



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΝΕΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ

ΟΔΗΓΟΣ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟΥ

ΕΝΑΖΗΤΟΥΝΤΑΣ ΤΗΝ ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΎΛΗ

Περισσότερα από 80 χρόνια πέρασαν από τότε που ο αστρονόμος Fritz Zwicky ανακάλυψε τις πρώτες ενδείξεις για μία παράξενη μορφή ύλης που υπάρχει παντού και όμως είναι αόρατη: την σκοτεινή ύλη. Έκτοτε, οι ενδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης πολλαπλασιάστηκαν, αν και η φύση της εξακολουθεί να παραμένει «σκοτεινή» όσο ποτέ! Από τον μεγαλύτερο σωματιδιακό επιταχυντή του κόσμου, που βρίσκεται στο CERN, μέχρι τους υπόγειους ανιχνευτές σκοτεινής ύλης που έχουν εγκατασταθεί στα βάθη εγκαταλελειμμένων ορυχείων, το «κυνήγι» για την ανίχνευση της σκοτεινής ύλης συνεχίζεται.





ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΝΕΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ

ΟΔΗΓΟΣ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟΥ

**ΑΝΑΖΗΤΩΝΤΑΣ
ΤΗΝ
ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΨΗ**

ΑΛΕΞΗ Α. ΔΕΛΗΒΟΡΙΑ
Αστρονόμος Ευγενιδείου Πλανηταρίου

**ΑΘΗΝΑ
2018**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ..... 4

01

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΥΛΗ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ 6

02

ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ..... 14

03

ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ 24

04

ΓΑΛΑΞΙΑΚΑ ΣΜΗΝΗ ΚΑΙ ΔΟΜΕΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ 34

05

ΕΠΙΛΟΓΟΣ: ΑΝΑΖΗΤΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΥΛΗ..... 46

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 56

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ 58

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το Νέο Ψηφιακό Πλανητάριο του Ιδρύματος Ευγενίδου, ένα από τα μεγαλύτερα και καλύτερα εξοπλισμένα 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 ενημερώνεται για τα κατορθώματα της επιστήμης, τις νέες τεχνολογικές εξελίξεις και διαφωτίζεται σχετικά με τη φύση της επιστημονικής έρευνας.

Ένα από τα πιο συναρπαστικά και αναπάντητα ακόμη ερωτήματα που αντιμετωπίζουν οι φυσικές επιστήμες σήμερα αφορά στην σκοτεινή ύλη: μία άγνωστης μορφής ύλη, η οποία δεν αλληλεπιδρά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, γι' αυτό και δεν μπορεί να ανιχνευθεί με την βοήθεια των τηλεσκοπίων μας. Οι έμμεσες, ωστόσο, αποδείξεις που διαθέτουμε για την ύπαρξή της είναι τόσο ισχυρές, ώστε η πλειονότητα της επιστημονικής κοινότητας συμφωνεί ότι η σκοτεινή ύλη υπάρχει. Παρόλο που οι πρώτες ενδείξεις για την σκοτεινή ύλη ανακαλύφθηκαν στην διάρκεια της δεκαετίας του '30, η φύση της εξακολουθεί να παραμένει «σκοτεινή».

Επομένως, τι είναι η σκοτεινή ύλη, ποιες είναι εκείνες οι ενδείξεις που συνηγορούν για την ύπαρξή της και ποια είναι η φύση της; Η παράσταση «Αναζητώντας την Σκοτεινή Ύλη» έχει ως κύριο στόχο να απαντήσει με όσο το δυνατόν πιο κατανοητό τρόπο σ' αυτά τα ερωτήματα, καθώς και να παρουσιάσει τους βασικούς τρόπους με τους οποίους οι επιστήμονες προσπαθούν να ανιχνεύσουν, να αναδημιουργήσουν και να προσδιορίσουν τα σωματίδια που την απαρτίζουν. Οι προσπάθειες αυτές που, μεταξύ άλλων, διεξάγονται σε υπόγειους ανιχνευτές σκοτεινής ύλης, αλλά και σε μεγάλους επιταχυντές σωματιδίων (όπως του CERN), αναδεικνύουν με τον καλύτερο τρόπο ότι το πρόβλημα της σκοτεινής ύλης μπορεί να απαντηθεί μόνο μέσα από την σύζευξη της Κοσμολογίας και της Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων. Είναι γεγονός ότι το θέμα αυτό παραμένει ένα από τα πιο σπουδαία και «ανοιχτά» ζητήματα της Φυσικής του μακρόκοσμου και του μικρόκοσμου σήμερα. Έτσι, τόσο η παράσταση όσο και ο Οδηγός που την συνοδεύει αποτελούν μια πρόκληση για την παρουσίαση του θέματος στο κοινό που έχει το ενδιαφέρον, αλλά όχι και τις εξειδικευμένες γνώσεις Φυσικής που απαιτούνται για την κατανόησή του.

Θεωρούμε ότι τα θέματα που έχουμε συμπεριλάβει σε αυτόν τον Οδηγό, 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. Ο συγκεκριμένος Οδηγός Παράστασης, καθώς και όλοι οι προηγούμενοι, θα αναρτηθεί στην ιστοσελίδα του Ευγενιδείου Πλανηταρίου, στην Ενότητα «Παραστάσεις» και θα είναι ελεύθερα διαθέσιμος για το κοινό και τους εκπαιδευτικούς.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Αλέξη Δεληβοριά, αστροφυσικό του Ευγενιδείου Πλανηταρίου, για τη συγγραφή του παρόντος Οδηγού, καθώς και όλους τους συναδέλφους που εργάζονται για τις εκδόσεις του Ιδρύματος Ευγενίδου για την επιμέλειά του. Θα ήταν, τέλος, παράλειψη αν δεν ευχαριστούσα και όλους τους συνεργάτες του Πλανηταρίου που συμμετείχαν στη δημιουργία της νέας παράστασης.

Μάνος Κισώνας
Διευθυντής Ευγενιδείου Πλανηταρίου

01

ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

**ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΥΛΗ ΚΑΙ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ**

Για πολλούς αιώνες, οι περιορισμένες μας γνώσεις για τον φυσικό κόσμο και η αδυναμία μας να δούμε πέρα απ' όσα έβλεπαν τα μάτια μας είχαν «συρρικνώσει» το ορατό τότε Σύμπαν στο Ηλιακό μας σύστημα και στα άστρα που βλέπαμε. Καθώς, όμως, οι επιστημονικές μας γνώσεις διευρύνονταν όλο και περισσότερο και καθώς κατασκευάζαμε όλο και ισχυρότερα τηλεσκόπια, τα όρια του Σύμπαντος επεκτείνονταν όλο και πιο πολύ. Με την βοήθειά τους, ανακαλύψαμε νεφελώματα μέσα στα οποία γεννιούνται νέα άστρα, αλλά και τον απόηχο βίαιων αστρικών εκρήξεων που σηματοδοτούν τον θάνατό τους. Ανακαλύψαμε ακόμη αναρίθμητους γαλαξίες στα πέρατα του Σύμπαντος, που συγκροτούν ομάδες και σμήνη ακόμη και χιλιάδων γαλαξιών. Ήδη, όμως, από την δεκαετία του '30, ανακαλύψαμε και τις πρώτες ενδείξεις ότι το Σύμπαν εμπεριέχει πολλά περισσότερα απ' όσα μπορούμε να δούμε. Μία μυστηριώδη και παράξενη μορφή ύλης που υπάρχει παντού και όμως είναι αόρατη: **η σκοτεινή ύλη.**

Το γαλαξιακό σμήνος Abell 2151
(φωτογρ. Copyright: [Ken Crawford](#)).

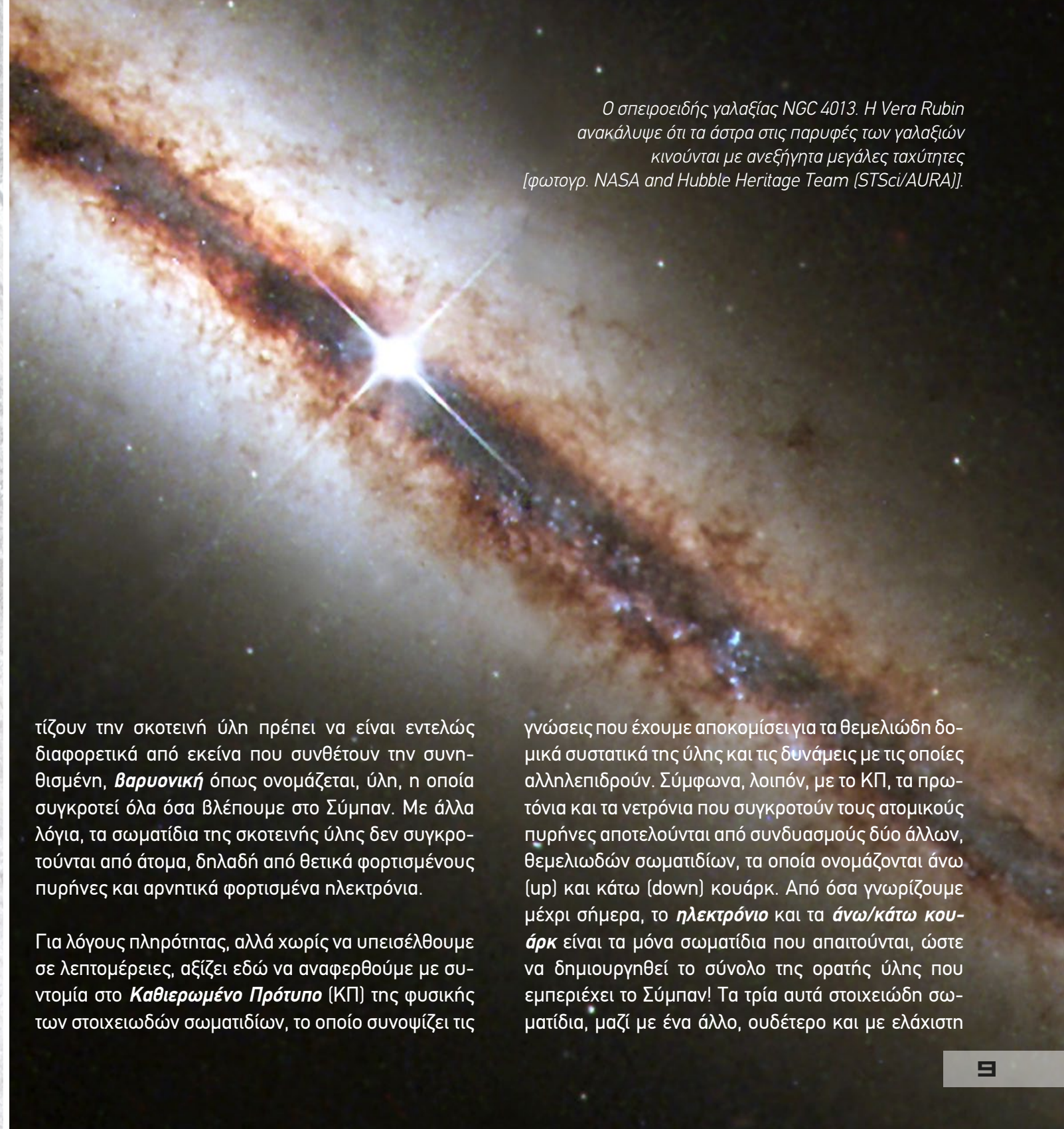
Όλα όσα έχουμε ανακαλύψει έως τώρα καταδεικνύουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της ύλης των γαλαξιών του Σύμπαντος δεν αντιστοιχεί στα αναρίθμητα άστρα και στα αέρια νέφη που μπορούμε να ανιχνεύσουμε με τα τηλεσκόπιά μας, αλλά είναι «σκοτεινή», διότι δεν αλληλεπιδρά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και κατά συνέπεια είναι «αόρατη». Όλες, ωστόσο, οι αποδείξεις που έχουμε συλλέξει για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης είναι έμμεσες. Δεν έχουμε, δηλαδή, κατορθώσει ακόμη να ανιχνεύσουμε τα ίδια τα σωματίδια που την απαρτίζουν, αλλά εξάγουμε το συμπέρασμα ότι η σκοτεινή ύλη υπάρχει, παρατηρώντας το πώς επηρεάζει σε μεγάλες συγκεντρώσεις με την βαρύτητά της την φωτεινή ύλη. Οι έμμεσες αυτές αποδείξεις, ωστόσο, είναι τόσες πολλές και πειστικές και προέρχονται από τόσες διαφορετικές κατευθύνσεις, που η πλειονότητα των επιστημόνων θεωρεί την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης αναμφισβήτητη. Την ίδια στιγμή, όμως, κάποιοι θεωρητικοί φυσικοί επεξεργάζονται εναλλακτικές θεωρίες βαρύτητας, θεωρώντας ότι η αδυναμία μας να ανιχνεύσουμε την σκοτεινή ύλη οφείλεται στο ότι αυτή δεν υπάρχει, καθώς είναι μία «ψευδαίσθηση» που προκαλείται από τις ελλιπείς γνώσεις μας για την βαρύτητα. Πώς, όμως, κατέληξαν οι επιστήμονες να αποδεχθούν την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης και ποια μπορεί να είναι η φύση της;

Ιστορικά, οι πρώτες ενδείξεις για την σκοτεινή ύλη προέκυψαν από την μελέτη της κίνησης των γαλαξιών στα γαλαξιακά σμήνη, στην διάρκεια της δεκαετίας του '30. Τότε ήταν που ο αστρονόμος **Fritz Zwicky** διαπίστωσε ότι οι ταχύτητες των γαλαξιών που απαρτίζουν το γαλαξιακό σμήνος **Κόμη** είναι ασύμβατες με τους νόμους του Νεύτωνα για τις κινήσεις των ουράνιων σωμάτων και την βαρύτητα, εκτός και αν

εμπεριέχουν περισσότερη ύλη απ' αυτήν που αντιστοιχεί στην φωτεινή τους ύλη. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε περίπου 40 χρόνια αργότερα η αστρονόμος **Vera Rubin**, μελετώντας τις κινήσεις των άστρων που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από τους γαλαξιακούς πυρήνες.

