

Milutin Milankovic: Η αστρονομική θεωρία της κλιματικής αλλαγής

Μηναΐδου Κλεοπάτρα, Κούλαλη Ευδοξία

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

	σελ.
1. Η γένεση του ηλιακού συστήματος.....	4-5
2. Το κλίμα της Γης στο παρελθόν.....	6-9
3. Οι θεωρίες ερμηνείας των κλιματικών αλλαγών ...	10-11
4. Ο Milutin Milankovitch	12-16
5. Χρήσιμοι όροι αστρονομίας και μαθηματικών.....	16-18
5.1 Η εκκεντρότητα.....	16
5.2 Η λόξωση.....	17
5.3 Η ισημερία	17
5.4 Το ηλιοστάσιο	18
6. Η αστρονομική θεωρία του Milankovitch (ή ο κανόνας της ηλιακής ακτινοβολίας).....	19-29
7. Ο Ήλιος.....	30-34
8. Η επίδραση των κύκλων του Milankovitch στην εξέλιξη των ειδών.....	34-36
9. Μοντέλα πρόβλεψης του «κλιματικού παρελθόντος και μέλλοντος»	37-38
10. Ο ρόλος του διοξειδίου του άνθρακα στις μακροχρόνιες κλιματικές αλλαγές	38-40

Παραπομπές	41-42
Α. Βιβλιογραφικές παραπομπές.....	41
Β. Δημοσιεύσεις	41
Γ. Ιστοσελίδες.....	41-42

1. Η γένεση του ηλιακού συστήματος

Σήμερα, η λεγόμενη Θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης (Big Bang) είναι η επικρατέστερη για τη δημιουργία του Σύμπαντος. Σύμφωνα με αυτήν, το Σύμπαν δεν είναι αιώνιο, αλλά δημιουργήθηκε μαζί με το χρόνο, το χώρο και τη μάζα-ενέργεια κατά την αρχική χρονική στιγμή. Κατά τη χρονική αυτή στιγμή, η πυκνότητα του Σύμπαντος ήταν άπειρη. Σήμερα, γνωρίζουμε ότι, μετά από την αρχική έκρηξη, το Σύμπαν διαστέλλεται συνεχώς. Η εξέλιξη του Σύμπαντος, από την αρχική υπέρπυκνη και υπέρθερμη κατάσταση και μετέπειτα, είναι μια διαδικασία, συνεχούς διαστολής και ψύξεώς του.

Πριν από 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια, ένα τεράστιο νέφος από αέρια και σκόνη άρχισε να συμπυκνώνεται. Τα βασικά συστατικά της αέριας φάσης του ήταν το υδρογόνο και το ήλιο, ενώ της σκόνης ήταν το πυρίτιο και ο άνθρακας. Το νεφέλωμα αυτό ονομάζεται ηλιακό, γιατί από το κεντρικό του τμήμα σχηματίστηκε ο αστέρας Ήλιος, ενώ από το περιφερειακό του, τα υπόλοιπα σώματα του ηλιακού συστήματος.

Χάρη στη δύναμη της βαρύτητας, το ηλιακό νεφέλωμα άρχισε να συστέλλεται, γεγονός που επέφερε τη μείωση της δυναμικής του ενέργειας και την αύξηση της θερμοκρασίας του. Αυτό συνέβη, διότι το νεφέλωμα ήταν αδιαφανές και η θερμότητα διέφευγε δύσκολα από την κεντρική περιοχή του προς τα εξωτερικά στρώματα. Η ψύξη του, λοιπόν, γινόταν μόνο από την επιφάνειά του, η οποία λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας της ακτινοβολούσε κυρίως στο υπέρυθρο.

Όταν η θερμοκρασία μειώθηκε κάτω από τα 2000K, σχηματίστηκαν ενώσεις αργιλίου, ασβεστίου, μαγνησίου και τιτανίου, ενώ κάτω από τα 1000K εμφανίστηκαν ενώσεις πυριτίου και οξειδία μετάλλων. Στα 180K σχηματίστηκε πάγος από τους υδρατμούς και με την περαιτέρω μείωση στα 20K στα εξωτερικά μέρη του νεφελώματος στερεοποιήθηκε το μεθάνιο.

Στο τέλος αυτής της περιόδου, το ηλιακό νεφέλωμα είχε συμπυκνωθεί και είχε σχηματίσει έναν περιστρεφόμενο δίσκο, ο οποίος αποτελούνταν κυρίως από μικρά σώματα, τους πλανητοειδείς. Αυτοί άρχισαν να συγκρούονται μεταξύ τους. Όταν, όμως, οι συγκρούσεις γίνονταν με μεγάλες ταχύτητες,

τότε οι πλανητοειδείς διαμελίζονταν. Όταν ήταν πιο ήπιες, τα θραύσματα ενώνονταν, λόγω της αμοιβαίας έλξης της βαρύτητας, και σχημάτιζαν μεγαλύτερες μονάδες, τους πρωτοπλανήτες.

Στη συνέχεια, η θερμοκρασία στο εσωτερικό των πρωτοπλανητών αυξήθηκε, αφενός μεν λόγω της βαρυτικής συστολής, αφετέρου δε λόγω της έκλυσης ενέργειας κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών στοιχείων που περιείχαν. Συνεπαγωγή των ανωτέρω υπήρξε το λιώσιμο των στερεών υλικών. Ειδικότερα, τα βαρύτερα από αυτά (σίδηρος και νικέλιο) συγκεντρώθηκαν στο κέντρο του κάθε πρωτοπλανήτη, ενώ τα ελαφρά (πυρίτιο και αέρια) ανέβηκαν στην επιφάνεια. Την περίοδο αυτή, όλοι οι πλανήτες βρίσκονταν σε ρευστή ή αεριώδη κατάσταση. Τελικά, 10^8 χρόνια μετά τη δημιουργία τους, όλοι είχαν ήδη αποκτήσει το σχήμα και την τροχιά που έχουν σήμερα. Με τον τρόπο αυτό, σχηματίστηκαν οι οκτώ από τους εννέα μείζονες πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος: ο Ερμής, η Αφροδίτη, η Γη, ο Άρης, ο Δίας, ο Κρόνος, ο Ουρανός και ο Ποσειδώνας, οι οποίοι στη συνέχεια, μαζί με τον Πλούτωνα θα ονομαστούν, απλώς πλανήτες¹.

¹ Βλ. Χ. Βάρβογλη – Γ.Χ.Σειραδάκη, Κοσμολογία- Σημειώσεις αστρονομίας, Θεσσαλονίκη 2005

2. Το κλίμα της Γης στο παρελθόν

Η μελέτη του κλίματος και των μεταβολών του, από την εποχή της δημιουργίας της Γης, είναι αντικείμενο έρευνας της επιστήμης της Παλαιοκλιματολογίας.

Παρακάτω ακολουθεί πίνακας με τους γεωλογικούς αιώνες, τις γεωλογικές περιόδους και εποχές, όπως ορίστηκαν από τους επιστήμονες.

Γεωλογικός Αιώνας	Γεωλογική Περίοδος	Γεωλογική Εποχή	Εκατομμύρια έτη πριν από σήμερα
Κοσμικός			4600
Αζωικός	Κιβατίνια		3600
	Λαυρέντια		
Προτεροζωικός	Χουρώνια		2700
	Κεβινάβια		
	Προκάμβρια		
Παλαιοζωικός	Κάμβρια		600
	Ορδοβίσια		500
	Σιλούρια		430
	Δεβόνια		400
	Λιθανθρακόφορη	Μισσισίπια	350
		Πενσυλβάνια	330
	Πέρμια		275
Μεσοζωικός	Τριάσια		225
	Ιουράσια		180
	Κρητιδική		135
Καινοζωικός	Τριτογενής	Παλαιόκαινη	66
		Ηώκαινη	59
		Ολιγόκαινη	38
		Μειόκαινη	25
		Πλειόκαινη	12
	Τεταρτογενής	Πλειστόκαινη	0,6
		Ολόκαινη	0,01

Πίνακας 1: Γεωλογικοί αιώνες, περίοδοι, εποχές και χρονολογίες εμφάνισής τους²

² Βλ. Χ.Σ. Σαχσαμάνογλου – Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική Κλιματολογία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1998, σελ.218

Σήμερα, πολύ λίγα στοιχεία είναι γνωστά για τις κλιματικές συνθήκες πριν από την Κάμβρια περίοδο. Πριν από αυτήν, υπήρξαν τουλάχιστον πέντε ισχυροί παγετώνες με μέση περίοδο 250.000.000 χρόνια. Η πιο εκτεταμένη ήταν η Χουρώνια περίοδος. Η Κάμβρια περίοδος ξεκινά με παγετό και περατώνεται με κλίμα θερμότερο από το σημερινό.

Η θέρμανση συνεχίστηκε σχεδόν μέχρι τα μέσα της Ορδοβίσιας περιόδου. Το κλίμα του μεγαλύτερου τμήματος της Βόρειας Αμερικής ήταν ηπιότερο από το σημερινό ενώ στη διάρκεια της Σιλούριας περιόδου ήταν επίσης θερμό σε όλη την έκταση της Βόρειας Αμερικής και της Αρκτικής. Οι θαλάσσιες μάζες, που κάλυπταν σημαντικά τμήματα της Β. Αμερικής στη διάρκεια των δύο προηγούμενων περιόδων, τώρα εξαφανίζονται και εμφανίζονται εκτεταμένες χερσαίες εκτάσεις. Στη Δεβόνια περίοδο το κλίμα ήταν θερμό, με εξαίρεση τους τοπικούς παγετώνες στη Ν. Αμερική και στη Ν. Αφρική.

Η αρχή της Λιθανθρακόφορης περιόδου ήταν θερμή και υγρή, ενώ το τέλος της ήταν πολύ ψυχρό. Η Μισσισίπια εποχή ήταν θερμή μόνο για τη Β. Αμερική, με βροχερά καλοκαίρια κυρίως στην ανατολική της πλευρά. Ισχυρές βροχοπτώσεις υπήρξαν στην Ευρώπη και στη Β. Ασία. Τώρα, σχηματίζονται τα αποθέματα άνθρακα των περιοχών αυτών. Οι ίδιες συνθήκες επικράτησαν στην αρχή της Πενσυλβάνιας εποχής, στο τέλος της, όμως, το κλίμα έγινε ξηρότερο και ψυχρότερο, ενώ στην Ευρώπη επικράτησε ερημικό κλίμα σε πολλές ηπειρωτικές περιοχές της.

Στην αρχή της Πέρμιας περιόδου επικράτησαν παγετώνες στις περιοχές νότια της Ν. Αμερικής, στη Ν. Αφρική, στην Ινδία και στο μεγαλύτερο τμήμα της Αυστραλίας. Το κλίμα είναι θερμό και ξηρό στο Β. Ημισφαίριο και ψυχρό και ερημικό στο Νότιο. Οι ωκεανοί, βαθμιαία, υποχωρούν και αυξάνεται το χερσαίο τμήμα. Στο κεντρικό τμήμα των ΗΠΑ επικρατεί αρχικά σχεδόν ερημικό κλίμα, με καταρακτώδεις βροχές, που ακολουθούνται όμως, από μεγάλες περιόδους ανομβρίας. Τώρα δημιουργούνται τα αποθέματα λιθάνθρακα στην περιοχή της Β. Κίνας και της Αυστραλίας, γεγονός που ερμηνεύει το θερμό, τροπικό κλίμα της περιοχής.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο Μεσοζωικός αιώνας. Η Τριάσια περίοδος αρχίζει με κλίμα ήπιο και ξηρό και καταλήγει σε υγρό και θερμό, ιδιαίτερα στην Αλάσκα, την Καλιφόρνια, τη Ν. Ασία, την Ευρώπη, τη Σιβηρία και την Αυστραλία. Η επόμενη περίοδος, η Ιουράσια (ή αιώνας των κοραλλιών), υπήρξε γενικά θερμή, με τη θερμοκρασία των θαλασσών να είναι 5-10°C ψηλότερη από τη σημερινή. Τώρα, λιώνουν οι παγετώνες, που σχηματίστηκαν κατά την Πέρμια περίοδο. Αυτό συνεπάγεται την κάλυψη με νερό μεγάλων περιοχών της Ευρώπης, της Ασίας και των Δυτικών ΗΠΑ. Η βροχόπτωση στο μεγαλύτερο τμήμα του πλανήτη ήταν ασθενής. Στη συνέχεια, κατά την Κρητιδική περίοδο, συνεχίστηκε η κάλυψη περιοχών από νερό. Παράλληλα, εμφανίζεται η τάση μείωσης της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα η ανώτερη θερμοκρασία σε Ευρώπη και Αμερική να μην ξεπερνά τους 20°C.

Κατόπιν, ακολουθεί ο Καινοζωικός αιώνας. Κατά την Τριτογενή περίοδο σχηματίζονται οι Άλπεις, τα Ιμαλάια και οι οροσειρές της δυτικής Β. Αμερικής. Αναλυτικότερα, η Παλαιόκαινη εποχή έχει ελαφρώς θερμό κλίμα, με ελάχιστα περισσότερες βροχοπτώσεις από σήμερα. Η Ηώκαινη εποχή έχει υγρό και θερμό κλίμα, με τη θερμοκρασία της κεντρικής Ευρώπης, να είναι 15°C υψηλότερη από τη σημερινή και το μεγαλύτερό της τμήμα να παρουσιάζει μεσογειακό κλίμα, με έντονες βροχοπτώσεις το χειμώνα. Η περιοχή των ΗΠΑ έχει κλίμα υγρό, με τις ετήσιες βροχοπτώσεις στο δυτικό της τμήμα να φτάνουν τα 2m. Οι συνθήκες αυτές ευνοούν την ανάπτυξη άφθονης χλωρίδας και πανίδας, σε περιοχές που σήμερα παρουσιάζονται γυμνές και άγονες. Τέτοιες είναι η ΝΑ. Αλάσκα όπου αναπτύχθηκαν φυτά, όπως η μανόλια και οι φοίνικες, ενώ στο Β. Πόλο έχουμε πεύκα, έλατα και ιτιές.

Στην Ολιγόκαινη εποχή, διαφοροποιείται το κλίμα, από θερμό και υγρό σε κρύο και ερημικό. Η τροπική βλάστηση των βόρειων πολιτειών των ΗΠΑ αντικαθίσταται από δάση που ευδοκίμουν σε εύκρατα κλίματα. Στη Μειόκαινη εποχή, η θερμοκρασία στην ισημερινή περιοχή του Ατλαντικού Ωκεανού ήταν 3-4°C χαμηλότερη από τη σημερινή, ενώ στις ακτές της Καλιφόρνιας 7°C υψηλότερη από τη σημερινή. Η θερμοκρασία του αέρα στην κεντρική Ευρώπη ήταν 10°C μεγαλύτερη από σήμερα. Η Πλειόκαινη εποχή εμφανίζει τάση μείωσης της θερμοκρασίας και των βροχοπτώσεων. Αυτό συνεπάγεται την ανάπτυξη ερημικής

βλάστησης στο Β. Μεξικό και το σχηματισμό των πρόσφατων παγετώνων.

