

Το Τέλος του Ήλιου

Δρ. Νίκος Πράντζος, Οκτώβριος 2004

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΙΣΙΟΥ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

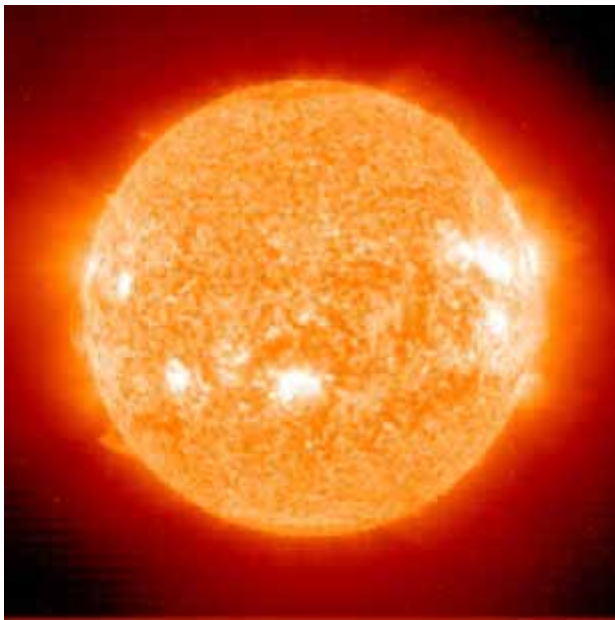
1. Η ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ
2. ΤΟ ΖΟΦΕΡΟ ΜΕΛΛΟΝ



1. Η ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Ανάμεσα στις κοσμικές καταστροφές υπάρχει μία που φαίνεται αναπόφευκτη, βρίσκεται όμως τόσο μακριά στο μέλλον, ώστε η λέξη «απειλή» χάνει τη σημασία της. Παρ' όλα αυτά η αναφορά της κάνει πάντα αίσθηση, αφού πρόκειται για το μέλλον και το θάνατο του άστρου της ζωής, του Ήλιου μας.

Είναι αλήθεια ότι ο Ήλιος, που γεννήθηκε λίγο πριν από τη Γη (εδώ και 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια περίπου), έχει διάγει μέχρι τώρα ένα βίο εξαιρετικά σταθερό. Με υποδειγματική κανονικότητα συνεχίζει να στέλνει στον πλανήτη μας σχεδόν 1 εκατομμύριο τεραβάτ, ενεργειακή ισχύ δεκάδες χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την παγκόσμια παραγωγή σήμερα. Και αυτή η κολοσσιαία ενέργεια που προσλαμβάνεται από την επιφάνεια της Γης δεν αποτελεί παρά ένα ελάχιστο μέρος (ένα δισεκατομμυριοστό περίπου) της συνολικής ενέργειας που ακτινοβολεί ο Ήλιος στο διάστημα. Όμως τα αποθέματα του πυρηνικού καυσίμου που παράγει αυτή την πολύτιμη ακτινοβολία δεν είναι ανεξάντλητα. Με το ρυθμό της σημερινής κατανάλωσης, που μετασχηματίζει σχεδόν 7 δισεκατομμύρια τόνους υδρογόνου σε ήλιο κάθε δευτερόλεπτο, τα αποθέματα του υδρογόνου στο κέντρο του Ήλιου θα επαρκέσουν για περίπου 6 δισεκατομμύρια χρόνια ακόμη. Τότε θα αρχίσει μια μακρά περίοδος αγωνίας με δραματικές συνέπειες για το υπόλοιπο Ηλιακό σύστημα. Στην πραγματικότητα το πρόβλημα θα ανακύψει πολύ πριν από αυτή την εποχή, αφού η Γη θα κινδυνεύσει να γίνει ακατοίκητη εξαιτίας της προοδευτικής αύξησης της λαμπρότητας του Ήλιου.



