

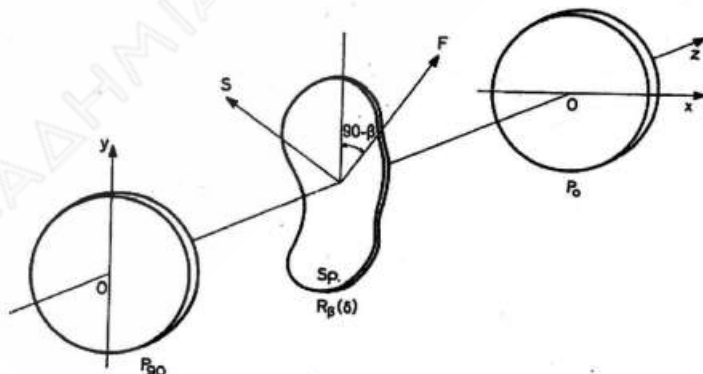
Ο προσδιορισμός τών διευθύνσεων τών κυρίων τάσεων και τής διαφοράς τους ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) πραγματοποιείται με τον αντίστοιχο προσδιορισμό τών κυρίων άξόνων διπλοθλαστικότητας και του μεγέθους τής διπλοθλαστικότητας  $\delta$

του δοκιμίου. Για τὸ σκοπὸ αὐτό, τὸ δοκίμιο τοποθετεῖται στὸ ὀπτικὸ πεδίο ἑνὸς ζεύγους δύο γραμμικῶν πολωτῶν, οἱ ἄξονες τῶν ὁποίων εἶναι κάθετοι μεταξύ τους. Τὸ σύστημα αὐτὸ τῶν δύο πολωτῶν ὀνομάζεται ἐπίπεδο πολωσισκόπιο (Σχ. 1). Ὁ γραμμικὸς πολωτῆς ποὺ βρίσκεται κοντὰ στὴ φωτεινὴ πηγὴ ὀνομάζεται πολωτῆς, ἐνῶ ὁ δεύτερος γραμμικὸς πολωτῆς ὀνομάζεται ἀναλύτης. Ὄταν στὸν πολωτῆ τοῦ ἐπιπέδου πολωσισκοπίου προσπέσει φωτεινὴ ἀκτῖνα, λόγω τῆς καθετότητας τῶν κυρίων ἀξόνων τῶν δύο πολωτῶν, λαμβάνεται σκοτεινὸ πεδίο πέραν τοῦ ἀναλύτη.

Ὄταν τὸ δοκίμιο ὑπὸ μηχανικὴ καταπόνηση τοποθετηθεῖ στὸ ὀπτικὸ πεδίο τοῦ ἐπιπέδου πολωσισκοπίου (μεταξὺ πολωτῆ καὶ ἀναλύτη), συμπεριφέρεται ὡς διπλοθλαστικὴ πλάκα. Ἔστω ὅτι ἡ ὀπτικὴ καθυστέρηση σὲ ἓνα σημεῖο τῆς πλάκας εἶναι  $\delta$ , καὶ οἱ δύο κύριοι ἄξονες σχηματίζουν γωνία  $\beta$  καὶ  $(\beta+90^\circ)$  μὲ τὸν ἄξονα  $x$  (Σχ. 1). Ὄταν ὁ ἄξονας τοῦ πολωτῆ εἶναι κατακόρυφος, τὸ ἐπίπεδο πολωσισκόπιο συνίσταται ἀπὸ τὰ ἐξῆς ὀπτικὰ στοιχεῖα:

1. Γραμμικὸ πολωτῆ  $P_{90}$ , τοῦ ὁποίου ὁ ἄξονας εἶναι κατακόρυφος.
2. Διπλοθλαστικὴ πλάκα (δοκίμιο)  $R_{\beta}(\delta)$  μὲ ὀπτικὴ ἐπιδράδυνση  $\delta$ , τῆς ὁποίας ὁ ταχὺς ἄξονας σχηματίζει γωνία  $\beta$  μὲ τὸν ἄξονα  $x$ .
3. Γραμμικὸ πολωτῆ (ἀναλύτης)  $P_0$ , τοῦ ὁποίου ὁ ἄξονας εἶναι ὀριζόντιος.

Θὰ ἀναλύσουμε στὴ συνέχεια τοὺς ὀπτικοὺς μετασχηματισμοὺς οἱ ὁποῖοι λαμβάνουν χώρα στὸ ἐπίπεδο πολωσισκόπιο μὲ τοὺς λογισμοὺς Mueller καὶ Jones.



Σχ. 1. Διάταξη τῶν ὀπτικῶν στοιχείων τοῦ ἐπιπέδου πολωσισκοπίου μὲ σκοτεινὸ πεδίο. Φαίνονται ἀπὸ ἀριστερά: Ἐπίπεδος πολωτῆς μὲ κύριον ἄξονα κατὰ τὴ διεύθυνση τοῦ ἄξονα  $y$ , δοκίμιο ὑπὸ καταπόνηση, τὸ ὁποῖο ἰσοδυναμεῖ μὲ διπλοθλαστικὴ πλάκα μὲ ταχὺ ἄξονα ποὺ σχηματίζει γωνία  $\beta$  μὲ τὸν ἄξονα  $x$ , καὶ ἐπίπεδος πολωτῆς (ἀναλύτης) μὲ κύριον ἄξονα κατὰ τὴ διεύθυνση τοῦ ἄξονα  $x$ .

## 8.2.1 Ο ΛΟΓΙΣΜΟΣ MUELLER ΓΙΑ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΟΛΩΣΙΣΚΟΠΙΟ

Τò διάνυσμα Mueller για τò μη πολωμένο φῶς πὸ ἐκπέμπεται ἀπὸ μονοχρωματικὴ φωτεινὴ πηγὴ, ἢ ὁποία τοποθετεῖται πέραν τοῦ πολωτῆ, δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Τὰ μητρῶα Mueller  $P_{90}$ ,  $R_{\beta}(\delta)$  καὶ  $P_0$  τοῦ πολωτῆ, τῆς διπλοθλαστικῆς πλάκας καὶ τοῦ ἀναλύτη, ἀντίστοιχα, δίδονται ἀπὸ τὶς σχέσεις:

$$P_{90} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$R_{\beta}(\delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\beta + \sin^2 2\beta \cos \delta & (1 - \cos \delta) \sin 2\beta \cos 2\beta & -\sin 2\beta \sin \delta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\beta \cos 2\beta & \sin^2 2\beta + \cos^2 2\beta \cos \delta & \cos 2\beta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\beta \sin \delta & -\cos 2\beta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Σύμφωνα μὲ τὸ λογισμὸ Mueller, τὸ μητρῶο Stokes  $S'$  τοῦ φωτὸς τὸ ὁποῖο ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν ἀναλύτη δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$S' = P_0 R_{\beta}(\delta) P_{90} S \quad (27)$$

ή

$$\begin{bmatrix} s_0' \\ s_1' \\ s_2' \\ s_3' \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\beta + \sin^2 2\beta \cos \delta & (1 - \cos \delta) \sin 2\beta \cos 2\beta & -\sin 2\beta \sin \delta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\beta \cos 2\beta & \sin^2 2\beta + \cos^2 2\beta \cos \delta & \cos 2\beta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\beta \sin \delta & -\cos 2\beta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sin^2 2\beta \sin^2(\delta/2) \\ \sin^2 2\beta \sin^2(\delta/2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Ἡ φωτεινὴ ἔνταση τοῦ ἀνωτέρω μητρώου Stokes δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$I = \frac{1}{2} \sin^2 2\beta \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (29)$$

Ἀπὸ τὴν ἀνωτέρω σχέση συνάγουμε ὅτι ἡ φωτεινὴ ἔνταση μηδενίζεται,  $I = 0$ , ὅταν:

$$\beta = 0, \frac{\pi}{2}, \dots, n\frac{\pi}{2} \quad \text{ἢ} \quad \delta = 0, 2\pi, \dots, n2\pi \quad (30)$$

Ἀπὸ τὴν σχέση (30) συνάγεται ὅτι οἱ γεωμετρικοὶ τόποι τῶν σημείων τοῦ δοκιμίου γιὰ τὰ ὁποῖα  $\beta =$  σταθερό, δηλαδὴ τὰ σημεῖα ποὺ ἔχουν τὴν ἴδια κλίση τῶν κυρίων ἀξόνων, σχηματίζουν σκοτεινοὺς κροσσούς, οἱ ὁποῖοι ὀνομάζονται ἰσοκλινεῖς, ἐνῶ οἱ γεωμετρικοὶ τόποι τῶν σημείων γιὰ τὰ ὁποῖα  $\delta = 2\pi n$  σχηματίζουν σκοτεινοὺς κροσσούς, οἱ ὁποῖοι ὀνομάζονται ἰσόχρωμοι, δεδομένου ὅτι ἔχουν τὸ ἴδιο χρῶμα ὅταν χρησιμοποιεῖται μονοχρωματικὸ φῶς. Συνάγεται, ἐπομένως, ὅτι τὸ ἐπίπεδο πολωσισκόπιο δημιουργεῖ δύο οἰκογένειες δικτύων κροσσῶν, τῶν ἰσοκλινῶν

καί τῶν ἰσοχρώμων, οἱ ὁποῖες βρίσκονται σέ ἐπαλληλία. Κατά συνέπεια, ἀπό τὸ ἐπίπεδο πολωσισκόπιο εἶναι δυνατόν νὰ προσδιοριστοῦν οἱ διευθύνσεις καί ἡ διαφορά  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  τῶν κυρίων τάσεων. Ἀπό τὰ δύο αὐτὰ στοιχεῖα προσδιορίζονται οἱ τιμές τῶν κυρίων τάσεων  $\sigma_1$  καί  $\sigma_2$ , μέ χρήση σχετικῶν μεθόδων ποῦ ἔχουν ἀναπτυχθεῖ στή φωτοελαστικότητα [2].

### 8.2.2 Ο ΛΟΓΙΣΜΟΣ JONES ΓΙΑ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΟΛΩΣΙΣΚΟΠΙΟ

Τὸ διάνυσμα Jones τοῦ γραμμικῶς πολωμένου φωτός, τὸ ὁποῖο ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν πολωτὴ  $P_{90}$  μέ κατακόρυφο ὀπτικὸ ἄξονα (Σχ. 1), δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Τὸ μητρώο Jones τῆς διπλοθλαστικῆς πλάκας  $R_\beta(\delta)$  μέ ὀπτικὴ ἐπιβράδυνση  $\delta$ , τῆς ὁποίας ὁ ταχὺς ἄξονας σχηματίζει γωνία  $\beta$  μέ τὸν ἄξονα  $x$ , δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$R_\beta(\delta) = \begin{bmatrix} e^{i\delta} \cos^2 \beta + \sin^2 \beta & (e^{i\delta} - 1) \sin \beta \cos \beta \\ (e^{i\delta} - 1) \sin \beta \cos \beta & e^{i\delta} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \end{bmatrix} \quad (32)$$

Τὸ μητρώο Jones τοῦ δεύτερου πολωτῆ (ἀναλύτη), τοῦ ὁποίου ὁ ὀπτικὸς ἄξονας εἶναι ὀριζόντιος, δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Σύμφωνα μέ τὸ λογισμό Jones, τὸ μητρώο Jones  $\alpha'$  τοῦ φωτός ποῦ ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν ἀναλύτη δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$\alpha' = P_0 R_\beta(\delta) \alpha \quad (34)$$

Ἡ σχέση (34) βάσει τῶν σχέσεων (31), (32), (33) γράφεται:



$$\alpha' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta} \cos^2 \beta + \sin^2 \beta & (e^{i\delta} - 1) \sin \beta \cos \beta \\ (e^{i\delta} - 1) \sin \beta \cos \beta & e^{i\delta} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$= \begin{bmatrix} (e^{i\delta} - 1) \sin \beta \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ἡ ἔνταση τοῦ φωτός πού δίδεται ἀπό τή σχέση (35) εἶναι:

$$I = \bar{\alpha}' \alpha' = \begin{bmatrix} (e^{-i\delta} - 1) \sin \beta \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (e^{i\delta} - 1) \sin \beta \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$= [2 - (e^{i\delta} + e^{-i\delta})] \sin^2 \beta \cos^2 \beta = \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin^2 2\beta.$$

Ἡ σχέση αὐτή διαφέρει ἀπό τή σχέση (29) κατὰ τὸν παράγοντα τοῦ ἑνός δευτέρου. Τοῦτο ὀφείλεται στὸ γεγονός ὅτι ἡ ἔνταση τοῦ μὴ πολωμένου φωτός πού χρησιμοποιήθηκε γιὰ τὴν ἐξαγωγή τῆς σχέσης (29) ἦταν ἴση μὲ τὴ μονάδα, καὶ κατὰ συνέπεια ἡ ἔνταση τοῦ πολωμένου φωτός πού ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν πολωτὴ ἦταν ἴση μὲ ἓνα δεύτερο. Ἀντίθετα, γιὰ τὴν ἐξαγωγή τῆς σχέσης (36) ὑπετέθη ὅτι ἡ ἔνταση τοῦ ἐπιπέδου πολωμένου φωτός πού ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν πολωτὴ εἶναι ἴση μὲ τὴ μονάδα. Κατὰ συνέπεια, ἡ ἔνταση τοῦ φωτός πού ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν ἀναλύτη, σύμφωνα μὲ τὸ λογισμὸ Jones (σχέση (36)), εἶναι διπλάσια ἀπὸ τὴν ἔνταση τοῦ φωτός σύμφωνα μὲ τὸ λογισμὸ Mueller (σχέση (29)).

### 8.3. ΤΟ ΚΥΚΛΙΚΟ ΠΟΛΩΣΙΣΚΟΠΙΟ

Τὸ κυκλικὸ πολωσισκόπιο προκύπτει ἀπὸ τὸ ἐπίπεδο πολωσισκόπιο διὰ τῆς εἰσαγωγῆς δύο πλακῶν τετάρτου μήκους κύματος, ἡ ὀπτική ἐπιβράδυνση τῶν ὁποίων εἶναι ἓνα τέταρτο τοῦ μήκους κύματος τοῦ προσπίπτοντος φωτός. Ἡ πρώτη πλάκα τετάρτου μήκους κύματος τοποθετεῖται μετὰ τὸν πολωτὴ καὶ ἡ δεύτερη πρὶν τὸν ἀναλύτη (Σχ. 2). Οἱ ταχεῖς

οπτικοί άξονες τών πλακῶν σχηματίζουν γωνία  $\pm 45^\circ$  με τούς άξονες τοῦ πολωτῆ καὶ ἀναλύτῃ ἀντίστοιχα. Ὄταν οἱ ταχεῖς άξονες τών δύο πλακῶν τετάρτου μήκους κύματος εἶναι κάθετοι μεταξύ τους, τὸ ἀποτέλεσμα τους ἀλληλοεξουδετερώνεται, ὅποτε τὸ σκοτεινὸ ὀπτικὸ πεδίο τοῦ ἐπιπέδου πολωσισκοπίου ἐξακολουθεῖ νὰ παραμένει σκοτεινὸ. Ὄταν οἱ ταχεῖς άξονες τών δύο πλακῶν τετάρτου μήκους κύματος εἶναι παράλληλοι, τότε τὸ ὀπτικὸ πεδίο τοῦ κυκλικῦ πολωσισκοπίου μετατρέπεται ἀπὸ σκοτεινὸ σὲ φωτεινὸ.

Τὸ κυκλικὸ πολωσισκόπιο ἀποτελεῖται ἀπὸ τὰ ἀκόλουθα ὀπτικά στοιχεῖα (Σχ. 2):

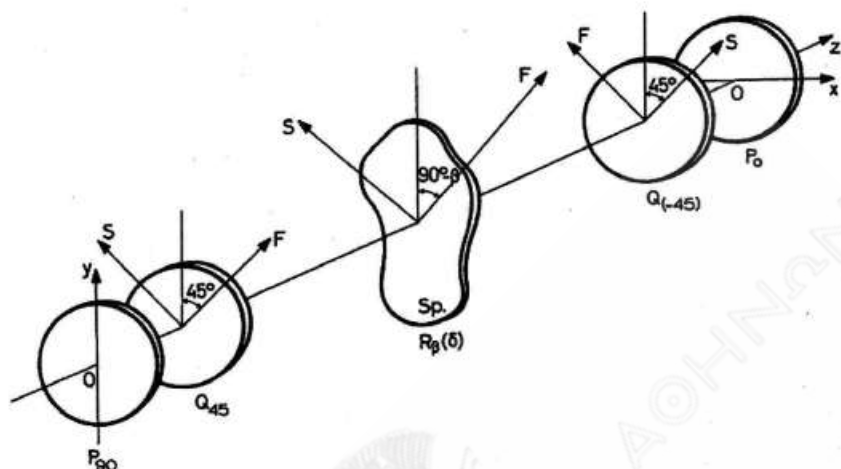
1. Γραμμικὸ πολωτῆ  $P_{90}$ , τοῦ ὁποῖου ὁ κύριος άξονας εἶναι κατακόρυφος.
2. Πλάκα τετάρτου μήκους κύματος  $Q_{45}$ , τῆς ὁποίας ὁ ταχὺς άξονας σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με τὸν άξονα  $x$ .
3. Διπλοθλαστικὴ πλάκα (δοκίμιο)  $R_\beta(\delta)$  με ὀπτικὴ ἐπιβράδυνση  $\delta$ , τῆς ὁποίας ὁ ταχὺς άξονας σχηματίζει γωνία  $\beta$  με τὸν άξονα  $x$ .
4. Πλάκα τετάρτου μήκους κύματος  $Q_{-45}$ , τῆς ὁποίας ὁ ταχὺς άξονας σχηματίζει γωνία  $-45^\circ$  με τὸν άξονα  $x$  (γιὰ τὸ κυκλικὸ πολωσισκόπιο με σκοτεινὸ πεδίο), ἢ γωνία  $45^\circ$  με τὸν άξονα  $x$  (γιὰ τὸ κυκλικὸ πολωσισκόπιο με φωτεινὸ πεδίο).
5. Γραμμικὸ πολωτῆ  $P_0$ , τοῦ ὁποῖου ὁ κύριος άξονας εἶναι ὀριζόντιος.

Θὰ ἀναλύσουμε στὴ συνέχεια τούς ὀπτικούς μετασχηματισμούς οἱ ὁποῖοι λαμβάνουν χώρα στὸ κυκλικὸ πολωσισκόπιο με τούς λογισμούς Mueller καὶ Jones.

### 8.3.1 Ο ΛΟΓΙΣΜΟΣ MUELLER ΓΙΑ ΤΟ ΚΥΚΛΙΚΟ ΠΟΛΩΣΙΣΚΟΠΙΟ

Τὰ μητρῶα Mueller γιὰ τὶς πλάκες τετάρτου μήκους κύματος τών ὁποίων οἱ άξονες σχηματίζουν γωνία  $\pm 45^\circ$  με τὸν άξονα  $x$ , λαμβάνονται ἀπὸ τὴ σχέση (25) θέτοντας  $\delta = 90^\circ$  καὶ  $\beta = \pm 45^\circ$  ἀντίστοιχα. Τὰ μητρῶα αὐτὰ  $Q_{45}$  καὶ  $Q_{-45}$  γιὰ  $\beta = 45^\circ$  καὶ  $\beta = -45^\circ$  δίδονται ἀπὸ τὶς σχέσεις:

$$Q_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad Q_{-45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$



Σχ. 2. Διάταξη τών ὀπτικῶν στοιχείων τοῦ κυκλικοῦ πολωτισμοσκοπίου με σκοτεινὸ πεδίο. Φαίνονται ἀπὸ ἀριστερά: Ἐπίπεδος πολωτῆς με κύριο ἄξονα κατὰ τὴ διεύθυνση τοῦ ἄξονα  $y$ , πλάκα τετάρτου μήκους κύματος με ταχὺ ἄξονα ὑπὸ γωνία  $45^\circ$  με τὸν ἄξονα  $x$ , δοκίμιο ὑπὸ καταπόνηση, ποὺ ἰσοδυναμεῖ με διπλοθλαστικὴ πλάκα με ὀπτικὴ ἐπιβράδυνση  $\delta$  καὶ ταχὺ ἄξονα ποὺ σχηματίζει γωνία  $\beta$  με τὸν ἄξονα  $x$ , πλάκα τετάρτου μήκους κύματος με ταχὺ ἄξονα ὑπὸ γωνία  $-45^\circ$  με τὸν ἄξονα  $x$ , καὶ ἐπίπεδο πολωτῆ (ἀναλύτη) με κύριο ἄξονα κατὰ τὴ διεύθυνση τοῦ ἄξονα  $x$ .

Σύμφωνα με τὸ λογιισμό Mueller, τὸ μητρώο Stokes  $S'$  τοῦ φωτός τὸ ὁποῖο ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν ἀναλύτη δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$S' = P_0 Q_{-45} R_\beta(\delta) Q_{45} P_{90} S \quad (38)$$

ἢ

$$S' = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\beta + \sin^2 2\beta \cos \delta & (1 - \cos \delta) \sin 2\beta \cos 2\beta & -\sin 2\beta \sin \delta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\beta \cos 2\beta & \sin^2 2\beta + \cos^2 2\beta \cos \delta & \cos 2\beta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\beta \sin \delta & -\cos 2\beta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

ή

$$S' = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 - \cos \delta \\ 1 - \cos \delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Ἡ ἔνταση τοῦ φωτός ποῦ ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν ἀναλύτη δίδεται ἀπὸ τὴ σχέση:

$$I = \frac{1}{4}(1 - \cos \delta) = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (41)$$

Ἀπὸ τὴ σχέση (41) προκύπτει ὅτι στὸ κυκλικὸ πολωσισκόπιο σκοτεινοῦ πεδίου λαμβάνονται μόνο ἰσόχρωμοι ἀκεραίας τάξεως. Παρατηροῦμε ὅτι στὸ κυκλικὸ πολωσισκόπιο ἀπαλείφονται οἱ ἰσοκλινεῖς, οἱ ὁποῖες ὑπάρχουν στὸ ἐπίπεδο πολωσισκόπιο.

Ἀντίστοιχα, γιὰ τὸ κυκλικὸ πολωσισκόπιο φωτεινοῦ τύπου (: οἱ ταχεῖς ἄξονες τῶν δύο πλακῶν τετάρτου μήκους κύματος εἶναι παράλληλοι), λαμβάνουμε γιὰ τὴν ἔνταση τοῦ φωτός ποῦ ἐξέρχεται ἀπὸ τὸν ἀναλύτη:

$$I = \frac{1}{4}(1 + \cos \delta) = \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (42)$$

Ἡ σχέση αὐτὴ δείχνει ὅτι στὸ κυκλικὸ πολωσισκόπιο φωτεινοῦ τύπου λαμβάνονται μόνον ἰσόχρωμοι ἡμισείας τάξεως.

### 8.3.2 Ο ΛΟΓΙΣΜΟΣ JONES ΓΙΑ ΤΟ ΚΥΚΛΙΚΟ ΠΟΛΩΣΙΣΚΟΠΙΟ

Τὰ μητρῶα Jones γιὰ τὶς πλάκες τετάρτου μήκους κύματος, τῶν ὁποίων οἱ ἄξονες σχηματίζουν γωνία  $\pm 45^\circ$  μὲ τὸν ἄξονα x, λαμβάνονται ἀπὸ τὴ σχέση (32) θέτοντας  $\delta = 90^\circ$  καὶ  $\beta = \pm 45^\circ$  ἀντίστοιχα. Τὰ μητρῶα  $J_{45}$  καὶ  $J_{-45}$  γιὰ  $\beta = 45^\circ$  καὶ  $\beta = -45^\circ$  δίδονται ἀπὸ τὶς σχέσεις:

$$Q_{45} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i+1 & i-1 \\ i-1 & i+1 \end{bmatrix} = \frac{i+1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}, \quad (43)$$

$$Q_{-45} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i+1 & -(i-1) \\ -(i-1) & i+1 \end{bmatrix} = \frac{i+1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Σύμφωνα με το λογισμό Jones, το μητρώο Jones  $\alpha'$  του φωτός το οποίο εξέρχεται από τον αναλύτη δίδεται από τη σχέση:

$$\alpha' = P_0 Q_{-45} R_\beta(\delta) Q_{45} \alpha \quad (45)$$

$$\alpha' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{i+1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta} \cos^2 \beta + \sin^2 \beta & (e^{i\delta} - 1) \sin \beta \cos \beta \\ (e^{i\delta} - 1) \sin \beta \cos \beta & e^{i\delta} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \end{bmatrix} \frac{i+1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\alpha' = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{i\delta} - 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Επομένως, η ένταση του φωτός που εξέρχεται από τον αναλύτη είναι:

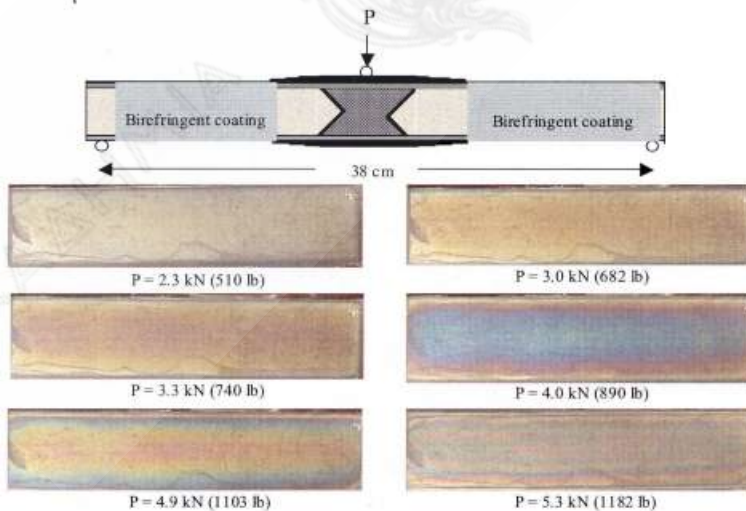
$$I = \bar{\alpha}' \alpha' = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} e^{-i\delta} - 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta} - 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (48)$$

Η σχέση (48) διαφέρει από τη σχέση (41), η οποία συνήχθη με το λογισμό Mueller, κατά τον παράγοντα ένα δεύτερο. Η εξήγηση της διαφοράς αυτής είναι η ίδια, όπως δόθηκε προηγουμένως στην περίπτωση του επιπέδου πολωσισκοπίου.

## 9. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η μέθοδος της φωτοελαστικότητας που ανεπτύχθη ανωτέρω θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του πεδίου των τάσεων σε άμφιερίστη δοκό σάντουιτς που καταπονείται με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον της [5]. Η δοκός αποτελείται από πέλματα από σύνθετο υλικό με ίνες γραφίτη σε πλα-

στική μήτρα και πυρήνα από άφρωδες ύλικό PVC με την έμπορική όνομασία Divinycell 250. Λόγω του ότι το ύλικό τής δοκού είναι άδιαφανές για την έφαρμογή τής φωτοελαστικότητας, έπικολλάται στη δοκό διπλοθλαστικό διαφανές ύλικό. Χρησιμοποιείται το κυκλικό πολωσισκόπιο ανακλαστικού τύπου, δηλαδή το φώς διέρχεται από τον πολωτή και την πλάκα τετάρτου μήκους κύματος, εισέρχεται στο δοκίμιο, ανακλάται από τη διεπιφάνεια δοκού σάντουιτς-διπλοθλαστικού διαφανούς ύλικού, και στη συνέχεια διέρχεται από τη δεύτερη πλάκα τετάρτου μήκους κύματος και τον αναλύτη. Η χρησιμοποιούμενη τεχνική αποτελεί τη μέθοδο των διπλοθλαστικών έπικαλύψεων. Το όπτικό πεδίο που παρατηρείται μετά τον αναλύτη συνίσταται από ίσοχρώμους κροσσούς, οι όποιοι αποτελούν τους γεωμετρικούς τόπους των ίσων διαφορών των κυρίων τάσεων (Σχ. 3). Με την αύξηση τής τάξεως των κροσσών, ή φωτεινή ένταση των διαφόρων χρωμάτων έξασθενεί. Σε κάθε χρώμα κροσσού αντίστοιχεί το μήκος κύματος του συμπληρωματικού του χρώματος, το όποιο αποσβέννυται στο φάσμα των διαφόρων χρωμάτων του λευκού φωτός. Παρατηρούμε τη διαδοχική αύξηση τής τάξεως των ίσοχρώμων με την αύξηση του έπιβαλλόμενου φορτίου. Από το πεδίο των κροσσών του Σχ. 3, και σε συνδυασμό με τις μεθόδους διαχωρισμού των κυρίων τάσεων που έχουν αναπτυχθεί στη φωτοελαστικότητα [2], έπιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των τιμών των κυρίων τάσεων.



Σχ. 3. Ίσοχρωμοί σε διπλοθλαστικές έπικαλύψεις σε άμφιέριστη δοκό που καταπονείται με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον της, για διάφορες τιμές του έφρημομένου φορτίου.

## 10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στήν παρούσα έργασία άνεπτύχθη περιληπτικά ή χρησιμοποίηση τοῦ φωτός για τόν προσδιορισμό τοῦ πεδίου τῶν τάσεων προβλημάτων Μηχανικῆς. Κατεδείχθη ὅτι ή περιγραφή τοῦ πολωμένου φωτός μέσω τῶν μητρικών μεθόδων Mueller και Jones διευκολύνει τήν επίλυση ὀπτικῶν προβλημάτων πού συνδέονται με τή δίοδο τοῦ φωτός μέσω ὀπτικῶν στοιχείων. Τό επίπεδο σώμα ὑπό μηχανική καταπόνηση συμπεριφέρεται ὡς διπλοθλαστικός κρύσταλλος, οἱ κύριες διευθύνσεις διπλοδιαθλάσεως τοῦ ὁποίου συμπίπτουν με τούς κύριους άξονες τοῦ πεδίου τῶν τάσεων. Τό γεγονός αυτό, σέ συνδυασμό με τή χρήση τοῦ επιπέδου ή κυκλικού πολωτισκοπίου, επιτρέπει τόν προσδιορισμό τῶν διευθύνσεων και τῶν διαφορῶν τῶν κύριων τάσεων επιπέδων έντατικῶν προβλημάτων. Καταδεικνύεται ὅτι ή μέθοδος τῆς φωτοελαστικότητας, ή ὁποία χρησιμοποιεῖ πολωμένο φῶς, άποτελεῖ ένα άπλό και δυναμικό έργαλεῖο για τόν προσδιορισμό τοῦ έντατικοῦ πεδίου προβλημάτων Μηχανικῆς.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χριστοφόρου, Α. Γ. *Βήματα στην Έπιστήμη και τή Ζωή*. Σύλλογος πρὸς Διάδοσιν Ὠφελίμων Βιβλίων, σσ. 219-231, 2009.
- [2] Γδούτου, Ε. Ε. *Θεωρία και Έφαρμογαι τῆς Φωτοελαστικότητας* (σσ. 1-127). Ἀθήνα, Έθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνεῖο, 1976.
- [3] Theocaris, P. S. - Gdoutos, E. E. *Matrix Theory of Photoelasticity*. *Springer Series in Optical Sciences*, vol. 11, pp. i-xi, 1-352. Springer Verlag, 1979.
- [4] Γδούτου, Ε. Ε. *Μηχανική τῶν Παραμορφώσιμων Σωμάτων. Θεωρία Έλαστικότητας και Άντοχή τῶν Ὑλικῶν* (σσ. i-xv και 1-542). Θεσσαλονίκη, Ἄφοι Κυριακίδη 1979.
- [5] Daniel, I. M. - Gdoutos, E. E. *Failure Modes of Composite Sandwich Beams*, in *Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures - An Anthology of ONR Sponsored Research*, edited by I. M. Daniel, E. E. Gdoutos and Y. D. S. Rajapakse, Springer, pp. 197-227, 2009.





# ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 3ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ 2011

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΠΟΡΙΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ  
ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΕΠΙ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ  
«ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ,  
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ»

ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ κ. ΛΟΥΚΑ Γ. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ

Ἡ Ἐπιτροπὴ Ἐνέργειας τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν θεώρησε ὅτι μίᾳ ὀλοκληρωμένη, ἐπιστημονικὰ καὶ τεχνικὰ τεκμηριωμένη, οὐδέτερη μελέτῃ τοῦ θέματος «Ἡλεκτροπαραγωγή στὴν Ἑλλάδα: Ὀρυκτὰ καύσιμα, ἀνανεώσιμες πηγές ἐνέργειας καὶ προοπτικὴ ἐνεργειακοῦ ἐφοδιασμοῦ», θὰ βοηθοῦσε τὴν ἑλληνικὴ ἡγεσία στὴν ἀντιμετώπιση καὶ τὸ σχεδιασμὸ τῶν ἐνεργειακῶν ἀναγκῶν τῆς χώρας. Γιὰ τὸ σκοπὸ αὐτό, ἡ Ἐπιτροπὴ Ἐνέργειας συγκρότησε 17μελὴ ὁμάδα ἐργασίας ἀπὸ Ἑλληνες ἐμπειρογνώμονες καὶ εἰδικούς στὰ γενικότερα ἐνεργειακὰ θέματα (Πίν. 1).

Κάθε μέλος τῆς Ὁμάδας Ἐργασίας προσκλήθηκε νὰ ἐκφέρει τὶς ἀπόψεις του καὶ νὰ κάνει εἰσηγήσεις ἐπὶ τοῦ θέματος, ἰδιαίτερα στὰ ἀκόλουθα:

- Ἐνεργειακὴ κατάσταση στὴν Ἑλλάδα σήμερα καὶ προβλέψεις γιὰ τὸ μέλλον.
- Ὁ ρόλος τοῦ λιγνίτη, καὶ πιθανῶς τοῦ λιθάνθρακα, στὶς ἐνεργειακὲς ἀνάγκες καὶ τὴν ἐνεργειακὴ στρατηγικὴ τῆς Ἑλλάδας.
- Ὁ ρόλος τοῦ φυσικοῦ ἀερίου.
- Πετρέλαιο γιὰ κάλυψη μεσοπρόθεσμων καὶ μακροπρόθεσμων ἀναγκῶν.
- Ἀνανεώσιμες πηγές ἐνέργειας καὶ ἔθνικοι στόχοι.
- Προβλέψεις γιὰ τὸ μείγμα τῶν πρωτογενῶν πηγῶν ἐνέργειας στὸ ἑλληνικὸ ἐνεργειακὸ σύστημα καὶ προοπτικὴ ἐνεργειακοῦ ἐφοδιασμοῦ.

### A. ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

1. Χριστοφόρου Λουκάς (Άκαδημαϊκός)
2. Άγαπητίδης Γεώργιος (ΚΑΠΕ)
3. Κακαρᾶς Ἐμμανουήλ (ΕΜΠ)
4. Χατζηαργυρίου Νικόλαος (ΕΜΠ/ΔΕΗ)

### B. ΕΛΛΗΝΕΣ ΕΜΠΕΙΡΟΓΝΩΜΟΝΕΣ

5. Γιαννίτσης Ἀναστάσιος (ΕΚΠΑ/ΕΛΠΕ)
6. Ζερβός Ἀρθούρος (ΔΕΗ)
7. Κάπρος Παντελής (ΕΜΠ)
8. Λάλας Δημήτριος (ΕΚΠΑ/ΥΠΕΚΑ)
9. Μπεργελές Γεώργιος (ΕΜΠ)
10. Μωυσῆς Ραφαήλ (τ. Πρόεδρος τοῦ ΣΕΕΣ/Ἀντιπρόεδρος IOBE)
11. Παλαιογιάννης Σπύρος (ΔΕΠΑ)
12. Πανάγος Θεόδωρος (ΡΑΕ)
13. Παπαδόπουλος Μιχαήλ (ΔΕΣΜΗΕ)
14. Πηλαβάκης Πέτρος (Παν/μιο Δυτ. Μακεδονίας)
15. Τίγκας Κωνσταντίνος (ΚΑΠΕ)
16. Τσατσαρώνης Γεώργιος (TU Berlin)
17. Τσουτρέλης Χαράλαμπος (τ. Καθηγητής ΕΜΠ)

Πίν. 1. Σύθεση τῆς Ὀμάδας Ἐργασίας.

Οἱ ἐκθέσεις τῶν μελῶν συζητήθηκαν στὶς 22 Ὀκτωβρίου 2010, σὲ κοινὴ σύσκεψη τῆς Ὀμάδας Ἐργασίας καὶ τῆς Ἐπιτροπῆς Ἐνέργειας στὴν Ἀνατολικὴ Αἴθουσα τοῦ Μεγάρου τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν. Τὰ κείμενα τῶν ἐκθέσεων, τὰ πρακτικὰ τῆς συνάντησης καὶ τὰ πορίσματα περιλαμβάνονται στὴν ἔκδοση τῆς Ἐπιτροπῆς Ἐνέργειας *Ἡλεκτροπαραγωγή στὴν Ἑλλάδα: Ὁρυκτὰ Καύσιμα, Ἀνανεώσιμες Πηγὲς Ἐνέργειας καὶ Προοπτικὴ Ἐνεργειακοῦ Ἐφοδισμοῦ* (Ἀθήνα 2011).

Ἡ Ἐπιτροπὴ Ἐνέργειας ἐπισημαίνει τὰ ἀκόλουθα πορίσματα τῆς Ὀμάδας Ἐργασίας ἐπὶ τοῦ θέματος.

## 1. ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΕΙΣ

### 1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ὁ τομέας τῆς ἐνέργειας συνιστᾷ σημαντικὸ παράγοντα ἀνάπτυξης τῆς ἑλληνικῆς οἰκονομίας. Ἡ σημερινὴ περίοδος ἀποτελεῖ τμῆμα μίας μακρᾶς μεταβατικῆς φάσης πρὸς τὴν «οἰκονομία χαμηλοῦ ἀνθρακα» καὶ τὴν αὐξημένη

περιβαλλοντική προστασία. Διευρύνονται οί καινοτομίες στις ενεργειακές τεχνολογίες, ύφίστανται όμως συχνές αλλαγές κατεύθυνσης και επιλογής στόχων.

Σε ό,τι αφορά την ηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα:

— Τη χρονική περίοδο 5/2009-4/2010 προήλθε από λιγνίτη (48,9%), Άνανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ, 17,0%), Φυσικό Άέριο (ΦΑ, 16,9%), πετρέλαιο (9,4%) και εισαγωγές (7,9% τὸ 2009).

— Ἡ οικονομική κρίση επέφερε σοβαρή πτώση τῆς ζήτησης με αποτέλεσμα νὰ προβλέπεται ἐπάρκεια μέχρι τὸ 2020, με ἔνταξη στοῦ συστήματος τῶν ὑπὸ κατασκευὴ μονάδων φυσικοῦ αἰρίου καὶ τῶν νέων λιγνιτικῶν μονάδων ποὺ προβλέπεται νὰ ἐγκατασταθοῦν.

— Μεσοπρόθεσμα εἶναι δυνατόν νὰ καλυφθοῦν οἱ ἀνάγκες ηλεκτρικῆς ἐνέργειας με χρήση λιγνίτη καὶ εἰσαγόμενου λιθάνθρακα, ΦΑ καὶ ΑΠΕ.

— Ἀπαιτεῖται αὐξήση τοῦ βαθμοῦ ἀπόδοσης τῶν ενεργειακῶν μονάδων, αὐξήση τῆς χρήσης τοῦ φυσικοῦ αἰρίου καὶ μείωση ἐκπομπῶν αερίων θερμοκηπίου καὶ κόστους.

— Ἐνδείκνυται ἡ ταχύτερη ὑλοποίηση τοῦ προγράμματος διασύνδεσης τῶν νήσων τοῦ Αἰγαίου στοῦ ἡπειρωτικοῦ συστήματος καὶ ἡ σύνδεση μεταξύ των.

— Ἡ παραγωγή ηλεκτρικῆς ἐνέργειας ἐπηρεάζεται ἀρνητικὰ ἀπὸ τὴν ἔλλειψη σταθεροῦ νομικοῦ πλαισίου καὶ ἀπὸ τὶς τοπικὲς κοινωνικὲς ἀντιδράσεις.

— Ἐπιβάλλεται ἡ ἐκμετάλλευση τῆς ἐνέργειας ποὺ ἀπορρίπτεται στοῦ περιβάλλον ἀπὸ θερμοκὸς σταθμοὺς καὶ ἡ συμμετοχὴ τῶν τοπικῶν κοινωνιῶν σὲ προγράμματα συμπαραγωγῆς.

— Θεωρεῖται ἀναγκαία ἡ διεξαγωγή σοβαροῦ διαλόγου συστηματικῆς ἐνημέρωσης τῶν τοπικῶν κοινωνιῶν σὲ κάθε ενεργειακῆ πρωτοβουλία εἴτε αὐτὴ ἀφορᾷ τὶς ΑΠΕ, εἴτε τὴν συμπαραγωγή, εἴτε τὴν ἐκμετάλλευση νέων κοιτασμάτων λιγνίτη.

## 1.2. ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### (α) Λιγνίτης

Τὸ ἐθνικὸ καύσιμο, ὁ λιγνίτης, στήριξε γιὰ σχεδὸν ἐξήντα χρόνια τὴν ηλεκτροπαραγωγή, καλύπτοντας παλαιότερα μέχρι τὸ 80% καὶ σήμερα περὶ τὸ 50% τῆς ζήτησης γιὰ φθηνὸ οἰκιακὸ, ἀγροτικὸ καὶ βιομηχανικὸ ρεῦμα, σὲ σύγκριση με τὴν τιμὴ τοῦ ρεύματος σὲ πολλὲς ἄλλες εὐρωπαϊκὲς χῶρες.

Ἡ λιγνιτική ἠλεκτροπαραγωγή συμβάλλει στὴν ἀσφάλεια τοῦ ἐνεργειακοῦ ἐφοδιασμοῦ τῆς Ἑλλάδας, ἔχει σταθερὸ καὶ προβλέψιμο κόστος ἐξόρυξης, καὶ προσφέρει σημαντικὸ ἀριθμὸ θέσεων ἐργασίας. Εἶναι ὅμως ἐξαντλήσιμος φυσικὸς πόρος καὶ σὲ σχέση μετὰ τὸ φυσικὸ ἀέριο προκαλεῖ αὐξημένη ἐκπομπὴ CO<sub>2</sub>. Μέχρι σήμερα ἔχουν ἐξορυχθεῖ 1,7 δισεκατομμύρια τόνοι λιγνίτη, ποὺ ἰσοδυναμοῦν περίπου μετὰ 215 ἑκατομμύρια τόνους πετρελαίου. Ἡ κοινωνικὴ ἀντίδραση γιὰ τὴν ἀνάπτυξη νέων λιγνιτικῶν κοιτασμάτων ἐκτὸς τῶν παρὰχωρήσεων τῆς ΔΕΗ στὴ Δυτικὴ Μακεδονία καθιστᾷ δύσκολη τὴν ἐκμετάλλευση νέων λιγνιτικῶν πεδίων. Ἡ ἀπόσυρση μέχρι τὸ 2020, λόγω παλαιότητας λιγνιτικῆς ἰσχύος, 900-1000 MW προβλέπεται νὰ ἀντικατασταθεῖ μετὰ δύο νέες μονάδες ἀντίστοιχῆς ἰσχύος σύγχρονης τεχνολογίας μετὰ χαμηλότερη ἐκπομπὴ CO<sub>2</sub>, ποὺ θὰ εἶναι ἀνταγωνιστικὲς ἐκείνων τοῦ ΦΑ. Ἡ προώθηση τῶν ἔργων αὐτῶν, σὲ συνδυασμὸ μετὰ τὴ σταδιακὴ ἀπόσυρση καὶ ἄλλων παλαιῶν λιγνιτικῶν μονάδων ΑΗΣ μετὰ τὸ 2020, θὰ ἐπιτρέψει τὴ λειτουργία τους μέχρι τὸ 2050, ὅπου προβλέπεται ἡ ἐξάντληση τῶν ἀποθεμάτων λιγνίτη.

Μετὰ τίς παρούσες τιμὲς κόστους τοῦ CO<sub>2</sub>, ἡ λιγνιτικὴ KWh εἶναι πιὸ οἰκονομικὴ ἀπὸ τὴν ἀντίστοιχη τοῦ ΦΑ. Ἀπὸ τὸ 2013 καὶ ἐξῆς, τὸ κόστος παραγωγῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας ἀπὸ λιγνίτη θὰ ἐπηρεασθεῖ ἀπὸ τὴν ἐπιβολὴ τοῦ κόστους ρύπων CO<sub>2</sub>, σύμφωνα μετὰ τίς δεσμεύσεις τῆς Ἑλλάδας γιὰ μείωση τῶν ἀερίων θερμοκηπίου. Μετὰ βάση τὰ σημερινὰ δεδομένα, καὶ ἐφόσον ἡ διαφορὰ κόστους τοῦ λιγνίτη πρὸς τὸ πετρέλαιο ὑπερβαίνει τὰ 30 εὐρὼ ἀνὰ τόνο ἰσοδύναμου πετρελαίου καὶ τὸ κόστος ρύπων εἶναι περίπου στὰ σημερινὰ ἐπίπεδα, οἱ λιγνιτικοὶ ἀτμοηλεκτρικοὶ σταθμοὶ (ΑΗΣ) εἶναι ἀνταγωνιστικότεροι ἐκείνων τοῦ φυσικοῦ ἀερίου.

Ἡ ὑποκατάσταση ΑΗΣ, ποὺ εἶναι σταθμοὶ βάσεων, μετὰ ΑΠΕ δὲν εἶναι δυνατὴ λόγω τῶν διαφορετικῶν συνθηκῶν λειτουργίας τῶν δευτέρων σὲ ὅ,τι ἀφορᾷ τὴν ἀξιοπιστία καὶ τὴν ἀσφάλεια παροχῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας.

Ἡ προβλεπόμενη κατασκευὴ τίς ἐπόμενες δεκαετίες δύο νέων λιγνιτικῶν σταθμῶν, ἰσχύος 600 MW ἕκαστος, θὰ διατηρήσει τὴ συμμετοχὴ τοῦ λιγνίτη στὸ μείγμα καυσίμων γιὰ παραγωγὴ ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας, θὰ ἐπιτρέψει τὴν ἀπομάκρυνση παλαιῶν λιγνιτικῶν σταθμῶν καὶ θὰ ἀντισταθμίσει αὐξήσεις κόστους τῆς κιλοβατώρας ἀπὸ ἄλλες πηγές.

Γιὰ τὴν ὀρθολογικὴν χρῆση τῶν διαθέσιμων ποσοτήτων λιγνίτη συνιστᾷται ἡ ἐπανεξέταση ἀνάμειξης τοῦ λιγνίτη μετὰ κοινοποιημένο εἰσαγόμενον λιθάνθρακα ἀλλὰ καὶ βιομάζα.

Συνιστᾷται ἡ ἐκμετάλλευση μέρους τῆς ἀπορριπτόμενης θερμότητας στοὺς νέους σταθμοὺς γιὰ τηλεθέρμανση καὶ ἄλλες χρήσεις.

**(β) Φυσικό αέριο (ΦΑ)**

Από τους τρεις όρυκτους πόρους (λιγνίτη, πετρέλαιο, ΦΑ) που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα, ο πλέον συμφέρων ενεργειακά και περιβαλλοντικά είναι το ΦΑ. Οί εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΑ απαιτούν μικρότερο χρόνο κατασκευής, έχουν χαμηλότερο κόστος επένδυσης και παρουσιάζουν τις χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>.

Η ηλεκτροπαραγωγή είναι ο σημαντικότερος καταναλωτής φυσικού αερίου στην Ελλάδα, με ποσοστά 68,1%, 69,8% και 73,7% των εισαγόμενων ποσοτήτων το 2005, 2007 και 2009 αντίστοιχως.

Η αύξηση των εισαγωγών ΦΑ μεγεθύνει την ενεργειακή εξάρτηση της χώρας από τρίτες χώρες, και ό,τι αυτό συνεπάγεται ως προς την ασφάλεια του ΦΑ και των τιμών του.

Ενδείκνυται διαφοροποίηση των πηγών εισόδου του ΦΑ.

Το LNG (Liquefied Natural Gas, Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο), αν και εξαρτάται από την πρόσβαση σε σταθμούς υγροποίησης και επακόλουθης επαναμετατροπής του σε αέριο, παρέχει ενεργειακή ελαστικότητα και απαλλαγή από τα προβλήματα ασφάλειας αγωγών μεταφοράς του ΦΑ.

Η διανεμημένη συμπαραγωγή με μονάδες των 20-50 MW κατά μήκος του αγωγού ΦΑ με δραστηριότητες εκμετάλλευσης της θερμότητας διαφαίνεται οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον.

**(γ) Πετρέλαιο**

Αναγνωρίζεται η περιορισμένη συνεισφορά του πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή, με σημαντικό όμως ρόλο στην τοπική ασφάλεια εφοδιασμού των μη διασυνδεδεμένων συστημάτων.

**(δ) Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**

Η μέχρι σήμερα εκμετάλλευση των σημαντικών ΑΠΕ της Ελλάδας δεν είναι ικανοποιητική.

Η προγραμματισμένη διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή (40%) μέχρι το 2020 κρίνεται ιδιαίτερα δαπανηρή και δύσκολο να επιτευχθεί.

Η αξιοπιστία και η αυτονομία της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ προϋποθέτει έργα υποδομής, και ειδικότερα έργα άντλησιοταμίευσης και ενίσχυσης του δικτύου.

Η έως σήμερα συνεισφορά των ΑΠΕ βασίζεται κυρίως στα υδροηλεκτρικά, τα μεγάλα αιολικά πάρκα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ενδείκνυται η διερεύνηση χρήσης και άλλων ώριμων τεχνολογιών ΑΠΕ,

όπως οι Ήλιοθερμικές Συγκεντρωτικές Τεχνολογίες (Concentrated Solar Thermal Power).

Η επίτευξη του φιλόδοξου στόχου του 40% της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ το 2020 προϋποθέτει σημαντικές αλλαγές στις υπάρχουσες διαδικασίες άδειοδότησης, καθώς και συστηματική ενημέρωση των τοπικών κοινωνιών.

### 1.3. ΑΕΡΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Η Ελλάδα οφείλει να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά το διάστημα 2008-2012 σε 25% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Οι συνολικές εκπομπές στη χώρα το 2009 παρουσιάζουν αύξηση 24,9%, και οι εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ηλεκτροπαραγωγή το 2007 αύξηση περίπου 35% σε σχέση με το 1990.

Η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ηλεκτροπαραγωγή είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη συρρίκνωση του μεριδίου του λιγνίτη και την αύξηση εκείνου του ΦΑ και των ΑΠΕ στο τελικό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και με τη μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, με αποδοτικότερα έργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής και με συμπαραγωγή.

Η εφαρμογή των τεχνολογιών δέσμευσης του CO<sub>2</sub> επιβαρύνει σημαντικά τα οικονομικά των θερμοηλεκτρικών μονάδων.

Η έλλειψη επαρκούς τεχνηρίωσης χώρων αποθήκευσης και το υψηλό κόστος για το διαχωρισμό, τη μεταφορά και την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> καθιστούν ιδιαίτερα προβληματική τη δέσμευση και την αποθήκευση (Carbon Capture and Storage, CCS) του CO<sub>2</sub> για την Ελλάδα.

### 1.4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Η αύξημένη άβεβαιότητα που χαρακτηρίζει το μέλλον της ελληνικής οικονομίας κάνει αναγκαία τη μεταβολή βασικών αξόνων και προσδιοριστικών παραγόντων που διαμορφώνουν την εθνική ενεργειακή στρατηγική. Έτσι, ο ενεργειακός σχεδιασμός πρέπει να είναι ικανός να αξιολογεί την επίδραση κάθε ενεργειακής επιλογής στο ΑΕΠ και το δημόσιο χρέος, ενώ πρέπει να χαρακτηρίζεται από ευελιξία, ώστε ούτε να δημιουργεί σπατάλη πολύτιμων πόρων σε περίπτωση επαλήθευσης των άρνητικών υποθέσεων για την οικονομία, αλλά ούτε ή ανεπάρκεια ενέργειας να αποτελέσει τροχοπέδη στην περίπτωση επίτευξης υψηλών ρυθμών ανάπτυξης. Προϋπόθεση για την επίτευξη των τελευταίων είναι ή προώθηση διαρθρωτικών αλλαγών, ή προσέλκυση επενδυτών, ή σταθερή και αξιόπιστη νομοθεσία, ή αξιοποίηση του διαθέσιμου ελληνικού δυναμικού και ή αποφυγή διαρροής αξιών επιστημόνων στο εξωτερικό.

Έχει υιοθετηθεί ο στόχος του 20% για τις ΑΠΕ, που εξειδικεύεται σε 40% στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% στις θερμικές ΑΠΕ και 10% στα βιοκαύσιμα. Στην Ελλάδα προβλέπεται 9% εξοικονόμηση ενέργειας στην τελική κατανάλωση το 2016. Ένδεικνυται να διερευνηθεί περαιτέρω η σημασία των βιοκαυσίμων στο ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας.

Το ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας αναμένεται να διαφοροποιηθεί σημαντικά ενόψει των ευρωπαϊκών στόχων του 2020, με σημαντική αύξηση των ΑΠΕ αλλά και του ΦΑ και σύγχρονη μείωση στη χρήση πετρελαίου και λιγνίτη.

Η ασφάλεια εφοδιασμού της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια, εφόσον συνεχισθεί η τάση χρήσης του ΦΑ στην ηλεκτροπαραγωγή, είναι σε σημαντικό βαθμό συνδεδεμένη με την ασφάλεια εφοδιασμού σε φυσικό αέριο.

Η Ελλάδα υπολείπεται από 7,6% έως 9,8% σε αποδοτικότητα για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, κυρίως λόγω της έλλειψης συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού.

Αν και η τεχνολογία CCS δεν έχει προτεραιότητα υλοποίησης στη χώρα μας, η Ελλάδα πρέπει να παρακολουθεί την τεχνολογία αυτή συμμετέχοντας σε έρευνητικά προγράμματα και σε πιλοτικά έργα της ΕΕ.

Συνιστάται η παρακολούθηση της εξέλιξης της πυρηνικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής και η δημιουργία επιστημονικού και τεχνικού προσωπικού «κρίσιμης μάζας».

Ένδεικνυται η ανάληψη ενημέρωσης των πολιτών για όλες τις μορφές ηλεκτροπαραγωγής, ώστε αυτές να τύχουν ευρύτερης κοινωνικής αποδοχής. Ένδεικνυται, επίσης, η προσφορά κινήτρων στις τοπικές κοινωνίες.

## 2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κρίνεται αναγκαία και επείγουσα η διαμόρφωση συνολικού ενεργειακού σχεδιασμού για τα επόμενα 10 έως 20 έτη, ο οποίος να επικαιροποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα σύμφωνα με τις ανάγκες και τις δεσμεύσεις της χώρας, στο πλαίσιο του οποίου αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Να εξετασθεί η συνέχιση της συμβολής του λιγνίτη ως ενεργειακού καυσίμου τις επόμενες δεκαετίες σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των ΑΠΕ και του ΦΑ.

- Να επιδιωχθεί βελτίωση της απόδοσης του λιγνίτη με επαναπροσδιορισμό του ρόλου του λιθάνθρακα στο ενεργειακό μείγμα στην περίπτωση των νέων λιγνιτικών ΑΗΣ.

- Νά διασφαλισθεῖ ἡ παροχὴ ΦΑ στὸ μέλλον μὲ τὴν ὀλοκλήρωση τοῦ «τέταρτου ἀγωγοῦ» καὶ τῶν σταθμῶν LNG.
- Νά διαφοροποιηθοῦν οἱ πηγές προμήθειας ΦΑ καὶ νά ἀναπτυχθοῦν οἱ σχετικὲς ὑποδομές, ἐφόσον τὸ ΦΑ καταστῆ τὸ βασικὸ καύσιμο γιὰ τὴν παραγωγὴ ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας.
- Νά ἐξετασθεῖ ἡ ἐπιλογὴ τοῦ LNG, δεδομένων τῶν δυσκολιῶν τῶν ἀγωγῶν ΦΑ.
- Νά μειωθεῖ σταδιακὰ ἡ χρῆση τοῦ πετρελαίου γιὰ ἠλεκτροπαραγωγὴ καὶ νά ἀυξηθεῖ ἡ διείσδυση τῶν ΑΠΕ στὰ νησιά.
- Νά κατασκευασθοῦν νέα ἔργα ἀντλησιοταμίευσης καὶ νά ἀποπερατωθοῦν ὅσα ὑδροηλεκτρικὰ ἐκκρεμοῦν.
- Νά ἐγκατασταθοῦν ἀεροστρόβιλοι ἀνοικτοῦ κύκλου ἢ μονάδες συνδυασμένου κύκλου πολλαπλῶν στροβίλων γιὰ τὴν καλύτερη διαχείριση τῶν μεταβολῶν παραγωγῆς τῶν αἰολικῶν πάρκων.
- Νά ἐπιδιωχεῖ συμπαραγωγὴ θερμότητας καὶ ἠλεκτρισμοῦ στὶς ὑπάρχουσες μονάδες.
- Νά ἀξιολογηθοῦν ὅλες οἱ ἐνεργειακὲς ἐπενδύσεις μὲ προτεραιότητα τὴ μείωση τοῦ δημόσιου χρέους καὶ τὴ δημιουργία νέων θέσεων ἐργασίας. Νά ἐλαχιστοποιηθοῦν οἱ ἐνεργειακὲς ἐπενδύσεις ποὺ ἄμεσα ἢ ἔμμεσα ἐπιβαρύνουν τὸ δημόσιο χρέος.
- Νά μειωθεῖ ἡ συμμετοχὴ στὴν παραγωγὴ ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας ἐκείνων τῶν τεχνολογιῶν ποὺ εὐθύνονται περισσότερο γιὰ τὴν παραγωγὴ ρύπων (λιγνιτικὲς καὶ πετρελαϊκὲς μονάδες).
- Νά γίνῃ ἡ διασύνδεση τῶν μὴ διασυνδεδεμένων νησιῶν μὲ τὸ ἠπειρωτικὸ σύστημα τῆς χώρας μὲ τὸν ταχύτερο δυνατὸ ρυθμὸ.
- Νά ἀναπτυχεῖ μέσω ἐπιδεικτικῶν προγράμματος μικρῆς κλίμακας ἡ τεχνολογία CSP (Concentrated Solar Power), ἐφόσον εἶναι ὄριμη καὶ ὑποσχόμενη τεχνολογία ΑΠΕ.
- Νά ἐντατικοποιηθοῦν οἱ ἐπενδύσεις σὲ ἔργα ΑΠΕ μὲ μακροπρόθεσμη οἰκονομικὴ βιωσιμότητα.
- Νά μελετηθοῦν τεχνολογίες ἀποθήκευσης ἐνέργειας, ἠλεκτρικῆς καὶ θερμικῆς.
- Νά ἐπαναπροσδιοριστεῖ τὸ ἀναγκαῖο μίγμα καυσίμων γιὰ ἐνεργειακὴ ἀνεξαρτησία.
- Νά προωθηθεῖ δυναμικὰ ἡ ὀρθολογικὴ χρῆση καὶ ἡ ἐξοικονόμηση τῆς ἐνέργειας.



### 3. ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ

Προτείνεται:

(1) Ἡ ἀνάπτυξη ἔργων ἐνεργειακῆς ὑποδομῆς, ἡ ἐπέκταση τῶν ἠλεκτρικῶν δικτύων μεταφορᾶς, ἡ διασύνδεση νήσων μεταξύ τους καὶ μὲ τὸ ἡπειρωτικὸ σύστημα καὶ ὁ ἐκσυγχρονισμὸς δικτύων διανομῆς.

(2) Ὁ ἐπαναπροσδιορισμὸς τοῦ ἐνεργειακοῦ μείγματος ὑπὸ τις σημερινές οἰκονομικὲς συνθῆκες λαμβάνοντας ὑπόψιν τὴν ἀνάπτυξη, τὴν αὔξηση θέσεων ἐργασίας καὶ τὴν ἐνεργειακὴ ἀσφάλεια.

(3) Ἡ μελέτη εἰσαγωγῆς στὴν Ἑλλάδα, κυρίως στὰ νησιὰ τοῦ Νοτίου Αἰγαίου, Ἡλιοθερμικῶν Συγκεντρωτικῶν Μονάδων.





ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 17ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ 2011

---

ΑΝΑΓΓΕΛΙΑ ΘΑΝΑΤΟΥ

Ὁ Πρόεδρος κ. Ἀπόστολος Γεωργιάδης ἀναγγέλλει τὸ θάνατο τοῦ Ἀντεπιστέλλοντος Μέλους τῆς Ἀκαδημίας Ἐμμανουὴλ Ἀρώνη καὶ ἀναγιγνώσκει σημεῖωμα τοῦ κ. Κωνσταντίνου Βαγενᾶ σχετικὰ μὲ τὸ βίο καὶ τὸ ἔργο τοῦ ἐκλιπόντος.

«Ὁ Καθηγητὴς Ἐμμανουὴλ Ἀρώνης γεννήθηκε στὸ Σίδνεϊ τὸ 1932, γόνος Ἑλλήνων μεταναστῶν ἀπὸ τὰ Κύθηρα. Σπούδασε μὲ κρατικὴ ὑποτροφία στὸ Πανεπιστήμιο τοῦ Σίδνεϊ, ὅπου ἄρχισε νὰ διδάσκει ἀπὸ τὸ 1961 στὸ Τμῆμα Χημείας. Ἦταν διακεκριμένος ἀνόργανος χημικὸς καὶ ἀσχολήθηκε κυρίως μὲ τὴ μελέτη τῆς μοριακῆς δομῆς τῶν χημικῶν ἐνώσεων. Ἔγινε Ἐταῖρος (Fellow) τῆς Αὐστραλιανῆς Ἀκαδημίας καὶ τῆς Royal Society of Chemistry τοῦ Λονδίνου. Πρόσφερε πολλὰ στὴν ἑλληνικὴ κοινότητα τῆς Αὐστραλίας, τῆς ὁποίας ὑπῆρξε ἐξέχον στέλεχος».

Ἡ Ὀλομέλεια τηρεῖ ἐνὸς λεπτοῦ σιγῆ εἰς μνήμην τοῦ ἐκλιπόντος.



ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 10ΗΣ ΜΑΪΟΥ 2011

ΙΔΙΑΖΟΥΣΑ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ  
ΑΠΟ ΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΟΜΙΛΙΑ ΤΟΥ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ κ. ΠΑΝΟΥ Α. ΛΙΓΟΜΕΝΙΔΗ

1. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HD: ΜΙΑ ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΕΝΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΣΥΜΠΛΗΝ

Στην περίοδο της ανάπτυξης διαφόρων ιδεών σχετικών με την όντολογική έρμηνεία της Κβαντικής Θεωρίας, ο Werner Heisenberg πρότεινε (1958)<sup>1</sup> ένα φιλοσοφικώς ικανοποιητικό μοντέλο για την εξέλικτική διαδικασία του κόσμου μας. Σήμερα, οι περισσότεροι επιστήμονες που έπιζητούν μια λογικά συνεπή αντίληψη του φυσικού κόσμου, φαίνεται να ασπάζονται τις ιδέες του Heisenberg.

Θά επιχειρήσω έδω τη διατύπωση μιās ιδιάζουσας θεώρησης τών διαδικασιών που καθορίζουν την εξέλικτική πορεία του κόσμου μας. Η θεώρηση αυτή προέκυψε από την έπεξεργασία και τη σύνθεση τών όντολογικών ιδεών και απόψεων του Werner Heisenberg, του Άριστοτέλη, του Karl Popper, του Paul Adrien Maurice Dirac, του Wolfgang Pauli, του David Bohm, του Alfred North Whitehead, και τών συνακόλουθων ιδεών της πραγματιστικής ψυχολογίας του William James, καθώς και με αναφορά στις κρίσιμες πρόσφατες εξελίξεις της Κβαντικής Θεωρίας και της Θεωρίας της Πληροφορικής. Η άκριβης ιστορική καταγωγή αυτής της όντολογικής θεώρησης μου είναι άγνωστη. Θά έλεγα πως οι βασικές ιδέες που διατυπώθηκαν στο βιβλίο του D. Bohm *Quantum Theory* (1951), μαζί με σχετικές φιλοσοφικές απόψεις του K. Popper, ήσαν καθοριστικές για

---

1. W. Heisenberg (1958), *Physics and Philosophy*, ch. III (New York: Harper and Row).

τή μορφοποίηση των ιδεών του Heisenberg περί «άντικειμενικών επιρροπειών» και τή συσχέτισή τους με τήν άριστοτελική ιδέα τής «δυνάμει» καταστάσεως του έξελισσόμενου φυσικού κόσμου.

Στήν ούσία της, ή κεντρική ιδέα του Heisenberg, ενισχυμένη από τις απόψεις του Dirac και από ιδέες των Popper, Wheeler και άλλων, είναι πώς τα «ύποατομικά σωματίδια», ή «κυματοσωματίδια», δηλαδή τα «στοιχειώδη κβαντικά φαινόμενα» του μικρόκοσμου, δέν άφοροϋν σε «πραγματικά φαινόμενα» με τήν έννοια τής φυσικής πραγματικότητας, όπως αυτή άπορρέει από τήν έμπειρία μας.

Η μυστηριώδης δραστηριότητα των ύποατομικών φαινομένων φαίνεται πώς είναι λογικά ασύμβατη με τις ιδιότητες «τής τοπικής δράσης» και τής «άναγωγικής προσέγγισης»<sup>2</sup>, τις όποιες δικαιολογεί ή έμπειρία μας και υποστηρίζει ή κλασική Φυσική. Η έρμηνεία των πειραματικών δεδομένων άπαιτεί τήν πληροφοριακή έπεξεργασία των λειτουργικών μορφών τής κίνησης και τής συνδετικότητας.

Αναφερόμαστε σε αυτήν τήν όντολογική θεώρηση τής έξελικτικής πορείας του κόσμου μας ως «Μοντέλο Heisenberg-Dirac», ή έν συντομία ως «Μοντέλο HD».

## 2. Η ΟΝΤΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΤΑΣΗ ΤΟΥ HEISENBERG

Ο Werner Heisenberg<sup>3</sup> πρότεινε ότι αυτό που θα όνομάζαμε «φυσική κατάσταση του ένεργου περιβάλλοντος<sup>4</sup> κάποιου συγκεκριμένου φυσικού φαινομένου» αναφέρεται σε ένα σύνολο «άντικειμενικών επιρροπειών», ένα είδος άριστοτελικής «δυνάμει» καταστάσεως του ένεργου περιβάλλοντος του έξελισσόμενου φυσικού φαινομένου. Άφορᾷ τήν κυλιόμενη ιδιότητα τής «δυνητικής» σχέσεως του «πριν» με τό «μετά».

Με αυτήν τήν πρόταση, ό Heisenberg αλλάζει τό τοπίο τής έξελικτικής διαδικασίας του κόσμου μας. Τό μέλλον δέν βασίζεται πλέον σε αυτό «που

2. Π.Α. Λιγομενίδης, *Η φλόδα του βερίκοκου* (Έλληνικά Γράμματα, 2002).

3. W. Heisenberg, *ξ.ά.*, σμ. 1.

4. Τό «ένεργό περιβάλλον» του φυσικού φαινομένου καθορίζεται κατά περίπτωση από τήν κυλιόμενη «προσεγγιστική όριοθέτηση» του φαινομένου (κεφ. 9, σμ. 6). Αναπροσαρμόζεται σε χώρο και χρόνο αναλόγως προς τήν κατά περίπτωση έξελικτική διαδικασία του φαινομένου.

είναι», δηλαδή στο παρελθόν. Η εξελικτική διαδικασία «δεν σπρώχνεται τυφλά» από το παρελθόν αλλά εξαρτάται από αυτό «πού μπορεί να είναι». Το μέλλον δεν είναι δεδομένο, όπως θα έλεγε ο Ilya Prigogine. Αυτό πού θα συμβεί πραγματικά «έλκεται δημιουργικά από το μέλλον», αφού το «δυνάμει» είναι άκαθόριστο μέχρι την έκβαση, αφού το μέλλον φτιάχνεται έφευρετικά σε κάθε λεπτό της εξελικτικής διαδικασίας. Θα έλεγε κανείς πώς οι εξελικτικές επιρρέπειες της Φύσης καθρεφτίζουν με κάποιον τρόπο «τις μνημες του μέλλοντος». Κρατείστε αυτήν τη θεμελιώδη διαφορά στο νοῦ σας!

Η ιδιότητα της έγγενοῦς «έπιρρεποῦς συνδετικότητας» (παριστάνεται με τὸ σύμβολο  $\Psi_n$ ), δηλαδή ἡ ιδιότητα τῆς «δυνητικῆς» σχέσεως τοῦ «πρὶν» με τὸ «μετὰ» τὴν ὁποία πρότεινε ὁ Heisenberg, προδιαγράφει τὴν κατανομὴ τῶν πιθανοτήτων (τῶν ἐν δυνάμει ἐξελικτικῶν δυνατοτήτων) πού θὰ διαμορφώσουν τὴν ἐξελικτικὴ πορεία τοῦ τοπικοῦ περιβάλλοντος.

Ἐφαρμόζεται σὲ ὅλες τὶς κλίμακες, ἀπὸ τὶς ὑποατομικὲς κλίμακες τοῦ μικρόκοσμου μέχρι τὶς κλίμακες πολυπλοκότητας τῶν ἀνθρώπινων κοινωνιῶν. Αὐτὲς οἱ ἐγγενεῖς ἀντικειμενικὲς ἐπιρρέπειες πού ἀφοροῦν τὶς «δυνάμει» ἐξελικτικὲς τάσεις τοῦ φυσικοῦ φαινομένου δὲν εἶναι παρατηρήσιμες, εἶναι μόνο στατιστικὰ προσδιορίσιμες, καὶ ἀφοροῦν τὶς μὴ ἀναστρέψιμες μεταβάσεις ἀπὸ τὸ «δυνάμει» στὸ «ἐνεργεία». Οἱ βαθμοὶ δραστηριότητας τῆς «έπιρρεποῦς συνδετικότητας» μετρῶνται ἀπὸ ἀντίστοιχους βαθμοὺς πιθανότητας. Ἡ ἐκάστοτε ἐξελικτικὴ ἔκβαση τοῦ φυσικοῦ φαινομένου, ἀπρόβλεπτη ἐκ τῶν προτέρων, καθορίζεται με στατιστικὴ ἀκρίβεια ἀπὸ τὴ Φύση «ρίχνοντας τὰ φτιαγμένα ζάρια της», ἀν θελήσει κανεὶς νὰ χρησιμοποιήσει αὐτὴν τὴν ἔκφραση ὡς ἀπάντηση στὴ γνωστὴ ἐρώτηση τοῦ Einstein γιὰ τὸ ἀν ὄντως «ἡ Φύση παίζει ζάρια». Ἡ μετάβαση ἀπὸ τὸ «δυνάμει» στὸ «ἐνεργεία» εἶναι μιὰ ἐγγενὴς πράξη «λειτουργικὰ κατευθυνόμενη», ὅπως θὰ ἐξηγήσουμε στὴ συνέχεια.