Κατά την Πλειστόκαινη εποχή διακρίνουμε τέσσερα διαστήματα με παγετώνες, με αποτέλεσμα η μέση πλανητική θερμοκρασία να είναι 6°C μικρότερη από τη σημερινή. Κατά την πρώτη εμφάνιση των παγετώνων έχουμε παγοκάλυψη της Β. Αμερικής, που ξεκινά από τον Καναδά και συνεχίζεται ανατολικά μέχρι την Α.Ευρώπη. Κατά τη δεύτερη και τρίτη εμφάνιση, δημιουργούνται οι λίμνες της Α. Αφρικής. Η ψυχρότερη και ξηρότερη εμφάνιση παγετώνων είναι η τελευταία, με τη θερμοκρασία του Ειρηνικού Ωκεανού να είναι 5°C μικρότερη από τη σημερινή. Στα διαστήματα μεταξύ των παγετώνων, η μέση πλανητική θερμοκρασία είναι 3°C μεγαλύτερη από τη σημερινή και το κλίμα υπήρξε γενικά θερμό και ξηρό.

Σχετικά με το πρόσφατο παρελθόν μπορούμε να ισχυριστούμε τα εξής: πριν από 15.000 χρόνια, το κλίμα της Ευρώπης έμοιαζε με αυτό της τούνδρας, ενώ στα 11.500 χρόνια, η θερμοκρασία του Β. Ημισφαιρίου ήταν μικρότερη της σημερινής. Ξαφνικά, εμφανίζεται θέρμανση του Ατλαντικού ωκεανού, γεγονός που οφείλεται στην απότομη παγοποίηση του Αρκτικού ωκεανού, ο οποίος δέσμευε μεγάλη ποσότητα νερού, με αποτέλεσμα τη διακοπή της επικοινωνίας μεταξύ Αρκτικού και Ατλαντικού ωκεανού³.

³ Βλ. Χ.Σ. Σαχσαμάνογλου – Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική Κλιματολογία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1998, σελ.219 κε.

3. Οι θεωρίες ερμηνείας των κλιματικών αλλαγών

Κατά γενική ομολογία των επιστημόνων, ένα και μόνο μοντέλο δε μπορεί να εξηγήσει τις κλιματικές αλλαγές που επήλθαν στη γη. Γι' αυτό προτάθηκαν διάφοροι μηχανισμοί ερμηνείας των φαινομένων, περιλαμβανομένων και των αστρονομικών.

Ένας μηχανισμός συσχετίζει τις κλιματικές αλλαγές με την ορογένεση. Συγκεκριμένα, κατά την ορογένεση, το κλίμα γίνεται σημαντικά θερμότερο, γεγονός που δεν ευνοεί την παρουσία παγετώνων. Μια άλλη θεωρία συνδέει τις μεταβολές του κλίματος με την ηφαιστειακή δραστηριότητα. Αναλυτικότερα, τα ηφαίστεια οδηγούν σε μείωση της θερμοκρασίας, άρα αύξηση του όγκου των παγετώνων. Αυτό οφείλεται στους σωματιδιακούς ρύπους, οι οποίοι απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και μειώνουν την ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στη γη.

Μια τρίτη θεώρηση αναδεικνύει τη στάθμη της θάλασσας σε συνιστώσα του φαινομένου. Συγκεκριμένα, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας συμπίπτει με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Έτσι, μεγαλώνει και η επιφάνεια των ωκεανών, άρα αυξάνεται η εξάτμιση και η βροχόπτωση. Ο επόμενος μηχανισμός μεταβολής του κλίματος αφορά το διοξείδιο του άνθρακα. Ειδικότερα, πολλοί επιστήμονες προσπάθησαν να συνδέσουν τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας, εφόσον το αέριο αυτό μαζί με τους υδρατμούς αποτελούν τους πιο σημαντικούς απορροφητές της γήινης ακτινοβολίας.

Τέλος, από τις πιο διαδεδομένες θεωρίες είναι η συσχέτιση των κλιματικών αλλαγών με τις μεταβολές στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Εν προκειμένω, διατυπώνονται δύο διαφορετικές εκδοχές. Η πρώτη συνδυάζει την αύξηση των παγετώνων με τη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας και την ελάττωση της θερμοκρασίας και η δεύτερη αποδίδει την αύξηση των παγετώνων στη μείωση της ακτινοβολίας και την αύξηση των βροχοπτώσεων.

Σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή της ανωτέρω θεωρίας, μια σημαντική αύξηση των παγετώνων εμφανίζεται όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μειωθεί κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή. Η θεωρία αυτή ενισχύεται από το γεγονός, ότι πριν από κάθε αύξηση παγετώνων, υπάρχει σημαντική μείωση της θερμοκρασίας σε όλα τα γεωγραφικά πλάτη⁴.

Η αύξηση, εξάλλου, των βροχοπτώσεων λόγω μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας συμβαίνει διότι, οι χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν την επέκταση παγετώνων από τις πολικές περιοχές προς τα μικρότερα γεωγραφικά πλάτη. Αυτό συνεπάγεται τη μετατόπιση της τροχιάς των τροπικών κυκλώνων προς μικρότερα πλάτη και περαιτέρω τη μείωση των βροχοπτώσεων στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη καθώς και την αύξησή τους στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Μια άλλη πιθανή εξήγηση για την αύξηση αυτή αποδίδεται στην κυκλοφορία των θαλάσσιων ρευμάτων βάθους.

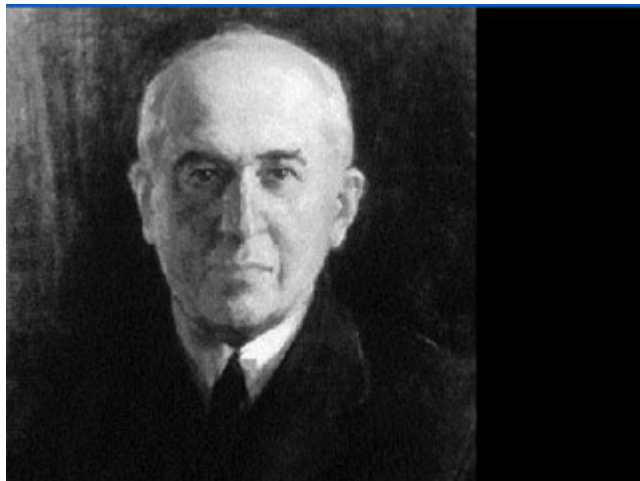
Η πλέον αποδεκτή άποψη, πάντως, η οποία ερμηνεύει πολλές από τις, μεγάλης διάρκειας, μεταβολές του κλίματος είναι αυτή που θεωρεί πως η αιτία των μεταβολών της ακτινοβολίας, κατ' επέκταση και του κλίματος είναι οι μεταβολές της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο. Ένας από αυτούς που τεκμηρίωσε την παραπάνω άποψη ήταν και ο Milutin Milankovitch.

⁴ Βλ. Χ.Σ. Σαχσαμάνογλου – Α.Α. Μπλούτσος, Φυσική Κλιματολογία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1998, σελ.228 κε.

4. Ο Milutin Milankovitch

Ο Milutin Milankovitch γεννήθηκε στις 28 Μαΐου του 1879 στο Dalj της Αυστροουγγρικής αυτοκρατορίας (τη σημερινή Κροατία). Ο πατέρας του, Milanwas, ήταν έμπορος, που πέθανε νωρίς, αφήνοντας πίσω του γυναίκα και έξι παιδιά. Ο Milankovitch ήταν ο μικρότερος. Τις βασικές γνώσεις του απέκτησε σε κατ' οίκον διδασκαλία, καθώς και σε σχολείο δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, στην Osek. Ο δάσκαλός του στα μαθηματικά, Vladimir Varićak, αργότερα μέλος της Γιουγκοσλαβικής Ακαδημίας Επιστημών, παρατήρησε τις εξαιρετικές ικανότητές του στη μαθηματική επιστήμη, παραμένοντας δια βίου φίλος και σύμβουλός του.

Το 1896, ο Milankovitch γράφτηκε στην Τεχνική Σχολή της Βιέννης, όπου σπούδασε πολιτικός μηχανικός. Οκτώ χρόνια αργότερα τελείωσε τη διδακτορική του διατριβή στις τεχνικές επιστήμες, με τον τίτλο «Θεωρία των καμπυλών πίεσης», η οποία δημοσιεύθηκε το 1907. Στην επιτυχημένη καριέρα του ως πολιτικός μηχανικός ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για την προβληματική του οπλισμένου σκυροδέματος. Στο πλαίσιο των σχετικών ερευνών, έλυσε ένα από τα δυσκολότερα θεωρητικά προβλήματα της ειδικότητάς του, αυτό της ευστάθειας των κατασκευών τοιχοποιίας. Σήμερα, αναγνωρίζεται ότι έφτασε στο υψηλότερο θεωρητικό επίπεδο στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.



Εικόνα 1: Πορτραίτο του Milutin Milankovitch (1879-1958) ⁵

⁵Βλ. www.amnh.org/education/resources/rfl/web/essaybooks/earth/p_milankovitch.htm, έργο της Paja Jovanović, 1943

Ωστόσο, στο ζενίθ της επιστημονικής του καταξίωσης εγκατέλειψε την καριέρα του επιτυχημένου μηχανικού και το 1909 μετακόμισε στη Σερβία για να γίνει καθηγητής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών στο Πανεπιστήμιο του Βελιγραδίου. Δυστυχώς, το πολυσήμαντο έργο του διακόπτεται από πολυτάραχα ιστορικά γεγονότα. Συγκεκριμένα, η πρώτη του δημοσίευση έγινε το 1912, κατά τον Α΄ Βαλκανικό Πόλεμο. Το 1914, όταν ξέσπασε ο Α΄ Παγκόσμιος Πόλεμος, οι Αυστρο-Ουγγρικές αρχές τον συνέλαβαν. Όμως, παρά τις συνεχείς αντιξοότητες στο συγγραφικό και ερευνητικό του έργο, ολοκληρώνει – μεσούντος του πολέμου- το πρώτο του βιβλίο, με τίτλο: «Μαθηματική θεωρία θερμικών φαινομένων παραγόμενων από την ηλιακή ακτινοβολία». Ασφαλές πνευματικό του καταφύγιο υπήρξε – μετά τη χορήγηση ειδικής άδειας – η βιβλιοθήκη της Ουγγρικής Ακαδημίας Επιστημών, με έδρα τη Βουδαπέστη. Για την πληρότητα της θεωρίας του ασχολήθηκε ακαταπόνητα σαράντα περίπου χρόνια. Ενδεικτικά, στο περιοδικό «Φωνή της Σερβικής Ακαδημίας Επιστημών», περιλαμβάνεται δημοσίευσμά του, με τίτλο: «Συμβολή στη Μαθηματική Θεωρία του Κλίματος». Με το εν λόγω δημοσίευμα ξεκίνησε να διαμορφώνει μια νέα αστρονομική θεωρία για την αλλαγή του κλίματος, ενώ τα επόμενα χρόνια εισήγαγε τα μαθηματικά στην κλιματολογία και άρχισε την αριθμητική μοντελοποίηση του κλίματος. Με τον τρόπο αυτό κατέδειξε την εξάρτηση των επιστημών της γης από την ουράνια μηχανική. Δέκα χρόνια αργότερα, το 1922, ο Wegener αντιλήφθηκε ότι ο Milankovitch ήταν ένας ισχυρός σύμμαχος, που υποστήριξε τη θεωρία του Korpen σχετικά με το κλίμα του γεωλογικού παρελθόντος. Αυτό υπήρξε ουσιαστικά το τέλος του γεωκεντρικού αιτίου του κλίματος.

Σήμερα αναγνωρίζεται, διεθνώς, ότι ο Milutin Milankovitch είναι ο ιδρυτής της σύγχρονης αστρονομικής θεωρίας της κλιματικής αλλαγής. Διότι, συνειδητοποίησε ότι η αστρονομική θεωρία είχε περιπέσει σε ανυποληψία, όχι λόγω κάποιας εγγενούς αδυναμίας, αλλά λόγω της ανεπαρκούς γνώσης της ουράνιας μηχανικής, ατελών μαθηματικών δεξιοτήτων και έλλειψης αξιόπιστων στρωματογραφικών αρχείων. Ήταν, εξ αρχής, σίγουρος ότι η λύση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής ήταν σύνθετη και πολύπλοκη και βρισκόταν στα γνωστικά πεδία πολλών επιστημονικών κλάδων.

Σε αντίθεση με τον Γάλλο μαθηματικό Joseph Adhemar και τον Σκωτσέζο φυσιοδίφη James Croll, ο οποίος διατύπωσε αρχικά την αστρονομική θεωρία του κλίματος της Γης, ο Milankovitch δεν περιορίστηκε στο πρόβλημα της εποχής των παγετώνων (Ice Age). Η βασική πρόθεσή του ήταν να συμπεριλάβει την κλιματική αλλαγή ως μια γενική σχέση Ήλιου - πλανήτη. Σε αυτό το πλαίσιο ολοκλήρωσε την ιδέα ότι οι παραλλαγές των κοσμικών τροχιακών ωθούν την ηλιακή ακτινοβολία του πλανήτη, προκαλώντας κλιματικές μεταβολές στην κατεύθυνση των παγετώνων.

Είχε το όραμα της μοντελοποίησης όλων των ηλιακών πλανητών του συστήματος, στο πλαίσιο του οποίου η Γη συνιστά μόνο μια ειδική περίπτωση. Στην καρδιά αυτού του συστήματος ήταν εγκατεστημένος ο Ήλιος, όχι η Γη, και ως εκ τούτου οι απόψεις του συνέθεταν μια ηλιοκεντρική θεωρία. Με τον τρόπο αυτό ήταν ο πρώτος που υπολόγισε τις κλιματικές συνθήκες στον Ερμή, στην Αφροδίτη, στον Άρη και στη Σελήνη, και τα αποτελέσματα του εξακολουθούν να είναι σεβαστά.