Σχήμα 1. Η σημερινή εικόνα Ηλίου δεν θα έχει καμία σχέση με αυτή μετά από μερικά δισεκατομμύρια χρόνια (φωτογραφία στο υπεριώδες μέρος του φάσματος από το διαστημόπλοιο SOHO).

Είναι ενδιαφέρον να δούμε πώς φανταζόταν η επιστήμη το τέλος του Ήλιου και της Γης πριν από την ανάπτυξη της σύγχρονης αστροφυσικής. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα η πηγή ενέργειας του Ήλιου και των άλλων αστεριών παρέμενε μυστηριώδης. Καμιά από τις τότε γνωστές ενεργειακές πηγές δε φαινόταν ικανή να προμηθεύει για δισεκατομμύρια χρόνια τα εκπληκτικά ποσά ενέργειας που εκπέμπει το άστρο μας. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Άγγλου φυσικού William Thomson (Λόρδου Kelvin), αν ο Ήλιος αντλούσε την ενέργειά του από τη βαρυτική του συστολή (όπως τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια χρησιμοποιούν την ενέργεια του νερού που πέφτει στο πεδίο βαρύτητας της Γης), δε θα μπορούσε να λάμπει για περισσότερο από 30 εκατομμύρια χρόνια το πολύ. Αυτό το διάστημα ήταν σαφώς μικρότερο από την ηλικία της Γης, που με βάση τις μεθόδους ραδιενεργού χρονολόγησης του Νεοζηλανδού φυσικού Ernest Rutherford υπολογιζόταν την εποχή εκείνη σε κάτι παραπάνω από 2 δισεκατομμύρια χρόνια.

Σύντομα όμως βρέθηκαν άλλες λύσεις χάρη στην ανάπτυξη

της θεωρίας της ειδικής σχετικότητας το 1905 από τον Einstein, που έκανε λόγο για ισοδυναμία μάζας και ενέργειας: μια μικρή ποσότητα μάζας **M** μπορεί να μεταμορφωθεί σε μια τεράστια ποσότητα ενέργειας **E**, σύμφωνα με την περίφημη εξίσωση **E = Mc²**, όπου **c** είναι η ταχύτητα του φωτός. Αν ο Ήλιος αντλούσε την ενέργειά του από τη μετατροπή της μάζας του σε ενέργεια με απόδοση 100 %, θα μπορούσε να λάμπει για 10.000 δισεκατομμύρια χρόνια. Αυτό το ασυνήθιστα μεγάλο χρονικό διάστημα, χίλιες φορές μεγαλύτερο από τη σημερινή ηλικία του Σύμπαντος, απαντάται στο έργο του Βρετανού συγγραφέα Olaf Stapledon **Τελευταίοι και Πρώτοι Άνθρωποι** (Last and First Men).

Σήμερα γνωρίζουμε ότι η συνολική διάρκεια ζωής του Ήλιου είναι περίπου χίλιες φορές μικρότερη από αυτή που φανταζόταν ο Stapledon. Η θερμοπυρηνική σύντηξη του υδρογόνου σε ήλιο μετατρέπει την ηλιακή μάζα σε ενέργεια με απόδοση λίγο μικρότερη από 1%, επιπλέον, αυτή η μετατροπή αφορά μόνο το ένα δέκατο της ηλιακής μάζας στο κέντρο του άστρου μας, αφού τα άλλα εννέα δέκατα είναι πολύ ψυχρά για να επιτρέψουν θερμοπυρηνικές αντιδράσεις. Οι παράγοντες αυτοί περιορίζουν τη ζωή του Ήλιου σε 11 δισεκατομμύρια χρόνια «μόνο». Χάρη στις αριθμητικές προσομοιώσεις στους υπολογιστές τους, οι αστρονόμοι πιστεύουν σήμερα ότι γνωρίζουν αρκετά καλά την εξέλιξη των άστρων και μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια τις λεπτομέρειες της

