



## Νέο Ψηφιακό Πλανητάριο

Ψηφιακή παράσταση Θόλου

Ο Γαλαξίας μας είναι μία αχανής αστρική πολιτεία με εκατοντάδες δισ. άστρα και πλανήτες και τεράστιες ποσότητες αερίων και σκόνης, μέσα στις οποίες γεννιούνται νέα άστρα. Κανένα, όμως, άστρο δεν είναι ακριβώς ίδιο με κάποιο άλλο. Κάθε άστρο, δηλαδή, έχει διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά, ενώ ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την εξέλιξη και τον θάνατό τους είναι η αρχική τους μάζα. Επομένως, πώς γεννιούνται τα άστρα; Ποιο θα είναι το τέλος του Ήλιου; Τι είναι οι εκρήξεις σουπερνόβα, οι αστέρες νετρονίων, τα πάλσαρ και οι μαύρες τρύπες; Πώς ανακαλύψαμε την τεράστια μαύρη τρύπα που υπάρχει στον πυρήνα του Γαλαξία μας; Το ταξίδι μας ανάμεσα στα άστρα του Γαλαξία αρχίζει...

# ΤΑΞΙΔΙ ΣΤΟΝ ΓΑΛΑΞΙΑ



Λεωφ. Συγγρού 387 - 175 64 Π. Φάληρο, τηλ. 210 9469600, fax: 210 9430171,  
e-mail: info@eef.edu.gr, http://www.eef.edu.gr

ΑΛΕΞΗ Α. ΔΕΛΗΒΟΡΙΑ  
Αστρονόμου Ευγενιδείου Πλανηταρίου



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ  
ΝΕΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ

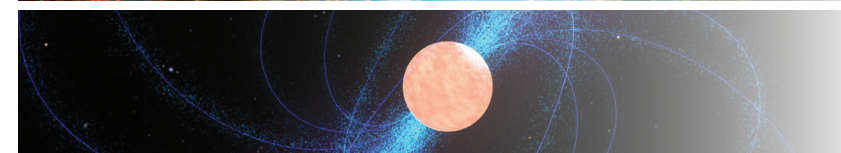
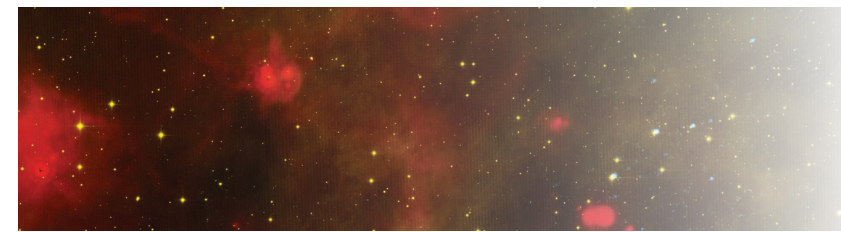
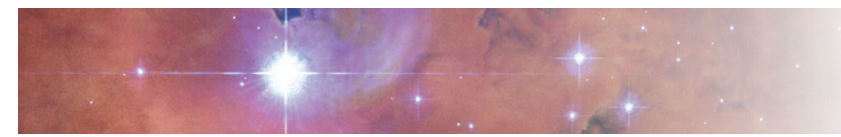
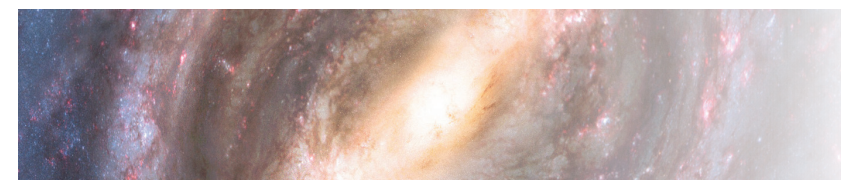
# ΤΑΞΙΔΙ ΣΤΟΝ ΓΑΛΑΞΙΑ

ΑΛΕΞΗ Α. ΔΕΛΗΒΟΡΙΑ  
Αστρονόμου Ευγενιδείου Πλανηταρίου

ΑΘΗΝΑ 2022

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	4
<b>1.</b> Εισαγωγή: Τα Μυστικά των Άστρων.....	6
<b>2.</b> Ο Γαλαξίας.....	14
<b>3.</b> Μεσοαστρική Ύλη και Αστρογένεση.....	22
<b>4.</b> Αστρική Ποικιλία.....	32
<b>5.</b> Κόκκινοι Γίγαντες και Λευκοί Νάνοι.....	40
<b>6.</b> Το Τέλος των Γιγάντιων Άστρων.....	50
<b>7.</b> Αστέρες Νετρονίων, Πάλσαρ και Μαύρες Τρύπες.....	60
<b>8.</b> Γαλαξιακές Μαύρες Τρύπες.....	68
Βιβλιογραφία/Ηλεκτρονικές Πηγές.....	78
Συντελεστές.....	80



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

4

Το Νέο Ψηφιακό Πλανητάριο του Ιδρύματος Ευγενίδου, ένα από τα μεγαλύτερα και καλύτερα ψηφιακά πλανητάρια στον κόσμο, συμβάλλει στην επιστημονική εκπαίδευση του κοινού της χώρας μας με πολλούς τρόπους, πρωτίστως όμως με τις ψηφιακές του παραγωγές. Από την έναρξη της λειτουργίας του το 2003, χρησιμοποιεί όλες τις δημιουργικές και τεχνικές δυνατότητες που παρέχουν τα σύγχρονα οπτικοακουστικά μέσα και οι νέες τεχνολογίες, τις οποίες συνδυάζει, προκειμένου να αφηγηθεί τα επιτεύγματα και την ιστορία της επιστήμης μ' έναν συναρπαστικό τρόπο. Μέσα από τις παραστάσεις του Πλανηταρίου, το ευρύ κοινό και οι μαθητές ενημερώνονται για τα επιτεύγματα της επιστήμης και τις νέες τεχνολογικές εξελίξεις, ενώ παράλληλα διαφωτίζονται σχετικά με τη φύση της επιστημονικής έρευνας.

Η παράσταση του Νέου Ψηφιακού Πλανηταρίου «Ταξίδι στον Γαλαξία» είναι μία περιήγηση στα άστρα του Γαλαξία μας, στην ζωή, στην εξέλιξη και στον «θάνατό» τους, στην μεσοαστρική ύλη, αλλά και στην τεράστια μαύρη τρύπα που έχει εντοπιστεί στο κέντρο του. Μέσα από την παράσταση παρουσιάζουμε πολλά από τα πιο ενδιαφέροντα φαινόμενα που συμβαίνουν στην αχανή έκταση του Γαλαξιακού μας χώρου, οι ανακαλύψεις των οποίων συχνά εμφανίζονται στην επικαιρότητα, όπως για παράδειγμα οι αστέρες νετρονίων, τα πάλσαρ, οι εκρήξεις σουπερνόβα και οι μαύρες τρύπες. Προσπαθούμε να δώσουμε απαντήσεις με όσο γίνεται πιο απλό τρόπο στα συχνά ερωτήματα που δεχόμαστε από τους επισκέπτες του Πλανηταρίου, τόσο από το μαθητικό όσο και από το γενικό κοινό, σχετικά με τον Γαλαξία μας αλλά και τους εκατοντάδες δισεκατομμύρια άλλους Γαλαξίες στο Σύμπαν.

5

Θεωρούμε ότι τα θέματα που έχουμε συμπεριλάβει σε αυτό το βιβλίο, καθώς και η σχετική βιβλιογραφία που παρατίθεται, συμπληρώνουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο όλα όσα παρουσιάζονται στην παράσταση και ευελπιστούμε ότι θα αποτελέσει χρήσιμο βοήθημα για κάθε ενδιαφερόμενο. Το συγκεκριμένο βιβλίο που συνοδεύει την παράσταση, όπως και όλα τα προηγούμενα, έχουν αναρτηθεί στην ιστοσελίδα του Ευγενιδείου Πλανηταρίου, στην Ενότητα «Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Πλανηταρίου» αλλά και στο «Ψηφιακό Αποθετήριο/Βιβλία», ελεύθερα διαθέσιμα για το κοινό και τους εκπαιδευτικούς. Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι, αρχής γενομένης από την ψηφιακή παράσταση «Αναζητώντας την Σκοτεινή Ύλη» και παράλληλα με το βιβλίο της παράστασης, συγγράφεται και ένα πιο συνοπτικό βιβλίο λίγων σελίδων, το οποίο απευθύνεται σε μαθητές, και είναι επίσης ελεύθερα διαθέσιμο στις πιο πάνω ενότητες.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον αστρονόμο του Ευγενιδείου Πλανηταρίου Δρα Φυσικής Αλέξη Δεληβοριά, για τη συγγραφή του βιβλίου αυτού, καθώς και όλους τους συναδέλφους της Ομάδας Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου για την επιμέλειά του. Θα ήταν, τέλος, παράλειψη αν δεν ευχαριστούσα και όλους τους συνεργάτες του Πλανηταρίου μας που συμμετείχαν στη δημιουργία της νέας παράστασης, και των οποίων τα ονόματα παρατίθενται στην τελευταία σελίδα του.

*Δρ Μάνος Κιτσώνας  
Διευθυντής Ευγενιδείου Πλανηταρίου*

# 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΑ ΜΥΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΣΤΡΩΝ

Πανόραμα του νότιου ουρανού, όπως φαίνεται πάνω από το αστεροσκοπείο La Silla, του Ευρωπαϊκού Νότιου Αστεροσκοπείου ESO στη Χιλή [© ESO/José Francisco Salgado ([josefrancisco.org](http://josefrancisco.org))].

Για χιλιάδες χρόνια, παρατηρούσαμε τον κόσμο μόνο με τα μάτια μας. Σταδιακά, ωστόσο, ανακαλύψαμε ότι υπάρχει ένα όριο σε αυτά που μπορούμε να δούμε. Γιατί η ανθρώπινη όραση αντιλαμβάνεται ένα ελάχιστο μόνο τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα ουράνια σώματα. Χωρίς βοήθεια, λοιπόν, το μόνο που μπορούμε να διακρίνουμε στον έναστρο ουρανό είναι τα άστρα που τον στολίζουν. Καθώς, όμως, κατασκευάζαμε όλο και ισχυρότερα τηλεσκόπια, οι αστρονομικές μας γνώσεις άρχισαν να διευρύνονται όλο και πιο πολύ. Ταξιδεύοντας, με την διεισδυτικότητά τους μακριά όλο και πιο μακριά στον χώρο, όλο

και πιο πίσω στον χρόνο, τα όρια του ορατού σε μας Σύμπαντος άρχισαν να επεκτείνονται όλο και πιο πολύ.

Τα τελευταία 50 περίπου χρόνια, μάλιστα, θέσαμε σε τροχιά διαστημικά τηλεσκόπια, που μας άνοιξαν νέα παράθυρα προς το Σύμπαν. Ανιχνεύοντας πλέον και τις αόρατες στα μάτια μας ακτινοβολίες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, οι αστρονομικές μας γνώσεις άρχισαν να πολλαπλασιάζονται ραγδαία. Γιατί, από τις ακτίνες γ μέχρι τα ραδιοκύματα, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεταφέρει όλες σχεδόν τις πληροφορίες που έχουμε συλλέξει έως τώρα για τα άστρα, τους γαλαξίες και το Σύμπαν.

Ατενίζοντας, όμως, τον έναστρο ουρανό από την Γη, δύσκολα μπορούμε να φανταστούμε την θαυμαστή πολυπλοκότητα του Σύμπαντος και τα μάτια μας συχνά μας ξεγελούν. Γιατί, δεν είναι όλες οι φωτεινές κουκκίδες που βλέπουμε άστρα, και αυτό που στα μάτια μας μοιάζει με άστρο μπορεί να είναι κάποιος τεχνητός δορυφόρος, κάποιος πλανήτης, ένα αστρικό σμήνος, ή ακόμη και κάποιος άλλος γαλαξίας. Ουράνια «αντικείμενα», δηλαδή, που αποκαλύπτουν την πραγματική τους φύση μόνο με την βοήθεια τηλεσκοπίων. Και ενώ, μακριά από τα φώτα της πόλης, τα άστρα στον ουρανό μοιάζουν αμέτρητα, εκείνα που μπορούμε να δούμε με γυμνό

μάτι δεν υπερβαίνουν τις 2 περίπου χιλιάδες. Είναι όλα τους άστρα του Γαλαξία μας: μίας τεράστιας αστρικής πολιτείας με εκατοντάδες δισ. άστρα. Και υπάρχουν εκατοντάδες δισ. γαλαξίες εκεί έξω...

Πόσοι από εμάς δεν αναρωτήθηκαν για τα άστρα και τους γαλαξίες, για την προέλευση του Σύμπαντος και για τα παράξενα φαινόμενα που κρύβει; Τέτοια ερωτήματα, τα οποία πηγάζουν από την έμφυτη περιέργεια που μας χαρακτηρίζει ως νοήμονα όντα, είχαν τεθεί από τα αρχαία κίονα χρόνια. Έκτοτε, αποκρυπτογραφήσαμε αρκετά από τα μυστικά του Σύμπαντος. Η μαγεία, βέβαια, που αισθανόμαστε αντικρύζοντας

Τέσσερις από τις πρώτες κεραίες της τεράστιας συστοιχίας ραδιοτηλεσκοπίων ALMA, η οποία εγκαταστάθηκε στην έρημο Ατακάμα της Χιλής, σε υψόμετρο 5 km [© ESO/José Francisco Salgado ([josefrancisco.org](http://josefrancisco.org))].



το θαυμαστό πανόραμα του έναστρου ουρανού δεν έχει ακόμη χαθεί.

Η εξερεύνηση, πάντως, του Διαστήματος είναι ακόμη στα σπάργαλα. Είναι αλήθεια ότι οι διαστημοσυσσκευές μας έχουν επισκεφθεί όλους τους πλανήτες του Ηλιακού συστήματος. Κι όμως, το **Voyager 1**, που εκτοξεύθηκε το 1977 για την εξερεύνηση του Δία και του Κρόνου, χρειάστηκε 35 ολόκληρα χρόνια μέχρι να βγει από την σφαίρα της επιρροής του Ήλιου, που ορίζει ο Ηλιακός άνεμος. Πραγματικά, η θρυλική αυτή διαστημοσυσσκευή είναι η πρώτη που κατόρθωσε να διαβεί αυτό το όριο και από τον Αύγουστο του 2012 ταξιδεύει μέσα στο μεσοαστρικό διάστημα του Γαλαξία. Σύντομα όμως, τα καύσιμά της θα εξαντληθούν. Και τότε, το Voyager 1, ακυβέρνητο πια και χωρίς να μας στέλνει άλλα δεδομένα, θα συνεχίσει την αέναη περιπλάνησή του ανάμεσα στα άστρα του Γαλαξία μας.

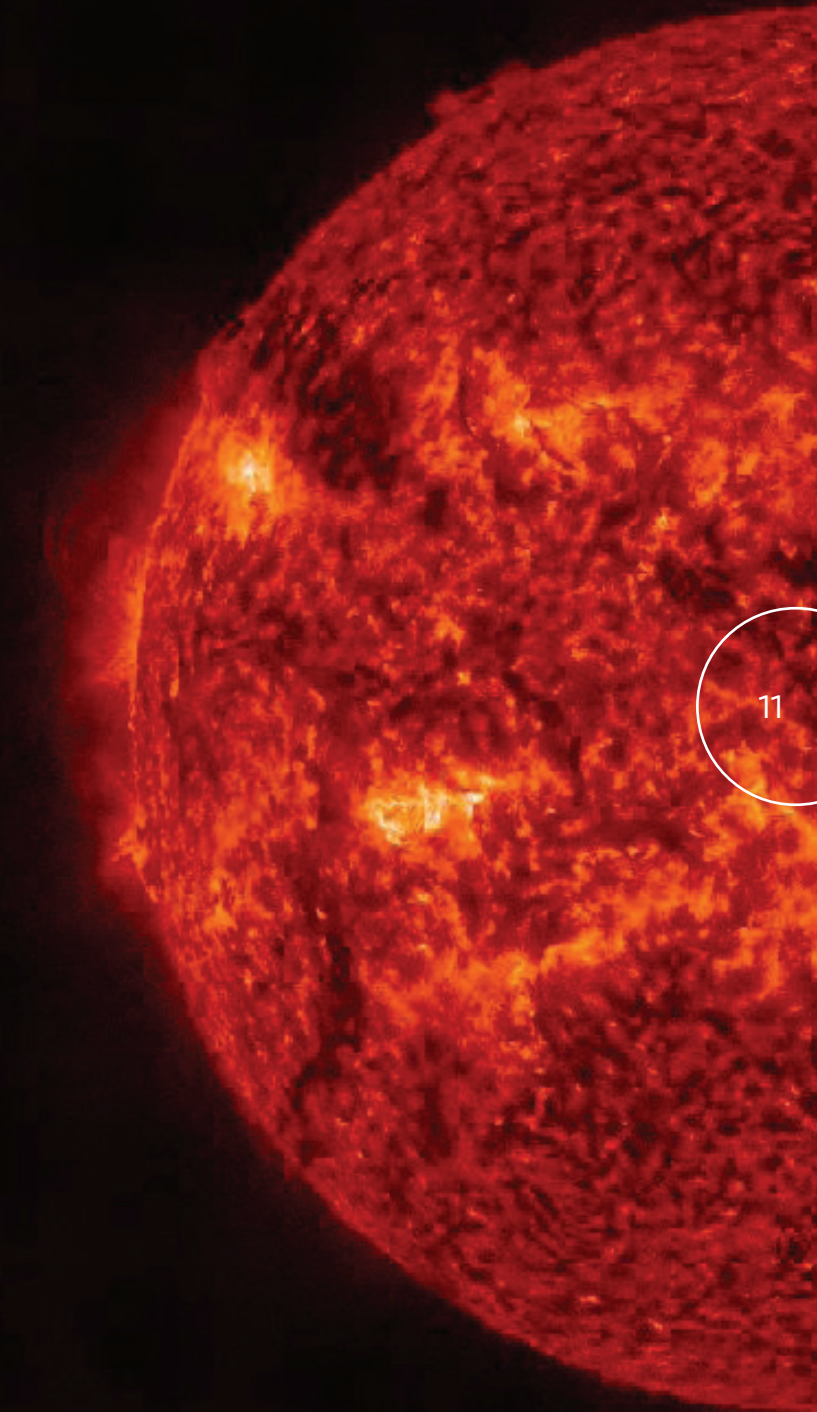
Απ' άκρη σ' άκρη, ο Γαλαξίας έχει διάμετρο τουλάχιστον 150.000 έτη φωτός. Εντυπωσιακές σπείρες από άστρα, αέρια και σκόνη εκτείνονται από τον πυρήνα του. Και εκεί ακριβώς, στο κέντρο του γαλαξιακού πυρήνα, ανακαλύψαμε μία τεράστια μαύρη τρύπα με μάζα 4 εκατ. φορές μεγαλύτερη απ' αυτήν του Ήλιου. Η ακανής αυτή αστρική πολιτεία, διατηρεί την συνοχή της χάρη στην αμοιβαία βαρυτική έλξη μεταξύ όλων των μορφών ύλης που εμπεριέχει.

Το Voyager 1, η θρυλική διαστημοσυσσκευή που εκτοξεύθηκε στις 5 Σεπτεμβρίου 1977 για την εξερεύνηση του Δία και του Κρόνου, ταξιδεύει πλέον στο μεσοαστρικό διάστημα (NASA/JPL-Caltech).

Περίπου 26.000 έτη φωτός μακριά από το γαλαξιακό κέντρο, βρίσκεται και το άστρο που μας χαρίζει απλόχερα το φως του: ο **Ήλιος**. Χάρη στις τεράστιες θερμοκρασίες και πιέσεις που επικρατούν στο εσωτερικό του, θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης μετατρέπουν το υδρογόνο στον πυρήνα του σε ήλιο, απελευθερώνοντας τεράστια ποσά ενέργειας. Αυτό είναι το άστρο μας: ένα κοινό και σχετικά συνηθισμένο άστρο του Γαλαξία, που δεν παύει ωστόσο να είναι το άστρο χωρίς το οποίο η ζωή στη Γη θα ήταν αδύνατη. Με επιφανειακή θερμοκρασία 6.000 °C, ο Ήλιος γεννήθηκε πριν από σχεδόν 5 δισ. χρόνια και θα συνεχίσει να «καίει» το υδρογόνο στον πυρήνα του για τουλάχιστον άλλα τόσα.

Από τον μικροσκοπικό Ερμή στον γιγάντιο Δία, από την καυτή Αφροδίτη στον παγωμένο Πλούτωνα και από τη Ζώνη των Αστεροειδών στα συντρίμια του Νέφους Oort, η ποικιλομορφία των ουράνιων σωμάτων που εμπεριέχει το Ηλιακό σύστημα είναι εντυπωσιακή. Οκτώ πλανήτες, τουλάχιστον πέντε νάνοι πλανήτες, δεκάδες δορυφόροι και αναρίθμητοι ακόμη αστεροειδείς και κομήτες, περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο, ακολουθώντας τον στο αέναο ταξίδι του γύρω από το γαλαξιακό κέντρο. Σε έναν, μάλιστα, απ' τους πλανήτες αυτούς, σε έναν μικροσκοπικό βράχο, χαμένο μέσα στο Σύμπαν, εμφανίστηκε η ζωή. Και από τις πρωταρχικές μορφές της

Ο Ήλιος σε εικόνα που ελήφθη από το τροχιακό αστεροσκοπείο SDO (NASA/SDO/AIA).



ζωής που εμφανίστηκαν σ' αυτόν τον πλανήτη εξελίχθηκαν και κάποια νοήμονα όντα που συνεχίζουν την προσπάθειά τους να αποκρυπτογραφήσουν τα μυστικά των άστρων.

Ο Ήλιος, όμως, δεν εκλύει μόνο ακτινοβολία. Όπως και σε κάθε άλλο άστρο, αναρίθμητα φορτισμένα σωματίδια ξεκύνονται από την επιφάνειά του, σε μία ασταμάτητη ροή που σχηματίζει τον **Ηλιακό άνεμο**. Αλληλεπιδρώντας με το μαγνητικό πεδίο της Γης, ο Ηλιακός άνεμος προκαλεί το μαγευτικό φαινόμενο του πολικού σέλαος. Συνεχίζοντας, ωστόσο, την πορεία του, «παρασέρνει» το μαγνητικό πεδίο του Ήλιου στο Διάστημα, σχηματίζοντας γύρω από το Ηλιακό σύστημα μία προστατευτική «φουσαλίδα»: την **ηλιόσφαιρα**. Κάπου 120 φορές πιο μακριά απ' όσο η Γη από τον Ήλιο, η επιφάνεια

της φουσαλίδας αυτής είναι το απώτατο όριο στο οποίο εκτείνεται η επιρροή του ηλιακού ανέμου.