Μετά από αυτή την προσέγγιση, ο Milankovitch δημιούργησε τον περίφημο «Κανόνα της ηλιακής ακτινοβολίας», δηλαδή μια γενική αστρονομική θεωρία κλίματος που ισχύει για πλανήτες με σταθερή κρούστα. Είναι μια ολοκληρωμένη μαθηματική θεώρηση των επιπτώσεων της ηλιακής ακτινοβολίας στα κλίματα των πλανητών του ηλιακού συστήματος. Ειδικότερα, εκτιμά ότι το θεωρητικό κλίμα ενός πλανήτη καθορίζεται μόνο από την ηλιακή ακτινοβολία. Η εξήγηση της δυναμικής ηλιακής ακτινοβολίας προέκυψε με αστρονομικούς υπολογισμούς, παρόμοιους με τις προβλέψεις των ηλιακών και σεληνιακών εκλείψεων (συνήθως ονομάζεται και «κανόνας των εκλείψεων»). Συγκεκριμένα, συνέδεσε τον Ήλιο με τη Γη, την ουράνια μηχανική με τις επιστήμες της Γης και την ανασυγκρότηση του παρελθόντος με την πρόβλεψη του μέλλοντος.

Στο διάστημα της επιστημονικής κριτικής σχετικά με την εγκυρότητα της «θεωρίας του Milutin Milankovitch», μια ουσιαστική συμβολή στην τελική της αποδοχή δόθηκε από τον βέλγο αστρονόμο και κλιματολόγο Berger. Ήταν ο πρώτος που ουσιαστικά συνέχισε το έργο του Milankovitch για την τροχιακή ώθηση. Ενδεικτικά, η καμπύλη της ηλιακής ακτινοβολίας που διατύπωσε ο Milankovitch με βάση την ουράνια μηχανική,

εξελίχθηκε από τον Berger, ο οποίος υπολόγισε ακριβώς τους κύκλους της παλαιοκλιματικής ηλιακής ακτινοβολίας. Τελικά, οι καμπύλες ηλιακής ακτινοβολίας του Berger είναι το αποκορύφωμα της προσπάθειας δύο αιώνων να γίνει πιο αξιόπιστη η λύση της τροχιακής γεωμετρίας στο πρόβλημα της αλλαγής του κλίματος.

Σχεδόν την ίδια περίοδο, το 1976, το παγκόσμιο παλαιοκλιματικό πρόγραμμα CLIMAP απέδειξε, γεωλογικά, τη σημασία της ώθησης των τροχιακών του Milankovitch στις κλιματικές μεταβολές. Περίοδοι που βρέθηκαν από το CLIMAP είναι πολύ κοντά στις περιόδους που προέβλεψε ο Berger, κατά τον υπολογισμό των διακυμάνσεων των παραμέτρων του Milankovitch. Μετά την τροποποίηση της θεωρίας του Milankovitch από τον Berger και την επιβεβαίωσή της από το CLIMAP, οι επιστήμες της Γης κινούνται γύρω από τους κύκλους των Milankovitch και Berger. Τα μέλη του προγράμματος CLIMAP άθροισαν τις προηγούμενες υποθέσεις, που είχαν την τάση να κατανοήσουν το κλιματικό πρόβλημα στο πλαίσιο της κανονικής επιστήμης (μηχανισμοί που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο) και κατέληξαν μεταξύ αυτών των μηχανισμών στο ότι μόνο η τροχιακή υπόθεση έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να προβλέπει τις συχνότητες των μεγάλων παγετώνων της Πλειστόκαινης εποχής.

Η στρωματογραφία για την Πλειστόκαινη εποχή αντανakλά την επίδραση των τριών αστρονομικών κύκλων. Γεωλογικοί κύκλοι των διαφόρων θαλάσσιων και ηπειρωτικών παλαιοκλιματικών αρχείων έχουν τον ίδιο κλιματολογικό ρυθμό. Το ίδιο συμβαίνει και με στοιχεία από βαθιά θαλάσσια ιζήματα, λιμναία ιζήματα, σπηλαιothέματα και κομμάτια πάγου. Οι κύκλοι στη θεωρία του Milankovitch ορίζονται και για παλαιότερες γεωλογικές περιόδους.

Ήταν επίσης ο πρώτος που υπολόγισε τη θερμοκρασία στους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος, ανέπτυξε τη θεωρία για την κίνηση των πόλων της Γης, δούλεψε πάνω στην αναμόρφωση του Ιουλιανού ημερολογίου και περιστασιακά πάνω στη θεωρία της σχετικότητας ⁶.

⁶ Βλ. Z. Knežević, Milutin Milanković and the astronomical theory of climate changes, Astronomical Observatory, Belgrade, DOI: 10.1051/epn/2010301

Ο Milankovitch εξελέγη μέλος της Σερβικής Ακαδημίας Επιστημών και Τεχνών το 1920, πλήρες μέλος το 1924, μέλος της Γιουγκοσλαβικής Ακαδημίας Επιστημών και Τεχνών το 1925 και μέλος της Γερμανικής Ακαδημίας φυσιοδιφών "Leopoldina». Διετέλεσε, επίσης μέλος πολλών επιστημονικών εταιρειών και συναφών οργανισμών, τόσο στη Γιουγκοσλαβία όσο και στο εξωτερικό. Σχολεία, δρόμοι και αστρονομικές εταιρείες στη Σερβία, τιμητικά, φέρουν το όνομά του. Πέθανε το 1978 ⁷.

5. Χρήσιμοι όροι αστρονομίας και μαθηματικών

Για την πληρέστερη κατανόηση της αναπτυσσόμενης θεματικής κρίθηκε σκόπιμη η ερμηνευτική απόδοση των παρατιθέμενων βασικών εννοιών.

5.1 Η εκκεντρότητα

Η Γη περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο με περίοδο περίπου 365,25 ημερών, με ελαφρώς ελλειπτική τροχιά, **εκκεντρότητα** $e=0,0167$ και μεγάλο ημιάξονα $a=149.598.261$ km.

Η *εκκεντρότητα* είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει κάθε κωνική Τομή και υπολογίζει πόσο η κωνική τομή "απέχει" από τον τέλειο κύκλο. Ειδικότερα, η εκκεντρότητα:

- i. ενός κύκλου είναι μηδέν.
- ii. μιας έλλειψης είναι μεγαλύτερη του μηδενός και μικρότερη του 1.
- iii. μιας παραβολής είναι ακριβώς 1.
- iv. μιας υπερβολής είναι μεγαλύτερη του 1
- v. μιας ευθείας τείνει στη μονάδα.

Η εκκεντρότητα δίνεται από τον εξής μαθηματικό τύπο:

$$e = \sqrt{1 - k \frac{\beta^2}{\alpha^2}}$$

όπου α είναι το μήκος του μεγάλου ημιάξονα της κωνικής τομής, β το μήκος του μικρού ημιάξονα, και το k είναι ίσο με +1 για την έλλειψη, 0 για την παραβολή και -1 για την υπερβολή.

⁷Βλ. <http://www.serbiaconsulatenyc.com/en/greatscientists.html#MilutinMilankovic>)

5.2 Η λόξωση

Το επίπεδο της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο τέμνει την ουράνια σφαίρα κατά ένα μέγιστο κύκλο, που ονομάζεται εκλειπτική (ecliptic). Η διάμετρος της ουράνιας σφαίρας που είναι κάθετη προς την εκλειπτική ονομάζεται άξονας της εκλειπτικής και τα σημεία στα οποία τέμνει την ουράνια σφαίρα ονομάζονται βόρειος και νότιος πόλος της εκλειπτικής. Ο άξονας περιστροφής της Γης δεν είναι παράλληλος προς τον άξονα της εκλειπτικής αλλά σχηματίζει γωνία $23,5^\circ$ περίπου. Η γωνία αυτή ονομάζεται **λόξωση** της εκλειπτικής⁸.

5.3 Η ισημερία

Ισημερία είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η διάρκεια της ημέρας και της νύχτας είναι ίσες. Αυτό συμβαίνει στις:

- ο στις 21 ή 22 Μαρτίου, δηλαδή στην εαρινή ισημερία
- ο στις 22 ή 23 Σεπτεμβρίου, δηλαδή στη φθινοπωρινή ισημερία.

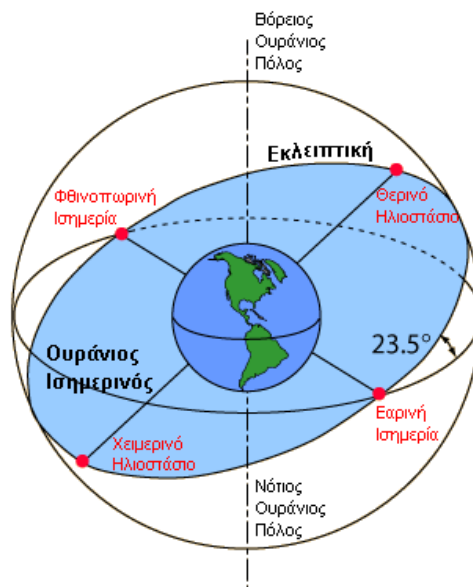
Οι ονομασίες *εαρινή* και *φθινοπωρινή* ισημερία ανάγονται στην εύκρατη ζώνη του βόρειου ημισφαιρίου. Στις αντίστοιχες ημερομηνίες στο νότιο ημισφαίριο υπάρχουν οι αντίθετες εποχές, ενώ στις δύο πολικές και στην τροπική ζώνη δεν υπάρχει αυτή η διαφοροποίηση εποχών. Ειδικά, στην αστρονομία *ισημερία* καλείται η αστρική ημέρα, κατά την οποία το κέντρο του ηλιακού δίσκου βρίσκεται ίσο χρονικό διάστημα πάνω και κάτω από τον ορίζοντα, διαγράφει δηλαδή ίσα τόξα (ημερήσιο και νυκτερινό), κατά τη διάρκεια της οποίας οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν με γωνία 90° στον ισημερινό, παρουσιάζοντας έτσι μηδενική απόκλιση.

Το φαινόμενο οφείλεται στην περιφορά της γης γύρω από τον ήλιο και στην κλίση του άξονα περιστροφής της. Καθώς η γη κινείται γύρω από τον ήλιο και επειδή ο άξονάς της δεν είναι κάθετος στο επίπεδο περιφοράς, η διάρκεια της ημέρας αλλάζει. Δύο φορές όμως το χρόνο η γη βρίσκεται σε τέτοια θέση, που οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν εντελώς κάθετα στον ισημερινό, οπότε η διάρκεια της ημέρας είναι ίδια με αυτή της νύχτας.

⁸ Βλ. Χ. Βάρβογλη – Γ.Χ.Σειραδάκη, Εισαγωγή στη σύγχρονη αστρονομία, εκδόσεις Γαρταγάνη, έκδ. τρίτη, Θεσσαλονίκη 1994, σελ. 31

5.4 Το ηλιοστάσιο

Ηλιοστάσιο ή Τροπή ονομάζονται τα δύο σημεία της εκλειπτικής στα οποία βρίσκεται ο Ήλιος στις 22 Ιουνίου (Θερινό Ηλιοστάσιο) και στις 22 Δεκεμβρίου (Χειμερινό Ηλιοστάσιο). Τότε έχει τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη απόκλιση του: $23^{\circ} 27'$ και $-23^{\circ} 27'$, αντίστοιχα. Όταν ο Ήλιος βρίσκεται στα Ηλιοστάσια φαίνεται να έχει σταθερή θέση ως προς την απόκλιση του. Εκεί οφείλεται το όνομα "ηλιοστάσιο". Ενώ το όνομα "Τροπή" οφείλεται στο γεγονός ότι ο Ήλιος αλλάζει φορά κίνησης. Συγκεκριμένα, ενώ τις ημέρες πριν το θερινό ηλιοστάσιο, έχει ανοδική πορεία, τις ημέρες που έπονται αυτού έχει καθοδική. Η ευθεία που ενώνει τα δύο ηλιοστάσια λέγεται γραμμή των τροπών και είναι κάθετη στη γραμμή των ισημεριών⁹.



Σχήμα 2: Η Ουράνια Σφαίρα¹⁰

⁹ Βλ. <http://www.astronomia.gr/wiki/index.php?title=Ηλιοστάσιο>

¹⁰Βλ.http://www.astronomia.gr/wiki/index.php?title=Αρχείο:Celestial_Sphere.PNG

6. Η αστρονομική θεωρία του Milankovitch (ή ο κανόνας της ηλιακής ακτινοβολίας)

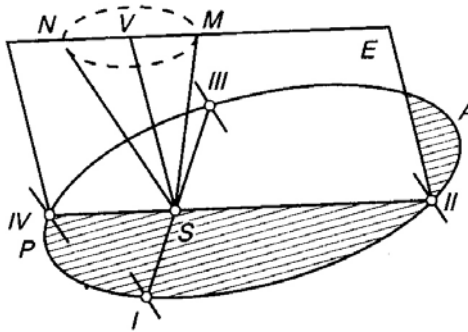
Αν υποθέσουμε ότι μια καταγραφή της μεταβλητότητας του κλίματος της Γης ήταν διαθέσιμη για όλη την ιστορία της, τότε, το εξιδανικευμένο φάσμα διακυμάνσής της θα έδειχνε τη μεγάλη ποικιλομορφία της με το χρόνο.

Το φάσμα αυτό θα αποτελείτο από κορυφές περιοδικών, ημιπεριοδικών ή απεριοδικών φαινομένων, που θα προσπαθούσαν να ερμηνεύσουν κάποιες από τις μεταβολές αυτές. Για παράδειγμα, η κορυφή που αντιπροσωπεύει τη μία μέρα συνδέεται με την ημερήσια περιστροφή της Γης γύρω από τον εαυτό της και την εναλλαγή μέρας – νύχτας. Στις τρεις έως επτά ημέρες επικρατούν συνοπτικές διαταραχές κυρίως σε μεσαία πλάτη. Στην κορυφή των δεκατεσσάρων ημερών κυριαρχούν οι παλίρροιες του φεγγαριού. Η ελαφρώς αυξημένη καμπύλωση του φάσματος στα 100-400 χρόνια συνδέεται με τη Μικρή Εποχή των Παγετώνων. Η κορυφή κοντά στα 2500 χρόνια προέκυψε πιθανώς, λόγω της ψύξης που παρατηρήθηκε μετά βελτίωση του κλίματος, στα τέλη της περιόδου των πάγων (Climatic Optimum). Οι επόμενες τρεις κορυφές των 20.000, 40.000 και 100.000 χρόνων συνδέονται με τα παγετώδη και μεσοπαγετώδη στάδια της τεταρτογενούς περιόδου και αντιπροσωπεύουν τις αστρονομικές διακυμάνσεις των τροχιακών παραμέτρων της Γης. Τέλος, οι κορυφές κοντά στα 45 και 350 εκατομμύρια χρόνια μπορεί να σχετίζονται με παγετώνες λόγω ορογένεσης και τεκτονικών επιπτώσεων της εκτροπής των ηπείρων και των λιθοσφαιρικών πλακών. Η αστρονομική θεωρία του Milankovitch επικεντρώνεται συνεπώς σε έναν από τους πολύ γνωστούς μηχανισμούς ώθησης του κλιματικού συστήματος, τις διακυμάνσεις των τροχιακών παραμέτρων της Γης και εξήγησε την ύπαρξη των περιόδων παγετώνων.