Εξίσου σημαντικές ενδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης προκύπτουν και από κοσμολογικές μελέτες που εδράζονται στην **θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης**, δηλαδή την θεωρία που περιγράφει την εξέλιξη του Σύμπαντος από μία αρχική κατάσταση άπειρης πυκνότητας και θερμοκρασίας. Οι ενδείξεις αυτές σχετίζονται με την εποχή της αρχέγονης **πυρηνοσύνθεσης**, στην διάρκεια της οποίας σχηματίστηκε το υδρογόνο και το ήλιο που εμπεριέχει το Σύμπαν, καθώς και με την μελέτη της **κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου**, δηλαδή την διάχυτη ακτινοβολία που απελευθερώθηκε στο Σύμπαν σχεδόν 400.000 χρόνια μετά την Μεγάλη Έκρηξη και αποτελεί το θερμικό υπόλειμμα του υπέρθερμου παρελθόντος του. Οι τελευταίες αποδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης που θα παρουσιάσουμε σ' αυτόν τον Οδηγό Παράστασης προέρχονται από την μελέτη των γαλαξιακών σμηνών και των συγκρούσεων μεταξύ τους, καθώς και από την μελέτη των δομών μεγάλης κλίμακας, οι οποίες είναι πολύ δύσκολο να αναπαραχθούν από εναλλακτικές θεωρίες βαρύτητας και χωρίς την βοήθεια της σκοτεινής ύλης.

Με αυτά τα δεδομένα, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στα κεφάλαια που ακολουθούν, οι περισσότεροι επιστήμονες συμφωνούν ότι η σκοτεινή ύλη υπάρχει, αν και η φύση της εξακολουθεί να παραμένει «σκοτεινή» όσο ποτέ. Στο τελευταίο κεφάλαιο, μάλιστα, θα δούμε ότι τα σωματίδια που απαρ-



Ο σπειροειδής γαλαξίας NGC 4013. Η Vera Rubin ανακάλυψε ότι τα άστρα στις παρυφές των γαλαξιών κινούνται με ανεξήγητα μεγάλες ταχύτητες [φωτογρ. NASA and Hubble Heritage Team (STScI/AURA)].

τίζουν την σκοτεινή ύλη πρέπει να είναι εντελώς διαφορετικά από εκείνα που συνθέτουν την συνηθισμένη, **βαρυονική** όπως ονομάζεται, ύλη, η οποία συγκροτεί όλα όσα βλέπουμε στο Σύμπαν. Με άλλα λόγια, τα σωματίδια της σκοτεινής ύλης δεν συγκροτούνται από άτομα, δηλαδή από θετικά φορτισμένους πυρήνες και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια.

Για λόγους πληρότητας, αλλά χωρίς να υπεισέλθουμε σε λεπτομέρειες, αξίζει εδώ να αναφερθούμε με συνομία στο **Καθιερωμένο Πρότυπο** (ΚΠ) της φυσικής των στοιχειωδών σωματιδίων, το οποίο συνοψίζει τις

γνώσεις που έχουμε αποκομίσει για τα θεμελιώδη δομικά συστατικά της ύλης και τις δυνάμεις με τις οποίες αλληλεπιδρούν. Σύμφωνα, λοιπόν, με το ΚΠ, τα πρωτόνια και τα νετρόνια που συγκροτούν τους ατομικούς πυρήνες αποτελούνται από συνδυασμούς δύο άλλων, θεμελιωδών σωματιδίων, τα οποία ονομάζονται άνω (up) και κάτω (down) κουάρκ. Από όσα γνωρίζουμε μέχρι σήμερα, το **ηλεκτρόνιο** και τα **άνω/κάτω κουάρκ** είναι τα μόνα σωματίδια που απαιτούνται, ώστε να δημιουργηθεί το σύνολο της ορατής ύλης που εμπεριέχει το Σύμπαν! Τα τρία αυτά στοιχειώδη σωματίδια, μαζί με ένα άλλο, ουδέτερο και με ελάχιστη

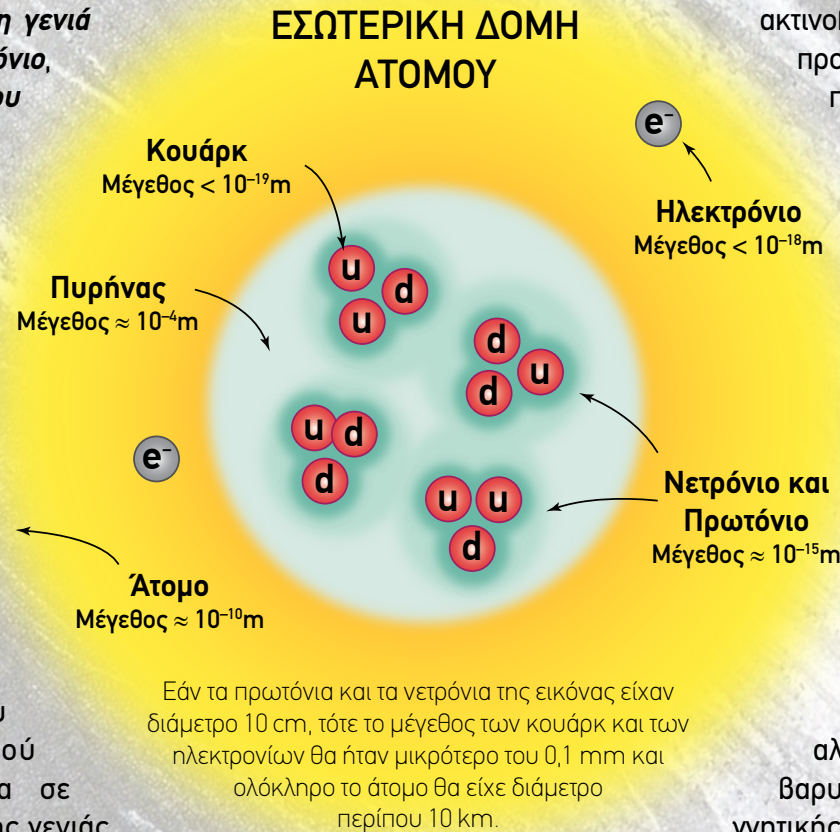
μάζα σωματίδιο, το **νεutrino του ηλεκτρονίου**, είναι τα ελαφρύτερα που υπάρχουν στη φύση και αποτελούν την **πρώτη γενιά** των σωματιδίων της ύλης.

Ανακαλύψαμε, ωστόσο, και άλλες μορφές ύλης, που αποτελούνται από βαρύτερα θεμελιώδη σωματίδια, τα οποία συγκροτούν τη δεύτερη και την τρίτη γενιά της ύλης. Έτσι, η **δεύτερη γενιά** αποτελείται από το **μίνιο**, το **νεutrino του μιονίου** και τα κουάρκ **γοη-τευτικό** (charm) και **παράξενο** (strange), ενώ η **τρίτη γενιά** αποτελείται από το σωματίδιο **ταυ**, το **νεutrino ταυ** και τα **κουάρκ κορυφή** (top) και **πυθμένας** (bottom). Τα σωματίδια της δεύτερης και της τρίτης γενιάς «ζουν» για κλάσματα του δευτερολέπτου, αφού διασπώνται ταχύτατα σε σωματίδια της πρώτης γενιάς, ενώ μόνο οι τεράστιες ενέργειες που επιτυγχάνονται σε γιγάντιους επιταχυντές, όπως αυτοί του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Πυρηνικών Ερευνών **CERN**, μπορούν να τα επαναφέρουν φευγαλέα στην ζωή.

Όπως θα δούμε στην συνέχεια, τα στοιχειώδη σωμα-

τίδια της ύλης, της αντιύλης («κατοπτρικά» σωματίδια της ύλης με την ίδια ακριβώς μάζα, αλλά αντίθετο φορτίο), καθώς και τα σωματίδια της σκοτεινής ύλης θεωρείται ότι σχηματίστηκαν κατά τις πρώτες απειροστές στιγμές της εξέλιξης του Σύμπαντος, σε συνθήκες ακραία υψηλών πυκνοτήτων και θερμοκρασιών, αποτελούσαν δηλαδή μία υπέρθερμη «σούπα» σωματιδίων και ακτινοβολίας, απ' την οποία προέρχονται όλα όσα βλέπουμε (και δεν βλέπουμε!) στο Σύμπαν.

Όλες οι δομές του μικρόκοσμου και του μακρόκοσμου, από τα πρωτόνια μέχρι τα γαλαξιακά σμήνη και υπερσμήνη, σχηματίζονται από σωματίδια της πρώτης γενιάς, τα οποία ενώνονται με την βοήθεια τεσσάρων θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων: της βαρυτικής, της ηλεκτρομαγνητικής, της ασθενούς και της ισχυρής. Η **βαρύτητα**, η ασθενέστερη απ' όλες τις αλληλεπιδράσεις, ασκείται μεταξύ όλων των σωμάτων με μάζα και περιγράφεται από τη **Γενική Θεωρία της Σχετικότητας** (ΓΘΣ). Αν και σε μεγάλες κλίμακες η βαρύτητα είναι αυτή που καθορίζει τον σχηματισμό και την εξέλιξη της δομής στο Σύμπαν, στο βασίλειο του μικρόκοσμου είναι αμελη-



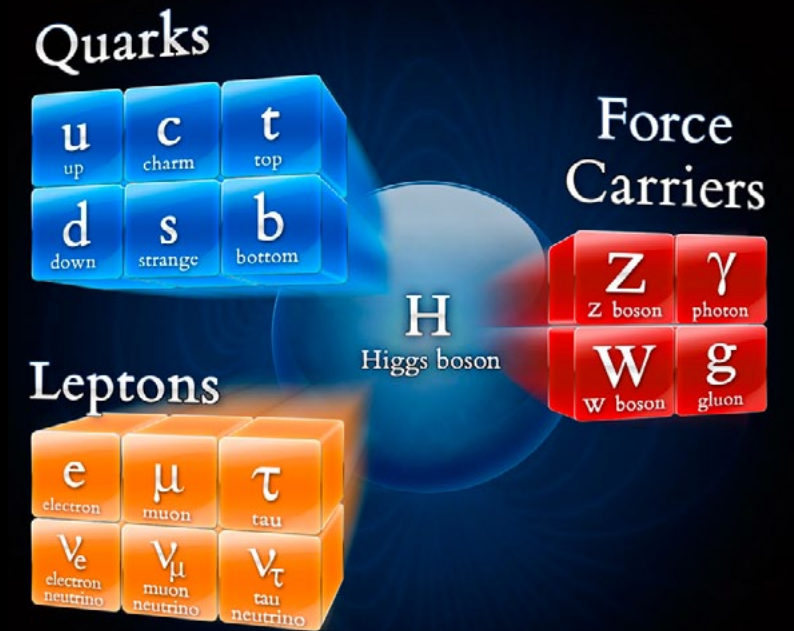
τέα. Πραγματικά, η βαρυτική έλξη μεταξύ δύο πρωτονίων είναι περίπου 10^{35} φορές ασθενέστερη από την **ηλεκτρομαγνητική** τους αλληλεπίδραση, η οποία, όπως και η βαρύτητα, έχει άπειρη εμβέλεια.