Πέρα από το όριο αυτό αρχίζει το μεσοαστρικό Διάστημα, με τα αναρίθμητα άστρα του. Οι αποστάσεις, όμως, ανάμεσα στα άστρα είναι σ' αλήθεια αδιανόητες. Για παράδειγμα, μόλις 4 έτη φωτός μακριά από την Γη βρίσκεται ο **Εγγύτατος του Κενταύρου**: το πλησιέστερο σε μας άστρο, μετά τον Ήλιο φυσικά. Εάν αυτός ήταν ο προορισμός του Voyager 1, ταξιδεύοντας με ταχύτητα 17 km/s, θα έφτανε εκεί μετά από 70.000 χρόνια. Ακόμη πιο ασύλληπτες, όμως, από τις αποστάσεις ανάμεσα στα άστρα, είναι οι αποστάσεις ανάμεσα στους γαλαξίες. Αρκεί μόνο να πούμε ότι, εάν ταξιδεύαμε με την ταχύτητα του φωτός, δηλαδή με 300.000 km/s, θα χρειαζόμασταν 2,5 εκατ. χρόνια για να φτάσουμε μέχρι τον

γαλαξία της Ανδρομέδας, τον πλησιέστερο σε μας γιγάντιο γαλαξία. Και υπάρχουν περίπου 2 τρισ. γαλαξίες στο παρατηρήσιμο Σύμπαν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αυτού του βιβλίου θα κάνουμε μία συνοπτική παρουσίαση του Γαλαξία μας και της πληθώρας των ουράνιων σωμάτων που εμπεριέχει, ενώ στο τρίτο θα εστιάσουμε στην μεσοαστρική ύλη, οι πυκνότερες συσσωρεύσεις της οποίας συγκροτούν τα αστρικά μαιευτήρια, όπου γεννιούνται νέα άστρα. Ακολουθώντας, θα αναφερθούμε στην εντυπωσιακή ποικιλία των άστρων που υπάρχουν στον Γαλαξία, αλλά και σε κάθε άλλο γαλαξία του Σύμπαντος, εστιάζοντας στο Διάγραμμα Hertzsprung–Russell, το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο των αστρονόμων για την μελέτη και «απεικόνιση» της αστρικής εξέλιξης. Στο

5<sup>ο</sup> κεφάλαιο, θα επικεντρωθούμε στην εξέλιξη και τον θάνατο των άστρων που έχουν παρόμοια μάζα με τον Ήλιο, ενώ στο 6ο κεφάλαιο θα δούμε πώς τελειώνουν την ζωή τους τα άστρα του Σύμπαντος που έχουν πολλαπλάσια μάζα από αυτήν του Ήλιου, μέσα από εκτυφλωτικές εκρήξεις σουπερνόβα. Στο 7ο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα στοιχεία για τους αστέρες νετρονίων, τα πάσσαρ και τις μαύρες τρύπες, ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο αυτού του βιβλίου θα εστιάσουμε στην γιγάντια μαύρη τρύπα που υπάρχει στον πυρήνα του Γαλαξία μας και θα δούμε ότι αυτού του είδους οι γαλαξιακές μαύρες τρύπες υπάρχουν στους πυρήνες των περισσότερων από τους γαλαξίες του Σύμπαντος. Το ταξίδι μας ανάμεσα στα άστρα του Γαλαξία αρχίζει... ★



Ο γαλαξίας της Ανδρομέδας.  
(📷 © Robert Gendler;  
<http://www.robgendlerastropics.com/>)





2

Ο ΓΑΛΑΞΙΑΣ

Καλλιτεχνική αναπαράσταση του Γαλαξία μας

Ο Γαλαξίας μας εμπεριέχει τουλάχιστον 200 δισ. άστρα, δεκάδες δισ. πλανήτες και τεράστιες ποσότητες αερίων και σκόνης. Ο μορφολογικός του τύπος τον κατατάσσει στους ραβδωτούς σπειροειδείς γαλαξίες, που σημαίνει ότι είναι ένας σχετικά επίπεδος γαλαξίας, οι σπείρες του οποίου ξεκινούν από μία κεντρική «ράβδο» άστρων, αερίων και σκόνης, που βρίσκεται στον πυρήνα του. Εκεί ακριβώς, στο κέντρο του γαλαξιακού πυρήνα, οι αστρονόμοι εντόπισαν μία ισχυρή πηγή ραδιοκυμάτων, όπου βρίσκεται μία τεράστια μαύρη τρύπα, με μάζα 4 εκατ. φορές μεγαλύτερη απ' αυτήν του Ήλιου.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ύλης του γαλαξιακού δίσκου είναι συγκεντρωμένο στις σπείρες του Γαλαξία, οι οποίες αποτελούνται κατά κύριο λόγο από άστρα μικρής σχετικά ηλικίας, καθώς και από μεγάλες ποσότητες αερίων και σκόνης, στο εσωτερικό των οποίων γεννιούνται νέα άστρα. Ο γαλαξιακός δίσκος έχει διάμετρο που, σύμφωνα με τις τελευταίες εκτιμήσεις, αγγίζει τα 200.000 έτη φωτός, ενώ το πάχος του υπολογίζεται στα 1.000 έτη φωτός. Όλα τα άστρα του γαλαξιακού δίσκου περιφέρονται γύρω από το γαλαξιακό κέντρο, σε τροχιές που λίγο ως πολύ τα διατηρούν στο επίπεδό του. Σύμφωνα, μάλιστα, με την τελευταία χαρτογράφηση του Γαλαξία και την ανάλυση των σχετικών δεδομένων, ο Ήλιος συμπληρώνει μία πλήρη περιφορά γύρω από το γαλαξιακό κέντρο σε 212 εκατ. χρόνια. Την τελευταία, δηλαδή, φορά που ο Ήλιος και το Ηλιακό μας σύστημα βρίσκονταν στην ίδια περιοχή του

Γαλαξία, στην Γη κυριαρχούσαν οι δεινόσαυροι. Δεδομένου, λοιπόν, ότι ο Ήλιος γεννήθηκε πριν από περίπου 4,6 δισ. χρόνια, το Ηλιακό μας σύστημα υπολογίζεται ότι έχει συμπληρώσει έως τώρα 21 περιφορές γύρω από το γαλαξιακό κέντρο.

Ο γαλαξιακός δίσκος περιβάλλεται από μία αχανή σφαιρική άλω, με σχετικά λιγοστά άστρα πολύ μεγαλύτερης ηλικίας και πολύ μικρότερης φωτεινότητας, τα οποία περιφέρονται γύρω από το γαλαξιακό κέντρο σε ιδιαίτερα ελλειπτικές τροχιές. Επειδή, όμως, σε αντίθεση με τον γαλαξιακό δίσκο, η σφαιρική άλως διαθέτει ελάχιστες ποσότητες αερίων και σκόνης, τα επεισόδια αστρογένεσης σ' αυτήν είναι ελάχιστα. Το εντυπωσιακό, μάλιστα, είναι ότι η σφαιρική αυτή άλως εμπεριέχει και το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής μάζας του Γαλαξία μας, το οποίο όμως δεν μπορούμε να δούμε, καθώς αποτελείται από **σκοτεινή ύλη**, δηλαδή μία παράξενη μορφή ύλης, η οποία δεν αλληλεπιδρά με το φως και γι' αυτό είναι αόρατη.<sup>1</sup>

Σε αντίθεση με τον Ήλιο, τα περισσότερα από τα άστρα του Γαλαξία δεν περιπλανώνται μόνα τους στην απεραντοσύνη του Διαστήματος, αλλά ανήκουν σε διπλά και τριπλά συστήματα άστρων, όπου τα άστρα του κάθε συστήματος περιφέρονται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός διπλού αστρικού συστήματος είναι ο **Σείριος**, το λαμπρότερο άστρο του ουρανού στον αστερισμό του Μεγάλου Κυνός, σε απόσταση μόλις 8,6 ετών φωτός. Αντιθέτως, συστήματα άστρων με 4, 5, 6 ή και 7 άστρα είναι πολύ πιο σπάνια.

<sup>1</sup> Περισσότερες πληροφορίες για την σκοτεινή ύλη μπορείτε να αντλήσετε από το βιβλίο της ψηφιακής παράστασης «Αναζητώντας την Σκοτεινή Ύλη».

Καλλιτεχνική αναπαράσταση του «διπλού» άστρου Σείριος, το οποίο αποτελείται από ένα άστρο με διπλάσια περίπου μάζα από αυτήν του Ήλιου (αριστερά), καθώς και από έναν γαλάζιο λευκό νάνο (δεξιά) [NASA, ESA and G. Bacon (STScI)].



Υπάρχουν, όμως, και ομάδες άστρων που περιλαμβάνουν πολλά περισσότερα άστρα. Τα **ανοιχτά σμήνη**, για παράδειγμα, εντοπίζονται κυρίως στο επίπεδο του γαλαξιακού δίσκου, ενώ αποτελούνται από λίγες εκατοντάδες έως και λίγες χιλιάδες άστρα, συγκεντρωμένα σε μία περιοχή με διάμετρο που δεν υπερβαίνει τα 30 έτη φωτός. Τα άστρα που απαρτίζουν ένα ανοιχτό σμήνος έχουν όλα τους σχετικά υψηλότερη περιεκτικότητα σε στοιχεία βαρύτερα από το υδρογόνο και το ήλιο, διότι γεννήθηκαν σε γιγάντια νέφη αερίων και σκόνης, που είχαν ήδη εμπλουτιστεί με βαρύτερα στοιχεία, όταν προηγούμενες γενιές άστρων ολοκλήρωσαν την ζωή τους σε εκρήξεις σουπερνόβα και εκτίναξαν τις εξωτερικές τους στοιβάδες στο Διάστημα, διασπείροντας στον μεσοαστρικό χώρο τα βαρύτερα στοιχεία που είχαν συνθέσει στο εσωτερικό τους. Ένα από τα γνωστότερα ανοιχτά σμήνη είναι το σμήνος των Πλειάδων, 400 έτη φωτός μακριά. Οι **Πλειάδες** αποτελούνται από αρκετές εκατοντάδες άστρα, τα οποία είναι ορατά μόνο με την βοήθεια τηλεσκοπίων, εκτός από έξι που είναι ορατά με γυμνό μάτι, ενώ η ηλικία του σμήνους υπολογίζεται ότι δεν υπερβαίνει τα 150 εκατ. έτη.

Τα ανοιχτά σμήνη, ωστόσο, δεν διαρκούν για πάντα, διότι η αμοιβαία βαρυτική έλξη μεταξύ των άστρων που τα απαρτίζουν δεν είναι ικανή να δι-

ατηρήσει την συνοχή τους άθικτη. Για παράδειγμα, «στενές επαφές» μεταξύ των άστρων ενός σμήνους μπορούν να προσδώσουν σε κάποιο από αυτά τόσο μεγάλη ταχύτητα, ώστε το άστρο αυτό να «διαφύγει» στο Διάστημα. Ένας άλλος παράγοντας που καθιστά τα ανοιχτά αστρικά σμήνη επιρρεπή στις αστρικές «λιποταξίες», είναι οι παλιρροϊκές δυνάμεις που ασκούνται πάνω τους κατά την διέλευσή τους δίπλα από ένα άλλο σμήνος, ή μέσα από ένα γιγάντιο νέφος αερίων και σκόνης. Για τους λόγους αυτούς τα ανοιχτά σμήνη συνήθως διαλύονται σε μερικές εκατοντάδες εκατ. χρόνια.

Τα **σφαιρωτά σμήνη**, από την άλλη, είναι αστρικά σμήνη πολύ μεγαλύτερης ηλικίας, που περιλαμβάνουν από μερικές δεκάδες χιλιάδες έως και μερικά εκατομμύρια άστρα, συνωστισμένα σε μία περιοχή, που συνήθως δεν υπερβαίνει τα 150 έτη φωτός. Τα σφαιρωτά σμήνη αποτελούνται από τα αρχαιότερα ίσως άστρα του Γαλαξία και κατανέμονται με σφαιρικό περίπου τρόπο στην γαλαξιακή άλω που τον περιβάλλει. Επειδή όμως περιλαμβάνουν τόσα πολλά άστρα, η βαρυτική έλξη που αναπτύσσεται μεταξύ τους είναι αρκετά ισχυρή, διασφαλίζοντας έτσι τη συνοχή τους για δισεκατομμύρια χρόνια. Τα άστρα που τα απαρτίζουν έχουν συνήθως παρόμοια ηλικία και χημική σύσταση, η οποία έχει σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε στοιχεία βαρύτερα

από το υδρογόνο και το ήλιο, διότι σχηματίστηκαν όταν ο Γαλαξίας μας ήταν ακόμη νέος, και ως εκ τούτου τα πρώτα άστρα του δεν είχαν ακόμη προλάβει σε μεγάλο βαθμό να εμπλουτίσουν το Διάστημα με βαρύτερα στοιχεία.

Ένα από τα χαρακτηριστικότερα, ίσως, παραδείγματα σφαιρωτού σμήνους είναι το σμήνος **Ωμέγα Κενταύρου**. Με διάμετρο που αγγίζει τα 200 έτη φωτός, το σμήνος αυτό υπολογίζεται ότι εμπεριέχει περί τα 10 εκατ. άστρα και είναι το μεγαλύτερο σφαιρωτό σμήνος του Γαλαξία. Σε αντίθεση, ωστόσο, με τα περισσότερα σμήνη αυτού του τύπου, οι

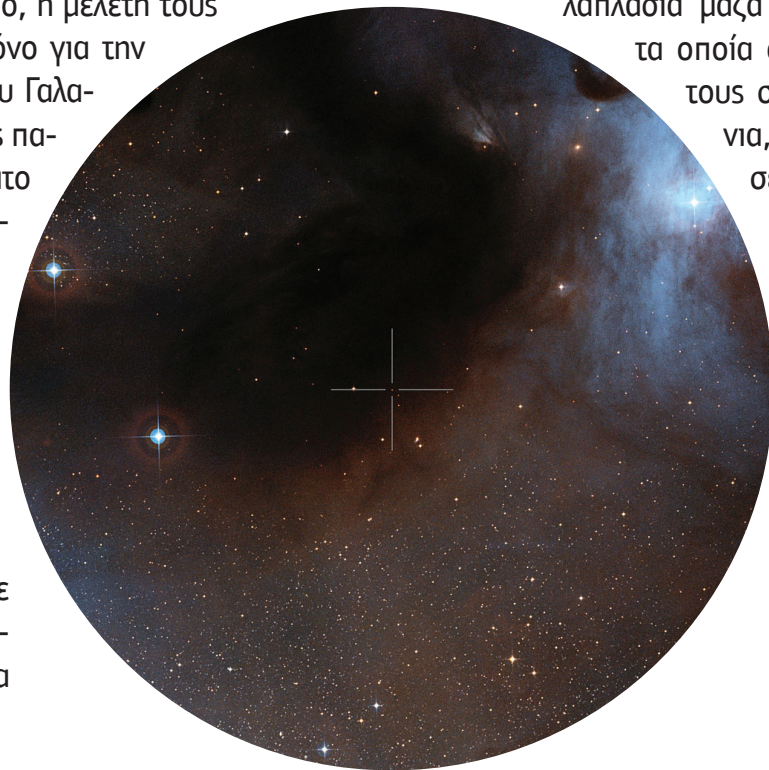


Το ανοιχτό σμήνος NGC 602, στο εσωτερικό του νεφελώματος N90, βρίσκεται στο Μικρό Νέφος του Μαγγελάνου, έναν μικρό γαλαξία-δορυφόρο του Γαλαξία μας [📷 NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration].

Το σφαιρωτό σμήνος Ωμέγα Κενταύρου, σε εικόνα που ελήφθη από το τηλεσκόπιο VST, που βρίσκεται στο Αστεροσκοπείο Paranal του ESO, στην Χιλή [📷 ESO/INAF-VST/OmegaCAM. Ackn.: A. Grado/INAF-Capodimonte Observatory].

αστρονόμοι θεωρούν ότι τα άστρα που το απαρτίζουν γεννήθηκαν σε διαφορετικές εποχές αστρογένεσης, σε μία περίοδο που διήρκεσε τουλάχιστον 2 δισ. έτη, γεγονός που σημαίνει ότι τα άστρα του έχουν και διαφορετικές περιεκτικότητες σε βαρύτερα στοιχεία. Γι' αυτό και εικάζουν ότι το Ωμέγα Κενταύρου είναι στη πραγματικότητα το υπόλειμμα του πυρήνα ενός μικρού γαλαξία-νάνου που «αφομοιώθηκε» από τον Γαλαξία μας. Όπως και να 'χει, δεδομένου ότι τα άστρα που εμπεριέχονται στα σφαιρωτά σμήνη είναι κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερης ηλικίας από τον Ήλιο, η μελέτη τους είναι σημαντική, όχι μόνο για την ιστορία της εξέλιξης του Γαλαξία, αλλά και επειδή μας παρέχουν και ένα κατώτατο όριο για την ίδια την ηλικία του Σύμπαντος.

Τα περισσότερα άστρα του Γαλαξία έχουν μάζα και επιφανειακή θερμοκρασία σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με τον Ήλιο. Τα άστρα που μοιάζουν με τον Ήλιο είναι αρκετά λιγότερα, ενώ τα γιγάντια



άστρα, με μάζα τουλάχιστον 20 φορές μεγαλύτερη απ' αυτήν του Ήλιου, είναι ελάχιστα. Η εξέλιξη του κάθε άστρου είναι βέβαια διαφορετική και, όπως θα δούμε αναλυτικότερα στην συνέχεια, εξαρτάται από την αρχική του μάζα: όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα ενός άστρου όταν αυτό γεννιέται, τόσο ταχύτερα καταναλώνει τα πυρηνικά του καύσιμα και τόσο νεότερο πεθαίνει. Έτσι, τα μικρότερα άστρα του Γαλαξία συνεχίζουν να καταναλώνουν το υδρογόνο στον πυρήνα τους ακόμη και για εκατοντάδες δισ. έτη, σε αντίθεση με τα άστρα που έχουν πολλαπλάσια μάζα από αυτήν του Ήλιου, τα οποία ολοκληρώνουν την ζωή τους σε λίγα μόνο εκατ. χρόνια, όταν και εκρήγνυνται σε αδιανόητα βίαιες εκρήξεις σουπερνόβα, αφήνοντας ως λείψανο είτε **αστέρες νετρονίων** είτε **μαύρες τρύπες**. Ο Γαλαξίας μας, όμως, περιέχει και μεγάλο αριθμό «αποτυχημένων» άστρων, δηλαδή ουράνιων σωμάτων που δεν συσώρευσαν πάνω τους την ελάχιστη ύλη που απαιτείται για

την έναρξη των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης στο εσωτερικό τους. Τα «άστρα» αυτά είναι γνωστά ως **καφέ νάνοι**.

Όσον αφορά στον συνολικό αριθμό των πλανητών του Γαλαξία μας, αυτός πρέπει να ανέρχεται σε πολλές δεκάδες δισεκατομμύρια. Από την ανακάλυψη του πρώτου εξωπλανήτη στις αρχές της δεκαετίας του 1990, μέχρι και τον Οκτώβριο του 2022, έχει επιβεβαιωθεί η ύπαρξη περισσότερων

από 5.170 εξωπλανητών, ενώ εκατοντάδες άλλοι περιμένουν την ανεξάρτητη επιβεβαίωση της πλανητικής τους ιδιότητας. Σύμφωνα, μάλιστα, με τις τελευταίες θεωρητικές εκτιμήσεις, ο Γαλαξίας πρέπει να εμπεριέχει περίπου 6 δισ. πλανήτες σαν την Γη, που περιφέρονται στην **Κατοικήσιμη Ζώνη** του άστρου τους, δηλαδή έχουν συνθήκες που επιτρέπουν την ύπαρξη του νερού σε υγρή μορφή και κατά συνέπεια διαθέτουν ευνοϊκό περιβάλλον για την εμφάνιση της ζωής ★

Το σταυρόνημα της εικόνας σημειώνει την θέση ενός καφέ νάνου, που εντοπίστηκε στην περιοχή αστρογένεσης ρ Οφιούχου

[📷 ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/Digitized Sky Survey 2. Ackn.: Davide De Martin].

Καλλιτεχνική αναπαράσταση δειλινού, όπως θα φαινόταν από την υπεργαία Gliese 667 Cc. Το φωτεινότερο άστρο στον ουρανό είναι ο κόκκινος νάνος Gliese 667 C, ο οποίος είναι μέρος ενός τριπλού αστρικού συστήματος περίπου 24 έτη φωτός μακριά μας. Τα δύο άλλα άστρα του συστήματος διακρίνονται στα δεξιά της εικόνας (📷 ESO/L. Calçada).

# 3

## ΜΕΣΟΑΣΤΡΙΚΗ ΥΛΗ ΚΑΙ ΑΣΤΡΟΓΕΝΕΣΗ

Το αστρικό μαιευτήριο NGC 2467, περίπου 13.000 έτη φωτός μακριά, σε εικόνα βασισμένη σε δεδομένα που συνέλεξε το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble [NASA, ESA and Orsola De Marco (Macquarie University)].

Οι αποστάσεις ανάμεσα στα άστρα του Γαλαξία είναι πραγματικά τεράστιες. Το μεσοαστρικό Διάστημα, ωστόσο, δεν είναι κενό από ύλη. Ανάμεσα στα άστρα του Γαλαξία «διαχέεται» ένα εξαιρετικά αραιό μείγμα αερίων και σκόνης, που ονομάζεται **μεσοαστρική ύλη**. Με μέση πυκνότητα μόλις 1 άτομο/cm<sup>3</sup>, η μεσοαστρική ύλη αντιστοιχεί περίπου στο 10-15% της ορατής ύλης που εμπεριέχει ο Γαλαξίας και αποτελείται κατά κύριο λόγο από 99% αέρια και 1% σκόνη.

Στο μεγαλύτερο τμήμα της, η αέρια μεσοαστρική ύλη αποτελείται από αρχέγονο υδρογόνο και ήλιο, τα οποία σχηματίστηκαν στα πρώτα λεπτά της κοσμικής εξέλιξης. Τα μικροσκοπικά σωματίδια που απαρτίζουν την μεσοαστρική σκόνη, αντιθέτως, εμπεριέχουν ίχνη όλων των βαρύτερων στοιχείων, τα οποία συντήχθηκαν πολύ αργότερα στο εσωτερικό γιγάντιων άστρων και εκτινάχθηκαν στο Διάστημα, όταν τα άστρα αυτά ολοκλήρωσαν τον κύκλο της ζωής τους σε εκρήξεις σουπερνόβα. Κυρίως, όμως, αποτελούνται από ενώσεις άνθρακα, πυριτίου και οξυγόνου, καθώς και από πάγο.

Παρόλο που η μεσοαστρική ύλη στον Γαλαξία έχει σε γενικές γραμμές εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα, συσσωρεύεται συχνά σε πολύ πυκνότερα νεφελώματα, τα βασικότερα από τα οποία είναι τα νεφελώματα εκπομπής, τα νεφελώματα ανάκλασης και τα νεφελώματα απορρόφησης.

Τα **νεφελώματα εκπομπής** σχηματίζονται συ-

νήθως γύρω από νεαρά, γιγάντια και υπέρθερμα άστρα, τα οποία ιονίζουν με την υπεριώδη τους ακτινοβολία το ουδέτερο ατομικό υδρογόνο που τα περιβάλλει. Καθώς, δηλαδή, η υπεριώδης ακτινοβολία «διεγείρει» τα άτομα υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια «αποδεσμεύονται» από τους ατομικούς τους πυρήνες, σχηματίζοντας μία «θάλασσα» πλάσματος από ηλεκτρόνια και πυρήνες υδρογόνου. Στη συνέχεια, όμως, τα ηλεκτρόνια επανενώνονται με τους πυρήνες υδρογόνου, σχηματίζοντας και πάλι άτομα υδρογόνου, τα οποία, καθώς επανέρχονται στην χαμηλότερη ενεργειακή τους κατάσταση, εκπέμπουν ορατή ακτινοβολία σε μήκη κύματος που αντιστοιχούν κατά κύριο λόγο στο κόκκινο τμήμα του ορατού φωτός. Γι' αυτό εξάλλου και τα νεφελώματα αυτού του τύπου έχουν συχνά κόκκινο χρώμα (οι διαφορετικές χρωματικές αποχρώσεις τους οφείλονται σε άλλα στοιχεία, όπως είναι το ήλιο, ο άνθρακας, το άζωτο, το οξυγόνο κ.λπ).