Η θεωρία του Milankovitch ή κύκλοι του Milankovitch, αποτελείται από δύο θεματικές συνιστώσες: α) την αστρονομική και β) τη φυσική. Ειδικότερα, στο αστρονομικό μέρος του έργου του υπολογίζονται οι μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας της Γης. Κατά την έρευνά του, ενσωμάτωσε τρεις αστρονομικές περιοδικότητες, τρεις μικρές μεταβολές στη γεωμετρία Γης – Ήλιου, οι οποίες αλλάζουν την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται κάθε ημισφαίριο και την εποχικότητα ¹¹.

¹¹ Βλ. *A. Petrović, Cosmic Cycles and methodological triangle, Milanković's unscrambling of Pleistocene ice ages, Faculty of Philology and Arts, Kragujevac, Republic of Serbia*

Στο σχήμα 3 απεικονίζονται οι τρεις τροχιακές παράμετροι της γης. Όπου S είναι ο Ήλιος, το τμήμα SV είναι κάθετο στην ελλειπτική τροχιά της Γης και το τμήμα SN είναι παράλληλο στον άξονα περιστροφής της Γης. Η γωνία VSN δείχνει την κλίση του άξονα περιστροφής ή τη λόξωση της εκλειπτικής. Το επίπεδο E, το οποίο περιλαμβάνει τον άξονα και τα ηλιοστάσια, κινείται γύρω από τον άξονα SV και συμπληρώνει μια πλήρη περιστροφή σε 26.000 χρόνια περίπου (Πλατωνικό έτος).

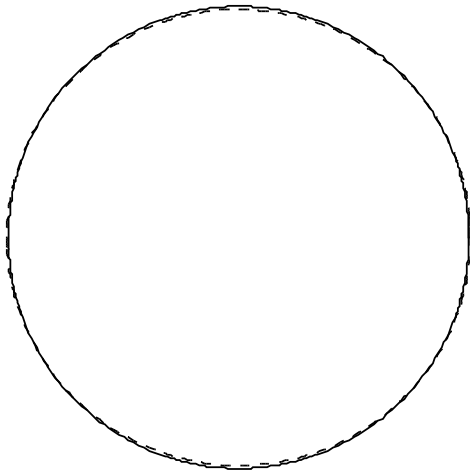


Σχήμα 3: Οι 3 αστρονομικοί μηχανισμοί ¹²

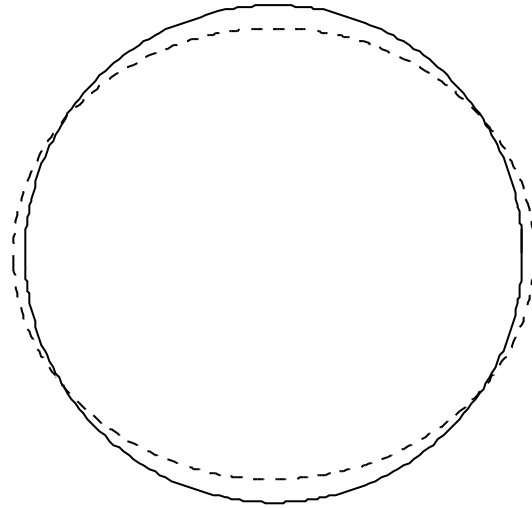
Οι τρεις μηχανισμοί, που σχετίζονται με τις κλιματικές αλλαγές, όπως διατυπώθηκαν από τον Milutin Milankovitch, είναι η διακύμανση της εκκεντρότητας, η μεταβολή της λόξωσης και η μετάπτωση των ισημεριών. Αναλυτικότερα:

1. Η εκκεντρότητα (eccentricity) της τροχιάς της Γης, κατά την περιστροφή της γύρω από τον Ήλιο, μεταβάλλεται από σχεδόν 0 έως περίπου 0.06. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η σχεδόν κυκλική τροχιά να μεταπίπτει σε ένα ελαφρώς επίμηκες ελλειψοειδές σχήμα. Παρακάτω παρατίθενται τα συγκριτικά σχήματα μεταβολής μιας κυκλικής τροχιάς σε ελλειψοειδή, με εκκεντρότητα 0.2 (σχήμα 4) και εκκεντρότητα 0.5 (σχήμα 5). Η διάκριση μεταξύ των δύο σχημάτων για μικρότερη εκκεντρότητα θα ήταν αδύνατη με βάση την ανάλυση της εικόνας, γι' αυτό και δεν παρατίθενται εικόνες με το εύρος μεταβολής της εκκεντρότητας της γήινης τροχιάς.

¹² Βλ. Z. Knežević, Milutin Milanković and the astronomical theory of climate changes, Astronomical Observatory, Belgrade, DOI: 10.1051/ept/2010301



Σχήμα 4: Τροχιά Γης με εκκεντρότητα 0.2 (διακεκομμένη γραμμή) σε σύγκριση με έναν πλήρη κύκλο (κλειστή καμπύλη).¹³



Σχήμα 5: Τροχιά Γης, εκκεντρότητας 0.5 (διακεκομμένη γραμμή) σε σύγκριση με πλήρη κύκλο (κλειστή καμπύλη).¹⁴

Το φαινόμενο οφείλεται στη βαρυτική έλξη, που δέχεται η Γη από άλλους πλανήτες και από τη Σελήνη. Έχει περιοδικότητα, που εναλλάσσεται, μεταξύ 100.000 ετών και 400.000 ετών και επηρεάζει τον κύκλο των εποχών. Συγκεκριμένα, όταν η Γη είναι πιο κοντά στον Ήλιο, δέχεται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Για παράδειγμα, αν ένα ημισφαίριο βρεθεί πλησιέστερα στον Ήλιο, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, τότε ο χειμώνας είναι λιγότερο βαρύς. Εάν η Γη τον προσεγγίσει κατά το καλοκαίρι, τότε, όμως, το ημισφαίριο γίνεται σχετικά πιο θερμό. Επιπλέον, μια πιο έκκεντρη τροχιά θα αλλάξει τη διάρκεια των εποχών κάθε ημισφαιρίου.

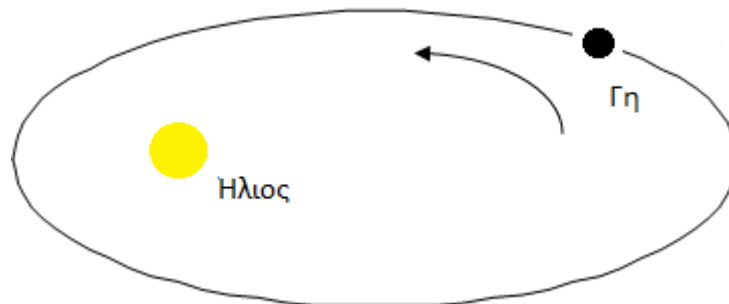
Η μεταβολή της εκκεντρότητας, όπως προαναφέρθηκε επηρεάζει την απόσταση της Γης από τον Ήλιο. Ειδικότερα, όταν η απόσταση αυτή είναι η μικρότερη δυνατή (147.098.074 χλμ.), η Γη βρίσκεται στο περιήλιο P της τροχιάς της, ενώ όταν είναι η πλέον απομακρυσμένη βρίσκεται στο αφήλιο A (βλ. σχήμα 3). Αυτό διαφοροποιεί το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας, που έρχεται στη Γη, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο του

¹³ Σχεδιάστηκε από τη Μηναιΐδου Κλεοπάτρα

¹⁴ Σχεδιάστηκε από τη Μηναιΐδου Κλεοπάτρα

τετραγώνου της απόστασης Γης - Ήλιου. Τα σημεία του ορίζοντα I και III (βλ. σχήμα 3), χαρακτηρίζουν τις ισημερίες, την έναρξη της άνοιξης και του φθινοπώρου αντίστοιχα, ενώ τα σημεία II και IV, απεικονίζουν αντίστοιχα το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο του βόρειου ημισφαιρίου (αντίθετα προς τα ισχύοντα για το νότιο ημισφαίριο).

Δεδομένου ότι η εκκεντρότητα (e) της τροχιάς της Γης περιορίζεται σ' ένα στενό φάσμα, κυμαινόμενο από το 0 έως περίπου το 0.06, αυτό συνεπάγεται τον οριακό επηρεασμό του συνολικού ποσού ακτινοβολίας που λαμβάνει η Γη. Κυρίως, όμως, επηρεάζει σημαντικά τη διάρκεια των εποχών. Συγκεκριμένα, η διάρκεια των εποχών είναι ανάλογη με το εμβαδό που σαρώνει το διάνυσμα θέσης της Γης μεταξύ ισημεριών και ηλιοστασίων. Έτσι, όταν η εκκεντρότητα είναι μεγάλη, τότε οι εποχές που εμφανίζονται όταν ο πλανήτης είναι στο πιο απομακρυσμένο σημείο της τροχιάς του (αφήλιο) θα είναι μεγαλύτερες σε διάρκεια (βλ. σχήμα 6).

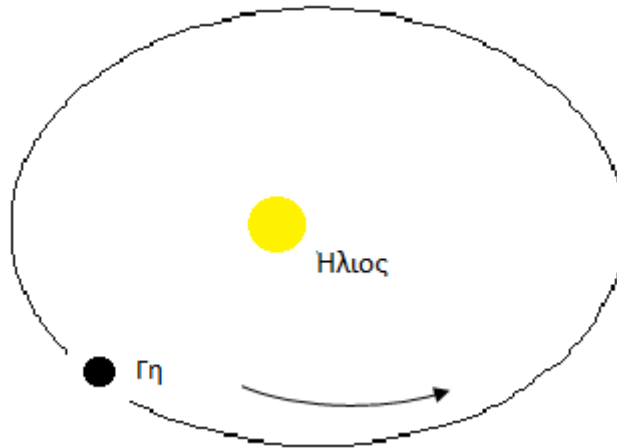


Σχήμα 6: Μέγιστη εκκεντρότητα γήινης τροχιάς, με τη Γη να βρίσκεται κοντά στο αφήλιο.¹⁵

Σήμερα, ο χειμώνας και το φθινόπωρο του βόρειου ημισφαιρίου εμφανίζονται στο περιήλιο. Αυτό παρέπεται ότι οι ανωτέρω εποχές είναι λίγο συντομότερες από την άνοιξη και το καλοκαίρι. Τη χρονιά 2006, το καλοκαίρι ήταν κατά 4,66 μέρες μεγαλύτερο από το χειμώνα και η άνοιξη είχε διάρκεια 2,9 μέρες μεγαλύτερη από το φθινόπωρο. Μέσα στα επόμενα 10.000 χρόνια, οι χειμώνες του βόρειου ημισφαιρίου θα γίνουν προοδευτικά μεγαλύτεροι σε διάρκεια και τα καλοκαίρια μικρότερα. Η θερμοκρασία του πλανήτη, όμως, δε θα ελαττωθεί

¹⁵ Σχεδιάστηκε από τη Μηναιΐδου Κλεοπάτρα

λόγω αυτού του γεγονότος, καθώς η εκκεντρότητα της τροχιάς της Γης θα έχει πέσει τότε στη μισή τιμή από τη σημερινή, κάτι που σημαίνει μικρότερη μέση απόσταση από τον Ήλιο και μεγαλύτερες θερμοκρασίες λόγω μεγαλύτερης εισροής ηλιακής ενέργειας ¹⁶, βλ σχήμα 7.



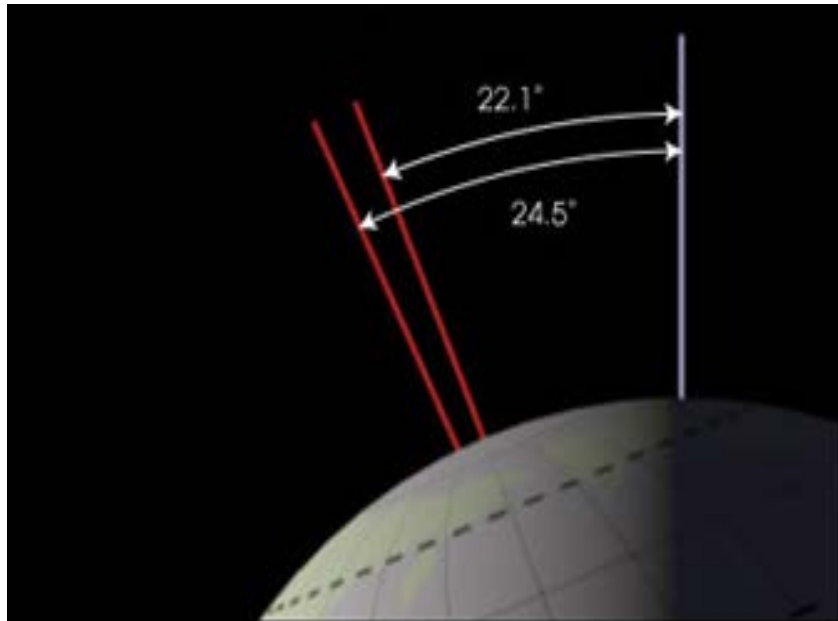
Σχήμα 7: Μικρή εκκεντρότητα γήινης τροχιάς, με τη Γη να παρουσιάζει μειωμένη μέση απόσταση από τον Ήλιο, σε κάθε σημείο της τροχιάς της. ¹⁷

2. Η κλίση του άξονα της Γης υφίσταται λόξωση (ή απόκλιση) (obliquity), από $22,1^\circ$ έως $24,5^\circ$. Τώρα βρισκόμαστε στις $23,5^\circ$ δηλαδή κοντά στη μέση τιμή. Η απόκλιση είναι η γωνία μεταξύ του άξονα περιστροφής της γης και της καθέτου στο επίπεδο περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο. Το φαινόμενο αυτό έχει περιοδικότητα 41.000 ετών περίπου. Παρόλο που οι μεταβολές στη λόξωση είναι μικρές, ωστόσο προκαλούν σημαντικές αλλαγές στο κλίμα. Έτσι, μια αύξηση στην κλίση του άξονα μεγαλώνει τη γωνία με την οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία στους πόλους, αυξάνοντας τη θερμότητα που φτάνει στην επιφάνεια της Γης και επομένως τη θερμοκρασία της. Για μεγάλη κλίση, η εποχικότητα στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη γίνεται πιο ακραία. Έτσι, οι εποχές γίνονται πιο οριακές, δηλαδή παρατηρούνται θερμότερα καλοκαίρια και ψυχρότεροι

¹⁶ Βλ. <http://el.wikipedia.org/wiki/Εκκεντρότητα>

¹⁷ Σχεδιάστηκε από Μηναιΐδου Κλεοπάτρα

χειμώνες. Μια μείωση στην κλίση σημαίνει λιγότερο έντονες εποχές, δηλαδή πιο ήπιους χειμώνες και πιο ήπια καλοκαίρια. Οι αλλαγές στην κλίση έχουν μικρή επίδραση στις τροπικές περιοχές και μέγιστα αποτελέσματα στους πόλους.



