

Οι κρίσιμες στιγμές που δημιουργούνται οι πυρήνες του κόσμου μας (Steven Weinberg, φυσικός, νομπελίστας)

/ [Πεμπτούσια](#)



[Προηγούμενη δημοσίευση: <http://www.pemptousia.gr/?p=180093>]

Η ακριβής θερμοκρασία στην οποία συμβαίνουν τα παραπάνω εξαρτάται κατά ένα μικρό ποσοστό από τον αριθμό των πυρηνικών σωματιδίων ανά φωτόνιο, επειδή μία υψηλή σωματιδιακή πυκνότητα θα καθιστούσε ελαφρώς ευκολότερο τον σχηματισμό πυρήνων. (Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο έπρεπε να ορίσω τη συγκεκριμένη στιγμή όχι επακριβώς αλλά ως λίγο αργότερα από το πέμπτο καρέ.) Όταν η αναλογία αντιστοιχεί σε 1 δισεκατομμύριο φωτόνια ανά πυρηνικό σωματίδιο, η πυρηνοσύνθεση θα ξεκινήσει σε θερμοκρασία 900 εκατομμυρίων Κέλβιν ($0,9 \times 10^9$ K). Τώρα, έχουν περάσει 3 λεπτά και 46 δευτερόλεπτα από το πρώτο καρέ. (Ο αναγνώστης πρέπει να μου συγχωρήσει την ανακρίβεια του τίτλου *Τα πρώτα τρία λεπτά*.)



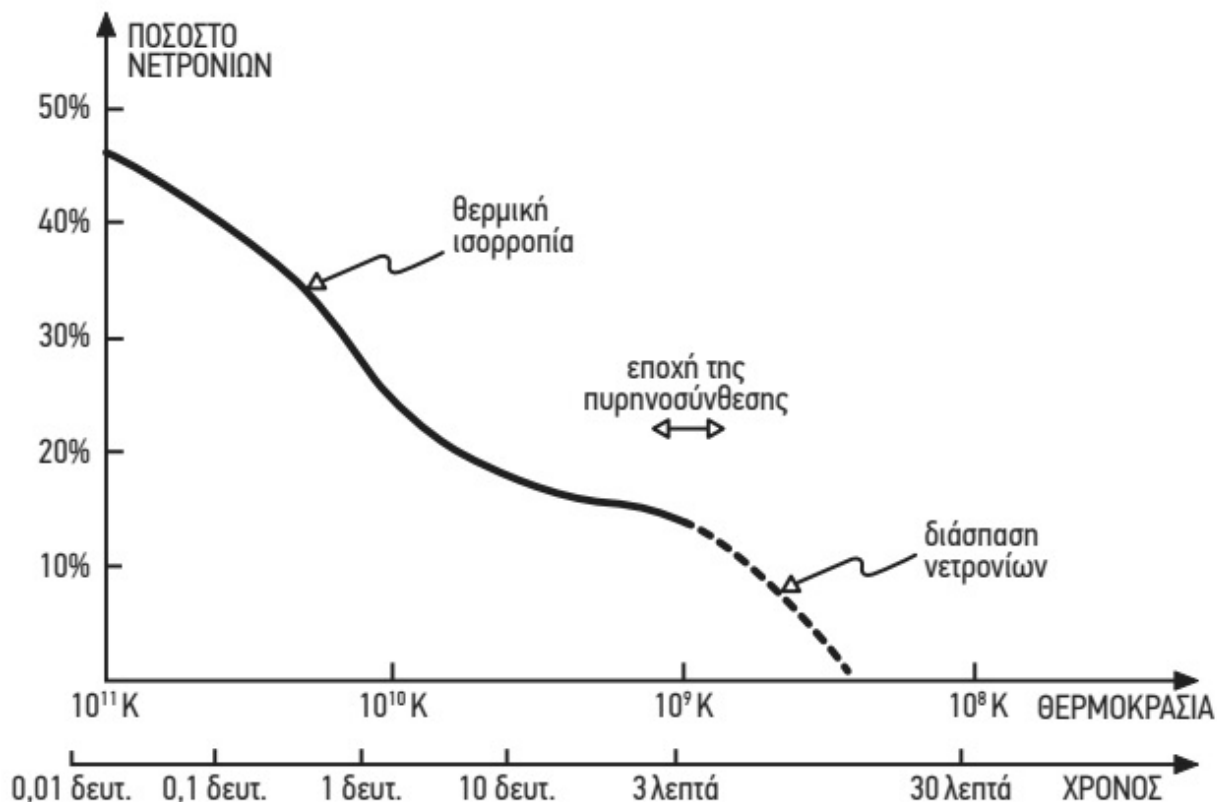