Ἐνα σημαντικό ἀντικείμενο ἔρευνας τῆς Φυσικῆς καὶ τῆς Ἐπιστήμης τῆς Πληροφορικῆς σήμερα εἶναι νὰ βροῦμε με ποιὲς διαδικασίες καὶ με ποιὸς κανόνες «φτιάχνονται τὰ ζάρια τῆς Φύσης», δηλαδή νὰ προσδιορίσουμε με ποιὲς διαδικασίες ἐπιλέγονται οἱ κατανομὲς τῶν πιθανοτήτων πού καθορίζουν τὶς «δυνητικὲς ἐξελικτικὲς ἐπιλογὲς τῆς Φύσης».

### 3. ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HD

#### 3.1. ΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΤΗΤΑ

Τὰ στοιχειώδη συστατικά τοῦ κόσμου μας εἶναι ἡ κίνηση καὶ ἡ συνδετικότητά. Ὅλα τὰ υπόλοιπα, ὑλικά ἀντικείμενα καὶ φυσικὲς διαδικασίες, ὁ χῶρος καὶ ὁ χρόνος, εἶναι παράγωγα «κίνησης καὶ συνδετικότητας».

**Κίνηση:** Στὰ ἔσχατα ὄρια τῆς ἀναζήτησης τῶν «στοιχειωδῶν συστατικῶν τῆς ὕλης» βρίσκουμε μόνο τὴν ἄυλη κίνηση. Ἡ κίνηση εἶναι ἡ ἔσχατη αἰτία ὅλων τῶν ἐξελικτικῶν φαινομένων τοῦ κόσμου μας. Στὸ θέμα αὐτὸ πρέπει νὰ προσέξουμε ὅτι οἱ θεμελιώδεις ἔννοιες στὰ δρώμενα τοῦ μικρόκοσμου δὲν εἶναι τὰ «σωματίδια», εἶναι οἱ μεταπτώσεις καὶ οἱ μετασχηματισμοί, δηλαδή εἶναι τὰ «κβαντικὰ συμβάντα», εἶναι ἡ κίνηση καὶ ὄχι τὰ ἀντικείμενα. Αὐτὴ ἡ ἐπαναστατικὴ ἀνατροπὴ στὴ δεσπόζουσα νοοτροπία μᾶς λέει πὼς «τὸ γίγνεσθαι προηγεῖται τοῦ εἶναι», ἀφοῦ «τὸ γίγνεσθαι», δηλαδή ἡ κίνηση, παίζει ἀποφασιστικὸ ρόλο στὴν κατασκευὴ τοῦ «εἶναι», τοῦ στοιχειώδους σωματιδίου.

Κατ' ἐπέκταση τῶν παρατηρήσεων αὐτῶν μπορούμε νὰ ποῦμε πὼς τὸ «εἶναι» δὲν ἔχει νόημα χωρὶς τὸ «γίγνεσθαι», καὶ πὼς καὶ αὐτὴ ἡ ἰδέα τῆς «ὑπαρξῆς» δὲν ἔχει νόημα χωρὶς τὴ δυνατότητα τῆς ἀλλαγῆς, δηλαδή χωρὶς τὴν κίνηση. Ἄν τὸ καλοσκεφεῖ κανεὶς, αὐτὴ ἡ ἄποψη, πέρα ἀπὸ ἀπατηλὲς μεταφυσικὲς καὶ μυστικιστικὲς ἐπεκτάσεις τίς ὁποῖες μπορεῖ νὰ ὑπαινίσσεται, εἶναι θεμελιωδῶς «ἐπιστημονικὴ». Ἴσως νὰ ἀποτελεῖ μιὰ καλὴ ἀρχὴ γιὰ νὰ κατανοήσουμε τὴν κβαντικὴ συμπεριφορὰ τοῦ χασοκοῦ κόσμου μας.

**Συνδετικότητά:** Ὁ θαυμαστός κόσμος μας ὀφείλει τὴν ἐξελικτικὴ δημιουργικότητά του καὶ τὴν ἀπέραντη πολυποικιλία του καὶ στὴν ἄλλη ἐγγενὴ ἰδιότητα τῆς ἐπιρρεποῦς συνδετικότητας τῆς Φύσης.

Μέσα ἀπὸ «τὴν πληροφορικὴ ἀντίληψη τοῦ γίγνεσθαι», ὁ κόσμος μας δὲν εἶναι μόνο αὐτὸ πὸ φαίνεται, δηλαδή ἓνα πολύπλοκο δυναμικὸ θέατρο ὑλικῶν ἀντικειμένων καὶ φυσικῶν διαδικασιῶν. Ὁ κόσμος μας εἶναι, στὴν οὐσία, ἓνα ἀπεριόριστο πολύπλοκο δυναμικὸ ἐπικοινωνιακὸ πλέγμα ἐπεξεργασίας, ἐρμηνείας καὶ ἐπικοινωνίας «μορφῶν κίνησης καὶ ἐπιρρεποῦς συνδετικότητας».

Μποροῦμε νὰ ποῦμε, ὅτι:

«Ὁ ἀντιληπτός κόσμος εἶναι ἡ μὴ ἀντιληπτὴ ὀργάνωση κίνησης καὶ ἐπιρρεποῦς συνδετικότητας». Τὸ βασικὸ ἀγαθὸ τῆς ἐπικοινωνιακῆς ἀνταλλαγῆς εἶναι ἡ πληροφορία.



Μπορούμε ακόμα να προσθέσουμε ότι αν κάτι δέν κινεῖται, δηλαδή δέν ἀλλάζει, ἢ δέν συσχετίζεται, δέν συνδέεται μὲ κάτι ἄλλο, τότε δέν ὑπάρχει. Ἡ ἔννοια τῆς «ὑπαρξίης», ὡς ἐνιαῖο συνεχτικὸ «βλον», ἀναγνωρίζεται, δηλαδή ἀποκτᾶ «ταυτότητα», μόνο σὲ σχέση μὲ τὸ περιβάλλον.

### 3.2. ΣΥΛΛΟΓΙΚΟΤΗΤΑ

Ἔλα τὰ «φυσικὰ φαινόμενα», τὰ ὑλικὰ ἀντικείμενα καὶ οἱ φυσικὲς διαδικασίες, δηλαδή ὅλες οἱ ἐξελικτικὲς μορφὲς τοῦ κόσμου μας, ξεδιπλώνουν τὴν προσωρινὴ ὑπαρξιακὴ διαδρομὴ τους στὸ συμβατικὸ χρόνο καὶ χῶρο, καὶ ἐμπλέκονται σὲ μιὰ ἀτέρμονη ἱεραρχικὴ συλλογικὴ πληροφοριακὴ ἐπεξεργασία καὶ ἐπικοινωνία, μὲ αὔξηση τῆς πολυπλοκότητος καὶ τῆς ἐπικοινωνιακῆς δικτύωσης.

Ἡ πληθυσμιακὴ δράση τῆς πληροφοριακῆς ἐπεξεργασίας καὶ τῆς ἐπικοινωνίας τῶν μορφῶν, δηλαδή ἡ «συλλογικότητα», χαρακτηρίζει παντοῦ τὴν ἐξελικτικὴ διαδικασία τοῦ κόσμου μας. Μὲ ἀπλὰ λόγια, στὸ φυσικὸ κόσμο μας, τὸ «μέρος» ἔχει νόημα μόνο σὲ σχέση μὲ τὴν «ὅλότητα»<sup>5</sup>.

Ἡ ἐπεξεργασία τῆς πληροφορίας καὶ ἡ συνεχῆς ἐξελικτικὴ ἐπικοινωνία τῶν μορφῶν τοῦ κόσμου μας ἀποτελοῦν τὴ μηχανὴ τῆς ἐξέλιξης. Εἴμαστε σὲ θέση νὰ διακρίνουμε τὴν παγκόσμια ἐξελικτικὴ διαδικασία τοῦ «γίγνεσθαι» ὡς μιὰ ἱεραρχικὰ ἐξελισσόμενη διαδικασία «ἐγκλειδωμένων ὀμαδοποιήσεων καὶ διάχυσης φαινομένων-μέσα-σὲ-φαινόμενα», ὑπὸ τὴν ἐπίδραση τοπικῶν ἐντοχισμένων πεδίων δυνάμεων ἐπιρροεῶς συνδετικότητας,  $\Psi_n$ , ποὺ δημιουργοῦνται ἐγγενῶς στὴ Φύση. Οἱ δυνάμεις ἐπιρροεῶς συνδετικότητας ἀποκτοῦν ἰδιαιτέρη σημασία στὶς ὀμαδοποιήσεις τῆς ἀνθρώπινης κοινωνίας.

Εἶναι σημαντικό νὰ διαγνώσει κανεὶς ἀν ἡ ἐξελικτικὴ πορεία τοῦ κόσμου μας ἀκολουθεῖ κάποια «κατευθυνόμενη ἐπιρροπὴ συνδετικότητας», ἡ ὁποία θὰ μπορούσε νὰ τὴν προικοδοτήσει μὲ κάποια «σκοπιμότητα».

### 3.3. ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΓΚΛΕΙΔΩΣΗ + ΔΙΑΧΥΣΗ

Γιὰ μιὰ μεγάλη κατηγορία δυναμικῶν φαινομένων ποὺ λειτουργοῦν μακριὰ ἀπὸ ἰσορροπία, «μικρὲς, ἀκόμη καὶ ἀπειροελάχιστες, διαταραχὲς μπορεῖ νὰ ἐνισχυθοῦν καὶ νὰ προκαλέσουν μεγάλα ἢ καὶ καταστροφικὰ ἀποτελέσματα».

5. Μὲ κάποιον τρόπο αὐτὸ τὸ ἀξίωμα θυμίζει τὸ χαρακτῆρα τῆς μυστικιστικῆς φιλοσοφίας τῶν ἀνατολικῶν θρησκειῶν.

τα». Τέτοια «άσταθῆ» δυναμικά φαινόμενα είναι ειδικού ενδιαφέροντος, ἀφοῦ δύνανται νὰ δημιουργήσουν νέες μορφές φαινομένων.

Υπάρχει πληθώρα μεταπτωτικῶν φαινομένων «χιονοστιβάδας» στὴ Φύση καὶ στὶς ἀνθρώπινες κοινωνίες, τὰ ὁποῖα μελετῶνται. Παραδείγματα ἐκτείνονται (1) στὶς ἀνθρώπινες κοινωνίες, ὅπως οἱ δυσανάλογες ἐπιδράσεις ψευδῶν εἰδήσεων στὴν πολιτικὴ ἢ στὸ χρηματιστήριον, (2) στὸν καλωδιωμένο κόσμον τῆς τεχνολογίας, ὅπως οἱ ἐκκωφαντικοὶ ἤχοι ποὺ παράγονται ἀπὸ διατάξεις μεγαφῶνων καὶ μικροφῶνων σὲ αἰθουσες διαλέξεων, καὶ (3) στὴ Φύση, ὅπως οἱ ἀπρόσμενες καταστροφές ποὺ μπορεῖ νὰ προκαλέσει ἓνα σολιτόνιο (τσουνάμι). Ἀπὸ παρόμοιες ἐμπειρίες μορφογενετικῆς συμπεριφορᾶς μακριὰ ἀπὸ τὴν ἰσορροπία ἀπορρέει καὶ ἡ πασίγνωστη ἀλληγορία ποὺ ἀναφέρεται στὴν πεταλούδα, ποὺ μπορεῖ μὲ τὴ διαταραχὴ ποὺ προκαλεῖ τὸ χτύπημα τῶν φτερῶν τῆς στὸ Χόγγκ Κόνγκ νὰ προκαλέσει ἀτμοσφαιρικὴ θύελλα στὴν Ἀθήνα. Σὲ τέτοιες περιπτώσεις κάνουμε λόγο γιὰ «εὐαίσθητη ἐξάρτηση ἀπὸ τὶς ἀρχικὲς συνθῆκες».

Γενικότερα, ἡ ἐπιστημονικὴ παρατήρηση μᾶς ἔχει ἀποκαλύψει πληθώρα περιπτώσεων ὅπου πληθυσμοὶ συστατικῶν μερῶν μεταπίπτουν σὲ «συγκροτημένες καὶ ἐγκλειδωμένες ὁμαδοποιήσεις» ὑπὸ τὴν ἐπίδραση πεδίων δυνάμεων, κάτω ἀπὸ κατάλληλες συνθῆκες «ἀνοιχτῆς ἐνεργειακῆς ἐπικοινωνίας μὲ τὸ περιβάλλον τους, μακριὰ ἀπὸ θερμοδυναμικὴ ἰσορροπία».

Ἡ ἔντονα δικτυωμένη συλλογικότητα, ἡ πληθυσμιακὴ ὁμαδοποίηση καὶ ἐντατικοποίηση τῆς πληροφοριακῆς ἐπεξεργασίας καὶ ἐπικοινωνίας μεταξὺ τῶν μορφῶν τοῦ κόσμου μας, χαρακτηρίζει τὶς μὴ ἀντιστρεπτές ἐγγενεῖς ἐξελικτικὲς διαδικασίες σὲ ὅλες τὶς κλίμακες τοῦ χωροχρόνου καὶ τῆς πολυπλοκότητος τοῦ πολυποίκιλου κόσμου μας.

Χαρακτηριστικὲς εἶναι οἱ ποικίλες «ὁμαδοποιήσεις καὶ ἐγκλειδώσεις» ἰδιαίτερα στὸν ἔμβιο κόσμον, μὲ τὶς ὁμαδοποιήσεις ζώων ὀργανισμῶν, ὅπως ψαριῶν, πτηνῶν, μυρμηγκιῶν, ἢ ἀνθρώπων, πάντοτε ὑπὸ τὴν ἐπίδραση πεδίων-δυνάμεων «ἐπιρρεποῦς συνδετικότητας». Στὴν περίπτωσιν τῆς κοινωνικῆς ὁμαδοποιήσεως ἀνθρώπων περιλαμβάνονται καὶ διάπροσωπικὰ πεδία ἀλληλεπιδράσεων, ὅπως εἶναι οἱ δυνάμεις ἀγάπης, φιλοδοξίας, ἐκδίκησης, κλπ.

### 3.4. ΦΘΟΡΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΓΕΝΕΣΗ

Σήμερα, ἐν πολλοῖς, ἔχουμε κατανοήσει τὴ συνεξέλιξη φθορᾶς καὶ μορφογένεσης στὴ Φύση καὶ στὴν ἀνθρώπινη κοινωνία, δηλαδὴ τὴν ἐξισορροπημένη δράση δύο ἀντίστοιχων ἐξελικτικῶν πεδίων. Οἱ κινήσεις φθορᾶς καὶ

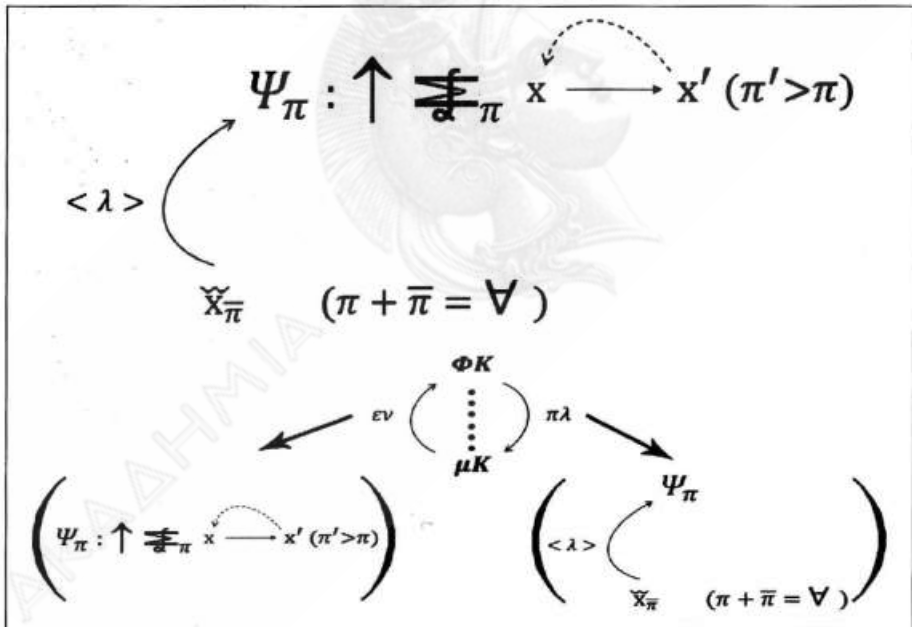
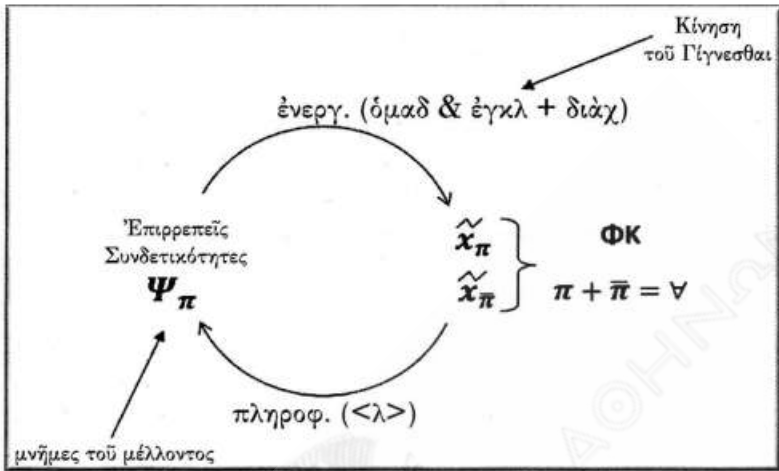
μορφογένεσης συντελοῦν ταυτοχρόνως στὴν ἀποδόμηση καὶ τὴν ἀνανέωση. Πρέπει νὰ σημειώσουμε ἐδῶ πῶς, μὲ τὴν ταυτόχρονη συνεξέλιξη τῆς φθορᾶς καὶ τῆς μορφογένεσης, ἡ ἀνάδυση τῆς πολυποικιλότητας νέων δομῶν καὶ συμπεριφορῶν προάγουν τὴ λειτουργικότητα τοῦ κόσμου μας. Ὁλόκληρος ὁ κόσμος τῆς ρέουσας κίνησης καὶ τῆς συνδεδεικτικότητας, ὁ κόσμος ποὺ βλέπουμε, ποὺ ἀγγίζουμε καὶ γνωρίζουμε, εἶναι τὸ προϊόν αὐτῶν τῶν δύο καθοριστικῶν ρευμάτων τῆς Δημιουργίας. Μὲ ἄλλα λόγια, θὰ μπορούσε κανεὶς νὰ πεῖ πῶς ὁ κόσμος μας «ξηλώνεται» πρὸς τὰ πίσω καὶ «ὕφαινεται» πρὸς τὰ ἐμπρός.

Πῶς μπορεῖ νὰ ταιριάζουν στὸ ἐξελικτικὸ πλαίσιο τοῦ κόσμου μας αὐτὲς οἱ δύο ἀναγκαῖες συνεξελικτικὲς διεργασίες τοῦ παγκόσμιου γίνεσθαι; Πῶς, μὲ τὴν ἄρμονικὴ συνεξέλιξη τῶν διαδικασιῶν τῆς φθορᾶς καὶ τῆς μορφογένεσης, καταφέρνει ἡ Φύση νὰ δημιουργεῖ τὴν ἀπεριόριστη πολυποικιλότητα νέων δομῶν καὶ συμπεριφορῶν; Εἶναι σημαντικό νὰ συλλάβουμε τὸ ὄραμα ποὺ ἐναρμονίζει αὐτὲς τὶς δύο ἀναγκαῖες καὶ συνεργατικὲς διαδικασίες τῆς Φύσης.

Γιατί νὰ λειτουργεῖ ἡ φθορὰ καὶ ὁ θάνατος μαζί μὲ τὴ δημιουργικὴ εξέλιξη; Μήπως εἶναι γιατί ὁ κύκλος «γέννηση-φθορὰ-θάνατος» ἐξασφαλίζει τὴν ἀπαραίτητὴ ἀνακύκλωση τῆς ὑπαρξῆς στὴν παγκόσμια διαδικασία τοῦ γίνεσθαι; Τί μπορεῖ νὰ ἐξασφαλίζει, καὶ τί μπορεῖ νὰ ὑποδηλώνει ἡ χρονικὰ ἐντοπισμένη, πεπερασμένη καὶ προσωρινὴ «βιοτροχιά» τῶν μορφῶν τοῦ κόσμου μας καὶ τοῦ ἀνθρώπου, ἀκόμη καὶ τοῦ ἴδιου τοῦ Σύμπαντος, σχετικὰ μὲ τὴ φυσιογνωμία τοῦ κόσμου μας; Στὸ Σύμπαν ποὺ ζοῦμε ὅλα ἔχουν μία ἡμερομηνία λήξεως.

Ἡ ἐξελικτικὴ πορεία τῆς φυσικῆς πραγματικότητας προσανατολίζεται καὶ βρίσκει τὸ δρόμο της ἐνεργώντας μέσα ἀπὸ ἓναν αὐτοαναφορικὸ «βρόχο ἐνεργειακῆς κίνησης πρὸς τὰ ἐμπρός» καὶ «ἀναδραστικῆς πληροφοριακῆς κίνησης πρὸς τὰ πίσω», ὅπως περιγράφεται στὶς ἀκόλουθες εἰκόνας συμβολικῶν ἀναπαραστάσεων τῶν ἐννοιῶν τῆς ἐξελικτικῆς διαδικασίας<sup>6</sup>.

6. Αναλύονται στὸ ὑπὸ ἐκδοσιν βιβλίο μου *Τὸ ξεφλούδισμα τοῦ βερίκοκου*.



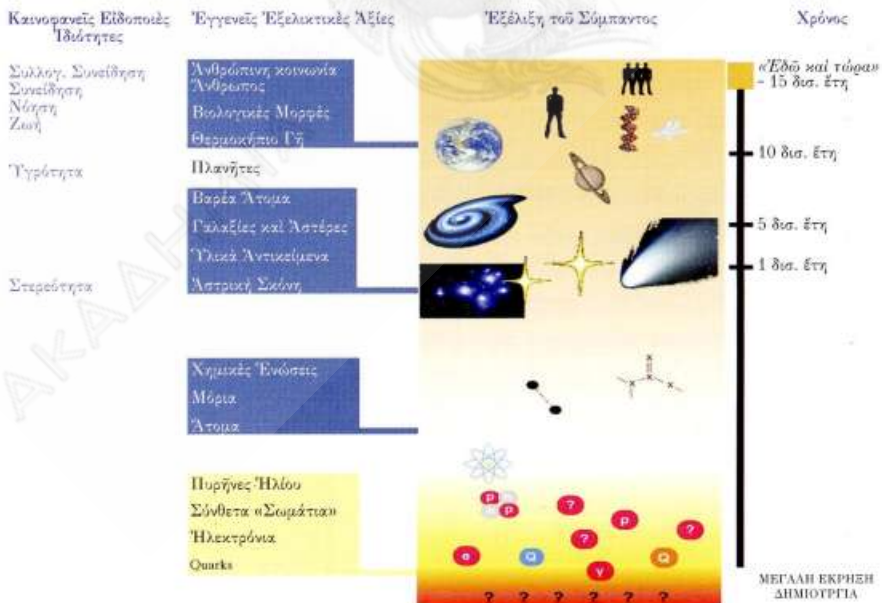
Είχ. 1.

3.5. ΕΓΓΕΝΕΙΣ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΕΣ ΛΕΙΪΣ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΦΑΝΕΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οί ένδείξεισ πού υπάρχουν για τήν εξέλικτική ιστορία του Σύμπαντος, όπωσ δυνάμεθα νά συμπεράνουμε από τά φυσικά άχνάρια του παρελθόντος, είναι ότι ό φυσικός κόσμος έχει ακολουθήσει μία αδιάλειπτη εξέλικτική πορεία, από τó χάοσ τών πρώτων στιγμών τής Δημιουργίας

μέχρι τόν άπεριορίστου ποικιλότητας σέ δόμηση και λειτουργικότητα φυσικό κόσμο πού άντισταβανόμαστε σήμερα. Με τήν πρώτη έμφάνιση τών άρχέγονων συστατικών τής ύλης, τά όποια όριοθέτησαν και καθόρισαν τίς έννοιες τού χώρου και τού χρόνου, τó Σύμπαν έπέδειξε και συνεχίζει νά έπιδεικνύει μιá σταθερή ροπή πρós σύνθεση, πολυπλοκότητα και διαφοροποίηση.

Άπό τά πρώτα στάδια τής μορφογενετικής έξελικτικής διαδικασίας πού ακολουθήσε τή Μεγάλη Έκρηξη, μέσα από ένα ένεργειακό μείγμα χάους τής προγεωμετρικής περιόδου, και μετά, με τó διαχωρισμό τών πεδίων δυνάμεων πού πιστεύεται ότι όφείλεται σέ μιá απότομη διαστολή τού χωρίς σύνορο και χωρίς κέντρο διπλωνόμενου «χώρου», πραγματοποιήθηκαν οι διαδικασίες άλληλεπιδράσεων τών άρχέγονων συστατικών τής άκτινοβολίας και τής ύλης, με τήν έπακόλουθη νουκλεοσύνθεση, τή σύνθεση ατόμων, μορίων και χημικών ένώσεων, και με τήν ιεραρχική ανάπτυξη τής τεράστιας ποικιλίας τών δομικών και «λειτουργικών» μορφών τής ύλης, τών «έγγενών έξελικτικών άξιών».



Είχ. 2.

Τὸ ἀναπτυσσόμενο ἀλυσιδωτὸ πλέγμα τῶν ἐγγενῶν λειτουργικῶν καὶ δομικῶν ἰδιομορφῶν τοῦ κόσμου μας, τὶς ὁποῖες ἀναφέρουμε ὡς ἐγγενεῖς ἐξελικτικὲς ἀξίες, ἀφορᾷ κατηγορίες εὐσταθῶν αὐτοσυντηρούμενων μορφῶν ἱεραρχικὰ ἀξιανόμενης πολυπλοκότητας, ἀπὸ τὰ στοιχειώδη σωματίδια, τοὺς πυρῆνες καὶ τὰ ἄτομα τοῦ μικρόκοσμου, μέχρι τοὺς ἀστρικοὺς σχηματισμοὺς τοῦ διαστήματος καὶ τὰ βιολογικὰ εἶδη, τὸν «ἄνθρωπο» καὶ «τὶς ἀνθρώπινες κοινωνίες του» (Εἰκ. 2, δεύτερη στήλη ἀπὸ ἀριστερά)<sup>7</sup>.

Οἱ ἐγγενεῖς ἐξελικτικὲς ἀξίες χαρακτηρίζονται ἀπὸ ἀξιανόμενη πολυπλοκότητα καὶ ἐνδοεπικοινωνιακὴ δικτύωση.

Γιὰ νὰ ὀλοκληρώσουμε αὐτὴν τὴ συνοπτικὴ παρουσίαση τῶν ἐγγενῶν ἐξελικτικῶν ἀξιῶν, θὰ ἀναφερθοῦμε ἐπιγραμματικὰ καὶ στὴν ἐξελικτικὴ ἀνάδυση τῶν «καινοφανῶν εἰδοποιῶν ἰδιοτήτων» ποὺ ἐπιτρέπουν τὴν ἐξελικτικὴ ἀνάπτυξη νέων εἰδῶν καὶ κατηγοριῶν ὕλικῶν ἀντικειμένων (Εἰκ. 2, πρώτη στήλη ἀπὸ ἀριστερά).

Γιὰ παράδειγμα ἡ αὔξηση τῆς πολυπλοκότητας καὶ τῆς ἐνδοεπικοινωνιακῆς δικτύωσης τῶν μοριακῶν ἐξελικτικῶν προϊόντων προκάλεσε, σὲ βάθος χρόνου, τὴν ἀνάδυση τῆς «στερεότητας». Ἡ ἀνάδυση τῆς καινοφανοῦς ἰδιότητος τῆς στερεότητος ἐπέτρεψε τὴν ἐξελικτικὴ ἀνάπτυξη νέων κατηγοριῶν, τῶν «στερεῶν σωματίων». Μολονότι σήμερα ἐξηγοῦμε καὶ κατανοοῦμε τὶς ἠλεκτρομαγνητικὲς μοριακὲς δυνάμεις ποὺ προκαλοῦν τὴν ἰδιότητα τῆς στερεότητος, αὐτὴ δὲν θὰ μπορούσε νὰ προβλεφθεῖ ὡς ἐξελικτικὸ προϊόν τῆς πορείας τοῦ Σύμπαντος ἀπὸ μόνο τὴ γνώση τῶν μοριακῶν ἰδιοτήτων. Τὸ ἴδιο ἰσχύει καὶ γιὰ ἄλλες ὁμότροπες ὀλιστικὲς ἰδιότητες, τὴν ὑγρότητα, τὴ ζωή, τὴ νόηση καὶ τὴ συνείδηση.

Νὰ σημειωθεῖ ὅτι, μέσα ἀπὸ ἓνα χρονο-κυλιόμενο βρόχο αὐτοαναφορᾶς<sup>8</sup>, οἱ ἐγγενεῖς ἐξελικτικὲς ἀξίες τοῦ κόσμου μας κινητοποιοῦν καὶ κατευθύνουν τὸν ἴδιο τὸν ἐγγενῆ μηχανισμό («ἐπιλογῆς») τῆς Φύσης, στὸν ὁποῖο ἀναφερθήκαμε σὲ σχέση μὲ τὴ διατύπωση τοῦ ἐξελικτικοῦ μοντέλου HD, καὶ ὁ ὁποῖος μὲ τὴ σειρά του τὶς διατηρεῖ, τὶς προάγει, καὶ τὶς ἀναβαθμίζει. Ἡ ἀμοιβαία σχέση ἀλληλεπίδρασης «αἰτίου καὶ ἀποτελέσματος»

7. Κατὰ τὴν πλατωνικὴ ἄποψη ἀφοροῦν τὶς ἰδεατὲς ὀλοκληρώσεις τῆς κατηγορίας τῶν ἀντικειμένων.

8. Ὅλοι μας γνωρίζουμε τὶς παράξενες συνέπειες τῶν βρόχων αὐτοαναφορᾶς ποὺ παγιδεύουν τὴ νόηση, ἀφοῦ ἡ «ἀλήθεια» τοὺς συνεπάγεται τὴν «ἀναλήθειά» τοὺς.

μεταξύ των έγγενων εξέλικτικων αξιών και των έπιλογων της Φύσης γεννά και κατευθύνει το θαυμαστό, όσο και αίνιγματικό, κόσμο μας.

Από την παρατήρηση και την έρμηνεία του χωροχρονικού πλέγματος των εξέλικτικων «αξιών» του Σύμπαντος και από τη μελέτη της ανάδυσσης των «καινοφανών ιδιοτήτων» που αναφέραμε, συμπεραίνουμε ότι ή συνεργασία της ολοκληρώσιμης καταγιγιστικής δραστηριότητας του μικρόκοσμου με τὰ φαινόμενα του φυσικού κόσμου της έμπειρίας παράγει έναν περισσότερο («λειτουργικό») κόσμο.

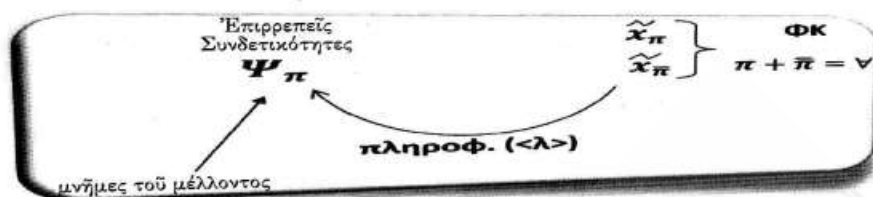
### 3.6. «ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ» - ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΠΡΟΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η μελέτη της εξέλικτικής δημιουργίας των δομικών και των λειτουργικών μορφών του φυσικού κόσμου, σε βάθος χρόνου, ύποδηλώνει ότι το δομικό και λειτουργικό προφίλ του φυσικού κόσμου δέν κινείται τυχαία, αλλά ότι, σε βάθος χρόνου, ρέει με τάση «προαγωγής της λειτουργικότητας».

• Η «λειτουργικότητα» του φυσικού κόσμου όρίζεται στο ευρύτερο παγκόσμιο χωροχρονικό θέατρο της εξέλικτικής πορείας του Σύμπαντος, και ή προαγωγή της εκδηλώνεται σε βάθος χρόνου με το ιεραρχικό ξεδίπλωμα και τη συνδυαστική αλληλεπίδραση και αναβάθμιση των χαρακτηριστικών παγκόσμιων εξέλικτικων ιδιομορφών, τις όποίες όνομάζουμε «έγγενεις εξέλικτικές αξίες».

Οί έγγενεις εξέλικτικές αξίες, που χαρακτηρίζουν το εξέλικτικό προφίλ του κόσμου μας, έπιδεικνύουν ιεραρχική προοδευτική αύξηση της πολυπλοκότητας και της ένδοεπικοινωνιακής συνδετικότητας των «έγκλειδωμένων» μερών τους. Προάγουν τη λειτουργικότητα του εξελισσόμενου κόσμου μας και προσφέρουν έντυπωσιακές προοπτικές για την κατανόηση του τρόπου με τον όποιο εξέλισσεται το Σύμπαν.

• Η άποψη την όποία παρουσιάζουμε έδω ύποστηρίζει ότι ή εξέλικτική πορεία του φυσικού κόσμου καθοδηγείται από το «μηχανισμό» μιās θεμελιώδους, προσανατολιστικής αρχής «προαγωγής της λειτουργικότητας» του Σύμπαντος (<λ>), ή όποια προσδιορίζει με στατιστική συνέπεια την κυλιόμενη έγγενή διαμόρφωση των πιθανοτήτων της τοπικής έπιρρεπούς συνδετικότητας  $\Psi_{\pi}$  του φυσικού περιβάλλοντος, πού, με τη σειρά τους, προσδιορίζουν και προσανατολίζουν την εξέλικτική πορεία όλόκληρου του φυσικού κόσμου. Ένδεχομένως ή <λ> πλουτίζει με νόημα την εξέλιξη του φυσικού κόσμου (Εικ. 3).



Είκ. 3.

• Από την παρατήρηση και την έρμηνεία του χωροχρονικού πλέγματος των εξελικτικών αξιών του Σύμπαντος μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η προαγωγή της παγκόσμιας λειτουργικότητας του κόσμου μας παράγει έναν περισσότερο «λειτουργικό» φυσικό κόσμο<sup>9</sup>.

Όλα αυτά μέχρι το κατώφλι της εμφάνισης της ανθρώπινης ύπαρξης, κάτι που συνέβη μόλις κατά την τελευταία αναλαμπή της μακρόχρονης και φαντασμαγορικής εξελικτικής πορείας των περίπου δεκαπέντε δισεκατομμυρίων ετών της εξέλιξης του κόσμου μας. Η ανάδυση και ανάπτυξη της «ζωής», του «νοῦ» και της «συνείδησης» συνέβη πάρα πολύ πρόσφατα στο πλανητικό «θερμοκήπιο» της Γῆς, και πιθανῶς και σε πολλά άλλα τέτοια πλανητικά «θερμοκήπια» του Σύμπαντος.

### 3.7. ΣΧΕΣΗ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΚΟΣΜΟΥ

Το Μοντέλο Heisenberg-Dirac αποδίδει τη δημιουργία και την εξελικτική διαδικασία του φυσικού κόσμου στις μορφογενετικές συνεργασίες του μυστηριώδους μικρόκοσμου με το φυσικό κόσμο τῆς ἐμπειρίας.

Υπό τους περιορισμούς τῆς ὅποιας διαθέσιμης περιγραφῆς του στοιχειώδους κβαντικού φαινομένου, θέτουμε τὸ ἐρώτημα: Πῶς θὰ μπορέσουμε νὰ συσχετίσουμε τὴ δραστηριότητα τῶν αἰνιγματικῶν στοιχειωδῶν κβαντικῶν φαινομένων με τὰ παρατηρούμενα φαινόμενα, δηλαδή με τὰ ὑλικά ἀντικείμενα καὶ τὶς εξελικτικὲς διαδικασίες τοῦ μακροσκοπικοῦ φυσικοῦ κόσμου τῆς ἐμπειρίας; Πῶς ἡ ὁμαδοποίηση καὶ ἐγκλειδωση τῶν φαινομένων τοῦ φυσικοῦ κόσμου μπορεῖ νὰ σχετίζεται με τὶς παράδοξες

9. Θὰ μπορούσε νὰ ὑποστηρίξει κανεὶς ὅτι ἡ διάσημη καὶ μοναδική ἰδέα τοῦ Δαρβίνου γιὰ τὴν εξελικτικὴ διαδικασία τῆς Φύσης με «ἐπιβίωση τοῦ καταλληλότερου» εἶναι οὐσιαστικά μιὰ εἰδικὴ περίπτωση ἑνὸς γενικότερου νόμου ποὺ ἀναφέρεται στὴν ἐγγενῆ εξελικτικὴ τάση τῆς Φύσης γιὰ τὴν «ἐπιβίωση τοῦ δυνατικὰ πλέον λειτουργικοῦ».



συμπεριφορές τῶν στοιχειωδῶν κβαντικῶν φαινομένων τοῦ μικρόκοσμου; Ἀπό ποιά ἀναγκαιότητα, ἡ ὁποία παραμένει ἀκόμη καί σήμερα πέρα ἀπό τήν κατανόησή μας, τὸ στοιχειῶδες κβαντικὸ φαινόμενο προκύπτει ὡς ἡ πλέον θεμελιώδης διεργασία στὴ δημιουργία τῆς φυσικῆς πραγματικότητας καί τῆς ἐξελικτικῆς διαδικασίας τοῦ φυσικοῦ κόσμου; Ἴσως ἡ ἔρευνα ποὺ θὰ ξεσκεπάσει τὴν αἰνιγματικὴ ἀναγκαιότητα τῶν στοιχειωδῶν κβαντικῶν φαινομένων μᾶς ἀποκαλύψει «ἓνα ἄλλο Σύμπαν», καί ἐνδεχομένως νὰ προικίσει τὸν κόσμο μας μὲ 'νόημα'.

Αὐτὸ εἶναι ἓνα βασικὸ ἐρώτημα. Γιὰ τὴν κατανόηση, καί ἐνδεχομένως γιὰ τὸν ἔλεγχο τῶν διαδικασιῶν συσχέτισης τοῦ μικρόκοσμου καί τοῦ μακρόκοσμου, θὰ πρέπει νὰ ἀναπτύξουμε μιὰ ἰσχυρὴ καί ἀποτελεσματικὴ «συνδυαστικὴ λογιστικὴ». Τὸ κολοσσιαῖο αὐτὸ μαθηματικὸ πρόβλημα εἶναι τεράστιας σημασίας γιὰ τὴν κατανόηση τῆς ἐξελικτικῆς λειτουργίας τοῦ φυσικοῦ κόσμου.

### 3.8. ΤΑ ΟΡΙΑ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Τὸ Μοντέλο Heisenberg-Dirac θεωρεῖ ὅτι τὰ ὅρια τῆς ἐξελικτικῆς διαδικασίας βρίσκονται στὴν αὔξηση τῆς πολυπλοκότητας καί στὴν παραγωγή τῆς λειτουργικότητας τῶν ἐγγενῶν ἀξιῶν καί τῶν καινοφανῶν ιδιοτήτων, καί ὄχι σὲ χωροχρονικὰ σύνορα τοῦ διαστελλόμενου διαστήματος, τοῦ ἄλλωστε αὐτοπεριεχόμενου Σύμπαντος ποὺ δὲν ἔχει ὄρια ἢ κέντρο.

Τὰ σημερινὰ ὅρια τοῦ ἐξελισσόμενου κόσμου μας βρίσκονται στὴν ἀνθρώπινη κοινωνία. Ἄν αὐτὴ καί οἱ ἄλλες ιδέες τῆς ἰδιάζουσας θεώρησης ἐπικυρωθοῦν μὲ μαθηματικὴ συνέπεια καί μὲ παραγωγικὴ συσχέτιση μὲ τὴν παρατήρηση καί μὲ ἄλλες ἐπικυρωμένες θεωρίες, ὥστε νὰ μποροῦν νὰ στηρίζουν μιὰ νέα καί διαφορετικὴ ἀντίληψη γιὰ τὴν ἐξελικτικὴ διαδικασία, τότε οἱ ἐπιπτώσεις στὴν ψυχολογία μας, στὴ φιλοσοφία καί τὴ θεολογία θὰ πάρουν μιὰ καινοτομικὴ τροπὴ. Σήμερα μποροῦμε μόνο νὰ ποῦμε πὼς οἱ ἐνδείξεις ποὺ ὑπάρχουν γιὰ τὴν ἀληθοφάνεια τῶν ιδεῶν αὐτῶν εἶναι ἐνθαρρυντικῆς.

### 4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Εἶναι ἀμέτρητες οἱ δυνατότητες ἐφαρμογῆς τοῦ Μοντέλου HD. Ἴσως νὰ μὴν μπορέσουμε ποτὲ νὰ προβλέψουμε μὲ ἀκρίβεια καί μὲ πληρότητα τὸ μέλλον τῆς πληθυσμιακῆς ἐξελικτικῆς διαδικασίας. Ὅμως, πρέπει νὰ χρησιμοποιήσουμε τίς γνώσεις καί τὰ ὑπολογιστικὰ μέσα ποὺ διαθέτουμε γιὰ νὰ τολμήσουμε μιὰ ριζικὴ ἀναθεώρηση τῶν περιορισμένων ἀντιλήψε-

ων που έχουν διατηρηθεῖ ὡς τὶς μέρες μας σχετικὰ μὲ τὴ θεώρηση τῆς ἐξελικτικῆς διαδικασίας τοῦ κόσμου μας, σχετικὰ μὲ τὸν ἰδιόμορφο χαρακτήρα τοῦ φαινομένου τῆς ζωῆς, σχετικὰ μὲ τὴν ἰδιαιτερότητα τῆς ἀνθρώπινης ὑπαρξῆς μέσα στὴ βιολογικὴ ἐξέλιξη. Ἡ ἰδιαιτερότητα τῆς ἀνθρώπινης παρουσίας δὲν περιορίζεται στὸ φαινόμενο τῆς ζωῆς. Τὸ μυστήριο τῆς ἀνθρώπινης παρουσίας δὲν εἶναι ὅτι ὑπάρχουμε, ἀλλὰ ὅτι γνωρίζουμε, καὶ ἀκόμα περισσότερο ὅτι θαυμάζουμε, ὅτι ἔχουμε συνείδηση. Εἶναι καιρὸς νὰ ἐκτιμήσουμε τὶς κοινωνικὲς ἐπιπτώσεις που θὰ προκύψουν ἀπὸ αὐτὴν τὴν ἀναθεώρηση.

Καὶ κάτι ἀκόμα που ἀφορᾷ τὴν κατεύθυνση τῆς ἐξελικτικῆς διαδικασίας τῆς κοινωνίας μας. Ὁ ἄνθρωπος ὁδηγήθηκε σὲ μιὰ ἀπερίσκεπτη κυριαρχία στὸ περιβάλλον του, καὶ σήμερα ἀπειλεῖται ἀπὸ τὴ βία, τὴν πείνα καὶ τὸν ὄλεθρο. Ζοῦμε σὲ ἓνα μικρὸ πλανήτη μὲ πεπερασμένους πόρους. Μὲ ἐπίγνωση τῶν ὀρίων, πρέπει νὰ συνειδητοποιήσουμε ὅτι ἔφτασε ἡ ὥρα τῶν ἐπιλογῶν.

Στὴν ἀρχὴ τοῦ 21ου αἰῶνα, ἡ κοινωνία τῶν ἀνθρώπων ἔχει μεγαλύτερη ἀνάγκη ἀπὸ ἡγέτες-ὄραματιστές, που θὰ διακρίνουν τὴν πιθανὴ πορεία τῆς ἀνθρώπινης περιπέτειας καὶ θὰ ἀνοίξουν τοὺς ὀρίζοντες τῶν ἐπιλογῶν που ἔχουμε, παρὰ ἀπὸ νομπελίστες ἐπιστήμονες. Στὶς μέρες μας ἡ ἀνεπάρκεια αὐτὴ εἶναι ἐντυπωσιακὴ!

Τὰ λίγα που εἶπαμε σήμερα ἦταν ἐπιλεκτικὰ σχεδιασμένα. Ἀπευθύνονται περισσότερο σὲ ἓνα εἶδος θρησκευτικῆς πίστεως παρὰ στὴν ἐπιχειρηματολογικὴ πειθῶ. Στὶς μέρες μας, θὰ μπορούσε νὰ κατηγορηθεῖ ἡ Ἐπιστήμη ὅτι δημιουργεῖ μιὰ νέα θεολογία που ἀφορᾷ τὴν ἐξελικτικὴ ὄντολογία, ἀκόμη καὶ ἀπόψεις γιὰ τὴν προέλευση τῆς ζωῆς καὶ τὸ ρόλο τοῦ ἀνθρώπου. Ἴσως δίνουμε τὴν ἐντύπωση ὅτι ἔχουμε ἀπορρίψει τὴ μυθολογία τῆς συμβατικῆς θρησκείας, μόνο γιὰ νὰ τὴν ἀντικαταστήσουμε ἀποδεχόμενοι μιὰ ἀκόμη πιὸ ἀπόμακρη θρησκεία, ἡ ὁποία ἐκφράζει ἓναν ἐπιστημονικὸ μυστικισμό που βασίζεται στὶς θαυμαστὲς ἀποκαλύψεις τῆς Κβαντικῆς Θεωρίας, τῆς γενικῆς θεωρίας τῆς Σχετικότητας, τῆς Κβαντικῆς Κοσμολογίας καὶ τῆς Θεωρίας τῆς Πληροφορίας, οἱ περισσότερες ἀπὸ τὶς ὁποῖες εἶναι κατ' οὐσίαν δόγμα που δὲν εἶναι δυνατὸν ποτὲ νὰ ὑποστῆ τὸν πειραματικὸ ἔλεγχο.

Γιὰ σήμερα, θὰ περιοριστοῦμε νὰ ποῦμε ὅτι εἶναι ἀνάγκη τῶν καιρῶν, καὶ ἴσως εἶναι μιὰ ἄνευ προηγουμένου εὐκαιρία, νὰ παρακινήθεῖ ἡ θεολογία καὶ ὁ θρησκευτικὸς στοχασμὸς, μαζὶ μὲ τὴ φιλοσοφία, τὴν ἐνόραση, τὰ γράμματα καὶ τὶς τέχνες, γιὰ νὰ βοηθήσουν στὴν πνευματικὴ ἀνάπλα-

ση τῶν ἐπιστημονικῶν θεωριῶν γιὰ τὴν πραγματικότητα, γιὰ τὸ φυσικὸ κόσμο καὶ γιὰ τὸ ρόλο τοῦ ἀνθρώπου μέσα σὲ αὐτὸν τὸν ἐκπληκτικὸ καὶ ἀσύγκριτης ὁμορφιᾶς «κῆπο» μας, τὸν ὁποῖο πρέπει πάντα νὰ καλλιεργοῦμε.

Σήμερα ἀναγνωρίζεται εὐρέως ὅτι αὐξάνει ἡ ἀνάγκη νὰ ἀναδείξουμε τὸ βαθύτερο νόημα τοῦ φυσικοῦ κόσμου, τὶς πνευματικὲς διαστάσεις τῆς «πραγματικότητας», καὶ ἰδιαίτερα, τὶς ὑπεραισθητὲς συσχετίσεις τοῦ ἀνθρώπου μὲ τὴ Φύση. Ἡ Ἐπιστήμη εἶναι σὲ θέση νὰ προσφέρει πολλὰ στὴν κατεύθυνση αὐτή. Ἀναγνωρίζεται ὅτι ὁ ἐπιστήμονας, μὲ συνέπεια καὶ χωρὶς λογικὴ ἀντίφαση, μπορεῖ νὰ συμβάλει στὴν ἀναζήτηση τῆς «ἀλήθειας» χωρὶς νὰ ἀρνεῖται τὴν ὕπαρξη τοῦ Θεοῦ. Γιὰ νὰ συλλάβουμε τὴν ἔννοια τῆς πραγματικότητας, τῆς ἐξελικτικῆς πορείας τοῦ φυσικοῦ κόσμου καὶ τῆς διάστασης τοῦ χρόνου ποὺ ὑπογραμμίζει τὴν «ὑπαρξη», πρέπει νὰ συζητοῦμε τὴν ἔρευνα τῶν θετικῶν ἐπιστημῶν, ἰδιαίτερα τῆς Φυσικῆς, τῆς Πληροφορικῆς καὶ τῆς Βιολογίας, μὲ τὶς ἀνθρωπιστικὲς σπουδές, τὴ Φιλοσοφία καὶ τὴ Θεολογία.



# ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 26ΗΣ ΜΑΪΟΥ 2011

## Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΟΥ ΤΡΑΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΚΟΙΛΙΑΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΠΛΑΧΝΩΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟ ΣΤΡΕΣ

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ κ.κ. ΓΡ. ΣΚΑΛΚΕΑ,  
ΠΑΝ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΑΚΟΥ, ΓΡ. ΚΟΥΤΡΑΚΗ ΚΑΙ Γ. ΧΡΟΥΣΟΥ

ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ κ. ΓΡΗΓΟΡΙΟ ΣΚΑΛΚΕΑ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στρες είναι η κατάσταση κατά την οποία απειλείται ή ομοιάζεται του οργανισμού και δύναται να οφείλεται σε ψυχολογικά ή σωματικά αίτια, τα στρεσογόνα ερεθίσματα. Το χειρουργικό στρες οφείλεται τόσο σε συναισθηματικά όσο και σωματικά αίτια που περιλαμβάνουν το προεγχειρητικό άγχος, το χειρουργικό τραύμα, τον πόνο, την τοπική ανοσολογική και φλεγμονώδη αντίδραση κ.ά. Είχα υποστηρίξει από τη δεκαετία του '60 ότι το χειρουργικό στρες, πέραν των συναισθηματικών και άλλων αιτίων του, οφείλεται περισσότερο στον τραυματισμό που προκαλεί ή διάνοιξη του κοιλιακού τοιχώματος και λιγότερο στον τραυματισμό των σπλάχνων. Η άποψη αυτή είχε χαρακτηριστεί τότε ως λανθασμένη. Η λαπαροσκοπική χειρουργική, η οποία τραυματίζει ελάχιστα το κοιλιακό τοίχωμα, ενώ συνιστά την ίδια επέμβαση επί των σπλάχνων, απέδειξε κλινικά ότι οι έκδηλώσεις του στρες είναι απόλυτως ήπιότερες από ό,τι επί ανοικτής χειρουργικής, όπως αποδεικνύεται από το μειωμένο χρόνο νοσηλείας, τη γρήγορη κινητοποίηση και σίτιση από το στόμα, τη μειωμένη παραμονή στο νοσοκομείο, τον ήπιότερο πόνο, καθώς και την περιορισμένη καταβολική αντίδραση.

## ΑΣΘΕΝΕΙΣ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΖΩΑ, ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Διὰ τὴν ἀπόδειξιν τούτου μελετήθηκε σειρά ἀσθενῶν, οἱ ὅποιοι ὑποβλήθησαν σὲ ἀνοικτὴ ἢ λαπαροσκοπικὴ χολοκυστεκτομή, ἐνῶ ἔγινε καὶ πλήρως ἐλεγχόμενον πείραμα ἐπὶ 20 ἐνηλίκων χοίρων. Στους χοίρους μάλιστα, παράλληλα μὲ τὴ χολοκυστεκτομή, πραγματοποιήθηκε καὶ ἑτερόπλευρη ἐπινεφριδεκτομή ὡς ἀποτέλεσμα πλέον τραυματικῆς ἐγχείρησις. Ὅλες οἱ ἐπεμβάσεις στους χοίρους ἔγιναν τὸ πρωὶ καὶ ὑπὸ τὴν ἴδια ἀναισθησία.

Δείγματα αἵματος ἐλήφθησαν μιὰ ἡμέρα πρὶν ἀπὸ τὴ χειρουργικὴ ἐπέμβαση, ἀμέσως πρὶν ἀπὸ τὴν τομὴ, κάθε 15 λεπτὰ κατὰ τὴ διάρκειαν τῆς χειρουργικῆς ἐπέμβασης, μετὰ τὴ σύγκλειση τοῦ τραύματος, καθὼς καὶ τὸ πρωὶ τῆς πρώτης μετεγχειρητικῆς ἡμέρας. Στὰ δείγματα μετρήθησαν οἱ συγκεντρώσεις τῆς κορτιζόλης μὲ τὴ μέθοδον ELISA ἢ/καὶ τῶν κατεχολαμινῶν ἀδρεναλίνης καὶ νοραδρεναλίνης μὲ HPLC καὶ ἠλεκτροχημικὴ ἀνίχνευση.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στους ἀνθρώπους, κατὰ τὴ διάρκειαν τῆς λαπαροσκοπικῆς χειρουργικῆς καὶ τὴν πρώτη μετεγχειρητικὴ ἡμέρα, τὰ ἐπίπεδα τῆς κορτιζόλης ἦταν σαφῶς χαμηλότερα ἀπὸ ἐκεῖνα τῶν ἀσθενῶν ποὺ ὑποβλήθησαν σὲ ἀνοικτὴ χολοκυστεκτομή ἀλλὰ ὄχι στατιστικῶς σημαντικὰ (Εἰκ. 1).

Στους χοίρους, τόσο στὴν ἐπινεφριδεκτομή (Εἰκ. 2, 3) ὅσο καὶ στὴ χολοκυστεκτομή (Εἰκ. 4, 5), οἱ συγκεντρώσεις τῆς ἐπινεφρίνης καὶ νορεπινεφρίνης πλάσματος ἦταν στατιστικῶς σημαντικὰ χαμηλότερες κατὰ τὴ διάρκειαν τῆς λαπαροσκοπικῆς χειρουργικῆς ἐπέμβασης. Οἱ διαφορὲς ἦταν ἐντυπωσιακότερες στὴν ἐπινεφριδεκτομή, ὅπου οἱ κατεχολαμίνες πλάσματος ἦταν μέχρι 40 φορές ὑψηλότερες κατὰ τὴ διάρκειαν τῆς ἀνοικτῆς χειρουργικῆς ἐπέμβασης (Εἰκ. 2, 3). Δὲν παρατηρήθηκε σημαντικὴ διαφορὰ στὰ ἐπίπεδα τῶν κατεχολαμινῶν μεταξύ τῶν δύο τύπων ἐπεμβάσεων κατὰ τὴν πρώτη μετεγχειρητικὴ ἡμέρα.

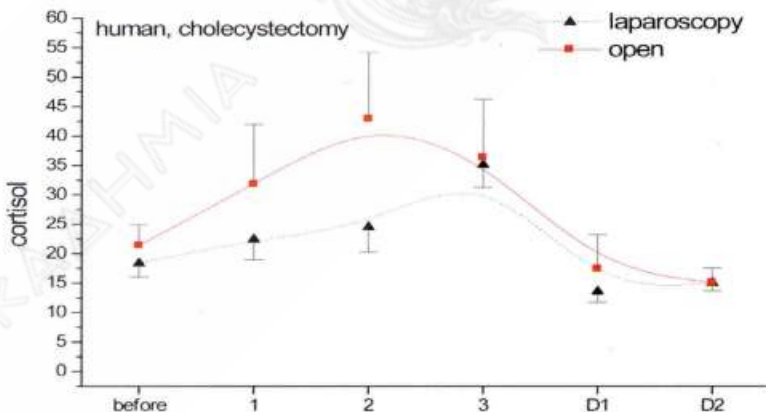
Στους χοίρους δὲν παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορὰ στὰ ἐπίπεδα τῆς κορτιζόλης πλάσματος μεταξύ λαπαροσκοπικῶν καὶ ἀνοικτῶν χολοκυστεκτομῶν (Εἰκ. 7). Ὅμως, τὰ ἐπίπεδα τῆς κορτιζόλης ἦταν σημαντικὰ χαμηλότερα στὶς λαπαροσκοπικὲς ἐπινεφριδεκτομές, τόσο κατὰ τὴ διάρκειαν τῶν χειρουργικῶν ἐπεμβάσεων ὅσο καὶ κατὰ τὴν πρώτη μετεγχειρητικὴ ἡμέρα (Εἰκ. 6).

## ΣΥΖΗΤΗΣΗ

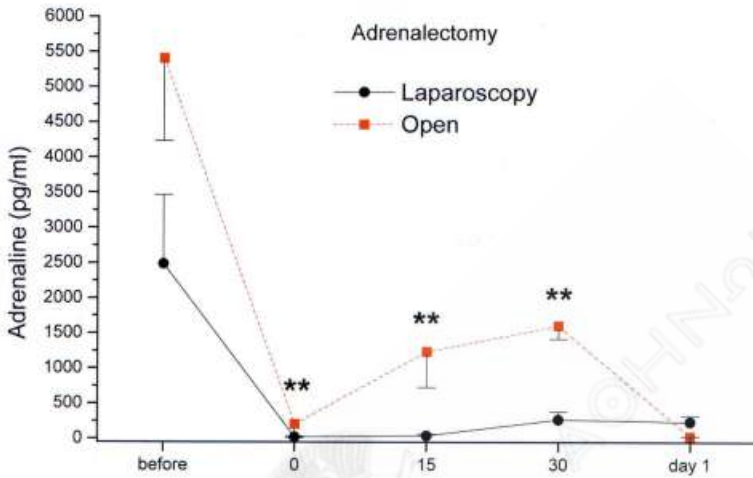
Τὰ ἀποτελέσματα μᾶς δείχνουν ὅτι ἡ ἐνδοσκοπικὴ χειρουργικὴ ἐπέμβαση ἔχει πολὺ μικρότερη διεγερτικὴ ἐπίδραση στὸ σύστημα στρὲς

ἀπὸ τὴν ἀνοικτὴ χειρουργικὴ ἐπέμβαση, κυρίως λόγω τῆς διαφορᾶς στὴν ἔκταση τοῦ χειρουργικοῦ τραύματος τοῦ τοιχώματος τῆς κοιλιάς. Ἡ διαφορὰ αὐτὴ μεταξὺ τῶν δύο τύπων ἐπεμβάσεων ἐπιτείνεται μὲ τὴν αὐξησὴ τοῦ χειρουργικοῦ τραύματος τοῦ κοιλιακοῦ τοιχώματος. Ἡ αὐξημένη καὶ παρατεταμένη ἐνεργοποίηση τοῦ ἄξονα τῶν ἐπινεφριδίων ποὺ παρατηρεῖται στὴν ἀνοικτὴ χειρουργικὴ ἐπέμβαση μπορεῖ νὰ συμβάλλει στὶς δυσκολίες καὶ τὸν παρατεταμένο καταβολισμό ποὺ παρατηροῦνται στὴ μετεγχειρητικὴ πορεία μεγάλων ἀνοικτῶν χειρουργικῶν ἐπεμβάσεων.

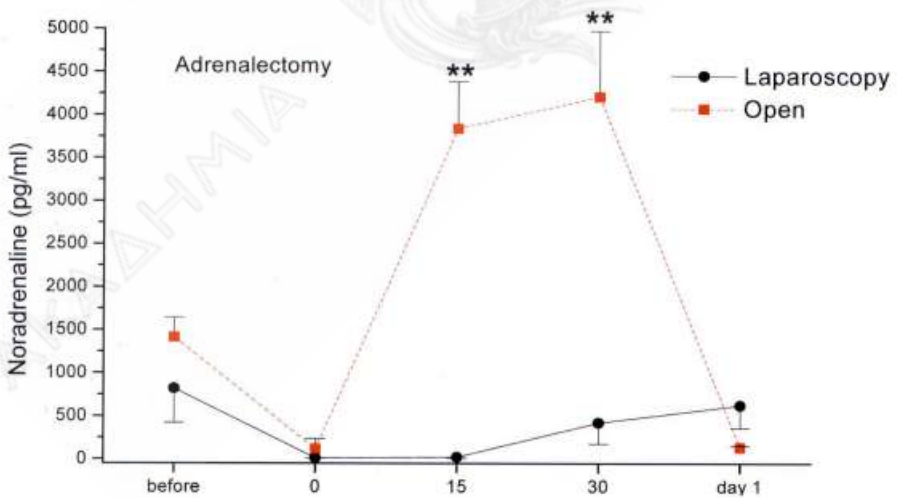
Ὅπως γνωρίζουμε σήμερα, ὁ τραυματισμὸς τοῦ κοιλιακοῦ καὶ θωρακικοῦ τοιχώματος ὀδηγεῖ στὴν παραγωγὴ ἀνοσολογικῶν μορίων, ὅπως ἡ ἰντερλευκίνη-6, τὰ ὁποῖα προκαλοῦν διέγερση τοῦ ἄξονα ὑποθαλάμου-ὑπόφυσης-ἐπινεφριδίων, καθὼς καὶ νευροπεπτιδίων, ὅπως ἡ ὁρμόνη CRH, ἡ οὐσία P καὶ ἡ ὁρμόνη CGRP, καὶ λιπιδίων, ὅπως οἱ προσταγλανδίνες, τὰ ὁποῖα διεγείρουν τὴ λειτουργία προσαγωγῶν νέρων ποὺ ἐνεργοποιοῦν τὰ κέντρα τοῦ συστήματος τοῦ στρες στὸν ἐγκέφαλο (Εἰκ. 8). Συνεπῶς, ἡ ἀνασθητοποίηση τοῦ κοιλιακοῦ τοιχώματος στὴν περιοχὴ τῆς χειρουργικῆς τομῆς ποὺ ἐφαρμόζαμε στοὺς ἀσθενεῖς μας καὶ ἡ ἡπιότερη μετεγχειρητικὴ τους πορεία ἐξηγεῖται πλέον μὲ τὶς σημερινὲς γνώσεις τῆς Νευροενδοκρινολογίας.



Εἰκ. 1. Κορτιζόλη πλάσματος (μg/dl) ἀσθενῶν σὲ ἀνοικτὴ καὶ λαπαροσκοπικὴ χολοκυστεκτομή (before: προεγχειρητικά, 1: διασωλήνωση, 2: μετὰ τὴν εἴσοδο τῶν trocars [λαπαροσκοπικῶς], ἢ μετὰ τὴ λαπαροτομή [ἀνοικτὴ], 3: ἀποσωλήνωση, D1: πρώτη μετεγχειρητικὴ ἡμέρα, D2: δευτέρη μετεγχειρητικὴ ἡμέρα).

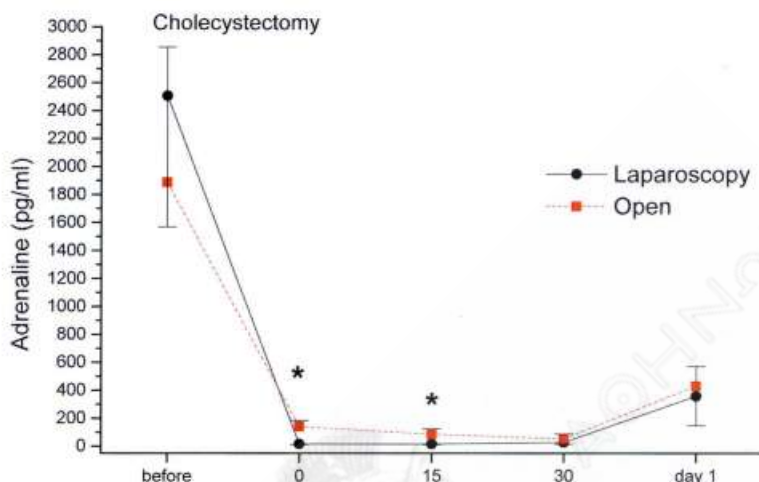


Εικ. 2. Άδρεναλίνη πλάσματος (pg/ml) πειραματόζωων σε άνοικτη και λαπαροσκοπική επινεφριδεκτομή (before: προεγχειρητικά, 0: άμέσως πριν από την τομή, 15 και 30: λεπτά κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης, day 1: πρωί της πρώτης μετεγχειρητικής ημέρας).

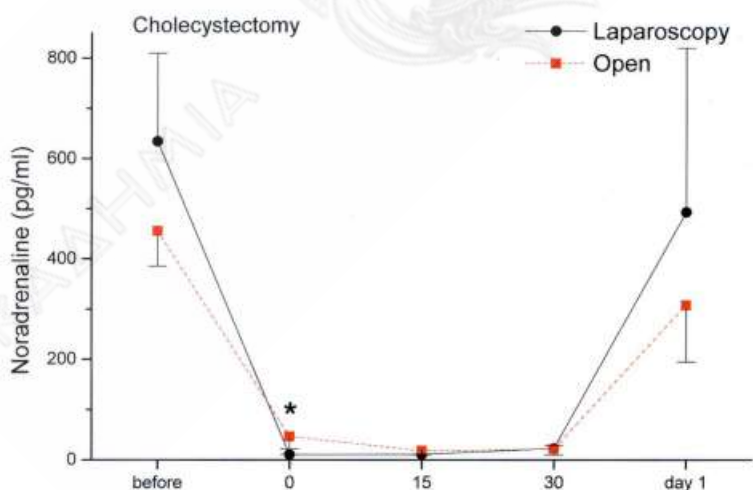


Εικ. 3. Νοραδρεναλίνη πλάσματος (pg/ml) πειραματόζωων σε άνοικτη και λαπαροσκοπική επινεφριδεκτομή (before: προεγχειρητικά, 0: άμέσως πριν από την τομή, 15 και 30: λεπτά κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης, day 1: πρωί της πρώτης μετεγχειρητικής ημέρας).

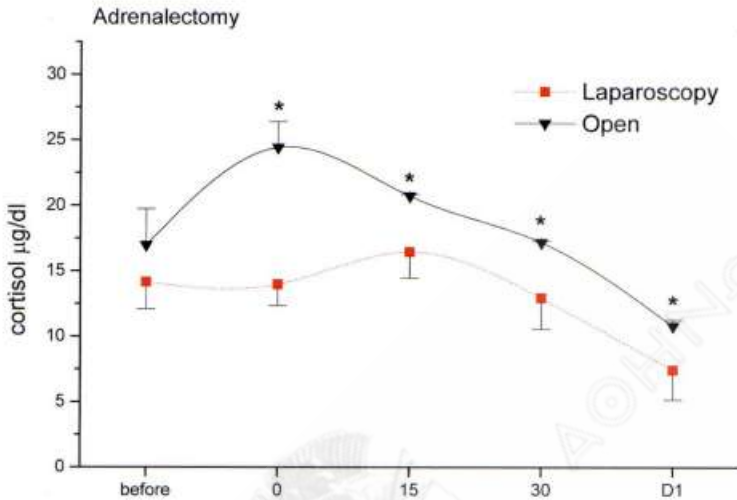




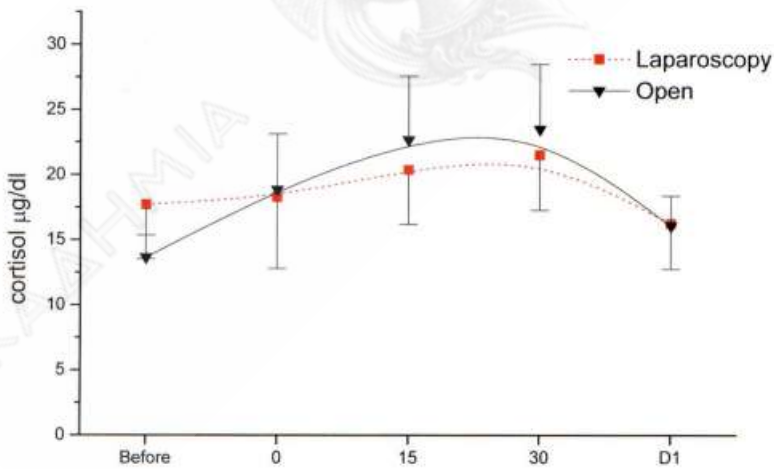
Είχ. 4. Άδρεναλίνη πλάσματος (pg/ml) πειραματόζωων σε άνοικτη και λαπαροσκοπική χολοκυστεκτομή (before: προεγχειρητικά, 0: άμέσως πριν από την τομή, 15 και 30: λεπτά κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης, day 1: πρωί της πρώτης μετεγχειρητικής ημέρας).



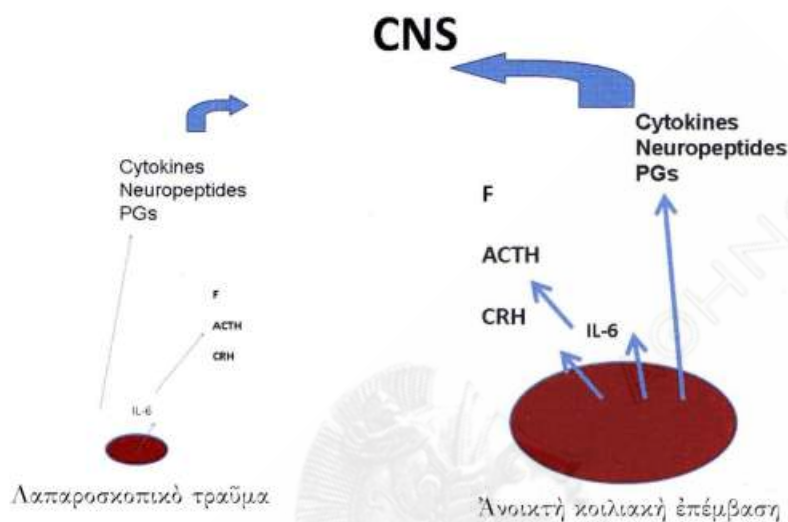
Είχ. 5. Νοραδρεναλίνη πλάσματος (pg/ml) πειραματόζωων σε άνοικτη και λαπαροσκοπική χολοκυστεκτομή (before: προεγχειρητικά, 0: άμέσως πριν από την τομή, 15 και 30: λεπτά κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης, day 1: πρωί της πρώτης μετεγχειρητικής ημέρας).



Εικ. 6. Κορτιζόλη πλάσματος (µg/dl) πειραματόζωων σε άνοικτη και λαπαροσκοπική επινεφριδεκτομή (before: προεγχειρητικά, 0: άμέσως πριν από την τομή, 15 και 30: λεπτά κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης, D1: πρωί της πρώτης μετεγχειρητικής ημέρας).



Εικ. 7. Κορτιζόλη πλάσματος (µg/dl) πειραματόζωων σε άνοικτη και λαπαροσκοπική χολοκυστεκτομή (before: προεγχειρητικά, 0: άμέσως πριν από την τομή, 15 και 30: λεπτά κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης, D1: πρωί της πρώτης μετεγχειρητικής ημέρας).