Τα **νεφελώματα ανάκλασης**, αντιθέτως, αποτελούνται κυρίως από χαμηλότερης θερμοκρασίας μεσοαστρική σκόνη, η οποία ανακλά και σκεδάζει το φως των γειτονικών τους άστρων. Αυτού του είδους τα νεφελώματα έχουν συνήθως μπλε χρώμα, γιατί το μέγεθος των κόκκων σκόνης που εμπεριέχουν είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος του ορατού φωτός που αντιστοιχεί στο μπλε χρώμα, με αποτέλεσμα να σκεδάζεται περισσότερο το μπλε απ' ό,τι το κόκκινο χρώμα.

Τα **νεφελώματα απορρόφησης**, τέλος, είναι αρ-



Το νεφέλωμα Φυσαλίδα είναι ένα νεφέλωμα εκπομπής, περίπου 8.000 έτη φωτός μακριά. Το μπλε χρώμα του οφείλεται στο οξυγόνο της μεσοαστρικής ύλης, το οποίο θερμαίνεται από το υπέρθερμο και μεγάλης μάζας άστρο που βρίσκεται στο εσωτερικό του (NASA, ESA, Hubble Heritage Team).

κετά πυκνότερα και, καθώς έχουν σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε σκόνη, απορροφούν ή/και σκεδάζουν πλήρως το ορατό φως που προσπίπτει πάνω τους, γεγονός που τα καθιστά αδιαφανή στην ορατή ακτινοβολία. Γι' αυτό και συχνά τα σκοτεινά αυτά νεφελώματα ξεχωρίζουν όταν βρίσκονται μπροστά από άλλα άστρα ή νεφελώματα εκπομπής, με το σκοτεινό τους περίγραμμα να διακρίνεται μπροστά από ένα φωτεινό φόντο.

Με μέση θερμοκρασία που τυπικά δεν υπερβαίνει τους  $-223\text{ }^{\circ}\text{C}$ , και με έκταση που μπορεί και να φτάνει τα 500-600 έτη φωτός, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αερίων και σκόνης συγκροτούν τα **γιγάντια μοριακά νέφη**, τα οποία αποτελούνται κυρίως από μοριακό υδρογόνο, αναμειγμένο με ίχνη άλλων μορίων, όπως νερό, μονοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία. Τα νέφη αυτά, τα ψυχρότερα και πυκνότερα της μεσοαστρικής ύλης, αποτελούν τα «μυιευτήρια» των άστρων, ενώ εντοπίζονται κυρίως στους γαλαξιακούς δίσκους των σπειροειδών γαλαξιών, καθώς και στους ακανόνιστους γαλαξίες. Τα μεγαλύτερα από αυτά τα παγωμένα αστρικά μυιευτήρια έχουν μάζα που υπερβαίνει το 1 εκατ. ηλιακές μάζες, αρκετή ύλη δηλαδή για τη δημιουργία δεκάδων χιλιάδων άστρων. Τα γιγάντια μοριακά νέφη, όμως, δεν διαρκούν για πάντα, διότι τα νέα άστρα που γεννιούνται στο εσωτερικό ενός από

Το νεφέλωμα Κεφάλι Μάγισσας ανακλά το φως του άστρου Ρίγκελ, ενός γαλάζιου υπεργίγαντα 50.000 φορές λαμπρότερου από τον Ήλιο (NASA/STScI Digitized Sky Survey/Noel Carboni).

αυτά απομακρύνουν με τους αστρικούς τους ανέμους τα αέρια και την σκόνη του νέφους που περίσσεψαν από τα διαδοχικά επεισόδια αστρογένεσης, έτσι ώστε μόλις το 10% της αρχικής του μάζας οδηγεί στον σχηματισμό άστρων και πλανητών. Το υπόλοιπο επιστρέφει ξανά στο μεσοαστρικό Διάστημα για να ανακυκλωθεί σε άλλα μοριακά νέφη.

Δύο είναι οι κύριες δυνάμεις, οι οποίες ανταγωνίζονται η μία την άλλη στο εσωτερικό των μοριακών νεφών: η βαρύτητα και η πίεση. Η **βαρύτητα** οφείλεται στη μάζα των σωματιδίων που εμπεριέχει ένα μοριακό νέφος, και έχει την τάση να συσσωρεύει τα αέρια μόρια και τη σκόνη σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ύλης, εξαιτίας της αμοιβαίας έλξης που αναπτύσσεται ανάμεσά τους. Η **εσωτερική πίεση** αντίθετα, οφείλεται στη μικρή κινητική ενέργεια αυτών των σωματιδίων, και έχει την τάση να απομακρύνει το ένα από το άλλο. Επειδή, όμως, τα μοριακά νέφη έχουν κατά κανόνα πολύ χαμηλή θερμοκρασία, οι ταχύτητες των σωματιδίων που εμπεριέχουν είναι πολύ μικρές, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχουν περιοχές στο εσωτερικό τους, όπου η τάση των σωματιδίων αυτών να συσσωρευθούν σε πυκνότερες συγκεντρώσεις ύλης υπερσχύει της τάσης τους να απομακρυνθούν το ένα από το άλλο. Αυτή η ανομοιομορφία στην κατανομή της ύλης στο εσωτερικό ενός γιγάντιου μορια-

Αυτός ο «πύργος» ψυχρών αερίων και σκόνης βρίσκεται στο Νεφέλωμα Αετός, ένα από τα γνωστότερα αστρικά μυιευτήρια, και έχει ύψος περίπου 9,5 έτη φωτός (NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team STScI/AURA).

κού νέφους το καθιστά βαρυντικά ασταθές.

Αυτό, ωστόσο, σημαίνει ότι, εάν υπάρξει κάποια διαταραχή στην ευρύτερη περιοχή του, όπως είναι η έκρηξη ενός γειτονικού σουπερνόβα, θα δώσει το έναυσμα για την βαρυντική του κατάρρευση, διότι η εσωτερική του πίεση δεν θα επαρκεί, ώστε να αντισταθεί στην περαιτέρω συστολή του νέφους κάτω από το ίδιο του το βάρος. Επομένως, η κατανομή της ύλης στο εσωτερικό ενός μοριακού νέφους δεν είναι ποτέ εντελώς ομοιόμορφη. Γι' αυτό, καθώς το νέφος αρχίζει να καταρρέει, σχηματίζονται στο εσωτερικό του μικρότερες περιοχές ή **προαστρικά νεφελώματα**, με μεγαλύτερη πυκνότητα σε σχέση με άλλες περιοχές του νέφους, καθένα απ' τα οποία θα καταρρεύσει κάτω από το ίδιο του το βάρος, σχηματίζοντας το δικό του άστρο.

Κάθε προαστρικό νεφέλωμα, που βρίσκεται στο «χειλός» της κατάρρευσης, έχει αρχικά χαμηλή θερμοκρασία και εσωτερική πίεση. Καθώς, όμως, η βαρύτητα υπερσχύει, το νεφέλωμα αρχίζει να καταρρέει βαρυντικά και τα σωματίδια αερίων και σκόνης από τις παρυφές του «πέφτουν» προς το κέντρο του, μετατρέποντας τη δυναμική τους ενέργεια σε κινητική. Την ίδια στιγμή, οι συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων αυτών μετατρέπουν την κινητική τους ενέργεια σε θερμότητα. Αρχικά, το προαστρικό νεφέλωμα ακτινοβολεί το πλεόνασμα της θερμικής του ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι η

εσωτερική του πίεση παραμένει μικρότερη απ' τη βαρύτητα και ως εκ τούτου ότι η κατάρρευσή του μπορεί να συνεχιστεί απρόσκοπτα. Καθώς, όμως, η πυκνότητά του αυξάνει διαρκώς, από κάποια στιγμή και μετά το προαστρικό νεφέλωμα καθίσταται αδιαφανές στη θερμική ενέργεια, «φυλακίζοντάς» την στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του να αυξάνει διαρκώς.

Αρχικά, το προαστρικό νεφέλωμα έχει την δική του αργή περιστροφική κίνηση. Σύμφωνα, όμως, με την διατήρηση της στροφορμής, με την έναρξη της κατάρρευσής του, η ταχύτητα περιστροφής του αυξάνει όλο και πιο πολύ, όπως περίπου συμβαίνει και με έναν αθλητή της καλλιτεχνικής παγοδρομίας, που στροβιλίζεται πιο γρήγορα όταν φέρνει τα απλωμένα χέρια του προς το στήθος. Καθώς, λοιπόν, το προαστρικό νεφέλωμα καταρρέει βαρυντικά και περιστρέφεται όλο και πιο γρήγορα, μετατρέπεται σταδιακά σ' έναν πεπλατυσμένο και περιστρεφόμενο δίσκο υλικών, γνωστό ως **πρωτοπλανητικό δίσκο**, στο κέντρο του οποίου συσσωρεύεται το μεγαλύτερο ποσοστό από τα αέρια και την σκόνη που εμπεριέχει. Καθώς, όμως, η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η πίεση στον πυρήνα του νεφελώματος αυξάνουν όλο και πιο πολύ, σχηματίζεται εκεί μία περιστρεφόμενη υπέρθερμη σφαίρα αερίων, δηλαδή το «έμβρυο» του άστρου που θα γεννηθεί, το οποίο ονομάζεται **πρωταστέρης**.

Καλλιτεχνική αναπαράσταση του σχηματισμού ενός πλανητικού συστήματος  
(Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF)

1. Γιγάντιο νέφος αερίων και σκόνης

2. Στο εσωτερικό του, αρχίζουν και σχηματίζονται πυκνότερες εστίες ύλης.

3. Μέσα σ' αυτές, σχηματίζονται προαστρικά νεφελώματα.

5. Οι πλανήτες σχηματίζονται από την σκόνη και τα αέρια του δίσκου και ένα νέο πλανητικό σύστημα γεννιέται.

4. Αυτά καταρρέουν σε άστρα, ενώ γύρω τους σχηματίζονται περιστρεφόμενοι δίσκοι ύλης.



Εντέλει, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του πρωταστέρα αυξάνει τόσο πολύ, ώστε οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες υδρογόνου, που σε χαμηλότερες θερμοκρασίες απωθούν ο ένας τον άλλον εξαιτίας του ομώνυμου φορτίου τους, αρχίζουν και συντήκονται μεταξύ τους σε ήλιο, εκλύοντας τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Σε κάθε στάδιο αυτών των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης, το σύνολο της μάζας των προϊόντων της σύντηξης είναι μικρότερο από την συνολική μάζα των αντιδρώντων σωματιδίων και η μάζα που «λείπει» μετατρέπεται σε

ενέργεια, σύμφωνα με την πασίγνωστη πλέον εξίσωση  $E=mc^2$ , του Άλμπερτ Αϊνστάιν (1879–1955). Δηλαδή η ενέργεια που εκλύεται, ισούται με το γινόμενο της μάζας που λείπει επί το τετράγωνο της ταχύτητας του φωτός στο κενό. Με δεδομένη την τεράστια τιμή της ταχύτητας του φωτός, μία ελάχιστη ποσότητα ύλης απελευθερώνει τεράστια ποσά ενέργειας. Από την στιγμή αυτή και μετά, η εσωτερική πίεση του νεογέννητου άστρου εξισορροπεί την περαιτέρω βαρυτική του κατάρρευση και το άστρο εισέρχεται σε μία μακρά περίοδο

ισορροπίας, ως άστρο της **Κύριας Ακολουθίας**. Αυτός είναι σε γενικές γραμμές ο μηχανισμός γένεσης ενός νέου άστρου και κάπως έτσι σχηματίστηκε και ο Ήλιος πριν από σχεδόν 4,6 δισ. χρόνια.

Τα πρωταρχικά υλικά, τέλος, από τα οποία σχηματίζονται οι πλανήτες, οι δορυφόροι και τα άλλα ουράνια σώματα που συγκροτούν ένα αστρικό σύστημα, απαρτίζονται από τους μικροσκοπικούς κόκκους σκόνης και τα αέρια του πρωτοπλανητικού δίσκου, που συνεχίζουν να

στροβιλίζονται γύρω από το νεογέννητο άστρο. Με τρόπο που δεν είναι ακόμη κατανοητός σε βάθος, τα σωματίδια αυτά αρχίζουν και κολλούν μεταξύ τους, διευρύνοντας το μέγεθός τους όλο και πιο πολύ. Ξανά και ξανά, τα σώματα αυτά συγκρούονται και κάποιες φορές συγχωνεύονται σε μεγαλύτερα. Έτσι, απορροφώντας με την βαρυτική τους έλξη όλο και πιο πολλή ύλη από τον δίσκο μέσα στον οποίο γεννήθηκαν, και μέσα από αλληπάλληλες συγκρούσεις και συγχωνεύσεις, σχηματίζονται όλο και μεγαλύτερες συσσωματώσεις ύλης, και εντέλει πλανήτες ★

# 4

## ΑΣΤΡΙΚΗ ΠΟΙΚΙΛΙΑ

Το αστρικό σμήνος Cygnus OB2 εμπεριέχει πολλά νεαρά, γιγάντια και υπέρθερμα άστρα (📷 Ακτίνες Χ: NASA/CXC/SAO J.Drake et al, Υπέρυθρο: NASA/JPL-Caltech Ορατό: Univ. of Hertfordshire/INT/IPHAS).

**Κ**ανένα άστρο δεν είναι ακριβώς ίδιο με κάποιον άλλο. Όπως, δηλαδή, ο κάθε άνθρωπος είναι μοναδικός, έτσι και κάθε άστρο έχει διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά, που προσδιορίζονται από την αρχική του μάζα. Έτσι, λοιπόν, το μέγεθος ενός άστρου, η φωτεινότητα, το χρώμα και η θερμοκρασία του, η διάρκεια της ζωής του, το είδος των πυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του, και ο «τρόπος» που θα πεθάνει, καθορίζονται από την μάζα που είχε όταν γεννήθηκε.

Τα πιο μικροσκοπικά, τα πιο ψυχρά, αλλά και τα πιο πολυάριθμα άστρα του Σύμπαντος είναι οι **κόκκινοι νάνοι**, όπως ο Εγγύτατος του Κενταύρου. Τα άστρα αυτά καταναλώνουν τόσο αργά τα πυρηνικά τους καύσιμα, ώστε μπορεί να «ζουν» ακόμη και για εκατοντάδες δισ. χρόνια. Υπάρχουν, όμως, και κάποια άστρα, που έχουν μάζα δεκάδες φορές μεγαλύτερη. Τα άστρα αυτά «καταβροχθίζουν» με αστραπιαία ταχύτητα τα πυρηνικά τους καύσιμα, γι' αυτό άλλωστε και η ζωή τους δεν διαρκεί περισσότερο από λίγα εκατομμύρια χρόνια. Αυτό συμβαίνει διότι, όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα ενός άστρου όταν αυτό γεννιέται, τόσο μεγαλύτερη είναι η βαρυτική δύναμη που ασκείται προς τον πυρήνα του, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του να είναι πολύ υψηλότερη και κατά συνέπεια ο ρυθμός με τον οποίο εκτελούνται οι πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης στο εσωτερικό του να είναι ραγδαίος. Επομένως, τα άστρα με την μεγαλύτερη μάζα καταναλώνουν ταχύτατα τα πυρηνικά τους «καύσιμα» και «πεθαίνουν» νέα. Τα άστρα αυτά, ωστόσο, δεν «σβήνουν»

ήσυχα μέσα στην απεραντοσύνη του μεσοαστρικού Διαστήματος. Αντιθέτως, τελειώνουν την ζωή τους σε βίαιες εκρήξεις σουπερνόβα, εκτινάσσοντας στο Διάστημα τις «στάχτες» τους. Είναι τόσο ισχυρές οι εκρήξεις αυτές, που για μια στιγμή η φωτεινότητά τους υπερβαίνει κι αυτήν ακόμη την φωτεινότητα του γαλαξία που τις φιλοξενεί.

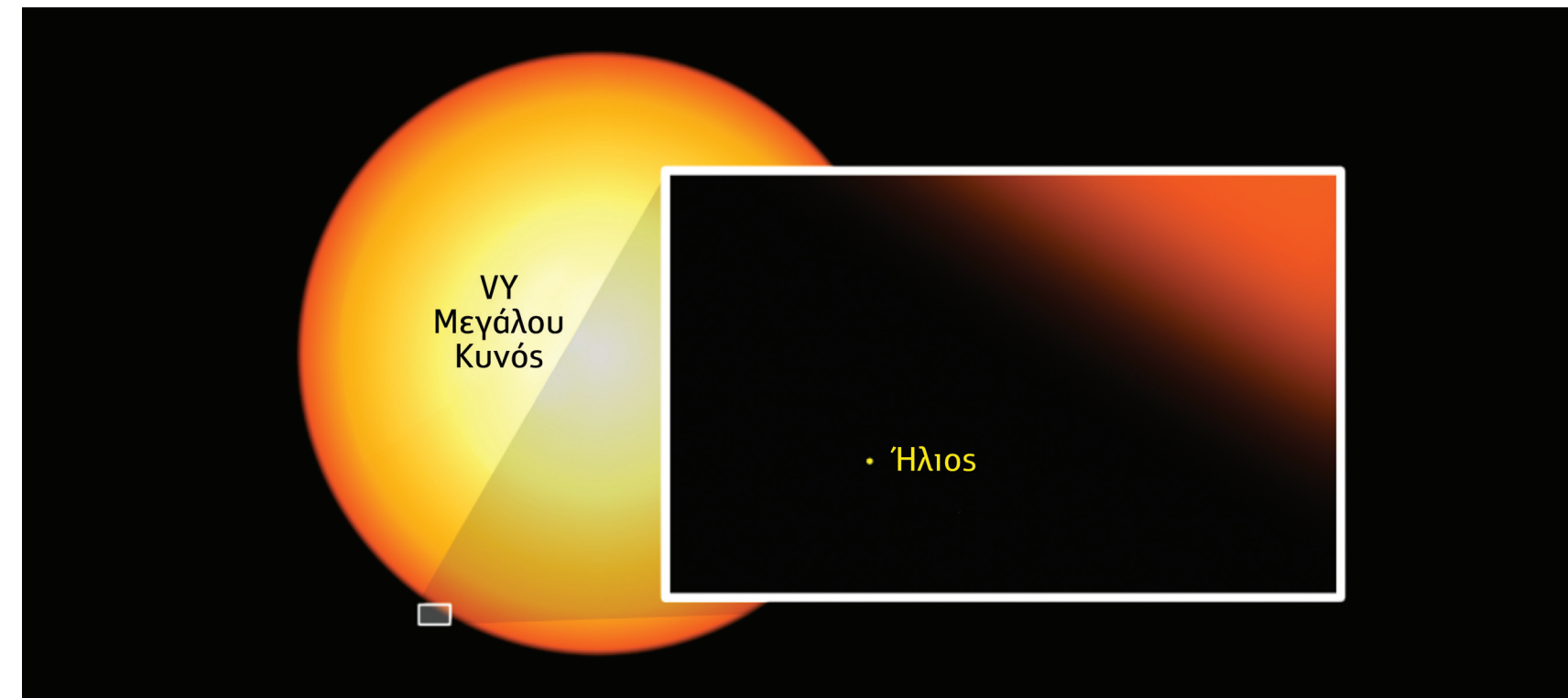
Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου άστρου είναι ο κόκκινος υπεργίγαντας **Μπετελγκεζ**, περίπου 700 έτη φωτός μακριά, στον αστερισμό του Ωρίωνα. Το άστρο αυτό έχει μάζα κάπου 10-20 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου και ακτίνες σχεδόν 800 φορές μεγαλύτερη, ενώ η φωτεινότητά του ισοδυναμεί μ' αυτήν που έχουν 100.000 άστρα σαν τον Ήλιο. Καθώς, μάλιστα, γεννήθηκε πριν από μόλις 10 εκατ. χρόνια, ο Μπετελγκεζ ήδη βρίσκεται στο τέλος της ζωής του. Πραγματικά, σύμφωνα με τις σχετικές μελέτες, το άστρο αυτό θα τελειώσει την ζωή του μέσα σε 100.000 χρόνια το πολύ με μία έκρηξη σουπερνόβα, μία έκρηξη τόσο εκτυφλωτική, που το φως της θα ανταγωνίζεται στον νυχτερινό μας ουρανό την Πανσέληνο.

Για λόγους, όμως, που θα γίνουν σαφέστεροι στην συνέχεια, τα άστρα με την μεγαλύτερη διάμετρο δεν έχουν πάντα και την μεγαλύτερη μάζα. Για παράδειγμα, το άστρο **VY Μεγάλου Κυνός**, σχεδόν 4.000 έτη φωτός μακριά, είναι ένας κόκκινος υπεργίγαντας με ακτίνες 1.420 φορές μεγαλύτερες από αυτήν του Ήλιου, έχει δηλαδή τόσο μεγάλες διαστάσεις, που στο εσωτερικό του θα χωρούσαν 3 δισ. άστρα σαν τον Ήλιο! Την ίδια στιγμή, όμως, η μάζα του δεν υπερβαίνει τις 9-25 ηλιακές μάζες.

Από την άλλη, το άστρο του Γαλαξία μας με την μεγαλύτερη μάζα που έχουμε εντοπίσει μέχρι σήμερα, βρίσκεται περίπου 8.000 έτη φωτός μακριά, στον αστερισμό της Κασσιόπης. Με μάζα 152 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου, με επιφανειακή θερμοκρασία που υπερβαίνει τους 45.000 °C, και λάμποντας με την φωτεινότητα 660.000 άστρων σαν τον Ήλιο, το άστρο αυτό έχει ακτίνες «μόλις» 16 φορές μεγαλύτερες από αυτήν του Ήλιου. Απ' ό,τι φαίνεται, όμως, υπάρχει ένα όριο στην μέγιστη δυνατή μάζα που μπορεί να έχει ένα άστρο. Πραγματικά, καθώς η μάζα του υπερβαίνει τις περίπου 150 ηλιακές μάζες, η πίεση της ακτινοβολίας

στο εσωτερικό του είναι μεγαλύτερη από την βαρυτική του έλξη, με αποτέλεσμα το άστρο να μην μπορεί να συσσωρεύσει πάνω του περισσότερη μάζα. Ένας άλλος μηχανισμός που παρεμποδίζει την ανεξέλεγκτη αύξηση της μάζας ενός άστρου, είναι οι βίαιες αναταράξεις στις εξωτερικές του στοιβάδες, που εκτινάσσουν μεγάλες ποσότητες από τα υλικά του στο Διάστημα.