Η αλληλεπίδραση αυτή εμφανίζεται σε όλα τα ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα, σ' αυτήν οφείλεται το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια συγκρατούνται στους ατομικούς πυρήνες, ενώ αποτελεί και την αιτία σύνδεσης των ατόμων μεταξύ τους για τον σχηματισμό των μορίων. Οι άλλες δύο θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις, αντίθετως, έχουν περιορισμένη εμβέλεια, καθώς γίνονται αισθητές μόνο σε υποατομικές κλίμακες. Η **ασθενής** αλληλεπίδραση, ειδικότερα, ευθύνεται για τις διασπάσεις των σωματιδίων της δεύτερης και τρίτης γενιάς σ' αυτά της πρώτης, αλλά και για τη μετατροπή των πρωτονίων σε νετρόνια, χωρίς την οποία τα άστρα όπως ο Ήλιος δεν θα μπορούσαν να συντήξουν το υδρογόνο του πυρήνα τους σε ήλιο. Η **ισχυρή** αλληλεπίδραση, τέλος, συγκρατεί τα κουάρκ στο εσωτερικό σωματιδίων, όπως είναι το πρωτόνιο, και ακριβώς επειδή είναι ισχυρότερη της ηλεκτρομαγνητικής, εμποδίζει τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια, που απωθούνται μεταξύ τους, να «διαλύσουν» τους ατομικούς πυρήνες, στους οποίους είναι συγκεντρωμένα.

Σύμφωνα με το ΚΠ, οι αλληλεπιδράσεις αυτές οφείλονται στην ανταλλαγή «σωματιδίων-φορέων» της κάθε αλληλεπίδρασης, που ονομάζονται **μποζόνια** και μεταφέρουν διακριτά ποσά ενέργειας από το ένα σωματίδιο ύλης στο άλλο: τα **φωτόνια** για την ηλεκτρομαγνητική, τα μποζόνια **W** και **Z** για την ασθενή και τα **γλουόνια** για την ισχυρή. Με την πρόσφατη ανίχνευση στον Μεγάλο Αδρονικό Επιταχυντή **LHC** του μποζονίου **Higgs** και κατά συνέπεια με την επιβεβαίωση του ομώνυμου μηχανισμού που προσδίδει μάζα στα στοιχειώδη σωματίδια της ύλης, το ΚΠ

βρίσκεται μέχρι στιγμής σε εξαιρετική συμφωνία με όλα τα πειραματικά αποτελέσματα.

Πολύ περισσότερο, το ΚΠ ενοποιεί την ηλεκτρομαγνητική με την ασθενή αλληλεπίδραση έτσι ώστε όλα τα φαινόμενα που σχετίζονται μ' αυτές αποτελούν διαφορετικές εκφάνσεις μίας μόνο αλληλεπίδρασης, που ονομάζεται **ηλεκτρασθενής**. Σε χαμηλές ενέργειες, η ηλεκτρασθενής συμμετρία, που σχετίζει τις δύο αυτές αλληλεπιδράσεις, είναι, όπως λένε οι φυσικοί, «σπασμένη» ή «κρυμμένη», γεγονός που εξηγεί τον λόγο για τον οποίο, τόσο η επιμέρους ισχύς τους, όσο και η εμβέλειά τους είναι εντελώς διαφορετικές. Στις τεράστιες, όμως, ενέργειες του αρχέγονου Σύμπαντος ή στις αντίστοιχα υψηλές ενέργειες των



Τα θεμελιώδη σωματίδια του ΚΠ.

επιταχυντών του CERN, η συμμετρία που τις ενοποιεί «αποκαθίσταται» και οι δύο αλληλεπιδράσεις «γίνονται» μία.

Όμως, παρόλο που το ΚΠ αποτελεί την καλύτερη περιγραφή που διαθέτουμε για τον μικρόκοσμο των στοιχειωδών σωματιδίων, μία σειρά από θεμελιώδη ερωτήματα εξακολουθούν να παραμένουν αναπάντητα. Κορυφαίο, ίσως, ανάμεσα σ' αυτά είναι το γεγονός ότι οι επιστήμονες δεν έχουν ακόμη κατορθώσει να «ενσωματώσουν» την βαρυτική αλληλεπίδραση στο ΚΠ. Πραγματικά, το «Άγιο Δισκοπότηρο» της θεωρητικής φυσικής, η ενοποίηση δηλαδή και των τεσσάρων αλληλεπιδράσεων σε μία ενιαία θεωρία, δεν έχει ακόμη επιτευχθεί, αφού 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 κανένα ως τώρα δεν κατάφερε να ταιριάξει.

Ούτε, όμως, η ενοποίηση της ηλεκτρασθενούς με την ισχυρή αλληλεπίδραση έχει ακόμη επιτευχθεί στο πλαίσιο του ΚΠ. Η ενοποίηση αυτή θεωρείται ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο μίας ομάδας ευρύτερων θεωριών, που βασίζονται στην έννοια της **υπερσυμμετρίας**. Η βαθύτερη αυτή συμμετρία, που θεωρείται ότι υπάρχει στην φύση, σχετίζει τα στοιχειώδη σωματίδια της ύλης με τα μποζόνια, ώστε σε κάθε σωματίδιο ύλης αντιστοιχεί ένα υπερσυμμετρικό μποζόνιο και αντίστροφα. Μέχρι στιγμής, ωστόσο, δεν έχουν ανακαλυφθεί υπερσυμμετρικά σωματίδια στο CERN ή αλλού, γεγονός που σημαίνει ότι η ιδέα αυτή παραμένει προς το παρόν αναπόδεικτη. Με την βοήθεια της υπερσυμμετρίας, ωστόσο, η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής και η ισχυρή αλληλεπίδραση εικάζεται ότι ενοποιούνται στις πρώτες απειροελά-

χιστες στιγμές της συμπαντικής εξέλιξης, καθώς στις τεράστιες θερμοκρασίες και πυκνότητες που επικρατούσαν τότε η ισχύς τους συγκλίνει στην ίδια ακριβώς τιμή. Σύμφωνα, μάλιστα, με τις πλέον υποσχόμενες υπερσυμμετρικές θεωρίες, το ελαφρύτερο απ' όλα τα υπερσυμμετρικά σωματίδια είναι σταθερό και ηλεκτρικά ουδέτερο, ενώ αλληλεπιδρά με τα άλλα σωματίδια του ΚΠ μόνο διά μέσου της βαρυτικής και της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Όπως, δηλαδή, θα δούμε στην συνέχεια, έχει αυτές ακριβώς τις ιδιότητες που «απαιτούνται» και για τα σωματίδια της σκοτεινής ύλης.

Δεν πρέπει, ακόμη, να ξεχνάμε ότι το ΚΠ αφορά κυρίως στην βαρυονική ύλη του Σύμπαντος, η οποία δεν αντιπροσωπεύει παρά μόλις το 5% της συνολικής μάζας και ενέργειας που εμπεριέχει. Η σκοτεινή ύλη υπολογίζεται ότι είναι τουλάχιστον πενταπλάσια, ενώ το υπόλοιπο 68% της «υλοενέργειας» του Σύμπαντος κυριαρχείται από μία εξίσου άγνωστη μορφή ενέργειας με βαρυτικά απωστικές ιδιότητες, που προκαλεί την επιταχυνόμενη διαστολή του: την **σκοτεινή ενέργεια**. Η βαθύτερη κατανόηση αυτών των δύο «σκοτεινών» μορφών ύλης και ενέργειας είναι σχεδόν βέβαιο ότι απαιτεί «νέα» φυσική, πέραν του ΚΠ. Άλλα θεμελιώδη ερωτήματα, που εξακολουθούν να παραμένουν αναπάντητα, είναι και τα εξής: *Γιατί υπάρχουν μόνο τρεις γενιές σωματιδίων; Υπάρχουν επιπλέον χωρικές διαστάσεις; Γιατί ζούμε σ' ένα Σύμπαν που αποτελείται από ύλη και όχι αντιύλη;* Οι θεωρητικές μελέτες για την απάντηση αυτών των ερωτημάτων έχουν ήδη αρχίσει, ενώ η συμβολή του CERN και των σπουδαίων πειραμάτων που διεξάγονται εκεί στην πειραματική επαλήθευση των προσεγγίσεων αυτών αναμένεται με ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τους επιστήμονες.

Συμπερασματικά, η αποκρυπτογράφηση της φύσης της σκοτεινής ύλης παραμένει ένα από τα σπουδαιότερα και αναπάντητα ακόμη ερωτήματα που σχετίζονται με την φυσική του μικρόκοσμου και του μακρόκοσμου, για την διερεύνηση του οποίου συνεργάζονται επιστήμονες από διαφορετικούς τομείς, που ξεκινούν από την αστροφυσική και την κοσμολογία και καταλήγουν στην φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων. Πραγματικά, οι πρώτες απειροστές στιγμές της εξέλιξης του Σύμπαντος καθορίζονται εν πολλοίς από την φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων, γεγονός που αναδεικνύει με τον καλύτερο τρόπο το πόσο στενά συνυφασμένη είναι η μελέτη του μικρόκοσμου με τον μακρόκοσμο. Εδώ ακριβώς έγκειται και η δυσκολία που συνεπάγεται η αναλυτική παρουσίαση όλων των θεωρητικών, παρατηρησιακών και πειραματικών πτυχών της συναρπαστικής αυτής «ιστορίας», καθώς μία τέτοια «αφήγηση» θα υπερέβαινε κατά πολύ τους ειδικότερους στόχους αυτού του Οδηγού Παράστασης. Γι' αυτό και σε ό,τι ακολουθεί θα εστιάσουμε κυρίως στις έμμεσες αποδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης, καθώς και σε δύο μόνο από τις πολλές προσπάθειες που διεξάγονται για την ανίχνευση των σωματιδίων που την απαρτίζουν. Οι όποιες αναφορές στα **Καθιερωμένα Πρότυπα** της φυσικής των στοιχειωδών σωματιδίων και της κοσμολογίας, δηλαδή στις δύο θεωρίες που συνοψίζουν τις γνώσεις μας για τον μικρόκοσμο και τον μακρόκοσμο, θα διατηρηθούν στο ελάχιστο που κρίνουμε ότι είναι απαραίτητο για μία πρώτη «γνωριμία» του αναγνώστη με την σκοτεινή ύλη, προτρέποντάς τον να αναζητήσει περισσότερες πληροφορίες στην ενδεικτική βιβλιογραφία, στο τέλος αυτού του Οδηγού Παράστασης.

Τμήμα του γιγάντιου επιταχυντή **LHC**
[φωτογρ. © 2009-2018 CERN (License: CC-BY-SA-4.0)].





02

ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ

Κάποιες φορές, όταν οι τροχιές των ουράνιων σωμάτων που καταγράφουμε με τις αστρονομικές μας παρατηρήσεις διαφέρουν κάπως απ' αυτές που προβλέπουν οι επιστημονικές μας θεωρίες, τότε είτε υπάρχουν «εκεί έξω» περισσότερα απ' όσα μπορούμε να δούμε, που με την βαρυτική τους έλξη εκτρέπουν κάπως τα σώματα αυτά από τις θεωρητικά προβλεπόμενες τροχιές τους, είτε οι θεωρίες μας είναι ελλιπείς. Δύο από τα χαρακτηριστικότερα ίσως παραδείγματα για του λόγου το αληθές αφορούν στο Ηλιακό μας σύστημα και ειδικότερα στους πλανήτες Ουρανό και Ερμή.

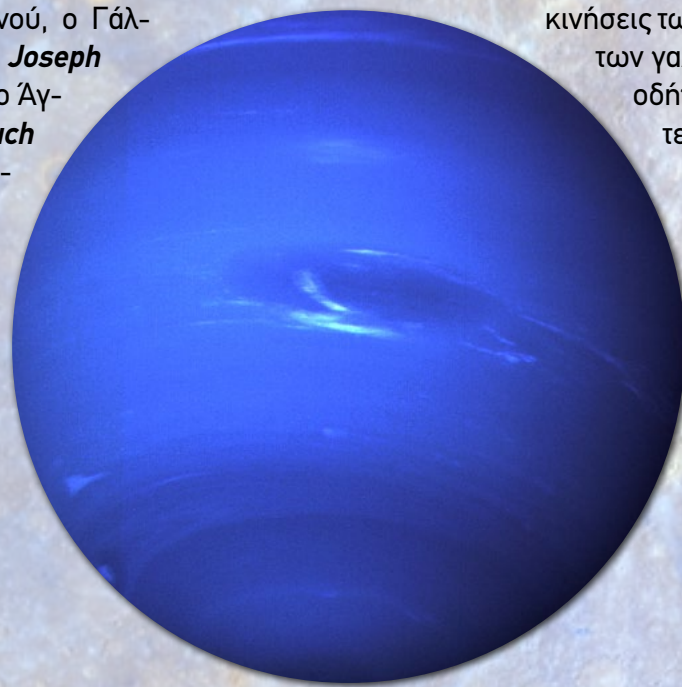
Ο γιγάντιος σπειροειδής γαλαξίας Ανδρομέδα ήταν ο πρώτος που μελέτησε η αστρονόμος Vera Rubin (φωτογρ. NASA/JPL-Caltech).