μελλοντικής εξέλιξης του Ήλιου. Προβλέπουν έτσι ότι η φωτεινότητά του θα αυξάνεται αργά αλλά σταθερά, κατά 10 % κάθε δισεκατομμύριο χρόνια. Ύστερα από τρία δισεκατομμύρια χρόνια η λαμπρότητα του Ήλιου θα έχει αυξηθεί προοδευτικά κατά 30 % περίπου και η Γη θα λαμβάνει τόση ενέργεια από τον Ήλιο όση δέχεται σήμερα η Αφροδίτη. Η συνεχής αυτή θέρμανση θα μπορούσε να οδηγήσει σε ένα ανεξέλεγκτο φαινόμενο θερμοκηπίου, παρόμοιο με αυτό που αναπτύχθηκε κάποτε στον αδελφό μας πλανήτη.

Εξαιτίας της ανόδου της θερμοκρασίας του πλανήτη το νερό των γήινων ωκεανών θα αρχίσει να εξατμίζεται, επιβαρύνοντας την ατμόσφαιρα με μια «ομίχλη» ολοένα πιο πυκνή. Καθώς οι υδρατμοί συμβάλλουν στο φαινόμενο θερμοκηπίου εμποδίζοντας τη θερμότητα του εδάφους να διαφύγει στο διάστημα, η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας θα αυξηθεί ακόμη περισσότερο, επιταχύνοντας ακόμη πιο πολύ την εξάτμιση. Είναι δύσκολο να εκτιμήσουμε σήμερα την ακριβή εξέλιξη όλων αυτών των φυσικών φαινομένων, γιατί ο ρόλος των υδρατμών (που απορροφούν τη θερμότητα του εδάφους συντελώντας στη θέρμανση της ατμόσφαιρας, αλλά ταυτόχρονα ανακλούν ένα μέρος από το προσπίπτον ηλιακό φως συντελώντας στην ψύξη της) δεν είναι ακόμη αρκετά γνωστός. Είναι ωστόσο βέβαιο ότι το περιεχόμενο των ωκεανών θα βρεθεί αργά ή γρήγορα στην ατμόσφαιρα, αιωρούμενο πάνω από ένα νεκρό τοπίο χωρίς το παραμικρό ίχνος ζωής.

Σιγά-σιγά η ομίχλη θα διαλυθεί. Κάτω από τη δράση των ηλιακών ακτινών τα μόρια του νερού θα αποσυντεθούν στα συστατικά τους υδρογόνο και οξυγόνο. Το ελαφρύ υδρογόνο θα διαφύγει στο διάστημα, ενώ το βαρύτερο οξυγόνο, που σχηματίζει εύκολα χημικές αντιδράσεις, θα προκαλέσει πλήθος πυρκαγιές στην ξερή βλάστηση ή θα απορροφηθεί από τους βράχους σχηματίζοντας διάφορα οξειδία. Μετά από μερικά εκατομμύρια χρόνια, όταν το νεφελώδες κάλυμμα των υδρατμών θα έχει εξαφανιστεί, θα εμφανιστεί το νέο πρόσωπο της Γης: ο πρώην γαλάζιος πλανήτης, το λίκνο της ζωής, θα έχει μεταμορφωθεί σε ένα ερημωμένο ουράνιο σώμα και η επιφάνειά του θα θυμίζει πολύ σεληνιακό τοπίο.