Μέχρι στιγμής, πάντως, το άστρο με την μεγαλύτερη μάζα που έχουμε ανακαλύψει στο Σύμπαν βρίσκεται στο **Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου**, έναν γειτονικό μας μικρό και ακανόνιστο



Καλλιτεχνική αναπαράσταση του άστρου VY Μεγάλου Κυνός, σε σχέση με τον Ήλιο

Το αστρικό σμήνος R136 (στο κάτω και δεξιά μέρος της εικόνας) εμπεριέχει εκατοντάδες νεαρά και υπέρθερμα γαλάζια άστρα, ένα εκ των οποίων είναι το άστρο με την μεγαλύτερη μάζα που έχουμε ανακαλύψει μέχρι σήμερα [© NASA, ESA, P. Crowther (University of Sheffield)].

γαλαξία, και συγκεκριμένα στο αστρικό σμήνος R136 που ανήκει στο **Νεφέλωμα Ταραντούλα**. Πραγματικά, με μάζα 265 φορές μεγαλύτερη απ' αυτήν του Ήλιου και λάμποντας με την φωτεινότητα σχεδόν 9 εκατ. άστρων σαν τον Ήλιο, το άστρο αυτό έχει τόσο μεγάλη μάζα, που η ίδια του η ύπαρξη αποτελεί πρόκληση για τις γνώσεις μας που αφορούν στην γένεση και την εξέλιξη των άστρων. Γι' αυτό και αρκετοί αστροφυσικοί πιθανολογούν ότι σχηματίστηκε από την συγχώνευση δύο μικρότερων άστρων.

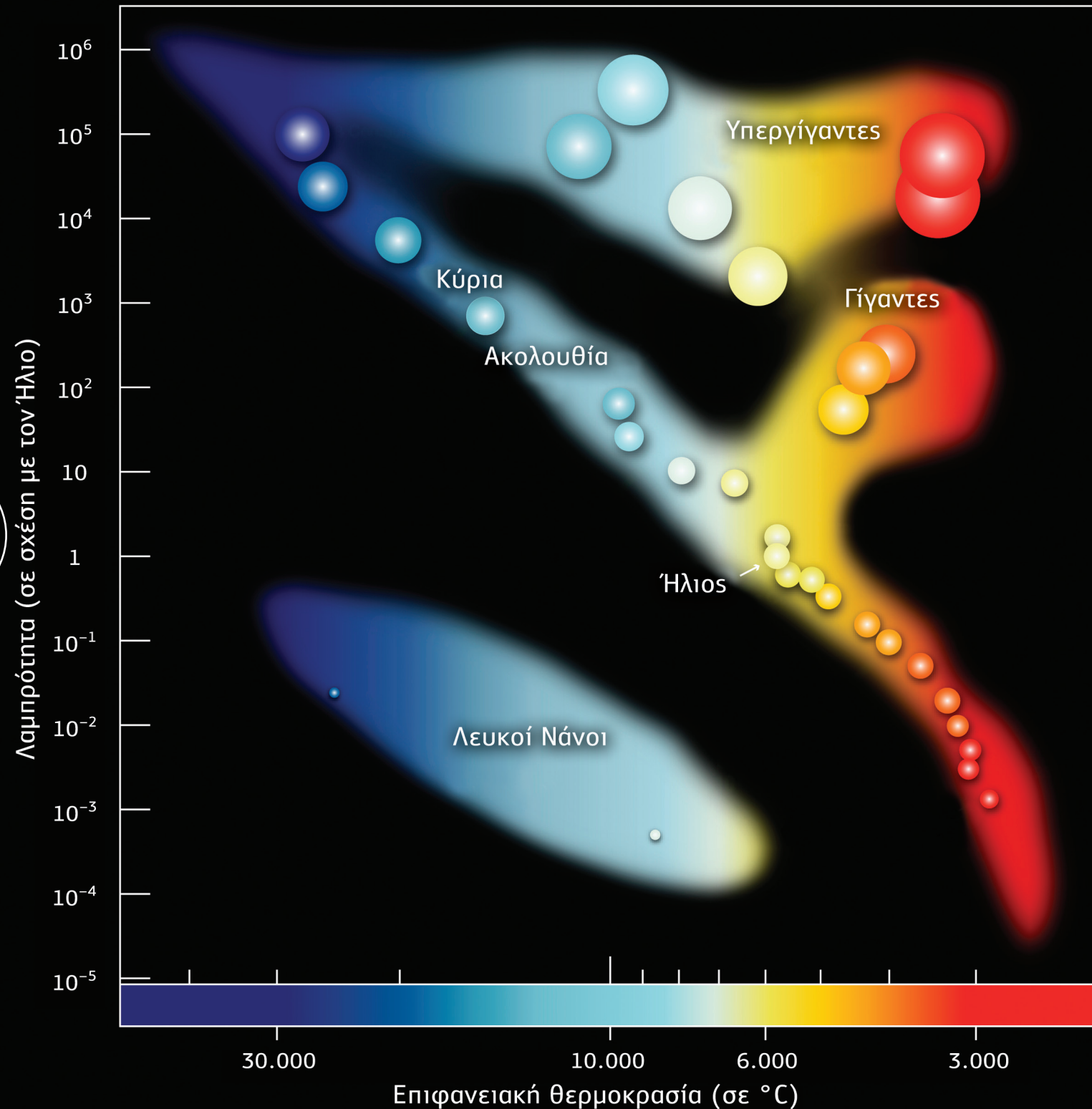
Σε γενικές γραμμές, λοιπόν, η ποικιλία των άστρων που υπάρχει εκεί έξω είναι τεράστια. Όμως, παρόλο που κάθε άστρο είναι μοναδικό, μπορούν όλα τους να ταξινομηθούν σε ομάδες, ανάλογα με τα ιδιαίτερα φυσικά τους χαρακτηριστικά. Σημαντικό ρόλο σ' αυτήν την ταξινόμηση διαδραματίζει το **Διάγραμμα Hertzsprung-Russel (H-R)**. Το διάγραμμα αυτό ονομάστηκε έτσι προς τιμήν των δύο αστρονόμων που το επινόησαν στις αρχές της δεκαετίας του 1910 και είναι για την Αστρονομία ό,τι ο περιοδικός πίνακας των στοιχείων για τη Χημεία. Όπως περίπου ένας χημικός, παρατηρώντας τη θέση ενός χημικού στοιχείου στον περιοδικό πίνακα μπορεί να γνωρίζει άμεσα μία ολόκληρη σειρά χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του στοιχείου αυτού, έτσι και ο αστρονόμος, παρατηρώντας τη θέση ενός άστρου στο Διάγραμμα H-R, μπορεί, είτε άμεσα είτε χρησιμοποιώντας σχετικά απλούς φυσικούς νόμους, να γνωρίζει συγκεκριμένα φυσικά χαρακτηριστικά του άστρου αυτού, όπως την φωτεινότητα, τον φασματικό τύπο, τη θερμοκρα-

σία, τη μάζα, τη χημική σύνθεση, την ηλικία, καθώς και την εξελικτική πορεία που ακολούθησε για να φτάσει σ' αυτή τη θέση.

Το Διάγραμμα H-R είναι η γραφική παράσταση της λαμπρότητας των άστρων σε σχέση με την επιφανειακή τους θερμοκρασία και η κατανομή τους σ' αυτό δεν είναι τυχαία, καθώς τα περισσότερα απ' αυτά συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένες περιοχές. Οι περιοχές αυτές, οι οποίες αποτελούν και διαφορετικά στάδια στην εξέλιξη των άστρων είναι τέσσερεις: η Κύρια Ακολουθία, οι Γίγαντες, οι Υπεργίγαντες και οι Λευκοί Νάνοι. Όπως ακριβώς και τα χημικά στοιχεία σε μία ομάδα του περιοδικού πίνακα, τα άστρα κάθε τέτοιας περιοχής, μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά. Επειδή όμως τα φυσικά χαρακτηριστικά του κάθε άστρου μεταβάλλονται με τον χρόνο, αντίστοιχα μεταβάλλεται και η θέση του στο Διάγραμμα H-R. Υπ' αυτήν την έννοια, το Διάγραμμα H-R μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί και μία γραφική απεικόνιση της αστρικής εξέλιξης.

Κάθε άστρο οφείλει την ενέργειά του στις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης, οι οποίες μετατρέπουν αρχικά το υδρογόνο του πυρήνα του σε ήλιο και στην συνέχεια (εάν έχει αρκετά μεγάλη μάζα) σε όλο και βαρύτερα στοιχεία, ακολουθώντας σε γενικές γραμμές τη σειρά με την οποία αυτά εμφανίζονται στον περιοδικό πίνακα των στοιχείων. Με την έναρξη, όμως, των αντιδράσεων σύντηξης υδρογόνου, το άστρο εισέρχεται σε μία περίοδο σχετικής ευστάθειας, ξεκινώντας την εξελικτική του πορεία ως άστρο της **Κύριας Ακολουθίας**

## Το Διάγραμμα H-R



(ΚΑ), όπου μετατρέπει το υδρογόνο του πυρήνα του σε ήλιο. Επειδή, όμως, τα άστρα με την μεγαλύτερη μάζα καταναλώνουν τα πυρηνικά τους καύσιμα, δεν παραμένουν όλα τα άστρα στην ΚΑ για το ίδιο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, ο Ήλιος γεννήθηκε πριν από περίπου 4,6 δισ. χρόνια και θα παραμείνει στην ΚΑ για 5,5 δισ. χρόνια ακόμη. Αντιθέτως, ένα άστρο με δεκαπλάσια μάζα θα ολοκληρώσει την καύση του υδρογόνου του σε μόλις 20 εκατ. έτη, ενώ ένα άστρο με τη μισή μάζα θα συνεχίζει τη σύντηξη του υδρογόνου στον πυρήνα του για περίπου 200 δισ. χρόνια.

Τα περισσότερα άστρα στον Γαλαξία είναι άστρα της ΚΑ και εντοπίζονται στο Διάγραμμα H-R στην διαγώνια περιοχή, που εκτείνεται από το άνω αριστερό άκρο του (μεγαλύτερης μάζας, θερμότερα και φωτεινότερα άστρα) στο κάτω δεξιό (χαμηλότερης μάζας, ψυχρά και αμυδρά άστρα). Οι **κόκκινοι νάνοι**, ειδικότερα, έχουν μάζα που σπάνια υπερβαίνει το 40% της μάζας του Ήλιου, επιφανειακή θερμοκρασία χαμηλότερη των 3.500 °C και φωτεινότητα αντίστοιχα μικρότερη, ενώ βρίσκονται στο κάτω δεξιό τμήμα της ΚΑ. Αντιθέτως, όσο αυξάνει η μάζα και η επιφανειακή θερμοκρασία ενός άστρου, το χρώμα του «μετατοπίζεται» από το κόκκινο, το πορτοκαλί και το κίτρινο προς το άσπρο και το μπλε. Τα άστρα αυτά με την μεγαλύτερη μάζα βρίσκονται στο άνω αριστερό άκρο της ΚΑ, είναι συγκριτικά ελάχιστα και έχουν επι-

φανειακές θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 20.000 °C. Οι θερμοπυρηνικές τους αντιδράσεις εκτελούνται με ταχύτατο ρυθμό, γι' αυτό άλλωστε και η «ζωή» τους στην ΚΑ δεν διαρκεί περισσότερο από λίγα εκατομμύρια χρόνια.

Οι **κόκκινοι γίγαντες** είναι φωτεινά και σχετικά ψυχρά άστρα, τα οποία συνωστίζονται στο μέσο-δεξιό τμήμα του διαγράμματος, πάνω από την ΚΑ. Όπως θα δούμε αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο, τα άστρα αυτά αποτελούν την φυσιολογική εξέλιξη των άστρων με μέγεθος από 0,8 έως 8 ηλιακές μάζες, που βρίσκονταν αρχικά στην ΚΑ, την οποία και «εγκατέλειψαν» με την ολοκληρωτική μετατροπή του υδρογόνου στον πυρήνα τους σε ήλιο. Εντέλει, τα άστρα αυτά θα μετατραπούν σε **λευκούς νάνους**. Αντιθέτως, άστρα μεγαλύτερα των περίπου 8 ηλιακών μαζών, μόλις καταναλώσουν το υδρογόνο του πυρήνα τους, «μετατοπίζονται» προς τον κλάδο των **υπεργιγάντων**, στο άνω δεξιό τμήμα του Διαγράμματος H-R. Οι κόκκινοι υπεργίγαντες, ειδικότερα, είναι ιδιαίτερα φωτεινά και σχετικά ψυχρά άστρα, ενώ χάρη στην τεράστια μάζα τους, έχουν τη δυνατότητα να συντήκουν όλο και βαρύτερα στοιχεία στο εσωτερικό τους. Όταν, ωστόσο, τα υλικά του πυρήνα τους μετατραπούν σε σίδηρο, οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης θα σταματήσουν και τότε τα άστρα αυτά θα εκραγούν ως σουπερνόβα, αφήνοντας πίσω τους αστέρες νετρονίων ή μαύρες τρύπες ★

# 5

## ΚΟΚΚΙΝΟΙ ΓΙΓΑΝΤΕΣ ΚΑΙ ΛΕΥΚΟΙ ΝΑΝΟΙ

Καλλιτεχνική αναπαράσταση του κύκλου της ζωής ενός άστρου σαν τον Ήλιο, μέχρι την μετατροπή του σε λευκό νάνο στο κέντρο ενός πλανητικού νεφελώματος (© ESO/S. Steinhöfel).

**Μ**εσήμερα πλέον, ο Ήλιος θα συνεχίσει να «καίει» το υδρογόνο στον πυρήνα του για τουλάχιστον 5 δισεκατομμύρια χρόνια ακόμη. Όταν, ωστόσο, το υδρογόνο του εξαντληθεί, θα μετατραπεί σε κόκκινο γίγαντα και εντέλει θα εκτινάξει τις εξωτερικές του στοιβάδες στο Διάστημα, αφήνοντας ως λείψανο τον υπέρθερμο πυρήνα του, δηλαδή έναν λευκό νάνο, στο κέντρο ενός διαστελλόμενου νεφελώματος. Αυτή θα είναι και η τελική «μοίρα» όλων των άστρων με μάζα 0,8-8 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου. Ανάλογα, φυσικά, με την συγκεκριμένη μάζα που έχει κάθε άστρο, τα τελευταία αυτά στάδια της ζωής τους διαφέρουν αρκετά, γι' αυτό και εδώ θα εστιάσουμε στα άστρα που έχουν την ίδια μάζα με τον Ήλιο.

Είπαμε νωρίτερα ότι καθόλη την διάρκεια της ζωής τους τα άστρα υπόκεινται σε μία αδιάκοπη διελευστικότητα μεταξύ της ίδιας τους της βαρύτητας και της εσωτερικής τους πίεσης. Όταν, όμως, το υδρογόνο του αστρικού πυρήνα μετατραπεί πλήρως σε ήλιο, οι αντιδράσεις σύντηξης σταματούν και, καθώς η θερμοκρασία του μειώνεται, η βαρύτητα υπερισχύει της εσωτερικής πίεσης. Ο πυρήνας του άστρου αρχίζει τότε να συστέλλεται βαρυτικά, μετατρέποντας την βαρυτική δυναμική του ενέργεια σε θερμότητα και αυξάνοντας την θερμοκρασία, τόσο στο εσωτερικό του, όσο και στην στιβάδα υδρογόνου που τον περιβάλλει. Έτσι, σε σχετικά

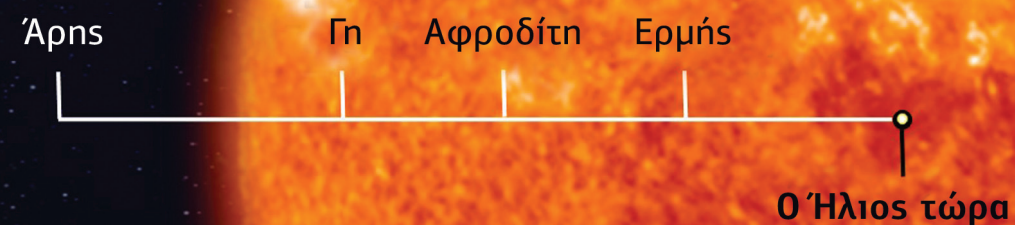
μικρό χρονικό διάστημα, η θερμοκρασία στην στιβάδα αυτή αυξάνει τόσο πολύ, ώστε το υδρογόνο που εμπεριέχει αρχίζει να συντήκεται σε ήλιο, το οποίο εναποτίθεται στον πυρήνα αυξάνοντας την μάζα και την θερμοκρασία του συνεχώς.

Η νέα αυτή εκροή ενέργειας αυξάνει τη φωτεινότητα του άστρου, εξαναγκάζοντας παράλληλα τις εξωτερικές του στοιβάδες να διογκωθούν σε ακτίνα ακόμη και εκατονταπλάσια από αυτήν που είχε το άστρο όταν βρισκόταν στην ΚΑ. Εξαιτίας, όμως της μεγάλης διαστολής των εξωτερικών του στοιβάδων, η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό του άστρου, εκλύεται πλέον από πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια απ' ό,τι προηγουμένως, με αποτέλεσμα τη μείωση της επιφανειακής του θερμοκρασίας και κατά συνέπεια τη μετατόπιση του χρώματος του άστρου προς το κόκκινο: δηλαδή τη μετατροπή του ίδιου του άστρου σε έναν **κόκκινο γίγαντα**.

Σε αντίθεση, όμως, με το εξωτερικό περίβλημα του κόκκινου γίγαντα, που έχει εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα, ο πυρήνας του, που πλέον απαρτίζεται από ήλιο, έχει ήδη συμπιεστεί στο ένα τρίτο του αρχικού του μεγέθους, γι' αυτό και η πυκνότητά του είναι τεράστια. Οι τεράστιες πιέσεις που επικρατούν στο εσωτερικό του «εκφυλίζουν» με την σειρά τους τα ηλεκτρόνια που εμπεριέχει σε μία κατάσταση που αντιστέκεται στην περαιτέρω κατάρρευσή του (τι ακριβώς είναι αυτή η «εκφυλι-

Απεικόνιση της διόγκωσης του Ήλιου, όταν μετατραπεί σε κόκκινο γίγαντα (© Ramses Ramirez, Cornell).

**Ο Ήλιος ως κόκκινος γίγαντας**



σμένη» κατάσταση θα γίνει σαφέστερο πιο κάτω).

Όταν, όμως, η θερμοκρασία του πυρήνα φτάσει στους 100 εκατ. °C, οι πυρήνες ηλίου αρχίζουν και συντήκονται σε άνθρακα, σε μία διαδικασία που παράγει και οξυγόνο. Τότε, ολόκληρος ο πυρήνας «αναφλέγεται» ξαφνικά σε μία **έκλαμψη ηλίου**, που διαρκεί για ελάχιστα λεπτά, απελευθερώνοντας όμως τεράστια ποσά ενέργειας, που επαναφέρουν τον πυρήνα στην πρότερη μη «εκφυλισμένη» του κατάσταση. Δεν θα παραμείνει όμως το άστρο σ' αυτό το στάδιο για πολύ. Όταν το ήλιο του αστρικού πυρήνα μετατραπεί πλήρως σε άνθρακα και οξυγόνο, οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης στο εσωτερικό του θα «σβήσουν» για πάντα, καθώς η θερμοκρασία του δεν θα αυξηθεί ποτέ στο σημείο που θα επέτρεπε να συνεχιστούν με την «καύση» του άνθρακα ή του οξυγόνου. Η βαρύτητα, τότε, θα υπερिσχύσει και πάλι της εσωτερικής πίεσης του άστρου και ο πυρήνας του θα αρχίσει να καταρρέει για μία ακόμη φορά.

Η στιβάδα υδρογόνου που περιβάλλει τον αστρικό πυρήνα έχει πλέον μετατραπεί εξ ολοκλήρου σε ήλιο. Καθώς, όμως, η θερμοκρασία του αστρικού πυρήνα αυξάνεται και πάλι από την νέα βαρυτική του συστολή, δίνει το έναυσμα για την σύντηξη του ηλίου στην στιβάδα που τον περιβάλλει, απελευθερώνοντας ακόμη περισσότερη ενέργεια και προκαλώντας έτσι την έναρξη πυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης της αμέσως επόμενης στιβάδας, που εμπεριέχει υδρογόνο.

Καθόλη τη διάρκεια της ζωής τους, τα άστρα χά-

νουν συνεχώς μάζα, εκτινάσσοντας στο Διάστημα μία ασταμάτητη ροή φορτισμένων σωματιδίων, όπως συμβαίνει με τον Ήλιο και τον ηλιακό άνεμο. Στο στάδιο του κόκκινου γίγαντα, αυτή η απώλεια μάζας αυξάνεται διαρκώς και εντέλει κορυφώνεται, όταν το ήλιο στην στιβάδα που περιβάλλει τον αστρικό πυρήνα αρχίσει να συντήκεται σε άνθρακα. Το άστρο τότε «αποσταθεροποιείται» εντελώς. Η βαρυτική έλξη του άστρου αδυνατεί πλέον να συγκρατήσει το μεγαλύτερο μέρος του εξωτερικού του περιβλήματος, το οποίο εκτινάσσεται στο Διάστημα, σχηματίζοντας ένα διαστελλόμενο νέφος αερίων, που ονομάζεται **πλανητικό νεφέλωμα**, και αποκαλύπτοντας τον υπέρθερμο πυρήνα του, που έχει συμπιεστεί σε έναν **λευκό νάνο**: ένα ουράνιο σώμα στο μέγεθος της Γης και με μάζα περίπου την μισή απ' αυτή που είχε αρχικά ο Ήλιος. Εντέλει, ακτινοβολώντας συνεχώς θερμότητα στο Διάστημα, η θερμοκρασία του λευκού νάνου θα μειώνεται όλο και πιο πολύ, ώσπου, εκατοντάδες δισ. χρόνια αργότερα, θα μετατραπεί σε έναν παγωμένο **μαύρο νάνο**.

Αφού όμως οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης στο εσωτερικό ενός λευκού νάνου έχουν «σβήσει» για πάντα, πού οφείλεται η εσωτερική του πίεση, η οποία αντιστέκεται στην περαιτέρω κατάρρευσή του; Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα

Υπέρυθρη εικόνα του πλανητικού νεφελώματος Έλικας, 700 έτη φωτός μακριά, που ελήφθη από το διαστημικό τηλεσκόπιο Spitzer [© NASA/JPL-Caltech/K. Su (Univ. of Ariz.)].



δόθηκε με την ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας στη διάρκεια της δεκαετίας του 1920, όταν αποδείχτηκε ότι η ύλη σε τέτοιες καταστάσεις υπερυψηλής πυκνότητας μπορούσε πραγματικά να αντισταθεί στην περαιτέρω βαρυτική κατάρρευση. Αυτό οφείλεται στην **Απαγορευτική Αρχή του Pauli**, σύμφωνα με την οποία δεν μπορούν περισσότερα από δύο ηλεκτρόνια να καταλαμβάνουν την ίδια ενεργειακή κατάσταση. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι εξαιτίας των μεγάλων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των άστρων, τα ηλεκτρόνια έχουν αποχωριστεί πλήρως από τους ατομικούς τους πυρήνες.