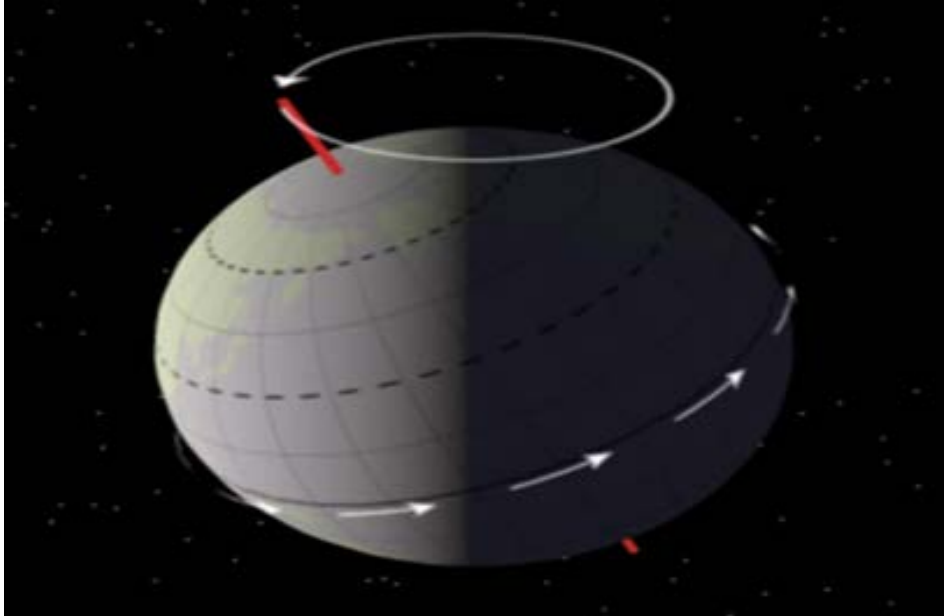
Εικόνα 6: Διακύμανση της λόξωσης από 22.1° σε 24.5° ¹⁸

3. Η μετάπτωση των ισημεριών (precession) έχει περίοδο περίπου 19.000 - 23.000 χρόνια. Ο άξονας της Γης διαγράφει τον κώνο NSM, όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Πρόκειται για ένα σύνθετο φαινόμενο, που επηρεάζει την κατεύθυνση του άξονα της Γης και εξαρτάται από τον κλονισμό του άξονα περιστροφής. Αυτός ορίζεται σαν η γωνία Λ , μεταξύ της γραμμής που ενώνει τη γη με τον ήλιο την εαρινή ισημερία και της γραμμής που τους ενώνει στο περιήλιο.

Αυτή η αλλαγή του άξονα μετατοπίζει τις ημερομηνίες του περιηλίου και του αφηλίου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η εποχική αντίθεση στο ένα ημισφαίριο και να μειώνεται στο άλλο. Επίσης, οι ισημερίες δε συμβαίνουν πάντα την ίδια ημέρα του ημερολογίου, αλλά βαθμιαία αλλάζουν.

¹⁸Βλ. http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Milankovitch/milankovitch_2.php, από τον Robert Simmon, NASA GSFC

Σε 11.000 χρόνια από τώρα, ο Βόρειος Πόλος της Γης δε θα είναι απέναντι από τον Πολικό Αστέρα, αλλά θα εντοπίζεται κοντά στο αστέρι Vega. Επομένως, ο άξονας της γης θα έχει μετατοπιστεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το βόρειο ημισφαίριο να έχει χειμώνα τον Ιούνιο και καλοκαίρι το Δεκέμβριο.



Εικόνα 7: Μετάπτωση ισημεριών ¹⁹

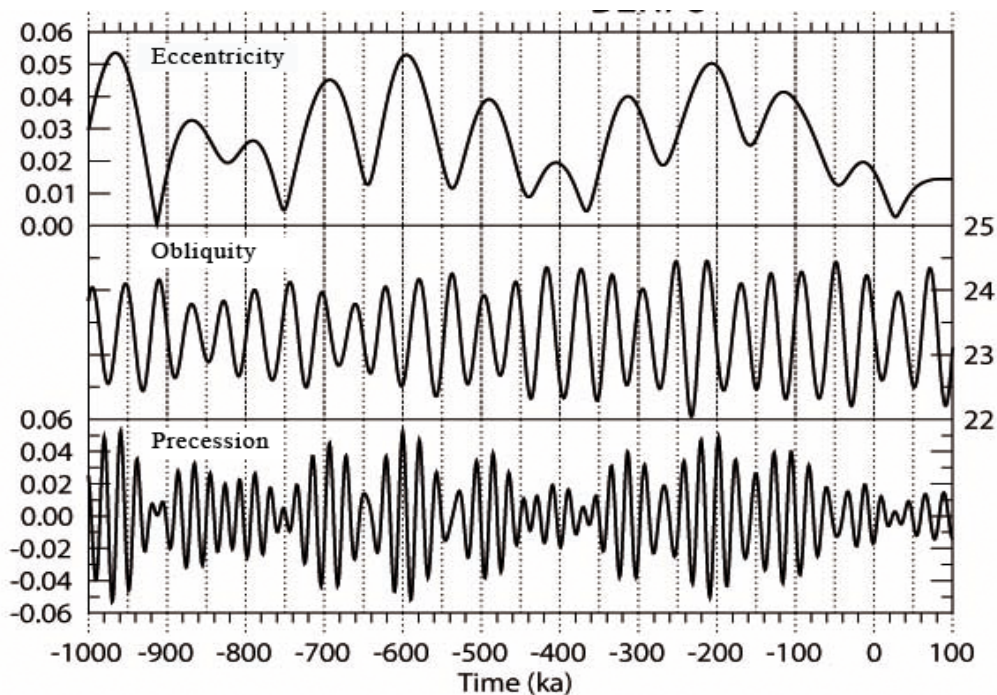
Η παράμετρος της μετάπτωσης των ισημεριών σε συνδυασμό με την εκκεντρότητα μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές ~15% στην καλοκαιρινή ροή ακτινοβολίας στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Η συνδυασμένη δράση των τριών τροχιακών παραμέτρων μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στην εποχική ροή ακτινοβολίας μέχρι ~30% στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Ο Milankovitch, λοιπόν, κατέληξε στο συμπέρασμα πως ο συνδυασμός των ανωτέρω τριών κύκλων έχει επιπτώσεις στη σχετική ένταση του καλοκαιριού και του χειμώνα, και θεωρείται ότι μπορεί να ελέγχει την αύξηση και την υποχώρηση των παγόβουνων. Τα δροσερά καλοκαίρια στο βόρειο ημισφαίριο, στα μέρη με περισσότερη στεριά, επιτρέπουν στο χιόνι και στον πάγο να διατηρούνται μέχρι και τον επόμενο χειμώνα. Αυτό

¹⁹Βλ. http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Milankovitch/milankovitch_2.php, από τον Robert Simmon, NASA GSFC

βοηθάει στην ανάπτυξη μεγάλων παγόβουνων και στη διατήρησή τους για εκατοντάδες έως χιλιάδες χρόνια. Αντιθέτως, τα θερμότερα καλοκαίρια μειώνουν την έκταση των παγόβουνων, γιατί συμβάλλουν στην τήξη τους. Βάσει της θεωρία του Milankovitch, περίοδος χωρίς παγετώνες θα εμφανιστεί ως αποτέλεσμα μεγάλης καλοκαιρινής ροής ακτινοβολίας στο Βόρειο Ημισφαίριο. Η εξέλιξη αυτή θα παρατηρηθεί όταν η απόκλιση είναι μεγάλη και η παράμετρος της μετάπτωσης των ισημεριών είναι θετική και μεγάλη. Αυτός ο συνδυασμός καταγράφηκε περίπου πριν από 10.000 χρόνια όταν το κλίμα ήταν ελαφρώς θερμότερο από το σημερινό. Περίπου 23.000 χρόνια πριν, όταν τα στρώματα πάγου μεγάλωναν γρήγορα προς το τελευταίο μέγιστο, η παράμετρος μετάπτωσης ήταν μεγάλη και αρνητική και η απόκλιση ήταν κοντά στην ελάχιστη τιμή της (σχήματα 8 & 9).

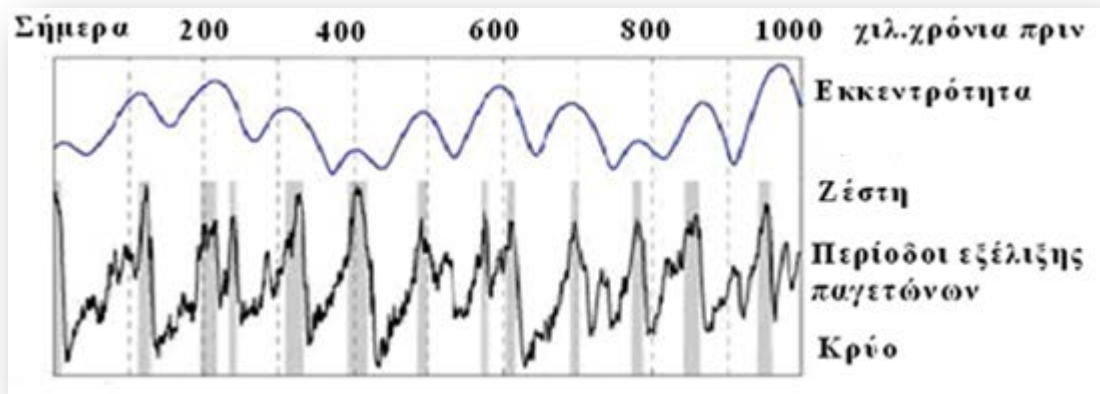
Ακολούθως, παρατίθεται διάγραμμα (βλ. σχήμα 8) με τις μεταβολές της εκκεντρότητας, της λόξωσης και της μετάπτωσης των ισημεριών 1.000 χιλιάδες χρόνια πριν από σήμερα μέχρι και τα επόμενα 100.000 χρόνια. Διαπιστώνουμε, πως υπάρχουν περιοδικότητες της εκκεντρότητας περίπου των 100.000 και 400.000 χρόνων.



Σχήμα 8: Εύρος τιμών εκκεντρότητας, λόξωσης, μετάπτωσης ισημεριών 1000 χιλιάδες χρόνια πριν από σήμερα, με το 0 να αντιστοιχεί στο 1950²⁰

²⁰ Βλ. http://stratus.astr.ucl.ac.be/textbook/chapter5_node12.xml, γραμμένο από τους Goosse H., P.Y. Barriat, W. Lefebvre, M.F.Loutre, V.Zunk

Μπορεί ο κύκλος των 21.000 ετών και των 41.000 ετών να παίζει σημαντικό ρόλο στο κλίμα της Γης, αλλά ο κυρίαρχος κύκλος κλίματος φαίνεται να είναι αυτός με περίοδο περίπου 100.000 ετών (βλ. σχήμα 9). Όπως διαπιστώνουμε υπάρχει σημαντική ταύτιση της διακύμανσης της εκκεντρότητας με τη μεταβολή των παγετώνων.



Σχήμα 9: Κύκλοι παγετώνων σε συνάρτηση της εκκεντρότητας²¹

Στο δεύτερο, φυσικό μέρος της θεωρίας του, ο Milankovitch έκανε χρήση φυσικών νόμων για να ανακαλύψει τις σχέσεις μεταξύ ακτινοβολίας και θερμοκρασίας των πλανητών. Συγκεκριμένα, εισήγαγε διάφορες παραμέτρους για τον προσδιορισμό της επίδρασης της ατμόσφαιρας και του εδάφους στη μετατροπή της εισερχόμενης ακτινοβολίας, διεισδύοντας στα πεδία της μετεωρολογίας και της κλιματολογίας. Δεν εξέτασε τα ρεύματα που προκαλούνται από την άνιση θέρμανση της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, έτσι ώστε το κλίμα που υπολόγισε να αντιστοιχεί στο λεγόμενο ηλιακό κλίμα. Ακόμα, προσδιόρισε τις μέσες ετήσιες ηλιακές θερμοκρασίες όλων των γεωγραφικών πλατών 0°- 90°, και την επιρροή της μέσης περιεκτικότητας των υδρατμών των περιοχών αυτών. Στη συνέχεια, περιέγραψε μαθηματικά, την ανταλλαγή θερμότητας στο έδαφος, έχοντας επίγνωση ότι το έδαφος διαδραματίζει σημαντικό κλιματικό ρόλο ως δεξαμενή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και προσδιόρισε το μέσο όρο του ετήσιου θερμικού ισοζυγίου της ατμόσφαιρας.