Παίρνοντας υπόψη το μεγάλο χρονικό περιθώριο μέχρι την πραγματοποίηση της προαναγγελθείσας καταστροφής, μπορεί κανείς να ελπίζει ότι ο γήινος πολιτισμός αυτού του μακρινού μέλλοντος θα έχει βρει τα μέσα να προστατευτεί. Μια προφανής λύση θα ήταν η εγκατάσταση σε τροχιά γύρω από τη Γη πελώριων ημιδιαφανών προστατευτικών πανό με διάμετρο χίλια χιλιόμετρα το καθένα. Η διαφάνεια αυτών των «ασπίδων» θα προσαρμοζόταν με τρόπο που να αφήνουν να περνά μόνο ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας, ίσο με αυτό που φτάνει σήμερα στη Γη, και να ανακλούν ή να απορροφούν το υπόλοιπο, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς. Χάρη σε αυτά τα μέτρα οι κλιματολογικές συνθήκες στο εσωτερικό του ηλιακού συστήματος θα μπορούσαν να διατηρηθούν σε αποδεκτά επίπεδα για περίπου 3 δισεκατομμύρια χρόνια ακόμη. Φτάνουμε έτσι στα 6 δισεκατομμύρια χρόνια στο μέλλον, 10,5 δισεκατομμύρια χρόνια από τη γέννηση του Ηλιακού συστήματος. Ο γήινος πολιτισμός θα βρεθεί τότε αντιμέτωπος με ένα αληθινό πρόβλημα επιβίωσης.



2. ΤΟ ΖΟΦΕΡΟ ΜΕΛΛΟΝ

Έπειτα από εξήμισι δισεκατομμύρια χρόνια τα αποθέματα υδρογόνου στο κέντρο του Ήλιου θα εξαντληθούν και η φωτεινότητά του άστρου μας θα είναι διπλάσια από ό,τι σήμερα. Ωστόσο σε ένα λεπτό στρώμα υδρογόνου γύρω από το κέντρο θα «ανάψουν» και πάλι οι πυρηνικές αντιδράσεις, παράγοντας ενέργεια και προκαλώντας τη διαστολή του εξωτερικού περιβλήματος του άστρου. Για 700 εκατομμύρια χρόνια αυτή η διαστολή θα γίνεται με ανεπαίσθητο ρυθμό και μόνο μια ελαφριά αλλαγή του χρώματος προς το πορτοκαλί θα υποδηλώνει ότι ο Ήλιος μεταμορφώνεται (και θα πρέπει συνεπώς να αρχίσουν να λαμβάνονται κάποια μέτρα από τους απογόνους μας εκείνης της εποχής). Προοδευτικά όμως η εξέλιξη θα επιταχυνθεί: το άστρο θα διασταλεί υπερβολικά και η φωτεινότητά του θα αυξηθεί κατά δέκα, εκατό, μέχρι και χίλιες φορές σε σχέση με τη σημερινή, ενώ το χρώμα του θα γίνει κόκκινο και η επιφανειακή θερμοκρασία του θα πέσει στους 3.000 °K (από τους 5.800 σήμερα). . Προς το τέλος αυτής της περιόδου, μέσα σε διάστημα δέκα εκατομμυρίων χρόνων «μόνο», η ακτίνα του άστρου μας θα αυξηθεί από 40 εκατομμύρια χιλιόμετρα (η ακτίνα της σημερινής τροχιάς του Ερμή) σε περίπου 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα (η ακτίνα της σημερινής τροχιάς της Γης).