Οι τεράστιες, ωστόσο, πιέσεις που επικρατούν τώρα στο εσωτερικό του αστρικού πυρήνα έχουν μετατρέψει την ύλη που εμπεριέχει σε μία «εκφυλισμένη», όπως ονομάζεται, κατάσταση, η οποία «απαγορεύει» στα ελεύθερα ηλεκτρόνια

να πλησιάσουν το ένα το άλλο, περισσότερο απ' όσο τους το «επιτρέπει» η αρχή του Pauli. Έτσι, το νέφος αυτό των ηλεκτρονίων δεν μπορεί να συμπιεστεί και να περιοριστεί πέρα από έναν ορισμένο όγκο, γι' αυτό και τα ελεύθερα, «εκφυλισμένα» ηλεκτρόνια ασκούν μία ισχυρότατη πίεση που αντιστέκεται σε οποιαδήποτε περαιτέρω συμπίεση του αστρικού πυρήνα. Επομένως, η περαιτέρω βαρυτική κατάρρευση του λευκού νάνου, ενός μακροσκοπικού σώματος, εμποδίζεται από την **εκφυλισμένη πίεση των ηλεκτρονίων**, μία δηλαδή από τις βασικές αρχές της κβαντομηχανικής, που κυβερνούν τον μικρόκοσμο.

Αυτή, λοιπόν, θα είναι περίπου και η τελική μοίρα του δικού μας άστρου. Σε περίπου 5 δισ. χρόνια, δηλαδή, ο Ήλιος θα μετατραπεί σε έναν κόκκινο γίγαντα, που θα καταπιεί τον Ερμή και την Αφροδίτη και πιθανότατα τον ίδιο μας τον

πλανήτη, αφανίζοντας κάθε μορφή ζωής που θα έχει ενδεχομένως επιβιώσει στο απώτατο αυτό μέλλον. Εντέλει, όμως, οι πυρηνικές αντιδράσεις θα σβήσουν για πάντα. Ο Ήλιος, τότε, θα εκτινάξει τις εξωτερικές του στοιβάδες στο Διάστημα, σχηματίζοντας ένα πλανητικό νεφέλωμα, στο κέντρο του οποίου παραμένει ο υπέρθερος πυρήνας του, δηλαδή ένας λευκός νάνος. Τελικά, τρισεκατομμύρια χρόνια αργότερα, καθώς οι τελευταίες «σταγόνες» θερμότητας θα τον εγκαταλείψουν, ο λευκός νάνος που ήταν κάποτε ο Ήλιος, θα σβήσει σαν ένας παγωμένος μαύρος νάνος.

Σε διπλά συστήματα άστρων, ωστόσο, τα οποία αποτελούνται από έναν λευκό νάνο, καθώς και από ένα άλλο άστρο, η τελική «μοίρα» του λευκού νάνου είναι διαφορετική. Σε αυτά τα αστρικά συστήματα, λοιπόν, το βαρυτικό πεδίο του λευ-

Καλλιτεχνική αναπαράσταση λευκού νάνου σε διπλό αστρικό σύστημα  
(© NASA/CXC/M.Weiss)

κού νάνου απορροφά υδρογόνο από τις εξωτερικές στοιβάδες του γειτονικού του άστρου, το οποίο στροβιλίζεται γύρω του και εντέλει εναποτίθεται σε όλο και μεγαλύτερες ποσότητες στην επιφάνειά του. Καθώς η ύλη αυτή σταδιακά συμπιέζεται και θερμαίνεται όλο και πιο πολύ, η θερμοκρασία της κάποια στιγμή μπορεί να φτάσει στο όριο που απαιτείται για την έναρξη της σύντηξης υδρογόνου. Ο λευκός νάνος, τότε, «αναφλέγεται» ξαφνικά, εκτινάσσοντας ύλη από την επιφάνειά του στο Διάστημα, ενώ η φωτεινότητά του αυξάνει ακόμη και δεκάδες χιλιάδες φορές, σε μία έκρηξη **καινοφανούς** ή **νόβα**. Είναι, μάλιστα, δυνατό να υπάρξουν πολλαπλές τέτοιες εκρήξεις, καθώς ύλη από το άστρο-συνοδό συνεχίζει να εναποτίθεται στην επιφάνεια του λευκού νάνου και η όλη διαδικασία ξεκινά από την αρχή.

Αυτά τα διπλά αστρικά συστήματα, ωστόσο, μπορούν να προκαλέσουν πολύ ισχυρότερες αστρικές εκρήξεις διότι, όπως απέδειξε ο Ινδός αστροφυσικός **Sabrahmanyan Chandrasehkar** (1910–1995), ακόμα και η πίεση των εκφυλισμένων ηλεκτρονίων δεν είναι πάντα ικανή να σταματήσει την περαιτέρω κατάρρευση ενός λευκού νάνου. Χρησιμοποιώντας την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας και την Κβαντική Φυσική, ο Chandrasehkar απέδειξε ότι, εάν η μάζα ενός λευκού νάνου υπερβεί με κάποιον τρόπο το όριο των 1,4 ηλιακών μαζών, η

πίεση των εκφυλισμένων ηλεκτρονίων δεν μπορεί πλέον να αντισταθεί στη δύναμη της βαρύτητας και το άστρο θα συνεχίσει να καταρρέει, σχηματίζοντας έναν αστέρα νετρονίων ή μία μαύρη τρύπα. Το όριο αυτό ονομάζεται **όριο Chandrasekhar**.

Ο φυσικός μηχανισμός που προκαλεί αυτές τις εκρήξεις είναι περίπου ίδιος μ' αυτόν που προκαλεί και τις εκρήξεις καινοφανών, με την διαφορά ότι η συνεχής προσθήκη ύλης από το άστρο-συνοδό στην επιφάνεια του λευκού νάνου αυξάνει τόσο πολύ την μάζα του, ώστε αυτή μπορεί να υπερβεί το όριο Chandrasekhar. Από την στιγμή αυτή και μετά, καθώς η εσωτερική του πίεση δεν επαρκεί πλέον, ώστε να αντισταθεί στην βαρύτητα, ο λευκός νάνος καταρρέει βαρυτικά, αυξάνοντας την πυκνότητα και την θερμοκρασία του σε ακραία επίπεδα, και δίνοντας έτσι το έναυσμα για μία «εκρηκτική» περίοδο πυρηνοσύνθεσης, στην διάρκεια της οποίας συντήκονται ραγδαία όλο και βαρύτερα στοιχεία. Ο λευκός νάνος, δηλαδή, μετατρέπεται σ' έναν ανεξέλεγκτο θερμοπυρηνικό αντιδραστήρα, που εντέλει εκρήγνυται με πρωτοφανή βιαιότητα και καταστρέφεται ολοκληρωτικά σε μία εκτυφλωτική έκρηξη **υπερκαινοφανούς τύπου Ia**, η φωτεινότητα της οποίας συναγωνίζεται την φωτεινότητα του γαλαξία που την φιλοξενεί. Όπως θα δούμε στην συνέχεια, ο θάνατος των γιγάντιων άστρων του Σύμπαντος είναι εξίσου βίαιος και δραματικός ★

Ο ραβδωτός σπειροειδής γαλαξίας UGC μοιάζει εκπληκτικά με τον Γαλαξία μας και βρίσκεται 400 εκατ. έτη φωτός μακριά. Το φωτεινό μπλε «άστρο» που διακρίνεται κάτω και αριστερά από το γαλαξιακό κέντρο είναι ένας υπερκαινοφανής τύπου Ia (ESA/Hubble & NASA).

# 6

## ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΩΝ ΓΙΓΑΝΤΙΩΝ ΑΣΤΡΩΝ

Το Νεφέλωμα Καρκίνος, 6.500 έτη φωτός μακριά στον αστερισμό του Ταύρου, είναι το λείψανο μίας έκρηξης σουπερνόβα που παρατήρησαν το 1054 Κινέζοι αστρονόμοι. (ESO).

**Κ**άθε άστρο οφείλει την ενέργειά του στις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης, οι οποίες μετατρέπουν αρχικά το υδρογόνο του πυρήνα του σε ήλιο και στη συνέχεια, εάν η μάζα τους είναι αρκετά μεγάλη, σε όλο και βαρύτερα στοιχεία. Πραγματικά, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την εξέλιξη και τον θάνατο των άστρων είναι η αρχική τους μάζα, ενώ σε αντίθεση ίσως με αυτό που θα περιμέναμε, τα άστρα με την μεγαλύτερη μάζα δεν έχουν την ίδια στιγμή και την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ο θάνατός τους, ωστόσο, συγκαταλέγεται ανάμεσα στα βιαιότερα φαινόμενα που μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σύμπαν.

Τα άστρα αυτά, δηλαδή όλα τα άστρα που έχουν μάζα τουλάχιστον 8 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου, καταναλώνουν ταχύτατα τα πυρηνικά τους καύσιμα, συντήκοντας όλο και βαρύτερους ατομικούς πυρήνες στο εσωτερικό τους. Με την ολοκλήρωση κάθε επεισοδίου πυρηνικής «καύσης» στον αστρικό πυρήνα, οι πυρηνικές αντιδράσεις σταματούν και, καθώς η βαρύτητα κυριαρχεί, ο πυρήνας συστέλλεται, αυξάνοντας την θερμοκρασία του σε επίπεδα που δίνουν το έναυσμα για την πυρηνική «καύση» του αμέσως βαρύτερου ατομικού πυρήνα. Αρχικά, τα άστρα αυτά συντήκουν, όπως είπαμε, το υδρογόνο του πυρήνα τους σε ήλιο. Ακολουθώντας, το ήλιο μετατρέπεται σε άνθρακα και οξυγόνο, ο άνθρακας σε νέον και μαγνήσιο, κ.ο.κ., μέχρις ότου το πυρίτιο και το θείο που έχει σχηματιστεί στον πυρήνα τους αρχίσει να μετατρέπεται σε σίδηρο, ενώ κάθε στάδιο πυρηνικής σύντηξης διαρκεί πολύ

λιγότερο από το προηγούμενο. Για παράδειγμα, ένα τέτοιο άστρο μπορεί να παραμένει στην ΚΑ, συντήκοντας το υδρογόνο του πυρήνα του για 10 εκατ. χρόνια. Η σύντηξη, όμως, του ηλίου διαρκεί το πολύ 1 εκατ. χρόνια, η σύντηξη του άνθρακα ολοκληρώνεται σε λίγες εκατοντάδες χρόνια κ.ο.κ., ενώ η πυρηνική «καύση» του πυριτίου διαρκεί μόλις μία μέρα.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξηγήσαμε τον τρόπο με τον οποίο ο πυρήνας ενός κόκκινου γίγαντα περιβάλλεται από μία στιβάδα στην οποία συντήκεται το ήλιο σε άνθρακα, καθώς και από μία δεύτερη, όπου το υδρογόνο συντήκεται σε ήλιο. Με τον ίδιο περίπου τρόπο, ο πυρήνας των γιγάντιων άστρων του Σύμπαντος περιβάλλεται από περισσότερες στιβάδες, όπου εκτελούνται διαφορετικές πυρηνικές «καύσεις», γεγονός που τους προσδίδει εσωτερική δομή που μοιάζει μ' αυτήν του κρεμμυδιού. Ο σιδερένιος πυρήνας τους, δηλαδή, περιβάλλεται από αλληπάλληλες στιβάδες, στις οποίες πραγματοποιούνται διαφορετικές πυρηνικές αντιδράσεις: στην εσώτατη από αυτές, το πυρίτιο συντήκεται σε σίδηρο, στην επόμενη το μαγνήσιο συντήκεται σε πυρίτιο και θείο κ.ο.κ., μέχρι την πλησιέστερη στην επιφάνειά του στιβάδα, όπου το υδρογόνο συντήκεται σε ήλιο.

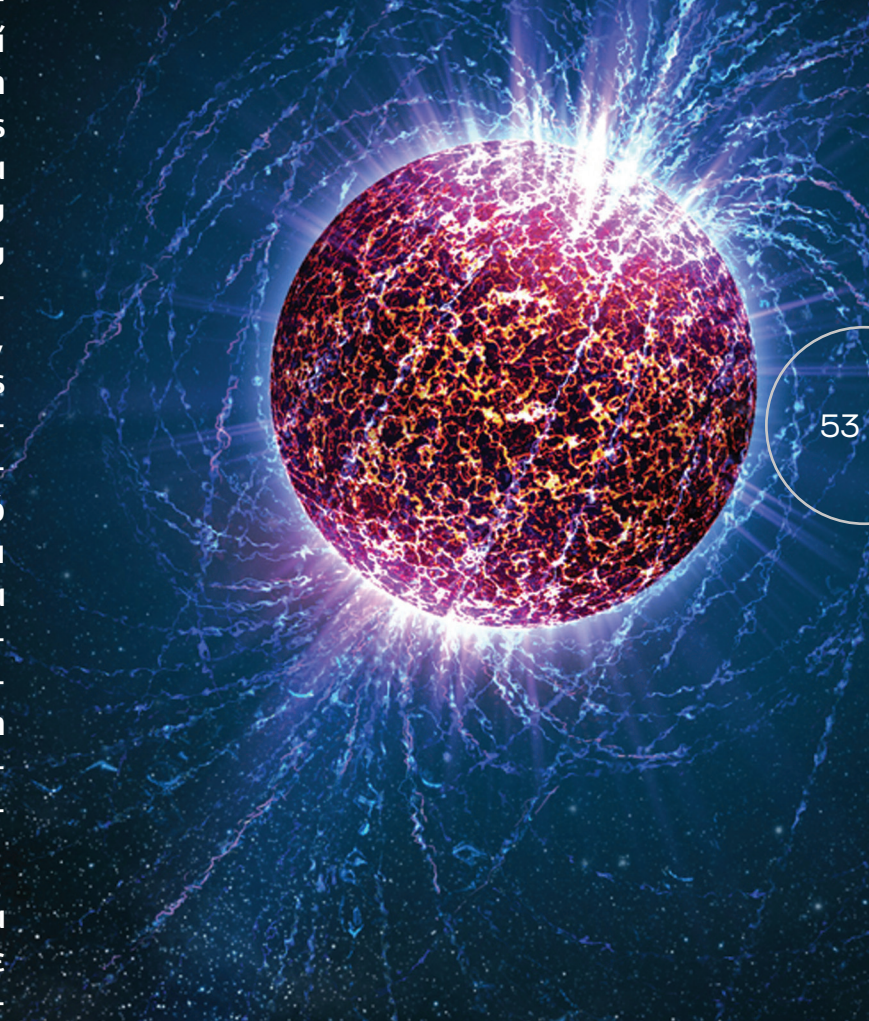
Όταν, όμως, ο πυρήνας τους μετατραπεί εξ ολοκλήρου σε σίδηρο, οι πυρηνικές αντιδράσεις εκεί σταματούν, διότι δεν είναι ενεργειακά εφικτό να συντηχθεί ο σίδηρος σε βαρύτερα στοιχεία. Αντιθέτως, στις τεράστιες θερμοκρασίες του αστρικού πυρήνα, που τώρα φτάνουν τους 10 δισ. °C, φωτόνια υψηλής ενέργειας διασπούν

τον σίδηρο σε πυρήνες ηλίου και νετρόνια, ενώ οι πυρήνες ηλίου διασπώνται με την σειρά τους σε πρωτόνια και νετρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την όλο και μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας από την καρδιά του άστρου.

Καθώς, όμως, η μάζα του πυρήνα φτάνει και εντέλει υπερβαίνει το όριο Chandrasekhar, η εκφυλισμένη πίεση των ηλεκτρονίων δεν μπορεί πλέον να αντισταθεί στην περαιτέρω βαρυτική του κατάρρευση και τότε ο αστρικός πυρήνας υφίσταται μία καταστροφική και σχεδόν ακαριαία ενδόρρηξη. Καθώς το εξωτερικό περίβλημα του αστρικού πυρήνα καταρρέει προς το κέντρο του με ταχύτητα δεκάδων χιλιάδων km/s, απελευθερώνονται ασύλληπτα ποσά βαρυτικής ενέργειας, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα, αυξάνοντας την θερμοκρασία στο εσωτερικό του σε αδιανόητα επίπεδα, που αγγίζουν τους 100 δισ. °C. Η εξίσου ακραία αύξηση της πυκνότητας στον αστρικό πυρήνα που συνεχίζει να καταρρέει, εξαναγκάζει τα εκφυλισμένα ηλεκτρόνια που εμπεριέχει να ενωθούν με τα πρωτόνια, παράγοντας με καταγιστικό ρυθμό νετρόνια και νετρίνα.<sup>2</sup> Τα ηλεκτρόνια έτσι σχεδόν «εξαφανίζονται» και, καθώς η εκφυλισμένη πίεση που ασκούσαν χάνεται, η κατάρρευση του πυρήνα και η αύξηση της θερμοκρασίας του συνεχίζονται ανεξέλεγκτες.

Όταν τα περισσότερα από τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια στον αστρικό πυρήνα μετατραπούν σε νετρόνια, η περαιτέρω κατάρρευσή του σταμα-

τά σχεδόν ακαριαία, καθώς ο αστρικός πυρήνας «στερεοποιείται» τώρα σε μία συμπαγή μάζα από νετρόνια, δηλαδή σε έναν αστέρα νετρονίων. Τα υπέρπυκνα αυτά αστρικά αντικείμενα με την ακραία βαρυτική έλξη έχουν μάζα περίπου 1,5-2 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου, συμπιεσμένη σε μία σφαίρα με διάμετρο που δεν υπερ-



<sup>2</sup> Τα νετρίνα είναι θεμελιώδη σωματίδια της ύλης με απειροελάχιστη μάζα και ουδέτερο φορτίο.

βαίνει τα 10-20 km και πυκνότητα παρόμοια με αυτήν που έχει ένας ατομικός πυρήνας. Η ύλη στο εσωτερικό ενός αστέρα νετρονίων, δηλαδή, είναι τόσο πυκνά «πακεταρισμένη», ώστε ένα κουταλάκι του γλυκού από τα υλικά του έχει μάζα που υπερβαίνει τους 5 δισ. τόνους. Η περαιτέρω κατάρρευση του αστρικού πυρήνα, που έχει πλέον μετατραπεί σε έναν αστέρα νετρονίων, παρεμποδίζεται τώρα από την πίεση που ασκούν τα «εκφυλισμένα» νετρόνια, που κι αυτά υπακούουν στην Απαγορευτική Αρχή του Pauli, καθώς και από την «πίεση» που οφείλεται σε απωστικής φύσης **ισχυρές αλληλεπιδράσεις**,<sup>3</sup> οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των νετρονίων.

Μέσα σε ελάχιστα δευτερόλεπτα, το σύνολο σχεδόν (περίπου το 99%) της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας που απελευθερώθηκε με την κατάρρευση του αστρικού πυρήνα εκλύεται στο Διάστημα με την βοήθεια των νετρίνων. Επειδή, όμως, τα νετρίνα σπανίως αλληλεπιδρούν με την συνηθισμένη ύλη, διαφεύγουν σχεδόν ελεύθερα από τον πυρήνα, με ταχύτητα που πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός, αποτελώντας και την πρώτη προειδοποίηση για την κολοσσιαία αστρική έκρηξη που επίκειται.

Πραγματικά, καθώς οι εξωτερικές στοιβάδες του αστρού συνεχίζουν την κατάρρευσή τους προς το κέντρο, επιταχύνονται από την ακραία βαρυτική έλξη σε τεράστιες ταχύτητες και προσκρούουν στον συμπαγή αστρικό πυρήνα με απίστευτη βιαιότητα.

Στην συνέχεια, όμως, «αναπηδούν» προς τα έξω, δημιουργώντας ένα κρουστικό κύμα. Από μόνο του, ωστόσο, το κρουστικό κύμα δεν έχει αρκετή ενέργεια, ώστε να αναστρέψει την περαιτέρω κατάρρευση των εξωτερικών στιβάδων του άστρου και να προκαλέσει την έκρηξή του. Σύμφωνα, όμως, με τις τελευταίες αριθμητικές προσομοιώσεις, το κρουστικό κύμα ενεργοποιείται και πάλι, χάρη στα νετρίνα, τα οποία διαφεύγουν από τον αστρικό πυρήνα, μεταφέροντας το σύνολο σχεδόν της ενέργειας που απελευθερώθηκε με την κατάρρευσή του. Η ενέργεια αυτή «αναζωογονεί» το κρουστικό κύμα, το οποίο διασχίζει τώρα τις εξωτερικές στιβάδες του άστρου, αναστρέφοντας την κατάρρευσή τους και δίνοντας το έναυσμα για μία εκρηκτική περίοδο πυρηνικής σύντηξης, ικανής πλέον να δημιουργήσει και στοιχεία βαρύτερα από τον σίδηρο.

Εντέλει, μετά από λίγες ώρες, το κρουστικό κύμα φτάνει στην επιφάνεια του άστρου, εκτινάσσοντας το εξωτερικό του περίβλημα στο Διάστημα, σε μία πρωτοφανούς βιαιότητας έκρηξη σουπερνόβα ή **υπερκαινοφανούς τύπου II**, όπως ονομάζεται, η εκτυφλωτική έκλαμψη της οποίας συναγωνίζεται αυτή των υπερκαινοφανών τύπου Ia. Το αρχικό άστρο έχει πλέον εξαφανιστεί. Τη θέση του έχει πάρει ένας υπέρπυκνος αστέρας νετρονίων στο κέντρο ενός ταχύτατα διαστελλόμενου αέριου περιβλήματος, που με την πάροδο του χρόνου σχη-

<sup>3</sup> Η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις που υπάρχουν στην φύση και έχει περιορισμένη εμβέλεια, καθώς γίνεται αισθητή μόνο σε υποατομικές κλίμακες. Μεταξύ άλλων, συγκρατεί τα κουάρκ στο εσωτερικό σωματιδίων όπως το πρωτόνιο και το νετρόνιο.