Πραγματικά, οι μετρήσεις που ακολούθησαν την ανακάλυψη του πλανήτη **Ουρανού** το 1781 έδειχναν ότι η τροχιά του γύρω από τον Ήλιο απέκλινε κάπως απ' αυτήν που προέκυπτε θεωρητικά μέσα απ' τους νόμους του Νεύτωνα για την κίνηση των σωμάτων και την βαρύτητα. Εξίσου παράξενη «συμπεριφορά», όμως, επιδείκνυε και ο **Ερμής**, το περιήλιο του οποίου περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο, με τρόπο που δεν μπορούσε να ερμηνευθεί αποκλειστικά με βάση τις αρχές της Νευτώνειας φυσικής. Δύο ήταν οι πιθανές λύσεις των αναντιστοιχιών αυτών: είτε οι παρατηρούμενες τροχιακές διακυμάνσεις των δύο πλανητών οφείλονταν στην βαρυτική έλξη ενός άγνωστου ως τότε πλανήτη, είτε οι γνώσεις μας για την βαρύτητα ήταν ελλιπείς.

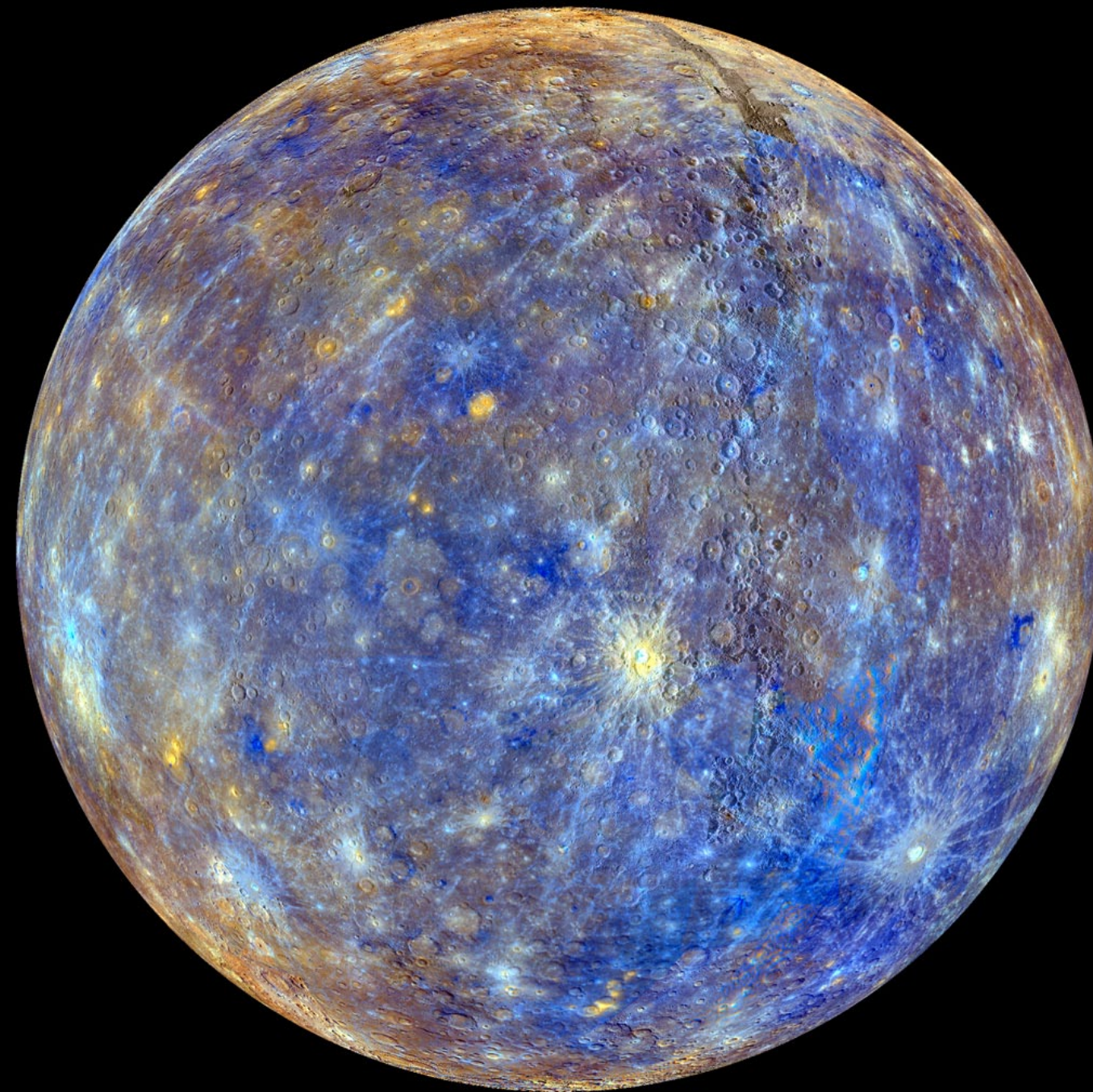
Στην περίπτωση του Ουρανού, ο Γάλλος μαθηματικός **Urbain Joseph Le Verrier** (1811–1877) και ο Άγγλος μαθηματικός **John Couch Adams** (1819–1892) υποστήριξαν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον ότι ίσχυε το πρώτο, ότι δηλαδή οι διαφορές αυτές οφείλονταν στην βαρυτική έλξη ενός άγνωστου έως τότε πλανήτη. Η ανακάλυψη με τηλεσκόπιο του πλανήτη αυτού το 1846 από τον Γερμανό αστρονόμο **Johann Gottfried Galle** (1812–1910) στην τροχιά που είχαν υπολογίσει οι δύο επιστήμονες επιβεβαίωσε τους σχετικούς υπολογισμούς και οι πλανήτες του Ηλιακού μας συστήματος αυξήθηκαν κατά έναν. Ο πλανήτης αυτός ονομάστηκε **Ποσειδώνας**.

Χρησιμοποιώντας την **Γενική Θεωρία της Σχετικότητας** (ΓΘΣ), αντιθέτως, ο **Αϊνστάιν** (1879–1955) απέδειξε το 1915 ότι η λύση του μυστηρίου στην περίπτωση του Ερμή δεν ήταν η βαρυτική επιρροή ενός άγνωστου πλανήτη, αλλά η ελλειπής κατανόηση της βαρύτητας στο πιο θεμελιώδες επίπεδο. Πραγματικά, ο πρώτος θρίαμβος της νέας αυτής θεωρίας του Αϊνστάιν για την βαρύτητα ήταν η εντυπωσιακής ακρίβειας θεωρητική πρόβλεψη αυτής ακριβώς της μετάπτωσης του περιηλίου του Ερμή, που η Νευτώνεια φυσική αδυνατούσε να ερμηνεύσει. Τηρουμένων των αναλογιών, η ίδια περίπου αναντιστοιχία μεταξύ θεωρίας και παρατήρησης όσον αφορά στις κινήσεις των άστρων στους γαλαξίες και των γαλαξιών στα γαλαξιακά σμήνη οδήγησε στην υπόθεση της σκοτεινής ύλης.

Υπενθυμίζουμε εδώ ότι όλες οι αποδείξεις που έχουμε συλλέξει για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης είναι έμμεσες, στηρίζονται δηλαδή στην ανίχνευση του τρόπου με τον οποίον η σκοτεινή ύλη επηρεάζει με την βαρύτητά της την φωτεινή ύλη που την περιβάλλει. Όπως θα δούμε αναλυτικότερα στην συνέχεια, αλλά και στα κεφάλαια που ακολουθούν, οι αποδείξεις αυτές τεκμαίρονται τόσο με την βο-



Ο Ποσειδώνας φωτογραφημένος το καλοκαίρι του 1989 από την διαστημοσυσκευή Voyager 2 (φωτογρ. NASA).



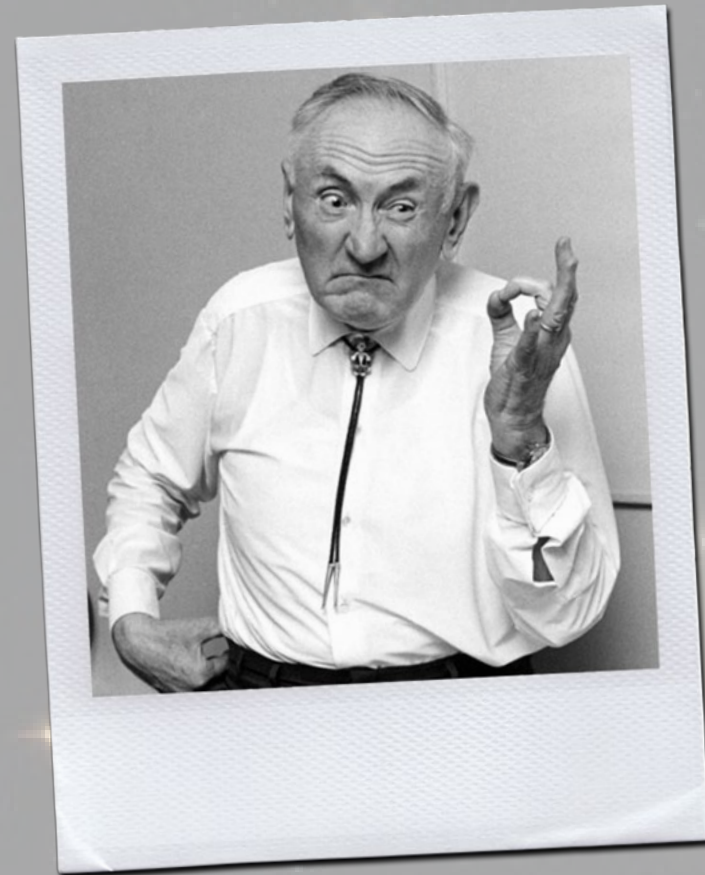
Ο Ερμής σε εικόνα που βασίστηκε στα δεδομένα που συνέλεξε η διαστημοσυσκευή MESSENGER (φωτογρ. NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington).

ήθεια της Νευτώνειας φυσικής, όσο και με την ΓΘΣ, με την βοήθεια της οποίας μπορούμε για παράδειγμα να υπολογίσουμε τον τρόπο με τον οποίο η βαρύτητα εκτρέπει το φως από την αρχική του πορεία, αλλά και να μελετήσουμε το Σύμπαν και το πώς αυτό εξελίσσεται με τον χρόνο. Οι πρώτες ενδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης εμφανίστηκαν, όπως είπαμε, στις αρχές της δεκαετίας του '30, χάρη στις πρωτοποριακές μελέτες του Ελβετού αστρονόμου **Fritz Zwicky** (1898–1974), ο οποίος βασίστηκε στην κλασική, Νευτώνεια φυσική, προκειμένου να υπολογίσει την συνολική μάζα που περικλείει το γαλαξιακό σμήνος **Κόμη**.

Πιστεύοντας, όπως και οι περισσότεροι επιστήμονες της εποχής του, ότι οι γαλαξίες απαρτίζονται από την συνηθισμένη ύλη απ' την οποία αποτελούνται όλα όσα μπορούμε να δούμε στο Σύμπαν, ο Zwicky θεωρούσε ότι η φωτεινότητα του κάθε γαλαξία αποτελεί και ένα μέτρο για την ποσότητα της ύλης που εμπεριέχει. Κατά συνέπεια θεωρούσε ότι η εκτίμηση της μάζας του σμήνους με βάση την φωτεινότητά του θα έπρεπε να δίνει το ίδιο περίπου αποτέλεσμα και με μία εκτίμηση της μάζας του, βασισμένη στην Νευτώνεια φυσική. Χρησιμοποιώντας τις ταχύτητες των επιμέρους γαλαξιών του σμήνους που μέτρησε ο ίδιος και τη διάμετρο του σμήνους που ήταν ήδη γνωστή, ο Zwicky υπολόγισε με την βοήθεια της Νευτώνειας φυσικής τη συνολική μάζα που θα έπρεπε να έχει το σμήνος, ώστε οι γαλαξίες που το απαρτίζουν να κινούνται με τις ταχύτητες που είχε μετρήσει. Στην συνέχεια, συνέκρινε το αποτέλεσμά του με μία εκτίμηση της μάζας του σμήνους, βασισμένη στην φωτεινή ύλη των επί μέρους γαλαξιών του. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ήταν εντυπωσιακό: η μάζα που αντιστοιχούσε στην φωτεινή ύλη του σμήνους Κόμη ήταν κατά πολύ

μικρότερη από αυτήν που απαιτούνταν, προκειμένου να «δικαιολογηθούν» οι μεγάλες ταχύτητες των γαλαξιών του. Με άλλα λόγια, η ποσότητα της ορατής ύλης του σμήνους δεν επαρκούσε, ώστε το σμήνος αυτό να διατηρεί με την βαρυτική του έλξη την συνοχή του άθικτη.