Είκ. 8. Ένδοκρινική και νευρική αντίδραση σε λαπαροσκοπικό (άριστερά) ή άνοικτο κοιλιακό τραῦμα (δεξιά).

CNS: Κεντρικό Νευρικό Σύστημα, Cytokines: Κυτοκίνες, Neuropeptides: Νευροπεπτίδια, PGs: Προσταγλαδίνες, F: Κορτιζόλη, ACTH: Κορτικοτροπίνη, CRH: Κορτικοτροπινο-εκλυτική ορμόνη.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Glaser, F., Sannwald, G.A., Buhr, H.J., et al. General stress response to conventional and laparoscopic cholecystectomy. *Ann. Surg.* 1995, 221 (4): 372-380.

Udelsman, R., Chrousos, GP. Hormonal responses to surgical stress. *Adv. Exp. Med. Biol.* 1988, 245: 265-272.



ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 31ΗΣ ΜΑΪΟΥ 2011

ΥΠΟΔΟΧΗ ΤΟΥ ΑΝΤΕΠΙΣΤΕΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕΛΟΥΣ  
κ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΘΕΟΛΟΓΗ

ΠΡΟΣΦΩΝΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΤΙΠΡΟΕΔΡΟ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ  
κ. ΓΕΩΡΓΙΟ ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟ

Ο κ. Θεολόγης γεννήθηκε στην Αθήνα το 1944, φοίτησε στην Ανωτάτη Γεωπονική Σχολή Αθηνών από το 1963 έως το 1967 και έλαβε το δίπλωμα του γεωπόνου. Κατά τα τελευταία έτη των σπουδών του εργάστηκε έρευνητικά στο Έργαστήριο Φυσιολογίας Φυτών και τιμήθηκε με βραβεΐα και υποτροφίες. Μετά τη στρατιωτική του θητεία ανεχώρησε για τις ΗΠΑ, όπου από το 1971 έως το 1972 σπούδασε Βιοχημεία Φυτών στο Πανεπιστήμιο της California στο Los Angeles και έλαβε μεταπτυχιακό τίτλο ειδίκευσης και διδακτορικό δίπλωμα το 1977 στη Βιοχημεία Φυτών. Στη συνέχεια υπήρξε Μεταδιδακτορικός Έρευνήτης στο Πανεπιστήμιο της California στο Los Angeles και στο Πανεπιστήμιο του Stanford. Υπηρέτησε για ένα διάστημα στο Πανεπιστήμιο Washington στο St. Louis (1984-87), και τελικά εγκαταστάθηκε στην California. Διέτρεξε όλες τις βαθμίδες της καθηγητικής σταδιοδρομίας.

Σήμερα ο κ. Θεολόγης είναι Πρόεδρος Καθηγητής (Adjunct Professor) του Τμήματος Βιολογίας Φυτών και Μικροβίων στο Πανεπιστήμιο της California στο Berkeley, και Κύριος Έρευνήτης (Senior Scientist) στο εκεί κέντρο έρευνών της γονδιακής έκφρασης των φυτών του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ. Έχει δύο φορές τιμηθεί με βραβεΐα του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ για τις έρευνές του, καθώς και από το Ίδρυμα Kumho της Σεούλ, μαζί με άλλους έρευνητές, για την αποκωδικοποίηση του γονιδιώματος του φυτού *Arabidopsis thaliana* (του πρώτου φυτού που αποκωδικοποιήθηκε). Ο κ. Θεολόγης έχει 93 κύριες έρευνητικές δημοσιεύσεις, αρκετές από τις

όποιες έχουν δημοσιευθεῖ σὲ περιοδικὰ μεγάλου ἐπιστημονικοῦ κύρους, καὶ ἑκατοντάδα περίπου ἀνακοινώσεων. Ὁ ἀριθμὸς ἀναφορῶν στὶς ἐργασίες του ἀνέρχεται περίπου σὲ 5.000. Πρόσφατα ὁ κ. Θεολόγης ἐξελέγη μέλος τῆς Ἀκαδημίας τῶν Ἐπιστημῶν τῶν ΗΠΑ.

Σὲ ἀναγνώριση τοῦ ἐπιστημονικοῦ του ἔργου, ἡ Α' Τάξη τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν πρότεινε τὴν ἐκλογή του κ. Θεολόγου ὡς Ἀντεπιστέλλοντος Μέλους καὶ ἡ Ὁλομέλεια τῆς Ἀκαδημίας ἐνέκρινε τὴν ἐκλογή του.

Καὶ τώρα παρακαλῶ τὸν ἀκαδημαϊκὸ κ. Κριμπᾶ νὰ παρουσιάσει λεπτομερέστερα τὸ ἐπιστημονικὸ ἔργο τοῦ κ. Θεολόγου.

#### ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ κ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟ ΚΡΙΜΠΙΑ

Εἶμαι ἰδιαίτερα εὐτυχῆς διότι σήμερα, κατόπιν ἀποφάσεως τῆς Συγκλήτου τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν, ἔχω τὴν τιμὴ νὰ παρουσιάσω τὴν προσωπικότητα καὶ τὸ ἔργο τοῦ νέου ἀντεπιστέλλοντος μέλους τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν Καθηγητοῦ κ. Ἀθανασίου Θεολόγου, τὸν ὁποῖο γνωρίζω ἀπὸ τὰ ἔτη τῶν σπουδῶν του στὸ ἐπονομαζόμενον σήμερα Γεωπονικὸ Πανεπιστήμιο, δηλαδὴ ἀπὸ τὰ μέσα τῆς δεκαετίας τοῦ 1960, περίπου πενήντα ἔτη. Καὶ θέλω ἀπὸ τοῦ βήματος τούτου νὰ τὸν συγχαρῶ γιὰ τὴν πρόσφατη ἐκλογή του ὡς μέλους τῆς Ἐθνικῆς Ἀκαδημίας Ἐπιστημῶν τῶν ΗΠΑ (National Academy of Sciences of USA), τιμὴ τὴν ὁποία λίγοι Ἕλληνες ἀξιώθηκαν.

Σήμερα ὁ κ. Θεολόγης εἶναι Ὁμότιμος Καθηγητῆς (Adjunct Professor) τοῦ Τμήματος Βιολογίας Φυτῶν καὶ Μικροβίων στὸ Πανεπιστήμιο Καλιφόρνιας στὸ Berkeley, καὶ Ἐρευνητῆς (Senior Scientist GM-15) στὸ Κέντρο Ἐρευνῶν τῆς Γονιδιακῆς Ἐκφρασης τῶν Φυτῶν τοῦ Ὑπουργείου Γεωργίας τῶν ΗΠΑ (Plant Gene Expression Center-PGEC, US Department of Agriculture-USDA). Ἔχει τιμηθεῖ δύο φορές μὲ βραβεῖα τοῦ Ὑπουργείου Γεωργίας τῶν ΗΠΑ γιὰ τὶς ἔρευνές του, καθὼς καὶ ἀπὸ τὸ Ἴδρυμα Kumbo τῆς Σεοὺλ μαζί μὲ ἄλλους ἔξι ἐρευνητὲς ποὺ προέβησαν στὴν ἀποκωδικοποίηση τοῦ γονιδιώματος τοῦ φυτοῦ *Arabidopsis thaliana*, τοῦ πρώτου φυτοῦ ποὺ ἀποκωδικοποιήθηκε καὶ εἶναι γιὰ τὰ φυτὰ τὸ ἀντίστοιχο τῆς δροσόφιλας γιὰ τὰ ζῶα, ἀποτελεῖ δηλαδὴ τὸν ὑποδειγματικὸ ὄργανισμὸ στὶς ἔρευνες τῆς μοριακῆς γενετικῆς τους. Οἱ ἔξι ἐν λόγῳ ἐρευνητὲς ἠγήθησαν ἑκατοντάδος περίπου ἐρευνητῶν ποὺ ἐπιτέλεσαν τὸ μνημειῶδες αὐτὸ ἔργο. Ὁ κ. Θεολόγης ἔχει 93 κύριες ἐρευνητικὲς δημοσιεύσεις καὶ ἑκατὸ περίπου σύντομες ἀνακοινώσεις. Ἐκ τῶν κυρίων του δημοσιεύσεων θέλω νὰ ἐπισημάνω ὅτι ἀρκετὲς ἔχουν δημοσιευθεῖ σὲ περιοδικὰ μεγάλου ἐπιστημονικοῦ κύρους, ὅπως 2 στὸ

περιοδικό *Nature*, 2 στο περιοδικό *Science*, καθώς και 11 στο *Proceedings of the National Academy of Sciences* των ΗΠΑ. Ένδεικτικός είναι ο αριθμός αναφορών των έργασιών του, που ανέρχεται στις 5.000 περίπου.

Ο κ. Θεολόγης γεννήθηκε στην Αθήνα το 1944, φοίτησε στην Ανωτάτη Γεωπονική Σχολή Αθηνών (νύν Γεωπονικό Πανεπιστήμιο) από το 1963 έως το 1967 και έλαβε το δίπλωμα του γεωπόνου. Κατά τα τελευταία έτη των σπουδών του εργάστηκε έρευνητικά στο Έργαστήριο Φυσιολογίας Φυτών, διευθυνόμενο από τον φίλο και συνάδελφό μου, αείμνηστο καθηγητή Κωνσταντίνο Νιαβή. Ο κ. Θεολόγης τιμήθηκε τότε με βραβεία και υποτροφίες, το δέ τελευταίο διάστημα διετέλεσε έμμισθος βοηθός έρευνών, πράγμα το οποίο τον βοήθησε να αντιμετωπίσει τις οικονομικές απαιτήσεις για να τις ολοκληρώσει. Μετά τη στρατιωτική του θητεία ανεχώρησε για τις ΗΠΑ, όπου από το 1971-72 σπούδασε Βιοχημεία Φυτών στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας στο Λος Άντζελες (MSc). Έξακολούθησε να εργάζεται και να σπουδάζει στο ίδιο πανεπιστήμιο, από το οποίο έλαβε το διδακτορικό του δίπλωμα το 1977 στη Βιοχημεία των Φυτών. Τις σπουδές αντιμετώπισε οικονομικά με υποτροφίες και έμμισθα διδακτικά καθήκοντα. Μεταδιδακτορικός έρευνητής υπήρξε στο ίδιο πανεπιστήμιο (1977-79) και στο Πανεπιστήμιο Stanford, προσληφθείς ως Έρευνητής (Research Associate, 1979-84) στο εργαστήριο του A. Kornberg, που τιμήθηκε το 1959 με το βραβείο Nobel. Ακολουθώντας τη σύζυγό του, γυναικολόγο και τώρα καθηγήτρια και πρόεδρο του αντίστοιχου τμήματος της Ιατρικής Σχολής στο Λος Άντζελες, υπηρέτησε για σύντομο χρονικό διάστημα στο Πανεπιστήμιο Washington στο St. Louis (1984-87), μέχρι τη μόνιμή τους εγκατάσταση στην Καλιφόρνια. Διέτρεξε όλες τις βαθμίδες της έρευνητικής σταδιοδρομίας και της καθηγητικής, και υπηρέτησε ως διευθυντής του έρευνητικού κέντρου στο οποίο σήμερα έξακολουθεί να εργάζεται. Όμως το κύριο ενδιαφέρον του εστιάζεται στην έρευνα, από την οποία ουδέποτε απομακρύνθηκε με διοικητικές ή έκτεταμένες διδακτικές δραστηριότητες.

Το έρευνητικό του έργο είναι έντυπωσιακό, αρχής γενομένης από τη διδακτορική του διατριβή. Σε αυτήν πρώτος προσδιόρισε το μηχανισμό με τον οποίο τα φυτά παρακάμπτουν τη δράση του ύδροκυανίου επί της ροής των ηλεκτρονίων στο μιτοχόνδριο κατά την αερόβιο αναπνοή, κάτι που δεν συμβαίνει στα ζώα. Το εύρημα προξένησε μεγάλη έντύπωση και συμπεριελήφθη άμέσως σε ανασκοπήσεις του θέματος.

Η μετέπειτα έρευνητική του δραστηριότητα αναφέρεται στο πεδίο της μελέτης της παραγωγής και δράσης δύο φυτικών όρμονων, της

αύξινης και του αϊθυλενίου, με μεθόδους βιοχημικών προσπελάσεων συνδυαζόμενων με εκείνες της Μοριακής Γενετικής. Επίσης, στην αποκωδικοποίηση του γονιδιώματος του φυτού *Arabidopsis thaliana*, την οποία ήδη αναφέραμε.

Θά έστιάσω πρώτα την προσοχή μου στην έξιχνίαση του μηχανισμού δράσης της αύξινης (του ινδολοξικού όξέος), μιās όρμόνης που εύθύνεται για την ανάπτυξη (αύξηση) του φυτού. Ο Θεολόγης απέδειξε ότι δρά ως μεταγραφικός παράγων, ως παράγων δηλαδή του όποιου ή δράση όφείλεται στην προαγωγή της έκφρασης όρισμένων γονιδίων και μάλιστα ταχύτατα, εντός των δέκα πρώτων λεπτών από την έκθεση του κυττάρου στην όρμόνη. Ακολούθως ό κ. Θεολόγης πέτυχε να απομονώσει και να κλωνοποιήσει τα γονίδια των όποιων ή έκφραση επάγεται από την αύξίνη. Έκείνη την εποχή, τό Τμήμα Βιοχημείας του Stanford πρωτοστατούσε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας του ανασυνδυασμένου DNA, και οι έργασίες του Θεολόγη αποτέλεσαν υπόδειγμα χρήσεως μοριακής βιολογίας για την επίλυση στο επίπεδο των μορίων φυσιολογικών μηχανισμών στά φυτά. Πέραν του ότι συνέβαλαν στη διεθνή του αναγνώριση στο χώρο της Άναπτυξιακής Βιολογίας, τον ανέδειξαν ως έναν από τους πρώτους που εφαρμόσαν σε αυτήν την περιοχή τεχνικές μοριακής βιολογίας. Τα εύρήματα δημοσιεύθηκαν σε αξιόλογα περιοδικά, πρέπει δέ να σημειώσω ότι τό τεύχος του *Journal of Molecular Biology*, που δημοσίευσε την έργασία του, άφιέρωσε την εικόνα του έξωφύλλου του στο άρθρο του Θεολόγη, ενώ τα περιοδικά *Plant Cell* και *Plant Growth and Development* φιλοξένησαν ειδικά σχόλια. Ο ίδιος έλαβε πενήντα προσκλήσεις για διαλέξεις σε διεθνή συνέδρια και πανεπιστήμια και συνέγραψε τρεις ανασκοπήσεις κατόπιν προσκλήσεως. Έλαβε προσφορές καθηγητικών θέσεων από μεγάλα πανεπιστήμια όπως τό Yale, αλλά απέδέχθη την προσφορά του Πανεπιστημίου Washington στο St. Louis για λόγους παράλληλης σταδιοδρομίας της συζύγου του.

Η δεύτερη περιοχή έρευνητικής δραστηριότητας άφορά τό μηχανισμό μοριακής δράσης του αϊθυλενίου ως φυτικής όρμόνης της ώριμάνσεως των καρπών. Η έρευνα συνεχίσθηκε και όταν ό Θεολόγης μετέβη στη νέα του θέση, εκείνη του Προϊσταμένου Έρευνας (Principal Investigator) στο Gene Expression Center του Όμοσπονδιακού Τμήματος Γεωργίας των ΗΠΑ (Federal Department of Agriculture-USDA), και εκείνη του Συνεργαζόμενου Καθηγητού στο Πανεπιστήμιο Berkeley, θέσεις τις όποιες και σήμερα κατέχει. Συνέχισε όμως και την έρευνα για την αύξίνη. Σήμερα, χάρη σε αυτόν γνωρίζουμε ότι ή αύξίνη εισέρχεται στο κύτταρο και



στὸν πυρήνα του, ὅπου ἀντιδρᾷ μὲ ἓνα μεταφραστικὸ σύμπλοκο, τὸ ὁποῖο στὴ συνέχεια ἀπενεργοποιεῖ ἓνα σύστημα καταστολέων τῆς μεταγραφῆς. Ἀποτέλεσμα τούτου εἶναι νὰ ἐλευθερώνεται ἡ δράση θετικῶν παραγόντων γιὰ τὴ μεταγραφή καὶ μετάφραση γονιδίων πού ἀπαιτοῦνται γιὰ τὴν αὐξηση τοῦ φυτοῦ. Πρόκειται γιὰ ἓναν ἐνδιαφέροντα μηχανισμό καταστολῆς τῆς καταστολῆς, πού ἐνισχύει τὴ θετικὴ δράση γονιδίων.

Στὸ δεύτερο τομέα, τοῦ αἰθυλενίου, πέτυχε πρῶτος τὴν ἀπομόνωση καὶ κλωνοποίηση γονιδίων πού ἐλέγχουν τὴ σύνθεση τοῦ αἰθυλενίου (γονίδιο ACL). Ἡ κλωνοποίηση ἐνὸς γονιδίου εἶχε πρακτικὲς ἐφαρμογές, ἐπέτρεψε τὴ σύνθεση γιὰ πρώτη φορά γενετικῶς τροποποιημένων (μεταλλαγμένων) μορφῶν φυτῶν τομάτας, τὰ ὁποῖα δὲν συνθέταν αἰθυλένιο καὶ ἐπομένως παρήγγαν καρπούς μὲ πολὺ καθυστερημένη ὠρίμανση καὶ σήψη. Ἄπὸ τὶς 21 δημοσιεύσεις σὲ κορυφαῖα περιοδικά, σημειώνω 1 στὸ *Science*, 6 στὸ *PNAS*, 5 στὸ *The Journal of Biological Chemistry* καθὼς καὶ 5 ἄρθρα ἀνασκόπησης λόγῳ προσκλήσεων. Ὁ ἀριθμὸς τῶν προσκεκλημένων διαλέξεων ἀνέρχεται σὲ 51. Τὸ περιοδικὸ *Science* προέβαλε στὸ ἐξώφυλλό του καρπούς ἀνθεκτικῶν καὶ κοινῶν ποικιλιῶν, σχόλια παρουσιάσθηκαν σὲ πληθώρα ἐπιθεωρήσεων, ὅπως τὰ *Science Notebook*, *Genetic Technology News*, *Bioprocessing Technology*, *Science News*, *Chemical and Engineering News*, *The Wall Street Journal*, καθὼς καὶ σὲ ἔντυπα τοῦ Department of Agronomy τῶν ΗΠΑ καὶ τοῦ Πανεπιστημίου Berkeley καὶ στὸν ἡμερήσιο Τύπο.

Ἄπὸ τὸ 1994, ὁ Θεολόγης συμμετεῖχε καὶ ὑπῆρξε εἰς ἓκ τῶν δύο καθοδηγητῶν τῆς πολυπληθοῦς ὁμάδας πού ἀποκωδικοποίησε τὸ γονιδίωμα τοῦ φυτοῦ-ὑποδείγματος *Arabidopsis thaliana*. Ἡ πλήρης ἀλληλούχισή του ἀποτελεῖ σημαντικώτατο ἐργαλεῖο γιὰ τοὺς ἐρευνητὲς τῆς μοριακῆς φυσιολογίας τῶν φυτῶν. Ἡ ἀλληλούχιση παρουσιάσθηκε σὲ κορυφαῖα περιοδικά, ὅπως τὸ *Nature* (3 δημοσιεύσεις καὶ εἰκόνα τοῦ φυτοῦ στὸ ἐξώφυλλό του), τὸ *Science* (μία δημοσίευση καὶ χωριστὰ σχόλια γιὰ τὸ ἐπίτευγμα) καθὼς καὶ στὸν ἡμερήσιο Τύπο μὲ ἀνακινώσεις (*New York Times*, *Wall Street Journal*, *Washington Post*, *Nation*, *Philadelphia Inquirer*, *Guardian*, *Observer*, *El Pais*, *Le Monde*) καὶ σὲ δίκτυα τηλεοράσεως (BBC, CNN). Ἡ ἀλληλούχιση αὐτὴ ἐπέτρεψε τὴν ἀποκάλυψη δύο οἰκογενειῶν γονιδίων μὲ 28 καὶ 23 γονίδια ἀντίστοιχα πού ἐμπλέκονται στοὺς ἀναγκαίους παράγοντες γιὰ τὴν αὐξηση τῶν φυτῶν (περιοχὴ δράσης τῆς αὐξίνης) μὲ τὴν ιδιότητα τὰ προϊόντα τους νὰ σχηματίζουν ὁμοδιμερεῖς καὶ ἑτεροδιμερεῖς ἐνώσεις μὲ πάνω ἀπὸ 4.000 συνδυασμούς. Ὡς πρὸς τὸ αἰθυλένιο, τὸ σύστημα εἶναι λιγότερο σύνθετο.

Μόνο 9 γονίδια έντοπίσθησαν, που μετέχουν στη βιοσύνθεσή του και μόνο 25 όμοδιμερή και έτεροδιμερή προϊόντα τους μπορούν να σχηματισθούν.

Ό κ. Θεολόγης αποτελεί μία σημαντική προσωπικότητα με διεθνή έρευνητική παρουσία, και από τοῦ βήματος αὐτοῦ, μαζί με τὰ θερμά μου συγχαρητήρια, θέλω νὰ ἐκφράσω και τὶς θερμότερες εὐχές μου γιὰ τὴ συνέχιση τῆς δραστηριότητάς του και γιὰ κάθε μελλοντικὴ εὐτυχία.



ΕΙΣΙΤΗΡΙΟΣ ΛΟΓΟΣ ΤΟΥ ΑΝΤΕΠΙΣΤΕΛΛΑΟΝΤΟΣ ΜΕΛΟΥΣ

κ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΘΕΟΛΟΓΗ

## THE ROLE OF ETHYLENE IN PLANT BIOLOGY

## THE ETHYLENE MOLECULE

The gas ethylene ( $H_2C=CH_2$ ) is the simplest unsaturated hydrocarbon. It is the most produced industrial chemical in the world and its global production exceeds 110 million tons annually. It is manufactured by catalytic cracking of petroleum products. Ethylene is also a unique plant hormone because of its gaseous nature. It is one of the simplest organic molecules with biological activity. It is the fifth member of a group of small organic molecules known as the "classical plant hormones" (auxins, gibberrellins, cytokinins, abscisic acid and ethylene) that coordinate various aspects of plant growth and development. This hydrocarbon gas, known as the fruit-ripening hormone, profoundly influences the growth and development of plants. Its effects include inhibition of growth, loss of geotropic sensitivity, onset of epinastic curvatures, acceleration of respiration, initiation of rooting, and modification of leaf and fruit pigments. Because large losses of fruits and vegetables are incurred annually (billions of dollars worldwide) due to ethylene's effects on plant senescence, the significance of a means to control the ripening process and prevent spoilage is clear. Ethylene production is also enhanced by a variety of external factors, including wounding, mechanical stimulus, hypoxia, viral infection, elicitors, hormone treatment, chilling injury, drought,  $Cd^{2+}$  and  $Li^+$  ions,  $O_3$ ,  $SO_2$  and other pollutants. Enhancement of ethylene production serves as a signaling mechanism with profound physiological consequences.

The tremendous advances in our understanding of the biology of ethylene the last 100 years coincide with the development of new technologies in the various fields of experimental sciences. This obeys the dogma that Technology Advances Plant Biology and *vice-versa*. Two model plant species, tomato and *Arabidopsis*, have been used for understanding the biology, biosynthesis and perception of ethylene the last 30 years (Figure 1). Tomato has been primarily used for understanding its biosynthesis and the regulation of fruit ripening while *Arabidopsis* has been responsible for elucidating its signaling pathway and the regulation of ethylene production by isolating mutants. However, other plant species such as banana, apple, avocado, pear, peas, carnation, rice etc have been extensively used for understanding the mysteries of ethylene biosynthesis and action.



Figure 1. *Arabidopsis* and tomato are two plant model systems most often used for ethylene research.

#### A HISTORICAL PROSPECTIVE

Folklore says that sealing fruits in a bag encourages them to ripen. It is correct—the bag traps ethylene released by the fruit, and ethylene enhances ripening. The earliest record of human manipulation causing fruit to ripen is in the Old Testament: the prophet Amos described himself as a “piercer” of sycamore fig fruit. The Greek philosopher Theophrastus later recognized that sycamore figs do not ripen unless they are scraped with an iron claw. Twenty-three centuries later, we know that wounding induces ethylene production, resulting in fruit ripening. It has long been known that smoke can accelerate fruit ripening; this observation led to the practice in China of ripening pears in temples filled with incense smoke. We now know that smoke contains ethylene, which is produced by plants to promote fruit ripening. Furthermore, figs found in ancient Egyptian tombs show marks from where they were intentionally gashed.

The spectacular and commercially important effects of ethylene on plant growth can be found in the scientific literature as early as the 19th centu-

ry, when the toxic effect of “illuminating” gas on plants was described: trees growing near broken gas pipes were severely injured; In 1901, at the Botanical Institute of St. Petersburg, Dimitry Neljubow recognized that the growth of his etiolated (dark-grown) pea seedlings grown in laboratory air contaminated with illuminating gas showed a radial swelling of the stem, inhibition of stem elongation, and absence of normal geotropic response (the “triple response”). Neljubow proposed that an unsaturated hydrocarbon, a component of the illuminating gas, is the causal agent of the “triple response”. In 1924, Denny identified ethylene as the component in combustion fumes from kerosene stoves that caused lemon de-greening in California and described it as a ripening agent. Ten years later, in 1934, it was conclusively shown by R. Gane that ripening fruits produced ethylene; he collected an air-stream containing the gaseous products from 60Kgr. of apples” over one-month period, from which he purified a small amount of ethylene. In 1959, Stanley Burg and Kenneth Thimann developed a gas chromatographic (GC) method for identifying and precisely quantifying ethylene; GC still remains a key method used in ethylene research. Eight decades later, Neljubow’s seedling “triple response” phenotype was used as the basis for the genetic dissection of the ethylene response pathway in *Arabidopsis*, providing insight into the molecular mechanisms of ethylene signaling.

#### BIOSYNTHESIS OF ETHYLENE AND ITS REGULATION

Ethylene is produced by plant tissues in amounts ranging from almost zero up to 500 nl/g per hr. Shan Far Yang and associates at the University of California at Davis elucidated the pathway for ethylene synthesis in 1979. The pathway is a beauty of biochemical design and its elucidation was a major contribution to plant biochemistry (Figure 2). Ethylene is made from methionine (Met) via S-adenosyl-methionine (AdoMet). The enzyme AdoMet synthase is responsible for AdoMet synthesis from Met and ATP (reaction 1 in Figure 2). Subsequently, AdoMet is converted to ethylene by a two-step biosynthetic pathway shown in Figure 2. The rate-limiting step in the pathway is catalyzed by 1-aminocyclopropane-1 carboxylic acid (ACC) synthase (ACS). It converts AdoMet to ACC, the immediate precursor of ethylene, and 5'-methylthioadenosine (MTA) (reaction 2 in Figure 2), an oxygen independent step. The final step conversion of ACC to ethylene, HCN, and CO<sub>2</sub>, is catalyzed by ACC oxidase (ACO; reaction 3 in Figure 1), an oxygen dependent step. The pathway is designed to allow high rates of ethylene production without high intracellular concentrations of methionine (a less abundant amino acid). This is achieved by recycling 5'-methylthioadenosine (MTA) to methionine (Figure 2). The overall result is that the ribose moiety of ATP gives rise to the 4-carbon skeleton

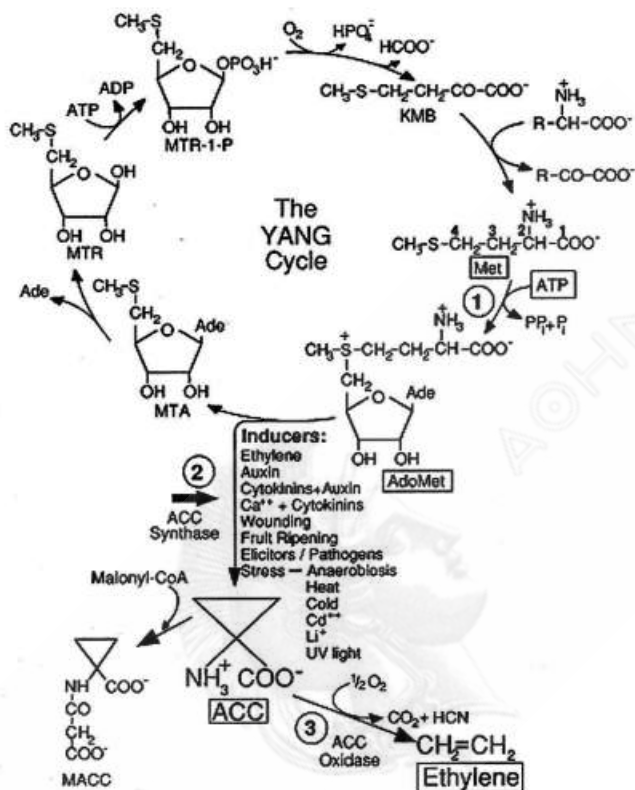


Figure 2. The ethylene biosynthetic pathway of higher plants: AdoMet, S-adenosyl-L-methionine; ACC, 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid; KMB, 2-keto-4-methylthiobutyrate; MACC, malonyl-ACC; MTA, 5'-methylthioadenosine; MTR, 5'-methylthioribose; MTR 1-P, MTR-1-phosphate.

of methionine from which ethylene is derived. The methylthiol group, however, is conserved for continued regeneration of methionine. Thus, with a constant pool of the methylthiol group and available ATP, high rates of ethylene production can be achieved. ACS is the key regulatory step of the pathway. Numerous inducers, including hormones and environmental stimuli, enhance the activity of ACS by transcriptional and posttranscriptional regulatory mechanisms (see step 2 in Figure 2).

#### ACC SYNTHASE (ACS)

None of the ethylene biosynthetic enzymes have been purified to homogeneity because of their low abundance. It was molecular cloning and heterologous

expression that allowed the isolation of the genes encoding AdoMet synthase, ACC synthase (ACS) and ACC oxidase (ACO). A cDNA encoding ACS was cloned from zucchini using immunochemical approaches, and its authenticity was confirmed by expression in *E. coli* and yeast by Sato and Theologis in 1989. Immediately thereafter, ACS was cloned from a variety of plant species. ACS is a cytosolic enzyme with a short half-life and requires pyridoxal phosphate (PLP) as a cofactor. The enzyme functions as a homodimer whose active site is formed from the interaction of residues from the monomeric subunits, similar to AspAT. ACS is encoded by a multigene family in every plant species examined. The sequencing of the *Arabidopsis* genome revealed nine genes that encode the ACS family of proteins. Eight of them form functional homodimers; one forms a non-functional homodimer. The carboxylic end of the nine ACS proteins, which is the most variable, is a regulatory domain responsible for posttranslational regulation of the enzyme the non-variable amino terminus harbors the catalytic domain. The ACS proteins are normally very unstable, and we now know that they are actively targeted for proteolysis as a means of maintaining a low-level of ethylene synthesis. Specific sequences at the C-terminus of some ACS isoforms contribute to a rapid proteolytic degradation by the 26S proteasome. Under some conditions the proteins are phosphorylated by one or more protein kinases, enhancing their stability. This regulatory pathway was discovered by Joe Kieber's group through analysis of gain-of-function ethylene-overproducing (*eto*) mutants in *Arabidopsis*.

In addition, the subunits of all isozymes have the capacity to form active and inactive heterodimers in *E. coli* and *in planta*. The ACS polypeptides can potentially form 45 homo and heterodimers of which 25 are functional. Functional heterodimerization enhances the isozyme diversity of the ACS family and provides physiological versatility by being able to operate in a broad gradient of AdoMet concentration in various cells/tissues during plant growth and development. Furthermore, recent findings with high order loss of function ACS mutants revealed that ethylene-mediated processes in *Arabidopsis* are regulated by a combinatorial interplay among the nine ACS subunits, which can form forty-five different dimeric isoforms. This interplay provides a combinatorial code that determines the relative ratio of homo- and heterodimers (active or inactive) in a spatio-temporal manner and is the central regulator of ethylene production during plant development. In addition, the lethality of the ACS null mutant, in contrast to the viability of null mutations in key components of the ethylene signaling apparatus, strongly support the idea that ACC, the precursor of ethylene, is a *primary* regulator of plant growth and development.

### ACC OXIDASE (ACO)

The enzyme ACC oxidase (ACO) is constitutively expressed in most vegetative tissues and is induced during fruit ripening. Don Grierson and colleagues first cloned the first cDNA encoding ACC oxidase from tomato fruit in 1985. Its authenticity was confirmed by antisense experiments in transgenic plants and by expression experiments in yeast and *Xenopus* oocytes in 1991. ACO is a dioxygenase that belongs to the superfamily of Fe<sup>+</sup>/ascorbate oxidases. It is a monomer and is encoded by small multigene family in all plant species examined.

### ETHYLENE SIGNALING

Plants can sense as little as 10-100 nl C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/l of air. They achieve this using a linear signaling pathway shown in Figure 3. Much of our knowledge about ethylene signaling comes from studies in *Arabidopsis*. The "triple response" provided a rapid and easy screen for mutants that either fail to respond to exogenous ethylene (ethylene insensitive; *ein* mutants) or constitutively respond (*ctr* mutants), even in the absence of ethylene. Double mutant analysis was used to identify epistatic interactions, allowing their order of the various genes in the pathway. The laboratories of Anthony Bleecker, Caren Chang, Joseph Ecker and Elliot Meyerowitz in the USA are responsible for the elucidation of the ethylene-signaling pathway.

In *Arabidopsis* and other plant species ethylene regulates expression of genes responsible for the response to ethylene via a protein kinase cascade that results in transcriptional activation of genes responsible for specific responses to ethylene (Figure 3). Extensive genetic analysis of ethylene sensing by *Arabidopsis* has established a linear signal transduction pathway connecting five membrane-bound, copper-containing receptors to a single negative regulator, CTR1 and to two key downstream positive regulators, EIN2 and EIN3. The ethylene receptors, which are similar to two-component histidine protein kinase receptors, are negative regulators of ethylene signaling. In the absence of ethylene the receptors inhibit ethylene responses through CTR1, a Raf-like (MPKKK) protein kinase. Ethylene binding to the receptors prevents them from inhibiting ethylene responses. CTR1 negatively regulates ethylene responses by inhibiting the positive regulator EIN2, an Nramp-like integral membrane protein that transduces the ethylene signal to the transcription factor EIN3 by an unknown mechanism. EIN3 and its close relative EIN3-like (EIL1) are plant specific nuclear transcription factors that initiate downstream transcriptional cascades responsible for ethylene responses. Ethylene-regulated protein stability of the receptors and EIN2 and EIN3 is central to the operation of the signaling machinery.



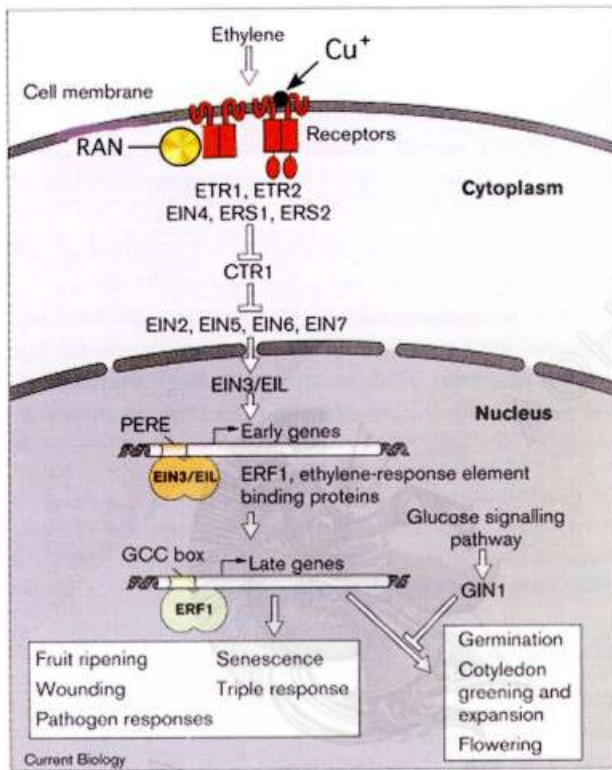


Figure 3. The ethylene signaling pathway (from *Current Biology*, vol. 8, no 24, 875-878).

## ROLE OF ETHYLENE IN WHOLE PLANT PROCESSES

Ethylene participates in many diverse processes from germination through fruit ripening, senescence and pathogen-mediated cell death. As yet the molecular details of many of these processes remain to be resolved. Here I would like to highlight some spectacular effects of ethylene on plant growth and development of highly agronomical importance.

### HOOK FORMATION

In dicot plants like peas and *Arabidopsis*, a unique mechanism has evolved to protect the delicate shoot meristem while the seedling makes its way through the soil towards the soil surface. During germination of the seedling, a hook-like structure is formed at the apical part of the hypocotyl or epicotyl. The apical hook is maintained until the seedling emerges and upon exposure

to light, the hook opens. The process is irreversible; once the apical hook has opened it cannot be reformed. The establishment of the apical hook is orchestrated by the differential elongation rates of cells within the structure. The coordination of differential cell growth in the apical hook is regulated by light and the plant hormones ethylene and auxin.

#### ETHYLENE AND DISEASE RESISTANCE

Ethylene greatly contributes to the plants defenses against pathogens. This was convincingly illustrated in a study in which ethylene-insensitive tobacco plants were sensitive to diseases caused by normal, soil-borne non-pathogenic fungi; the plants' most basic defenses were eliminated. It was found that ethylene is necessary for the induction of defense-associated genes. More recently, it has been shown that high order loss of function ACC synthase mutants in *Arabidopsis* that produce low levels of ethylene are sensitive to pathogens.

#### ETHYLENE IN EPINASTY AND DEEPWATER RICE

Ethylene production is stimulated under various forms of abiotic stress. The roles of ethylene in flooding responses have been studied extensively. Under optimal conditions, roots exist in moist but not waterlogged soil, allowing them to take up water and dissolved ions but also oxygen through the air spaces in the soil matrix. When plants are flooded, they become hypoxic (oxygen deprived). Plants have several responses to flooding and hypoxia. A long-term, morphological change that occurs in roots of many plants adapted to flood-prone regions is the formation of aerenchyma – air-filled channels that run through the root system. Like the ventilation shafts of underground subway systems, oxygen moves through the aerenchyma to provide oxygen to the submerged tissues. Aerenchyma formation is induced by ethylene produced in the root cortex tissues due to elevated expression of ACS. Under severe hypoxia, the ACC synthesized in the roots cannot be converted to ethylene because the ACO reaction is oxygen dependent. In these cases, the ACC can be transported into the shoot tissues. Ethylene production in the shoot induces a pronounced leaf drooping response called epinasty, which is thought to reduce light absorption by the leaves (stressed plants can't process light energy as quickly and are prone to photo-oxidative damage). Some plants, including deep-water varieties of rice, respond to flooding by an ethylene-induced shoot elongation. This response can be very dramatic; deep-water rice plants can elongate by 25 cm per day, and can reach heights of up to 15 m.

## ETHYLENE IN SEX DETERMINATION AND FLOWER SENESCENCE

In the *Cucurbitaceae* family (which includes cucumber [*Cucumis sativus*] and melon [*Cucumis melo*]), ethylene contributes to sex determination. Although most plants produce hermaphroditic flowers, which have both male and female reproductive organs, many *Cucurbitaceae* produce various combinations of male, female and hermaphroditic flowers. Ethylene has long been recognized as a promoter of femaleness, with exogenous ethylene treatment converting flowers that would otherwise be hermaphroditic into female, or male into hermaphroditic plants. Flowers also make non-sexual organs, the sepals and petals. After pollination, these organs are no longer useful, and usually either abscise (fall off) or wither. Several studies have shown a very specific induction of ethylene biosynthesis in the petals and sepals that causes their senescence. A better understanding of these processes also has tremendous commercial potential; how much more would you be willing to pay for cut flowers that were guaranteed to stay fresh and beautiful for more than a month?

## ETHYLENE AND FRUIT RIPENING

Ethylene regulates fruit ripening by coordinating the expression of genes responsible for enhancing a rise in the rate of respiration, autocatalytic ethylene production, chlorophyll degradation, carotenoid synthesis, conversion of starch to sugars, and increased activity of cell wall-degrading enzymes.

Fruits like tomato, pear, apple and banana are climacteric fruits, in which there is a ripening-related burst of respiration and ethylene production that coordinates ripening across the fruit. At least ten percent of the tomato genome is expressed during fruit development, with different genes involved in the early (maturation) and later (ripening) phases. During the ripening phase, ethylene positively regulates ethylene production, destabilizes some of the ethylene receptors, and induces expression of many genes associated with ripening. Some of these ripening-associated genes include genes involved in synthesis of pigments, aromas and flavors, sugar production from starches, and cell wall changes associated with fruit softening. Efforts have been always made by plant biologists to modulate ethylene synthesis or response in order to delay ripening, so that fruit is more tolerant of long-distance transport, or accelerate ripening to shorten the time to fruit harvesting. It has been estimated by the US National Academy of Sciences that 50% of fruits and vegetables are lost due to ethylene-induced senescence.

## BIOTECHNOLOGY OF ETHYLENE

It has always been a goal of Plant Scientists to delay fruit ripening in a reversible manner and to prevent flower senescence. Various methods have been

employed, such as ventilation with air under hypobaric pressures or use of inhibitors of ethylene action, such as silver ions and carbon dioxide. Inhibition of flower senescence using STS (silver thiosulfate) has been a horticultural practice the last 30 years. However, these approaches are expensive and fail to prevent fruit and flower senescence satisfactorily. Furthermore silver is quite toxic and may damage the human nervous system. A more desirable solution would be the construction of a mutant plant whose fruits do not ripen until treated with ethylene or mutant plants whose flowers do not sense ethylene. The cloning of genes in ethylene biosynthesis and signaling allowed the construction of such mutants using recombinant DNA technology. Tomato fruit ripening was successfully inhibited for the first time with antisense-RNA of a fruit specific ACC synthase or ACC oxidase. The antisense phenotype can be reversed by exogenous ethylene. Carnation flower senescence was also successfully retarded with expressing the dominant mutation (*etr1-3*) of the ethylene receptor ETR1.

#### FUTURE DIRECTIONS

The Plant Biologists of the 20th century discovered the spectacular effects of ethylene on plant growth and development, elucidated its biosynthetic and signaling pathways, and were able to inhibit for the first time ethylene-regulated plant senescence. They were able to achieve these goals by utilizing all the technological advances of their century. Recombinant DNA technology and the introduction of *Arabidopsis* molecular genetics were among some of the key weapons for all these achievements. There are still many outstanding questions about the regulation of ethylene synthesis and perception to be answered. Understanding how the ethylene biosynthetic and signaling pathways are coordinated with the other hormonal biosynthetic and signaling pathways in a cell and tissue specific manner for mediating plant growth and development is a major goal for the future. It will require the development of new technologies. Such knowledge will contribute to the long-term goal of Plant Scientists to construct new plants species with superior agronomical qualities in order to feed the ever-increasing human population of the planet earth.

---

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 2ΑΣ ΙΟΥΝΙΟΥ 2011

ΕΥΣΥΝΟΠΤΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΑΡΟΥ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ  
ΜΕ ΤΗΝ ΕΥΚΑΙΡΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗΣ ΤΟΥ

ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ κ. ΑΝΤΩΝΙΟ ΚΟΥΝΑΔΗ

Πολύ συνοπτικά, σχετικά με την παρούσα ανακοίνωση, ως Πρόεδρος του Τεχνικού Συμβουλίου, θα εκθέσω τα παρακάτω, αφού στο μέλλον θα γίνει έκτενης αναφορά στην ανακαίνιση του Μεγάρου της Ακαδημίας με ειδική έκδοση.

Ο θεμέλιος λίθος του Μεγάρου της Ακαδημίας τέθηκε το 1859 και η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1886, διήρκεσε δηλαδή 27 χρόνια. Η αρχιτεκτονική μελέτη εκπονήθηκε από τον Δανό αρχιτέκτονα Θεόφιλο Χάνσεν, με τη στενή συνεργασία του επίσης επιφανούς αρχιτέκτονα Έρνέστου Τσίλλερ. Το έργο χρηματοδοτήθηκε από τον βαρώνο Γεώργιο Σίνα, Γενικό Πρόξενο τότε της Ελλάδος στη Βιέννη, φίλο του Θεόφιλου Χάνσεν. Μετά το θάνατο του Γεωργίου Σίνα, η χρηματοδότηση συνεχίστηκε από τον γιό του Σίμωνα Σίνα. Το εξωτερικό του Μεγάρου είναι κατασκευασμένο από πεντελικό μάρμαρο και η τοιχοποιία από πωρόλιθο. Οί μοναδικού κάλλους τοιχογραφίες στην αίθουσα αυτή παρουσιάζουν σκηνές από το μύθο του Προμηθέως. Τα γλυπτά του αετώματος της προσόψεως, κατασκευασμένα επίσης από πεντελικό μάρμαρο, μεγάλης καλλιτεχνικής αξίας, καθώς και τα αγάλματα της Αθηνᾶς και του Απόλλωνος, είναι έργα του γλύπτου Λεωνίδα Δρόση.

Το όλο έργο μέχρι των αρχών του 2000 ουσιαστικῶς δὲν εἶχε συντηρηθεῖ. Λέγω ουσιαστικῶς, διότι εἶχαν γίνει κάποιες μικροεπεμβάσεις, ὅπως λόγου χάρη σὲ ὀρισμένα ζευκτὰ τῆς στέγης, καθὼς καὶ ἡ συντήρηση τῶν κεραμικῶν γλυπτῶν ἀπὸ τερακότα στὰ ὀκτὼ μικρὰ αετώματα ἀπὸ τὸν αἰμνηστο Γιάννη Παππᾶ με βοηθὸ τὸν γλύπτη κ. Πραξιτέλη Τζανουλίνο. Ἔτσι, ἡ ἔλλειψη οὐσιαστικῆς συντηρήσεως εἶχε δημιουργήσει σοβαρὰ προβλήμα-

τα, ἀφοῦ ἀπὸ διάφορα σημεῖα τῆς στέγης εἰσέρρεαν βρόχινα νερὰ ἐντὸς τοῦ Μεγάρου. Στὸν προθάλαμο, μάλιστα, τῆς αἰθούσης αὐτῆς εἶχαν τοποθετηθεῖ μικρὲς σκάφες γιὰ τὴ συγκέντρωση τῶν βρόχινων ὑδάτων. Ἡ ὑγρασία κάτω ἀπὸ τὴν κεραμοσκεπὴ στέγη εἶχε διαβρώσει κάποια ζευκτά, ἀπὸ τὰ ὁποῖα κρέμονταν βαρύτερες καλλιτεχνικὲς ὀροφές. Ὅπως θὰ ἐνθυμεῖστε εἶχαμε πτώσεις τμημάτων τῶν ὀροφῶν, τόσο στὴ Δυτικὴ Αἴθουσα τοῦ Μεγάρου, ὅσο καὶ στὴν Ἀνατολική, χωρὶς εὐτυχῶς θύματα, διότι αὐτὲς οἱ πτώσεις ἔγιναν σὲ ὦρες ποὺ δὲν λειτουργοῦσε ἡ Ἀκαδημία. Ἐπίσης εἶχαμε ἀποκολλήσεις μεγάλων ἐπίτοιχων μαρμάρινων ἐπιφανειῶν στὴν Αἴθουσα Τελετῶν, ἀλλὰ καὶ πτώση μικροῦ τμήματος τῆς ὀροφῆς της, ποὺ ἔγιναν εὐτυχῶς σὲ ὦρες μὴ λειτουργίας τῆς Ἀκαδημίας. Ἐπίσης, οἱ σπάνιες τοιχογραφίες τῆς αἴθουσας αὐτῆς εἶχαν ὑποστῆ σημαντικὲς ἀλλοιώσεις ἀπὸ τὴν εἴσοδο βρόχινων ὑδάτων μῆσω τῶν ἀρμῶν τῆς ἐξέχουσας ἐξωτερικῆς τοιχοποιίας.

Ἐν ὄψει ὅλων αὐτῶν, χάρις στὶς προσπάθειες τοῦ διακεκριμένου συναδέλφου κ. Γρηγορίου Σκαλκέα ὡς Ἀντιπρόεδρου καὶ ἐν συνεχείᾳ ὡς Προέδρου τῆς Ἀκαδημίας, ἐξασφαλίστηκε ἀπὸ τὴν Εὐρωπαϊκὴ Ἐνωση μῆσω τοῦ Περιφερειάρχῃ μιὰ σημαντικὴ ἐπιχορήγηση ὕψους 1,6 δισεκατομμυρίων περίπου δραχμῶν, γιὰ τὴν ἀποκατάσταση βλαβῶν τοῦ Μεγάρου λόγω σεισμῶν βάσει μιᾶς παλιᾶς ἐκθέσεως ποὺ εἶχα συντάξει ὡς Ἀντιπρόεδρος τοῦ Τεχνικοῦ Συμβουλίου. Μὲ τὴ χρηματοδότηση αὐτὴ ἀνακαινίστηκε ἐπίσης τὸ Μέγαρο ἐσωτερικῶς καὶ ἐξωτερικῶς, μὲ ἀποτέλεσμα νὰ ξαναβρεῖ σὲ μεγάλο βαθμὸ τὴν παλιά του λάμψη. Ἡ ἐκτέλεση τοῦ ἔργου αὐτοῦ δὲν θὰ μπορούσε νὰ πραγματοποιηθεῖ χωρὶς τὴν ὑπαρξὴ τεχνικῆς ὑπηρεσίας, ποὺ δὲν διέθετε ἡ Ἀκαδημία. Τὸ πρόβλημα αὐτὸ ὥστόσο λύθηκε μὲ τὴ συνδρομὴ τῆς Τεχνικῆς Ὑπηρεσίας τοῦ Ἰατροβιολογικοῦ Κέντρου, ἐπικεφαλῆς τοῦ ὁποίου ἦταν —ἀλλὰ καὶ εἶναι— ἡ ἀρχιτέκτων κ. Ντόρα Παπαδημητρίου, μὲ συνεργάτη της τὸν πολιτικὸ μηχανικὸ κ. Χρῆστο Δήμου.

Περὶ τὰ τέλη τῆς ἀνακαινίσεως ἡ κρατικὴ τηλεόραση, μετὰ ἀπὸ συνενόηση μὲ τὸν ἀείμνηστο Γενικὸ Γραμματέα Νικόλαο Ματσανιώτη, κατασκεύασε μιὰ σύντομης διάρκειας ταινία, τὴν ὁποία θὰ δεῖτε εὐθὺς ἀμέσως, καὶ τὴν ὁποία οἱ διακεκριμένοι συναδέλφοι κ.κ. Σακελλαρίου καὶ Χρήστου, καθὼς καὶ ὁ ὁμιλῶν, παρακλήθηκαν νὰ προλογίσουν.

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 21ΗΣ ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2011

ΥΠΑΡΧΕΙ ΧΑΟΣ ΣΤΙΣ ΜΕΛΑΝΕΣ ΟΠΕΣ;

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ κ.κ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΥ  
ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΛΟΥΚΕΣ-ΓΕΡΑΚΟΠΟΥΛΟΥ

ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ κ. ΓΕΩΡΓΙΟ ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟ

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μελανές όπες είναι ένα από τα πλέον άκραία φαινόμενα που έχει προβλέψει η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας (Misner et al. 1973). Υπάρχουν σήμερα πολλές ενδείξεις για την ύπαρξη μελανών όπων στο διάστημα, σε ζεύγη αστέρων και στα κέντρα γαλαξιών (Schutz 2009, Babak et al. 2011). Στο κέντρο πολλών γαλαξιών παρατηρείται μια έντονη έκπομπη ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος, από ραδιοφωνικά μέχρι τις ακτίνες γ. Έτσι έχουμε τους Ένεργους Γαλαξιακούς Πυρήνες (Active Galactic Nuclei), και σε άκραίες περιπτώσεις τους Ήμιστέρες (Quasars).

Θεωρείται πολύ πιθανό ότι η δραστηριότητα αυτή οφείλεται στην ύπαρξη υπερμεγεθών μελανών όπων στα κέντρα των γαλαξιών αυτών. Βεβαίως είναι γνωστό ότι οι μελανές όπες απορροφούν κάθε ακτινοβολία και κάθε σωματίο που προσπίπτει σε αυτές και δεν ακτινοβολούν\*. Έντούτοις, οι μελανές όπες επηρεάζουν σημαντικά το περιβάλλον τους και προκαλούν έμμέσως την ακτινοβολία, είτε βαρυτική είτε ηλεκτρομαγνητική, που οφείλεται στις κινήσεις σωματίων γύρω από κάθε μελανή όπη.

Η κίνηση των σωματίων έχει άμεση σχέση με το φάσμα των συχνοτήτων της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό είναι ενδιαφέρον

---

\* Η ακτινοβολία Hawking, που οφείλεται στις κβαντικές ιδιότητες των μελανών όπων, είναι, εν γένει, ασήμαντη.

νά μελετηθοῦν οἱ τροχιές σωματίων, συμπεριλαμβανομένων τῶν φωτονίων καὶ μεγάλων συμπαγῶν σωμάτων, γύρω ἀπὸ μελανές ὀπές. Οἱ τροχιές αὐτὲς εἶναι δυνατὸν νὰ εἶναι εἴτε ὀργανωμένες εἴτε χαοτικές. Ἐπομένως παρουσιάζονται δύο προβλήματα. Πρῶτον, πότε οἱ τροχιές εἶναι ὀργανωμένες καὶ πότε χαοτικές. Καὶ δεύτερον, πῶς εἶναι δυνατὸν νὰ γίνῃ διάκριση μεταξὺ τῶν δύο αὐτῶν τύπων ἀπὸ παρατηρήσεις.

Σύμφωνα μὲ ἓνα βασικὸ θεώρημα τῆς Γενικῆς Θεωρίας τῆς Σχετικότητος (Misner et al. 1973), ὁ χωρόχρονος γύρω ἀπὸ μία σταθερὴ μελανὴ ὀπή χαρακτηρίζεται μόνον ἀπὸ τρεῖς ποσότητες: τὴ μάζα, τὴ στροφορμὴ καὶ τὸ φορτίο τῆς μελανῆς ὀπῆς.

Ἄν ἡ μελανὴ ὀπή δὲν ἔχει φορτίο καὶ δὲν περιστρέφεται, ὁ χωρόχρονός της περιγράφεται ἀπὸ τὴ μετρικὴ Schwarzschild (1916). Ἄν ἡ μελανὴ ὀπή ἔχει περιστροφή ἀλλὰ ὄχι φορτίο, τότε περιγράφεται ἀπὸ τὴ μετρικὴ Kerr (1963). Τέλος, μία μελανὴ ὀπή μὲ περιστροφή καὶ φορτίο περιγράφεται ἀπὸ τὴ μετρικὴ Kerr-Newman (Newman et al. 1965). Αὐτὲς οἱ μελανές ὀπές εἶναι ὀλοκληρώσιμες, δηλαδή οἱ τροχιές γύρω ἀπὸ αὐτὲς εἶναι ὀργανωμένες καὶ δὲν παρουσιάζουν χάος.

Ἡ πρώτη θεωρητικὴ ἔνδειξη γιὰ τὴν ὑπαρξὴ χάους στὴ Γενικὴ Θεωρία τῆς Σχετικότητος δόθηκε ἀπὸ τὸν Chandrasekhar (1989), ὁ ὁποῖος ὑπολόγισε λίγες τροχιές σωματίων σὲ ἓνα σύστημα δύο σταθερῶν μελανῶν ὀπῶν. Τὸ πρόβλημα αὐτὸ ἔχει ἰδιαίτερο ἐνδιαφέρον γιὰ τὴ Γενικὴ Θεωρία τῆς Σχετικότητος, διότι τὸ ἀντίστοιχο κλασικὸ πρόβλημα, τὸ πρόβλημα τῶν δύο σταθερῶν κέντρων, εἶναι ὀλοκληρώσιμο, ἄρα δὲν ἔχει καθόλου χάος. Ὁ Chandrasekhar βρῆκε μερικές τροχιές ποὺ ὑποδείκνυαν τὴν ὑπαρξὴ χάους. Ἀλλὰ μιὰ λεπτομερὴς μελέτη τῶν χαοτικῶν τροχιῶν στὸ πρόβλημα αὐτὸ ἔγινε ἀπὸ ἐμᾶς, ποὺ ἀποδείξαμε ὅτι οἱ περισσότερες τροχιές εἶναι χαοτικές (Contopoulos 1990, 1991). Ἀργότερα, πολλοὶ ἄλλοι βρῆκαν χάος σὲ διάφορα προβλήματα τῆς Γενικῆς Θεωρίας τῆς Σχετικότητος (Moeckel 1992, Bombelli and Gazetta 1992, Varvoglis and Papadopoulos 1992, Dettman et al. 1994, Hobill et al. 1994, Darian and Künzle 1996, Suzuki and Maeda 1997, Chicone et al. 1997, 1999, 2000, Podolsky and Vesely 1998, Barrow and Levin 1998, κλπ.).

Τὸ πρόβλημα τῆς ἀκτινοβολίας τῶν μελανῶν ὀπῶν ἔχει ἐνδιαφέρον, διότι τὰ ἐκπεμπόμενα βαρυτικὰ κύματα βρίσκονται σὲ περιοχὲς τοῦ φάσματος στὶς ὁποῖες εἶναι εὐαίσθητοι οἱ ἐν λειτουργίᾳ ἀνιχνευτὲς βαρυτικῶν κυμάτων (Schutz 2009). Ἐνα ὅμως βασικὸ ζήτημα εἶναι νὰ ἐλέγξουμε ἂν ὁ χωρόχρονος γύρω ἀπὸ τὴ μελανὴ ὀπή περιγράφεται ἀπὸ τὴ μετρικὴ Kerr ἢ ὄχι. Ἐπομένως εἶναι ἐνδιαφέρον νὰ ἐξετάσουμε χωρόχρονους ποὺ ἀποτε-



λοῦν γενικεύσεις τῶν μελανῶν ὀπῶν Kerr. Ἕνα τέτοιο γενικό μοντέλο εἶναι τὸ μοντέλο Manko-Nonikov (MN) (1992).

Ἡ πρώτη μελέτη τροχιῶν στὸ μοντέλο MN ἔγινε ἀπὸ τοὺς Gair et al. (2008). Ἐμεῖς κάναμε μιὰ συστηματικὴ μελέτη τῶν τροχιῶν στὸ μοντέλο αὐτὸ καὶ ὑποδείξαμε πῶς θὰ μπορούσαμε ἀπὸ παρατηρήσεις τῆς ἀκτινοβολίας βαρύτητος νὰ συμπεράνουμε τὴν ὑπαρξὴ χάους. Τὰ ἀποτελέσματά μας δημοσιεύθηκαν στὸ περιοδικὸ *Physical Review Letters* (Apostolatos, Lukes-Gerakopoulos and Contopoulos 2009), καθὼς καὶ στὸ περιοδικὸ *Physical Review D* (Lukes-Gerakopoulos, Apostolatos and Contopoulos 2010).

Στὴν παρούσα ἐργασία δίνουμε μιὰ περίληψη τῶν προηγούμενων ἀποτελεσμάτων καὶ ἀναπτύσσουμε μιὰ λεπτομερῆ ἀνάλυση τῶν τροχιῶν σὲ διάφορες περιπτώσεις τοῦ μοντέλου Manko-Novikov. Τὸ τελικὸ μας συμπέρασμα εἶναι ὅτι, ἐὰν παρατηρηθοῦν κύματα βαρύτητας (π.χ. ἀπὸ τὸν δορυφόρο Lisa [Bender et al. 1998] ὁ ὁποῖος ὑπολογίζεται ὅτι θὰ ἐκτοξευθεῖ μετὰ τὸ 2013) ἀπὸ συστήματα μελανῶν ὀπῶν καὶ συνοδῶν μὲ ἀκραῖο λόγο μάζας —καὶ τέτοια συστήματα ἀναμένεται νὰ παρατηρηθοῦν σὲ κέντρα γαλαξιών—, τότε παρακολουθώντας τὴν ἐξέλιξη τῶν συχνοτήτων τῶν κυμάτων αὐτῶν θὰ μπορούμε νὰ συμπεράνουμε ἂν ἡ πηγὴ τους ὀφείλεται στὴν ἐπίδραση μιᾶς μελανῆς ὀπῆς Kerr ὅπου δὲν ὑπάρχει χάος, ἢ σὲ μιὰ μορφὴ παρόμοια μὲ αὐτὴ τοῦ Manko-Novikov ὅπου τὸ χάος εἶναι ἐμφανές.

## 2. ΤΡΟΧΙΕΣ ΣΕ ΜΕΛΑΝΕΣ ΟΠΙΕΣ MANKO-NOVIKOV

Τὸ μοντέλο Manko-Novikov ἀποτελεῖ μιὰ λύση τῶν ἐξισώσεων πεδίου τοῦ Einstein μὲ ἀρκετὰ πολύπλοκη μορφή. Ἡ μορφή τῆς μετρικῆς δίδεται στὶς ἐργασίες τῶν Gair et al. (2008) καὶ Lukes-Gerakopoulos et al. (2010). Ἡ λύση αὐτὴ χαρακτηρίζεται ἀπὸ τὴ μάζα τοῦ κεντρικοῦ συμπαγοῦς σώματος  $M$ , τὸ spin  $S$  καὶ μιὰ παράμετρο  $q$ , ἢ ὁποῖα δίνει τὴν ἐκτροπὴ τῆς μετρικῆς MN ἀπὸ τὴν ἀντίστοιχη μετρικὴ Kerr. Ὄταν  $q=0$ , ἡ μετρικὴ MN ἀνάγεται στὴ μετρικὴ Kerr, ἢ ὁποῖα παριστάνει ἕνα πεπλατυσμένο ἐλλειψοειδὲς μὲ συμμετρία ὡς πρὸς τὸν ἄξονα  $z$ . Ὄταν  $q>0$ , ἡ μετρικὴ Manko-Novikov ἔχει μικρότερη τετραπολικὴ ροπὴ ἀπὸ τὴ μετρικὴ Kerr.

Οἱ τροχιᾶς ὑπολογίζονται στὸ μεσημβρινὸ ἐπίπεδο  $(\rho, z)$  ποὺ διέρχεται ἀπὸ τὸν ἄξονα  $z$ , καὶ  $\rho$  εἶναι ἡ ἀπόσταση ἀπὸ τὸν ἄξονα  $z$ . Οἱ ταχύτητες  $\dot{\rho} = d\rho/dt$ ,  $\dot{z} = dz/dt$ , ὅπου  $t$  εἶναι ὁ ἴδιος χρόνος, ἐπαληθεύουν μιὰ ἐξίσωση τῆς μορφῆς:

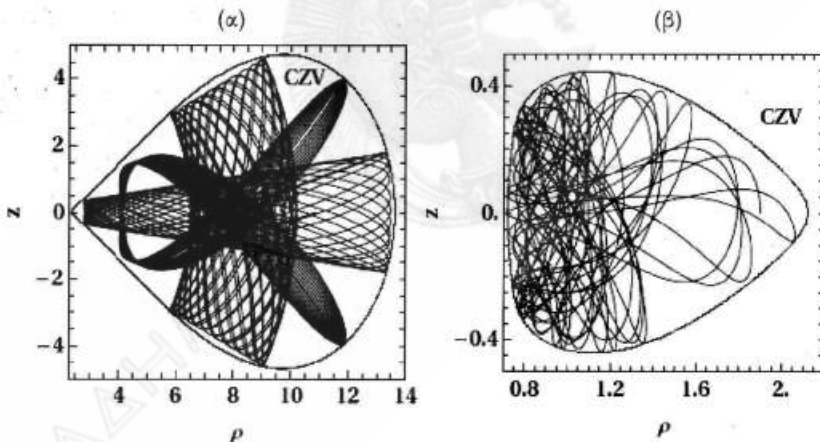
$$\frac{1}{2}(\dot{\rho}^2 + \dot{z}^2) + V_{\text{eff}}(\rho, z) = 0 \quad (1)$$

όπου το  $V_{eff}$  είναι το ενεργό δυναμικό που προκύπτει από τις εξισώσεις της μετρικής Manko-Novikov.

Η κίνηση γίνεται στις περιοχές όπου  $V_{eff} < 0$ , ενώ η καμπύλη

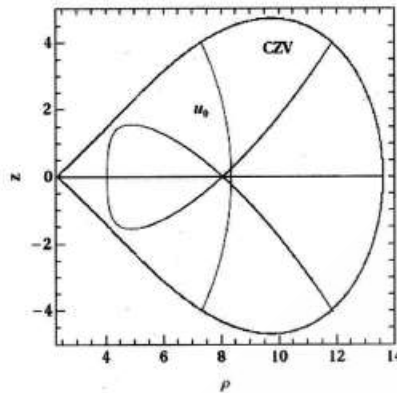
$$V_{eff} = 0 \quad (2)$$

ονομάζεται Καμπύλη Μηδενικής Ταχύτητας (Curve of Zero Velocity, CZV). Κατωτέρω υπολογίζουμε τροχιές όταν  $M=1$ , ενώ η αδιάστατη παράμετρος του spin είναι  $\chi=S/M^2=0.9$  και η έκτροπη της μετρικής MN από τη μετρική Kerr είναι  $q=0.95$ . Σε κάθε τροχιά υπάρχουν δύο ολοκληρώματα της κινήσεως, ή ενέργεια  $E$  και η στροφορμή  $L_z$  κατά τον άξονα  $z$ . Στη μετρική Kerr υπάρχει ένα ακόμη ολοκλήρωμα της κινήσεως, το οποίο ονομάζεται ολοκλήρωμα Carter, αλλά στη μετρική Manko-Novikov δεν υπάρχει τρίτο ολοκλήρωμα. Κατά συνέπεια, ενώ στην περίπτωση Kerr όλες οι τροχιές είναι οργανωμένες, στην περίπτωση Manko-Novikov υπάρχουν τόσο οργανωμένες τροχιές (Σχ. 1α) όσο και χαοτικές (Σχ. 1β).



Σχ. 1α. Τρεις οργανωμένες τροχιές κοντά σε αντίστοιχες ευσταθείς περιοδικές τροχιές.  
β. Μία χαοτική τροχιά ( $E=0.95$ ,  $L_z=3$ ).

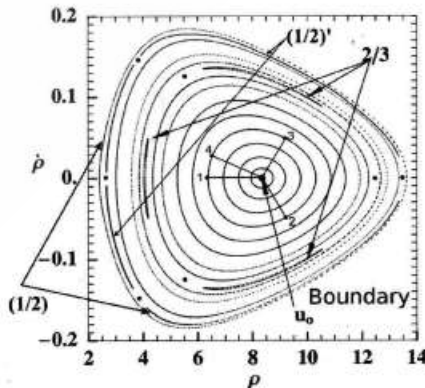
Οι οργανωμένες τροχιές (Σχ. 1α) οφείλονται σε μικρές σχετικά έκτροπες από ευσταθείς περιοδικές τροχιές (Σχ. 2). Στο Σχ. 2 υπάρχουν τρεις περιοδικές τροχιές: (α) ή τροχιά  $z=0$ , (β) ή τροχιά  $u_\theta$ , ή οποία τέμνει τον άξονα  $z=0$  καθέτως σε ένα σημείο, και (γ) μία τροχιά συντονισμού  $2/3$ , ή οποία εκτελεί δύο ταλαντώσεις κατά τον άξονα  $\rho$  και τρεις ταλαντώσεις κατά τον άξονα  $z$ . Έξάλλου, οι χαοτικές τροχιές γεμίζουν με άκανόνιστο τρόπο μεγάλες περιοχές εντός της καμπύλης μηδενικής ταχύτητας (Σχ. 1β).



Σχ. 2. Τρεις ευσταθείς περιοδικές τροχιές ( $E=0.95$ ,  $L_z=3$ ).

Ένας κατάλληλος τρόπος για τη μελέτη του συνόλου των τροχιών είναι με την αποτύπωση των ίχνων των τροχιών σε μια «έπιφάνεια τομής» στο χώρο των φάσεων  $(\rho, z, \dot{\rho}, \dot{z})$ , ο οποίος περιλαμβάνει τις συντεταγμένες  $(\rho, z)$  και τις ταχύτητες  $(\dot{\rho}, \dot{z})$ . Συγκεκριμένα, σημειώνουμε στο επίπεδο  $(\rho, \dot{\rho})$  τις συντεταγμένες  $(\rho, \dot{\rho})$  όταν  $z=0$  και  $\dot{z}>0$ , όπου το  $\dot{z}$  προκύπτει από την εξίσωση (1).

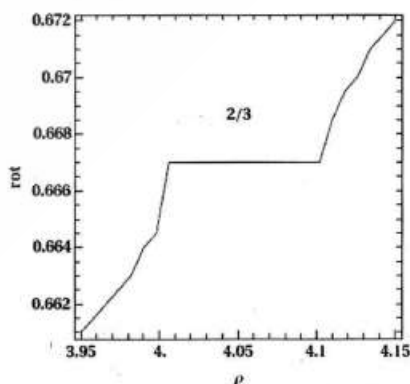
Σε μία οργανωμένη τροχιά, τα διαδοχικά σημεία  $(\rho, \dot{\rho})$  βρίσκονται πάνω σε μια «άμετάβλητη καμπύλη» (Σχ. 3), ή οποία στην απλούστερη περίπτωση είναι μία κλειστή καμπύλη γύρω από ένα σημείο  $u_0$ , που παριστάνει την περιοδική τροχιά  $u_0$  του Σχήματος 2, ή οποία τέμνει το επίπεδο  $z=0$  σε ένα μόνο σημείο. Όλες οι άμετάβλητες καμπύλες περιβάλλονται από μία όριακή καμπύλη (boundary), ή οποία παριστάνει την τροχιά  $z=0$  του Σχήματος 2 ( $E=0.95$ ) είναι ευσταθής.



Σχ. 3. Η εξωτερική έπιφάνεια τομής στην περίπτωση  $E=0.95$ ,  $L_z=3$ .