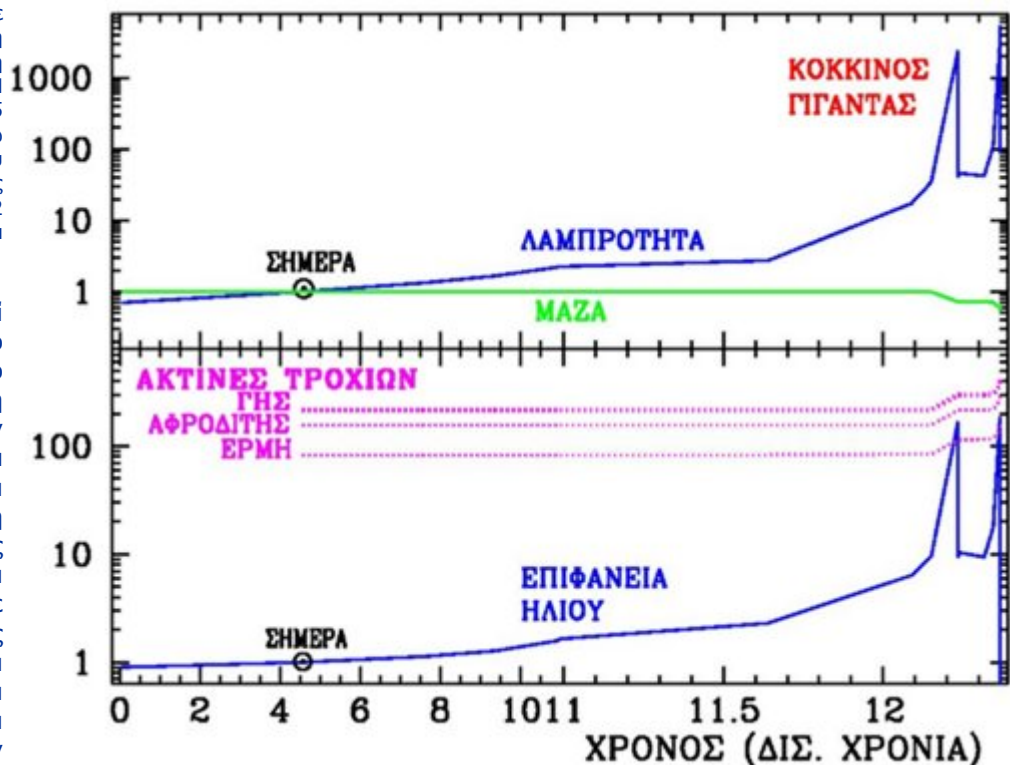
Σχήμα 2. Η λαμπρότητα (μπλε γραμμή) και η μάζα (πράσινη γραμμή) του Ήλιου σαν συνάρτηση της ηλικίας του (άνω διάγραμμα). Η σημερινή ηλικία του Ήλιου είναι 4.5 δισεκατομμύρια έτη. Στο κάτω διάγραμμα φαίνεται η ακτίνα του Ήλιου σαν συνάρτηση της ηλικίας του. Όταν ο Ήλιος θα είναι ~12 δισεκατομμυρίων ετών θα "καταβροχθίσει" τον Ερμή.

Ο Ερμής θα καταβροχθιστεί σίγουρα από το διαστελλόμενο ερυθρό γίγαντα, ενώ δεν είναι ακόμη σαφές τι θα συμβεί με την Αφροδίτη. Η Γη φαίνεται ότι θα γλιτώσει χάρη σε μια ευτυχή συγκυρία, τη μετατόπιση της τροχιάς της προς τα έξω (χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση!). Σε όλη τη διάρκεια της διαστολής τα εξωτερικά στρώματα του Ήλιου θα διαφεύγουν στο διάστημα σπρωγμένα από την εσωτερική πίεση, με