²¹ Βλ. <http://www.jeffreyfullerton.com/GlobalWarmingTested/>

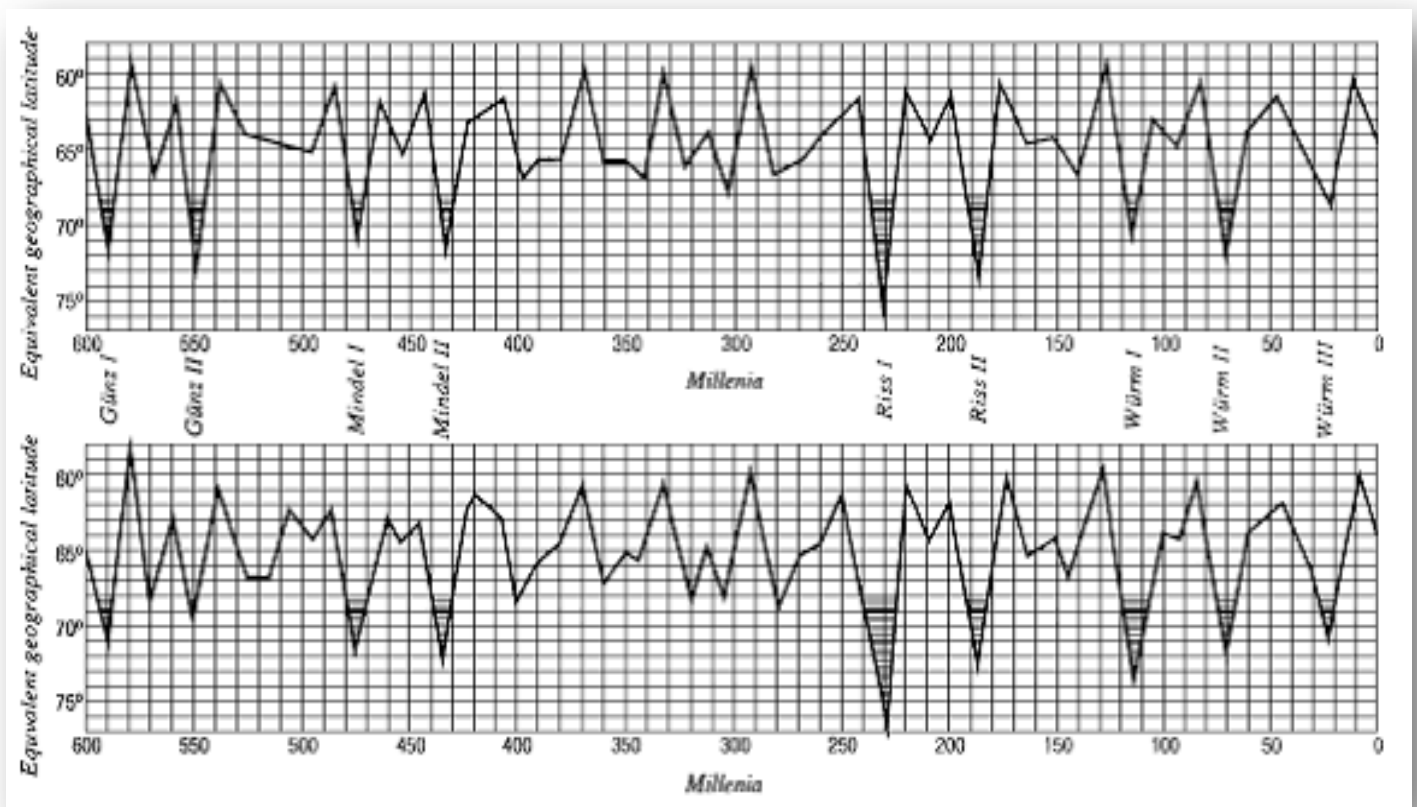
Το κύριο προϊόν της θεωρίας του Milankovitch είναι η ακόλουθη καμπύλη (βλ. σχήμα 10). Με τη βοήθεια ενός μαθηματικού μοντέλου υπολόγισε στα διάφορα γεωγραφικά πλάτη, τις διαφορές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας και την αντίστοιχη θερμοκρασία επιφάνειας, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 600.000 ετών. Προσπάθησε, έπειτα, να συσχετίσει αυτές τις αλλαγές με την αύξηση και την υποχώρηση των εποχών πάγου. Για να το πετύχει αυτό, δέχτηκε ότι οι αλλαγές της ακτινοβολίας και των εποχών σε μερικά γεωγραφικά πλάτη είναι σημαντικότερες για την αύξηση ή τη διάσπαση των παγόβουνων από τις αντίστοιχες σε κάποιες άλλες περιοχές. Η θεωρία του προτείνει, εν τέλει, ότι η αρχική αιτία των Εποχών του Πάγου είναι η ολική θερινή ακτινοβολία που πέφτει στις βόρειες περιοχές (κοντά στις 65°), όπου στο παρελθόν έχουν σχηματιστεί μεγάλα παγόβουνα.

Έτσι, η καμπύλη υπολογίστηκε για τις 65° βόρειο γεωγραφικό πλάτος, με την υπόθεση πως τα βόρεια υψηλά πλάτη είναι πιο ευαίσθητα στις αλλαγές της ακτινοβολίας. Στην καμπύλη αυτή αναγνωρίστηκαν συγκεκριμένα χαμηλά σημεία, τα οποία και ταύτισε με τις τέσσερις ευρωπαϊκές περιόδους παγετώνων (σχήμα 10).

Τα βασικά από τα μειονεκτήματα της θεωρίας του Milankovitch είναι τα εξής:

1. Οι κύκλοι του Milankovitch δεν υπολογίζουν τον παράγοντα άνθρωπος, ο οποίος επηρεάζει το κλίμα περισσότερο από την αλληλεπίδραση Γης - Ηλίου.
2. Πρόσφατα στοιχεία δείχνουν ότι το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα διαδραματίζει ρόλο ενισχυτικό της τροχιακής επίδρασης.
3. Οι ακριβείς μηχανισμοί από τους οποίους εξάγεται ότι, σχετικά μέτριες μεταβολές στην κατεύθυνση της τροχιάς και των αξόνων της Γης οδηγούν σε εντυπωσιακά αποτελέσματα, όπως οι Εποχές του Πάγου, δεν αποδεικνύονται ικανοποιητικώς²².

²² Βλ. <http://www.physics4u.gr/articles/2004/milankovitch.html>



Σχήμα 10: Καμπύλη ακτινοβολίας Milankovitch, στις 65° βόρειο γεωγραφικό πλάτος, για τα τελευταία 600.000 χρόνια²³. Το πάνω σχέδιο έγινε σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Milankovitch, με βάση τους Stockwell²⁴ και Pilgrim, ενώ το δεύτερο βάσει των Le Verrier²⁵ και Miskovitch²⁶.

²³ Βλ. A. Grubic, The astronomic theory of climatic changes of Milutin Milankovitch, Episodes, Vol. 29, no. 3, p. 187-203, 2006

²⁴ Βλ. <http://www.onlinebiographies.info/oh/cuya/stockwell-jn.htm>, του William R. Coates

²⁵ Βλ. http://en.wikipedia.org/wiki/Urbain_Le_Verrier

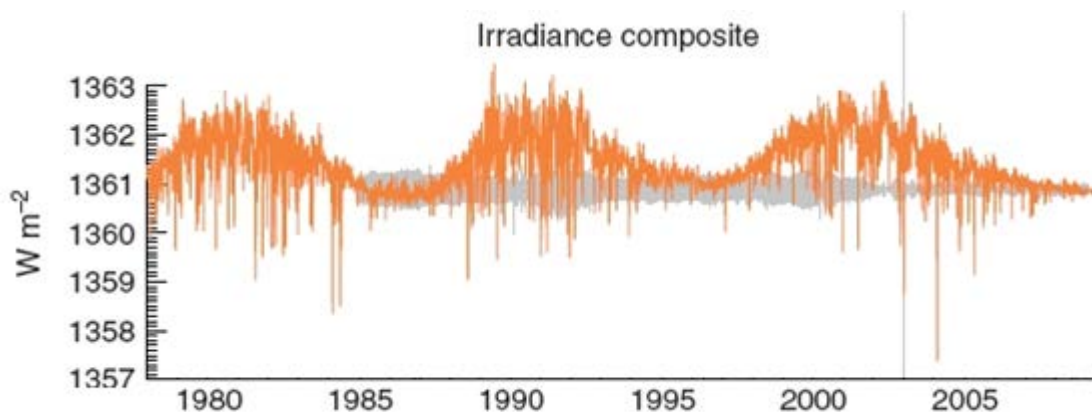
²⁶ Βλ. V. Protitch-Benishek, M. Djokić, From the notes on academician Vojislav V. Mišković, Publ. Astron. Obs. Belgrade, no.54, p. 171 – 174, 1996

7. Ο Ήλιος

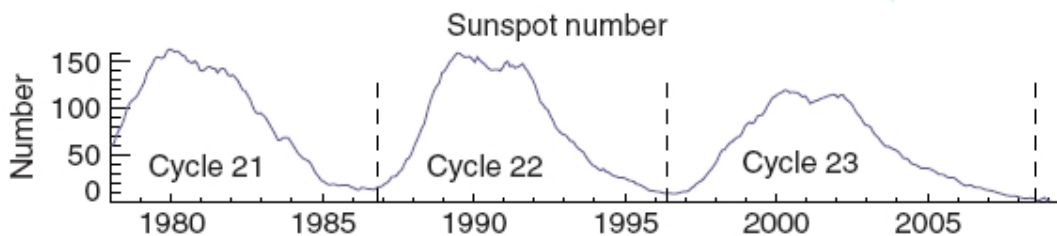
Όπως αναπτύχθηκε παραπάνω, εκτός από τις διακυμάνσεις στη σχέση Ήλιου – Γης, υπάρχουν μεταβολές και στις ιδιότητες του Ήλιου, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν το κλίμα.

Ακόμα και μικρές διακυμάνσεις του ποσού ή της κατανομής της ενέργειας που λαμβάνει η Γη από τον Ήλιο μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στο κλίμα της, αν εμμένουν για πολλές χιλιάδες χρόνια. Ωστόσο, οι δορυφορικές μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας δε δείχνουν αύξηση της ηλιακής έντασης τα τελευταία 30 χρόνια, παρά μόνο μικρές περιοδικές διακυμάνσεις, που συνδέονται με τον 11ετή ηλιακό κύκλο και είναι της τάξεως των περίπου $1,5 \text{ W/m}^2$ (βλ. σχήμα 11α).

Λόγω της γεωμετρίας της Γης και της ανάκλασης ποσού της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας πίσω στο διάστημα, αυτή η διακύμανση των $1,5 \text{ W/m}^2$ αντιστοιχεί σε περιοδική μεταβολή της ώθησης του κλίματος της τάξης των $0,3 \text{ W/m}^2$.



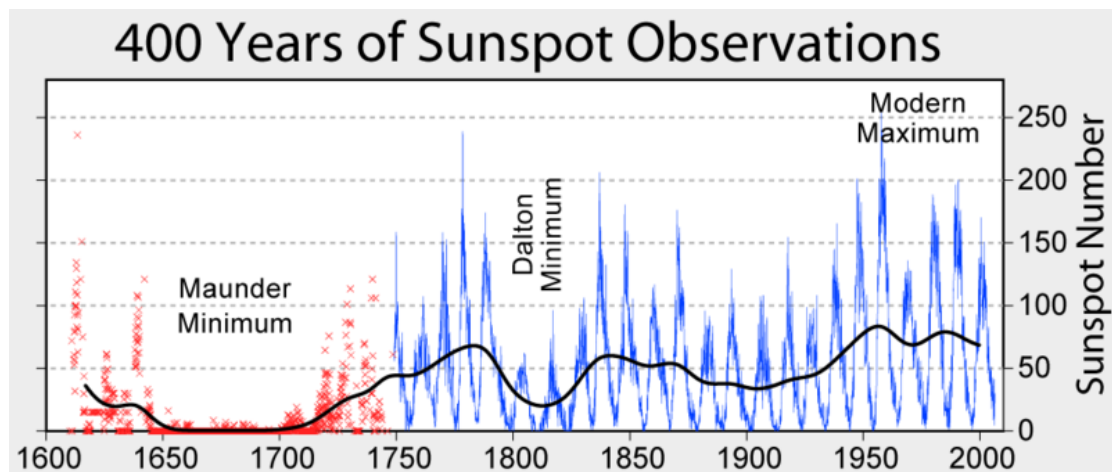
Σχήμα 11α: Ηλιακή ακτινοβολία όπως καταγράφηκε στην κορυφή της ατμόσφαιρας της Γης από δορυφόρους²⁷



Σχήμα 11β: Αριθμός ηλιακών κηλίδων στις ίδιες χρονολογίες με το διάγραμμα 11α²⁸

²⁷ Βλ. <http://meteolcd.wordpress.com/2010/03/12/cycles-and-trends-in-solar-irradiance-and-climate/>, από τη Judith Lean

Οι μικρές αυτές μεταβολές στην ηλιακή δραστηριότητα οδηγούν σε αλλαγές της θερμοκρασίας και της κυκλοφορίας στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Μπορούν να επηρεάσουν τις καιρικές συνθήκες στον τροπικό Ειρηνικό και θα μπορούσαν ενδεχομένως να συνδέονται με τις μικρές διακυμάνσεις της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας της Γης. Υπάρχουν επίσης στοιχεία ότι αλλαγές στην ηλιακή δραστηριότητα, επηρεάζουν το κλίμα της Γης για μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες. Ενδεικτικά, η «Μικρή Εποχή των Παγετώνων», - μια περίοδος μεταξύ 17^{ου} και 19^{ου} αιώνα - με ελαφρώς πιο δροσερές θερμοκρασίες, μπορεί να είχε προκληθεί, εν μέρει, από μια χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα, μεταξύ 1645 - 1715, που ονομάζεται «Ελάχιστο Μόντερ» (Maunder Minimum)(βλ. σχήμα 12).



Σχήμα 12: Εκτιμώμενη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια των τελευταίων 400 χρόνων με βάση τις παρατηρήσεις του αριθμού των ηλιακών κηλίδων. Οι τρεις περίοδοι δείχνουν μείωση της ηλιακής παραγωγής κατά τη διάρκεια εκτεταμένων περιόδων με μικρό αριθμό ηλιακών κηλίδων, ειδικά στα ελάχιστα των Maunder και Dalton, και αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα.²⁹

Εκτιμήσεις της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας για ακόμη μεγαλύτερο χρονικό διάστημα έχουν επίσης παραχθεί αναλύοντας ισότοπα από δακτυλίους δέντρων και πυρήνες πάγου. Επιπλέον, μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας πριν

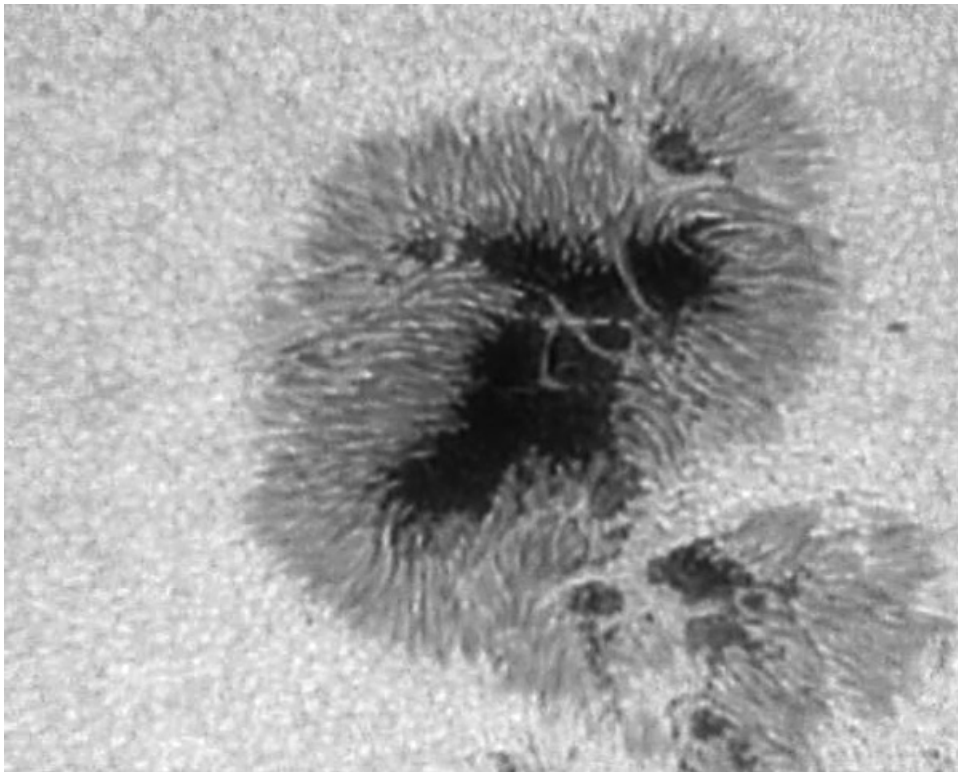
²⁸ Βλ. <http://meteolcd.wordpress.com/2010/03/12/cycles-and-trends-in-solar-irradiance-and-climate/>, από τη Judith Lean

²⁹ Βλ. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sunspot_Numbers.png, από τον Robert A.Rohde για την Global Warming Art

από την εποχή των δορυφόρων, υπολογίζονται βάσει πλήθους τεχνικών, συμπεριλαμβανομένων των παρατηρήσεων του αριθμού των ηλιακών κηλίδων, οι οποίες αντιστοιχούν περίπου με την ηλιακή δραστηριότητα (βλ. σχήματα 11α, 11β).