Ἡ μέση γωνία μεταξύ τῶν διαδοχικῶν διευθύνσεων  $u_{\theta 1}$ ,  $u_{\theta 2}$  κλπ. ὀνομάζεται γωνία περιστροφῆς (rotation number,  $\text{rot}$ ). Ὄταν ἡ γωνία περιστροφῆς εἶναι ρητὸς ἀριθμὸς (π.χ.  $2/3$  ὅπως στὸ Σχῆμα 3), τότε ἔχουμε δύο περιοδικές τροχιές τύπου  $2/3$ , μία εὐσταθὴ καὶ μία ἀσταθὴ, ποὺ παριστάνονται ἀπὸ τρία σημεῖα στὴν ἐπιφάνεια τομῆς. Ἡ εὐσταθῆς τροχιά περιβάλλεται ἀπὸ τρεῖς νησίδες εὐστάθειας καὶ οἱ ἀντίστοιχες τροχιές ἔχουν μικρὲς ἐκτροπές ἀπὸ τὴν εὐσταθῆ περιοδικὴ τροχιά (Σχ. 1α). Ὅλες οἱ τροχιές τῶν νησίδων  $2/3$  ἔχουν τὸν ἴδιο ἀριθμὸ περιστροφῆς  $2/3$ . Στὸ Σχῆμα 3 ὑπάρχουν ἐπίσης δύο ζεύγη νησίδων ποὺ ἀντιστοιχοῦν στὸ συντονισμὸ  $1/2$ . Ἐξῆλλου εἶναι γνωστὸ ὅτι οἱ τροχιές κοντὰ στὶς ἀσταθεῖς περιοδικές τροχιές σὲ μὴ ὀλοκληρώσιμα συστήματα παρουσιάζουν λίγο ἢ περισσότερο χάος (Contopoulos 2002). Οἱ τομὲς τῶν χαοτικῶν τροχιῶν μὲ τὸ ἐπίπεδο τομῆς εἶναι διάσπαρτα σημεῖα, ὅπως φαίνεται στὸ Σχῆμα 6 κατωτέρω.

Ὁ ἀριθμὸς περιστροφῆς, συναρτῆσει τῆς ἀποστάσεως  $\rho$  (γιά  $\dot{\rho}=z=0$ ), φαίνεται ὡς μιὰ συνεχῆς συνάρτηση τοῦ  $\rho$ , ἀλλὰ ἐντὸς τῶν νησίδων εὐστάθειας ὁ ἀριθμὸς περιστροφῆς εἶναι σταθερὸς (Σχ. 4). Στὴν πραγματικότητά, ἡ καμπύλη περιστροφῆς ἔχει ἄπειρα σκαλοπάτια, ἕνα σὲ κάθε ρητὸ ἀριθμὸ περιστροφῆς, καὶ ὀνομάζεται «καμπύλη τοῦ διαβόλου». Ὅμως τὰ εὐθύγραμμα τμήματα τῶν συντονισμῶν ἀνωτέρας τάξεως εἶναι πολὺ μικρά, καὶ μόνο ὁ συντονισμὸς  $2/3$  εἶναι ἐμφανῆς στὸ Σχῆμα 4. Πάντως ἡ ὑπαρξὴ τῶν σκαλοπατιῶν αὐτῶν εἶναι πολὺ σημαντικὴ διότι παρατηρεῖται μόνο σὲ μὴ ὀλοκληρώσιμα συστήματα, ἐνῶ σὲ ὀλοκληρώσιμα συστήματα, ὅπως τοῦ Kerr, δὲν παρατηροῦνται σκαλοπάτια. Αὐτὸ τὸ γεγονός πάλι μᾶς ἐπιτρέπει νὰ διαπιστώσουμε μὲ παρατηρήσεις ἂν ἕνα σύστημα εἶναι ὀλοκληρώσιμο ἢ ὄχι (βλ. κατωτέρω, κεφ. 5).

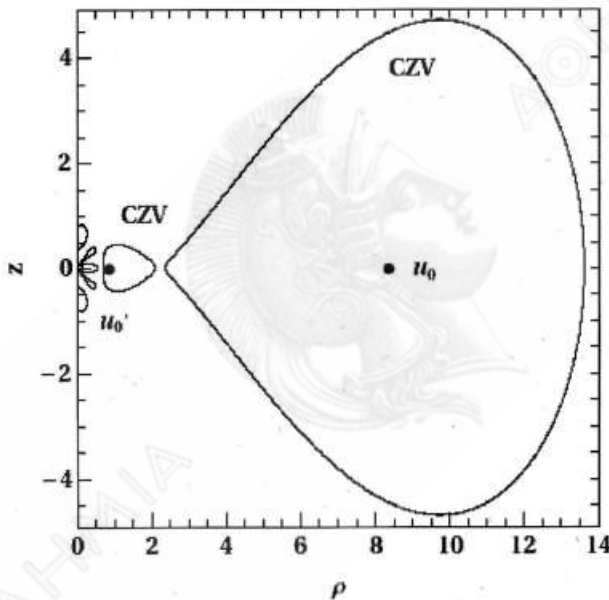


Σχ. 4. Τμήμα τῆς καμπύλης περιστροφῆς. Ὁ ἀριθμὸς περιστροφῆς  $\text{rot}$  μιᾶς ἀμετάβλητης καμπύλης ἐλαττώνεται καθὼς τὸ  $\rho$  ἐλαττώνεται, ἐκτὸς ἀπὸ τὴν περιοχὴ τῆς νησίδος ὅπου παραμένει σταθερὸς ( $\text{rot}=2/3$ ).

### 3. ΤΥΠΟΙ ΤΡΟΧΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ

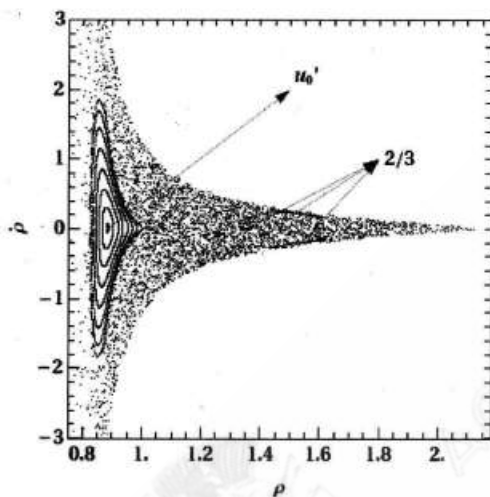
Στὰ ἐπόμενα διατηροῦμε τὴ στροφορμὴ  $L_z$  σταθερὴ ( $L_z=3$ ), καὶ ἐξετάζουμε τὶς διαφορὲς περιοχὲς τροχιῶν γιὰ διαφορὲς ἐνέργειες  $E$ .

Στὸ Σχῆμα 5, ἡ ἐνέργεια εἶναι ἴση μὲ  $E=0.95$ . Ἡ καμπύλη μηδενικῆς ταχύτητος ἀποτελεῖται ἀπὸ δύο κλειστὲς καμπύλες (CZV) καὶ πέντε μικρὲς καμπύλες πὺ φθάνουν στὸν ἄξονα  $\rho=0$ . Τροχιὲς πὺ ξεκινοῦν μέσα ἀπὸ τὶς πέντε αὐτὲς καμπύλες φθάνουν στὸν ὀρίζοντα τῆς μελανῆς ὀπῆς καὶ χάνονται ἐντὸς αὐτῆς.



Σχ. 5. Καμπύλες μηδενικῆς ταχύτητος (CZV) γιὰ  $E=0.95$  ( $L_z=3$ ). Σημειώνονται ἐπίσης οἱ ἀρχικὲς συνθήκες τῶν περιοδικῶν τροχιῶν  $u_0$  καὶ  $u_0'$ .

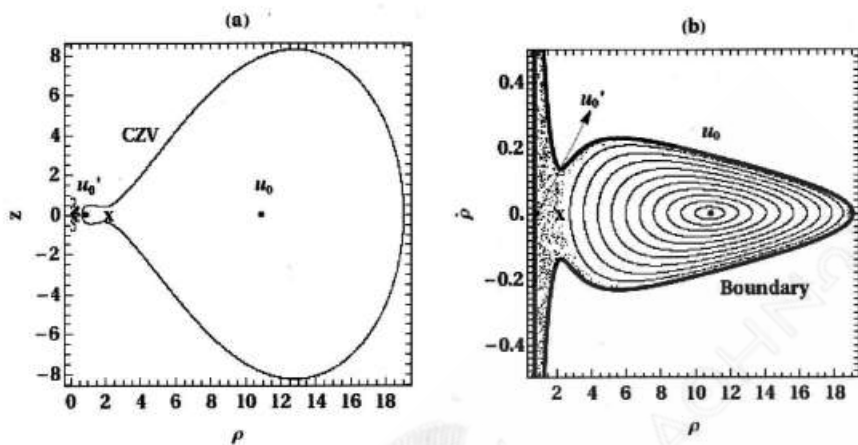
Εἶχε λεχθεῖ (Gair et al. 2008) ὅτι οἱ τροχιὲς ἐντὸς τῆς ἐξωτερικῆς CZV εἶναι ὅλες ὀργανωμένες, ἐνῶ οἱ τροχιὲς ἐντὸς τῆς ἐσωτερικῆς CZV εἶναι ὅλες χαοτικὲς. Ἐντούτοις, δείξαμε ὅτι μέσα στὶς ἐξωτερικὲς CZV ὑπάρχουν καὶ χαοτικὲς τροχιὲς (Lukes-Gerakopoulos et al. 2010), καὶ συγκεκριμένα χαοτικὲς εἶναι οἱ τροχιὲς κοντὰ στὶς ἀσταθεῖς περιοδικὲς τροχιὲς (π.χ.  $2/3$  καὶ  $1/2$  στὸ Σχῆμα 3), καθὼς καὶ ὅτι μέσα στὶς ἐσωτερικὲς CZV ὑπάρχουν καὶ ὀργανωμένες τροχιὲς (Σχ. 6).



Σχ. 6. Η έσωτερική επιφάνεια τομής για  $E=0.95$ ,  $L_z=3$ . Παρατηρείται μία οργανωμένη περιοχή γύρω από το  $u_0$ . Αυτή περιβάλλεται από μία μεγάλη χαοτική περιοχή, η οποία φθάνει μέχρι το έξωτερο όριο της έσωτερικής περιοχής του Σχήματος 5.

Πράγματι, στο Σχήμα 6 υπάρχει μια αρκετά μεγάλη νησίδα ευσταθών περιοδικών τροχιών, και στο κέντρο της υπάρχει μια ευσταθής περιοδική τροχιά  $u_0'$ . Υπάρχουν επίσης πολύ μικρές νησίδες ευστάθειας, ανωτέρας τάξεως, στην χαοτική περιοχή του Σχήματος 6. Όταν  $E=0.95$ , το χάος κυριαρχεί στην έσωτερική νησίδα (Σχ. 6). Στην περίπτωση αυτή, η έσωτερική τροχιά  $z=0$  είναι άσταθής. Όπως θα δούμε όμως κατωτέρω, για μικρότερες τιμές της ενέργειας  $E$ , η τροχιά  $z=0$  είναι ευσταθής.

Καθώς το  $E$  αυξάνει, οι δύο περιοχές CZV του Σχήματος 5 ενώνονται όταν  $E \geq 0.9504$  (Σχ. 7α). Οι περιοδικές τροχιές  $u_0$  και  $u_0'$  εξακολουθούν να υπάρχουν, ενώ μεταξύ αυτών υπάρχει μια άσταθής περιοδική τροχιά ( $x$ ), η οποία δημιουργείται τη στιγμή που, καθώς αυξάνει το  $E$ , οι δύο καμπύλες CZV άκουμπούν και ενώνονται ( $E=0.9504$ ). Κοντά στην τροχιά  $x$  και μέσα από αυτήν κυριαρχούν οι χαοτικές τροχιές, ενώ έξω από αυτήν κυριαρχούν οι οργανωμένες τροχιές. Στην έξωτερική περιοχή παρατηρείται χάος, κυρίως κοντά στην όριακή καμπύλη (boundary) (Σχ. 7β), σε ένα δακτύλιο που περιλαμβάνει τις αμετάβλητες καμπύλες γύρω από το σημείο  $u_0$ . Το χάος αυτό οφείλεται στο ότι η τροχιά  $z=0$  στην περίπτωση αυτή ( $E=0.96$ ) είναι άσταθής. Πράγματι, υπάρχει πάντοτε χάος κοντά στις άσταθεις περιοδικές τροχιές, ενώ υπάρχει τάξη κοντά στις ευσταθείς περιοδικές τροχιές, ακόμη και μέσα στις χαοτικές περιοχές.

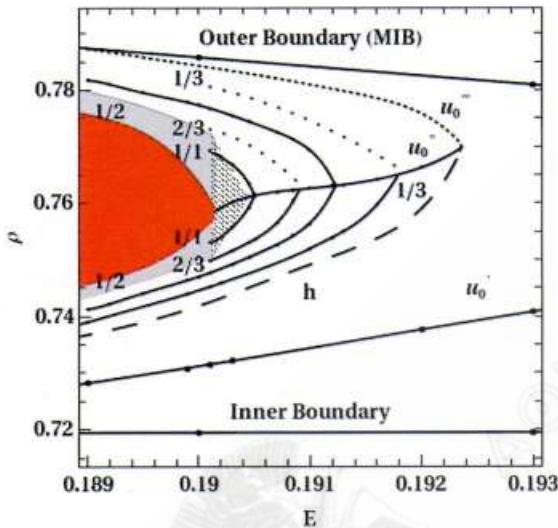


Σχ.7α. Καμπύλες μηδενικής ταχύτητας, για  $E=0.96$  ( $L_2=3$ ). Οι δύο βασικές καμπύλες CZV του Σχήματος 5 έχουν ενωθεί σε μία.

β. Έπιφάνεια τομής  $(\rho, \rho)$  που περιλαμβάνει αμετάβλητες καμπύλες γύρω από την περιοδική τροχιά  $u_0$  και χαοτικές τροχιές (διάσπαρτα σημεία).

Όταν υπάρχουν δύο ξεχωριστές καμπύλες μηδενικής ταχύτητας (CZV), η εξωτερική τροχιά  $z=0$  είναι ευσταθής ενώ η έσωτερική τροχιά  $z=0$  είναι άσταθής. Όταν όμως οι δύο καμπύλες CZV ενωθούν ( $E > 0.9504$ ), η ενωμένη τροχιά  $z=0$  είναι άσταθής. Ένα ανάλογο παράδειγμα όπου μία διακλάδωση της τροχιάς  $z=0$  οδηγεί από ευστάθεια σε άσταθεια είχε δοθεί παλαιότερα (Contopoulos 1968).

Όταν η ενέργεια  $E$  γίνεται μικρότερη από 0.95, η εξωτερική περιοχή CZV μικραίνει, και για  $E < 0.9321$  εξαφανίζεται. Επίσης εξαφανίζεται η περιοδική τροχιά  $u_0$ , αφού εκφυλισθεί σε ένα σημείο. Για μικρότερα  $E$  υπάρχει μόνον η έσωτερική περιοχή CZV και η περιοδική τροχιά  $u'_0$  εντός αυτής. Το έσωτερικό όριο αυτής της CZV παραμένει περίπου σταθερό ( $\rho \approx 0.72$ ). Το εξωτερικό όριο μικραίνει μέχρις ότου το πάχος  $\Delta\rho$  μηδενισθεί, για  $E=0.28$ , ενώ για μικρότερα  $E$  το εξωτερικό όριο αυξάνει (Σχ. 8).



Σχ. 8. Χαρακτηριστικές διαφόρων περιοδικών τροχιών όπως οι  $u'_0$ ,  $u''_0$ ,  $u''_0$  και όρισμένων διακλαδώσεων της  $u'_0$  (1/3, 1/2, 2/3, 1/1). Οι ευσταθείς τροχιές παριστάνονται με συνεχείς καμπύλες, ενώ οι ασταθείς τροχιές με τελείες. Η διακεκομμένη γραμμή παριστάνει το πρώτο όμοκλινικό σημείο της  $u''_0$  για κάθε  $E$ . Τα όρια της εσωτερικής καμπύλης CZV (inner - outer boundary), για  $z=0$ , παριστάνονται με παχιές γραμμές. Η γκριζα περιοχή άριστερά περιέχει τροχιές διαφυγής, ενώ η κόκκινη περιοχή περιλαμβάνει τροχιές που διαφεύγουν άμεσα προς τη μελανή όπη. Οι μικρές τελείες παριστάνουν χαοτικές τροχιές.

Όταν το  $E$  γίνεται μικρότερο από 0.95, το χάος ελαττώνεται. Π.χ. για  $E=0.7$ , το χάος είναι ελάχιστο (Σχ. 9α). Για μικρότερα  $E$ , η τροχιά  $z=0$  που παριστάνεται από το εξωτερικό όριο (boundary) είναι ευσταθής και δεν υπάρχει χάος πλησίον της. Στο Σχήμα 9α παρατηρούμε κοντά στο δεξιό άκρο του εξωτερικού ορίου μία μικρή νησίδα. Αυτή περιβάλλεται από λίγο χάος. Καθώς η ενέργεια  $E$  γίνεται λίγο μικρότερη από 0.7, η νησίδα αυτή συρρικνώνεται σε ένα σημείο του εξωτερικού ορίου και χάνεται. Τότε ακριβώς η τροχιά  $z=0$ , που αντιπροσωπεύεται από το εξωτερικό όριο, γίνεται ευσταθής και παραμένει ευσταθής για μικρότερες τιμές του  $E$ , μέχρι περίπου  $E=0.19015$ . Έξάλλου, όταν το  $E$  γίνεται μεγαλύτερο από 0.7, η προαναφερθείσα μικρή νησίδα αρχικά μεγαλώνει, και δημιουργούνται εντός αυτής δευτερεύουσες διακλαδώσεις. Όμως για μεγαλύτερα  $E$ , η περιοδική τροχιά στο κέντρο της μικρής νησίδας γίνεται ασταθής, και γύρω της δημιουργείται εκτεταμένο χάος. Π.χ., για  $E=0.95$  υπάρχουν μόνον τρεις μικρές νησίδες στην περιοχή αυτή, γύρω από μια τριπλή διακλαδιζόμενη περιοδική τροχιά (Σχ. 6).



Τò Σχῆμα 8 δίνει τις χαρακτηριστικές τῶν διαφόρων περιοδικῶν τροχιῶν, δηλαδή τις τιμές τοῦ  $\rho$  (για  $z=0$ ) ὡς συναρτήσεις τῆς ἐνέργειας  $E$ . Ἡ κυριότερη περιοδική τροχιά εἶναι ἡ  $u_0$ , ἡ ὁποία εἶναι εὐσταθής.

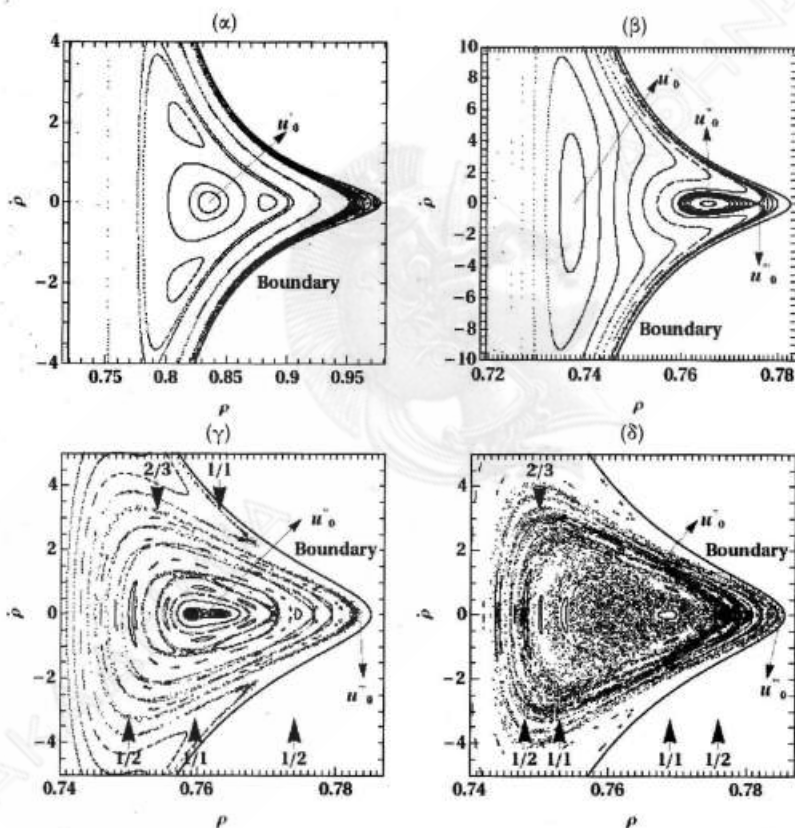
Ὅταν τὸ  $E$  γίνεῖ μικρότερο ἀπὸ  $E=0.19236$ , δημιουργεῖται ἐκ τοῦ μηδενὸς ἓνα ζευγὸς ἀπλῶν περιοδικῶν τροχιῶν, ἐκ τῶν ὁποίων ἡ μία εἶναι εὐσταθής ( $u_0$ ) καὶ ἡ ἄλλη ἀσταθής ( $u_0'$ ) (Σχ. 8). Τὸ φαινόμενο αὐτὸ ὀνομάζεται ἐφαπτομενική διακλάδωση (Contopoulos 2002).

Ὅταν  $E=0.192$  (Σχ. 9β), ἡ περιοδική τροχιά  $u_0$  περιβάλλεται ἀπὸ μία μικρὴ νησίδα  $u_0'$ , ἐνῶ ἡ ἀσταθής περιοδική τροχιά  $u_0'$  ἔχει δύο ἀσυμπτωτικές καμπύλες, εὐσταθὴ καὶ ἀσταθὴ, οἱ ὁποῖες περιβάλλουν τὴν εὐσταθὴ νησίδα καὶ τέμνονται γιὰ πρώτη φορὰ σὲ ἓνα ὀμοκλινικὸ σημεῖο ἀριστερὰ ἀπὸ τὸ  $u_0$ . Τὰ ὀμοκλινικὰ σημεῖα βρίσκονται στὴ διακεκομμένη καμπύλη  $h$  στὸ Σχῆμα 8. Κοντὰ στὶς ἀσταθεῖς περιοδικές τροχιές  $u_0'$  καὶ κοντὰ στὰ ὀμοκλινικὰ σημεῖα ὑπάρχει λίγο χάος.

Καθὼς τὸ  $E$  μικραίνει (Σχ. 8), ἡ νησίδα γύρω ἀπὸ τὴν τροχιά  $u_0$  μεγαλώνει, ἀλλὰ μεγαλώνει καὶ τὸ χάος γύρω ἀπὸ τὴν ἀσταθὴ τροχιά  $u_0'$  (Σχ. 9γ). Ἐπίσης, καθὼς τὸ  $E$  μικραίνει, διακλαδίζονται ἀπὸ τὴν τροχιά  $u_0$  διαφορὲς τροχιές συντονισμοῦ, ὅπως οἱ τροχιές  $1/3$ , εὐσταθής καὶ ἀσταθής (Σχ. 8). Ἡ εὐσταθής τροχιά  $1/3$  γίνεται καὶ αὐτὴ ἀσταθής γιὰ μικρότερα  $E$ . Στὸ Σχῆμα 9γ ὑπάρχουν περιοχές χάους κοντὰ σὲ διαφορὲς ἀσταθεῖς περιοδικές τροχιές. Ἐντούτοις, οἱ χαοτικές αὐτὲς περιοχές χωρίζονται μεταξύ τους ἀπὸ ἀμετάβλητες καμπύλες ποὺ περιβάλλουν τὴν τροχιά  $u_0$ .

Ὅταν  $E \approx 0.1912$ , διακλαδίζεται ἀπὸ τὴν  $u_0$  μία εὐσταθής τροχιά διπλῆς περιόδου  $1/2$  (Σχ. 8), ἐνῶ ἡ τροχιά  $u_0$  γίνεται ἀσταθής. Πλησίον τῆς  $u_0$  ὑπάρχουν δύο νησίδες ποὺ περιβάλλουν τὰ δύο σημεῖα τῆς περιοδικῆς τροχιᾶς  $1/2$ , ποὺ ἀνήκουν στὴν ἴδια τροχιά. Γιὰ λίγο μικρότερο  $E$ , ἡ  $u_0$  γίνεται πάλι εὐσταθής, δημιουργώντας με διακλάδωση μιὰ ἀσταθὴ περιοδική τροχιά διπλῆς περιόδου, ἡ ὁποία δὲν σημειώνεται στὸ Σχῆμα 8. Γιὰ μικρότερο  $E$  διακλαδίζονται δύο τροχιές  $2/3$ , καὶ γιὰ ἓνα ἀκόμη μικρότερο  $E$  ἡ  $u_0$  γίνεται πάλι ἀσταθής γιὰ ἓνα μικρὸ διάστημα τιμῶν πλησίον τῆς τιμῆς  $E=0.19045$ , δημιουργώντας δύο περιοδικές τροχιές ἴσης περιόδου ( $1/1$ ) (Σχ. 9γ). Δημιουργοῦνται πάλι δύο νησίδες δεξιὰ καὶ ἀριστερὰ τοῦ  $u_0$ , ἀλλὰ αὐτὴ τὴ φορὰ αὐτὲς περιβάλλουν δύο διαφορετικές τροχιές  $1/1$ . Οἱ νησίδες  $1/2$  στὸ Σχῆμα 9γ ἔχουν ἀπομακρυνθεῖ δεξιὰ καὶ ἀριστερὰ ἀπὸ τὸ σημεῖο  $u_0$ . Οἱ χαοτικές περιοχές στὴν περίπτωσι τοῦ Σχήματος 9γ εἶναι χωρισμένες ἀπὸ ἀμετάβλητες καμπύλες ποὺ περιβάλλουν τὴν τροχιά  $u_0$ .

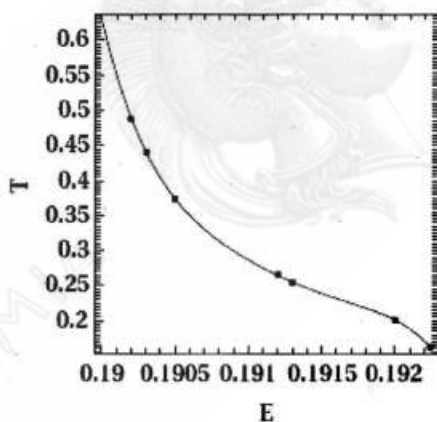
Οι νησίδες  $1/1$ ,  $2/3$ ,  $1/2$  εμφανίζονται επίσης στο Σχήμα 9δ, για  $E=0.19015$ , σε διαδοχικά μεγαλύτερες αποστάσεις από την κεντρική νησίδα γύρω από το  $u_0^-$ . Όμως, στην περίπτωση αυτή, οι χαοτικές περιοχές γύρω από τις ασταθείς τροχιές  $u_0^-$ ,  $1/3$ ,  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $1/1$  έχουν ένωθεί. Είναι ενδιαφέρον ότι το χάος αυξάνει πάρα πολύ, καθώς η ενέργεια μεταβάλλεται από  $E=0.19045$  σε  $E=0.19015$ . Οι περιοχές του χάους παριστάνονται με τελείες στο Σχήμα 8. Παρατηρούμε ότι, καθώς το  $E$  γίνεται μικρότερο από  $E=0.19045$ , η χαοτική περιοχή μεγαλώνει απότομα.



Σχ. 9. Έπιφάνειες τομής για όρισμένες χαρακτηριστικές τιμές του  $E$ :

- α.  $E=0.7$ : Η τροχιά  $z=0$ , η οποία παριστάνεται με το εξωτερικό όριο του σχήματος (boundary), γίνεται εύσταθης καθώς μικραίνει το  $E$ , για  $E$  λίγο μικρότερο από  $E=0.7$ .
- β.  $E=0.192$ : Μόλις έχει δημιουργηθεί το ζεύγος περιοδικών τροχιών  $u_0^+$ ,  $u_0^-$ .
- γ.  $E=0.19045$ : Με πολλές μικρές περιοχές χάους.
- δ.  $E=0.19015$ : Οι χαοτικές περιοχές είναι ένωμένες.

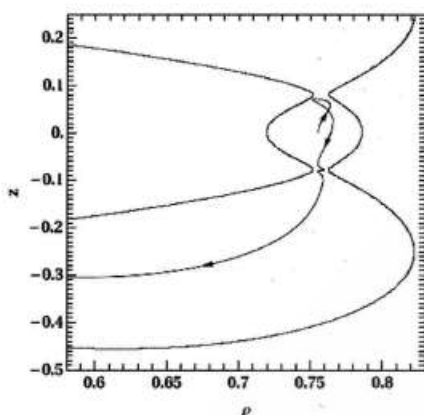
Καθώς η ενέργεια  $E$  μικραίνει ακόμη, έχουμε μια άπειρα διακλαδώσεων  $1/2$  και  $1/4$  και μεταβάσεων της  $u_0$  έναλλάξ σε άσταθια και ευστάθια. Συγχρόνως όμως, η περίοδος της  $u_0$  αυξάνει και τείνει στο άπειρο (Σχ. 10). Τέλος, όταν  $E=0.1901$ , η CZV που περιβάλλει την περιοχή των τροχιών που διακλαδίστηκαν από την  $u_0$  ενώνεται με τις εξωτερικές καμπύλες μηδενικής ταχύτητας που φθάνουν στον ορίζοντα  $\rho=0$ , και η περιοδική τροχιά  $u_0$  εξαφανίζεται, δηλαδή παύει να είναι περιοδική και οδηγείται στη μελανή όπη. Στο Σχήμα 8, η χαρακτηριστική καμπύλη της  $u_0$  φθάνει στη γκριζα περιοχή που περιέχει τις τροχιές διαφυγής, δηλαδή τις τροχιές που διαφεύγουν εντός της μελανής όπης. Ο τερματισμός της οικογένειας περιοδικών τροχιών  $u_0$  γίνεται όταν η περίοδος  $T \rightarrow \infty$ . Αυτό είναι σύμφωνο με τη θεωρία του Strömberg περί τερματισμού των περιοδικών τροχιών (Szebehely 1967). Μια παράμοια περίπτωση περιοδικής τροχιάς, η οποία παύει να υπάρχει καθώς η περίοδος της φθάνει στο άπειρο, είχε διαπιστωθεί παλαιότερα από τους Contopoulos and Zikides (1980).



Σχ. 10. Η περίοδος της τροχιάς  $u_0$  συναρτῆσει τοῦ  $E$ .

#### 4. ΤΡΟΧΙΕΣ ΔΙΑΦΥΓΗΣ

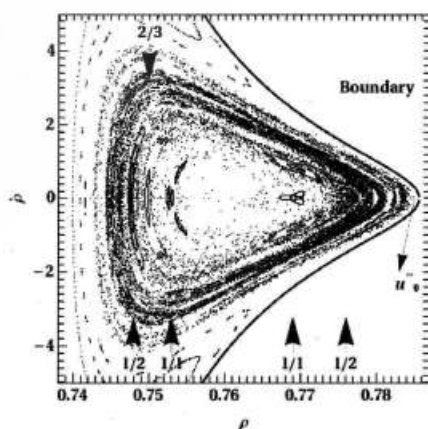
Όταν η ενέργεια  $E$  γίνει μικρότερη από  $E=0.1901$ , η καμπύλη μηδενικής ταχύτητας (CZV) γύρω από την ευσταθή περιοδική τροχιά  $u_0$  είναι ενωμένη με τις δύο περιβάλλουσες καμπύλες που περιέχουν τροχιές που διαφεύγουν πρὸς τὴ μελανή όπη. Τότε πολλές τροχιές που αρχίζουν στον άξονα  $z=0$  διαφεύγουν. Ένα παράδειγμα, για  $E=0.1201$ , είναι ἡ τροχιά τοῦ Σχήματος 11. Ἡ τροχιά αὐτή διευθύνεται αρχικά πρὸς τὰ ἄνω, ἀλλὰ κατόπιν στρέφεται πρὸς τὰ κάτω καὶ τελικά διαφεύγει πρὸς τὰ ἀριστερά, ὅπου βρίσκεται ἡ μελανή όπη ( $\rho=0$ ).



Σχ. 11. Μία τροχιά η οποία διαφεύγει προς τη μελανή όπη ( $E=0.1901$ ).

Εντούτοις, η τροχιά  $u_0$  εξακολουθεί να είναι ευσταθής για  $E=0.1201$  και οι γειτονικές της τροχιές δεν διαφεύγουν. Επίσης, οι ασταθείς τροχιές  $u_0^+$  και οι διακλαδώσεις της  $u_0$ , ευσταθείς και ασταθείς, δεν διαφεύγουν (Σχ. 8).

Το Σχήμα 12 είναι μία επιφάνεια τομής ( $\rho, \beta$ ) για  $E=0.1901$ , που περιλαμβάνει μια μεγάλη περιοχή τροχιών διαφυγής, καθώς και μία μεγάλη περιοχή οργανωμένων τροχιών γύρω από την περιοδική τροχιά  $u_0$  (αριστερά καθώς και έξω από τα όρια του σχήματος). Η περιοχή διαφυγής αποτελείται από μία κεντρική περιοχή από την οποία οι τροχιές διαφεύγουν άμεσα από τα ανοίγματα της CZV, ενώ γύρω από αυτήν είναι χαοτικές περιοχές (διάσπαρτα σημεία), που περιέχουν τροχιές οι οποίες διαφεύγουν μετά από μερικές τομές με την επιφάνεια  $z=0$ .



Σχ. 12. Επιφάνεια τομής ( $\rho, \beta$ ), όταν αρχίζουν να υπάρχουν διαφυγές ( $E=0.1901$ ).

Μέσα στις χαοτικές περιοχές του Σχήματος 12 υπάρχουν ορισμένες μικρές νησίδες ευστάθειας που περιβάλλουν ευσταθείς περιοδικές τροχιές που διακλαδίστηκαν από την περιοδική τροχιά  $u_0$  για κάποια μεγαλύτερη τιμή του  $E$  και εξακολουθούν να υπάρχουν για μικρότερα  $E$ . Έτσι βλέπουμε άριστερά της περιοχής διαφυγής νησίδες των συντονισμών  $1/2$ ,  $2/3$ . Επίσης υπάρχουν τρεις σχετικά μεγάλες νησίδες ενός τριπλού συντονισμού, οι οποίες προήλθαν με διακλάδωση από την τροχιά  $1/1$ , και δεξιά μία νησίδα  $1/1$  που περιβάλλεται από τρεις μικρές νησίδες συντονισμού, καθώς και μία νησίδα  $1/2$ . Όλες οι νησίδες είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες νησίδες του Σχήματος 9δ, δεδομένου ότι οι ενέργειες των Σχημάτων 12 και 9δ είναι παραπλήσιες ( $E=0.1901$  και  $E=19015$  αντίστοιχα). Οι τροχιές που αντιστοιχούν στις νησίδες δεν διαφεύγουν. Τα κέντρα των νησίδων παριστάνουν τις αντίστοιχες περιοδικές τροχιές, οι οποίες εξακολουθούν να είναι ευσταθείς. Ειδικότερα η τροχιά  $1/2$  είναι ευσταθής, μέχρι τουλάχιστον το  $E=0.189$  (Σχ. 8). Πάντως στην περίπτωση του Σχήματος 12, η περιοδική τροχιά  $u_0$  έχει αντικατασταθεί από μία τροχιά διαφυγής.

Καθώς το  $E$  μικραίνει, όλες οι ευσταθείς τροχιές γίνονται άσταθείς. Οι άσταθείς περιοδικές τροχιές δεν διαφεύγουν, οι γειτονικές τους όμως τροχιές διαφεύγουν εν γένει προς τον ορίζοντα της μελανής όπης.

## 5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

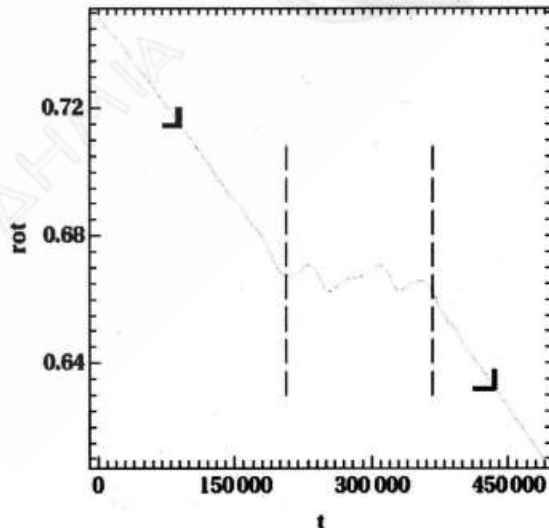
Καθώς ένα σώμα κινείται γύρω από μία μελανή όπη, η ενέργεια του  $E$  και η στροφορμή του  $L_z$  μειώνεται αδιαβατικά (δηλαδή βραδέως), λόγω της έκπομπης βαρυτικών κυμάτων. Έπομένως οι τροχιές στην πραγματικότητα γίνονται σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο. Αν περιορισθούμε στις οργανωμένες τροχιές, αυτές βαθμιαία αλλάζουν και αν θεωρήσουμε τις τομές τους σε μία επιφάνεια τομής, όπως στο Σχήμα 3, δεν θα έχουμε σημεία ακριβώς πάνω σε μία αμετάβλητη καμπύλη αλλά τα διαδοχικά σημεία θα βρίσκονται σε μία σπειροειδή καμπύλη που θα περνάει κοντά από διαδοχικές αμετάβλητες καμπύλες. Δεδομένου ότι η ακτινοβολία βαρύτητας είναι μικρή, η έκτροπή της σπείρας από τις κλειστές καμπύλες είναι μικρή.

Το φαινόμενο αυτό είναι προφανές εφόσον η τροχιά παραμένει κοντά σε αμετάβλητες καμπύλες που κλείνουν γύρω από την περιοδική τροχιά  $u_0$  του Σχήματος 3. Όταν όμως η τροχιά πλησιάσει σε ένα συντονισμό, όπως είναι ο συντονισμός  $2/3$ , τότε η τροχιά παγιδεύεται για ένα διάστημα κοντά στις τρεις νησίδες του Σχήματος 3. Αυτό διαρκεί μόνον



Αρχικά η μαύρη γραμμή έρχεται από την κάτω δεξιά γωνία του σχήματος προς τα δεξιά της αρχικής νησίδας, και τελικά η νησίδα προσπερνά τη μαύρη γραμμή ή όποια κατόπιν μένει λίγο άριστερά από τη νησίδα. Τα διαδοχικά σημεία πάνω στη γραμμή αυτή κινούνται αρχικά (έξω από τη νησίδα) δεξιόστροφα ως προς το σημείο  $u_0$ , δηλαδή κατά τη φορά των δεικτών του ωρολογίου. Καθώς η τροχιά παγιδεύεται, τα διαδοχικά σημεία τομής της τροχιάς δημιουργούν δύο θηλιές κοντά στη νησίδα. Κατόπιν τα σημεία φεύγουν προς τα κάτω δεξιά, δηλαδή με άριστερόστροφη φορά ως προς το σημείο  $u_0$ , αντίθετη προς τη φορά των δεικτών του ωρολογίου.

Η παγίδευση της τροχιάς κοντά σε μία νησίδα αποτυπώνεται στις συχνότητες της ακτινοβολίας βαρύτητας (Σχ. 14). Οι συχνότητες μεταβάλλονται με το χρόνο καθώς εκπέμπονται βαρυτικά κύματα, και η μεταβολή των συχνοτήτων είναι αδιαβατική, δηλαδή βραδεία. Έκτος συντονισμών, ο λόγος των συχνοτήτων αλλάζει και αυτός αδιαβατικά, και στην περίπτωση του Σχήματος 14 μειώνεται. Όμως κατά τη διάρκεια της παγίδευσης σε συντονισμό ο λόγος των συχνοτήτων, δηλαδή ο αριθμός περιστροφής  $g_0$ , παραμένει σταθερός στην τιμή  $2/3$  του συντονισμού, με μικρές μόνο μεταβολές λόγω της μετακίνησης του σώματος κοντά στη νησίδα. Η παγίδευση αυτή δέν παρατηρείται σε μία μελανή όπη Κε $\rho$ 1 διότι δέν υπάρχουν καθόλου νησίδες συντονισμού.



Σχ. 14. Η μεταβολή του λόγου συχνοτήτων  $g_0$ , συναρτήσει του χρόνου στην περίπτωση του Σχήματος 13.

Όταν παρατηρηθούν κύματα βαρύτητας (Bender 1998) οφειλόμενα σε κινήσεις σωμάτων γύρω από μία μελανή όπη στο κέντρο ενός γαλαξίου, αναμένεται ότι η συχνότητα των κυμάτων αυτών εν γένει θα μεταβάλλεται και ο λόγος των συχνοτήτων επίσης θα μεταβάλλεται. Αν η μεταβολή αυτή είναι συνεχής χωρίς plateau συντονισμού, τότε θα έχουμε ένδειξεις ότι η μελανή όπη είναι τύπου Kerr, όποτε δέν υπάρχει καθόλου χάος. Αν όμως η συχνότητα έχει περιόδους σταθεροποίησης, τότε θα έχουμε σοβαρές ένδειξεις ότι η μελανή όπη είναι μη ολοκληρώσιμη, όπως είναι η γενικευμένη μελανή όπη Manko-Novikov, όποτε γύρω από τή γενικευμένη αυτή μελανή όπη υπάρχει χάος.

#### SUMMARY

Is there chaos in the black holes?

In the centers of many galaxies there are supermassive black holes that govern the motions of the bodies (eg. stars) around them. These black holes may be described by an integrable metric (the Kerr metric), or by a generalized solution of Einstein's equation like the Manko-Novikov(MN) metric. We study the orbits of stars around a MN generalized black hole and find the regions covered by ordered orbits around stable periodic orbits and by chaotic orbits. We find the characteristics of the main periodic orbits as we change the energy. As we cross a critical «escape energy» most chaotic orbits escape to the black hole.

In the MN case we find several «islands of stability» that do not exist in the Kerr metric. The moving bodies change gradually their energy (and angular momentum) by emitting gravitational waves. Thus their orbits change and may be trapped for some time in islands of stability. Future observations of the frequencies of the gravitational waves may be able to find whether such trappings appear, in which case the system is nonintegrable and contains chaos.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Apostolatos, T. A., Lukes-Gerakopoulos, G. and Contopoulos, G.: 2009, *Phys. Rev. Lett.* 103, 111101.
- Babak, S., Gair, J. R., Petiteau, A. and Sesana, A.: 2011, *Class. Quantum Grav.* 28, 114001.
- Bender P., and the Lisa Study Team: 1998, Laser Interferometer Space Antenna for the Detection and Observation of Gravitational Waves: Pre-Phase A Report, MPQ 283 (Garching, Max-Planck-Institut für Quantenoptik).



- Chandrasekhar, S.: 1989, *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 421, 227.
- Contopoulos, G.: 1968, *Astroph. J.* 153, 83.
- Contopoulos, G.: 1990, *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 431, 183.
- Contopoulos, G.: 1991, *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 435, 551.
- Gair, J. R., Li, C. and Mandel, I.: 2008 *Phys. Rev. D* 77, 02403.
- Kerr, R. P.: 1963, *Phys. Rev. Lett.* 11, 237.
- Lukes-Gerakopoulos, G. Apostolatos, T. A. and Contopoulos, G.: 2010, *Phys. Rev. D* 81, 124005.
- Manko, V. S. and Novikov, I. D.: 1992, *Class. Quant. Grav.* 9, 2477.
- Misner, C. W., Thorne, K. S. and Wheeler, J. A.: 1973, *Gravitation* (San Francisco: W. H. Freeman and Co.).
- Newman, E., Chinnapared, K., Exton, A. Prakash, A. and Torrence, R.: 1965, *J. Math. Phys.* 6, 918.
- Schwarzschild, K.: 1916, *Sitz. König. Preuss. Akad. Wiss.* 1, 424.
- Schutz, B.: 2009, *A First Course in General Relativity* (Cambridge University Press).





# ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 8ΗΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2011

---

## ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΟΡΤΑΣΜΟ ΤΩΝ ΔΕΚΑ ΧΡΟΝΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ EUROPEAN ACADEMIES SCIENCE ADVISORY COUNCIL (EASAC)

ΧΑΙΡΕΤΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΡΟΕΔΡΟ κ. ΑΠΟΣΤΟΛΟ ΓΕΩΡΓΙΑΔΗ

Ἡ Ἀκαδημία Ἀθηνῶν φιλοξενεῖ σήμερα καὶ αὖριο ἐδῶ στὸ Μέγαρο τῆς Ἀκαδημίας τὴ συνέλευση τοῦ European Academies Science Advisory Council. Μὲ τὴν εὐκαιρία αὐτὴ ἡ Ἀκαδημία Ἀθηνῶν ἐορτάζει ἀπόψε, ἀπὸ κοινοῦ μὲ τὸ European Academies Science Advisory Council, τὰ δέκα χρόνια ἀπὸ τὴν ἵδρυσή του, περίοδο σημαντικῆς προσφορᾶς τῶν ἀκαδημιῶν τῶν χωρῶν-μελῶν τῆς Εὐρωπαϊκῆς Ἐνωσῆς πρὸς τὴν ἡγεσία τῆς καθὼς καὶ πρὸς τοὺς πολίτες τῆς ΕΕ σὲ ἐπιστημονικὰ καὶ τεχνολογικὰ θέματα καίριας σημασίας.

Συγχαίρουμε τὸ European Academies Science Advisory Council καὶ τὸν Πρόεδρό του Sir Brian Hear γιὰ τὴν οὐσιαστικὴ προσφορά τους καὶ εὐχόμεστε καλὴ συνέχεια.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΤΙΠΡΟΕΔΡΟ κ. ΓΕΩΡΓΙΟ ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟ

I would like to welcome you to this Meeting of the Academy of Athens and EASAC on the occasion of the celebration of the 10th anniversary of EASAC. The European Academies Science Advisory Council is formed by the European national science academies to enable them to collaborate with each other and provide advice to the European policy-makers on scientific matters. Thus it provides a means for the collective voice of European science to be heard. The view of the academies is that science is central to many aspects of modern life and the scientific dimension is a prerequisite for a wise policy-making. Furthermore the academies recognise that their advisory functions should extend beyond the national level to cover also the European level.

For this purpose EASAC uses the best of European science in carrying out its work. Its views are completely independent of commercial or political bias. Its aim is to deliver advice that is comprehensible, relevant and timely. EASAC covers all scientific and technical disciplines, and its experts are drawn from all the countries of the European Union. It is funded by the member academies or by contracts with scientific bodies, but has no commercial or business sponsors. The expert members of its project groups give their time free of charge.

EASAC's activities include reviews and advice about policy documents, workshops about major policy issues, and short, timely statements on topical subjects. The EASAC Council has 25 members, namely the national science academies of every EU Member State, the Academia Europaea and ALLEA, i.e. the organization of All European Academies. It has a professional secretariat based on the German Academy of Sciences. Its Council agrees the initiation of projects, appoints members of project groups, reviews drafts and approves reports for publication.

The president of EASAC is Professor Sir Brian Heap a renown biologist, fellow of the Royal Society of the United Kingdom. Sir Brian Heap was born in 1935 and earned his BSc and PhD at the University of Nottingham. He also has a MA and a DSc degree from Cambridge and Honorary DSc degrees from Nottingham (1994), York (2001) and St. Andrews (2007). He has served as Head of the Department of Physiology (1976), Head of the Cambridge Research Station (1986), Director of the Institute of Animal Physiology and Genetics Research in Cambridge and Edinburgh (1989-1993), Director of Science (1991-1994) and Director of the Babraham Institute (1993-1994). He was Master of St. Edmund's College at the University of Cambridge (1996-2004), and Special Professor in Animal Physiology at the University of Nottingham since 1988. He was elected as a fellow of the Royal Society in 1989, and held the post of Vice President of the Royal Society and Foreign Secretary from 1996 to 2001. He is a founding member of the International Society for Science and Religion.

Today we will be happy to hear Sir Brian Heap give the main lecture of this evening under the title Towards Sustainable Production and Consumption [Πρός βιώσιμη παραγωγή και κατανάλωση].

## ΟΜΙΛΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΕΔΡΟΥ ΤΟΥ EASAC SIR BRIAN HEAP

## TOWARDS SUSTAINABLE PRODUCTION AND CONSUMPTION

## INTRODUCTION

In this lecture, I examine the implications of consumption – a topic which lies at the heart of present and future challenges.

The top 20 % of the world's rich consume 85 % of total commodities. This situation led Professor Mohan Munasinghe to say recently that 'we now have Millennium Development Goals (MDG) for the poor. We should extend that to the rich and make sure they consume more sustainably'. Mohan Munasinghe, an expert on sustainable development and climate change, shared the Nobel Peace Prize of 2007 awarded to IPCC.

Two years ago we celebrated the 200th anniversary of Darwin's birth and the 150th anniversary of the publication of the 'Origin of Species'. We revisited Darwin's great new idea about natural selection as the agent of evolution, the phenomena of competition and adaptation, and how they are central in the struggle to survive in a changing environment. Darwin's insights were formulated in the heat of the industrial revolution when the key incentive was the pursuit of profits. Firms competed by investing in new technologies and by reducing costs of production. It resulted in a form of capitalism that stimulated human creativity and aggression in ways that produced immense benefits to humankind.

Yet, says Nolan<sup>1</sup>, capitalist freedom is a two-edged sword and there is now a ferocious international struggle underway to secure access to scarce resources.

Therefore, we will examine three propositions for policy makers:

1. Do consumption patterns present a challenge to development?
2. Is sustainable consumption and production (SCP) a new strategy for development?
3. Is there time to adapt and make the necessary changes to lifestyles?

## 1. CHALLENGE TO DEVELOPMENT

Everyone favours the idea of development, and many forms of consumption have risen with the global increase in the number of people on the planet which has placed great pressures on the finite resources of the planet. World population started to grow exponentially about 200 years ago, it doubled in the past 50

---

1. *Capitalism and Freedom* (2008) - Peter Nolan (author), Director of the Chinese Big Business Programme (CBBP), Judge Business School, Cambridge.

years, and will reach a medium figure of about 9 billion by 2050. Growth will eventually stabilise or crash, as Malthus envisaged, either because of fertility control, socio-economic factors, or exhausted ecosystem services. Therefore, decisions taken now will determine whether we reach the UN's high projection of 10.5bn, a medium of 9bn, or a low of 7.8bn.

Global prosperity (Fig. 1) has had a long record of providing more goods and services and it has been a driver of global consumption and production. Over the past 50 years global economic growth (5-fold) has been greater than the increases in energy (4.4), food (2.7) and population (2.2). Market-driven consumption particularly in high-income countries has been driven by a seemingly unlimited source of financial loans as greater numbers than ever before have aspired to a lifestyle advertised as the American dream.

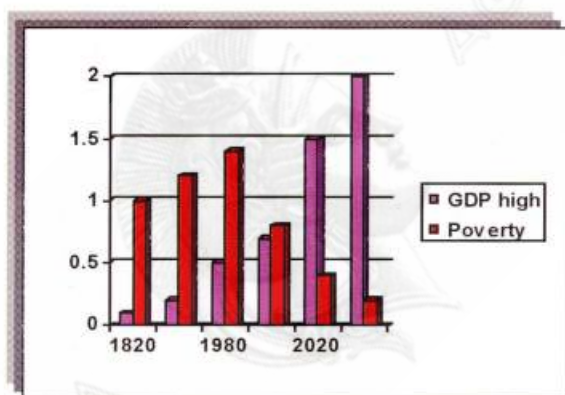


Figure 1: Prosperity is increasing (Musser, *Scientific American* 2005).

The challenge to development becomes even more apparent when we consider the two-edged nature of this capitalist freedom and its effect on the environment. Economic growth in high-income countries has been associated with a 30% increase in global concentrations of greenhouse gases in the atmosphere since the time of the industrial revolution. This has been caused by the burning of fossil fuels, deforestation, intensive agriculture and other land-use changes. CO<sub>2</sub> persists for over 100 years in the stratosphere and heat that has been trapped in the earth's atmosphere means that further planetary warming is inevitable. Even if we stabilise greenhouse gas concentrations at their present values today, which may be beyond us, global warming is expected to continue.

Yet, consumption does not necessarily make people happier. According to the Easterlin paradox published in 1974 ("Does Economic Growth Improve the Human Lot? Some Empirical Evidence") increases in low levels of personal income predicted improvements in happiness, but above a threshold of about

\$15,000 further increases appeared to have only a modest effect. Research in the USA and Switzerland showed that rich people were only slightly happier than the less well off. In fact, the highest income recipients reported a lower well-being than the income group immediately below. Clearly, there are many reasons why higher income and material prosperity do not simply translate into greater happiness. Individual well-being does not increase with income because aspiration levels adjust to the rise in income (hedonic treadmill effect). People compare themselves with others and their relative rather than their absolute income is what becomes important. Therefore, people get used to the higher income level which then produces less happiness for them than they would have enjoyed if no such adjustment had taken place. For example, lottery winners are very happy after winning but their happiness levels revert back near to the original level after some weeks. Therefore, what is clear from research into well-being is that the relationship between happiness and per capita income across countries is complex.

Stevenson and Wolfers<sup>2</sup> have re-assessed the Easterlin paradox using data from a broader array of countries. They established a clear positive link between average levels of well-being and income across countries, but they found no evidence of a satiation point beyond which wealthier countries showed no further increases in subjective well-being. An apparent inconsistency was in the United States where there has been no discernible increase in happiness over the past thirty-five years (and indeed, happiness among women has declined). A possible clue may be found in annual surveys of more than 20,000 students entering colleges in the USA. An increasing percentage said that it was very important to be very well off but a decreasing number said that it was very important to develop a meaningful philosophy in life.

So, we can see that unsustainable production and consumption are a challenge to development and that they affect the poorer more than the richer nations of the world because the former lack resilience and the ability to adapt quickly enough to climate change. Population increase and poverty from unemployment continue to present major threats to societal stability as we see in the tribal heartlands of Pakistan, the streets of London, and even in Athens.

## 2. SUSTAINABLE PRODUCTION AND CONSUMPTION (SCP): AN ALTERNATIVE PARADIGM

Is there an alternative paradigm to a pattern of high consumption that would make us feel better about the pursuit of consumption and the type of world we are

---

2. Stevenson, B. and J. Wolfers, *Economic growth and subjective well-being: Reassessing the Easterling Paradox*. Brooking Papers on Economic Activity, Spring 2008.

handing on to the next generation? No one denies that development is essential but there is mounting evidence that unconstrained consumption and production adds little to human well-being and may even impede it. Three exemplars illustrate where science and new technologies could help to achieve patterns of more sustainable consumption and production, two of which are the focus of current EASAC studies. Acceptability and the impact on SCP, however, will depend on many factors including perceived consumer benefits.

#### (I) EFFICIENCY - FOOD PRODUCTION

Global food production has become unsustainable. Over the past 50 years production has increased three-fold by the adoption of new technologies. But pressures now exist to move towards more sustainable methods of food production. In the future, more people will be wealthier creating demand for more varied, high-quality diets that require additional resources to produce. Competition for land will increase, and the effects of climate change will become greater. We live in a very uneven society where 925 m people experience hunger, another 1bn are thought to suffer from 'hidden hunger' because of mineral and vitamin deficiency, while another 1 bn overconsume leading to obesity and type II diabetes.

Among a range of possibilities, new advances in plant breeding (including genetically modified crops) would help to improve yields, reduce the chemical burden on the environment, diminish waste, pollution and labour, and provide greater safety for farmers (many of whom are women) by lower exposure to pesticides. In China, insecticide use has fallen by 156 million pounds after the introduction of GM cotton, equivalent to the entire amount of spray used in California each year. Opponents argue that GM plants could harbour unknown risks and pose a threat to human health, the environment and biodiversity, and this has created a strongly negative position in the European Union. But more than 20 years experience of growing GM crops in North America has shown that fears about GM are largely unfounded with impacts that are less than the blanket spraying used in organic agriculture. In this century 500,000 children will become blind, and 2.2 m will die every year from vitamin A malnutrition. This could be prevented with GM rice –so-called Golden Rice. Yet Europe's opposition has disadvantaged thousands around the world.

#### (II) INNOVATION - ENERGY

Energy presents one of the greatest challenges for a paradigm of SCP since energy usage has been mainly about non-renewable unsustainable consumption. Energy infrastructure in the EU has started to go down the path of greater efficiency and carbon for energy needs has been reduced by 0.75% per year (eg in 2002 1.1 Gt of carbon was utilised to produce 49 exajoules ( $1 \times 10^{18}$ ) of energy).



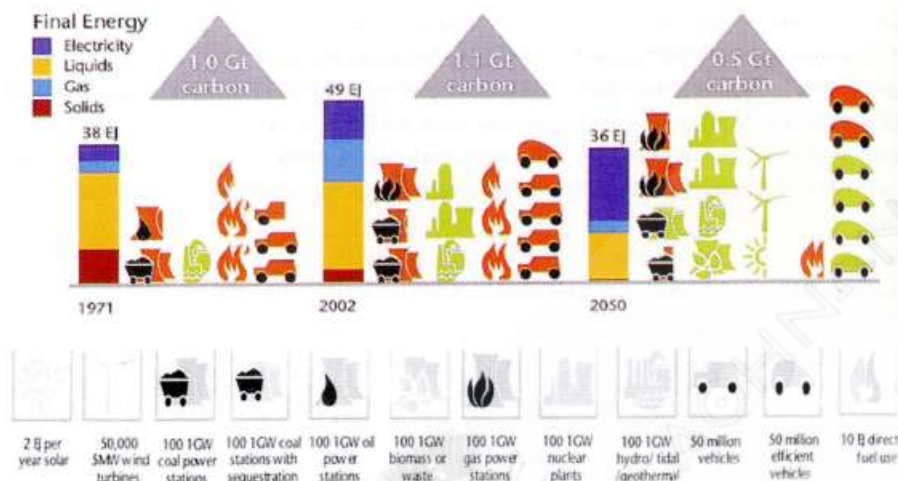


Diagramme 1: Energy infrastructure in the EU-25 (taken from Shell scenarios).

(Each symbol in the diagramme equivalent to 100 1 GW coal power stations; 100 1GW oil power stations; 100 1GW biomass or waste stations; 100 1GW gas power stations; 100 1GW nuclear plants; 100 1GW hydro/tidal/geothermal; 10 EJ direct fuel use; 50 million vehicles; 50 million efficient vehicles; 2 EJ per year solar; 50,000 5MW wind turbines). Over the next 50 years that rate of change will need to double which means in practical terms finding alternative sources to provide for basic necessities.

Concentrated solar power (CSP) systems are attracting much interest as they use mirrors and tracking systems to focus a large area of sunlight onto a central receiver atop a tower. The Solar Tower in Daggett, California and the Planta Solar 10 (PS10) in Spain are representative of this technology. Concentrated Solar Thermal Power (CSP) is the main technology proposed for a cooperation to produce electricity and desalinated water in the arid regions of North Africa and Southern Europe by the Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation DESERTEC. This technology was the subject of a special EASAC workshop held at the Academy of Athens the following day.

### (III) ADAPTATION - CONSTRUCTION

The International Energy Agency says that buildings worldwide account for more than 40% of primary energy use and 24% of greenhouse gas emissions. The construction industry has started to experiment seriously with ways to improve energy efficiency by the use of new materials and processes to reduce the carbon footprint of new and existing buildings. One example in the UK is

the Beddington zero energy project organised by Bioregional, an environmentally friendly housing development in the London Borough of Sutton.

These exemplars, of which there are many more, remind policy makers that science and technology can provide ways towards sustainable consumption and production. But they are not sufficient. We also need economic, fiscal and behavioural change instruments if we are to avoid repeating the mistakes of the past.

### 3. ADAPTATION - AN ANTIDOTE TO COLLAPSE

Mismanagement can terminate cultures so that adaptation to SCP has become a primary and urgent issue. Stewardship of shared resources has become essential if we are to avoid the 'tragedy of the commons' - the exploitation and overconsumption of the ecosystem services we take for granted - air, water, oceans, natural resources and reserves.

Jared Diamond in his book *Collapse* has analysed how societies have dealt with crises. Some have succeeded while others have not. In Easter Island, collapse was largely because resources were overexploited; in the Yucatan peninsula it was population explosion and socio-political failure; in the medieval Viking colony on Greenland there was a failure to develop stable trading partnerships with Native Americans and adapt to their culture; in Rwanda genocide was mainly because of the impact of overpopulation. Yet in GuiYu in China, Montana in the USA, and new accession countries of the EU, co-operation, support systems and adaptation have been prominent.

Success stories of behavioural change do exist. The change in human (industrial) behaviour after the discovery of the ozone hole is one of the best examples with the phasing out of dangerous refrigerants and new agreements being established. Lloyds of London, the international insurers and one of the most conservative businesses in the world, published 'Adapt or Bust', a report that stressed the importance of investment in the reduction of unsustainable practices and the need to adapt to the consequences of climate change. Demands to strengthen the Kyoto Protocol, the Emissions Trading Schemes, and National Adaptation Programmes have become increasingly important. Modern success stories are to be found among global industries which have steered towards SCP as a result of the actions of non-governmental organizations. Even one global luxury perfume industry has reconfigured its marketing!

These examples serve to show how a strategy of sustainable consumption and production is about using collectively all the tools available. It is a strategy that could be more strongly promoted by the EU, but it is also an opportunity for business leaders and the private sector to take seriously Corporate Social Responsibility.

But we can all think of examples where there is little evidence that SCP has ever been considered seriously. Dependency on the use of plastics in modern living, and the tardy response of the chemical industry to come up with more acceptable alternatives and safer additives is a salutary example of where society and business lag far behind in the principles of SCP both in the recognition of environmental impact and in the realization of a new business opportunity, respectively.

The sustainable consumption and production practices are fundamental to the future success and planetary survival of humankind and these practices have to be informed by value systems that speak about stewardship, responsibility and things we really value. The core idea is that there are problems with unsustainable patterns of consumption and production, not least in their low impact on individuals' well-being and happiness, and that we should see what contribution would be expected of us as 'reasoned agents' of change rather than 'needy patients'. The EASAC seeks to contribute to the debate by emphasising how science can assist with evidence-based policies that focus on ways to achieve SCP, a crucial requirement for the realisation of EU's *Horizon 2020* and for future economic revival and stability which, in Jared Diamond's language, has to be subjugated to group - rather than self-interests.

---



ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 8ΗΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2011

ΑΝΑΓΓΕΛΙΑ ΘΑΝΑΤΟΥ

Ὁ Πρόεδρος κ. Απόστολος Γεωργιάδης ἀνακοινώνει τὸ θάνατο τοῦ Ἀντεπιστέλλοντος Μέλους τῆς Ἀκαδημίας Λυσίμαχου Μαυρίδη. Ὁ Ἀντιπρόεδρος κ. Γεώργιος Κοντόπουλος ὁμιλεῖ γιὰ τὸ βίο καὶ τὸ ἔργο τοῦ ἐκλιπόντος καὶ λέγει τὰ ἑξῆς:

«Ὁ Λυσίμαχος Μαυρίδης, Ἀντεπιστέλλον Μέλος τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν, γεννήθηκε τὸ 1928 στὴν Καβάλα. Τελείωσε τὸ Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης τὸ 1949 καὶ πῆρε τὸ διδακτορικό του τὸ 1954. Κατόπιν ἐργάσθηκε ὡς μετα-διδακτορικός ἐρευνητής στὴν Heidelberg (1955-1958) καὶ στὸ Cleveland τὸ 1961.

Διετέλεσε Διευθυντὴς τοῦ Γραφείου Ἐρευνῶν καὶ Ὑπολογισμῶν τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν (1960-1965) καὶ κατόπιν Καθηγητὴς Γεωδαιτικής Ἀστρονομίας στὴν Πολυτεχνικὴ Σχολὴ τοῦ Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης ἀπὸ τὸ 1964 γιὰ πάνω ἀπὸ τριάντα χρόνια. Διετέλεσε Πρόεδρος τῆς Ἐπιτροπῆς Ἀστέρων Ἐκλάμψεων τῆς Διεθοῦς Ἀστρονομικῆς Ἐνώσεως καὶ Μέλος τῆς Ἐπιτροπῆς Διδασκαλίας τῆς Ἀστρονομίας τῆς ἴδιας ἐνώσεως. Ὑπῆρξε πρόεδρος ἢ μέλος πολλῶν ἄλλων ἐλληνικῶν ἢ διεθνῶν ὀργανισμῶν. Κατὰ τὸ διάστημα 1974-1978 διετέλεσε Πρόεδρος τοῦ Πανεπιστημίου Θράκης καὶ συνέβαλε σημαντικὰ στὴν ἀνάπτυξη τοῦ νέου αὐτοῦ πανεπιστημίου.

Ἦταν ὁ πρῶτος Πρόεδρος τῆς Ἑλληνικῆς Διαστημικῆς Ἐπιτροπῆς καὶ διετέλεσε Γενικὸς Διευθυντὴς Ἀνώτατης Ἐκπαίδευσης τοῦ Ὑπουργείου Παιδείας. Τέλος, δημιούργησε καὶ ἀνέπτυξε τὸν Ἀστρονομικὸ Σταθμὸ στὸ Στεφάνιο Κορινθίας. Εἰδικότερα μελέτησε διάφορους τύπους μεταβλητῶν ἀστέρων, τὴ δομὴ τοῦ Γαλαξίου, τίς σχέσεις ἡλιακῶν καὶ γήινων φαινομένων, τὸ βαρυτικὸ καὶ τὸ μαγνητικὸ πεδίο τῆς Γῆς καὶ τὴ διάδοση τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας στὴ γήινη ἀτμόσφαιρα. Δημοσίευσε πολλὰ ἐργασίες

στά θέματα αυτά και ἔγραψε ἀντίστοιχα βιβλία γιὰ τοὺς φοιτητές. Τὸ ἐπιστημονικὸ του ἔργο εἶχε ἀξιόλογη διεθνή ἀναγνώριση.

Ἡ Ἀκαδημία Ἀθηνῶν, ἡ ὁποία τοῦ ἀπένευμε τὸ Ἀριστεῖο τῶν Θετικῶν Ἐπιστημῶν καὶ τὸν ἐξέλεξε Ἀντεπιστέλλον Μέλος της τὸ 1988, ἐκφράζει τὰ συλλυπητήριά της στοὺς συγγενεῖς καὶ τοὺς συνεργάτες του».

Ἡ Ὀλομέλεια τηρεῖ ἐνὸς λεπτοῦ σιγή.



ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 15ΗΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2011

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ  
[EARTHQUAKE RESPONSE OF MULTIDRUM COLUMNS]

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ κ.κ. Ν. ΑΜΒΡΑΖΗ ΚΑΙ Ι. ΨΥΧΑΡΗ

ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ κ. ΝΙΚΟΛΑΟ ΑΜΒΡΑΖΗ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτό το άρθρο αποσκοπεί στην επισήμανση απαραίτητων βελτιώσεων που πρέπει να εφαρμοστούν στις μεθόδους εκτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς και της τρωτότητας ελεύθερα ιστάμενων σπονδυλωτών κιόνων\*. Βασίζεται σε επιτόπιες παρατηρήσεις που έγιναν σε πολλά μνημεία και επισημαίνει την ανάγκη να λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές επιπτώσεις των σεισμών, όπως αυτές καταγράφονται στη σημερινή κατάσταση των μνημείων, και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια έχουν εμφανιστεί πολλές εργασίες που εξετάζουν τη σεισμική απόκριση λικνιζόμενων κατασκευών και ειδικότερα σπονδυλωτών κιόνων. Όπως όμως συμβαίνει και με άλλα προβλήματα στα οποία εμπλέκονται πολλές επιστημονικές ειδικότητες, υπάρχει μία ανισοκατανομή του επιπέδου γνώσης που εφαρμόζεται στην εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των κιόνων. Έτσι, ενώ υπάρχει μεγάλη εξέλιξη στις αριθμητικές μεθόδους, με τις οποίες, τουλάχιστον θεωρητικά, μπορούν να γίνουν λεπτομερείς αναλύσεις, ή γνώση των ιδιοτήτων των υλικών, της θεμελίωσης και ιδιαίτερα των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης υπολείπεται κατά πολύ.

---

\* Το άρθρο είναι συνέχεια προηγούμενης δημοσίευσης των συγγραφέων (Ambraseys and Psycharis 2011).

Φαίνεται, επομένως, ότι υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων που να μπορούν να λάβουν υπόψιν τους τις ιδιότητες των υλικών και την πραγματική κατάσταση των κiónων, και με κατάλληλες παραδοχές να καταλήξουν σε συμπεράσματα που θα συμφωνούν με τις επιτόπιες παρατηρήσεις.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένω με τις ύφιστάμενες μεθόδους ανάλυσης είναι δυνατόν σήμερα να υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια ή σεισμική απόκριση μιᾶς μεγάλης σύγχρονης κατασκευῆς, ή εκτίμηση τῆς συμπεριφορᾶς ενός ἐλεύθερα ἱστάμενου πολυσπόνδυλου κίονα τῆς κλασικῆς ἀρχαιότητος εἶναι ἐξαιρετικά δύσκολη.

Ὁ ἀντισεισμικὸς σχεδιασμὸς ἄλλων λυγηρῶν κατασκευῶν πλὴν τῶν κiónων, ὅπως πύργων καὶ διατμητικῶν τοίχων πυρηνικῶν ἀντιδραστήρων, βασίζεται σὲ γνωστὲς ιδιότητες ἀντοχῆς, πλαστιμότητος καὶ ἀπορρόφησης ἐνέργειας τῶν υλικῶν κατασκευῆς καὶ τῆς θεμελίωσης καὶ στὴν πιθανότητα ὑπέρβασης τῆς σεισμικῆς ἔντασης ποὺ καθορίζεται ἀπὸ τοὺς κανονισμοὺς. Ὁ σχεδιασμὸς μπορεῖ νὰ βελτιωθεῖ περαιτέρω λαμβάνοντας ὑπόψιν πειραματικὰ ἀποτελέσματα καὶ τὴν ἐμπειρία ἀπὸ προηγούμενους σεισμοὺς.

Στὴν περίπτωσιν τῶν κλασικῶν κiónων, ἡ κατάσταση εἶναι πολὺ πιὸ σύνθετη. Τὰ μνημεῖα, ὅταν ἀνακαλύφθησαν ἀπὸ τοὺς σύγχρονους ἐρευνητῆς, κατέγραφαν ἤδη πολλοὺς αἰῶνες ζωῆς καὶ τὸ ὑλικὸ κατασκευῆς τους καὶ ἡ θεμελίωσις εἶχαν ἤδη ὑποστῆ σημαντικὰς ἀλλοιώσεις, ὄχι μόνον ἀπὸ σεισμοὺς ἀλλὰ καὶ ἀπὸ διάβρωσιν, ἀνθρώπινες ἐπεμβάσεις καὶ βανδαλισμοὺς, με ἀποτέλεσμα νὰ ὑπάρχουν σημαντικὰς ἀβεβαιότητες σχετικὰ με τὶς ιδιότητές τους. Ἡ ἀνάλυσις, ἐπομένως, τῆς σεισμικῆς τους συμπεριφορᾶς πρέπει νὰ ξεκινάει ἀπὸ τὴ διερεύνησιν τῆς κατάστασις στὴν ὁποία βρίσκονται. Ἡ σημερινὴ κατάσταση ἐνός κίονα δίνει στὸν μηχανικὸ τὴ δυνατότητα νὰ ἀντιληφθεῖ ὄχι μόνον τὴν πολυπλοκότητα τῆς ἀπόκρισις αὐτῶν τῶν κατασκευῶν σὲ σεισμικὰς διεγέρσεις, ἀλλὰ ἐπίσης τὶς ἀβεβαιότητες τῶν παραμέτρων ποὺ ἐπηρεάζουν τὴ συμπεριφορὰ τους.