Ακριβώς όπως και στην περίπτωση του Ουρανού και του Ερμή, η αναντιστοιχία αυτή μπορεί να ερμηνευθεί με δύο τρόπους: είτε να υποθέσουμε ότι το σμήνος Κόμη εμπεριέχει περισσότερη ύλη απ' αυτήν



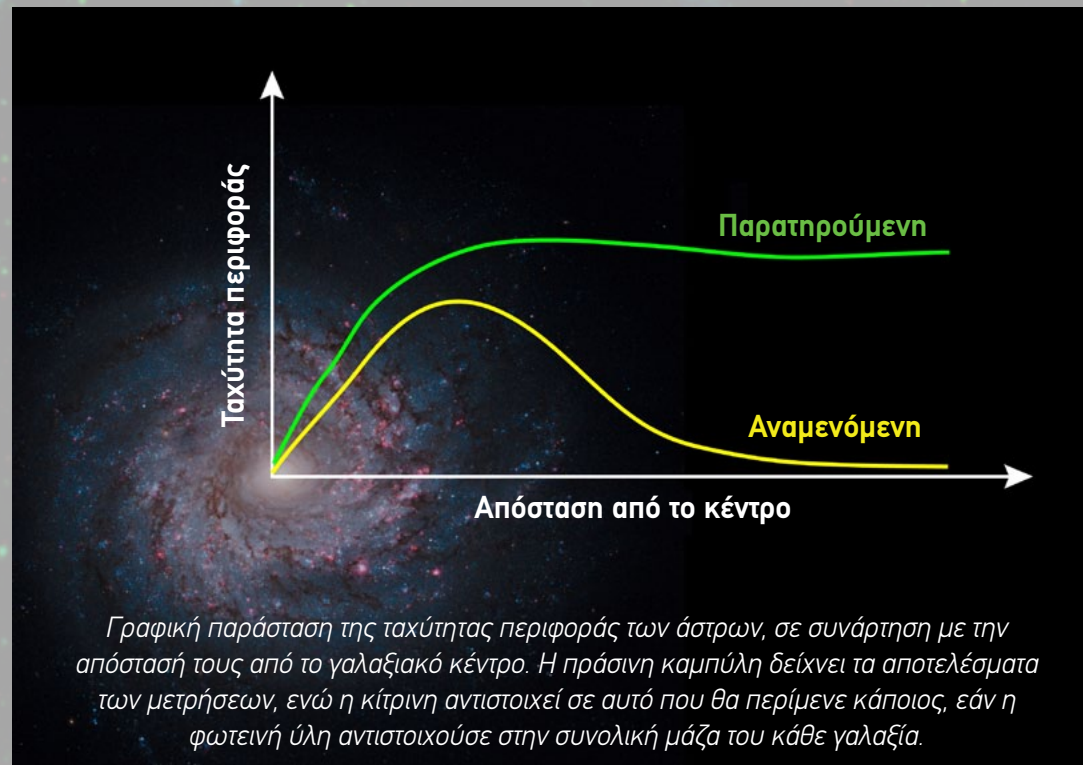
Ο αστρονόμος Fritz Zwicky.

που μπορούμε να δούμε, είτε να υποθέσουμε ότι οι γνώσεις μας για την βαρύτητα είναι ελλιπείς.¹ Το εκπληκτικό, δηλαδή, συμπέρασμα στο οποίο οδηγούν αυτοί οι συλλογισμοί που μόλις περιγράψαμε είναι ότι το σμήνος Κόμη, προκειμένου να «συγκρατεί» με την βαρυτική του έλξη τους γαλαξίες που το απαρτίζουν, πρέπει να εμπεριέχει και τεράστιες ποσότητες μίας άγνωστης μορφής ύλης. Η πλεονάζουσα αυτή ύλη, δεδομένου ότι δεν αλληλεπιδρά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, και ως εκ τούτου είναι αδύνατον να ανιχνευθεί με την βοήθεια των τηλεσκοπίων, ονομάστηκε «σκοτεινή». Χρειάστηκε να περάσουν περίπου 40 χρόνια, προκειμένου η ιδέα αυτή να γίνει ευρέως αποδεκτή από την αστρονομική κοινότητα.

Στη διάρκεια της δεκαετίας του '70, ωστόσο, η Αμερικανή αστρονόμος **Vera Rubin** (1928–2016) κατέληξε στο ίδιο συμπέρασμα από μία διαφορετική οπτική γωνία. Την εποχή εκείνη, οι περισσότεροι αστρονόμοι θεωρούσαν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας ενός γαλαξία είναι συγκεντρωμένο στην ευρύτερη περιοχή που περιβάλλει τον πυρήνα του, όπου παρατηρείται και η μεγαλύτερη συσσώρευση άστρων και αερίων, εκεί δηλαδή όπου η πυκνότητα της ύλης και κατά συνέπεια η βαρυτική έλξη είναι ισχυρότερη. Εάν, όμως, ίσχυε αυτό, τότε, σε αντιστοιχία με τους πλανήτες που περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο, τα άστρα που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από τους γαλαξιακούς πυρήνες θα έπρεπε να περιφέρονται με πολύ μικρές ταχύτητες γύρω τους. Οι μετρήσεις της Rubin, όμως, έδειξαν ακριβώς το αντίθετο: αντί οι ταχύτητες περιφοράς των άστρων να

¹ Στην μελέτη του που δημοσιεύθηκε το 1933, ο Zwicky αναφέρει 4 τρόπους με τους οποίους θα μπορούσε να ερμηνευθεί αυτή η αναντιστοιχία, περιλαμβανομένης της σκοτεινής ύλης, χωρίς όμως να επιλέγει κάποιον απ' αυτούς ως τον καλύτερο. Η παρουσίασή τους, ωστόσο, υπερβαίνει τους ειδικότερους στόχους αυτού του Οδηγού Παράστασης.

Το γαλαξιακό σμήνος Κόμη
[NASA/JPL-Caltech/L. Jenkins (GSFC)]



μειώνονται, παρέμεναν σταθερά υψηλές σε μεγάλες αποστάσεις από το γαλαξιακό κέντρο. Με άλλα λόγια, τα άστρα στις παρυφές των γαλαξιών διαγράφουν τροχιές με πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες από αυτές που θα «έπρεπε» να έχουν, εάν η ορατή γαλαξιακή ύλη αντιστοιχούσε επακριβώς και στη συνολική τους μάζα. Σε αντίθεση, δηλαδή, με τις ταχύτητες των πλανητών στο Ηλιακό μας σύστημα, οι οποίες μειώνονται με την απόσταση από τον Ήλιο, τα άστρα αυτά κινούνται με τόσο μεγάλες ταχύτητες, που κανονικά θα έπρεπε να είχαν εκτιναχθεί στο Διάστημα.

Δεδομένου ότι η φωτεινή ύλη των γαλαξιών δεν επαρκεί, ώστε να συγκρατήσει με την βαρυτική της έλξη τα άστρα αυτά στις τροχιές τους, η Rubin κατέ-

ληξε στο συμπέρασμα ότι οι γαλαξίες εμπεριέχουν περισσότερη ύλη απ' αυτήν που μπορούμε να δούμε. Κάθε γαλαξίας, δηλαδή, πρέπει να περιβάλλεται από ένα αχανές νέφος αόρατης, σκοτεινής ύλης, που αντιστοιχεί και στο μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής του μάζας, με την βαρυτική έλξη του οποίου συμβάλλει στο να διατηρείται η συνοχή του γαλαξία άθικτη. Έκτοτε, οι ενδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης πολλαπλασιάστηκαν.

Πολλές, μάλιστα, απ' αυτές οφείλονται στην θεωρία του Αϊνστάιν για την βαρύτητα, δηλαδή στην ΓΘΣ, ένα μοναδικό θεωρητικό εργαλείο που επέτρεψε στους αστρονόμους να μελετήσουν το Σύμπαν στο σύνολό του. Πραγματικά, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο,

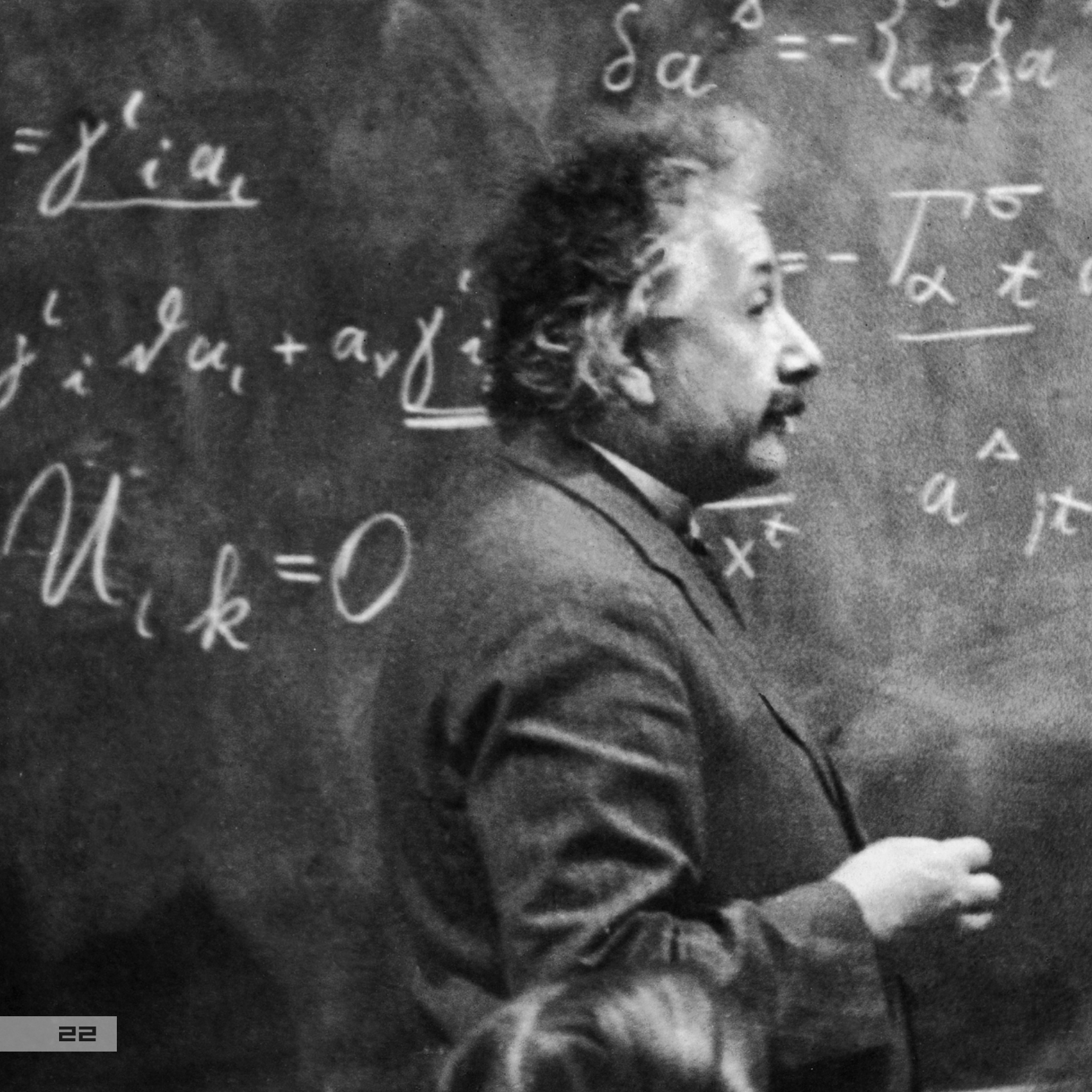
η κλασική θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης και εντέλει το Καθιερωμένο Πρότυπο της Κοσμολογίας που συνοψίζει τις γνώσεις μας για την συμπαντική εξέλιξη, σύμφωνα με τις οποίες το Σύμπαν είχε μία αρχή και έκτοτε διαστέλλεται και ψύχεται συνεχώς, απορρέουν με απόλυτα φυσικό τρόπο μέσα από την επίλυση των εξισώσεων του Αϊνστάιν για την βαρύτητα. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι με τη δημοσίευση της ΓΘΣ το 1916, ο Αϊνστάιν έδωσε το έναυσμα για μία επιστημονική επανάσταση, ο απόηχος της οποίας κρατά μέχρι σήμερα.

² Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να αντιλήσει περισσότερες πληροφορίες για την ΓΘΣ στο άρθρο [Τα Εκατοστά Γενέθλια της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας](#), καθώς και στην βιβλιογραφία του παρόντος Οδηγού.

Καλλιτεχνική αναπαράσταση του Γαλαξία μας. Η μπλε άλως αντιστοιχεί στην κατανομή τα σκοτεινής ύλης (φωτογρ. ESO/L. Calzada).