ταχύτητες μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο. Η διαφυγή τους θα διευκολυνθεί από το γεγονός ότι θα βρίσκονται μακριά από το κέντρο, όπου θα είναι συγκεντρωμένο το κύριο μέρος της μάζας του Ήλιου, και θα νιώθουν έτσι πολύ λιγότερο τη βαρυτική της έλξη. Εξαιτίας αυτής της «αιμορραγίας» ο Ήλιος θα χάνει μια ποσότητα μάζας ίση με τη μάζα της Γης κάθε χιλιετία και στο τέλος της περιόδου της διαστολής θα βρεθεί με τη μάζα του μειωμένη κατά 30%. Αντιστοιχη μείωση θα υποστεί και η δύναμη της βαρυτικής του έλξης, που είναι ανάλογη με τη μάζα του. Καθώς η βαρύτητα του Ήλιου θα εξασθενεί, δε θα μπορεί να συγκρατήσει στις τροχίες τους τα διάφορα αντικείμενα του Ηλιακού συστήματος που θα μεταναστεύσουν σιγά-σιγά προς τα έξω, σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το κέντρο. Έτσι η Αφροδίτη θα βρεθεί στο ύψος της σημερινής τροχιάς της Γης, γλιτώνοντας κατά πάσα πιθανότητα την καταβρόχισή της από το διαστελλόμενο ερυθρό γίγαντα, όμως θα έχει μετατραπεί σε μια «αναβράζουσα» σφαίρα με επιφανειακή θερμοκρασία σχεδόν 2.000 °K, λίγο μικρότερη από τη θερμοκρασία του κόκκινου άστρου που θα καλύπτει σχεδόν ολόκληρο τον ουρανό της. Όσον αφορά τη Γη, θα βρεθεί σε απόσταση μόλις 60 εκατομμυρίων χιλιομέτρων έξω από την τροχιά της Αφροδίτης. Αν ένας παρατηρητής μπορούσε να παραμείνει στην καυτή επιφάνειά της, όπου η θερμοκρασία θα πλησιάζει τους 1500 °K, θα αντίκριζε ένα τοπίο ανάλογο με την Κόλαση του Δάντη, με τον τερατώδη κόκκινο δίσκο του Ήλιου να καλύπτει πάνω από τα τρία τέταρτα του ουρανού.

Η διαστολή του Ήλιου θα επηρεάσει επίσης το εξωτερικό Ηλιακό σύστημα, αν και οι συνέπειες θα είναι ελάχιστες για τους γιγάντιους πλανήτες. Οι τρεις δορυφόροι του Δία, η Ευρώπη, η Καλλιστώ και ο Γανυμήδης, περιέχουν τεράστιες ποσότητες νερού κάτω από τα επιφανειακά τους στρώματα πάγου. Επίσης, ενδέχεται να υπάρχει νερό με τη μορφή πάγου κάτω από την ατμόσφαιρα μεθανίου και αζώτου που καλύπτει τον Τιτάνα, το μεγαλύτερο δορυφόρο του Κρόνου. Η διαστολή του Ήλιου και η συνακόλουθη θέρμανση αυτών των δορυφόρων θα απελευθερώσει τεράστιες ποσότητες νερού σε υγρή μορφή για αρκετές εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια. Όμως στο τέλος αυτής της περιόδου, το μεγαλύτερο μέρος των αποθεμάτων θα εξατμιστεί και θα διασκορπιστεί στο διάστημα. Την ίδια μοίρα θα έχει και το νερό των μικρότερων δορυφόρων και των δακτυλίων των γιγάντιων πλανητών. Ωστόσο τα τεράστια αποθέματα πάγου των κομητών της ζώνης του Kuiper και του νέφους του Oort, που βρίσκονται πολύ πιο μακριά, θα μείνουν ανέπαφα, στη διάθεση ενός πολιτισμού που θα έχει ενδεχόμενα επιζήσει στο μακρινό εκείνο μέλλον.

Γύρω στο έτος 7.500.000.000 ολόκληρο το Ηλιακό σύστημα θα έχει γίνει ακατοίκητο. Ακόμη και στο επίπεδο της τροχιάς του Πλούτωνα, που βρίσκεται σήμερα σαράντα φορές μακρύτερα από τον Ήλιο από ό,τι η Γη, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας θα είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από ό,τι σήμερα στον πλανήτη μας. Μετά από μια μακρά περίοδο διαστολής που θα απειλεί να καταπιεί τα πάντα στο πέρασμά της, ο Ήλιος θα ηρεμήσει, τουλάχιστον για κάποιο διάστημα. Μέσα στην καρδιά του το ήλιο, προϊόν της καύσης του υδρογόνου, θα αρχίσει με τη σειρά του να καίγεται και να μετατρέπεται σε άνθρακα, μόλις η κεντρική θερμοκρασία ανεβεί στους εκατό εκατομμύρια βαθμούς. Με την έναρξη της καύσης του ήλιου θα σβήσει το περιφερειακό στρώμα καύσης του υδρογόνου, του οποίου η ενέργεια είχε προκαλέσει την τεράστια διαστολή του περιβλήματος. Όπως η άμωπη ακολουθεί την πλημμυρίδα, το περίβλημα του άστρου θα αρχίσει να συρρικνώνεται και να απομακρύνεται από το απανθρακωμένο σώμα της Αφροδίτης, για να σταθεροποιηθεί σε μια ακτίνα 7 εκατομμυρίων χιλιομέτρων «μόνο»,