Πρέπει νὰ σημειωθεῖ ὅτι δὲν μπορεῖ νὰ πεῖ κανεὶς με βεβαιότητα ἐὰν οἱ ζημιὰς ποὺ ἐμφανίζονται στὴ σημερινὴ κατάσταση ἐνός κίονα συνέβησαν ὅταν αὐτὸς ἀποτελοῦσε δομικὸ στοιχεῖο τῆς κατασκευῆς καὶ ἔφερε τὰ φορτία τῆς ἀνωδομῆς ἢ ὅταν ἦταν ἐλεύθερα ἱστάμενος μετὰ τὴν κατάρρευσις τῆς μητρικῆς κατασκευῆς. Ἐπίσης, οἱ σημερινὲς βλάβες εἶναι τὸ συσσωρευτικὸ ἀποτέλεσμα περισσότερων τοῦ ἐνός σεισμῶν, συμπεριλαμβανομένων σεισμῶν ποὺ συνέβησαν μετὰ τὴν ἐγκατάλειψιν τοῦ ἀρχαιολογικοῦ χώρου ἀπὸ τοὺς κατοικοὺς τῶν γύρω περιοχῶν.



## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Έχουμε επομένως τὸ κλασικὸ πρόβλημα: (1) παρατήρηση γεγονότων, (2) ὑπόθεση, καὶ (3) πόρισμα. Μετὰ τὴν ἐξαγωγή τοῦ συμπεράσματος ἀπαιτοῦνται νέες παρατηρήσεις γιὰ νὰ διαπιστωθεῖ ἐὰν τὸ θεωρητικὸ συμπέρασμα ἐπιβεβαιώνεται ἢ ὄχι.

Οἱ ἐλεύθερα ἱστάμενοι κίονες ἀποτελοῦν τὸ τμήμα τῆς ἀρχικῆς κατασκευῆς ποῦ ἐπέζησε μετὰ τὴν κατάρρευσὴ τῆς ἀπὸ σεισμό, καὶ ἡ διερεύνηση τῆς κατάστασης στὴν ὁποία βρίσκονται μπορεῖ νὰ δώσει πληροφορίες σχετικὰ μὲ τίς αἰτίες ποῦ προκάλεσαν τίς βλάβες ποῦ ἐμφανίζονται καὶ τὸν τρόπο ποῦ συμπεριφέρθηκε ἡ κατασκευὴ στὸ σεισμό. Ἀπὸ μία τέτοια ἐξέταση μπορεῖ νὰ δεῖ κανεὶς μὲ ἀρκετὴ λεπτομέρεια τὸ εἶδος καὶ τὸ βαθμὸ βλάβης ποῦ ἔχουν ὑποστεῖ ὁ στυλοβάτης, τὸ κρηπίδωμα, οἱ σπόνδυλοι, τὰ κιονόκρανα καὶ τὰ ἐπιστύλια, καθὼς καὶ πολλὰς τοπικὰς ζημιὰς στοὺς σπονδύλους ποῦ ἔχουν προκληθεῖ ἀπὸ κρούσεις μεταξύ τους καὶ ἀπὸ κτυπήματα ἀπὸ ἄλλα δομικὰ στοιχεῖα ποῦ κατέρρευσαν κατὰ τὴ διάρκεια τοῦ σεισμοῦ.

Πρέπει νὰ σημειωθεῖ ὅτι οἱ κίονες ἔχουν ὑποστεῖ ζημιὰς ὄχι μόνον λόγῳ τῆς ταλάντωσής τους κατὰ τὴ διάρκεια τῆς σεισμικῆς δόνησης, ἀλλὰ καὶ ἀπὸ τὴν πτώση δοκῶν καὶ ἄλλων δομικῶν στοιχείων ἢ ἀκόμη καὶ διπλανῶν κίωνων. Ἡ διάκριση μεταξύ αὐτῶν τῶν ζημιῶν δὲν εἶναι πάντοτε προφανῆς. Ἐπίσης, στίς περισσότερες περιπτώσεις, δὲν εἶναι σαφὲς ἐὰν οἱ βλάβες ποῦ βλέπουμε σήμερα προκλήθηκαν ὅταν οἱ κίονες ἀποτελοῦσαν τμήμα τοῦ ναοῦ καὶ ἔφεραν τὰ φορτία τῆς στέγης ἢ μετὰ τὴν κατάρρευση τοῦ ναοῦ, ὅταν στέκονταν ἐλεύθεροι. Ἐπιπρόσθετα, εἶναι δύσκολο νὰ πεῖ κανεὶς ἐὰν κάποιες ἀπὸ αὐτὲς τίς βλάβες προκλήθηκαν ἀπὸ ἀνθρώπινες ἐνέργειες. Ἡ κατάσταση περιπλέκεται ἀκόμη περισσότερο ἐὰν, στοὺς αἰῶνες ποῦ ἀκολούθησαν τὸν πρῶτο σεισμό, οἱ ἐλεύθερα ἱστάμενοι κίονες ὑπέστησαν πρόσθετες βλάβες σὲ ἐπόμενους σεισμούς, ἀφοῦ οἱ βλάβες εἶναι συσσωρευτικὲς καὶ γενικῶς δὲν μποροῦν νὰ ἀποδοθοῦν σὲ ἓνα μόνον σεισμό.

Ὅσον ἀφορᾷ κίονες ποῦ ἔχουν καταρρεύσει, ἐκτὸς ἀπὸ τὴν ἔντονη ταλάντωση, εἶναι πιθανὸν ἢ κατάρρευση νὰ συνέβη καὶ ἐπειδὴ οἱ σπόνδυλοι ὑπέστησαν σοβαρὰς ζημιὰς κατὰ τὴ διάρκεια τοῦ σεισμοῦ. Κατάρρευση ἑνὸς κίονα μπορεῖ νὰ προκληθεῖ καὶ ἀπὸ θραύση σπονδύλων κατὰ τὴ διάρκεια τοῦ λικνισμού, ἐὰν τὸ ὑλικὸ εἶναι μικρῆς ἀντοχῆς καὶ συμβεῖ ἀστοχία λόγῳ τῶν κρούσεων. Ἐπομένως, παρ' ὅτι ὁ ἐντοπισμὸς βλαβῶν ποῦ νὰ μποροῦν νὰ ἀποδοθοῦν μὲ βεβαιότητα σὲ σεισμούς δὲν εἶναι εὐκόλος, ἡ διερεύνηση τῆς ἀκεραιότητος τῶν δομικῶν στοιχείων καὶ τῶν ιδιοτήτων τοῦ ὑλικοῦ μπορεῖ νὰ ὀδηγήσει σὲ συμπεράσματα γιὰ τίς αἰτίες τῆς κατάρρευσής τους.

Για την αξιολόγηση των επιτόπιων παρατηρήσεων πρέπει να ξεκινήσει κανείς από τη διερεύνηση της άντοχης και της άκεραιότητας των λίθινων δομικών στοιχείων. Σημαντικός είναι ο έντοπισμός ύφιστάμενων ρωγμών, οι οποίες δεν είναι πάντοτε εμφανείς, αφού πολλές φορές δεν διαδίδονται μέχρι τις ελεύθερες επιφάνειες των σπονδύλων. Σε αυτές τις περιπτώσεις ήχητικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έντοπισμό τους.

Πληροφορίες σχετικές με την ποιότητα των λίθινων δομικών στοιχείων και των ζημιών που έχουν προκληθεί από σεισμούς ή από ανθρωπογενείς παράγοντες μπορούν να άντληθούν και από φωτογραφίες καλής ποιότητας που έχουν ληφθεί υπό διάφορες γωνίες και σε διαφορετικές ώρες της ημέρας κατά την αποτύπωση του μνημείου.

Εάν υπάρχουν διακριτές διαγώνιες ρωγμές, είναι προφανές ότι αυτές προκλήθηκαν κατά τη διάρκεια του λικνισμού, ιδιαίτερα εάν ο κίονας παρουσιάζει και σημαντικές μετατοπίσεις σπονδύλων και κιονοκράνου που αποδεικνύουν σημαντική ταλάντωση κατά τη διάρκεια του σεισμού (π.χ. Σχήματα [1, 14, 37, 41, 45 και 47]). Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο λικνισμός προκαλεί θραύση των άκμων των σπονδύλων κατά μήκος της περιμέτρου έπαφής με τους γειτονικούς σπονδύλους ή το στυλοβάτη. Σε όρισμένες περιπτώσεις, οι αποτμήσεις σπονδύλων όφείλονται κυρίως στη μικρή άντοχη του λίθου και λιγότερο στο μέγεθος των φορτίων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του λικνισμού (π.χ. Σχήματα [4, 10, 11, 27, 35, 42, 43, 44, 47, 48, 50 και 51]). Το τμήμα που αποκόπτεται μπορεί να είναι μεγάλο και σε μερικές περιπτώσεις φθάνει το ένα τέταρτο του όγκου του σπονδύλου. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι σφηνοειδείς αποτμήσεις τμημάτων στους κατώτερους σπονδύλους μπορεί να μην όφείλονται στην απόκριση του κίονα κατά τη διάρκεια του σεισμού αλλά να είναι αποτέλεσμα ανθρωπογενών έπεμβάσεων για τον προσπορισμό του μολύβδου των έμπολιών.

Στο Σχήμα [1] άπεικονίζονται οι ρωγμές ενός κίονα στην Περσέπολη σύμφωνα με ένα σχέδιο του 1840, ενώ το Σχήμα [2] δείχνει την προσομοίωση της απόκρισης ενός αντίστοιχου σπονδυλωτού ελεύθερου κίονα κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού, με τους σπονδύλους να λικνίζονται και να όλισθαίνουν μεταξύ τους. Πολλές διαφορετικές μορφές ρηγματώσεων είναι εμφανείς στους σπονδύλους, με έντονες τις διαγώνιες ρωγμές που ύποδηλώνουν διατμητική άστοχία λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται κατά το λικνισμό. Συνήθως, οι ρωγμές που δημιουργούνται περιορίζονται στην επιφάνεια κάθε σπονδύλου και δεν διαδίδονται σε γειτονικούς σπονδύλους.

Μπορούν να βρεθούν σε ιστάμενους ή πεσμένους πολυσπόνδυλους κίονες, αλλά όχι σε μονολιθικούς κίονες.

Τέτοιες διαγώνιες ρωγμές εντοπίζονται σε πολλές απεικονίσεις ιστάμενων και πεσμένων κίωνων, οι οποίες όμως δεν αποδίδουν πάντοτε την πραγματικότητα, αφού συγκρίσεις σχεδίων με φωτογραφίες και επιτόπιες παρατηρήσεις δείχνουν ότι οι καλλιτέχνες είχαν την τάση να προσθέτουν ρωγμές στα σχέδιά τους. Έτσι, πολλές λεπτομέρειες που φαίνονται σε πίνακες, λιθογραφίες ή σκίτσα μπορεί να μην αντιστοιχούν σε ακριβή αποτύπωση των ζημιών, αλλά να πρόκειται για σκιές και φυσικές αποχρώσεις του λίθου που αποδόθηκαν με περισσότερο δραματικό τρόπο από τον καλλιτέχνη.

Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι διαγώνιες ρωγμές που δείχνουν αποκοπτόμενα τμήματα σπονδύλων σφηνοειδούς μορφής σαφώς παραπέμπουν σε διατμητική άστοχία λόγω του λικνισμού. Μετρήσεις σε ένα δείγμα 29 περιπτώσεων έδειξε ότι η κυρίαρχη γωνία κλίσης θ της ρωγμής ως προς την κατακόρυφο είναι  $30^\circ$  (Σχ. 5). Οι μετρήσεις αυτές έγιναν σε φωτογραφίες και σχέδια, και λίγες επιτόπιες. Είναι αξιοπερίεργο ότι οι ρωγμές που απεικονίζονται στα σχέδια των καλλιτεχνών έχουν κλίση ίση με αυτή που αντιστοιχεί σε διατμητική άστοχία του λίθου. Είναι, επομένως, μάλλον άπίθανο όλες αυτές οι διαγώνιες ρωγμές που απεικονίζονται σε σχέδια και λιθογραφίες να προστέθηκαν αυθαίρετα από τους καλλιτέχνες.

Παρακάτω γίνεται μία παρουσίαση ορισμένων από τις επιτόπιες παρατηρήσεις, που δείχνουν ότι οι διαγώνιες ρωγμές έχουν προκληθεί προφανώς από λικνισμό. Οι παρατηρήσεις έγιναν σε περιοχές με έντονη τεκτονική δραστηριότητα αλλά και σε περιοχές μικρής σεισμικότητας. Σχεδόν όλες οι περιπτώσεις ζημιών σε σπονδύλους έχουν βρεθεί στην Τουρκία, το Ιράν, την Ιορδανία και την Ελλάδα, ενώ πολύ λιγότερες και λιγότερο προφανείς έχουν βρεθεί στην Αλβανία, τη Βουλγαρία, την Αίγυπτο και την Αλγερία. Τα μνημεία που ελήφθησαν υπόψη φαίνονται στον Πίνακα [1].

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΑΖΟΝΤΑΣ ΤΙΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Όπως προκύπτει από τις παρατηρήσεις, υπάρχουν πολλές παράμετροι που επηρεάζουν τη σεισμική απόκριση ελεύθερα ιστάμενων κίωνων, όπως οι συνθήκες θεμελίωσης, οι ιδιότητες των υλικών των σπονδύλων και του στυλοβάτη στην κατάσταση που βρίσκονται σήμερα, τα χαρακτηριστικά των διεπιφανειών έπαφής τους, συμπεριλαμβανομένων των συντελεστών στατικής και κινηματικής τριβής, ή έπιρροή τυχόν έμπολιών, τα χαρακτηριστικά της

έδαφικῆς κίνησης, ἡ ἐπιρροή τῶν κρούσεων μεταξύ τῶν σπονδύλων, ἀρχόμενες ρωγμές καὶ θραύσεις στους σπονδύλους κλπ.

Παρ' ὅτι δὲν εἶναι δυνατόν νὰ ληφθοῦν ὑπόψιν ὅλες αὐτὲς οἱ παράμετροι στὴ διατύπωση τοῦ προβλήματος, εἶναι σημαντικὸ νὰ γίνῃ μία ποιοτικὴ διερεύνηση τῆς ἐπιρροῆς τους στὴν ἀπόκριση, ὥστε νὰ μπορέσει κανεὶς νὰ ἐξηγήσῃ τίς βλάβες ποὺ παρατηροῦνται. Μὲ αὐτὸν τὸν τρόπο ἀποδεικνύεται ὅτι οἱ σεισμοὶ ἀποτελοῦν τὴν πιθανότερη αἰτία πρόκλησης ζημιῶν τοῦ τύπου ποὺ φαίνεται στὰ Σχήματα [3], [4], [9].

Οἱ σπόνδυλοι τῶν κίονων δὲν συνδέονται μεταξύ τους καὶ ἐπομένως μποροῦν νὰ ὀλισθήσουν καὶ νὰ λικνιστοῦν κατὰ τὴ διάρκεια ἰσχυρῶν σεισμικῶν δονήσεων. Μὲ τὴ μέθοδο τῶν διακριτῶν στοιχείων (DEM), ἐὰν ληφθοῦν ὑπόψιν μὲ ἀπλοποιημένο τρόπο οἱ παραπάνω παράμετροι, μποροῦν νὰ δικαιολογηθοῦν ἀναλυτικὰ οἱ ζημιὲς ποὺ παρατηροῦνται καὶ νὰ διερευνηθοῦν οἱ συνθῆκες ὑπὸ τίς ὁποῖες συμβαίνουν οἱ ρωγμές στους σπονδύλους καὶ ἡ κατάρρευση τῶν κίονων κατὰ τὴ διάρκεια σεισμῶν.

Ὁ λικνισμὸς εἶναι ἡ κυρίαρχη μορφή ταλάντωσης, ἐνῶ ἡ ὀλίσθηση συνήθως περιορίζεται στὸ ἀνώτερο τμήμα τῶν κίονων ὅπου ἀναπτύσσονται ἐπιταχύνσεις ἀρκετὰ μεγάλες ὥστε νὰ ὑπερκεράσουν τὴν τριβή. Ὁ λικνισμὸς τῶν κίονων μπορεῖ νὰ γίνῃ μὲ πολλὲς διαφορετικὲς («μορφές») ταλάντωσης, ποὺ ἐξαρτῶνται ἀπὸ τὸ πλῆθος τῶν ἀρμῶν ποὺ ἀνοίγουν ταυτόχρονα καὶ τὴ φορά τῆς κίνησης κάθε τμήματος (Σχ. 57). Γιὰ τὴν ἀπλὴ περίπτωσι τοῦ ἐπίπεδου λικνισμοῦ δύο στερεῶν σωμάτων ὑπάρχουν τέσσερις μορφὲς ταλάντωσης (Σχ. 58), ὁ ἀριθμὸς ὅμως τῶν πιθανῶν μορφῶν ταλάντωσης μεγαλώνει ἐκθετικὰ μὲ τὸν ἀριθμὸ τῶν σπονδύλων. Ἐπιπρόσθετα, σὲ σπονδύλους κυκλικῆς διατομῆς εἶναι δυνατόν νὰ ὑπάρξει καὶ κύλιση (wobbling) κατὰ τὴ διάρκεια τοῦ λικνισμοῦ.

Κατὰ τὴ διάρκεια τοῦ λικνισμοῦ, ἡ ἐπιφάνεια ἐπαφῆς τῶν σπονδύλων μειώνεται σημαντικὰ. Τὸ ἐμβαδόν της ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν παραμορφωσιμότητα τοῦ ὑλικοῦ τῶν σπονδύλων. Στὴ θεωρητικὴ περίπτωσι ἀπαρμόρφωτων σπονδύλων ἡ στήριξι ἐκφυλίζεται σὲ «σημειακὴ».

Λόγω τῆς μικρῆς ἐπιφάνειας ἐπαφῆς, στὴν ὁποία μεταφέρεται τὸ βᾶρος τῆς ὑπερκείμενης κατασκευῆς, καὶ τῶν κρούσεων ποὺ συμβαίνουν κατὰ τὴ διάρκεια τοῦ λικνισμοῦ, ἀναπτύσσονται μεγάλες τάσεις, οἱ ὁποῖες, ἐὰν ὑπερβοῦν τὴν ἀντοχὴ τοῦ ὑλικοῦ, προκαλοῦν διαγώνιες ρωγμὲς ποὺ συνήθως διαδίδονται σὲ πεπερασμένο μῆκος χωρὶς ἀποκοπὴ τμημάτων τῶν σπονδύλων. Αὐτὸ φαίνεται καὶ σὲ τριαξονικὲς δοκιμὲς σὲ μάρμαρο, ὅπου οἱ ρωγμὲς δὲν μεταδίδονται ἕως τίς ἐλεύθερες ἐπιφάνειες. Στίς περισσότερες

περιπτώσεις ή άστοχία αρχίζει λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής άντοχης και, όσο η θραύση προχωρά σε βάθος, μετατρέπεται σε διατμητική άστοχία με τη μορφή που εμφανίζεται στα μνημεία. Σημειώνεται ότι είναι πιθανόν ύφιστάμενες τέτοιες ρωγμές να μην είναι διακριτές λόγω της διάβρωσης των επιφανειών. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να έντοπιστούν με γεωφυσικές, μη καταστροφικές μεθόδους.

Κατά τη διάρκεια του λικνισμού είναι πιθανόν να σπάσουν οι άκμές των σπονδύλων ή ακόμη και μεγαλύτερα κομμάτια. Αυτό εξαρτάται από την άντοχή και την όμοιογένεια του ύλικού των σπονδύλων. Οι μηχανικές ιδιότητες του ύλικού αλλάζουν με το είδος του πετρώματος (γρανίτης, μάρμαρο, άσβεστόλιθος διαφόρων τύπων κλπ.), ενώ υπάρχει και σημαντική διακύμανση στο επίπεδο όμοιογένειας του ύλικού, από όμοιογένης, συμπαγές, έως έντονα διαβρωμένο και κατακεραματισμένο που περιγράφεται από το κριτήριο άστοχίας Hoek-Brown.

Η μηχανική της θραύσης έχει μελετηθεί πειραματικά για μάρμαρο Cararra που είναι σχετικά πλάστιμο ύλικό. Στα Σχήματα [60] και [62] παρουσιάζεται η συμπεριφορά του άθθεντικού ύλικού. Τα Σχήματα [61] και [63] άφορούν «κοκκοποιημένο» ύλικό. Σε αυτήν την περίπτωση, τα δοκίμια θερμάνθηκαν σε ύψηλή θερμοκρασία για να σπάσουν οι δεσμοί μεταξύ των κόκκων και να προσομοιαστούν οι συνθήκες που επικρατούν στις διεπιφάνειες ρηγματωμένου βράχου. Σύγκριση των άποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα Σχήματα [62] και [63] δείχνει ότι στην περίπτωση του «κοκκοποιημένου» μαρμάρου μειώνεται δραστικά η εφελκυστική άντοχή, ενώ υπάρχει και σημαντική μείωση της μονοαξονικής θλιπτικής άντοχης.

Και στις δύο περιπτώσεις οι καμπύλες άστοχίας είναι μη γραμμικές. Η τιμή της συνοχής  $c$  και της γωνίας έσωτερικής τριβής  $\phi$  μπορεί να εκτιμηθεί από την έφαπτομένη της περιβάλλουσας των κύκλων Mohr. Τα άποτελέσματα δίδονται στον Πίνακα [2] και στα Σχήματα [64] και [65] ανάλογα με την τιμή της όρθης τάσης. Η τιμή που άντιστοιχεί στο άθθεντικό μάρμαρο Cararra συνιστάται να χρησιμοποιείται για τη μέγιστη άντοχή και η τιμή που άντιστοιχεί στο «κοκκοποιημένο» Cararra για την έναπομένουσα άντοχή. Όπως φαίνεται από τα πειραματικά άποτελέσματα και όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, υπάρχει έναπομένουσα άντοχή έπειδή οι ρωγμές δέν διαδίδονται έως τις έλεύθερες έπιφάνειες και δέν συμβαίνει άποκοπή τμήματος.

Στην περίπτωση γρανιτών, η άντοχή των δεσμών μεταξύ των κόκκων είναι σημαντικά μικρότερη από την άντοχή των ίδιων των κόκκων και η θραύση γίνεται σε έπιφάνειες μεταξύ των κόκκων. Στην περίπτωση του μαρμάρου, όμως, η άντοχή των κόκκων είναι μικρότερη σε σύγκριση με

αυτή του γρανίτη και οι διεπιφάνειες είναι καλά συγκολλημένες. Έπομένως, οι επιφάνειες θραύσης περιλαμβάνουν και θραύσεις των ίδιων των κόκκων. Η προσομοίωση τέτοιων θραύσεων είναι σήμερα δυνατή λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ικανότητας των υπολογιστικών προγραμμάτων που μπορούν να λάβουν υπόψη και τη θραύση σε επίπεδο κόκκου.

Η ανάλυση της συμπεριφοράς περιπλέκεται ακόμη περισσότερο, εάν ληφθούν υπόψη και οι κρούσεις μεταξύ των σπονδύλων κατά τη διάρκεια του λικνισμού. Σε αυτήν την περίπτωση, η δυναμική άντοχη του λίθου αυξάνει αλλά οι συνεχόμενες κρούσεις προκαλούν αντίθετο αποτέλεσμα. Ενδεικτικά αποτελέσματα των κρουστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ 1ου και 2ου σπονδύλου του κίονα του αγάλματος του Απόλλωνα της Ακαδημίας Αθηνών παρουσιάζονται στο Σχήμα [66] για το σεισμό του 1999 (καταγραφή Συντάγματος) μεγεθυμένη σε μέγιστη επιτάχυνση 0.19 g. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν προκύψει από αναλύσεις με το πρόγραμμα 3DEC (Itasca Inc. 1998), που βασίζεται στη DEM.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η ανάπτυξη της μέγιστης δύναμης γίνεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, περίπου 0.005 sec που, για όρισμένα υλικά αλλά όχι για μάρμαρο μπορεί να είναι αρκετό για να προκληθεί έναρξη θραύσης. Σύμφωνα με την ανάλυση, τα δυναμικά φορτία που αναπτύσσονται στους ανώτερους σπονδύλους είναι κατά 70% μεγαλύτερα των αντίστοιχων στατικών, ενώ κοντά στη βάση είναι κατά 20% μεγαλύτερα. Τα φορτία αυτά ενεργούν σε μικρές επιφάνειες επαφής λόγω του λικνισμού, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις που σε όρισμένους λίθους μπορούν να προκαλέσουν θραύση. Στο Σχήμα [67] φαίνεται η ιστορία των όρθων και των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα σημείο της άκμης του άρμου μεταξύ των σπονδύλων (1) και (2) του κίονα του Απόλλωνα κατά τη διάρκεια της ισχυρής σεισμικής δόνησης. Οι μέγιστες τάσεις υπερβαίνουν την τιμή 2.0 MPa.

Στην περίπτωση κίονων μεγάλων διαστάσεων και βάρους, οι όποιοι είναι πιθανόν να μετέφεραν και φορτία από την άνωδομή κατά τη διάρκεια ενός προηγούμενου σεισμού ανάλογα με την κατάσταση που βρισκόταν το μνημείο, οι τάσεις που αναπτύσσονται μπορεί να είναι ικανές να προκαλέσουν θραύση, ή όποια είναι πολύπλοκη και είναι δυνατόν να περιορίζεται μόνο στο έσωτερικό του λίθου και να μην είναι ορατή στην εξωτερική επιφάνεια. Επιπρόσθετα, οι κρούσεις κατά τη διάρκεια του λικνισμού μπορούν να αυξήσουν την ύφιστάμενη ρηγμάτωση από προηγούμενους σεισμούς και να οδηγήσουν σε άστοχια των σπονδύλων. Σημειώνεται ότι σε σπονδύλους με αναθύρωση αναπτύσσονται ακόμη μεγαλύτερες τάσεις, επειδή τμήμα μόνον της επιφάνειας συμμετέχει στην ανάληψη των φορτίων.

Φυσικά, τὸ ἂν θὰ ξεκινήσει ἢ ὄχι ρηγματώση ἢ θραύση ἐξαρτᾶται, ἐκτὸς ἀπὸ τὸ μέγεθος τῶν φορτίων ποὺ ἀναπτύσσονται, καὶ ἀπὸ τὴν ἀντοχὴ τῶν σπονδύλων. Ἔτσι, τὸ ἂν θὰ συμβεῖ ἀποκοπὴ κάποιου τμήματος καὶ μερική ἢ ὀλικὴ θραύση τοῦ σπονδύλου ἐξαρτᾶται, ἐκτὸς τῶν ἄλλων, καὶ ἀπὸ τὴν ἀντοχὴ τοῦ ὕλικου, τὴν ὁμοιογένειά του, τὴ διάστρωσή του καὶ τὸ πλῆθος τῶν κρούσεων κατὰ τὸ λικνισμό.

Πρέπει νὰ σημειωθεῖ ὅτι ἡ θραύση δὲν εἶναι στιγμιαία. Ξεκινᾷ μὲ ρηγματώσεις, ἢ μορφή τῶν ὁποίων μπορεῖ νὰ εἶναι ἀρκετὰ πολύπλοκη λόγω τῆς ἀνομοιογένειας τοῦ ὕλικου. Ἀνάλογα καὶ μὲ τὴν ἀντοχὴ τοῦ λίθου καὶ τὰ φορτία ποὺ ἀναπτύσσονται, οἱ ἀκμές τῶν σπονδύλων μπορεῖ νὰ ἀστοχήσουν σὲ διάτμησῃ ἢ νὰ θρυμματιστοῦν.

Γιὰ τοὺς παραπάνω λόγους, ἀλλὰ καὶ λόγω τῆς πολύπλοκης γεωμετρίας -σπόνδυλοι κυλινδρικοῦ σχήματος στὶς περισσότερες περιπτώσεις-, καὶ τῶν ἀβεβαιότητων ὅσον ἀφορᾷ στὶς διαστάσεις τῆς ἐπιφάνειας ἐπαφῆς καὶ τὴν κλίση τῶν ἀναπτυσσόμενων δυνάμεων, ἡ ἀναλυτικὴ διερεύνηση τοῦ φαινομένου εἶναι ἐξαιρετικὰ πολύπλοκη. Προκαταρκτικὲς ἀναλύσεις τῶν τάσεων ποὺ ἀναπτύσσονται σὲ ἓνα σπόνδυλο γιὰ ἔκκεντρη στατικὴ φόρτιση τῆς ἄνω ἐπιφάνειάς του παρουσιάζονται στὸ Σχῆμα [68]. Μὲ γκρι χρῶμα ἐμφανίζεται ἡ περιοχὴ ὅπου ἀναπτύσσονται οἱ μέγιστες ἐφελκυστικὲς τάσεις. Προκύπτει ὅτι, ἂν οἱ τάσεις αὐτὲς εἶναι ἀρκετὰ μεγάλες ὥστε νὰ προκαλέσουν θραύση, ἡ ρωγμὴ θὰ ξεκινήσει ἀπὸ τὴν ἄνω ἐπιφάνεια τοῦ σπονδύλου καὶ θὰ ἀρχίσει νὰ διαδίδεται πρὸς τὰ κάτω, πιθανῶς μὲ κάποια κλίση. Λόγω τοῦ μικροῦ χρόνου ποὺ ἐνεργοῦν τὰ κρουστικὰ φορτία, ἡ διάδοση τῆς ρωγμῆς ἀναμένεται νὰ σταματήσει ἀφοῦ διακνύσει κάποιο μῆκος καὶ πρὶν τὴν ἀποκοπὴ τοῦ ἀντίστοιχου τμήματος, γεγονός ποὺ συμβαδίζει μὲ τὶς παρατηρήσεις πεδίου.

Μία ἄλλη παράμετρος ποὺ ἐπηρεάζει τὴ συμπεριφορὰ ἀφορᾷ στὴ διακύμανση τοῦ συντελεστῆ τριβῆς μὲ τὴν ταχύτητα ὀλισθήσεως καὶ τὴν κατακόρυφη τάση. Ἡ ἐπιρροή τοῦ συντελεστῆ τριβῆς στὰ ἀποτελέσματα διερευνήθηκε σὲ προηγούμενη μελέτη (Ambraseys and Psycharis 2011).

Πολὴ σημαντικὴ εἶναι καὶ ἡ ἐπιλογὴ τῶν σεισμικῶν διεγέρσεων, ἢ ὅποια πρέπει νὰ γίνεται μὲ βάση τὴν πιθανότητα ὑπέρβασης καὶ νὰ εἶναι ἀποδεκτὴ ἀπὸ τοὺς συντηρητὲς τῶν ἀρχαιοτήτων. Ἡ ἐπιλογὴ τῶν σεισμικῶν διεγέρσεων ἐπηρεάζει σημαντικὰ τὰ ἀποτελέσματα. Ἡ διάρκεια τῆς σεισμικῆς δόνησης εἶναι ἐπίσης σημαντικὴ, ἰδιαιτέρα ὅσον ἀφορᾷ ἐπαναλαμβανόμενους σεισμούς.

Οἱ δυνάμεις σχεδιασμοῦ πρέπει νὰ εἶναι συμβατὲς μὲ ἓνα ἀποδεκτὸ ἐπίπεδο διακινδύνευσης. Ἐφόσον εἶναι γενικῶς ἐπιθυμητὸ ἓνα μνημεῖο νὰ ἐπιβιώσει (αἰώνια), εἶναι λογικὸ ὁ ἀποδεκτὸς κίνδυνος νὰ εἶναι μικρότερος ἀπὸ αὐτὸν

των συνήθων κατασκευών, χωρίς όμως να υπάρχει μία επιστημονική βάση καθορισμού του. Έτσι, το βάρος πέφτει στον μηχανικό, ο οποίος θα πρέπει να καθορίσει a priori παραμέτρους σχεδιασμού, οι οποίες είναι δύσκολο να εκτιμηθούν ακόμη και μετά το σεισμό.

Είναι σημαντικός, επομένως, ο καθορισμός της πιθανότητας υπέρβασης ή της αποδεκτής διακινδύνευσης με τις οποίες θα επιλεγούν οι σεισμικές δονήσεις για τον υπολογισμό της τρωτότητας. Όμως οι συντηρητές των μνημείων δεν επιθυμούν, συνήθως, κανενός είδους απώλεια και είναι απρόθυμοι να δεχθούν κάποια πιθανότητα αστοχίας. Τα θέματα αυτά διερευνήθηκαν σε προηγούμενη έργασία των συγγραφέων (Ambraseys and Psycharis 2011).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Ενώ δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι θα πρέπει να προσομοιάζουμε και να υπολογίζουμε την ευστάθεια των κόνων όσο καλύτερα μπορούμε, λόγω των πολλών αβεβαιοτήτων στις παραμέτρους και τα δεδομένα, ανάλυση με ακρίβεια πέραν ενός όριου δεν έχει πρακτική σημασία. Πολύ αναλυτικά και λεπτομερή προσομοιώματα κινδυνεύουν να υποβαθμίσουν τη σημασία των παραδοχών στις οποίες βασίζονται και τις αδυναμίες τους. Αντίθετα, υπερβολικά απλά μοντέλα υπερτονίζουν τη σημασία των παραδοχών. Απλά μοντέλα, ούτε πολύ λεπτομερή αλλά ούτε και πολύ απλοποιημένα, τα οποία λαμβάνουν υπόψιν τους και τις ιδιότητες των υλικών, είναι περισσότερο αποδεκτά και προτιμητέα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν διάφορα θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψιν στα όποια εμπλέκονται πολλές επιστημονικές ειδικότητες. Είναι εμφανές ότι οι μέθοδοι που εφαρμόζονται μέχρι σήμερα για την εκτίμηση της τρωτότητας ιστορικών κόνων, ή όποια έχει αρχίσει από ετών στο Έθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (βλ. Psycharis et al. 1996, Papastamatiou et al. 1997), είναι έλλιπεις λόγω αυτής της εμπλοκής πολλών ειδικοτήτων. Έτσι, αυτοί που ασχολούνται με την αριθμητική ανάλυση καλούνται να αντιμετωπίσουν προβλήματα που σχετίζονται με τη συντήρηση των μνημείων και οι πολιτικοί μηχανικοί να χρησιμοποιήσουν στοιχεία από τις φυσικές επιστήμες και τη Βραχομηχανική.

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική πρόοδος στον τομέα της επίλυσης σεισμικών προβλημάτων στα όποια εμπλέκονται διαφορετικές ειδικότητες, που έχει αναδείξει την ανάγκη συνεργασίας μεταξύ αρχαιολόγων, μηχανικών, γεωλόγων και άλλων επιστημόνων για την κατανόηση των επιπτώσεων του σεισμού και την ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με τη φύση της εδαφικής κίνησης.



## EARTHQUAKE RESPONSE OF MULTIDRUM COLUMNS

## ABSTRACT

This article aims at clarifying perceptions of likely needs and developments of methods for the assessment of the earthquake response and the vulnerability of real multidrum free-standing columns\*. It is written with the engineer in mind. It puts on record field observations and case histories that demonstrate the necessity that such a method should take into account observed earthquake effects and the actual material properties of columns.

During the last two decades, there have been papers dealing with the seismic response of multidrum columns and with the rocking design of structures. However, as with other multidisciplinary engineering problems, there is an imbalance of knowledge of how to estimate the seismic vulnerability of extant classical columns. Numerical methods are highly developed and amenable to rational analysis, at least in theory, whilst knowledge of the material, foundation properties and in particular of the design ground motions is still lagging behind.

It seems therefore that there is a need to devise a method that could take into consideration the actual material properties and integrity of the columns and make assumptions likely to be satisfied from observations. Such assumptions may best be regarded as indicators of the extent to which a particular conclusion would be supported by the data.

## INTRODUCTION

While it is now possible, theoretically, to estimate with fair accuracy the seismic response, say, of a large-aspect-ratio construction at the design stage, it is difficult to predict the response of an extant classical free-standing multidrum column to a future earthquake.

The earthquake-resistant design and construction of slender structures other than columns, such as towers, shear walls and nuclear-reactor control rods, is based on well-known strength, ductility and energy-absorption properties of building and foundation materials, while, in addition, building codes for the likelihood of future earthquakes specify a probability of exceedance. The design can be improved further by learning from laboratory or full-scale tests, not to mention occasionally by applying lessons learned from real earthquakes.

In case of multi-drum classical columns, things are more complicated. Monuments, when they are first discovered by modern researchers, are already many cen-

---

\* The article is a sequence to the paper by Ambraseys and Psycharis (2011).

turies old and their material properties and those of their foundations are imperfectly known to say the least, having quite often been affected not only by earthquakes but also by weathering, human activity and vandalism. Therefore, a prerequisite for their proper modelling of the earthquake response is to start with the examination of the condition in which they were first found on site. The final state in which a column is left after an earthquake gives the engineer the opportunity not only to visualise the actual complexity of its response to ground motions, but also to become aware of the uncertainties in the variables involved in the system.

Note that it is not always possible to say whether the observed damage to a column occurred when it was a structural element carrying a load or when it was free-standing after the parent structure had collapsed. Damage can also be cumulative, namely from more than one earthquake, including from earthquakes that happened a long while after the abandonment of an archaeological site.

#### OBSERVATIONS

Thus, the problem takes the classical form: (1) observation of facts; (2) a hypothesis; and (3) deduction. Having drawn a conclusion, one has to take the next step, which is to make observations to see whether the theoretical conclusion is recognizable.

Free-standing columns are usually the surviving structural elements of temples or colonnades that collapsed in an earthquake. They are often found in a tolerable state of preservation, so from their examination one can discern the way in which they responded to the earthquake and the reason why they were damaged. Starting with the examination of the condition in which columns are found on site, here one may see in some detail the degree and kind of damage sustained by their stylobate, crepidoma, shaft, capital and architrave as well as the many different forms of scarring of the shaft caused by impact and by incipient failure of the stones.

It is necessary to think that columns suffered damage not only from the earthquake shaking but also from the falling beams among falling structural elements and even other falling columns and capitals, adding scars that are difficult to distinguish from those caused by the earthquake shaking alone. In most cases, it is not easy to say whether the damage we see today was caused by an earthquake when the columns belonged, say, to a temple, supporting architraves and entablature, or by an earthquake after the temple had collapsed when the surviving column was free-standing. It is even more difficult to say whether the damage was assisted by human action. Matters may become complicated even further if, during the centuries that followed the first earthquake, free-standing columns were damaged again by one or more earthquakes. Damage is cumulative, thus it cannot, in general, be attributed to a particular earthquake.

Columns that have been seriously damaged are more likely to be found prostrated on the ground. Finding telltale scars that can be attributed to earthquakes from the remnants of collapsed columns is not easy; yet from their examination it is still possible to see the degree of their integrity and the cause for their collapse. Toppling may be brought about not only by excessive rocking but also due to the low strength of the supporting stone of the drum, which can fail by impact during rocking. Therefore, any method that provides an insight into the real response of columns requires that their material properties be also taken into consideration.

Beginning with field evidence of damage, one must start with the investigation of the integrity and inherent strength of the structural elements made of the stone. Checking the quality of the stone is necessary because flaws on the smooth or rough surface of drums are not always marked as cracks of incipient failure, which do not always propagate to free surfaces. In some cases, sounding techniques may be used even when, at first sight, the stone shows no visual signs of overstressing.

The integrity of the stone of columns before restoration is easier to identify when details can be seen in good-quality photographs taken from different angles and particularly at different times of the day. This information may be gleaned from reports and drawings of columns showing the state in which they were found. It is possible then to see details and the pattern of earthquake damage caused during their lifetime, in addition to the effects of human activity, vandalism or weathering.

Where genuine diagonal scars are visible, the rocking solution to the question of the source of such scarring is obvious, particularly when the column shows also severely dislodged upper drums and capitals, which is to say that the column was once rocking away without restraint (viz. Figures [1, 14, 37, 41, 45 and 47]). In most cases, the effect of rocking results in crushing the rock at the edge of a drum all around the periphery of contact with adjacent drums or the stylobate or higher up in the shaft. In some cases this is more due to the low strength of the stone rather than to excessive loading during rocking (viz. Figures [3, 4, 10, 11, 27, 35, 42, 43, 44, 47, 48, 50 and 51]). The piece of broken stone can be large, in some cases a quarter of the volume of the drum. However, failure of a wedge-shaped piece of rock at the edge of a bottom drum due to rocking is sometimes difficult to distinguish from anthropogenic damage caused by deliberate hewing off of the bottom drum, probably for the lead of its dowel.

Figure [1] shows the actual fractures of a column in Persepolis drawn in 1840 and Figure [2] shows the simulated response of a multidrum free-standing column subjected to a strong earthquake with its drums drawn in the act of rocking and sliding. Many different forms of scarring are visible on drums, with the prevalence of diagonal scarring on the columns suggesting shear failure, the trace of which is usually confined to the side of one drum, not



Fig. [1]: Damaged column in Persepolis.

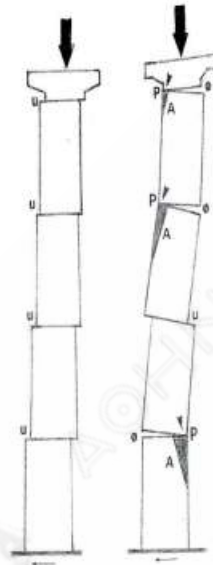


Fig. [2]: Column drums in the act of sliding and rocking. Simplified representation of the deformation during rocking.



Fig. [3]: Diagonal cracks of drums.



Fig. [4]: Diagonal cracks of drums.

extending to the adjacent drums. Similar patterns of diagonal cracks can be found in standing columns and in remnants of collapsed multidrum columns, but not in monolithic columns.

These diagonal cracks can be seen in many standing or prostrated columns, but the phenomenon is nothing like as universal as it has been made out to be by a number of artists who have drawn the site soon after it was discovered. By comparing such drawings with photographs and views with the naked eye one can even prove that they were adding extra chips and cracks.

The problem with images is that some of the details seen in old paintings, lithographs and sketches might not always be an accurate record of damage; rather, they may be due to artistic licence employed by the artist to create some dramatisation of what in fact are shadows or merely natural flaws of the stone.

One particular detail shown as diagonal cracks separating a wedge-shaped section of the edge of a drum, which is often marked on drawings, seen in photographs or measured on columns, clearly suggests incipient shear failure of the edge of the drum due to impact from the drum above it during rocking. A sample of 29 measurements of the angle  $\vartheta$  formed between traces of incipient failure and the vertical shows that its predominant value is  $30^\circ$ , Figure [5]. These measurements were made on photographs and drawings, and a few *in situ*. It is rather strange that artists could show so many scars and diagonal cracks on their drawings due to "artistic licence", with angles that unknowingly are in fact close to the expected angles for incipient failure of the rock. It is unlikely that all these traces have been added to early drawings and lithographs by artists.

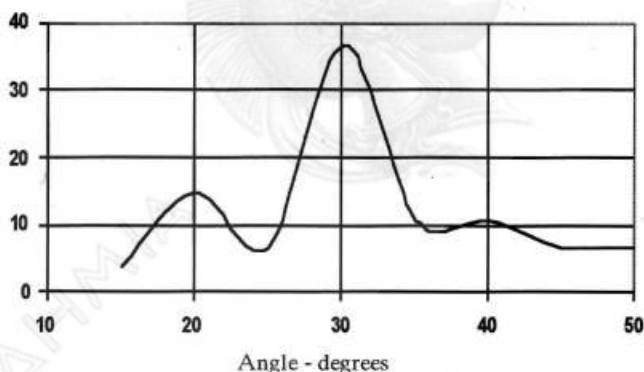


Fig. [5]: Frequency distribution of the angle  $\vartheta$  of incipient failure from 29 observations.

In what follows we give a summary of some of the field observations showing that, where genuine diagonal scars are visible, the rocking solution to the question of the source of such scarring is obvious. Observations have been made in regions of active tectonics as well as of low seismicity. Almost all cases of damaged drums we know have been found in Turkey, Iran, Jordan and Greece; such instances are far fewer and less evident in Albania, Bulgaria, Egypt and Algeria. The monuments considered are shown in Table [1].

Location	Name	Cnt	Flut	Stone	H(m)	D(m)	H/D	N	E
Aizani**	Zeus	2	yes	marble	9.2	1	9.8	39.19	29.62
Andigonia-	?	-3	yes	conglm				40.10	20.23
Apamea*	Apameia			limest	-	-	-	35.42	26.40
Aphrodisias **	Aphrodite	-1	yes	marble	9.3			37.71	28.73
Apollonia-	Poseidon ?		yes					40.74	19.47
Athens**	Apollo Acad.	19	yes	marble	15.3	1.2	13	37.98	23.73
Baalbek**	Bacchus	3	no	limst.	20?	1.7	12	34.00	36.22
Bassae**	Apollo	-5	yes	limest.	5.9?	1.2	4.9	37.40	21.85
Cendere-	bridge	3	no	limest.	9.5			37.94	38.61
Claros*	Apollo	-4	yes	marble	9.1	1.5	6.1	38.01	27.19
Corinth*	Apollo	-6	yes	limest.	7.8	1.8	4.3	37.92	22.94
Didyma**	Apollo a	-3	no	limest.	19.7	2	9.8	37.35	27.23
Edessa-	Urfa	9		limest.	17.3	1.5	12	37.15	38.79
Jerash **	Artemis	2	no	limest.	16	1.5	11	32.18	35.85
Karakus*	Nymphaeo	-1	no	limest.	9	2	4.5	37.87	38.60
Nemea*	Zeus a	-3	yes	limest.	10.2	1.5	6.8	37.82	22.67
Olympia*	Zeus	-5	yes	limest.	10.4	2.2	4.7	37.64	21.60
Olympieion*	Athens	2	yes	limest.	17	1.9	8.9	37.97	23.73
Palmyra**		2		limest.				34.55	38.27
Pergamon**	Demeter		no	marble	5.3	0.6	8.8	39.13	27.18
Persepolis**	Apadana	-5	yes	limest.	18	1.4	13	29.93	52.88
Pompeiopolis-	Soloi	-1	no	limest.				36.78	34.54
Prieni*	Athens	-4	yes	marble	11.4	1.3	8.8	37.65	27.32
Sardis-	Kybele	2	no	marble	17.7	2	8.9	38.30	28.03
Sounion	Poseidon	-5	yes	marble				37.67	24.02
Theseio*	Hephaestus	-5	yes	marble	6	1.1	5.6	37.98	23.72
Thrasyllos W**	Choregic	4	no	marble	8.1	0.7	12	37.97	23.73
Thrasyllos E**	Choregic	4	no	marble	9.3	0.8	12	37.97	23.73

\*\* site investigation

\* cursory study

- not visited

Table [1]: List of the monuments considered.

## CASE HISTORIES

## ΑΙΖΑΝΙ, ΖΕΥΣ

The Temple of Zeus at Aizani, near Çavdarhisar in western Turkey, was discovered in 1824 and its excavation began in 1926 (Figure [6]). It is regarded as one of the best-preserved Roman temples in Turkey, built on a low artificial mound that covers underground vaults that form the basement of the temple.

Early in the nineteenth century some of its columns near the stylobate had been cut away at bottom level so that only about half their base was sitting on the plinth. This seems to have been done deliberately by hewing off part of the base of the column, presumably for the lead of its dowel, a practice encountered in other parts of the Middle East (Figure [11]). Sometime in the 1930s, probably in about 1937, the damaged drums were repaired with concrete pillows that replaced the missing parts of limestone (Figure [9]).



Fig. [6]: The Temple of Zeus some time before the earthquake of 1970.



Fig. [7]: The Temple of Zeus after the earthquake of 1970, which caused the collapse of the three columns shown standing on the left of the temple in Figure [6].



Fig. [8]: Fracture of toppled monolithic columns caused by the earthquake of 1970. In the background can be seen the ruined village of Çavdarhisar.



Fig. [9]: Concrete repair corner pillows of bottom drums of the temple of Zeus at Aizani detached from their columns due to their rocking caused by the earthquake of 1970.

The earthquake of 1944 is said to have caused some damage to the temple, but from what we know about its effects at Çavdarhisar this should have been trivial in comparison with the damage done by the earthquake of 1970 that followed. The new damage to the repairs carried out in 1937 was fixed again, probably sometime between 1963 and 1968, a time period known from a coin found in the concrete pillow when the damaged drums were again repaired.

The earthquake of Gediz of 28 March 1970 ( $M_s = 7.1$ ), which occurred 25 km from Çavdarhisar, aggravated the existing damage. This time, three of the repaired columns which were connected with an architrave collapsed (Figure [7]), and all the reinforcing concrete corner pillows were detached from the shafts (Figure [9]). The monolithic columns that collapsed were all fractured at right angles to the shaft (Figure [8]). In addition, the bottom drums of a number of columns had their edges fractured due to excessive rocking on the stylobate (Figure [10]).



Fig. [10]: Typical corner fracture of the lower part of bottom drums of columns of the Temple of Zeus at Aizani due to rocking caused by the earthquake of 1970.



Fig. [11]: Characteristic damage to columns of the Temple of Zeus at Aizani caused the deliberate hewing off of its bottom drum for the lead of its dowel.



The site was visited a number of times after the earthquake in March 1970 and again in 1971, and the damage caused to the structure by the earthquake was mapped. The interest here is that, because the temple is founded not on the ground but on a semi-basement consisting of vaulted structures, its response to the earthquake was quite different from that of similar structures founded on firm ground (Ambraseys 1976).

Local information to the effect that during the earthquake the columns of the temple were seen swaying seems to be a figment of the imagination, since the event occurred at midnight (Ambraseys and Tchalenko 1972; Naumann 1971; Rheidt 1977).

#### ANTIGONIA

Excavations in Antigonía, a site near Saraqiniste in Albania, were begun in the early 1960s. The free-standing monolithic columns shown in Figure [12] were re-erected, probably in the early 1970s. They belong to the original Hellenistic settlement dating from the early second century BC (Korkuti 1971; Zachos 2006). In spite of the poor quality of the stone and the seismicity of the region, there is no evidence of earthquake damage before they were re-erected.



Fig. [12]: Monolithic columns at Antigonía.

## ΑΡΑΜΕΑ

Excavations at the site of Apamea began in the 1920s. The city was badly damaged by series of earthquakes, in 130, 526 and 528, when it was rebuilt. It was again almost totally destroyed by the earthquakes in 1157 and 1170 and once again rebuilt. There is a considerable number of free-standing columns here for examination, but all of them have been re-erected and it is too difficult to identify with certainty those that have been damaged by the earthquakes.

The problem is that, of the over 1000 originally collapsed columns, those that still stand have been re-erected, some of them perfectly well but many not so well. Those in the vicinity of the Roman Villa have been restored and strengthened with concrete. Also the columns on the site of the Temple of Zeus have all been re-erected, as well as some hundreds along Colonnade Street, these being columns erected in the second century but in part demolished by the earthquake of 1157. Also the series of columns with twisted fluting has been re-erected and their capitals and entablatures have been put back in place.

It was found extremely difficult to identify with certainty standing or prostrated columns that had not been restored during the period 1930-1965. Yet, almost all of them show signs that at some time when they were load-carrying structural elements they had been damaged by what can only have been rocking during earthquakes (Figure [13]).



Fig. [13]: Typical damage of drums of the Colonnade near the northern baths in Apamea.



Fig. [14]: A column (No. 2) of the peristasis of the temple of Aphrodite at Aphrodisias, showing incipient failure of one of its drums.

## APHRODISIAS, APHRODITE

The Temple of Aphrodite in Aphrodisias, near the village of Geyre in Asia Minor, was first found in the early eighteenth century and first excavated in 1904. Repeated earthquakes at various times, particularly the earthquake in 240

AD, should have caused serious damage to the stone buildings of the city. Another earthquake on 22 February 1653 should have caused somewhat smaller damage, but its effect on the columns is not easy to identify. This and later earthquakes helped put an end to Aphrodisias, after which the city fell into disrepair.

The main sanctuary of the city, the Temple of Aphrodite (Figure [14]), has 14 columns of the Ionic order of its peristasis as they were found after the conversion of the temple into the city's cathedral in circa 500 AD. It was altered when it was converted into a Christian basilica at the expense of the building material taken from the ruins for its construction.

To the east of the temple eight columns of a propylon have been newly excavated and re-erected, while south of the Temple of Aphrodite is the Odeon and Agora enclosed by Ionic porticoes on three sides. A series of these columns is preserved in the south-eastern corner.

Some drums of the few standing marble fluted columns with remnants of their capitals found originally do show diagonal cracks suggesting incipient failure due to rocking. There is no evidence that the drums had been hewn near their base or elsewhere for the lead of their dowels (Akurgal 1969).

#### APOLLONIA, POSEIDON (?)

The solitary column, presumably belonging to a temple of Poseidon, is located beyond the site of Apollonia, on the hill of Shtyllas near Fier in Albania. Figure [15] shows a drawing of the column made in 1813 by Holland (1815), and Figure [16] shows the column after its cleaning in 1960 (Korkuti 1971). The site was not visited, but references to the state of preservation of the column do not suggest noticeable earthquake damage.



Fig. [15]: The column as found in 1813 (Holland 1815).

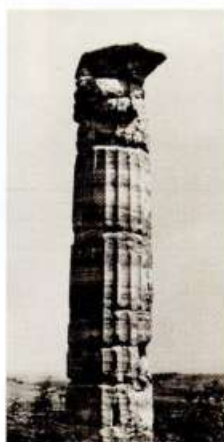


Fig. [16]: The same column in 1960.

## ATHENS, APOLLO, ACADEMY

The columns of Apollo (Figure [17]), and Athena of the Academy of Athens were built of marble and carry the statues of Apollo and Athena, respectively. They were shaken by the earthquake of 7 September 1999 ( $M_w = 5.9$ ) at an epicentral distance of 10 km, which caused no damage to the columns but merely brought about sliding of the statues on the base by a few centimetres (Figure [18]) (Ambraseys 2010a; Ambraseys and Psycharis 2011).



Fig. [17]: Column and statue of Apollo of the Academy of Athens.

Fig. [18]: Displacement and rotation of statue caused by the earthquake of 1999.



## BAALBEK, TEMPLE OF BACCHUS

The Temple of Bacchus in Lebanon is a second-century-AD construction. Its columns are made of hard limestone and they have an aspect ratio of 8.5. The earthquake of 25 November 1759 in the Litani Valley of  $M_s = 7$ , which was associated with a surface fault break 5 km from the Temple, almost totally destroyed Baalbek, demolishing the ancient ruins (Figure [19]).

The site was visited in the autumn of 1968. Between the south-west corner of the peristyle and the colonnade of the vestibule all the columns of the temple have collapsed, except for one whose fall was arrested by the wall of the cella (Figure [20]), which was damaged by the impact of the fall (Figure [21]). The way in which this column fell over suggests that during the earthquake the base of the stylobate moved southwards before the ceiling of the peristyle could collapse. This caused the column to break into two pieces and fall northwards.



Fig. [19] View of the Temple of Bacchus from the south-west in 1890.



Fig. [20] Column of the south peristyle of the Temple of Bacchus in Baalbek thrown onto the cella wall of the Temple by the earthquake of 25 November 1759.



Fig. [21] The column of the south peristyle of the Temple of Bacchus leaning against the cella wall of the temple, which was damaged in arresting its fall.



Fig. [22] The final position of the column of the south peristyle of the Temple of Bacchus, showing the crashed edge of its bottom drum resting on the stylobate (1968).

What is interesting here is the small size of the contact area of the cracked edge of the column which supports it on the stylobate, which is sufficiently large for the stone to carry the load from the column above it (Figure [22]). This shows the ease with which drums of hard rock can stand on their crashed edges, in this case not instantaneously, as in the case when the column is rocking, but for hundreds of years (Diener 1886).

#### BASSAE, APOLLO

The Temple of Apollo Epicurius at Bassae is a mid-fifth-century-BC construction of external Doric order. Its columns are of limestone about 6.0 m high with an aspect ratio of 5.7.

The temple was discovered in 1765 and its structure was seriously affected in 1812 by the demolition works for the removal of parts of its sculptures. Figure [23] shows the remains of the temple in 1814, with one of its columns leaning noticeably against the column next to it.



Fig. [23]: The ruins of the Temple of Apollo at Bassae, 1810 (Haygarth 1814). The leaning column shown must be a “slip of the brush”.



Fig. [24]: A solitary column, next to the missing column of the south colonnade, leaning by 17 cm to the south in 1965.



Fig. [25]: Damaged architraves of low-quality stone, which had already broken before the earthquake (looking up).

The site has been subjected recently to two not very strong earthquakes. The first occurred on 5 April 1965, and the second on 1 September 1966, causing peak ground accelerations less than 10% g.

The site was visited after the earthquakes in 1965 and 1966, and again in 1975. Much of the observed damage was found to be due to the dismantling of the temple for the removal of sculptures. In the first visit to Bassae in July, shortly after the earthquake of April 1965, a cursory inspection of the temple showed that the south part of the western colonnade with its architrave was leaning noticeably to the east by  $2^\circ$  and the north part by  $1^\circ$  to the west (Figure [24]). The eastern colonnade was leaning to the east by about  $1^\circ$ . Also some of the free-standing columns of the north and south colonnades were found to be leaning over to the south by more than  $2^\circ$  (Figure [25]), and some of their heavily eroded architraves were on the verge of collapse. Small pre-existing breaks from the base of a few columns were noticed, with no chippings left on the stylobate.

There was no other visible damage to the structure, except to two drums, which were displaced by about 1 cm, exposing the top surface of the drums below. However, the exposed surface showed the same degree of weathering as the sides of the drums, suggesting that these displacements had taken place long ago. Local information from the nearby town of Andritsaena confirmed that the earthquake caused no noticeable changes in the pre-existing inclination of the columns, except that two architraves, which were already broken, opened up a little, threatening collapse (Figure [25]).

A second visit, after the earthquake of 1 September 1966, and after some small repairs had been made before the second earthquake, confirmed that the shock had caused absolutely no structural damage and no measurable change in the tilting of the columns. There was some indication that, as a result of the location of the temple on the hump of a small catchment area, the foundation of the west part of the temple was in places eroded. Columns on relatively good-quality stylobates but founded on eroded material had settled, causing these columns to lean over.

A third visit in October 1975 led to the conclusion that much of the deterioration of the temple was due to causes other than earthquakes. Erosion, particularly of its architraves, and differential settlement of its foundations were the main causes for the tilting of its columns. A painting of the temple in 1814 shows the excessive tilt of one of its columns (Figure [23]), which can be attributed to foundation failure. Also the few cases of displaced drums in some columns may be associated with the dismantling of the fabric of the monument.

Although the quality of the limestone is not very high, there is no evidence of damage to columns due to oversteering caused by rocking, except that two architraves, which were already broken, opened up a little, threatening collapse (Figure [24]) (Haygarth 1814; Ambraseys 1976; Ambraseys, Lemaire and Marchesini 1976) (viz. Psycharis et al. 1996).

## CENDERE

Of the four columns erected early in the third century AD by the Romans, three are standing on the abutments of the bridge spanning the Cendere River near Arsameia, in a region of high seismicity in the east Anatolian fault zone in Turkey (Figure [26]); the fourth was probably removed by the Romans. Some of the limestone used for these columns came from the dismantling of the columns that are now missing from the Karakus tumulus (Akurgal 1973).



Fig. [26]: The Cendere column on the left abutment of the bridge.

## CLAROS, APOLLO



(a)



(b)

Fig. [27]: The Temple of Apollo, Claros: (a) a drum showing anathyrosi, multiple dowels and (b) missing parts of the edge of the stone, presumably due to rocking (Akurgal 1973; Arisoy, Nuhoglu and Ercan 2011).

## CORINTH, APOLLO

The Temple of Apollo in Corinth is a sixth-century-BC Doric-order construction, built with fluted monolithic limestone columns about 8.0 m high and of near 1.7 m diameter on average, with an aspect ratio of about 4.3.

The first image we have of the temple is from a drawing made in 1751, that is nine years after the destructive earthquake of 21 February 1742 in the region of Corinth. The drawing shows that there were 12 columns standing with their epistyles, with no visual evidence of damage (Figure [28]). Also no mention of damage to the temple and to the surrounding buildings was found in contemporary Ottoman or occidental sources (BBA.A.DVN.808; Stuart and Revett 1751).



Drawings and paintings of the site dating from between 1776 and 1800 show that in the intervening period four or five of the columns and their epistyles had been removed and that only seven columns were still standing. We know, however, that the missing columns were blown up with gunpowder by the owner of the piece of land on which they were standing in order to use the material for the enlargement of his new house (Figure [29]).

Figure [32] shows the view of the remains of the temple after the site had been excavated in 1927. From 1751 up to 1898 the site had been visited and described by 39 travellers, who do not mention any earthquake damage. They note, however, that, as a result of the earthquake of 21 February 1858, the columns had their capitals and entablature somewhat displaced and also that an earlier earthquake had caused one of the columns to split diagonally. In fact this was a pre-existing crack that was enlarged by the earthquake of 1856 (PRO FO:32.261.123 (Athens)). Some superficial damage to the lower parts of some of the surviving columns that can be seen is for structural connections when the columns were part of the houses built on the site (Figures [29], [30] and [31]). It is only on the drawing made in 1801 that the artist adds diagonal cracks in one of the columns of the temple (Dodwell 1819) (Figure [30]), the same view of which is not drawn by other artists. The seven columns of the Temple of Apollo in Corinth remain as they were found.

In January 1851 Flaubert notices that the capital of the 5th column had been displaced considerably to the right (Flaubert, G. 1948) (viz. Psycharis et al. 1996).



Fig. [28]: The first image of the Temple of Apollo in Old Corinth in 1751 viewed from the south-west; notice the houses built on the site (Stuart and Revett 1751).



Fig. [29]: A view from the south-west of the columns left standing, showing the house built on the site (Williams 1816).



Fig. [30]: A view of the same in 1801.



Fig. [31]: Corinth in 1883 (Smith A. 1884).



Fig. [32]: A view of the temple from the east after it had been excavated in 1927.

#### DIDYMA, TEMPLE OF APOLLO

The construction of the temple of Apollo at Didyma, near Miletus, started in the fourth century BC and continued until the first century AD, but it was never completed. Its Ionic columns, a few of which stand today re-erected, are 20.0 m high and have an aspect ratio of 9.7. It is very probable that the site was seriously damaged by many earthquakes. One of these should have been the event which on 18 October 1493 ruined the island of Kos and damaged seriously the nearby Halikarnasus, for which we have a historical record.

The only indication that some of these columns toppled because of excessive rocking comes from drums of fallen columns that clearly show shear failure of the bottom drum (Figure [33]).



Fig. [33]: The stump of a column that failed in shear.

## EDESSA, URFA

Nothing is left of the buildings of the city of Edessa at the time of Abgar the Great. Of Abgar's palace and the mansions all that survives are two columns standing high on the Cathedral Mount among ruined towers and fallen debris (Figure [34]).

The two columns are on bases that were subsequently reinforced. The style of their Corinthian capitals assigns them to the late Roman period, which date is confirmed by the script of the Syriac dedication to Queen Shalmath on the one further to the east. The bases are of dimensions 4.15 m x 5.07 m and 3.75 m x 3.90 m. The total height of the columns, including the bases, capital and coping, is 17.25 m and their diameter is 1.45 m (Segal 1971).



Fig. [34] The shaft and capital of one of Abgar's columns. Note the employment of half drums used in pairs with separate dowels for the construction of the column.

## JERASH, TEMPLE OF ARTEMIS

The Temple of Artemis in Jerash was built on a raised platform surrounded by a line of columns, 11 on the long sides and six on the short sides. Underneath was a barrel-vaulted crypt, which meant that the floor inside the temple was of uneven height. The main entrance faced east. It was marked by a colonnade three columns deep. Eleven front columns are still standing, having survived the earthquake of 746 AD, which seems to have caused extensive damage in Jerash, and other shocks later.

Most of the columns in Jerash standing today show the damage they have suffered from past earthquakes, which were strong enough to cause intensive rocking, and also sliding between drums that in most cases resulted in the fracture of large pieces of rock from the edges of drums (Figure [35]).

Many of the damaged drums have lost so much stone from their edges that they can sway in high wind. The movement of these columns can be seen today by wedging a twig between the drums and watching it move up and down as the columns sway. These “dancing columns”, as they are dubbed, have survived many earthquakes and high winds because of the exposed position of the temple. Nevertheless, on wise advice they have not been stiffened, an intervention that could have been counterproductive.

Almost all of the surviving free-standing columns in Jerash show in some way the effects of rocking from earthquakes by having the fluting between drums chipped off or shattered (Wharton 1995).



Fig. [35]: A *contre-lumière* view of columns in Jerash, showing the loss of stone due to rocking. The movement of these columns can be seen today by wedging a twig between the drums and watching it move up and down as the column sways.

#### KARAKUŞ COLUMNS

The burial mound of Karakuş that marks the memorial graves of the female Comagene royal family was built early in the first century AD. It was surrounded by Doric columns, three of which, 9 m high, survived the demolition in the second century by the Romans for their limestone blocks, which were used for the construction of the columns that decorate the Cendere Bridge further to the north.

The Comagene graves are located in the east Anatolian fault zone in Turkey, a region of high seismicity.

An eagle 2.5 m tall (Figure [36]), a lion and an inscription top the three surviving columns.



Fig. [36]: The three Karakuş columns.

#### NEMEA, ZEUS

The ruins of the Temple of Zeus at Nemea in the north-eastern Peloponnese have been known since the mid-eighteenth century, and the three columns of the temple left standing are original. The temple was built on Holocene gravels and clays about 30-50 m thick of the floodplain of the Nemea River, now canalised only 10 m to the west.

The earliest drawing of its three standing columns was made by Pars (1797) in 1766, which, like many later paintings, shows no details. The only drawing that shows some details was made by F. Préaux in 1801, in Clarke (1812) (Figure [37a]).

Already in the 2nd century AD the roof of the temple had fallen in and in the years that followed the rest of the ruins were used as building material for the construction of a Christian Basilica and of other structures, leaving only three of its columns standing.

It is said that the Temple was overthrown by an earthquake (Hill 1996) for which the first author could find no justification when the first author visited the site in the winter of 1972. The region of Nemea is of relatively subdued tectonic activity and the field evidence points to the use of the site over a long period for building materials, deliberate damage and from weathering.

The free-standing column is made up of 13 drums, each cut from bedded limestone, not of the best quality. All three columns as drawn by Préaux show diagonal cracks across the bedding of the drums. There, traces of diagonal fractures

in the drums of three columns of limestone can be seen in the drawing made by Préaux, clearly cutting across the bedding of the stone of drums, but not extending to contiguous drums (Figure [37b]) (Gell 1810) (viz. Psycharis et al. 1996).

Professor Miller believes, most probably rightly so, that these traces of diagonal cracks are nothing more than the product of the artist who made the drawing or the printer who adapted it for publication, which is possible. He considers that these traces on the lithograph are largely due to “artistic” licence based in some small degree on the natural flaws in the stone that can be seen in a recent photograph. He agrees, however, that there is a diagonal crevice in the stone about where Préaux’s “crack” begins at the upper left, which he thinks is a natural flaw in the stone that does not continue through the whole of the second drum from the top of the column (Figure [37c], personal communication 7 August 2009, Miller S. G. 1986).

It is rather unlikely however, that the eight diagonal traces cutting across horizontally bedded stone which we see on the three columns are all due to “artistic” licence. They are more likely to be the weathered traces of incipient cracks produced in the low-quality stone of the drums by an earthquake when the temple was still standing.



Fig. [37]: The three standing columns of the temple of Zeus in Nemea, drawn by F. Préaux in 1801, in Clarke (1812).

#### OLYMPIEION ZEUS

The Temple of Olympieion, of Corinthian order, was completed in 132 AD. Of its columns only 16 have survived, of which 15 are still standing: 13, with their architraves in a fair state of preservation, in a group at the south-west corner of the site, and two others to the south-west. The latter group consi-

sted of four columns until 1759, when the Turkish Governor pulled one of them down to provide lime for the mosque he was building. The fourth column was blown down in the great storm of 1852 and it is alleged that this was because of foundation failure.

However, it is evident that its collapse was caused by excessive tilting and fracture of its lower drums. As Figures [38], [39] and [40] show, the tilt of the foundation plinth does not agree with the tilt of the rigid foundation block on which the column was standing, which remained horizontal.

On examination it appears that the column prostrated itself only after fracturing of the edge of its lowest drum, a fragment of which lies next to it (Figure [40]), as well as of drums higher up the shaft (Figure [41]).

Incipient fractures and chipping or flaking off of sides of drums appear in many of the standing columns, most of them probably the result of earlier earthquakes.

It is said that the two remaining columns were caused to sway by the earthquake of 20 April 1894 in Atalante, 80 km away from Athens (Tölle 1994).

Fig. [38]: A view of the column blown down in 1852, which most probably fell owing to failure of its base plinth.



Fig. [39]: Foundation conditions of the collapsed column in Figure [38], showing possible failure of its foundation plinth.





Fig. [40]: Corner failure of the bottom drum of the column; the missing piece lies on the ground.



Fig. [41]: The first drum under the capital of the column of Olympieion Zeus in Athens blown down in the storm of 1852, showing a diagonal trace of incipient failure.

#### PALMYRA, TADMOR



Fig. [42]: Pillars of the colonnade with statue brackets in Palmyra, Tadmor. Most of the upper drums are dented at the edge.

#### PERGAMON



Fig. [43]: A *contre-jumière* photograph showing clearly the state of displaced drums of the columns on the Acropolis of Pergamon with their edges missing.



Fig. [44]: The Pergamon sanctuary of Demeter.

## PERSEPOLIS

The Palace of Persepolis (Takht-e Jamshid) was discovered early in the seventeenth century. The various buildings stood on a platform, partly built up on the eastern side and partly excavated in the west. Originally the colonnade of the Apadana Hall, which is located on the eastern part of the site, consisted of 36 limestone fluted columns about 18 m high with a diameter of 1.4 m and an aspect ratio of 12.8.

In 1619 there were 20 free-standing columns, whereas in 1840 there were only 13 (Flandin and Coste 1851), which is also the number of columns that remain upright today without their enormous double bull protomes.

The columns were found in different degrees of preservation, standing up to about 18 m high, made up of only three to five drums of diameter about 1.4 m. The heights of their base, shaft and capital, excluding the massive protome, are about 1.4, 15.5 and 1.9 m, respectively. The diminution in the number of columns is attributed to fires and deliberate demolition, for which there is literary evidence, and also to earthquakes, regarding which, although historical evidence is totally missing, there is no doubt that they had played a significant role in the demise of the site.

The damage to the columns can be seen in the drawings of Flandin and Coste and in descriptions by later travellers that show the actual condition in which they were found in 1840 (Figure [45]).