Η παρουσίαση της ΓΘΣ υπερβαίνει κατά πολύ τους ειδικότερους στόχους αυτού του Οδηγού Παράστασης.² Μπορούμε, ωστόσο, εδώ να αναδείξουμε δύο καίρια σημεία, στα οποία διαφέρει ουσιαστικά από την Νευτώνεια θεώρηση για την βαρύτητα, τον χώρο και τον χρόνο. Σύμφωνα, λοιπόν, με την Νευτώνεια φυσική, ο χώρος και ο χρόνος, απόλυτοι, αμετάβλητοι και ίδιοι για όλους, καθορίζουν απλά το «σκηνικό», μέσα στο οποίο κινούνται τα ουράνια σώματα και υλοποιούνται τα φυσικά φαινόμενα, χωρίς όμως να τα επηρεάζουν, ενώ η βαρύτητα είναι απλά μία



μυστηριώδης ελκτική δύναμη που δρα ακαριαία από απόσταση.

Με την ΓΘΣ, αντίθετα, ο Αϊνστάιν «αναβαθμίζει» τον χώρο και τον χρόνο σ' έναν ενοποιημένο, δυναμικό και τετραδιάστατο χωροχρόνο και περιγράφει την βαρύτητα ως την καμπύλωση που προκαλεί σ' αυτόν η παρουσία της ύλης. Ο χωροχρόνος, ειδικότερα, καθορίζει την τροχιά κάθε αντικειμένου που κινείται εντός του, απ' αυτόν ακριβώς τον βαθμό της στρέβλωσης στην «δομή» του, η οποία προκαλείται από την παρουσία άλλων υλικών αντικειμένων: όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα ενός σώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η «παραμόρφωση» που προκαλεί στον τετραδιάστατο χωροχρόνο. Από αυτήν την άποψη, μικρότερα υλικά σώματα που βρίσκονται κοντά σε ένα μεγαλύτερο, όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο, δεν κινούνται στις ελλειπτικές τους τροχιές εξαιτίας κάποιας μυστηριώδους ελκτικής δύναμης που ο Νεύτωνας ονόμασε βαρύτητα, αλλά διότι «εξαναγκάζονται» να ακολουθήσουν την συντομότερη οδό που είναι δυνατό να υπάρξει σ' αυτόν τον στρεβλωμένο χωροχρόνο, που

προκαλεί η τεράστια μάζα του Ήλιου. Αυτή, ωστόσο, η συντομότερη οδός δεν είναι πλέον ευθεία γραμμή, όπως στην Ευκλείδεια γεωμετρία, αλλά καμπύλη, και ονομάζεται **γεωδαισιακή γραμμή**.

Υπ' αυτήν την έννοια, λοιπόν, η βαρύτητα δεν οφείλεται σε μία μυστηριώδη δύναμη που διαδίδεται στον χωροχρόνο, αλλά είναι χαρακτηριστική ιδιότητα του ίδιου του χωροχρόνου. Όπως το έθεσε αρκετά χρόνια αργότερα ο 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». Όλες σχεδόν οι προβλέψεις της επαναστατικής αυτής θεωρίας, από την καμπύλωση του φωτός ως τις μαύρες τρύπες, και από την διαστολή του Σύμπαντος μέχρι τα βαρυτικά κύματα, έχουν επιβεβαιωθεί με εντυπωσιακή ακρίβεια. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε πώς η εκπληκτική αυτή θεωρία θέτει τις βάσεις για την μελέτη του Σύμπαντος στο σύνολό του και πώς μέσα απ' αυτήν την μελέτη οι έμμεσες αποδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης πολλαπλασιάστηκαν.

Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν.



ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ

Εικόνα του
«Εξαιρετικά Βαθέος
Πεδίου» (UDF), που ελήφθη από
το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble,
στην οποία απεικονίζονται 10.000 γαλαξίες,
το αρχέγονο φως πολλών από τους οποίους
ταξίδεψε ακόμα και 13 δισ. χρόνια μέχρι να φτάσει
σε εμάς [φωτογρ. NASA, ESA, N. Pirzkal (STScI/ESA)
and the HUDF Team (STScI)].

Ποιοι είναι οι νόμοι που διέπουν την «λειτουργία» του Σύμπαντος στο σύνολό του και πώς σχηματίστηκαν οι κοσμικές δομές που εμπεριέχει; Είχε το Σύμπαν αρχή ή μήπως υπήρχε πάντα; Είναι το Σύμπαν στατικό και αμετάβλητο ή μήπως εξελίσσεται με τον χρόνο; Χάρη στις προσπάθειες εκατοντάδων αστρονόμων, αστροφυσικών και θεωρητικών φυσικών τα τελευταία 120 χρόνια, κατορθώσαμε να απαντήσουμε σε αρκετά κοσμολογικά ερωτήματα, όπως αυτά. Το σύνολο των επιστημονικών μας γνώσεων, που προέκυψε μέσα απ' αυτήν την επίπονη και μακροχρόνια συλλογική προσπάθεια, εδράζεται στην «κλασική» **θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης (ΘΜΕ)**.

Σύμφωνα με την ΘΜΕ, το Σύμπαν προήλθε από μία υπέρθερμη και υπέρπυκνη αρχική κατάσταση και έκτοτε διαστέλλεται με επιβραδυνόμενο ρυθμό εξαιτίας της βαρύτητας που «αντιστέκεται» στην επέκτασή του, ενώ η θερμοκρασία του μειώνεται συνεχώς. Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε στην αρχική της μορφή μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '60, προτού δηλαδή γίνει ευρέως αποδεκτή η ύπαρξη της σκοτεινής ύλης και πολύ πριν ανακαλυφθεί ότι τα τελευταία 6 δισ. χρόνια η διαστολή του Σύμπαντος επιταχύνεται εξαιτίας μίας άγνωστης μορφής ενέργειας, που επίσης ονομάστηκε «σκοτεινή». Έκτοτε, και μέχρι τα τέλη περίπου του 20^{ου} αιώνα, η κλασική ΘΜΕ εξελίχθηκε στο επονομαζόμενο **Καθιερωμένο Πρότυπο της Κοσμολογίας** (ΚΠΚ), το οποίο συνοψίζει όλες τις γνώσεις που έχουμε αποκομίσει για το Σύμπαν. Η κλασική ΘΜΕ διαφέρει σημαντικά σε σχέση με το ΚΠΚ, αφού στην αρχική της μορφή δεν περιελάμβανε ούτε την σκοτεινή ύλη ούτε την σκοτεινή ενέργεια. Η τρίτη σημαντική διαφορά των δύο θεωριών αφορά στην επονομαζόμενη **πληθωριστική** διαστολή, η οποία προτάθηκε το 1981, προκειμένου να επιλύσει σημαντικά προβλήματα που αντιμετώπιζε η ΘΜΕ (στην οποία θα αναφερθούμε με συντομία στο επόμενο κεφάλαιο). Όπως θα δείξουμε στην συνέχεια, ωστόσο, οι κοσμολογικές ενδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης προκύπτουν και μέσα από την ανάλυση συγκεκριμένων προβλέψεων της ΘΜΕ, οι οποίες εξακολουθούν να ισχύουν και στο θεωρητικό πλαίσιο του ΚΠΚ.

Το θεωρητικό «εργαλείο» που επέτρεψε στους επιστήμονες να μελετήσουν σε βάθος την κοσμική εξέλιξη, δεν είναι άλλο από την ΓΘΣ. Προκειμένου, όμως, να εφαρμοστεί η ΓΘΣ στο Σύμπαν και να επιλυθούν οι εξισώσεις της, απαιτείται μία θεμελιώδης παραδοχή αναφορικά με τον τρόπο που η ύλη κατανέμεται εντός

του. Η απλούστερη και πλέον εύλογη απ' αυτές είναι να υιοθετήσουμε το **Κοσμολογικό Αξίωμα**, σύμφωνα με το οποίο δεν κατέχουμε «προνομιακή» θέση στο Σύμπαν και κατά συνέπεια οποιοσδήποτε άλλος παρατηρητής σε οποιονδήποτε άλλον γαλαξία θα έβλεπε περίπου ό,τι βλέπουμε και εμείς, σε οποιαδήποτε περιοχή του Σύμπαντος κι αν εστίαζε και προς οποιαδήποτε κατεύθυνση κι αν παρατηρούσε. Στην «γλώσσα» των κοσμολόγων αυτό διατυπώνεται με την φράση ότι σε μεγάλες κλίμακες το Σύμπαν είναι **ομοιογενές** και **ισότροπο**. Προφανώς, σε μικρότερες κλίμακες, το Κοσμολογικό Αξίωμα καταρρέει. Το Ηλιακό μας σύστημα, τα άστρα, οι γαλαξίες, ακόμη και τα επιμέρους γαλαξιακά σμήνη μαρτυρούν μία ανομοιομορφία στην τοπική κατανομή της ύλης, που όμως παρατηρούμενη στην ολότητά της και μέσα στην απεραντοσύνη του Σύμπαντος εξαφανίζεται. Μία δεύτερη, εξίσου εύλογη υπόθεση που πρέπει να υιοθετήσουμε αφορά στην **παγκοσμιότητα των φυσικών νόμων**, σύμφωνα με την οποία οι ίδιοι φυσικοί νόμοι ισχύουν παντού και πάντα: τόσο στον πλανήτη μας, όσο και σε άλλους γαλαξίες δισ. έτη φωτός μακριά, τόσο στο παρελθόν, όσο και στο μέλλον.

Υιοθετώντας τις δύο αυτές θεμελιώδεις παραδοχές, ο Ρώσος μαθηματικός **Alexander Friedman** (1888–1925) ανακάλυψε το 1922 και το 1924 λύσεις των εξισώσεων του Αϊνστάιν, οι οποίες περιγράφουν ένα δυναμικό, δηλαδή ένα διαστελλόμενο Σύμπαν. Ανεξάρτητα από τον Friedman, ο Βέλγος αστρονόμος και ιερέας **Georges Lemaitre** (1894–1966) κατέληξε το 1927 στο ίδιο ακριβώς συμπέρασμα, ενώ 4 χρόνια αργότερα προχώρησε ακόμη περισσότερο, προτείνοντας ότι το Σύμπαν προήλθε από ένα υπέρπυκνο και υπέρθερμο «αρχέγονο άτομο» ενέργειας. Στα επόμενα χρόνια και χάρη στις μελέτες σπουδαίων ερευνητών, άρχισε να αποκρυσταλλώνεται η «κλασική» μορφή

της νέας αυτής θεωρίας, σύμφωνα με την οποία, από την γένεσή του και μετά, το Σύμπαν διαστέλλεται και η θερμοκρασία του μειώνεται διαρκώς.

Επομένως, όσο πιο πίσω κινούμαστε στον χρόνο, τόσο πλησιέστερα βρίσκονται οι γαλαξίες μεταξύ τους, τόσο νεότερο γίνεται το Σύμπαν και τόσο πυκνότερη και θερμότερη γίνεται η ύλη, ώσπου κάποια στιγμή δεν μπορεί να υπάρξει παρά μόνο ως μία υπέρθερμη «σούπα» στοιχειωδών σωματιδίων. Εντέλει, σχεδόν 14 δισ. χρόνια πριν, φτάνουμε αναπόφευκτα σ' ένα «σημείο», όπου η πυκνότητα και η θερμοκρασία του Σύμπαντος γίνονται άπειρες, όπου ο χώρος και ο χρόνος παύουν να έχουν νόημα και η ΓΘΣ καταρρέει. Πρόκειται για τη στιγμή της Μεγάλης Έκρηξης, που δημιουργήσε τον ίδιο τον χώρο και τον χρόνο, καθώς και όλη την ύλη και την ενέργεια που εμπεριέχει το Σύμπαν. Σύμφωνα, λοιπόν, με την ΘΜΕ, το Σύμπαν διαστέλλεται με επιβραδυνόμενο ρυθμό, εξαιτίας της βαρύτητας που τείνει να «φρενάρει» την επέκτασή του, ενώ η θερμοκρασία του και η πυκνότητα της «υλοενέργειας» που εμπεριέχει διαρκώς μειώνονται.