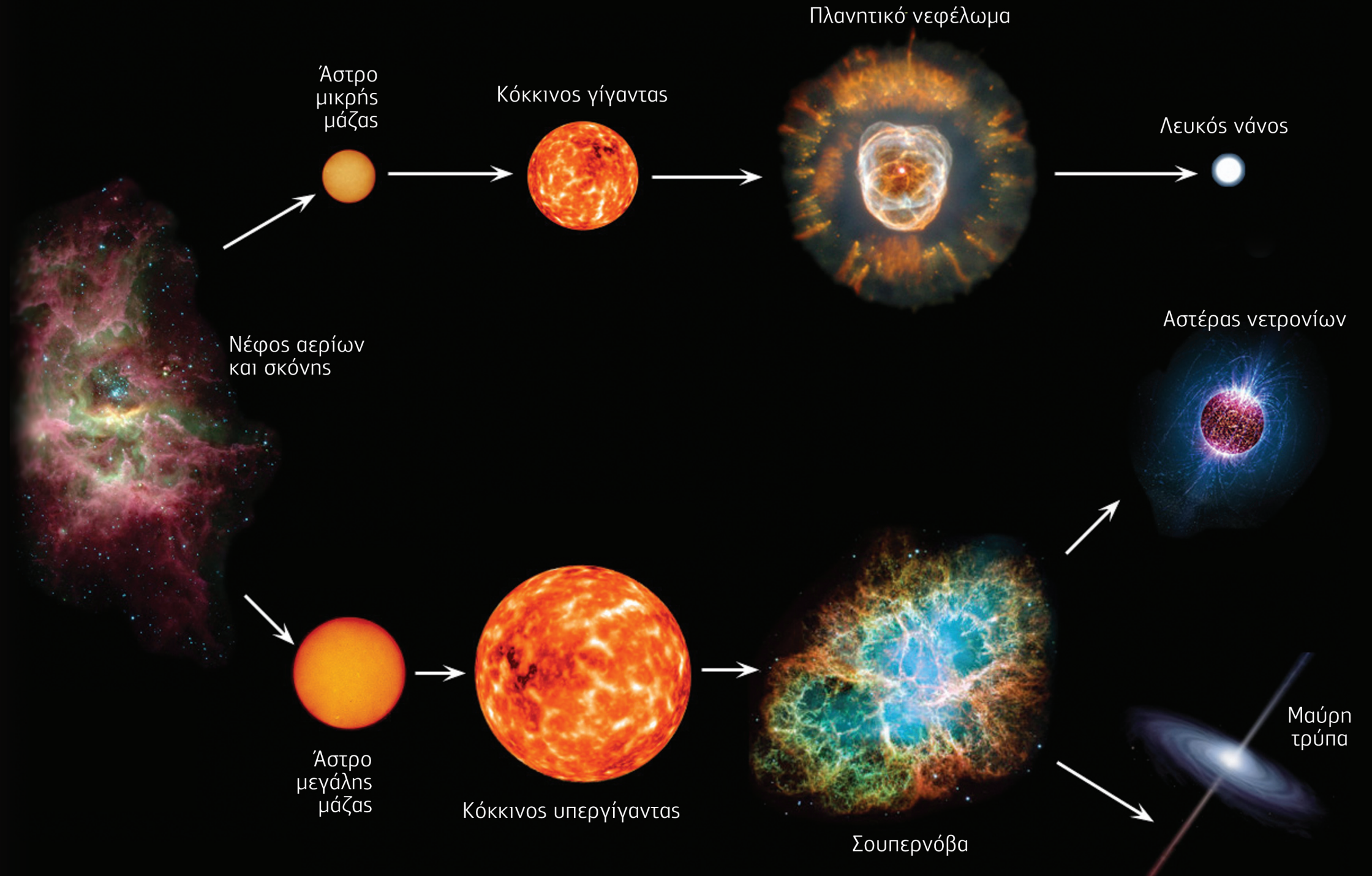
Αυτό το λείψανο μίας έκρηξης σουπερνόβα βρίσκεται στο Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου. Η αρχική μάζα του άστρου που την προκάλεσε, ήταν περίπου 50 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου [NASA, ESA, HEIC, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA); Ackn.: Y.-H. Chu and R. M. Williams (UIUC)].

## ΑΣΤΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

ματίζει εκπληκτικής ομορφιάς νεφελώματα όπως αυτό του Καρκίνου. Εάν ο αστρικός αυτός πυρήνας έχει μάζα μικρότερη από τις περίπου 3 ηλιακές μάζες, τότε η περαιτέρω συμπίεσή του σταματά και το αστρικό «λείψανο» που επιβιώνει της καταστροφικής έκρηξης είναι αυτός ακριβώς ο αστρικός πυρήνας, δηλαδή ένας αστέρας νετρονίων. Εάν, αντιθέτως, η μάζα του είναι μεγαλύτερη, ο αστρικός πυρήνας καταρρέει σε μία μαύρη τρύπα.

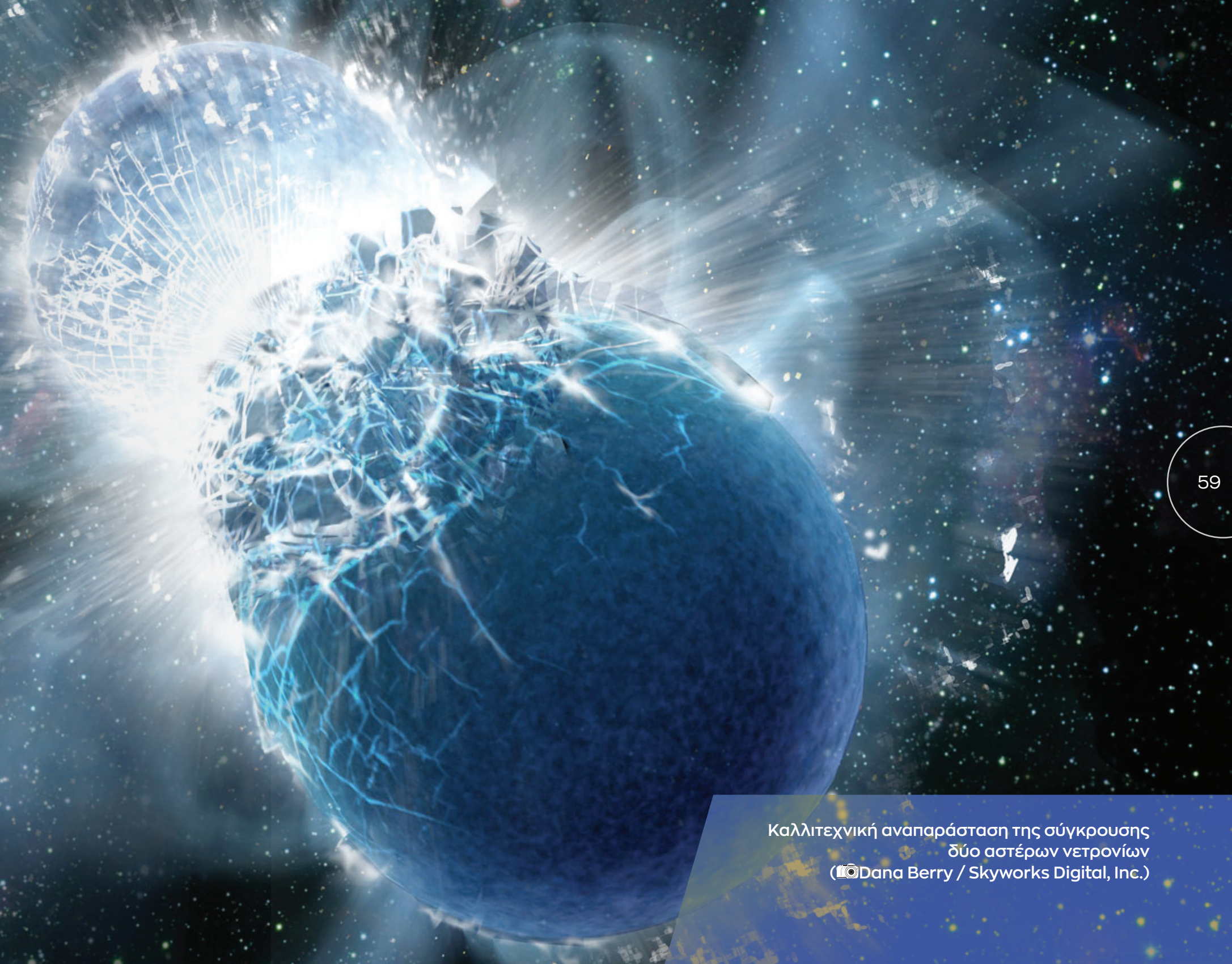
Υπάρχουν, όμως, κάποιες αστρικές εκρήξεις, γνωστές ως **υπερνόβα**, οι οποίες είναι τουλάχιστον 100 φορές ισχυρότερες, γεγονός που υποδεικνύει ότι η αρχική μάζα του άστρου που τις προκαλεί, μπορεί να είναι ακόμη και 200 φορές μεγαλύτερη απ' αυτήν του Ήλιου. Δεν είναι ακόμη απολύτως κατανοητός ο φυσικός μηχανισμός που προκαλεί τις εκρήξεις αυτές, μία ωστόσο από τις πιθανές ερμηνείες είναι οι **υπερκαινοφανείς αστάθειας ζεύγους** (pair-instability supernova).

Οι υπερκαινοφανείς αστάθειας ζεύγους προκαλούνται όταν άστρα με μάζα της τάξης των 130–200 ηλιακών μαζών εκρήγνυνται χωρίς να αφήνουν πίσω τους κανενός είδους αστρικό υπόλειμμα. Αυτό που συμβαίνει είναι το εξής: η θερμοκρασία στον πυρήνα τους αυξάνεται τόσο πολύ, ώστε υψηλότερης ενέργειας ακτινοβολία γ αρχίζει να μετατρέπεται σε ζεύγη σωματιδίων ύλης και αντιύλης, κυρίως ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πίεσης της ακτινοβολίας στο εσωτερικό του άστρου, γεγονός που εξαναγκάζει τον πυρήνα του, που εμπεριέχει μεγάλες ακόμη ποσότητες πυρηνικών «καυσίμων», να καταρρεύσει.



Η περαιτέρω συμπίεση του πυρήνα, όμως, οδηγεί σε μία εκρηκτική και εκτός ελέγχου θερμοπυρηνική σύντηξη, που σχεδόν ακαριαία «καίει» τα πάντα. Η ξαφνική και ακραία απελευθέρωση ενέργειας αναστρέφει την περαιτέρω κατάρρευση του πυρήνα και το άστρο εκρήγνυται σε μία θερμοπυρηνική έκρηξη αδιανόητης ισχύος, που κυριολεκτικά διαμελίζει το άστρο, χωρίς να αφήσει κανένα αστρικό «λείψανο», χωρίς δηλαδή να σχηματιστεί αστέρας νετρονίων ή μαύρη τρύπα.

Κλείνοντας αυτήν την σύντομη και αναγκαστικά ελλιπή παρουσίαση ορισμένων από τις βιαιότερες αστρικές εκρήξεις που μπορούμε να δούμε στον Γαλαξία μας και στο Σύμπαν, θα αναφερθούμε σε ένα ακόμη είδος, το οποίο οφείλεται στην σύγκρουση δύο αστέρων νετρονίων. Όταν δύο αστέρες νετρονίων συγκρούονται και συγχωνεύονται, ένα μικρό ποσοστό ύλης από τις εξωτερικές τους στοιβάδες, που αποτελείται κυρίως από νετρόνια, αναμειγμένων με πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις πρωτονίων και ηλεκτρονίων, εκτινάσσεται στο Διάστημα. Στο εσωτερικό αυτού του διαστελλόμενου νέφους ύλης, τα σωματίδια αυτά ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας όλο και βαρύτερους ατομικούς πυρήνες, περιλαμβανομένων και ραδιενεργών ισοτόπων. Κατά την ραδιενεργό διάσπαση των ισοτόπων αυτών εκλύονται μεγάλα ποσά θερμότητας, που προσδίδουν στο νέφος μία ηλεκτρομαγνητική έκλαμψη, η οποία θυμίζει σουπερνόβα, αλλά είναι περίπου 100 φορές ασθενέστερη. Αυτού του είδους οι εκρήξεις ονομάζονται **κιλονόβα**, ενώ η πιο πρόσφατη από αυτές παρατηρήθηκε στις 16 Οκτωβρίου 2017 ★



Καλλιτεχνική αναπαράσταση της σύγκρουσης  
δύο αστέρων νετρονίων  
(©Dana Berry / Skyworks Digital, Inc.)

# 7

## ΑΣΤΕΡΕΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ, ΠΑΛΣΑΡ ΚΑΙ ΜΑΥΡΕΣ ΤΡΥΠΕΣ

Καλλιτεχνική αναπαράσταση ενός πάλσαρ (NASA)



Είδαμε νωρίτερα ότι όταν ένα άστρο εκρήγνυται ως σουπερνόβα, ο πυρήνας του καταρρέει προς το εσωτερικό του, ενώ οι εξωτερικές του στοιβάδες εκτινάσσονται στο Διάστημα. Εάν ο αστρικός πυρήνας που υφίσταται την καταστροφική ενδόρρηξη έχει μάζα μικρότερη από τις 3 περίπου ηλιακές μάζες, τότε συμπιέζεται σ' έναν αστέρα νετρονίων. Εάν, αντιθέτως, η αρχική μάζα του άστρου είναι μεγαλύτερη, ώστε η μάζα του αστρικού πυρήνα να υπερβαίνει αυτό το όριο, τίποτα πλέον δεν μπορεί να αντισταθεί στην περαιτέρω βαρυτική του κατάρρευση σε ένα σημείο μηδενικού όγκου και άπειρης πυκνότητας, δηλαδή σε μία μαύρη τρύπα.

Αυτό το κρίσιμο όριο των περίπου 3 ηλιακών μαζών υπολογίστηκε για πρώτη φορά το 1939, μέσα από τις θεωρητικές μελέτες των **Robert Oppenheimer** (1904–1967) και **George Volkoff** (1914–2000), οι οποίοι βασισμένοι σε προηγούμενη έρευνα του **Richard Tolman** (1881–1948), συνειδητοποίησαν ότι, όπως ακριβώς η μάζα ενός λευκού νάνου δεν μπορεί να υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο (το όριο Chandrasehkar, στο οποίο αναφερθήκαμε νωρίτερα), το ίδιο ακριβώς πρέπει να ισχύει και για τους αστέρες νετρονίων. Ωστόσο η ακριβής τιμή της μέγιστης επιτρεπτής μάζας ενός αστέρα νετρονίων εξακολουθεί να αποτελεί πεδίο αντιπαράθεσης. Πραγματικά, παρόλο που οι αστρονόμοι μελετούν αυτά τα συναρπαστικά αντικείμενα εδώ και αρκετές δεκαετίες, οι γνώσεις μας γι' αυτά παραμένουν ελλιπείς, καθώς εξακολουθούμε να αγνοούμε το πώς ακριβώς συμπερι-

φέρεται η ύλη σε αυτές τις ακραίες συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό τους.

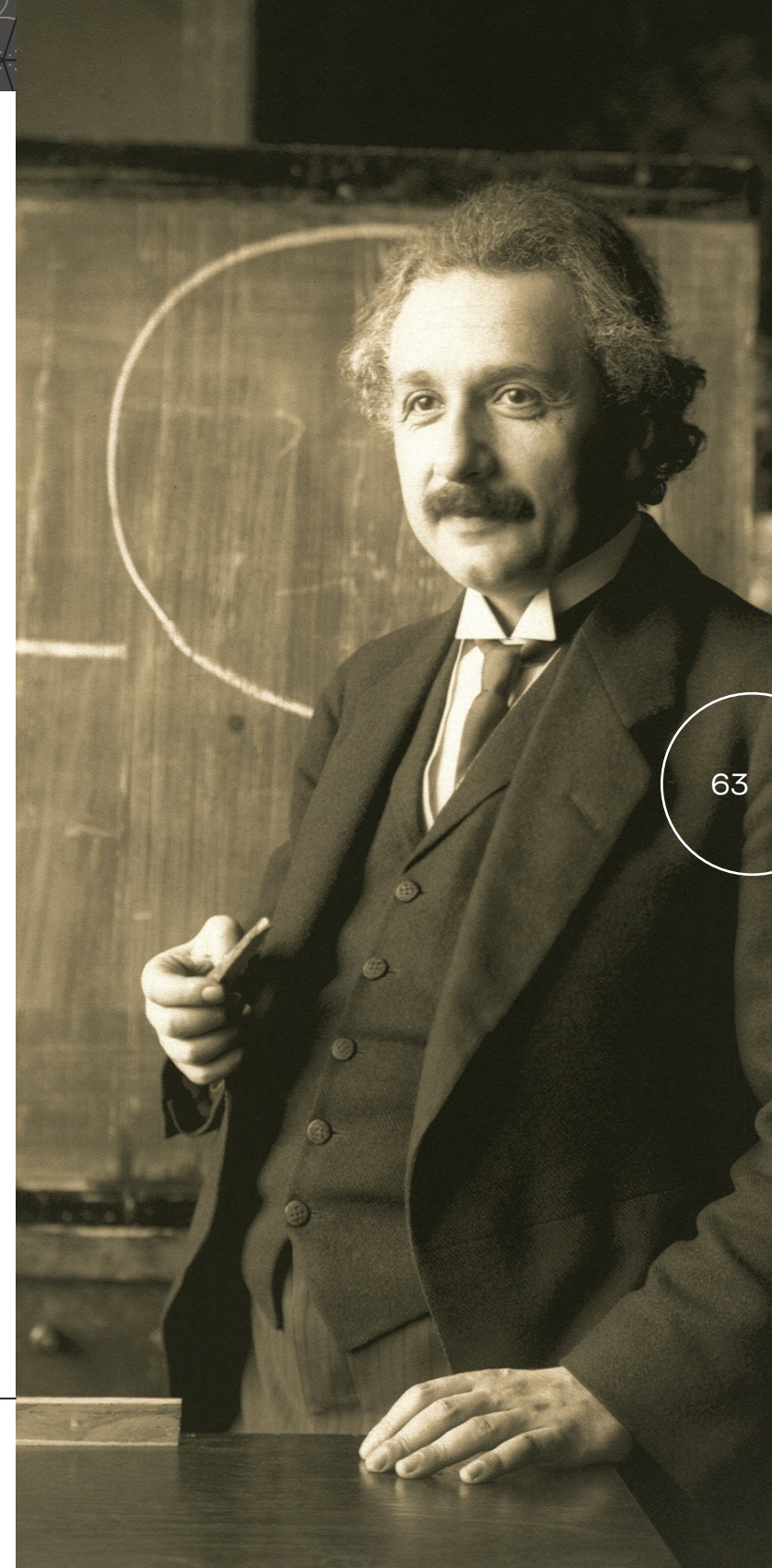
Οι αστέρες νετρονίων περιστρέφονται με μεγάλες ταχύτητες γύρω από τον άξονά τους. Καθώς, όμως, τα νετρόνια στην επιφάνεια ενός αστέρα νετρονίων διασπώνται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια, τα φορτισμένα αυτά σωματίδια παγιδεύονται από το ισχυρότατο μαγνητικό του πεδίο και επιταχύνονται με την περιστροφή του σε τεράστιες ταχύτητες, εκλύοντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία εστιάζεται σε δύο στενές δέσμες: μία προς την κατεύθυνση που δείχνει ο βόρειος μαγνητικός πόλος του αστέρα νετρονίων και μία προς την κατεύθυνση που δείχνει ο νότιος μαγνητικός πόλος. Στην περίπτωση που οι μαγνητικοί πόλοι του αστέρα νετρονίων δεν ευθυγραμμίζονται με τον άξονα περιστροφής του, οι δύο δέσμες ακτινοβολίας περιστρέφονται και αυτές, σαρώνοντας το Διάστημα, όπως το περιστρεφόμενο «μάτι» ενός φάρου. Εάν, λοιπόν, ένας αστέρας νετρονίων είναι έτσι προσανατολισμένος σε σχέση με την Γη, ώστε η ακτινοβολία του να σαρώνει στο πέρασμά της τον πλανήτη μας, την αντιλαμβανόμαστε ως μία παλλόμενη πηγή ακτινοβολίας που αναβοσβήνει περιοδικά, δηλαδή ως ένα **πάλσαρ**. Με λίγα λόγια, όλα τα πάλσαρ είναι αστέρες νετρονίων, αλλά δεν είναι όλοι οι αστέρες νετρονίων πάλσαρ!

Το ταχύτερα περιστρεφόμενο πάλσαρ που έχει ανακαλυφθεί μέχρι σήμερα στροβιλίζεται γύρω από τον εαυτό του με ταχύτητα που στον ισημερινό του υπερβαίνει τα 70.000 km/s, συμπληρώνοντας

716 περιστροφές το δευτερόλεπτο. Καθώς, όμως, συνεχίζουν να περιστρέφονται, τα πάλσαρ χάνουν ενέργεια και επιβραδύνονται, εκλύοντας όλο και λιγότερη ακτινοβολία. Σε μερικά εκατομμύρια χρόνια, περιστρέφονται πλέον τόσο αργά και η εκπομπή ακτινοβολίας τους είναι τόσο περιορισμένη, που δεν θεωρούνται πια πάλσαρ.

Οι αστρικές μαύρες τρύπες, από την άλλη, αποτελούν το τελικό στάδιο της εξέλιξης των άστρων, με μάζα τουλάχιστον 20 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου, ενώ προέκυψαν αρχικά ως μαθηματικές «παραδοξότητες», μέσα από την επίλυση των εξισώσεων της **Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας** (ΓΘΣ), της νέας θεωρίας για την βαρύτητα που μας κληροδότησε ο **Άλμπερτ Αϊνστάιν** (1879–1955) το 1915. Μέσα από μία σειρά πολύπλοκων και ιδιαίτερα δύσκολων στην επίλυσή τους εξισώσεων, ο Αϊνστάιν περιέγραψε τη βαρύτητα ως την στρέβλωση που προκαλεί η παρουσία της ύλης στην υφή του χωροχρόνου. Όπως το έθεσε αρκετά χρόνια αργότερα ο θεωρητικός φυσικός **John Wheeler** (1911–2008), «η ύλη υπαγορεύει στον χωροχρόνο πώς θα καμπυλωθεί και ο βαθμός καμπύλωσης του χωροχρόνου υπαγορεύει στην ύλη πώς θα κινηθεί». Με την ΓΘΣ, ο Αϊνστάιν διαμόρφωσε ένα λαμπρό θεωρητικό οικοδόμημα, πάνω στο οποίο θεμελιώθηκαν σταδιακά όλες σχεδόν οι γνώσεις που αποκτήσαμε έκτοτε για το Σύμπαν και την εξέλιξη των δομών μικρής και μεγάλης κλίμακας που εμπεριέχει.

Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν



64

Για να πάρουμε, όμως, τα πράγματα από την αρχή, θα χρειαστεί να ανατρέξουμε στα τέλη του 18ου αιώνα, σε μία εποχή όπου η καθιερωμένη και ευρύτατα αποδεκτή περιγραφή της βαρύτητας δινόταν μέσα από τους νόμους του **Νεύτωνα** (1642–1727). Σύμφωνα με την κλασική, Νευτώνεια Μηχανική, κάθε αντικείμενο που εκτινάσσεται κατακόρυφα προς τον ουρανό, ανέρχεται σε κάποιο ύψος, για να ξαναπέσει στη Γη αργότερα. Εάν όμως η αρχική του ταχύτητα είναι αρκετά μεγάλη, τότε το αντικείμενο αυτό θα διαφύγει από το βαρυτικό πεδίο της Γης για πάντα. Αυτή η ταχύτητα ονομάζεται **ταχύτητα διαφυγής** και για τον πλανήτη μας ισούται με 11,2 km/sec. Κάθε ουράνιο σώμα χαρακτηρίζεται από τη δική του ταχύτητα διαφυγής, η οποία είναι ανάλογη με τη μάζα του και αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας του. Επομένως, όσο μεγαλύτερη ποσότητα ύλης είναι συγκεντρωμένη στον μικρότερο δυνατό όγκο, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι και η ταχύτητα με την οποία θα πρέπει να εκτιναχθεί ένα αντικείμενο προκειμένου να διαφύγει από τη βαρυτική έλξη της. Είναι δυνατόν, λοιπόν, να υπάρξει ένα αστρικό αντικείμενο, η μάζα και η ακτίνα του οποίου είναι τέτοιες, ώστε η ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνειά του να ισούται με την ταχύτητα του φωτός;

Ελάχιστες εβδομάδες μετά τη δημοσίευση της ΓΘΣ, ο Γερμανός αστρονόμος **Karl Schwarzschild** (1873–1916) ανακάλυψε μία μαθηματική λύση των εξισώσεων του Αϊνστάιν, για το βαρυτικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από μία σφαιρική και μη περιστρεφόμενη «σημειακή» συσσώρευση

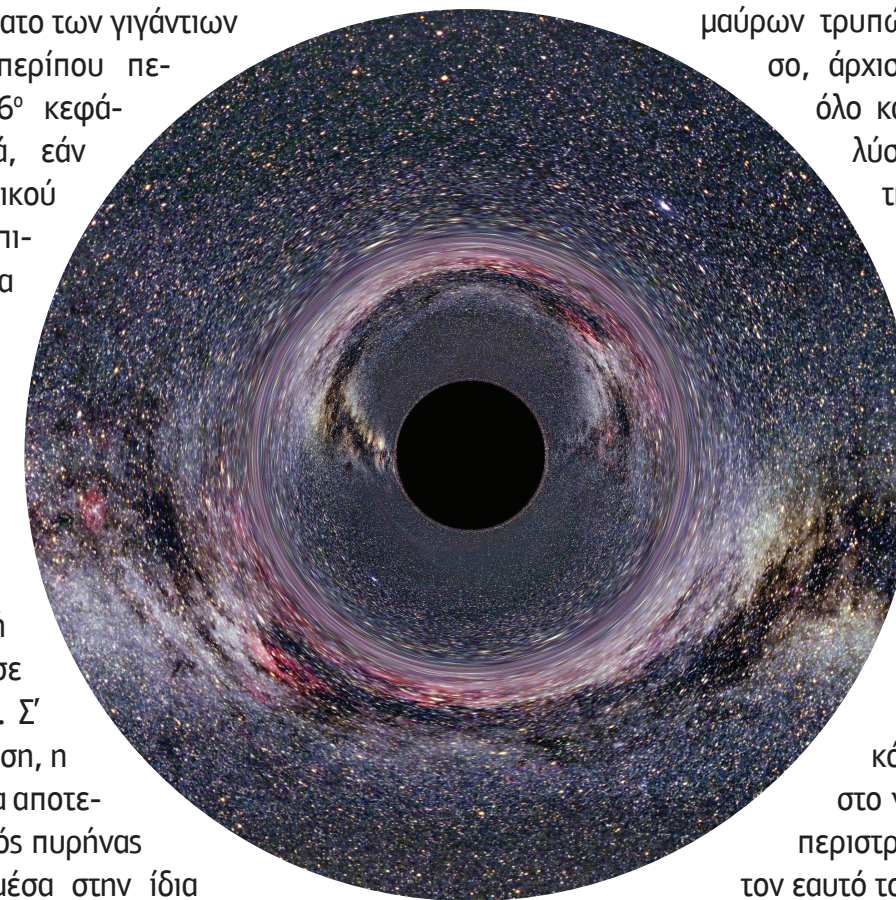
ύλης. Δηλαδή, μία συσσώρευση ύλης, όπου το σύνολο της μάζας της είναι συγκεντρωμένο σε ένα σημείο με μηδενικό όγκο και άπειρη πυκνότητα, σε μία ιδιομορφία στην ίδια την υφή του χωροχρόνου, όπου οι γνωστοί Νόμοι της Φυσικής απλά καταρρέουν. Σύμφωνα με τη μαθηματική λύση στην οποία κατέληξε, η **ιδιομορφία** αυτή «κρύβεται» από το υπόλοιπο Σύμπαν πίσω από τον **ορίζοντα γεγονότων** της.

Πνευματικός πατέρας αυτών των παράξενων αντικειμένων που προβλέπει η ΓΘΣ έγινε μισόν αιώνα αργότερα ο John Wheeler, ο οποίος σε μία διάλεξή του το 1967 τα ονόμασε **μαύρες τρύπες**. Κάθε σώμα και κάθε ακτινοβολία που έχει την «ατυχία» να διαβεί αυτό το όριο της «μη επιστροφής» που ορίζει ο ορίζοντας γεγονότων, θα χαθεί στο εσωτερικό της για πάντα. Γιατί πέρα απ' αυτό, η βαρυτική έλξη της μαύρης τρύπας γίνεται τόσο ισχυρή, ώστε τίποτα δεν μπορεί να διαφύγει, ούτε και αυτό ακόμη το φως. Από την ίδια τους την φύση, δηλαδή, οι μαύρες τρύπες είναι αόρατες, γι' αυτό και μέχρι πρόσφατα διαθέταμε μόνο έμμεσους τρόπους για την ανίχνευσή τους.


Η λύση Schwarzschild που αντιστοιχεί σε αυτού του είδους τις στατικές, μη περιστρεφόμενες και χωρίς ηλεκτρικό φορτίο μαύρες τρύπες, είναι η απλούστερη που υπάρχει. Εκείνη την εποχή, ωστόσο, η μαθηματική λύση του Schwarzschild δεν είχε «υλική υπόσταση». Θα χρειαστεί να περάσουν αρκετά ακόμη χρόνια προτού οι επιστήμονες αρχίσουν να σκέφτονται σοβαρά την πιθανότητα τα παράξενα

αυτά «μαθηματικά» αντικείμενα όντως να υπάρχουν στο Σύμπαν.

Στα χρόνια, όμως, που ακολούθησαν, η διεύρυνση των γνώσεών μας για την γένεση και την εξέλιξη των άστρων οδήγησε σταδιακά στο συμπέρασμα ότι αυτές οι παράξενες μαθηματικές λύσεις των εξισώσεων της ΓΘΣ αποκτούν υλική υπόσταση μέσα από τον θάνατο των γιγάντιων άστρων, όπως περίπου περιγράψαμε στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Πραγματικά, εάν η μάζα του αστρικού πυρήνα που «επιβιώνει» από μία έκρηξη σουπερνόβα υπερβαίνει τις 2-3 ηλιακές μάζες, τίποτα πλέον δεν μπορεί να αντισταθεί στην περαιτέρω βαρυτική του κατάρρευση σε μία μαύρη τρύπα. Σ' αυτή την περίπτωση, η ύλη από την οποία αποτελούνταν ο αστρικός πυρήνας «εξαφανίζεται» μέσα στην ίδια



Απεικόνιση μαύρης τρύπας 10 ηλιακών μαζών, όπως θα φαινόταν από απόσταση 600 km στον Γαλαξία μας

[ [Ute Kraus](#), Physics education group Kraus, Universität Hildesheim [Space Time Travel](#), (background image of the milky way: [Axel Mellinger](#))].

την ιδιομορφία και το μόνο που παραμένει, υποδηλώνοντας ότι εδώ υπάρχει «κάτι», είναι το βαρυτικό της πεδίο. Αυτό το κρίσιμο όριο των 2-3 ηλιακών μαζών υπολογίστηκε, όπως είπαμε, για πρώτη φορά το 1939.

Ακόμη και τότε, όμως, η επιστημονική κοινότητα δυσκολευόταν να αποδεχτεί την ύπαρξη των μαύρων τρυπών. Σταδιακά, ωστόσο, άρχισαν να εμφανίζονται όλο και πιο «ρεαλιστικές» λύσεις των εξισώσεων της ΓΘΣ και απ' ό,τι φαίνεται οι πλέον «ρεαλιστικές» απ' αυτές είναι οι περιστρεφόμενες μαύρες τρύπες, όπως περιγράφονται σε μία λύση που ανακάλυψε ο Νεοζηλανδός φυσικός **Roy Kerr** το 1963. Η «ρεαλιστικότητα» τους έγκειται στο γεγονός ότι τα άστρα περιστρέφονται γύρω από τον εαυτό τους, γεγονός που ση-

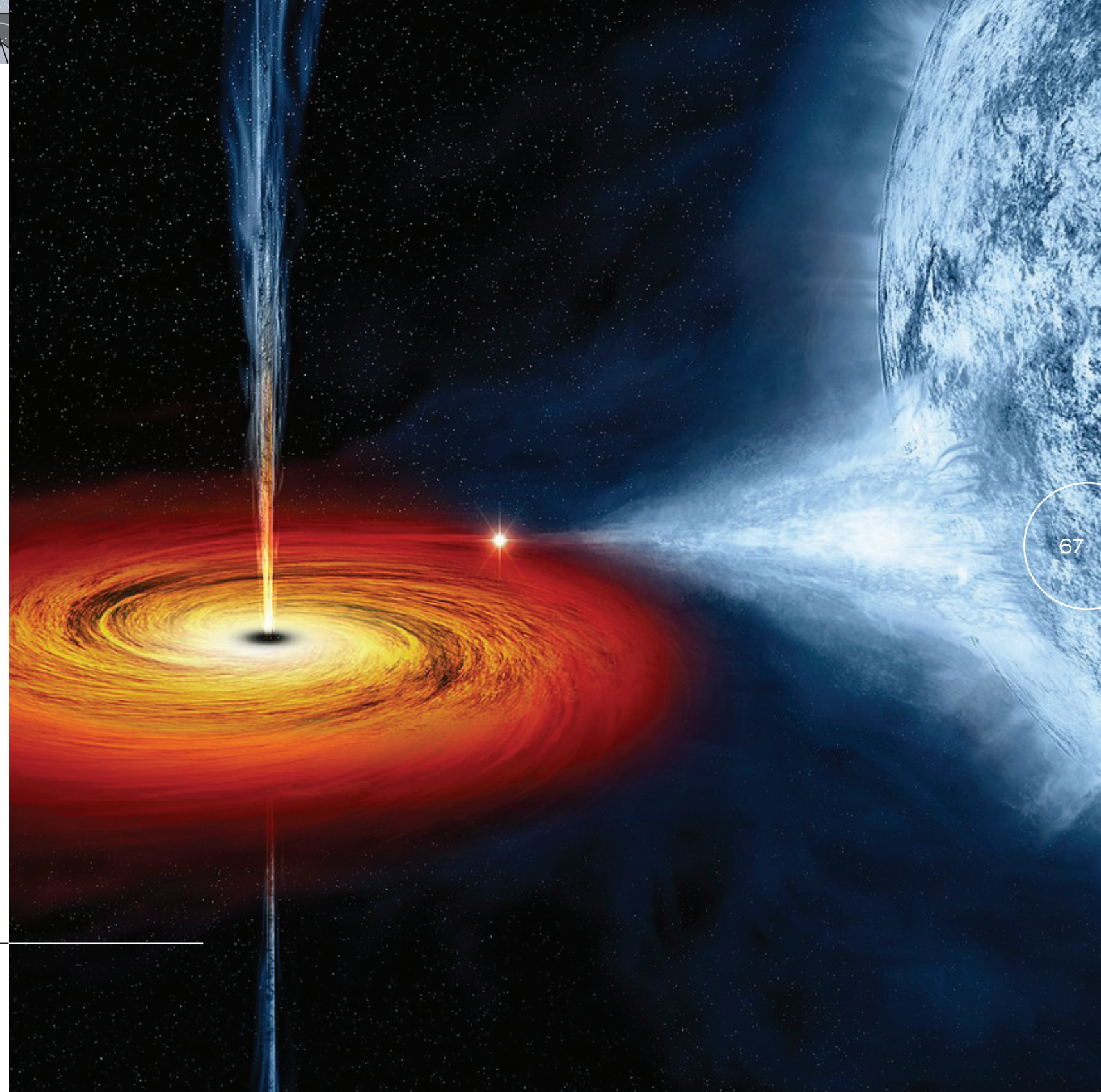
μαίνει ότι, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της στροφορμής, οι μαύρες τρύπες που δημιουργούνται από τον θάνατό τους πρέπει να περιστρέφονται και αυτές.

Εφόσον όμως, και αυτό ακόμη το φως δεν μπορεί να διαφύγει από τη βαρυτική έλξη μίας μαύρης τρύπας, πού στηρίζουμε την πεποίθησή μας ότι όντως υπάρχουν; Μέχρι πρόσφατα, ο μοναδικός τρόπος ανίχνευσης μίας μαύρης τρύπας βασιζόταν στην επιρροή που ασκεί το ισχυρότατο βαρυτικό της πεδίο στην ύλη που την περιβάλλει ή στα ουράνια σώματα με τα οποία γειτονεύει. Γι' αυτό και οι απομονωμένες αστρικές μαύρες τρύπες είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ανιχνευθούν με την υπάρχουσα τεχνολογία και γνώση. Εάν, όμως, μία αστρική μαύρη τρύπα αποτελεί μέρος ενός διπλού αστρικού συστήματος, η ύπαρξή της μπορεί να φανερωθεί εμμέσως, καταρχάς από την «ανεξήγητα» μεγάλη ταχύτητα με την οποία περιφέρεται το άστρο-συνοδός της γύρω από ένα «σκοτεινό σημείο». Αυτά τα αστρικά συστήματα, δηλαδή, αποτελούνται από ένα «ορατό» άστρο, το οποίο περιφέρεται γύρω από τον «αόρατο» συνοδό του, που μπορεί να είναι είτε ένας αστέρας νετρονίων είτε μία μαύρη τρύπα.

Καθώς το αόρατο «άστρο» έλκει αέρια από τις εξωτερικές στοιβάδες του ορατού άστρου, αυτά στρο-

βιλίζονται γύρω του, σχηματίζοντας έναν δίσκο υπερθερμασμένων υλικών, που εκλύει ακτινοβολία Χ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος είναι το **Cygnus X-1**, το οποίο αποτελείται από μία αστρική μαύρη τρύπα και έναν γαλάζιο υπεργίγαντα. Σύμφωνα με την έρευνα που ακολούθησε, η μάζα της μαύρης τρύπας είναι περίπου δεκαπενταπλάσια από αυτήν του Ήλιου, δηλαδή πολύ μεγάλη, ώστε αυτός ο οπτικά αόρατος «συνοδός» του γαλάζιου υπεργίγαντα να είναι αστέρας νετρονίων. Οι αναλαμπές ακτίνων Χ προκαλούνται καθώς φορτισμένο πλάσμα απομακρύνεται από την επιφάνεια του γαλάζιου υπεργίγαντα στο Διάστημα. Σημαντικό μέρος της ύλης αυτής έλκεται από την γειτονική μαύρη τρύπα, σχηματίζοντας γύρω της έναν δίσκο υπερθερμασμένων υλικών, τα οποία κάτω από την βαρυτική της έλξη στροβιλίζονται με όλο και μεγαλύτερη ταχύτητα, όλο και πλησιέστερα προς τον ορίζοντα γεγονότων της. Τα αέρια αυτά θερμαίνονται σε εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου και, λίγο πριν καθούν για πάντα πίσω από τον ορίζοντα γεγονότων της, ακτινοβολούν ακτίνες Χ. Για λόγους, μάλιστα, οι οποίοι δεν είναι ακόμη απολύτως κατανοητοί, σχηματίζονται και ενεργητικοί πίδακες φορτισμένων σωματιδίων, οι οποίοι εκτοξεύονται από τους πόλους της μαύρης τρύπας στο Διάστημα, με τεράστιες ταχύτητες ★

Καλλιτεχνική αναπαράσταση του συστήματος Cygnus X-1  
(NASA/CXC/M.Weiss)



# 8

## ΓΑΛΑΞΙΑΚΕΣ ΜΑΥΡΕΣ ΤΡΥΠΕΣ

Το παράξενο σχήμα του γαλαξία NGC 2623 οφείλεται στην σύγκρουση δύο μικρότερων, οι οποίοι συγχωνεύονται. Με το πέρας των γαλαξιακών συγχωνεύσεων, οι γιγάντιες μαύρες τρύπες που βρίσκονταν στον πυρήνα τους, συγχωνεύονται κι αυτές (📷 Hubble Legacy Archive, ESA, NASA).

**Α**π' όλα τα θαυμαστά και παράξενα αντικείμενα του Γαλαξία μας κανένα δεν είναι πιο θαυμαστό και παράξενο από τις μαύρες τρύπες. Και καμία απ' αυτές δεν είναι μεγαλύτερη από την γιγάντια μαύρη τρύπα που υπάρχει στον πυρήνα του. Τεράστιες μαύρες τρύπες με μάζα ακόμη και δισεκατομμύρια φορές μεγαλύτερη απ' αυτήν του Ήλιου, υπάρχουν στους πυρήνες των περισσότερων γαλαξιών του Σύμπαντος. Κάποιοι γαλαξίες, μάλιστα, μπορεί να φιλοξενούν στον πυρήνα τους, όχι μία μόνο, αλλά δύο, ακόμη και τρεις γιγάντιες μαύρες τρύπες, που στροβιλίζονται η μία γύρω από την άλλη, σ' έναν κοσμικό χορό με μαέστρο την βαρύτητα.

Πώς, όμως, γνωρίζουμε ότι υπάρχει στο κέντρο

του Γαλαξία μας μία μαύρη τρύπα; Υπολογίζοντας την ταχύτητα περιφοράς μεμονωμένων άστρων γύρω από τους γαλαξιακούς πυρήνες, μπορούμε να διαπιστώσουμε την ύπαρξη μαύρων τρυπών, εάν οι ταχύτητες αυτές είναι τόσο μεγάλες, που μόνο μία τεράστια συσσώρευση ύλης, δηλαδή μία μαύρη τρύπα, θα μπορούσε να δικαιολογήσει. Πραγματικά, αστρονομικές παρατηρήσεις στην διάρκεια της τελευταίας εικοσαετίας καταδεικνύουν ότι ορισμένα άστρα στον πυρήνα του Γαλαξία μας κινούνται γύρω του με ταχύτητες αρκετών εκατ. km/h. Γνωρίζοντας τις θέσεις και τις τροχιακές ταχύτητες των άστρων αυτών και χρησιμοποιώντας τους νόμους του Κέπλερ, οι αστρονόμοι εκτίμησαν στην συνέχεια την συνολική ποσότητα της μάζας

που περικλείεται στις τροχιές τους. Το αποτέλεσμα αυτών των υπολογισμών δείχνει ότι η συνολική μάζα που βρίσκεται συσσωρευμένη στον πυρήνα του Γαλαξία μας είναι περίπου 4,3 εκατ. φορές μεγαλύτερη απ' αυτήν του Ήλιου.

Εάν τώρα παρατηρήσουμε το κέντρο του γαλαξιακού πυρήνα με ραδιοτηλεσκόπια, θα διαπιστώσουμε ότι εκεί ακριβώς υπάρχει μία σχεδόν σημειακή, φωτεινή (σε αυτά τα μήκη κύματος) «πηγή» ραδιοκυμάτων, γνωστή ως **Toξότης A\***. Πρόκειται για ένα «αντικείμενο» με διάμετρο που δεν υπερβαίνει την μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο. Ο συνδυασμός των δύο αυτών παρατηρήσεων, δηλαδή της πολύ μεγάλης μάζας που είναι συσσωρευμένη σε μία (τηρουμένων των αναλογιών) μικροσκοπική

περιοχή, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα άστρα του γαλαξιακού πυρήνα στροβιλίζονται γύρω από μία γαλαξιακή μαύρη τρύπα.

Διεθνής ομάδα ερευνητών, μάλιστα, που τα τελευταία χρόνια καταγράφει προσεκτικά την τροχιά ενός άστρου γύρω από την γιγάντια μαύρη τρύπα του Γαλαξία, ανακοίνωσε πρόσφατα ότι το άστρο αυτό κινείται ακριβώς όπως προβλέπει η ΓΘΣ. Τα σχετικά δεδομένα ελήφθησαν με την βοήθεια του τηλεσκοπίου VLT, που έχει εγκατασταθεί στην έρημο Ατακάμα της Χιλής από το Ευρωπαϊκό Νότιο Αστεροσκοπείο (ESO), ενώ η σχετική μελέτη δημοσιεύθηκε στις 16 Απριλίου 2020 στο επιστημονικό περιοδικό *Astronomy & Astrophysics*.



Οι τροχιές των άστρων που γειτονεύουν με την γιγάντια μαύρη τρύπα του Γαλαξία, από στιγμιότυπο προσομοίωσης (ESO/L. Calçada/spaceengine.org).

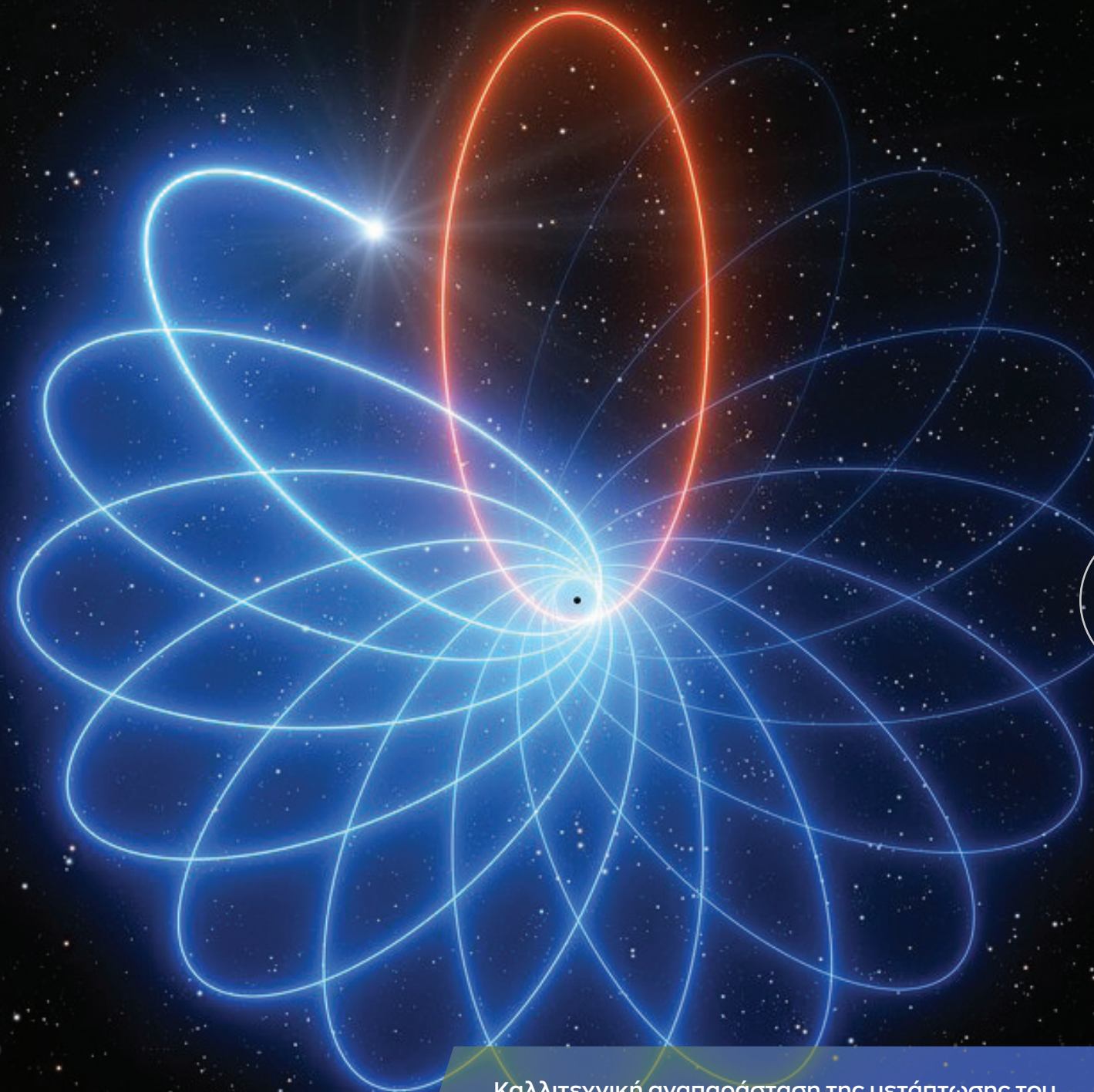
Περίπου 26.000 έτη φωτός μακριά από τον Ήλιο, ο Τοξότης A\* και το πυκνό αστρικό σμήνος που τον περιβάλλει, παρέχουν στους αστρονόμους ένα μοναδικό εργαστήριο, με την βοήθεια του οποίου μπορούν να ελέγξουν συγκεκριμένες προβλέψεις της ΓΘΣ σε ένα εν πολλοίς ανεξερεύνητο, αλλά σίγουρα ακραίο περιβάλλον βαρύτητας. Πραγματικά, το άστρο του σμήνους με την κωδική ονομασία **S2**, που ολοκληρώνει μία τροχιά γύρω από την γιγάντια μαύρη τρύπα του Γαλαξία σε 16 χρόνια, έφτασε στο πλησιέστερο σημείο της τροχιάς του γύρω της (σε απόσταση μόλις 120 φορές μεγαλύτερη από την μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο) στις 19 Μαΐου του 2018, κινούμενο με ταχύτητα που αγγίζει τα 8.000 km/s. Εάν η κλασική, Νευτώνεια θεώρηση της βαρύτητας ήταν σωστή, το S2 θα συνέχιζε να κινείται ακριβώς πάνω στην ίδια τροχιά που είχε μόλις ολοκληρώσει.