Οι κηλίδες αυτές είναι μικρές μαύρες περιοχές στην επιφάνεια του Ήλιου. Ο λόγος που φαίνονται μαύρες είναι η χαμηλή θερμοκρασία τους σε σχέση με τη θερμοκρασία της φωτόσφαιρας που τις περιβάλλει. Σε κάθε ηλιακή κηλίδα διακρίνουμε τα εξής χαρακτηριστικά (βλ. σχήμα 13):

- τη σκιά: μαύρη κεντρική περιοχή.
- την παρασκιά: λιγότερο σκοτεινή ζώνη γύρω από τη σκιά.
- τα νήματα: διακρίνονται μέσα στην παρασκιά και έχουν κατεύθυνση ακτινική προς το κέντρο της σκιάς.



Σχήμα 13: Τα μέρη μιας Ηλιακής Κηλίδας³⁰

³⁰Βλ. <http://www.astronomia.gr/wiki/index.php?title=Αρχείο:Picture3.jpg>, από τον J.B. Kristofersen

Οι κηλίδες, αρχικά, εμφανίζονται σχεδόν πάντα κατά ομάδες. Είναι μαύρες και έχουν απόσταση 1.000 χλμ. η μία από την άλλη. Στη συνέχεια, απομακρύνονται και γρήγορα φτάνουν στο μέγιστο μέγεθός τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις διακρίνουμε σε κάθε ομάδα δύο κηλίδες που είναι σαφώς μεγαλύτερες από τις άλλες και βρίσκονται στο ίδιο περίπου ηλιακό πλάτος. Από αυτές τις δύο κηλίδες αυτή που προηγείται κατά τη διεύθυνση της περιστροφής του ήλιου λέγεται p-κηλίδα (*preceding-ηγουμένη*), ενώ η άλλη ονομάζεται f-κηλίδα (*following-επόμενη*). Το μέγεθος μιας κηλίδας είναι περίπου 10.000χλμ., ενώ το συνολικό μήκος μιας ομάδας στην οποία ανήκει είναι περίπου 100.000χλμ.

Ο χρόνος ζωής των κηλίδων είναι, για τις πολύ μικρές, μερικές μέρες, ενώ για τις μεγαλύτερες κηλίδες ή ομάδες κηλίδων φτάνει μέχρι και τις 100 μέρες, δηλαδή 4 ηλιακές περιστροφές. Στατιστικά, όμως, το 95% του συνολικού αριθμού των ηλιακών κηλίδων έχει χρόνο ζωής μικρότερο από 11 μέρες. Οι κηλίδες, συνήθως, εμφανίζονται σε δύο ζώνες, βόρεια και νότια από τον ηλιακό ισημερινό και σε ηλιακό πλάτος ± 5 μοίρες έως ± 35 μοίρες. Η συχνότητα εμφάνισης και στα δύο ημισφαίρια είναι η ίδια ³¹.

Ο αριθμός των κηλίδων και των ομάδων τους μεταβάλλεται με το χρόνο. Συγκεκριμένα, η εμφάνιση των κηλίδων παρουσιάζει έναν 11ετή κύκλο, δηλαδή ο αριθμός τους αυξάνεται και ελαττώνεται περιοδικά κάθε 11 χρόνια. Ο Ήλιος αλλάζει πολικότητα κάθε 11 χρόνια και περνάει σταδιακά από τη φάση της υπερδιέγερσης σε εκείνη της σχετικής ηρεμίας, για να ακολουθήσει αντίστροφη πορεία στον επόμενο κύκλο. Στη διάρκεια του κύκλου, ηλιακές καταιγίδες μπορούν να εκδηλωθούν, προερχόμενες από τεράστιες πυρηνικές εκρήξεις στην επιφάνεια του Ηλίου, που καταιώνίζουν την ατμόσφαιρα της Γης με ακτινοβολία. Οι καταιγίδες αυτές ξεσπούν οποτεδήποτε, αλλά οι σφοδρότερες συμπυκνώνονται σε μια περίοδο του κύκλου που ονομάζεται «ηλιακό μέγιστο», οπότε έχουμε και την αλλαγή των μαγνητικών πόλων. Το ηλιακό μέγιστο του τελευταίου κύκλου ήταν εξαιρετικά ισχυρό και συνέβη το 2001, ακολουθούμενο από μεγάλης κλίμακας διακοπές ηλεκτροδότησης στη ζώνη του Ειρηνικού και βλάβες στα δίκτυα τηλεπικοινωνίας. Σήμερα, οι μαγνητικοί πόλοι του ήλιου θα διατηρήσουν την πολικότητά τους μέχρι το έτος 2012, όταν θα αντιστραφούν και πάλι.

³¹ Βλ. http://www.astronomia.gr/wiki/index.php?title=Ηλιακή_Κηλίδα

Ωστόσο, η έκταση της ηλιακής επιρροής στο παγκόσμιο κλίμα λόγω των κηλίδων είναι ακόμη πιο αβέβαιη από τις τροχιακές παραμέτρους.

8. Η επίδραση των κύκλων του Milankovitch στην εξέλιξη των ειδών

Θα μπορούσαν να επιδράσουν οι κύκλοι του Milankovitch στην εξέλιξη των ειδών; Οι βιολογικοί κύκλοι των ειδών διακρίνονται σε δύο μέρη. Στο χρόνο ζωής των οργανισμών, φυτικών και ζωικών, και στο χρόνο διάρκειας των ειδών τους. Ο πρώτος ποικίλει στα διάφορα είδη, από λίγα λεπτά στα βακτήρια, μέχρι κάποια χρόνια στα σπονδυλωτά και μέχρι 100 χρόνια στα δέντρα. Πολλοί οργανισμοί ζουν για περισσότερο από ένα έτος και γι' αυτούς, ο ετήσιος κύκλος των εποχών είναι πολύ σημαντικός. Κανένας οργανισμός όμως δε ζει για χρόνο που να υπερβαίνει τους κύκλους του Milankovitch.

Η άλλη χρονική κλίμακα σχετίζεται με τη διάρκεια των ειδών. Τα είδη επιβιώνουν από 1-30 εκατομμύρια χρόνια, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν. Το ουσιαστικό σημείο, εν προκειμένω, είναι ότι παρατηρήθηκαν είδη να αντέχουν, πολύ περισσότερο από τους κύκλους του Milankovitch.

Οι αντιδράσεις κάποιων θαλάσσιων οργανισμών στις μεταβολές του κλίματος κατά την Τεταρτογενή περίοδο είναι γνωστές, αλλά οι καταγραφές από χερσαία δείγματα καλύπτουν μόνο τους οργανισμούς του τελευταίου παγετώνα, δηλαδή το μέγιστο πριν από 18.000 χρόνια.

Ένα εξαιρετικό αρχείο δεδομένων από χερσαία δείγματα προέρχεται από τα φυτά, μέσω της ταυτοποίησης της γύρης και άλλων τμημάτων τους, σε ιζήματα λιμνών. Συγκεκριμένα, αποδεικνύεται πως στην ανατολική Β. Αμερική και στη δυτική Ευρώπη τα σημερινά φυλλοβόλα δάση δεν υπήρχαν 18.000 χρόνια πριν, αλλά δημιουργήθηκαν 5.000-15.000 χρόνια πριν. Κάθε είδος φαίνεται να έχει αντιδράσει διαφορετικά στις κλιματικές συνθήκες. Κάποιες ομάδες άντεξαν για 1.000-2.000 χρόνια και μετά διαλύθηκαν. Η αφθονία των ειδών στα δάση της ανατολικής Αγγλίας, η οποία ποικίλλει από τη μια

μεσοπαγετωνική περίοδο στην άλλη, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η σημερινή βλάστηση δεν έχει μεγάλη ιστορία, αλλά αποτελεί μίξεις των ειδών που δημιουργήθηκαν κάτω από δεδομένους κλιματικούς παράγοντες.

Στην ανατολική Ν. Αμερική και τη δυτική Ευρώπη επικρατούσαν πολύ σκληρές συνθήκες κατά τη διάρκεια της Τεταρτογενούς περιόδου, λόγω της εγγύτητάς τους στους ηπειρωτικούς πάγους. Κάποιες ουσιαστικές αλλαγές στη χλωρίδα παρατηρήθηκαν στις μη παγετώδεις περιοχές, οι οποίες δέχθηκαν πολύ μικρότερες θερμοκρασιακές αλλαγές. Οι περιοχές αυτές ίσως είναι πιο αντιπροσωπευτικές των πιθανών επιδράσεων των προ Τεταρτογενών κύκλων του Milankovitch στη βλάστηση. Συγκεκριμένα, στη νοτιοανατολική Αυστραλία, στα μέσα και τέλη της περιόδου αυτής, παρατηρήθηκαν μεταβολές από τροπικά δάση σε ξερά σκληρόφυλλα δάση, όπου κυριαρχούσε ο ευκάλυπτος.

Τα απολιθώματα από τη Β. Αμερική στα τέλη της τεταρτογενούς περιόδου αποκαλύπτουν πληροφορίες για μικρά θηλαστικά. Τα διάφορα είδη αυτών μετανάστευσαν στα τέσσερα σημεία του ορίζοντα, σε διαφορετικούς χρόνους, καλύπτοντας διαφορετικές αποστάσεις. Υπάρχουν παραδείγματα από είδη τα οποία ενώ την Πλειστόκαινο εποχή βρισκόταν στα βόρεια, την Ολόκαινη εποχή μετακινήθηκαν προς τα νότια. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούν τα σκαθάρια. Ενώ ένα είδος τους ζούσε στη νότια Αγγλία, τώρα βρέθηκε στην Ινδία, την Αφρική και τη νοτιοανατολική Ασία.

Κάθε είδος αντέδρασε διαφορετικά στις κλιματικές αλλαγές που έγιναν κατά την Τεταρτογενή περίοδο, λόγω των κύκλων του Milankovitch. Τα οικοσυστήματα αλλοιώθηκαν και ξανασηματίστηκαν σε διαφορετικές διαμορφώσεις, μέσα σε χρονικές κλίμακες κάποιων χιλιάδων χρόνων.

Το παλαιοντολογικό υλικό από τους ωκεανούς διαφέρει από αυτό των χερσαίων καταγραφών. Απολιθωματοφόρα ιζήματα συλλέγονται μέσω της διαδικασίας της πυρηνόληψιας. Οι οργανισμοί που μελετώνται καλύτερα είναι τα φύκια και τα πρωτόζωα, διότι έχουν μικρό χρόνο γενεάς και ανταποκρίνονται άμεσα στις κλιματικές αλλαγές της Τεταρτογενούς περιόδου. Καθώς τα νερά των ωκεανών, την περίοδο αυτή, ζεσταίνονται

και ψύχονται, οι πλαγκτονικοί και βενθικοί οργανισμοί αλλάζουν τοποθεσία σε μαζική κλίμακα. Παρά το γεγονός ότι οι πλαγκτονικοί οργανισμοί μπορούσαν να κινούνται κατά εκατοντάδες χιλιόμετρα το χρόνο μέσω οριζόντιας μεταφοράς και διάχυσης στις υγρές μάζες, τα στοιχεία δείχνουν ότι δεν το έκαναν. Περιοχές με μεγάλο αριθμό συγκεκριμένων ειδών παραμένουν γεμάτες από τα εν λόγω είδη για εκατοντάδες χρόνια, διότι μετακινήθηκαν ελάχιστα μέσα στα χρόνια αυτά, καθώς οι μάζες νερού άλλαξαν θερμοκρασία και αλατότητα. Οι βενθικοί οργανισμοί μετακινούνται το ίδιο, λόγω των κλιματικών διακυμάνσεων.

Στη συνέχεια, ακολουθούν παραδείγματα μετακίνησης πληθυσμών, που αποδεικνύουν την αντίδρασή τους στις κλιματικές αλλαγές. Κατά τις παγετώδεις περιόδους, βόρειοι πληθυσμοί κάποιων ειδών τρηματοφόρων (είδος θαλάσσιων πρωτόζωων) μετακόμισαν αρκετά νότια, ενώ άλλα είδη τους πήγαν από τα νότια στα βόρεια. Κάποια μαλάκια εγκαθίστανται τώρα στη Μεσόγειο, ερχόμενα από το βορρά, ενώ η παγετώδης πανίδα της Βρετανίας και της βόρειας Νορβηγίας αντικαθίσταται από τη σημερινή πανίδα, που εξαπλώνεται από το νότο.

Οι αντιδράσεις των μικροοργανισμών είναι διαφορετικές για τον καθένα, όμως όλες συγκλίνουν στην άποψη ότι οι βιογεωγραφικοί τους κύκλοι επηρεάζονται από τους κύκλους του Milankovitch.