Παρόλο που δεν γνωρίζουμε με πολύ μεγάλη ακρίβεια την πραγματική μέση πυκνότητα της «υλοενέργειας» του Σύμπαντος, ξέρουμε πλέον ότι αυτή πρέπει να βρίσκεται πάρα πολύ κοντά στην επονομαζόμενη **κρίσιμη πυκνότητα**, που σημαίνει ότι το Σύμπαν είναι **επίπεδο**, δηλαδή ο χώρος έχει μηδενική καμπυλότητα και περιγράφεται από την γνωστή σε όλους Ευκλείδεια γεωμετρία. Γνωρίζουμε ακόμη ότι οι βασικές μορφές ύλης-ενέργειας που περιέχει είναι 4: η ακτινοβολία, η βαρυονική ύλη, η σκοτεινή ύλη και η σκοτεινή ενέργεια. Η **ακτινοβολία** αποτελείται από φωτόνια, σωματίδια χωρίς μάζα που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός. Η **βαρυονική ύλη** αντιστοιχεί στην συνηθισμένη ύλη από την οποία απαρτίζονται όλα όσα

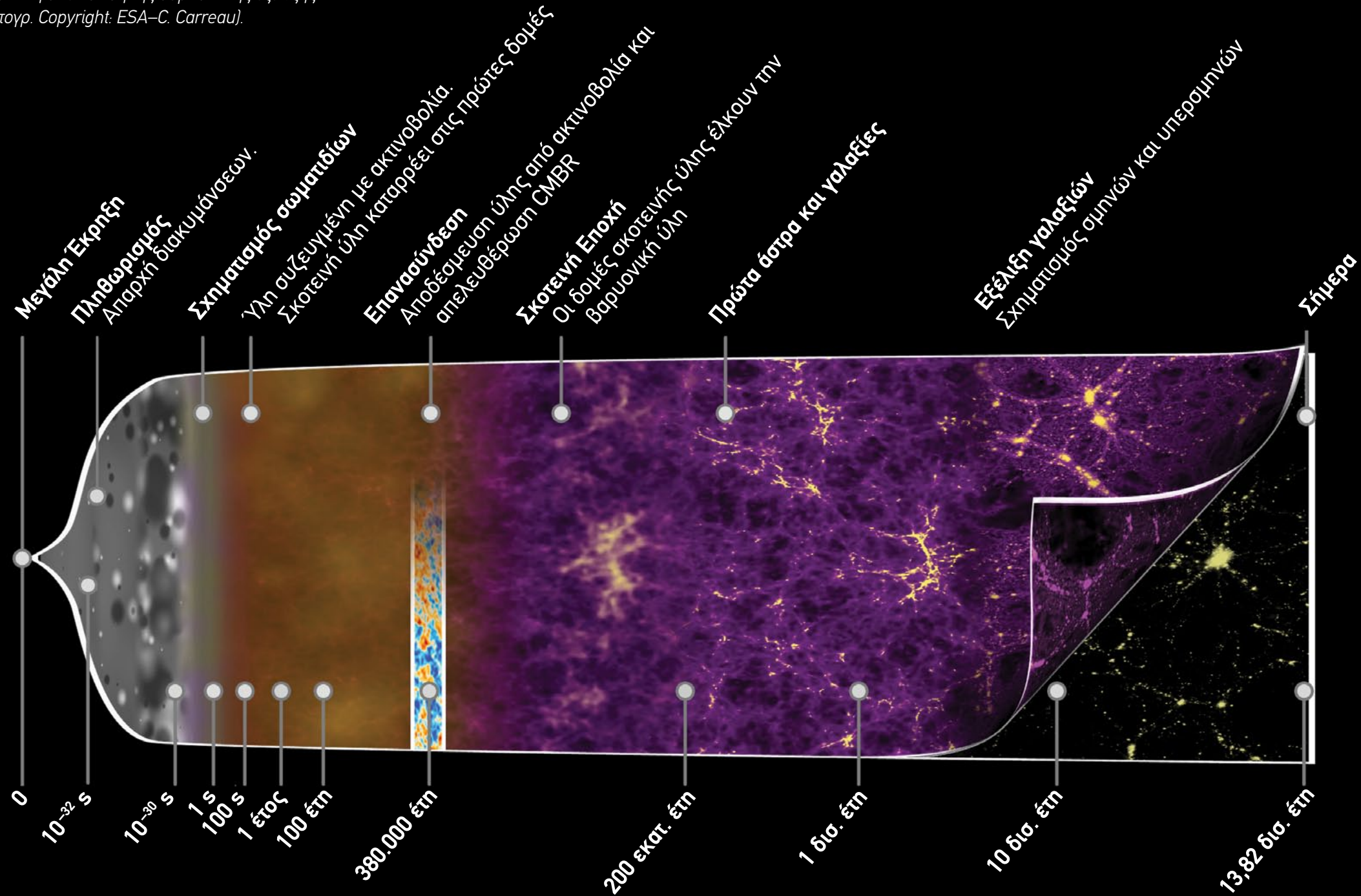
βλέπουμε στην Γη και στο Διάστημα, σε αντίθεση με την **σκοτεινή ύλη** που, όπως έχουμε ήδη πει, είναι μία άγνωστη μορφή ύλη, η οποία δεν αλληλεπιδρά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η **σκοτεινή ενέργεια**, τέλος, που ακαλύφθηκε το 1998, είναι μία εξίσου άγνωστη μορφή ενέργειας με βαρυτικά απωστικές ιδιότητες, η οποία υπερίσχυσε στην κοσμική της «διελκυστίνδα» ενάντια στην βαρύτητα πριν από περίπου 6 δισ. χρόνια, οδηγώντας το Σύμπαν σε μία νέα εποχή επιταχυνόμενης κοσμικής διαστολής.

Η πρώτη, τεκμηριωμένη με την παρατήρηση, απόδειξη ότι το Σύμπαν διαστέλλεται οφείλεται στον Αμερικανό αστρονόμο **Edwin Hubble** (1889–1953), ο οποίος απέδειξε με τις παρατηρήσεις του το 1929 ότι οι γαλαξίες απομακρύνονται από εμάς με ταχύτητες



Ο Αμερικανός αστρονόμος Edwin Hubble (φωτογρ. NASA & ESA).

Συνοπτική απεικόνιση της συμπαντικής εξέλιξης
(φωτογρ. Copyright: ESA-C. Carreau).



ανάλογες της απόστασής τους. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι όταν αναφερόμαστε σε διαστολή του Σύμπαντος, δεν υπονοούμε ότι το Σύμπαν διαστέλλεται μέσα σε κάποιον ήδη προϋπάρχοντα χώρο, αλλά ότι ο ίδιος ο χώρος «ξεχειλώνει» έτσι, ώστε η σχετική απόσταση μεταξύ δύο οποιωνδήποτε σημείων του να μεγαλώνει. Υπό αυτή την έννοια, λοιπόν, το Σύμπαν δεν έχει κέντρο, ούτε όμως υπάρχει τίποτε έξω από αυτό. Ένας κλασικός τρόπος να οπτικοποιήσουμε την διαστολή του τρισδιάστατου χώρου είναι να «σκεφτούμε» σε δύο διαστάσεις, προσομοιάζοντας τον τρισδιάστατο χώρο με την δισδιάστατη ελαστική επιφάνεια ενός μπαλονιού, πάνω στην οποία έχουμε σχεδιάσει μικρούς γαλαξίες. Βλέπουμε ότι όσο περισσότερο φουσκώνουμε το μπαλόνι, τόσο περισσότερο απομακρύνεται ο ένας γαλαξίας από τον άλλον. Αυτό, όμως, δεν συμβαίνει επειδή οι γαλαξίες μετατοπίζονται πάνω στην ελαστική επιφάνεια, αλλά επειδή αυτή «ξεχειλώνει», διευρύνοντας την μεταξύ τους απόσταση. Μ' αυτόν περίπου τον τρόπο «απομακρύνονται» και οι γαλαξίες στον διαστελλόμενο τρισδιάστατο χώρο του Σύμπαντος: δεν «διασχίζουν» τον χώρο, αλλά απομακρύνονται ο ένας από τον άλλον, διότι ο μεταξύ τους χώρος διαστέλλεται.

Μία ακόμη βασική πρόβλεψη της ΘΜΕ αφορά στην εποχή της αρχέγονης **πυρηνοσύνθεσης**, στην διάρκεια της οποίας σχηματίστηκαν τα ελαφρύτερα στοιχεία του περιοδικού πίνακα. Σύμφωνα με την ΘΜΕ, κλάσματα του δευτερολέπτου μετά την «γένεση» του Σύμπαντος, η θερμοκρασία του ήταν τόσο υψηλή, ώστε η ύλη εντός του μπορούσε να υπάρξει μόνο ως μία υπέρθερμη «σούπα» στοιχειωδών σωματιδίων ύλης και αντιύλης. Σχεδόν αμέσως, ωστόσο, και καθώς το Σύμπαν συνέχισε να διαστέλλεται και να ψύχεται, η ύλη και η αντιύλη εξαϋλώθηκαν, αφήνοντας

Σχηματική αναπαράσταση της διαστολής του χώρου.



ένα μικρό πλεόνασμα ύλης, απ' το οποίο θα προέλθουν όλα όσα παρατηρούμε στο Σύμπαν. Περίπου 3 λεπτά αργότερα, η θερμοκρασία του είχε μειωθεί στους 10^9 °C, δίνοντας το έναυσμα για την εποχή της αρχέγονης πυρηνοσύνθεσης. Αρχικά, τα ελεύθερα νετρόνια άρχισαν να ενώνονται με πρωτόνια (που αμφότερα είχαν ήδη σχηματιστεί από την συνένωση άνω και κάτω κουάρκ), σχηματίζοντας πυρήνες δευτερίου, ενός δηλαδή εκ των ισωτόπων του υδρογόνου, του ελαφρύτερου στοιχείου που υπάρχει στη φύση.

Στη συνέχεια και μέσα στα επόμενα 15 περίπου λεπτά, το περισσότερο από το δευτέριο συντήχθηκε σε ήλιο, ενώ σχηματίστηκαν και ίχνη λιθίου και βηρυλλίου. Η επακόλουθη, όμως, μείωση της θερμοκρασίας του Σύμπαντος, αλλά και η απουσία σταθερών στοιχείων με 5 και 8 πρωτόνια στον πυρήνα τους, εμπόδισε τον σχηματισμό βαρύτερων πυρήνων και η εποχή της αρχέγονης πυρηνοσύνθεσης έφτασε στο τέλος της (τα βαρύτερα στοιχεία του περιοδικού πίνακα θα σχηματιστούν αρκετά αργότερα στο εσωτερικό των άστρων). Οι ποσότητες όμως του υδρογόνου, του ηλίου και του

λιθίου που έχουν μετρήσει οι αστρονόμοι ταιριάζουν μ' αυτές που προβλέπει η ΘΜΕ. Εκτός, όμως, από τις «σωστές» αναλογίες των στοιχείων αυτών, η αρχέγονη πυρηνοσύνθεση επιτρέπει στους επιστήμονες να εκτιμήσουν και την πυκνότητα των βαρυονίων που εμπεριέχει το Σύμπαν. Τέτοιοι υπολογισμοί καταδεικνύουν ότι το σύνολο της βαρυονικής ύλης που σχηματίστηκε στα πρώτα λεπτά της συμπαντικής εξέλιξης δεν επαρκεί, ώστε να ερμηνεύσει την συνολική ποσότητα της ύλης που εμπεριέχει το Σύμπαν και εξάγεται από άλλες μετρήσεις, γεγονός που αποτελεί μία ακόμη έμμεση απόδειξη για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης.

Η τυχαία ανακάλυψη της **μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου** (Cosmic Microwave Background Radiation – **CMBR**) το 1965 από τους **Arno Penzias** (1933 –) και **Robert Wilson** (1941 –) αποτέλεσε την τρίτη θεμελιώδη παρατήρηση, μέσα από την οποία επιβεβαιώθηκαν βασικές προβλέψεις της ΘΜΕ. Με την ολοκλήρωση της αρχέγονης πυρηνοσύνθεσης, το Σύμπαν συνέχισε να διαστέλλεται και να ψύχεται, ωστόσο η θερμοκρασία του εξακολουθούσε να

Οι αστρονόμοι Arno Penzias και Robert Wilson.