Αυτό που παρατηρήθηκε, ωστόσο, ήταν διαφορετικό: το S2 συνέχισε να κινείται σε μία τροχιά ανεπαίσθητα μετατοπισμένη σε σχέση με την προηγούμενη, όπως ακριβώς προβλέπει η ΓΘΣ. Όπως, δηλαδή, συμβαίνει με την τροχιά του Ερμή γύρω από τον Ήλιο, η **μετάπτωση** του άστρου S2 μετατοπίζει ανεπαίσθητα την θέση του πλησιέστερου σημείου της τροχιάς του γύρω από την γιγάντια μαύρη τρύπα του Γαλαξία, έτσι ώστε η επόμενη τροχιά του να είναι ελάχιστα διαφορετική από την προηγούμενη κ.ο.κ., σχηματίζοντας το χαρακτηριστικό σχήμα της ροζέτας που έχουν οι μαργαρίτες. Οι τελευταίες αυτές μετρήσεις βρίσκονται σε εκπληκτική συμφωνία με την αντίστοιχη θεωρητική πρόβλεψη που γίνεται στο πλαίσιο της ΓΘΣ.


Οι περισσότεροι, μάλιστα, γαλαξίες στο Σύμπαν φιλοξενούν στους πυρήνες τους τεράστιες μαύρες τρύπες με μάζα ακόμη και χιλιάδες φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την μαύρη τρύπα του Γαλαξία μας. Ένα από τα πρώτα σημαντικά βήματα που οδήγησε την διεθνή επιστημονική κοινότητα σ' αυτό το συμπέρασμα αποτέλεσε η ανακάλυψη των κβάζαρ, παράξενων υπερφωτεινών «αντικειμένων» στα πέρατα του Σύμπαντος, τα οποία εκλύουν τεράστια ποσά ενέργειας, από περιοχές που συνήθως δεν υπερβαίνουν σε μέγεθος την διάμετρο του Ηλιακού μας συστήματος.

Τα κβάζαρ εκλύουν ακτινοβολία σε ολόκληρο το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και η εκτυφλωτική τους φωτεινότητα υπερβαίνει κατά πολύ την φωτεινότητα ενός «κοινού» γαλαξία, καθώς ο πυρήνας τους εκπέμπει τεράστιες ποσότητες ενέργειας, ασύγκριτα μεγαλύτερης από αυτήν που θα μπορούσε να δικαιολογήσει ο αριθμός των άστρων που περιέχει. Αυτού του είδους οι γαλαξίες ονομάζονται **ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες** (Active Galactic Nuclei, AGN).

Περαιτέρω μελέτες στα χρόνια που ακολούθησαν την ανακάλυψή τους, οδήγησαν τους αστρονόμους στο συμπέρασμα ότι οι «μηχανές» που ενεργοποιούν τα κβάζαρ δεν μπορεί να είναι τίποτε άλλο από κολοσσιαίες μαύρες τρύπες. Καθώς, δηλαδή, η μαύρη τρύπα έλκει με το πανίσχυρο βαρυτικό της πεδίο τα αέρια και την σκόνη που την περιβάλλει, σχηματίζει γύρω της έναν αχανή περιστρεφόμενο δίσκο αερίων και σκόνης, γνωστό ως **δίσκο προσαύξη-**



Καλλιτεχνική αναπαράσταση της μετάπτωσης του άστρου S2 γύρω από την γιγάντια μαύρη τρύπα του Γαλαξία μας (ESO/L. Calçada).

An artistic rendering of a quasar jet. A bright, glowing yellow and orange central region represents the accretion disk and the supermassive black hole. From this center, a powerful jet of light blue and white energy extends upwards and to the left. The surrounding space is filled with intricate, swirling patterns of red and orange, representing the complex magnetic fields and plasma structures of the quasar. The background is a dark, starry space.

Καλλιτεχνική αναπαράσταση κβάζαρ που ενεργοποιείται από μία μαύρη τρύπα με μάζα 2 δισ. φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου (ESO/M. Kornmesser).

**ons.** Καθώς τα υλικά του δίσκου στροβιλίζονται με όλο και μεγαλύτερη ταχύτητα, όλο και πλησιέστερα προς τον ορίζοντα γεγονότων της, υπερθερμαίνονται σε εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου, εκλύοντας ακτινοβολία. Κάποιες φορές, μάλιστα, και για λόγους που δεν είναι ακόμη απολύτως κατανοητοί, ενεργητικοί πίδακες φορτισμένων σωματιδίων εκτινάσσονται από τους πόλους της μαύρης τρύπας, με ταχύτητες που πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός. Αυτού του είδους οι πίδακες παράγουν

επιπλέον ακτινοβολία, και όταν ο ένας από αυτούς εκτινάσσεται προς την γενικότερη κατεύθυνση του πλανήτη μας, ο AGN ονομάζεται **blazar**.

Ένα τέτοιο blazar είναι και ο γαλαξίας **OJ 287**. Το εκπληκτικό στην περίπτωση του γαλαξία αυτού είναι ότι δεν ενεργοποιείται από μία μόνο, αλλά από δύο κολοσσιαίες μαύρες τρύπες, η μικρότερη από τις οποίες έχει μάζα 150 εκατ. φορές μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου, δηλαδή κάπου 37 φορές με-

γαλύτερη από την γιγάντια μαύρη τρύπα του Γαλαξία μας. Η πιο μεγάλη ωστόσο, περικλείει την μάζα 18 δισ. Ήλιων και είναι από τις μεγαλύτερες που έχουμε ανακαλύψει ποτέ!

Οι γαλαξιακές μαύρες τρύπες ανιχνεύονται με τους ίδιους έμμεσους τρόπους που χρησιμοποιούμε και για την ανίχνευση των αστρικών μαύρων τρυπών. Με την πρώτη ανίχνευση, όμως, των **βαρυτικών κυμάτων** από τον ανιχνευτή **LIGO**, που ανακοινώ-

θηκε τον Φεβρουάριο του 2016, καθώς και με την πρώτη φωτογράφιση της σκιάς μίας γαλαξιακής μαύρης τρύπας που υλοποιήθηκε τρία χρόνια αργότερα, στους έμμεσους τρόπους ανίχνευσης μαύρων τρυπών, προστίθενται και δύο άμεσοι (περισσότερες πληροφορίες για τα δύο αυτά ιστορικά επιστημονικά επιτεύγματα μπορείτε να αντλήσετε από τα άρθρα που παρατίθενται στην «Βιβλιογραφία»). Η σημασία, ειδικότερα, της πρώτης ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων δεν μπορεί να υποτιμηθεί, αφού

εκτός του ότι αποτελεί μία ακόμη, εντελώς νέα και εκπληκτική, επαλήθευση της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, αποτελεί παράλληλα και την πρώτη απευθείας ανίχνευση μαύρων τρυπών, την πρώτη παρατήρηση διπλών αστρικών συστημάτων που αποτελούνται από μαύρες τρύπες και την πρώτη καταγραφή της συγχώνευσής τους σε μία.

Είδαμε μέχρι τώρα ότι οι αστρικές μαύρες τρύπες αποτελούν το τελικό στάδιο της εξέλιξης των άστρων με μάζα πολλαπλάσια απ' αυτήν του Ήλιου και ότι οι γαλαξιακές μαύρες τρύπες υπάρχουν στους πυρήνες των περισσότερων γαλαξιών του Σύμπαντος, ενώ σκιαγραφήσαμε και τις βασικότερες μεθόδους ανίχνευσής τους. Ενώ, όμως, γνωρίζουμε σε γενικές γραμμές τον φυσικό μηχανισμό σχηματισμού των αστρικών μαύρων τρυπών, δεν μπορούμε να ισχυριστούμε το ίδιο και για τις γαλαξιακές μαύρες τρύπες. Και δεν είναι μόνο αυτό. Μία ολόκληρη σειρά ερωτημάτων, που αφορούν στη γένεση και στην εξέλιξη των τελευταίων παραμένει ακόμη και σήμερα αναπάντητη. Πού οφείλεται, για παράδειγμα, αυτό το τεράστιο εύρος στις μάζες των γαλαξιακών μαύρων τρυπών που έχουν υπο-

λογίσει οι αστρονόμοι; Σχετίζεται άραγε η μάζα τους με τη μάζα του γαλαξία που τις φιλοξενεί; Και εάν ναι, τι δημιουργήθηκε πρώτα; Η μαύρη τρύπα ή μήπως ο γαλαξίας που τη φιλοξενεί;

Αυτού του είδους τα ερωτήματα δεν έχουν ακόμη απαντηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Όπως όμως θεωρούν οι περισσότεροι αστρονόμοι, η γένεση και η εξέλιξη των γαλαξιών και των μαύρων τρυπών που φιλοξενούν στους πυρήνες τους, θα πρέπει να είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους. Τα βαθύτερα αίτια αυτού του συσχετισμού αποτελούν αναμφίβολα ένα από τα κορυφαία και αναπάντητα ακόμη ερωτήματα που αντιμετωπίζει η σύγχρονη Αστροφυσική. Εξίσου αναπάντητα παραμένουν και τα ερωτήματα που σχετίζονται με το τι συμβαίνει στο εσωτερικό μίας μαύρης τρύπας. Και ένας ίσως από τους λόγους γι' αυτό να είναι και το γεγονός ότι δεν έχει ακόμη διατυπωθεί μία **κβαντική θεωρία βαρύτητας**, καθώς η κβαντική θεωρία που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του μικρόκοσμου και η ΓΘΣ που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του μακρόκοσμου είναι δύο μαθηματικές δομές που κανένας ως τώρα δεν κατόρθωσε να «ταιριάξει» ★

Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την σύγκρουση δύο μαύρων τρυπών, σαν κι αυτή που ανιχνεύθηκε από το Αστεροσκοπείο Βαρυτικών Κυμάτων LIGO το 2016 [LIGO SXS, the Simulating eXtreme Spacetimes (SXS) project (<http://www.black-holes.org>)].





## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ / ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ★ [Ο Αϊνστάιν επιβεβαιώνεται ξανά: τα βαρυτικά κύματα υπάρχουν! - ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ](#)
- ★ [Η πρώτη φωτογράφιση της «σκιάς» μίας μαύρης τρύπας είναι γεγονός! - ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ](#)
- ★ <https://www.aavso.org/stellar-evolution>
- ★ <https://www.e-education.psu.edu/astro801/>
- ★ <https://www.accessscience.com/content/stellar-evolution/654000>
  
- ★ Αλυσσανδράκης Κ. Ε., *Εισαγωγή στην αστροφυσική*, Παπαζήσης, 2014.
- ★ Begelman, Mitchell, *Gravity's fatal attraction: black holes in the universe*, Scientific American Library, 1996.
- ★ Belkora, Leila, *Minding the heavens: the story of our discovery of the milky way*, IOP, c2003.
- ★ Binney, James, *Αστροφυσική: μια συνοπτική εισαγωγή*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2019.
- ★ Kaler, James, B., *Cosmic clouds: birth, death, and recycling in the galaxy*, Scientific American Library, 1997.
- ★ Luminet, Jean-Pierre, *Ένα αστέρι πεθαίνει: μαύρες τρύπες, κόκκινοι γίγαντες και άσπροι νάνοι*, Τραυλός, 2006.
- ★ Melia, Fulvio, *The edge of infinity: supermassive black holes in the universe*, Cambridge University Press, 2003.
- ★ Sanders, Robert, H., *Revealing the heart of the galaxy: the Milky Way and its black hole*, Cambridge University Press, 2014.
- ★ Tayler, R. J., *The stars: their structure and evolution*, Cambridge University Press, 1994.
- ★ Thorne, Kip, S., *Μαύρες τρύπες και στρεβλώσεις του χρόνου: η προκλητική κληρονομιά του Αϊνστάιν*, Κάτοπτρο, 1999.
- ★ Tweed, Mad, *Ένας οδηγός του σύμπαντος: ταξίδι στο χώρο και στο χρόνο*, Αλεξάνδρεια, 2019.
- ★ Tyson, Neil deGrasse, *Αστροφυσική για βιαστικούς*, Παπαδόπουλος, c2019.

# ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

**αφήγηση**  
ΘΑΝΑΣΗΣ ΚΟΥΡΛΑΜΠΑΣ

**narration**  
ARIS GERONTAKIS

**σκηνοθετική επιμέλεια**  
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΣ

**σενάριο, επιστημονική επιμέλεια  
& κείμενο αφήγησης**  
ΑΛΕΞΗΣ ΔΕΛΗΒΟΡΙΑΣ

**μουσική & sound design**  
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Κ. ΚΑΤΣΑΡΗΣ

**διεύθυνση παραγωγής**  
ΜΑΝΟΣ ΚΙΤΣΩΝΑΣ

**σύμβουλος παραγωγής**  
ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ Π. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΣ

**post-production video &  
title animation**  
ΓΙΑΝΝΗΣ ΒΑΜΒΑΚΑΣ

**graphic design**  
ΕΥΓΕΝΙΑ ΣΤΑΒΑΡΗ  
ΧΡΥΣΑΝΘΗ ΒΑΣΟΠΟΥΛΟΥ

**τεχνικοί πλανηταρίου**  
ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΛΟΥΒΑΡΗΣ  
ΧΡΗΣΤΟΣ ΧΡΗΣΤΟΓΙΩΡΓΟΣ

**ADLER PLANETARIUM**  
*Chicago, Illinois*

**executive producers**  
DAVID J. McCOMAS Ph.D.

PAUL H. KNAPPENBERGER Jr., Ph.D.  
LINDSAY MARIE BARTOLONE  
SUSAN WAGNER  
SUSAN HARRISON

**producer - art director**  
MARK PATERNOSTRO

**technical direction**  
PATRICK McPIKE  
LU NATALINO

**senior 3D artist - animators**  
PATRICK McPIKE  
LU NATALINO

**3D artist - animators**  
JESSICA REGALADO  
DEVIN FERGUSON

**BOCHUM PLANETARIUM**  
*Bochum, Germany*

**producer**  
MANFRED HUNERBEIN

**executive producer**  
DR. BJORN VOSS

**3D artists & compositing artists**  
ROBERT R. PERDOK  
TOBIAS WIETHOFF

**ESO IMAGES**  
*Munich, Germany*

**artist's impression of  
accreting black hole**

ESO  
L. CALCADA  
M.KORNMESSER

**artist's impression of dust formation  
by supernovae in a2744\_yd4**  
ESO

**artist's impression time-lapse of  
distant supernovae**  
ESO

**clip of the sun**  
NASA/SDO  
AIA SCIENCE TEAM  
EVE SCIENCE TEAM  
HMI SCIENCE TEAM  
M. KORNMESSER  
L. CALCADA

**close-up of a black hole near the  
event horizon**  
ESO  
L. CALCADA  
spaceengine.org

**flight from the earth to the  
milky way black hole**  
ESO  
L. CALCADA  
spaceengine.org

**flying to betelgeuse**  
ESO

**from earth to andromeda**  
ESO  
spaceengine.org

**orbiting a black hole near the  
event horizon 3**  
ESO  
L. CALCADA  
spaceengine.org

**out there: the quest for  
extrasolar worlds**

MARC HORAT (director &  
executive producer)

UELI THALMANN (production support)  
LARS LINDBERG CHRISTENSEN (ESO)  
(production support)

GUIDO SCHWARZ (NCCR PlanetS/  
Universitat Bern) (production support)  
WILLY BENZ (NCCR PlanetS/  
Universitat Bern) (production support)  
PIERRE BRATSCHI (NCCR PlanetS/  
Universitat Bern) (production support)

LUIS CALCADA (ESO)  
(3d modeling & texturing)  
ALVIM CORREA  
(war of the worlds illustrations)

**paranal flight**  
ESO

**supernova explosion 2**  
ESO  
L. CALCADA  
spaceengine.org

**stars orbiting the black hole at  
the heart of the milky way**  
ESO  
L. CALCADA  
spaceengine.org

**the scales of the stars**  
ESO  
L. CALCADA

**trappist-1 planetary system**  
ESO  
L. CALCADA  
spaceengine.org

**trappist-1 planetary system seen  
from above**  
ESO  
L. CALCADA  
spaceengine.org

**two small pieces of glass**  
IMILOA ASTRONOMY CENTER OF HAWAII  
INTERSTELLAR STUDIOS  
CARNEGIE SCIENCE CENTER

**universal: clues**  
CONSTRAINED LOCAL UNIVERSE  
EVOLUTION SUMMARY  
Dr. JOEL PRIMACK (UCSC)  
(science advisor)

Dr. ANATOLY KLYPIN (NMSU)  
(science advisor)

Dr. STEFAN GOTTLÖBER (Astrophysical  
Institute Potsdam) (science advisor)  
CHRIS HENZE (NASA Ames Research  
Center) (visualization)

NINA McCURDY (UCSC) (visualization)  
Dr. MARK SUBBARAO  
(Adler Planetarium) (visualization)  
PATRICK McPIKE (Adler Planetarium)  
(visualization)

Dr. DOUG ROBERTS  
(clues-adler show integration)  
MARK PATERNOSTRO  
(clues-adler show integration)

**vampire star cataclysm**  
ESO

**ESA PLANETARIUM**  
*Paris, France*

**producers**  
Dr. WILFRIED HAUKE  
ISABELLA BUCZEK

**lead 3D/compositing artist**  
BOB WEBER

**3D/compositing artists**  
MARTIN KOSMANN  
JOACHIM PERSCHBACHER  
ISABELLA BUCZEK  
BASTIAN BARTON  
JURGEN RIENOW  
JAN WARNSTAM

**keying**  
KNUT HOLST

**EVANS & SUTHERLAND**  
*Salt Lake City, Utah*

**executive producers**  
TERENCE MURTAGH  
KIRK JOHNSON

**producer**  
MICHAEL DAUT

**art & animation director**  
DON DAVIS

**animators**  
KEN CARLSON  
MARTY SISAM

**post-production**  
BRYCE BUCHANAN

**FULLDOMELAB IMMERSIVE MEDIA**

*ChiangMai, Thailand*

**supervisor**  
YURIY GAPON

**producers**  
GEOGIY AISTOV  
MAKSIM GOGOLEV  
ALEKSANDR SAMILENKO

**graphics**  
YULIYA TATSKO  
OLGA NAZARENKO

**animation**  
YURIY GAPON

**programmer**  
ALEKSANDR BEREZOVSKY

**GEOGRAPHICS IMAGING**

*Bradenton, Florida*

**producer**  
GEORGE FLEENOR

**HUBBLE SPACE TELESCOPE IMAGES**

*European Space Agency*

**artist's impression of hubble  
over earth**  
NASA  
ESA

**flight through the orion nebula  
in visible and infrared light**

NASA  
ESA

F. SUMMERS  
G. BACON  
Z. LEVAY

J. DePASQUALE  
L. HUSTAK  
L. FRATTARE

M. ROBERTO  
M. GENNARO (STScI)  
R. HURT (Caltech/IPAC)  
R. GENDLER

**Supernova explosion**  
ESA  
HUBBLE

L. CALCADA

N. RISINGER (skysurvey.org)

**MUSEUM OF SCIENCE**

*Boston, Massachusetts*

**supervisor**  
DANIELLE KHOURY LeBLANC

**producer**  
ALAN LIGHTMAN

**executive producers**  
IOANNIS MIAOULIS  
PAUL FONTAINE

DAVID RABKIN

**animation & effects artists**

CHARLES WILCOX  
WADE SYLVESTER

HEATHER FAIRWEATHER  
JASON FLETCHER

**systems & technical coordinator**

DARRYL DAVIS

**MELBOURNE PLANETARIUM**

*Melbourne, Australia*

**supervisor**  
TANYA HILL

**animation & design**  
DERMOT EGAN  
WARIK LAWBRANCE  
MATTHEW McCULLOUGH

**storyboard**  
MATT BISSETT-JOHNSON

**MIRAGE 3D STUDIO**

*The Hague, Netherlands*

**producer**  
ROBIN SIP

**senior animators**  
KEES VAN DER VIJVER  
MATHIJS BRUSSAARD  
PETER GEERTS  
LEON VER SCHOOR

**animators**  
RICK VAN REENEN

JOHANNES BEVELANDER

ROB MIENTJES  
TONI VAN VELZEN  
STIJN CAN KOOPEREN

BRYAN NOTER  
JEROEN TANIS

RICK VAN DEN BERG  
WIJNAND KOREMAN  
ALEXANDER HAUG

MAURICE VAN RIJSINGE  
MARK VERKERK

**NATIONAL SPACE CENTRE**

*Leicester, UK*

**producers**  
MAX CROW  
PAUL MOWBRAY  
ANDY GREGORY

**executive producer**  
KRIS McCALL

**computer animation and design**

AARON BRADBURY  
MAX CROW  
PHILIP DAY  
PAUL MOWBRAY

**additional 3D modeling**  
HUGH McGAHERN

**NORTHDOCKS**

*Kiel, Germany*

**supervisor**  
ADAM MAJOROSI

**art director**  
MICHEL MAGENS

**lead 3D artist**  
BOB WEBER

**lead fx artist**  
MARTIN KOSSMANN

**3D artists**  
JOACHIM PERSCHBACHER  
MICHEL MAGENS  
WOLF RUSMANN  
SVENJA KAMPO  
MICHA TWARDY

**data conversion**  
ALEXANDER GROFENSTEIN

**milky way simulation**  
ALEXANDER BINDEUS  
CHRISTIAN GOSCHI

**SKY-SKAN**  
*Nashua, New Hampshire*

**supervisor**  
JACK WHITE

**executive producer**  
STEVEN T. SAVAGE

**producers**  
ANNETTE SOTHERAN-BARNETT  
SHAWN LAATSCH

**animation**  
JOE JANCSICS  
CHRISTOPHER PHILLIPS  
MICHAEL ZOLTNITSKI

**composer**  
KEVIN BEAULIEU

**SOFTMACHINE**  
*Munich, Germany*

**supervisor**  
PETER POPP

**producer**  
RITA-GRACIELA WERNER

**production designer**  
ECKHARD ROCHOLL

**technical director**  
ROBERT ZELTSCH

**co-art director**  
CHRIS DREHER

**fulldome & post-production  
video services**  
ΝΕΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ  
Ιδρύματος Ευγενίδου

**post-production audio services**  
STARGAZER AUDIO  
Ιδρύματος Ευγενίδου

**παραγωγή**  
ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ  
© 2022



Το πλανητικό νεφέλωμα NGC 6543, γνωστότερο ως «Μάτι της Γάτας», είναι ένα από τα πιο πολύπλοκα νεφελώματα αυτού του τύπου που έχουμε ανακαλύψει [📷 NASA, ESA, HEIC, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)].