Από την άλλη, όμως, δεν θα μπορούσα να ονομάσω το βιβλίο *Τα πρώτα τρία λεπτά και τα τρία τέταρτα του λεπτού*. Θα ήταν λιγότερο εύηχο...) Η διάσπαση των νετρονίων μετατοπίζει την ισορροπία νετρονίων-πρωτονίων, ακριβώς πριν ξεκινήσει η πυρηνοσύνθεση, σε 13% νετρόνια και 87% πρωτόνια. Μετά την πυρηνοσύνθεση, το ποσοστό κατά βάρος του ηλίου είναι ακριβώς ίσο με το ποσοστό όλων των δεσμευμένων πυρηνικών σωματιδίων στον πυρήνα ηλίου· τα μισά από αυτά είναι νετρόνια, και επειδή όλα τα νετρόνια είναι δεσμευμένα στον πυρήνα, το ποσοστό κατά βάρος του ηλίου είναι απλώς διπλάσιο από το ποσοστό των νετρονίων σε σχέση με τα πυρηνικά σωματίδια ή περίπου 26%. Αν η πυκνότητα των πυρηνικών σωματιδίων είναι λίγο μεγαλύτερη, η πυρηνοσύνθεση ξεκινά λίγο νωρίτερα, όταν ακόμη δεν έχουν διασπαστεί τόσα πολλά νετρόνια· τη δεδομένη στιγμή παράγεται ελαφρώς περισσότερο ήλιο, αλλά πιθανώς όχι παραπάνω από 28% κατά βάρος (Σχήμα 9).