9. Μοντέλα πρόβλεψης του «κλιματικού παρελθόντος & μέλλοντος»

Για τη μελέτη του κλίματος χρησιμοποιούνται μοντέλα τα οποία έχουν ως στόχο να εξηγήσουν την απόκριση του κλίματος σε εξωτερικούς παράγοντες λαμβάνοντας, κατά το δυνατόν, υπόψη την πολυπλοκότητα των κύριων μηχανισμών ανάδρασης.

Αναλύσεις υψηλής ευαισθησίας επιβεβαίωσαν διστακτικά ότι οι αστρονομικές παράμετροι του Milankovitch δρουν ως ενεργοποιητές των παγετωνικών-μεσοπαγετωνικών κύκλων. Στην περίπτωση, όμως, που συνδυαστούν οι παράμετροι αυτοί με μεταβολές της συγκέντρωσης του CO₂ και μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας, τότε το μοντέλο Lounvainla-Neune (LLN) προσομοιώνει σχεδόν σωστά την είσοδο σε εποχή παγετώνων 2,75 εκατομμύρια χρόνια πριν, την εμφάνιση του κύκλου των 100.000 χρόνων περίπου 850.000 χρόνια πριν, και τους κύκλους των τελευταίων 600.000 χρόνων.

Ο κύκλος των 100.000 χρόνων είναι από τα κυριότερα χαρακτηριστικά της Τεταρτογενούς περιόδου και συνδέεται με το μέλλον του κλίματος. Αναλυτικότερα, ο κάθε κύκλος χαρακτηρίζεται από μία μεγάλη εποχή παγετώνων ακολουθούμενη από μια μικρότερη εποχή μεσοπαγετώνων, διάρκειας περίπου 10-15 χιλιάδων χρόνων. Σήμερα, επειδή βρισκόμαστε σε μια μεσοπαγετώδη περίοδο, την Ολόκαινη περίοδο, που ήδη έχει διαρκέσει 10.000 χρόνια, οι παλαιοκλιματολόγοι προβλέπουν ότι προσεγγίζει η επόμενη εποχή παγετώνων. Προσομοιώσεις που έγιναν χρησιμοποιώντας κλιματικά μοντέλα έδειξαν ωστόσο ότι η παρούσα μεσοπαγετώδης περίοδος μπορεί να διαρκέσει περισσότερο από τις προηγούμενες. Αυτό σχετίζεται με το σχήμα της τροχιάς της Γης, το οποίο θα είναι σχεδόν κύκλος τα επόμενα δεκάδες χιλιάδες χρόνια.

Επειδή η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα γεωγραφικά πλάτη και τις διαφορετικές εποχές δε θα αλλάξει σημαντικά μέσα στα επόμενα δεκάδες χιλιάδες χρόνια, οι αλλαγές στη συγκέντρωση του CO₂ αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κλίματος στο μέλλον. Ήδη, οι τιμές του CO₂ σήμερα είναι πολύ υψηλές και αναμένεται να αυξηθούν, περαιτέρω, μέχρι τα τέλη του 21^{ου} αιώνα, εξαιτίας

της ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Σύμφωνα με πειράματα που έγιναν χρησιμοποιώντας το δισδιάστατο μοντέλο LLN, φαίνεται να υπάρχει ένα κατώφλι στη συγκέντρωση του CO₂ (~700 ppmv) πάνω από το οποίο οι πάγοι της Γροιλανδίας λιώνουν και εξαφανίζονται εντελώς στα επόμενα 10 χιλιάδες χρόνια.

Η αστρονομική θεωρία μάς επέτρεψε να αναπτύξουμε και να δοκιμάσουμε προηγμένες τεχνικές ανάλυσης δεδομένων και μοντέλων, ώστε να εκτιμηθούν οι κλιματικές μεταβολές. Ωστόσο, απαιτούνται ακόμη πολλές βελτιώσεις στις τεχνικές και στα μοντέλα, ώστε να έχουμε καλύτερη γνώση για την εξέλιξη του κλίματος στο πέρασμα των αιώνων.

10. Ο ρόλος του διοξειδίου του άνθρακα στις μακροχρόνιες κλιματικές αλλαγές

Οι κύκλοι του Milankovitch όπως τους αναλύσαμε παραπάνω επηρεάζουν κυρίως την κλιματική αλλαγή σε περιόδους 100.000 ετών, οι οποίες φαίνεται να σχετίζονται με τη συχνότητα εμφάνισης των παγετώνων της Τεταρτογενούς περιόδου. Το γεγονός ότι οι κύκλοι δεν αποδίδουν επακριβώς τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούσαν, έχει αποδοθεί στο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), όπως συζητήθηκε και στην παραπάνω παράγραφο.

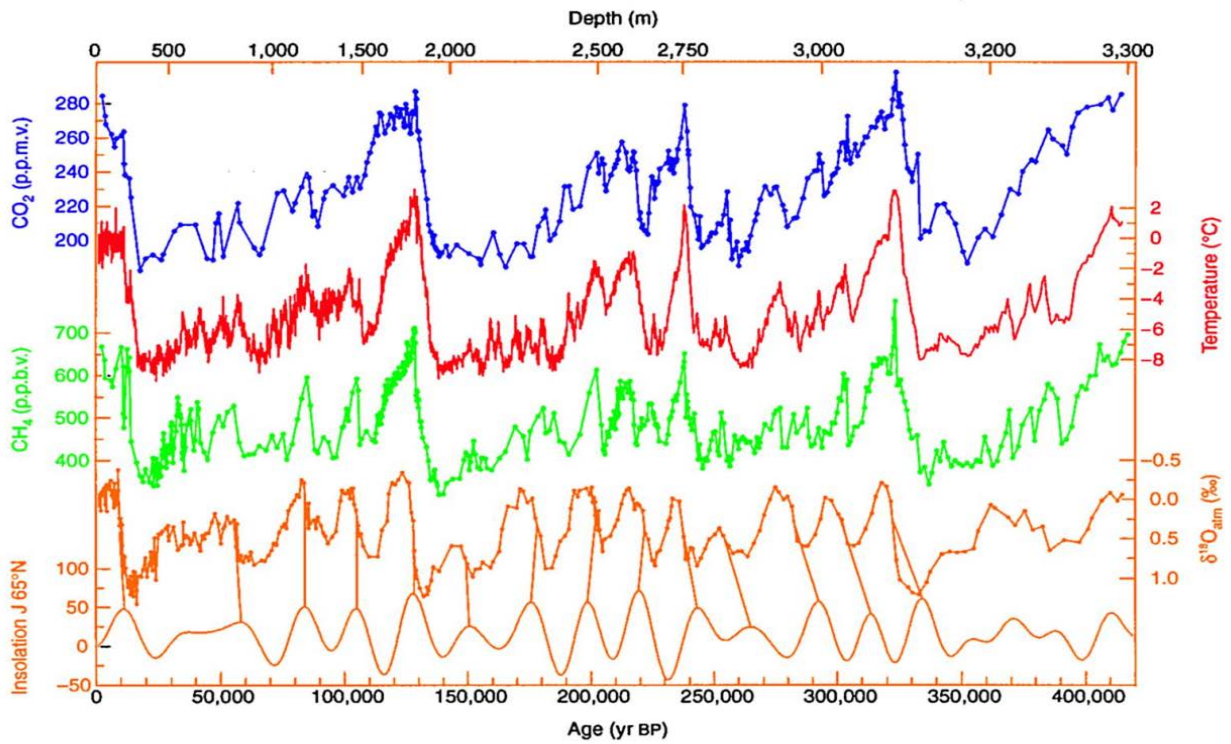
Σήμερα, οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα βρίσκονται γύρω στα 380 ppm. Στο μακρινό παρελθόν, οι συγκεντρώσεις κυμαίνονταν κάτω από τα επίπεδα αυτά, αλλά πάντα συνέπιπταν με παγετώνες. Μια καλή απόδειξη αποτελούν τα στοιχεία από έναν πυρήνα πάγου, που θα αναλυθεί παρακάτω, τα οποία αντιστοιχούν σε αρχείο κλιματικών συνθηκών 400.000 ετών (βλ. σχήμα 14).

Οι πυρήνες αυτοί παρέχουν δεδομένα για τη θερμοκρασία, το ποσοστό βροχόπτωσης, την υγρασία, την ένταση του ανέμου και τις ροές των θαλάσσιων, ηφαιστειακών και ανθρωπογενών αιωρούμενων σωματιδίων. Επίσης, αποτελούν αρχεία της σύνθεσης της ατμόσφαιρας σε αέρια ιχνοστοιχεία (trace gas). Οι γεωτρήσεις έγιναν από γαλλο-σοβιετική ομάδα στο Ρωσικό σταθμό Βοστόκ, στην ανατολική Ανταρκτική, μέχρι βάθος 3.300 μέτρων.

Στο διάγραμμα παρατίθενται οι συγκεντρώσεις των παγιδευμένων θερμοκηπικών αερίων CO₂ και CH₄ καθώς και του δ¹⁸O, το οποίο αντανακλά τις αλλαγές στο συνολικό όγκο των πάγων και στον υδρολογικό κύκλο. Παρατηρώντας τους κύκλους της θερμοκρασίας διαπιστώνουμε πως τα ελάχιστα των κύκλων αυτών σχεδόν συμπίπτουν, με διαφορά 1°C. Ακόμα, τα αρχεία για το δ¹⁸O μοιάζουν πάρα πολύ με αυτά της ηλιοφάνειας σε γεωγραφικό πλάτος 65°B, αφού τα πρώτα, αντικατοπτρίζουν την άμεση και έμμεση επιρροή της ηλιοφάνειας. Η μετάβαση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου από τη χαμηλότερη στην υψηλότερη τιμή συνδέεται με την παγετωνική - μεσοπαγετωνική μετάβαση. Οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του CO₂ αυξάνονται από 180ppmν σε 280-300 ppmν και του CH₄ από 320 - 350 ppb σε 650 - 770 ppb. Η μείωση του CO₂ υστερεί ως προς τη μείωση της θερμοκρασίας, κατά αρκετές χιλιάδες χρόνια, και μπορεί να είναι απότομη ή ομαλή.

Τα επίπεδα του CO₂ που καταγράφηκαν ήταν χαμηλά μέχρι τα 180ppm τις κρύες περιόδους και έφθαναν τα 280ppm τις αντίστοιχες θερμές. Στην ατμόσφαιρα, όμως, πάνω από τον πάγο, τα επίπεδα του αερίου ήδη έφτασαν τα 350ppm και τώρα είναι περίπου στα 380 ppm.

Στο γεωλογικό παρελθόν έχει καταγραφεί πλήθος περιόδων παγκόσμιας θέρμανσης. Αυτό μπορούσε να συσχετιστεί με ποικίλα γεωλογικά γεγονότα, όπως τροχιακές παράμετροι της Γης, μεταβολή στην κυκλοφορία των ωκεάνιων ρευμάτων, ηφαιστειακή δραστηριότητα, μετακίνηση ηπείρων και μεταβολές στην ηλιακή δραστηριότητα. Η ανησυχία για τη σημερινή θέρμανση, από το 1970 μέχρι σήμερα, οφείλεται στο ότι φαίνεται αδύνατος ο συσχετισμός και η αιτιολόγηση του φαινομένου με κάποια γεωλογικά γεγονότα σαν αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι επιστήμονες απέδειξαν ότι η πρόσφατη θέρμανση του πλανήτη συμπίπτει με την αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ από τα 280 ppm στα 380 ppm που είναι σήμερα και οφείλεται εξ ολοκλήρου στον ανθρώπινο παράγοντα.



Σχήμα 14: Χρονοσειρές από πυρήνες πάγου, στο Βοστόκ της Ανταρκτικής, της ηλιοφάνειας, της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης μεθανίου, του διοξειδίου του άνθρακα και του $\delta^{18}\text{O}$.³²

³²Βλ. upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/77/Vostok_420ky_4curves_insolation.jpg/800px-Vostok_420ky_4curves_insolation.jpg

ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

Α. Βιβλιογραφικές παραπομπές

Βάρβογλη Χ. – Σειραδάκη Γ., Εισαγωγή στη σύγχρονη αστρονομία, εκδόσεις Γαρταγάνη, έκδ. τρίτη, Θεσσαλονίκη 1994

Βάρβογλη Χ. – Σειραδάκη Γ., Κοσμολογία - Σημειώσεις αστρονομίας, Θεσσαλονίκη 2005

Σαχσαμάνογλου Χ. – Μπλούτσος Α., Φυσική Κλιματολογία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1998

Β. Δημοσιεύσεις

Grubic A., The astronomic theory of climatic changes of Milutin Milankovich, Episodes, Vol. 29, no. 3, 187-203, 2006

Knežević Z., Milutin Milanković and the astronomical theory of climate changes, Astronomical Observatory, Belgrade, DOI: 10.1051/epn/2010301

Petrović A., Cosmic Cycles and methodological triangle, Milanković's unscrambling of Pleistocene ice ages, Faculty of Philology and Arts, Kragujevac, Republic of Serbia

Protitch-Benishek V., Djokić M., From the notes on academician Vojislav V. Mišković, Publ. Astron. Obs. Belgrade, no.54, p. 171 – 174, 1996

Γ. Ιστοσελίδες

earthobservatory.nasa.gov/Features/Milankovitch/milankovitch_2.php, από τον Robert Simmon, NASA GSFC

el.wikipedia.org/wiki/Εκκεντρότητα

en.wikipedia.org/wiki/File:Sunspot_Numbers.png, από τον Robert A.Rohde για την Global Warming Art

en.wikipedia.org/wiki/Urbain_Le_Verrier

meteolcd.wordpress.com/2010/03/12/cycles-and-trends-in-solar-irradiance-and-climate/, από τη Judith Lean

stratus.astr.ucl.ac.be/textbook/chapter5_node12.xml, γραμμένο από τους Goose H., P.Y. Barriat, W. Lefebvre, M.F.Loutre, V.Zunk

upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/77/Vostok_420ky_4curves_insolation.jpg/800px-Vostok_420ky_4curves_insolation.jpg

www.amnh.org/education/resources/rfl/web/essaybooks/earth/p_milankovitch.htm, έργο της Paja Jovanović, 1943

www.astronomia.gr/wiki/index.php?title=Αρχείο:Celestial_Sphere.PNG

www.astronomia.gr/wiki/index.php?title=Αρχείο:Picture3.jpg, από τον J.B. Kristofersen

www.astronomia.gr/wiki/index.php?title=Ηλιακή_Κηλίδα

www.astronomia.gr/wiki/index.php?title=Ηλιοστάσιο

www.jeffreyfullerton.com/GlobalWarmingTested/

www.onlinebiographies.info/oh/cuya/stockwell-jn.htm, του William R. Coates

www.physics4u.gr/articles/2004/milankovitch.html

www.serbiaconsulatenyc.com/en/greatscientists.html#MilutinMilankovic