In most of the columns in Apadana there can clearly be seen a diagonal fragmentation pattern of their drums, a pattern typical of incipient failure of the edges of drums caused by the impact due to rocking. These fractures were probably caused when the columns were still supporting the heavy double bull protomes, while other fractures may be due to earthquakes that occurred after the protomes had toppled.

One has to keep in mind, however, that many different forms of scarring are visible and that the prevalence of diagonal scarring on the stone columns of the Apadana Hall was nothing like as ubiquitous as it is made out to be by Flandin. Above all, by comparing Stronach's drawings with Flandin's left-hand column one can even prove that he was adding extra chips and cracks.

Nonetheless, where genuine diagonal scars are shown, one can say that the rocking of drums having been the cause of such scar strikes is eminently reasonable. Furthermore, Stronach's drawing of the column shows a severely dislodged upper drum and capital. To say that this column was once rocking away completely without collapsing would hardly seem to be an exaggeration. Evidence of diagonal fractures of all sizes can be found also in drums of columns that collapsed and in loose fragments (Figure [46]).

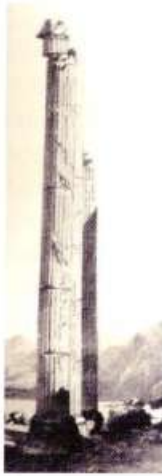
The site was visited after the earthquake of April 1972, which caused only one or two columns to sway. The 13 columns in the Apadana Hall were found

standing with no damage whatsoever, but in appearance were very different from that carefully drawn by Flandin and Coste. The columns all looked brand new, their relatively recent restoration concealing much but not all of their damaged fabric. The little detail that is known about the restoration work on these columns does not explain how the fabric of the columns and their foundations have been strengthened or whether restoration meant merely a repair of the original damage to the shafts.

It was possible to model the observed damage, much of which can be attributed to the impact of drums during rocking (Figure [47]) (Flandin and Coste 1851; Schmidt 1953; Tilia 1972; Stronach 1978; Pasargadae (Apadana); Mousavi 2002 and references in Farsi therein).



Fig. [45]: Columns in Persepolis at Apadana drawn in 1851.



Figures [46-47]: Stronach's column in Persepolis in 1961 after restoration (right), still showing the pattern of damage in 1840 (left).

#### POMPEIOPOLIS

The ancient Roman town of Soloi-Pompeiopolis, near the city of Mersin.



Fig. [48]: Widespread denting of edges of drums.

#### PRIENE, ATHENA POLIAS

The Temple of Athena Polias in Priene is a fourth-century-BC construction in the Ionic order, which was not completed before the second century BC.

Priene was built on the north-south slope of the flank of Mt Mycale. The town is built on tiered terraces, well above the Meander River, and it is one of

the few towns of that period built on hilly topography. It runs east–west because thus the ground is level, while in its narrower north–south part the ground is quite steep, in places reducing streets to stairs, with most of its public and private buildings facing south.

The site was first visited in 1765, and archaeological excavation did not begin before 1896. Not a single column of the Temple of Athena was found standing. In recent years five columns of the north colonnade of the temple have been re-erected, Figure [49]. The temple, for which local marble was used as construction material, is built on a platform.

The temple would seem to have been heavily damaged by earthquakes, for which there is no literary record, and parts of it rebuilt or repaired many times; it has also suffered great destruction in a fire.

Examination of the drums of the re-erected columns and of those on the ground shows that the site seems to have been shaken by strong earthquakes. The damage that can be seen to pedestals and drums, and the loss of parts of their plinths, suggests the effects of severe rocking (Figures [50] and [51]).

There is some evidence of tilting of stubs of columns, but this can be easily explained by the fact that the Temple of Athena is one of those in which the stylobate is tilted outwards, though not curved, presumably for drainage.

There is also some evidence of permanent ground deformations, which may be due to the location of the site on an incipient old slide on the flank of Mt Mycale.

Finally, it is alleged that the original site of Priene was destroyed by an earthquake sometime in 350 BC. This may be so, but it is more likely that the town had suffered severely in the Persian wars, possibly to the extent of being razed and depopulated.



Fig. [49]: The five columns of the Temple of Athena Polias at Priene were re-erected in 1965–6 from rubble.



Fig. [50]: Priene, fractured base.



Fig. [51]: A lower drum of the Temple of Athena, broken all the way around on the bottom and at the base (Altunel 1998).

#### SARDIS, ARTEMIS

Most of what remains today in Sardis dates from the second century. Only two complete columns and a few partial ones still stand. Almost all of them show denting of the edges of drums.

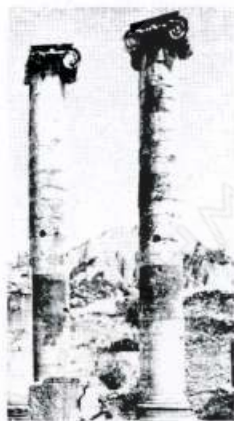


Fig. [52]: The Sardis Temple of Artemis seen from the west. The capital surmounting the left-hand column dates from the second century BC.

#### THESEION, HEPHAESTUS ATHENS

The Theseion or the Hephaesteion in Athens is a temple of Doric order built on a hillock. It is very well preserved externally, owing to its having been converted into a church.

On the short ESE and WNW sides it has six multidrum columns, and there are 13 along the NNE and SSW sides, all carrying the architrave, frieze and pediment.

From Figure [53] we notice that the drums at mid-height of columns 4 and 5 and, to a lesser extent, of column 6 (on the north face of the temple counted from

east to west) have been displaced to the north-west without any indication of the slightest disturbance to the drums of the columns of the rest of the colonnade. Figure [54] shows a detail of the displaced drums, a feature that can still be seen today.

These observations have led seismologists to believe that the deformations and also the cracks seen today in the walls shown in Figure [55] are the result of an earthquake, an assumption that is not tenable.

The structure stands on a slight rise on a 2.5-m-elevated platform of unequal thickness on its east and south sides (Figure [53]). With the exception of columns 4 and 5, the remaining 34 columns show no signs of relative displacement or damage to the edge of their drums. The *en échelon* pattern of cracks in one of the internal walls, shown in Figure [56], suggests right-lateral differential settlements of the foundation of the western part of the temple (the left part of the temple in Figure [53]) rather than earthquake loading. None of these observations supports the effect of an earthquake. It is unlikely that this was the work of an enemy; an invader in temporary possession of a site seldom has the power and leisure for destruction equal to his will.

It may be that what we have here is the result of an unsuccessful attempt in the fifth century AD, a period of purification of the pagan temples, to pull down the structure, starting by first trying to pull out two of the central columns of the north colonnade where the ground was level. This would have caused a retrogressive collapse of neighbouring columns and part of the cella wall. The method they used unsuccessfully is difficult to define. The small height of the displaced drums above ground excludes the use of horses or oxen, that could pull out the columns one by one, in which case they should have gone for the first or second drum.

Another method would have been to wedge dry massive timbers between columns and then drench them to make them swell, thereby forcing the columns apart. But this should have pushed the drums in the opposite direction, which is not the case (Figures [54] and [55]).

It is not known what really caused the observed displacements of the drums.



Fig. [53]: Temple of Hephaestus in Athens in 1749, viewed from the north (Dalton 1791).

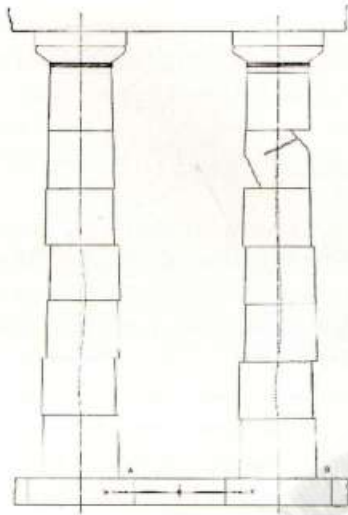


Fig. [54]: Columns 4-6 of the north face of the temple in 1938.



Fig. [55]: The temple viewed from the north-east in 1977.



Fig. [56]: The pattern of wall cracks in one of the internal walls.

#### ACROPOLIS

Evidence for corner incipient failure of the rock of drums due to the tendency of the column to rock can be seen in many cases, such as of the first drum (anathyrosis) of the NE column of Parthenon after the earthquake of 1981 in Figure [57].





Figure [57]: First drum (anathyrosis) of the NE column of Parthenon after the earthquake of 1981 showing incipient right-lateral shear failure most probably due to rocking.

#### MODELING THE OBSERVATIONS

We may now look into the various parameters identified from observations that enter into the formulation of the earthquake response of free standing classical columns. These are: foundation conditions; material properties of the drums and stylobate in the state in which they were found; type of contact surfaces between drums; static and kinetic friction between drums; effect of central or lateral dowels on the response; criteria for the appropriate selection of ground motion; transient loading and impact between drums and stylobate; effect of impact on drums; incipient failure and fracture of drums. Of the many parameters mentioned above, of major importance are the material properties of the drums.

While it is not possible to take into account all these parameters in the formulation of the problem, it is important to examine qualitatively their effects on the response, since one can thereby explain, at least in principle, the kind of damage we observe in the field. That alone should make earthquakes not the explanation of last resort but rather one of the first suspicions to come to mind when we look, for instance, at the damage in Figures [3, 4, 9].

Multi-drum columns are made of individual stones (drums) that are placed one on top of the other in some cases without any connection between them. As a result, they rock and/or slide during strong earthquakes. The application of the DEM in parallel with a simplified modelling of the above-mentioned parameters may provide an explanation for the observed damage

and provide a more realistic simulation for the conditions that lead to the cracking and toppling of columns during rocking.

In structures, such as columns of classical temples or colonnades, rocking is the dominant mode of response, while sliding is usually restricted to the upper part of the column where the developed accelerations are large enough to overcome friction resistance.

There are many rocking “modes” in which a multi-drum column can respond. For example, there might be simultaneous opening of many joints, or some blocks might respond without opening of the intermediate joints, thus behaving as a single block (Figure [58]). In Figure [59], the four possible rocking modes of a two-block assembly are shown for planar (2-D) response. The number of the possible rocking modes increases exponentially with the number of drums. Additionally, for drums of circular cross section, wobbling occurs during rocking.

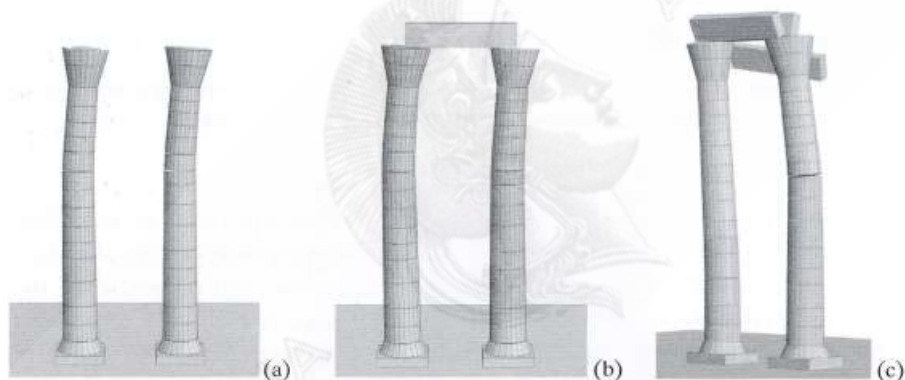


Figure [58]: Earthquake response of multidrum columns: (a) free-standing columns with joint opening at many places; (b) two columns connected with architrave with joint opening at many places; (c) two columns connected with architrave with joint opening at few places (Psycharis 2005).

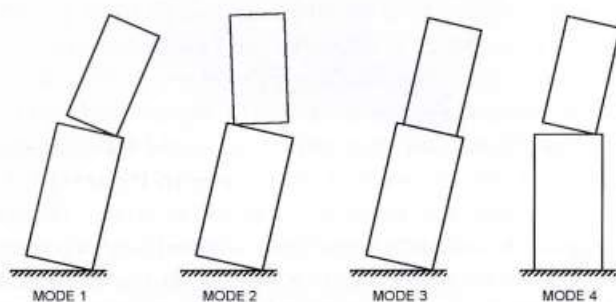


Figure [59]: The four modes of rocking of a two-block assembly for planar response (Psycharis 1990).

During rocking, the weight of the upper part of the column and the superstructure is supported by the small contact area of the two drums, adjacent to the opening joint. The area of contact depends on the deformability of the material of the drum. The stiffer is the stone from which the drums are made the smaller is the area of contact. In the theoretical case of perfectly rigid blocks, the area of contact degenerates to a single point.

Due to the small size of the contact area and the impacts that occur, high stresses are developed, which can produce cracking. In drums of columns that still stand or they have collapsed, the existence of diagonal cracks indicates that the strength of the rock has reached its residual value. The failed material does not just fall out since many of the cracks propagate limited distances along quite complex paths before they stop. This can be seen clearly in triaxial tests of granulated marble (*viz.* Lan, Martin and Hu 2010), in which most of the cracks do not propagate to free surfaces. In most cases, failure starts in tension and, as fracture propagates into the stone, ends up in shear, which is in fact the failure pattern observed in the field. Note, however, that traces of old cracks that propagate to the surface of the drum can easily become indistinguishable from the rest of the surface, due to the weathering of the stone. In such cases, geophysical non-destructive test methods may be applied to confirm the integrity of the stone.

Whether rocking may bring about failure of the edge or of a larger part of a drum will depend primarily on the inherent strength of the rock itself from which the column is made, as well as from the degree of its ageing over the centuries. Material properties may vary with the type of rock which can be granite, marble, limestone of different kinds, travertine even cemented conglomerates. The integrity of the drum material may also vary from solid and homogeneous to heavily jointed and weathered described by the Hoek-Brown failure criterion (Hoek and Brown 1980a and 1980b).

The fracture behaviour can be seen in relatively ductile rocks such as marble. A plot of typical test results for intact Cararra Marble specimens is shown in Figures 60 and 62 [4-5] (Rosengren and Jaeger 1968; Kovari and Tisa 1975; Georgiannopoulos 1978).

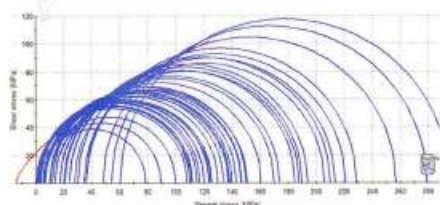


Fig. [60]: Intact Cararra Marble.

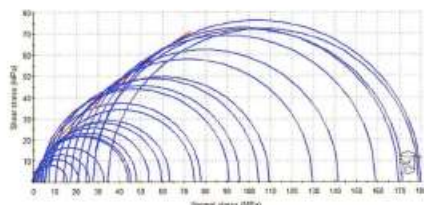


Fig. [61]: Granulated Cararra Marble.

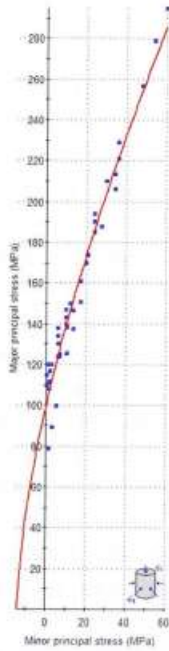


Fig. [62]: Intact Cararra Marble.

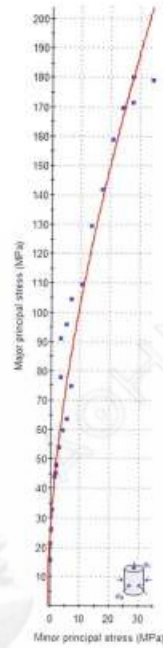


Fig. [63]: Granulated Cararra Marble.

A. Intact Cararra Marble			B. Granulated Cararra Marble		
$\sigma_n$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (deg)	$\sigma_n$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (deg)
0	22.0	46.9	0	2.6	68.5
20	24.0	38.8	20	9.4	45.2
40	27.0	34.4	40	15.2	38.8
60	31.0	31.3	60	20.3	34.9
80	35.0	29.1	80	25.1	32.2

Table [2]: Properties of Intact and Granulated Cararra Marble.

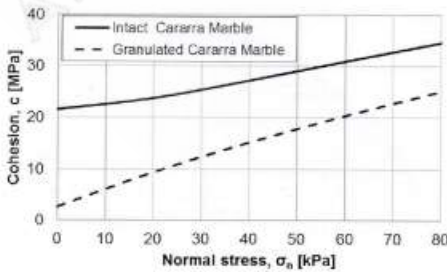


Fig. [64]: Plot of data in Table [2].

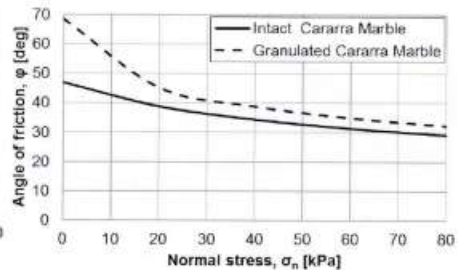


Fig. [65]: Plot of data in Table [2].

Figures [61] and [63] show the result from a second set of tests, which are particularly interesting, since in an attempt to simulate the failure of jointed rock masses they were carried out on “granulated” marble. The specimens were heated at a high temperature to induce anisotropic thermal expansion, which was sufficient to break the grain boundaries. This resulted in cohesionless but perfectly interlocked mass of angular particle, which is what many rock masses look like. Comparison of the results presented in Figures [62] and [63] shows that the tensile strength of the granulated marble drops dramatically, as does the uniaxial compressive strength.

Note that both of these failure curves are highly non-linear. In order to estimate the cohesion  $c$  and angle of friction  $\phi$  for different normal stress levels we may take tangents to the Mohr envelope, using the program RocData ([www.rocsience.com](http://www.rocsience.com)) (Hoek 1990). The results are tabulated in Table 2 and plotted in Figures [64] and [65]. These Tables can be used to decide at which normal stress level one wishes to work. It is suggested that the Intact Cararra Marble results should be used in the analyses as peak strength and the Granulated results as the residual strength. As shown in the granulated marble tests and, also, as discussed above, there is a residual strength because many of the cracks do not propagate to free surfaces and the failed material does not just fall out.

In the case of rocks, such as granite, the grain boundaries are significantly weaker than the grains themselves and the overall failure process is dominated by grain boundary failure. However, in more ductile rock such as marble, the grains are relatively weak (compared to granites) and the grain boundaries are well cemented. Hence, overall failure may include both grain boundary and intact grain failure.

Modeling of such fractures has been made possible by the increasing power of computer software and the ability to model failure processes at the grain size scale. Lan, Martin and Hu (2010) have used the Itasca program UDEC to model grain boundary failure in granites. These analyses were being carried out in order to study the explosive fracture propagation in brittle rocks which, at a high enough stress level, can lead to rock bursts.

The analysis is complicated further if we consider the effect of the rate of impact on increasing the dynamic strength of the rock while, in general, successive impacts have an opposite effect. Figure [66] shows a sample of the time history of the impact loads  $P(t)$  and  $H(t)$  between drums 1 and 2 of the column of Apollo of the Academy of Athens calculated for the ground motions of the 1999 earthquake recorded at Syntagma (SGMB) magnified to maximum acceleration of 0.19 g (Ambraseys 2010a). These results were obtained using the code 3DEC (Itasca Inc. 1998), which is based on the Discrete Element Method (DEM).

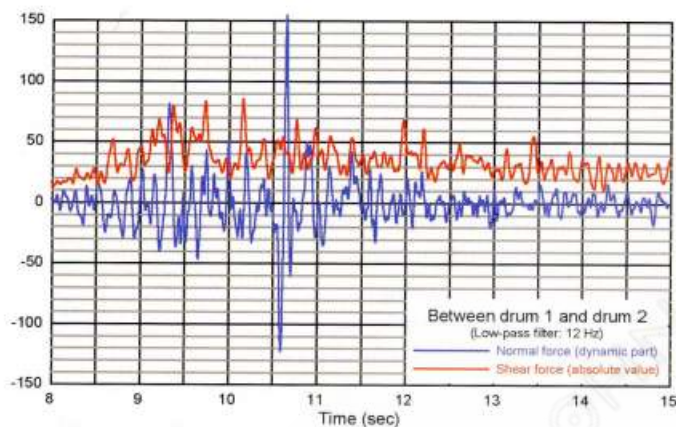


Figure [66]: Time history (zoom between  $t=9$  sec and  $t=14$  sec) of the normal and shear forces at the joint between drums 1 and 2 of the column of Apollo for the Athens (Syntagma B), 1999 earthquake, magnified to  $p_{ga} = 0.19$  g.

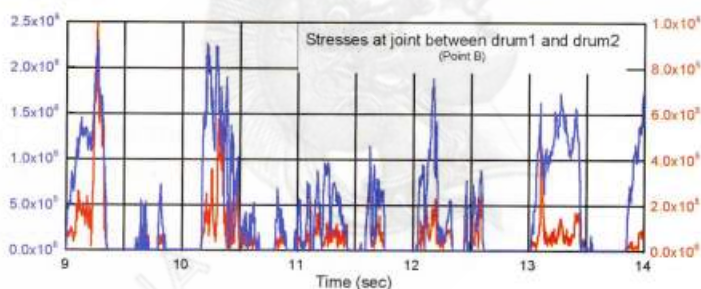


Figure [67]: Time history (zoom between  $t=9$  sec and  $t=14$  sec) of the normal and shear stresses at the right corner of the joint between drums 1 and 2 of the column of Apollo for the Athens (Syntagma B), 1999 earthquake, magnified to  $p_{ga} = 0.19$  g.

We notice that the duration of the application of the maximum loads on the edge of the drums is almost instantaneous with rise and fall off times as short as 0.005 sec which, for certain rocks, but not for marble, is sufficient long to initiate fracture. According to this analysis, the impact loads during rocking in the upper drums are in excess of the static loads by as much as 70% and near the base by 20%. These loads act on surfaces, the size of which may be small enough to cause over-stressing. In Figure [67], the time history of the normal (blue line) and the shear (red line) stresses that are developed at a point on the edge of the joint between the drums 1 and 2 of the column of Apollo during the strong-motion part ( $t = 9$  to  $14$  sec) of the earthquake is presented (Ambraseys 2010a). The maximum stresses exceed the value of 2.0 MPa.

It is evident that for columns of large dimensions and weight, which during a past earthquake might carry additional loads from a superstructure (depending on the condition of the monument at the time of the seismic event), the stresses that could have been developed could be large enough to produce cracking or fracture of the drums which may be extremely complex and may terminate within the rock mass, not visible on the surface of the stone. Additionally, it is possible that impact loading due to rocking may bring about further cracking or even failure of drums that had been cracked already by previous earthquakes. Note that increased stresses are developed in columns made up of drums with anathyrosis, where only a fraction of the stone surfaces has any structural function.

Of course, the cause of cracking or failure is not only a matter of the magnitude of the impact load, but also depends on the strength of the drum. What seems to be the most common cause for first-time cracking of drums is the low quality of the rock. The extent to which the high stresses that are developed during rocking and the related impact loading may bring about the chipping off of the stone and incipient or total failure will depend, among other things, on the strength of the rock, on its homogeneity, jointing, layering, dynamic fracture toughness and on the number of successive cycles of impact (*viz.* Zhang, Kou, Jiang, Lindqvist 2000).

Note that fracture of the stone does not happen instantaneously. It starts with incipient fractures which may leave their traces on the sides of drums in the form or cracks of a pattern that can be quite complicated due to the non-homogeneity of the rock material and the amount of the pre-existing integrity of the drum. Then, depending on the strength mobilised by the drums and on the magnitude of the applied load, the edge of one or of both of the contiguous drums may fail in shear or may be shattered.

The analytical investigation of this phenomenon is very complicated for the above-mentioned reasons, the complex geometry (cylindrical drums in most cases) and the uncertainties in the actual dimensions of the contact area and the inclination of the force at the joint. Preliminary results on the stresses that are developed at a cylindrical drum, when static eccentric vertical and horizontal loads are applied at a part of its top surface, are shown in Figure [68]. Gray area denotes the region in which the maximum tensile stresses are developed. It is evident that, if the stresses are large enough and the strength of the drum's material small enough, a crack can be created at the top surface, close to the border of the area of the load application, which will propagate downwards, on an inclined plane.

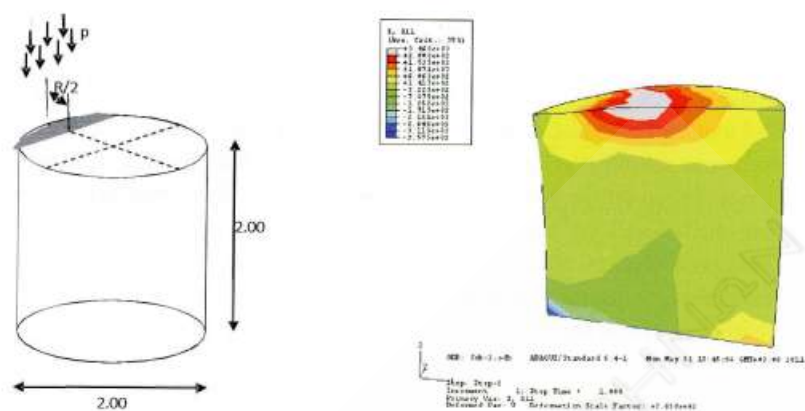


Figure [68]: Horizontal tensile stresses developed at a drum for eccentric application of a static vertical load and a horizontal one equal to  $1/10$  of the vertical. Gray area shows the region of the maximum tensile stresses.

Due to the limited time that the impact loads act (Figure [67]), the crack propagation will probably stop at a certain depth, since unloading will occur before the full phenomenon is completed. It is possible, therefore, that rocking may cause only cracking, bringing the rock close to its residual strength with visible signs of incipient shear failure, but with no part of it falling out, which is consistent with the field observations.

The variation of the coefficient of friction  $\mu$  with the rate of sliding and contact pressure between drums, capital and statue is another important consideration. Its bearing on the results has been touched upon in a previous study (Ambraseys and Psycharis 2011). It must be pointed out, however, that in columns made up of drums with anathyrosis only a fraction of the stone surfaces has any structural function.

Very important is also the choice of the design ground-motion time history which would be appropriate for the assessment of vulnerability; this must be based on a statistical estimate that would be acceptable to those concerned with the preservation of the monument. The ground-motion time history to be used to estimate the worst in a range of years to come and the probability of such an occurrence has a strong bearing on the results, particularly on the uniqueness of the solution, which is a problem yet to be resolved in numerical methods. The response of a multidrum column is also sensitive to the duration of the time history of the imposed ground motion, particularly from close in, multiple shocks.

The seismic design force demands must be based on an acceptable level of risk. Since we want to preserve a historical structure for “eternity”, it might be intuitive that the risk acceptable for it should be smaller than what codes prescribe for normal structures, but that would be tantamount to saying that we cannot have a scientific basis for the preservation of cultural heritage. Even if this were not the



case, the solution would place the onus on the engineer to assess *a priori* design parameters that, even after an earthquake, are difficult enough to estimate.

The selection of the ground motion to be used in any method including the DEM is a recurring problem. In fact, the problem arises among those preoccupied with the preservation of the structure, who dislike risk or losses of any kind, and are reluctant to undertake conservation measures based on risk. Much of this has been discussed in a previous study (Ambraseys and Psycharis 2011).

## CONCLUSION

While there can be no objection to modelling and calculating the seismic stability of columns as well as we can, due to the many uncertainties in the input data whose accuracy for predictive purposes is little known, there is a degree of precision beyond which analytical refinement becomes pointless. Moreover, a numerical model that is too sophisticated carries with it the danger that its weaknesses and assumptions might not be appreciated. Conversely, a model that is too simple may be discredited just because it exposes the underlying assumptions too clearly. A simple model in which the variables include the state of integrity and the material properties of the column is justified and preferable.

The foregoing brings out a number of points that should be taken into consideration when dealing with multidisciplinary problems such as the preservation and conservation of historical monuments. It is apparent that the methods employed for the assessment of the vulnerability of historical structures hitherto have frequently been found lacking. This has often been due to the interdisciplinary nature of this field of study, requiring numerical analysts to tackle problems of preservation of historical monuments and civil engineers to glean information from earth sciences and rock mechanics. This is of no technical consequence, provided that the end-user is aware of it.

In recent years, considerable progress has been made in the solution of interdisciplinary earthquake problems, which has increased awareness of the need for collaboration among archaeologists, geologists, engineers and workers in other disciplines, both for understanding the effects of an earthquake at the site and on account of the information they can provide about the nature of the earthquake implicated.

## ACKNOWLEDGMENTS

This is a part of the information relating to the stability of free standing multi drum which has been collected over the years during UNESCO earthquake reconnaissance field missions and projects regarding the preservation and conservation of historical sites in the Eastern Mediterranean and in the Middle East. The first author acknowledges the invaluable assistance afforded

by the late M. Fournier d'Albe, E. Akurgal, R. Le Maire and A. Skempton, as well as the great help from G. Hallows, E. Hoek, D. Stronach and J. Tchalenko. This is part of the research work carried out by the Engineering Seismology Research Section of the Academy of Athens and the National Technical University of Athens during the period 2010-2011, supported by the Department of Civil Engineering of Imperial College, London.

## REFERENCES

- Akurgal E. (1969) Ancient civilizations and ruins in Turkey. Mobil Oil TAS.
- Altunel E. I. (1998) Evidence for damaging historical earthquakes at Priene, Western Turkey. *Turk. J. Earth Sci.*, vol. 7, pp. 25-35.
- Ambraseys N. (1971) The Gediz earthquake of 1970 and its effects on historical sites. UNESCO Mission Report.
- Ambraseys N., Tchalenko J. (1972) Seismotectonic aspects of the Gediz, Turkey, earthquake of March 1970. *Roy. Astr. Soc. Geophys.*, vol. 30, pp. 229-52.
- Ambraseys N., Lemaire R. M., Marchesini L. (1976) Conservation des monuments de l'Acropole et les mesures de sauvegarde envisagées. UNESCO Rapp. Tech. (i) PP/1975-76/3.411.6 et (ii) Annex /3.412.1, Paris.
- Ambraseys N. (1976) Observations sur les lieux archéologiques effectués par les tremblements de terre. *Rapport Technique* PP/1975-6/iii.411.9, 213 pp. UNESCO, Paris.
- Ambraseys N. (2010a) *Annual Reports of the Engineering Seismology Research Office 2007-2009*. Publication of the Academy of Athens (in Greek, extended summary in English).
- Ambraseys N., Psycharis I. (2011) Earthquake stability of columns and statues. *J. Earthq. Eng.*, vol. 15, n. 5, pp. 685-710.
- Arisoy B., Nuhoglu A., Ercan E. (2011) Seismic response of multi-drum classical columns of Apollo Temple at Claros. *Sci. Research and Essays*, vol. 6, n. 2, pp. 283-292.
- Bailey D. M. (1991) *Excavations at el-Ashmunein IV. Hermopolis Magna: Buildings of the Roman Period* (43 pp.). London: British Museum.
- Clarke E. D. (1812, 1814, 1816) *Travels in various countries of Europe, Asia and Africa: Greece, Egypt and the Holy Land* (London).
- Clarke E. D. (1810-1823) *Travels in Various Countries of Europe, Asia and Africa* (6 vols) (London).
- Dalton R. (1791) *Antiquities and views in Greece and Egypt: With the manners and customs of the inhabitants, from drawings made in the spot* (London).
- Diener C. (1886) *Libanon: Grudlinien der physischen Geographie und Geologie von Mittel-Syrien* (255-262 pp.). Wien: A. Hölder.
- Dodwell E. (1819) *A classical and topographical tour through Greece during the years 1801, 1805 and 1806* (i. 299), London.
- Flandin E. (1851) *Voyage en Perse de Mm. Eugène Flandin, peintre, et Pascal Coste, architecte, attachés à l'ambassade de France en Perse pendant les années 1840 et 1841*. 2 vols, Paris (also Pahlevi Commemoration Repr. Series, 3 vols, Tehran 1976).

- Flaubert, G. (1948) *Voyages*. Texte établi et présenté par R. Dumesnil. Société des Belles-Lettres, Paris.
- Gell, W. (1810) *The itinerary of Greece* (Nemea).
- Georgiannopoulos (1978) PhD thesis, Imperial College.
- Haygarth W. (1814) *Greece: A poem, in three parts with notes and classical illustrations and sketches of the scenery*. London: W. Bulmer.
- Hill B. H. (1996) *The Temple of Zeus at Nemea*. Athens: Am. School Clas. Studies.
- Hoek E. (1990) Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol. 27, pp. 227-229.
- Holland H. (1815) *Travels in the Ionian Isles, Albania, Thessaly, Macedonia & c. during the years 1812 and 1813*. London: Longman.
- Itasca Consulting Group Inc. (1998), *3-Dimensional Distinct Element Code (3DEC): Theory and Background*.
- Klaus (1977) *Archäologischer Anzeiger*, pp. 448-473.
- Korkuti M. (1971) *Archaeological Albania; Shqipëria Arkeologjike*. Univ. Shtet. Tiranes.
- Κορρές Μ., Μπούρας Χ. (1983) Μελέτη αποκαταστάσεως τοῦ Παρθενῶνος Ὑπουργεῖο Πολιτισμοῦ, Ἐπιτροπὴ Συντηρήσεως Μνημείων Ἀκροπόλεως (736 σ.), Ἀθήνα
- Kovari, K. and Tisa. A. (1975) Multiple failure state and strain controlled triaxial tests. *Rock Mechanics*, vol. 7, pp. 17-33.
- Kumar A. (1968) The effect of stress and rate and temperature on strength of basalt and granit. *Geophysics*, vol. 33, pp. 501-510.
- Lan H., Martin C., Hu B. (2010) Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behaviour during compression loading. *J. Int. Geoph. Research*, vol. 115 B01202, 14 pp.
- Makris N., Konstantinidis D. (2003) The rocking spectrum and the limitations of practical design methodologies. *Earthq. Eng. & Struct. Dynamics*, vol. 32, pp. 265-289.
- Martin R. (1965) *Manuel d'architecture grecque: (I) Matériaux et techniques*. Paris: Picard.
- Miller S.G. (1986) Poseidon at Nemea. Φίλια Ἑπη εἰς Γ.Ε. Μυλωνᾶν, vol. 1, Athens.
- Mousavi A. (2002) Persepolis in retrospect: Histories of discovery and archaeological exploration at the ruins of ancient Parseh. *Ars Orientalis*, vol. 32, pp. 209-251.
- Naumann R. (1971) *Archäologischer Anzeiger*, pp. 214-221 (Aizani).
- Ὅρλάνδος Α. Ν. (1960) Τὰ ἑλικὰ δομῆς τῶν ἀρχαίων Ἑλλήνων καὶ οἱ τρόποι ἐφαρμογῆς αὐτῶν. Ἡ ἐν Ἀθήναις Ἀρχαιολογικὴ Ἐταιρεία ἀριθ. 37, τχ. 2.
- Papastamatiou D. J., Psycharis I. N., Carydis P. G., Papantonopoulos C., Mouzakis H., Zambas C., Lemos J. V. (1997) *Monuments under Seismic Action - Experimental and Numerical Investigation*. Pub. NTUA/LEE-97/01 (187 pp.), *Lab. Earthq. Eng.*, Nat. Tech. Univ. (Athens).
- Pars William (1797) In R. Chandler and N. Revett, *Ionian Antiquities* (vol. 2), Paris.
- Psycharis et al: Ψυχάρης Ι., Παπασταματίου Δ., Ἀλεξανδρῆς Α., Παπαντωνόπουλος Κ., Παλάνη Α., Τσόγκα Κ. (1996) Διερεύνηση τῆς Σεισμικῆς Συμπεριφορᾶς Ἀρχαίων Μνημείων. NTUA/LEE-96/02, Ἐργαστήριο Ἀντισεισμικῆς Τεχνολογίας ΕΜΠ.

- Psycharis I. (2007) A probe into the seismic history of Athens, Greece from the current state of a classical monument. *Earthq. Spectra*, vol. 12, pp. 393-415.
- Rheidt, K. (1977) *Archäologischer Anzeiger*, pp. 448-473 (Aizani).
- Rosengren, K. J. and Jaeger, J. C. (1968). The mechanical properties of a low-porosity interlocked aggregate. *Geotechnique*, vol. 18, n. 3, pp. 317-326.
- Schmidt E.F. (1953) *Persepolis*, vol. 1 (Apadana).
- Segal J. G (1971) *Edessa: The Blessed City* (Oxford).
- Stronach D. (1978) *Pasargadae* (Apadana).
- Stuart J. (1789) *The antiquities of Athens* (London).
- Stuart and Revett (1751). In Stuart J. (1789) *The antiquities of Athens* (London).
- Tilia, A. B. (1972) *Studies and restorations at Persepolis and other sites of Fars*. Istituto Italiano per il Medio ed Estremo Oriente, Centro Studi e Scavi Archaeologici in Asia, Centro Restauri, Consiglio Naz. Ricerche, IsMEO, Rome.
- Tölle-Kastenbein R. (1994) *Das Olympieion in Athen*. Cologne: Böhlau Verlag.
- Wharton, A. J. (1995) *Refiguring the Post-Classical City: Duras Europos, Jerash Jerusalem and Ravenna* (Cambridge University Press).
- Zachos K. (2006) In *New directions in Albanian Archaeology* (eds. L. Bejko and R. Hodgees).
- Zhang, Z, Kou, S., Jiang, L., Lindqvist P. (2000) Effects of loading rate on rock fracture: Fracture characteristics and energy partitioning. *Int. J. Rock Mech, & Mining*, vol. 37, pp. 745-762.
- BBA.A.DVN.808: *Başbakanlık Osmanlı Arşivi* (Istanbul).
- PRO FO:32.261.123 (Athens) Public Records Office, Foreign Office, Kew.
-

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 20ΗΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2011

ΥΠΟΔΟΧΗ ΤΟΥ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ κ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΒΑΓΕΝΑ

ΠΡΟΣΦΩΝΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΡΟΕΔΡΟ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ  
κ. ΑΠΟΣΤΟΛΟ ΓΕΩΡΓΙΑΔΗ

Ἡ Ἀκαδημία Ἀθηνῶν ὑποδέχεται σήμερα μεῖ ιδιαίτερη χαρὰ καὶ τιμὴ ὡς Τακτικὸ Μέλος τῆς τὸν κ. Κωνσταντῖνο Βαγενᾶ, Καθηγητὴ στὸ Τμῆμα Χημικῶν Μηχανικῶν τῆς Πολυτεχνικῆς Σχολῆς τοῦ Πανεπιστημίου Πατρῶν, τὸν ὁποῖο ἡ Ὀλομέλεια ἐξέλεξε κατὰ τὸ ἔτος 2010 στὴν ἔδρα τῶν Χημικῶν Ἐπιστημῶν (Ἵπολογιστικὴ, Θεωρητικὴ καὶ Πειραματικὴ Χημεία).

Ὁ νέος Ἀκαδημαϊκός, μετὰ ἀπὸ λαμπρὲς σπουδὲς στὸ Ἐθνικὸ Μετσόβιο Πολυτεχνεῖο καὶ στὸ Rochester τῶν ΗΠΑ, δίδαξε ὡς Ἐπίκουρος Καθηγητῆς στὸ Πανεπιστήμιο Yale καὶ ὡς Ἐπίκουρος καὶ Ἀναπληρωτῆς Καθηγητῆς στὸ Τεχνολογικὸ Ἰνστιτοῦτο τῆς Μασαχουσέτης. Ἀπὸ τὸ 1982 εἶναι Καθηγητῆς Χημικῆς Μηχανικῆς στὸ Πανεπιστήμιο Πατρῶν καὶ Ἐπισκέπτης Καθηγητῆς στὰ Πανεπιστήμια Yale, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Ἑλβετία) καὶ Lyon (Γαλλία).

Ἡ ἔρευνά του ἐστιάζεται στὶς περιοχὲς τῆς Κατάλυσης, τῆς Ἡλεκτροχημείας καὶ τῆς μοντελοποίησης φυσικοχημικῶν φαινομένων. Ἔχει συγγράψει μόνος του ἢ ἀπὸ κοινοῦ με συνεργάτες του περὶ τίς 220 ἐργασίες σὲ ἔγκριτα διεθνῆ περιοδικά, ἐκ τῶν ὁποίων τέσσερις στὰ περιοδικὰ *Science* καὶ *Nature*. Ἔχει τιμηθεῖ με ἀρκετὰ διεθνῆ βραβεῖα, ὅπως τὸ Outstanding Achievement Award τῆς Διεθνοῦς Ἡλεκτροχημικῆς Ἐταιρείας (ECS) γιὰ τὴν ἀνακάλυψη τοῦ φαινομένου τῆς Μὴ Φαρανταϊκῆς Ἡλεκτροχημικῆς Τροποποίησης τῆς Κατάλυσης, τὸ Βραβεῖο Χημείας τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν, τὸ Μετάλλιο Wason γιὰ τὴν ἔρευνά του στὴν περιοχὴ τῆς χημείας τοῦ σκυροδέματος, μαζὶ με τὸν καθηγητὴ Μιχ. Φαρδῆ, καθὼς καὶ τὸ Βραβεῖο Dreyfus Teacher-Scholar Award.

Είναι επιστημονικός εκδότης τῆς γνωστῆς σειρᾶς βιβλίων Ἠλεκτροχημείας Modern Aspects of Electrochemistry και ἔχει συγγράψει δύο βιβλία στους εκδοτικούς οἴκους Springer και Marcel Dekker. Τέλος, ἔχει ἐπιβλέψει 35 διδακτορικές διατριβές, ἐνῶ 12 ἀπὸ τοὺς διδάκτορες αὐτοὺς ἔγιναν καθηγητὲς σὲ ἑλληνικά και ξένα πανεπιστήμια (ΗΠΑ, Κίνα) και ἐρευνητικά κέντρα.

Κύριε συνάδελφε, ἡ Ἀκαδημία Ἀθηνῶν εἶναι εὐτυχῆς ποὺ σᾶς καλωσορίζει και σᾶς ἀπευθύνει τὶς καλύτερες εὐχὲς γιὰ συνέχιση τῆς ἐπιστημονικῆς και ἐρευνητικῆς προσφορᾶς σας, τώρα πλέον και στὸ πλαίσιο τῶν σκοπῶν τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν.

Σᾶς καλῶ νὰ σᾶς περιβάλω μὲ τὸ μεγάλο διάστημα τοῦ Ἰδρύματος.

Και τώρα παρακαλῶ τὸν Ἀκαδημαϊκὸ κ. Ἀθανάσιο Φωκᾶ νὰ ἀνέλθει στὸ βῆμα και νὰ παρουσιάσει τὸ ἔργο τοῦ νέου Ἀκαδημαϊκοῦ.

#### ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ κ. ΑΘΑΝΑΣΙΟ ΦΩΚΑ

Ὁ κ. Κωσταντίνος Βαγενᾶς γεννήθηκε στὴν Ἀθήνα τὸ 1950. Φοίτησε στὸ Β' Γυμνάσιο Ἀθηνῶν, στὸ Γυμνάσιο Γιαννιτσῶν και στὴ Βαρβάκειο Πρότυπο Σχολή. Τὸ 1968 εἰσήλθε πρῶτος στὴ Σχολὴ Χημικῶν Μηχανικῶν τοῦ Ἐθνικοῦ Μετσοβίου Πολυτεχνείου και πέτυχε τὸ δεύτερο μεγαλύτερο βαθμὸ σὲ ὅλες τὶς σχολές τοῦ ΕΜΠ. Διετέλεσε ἀθλητὴς στίβου τοῦ Πανελληνίου μέχρι τὸ 1969 και ἀνεδείχθη Πανελληνιονίκης στὴν κατηγορία Παίδων τὸ 1966.

Παρέμεινε ὑπότροφος τοῦ ΙΚΥ γιὰ ὅλες τὶς σπουδές του στὸ ΕΜΠ και τὸ 1972 πέτυχε τὸ μεγαλύτερο βαθμὸ (9,23) ὄλων τῶν σχολῶν τοῦ ΕΜΠ. Τὸ 1973 ἔφυγε μὲ πλήρη ὑποτροφία γιὰ τὸ Πανεπιστήμιο Rochester τῶν ΗΠΑ ὅπου τελείωσε τὴ διδακτορική του διατριβὴ σὲ τρία χρόνια μὲ τὸν καθηγητὴ Saltsburg. Στὴ διατριβὴ του χρησιμοποιήθηκε γιὰ πρώτη φορὰ ἠλεκτροχημεία γιὰ τὴ μελέτη τοῦ μηχανισμοῦ καταλυτικῶν ἀντιδράσεων. Τὸ 1976 προσεκλήθη ὡς Ἐπίκουρος Καθηγητὴς στὸ Τμῆμα Μηχανικῆς και Ἐφαρμοσμένης Ἐπιστήμης τοῦ Πανεπιστημίου Yale. Τὸν ἐπόμενο χρόνο προσεκλήθη ὡς Ἐπίκουρος Καθηγητὴς στὸ Τμῆμα Χημικῶν Μηχανικῶν τοῦ MIT. Μετὰ ἀπὸ δύο μόλις χρόνια προήχθη σὲ Ἀναπληρωτὴ Καθηγητὴ. Κατὰ τὴν παραμονή του στὸ MIT ἔλαβε δύο φορές τὸ Βραβεῖο Ἐξαιρετικῆς Διδασκαλίας και Ἐρευνας τοῦ Τμήματος Χημικῶν Μηχανικῶν. Στὰ πέντε χρόνια παραμονῆς του στὸ MIT ἐπέβλεψε τέσσερα διδακτορικά και δύο ἀπὸ τοὺς μαθητὲς του ἔγιναν τελικά καθηγητὲς στὸ Πανεπιστήμιο Berkeley και στὸ Ἀριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Τό 1980, με την έκλογή του ως Τακτικού Καθηγητού στην Έδρα Χημικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Πατρών, αρχίζει ή ακαδημαϊκή σταδιοδρομία του στην Ελλάδα. Ήταν τότε ό νεότερος καθηγητής στην Ελλάδα. Πρωτοστάτησε με άλλους συναδέλφους του, που επίσης γύρισαν από την Αμερική την ίδια εποχή, στην καθιέρωση επί σειρά έτων και τουλάχιστον μέχρι τό 2004 του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών ως του δεύτερου στην Εύρώπη τμήματος σε αριθμό δημοσιεύσεων ανά καθηγητή.

Ο κ. Βαγενάς έχει ύπηρετήσει ως Πρόεδρος του Τμήματος Χημικής Μηχανικής δύο φορές, ως Κοσμήτορας τής Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών και ως Αντιπρύτανης του Πανεπιστημίου Πατρών επί δύο συνεχείς θητείες (1997-2003). Έχει επίσης διατελέσει Πρόεδρος και Αντιπρόεδρος του Έθνικού Ίδρύματος Έρευνών.

Τό έρευνητικό έργο του κ. Βαγενά είναι όντως έντυπωσιακό, τόσο σε ό,τι αφορά την ευρύτητά του όσο και τό βάθος του. Μεταξύ τών διαφορετικών έπιστημονικών περιοχών στις όποίες έχει σημαντική συνεισφορά άναφέρω την έρευνά του σχετικά με την μαθηματική μοντελοποίηση όρισμένων φυσικοχημικών φαινομένων, για την όποία του άπονεμήθηκε τό βραβείο τής Αμερικανικής Έταιρείας Σκυροδέματος.

Τό όνομα του κ. Βαγενά θα παραμείνει στην ιστορία τής Χημείας συνδεδεμένο με δύο σημαντικές ανακαλύψεις: Πρώτον, θεμελίωσε έναν νέο και χρήσιμο τομέα στο γενικό χώρο τής Χημείας, τό λεγόμενο τομέα τής Χημικής Συμπαραγωγής, δηλαδή τή χρήση ήλεκτροχημείας για την ταυτόχρονη παραγωγή ήλεκτρικής ενέργειας και χρήσιμων χημικών προϊόντων. Δεύτερον, ή έρευνητική του ομάδα πέτυχε τή σύνθεση τής έτερογενούς κατάλυσης και τής ήλεκτροχημείας, ανακαλύπτοντας ένα έντελώς μη άναμενόμενο φαινόμενο που όνομάζεται Ήλεκτροχημική Τροποποίηση τής Καταλυτικής Ένεργότητας. Τό φαινόμενο αυτό άναφέρεται επίσης ως Μή Φαρανταϊκή Ήλεκτροχημική Τροποποίηση τής Καταλυτικής Ένεργότητας. Αύτή ή δεύτερη όνομασία τονίζει τή σπουδαιότητά του, άφου τουλάχιστον έπιφανειακά φαίνεται ως μη συμβατό με τό Νόμο του Faraday. Για τις άνωτέρω δύο ανακαλύψεις, οι όποίες έχουν δημοσιευθεί σε δύο άρθρα στο περιοδικό *Science* και σε δύο άρθρα στο περιοδικό *Nature*, ό κ. Βαγενάς έχει τιμηθεί με τό Βραβείο Έξαιρετικού Έπιτεύματος τής Ήλεκτροχημικής Έταιρείας. Επίσης, προσφάτως άνακηρύχθηκε ένας από τους δεκατέσσερις μόνο παγκοσμίους έταίρους τής Διεθνούς Ήλεκτροχημικής Έταιρείας.

Η Ακαδημία Αθηνών, κατά την έκλογή νέων μελών, βασίζεται σε δύο κυρίως κριτήρια: Ποιότητα έργου και ήθος. Σήμερα, στις ήμέρες τής

μεγίστης κρίσης αξιῶν, στίς ἡμέρες πού ἡ Ἑλλάδα ἀπὸ ἀπαράμιλλη στήν παγκόσμια ἱστορία δημιουργὸς ἐννοιῶν, ιδεῶν καὶ πολιτισμοῦ κατέληξε παράδειγμα πρὸς ἀποφυγὴν, εἶναι λίαν σημαντικό γιὰ τὴν Ἀκαδημία Ἀθηνῶν νὰ κατορθῶναι νὰ ἐκλέγει μέλη τὰ ὁποῖα μποροῦν νὰ ἀποτελέσουν πρότυπα γιὰ τὴ νέα γενιά. Μέλη πού μὲ τὸ ἔργο τους καὶ τὴν ἐν γένει στάση ζωῆς τους, πρόβαλαν μία ἄλλη πορεία. Τὴν πορεία τῆς ἀξιοκρατίας, τῆς ἀνακάλυψης, τοῦ ἥθους. Μέσα σὲ αὐτὸ τὸ πλαίσιο θεωρῶ ὅτι ἡ Ἀκαδημία Ἀθηνῶν, μὲ τὴν ἐκλογή τοῦ Κωνσταντίνου Βαγενᾶ, ἔπραξε πλήρως τὸ καθῆκον της.





ΕΙΣΙΤΗΡΙΟΣ ΛΟΓΟΣ ΤΟΥ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ κ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΒΑΓΕΝΑ

## ΑΝΑΖΗΤΩΝΤΑΣ ΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΕΙΑΣ

Έπιθυμῶ καταρχὰς νὰ ἐκφράσω τὶς θερμότερες εὐχαριστίες μου στὴν Ἀκαδημία Ἀθηνῶν γιὰ τὴ μεγάλη τιμὴ ποὺ μοῦ ἔκανε ἐκλέγοντάς με ὡς τακτικὸ τῆς μέλος. Εἶμαι εὐγνώμων καὶ ὑπόσχομαι ὅτι θὰ κάνω ὅ,τι μπορῶ γιὰ νὰ ἀνταποκριθῶ στὶς προσδοκίες τῆς. Εὐχαριστῶ ἐπίσης θερμὰ τὸν Πρόεδρο τῆς Ἀκαδημίας κ. Ἀπόστολο Γεωργιάδη ἀλλὰ καὶ τὸν Ἀκαδημαϊκὸ κ. Θανάση Φωκᾶ γιὰ τὴν πολὺ γενναιοδωρὴ εἰσαγωγή του.

Αἰσθάνομαι πῶς ἡ τιμὴ ποὺ μοῦ ἔγινε ἀνήκει πρωτίστως στοὺς συνεργάτες μου, στὴν ἀρχὴ στὴν Ἀμερικὴ καὶ κατόπιν, ἀπὸ τὸ 1981 στὴν Πάτρα, στὸ Τμῆμα Χημικῶν Μηχανικῶν. Μὲ τοὺς συνεργάτες μου ἐργαστήκαμε σκληρὰ γιὰ πολλὰ χρόνια καὶ συχνὰ ὑπὸ ἀντίξοες συνθῆκες. Ὅμως χάρη στὰ ἀνταγωνιστικὰ προγράμματα τῆς ΓΓΕΤ καὶ τῆς Εὐρωπαϊκῆς Ἐνωσης κατορθώσαμε νὰ ἐπιβιώσουμε ὡς μία ἐνεργὴ ἐρευνητικὴ ὁμάδα καὶ ἤμασταν τυχεροὶ νὰ ζήσουμε μαζὶ ἀρκετὲς φορές τὴ χαρὰ τῆς δημιουργίας καὶ δύο ἢ τρεῖς φορές τὴ χαρὰ τῆς ἀνακάλυψης καὶ αὐτὸ εἶναι κάτι ποὺ θὰ προσπαθῆσω νὰ μοιρασθῶ ἀπόψε μαζὶ σας.

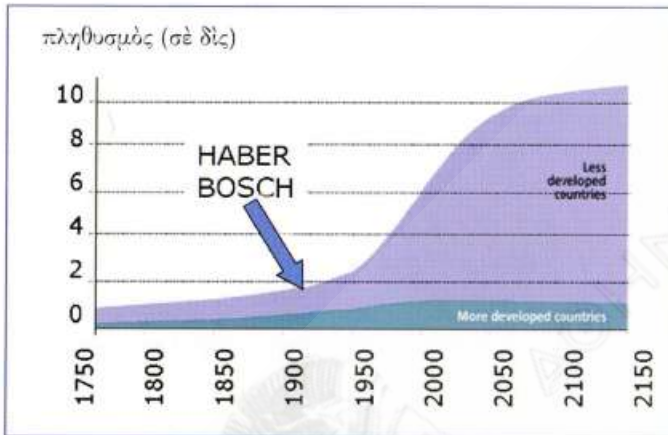
Ὁ τίτλος τῆς παρουσιάσῆς μου εἶναι «Ἀναζητώντας τὴ σύνθεση τῆς Κατάλυσης καὶ τῆς Ἡλεκτροχημείας», καὶ ὅπως εἶναι ἀντιληπτὸ θὰ ἐξετάσουμε πρῶτα τί εἶναι αὐτὲς οἱ δύο περιοχὲς τῆς Χημείας, καὶ εἰδικότερα τῆς Φυσικοχημείας, καὶ πῶς ἔχουν ἐπηρεάσει καὶ ἐπηρεάζουν τὴ ζωὴ μας.

### 1. ΚΑΤΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΕΙΑ

Ξεκινώντας ἀπὸ τὴν κατάλυση, ἔχουμε δύο περιοχὲς ὅπου οἱ καταλυτικὲς διεργασίες ἔχουν παίξει πολὺ σημαντικὸ ρόλο στὴ ζωὴ μας:

(1) Πρῶτον, στὴν παραγωγή χημικῶν προϊόντων. Κλασικὸ παράδειγμα εἶναι ἡ ἀντίδραση σύνθεσης τῆς  $\text{NH}_3$  ἀπὸ  $\text{N}_2$  καὶ  $\text{H}_2$  μὲ καταλύτη Fe ἢ Ru. Οἱ συνθῆκες τῆς ἀντίδρασης εἶναι ἔντονες ( $450^\circ\text{C}$  καὶ 300 atm πίεση), καὶ ὁ σχεδιασμὸς τῶν πρώτων βιομηχανικῶν ἀντιδραστήρων ἐξαιρετικὰ δύσκολος. Γιὰ αὐτὸ οἱ Haber καὶ Bosch τιμῆθηκαν μὲ τὸ Βραβεῖο Nobel τὸ 1920. Ὑπολογίζεται ὅτι χωρὶς τὴ σύνθεση Haber-Bosch, ποὺ ἐπιτρέπει τὴ δέσμευση τοῦ ἀερίου  $\text{N}_2$  καὶ τὴ μετατροπὴ του τελικὰ σὲ

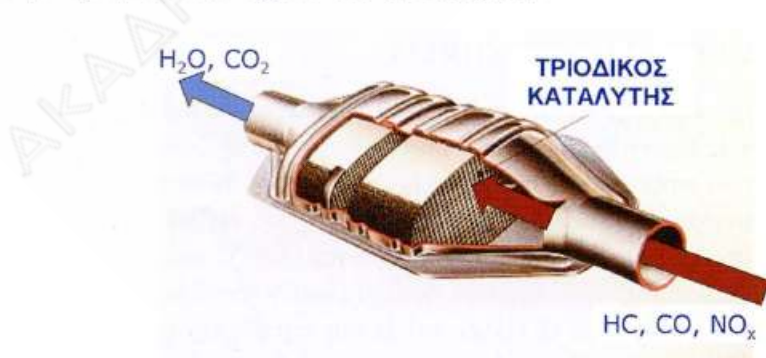
$\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$  και άζωτοϋχα λιπάσματα, ο πληθυσμός της Γης μας θα ήταν σήμερα το 1/6 του σημερινού πληθυσμού.



Σχ. 1. Κατάλυση: Επίδραση της σύνθεσης της αμμωνίας (Μέθοδος Haber-Bosch) στον πληθυσμό της Γης (<http://www.idsia.ch>).

Αυτό φαίνεται και από το Σχήμα 1, που δείχνει την εξέλιξη του πληθυσμού της Γης κατά τους τελευταίους αιώνες. Το έτος 1999 οι αναγνώστες του περιοδικού *Nature* ψήφισαν την αντίδραση σύνθεσης της  $\text{NH}_3$  Haber-Bosch ως το σημαντικότερο επιστημονικό επίτευγμα του 20ού αιώνα, πολύ σημαντικότερο από την εφεύρεση των υπολογιστών και την ανακάλυψη του DNA.

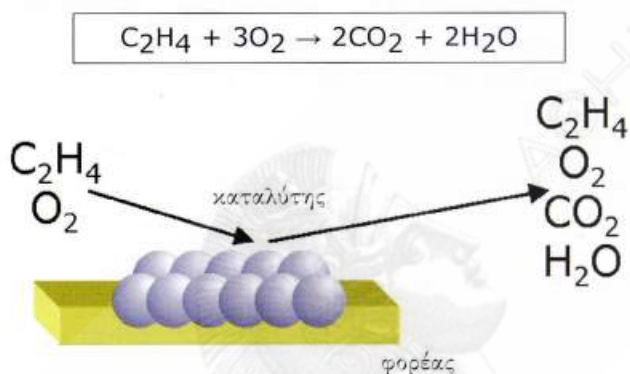
(2) Δεύτερον, στην προστασία του περιβάλλοντος. Στο Σχήμα 2 φαίνεται ένας καταλυτικός μετατροπέας αυτοκινήτου, από αυτούς που υπάρχουν πλέον στην εξάτμιση όλων σχεδόν των αυτοκινήτων.



Σχ. 2. Κατάλυση για την προστασία περιβάλλοντος (<http://www.aalcar.com>).

Ο τριοδικός, όπως λέγεται, καταλύτης, δηλαδή νανοκρύσταλλοι Pt, Rh και Pd στηριζόμενοι σε έναν οξειδικό φορέα, επιτρέπει την καταστροφή των αέριων ρύπων υδρογονανθράκων, CO και NO.

Υπολογίζεται ότι κάθε χρόνο ο καταλυτικός μετατροπέας σώζει περί τις 1.000.000 ζωές και ότι κάθε ερευνητής που ασχολείται με τη βελτίωση του καταλυτικού μετατροπέα, όπως οι συνεργάτες του συναδέλφου κ. Ξ. Βερούκιου στην Πάτρα, σώζει κάθε χρόνο περί τους έκκατο συνανθρώπους του.



Σχ. 3. Μια καταλυτική αντίδραση προστασίας του περιβάλλοντος.

Στό Σχήμα 3 φαίνεται σχηματικά μία καταλυτική αντίδραση προστασίας του περιβάλλοντος, ή οξείδωση του  $\text{C}_2\text{H}_4$  πάνω σε καταλύτη Pt στηριζόμενο σε έναν οξειδικό φορέα. Ένα κοινό χαρακτηριστικό των καταλυτικών αντιδράσεων είναι ότι έχουμε μηδενική μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου, κατ' αντίθεση με την Ήλεκτροχημεία.

Η Ήλεκτροχημεία παίζει και θα παίζει και μελλοντικά σημαντικότατο ρόλο στη ζωή μας σε τρεις κυρίως περιοχές:

(1) Πρώτον, στην παραγωγή χημικών με ηλεκτρόλυση. Πολλά μέταλλα, όπως το Al, το K και το Na μπορούν να παραχθούν μόνον ηλεκτρολυτικά. Η παραγωγή Al ως γνωστόν είναι και μία από τις σημαντικότερες βιομηχανίες της χώρας μας. Είναι σαφές ότι χωρίς Al η ζωή μας θα ήταν πολύ διαφορετική αφού, λόγω χάρη, δεν θα ήταν δυνατή η κατασκευή αεροπλάνων.

(2) Δεύτερη σημαντική περιοχή της Ήλεκτροχημείας είναι οι μπαταρίες, χωρίς τις οποίες η ζωή μας θα ήταν ακόμη πιο δύσκολη, είτε πρόκειται για αυτοκίνητα, διαστημόπλοια ή βηματοδότες.

(3) Τρίτη περιοχή είναι αυτή των κυψελών καυσίμου που είναι μπαταρίες συνεχούς λειτουργίας που καταναλώνουν καύσιμο (π.χ.  $H_2$ ). Σήμερα ή πρακτική τους χρήση περιορίζεται στα διαστημόπλοια, όμως αναμένεται ότι θα παίξουν σημαντικό ρόλο στη μελλοντική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λόγω του ύψηλου συντελεστή απόδοσης που έχουν.

Το ξεκίνημα της Ηλεκτροχημείας έλαβε χώρα γύρω στα 1800. Έμπνεόμενος από την αρχή με την οποία τα ηλεκτρικά χέλια αναπτύσσουν πολύ μεγάλες διαφορές δυναμικού, άνω των 500 V, κατά μήκος του σώματός τους, ο Alessandro Volta δημιούργησε την πρώτη βολταϊκή στήλη που αποτελείται από δίσκους εναλλασσόμενους Cu και Zn με ένα υγρό ύφασμα ανάμεσά τους που δρα ως ηλεκτρολύτης. Είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι στα ηλεκτρικά χέλια, εκτός από τα 500 V τάση, που πηγάζουν από περίπου 5.000 στοιχειώδη κελιά-πλάκες συνδεδεμένα σε σειρά κατά μήκος του σώματος του χελιοῦ, έχουμε και ρεύμα 0.83 A και άρα ισχύ περίπου μισό kW, ικανή να φονεύσει έναν ίππο. Η φύση έχει λοιπόν δημιουργήσει ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό ηλεκτροχημικό όπλο. Ευτυχώς οι ανθρώπινες εφαρμογές της Ηλεκτροχημείας έχουν υπάρξει πάντοτε ειρηνικές.

Alessandro Volta  
(1745-1827)



Luigi Galvani  
(1737-1798)



André-Marie Ampère  
(1775-1836)



Σχ. 4. Volta, Galvani και Ampère.

Έδω (Σχ. 4) βλέπουμε τον Alessandro Volta, που έδωσε το όνομά του στη μονάδα της ηλεκτρικής τάσης (volt, V), καθώς και τον Luigi Galvani που είναι και αυτός ένας από τους θεμελιωτές της Ηλεκτροχημείας. Μαζί τους βλέπουμε και τον Γάλλο φυσικό Ampère, από τον οποίο έλαβε το όνομά της ή μονάδα του ηλεκτρικού ρεύματος, το Ampère.



Basic electrochemical terminology as introduced by Faraday:

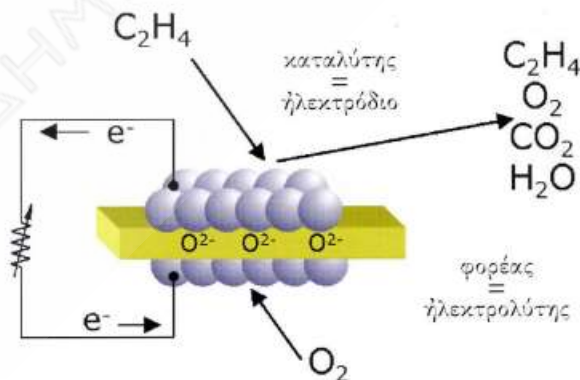
1. Electrode: ἤλεκτρον, and ὁδός, a way.
2. Anode: ἄνω, upwards, and ὁδός, a way.
3. Cathode: κατὰ, downwards, and ὁδός, a way.
4. Electrolyte: ἤλεκτρον, and λύω, solvo.
5. Anion: ἀνίόν, that which goes up.
6. Cation: κατιόν, that which goes down.

[Michael Faraday, Experimental Researches in Electricity, Seventh Series, 11: On Electro-Chemical Decomposition. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 124 (1834), 77-122].

Σχ. 5. Ὁ βασικός θεμελιωτής τῆς Ἡλεκτροχημείας Michael Faraday (1791-1867).

Ὁ σημαντικότερος ὅμως θεμελιωτής τῆς Ἡλεκτροχημείας ἦταν ὁ Michael Faraday (Σχ. 5), ὁ ὁποῖος διατύπωσε καὶ τὸν περίφημο Νόμο τοῦ Faraday πού θὰ συζητηθεῖ κατωτέρω, καὶ ὁ ὁποῖος ἐγνώριζε ἀρκετὰ ἑλληνικά ὥστε νὰ εἰσαγάγει μὲ βάση τὰ Ἑλληνικά τοὺς βασικοὺς ὅρους τῆς Ἡλεκτροχημείας, δηλαδή τὸ ἤλεκτρόδιο, τὴν ἄνοδο (πάντοτε ὀξειδωση), τὴν κάθοδο (πάντοτε ἀναγωγὴ), τὸν ἠλεκτρολύτη, τὸ ἀνίόν (ἀρνητικὰ φορτισμένο ἰόν), τὸ κατιόν (θετικὰ φορτισμένο ἰόν).

Σὲ ἀντίθεση μὲ τὴν κατάλυση, τὸ χαρακτηριστικὸ τῶν ἠλεκτροχημικῶν ἀντιδράσεων εἶναι ἡ μεταφορὰ φορτίου.



Νόμος Faraday:  $m=Q/F$ ,  $\eta$ , σὲ διαφορική μορφή,  $r=dm/dt=I/F$

Σχ. 6. Ἡλεκτροχημικὴ ὀξειδωση αιθυλενίου.

Έχουμε λοιπόν εδώ (Σχ. 6) αντί για φορέα έναν ηλεκτρολύτη, υγρό ή στερεό, που άγει ηλεκτρικό ρεύμα με κίνηση ιόντων, στην προκειμένη περίπτωση ιόντων όξυγόνου.

Στις δύο πλευρές του ηλεκτρολύτη έχουμε τα δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, όπου τώρα ξεχωριστά διαβιβάζουμε τα αντιδρώντα. Στην άνοδο διοχετεύουμε το καύσιμο, εν προκειμένω  $C_2H_4$ , στην κάθοδο διοχετεύουμε αέρα ή  $O_2$  που ανάγεται σε ιόντα  $O^{2-}$  τα οποία μεταναστεύουν μέσω της μεμβράνης στην άνοδο και λαμβάνει χώρα η αντίδραση μεταφοράς φορτίου που φαίνεται στο Σχήμα 6 με παραγωγή  $CO_2$  και  $H_2O$ . Ταυτοχρόνως παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα που εν προκειμένω διοχετεύεται σε μία εξωτερική αντίσταση.

Ο Νόμος του Faraday μας λέγει ότι,

$$m = Q/nF \quad (1)$$

$$r = I/nF \quad (2)$$

όπου  $m$  ή μάζα του παραγόμενου  $CO_2$ ,  $Q$  το φορτίο,  $n$  ο αριθμός των ανταλλάσσόμενων ηλεκτρονίων,  $r$  ο ρυθμός παραγωγής του  $CO_2$ ,  $I$  το ρεύμα και  $F$  ή σταθερά Faraday (96500 C/mol).

Μια πολλά υποσχόμενη εφαρμογή της Ηλεκτροχημείας, απαραίτητη για τη λεγόμενη οικονομία του υδρογόνου, είναι οι κυψέλες καυσίμου που είναι μπαταρίες συνεχούς λειτουργίας με συνεχή κατανάλωση καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (Proton Exchange Membrane, PEM) βασίζονται στην άγωγη πρωτονίων μέσω της πολυμερικής μεμβράνης που είναι ο ηλεκτρολύτης μας και εξετάζονται για τα ηλεκτρικά αυτόκινητα. Λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι  $100^\circ C$ .

Η άνοδος όπου όξειδώνεται το  $H_2$  είναι μία πορώδης δομή άνθρακα με στηριζόμενους νανοκρυσταλλίτες Pt, και παρόμοια είναι και η κάθοδος όπου γίνεται η αναγωγή του  $O_2$ .

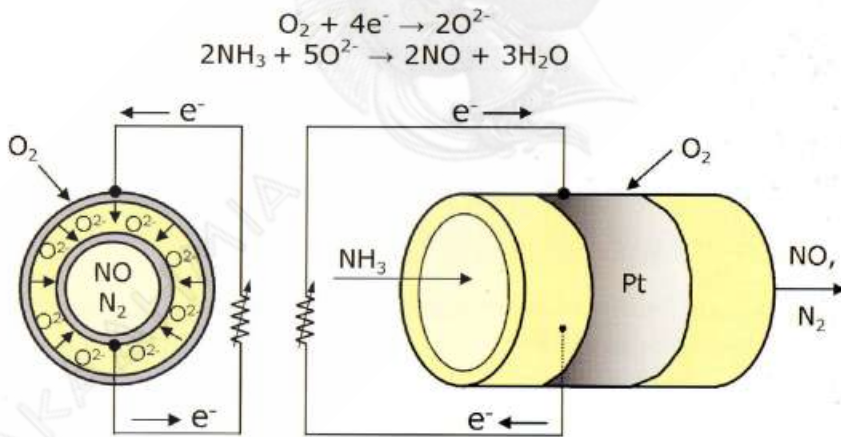
Ένας άλλος σύγχρονος τύπος κυψέλης καυσίμου, υψηλής εν προκειμένω θερμοκρασίας, άνω των  $600^\circ C$ , χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη το λεγόμενο YSZ, που είναι μίγμα όξειδίου του Zr, και του Y και είναι άγωγος ιόντων  $O_2$ . Μάλιστα χρησιμοποιείται και στους αισθητήρες  $O_2$  που υπάρχουν τώρα στις εξατμίσεις όλων των αυτοκινήτων.