Παρόλο που έχουμε ξεπεράσει τη χρονική διάρκεια της ταινίας μας, θα ρίξουμε μια τελευταία ματιά στο σύμπαν ύστερα από μία ακόμα πτώση της θερμοκρασίας.

ΕΚΤΟ ΚΑΡΕ. Η θερμοκρασία του σύμπαντος είναι τώρα ίση με 300 εκατομμύρια Κέλβιν (3×10^8 K). Από το πρώτο καρέ έχουν περάσει 34 λεπτά και 40 δευτερόλεπτα. Ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια έχουν πλέον εξαϋλωθεί ολοκληρωτικά, εκτός από ένα μικρό πλεόνασμα ηλεκτρονίων (ένα προς ένα δισεκατομμύριο) που χρειάζεται για να αντισταθμίσει το φορτίο των πρωτονίων. Η εκλυόμενη ενέργεια κατά την εξαύλωση ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων έχει προσδώσει στα φωτόνια

θερμοκρασία σταθερά μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία των νετρίνων κατά 40,1%. Η πυκνότητα ενέργειας του σύμπαντος ισοδυναμεί τώρα με πυκνότητα μάζας κατά 9,9% μεγαλύτερη από την πυκνότητα του νερού· από αυτό το ποσοστό, το 31% βρίσκεται υπό τη μορφή νετρίνων και αντινετρίνων, και το 69% υπό τη μορφή φωτονίων. Αυτή η πυκνότητα ενέργειας δίνει στο σύμπαν έναν χαρακτηριστικό χρόνο διαστολής που αντιστοιχεί περίπου σε μία ώρα και ένα τέταρτο της ώρας. Οι πυρηνικές διεργασίες έχουν σταματήσει - τα πυρηνικά σωματίδια είναι πλέον είτε δεσμευμένα σε πυρήνες ηλίου είτε είναι ελεύθερα πρωτόνια (πυρήνες υδρογόνου), σε αναλογία ηλίου 22-28% κατά βάρος. Παρόλο που υπάρχει ένα ηλεκτρόνιο για κάθε ελεύθερο ή δεσμευμένο πρωτόνιο, το σύμπαν είναι ακόμη πολύ θερμό ώστε να σχηματιστούν σταθερά άτομα.

Το σύμπαν θα συνεχίσει να διαστέλλεται και να κρυώνει, αλλά τίποτα ενδιαφέρον δεν θα συμβεί στα επόμενα 700.000 χρόνια. Η θερμοκρασία τότε θα πέσει τόσο πολύ ώστε τα ηλεκτρόνια και οι πυρήνες να μπορούν να σχηματίσουν σταθερά άτομα. Η έλλειψη ελεύθερων ηλεκτρονίων θα καταστήσει το περιεχόμενο του σύμπαντος διαφανές στην ακτινοβολία - η αποσύζευξη ύλης και ακτινοβολίας θα επιτρέψει στην ύλη τον σχηματισμό γαλαξιών και αστέρων. Έπειτα από περίπου άλλα 10 δισεκατομμύρια χρόνια, ζωντανές υπάρξεις θα ξεκινήσουν την ανασύνθεση αυτής της ιστορίας.



Σχήμα 9: Η μετατόπιση της ισορροπίας νετρίνων-πρωτονίων. Το ποσοστό των

νετρονίων σε σχέση με όλα τα πυρηνικά σωματίδια δίνεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και του χρόνου. Το τμήμα της καμπύλης που χαρακτηρίζεται ως θερμική ισορροπία περιγράφει την περίοδο κατά την οποία οι πυκνότητες και η θερμοκρασία είναι τόσο υψηλές, που η θερμική ισορροπία διατηρείται μεταξύ όλων των σωματιδίων. Το ποσοστό των νετρονίων μπορεί να υπολογιστεί εδώ από τη διαφορά μάζας νετρονίων-πρωτονίων, χρησιμοποιώντας τους κανόνες της στατιστικής μηχανικής. Το τμήμα της καμπύλης που χαρακτηρίζεται ως διάσπαση νετρονίων περιγράφει την περίοδο στην οποία όλες οι διεργασίες μετατροπής νετρονίων-πρωτονίων έχουν σταματήσει, εκτός από τη ραδιενεργό διάσπαση των ελεύθερων νετρονίων. Το τμήμα της καμπύλης που μεσολαβεί εξαρτάται από λεπτομερείς υπολογισμούς του ρυθμού μετάπτωσης των ασθενών αλληλεπιδράσεων. Το διακεκομμένο τμήμα της καμπύλης δείχνει τι θα είχε συμβεί αν με κάποιο τρόπο αποτρεπόταν ο σχηματισμός πυρήνων. Πράγματι, σε κάποια χρονική στιγμή, κατά την περίοδο που συμβολίζεται με το βέλος διπλής κατεύθυνσης ως εποχή της πυρηνοσύνθεσης, τα νετρόνια συγκεντρώνονται γρήγορα σε πυρήνες ηλίου, και η αναλογία νετρονίων-πρωτονίων παραμένει σταθερή στην τιμή που έχει εκείνη τη στιγμή. Η συγκεκριμένη καμπύλη μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ποσοστού (κατά βάρος) του κοσμικού παραγόμενου ηλίου· για οποιαδήποτε δεδομένη τιμή της θερμοκρασίας ή του χρόνου της πυρηνοσύνθεσης, είναι απλώς διπλάσιο του ποσοστού των νετρονίων εκείνη τη στιγμή.