10 φορές δηλαδή μεγαλύτερη από τη σημερινή. Από το πτώμα του Ερμή δεν πρόκειται να απομείνει τίποτα, αφού ο πλανήτης θα έχει εξατμιστεί από καιρό στο εσωτερικό του τεράστιου φούρνου.



Σχήμα 3. Το πλανητικό νεφέλωμα NGC6826 όπως το φωτογράφησε το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble. Κάπως έτσι θα τελειώσει την ζωή του και ο Ήλιος, σκορπίζοντας τα συστατικά του στο περιβάλλοντα διαστημικό χώρο.

Για εκατό εκατομμύρια χρόνια ακόμη ο Ήλιος θα διατηρηθεί σε μια κατάσταση ημι-ερυθρού ημι-γίγαντα, λάμποντας με λαμπρότητα σαράντα φορές μεγαλύτερη από τη σημερινή. Όμως τα αποθέματα ηλίου θα εξαντληθούν πολύ πιο γρήγορα από τα αποθέματα του υδρογόνου και αυτή η περίοδος ηρεμίας θα φτάσει στο τέλος της. Τότε ο Ήλιος θα μπει στο τελευταίο στάδιο της εξέλιξής του: το στάδιο της διπλής περιφερειακής καύσης, όπου το ήλιο «καίγεται» στην περιφέρεια της καρδιάς και το υδρογόνο σε μια πιο εξωτερική στιβάδα. Αυτή θα είναι η πιο ασταθής φάση της μακρόχρονης ζωής του. Σπρωγμένο από τους σπασμούς του άστρου που ψυχορραγεί, το περίβλημά του θα ξαναρχίσει να απλώνεται στον ορίζοντα των πλανητών του Ηλιακού συστήματος. Στο διάστημα αυτής της σχετικά σύντομης περιόδου που θα διαρκέσει περίπου 500.000 χρόνια, το μεγαλύτερο μέρος του περιβλήματος του άστρου θα διαφύγει στο διάστημα σχηματίζοντας ένα εντυπωσιακό πλανητικό νεφέλωμα. Για πρώτη φορά τότε θα αποκαλυφθεί η καρδιά του

Ήλιου, μια φλεγόμενη αλλά μικροσκοπική σφαίρα με μέγεθος περίπου όσο η Γη. Με επιφανειακή θερμοκρασία 100.000 °K η σφαίρα θα ακτινοβολεί κυρίως στο υπεριώδες, στέλνοντας για δεκάδες εκατομμύρια χρόνια ένα κύμα θανατηφόρας ακτινοβολίας να αποστειρώσει τους πλανήτες στους οποίους κάποτε πρόσφερε ζωή.

Έτσι θα πεθάνει ο Ήλιος. Μένοντας με τη μισή περίπου από την αρχική του μάζα δε θα μπορέσει να συμπιέσει και να θερμάνει αρκετά το εσωτερικό του, ώστε να ενεργοποιηθούν οι πυρηνικές αντιδράσεις καύσης του άνθρακα. Το θερμό αρχικά «πτώμα» του θα ψυχθεί σιγά-σιγά, καθώς θα μεταμορφώνεται σε λευκό νάνο, ένα άστρο αδρανές που η λιγοστή του ακτινοβολία θα ελαττώνεται όλο και περισσότερο μέχρι να σβήσει εντελώς και να μετατραπεί σε μαύρο νάνο έπειτα από μερικές δεκάδες δισεκατομμύρια χρόνια.