## 2. ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

Γενικά στις κυψέλες καυσίμου έχουμε τη συνεχή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη κατανάλωση ενός πολύτιμου καυσίμου, όπως το  $H_2$ ,

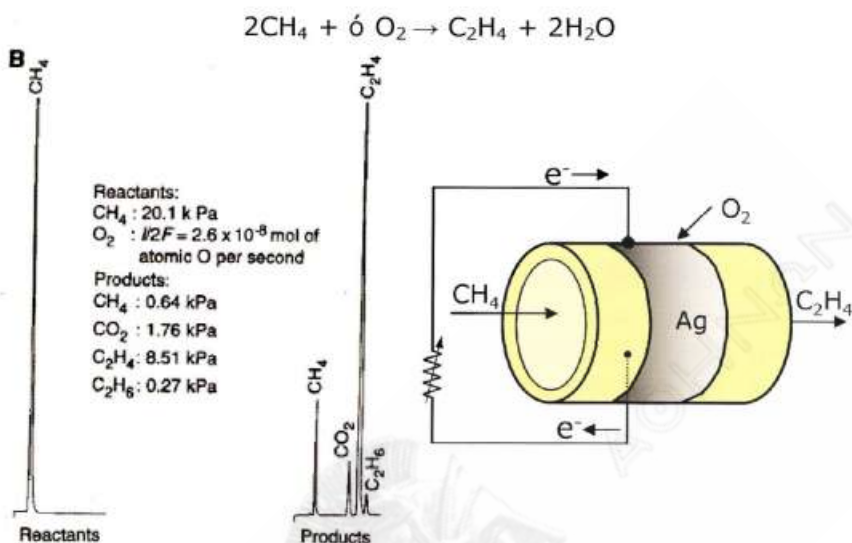
καί παραγωγή μιᾶς λιγότερο πολύτιμης χημικῆς ἔνωσης ὅπως τὸ  $\text{H}_2\text{O}$ . Θὰ ἦταν ἐξαιρετικὸ ἂν μπορούσαμε νὰ ἔχουμε παραγωγή ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας μὲ ταυτόχρονη μετατροπὴ ἑνὸς φθηνότερου ἀντιδρώντος, ὅπως ἡ  $\text{NH}_3$ , σὲ ἓνα ἀκριβότερο προϊόν ὅπως τὸ  $\text{NO}$  καὶ τὸ νιτρικὸ ὄξύ, ὅπως γίνεται στὴ χημικὴ βιομηχανία. Τοῦτο φαίνεται φιλόδοξο εἶναι ὅμως ἐφικτό, δεδομένου ὅτι στὴ χημικὴ βιομηχανία οἱ μισὲς τουλάχιστον ἀντιδράσεις εἶναι ἐξώθερμες, γιὰ τὴν ἀκρίβεια ἐξώεργες, καὶ ἄρα μποροῦν νὰ χρησιμοποιηθοῦν γιὰ τὴν παραγωγή ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας. Τοῦτο μᾶς ἔδωσε τὴν ιδέα μὲ τοὺς συνεργάτες μου τὸ 1980 τῆς λεγόμενης χημικῆς συμπαραγωγῆς, δηλαδὴ τῆς ταυτόχρονης παραγωγῆς ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας καὶ χρήσιμων χημικῶν προϊόντων.

Δύο παραδείγματα χημικῆς συμπαραγωγῆς φαίνονται στὰ σχήματα 7 καὶ 8. Στὴν πρώτη περίπτωση (Σχ. 7) ἀέρια  $\text{NH}_3$  διοχετεύεται στὸν ἐσωτερικὸ σωλήνα  $\text{ZrO}_2$  (YSZ), ποὺ εἶναι ἀγωγὸς ἰόντων  $\text{O}^{2-}$ , στὸ ἐξωτερικὸ τοῦ σωλήνα διοχετεύεται ἀέρας ἢ  $\text{O}_2$ , τὸ ὁποῖο μὲ τὴ μορφὴ ἰόντων κινεῖται πρὸς τὸ ἐσωτερικὸ τοῦ σωλήνα καὶ παράγει  $\text{NO}$  μὲ ταυτόχρονη παραγωγή ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας.



Σχ. 7. Συμπαραγωγή ἠλεκτρικῆς ἐνέργειας καὶ νιτρικοῦ ὄξεος [C. G. Vayenas and R. D. Farr, *Science* 208 (1980) 593].

Μιὰ δευτέρη καὶ σημαντικότερη ἴσως ἐπιτυχία τῆς χημικῆς συμπαραγωγῆς, ποὺ καὶ αὐτὴ δημοσιεύθηκε στὸ περιοδικὸ *Science*, εἶναι ἡ ὀξειδωτικὴ σύζευξη τοῦ  $\text{CH}_4$  πρὸς  $\text{C}_2\text{H}_4$ , ποὺ εἶναι ἰδιαίτερα σημαντικὴ δεδομένου ὅτι τὸ  $\text{CH}_4$  εἶναι τὸ βασικὸ συστατικὸ τοῦ φυσικοῦ ἀερίου ἐνῶ τὸ  $\text{C}_2\text{H}_4$  εἶναι ἡ βάση τῆς πετροχημικῆς βιομηχανίας.



Σχ. 8. Οξειδωτική σύζευξη του μεθανίου [Y. Jiang, I. V. Tsentekakis and C. G. Vayenas, *Science* 264 (1994) 1563].

Έδω (Σχ. 8) βλέπουμε δύο αέρια χρωματογραφήματα που δείχνουν την ανάλυση της τροφοδοσίας (αντιδρώντων) και της εξόδου (δηλαδή των προϊόντων). Παρατηρούμε τη σχεδόν ποσοτική (88%) μετατροπή του  $\text{CH}_4$  προς  $\text{C}_2\text{H}_4$  με ελάχιστα παραπροϊόντα  $\text{C}_2\text{H}_6$  και  $\text{CO}_2$ .

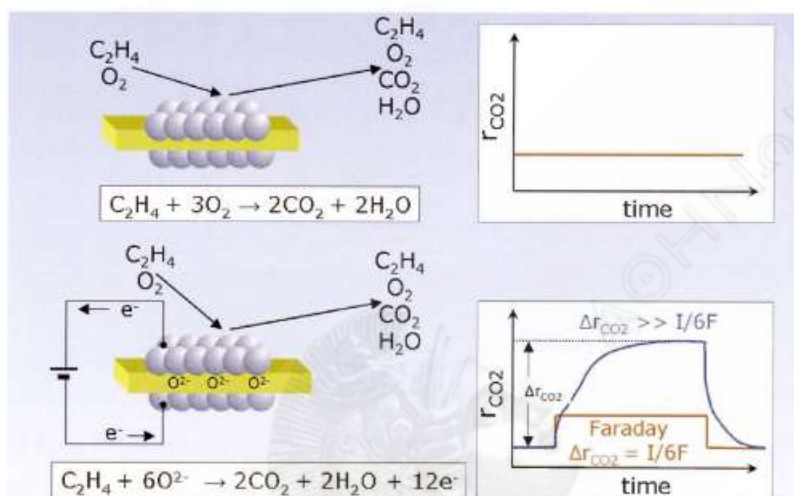
### 3. ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΥΣΗΣ

Εξετάζουμε λοιπόν τώρα το δεύτερο και τελευταίο θέμα μας (Σχ. 9), που είναι η σύνθεση κατάλυσης και Ηλεκτροχημείας. Έναποθέτουμε λοιπόν έναν πορώδη καταλύτη Ag πάνω σε ένα στερεό ηλεκτρολύτη, το γνωστό μας ήδη ISZ, άγωγο ιόντων  $\text{O}^{2-}$ . Και θα εξετάσουμε τώρα πώς η σύνθεση αυτή της κατάλυσης και της Ηλεκτροχημείας οδηγεί στην ανακάλυψη ενός νέου χημικού φαινομένου, γνωστού στη βιβλιογραφία ως «φαινομένου της ηλεκτροχημικής ενίσχυσης της κατάλυσης», ή «φαινομένου NEMCA» ή «EPOC», θα φανεί γιατί.

Θα χρησιμοποιήσουμε τον καταλύτη Ag που μόλις είδαμε για την καταλυτική οξείδωση του  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Έχουμε αποθέσει στην άλλη πλευρά και ένα αδρανές στρώμα Au. Ο ρυθμός παραγωγής  $\text{CO}_2$  από τον καταλύτη παραμένει σταθερός στο χρόνο, εφόσον δεν μεταβάλλουμε τις συνθήκες τροφοδοσίας και θερμοκρασίας. Επιβάλλουμε τώρα μια ηλεκτρική τάση



(διαφορά δυναμικού 1V) ανάμεσα στον καταλύτη μας και το αδρανές βοηθητικό ηλεκτρόδιο. Έπομένως λαμβάνει χώρα παραλλήλως και η ηλεκτροχημική αντίδραση οξείδωσης του  $C_2H_4$ .

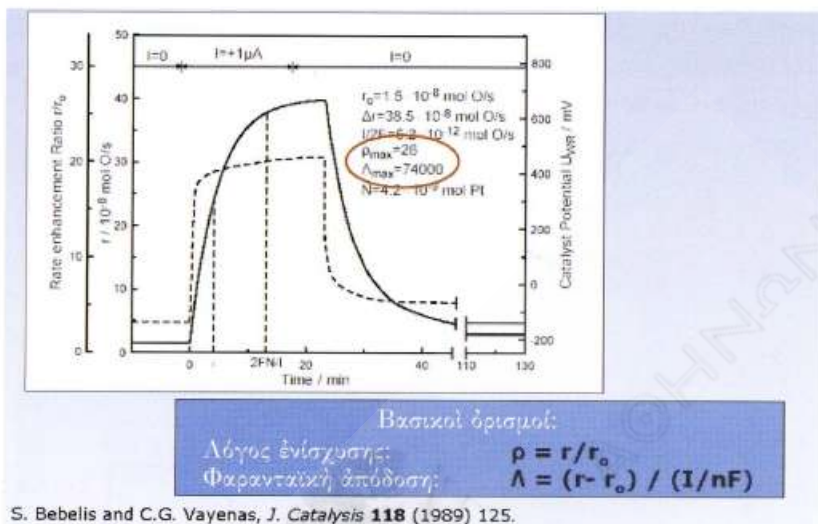


Σχ. 9. Ηλεκτροχημική ενίσχυση της κατάλυσης: Το φαινόμενο NEMCA ή EPOC.

Αναμένουμε λοιπόν ότι ο ρυθμός παραγωγής  $CO_2$  θα είναι το άθροισμα των δύο ρυθμών και ότι η αύξηση του ρυθμού  $\Delta r$  θα είναι ίση με αυτό που προβλέπει ο Νόμος του Faraday, δηλαδή  $I/6F$ , όπου  $F$  είναι η σταθερά του Faraday. Αντιθέτως, αυτό που παρατηρείται είναι μία σημαντικά μεγαλύτερη αύξηση.

Το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό. Με διακοπή του ρεύματος επανέρχουμε στην αρχική κατάσταση. Έχουμε λοιπόν μία φαινόμενη παραβίαση του Νόμου του Faraday. Λόγω της παραβίασης αυτής, που όπως θα φανεί μπορεί να είναι πάρα πολύ μεγάλη, το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και με το ακρωνύμιο NEMCA, δηλαδή «μη φαρανταϊκή ηλεκτροχημική τροποποίηση της καταλυτικής ενεργότητας», ή «EPOC», δηλαδή «ηλεκτροχημική ενίσχυση της κατάλυσης».

Στο διάγραμμα αυτό (Σχ. 10) παρατηρούμε ένα πραγματικό πείραμα από τη διδακτορική διατριβή του τότε φοιτητή μου και νυν συναδέλφου μου κ. Σ. Μπεμπέλη, δηλαδή παρατηρούμε πάλι το ρυθμό κατανάλωσης  $r$  του  $C_2H_4$  (ή του  $O$ ) ως συνάρτηση του χρόνου. Πριν την επίβολή του ρεύματος ο ρυθμός έχει αυτήν την τιμή  $r_0$ . Με την επίβολή του ρεύματος αυξάνεται 26 φορές (2600% αύξηση), και ο λόγος ενίσχυσης  $\rho$ , οριζόμενος από τη σχέση



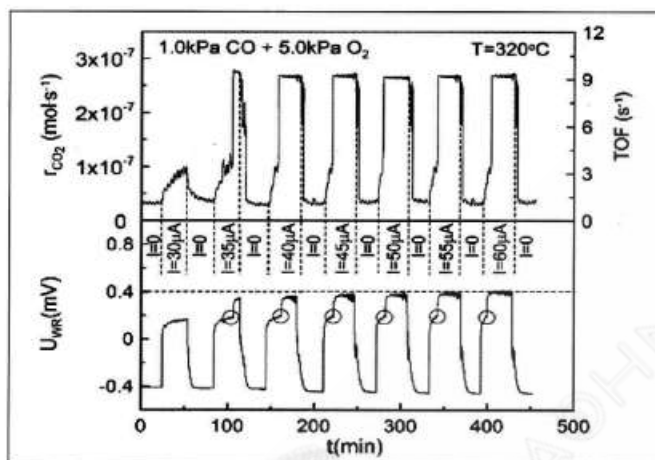
Σχ. 10. Ηλεκτροχημική ενίσχυση τής κατάλυσης: Το φαινόμενο NEMCA ή EPOC.

$\rho = r/r_0$ , δηλαδή ο ηλεκτροενισχυόμενος ρυθμός δια αρχικού ρυθμού παίρνει την τιμή 26. Ταυτοχρόνως ή φαρανταϊκή απόδοση, οριζόμενη όπως πάντα ως το πηλίκο τής αλλαγής του ρυθμού δια του ρυθμού παροχής ιόντων οξυγόνου, παίρνει την τιμή του 74000 ενώ, κατά Faraday, θα έπρεπε να ισούται με 1. Τοῦτο ὑποδηλοῖ ὅτι κάθε ἰόν  $O^{2-}$  ποῦ διοχετεύεται με τήν ἐπιβολή ρεύματος στόν καταλύτη, προκαλεῖ τήν ἀντίδραση 74000 ἐπιπλέον ἀτόμων O με τὸ  $C_2H_4$ . Παρατηρεῖται λοιπὸν ἓνα πολὺ ἐντυπωσιακὸ φαινόμενο.

Ἐνα ἄλλο, πολὺ πιὸ πρόσφατο παράδειγμα, φαίνεται στὸ Σχῆμα 11, ποῦ ἀφορᾷ σὲ μιὰ ἄλλη σημαντικὴ ἀντίδραση περιβαλλοντικοῦ ἐνδιαφέροντος, τήν ὀξειδωση τοῦ CO σὲ Pt στηριζόμενο σὲ YSZ. Παρατηροῦμε ὅτι με ἐπιβολή διαφόρων ρευμάτων μπορούμε νὰ ἐπηρεάζουμε κατὰ βούληση τὸ ρυθμὸ τής καταλυτικῆς ἀντίδρασης με ἀναστρεπτό τρόπο.

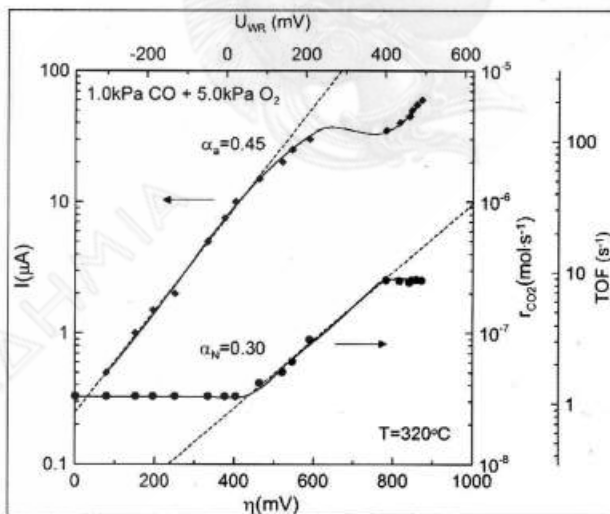
Ἐχουμε λοιπὸν με τήν Ἠλεκτροχημεία πλήρη ἔλεγχο τής καταλυτικῆς δράσεως, δηλαδή τοῦ καταλυτικοῦ ρυθμοῦ ἢ ἰσοδύναμα τοῦ ρυθμοῦ ἀναστροφῆς τοῦ λεγομένου TOF, μόρια δηλαδή CO ποῦ ἀντιδρῶν ἀνά ἐπιφανειακὸ ἄτομο Pt ἀνά s. Στὸ κάτω μέρος τής εἰκόνας παρατηροῦμε τίς ἀντίστοιχες μεταβολές τοῦ δυναμικοῦ.

Ἄν λοιπὸν ἀπεικονίσουμε τὸ ρυθμὸ  $r$  τής καταλυτικῆς δράσεως ὡς συνάρτηση τής τάσης  $U_{WR}$ , ἢ τής ὑπέρτασης  $\eta$ , παρατηροῦμε αὐτὴν τὴ γραμμικὴ σχέση ἀνάμεσα στὸ λογάριθμο τοῦ  $r$  καὶ τής ὑπέρτασης (Σχ. 12).



Σχ. 11. Όξείδωση του CO σε Pt/γSZ [M. N. Tsampas, F. M. Sapountzi, C. G. Vayenas, *Catalysis Today* 146 (2009) 319].

ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΕΙΑ:  $\ln(I/I_0) = \alpha_a F \eta / RT$  (Butler-Volmer)



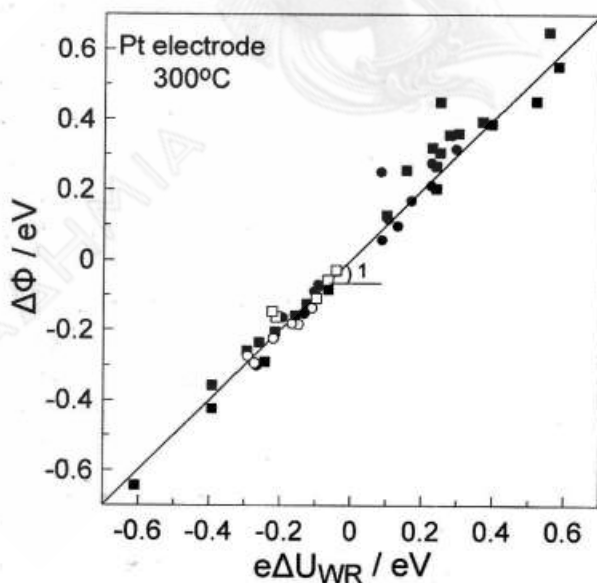
ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ:  $\ln(r/r_0) = \alpha_N F (\eta - \eta^*) / RT$

Σχ. 12. Έξαρτηση του ηλεκτροχημικού ( $I$ ) και του καταλυτικού ρυθμού  $r$ , από το δυναμικό  $U_{WR}$ , ή την υπέρταση  $\eta$  ( $=U_{WR}-U^0_{WR}$ ), όπου  $U^0_{WR}$  το δυναμικό του καταλύτη ( $W$ ) ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς ( $R$ ) σε συνθήκες άνοιχτου κυκλώματος. Παρατηρούμε την ομοιότητα της Ηλεκτροχημείας και της ηλεκτροχημικής ενίσχυσης της κατάλυσης [M. N. Tsampas, F. M. Sapountzi, C. G. Vayenas, *Catalysis Today* 146 (2009) 319].

Ταυτόχρονα, ως γνωστόν από τη βασική θεωρία της Ήλεκτροχημείας, σύμφωνα με την εξίσωση Butler-Volmer υπάρχει επίσης γραμμική σχέση μεταξύ του λογάριθμου του ρεύματος και της υπέρτασης. Παρατηρούμε λοιπόν την ομοιότητα των δύο εξισώσεων, της Ήλεκτροχημείας και της ηλεκτροχημικής ενίσχυσης της κατάλυσης.

Το φαινόμενο της ηλεκτροχημικής ενίσχυσης δεν περιορίζεται στη χρήση στερεών ηλεκτρολυτών αλλά επεκτείνεται και στην περιοχή της υγρής ηλεκτροχημείας με τη χρήση υδατικών διαλυμάτων. Μελετώντας την οξείδωση του  $H_2$  σε ηλεκτρόδιο Pt μέσα σε αλκαλικό διάλυμα με συντροφοδοσία  $H_2$  και  $O_2$ , παρατηρεί κανείς ότι οι επαγόμενες από το ρεύμα μεταβολές στο ρυθμό κατανάλωσης του  $H_2$  και του  $O_2$  είναι πολύ μεγαλύτερες (~600%) από την τιμή που αναμένεται με βάση το Νόμο του Faraday.

Η εργασία αυτή δημοσιεύθηκε στο περιοδικό *Nature* [S. Neophytides, D. Tsiplakides, M. Jaksic, P. Stonehart and C. G. Vayenas, *Nature* 370 (1994) 45]. Νιώθω ιδιαίτερη χαρά ότι δύο από τους συν-συγγραφείς μου, οί κ.κ. Τσιπλακίδης και Νεοφυτίδης είναι σήμερα μαζί μας στο ακροατήριο.



Σχ. 13. Ίσοδυναμία δυναμικοῦ-έργου ἐξόδου [C. G. Vayenas, S. Bebelis and S. Ladas, *Nature* 343 (1990) 625]. Βραβεῖο Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν στὴ Χημεία (1992).

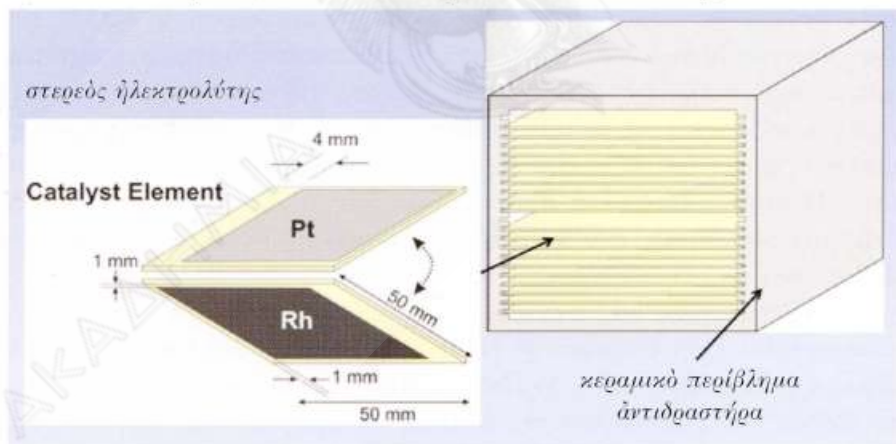
Ένα βασικό βήμα στην κατανόηση του φαινομένου της ηλεκτροχημικής ένιςχυσης υπήρξε η παρατήρηση ότι κατά τη μεταβολή του δυναμικού  $U$  ενός καταλύτη σε έπαφή με έναν ηλεκτρολύτη μεταβάλλεται ταυτόχρονα και τó έργο εξόδου  $\Phi$  του καταλύτη, και μάλιστα με αναλογία 1:1 (Σχ. 13). Τό έργο εξόδου είναι ή ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την εξαγωγή ενός ηλεκτρονίου από ένα μέταλλο (όπως ίσως ένθυμούμεθα από τó φωτοηλεκτρικό φαινόμενο του Einstein). Άρα μεταβάλλοντας τó δυναμικό με έναν ποτενσιοστάτη, μεταβάλλουμε ταυτοχρόνως τó έργο εξόδου του καταλύτη και άρα τις ροφητικές και καταλυτικές του ιδιότητες. Αύξηση του έργου εξόδου σημαίνει άσθενέστερη ρόφηση του όξυγόνου, ελάττωση του έργου εξόδου οδηγεί σε ίσχυροποίηση του δεσμού ρόφησης του όξυγόνου.

Βλέπουμε λοιπόν εδώ τη σύζευξη της Ήλεκτροχημείας ( $U$ ) και της Κατάλυσης ( $\Phi$ ). Μεταβάλλοντας τó δυναμικό ελέγχουμε τó έργο εξόδου του καταλύτη. Και ή έργασία αυτή είχε δημοσιευθεί στο περιοδικό *Nature* και είχε βραβευθεί από την Ακαδημία Αθηνών τó 1992, κάτι για τó όποιο είμαστε έσαι ευγνώμονες. Τίθεται λοιπόν τó έρώτημα με ποιό μηχανισμό μεταβάλλεται τó έργο εξόδου ενός καταλύτη, και για να τó απαντήσουμε χρησιμοποιήσαμε ένα στερεό ηλεκτρολύτη  $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$  που είναι άγωγός ίόντων Na. Πάνω στο στερεό ηλεκτρολύτη έχει συνδεθεί ένας μονοκρύσταλλος Pt. Χρησιμοποιούμε την τεχνική της μικροσκοπίας σήράγγωσης (Scanning Tunneling Microscope, STM), που βασίζεται στην κβαντομηχανική σήράγγωση ηλεκτρονίων από μία ακίδα στο δείγμα μας. Με την τεχνική αυτή παρατηρούμε άπευθείας τά άτομα, για αυτό οί Rohrer και Binnig που ανέπτυξαν την τεχνική στη δεκαετία του '90 τιμήθηκαν με τó Βραβείο Nobel Φυσικής.

Στην περίπτωση μας παρατηρούμε άπευθείας τά άτομα O, που είναι προσροφημένα στην έπιφάνεια Pt (111), και βλέπουμε την εξαγωνική δομή. Σίγουρα ό Λεύκιππος και ό Δημόκριτος θά ήσαν πολύ χαρούμενοι με αυτές τις εικόνες που έπαληθεύουν την άτομική θεωρία της ύλης. Στη συνέχεια, με έπιβολή άρνητικού δυναμικού, ύποχρεώνουμε άτομα Na να μεταναστεύουν από τόν ηλεκτρολύτη στην έπιφάνεια του καταλύτη. Διακρίνονται εύκρινως τά άτομα Na, τά όποια είναι έπικαθισμένα σε όλη την έπιφάνεια του κρυστάλλου και έχουν μεταναστεύσει εκεί από τó στερεό ηλεκτρολύτη. Τό ίδιο παρατηρείται και όταν αντικαταστήσουμε τόν άγωγό ίόντων Na με άγωγό ίόντων O, τη γνωστή μας  $\text{ZrO}_2$ , YSZ.

Έδω, με επιβολή θετικού ρεύματος έχουμε μετανάστευση ιόντων όξυγόνου από τον ηλεκτρολύτη στην επιφάνεια του καταλύτη, όπου τα ιόντα αυτά σχηματίζουν πάλι μια εξαγωνική δομή. Η δομή αυτή, που αντιστοιχεί στα ιόντα όξυγόνου, συνυπάρχει με μια άλλη λεπτότερης ύψης δομή που αντιστοιχεί σε άτομα και όχι ιόντα όξυγόνου. Η συνύπαρξη των δύο δομών φαίνεται και στην ανάλυση Fourier του φάσματος, καθώς και στην κατά Fourier ανακατασκευασμένη εικόνα, όπου η άδρη ύψη αντιστοιχεί σε ιόντα που δρουν ως ενισχυτές της κατάλυσης και η λεπτή ύψη σε άτομα O. Οφείλεται λοιπόν το νέο αυτό φαινόμενο της ηλεκτροχημικής ενίσχυσης της κατάλυσης στην ηλεκτροχημικά επαγόμενη μετανάστευση προωθητικών για την κατάλυση ιόντων στην επιφάνεια του καταλύτη.

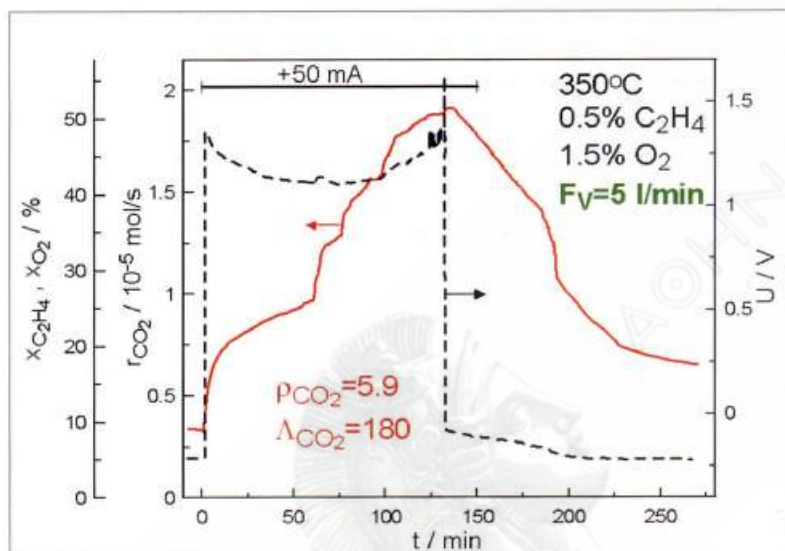
Στην προσπάθεια των τελευταίων ετών για την πρακτική χρησιμοποίηση του φαινομένου της ηλεκτροχημικής ενίσχυσης έχουμε αναπτύξει, σε συνεργασία με το EPFL της Λωζάνης και την Έταιρεία BASF, τον εικονιζόμενο στο Σχήμα 14 αντιδραστήρα, γνωστό τώρα στη βιβλιογραφία ως Μονολιθικό Ήλεκτροχημικά Ενισχυόμενο Αντιδραστήρα (Monolithic Electrochemical Promoted Reactor, MEPR). Σε αυτό πρωτοστάτησαν οι συνεργάτες μου κ.κ. Σ. Μπαλωμένου, Δ. Τσιπλακίδης και Α. Κατσαούνης.



Σχ. 14. Μονολιθικός Ήλεκτροχημικά Ενισχυόμενος Αντιδραστήρας (MEPR) [S. Balomenou, D. Tsiplakides, A. Katsaounis, S. Thiemann-Handler, B. Cramer, G. Foti, Ch. Comninellis and C. G. Vayenas, *Applied Catalysis B* 52 181 (2004)].

Χρησιμοποιούνται λεπτές πλάκες στερεού ηλεκτρολύτη, εν προκειμένω YSZ, που τοποθετούνται σε ειδικά διαμορφωμένο με έσοχες κεραμικό περίβλημα. Καταλυτικά ηλεκτρόδια εναποτίθενται στις δύο πλευρές των πλακών με

τέτοιον τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται ηλεκτρική επαφή με όλα τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιώντας μόνο δύο εξωτερικά σύρματα. Έν προκειμένω έχουμε καταλύτες Pt και Rh.



Σχ. 15. Πρώτες δοκιμές λειτουργίας του αντιδραστήρα MEPR για την οξείδωση  $C_2H_4$  [S. Balomenou, D. Tsiplakides, A. Katsaounis, S. Thiemann-Handler, B. Cramer, G. Foti, Ch. Comninellis and C. G. Vayenas, *Applied Catalysis B* 52, 181 (2004)].

Έδω, στο Σχῆμα 15, βλέπουμε κάποια από τα πρώτα αποτελέσματα στην οξείδωση του  $C_2H_4$ . Παρατηρούμε τη σημαντική αύξηση του ρυθμού — το  $r$  είναι 5.9, έχουμε δηλαδή 490% αύξηση του ρυθμού με το ρεύμα. Η φαρανταϊκή απόδοση είναι 180, δηλαδή 180 φορές μεγαλύτερη από ό,τι θα προέβλεπε ο Νόμος του Faraday.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Οί κυψέλες καυσίμου επιτρέπουν τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρήσιμων χημικών προϊόντων.

2. Η Ήλεκτροχημεία επιτρέπει την ενεργοποίηση της έτερογενούς κατάλυσης (φαινόμενο NEMCA).

3. Ο Νόμος του Faraday ισχύει μακροσκοπικά, εφόσον δὲν λαμβάνουν χώρα καταλυτικές αντιδράσεις στην επιφάνεια τῶν ηλεκτροδίων.

Εὐχαριστῶ θερμὰ τοὺς συνεργάτες μου τὰ τελευταῖα τριάντα χρόνια, ποὺ ἦσαν οἱ J. Michaels, Μ. Στουκίδης, Μ. Manton, P. Debenedetti, Σ. Μπεμπέλης, Σ. Νεοφυτίδης, Ι. Γεντεκάκης, Ε. Παπαδάκης, Ε. Κολυφότης, Δ. Σπαρτινός, Π. Τσιακάρας, Α. Ἰωαννίδης, Χ. Καραβασίλης, Ε. Καρασαλῆ, Α. Καλογιάννης, Μ. Μακρῆ, Jiang Yi, Κ. Πλιάγκος, Μ. Marwood, S. Wodiunig, J. Nicole, Π. Πετρολέκας, Σ. Μπρόσντα, Δ. Τσιπλακίδης, Ι. Μπάφας, Κ. Ράπτης, Θ. Μπάδας, Α. Κατσαούνης, Α. Φραντζῆς, Σ. Μπαλωμένου, Ι. Κωνσταντίνου, Α. Γιαννίκος, Δ. Ἄρχοντα, Κ. Κουτσοδόντης, Α. Hammad, Φ. Σαπουντζῆ, Σ. Σουεντίε, Μ. Τσαμπᾶς, Δ. Πρεσβύτες, Ε. Παπαϊωάννου, Δ. Θελερίτης, Σ. Διβανέ καὶ Μ. Ε. Μακρῆ, καθὼς καὶ τὴν ἐπὶ εἰκοσιῆξι χρόνια γραμματέα τοῦ ἐργαστηρίου μας κ. Χ. Πιλίση. Ἐπίσης, τοὺς συναδέλφους στὸ ἐξωτερικὸ ποὺ συνεργαστήκαμε ἐπὶ σειρὰ ἐτῶν. Ἐπιθυμῶ νὰ κάνω ἰδιαιτέρη μνεῖα στοὺς κ.κ. Χ. Κομνηνέλλη στὸ EPFL καὶ Ξ. Βερούκιου στὴν Πάτρα, ἡ βοήθεια τῶν ὁποίων ὑπῆρξε καθοριστική. Εὐχαριστῶ ἐπίσης θερμὰ τοὺς χρηματοδότες μας, ποὺ περιλαμβάνουν τὴ ΓΓΕΤ, τὴν ΕΕ καὶ τὴν ESA, καθὼς καὶ τὴν Ἀκαδημία Ἀθηνῶν ποὺ μᾶς βράβευσε τὸ 1992. Τέλος, εὐχαριστῶ τοὺς γονεῖς μου, ὅλα τὰ μέλη τῆς οἰκογένειάς μου καὶ τοὺς φίλους, τοὺς φίλους τοὺς πιὸ πρόσφατους ποὺ ἔκαναν τὸν κόπο νὰ ἔλθουν ἀπὸ τὴν Πάτρα ἢ καὶ ἀπὸ πιὸ μακριά, καὶ τοὺς φίλους τοὺς παλιούς τῶν φοιτητικῶν καὶ γυμνασιακῶν μας χρόνων ποὺ μὲ τιμοῦν μὲ τὴν παρουσία τους σήμερα ἐδῶ, καὶ τὸν καθένα ἀπὸ ἐσᾶς ξεχωριστὰ ποὺ μὲ τιμήσατε μὲ τὴν παρουσία καὶ τὴν προσοχὴ σας.



ΕΚΘΕΣΕΙΣ ΠΕΠΡΑΓΜΕΝΩΝ  
ΤΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΕΡΕΥΝΗΣ

ΑΚΑΔΗΜΙΑ

ΑΘΗΝΩΝ





## ΕΚΘΕΣΕΙΣ

### ΚΕΝΤΡΟΝ ΕΡΕΥΝΩΝ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΗΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ

Τὸ ΚΕΑΕΜ κατὰ τὸ ἔτος 2011 συνέχισε τὶς πολλαπλῆς δραστηριότητές του μὲ ἀξιόλογα ἐπιστημονικὰ ἀποτελέσματα ποὺ δημοσιεύθηκαν σὲ περιοδικὰ διεθνοῦς κύρους, διεθνεῖς συνεργασίες, ἀποστολὲς σὲ ἰδρύματα τοῦ ἐξωτερικοῦ καὶ ἐβδομαδιαῖα σεμινάρια μὲ ὁμιλητὲς ἀπὸ τὴν Ἑλλάδα καὶ τὸ ἐξωτερικόν.

Κατὰ τὸ 2011 προήχθησαν στὴν Α' βαθμίδα ὁ κ. Χ. Εὐθυμιόπουλος καὶ στὴ Β' βαθμίδα ὁ κ. Η. Βαγενᾶς.

Ἐπόπτης τοῦ Κέντρου εἶναι ὁ Ἀκαδημαϊκὸς κ. Γεώργιος Κοντόπουλος, ἡ δὲ σύνθεση τοῦ προσωπικοῦ κατὰ τὸ 2011 ἦταν:

- Πάτσης Πάνος: Διευθύνων, Ἐρευνητὴς Α'.
- Εὐθυμιόπουλος Χρῆστος: Ἐρευνητὴς Α'.
- Κοντόπουλος Ἰωάννης: Ἐρευνητὴς Β'.
- Βασιλάκος Σπύρος: Ἐρευνητὴς Β'.
- Γοντικᾶκης Κωνσταντῖνος: Ἐρευνητὴς Β'.
- Βαγενᾶς Ἡλίας: Ἐρευνητὴς Β'.
- Γεωργούλης Μανώλης: Ἐρευνητὴς Γ'.
- Χαρσούλα Μιρέλλα: Ἐπιστημονικὸ Προσωπικόν.
- Carvalho Sofia, Λοῦικες-Γερακόπουλος Γεώργιος, Τζιότζιου Κωνσταντῖνος, Σταυρόπουλος Ἰωάννης, Γσούτσης Πάνος: Μεταδιδακτορικοὶ Ἐρευνητές.
- Δάρα Ἑλένη, Ζαχαριάδης Θεοδόσης, Τριτάκης Βασίλειος: Ἐπιστημονικοὶ Συνεργάτες.
- Ζούλιας Μανώλης: Τεχνικὸς Ὑπεύθυνος.
- Ἀγγελοπούλου Γεωργία: Γραμματέας.
- Δελῆς Νίκος, Κατσανίκας Ματθαῖος, Τσιγαρίδη Λιάνα, Πούρη Ἀθηνᾶ: Ὑποψήφιοι Διδάκτορες.
- Ζαμπέλη Ἀδαμαντία, Συντελῆς Πέτρος, Χατζόπουλος Σωτήρης: Μεταπτυχιακοὶ φοιτητὲς πρὸς ἀπόκτηση Μεταπτυχιακοῦ Διπλώματος Εἰδίκευσης.

Κατά τη διάρκεια του 2011 επισκέφθηκαν το ΚΕΑΕΜ ο Καθηγητής του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης κ. Δ. Παπαδόπουλος (συνεργάτης του κ. Ι. Κοντόπουλου) και η Monica G. Bobra, Μέλος του Solar Dynamic Observatory (SDO), Πανεπιστήμιο Stanford - USA (συνεργάτης του κ. Γεωργούλη). Επίσης, ολιγοήμερες επισκέψεις πραγματοποίησαν οι Καθηγητές A. Valentini, Department of Physics, Clemson University - USA (συνεργάτης του κ. Εύθυμίου), J. Silk, Πανεπιστήμιο της Ώξφόρδης, και N. Mavromatos, King's College - Άγγλία (συνεργάστηκαν με τον κ. Σ. Βασιλάκο), και ο Δρ. G. J. D. Petrie, Έρευνήτης, National Solar Observatory - USA (συνεργάτης του κ. Γοντικιάκη).

Η έρευνα του ΚΕΑΕΜ εστιάσθηκε στα ακόλουθα πέντε επιστημονικά πεδία:

- Θεωρητική και Παρατηρησιακή Γαλαξιακή Δυναμική.
- Μη Γραμμική Δυναμική και Χάος.
- Ήλιακή Φυσική.
- Μαγνητούδροδυναμική.
- Κοσμολογία-Βαρύτητα.

Οι δραστηριότητες του ΚΕΑΕΜ κατά το έτος 2010 ήταν οι εξής:

#### 1. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

1. «Marie Curie International Reintegration Grant». Τετραετές πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Έπιτροπής. Υπεύθυνος: Γ. Κοντόπουλος. Κύριος Έρευνήτης: Ε. Γεωργούλης. Συμμετέχει ο Μεταδιδακτορικός Έρευνήτης Κ. Τζιότζιου. Συνολικός προϋπολογισμός: 100.000 ευρώ για τέσσερα έτη.
2. «Χάος στη Σχετικότητα και την Κοσμολογία». Πρόγραμμα της Έπιτροπής Έρευνών της Ακαδημίας Αθηνών (200/735) (Γ. Κοντόπουλος, Σ. Βασιλάκος, Γ. Λούκας-Γερακόπουλος).
3. «Μη γραμμικά φαινόμενα σε γαλαξιακούς δίσκους». Πρόγραμμα της Έπιτροπής Έρευνών της Ακαδημίας Αθηνών (200/739) (Γ. Κοντόπουλος, Π. Α. Πάτσης, Μ. Χαρσούλα, Μ. Κατσανίκας, Ε. Τσιγαρίδη).
4. «Έκρηκτική δραστηριότητα και θέρμανση των κέντρων δράσης στον Ήλιο». Πρόγραμμα της Έπιτροπής Έρευνών της Ακαδημίας Αθηνών (200/740) (Γ. Κοντόπουλος, Ε. Γεωργούλης, Κ. Γοντικιάκης, Ε. Δάρα, Ι. Κοντόπουλος, Π. Συντελής).

5. «Γαλαξιακή δυναμική». Πρόγραμμα της 'Επιτροπής 'Ερευνών της 'Ακαδημίας 'Αθηνών (200/716) (Γ. Κοντόπουλος, Γ. Λοῦκες-Γερακόπουλος).
6. «Διάχυση έρευνητικῶν ἀποτελεσμάτων». Πρόγραμμα της 'Επιτροπής 'Ερευνών της 'Ακαδημίας 'Αθηνών (200/758) (Γ. Κοντόπουλος, Μ. Κατσανίκας).
7. «Τὸ φαινόμενο τῆς κολλητικότητας τῶν χαοτικῶν τροχιῶν» (Γ. Κοντόπουλος, Μ. Χαρσούλα). Μὴ χρηματοδοτούμενο.
8. «Δυναμικὴ μελέτη μελανῶν ὀπῶν» [Γ. Κοντόπουλος, Γ. Λοῦκες-Γερακόπουλος, Θ. Ἀποστολάτος ('Επίκουρος Καθηγητῆς Πανεπιστημίου 'Αθηνῶν)]. 'Ενισχύθηκε οἰκονομικὰ ἀπὸ τὴν «'Ελληνικὸ Κέντρο 'Ερευνας Μετάλλων Α.Ε.».
9. «'Η δομὴ τοῦ φασικοῦ χώρου σὲ χαμιλτονιανὰ συστήματα 3 βαθμῶν ἐλευθερίας» (Π. Πάτσης, Μ. Κατσανίκας). 'Ενισχύθηκε οἰκονομικὰ ἀπὸ τὴν «'Ελληνικὸ Κέντρο 'Ερευνας Μετάλλων Α.Ε.».
10. «The stellar and gaseous flows in galactic disks» [Π. Πάτσης, P. Grosbol (European Southern Observatory - ESO, Μόναχο), Κ. Καλαποθαράκος, Λ. Τσιγαρίδη]. Τὸ πρόγραμμα αὐτὸ ὑποστηρίχθηκε οἰκονομικὰ ἀπὸ τὸ ESO καὶ ἐν μέρει ἀπὸ τὴν «'Ελληνικὸ Κέντρο 'Ερευνας Μετάλλων Α.Ε.».
11. «Theoretical and observational studies of two pattern speeds in the disks of barred-spiral galaxies» [Π. Πάτσης, D. Kaufmann (SouthWest Research Institute, Boulder - Colorado, ΗΠΑ), P. Grosbol (European Southern Observatory - ESO, Μόναχο)]. Μὴ χρηματοδοτούμενο.
12. «Applications of Nekhoroshev Theory in the solar system and in extrasolar planetary systems» [X. Εὐθυμιόπουλος, C. Lhotka (Μεταδιδακτορικὸς 'Ερευνητῆς Πανεπιστημίου Ρώμης ΙΙ)]. 'Ενισχύθηκε οἰκονομικὰ ἀπὸ τὸ Πανεπιστήμιο Ρώμης ΙΙ.
13. «Μελέτη αὐτοσυνεπῶν βαρυτικῶν συστημάτων N-σωμάτων» (X. Εὐθυμιόπουλος, Κ. Καλαποθαράκος, Π. Τσούτσης, Γ. Λοῦκες-Γερακόπουλος). Μὴ χρηματοδοτούμενο.
14. «Συντονισμοὶ καὶ διάχυση στὸ Δίκτυο Arnold» (X. Εὐθυμιόπουλος, Μ. Χαρσούλα). Μὴ χρηματοδοτούμενο.
15. «Κβαντικὲς ἐξισώσεις κίνησης καὶ χρόνοι ἄφιξης» (Γ. Κοντόπουλος, X. Εὐθυμιόπουλος, Ν. Δελῆς). 'Ενισχύθηκε οἰκονομικὰ ἀπὸ τὴν «'Ελληνικὸ Κέντρο 'Ερευνας Μετάλλων Α.Ε.».
16. «Χαμηλοδιάστατοι τόροι καὶ ἐνεργειακὸς ἐντοπισμὸς σὲ ἄλυσίδες Fermi-Pasta-Ulam» [X. Εὐθυμιόπουλος, Α. Μπούνης (Καθηγητῆς Πανεπι-

- στημίου Πατρών), Ε. Χριστοδουλίδη (Μεταδιδακτορική Έρευνήτρια Πανεπιστημίου Padova)]. Μή χρηματοδοτούμενο.
17. NASA High-End Computing Program «Simulations of 3D Pulsar Magnetospheres» [D. Kazanas (NASA, Άντεπιστέλλον Μέλος τής Ακαδημίας Αθηνών), Ι. Κοντόπουλος, Κ. Καλαποθαράκος (NASA), Δ. Χριστοδούλου (University of Massachusetts), D. Gabuzda (University College Cork - Ίρλανδία), Houshang Ardavan (Cambridge), Νικόλαος Κυλάφης και Ίωάννης Κομίνης (Πανεπιστήμιο Κρήτης), και Δημήτριος Παπαδόπουλος (Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης)]. Μή χρηματοδοτούμενο.
  18. «Particle Acceleration and High Energy Radiation from Pulsar Magnetospheres, 2011-2014». Α. Harding (PI), Ι. Contopoulos (Collaborator): Μελέτη αυτόσυνεπών μαγνητοσφαιρικών μοντέλων pulsars και σύγκριση με παρατηρήσεις ύψηλων ενεργειών [Δημοσθένης Καζάνας και Κωνσταντίνος Καλαποθαράκος (NASA/Goddard)].
  19. «The Poynting-Robertson Cosmic Battery». Ι. Contopoulos [συνεργάτες οί Δημοσθένης Καζάνας (NASA/Goddard), Δ. Χριστοδούλου (University of Massachusetts), D. Gabuzda (University College Cork, Ίρλανδία), Ν. Κυλάφης (Πανεπιστήμιο Κρήτης), και Δ. Παπαδόπουλος (Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης)]. Μή χρηματοδοτούμενο.
  20. «Using starburst galaxies to trace the cosmic acceleration» [Σ. Βασιλάκος, Μ. Πλειώνης (Διευθυντής Έρευνών, Άστεροσκοπείο Αθηνών), R. Terlevich (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica - INOAE, Μεξικό και Πανεπιστήμιο Cambridge)]. Πρόκειται για συνεργασία του ΚΕΑΕΜ με το Έθνικό Άστεροσκοπείο Αθηνών, το Ίνστιτούτο INOAE του Μεξικού και του Πανεπιστημίου Cambridge. Ένισχύεται οικονομικά από το INOAE.
  21. «Μελέτη τής δυναμικής τών spicules στο ύπεριώδες από παρατηρήσεις με το τηλεσκόπιο τών 30 cm του TRACE σε συνδυασμό με άλλα όργανα» [Κ. Γοντικιάκης, Θ. Ζαχαριάδης, Κ. Άλυσσανδράκης (Καθηγητής Πανεπιστημίου Ίωαννίνων)]. Μή χρηματοδοτούμενο.
  22. «Έγλοποίηση του διαστημικού στεμματογράφου ASPIICS», για την παρατήρηση του Ήλιου από τον ευρωπαϊκό δορυφόρο PROBA 3. Συντονιστής τής ελληνικής ομάδας του Προγράμματος είναι ο Καθηγητής του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Κ. Τσίγκανος. Από την πλευρά του ΚΕΑΕΜ συμμετέχουν οί Ε. Γεωργούλης και Κ. Γοντικιάκης. Μή χρηματοδοτούμενο.

23. «Τὸ παράδοξο τῆς ἀπώλειας πληροφορίας στὶς μελανὲς ὀπές» [Η. Βαγενᾶς, D. Singleton (California State University, Fresno - ΗΠΑ)].
24. «Κβαντικὲς διορθώσεις λόγω τῆς γενικευμένης ἀρχῆς τῆς ἀβεβαιότητας ἀπὸ τὴν ἐποχὴ Planck ἕως σήμερα» [Η. Βαγενᾶς, S. Das, A. Farag Ali (Πανεπιστήμιο τοῦ Lethbridge - Canada)].
25. «Solar Dynamics Observatory (SDO) Feature Finder Team (FFT)». Διεθνὲς consortium ἐρευνητῶν ὑποστηριζόμενο ἀπὸ τὴ NASA, μὲ σκοπὸ τὴν αὐτόματη ἐπεξεργασία τῶν δεδομένων τῆς ἀποστολῆς SDO (διάρκεια: 2008-2012). Ἀπὸ τὴν πλευρὰ τοῦ ΚΕΑΕΜ συμμετέχει ὁ κ. Ε. Γεωργούλης.
26. «The fundamental instability of coronal magnetic fields». Πρόγραμμα τοῦ Living With a Star (Guest Investigators) τῆς NASA [Ε. Γεωργούλης, N. E. Raouafi, D. M. Rust, P. Bernasconi (Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory)]. Μὴ χρηματοδοτούμενο.
27. «Space Weather at APL (SpW@APL)». Ἐσωτερικὸ πρόγραμμα τοῦ Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, στὸ ὁποῖο συμμετέχει ὁ Ε. Γεωργούλης σὲ συνεργασία μὲ τοὺς Δρ. Larry Zanetti, Δρ. Simon Wing καὶ Δρ. Nour-Eddine Raouafi. Μὴ χρηματοδοτούμενο.
28. «Working group on inferring magnetohydrodynamic velocities from solar magnetograms». Συμμετοχὴ τοῦ Ε. Γεωργούλη σὲ διεθνή ομάδα ἐργασίας μὲ ἐρευνητὲς ἀπὸ πανεπιστήμια καὶ ἰνστιτούτα τῶν ΗΠΑ, τῆς Ἰαπωνίας καὶ τῆς Κίνας, μὲ σκοπὸ τὸν κατὰ τὸ δυνατόν ἀκριβῆ ὑπολογισμό τοῦ πεδίου ταχυτήτων τοῦ πλάσματος στὴν ἠλιακὴ φωτόσφαιρα. Μὴ χρηματοδοτούμενο.
29. «Working group on comparing vector magnetograms from different instruments». Συμμετοχὴ τοῦ Ε. Γεωργούλη σὲ διεθνή ομάδα ἐργασίας μὲ ἐρευνητὲς ἀπὸ πανεπιστήμια καὶ ἰνστιτούτα τῶν ΗΠΑ μὲ σκοπὸ τὴ σύγκριση καὶ τὴ βελτιστοποίηση τῶν τηλεπισκοπικῶν μετρήσεων τοῦ ἠλιακοῦ μαγνητικοῦ πεδίου. Μὴ χρηματοδοτούμενο.
30. «SREM-Solar Particle Events Scientific Analysis Extension». Πρόγραμμα τῆς ESA πού συντονίζεται ἀπὸ τὸ ΙΔΕΤ τοῦ Ἐθνικοῦ Ἀστεροσκοπεῖου Ἀθηνῶν. Συμμετέχει ὁ Ε. Γεωργούλης ὡς Κύριος Ἐρευνητής. Χρηματοδοτούμενο ἀπὸ τὴν ESA/ESTEC.
31. «Ἐπιπτώσεις τῆς κλιματικῆς ἀλλαγῆς στὸν ἑλληνικὸ καὶ εὐρύτερο χῶρο τῆς Ἀνατολικῆς Μεσογείου». Συντονιστής: Β. Τριτάκης. Χρηματοδότηση ἀπὸ τὸ Μαριολοπούλειο Ἰδρυμα, ἐκτέλεση ἀπὸ τὴν Ἐπιτροπὴ International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP).

32. «Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα ERANET/CIRCLE». Συντονιστής: Β. Τριτάκης (Μαριολοπούλειο Ίδρυμα).

## 2. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Κατά τὸ ἔτος 2010 δημοσιεύθηκαν ἢ ἔγιναν δεκτὲς πρὸς δημοσίευση 49 ἔργασιες, ἐκ τῶν ὁποίων 39 σὲ περιοδικὰ μὲ σύστημα κριτῶν. Συγκεκριμένα οἱ δημοσιεύσεις εἶναι:

### 2.1. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΤΕΣ

1. Contopoulos, G., Lukes-Gerakopoulos, G., Apostolatos, T. A. (2011), Orbits in a Non Kerr Dynamical System. *Int. J. Bif. Ch.* 21, 2261.
2. Contopoulos, G., Efthymiopoulos, C. (2011), Galactic Dynamics. *Scholarpedia* 6 (5), 10670.
3. Apostolatos, T. A., Lukes-Gerakopoulos, G., Contopoulos, G. (2011), Searching for Non-Kerr Objects. *J. Phys. C. S.* 283, 012002.
4. Harsoula, M., Kalapotharakos, C., Contopoulos, G. (2011), Asymptotic Orbits in Barred Spiral Galaxies. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 411, 1111.
5. Katsanikas, M., Patsis, P. A., Contopoulos, G. (2011), The Structure and Evolution of Confined Tori near a Hamiltonian Hopf Bifurcation. *Int. J. Bif. Ch.* 21, 2321.
6. Harsoula, M., Kalapotharakos, C., Contopoulos, G. (2011), Diffusion of Chaotic Orbits in Barred Spiral Galaxies. *Int. J. Bif. Ch.* 21, 2221.
7. Chatzopoulos, S., Patsis, P. A., Boily, C. M. (2011), A Taxonomic algorithm for bar-building orbits. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 416, 479.
8. Katsanikas, M., Patsis, P. A., Pinotsis, A. D. (2011), Chains of Rotational Tori and Filamentary Structures Close to High Multiplicity Periodic Orbits in a 3D Galactic Potential. *Int. J. Bif. Ch.* 21, 2331.
9. Katsanikas, M., Patsis, P. A. (2011), The Structure of Invariant Tori in a 3D Galactic Potential. *Int. J. Bif. Ch.* 21 467.
10. Contopoulos, I., Kalapotharakos, C., Georgoulis, M. K. (2011), Non-linear Force-Free Reconstruction of the Global Solar Magnetic Field: Methodology. *Solar Physics* 269, 351.
11. Plionis, M., Terlevich, R., Basilakos, S., Bresolin, F., Terlevich, E., Melnick, J., Chavez, R. (2011), A strategy to measure the dark energy equation of state using the H II galaxy Hubble function and X-ray



- active galactic nuclei clustering: Preliminary results. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 416, 2981.
12. Jesus, J. F., Oliveira, F. A., Basilakos, S., Lima, J. A. S. (2011), Newtonian perturbations on models with matter creation. *Phys. Rev. D.* 84, 063511.
  13. Grande, J., Solà, J., Basilakos, S., Plionis, M. (2011), Hubble expansion and structure formation in the «running FLRW model» of the cosmic evolution. *J. Cosm. Astropart. Phys.* 08, 007.
  14. Basilakos, S., Plionis, M., Pouri, A. (2011), Generalized evolution of linear bias: A tool to test gravity. *Phys. Rev. D.* 83, 123525.
  15. Basilakos, S., Tsamparlis, M., Paliathanasis (2011), Using the Noether Symmetry Approach to probe the nature of dark energy A. *Phys. Rev. D.* 83, 103512.
  16. Basilakos, S., Plionis, M., Alves, M. E. S., Lima, J. A. S. (2011), Dynamics and constraints of the massive graviton dark matter flat cosmologies. *Phys. Rev. D.* 83, 103506.
  17. Paliathanasis, A., Tsamparlis, M., Basilakos S. (2011), Constraints and analytical solutions of  $f(R)$  theories of gravity using Noether Symmetries. *Phys. Rev. D.* 84, 123514.
  18. Carvalho, C. S. and Tereno, I.(2011), Real space CMB lensing reconstruction with point source masks. *Phys. Rev. D.* 84, 063001.
  19. Sherwin, B. D., et al. (+ Carvalho, C. S.) (2011), Evidence for dark energy from the cosmic microwave background alone using the Atacama Cosmology Telescope Lensing Measurements. *Phys. Rev. Lett.* 107, 021302.
  20. Das, S., et al. (+ Carvalho, C. S.) (2011), Detection of the power spectrum of Cosmic Microwave Background Lensing by the Atacama Cosmology Telescope. *Phys. Rev. Lett.* 107, 021301.
  21. Alberto, P., Das, S., Vagenas, E. C. (2011), Relativistic particle in a three-dimensional box. *Phys. Lett.* A375, 1436.
  22. Majhi, B. R., Vagenas, E. C. (2011), Black hole spectroscopy via adiabatic invariance. *Phys. Lett.* B701 623.
  23. Ali, A. F., Das, S., Vagenas, E. C. (2011), Proposal for testing quantum gravity in the lab. *Phys. Rev. D* 84, 044013.
  24. Chemissany, W., Das, S., Ali, A. F., Vagenas, E. C. (2011), Effect of the generalized uncertainty principle on post-inflation preheating. *J. Cosm. Astropart. Phys.* 1112, 017.
  25. Das, S., Vagenas, E. C. (2011), Quantum aether and an invariant Planck scale. *Europhys. Lett.* 96, 50005.

26. Dimitropoulou, M., Isliker, H., Vlahos, L., Georgoulis, M. K. (2011), Simulating flaring events in complex active regions driven by observed magnetograms. *Astron. Astrophys.* 529, 101.
27. Tun, S. D., Gary, D. E., Georgoulis, M. K. (2011), Three-dimensional structure of a solar active region from spatially and spectrally resolved microwave observations. *Astrophys. J.* 728, 1.

## 2.2. ΑΡΘΡΑ ΥΠΟ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΠΟΥ ΔΙΑΤΙΘΕΝΤΑΙ ΗΔΗ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ

1. Efthymiopoulos C., Contopoulos G., Delis N. (2011), Wavepacket approach to particle diffraction by these targets: Quantum trajectories and arrival times. *Annals of Physics.*
2. Contopoulos, G., Harsoula, M. (2011), Chaotic spiral galaxies. *Cel. Mech. Dyn. Astr.*
3. Georgoulis, M. K. (2011), Comment on resolving the 180° ambiguity in solar vector magnetic field data: Evaluating the effects of noise, spatial resolution, and method assumptions. *Solar Physics.*
4. Georgoulis, M. K. (2011), Are solar active regions with major flares more fractal, multifractal, or turbulent than others? *Solar Physics.*
5. Martens, P. C. H. et al. (+ Georgoulis, M.) (2011), Computer vision for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics.*

## 2.3. ΑΡΘΡΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΓΙΝΕΙ ΔΕΚΤΑ ΠΡΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΤΕΣ (IN PRESS)

1. Delis N., Efthymiopoulos C., Contopoulos G., Quantum vortices and quantum trajectories in particle diffraction. *Int. J. Bif. Chaos* (2011, in press).
2. Patsis P. A., Structures out of chaos in barred-spiral galaxies. *Int. J. Bif. Chaos* (2011, in press).
3. Kalapotharakos, C., Contopoulos, I., Kazanas, D., The extended pulsar magnetosphere. *Astrophys. J.* (2011, in press).
4. Kylafis, N. D., Contopoulos, I., Kazanas, D. and Christodoulou, D. M., Formation and destruction of jets in X-ray binaries. *Astron. Astroph.* (2011, in press).
5. Basilakos, S., Mavromatos, N. E., Mitsou, V. A., Plionis, M., Dynamics and constraints of the Dissipative Liouville Cosmology. *Nucl. Phys.* (2011, in press).

6. Basilakos, S., Bauer, F., Sola, J., Confronting the relaxation mechanism for a large cosmological constant with observations. *J. Cosm. Astropart. Phys.* (2011, in press).
7. Elyiv, A., Clerc, N., Plionis, M., Surdej, J., Pierre, M., Basilakos, S. et al., Angular correlation functions of X-ray point-like sources in the full exposure XMM-LSS field. *Astron. Astrophys.* (2011, in press).

#### 2.4. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

1. Patsis, P. A., Kalapotharakos, C. (2011), Ordered and chaotic spirals in disk galaxies. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement* 18, p. 83.
2. Fukumura, K., Kazanas, D., Behar, E. and Contopoulos, I. (2011), Probing emission and absorption processes in AGNs with MHD accretion-disk winds. *Bulletin of the American Astronomical Society* (American Astronomical Society, AAS Meeting #218), 43, 327.17.
3. Chávez, R., Terlevich, R., Terlevich, E., Bresolin, F., Melnick, J., Plionis, M., Basilakos, S. (2011), Constraining the dark energy equation of state using alternative cosmic tracer. XIII Latin American Regional IAU Meeting, W. J. Henney and S. Torres-Peimbert (eds). *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* (Ser. Conf.) 40, 9.
4. Georgoulis, M. K. (2011), Pre-eruption magnetic configurations in the active-region solar photosphere. In *Physics of Sun and Star Spots, Proc. IAU Symp.* 273, 495.
5. Georgoulis, M. K. (2011), The Solar Dynamics Observatory Feature Finding Team (SDO/FFT): The First Massive Computer Vision Effort. *Hipparchos* 2, Issue 8, 11.
6. Carvalho, C. S. (2011), The cosmic microwave background radiation: The memories of the universe revealed. *Hipparchos* 2, Issue 8, 31.

#### 2.5. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. Γ. Κοντόπουλος (2011), 'Η μελλοντική εξέλιξη του Σύμπαντος. Σειρά Πατερική Βιβλιοθήκη 26, 173 (Περά Σύνοδος τῆς Ἐκκλησίας τῆς Ἑλλάδος).
2. Γ. Κοντόπουλος (2011), Τὸ τελευταῖο βιβλίο τοῦ S. Hawking Τὸ Σύμπαν καὶ ὁ Ἄνθρωπος. Τρίμηνη ἔκδοση τῆς Ἐνώσεως Ἑλλήνων Φυσικῶν, τχ. 41.

3. Γ. Κοντόπουλος, Π. Α. Πάτσης (2011), *Χαοτικοί Γαλαξίες. Πρακτικά της Ακαδημίας Αθηνών* τ. 86<sup>Α</sup>.
4. Γ. Κοντόπουλος, Γ. Λούκας-Γερακόπουλος (2011), *Υπάρχει χάος στις μελανές όπες; Πρακτικά της Ακαδημίας Αθηνών* τ. 86<sup>Α</sup>.

### 3. ΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ

Ο κ. Γεωργούλης διοργάνωσε επιτυχώς το 13ο Συνέδριο Ευρωπαϊκής Ηλιακής Φυσικής (ESPM-13) στη Ρόδο (12-16 Σεπτεμβρίου), το οποίο ενισχύθηκε οικονομικά από την Ακαδημία Αθηνών. Το βιβλίο των περιλήψεων έπιμελήθηκαν οι Κ. Τζιότζιου και Κ. Γοντινάκης (ISBN: 2-914771-70-3, *Europhysics Conference Abstracts*). Επίσης ο κ. Γεωργούλης ήταν μέλος της επιστημονικής οργανωτικής επιτροπής του Συνεδρίου JENAM-2011 (St. Petersburg - Ρωσία, 4-8 Ιουλίου 2011).

Το ΚΕΑΕΜ συμμετείχε διά του κ. Εύθυμιόπουλου στη διοργάνωση του 10ου Συνεδρίου της Ελληνικής Αστρονομικής Εταιρείας στα Ίωαννινα (4-9 Σεπτεμβρίου 2011), το οποίο ενισχύθηκε οικονομικά από την Ακαδημία Αθηνών.

### 4. ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΚΑΙ ΟΜΙΛΙΕΣ<sup>1</sup>

#### Γ. ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ

1. Chaotic spiral galaxies. Προσκεκλημένη ομιλία στο 8th Alexander von Humboldt Symposium on Celestial Mechanics (Bad Hofgastein, Salzburg - Αυστρία, 23.03.2011).
2. Αναζητώντας την αρχή του Σύμπαντος. Ομιλία στο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Χειρουργικής Εταιρείας στο Ι.ΙΒ.Ε.Α.Α. (2011).
3. Χαοτικοί Γαλαξίες. Πρακτικά της Ακαδημίας Αθηνών, τ. 86<sup>Α</sup>, 2011 (με τον κ. Π. Πάτση).
4. Ομιλία στην τιμητική εκδήλωση για τον Κ. Αλεξόπουλο στο Πανεπιστήμιο Αθηνών (31.3.2011).
5. Υπάρχει χάος στις μελανές όπες; Πρακτικά της Ακαδημίας Αθηνών, τ. 86<sup>Α</sup>, 2011 (με τον κ. Γ. Λούκας-Γερακόπουλο).

---

1. Οι ομιλίες των μελών του ΚΕΑΕΜ στα σεμινάρια του Κέντρου αναφέρονται παρακάτω στο σχετικό πίνακα.

6. Γαλαξιακή δυναμική. Όμιλία στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού μαθήματος «Εξωγαλαξιακή Αστρονομία» (Πανεπιστήμιο Αθηνών, 27.1.2011).

## Π. ΠΑΤΣΗΣ

1. Structures out of chaos in barred-spiral systems. Όμιλία στο Συνέδριο *Assembling the puzzle of the Milky Way* (Le Grand Bornand - Γαλλία, 17-22 Απριλίου 2011).
2. Modeling the morphology of disk galaxies by means of orbital theory. Προσκεκλημένη όμιλία στο 10ο Διεθνές Συνέδριο της Έλληνικής Αστρονομικής Έταιρείας (Ιωάννινα, 5-8 Σεπτεμβρίου 2011).
3. Ο ρόλος των υπολογιστών στη σύγχρονη γαλαξιακή έρευνα. Προσκεκλημένη όμιλία στο 10ο Διεθνές Συνέδριο της Έλληνικής Αστρονομικής Έταιρείας, ειδική ημερίδα για εκπαιδευτικούς (Ιωάννινα, 8.9.2011).
4. The flow of material in the spiral arms of disk galaxies. Ordered or chaotic motion? Προσκεκλημένη όμιλία στο European Southern Observatory (ESO) (Garching - Μόναχο, 6.12.2011).
5. Building models of disk galaxies using the orbital theory. Προσκεκλημένη όμιλία στο Πανεπιστήμιο του Μονάχου (7.12.2011).

## X. ΕΥΘΥΜΙΟΠΟΥΛΟΣ

1. Canonical perturbation theory. Chaos and diffusion in Hamiltonian Systems. Προσκεκλημένη σειρά διαλέξεων (10 ώρων) στο 3rd La Plata School on Astronomy and Geophysics (La Plata - Αργεντινή, Ιούλιος 2011).
2. De Broglie-Bohm Approach to electron diffraction and the interpretation of quantum-mechanical arrival time measurements. Προσκεκλημένη όμιλία στο Διεθνές Συνέδριο *CUPI 2011: New Frontiers of Quantum Foundations*, που οργανώθηκε από το Ίνστιτούτο Perimeter (Clemson University - USA, Μάρτιος 2011).
3. Kolmogorov normal form and low-dimensional tori in partly or fully isochronous systems. Προσκεκλημένη όμιλία στο Συνέδριο *8th Alexander von Humboldt Symposium on Celestial Mechanics* (Bad Hofgastein - Αύστρια, March 2011).
4. The speed of Arnold diffusion. Προσκεκλημένη όμιλία στο σεμινάριο του Τμήματος Θεωρητικών και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών (Πανεπιστήμιο Padova, Μάιος 2011).

5. Θεωρία de Broglie-Bohm και ο ρόλος του χάους (ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Απρίλιος 2011).
6. Εισαγωγή στη Θεωρία της Σχετικότητας. Σχολείο προηγμένων έννοιων Φυσικής της Ένωσης Έλλήνων Φυσικών (Ζάκυνθος, Ιούνιος 2011).
7. Γενική Εισαγωγή στα Δυναμικά Συστήματα. Τρίωρη διάλεξη στο μεταπτυχιακό μάθημα «Ειδικά θέματα χάους και πολυπλοκότητας». Διατμηματικό μεταπτυχιακό πρόγραμμα στη μαθηματική προτυποποίηση (ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Οκτώβριος 2011).

#### I. ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ

1. Evidence for a Cosmic Battery. Προσκεκλημένη ομιλία, Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (11.3.2011).
2. Προσεγγίζοντας την πραγματική μαγνητόσφαιρα των pulsars. Προσκεκλημένη ομιλία, Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών (3.11.2011).
3. Ανακατασκευή του μαγνητικού πεδίου του ήλιακού στέμματος. Προσκεκλημένη ομιλία, Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών (25.11.2011).
4. Evidence for a Cosmic Battery. Προσκεκλημένη ομιλία, Institute of Astronomy, Cambridge University (16.2.2011)
5. Evidence for a Cosmic Battery. Προσκεκλημένη ομιλία, NASA/Goddard Space Flight Center - USA (22.3.2011).
6. Evidence for a Cosmic Battery. Προσκεκλημένη ομιλία, Purdue University - USA (23.3.2011).
7. Evidence for a Cosmic Battery. Προσκεκλημένη ομιλία, ITC Center for Astrophysics, Harvard University (25.3.2011).
8. The theory of the pulsar magnetosphere. Προσκεκλημένη ομιλία στο Διεθνές Συνέδριο *Physics of Neutron Stars-2011*, Ίνστιτούτο Ioffe - Άγια Πετρούπολη (11-13 Ιουλίου).
9. Formation and destruction of jets in X-ray binaries. Όμιλία στο Διεθνές Συνέδριο *High Energy Phenomena in Relativistic Outflows III* (Πανεπιστήμιο Βαρκελώνης - Ισπανία, 1 Ιουλίου).
10. Nonlinear force-free reconstruction of the global solar magnetic field. Όμιλία στο 10ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Αστρονομικής Έταιρείας (Πανεπιστήμιο Ίωαννίνων, 7 Σεπτεμβρίου).

11. Towards a realistic pulsar magnetosphere (Poster). *10ο Πανελλήνιο Συνέδριο τής Ελληνικής Αστρονομικής Εταιρείας* (Πανεπιστήμιο Ίωαννίνων, 6-9 Σεπτεμβρίου).
12. Έγώ τὸ ρομπότ: Τεχνητὴ νοημοσύνη καὶ συνειδητότητα. Προσκεκλημένη ὁμιλία στὸ Θερινὸ Σχολεῖο Ἑνώσης Ἑλλήνων Φυσικῶν (Ἐρέτρια, 26.6.2011).
13. Τὰ ὄρια τῶν φυσικῶν νόμων. Προσκεκλημένη ὁμιλία στὸ Σχολεῖο Ἑνώσης Ἑλλήνων Φυσικῶν (Νέα Φιλαδέλφεια, 10.12.2011).
14. Ἡλεκτροδυναμικὴ τῶν pulsars. 2ο Χειμερινὸ Σχολεῖο Ἀστροφυσικῆς (12-16 Δεκεμβρίου).

#### Κ. ΓΟΝΤΙΚΑΚΗΣ

1. Nanoflare heating of coronal loops in an active region triggered by reconnecting current sheets. Ὁμιλία στὸ Συνέδριο τής Ἑλληνικῆς Αστρονομικῆς Εἰταιρείας μαζί μὲ τοὺς S. Patsourakos, C. Efthymiopoulos, A. Anastasiadis, M. Georgoulis (Ἰωάννινα, 7.9.2011).
2. On the shape of active region coronal loops observed by Hinode/EIS (Poster: P. Syntelis, C. Gontikakis, C. Alissandrakis, M. Georgoulis, K. Tsinganos). *European Solar Physics Meeting-13* (Rhodes, 12-16 September).
3. The initiation of a Coronal Mass Ejection as observed by STEREO/EUVI (Poster: P. Syntelis, A. Vourlidas, K. Tsinganos, C. Gontikakis). *European Solar Physics Meeting13* (Rhodes, 12-16 September).
4. Study of a microflare observed with SUMER and TRACE (Poster: C. Gontikakis, A. R. Winebarger). *10ο Διεθνὲς Συνέδριο τής Ἑλληνικῆς Αστρονομικῆς Εἰταιρείας* (Ἰωάννινα, 5-8 Σεπτεμβρίου 2011).
5. *The initiation of a Coronal Mass Ejection as observed by STEREO/EUVI* (Poster: P. Syntelis, A. Vourlidas, K. Tsinganos, C. Gontikakis). *10ο Διεθνὲς Συνέδριο τής Ἑλληνικῆς Αστρονομικῆς Εἰταιρείας* (Ἰωάννινα, 5-8 Σεπτεμβρίου 2011).

#### Σ. ΒΑΣΙΛΑΚΟΣ

1. Testing gravity at cosmological scales. Προσκεκλημένη ὁμιλία στὸ Συνέδριο τής Ἑλληνικῆς Αστρονομικῆς Εἰταιρείας (Ἰωάννινα, 5.9.2011).
2. The physical properties of the cosmic acceleration. Προσκεκλημένη ὁμιλία στὸ Ἐθνικὸ Ἀστεροσκοπεῖο Ἀθηνῶν (29.10.2011).

3. The physical properties of the cosmic acceleration. Προσκεκλημένη όμιλία στο Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών (1.12.2011).
4. The physical properties of the cosmic acceleration. Προσκεκλημένη όμιλία στο Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου τής Βαρκελώνης (14.12.2011).
5. The generalized evolution of linear bias: A tool to test gravity. Προσκεκλημένη όμιλία στο Συνέδριο *Cosmology Workshop Montpellier II* (3.11.2011).

#### Ε. ΓΕΩΡΓΟΥΛΗΣ

1. *On our Ability to Predict Major Solar Eruptions*. Προσκεκλημένη όμιλία στο Συνέδριο *JENAM-2011* (St. Petersburg - Ρωσία, 4-8 Ιουλίου 2011).
2. Flare-Predictive Parameters of Solar Active Regions: Progress and Challenges. Προσκεκλημένη όμιλία στο Συνέδριο *European Space Weather Week (ESWW8)* (Namur - Βέλγιο, 28.11.2011-2.12.2011).
3. *The Role of Electric Currents in the Sustainability of Intense Photospheric Polarity Inversion Lines*. Προσκεκλημένη όμιλία στο Συνέδριο *4th SOLAIRE Network Meeting* (Teistungen - Γερμανία, 9-13 Μαΐου 2011).
4. On the resolution of the azimuthal ambiguity in partially resolved Solar Vector Magnetograms. Προσκεκλημένη όμιλία στο Συνέδριο *13th European Solar Physics Meeting (ESPM-13)* (Ρόδος, 12-16 Σεπτεμβρίου 2011).
5. Διαστημικός καιρός και επιπτώσεις στο γήινο περιβάλλον. Προσκεκλημένη όμιλία στο ΤΕΙ Ιονίων Νήσων (Ζάκυνθος, 20.5.2011).

#### Μ. ΚΑΤΣΑΝΙΚΑΣ

1. The structure of the phase space in a 3D autonomous hamiltonian system of galactic type. Όμιλία στο Συνέδριο *3rd La Plata School on Astronomy and Geophysics* (La Plata - Άργεντινή, Ιούλιος 2011).

Τέλος, οί Ν. Δελής, Γ. Λούκας - Γερακόπουλος και Λ. Τσιγαρίδη παρακολούθησαν τις εργασίες του Διεθνούς Συνεδρίου τής Έλληνικής Αστρονομικής Έταιρείας που διεξήχθη στα Ίωάννινα (Σεπτέμβριος 2011).



## 5. ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ

Τò ΚΕΑΕΜ, άποσκοπώντας στη συνεχή ένημέρωση τόσο τών έρευνητών όσο και τών μεταπτυχιακών φοιτητών σε σύγχρονα θέματα έρευνας, οργανώνει έβδομαδιαία σεμινάρια που χρηματοδοτούνται εν μέρει από την Ακαδημία Αθηνών κατόπιν σχετικής άποφάσεως τής Συγκλήτου. Κατά τò 2011 πραγματοποιήθηκαν στο Κέντρο σεμινάρια αναφερόμενα σε θέματα Άστρονομίας, Άστροφυσικής και Μηχανικής. Στα σεμινάρια συμμετεΐχαν ως όμιλητές, εκτός τών έρευνητών και φοιτητών του Κέντρου, άκαδημαϊκοί, καθηγητές και διακεκριμένοι έπιστήμονες από διάφορα πανεπιστήμια και έρευνητικά κέντρα τής Έλλάδας και του έξωτερικού. Άκολουθεΐ ó πλήρης κατάλογος τών σεμιναρίων που πραγματοποιήθηκαν.

ΗΜ/ΝΙΑ	ΟΜΙΛΗΤΗΣ	ΤΙΤΛΟΣ
20.12.2011	Dr. Constantinos Gontikakis (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	Particles acceleration, nanoflares and coronal heating.
13.12.2011	Dr. Manolis K. Georgoulis (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	Solar Energetic Particle (SEP) events: Their origin and environment, from Sun to the Interplanetary Space.
6.12.2011	Andronikos Paliathanasis (Dept. of Physics, Section of Astrophysics Astronomy and Mechanics, University of Athens)	The Riemannian Kepler Ermakov system.
29.11.2011	Dr. Spyros Basilakos (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	The physical properties of the cosmic acceleration: A new scalar field or a modified theory of gravity?
22.11.2011	Dr. Ioannis Contopoulos (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	Προσεγγίζοντας τήν πραγματική μαγνητόσφαιρα τών pulsars.
15.11.2011	Prof. George Contopoulos (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	The limits of determinism.

HM/NIA	ΟΜΙΑΗΤΗΣ	ΤΙΤΛΟΣ
8.11.2011	Prof. Apostolos Mastichiadis (University of Athens)	The hadronic model of Active Galactic Nuclei.
1.11.2011	Dr. Thanassis Katsiyannis (National Observatory of Athens, Institute of Astronomy and Astrophysics)	Greek participation to the Extreme UV Imager (EUI) development.
25.10.2011	Dr. George Lukes-Gerakopoulos (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	Searching for non-Kerr compact objects.
18.10.2011	Dr. Christos Efthymiopoulos (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	Normal forms and the representation of Arnold diffusion.
27.9.2011	Dr. Gordon Petrie (National Solar Observatory)	Measurements and models of Solar Active Magnetic Fields.
9.9.2011	Prof. Joe Silk (Dept. of Astrophysics, University of Oxford)	Do we understand how galaxies formed?
21.6.2011	Dr. Markos Trichas (Harvard University)	The nature of far-infrared emission from Active Galactic Nuclei.
14.6.2011	Dr. Thanos Manos [Center for Research on Applied Nonlinear Systems (CRANS), University of Patras & School of Applied Sciences, University of Nova Gorica - Slovenia]	Chaos and order in systems with long-range interactions: Applications to a Hamiltonian Mean Field model and a barred galaxy system.
7.6.2011	Prof. George Contopoulos (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	Artificial intelligence and conciousness.
31.5.2011	Prof. Antony Valentini (Clemson University, Dept. of Physics and Astronomy)	Beyond the Quantum.
24.5.2011	Prof. Michael N. Vrahatis (Computational Intelligence Laboratory, Dept. of Mathematics, University of Patras Artificial Intelligence Research Center)	Studying the basin of convergence of methods for computing periodic orbits.

HM/NIA	ΟΜΙΛΗΤΗΣ	ΤΙΤΛΟΣ
17.5.2011	Prof. Tassos Bountis [Dept. of Mathematics and Center for Research and Applications of Nonlinear Systems (CRANS), University of Patras]	Complex statistics of multidimensional hamiltonian systems with applications to Galactic Dynamics.
10.5.2011	Dr. Antonis Georgakakis (National Observatory of Athens)	What drives the evolution of Active Galactic Nuclei?
3.5.2011	Dr. Georgia Tsiropoula (National Observatory of Athens)	Ὁ ρόλος τῶν ἡλιακῶν ψηφίδων στὸ σχηματισμὸ ἄλλω ἰσχύος, μαγνη- τικῆς σκιάς καὶ μαγνητικοῦ θόλου μὲ χρήση παρατηρήσεων τοῦ μαγνητι- κοῦ πεδίου καὶ τῆς γραμμῆς H $\alpha$ .
19.4.2011	Dr. Tassos Fragos (Harvard Smithsonian Center for Astrophysics)	Understanding the formation and evolution of black hole X-ray binaries.
12.4.2011	Dr. Nektarios Vlahakis (University of Athens)	Rarefaction acceleration in magnetized gamma-ray burst jets.
5.4.2011	Dr. Christos Tsagas (University of Thessaloniki)	Large-scale magnetic fields in Cosmology.
29.3.2011	Dr. Nikolaos Tetradis (University of Athens)	Cosmological matter perturbations and the model of the Universe.
22.3.2011	Prof. Kostas Kokkotas (University of Thessaloniki- University of Tuebingen)	High frequency sources of gravitational waves: Recent progress.
15.3.2011	Dr. Kostas Tziotziou (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	The dynamic solar chromosphere: Recent advances from high resolution telescopes.
8.3.2011	Dr. Manolis K. Georgoulis (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	Automated data analysis for the Solar Dynamics Observatory Mission: RCAAM's participation.
1.3.2011	Prof. Elias C. Katsoufis (National Technical University of Athens)	First year of operation of the accelerator LHC and of the related experiments at CERN.

ΗΜ/ΝΙΑ	ΟΜΙΛΗΤΗΣ	ΤΙΤΛΟΣ
22.2.2011	Dr. P. K. Pavlakos (University of Athens)	Ergodic theorems and applications to Classical and Quantum Mechanics.
15.2.2011	Dr. Konstantinos Anagnostopoulos (National Technical University of Athens)	Superstring Theory: A journey to a multidimensional universe with unified interactions.
8.2.2011	Prof. Nikos E. Mavromatos (King's College London / CERN)	Quantum gravity and the dark sector of the Universe.
1.2.2011	Prof. Nick Kylafis (University of Crete)	Are magnetars really magnetars?
25.1.2011	Dr. Despina Hatzidimitriou (University of Athens)	Study of X-ray populations in local group galaxies with XMM-Newton.
18.1.2011	Dr. Constantinos Gontikakis (Research Center for Astronomy and Applied Mathematics of the Academy of Athens)	Study of the radiation scattering in the spectral lines at 1548Å and 1550Å, emitted by the carbon four (C IV) ion, from a solar micro flare.
11.1.2011	Dr. Padelis Papadopoulos (Argelander-Institut für Astronomie, University of Bonn, Germany)	Cosmic rays and interstellar matter: New initial conditions for star formation in galaxies.

## 6. ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ-ΕΠΙΣΚΕΨΕΙΣ ΣΕ ΙΔΡΥΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ

### Π. ΠΑΤΣΗΣ

Ο κ. Πάτσης επισκέφθηκε κατόπιν προσκλήσεως τὸ European Southern Observatory (ESO) καὶ τὸ Πανεπιστήμιο τοῦ Μονάχου (Δεκέμβριος), ὅπου εἶχε συνεργασία μὲ τὸν Δρ. Grosbol καὶ τὸν Καθηγητὴ Burkert σὲ θέματα παρατηρήσεων σπειροειδῶν γαλαξιών στὸ ἐγγυὲς ὑπέρυθρο καὶ δημιουργίας καὶ ἐξέλιξης γαλαξιακῶν δίσκων ἀντίστοιχα.

### Χ. ΕΥΘΥΜΙΟΠΟΥΛΟΣ

Ο κ. Εὐθυμίουπουλος ἐπισκέφθηκε κατόπιν προσκλήσεως τὸ Πανεπιστήμιο τῆς Padova (Μάιος), ὅπου εἶχε συνεργασία μὲ τοὺς Καθηγητὲς G. Benettin καὶ A. Ponno στὸ πρόβλημα τῶν ἀλυσίδων Fermi-Pasta-Ulam.

## I. ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ

Ο κ. Κοντόπουλος επισκέφθηκε κατόπιν προσκλήσεων το Institute of Astronomy (Cambridge University - Άγγλία, Φεβρουάριος), το NASA / Goddard Space Flight Center, το Πανεπιστήμιο του Purdue και το ITC (Center for Astrophysics, Harvard University - USA, Μάρτιος).

## Σ. ΒΑΣΙΛΑΚΟΣ

Ο κ. Βασιλάκος έλαβε εκπαιδευτική άδεια (sabbatical) και επισκέφτηκε κατόπιν προσκλήσεως το Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου της Βαρκελώνης στην Ίσπανία από τον Μάιο έως τον Νοέμβριο του 2011, όπου συνεργάστηκε με την ομάδα του Καθηγητή Sola σε θέματα Κοσμολογίας.

## M. ΓΕΩΡΓΟΥΛΗΣ

Ο κ. Γεωργούλης, κατά τη διάρκεια του έτους, έλαβε μέρος σε τέσσερις συναντήσεις εργασίας της ESA/ESTEC σχετικές με το Πρόγραμμα «SREM: Scientific Analysis Extension».

## 7. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Κατά τη διάρκεια του 2011 χρηματοδοτήθηκαν επίσης οι ακόλουθες επιστημονικές προτάσεις στις οποίες συμμετέχουν μέλη του ΚΕΑΕΜ:

1. Το ΚΕΑΕΜ συμμετέχει στην πρόταση του προγράμματος «Θαλής: Hellenic National Network For Space Weather Research» (Συντονιστής: Καθ. Α. Βλάχος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης), η οποία εγκρίθηκε πρόσφατα (Ε. Γεωργούλης, Κ. Γοντικάκης).
2. Έγκρίθηκε αίτηση της κ. Ε. Τσιγαρίδη για ένισχυση της έρευνας που διεξάγει υπό την επίβλεψη του κ. Πάτση με θέμα «Μοντέλα απόκρισης σπειροειδών γαλαξιών» από το Ίδρυμα Λεβέντη (3.000 ευρώ).

## 8. ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΡΙΒΕΣ

Στο ΚΕΑΕΜ εργάζονται εκπονώντας τις διατριβές τους υποψήφιοι διδάκτορες και μεταπτυχιακοί φοιτητές για την απόκτηση διπλωμάτων. Επίσης οι έρευνες του ΚΕΑΕΜ συμμετέχουν σε εξεταστικές επιτροπές.

Συνεχίζουν να εκπονούνται υπό την επίβλεψη μελών του ΚΕΑΕΜ οι διδακτορικές διατριβές των:

1. Μ. Κατσάνικα, «Η δομή του φασιικού χώρου σε χαμιλτονιανά συστήματα τριών βαθμών ελευθερίας» (Επιβλέπων: Π. Πάτσης).
2. Ε. Τσιγαρίδη, «Μη γραμμικά φαινόμενα σε μοντέλα απόκρισης δυσκοειδών γαλαξιών» (Επιβλέπων: Π. Πάτσης).
3. Ν. Δελή, «Μελέτη στοχαστικών τροχιών σε μη γραμμικά δυναμικά συστήματα» (Επιβλέπων: Χ. Εύθυμιόπουλος).
4. Α. Πούρη, «Η μελέτη της φύσης της σκοτεινής ενέργειας χρησιμοποιώντας έξωγαλαξιακές πηγές υψηλών ενεργειών» (Επιβλέπων: Σ. Βασιλάκος).

Ο κ. Η. Βαγενάς συμμετέχει στη συμβουλευτική επιτροπή του υποψήφιου διδάκτορα κ. Μιλτιάδη Στάμου στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, και ο κ. Σ. Βασιλάκος στη συμβουλευτική επιτροπή του υποψήφιου διδάκτορα κ. Κωνσταντίνου Παρούση-Ορθόδοξου, επίσης στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου.

Υπό την επίβλεψη μελών του ΚΕΑΕΜ, η Α. Ζαμπέλη ολοκλήρωσε με επιτυχία τη διατριβή της για απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στο Έθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με θέμα «Ακτινοβολία Hawking με τη μέθοδο των βαρυτικών ανωμαλιών» (Επιβλέπων: Η. Βαγενάς).

Ο κ. Σ. Βασιλάκος συμμετέχει στη συμβουλευτική επιτροπή του κ. Αλέξανδρου Παπαγεωργίου για την εκπόνηση μεταπτυχιακής διατριβής στο Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Επίσης ο κ. Γεωργούλης συμμετέχει στη συμβουλευτική επιτροπή της διπλωματικής εργασίας του Α. Σουλικιά στο Πανεπιστήμιο Πειραιά με θέμα «Τρισδιάστατη αναπαράσταση μαγνητικών πεδίων σε σφαιρικές συντεταγμένες».

## 9. ΔΙΔΑΚΤΙΚΟ ΕΡΓΟ

Οι έρευνήτες του ΚΕΑΕΜ έδωσαν σειρά μαθημάτων σε μεταπτυχιακά πανεπιστημιακά τμήματα, σε σεμινάρια για φοιτητές και έρευνήτες και σε σχολεία που διοργάνωσαν επιστημονικές ενώσεις.

Η διδασκαλία του μεταπτυχιακού μαθήματος «Μη Γραμμική Δυναμική» του Τομέα Αστρονομίας, Αστροφυσικής και Μηχανικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, κατά το 2011, έγινε από τον Διευθύνοντα του ΚΕΑΕΜ κ. Π. Πάτση.

Ο κ. Εύθυμιόπουλος δίδαξε στο μεταπτυχιακό μάθημα «Ειδικά θέματα χάους και πολυπλοκότητας» που διεξάγεται στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος (Οκτώβριος). Επίσης δίδαξε στο Σχολείο Προηγμένων Έννοιών Φυσικής της Ένωσης Ελλήνων Φυσικών στη Ζάκυνθο (Ιούνιος).

Ο κ. Ι. Κοντόπουλος δίδαξε το μάθημα «Ηλεκτροδυναμική των pulsars» στο 2ο Χειμερινό Σχολείο Αστροφυσικής, το οποίο έλαβε χώρα στη Θεσσαλονίκη (Δεκέμβριος). Επίσης δίδαξε στο Θερινό Σχολείο της Ένωσης Ελλήνων Φυσικών στην Ήρετρια (Ιούνιος) και στο σχολείο της ίδιας ένωσης στη Ν. Φιλαδέλφεια (Δεκέμβριος).

#### 10. ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΗΣ ΕΚΛΑΪΚΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ

Οι έρευνητές του ΚΕΑΕΜ έδωσαν κατόπιν προσκλήσεων πολλές εκλαϊκευτικές όμιλίες σε σχολεία μέσης εκπαίδευσης και σε εκδηλώσεις για το πλατύ κοινό.

- Π. Πάτσης: Μία όμιλία, Γυμνάσιο-Λύκειο Δεύτερης Εύκαιρίας, Καλλιθέα.
- Χ. Εύθυμιόπουλος: Μία όμιλία, Ίδρυμα Θεοχαράκη.
- Ι. Κοντόπουλος: Έξι όμιλίες, Σχολείο Ι. Ν. Κοιμήσεως Θεοτόκου (Άλιμος), Γενικό Λύκειο Μελισσίων, Ι. Μονή Αγίων Πάντων Σπετσών, Ίδρυμα Θεοχαράκη, Έταιρεία Φίλων Λαού και 12ο Δημοτικό Γλυφάδας.
- Κ. Γοντικάκης: Μία όμιλία, Ίδρυμα Θεοχαράκη.
- Η. Βαγενάς: Διοργάνωση ομιλιών, όμιλία στο Γενικό Λύκειο Μελισσίων και μία όμιλία στο Δήμο Καλαμάτας.
- Ε. Γεωργούλης: Δύο όμιλίες, 2ο Λύκειο Μελισσίων και Ίδρυμα Θεοχαράκη.
- Μ. Χαρσούλα: Μία όμιλία, Ίδρυμα Θεοχαράκη.

#### 11. ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΕ ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΕΠΙΤΡΟΠΕΣ

Οι έρευνητές και οι επιστημονικοί συνεργάτες του ΚΕΑΕΜ συμμετέχουν σε εθνικές και ευρωπαϊκές επιτροπές. Όλοι είναι μέλη της Ελληνικής Αστρονομικής Έταιρείας (Hel.A.S.) και της Διεθνούς Αστρονομικής Ένωσης (IAU). Επιπλέον συμμετέχουν στις εξής Επιτροπές:

- Ελληνική Αστρονομική Έταιρεία: Χ. Εύθυμιόπουλος, Μέλος του Δ.Σ.
- Ένωση Ελλήνων Φυσικών: Χ. Εύθυμιόπουλος, Μέλος του Δ.Σ.
- Διαχειριστική Επιτροπή (Management Committee) της Ευρωπαϊκής Δράσης COST MPNS MP1006: Fundamental Problems in Quantum Physics (2011-): Χ. Εύθυμιόπουλος, Έθνικός Εκπρόσωπος.

- International Coordinating Committee του Διεθνούς Συνεδρίου *12th Marcel Grossmann Meeting*: Η. Βαγενᾶς.
- Ἑλληνική Ἐταιρεία Σχετικότητας, Βαρύτητας καὶ Κοσμολογίας: Η. Βαγενᾶς, Γραμματέας.
- Ἐπιτροπή Ἐπιστημονικοῦ Προγραμματισμοῦ (SPC) τοῦ European Space Agency (ESA): Ε. Γεωργούλης, Ἐθνικός Ἐκπρόσωπος.
- European Solar Physics Division (2011-2014): Ε. Γεωργούλης, Ἀντιπρόεδρος.
- Ἐθνική Ἀστρονομική Ἐπιτροπή (2011-2013): Ε. Γεωργούλης.
- Ἐπιτροπή HLWG (High Level Working Group) GEO: Β. Τριτάκης.
- Ἐπιτροπή Μελέτης τῆς Παγκόσμιας Μεταβολῆς (IGBP): Β. Τριτάκης.

Ὁ κ. Τριτάκης ἔλαβε μέρος ὡς ἐκπρόσωπος τῆς Ἑλλάδας στὸ 8th *Plenary GEO Meeting*, πὺ διεξήχθη στὴ Κωνσταντινούπολη στὶς 16 καὶ 17 Νοεμβρίου 2011.

Τέλος, ὄλοι οἱ ἐρευνητὲς τοῦ ΚΕΑΕΜ εἶναι κριτὲς σὲ διεθνή ἐπιστημονικά περιοδικὰ κύρους, ἐνῶ μερικοὶ εἶναι ἀξιολογητὲς διεθνῶν ἐπιστημονικῶν προτάσεων καὶ συμμετέχουν στὰ ἐκδοτικά συμβούλια διεθνῶν περιοδικῶν. Ὁ κ. Χ. Εὐθυμιόπουλος εἶναι Associate Editor τοῦ περιοδικοῦ *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* (Springer) καὶ ὁ κ. Η. Βαγενᾶς εἶναι Editor τοῦ περιοδικοῦ *Central European Journal of Physics* (Springer) καὶ μέλος τοῦ Editorial Advisory Board τοῦ περιοδικοῦ *The Open Nuclear & Particle Physics Journal* (Bentham Open).

[Πάνος Πάτσης - Διευθύνων τοῦ ΚΕΑΕΜ]



**KENTRON EPETNHΣ ΦΥΣIKHΣ  
THΣ ATMOΣΦAIPAΣ KAI KΛIMATOΛOΓIAC**

Έπόπτης: Χρήστος Σ. Ζερεφός.

Έφορευτική Έπιτροπή:

Πρόεδρος: Π. Λιγομενίδης.

Μέλη: Γ. Κοντόπουλος, Ν. Άμβράζης, Σ. Κριμιζής, Α. Κουνάδης,  
Λ. Χριστοφόρου, Χ. Ζερεφός.

Διευθυντής: Γεώργιος Β. Τσελιούδης.

Έρευνητές: Παύλος Δ. Καλαμπόκας (Α' βαθμίδα), Κωνσταντίνος Μ. Φιλάνδρας (Β' βαθμίδα).

Έπιστημονικοί Συνεργάτες: Όμηρος Μάντης (Καθηγητής, Άντεπιστέλλον Μέλος τής Άκαδημίας Άθηνών), Χρήστος Ρεπαπής (τ. Διευθυντής του ΚΕΦΑΚ).

Διοικητικό Προσωπικό: Σρπούη Γαζεριάν, Μαρίνα Σοϊλεμεζίδου.

Συνεργαζόμενοι έρευνητές στο πλαίσιο έρευνητικών προγραμμάτων: Κ. Δουβής, Ι. Καψωμενάκης, Μ. Βρεκούσης, Δ. Κώνστα, Κ. Έλευθεράτος, Ν. Βιδιαδάκης.

Συνεργασίες με έρευνητικά κέντρα του έξωτερικού: NASA Goddard Institute for Space Studies - ΗΠΑ (G. Tselioudis), University of Giessen - Γερμανία (J. Luterbacher, E. Xoplaki), University of Oslo - Νορβηγία (I. Isaksen), University of Toulouse - Γαλλία (J. P. Cammas, V. Thouret), Έρευνητικό Κέντρο Juelich - Γερμανία (A. Volz-Thomas), Εύρωπαϊκό Κέντρο Έρευνών JRC Ispra - Ίταλία (Δ. Κοτζιάς, Δ. Σαρηγιάννης), Ίνστιτούτο Τεχνολογίας Κύπρου (M. Lange, Π. Χατζηνικολάου).

Συνεργασίες με έλληνικά ιδρύματα: Άριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α. Μπάης, Δ. Μελάς, Δ. Μπαλής, Π. Ζάνης, Κ. Τουρπάλη), Έθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Α. Παπαγιάννης), Έθνικό Άστεροσκοπείο Άθηνών (Ε. Γερασόπουλος, Χ. Γιαννακόπουλος, Δ. Φουντά, Σ. Καζαντζής, Β. Άμοιρίδης), Πανεπιστήμιο Άθηνών

(Π. Νάστος), Πανεπιστήμιο Κρήτης (Ν. Μιχαλόπουλος), Πανεπιστήμιο Πατρών (Α. Καζαντζίδης), ΤΕΙ Πειραιά (Α. Παλιατσός).

## 1. ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ

- Συμμετοχή του καθηγητή Χ. Ζερεφού ως Κριτή στην Έκθεση του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Όργανισμού και του Προγράμματος Περιβάλλοντος του ΟΗΕ για την αναθεώρηση του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ (WMO/UNEP Ozone Assessment).
- Συμμετοχή του καθηγητή Χ. Ζερεφού ως Κριτή στην Έκθεση της Διακυβερνητικής Έπιτροπής για την Κλιματική Άλλαγή [IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)].
- Έκπροσώπηση της Ακαδημίας Αθηνών από τον καθηγητή Χ. Ζερεφό στην κοινή συνάντηση της Ομάδας Περιβαλλοντικής Στρατηγικής και της Ομάδας Ενέργειας της Επιστημονικής Συμβουλευτικής Έπιτροπής των Ευρωπαϊκών Ακαδημιών (EASAC) (Βρυξέλλες, 11.11.2011).
- Ανακήρυξη του καθηγητή Χ. Ζερεφού σε Έπίτιμο Μέλος της Έλληνικής Έταιρείας Μεταφραστών Λογοτεχνίας (18.11.2011).
- Άπονομή της τμητικής διακρίσεως «XENIA» στον καθηγητή Χ. Ζερεφό για την προσφορά του στη φυσική επιστήμη και την προβολή της χώρας μας (21.11.2011).
- Συμμετοχή του καθηγητή Χ. Ζερεφού ως Συντονιστή στην Έπιτροπή Μελέτης των Περιβαλλοντικών, Κοινωνικών και Οικονομικών Έπιπτώσεων της Κλιματικής Άλλαγής της Τραπεζής της Ελλάδος. Στην Έπιτροπή συμμετείχαν επίσης οι Γ. Τσελιούδης, Π. Καλαμπόκας, Κ. Φιλάνδρας, Ι. Καψωμενάκης, Κ. Δουβής, Μ. Βρεκούσης.

## 2. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΤΕΣ

1. Kazantzidis, A., K. Eleftheratos, C. S. Zerefos (2011), Effects of cirrus cloudiness on solar irradiance in four spectral bands. *Atm. Res.* 102, 452-459.
2. Nastos, P. T., C. M. Philandras, D. Founda, C. S. Zerefos (2011), Air temperature trends related to changes in atmospheric circulation in

- the wider area of Greece. *Int. J. of Rem. Sens.* vol. 32-3, 737-750, doi: 10.1080/01431161.2010.517796.
3. Gerasopoulos, E., V. Amiridis, S. Kazadzis, P. Kokkalis, K. Eleftharatos, M. O. Andreae, T. W. Andreae, H. El-Askary, C. S. Zerefos (2011), Three-year ground based measurements of aerosol optical depth over the Eastern Mediterranean: The urban environment of Athens. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 2145-2159.
  4. Tselioudis, G., C. Douvis, C. Zerefos (2011), Does dynamical downscaling introduce novel information in climate model simulations of precipitation change over a complex topography region? *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.2360.
  5. Tselioudis, G., W. B. Rossow (2011), Time scales of variability of the tropical atmosphere derived from cloud-defined weather states. *J. Climate* 24, 602-608, doi: 10.1175/2010JCLI35744.
  6. Haynes, J. M., C. Jakob, W. B. Rossow, G. Tselioudis, J. Brown (2011), Major characteristics of Southern Ocean cloud regimes and their effects on the energy budget. *J. Climate* 24, 5061-5080, doi: 10.1175/2011JCLI40524.
  7. Bender, F. A. M., V. Ramanathan, G. Tselioudis (2011), Changes in extra tropical storm track cloudiness 1983-2008: Observational support for a poleward shift. *Clim. Dynam.* doi: 10.1007/s00382-011-1065-6.
  8. Eleftheratos, K., C. S. Zerefos, C. Varotsos (2011), Interannual variability of cirrus clouds in the tropics at ENSO regions based on ISCCP satellite data. *Int. J. of Rem. Sens.* doi: 10.1080/01431161.2010.510491.
  9. Nastos P. T., C. M. Philandras, D. Founda, C. S. Zerefos (2011), Air temperature trends related to changes in atmospheric circulation in the wider area of Greece. *Int. J. of Rem. Sens.* vol. 32, no 3, 737-750.
  10. Rinaldi, M., S. Decesari, C. Carbone, E. Finessi, S. Fuzzi, D. Ceburnis, C. O'Dowd, J. Sciare, J. P. Burrows, M. Vrekoussis, B. Ervens and M. C. Facchini (2011), Evidence of a natural marine source of oxalic acid and a possible link to glyoxal. *J. Geophys. Res.* 116, D16204, doi: 10.1029/2011JD015659.
  11. Kanakidou, M., N. Mihalopoulos, T. Kindap, U. Im, E. Gerasopoulos, M. Vrekoussis, E. Dermizaki, A. Unal, M. Koçak, K. Markakis, M. Melas, G. Kouvarakis, A. F. Youssef, N. Hatzianastassiou, A. Hilboll, F. Ebojje, F. Wittrock, C. von Savigny, J. Burrows, A. Ladstaetter-Weissenmayer,

- H. Moubasher (2011), Megacities as hot spots of air pollution in the East Mediterranean. *Atmos. Env.*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.11.048.
12. Nastos P. T., C. M. Philandras, J. Kapsomenakis, K. Eleftheratos (2011), Variability and trends of mean maximum and mean minimum air temperature in Greece from ground-based observations and NCEP-NCAR reanalysis, gridded data. *Int. J. of Rem. Sens.* ifirst 1-16.
  13. Amiridis, V., C. Zerefos, S. Kazadzis, E. Gerasopoulos, K. Eleftheratos, M. Vrekoussis, A. Stohl, R. E. Mamouri, P. Kokkalis, A. Papayannis, K. Eleftheriadis, E. Diabouli, I. Keramitsoglou, C. Kontoes, V. Kotroni, K. Lagouvardos, E. Marinou, E. Giannakaki, E. Kostopoulou, C. Giannakopoulos, A. Richter, J. P. Burrows and N. Mihalopoulos (2011), The impact of the 2009 Attica wild fires on the air quality of Athens' urban environment. *Atmos. Environ.*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.07.056.
  14. Nastos P. T., N. Politi, J. Kapsomenakis, Spatial and temporal variability of the aridity index in Greece. *Atmospheric Research* (in press - 2011).
  15. Eleftheratos, K., C. Zerefos, E. Gerasopoulos, I. Isaksen, B. Rognerud, S. Dalsøren, C. Varotsos (2011), A note on the comparison between total ozone from Oslo CTM2 and SBUV satellite data. *Int. J. of Rem. Sens.* 32: 9, 2535-2545.
  16. Balis, D., I. S. A. Isaksen, C. Zerefos, I. Zyrichidou, K. Eleftheratos, K. Troukali, R. Bojkov, B. Rognerud, F. Stordal, O. A. Sovde, Y. Orsolini, Observed and modeled record ozone decline over the Arctic during winter/spring 2011. *Geophys. Res. Lett.* (in press - 2011).
  17. Philandras C. M., P. T. Nastos, J. Kapsomenakis, K. C. Douvis, G. Tselioudis, C. S. Zerefos, Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (in press - 2011).
  18. Kalabokas P. D., A. D. Papayannis, G. Tsaknakis, I. Ziomas, A study on the atmospheric concentrations of primary and secondary air pollutants in the Athens basin performed by DOAS and DIAL measuring techniques. *Sci. of Tot. Environ.* (accepted - 2011).
  19. Kalabokas P. D., A. D. Adamopoulos, L. G. Viras, Seasonal variation characteristics of PM10 particles, nitrogen oxides and ozone in the Mediterranean urban areas of Athens and Thessaloniki, Greece. *Fres. Environ. Bul.* (submitted - 2011).
  20. Kalabokas P. D., A. Volz-Thomas, V. Thouret, J. P. Cammas, D. Boulanger, C. C. Repapis, Examination of the atmospheric conditions associated with

high and low vertical ozone measurements in the lower troposphere over the Eastern Mediterranean. *Atmos. Chem. Phys.* (submitted - 2011).

21. Konsta, D., H. Chepfer, J. L. Dufresne, A process oriented representation of tropical oceanic clouds for climate model evaluation, based on a statistical analysis of daytime A-train high spatial resolution observations. *Climate Dynamics* (submitted - 2011).
22. Konsta, D., J. L. Dufresne, H. Chepfer, A. Idelkadi, G. Cesana, Evaluation of clouds simulated by the LMDZ5 GCM using A-train satellite observations (CALIPSO-PARASOL-CERES). *Climate Dynamics* (submitted - 2011).
23. PETERS, A. J. M., K. F. Boersma, M. Kroon, J. C. Hains, M. Van Roozendaal, F. Wittrock, N. Abuhassan, C. Adams, N. Akrami, M. A. F. Allaart, I. Alonso, I. Calvo, A. Apituley, J. B. Bergwerff, A. J. C. Berkhout, D. Brunner, A. Cede, J. Chong, K. Clemer, C. Fayt, U. Frieß, L. F. L. Gast, M. Gil Ojeda, F. Goutail, R. Graves, A. Griesfeller, K. Großmann, G. Hemerijckx, F. Hendrick, B. Henzing, J. Herman, C. Herman, M. Hoexum, G. R. van der Hoff, H. Irie, P. V. Johnston, Y. Kanaya, Y. J. Kim, H. Klein-Baltink, K. Kreher, G. de Leeuw, R. Leigh, A. Merlaud, M. M. Moerman, P. S. Monks, G. H. Mount, M. Navarro-Comas, H. Oetjen, A. Pazmino, E. Peters, A. du Piesanie, G. Pinardi, O. Puentedura, A. Richter, H. K. Roscoe, A. Schoenhardt, B. Schwarzenbach, R. Shaiganfar, W. Sluis, E. Spinei, A. P. Stolk, K. Strong, D. P. J. Swart, H. Takashima, T. Vlemmix, M. Vrekoussis, T. Wagner, C. Whyte, K. Wilson, M. Yela, S. Yilmaz, P. Zieger, Y. Zhou, The Cabauw Intercomparison campaign for Nitrogen Dioxide measuring Instruments (CINDI): Design, execution, and first results. *AMTD* (submitted - 2011).
24. Sayer, A. M., G. E. Thomas, R. G. Grainger, E. Carboni, C. Poulsen, R. Siddans, A. Richter, M. Vrekoussis, F. Wittrock, Biomass burning in the Amazon: Links between burning, trace gases, and aerosol and surface properties from the ORAC-AATSR retrieval. *Rem. Sens. of Env.* (submitted - 2011).

### 3. ΑΛΛΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. Έκθεση της Τραπέζης της Ελλάδος για τις οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα (Αθήνα 2011).

## 4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

1. Isaksen I. S. A., C. Zerefos, W. C. Wang, D. Balis, K. Eleftheratos, B. Rognerud, F. Stordal, O. A. Sovde, D. Olivie, Y. Orsolini, E. Zyrichidou, M. Prather, Studies of record low Arctic ozone during the 2011 winter, and comparison with interannual variability. *AGU Fall Meeting* (San Francisco, California - USA, 5-9 December 2011).
2. Zerefos, C., Conclusions of the study of the Bank of Greece on the environmental, economic and social impacts of climate change in Greece. *Workshop Solar Energy - Concentrating Solar Power* on the occasion of EASAC's 10th anniversary (Athens, 9.12.2011).
3. Zerefos, C., C. Giannakopoulos, C. Douvis, K. Eleftheratos, J. Kapsomenakis, D. Konsta, C. Philandras, G. Tselioudis, Topic of climate change in the Mediterranean. *International Conference Sustainable Water Management & Global Change - The GLOWA Jordan River Project* (Cyprus, 5-7 September 2011).
4. Zerefos, C., From the well-tempered environment to sustainability. *International Conference The architecture of well tempered environment. An orchestra of integrated instruments* (Rome, 19-20 May 2011).
5. Kalabokas P., Implementation of the European Union legislation on air quality in Greece. *International workshop Reducing air pollution and health risk through urban green diversity* (Sapienza University - Rome, 31.5.2011).
6. Kalabokas P. D., A. Volz-Thomas, V. Thouret, J. P. Cammas, D. Boulanger, C. C. Repapis, Examination of the atmospheric conditions associated with high and low vertical ozone measurements in the lower troposphere over the Eastern Mediterranean. *European Geosciences Union (EGU), General Assembly* (Vienna - Austria, 3-8 April 2011).
7. Kalabokas P. D., A. D. Adamopoulos, L. G. Viras, Seasonal variation characteristics of PM10 particles, nitrogen oxides and ozone in the Mediterranean urban areas of Athens and Thessaloniki, Greece. *European Geosciences Union (EGU) General Assembly* (Vienna - Austria, 3-8 April 2011).
8. Kalabokas P. D., High and low ozone concentrations in the boundary layer and the lower troposphere over the Eastern Mediterranean and associated atmospheric conditions. *16th International Symposium on Environmental Pollution and Its Impact on Life in the Mediterranean Region (MESAEP)* (Ioannina - Greece, 24-27 September 2011).

9. Nastos P. T., J. Kapsomenakis, K. C. Douvis, Comparison of satellite precipitation extremes from TRMM 3B42 Products with high-resolution gridded data set (E-OBS dataset) for precipitation extremes over Mediterranean region. *European Geosciences Union General Assembly 2011* (Vienna - Austria, 3-8 April 2011).
10. Kapsomenakis J., P. T. Nastos, C. Douvis, K. Eleftheratos, C. C. Zerefos, Estimation of precipitation change over Greece during the 21st century, using RCM simulations. *9th International Hydrogeological Congress of Greece* (Kalavryta, 5-8 October 2011).
11. H. Chepfer, D. Konsta, J. L. Dufresne, G. Cesana, S. Bony, A process oriented description of oceanic clouds derived from A-train observations, for climate model evaluation. *2nd GA/CFMIP Meeting* (Exeter - UK, 6-10 June 2011).
12. Richter, A., F. Wittrock, A. Hilboll, J. Leitão, A. Zien, M. Vrekoussis, J. P. Burrows, Long-term observations of pollution from space. *IUGG 2011* (Melbourne - Australia, 28 June-7 July 2011).

##### 5. ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΕ ΕΘΝΙΚΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

1. Ζερεφός, Χ., «Η περιβαλλοντική σημασία του Πεντελικού Όρους». *Ημερίδα Ή λύση για το άποχευτικό πρόβλημα στους Δήμους Σπάτων-Αρτέμιδος και Ραφήνας-Πικερμίου* (Σπάτα, 11.12.2011).
2. Ζερεφός, Χ., «Παγκόσμια κλιματική αλλαγή: Το σταυροδρόμι των Μαθηματικών, τής Φυσικής και τής Χημείας». *28ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μαθηματικής Παιδείας τής Ελληνικής Μαθηματικής Έταιρείας* (12.11.2011).
3. Ζερεφός, Χ., «Κλιματικές μεταβολές: Παρόν και μέλλον» (Νάουσα, 16.10.2011).
4. Ζερεφός, Χ., «Ο F. Nansen, ό Ε. Βενιζέλος και ό Π. Καναγκίνης μετά τή δίνη τής Μικρασιατικής Καταστροφής και ή άποκατάσταση τών προσφύγων». *Έκδήλωση Ό Φ. Νάνσεν και τό άνθρωπιστικό έργο του κατά τήν έλληνική προσφυγική κρίση του 1922-1924* (Αθήνα, 10.10.2011).
5. Ζερεφός, Χ., «Κλίμα, περιβάλλον και οικοσυστήματα» (Πνευματική Έστία Σπάρτης, 7.10.2011).
6. Ζερεφός, Χ., «Οί κλιματικές αλλαγές στη Ν. Ελλάδα: Παρόν και Μέλλον». *Όμιλία στην Κυθηραϊκή Έταιρεία* (Αθήνα, 3.10.2011).

7. Ζερεφός, Χ., «Η κλιματική μεταβολή στις Κυκλάδες». 3ο Διεθνές Φεστιβάλ Ώξία (Νάξος, 17.8.2011).
8. Ζερεφός, Χ., Παρουσίαση τής Έκθέσεως τής Τραπεζίης τής Ελλάδος για τις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις τής κλιματικής αλλαγής. Ένημέρωση τής Ειδικής Μόνιμης Έπιτροπής Προστασίας Περιβάλλοντος τής Βουλής τών Έλλήνων (Αθήνα, 7.7.2011).
9. Ζερεφός, Χ., «Άρμονία και δυσαρμονία τών πόλεων σέ ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον». Έκδήλωση του Ίνστιτούτου Δημοκρατίας με θέμα *Η πόλις θά σέ ακολουθεί. Ποιό είναι τó μέλλον τής σύγχρονης πόλης;* (Αθήνα, 2.6.2011).
10. Ζερεφός, Χ., Συμμετοχή στο στρογγυλό τραπέζι με θέμα *Σχεδιάζοντας για ένα εύκρατο περιβάλλον*. 1ο Έθνικό Συνέδριο με θέμα *Άρχιτεκτονική, Ένέργεια και Περιβάλλον στα κτήρια και τις πόλεις* (Αθήνα, 4.5.2011).
11. Ζερεφός, Χ., «Η κλιματική αλλαγή στην Άνατολική Μεσόγειο». Ημερίδα τής Έλληνικής Έταιρείας Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων με τίτλο *Κλιματική αλλαγή και διαχείριση στερεών αποβλήτων* (Αθήνα, 14.4.2011).
12. Καλαμπόκας Π., «Η άτμοσφαιρική ρύπανση στην Άθήνα». Ημερίδα διάχυσης τών αποτελεσμάτων του Ευρωπαϊκού Προγράμματος HEREPUS (Αθήνα, 1.4.2011).
13. Ζερεφός, Χ., «Κλιματική αλλαγή». Έκδήλωση *Πολιτιστική κληρονομιά-Κλιματική αλλαγή: Ο ρόλος του εκπαιδευτικού* (Αθήνα, 23.3.2011).
14. Ζερεφός, Χ., «Οί προκλήσεις του σήμερα για τις εταιρείες διαχείρισης νερού κάτω από τó πρίσμα τής κλιματικής αλλαγής». Ημερίδα τής ΕΥΔΑΠ στο πλαίσιο τής Παγκόσμιας Ημέρας Νερού με θέμα *Υδατικοί πόροι και κλιματική αλλαγή. Σύγχρονες προκλήσεις για τις εταιρείες διαχείρισης νερού* (Αθήνα, 22.3.2011).
15. Ζερεφός, Χ., «Παγκόσμια κλιματική μεταβολή και οί επιπτώσεις της». Όμιλία στο πλαίσιο τών *Παιδευτικών Διαλόγων* (Ναύπακτος, 13.3.2011).
16. Ζερεφός, Χ., «Τρείς αιώνες κλιματικής αλλαγής στη Δυτική Ελλάδα (19ος - 21ος)». Έκδήλωση του Δήμου τής Έρως Πόλεως του Μεσολογγίου σέ συνεργασία με τήν Άστρονομική και Άστροφυσική Έταιρεία Δυτικής Έλλάδας, τó Φορέα Διαχείρισης Λιμνοθάλασσας Μεσο-



λογγίου-Αίτωλικού και το Τμήμα Αίτωλοακαρνανίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (Μεσολόγγι, 14.3.2011).

17. Ζερεφός, Χ., «Άκραιές καιρικές καταστάσεις στο μύθο και στην πραγματικότητα». Ομιλία στην Έταιρεία Μελέτης Αρχαίας Έλληνικής Μυθολογίας (Αθήνα, 4.3.2011).
18. Ζερεφός, Χ., «Κλιματική αλλαγή και τέχνη». Πρόγραμμα Διαλογικών Μαθημάτων *Τέχνη και Πολιτισμός* της Έλληνικής Έταιρείας για την Προστασία του Περιβάλλοντος και του Πολιτισμού (Αθήνα, 7.2.2011).
19. Ζερεφός, Χ., «Η κρίση στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον». Φιλολογικός Σύλλογος Παρνασσός (Αθήνα, 2.2.2011).

## 6. ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

### 6.1. NAVARINO ENVIRONMENTAL OBSERVATORY (NEO)

Το πρόγραμμα «NEO» («Navarino Environmental Observatory») είναι μία συνεργασία μεταξύ της Ακαδημίας Αθηνών, του Πανεπιστημίου της Στοκχόλμης και της Έταιρείας TEMES. Αφορά στη δημιουργία και λειτουργία ενός περιβαλλοντικού παρατηρητηρίου στην περιοχή της Μεσσηνίας με καθορισμένους έρευνητικούς και εκπαιδευτικούς στόχους. Στο πλαίσιο του προγράμματος, η ομάδα της Ακαδημίας Αθηνών κατά το έτος 2011 πραγματοποίησε τα ακόλουθα:

- Τον Μάρτιο του 2011 εγκαταστάθηκε στο Σταθμό Navarino Environmental Observatory γραμμή δειγματοληψίας αέριων και σωματιδιακών ρύπων στην όροφή του χώρου που διατέθηκε αποκλειστικά για την εγκατάσταση του σταθμού.
- Τον Μάρτιο του 2011 ολοκληρώθηκε η κατασκευή της πλατφόρμας για την εγκατάσταση των μηχανημάτων μέτρησης διαφόρων συνιστωσών της ήλιακής ακτινοβολίας.
- Παράλληλα ολοκληρώθηκαν οι διαδικασίες συντήρησης και βαθμονόμησης των μηχανημάτων της Α.Α. που μεταφέρονται ήδη στο Navarino Environmental Observatory.
- Δρομολογήθηκε η αγορά νέου μηχανήματος παρακολούθησης της υπεριώδους ακτινοβολίας και της έρυθηματώδους δόσης.

- Τὸν Ἀπρίλιο τοῦ 2011 πραγματοποιήθηκε ἡ ἐγκατάσταση τοῦ πρώτου ἐξοπλισμοῦ καὶ ξεκίνησαν οἱ πρώτες μετρήσεις.
- Τὸν Ἰούνιο τοῦ 2011 ἔλαβε χώρα ἡ ἐγκατάσταση τοῦ φασματοραδιομετρικοῦ ἐξοπλισμοῦ στὸν ἀντίστοιχο σταθμὸ.
- Καθ' ὅλη τὴ διάρκεια τοῦ ἔτους παρακολουθεῖται ἡ λειτουργία τοῦ σταθμοῦ, καταγράφονται καὶ ἀναλύονται οἱ σχετικὲς μετρούμενες παράμετροι.

## 6.2. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ

1. Πρόγραμμα τῆς ΕΕ «Climate Change and Impact Research: The Mediterranean Environment (CIRCE)». Ὑπεύθυνος προγράμματος: A. Navara. Ἐρευνητής: X. Ζερεφός.
2. Πρόγραμμα τῆς ΕΕ «Global Earth Observation and Monitoring (GEOMON)». Ὑπεύθυνος προγράμματος: S. Godin-Beekman. Ἐρευνητής: X. Ζερεφός.
3. Πρόγραμμα τῆς ΕΕ «Monitoring Atmospheric Composition and Climate (MACC)». Ὑπεύθυνος προγράμματος: A. Simons. Ἐρευνητής: X. Ζερεφός.
4. Πρόγραμμα τοῦ European Strategy Forum for Research Infrastructures (ESFRI), Δημιουργία Ἐθνικοῦ Ἐρευνητικοῦ Δικτύου γιὰ τὴν Εὐρωπαϊκὴ Ἐρευνητικὴ Ὑποδομὴ COPAL. Ὑπεύθυνος Προγράμματος: Ἀλκιβιάδης Μπάης. Ἐρευνητές: X. Ζερεφός, Γ. Τσελιούδης.
5. Πρόγραμμα τῆς ΕΕ «Health Risk from Environmental Pollution Levels in Urban Systems (HEREPLUS)». Συντονισμὸς ἀπὸ τὸ Πανεπιστήμιο Sapienza τῆς Ρώμης. Ὑπεύθυνος Προγράμματος: F. Manes. Ἐρευνητής: Π. Καλαμπόκας.
6. Πρόγραμμα τῆς ESA «Building consolidated climate-relevant ozone data sets in the framework of the ESA's Climate Change Initiative (ESA CCI)». Ὑπεύθυνος προγράμματος: Michel Van Roozendael. Ἐρευνητής: X. Ζερεφός.
7. Πρόγραμμα τῆς ΕΕ «Data Repositories and Computational Infrastructure for Environmental and Climate Studies in the Eastern Mediterranean (DARECLIMED)». Ὑπεύθυνος προγράμματος: Manfred Lange. Ἐρευνητής: X. Ζερεφός.

8. Πρόγραμμα τῆς ΕΕ «Monitoring Atmospheric Composition and Climate Interim Implementation (MACC II)». Ὑπεύθυνος προγράμματος: Α. Simmons. Ἐρευνητής: Χ. Ζερεφός.
9. Πρόγραμμα τῆς ΕΕ «EU Cloud Intercomparison, Process Study and Evaluation Project (EUCLIPSE)». Ἐρευνητές: Γ. Τσελιούδης, Δ. Κώνστα, Γ. Καψωμενάκης.
10. Πρόγραμμα τῆς ΕΕ «InfraStructure for the European Network for the Earth System Modeling (IS-ENES)». Ὑπεύθυνος προγράμματος: S. Joussrme. Ἐρευνητές: Γ. Τσελιούδης, Κ. Δουβῆς.
11. Πρόγραμμα τῆς ΕΕ «Pollution of air in the extended region of Athens: Space-based Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>) observations and their comparison with remote and ground-based measurements and modeling simulations - PARTHENO2N». Ὑπεύθυνος Προγράμματος: Χ. Ζερεφός. Ἐρευνητής: Μ. Βρεκούσης.

### 6.3. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ

1. Συνεργασία στό πλαίσιο τοῦ Ἐρευνητικοῦ Προγράμματος τῆς Ἐπιτροπῆς Ἐρευνῶν τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν «Μελέτη τῆς κατακόρυφης κατανομῆς τροποσφαιρικοῦ ὄζοντος στήν Ἀνατολική Μεσόγειο καί σύγκριση μέ τήν Κεντρική Εὐρώπη μέ βάση τίς ἀεροπορικῆς μετρήσεις τοῦ Εὐρωπαϊκοῦ Προγράμματος MOZAIK». Ὑπεύθυνος Προγράμματος: Π. Λιγομενίδης. Ἐρευνητής: Π. Καλαμπόκας.

[Χρῆστος Σ. Ζερεφός - Ἐπόπτης τοῦ ΚΕΦΑΚ]



## ΚΕΝΤΡΟΝ ΕΡΕΥΝΩΝ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΦΗΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ

Ἡ ἔρευνα τοῦ ΚΕΘΕΜ ἐστιάζεται στὴ δημιουργία ἀλγόριθμων ἀνακατασκευῆς ἱατρικῆς εἰκόνας (image reconstruction). Αὐτὴ ἡ διαδικασία εἶναι ἀπαραίτητη γιὰ τὴ δημιουργία τομογραφικῆς εἰκόνας στὰ σύγχρονα ἀπεικονιστικὰ συστήματα PET, CT καὶ SPECT. Ἐπόπτης τοῦ Κέντρου εἶναι ὁ Ἀκαδημαϊκὸς κ. Ἀθανάσιος Φωκάς, τὸ δὲ προσωπικὸ, στὴν παρούσα φάση, ἀποτελεῖται ἀπὸ τὸν Γεώργιο Καστῆ, Ἐρευνητὴ Γ' βαθμίδας, στὸν ὁποῖο ἔχει ἀνατεθεῖ ἡ προσωρινὴ διεύθυνση τοῦ Κέντρου.

Κατὰ τὴ διάρκεια αὐτοῦ τοῦ ἔτους, τὸ ΚΕΘΕΜ εἶχε τὶς ἀκόλουθες δραστηριότητες:

- Ἀναπτύχθηκε ἓνας ἀναλυτικὸς ἀλγόριθμος βασισμένος σὲ splines, γιὰ τὴν ἀνακατασκευὴ τῆς εἰκόνας τοῦ τομογραφικοῦ σπινθηρογραφήματος ἐκπομπῆς μονήρους φωτονίου SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography). Ὁ ἀλγόριθμος βασίζεται στὴν ἀντιστροφὴ τοῦ ἐξασθενημένου μετασχηματισμοῦ Radon (Attenuated Radon Transform), τοῦ ὁποῖου ἡ ἀναλυτικὴ λύση ἔχει δοθεῖ πρόσφατα ἀπὸ τὸν Ἀκαδημαϊκὸ κ. Ἀθανάσιο Φωκά.
- Ὁργανώθηκε ἡ δημιουργία ἑνὸς ἐργαστηρίου ἀπεικόνισης ἀκτίνων-γ γιὰ μικρὰ ζῶα σὲ συνεργασία μὲ τὸ Center for Gamma-Ray Imaging (CGRI) τοῦ University of Arizona καὶ τὸ Ἴδρυμα Ἰατροβιολογικῶν Ἐρευνῶν τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν (I.I.B.E.A.A.). Ἡ ἀπεικονιστικὴ γ-κάμερα ἔχει παραχωρηθεῖ δωρεὰν ἀπὸ τὸ CGRI. Ἡ συγκεκριμένη συνεργασία μᾶς δίνει τὴ δυνατότητα νὰ δοκιμάζουμε τοὺς ἀλγόριθμους ἀνάλυσης καὶ ἀνακατασκευῆς εἰκόνας σὲ πραγματικὸ περιβάλλον.

Τὸ ΚΕΘΕΜ ἔχει συνάψει συνεργασία μὲ τὰ κάτωθι Ἴδρύματα:

- Ἐργαστήριον Ἰατρικῆς Φυσικῆς τοῦ Γενικοῦ Νοσοκομείου Ἀθηνῶν «Ὁ Εὐαγγελισμός» (συλλογὴ κλινικῶν δεδομένων ἀπὸ τὸ σύστημα ἐκπομπῆς ποζιτρονίων PET/CT ποὺ διαθέτει τὸ νοσοκομεῖο).
- Ἐργαστήριον Ἰατρικῆς Φυσικῆς τοῦ Πανεπιστημιακοῦ Γενικοῦ Νοσοκομείου Πατρῶν (συλλογὴ κλινικῶν δεδομένων ἀπὸ τὸ σύστημα SPECT/CT ποὺ διαθέτει τὸ νοσοκομεῖο).

- Centro d'Imatge Molecular Experimental (CIME), CETIR Centre Mèdic, Βαρκελώνη-Ισπανία (συλλογή δεδομένων από ένα PET/CT ύψηλης διακριτικής ικανότητας, εξειδικευμένο σε απεικονίσεις μικρών ζώων).
- Γραφείο Βιοϊατρικής Τεχνολογίας, Ίδρυμα Ίατροβιολογικών Έρευνών τής Ακαδημίας Αθηνών (Monte Carlo Simulations, ανακατασκευή ιατρικής εικόνας).
- Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Telecomunicación, Dpto. Ingeniería Electrónica (ανακατασκευή ιατρικής εικόνας).
- Center for Gamma-Ray Imaging (CGRI), University of Arizona - Tucson, AZ, USA (άνιχνευτές ακτίνων-γ).
- Α' Κλινική Έντατικής Θεραπείας, Έθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Γενικό Νοσοκομείο Αθηνών «Ο Ευαγγελισμός» (απεικόνιση μικρών ζώων).

#### ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΤΕΣ

1. Lenells and A. S. Fokas, Boundary Value Problems for the Stationary Axisymmetric Einstein Equations: A Rotating Disk. *Nonlinearity* 24, 177-206 (2011).
2. D. Mantzavinos and A. S. Fokas, The KPII Equation on the Half-Plane. *Physica D* 240, 477-511 (2011).
3. A. S. Fokas and A. Himonas, Well-Posedness of an Integrable Generalization of the Nonlinear Schrödinger Equation on the Circle. *Lett. Math. Phys.* 96, 169-189 (2011).
4. D. G. Crowdy, A. S. Fokas and C. C. Green, Conformal Mappings to Multiply Connected Polycircular Arc Domains. *Computational Methods and Function Theory* (in press).
5. A. C. L. Ashton and A. S. Fokas, A Non-Local Formulation for Rotational Water Waves. *J. Fluid. Mechanics* (in press).
6. A. S. Fokas, J. Lenells and B. Pelloni, Boundary Value Problems for the Elliptic sine-Gordon Equation in a Semi-Strip. *J. Nonlinear Science* (in press).
7. A. S. Fokas and E. A. Spence, Synthesis as Opposed to Separation of Variables. *SIAM Review* (to appear).
8. A. S. Fokas and B. Pelloni, Generalized Dirichlet-to-Neumann Map in Time-Dependent Domains. *Selecta Mathematica* (to appear).
9. A. S. Fokas and D. Yang, On a Novel Class of Integrable ODEs Related to the Painleve Equations. *J. Bif. and Chaos* (to appear).

10. A. S. Fokas, O. Hauk and V. Michel, Electro-Magneto-Encephalography for the three-Shell Model: Numerical Implementation for Distributed Current in Spherical Geometry. *Inverse Problems* (to appear).
11. A. S. Fokas and Y. Kurylev, Electro-Magneto-Encephalography for the three-Shell Model: Minimal L<sub>2</sub>-norm in Spherical Geometry. *Inverse Problems* (to appear).
12. G. Dassios and A. S. Fokas, Electro-Magneto-Encephalography for the three-Shell Model: A Single Dipole in Ellipsoidal Geometry (submitted).
13. A. S. Fokas and D. Yang, A Novel Approach to Elastodynamics: I. The Two-Dimensional Case (submitted).
14. A. S. Fokas and D. Yang, A Novel Approach to Elastodynamics: II. The Three-Dimensional Case (submitted).
15. A. S. Fokas and B. Pelloni, The Dirichlet-to-Neumann Map for the Elliptic sine-Gordon Equation (submitted).
16. A. S. Fokas and A. Nachbin, Water Waves over a Variable Bottom: A Non-Local Formulation and Conformal Mapping (submitted).
17. M. Dimakos and A. S. Fokas, Linearizable Nonlinear PDEs in Multidimensions (submitted).
18. S. De Lillo and A. S. Fokas, The Burgers Equation on a Fixed and on a Moving Boundary (submitted).
19. M. Dimakos and A. S. Fokas, Davey-Stewartson Type Equations in 4+2 and 3+1 Possessing Soliton Solutions (submitted).
20. M. Dimakos and A. S. Fokas, The Poisson and the Biharmonic Equations in the Interior of a Convex Polygon (submitted).
21. A. S. Fokas and K. Kalimeris, Eigenvalues for the Laplace Operator in the Interior of an Equilateral Triangle (submitted).
22. A. S. Fokas and J. Lenells, The Unified Method: I Non-Linearizable Problems on the Half-Line (submitted).
23. J. Lenells and A. S. Fokas, The Unified Method: II NLS on the Half-Line with t-periodic Boundary Conditions (submitted).
24. J. Lenells and A. S. Fokas, The Unified Method: III Non-Linearizable Problems on the Interval (submitted).

## ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

1. Α. Φωκᾶς - Γ. Καστῆς, Ἀναλυτικὸς ἀλγόριθμος γιὰ τὸν Τομογράφο Ἐγκομπῆς Ποζιτρονίων. *Πρακτικὰ τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν*, τ. 85<sup>Α</sup> (2010).

### ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ (PROCEEDINGS)

1. P. E. Barbano, A. S. Fokas and C. B. Schönlieb, Alternating Regularisation in Measurement and Image Space for PET Reconstruction. *9th International Conference on Sampling Theory and Applications* (Singapore 2011).
2. P. E. Barbano and A. S. Fokas, Multi-Resolution Inversion Algorithm for the Attenuated Radon Transform, *IEEE* (China 2011).
3. G. A. Kastis, A. Gaitanis, T. Skouras, A. S. Fokas, Evaluation of a Spline Reconstruction Technique for SPECT: Comparison with FBP and OSEM. *2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference* (Oct. 2011).

### ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ ΚΑΤΟΠΙΝ ΠΡΟΣΚΛΗΣΕΩΣ

Ο Έπόπτης του ΚΕΘΕΜ πραγματοποίησε τις ακόλουθες όμιλίες κατά το 2011:

1. Diachronic Role of Libraries (Zappeion, Athens-Greece, January 27, 2011).
2. A Unified and Effective Method for Integrable Nonlinear PDES. ESF Mathematics Conference *Completely Integrable Systems and Applications* (Vienna-Austria, July 4, 2011).
3. Integrability, Medical Imaging and Boundary Value Problems (Technical University of Crete-Greece, July 28, 2011).

### ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ ΣΤΟ ΚΕΘΕΜ

Τόν Νοέμβριο του 2011 πραγματοποιήθηκε ή διάλεξη με τίτλο Small Animal Gamma-Ray Imaging: Instrumentation and Applications, από τον προσκεκλημένο του ΚΕΘΕΜ Dr. Lars Furenlid, Καθηγητή Άκτινολογίας και Όπτικων Έπιστημών του Πανεπιστημίου της Arizona.

[Αθανάσιος Φωκάς, Έπόπτης του ΚΕΘΕΜ -  
Γεώργιος Καστής, Διευθύνων του ΚΕΘΕΜ]



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟΝ ΚΑΤΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

	Σελ.
ΑΜΒΡΑΖΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ - ΨΥΧΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ. — Σεισμική αστάθεια σπονδυλωτών κίονων [Earthquake response of multidrum columns] ...	141
ΒΑΓΕΝΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ. — Αναγγελία του θανάτου του άντεπιστέλλοντος μέλους τῆς Ἀκαδημίας Ἐμμανουήλ Ἀρώνη .....	65
ΒΑΓΕΝΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ. — Ἀναζητώντας τὴ σύνθεση τῆς κατάλυσης καὶ τῆς Ἡλεκτροχημείας. Εἰσιτήριοσ λόγος τοῦ ἀκαδημαϊκοῦ κατὰ τὴν ὑποδοχὴ του στὴν Ἀκαδημία .....	199
ΓΔΟΥΤΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ. — Φῶς: Ἐνα δυναμικὸ μέσο γιὰ τὴν ἐπίλυση προβλημάτων Μηχανικῆς .....	29
ΓΕΩΡΓΙΑΔΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ. — Χαιρετισμὸς τοῦ Προέδρου στὴν ἐκδήλωση γιὰ τὸν ἑορτασμὸ τῶν δέκα χρόνων λειτουργίας τοῦ European Academies Science Advisory Council (EASAC) .....	129
ΓΕΩΡΓΙΑΔΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ. — Προσφώνηση τοῦ Προέδρου κατὰ τὴν ὑποδοχὴ τοῦ ἀκαδημαϊκοῦ κ. Κωνσταντίνου Βαγενᾶ στὴν Ἀκαδημία ...	195
ΖΕΡΕΦΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ. — Ἐκθεση πεπραγμένων τοῦ Κέντρου Ἐρεῦνης Φυσικῆς τῆς Ἀτμοσφαιρας καὶ Κλιματολογίας .....	239
ΘΕΟΛΟΓΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ. — The role of ethylene in Plant Biology. Εἰσιτήριοσ λόγος τοῦ άντεπιστέλλοντος μέλους κατὰ τὴν ὑποδοχὴ του στὴν Ἀκαδημία .....	97
HEAP BRIAN, SIR. — Towards sustainable production and consumption. Ὁμιλία τοῦ Προέδρου τοῦ European Academies Science Advisory Council (EASAC) στὴν ἐκδήλωση γιὰ τὸν ἑορτασμὸ τῶν δέκα χρόνων λειτουργίας του .....	131
ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ. — Προσφώνηση τοῦ Ἀντιπροέδρου κατὰ τὴν ὑποδοχὴ τοῦ άντεπιστέλλοντος μέλους κ. Ἀθανάσιου Θεολόγη στὴν Ἀκαδημία .....	91
ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ. — Παρουσίαση τοῦ ἔργου τοῦ European Academies Science Advisory Council (EASAC) στὴν ἐκδήλωση γιὰ τὸν ἑορτασμὸ τῶν δέκα χρόνων λειτουργίας του .....	129

ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ. — Αναγγελία τοῦ θανάτου τοῦ ἀντεπιστέλλοντος μέλους τῆς Ἀκαδημίας Λυσίμαχου Μαυρίδη . . . . .	139
ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ - ΛΟΥΚΕΣ-ΓΕΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ. — Ὑπάρχει χάος στὶς μελανές ὀπές; . . . . .	109
ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ - ΠΑΤΣΗΣ ΠΑΝΟΣ. — Χασοτικοὶ γαλαξίες . . . . .	9
ΚΟΥΝΑΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ. — Εὐσύνοπτη παρουσίαση τοῦ Μεγάρου τῆς Ἀκαδημίας μὲ τὴν εὐκαιρία τῆς ἀνακαίνισής του . . . . .	107
ΚΡΙΜΠΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ. — Παρουσίαση τοῦ ἀντεπιστέλλοντος μέ- λους κ. Ἀθανάσιου Θεολόγου κατὰ τὴν ὑποδοχὴ του στὴν Ἀκαδημία . .	92
ΛΙΓΟΜΕΝΙΔΗΣ ΠΑΝΟΣ. — Ἰδιόζουσα θεώρηση τῆς ἐξελικτικῆς δια- δικασίας ἀπὸ τὴ Φυσικὴ καὶ τὴν Ἐπιστῆμὴ τῆς Πληροφορίας . . . . .	67
ΠΑΤΣΗΣ ΠΑΝΟΣ. — Ἐκθεση πεπραγμένων τοῦ Κέντρου Ἐρευνῶν Ἀστρο- νομίας καὶ Ἐφηρμοσμένων Μαθηματικῶν . . . . .	217
ΣΚΑΛΚΕΑΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ - ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΑΚΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ - ΚΟΥΡΑΚΗΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ - ΧΡΟΥΣΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ. — Ἡ ση- μασία τῆς ἔκτασης τοῦ χειρουργικοῦ τραύματος στὸ κοιλιακὸ τοίχωμα σὲ σχέση μὲ τὸν τραυματισμὸ τῶν σπλάχνων καὶ ἡ ἐπίπτωσή του στὸ στρές . . . . .	83
ΦΩΚΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ. — Παρουσίαση τοῦ ἀκαδημαϊκοῦ κ. Κωνσταντίνου Βαγενᾶ κατὰ τὴν ὑποδοχὴ του στὴν Ἀκαδημία . . . . .	196
ΦΩΚΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ - ΚΑΣΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ. — Ἐκθεση πεπραγμέ- νων τοῦ Κέντρου Ἐρευνῶν Θεωρητικῶν καὶ Ἐφηρμοσμένων Μαθη- ματικῶν . . . . .	251
ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ ΛΟΥΚΑΣ. — Παρουσίαση τῶν πορισμάτων τῆς Ὀμάδας Ἔργασίας τῆς Ἐπιτροπῆς Ἐνέργειας τῆς Ἀκαδημίας ἐπὶ τοῦ θέματος «Ἡλεκτροπαραγωγή στὴν Ἑλλάδα: Ὁρυκτὰ καύσιμα, ἀνανεώσιμες πηγές ἐνέργειας καὶ προοπτικὴ ἐνεργειακοῦ ἐφοδιασμοῦ» . . . . .	55





ΑΚΑΔΗΜΙΑ



ΑΘΗΝΩΝ

ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΕΧΝΕΣ - ΤΥΠΟΓΡΑΦΕΙΟ  
ΑΦΟΙ ΕΜΜ. ΠΑΠΑΔΑΚΗ «ΣΤΟΙΧΕΙΑΓΡΑ» ΕΠΕ  
ΔΕΡΒΕΝΙΩΝ 7, 10680 ΑΘΗΝΑ, ΤΗΛ: 210 36 31 298





ΑΚΑΔΗΜΙΑ



ΔΟΧΜΙΑ

ISSN 0369-8106