παραμένει απαγορευτικά υψηλή για τον σχηματισμό ουδέτερων ατόμων, γι' αυτό και η ύλη παρέμενε ιονισμένη και αποτελούνταν από ελεύθερα ηλεκτρόνια και ελαφρείς ατομικούς πυρήνες, κυρίως υδρογόνο και ήλιο. Καθώς, όμως, τα φωτόνια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αλληλεπιδρούσαν και σκεδάζονταν συνεχώς από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, δεν μπορούσαν να διαφύγουν ελεύθερα στο Διάστημα, γι' αυτό και το Σύμπαν παρέμενε αδιαφανές στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Ωστόσο, 380.000 χρόνια μετά την Μεγάλη Έκρηξη, η θερμοκρασία του Σύμπαντος είχε μειωθεί στους 3.000 °C και τα ηλεκτρόνια άρχισαν να ενώνονται με πρωτόνια, σχηματίζοντας ουδέτερα άτομα υδρογόνου. Καθώς, όμως, τα ηλεκτρόνια είχαν «δεσμευθεί» στους ατομικούς πυρήνες του υδρογόνου, τα φωτόνια κατόρθωσαν να διαφύγουν, καθιστώντας το Σύμπαν

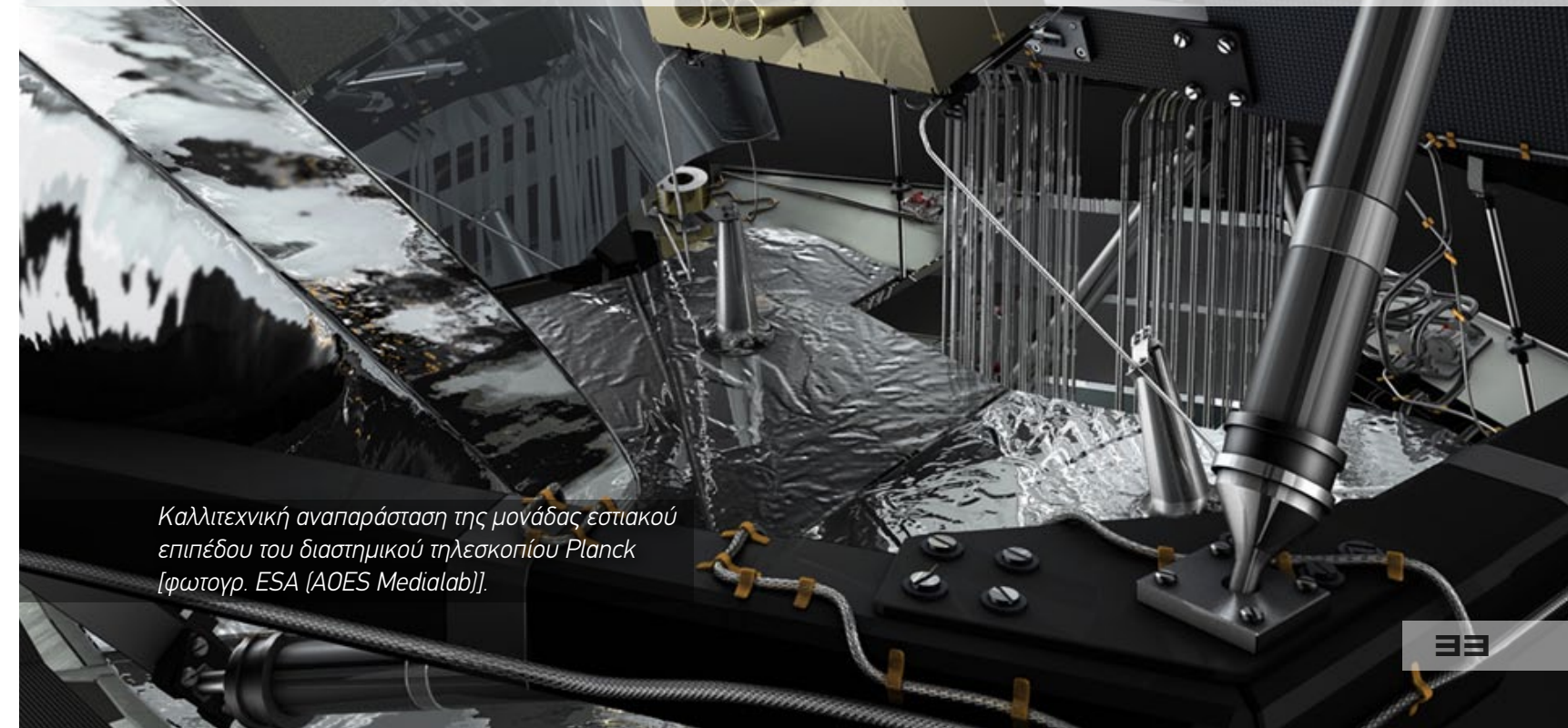
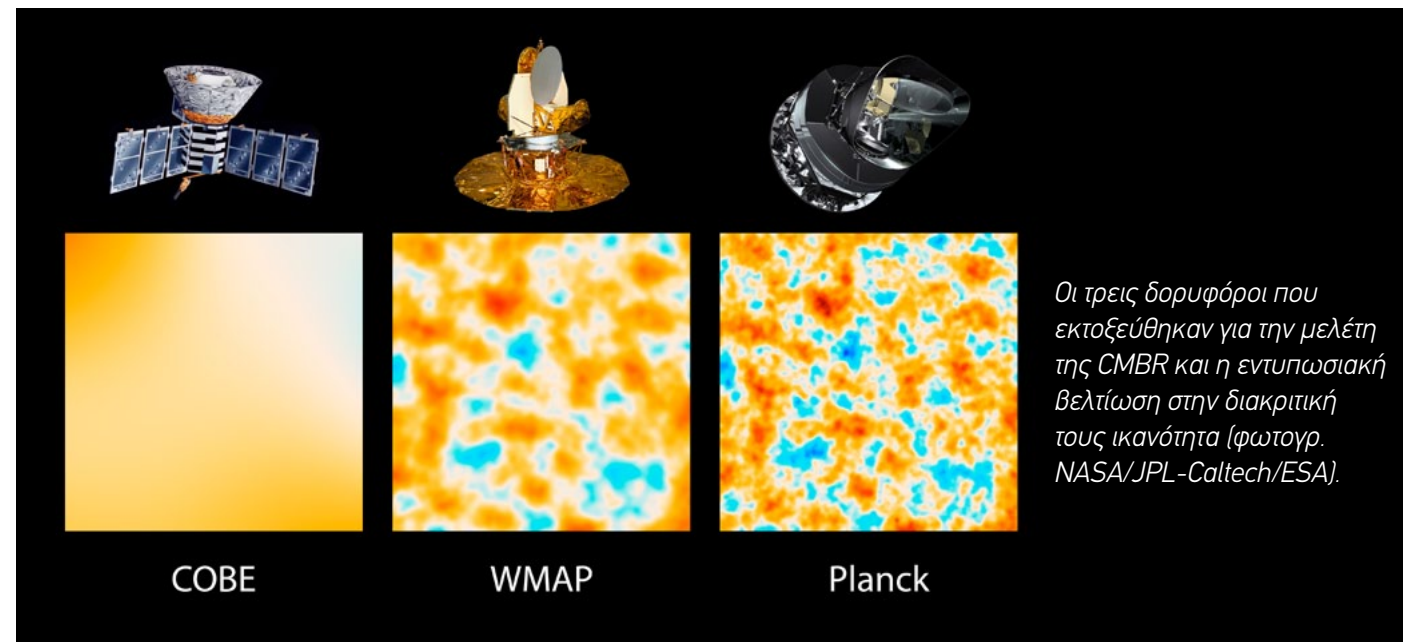
διαφανές στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Έκτοτε, το Σύμπαν συνέχισε να διαστέλλεται και να ψύχεται, και το φως που «απελευθερώθηκε» τότε έχανε ενέργεια, ενώ το μήκος κύματος των φωτονίων του «ξεχειλώνει» διαρκώς, φτάνοντας σήμερα να αντιστοιχεί στα μικροκύματα. Αυτά τα φωτόνια αποτελούν το πλέον αρχέγονο φως που μπορούμε να ανιχνεύσουμε στο Σύμπαν και απαρτίζουν την CMBR.

Ο πρώτος δορυφόρος που σχεδιάστηκε με αποκλειστικό σκοπό την μελέτη της CMBR ήταν ο **COBE** της NASA, που εκτοξεύθηκε το 1989. Η ανάλυση των δεδομένων που συνέλεξε μέχρι το 1992 έδειξε ότι η CMBR ανιχνεύεται απ' όλες τις κατευθύνσεις στον ουρανό ως ένα σχεδόν ομοιόμορφο «υπόβαθρο» ακτινοβολίας με θερμοκρασία περίπου -270 °C. Πολύ περισσότερο, όμως, η ανάλυση αυτή αποκάλυψε ότι, κρυμμένες μέσα στην ομοιομορφία της CMBR, υπάρ-

χουν μικροσκοπικές διακυμάνσεις στη θερμοκρασία που της αντιστοιχεί, της τάξης του 1/100.000. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται σε εξίσου μικροσκοπικές διακυμάνσεις στην πυκνότητα της ύλης εκείνη την εποχή, οι οποίες διογκώθηκαν και οδήγησαν, εντέλει, στις γιγάντιες κοσμικές δομές που παρατηρούμε σήμερα και στις οποίες θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο. Για τα επιτεύγματά τους αυτά, οι επικεφαλής ερευνητές του COBE **John Mather** και **George Smoot** τιμήθηκαν με Νόμπελ Φυσικής το 2006. Οι διακυμάνσεις της CMBR μελετήθηκαν με ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια χάρη στις διαστημοσκευές **WMAP** της NASA, που εκτοξεύθηκε το 2001, και **Planck** του ESA, που εκτοξεύθηκε το 2009.

Αυτό, μάλιστα, που είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον για το θέμα του παρόντος Οδηγού είναι ότι η σκοτεινή ύλη αφήνει ένα χαρακτηριστικό αποτύπωμα στο φάσμα

της CMBR, η ακριβής μορφή του οποίου είναι δύσκολο να αναπαραχθεί με οποιαδήποτε άλλη ανταγωνιστική θεωρία, η οποία δεν υιοθετεί την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης. Ειδικότερα, το φάσμα της CMBR έχει την χαρακτηριστική μορφή μίας καμπύλης με τρεις κορυφές, η πρώτη απ' τις οποίες μάς δίνει πληροφορίες για την γεωμετρία του Σύμπαντος, η δεύτερη για την ποσότητα της βαρυονικής ύλης και η τρίτη για την ποσότητα της σκοτεινής ύλης. Η αναλυτική μελέτη της καμπύλης αυτής καταδεικνύει με μεγάλη ακρίβεια ότι το Σύμπαν είναι επίπεδο, ότι η βαρυονική ύλη αποτελεί περίπου το 4,9% της συνολικής μάζας και ενέργειας του Σύμπαντος και ότι η σκοτεινή ύλη είναι περίπου 5,5 φορές περισσότερη. Με άλλα λόγια, το παρατηρούμενο φάσμα της CMBR δεν αποτελεί μόνο μία ακόμη ισχυρή ένδειξη για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης, αλλά επιβεβαιώνει με μεγάλη ακρίβεια και τις βασικές προβλέψεις του ΚΓΚ γενικότερα.



04

ΓΑΛΑΞΙΑΚΑ ΣΜΗΝΗ ΚΑΙ ΔΟΜΕΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Στιγμιότυπο αναλυτικής προσομοίωσης της εξέλιξης δομών μεγάλης κλίμακας γύρω από ένα γιγάντιο γαλαξιακό σμήνος, που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της [Προσομοίωσης Illustris](#). Η κατανομή της σκοτεινής ύλης απεικονίζεται με μπλε χρώμα, ενώ αυτή των αερίων με πορτοκαλί (φωτογρ. Illustris Collaboration).

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τις αποδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης, οι οποίες εξάγονται από την μελέτη των γαλαξιακών σμηνών και των συγκρούσεων μεταξύ τους, με την βοήθεια του φαινομένου της βαρυτικής εστίασης. Ακολουθώντας θα εστιάσουμε στον τρόπο με τον οποίο οι δομές μεγάλης κλίμακας, που ανακαλύψαμε με τα τηλεσκόπιά μας, «απαιτούν» την ύπαρξη σκοτεινής ύλης, χωρίς την οποία είναι ιδιαίτερα δύσκολο να εξηγήσουμε πώς εντέλει σχηματίστηκαν.

Μία θεμελιώδης πρόβλεψη της ΓΘΣ, η οποία έχει επανειλημμένα επιβεβαιωθεί με τις αστρονομικές μας παρατηρήσεις, είναι ότι κι αυτό ακόμη το φως εκτρέπεται από την αρχική του πορεία, όταν διέρχεται δίπλα από μία μεγάλη συσσώρευση μάζας. Για παράδειγμα, το γιγάντιο γαλαξιακό σμήνος **Abell 2218** έχει τόσο μεγάλη μάζα, ώστε καμπυλώνει, στρεβλώνει και μεγεθύνει το φως των γαλαξιών που «κρύβονται» πίσω του. Λειτουργεί δηλαδή σαν ένας γιγάντιος «βαρυτικός» φακός που παραμορφώνει τις εικόνες τους, σχηματίζοντας φωτεινά τόξα. Επειδή, μάλιστα, ο βαθμός αυτής της παραμόρφωσης εξαρτάται από την μάζα του σμήνους, το φαινόμενο αυτό της **ισχυρής βαρυτικής εστίασης**,

όπως ονομάζεται, επιτρέπει στους αστρονόμους να υπολογίσουν και την μάζα του. Τέτοιοι υπολογισμοί δείχνουν ότι τα γαλαξιακά σμήνη έχουν πολύ μεγαλύτερη μάζα απ' αυτήν που αντιστοιχεί στην φωτεινή τους ύλη. Δυστυχώς, τόσο μεγάλες παραμορφώσεις, όπως κι αυτήν που μόλις περιγράψαμε, είναι σπάνιες. Δεδομένου, όμως, ότι η σκοτεινή ύλη υπάρχει παντού, όλοι οι γαλαξίες υφίστανται κάποιου είδους παραμόρφωση, που δεν υπερβαίνει το 1%, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της **ασθενούς βαρυτικής εστίασης**.

Μία ακόμη απόδειξη για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης προκύπτει από την μελέτη γαλαξιακών σμηνών,

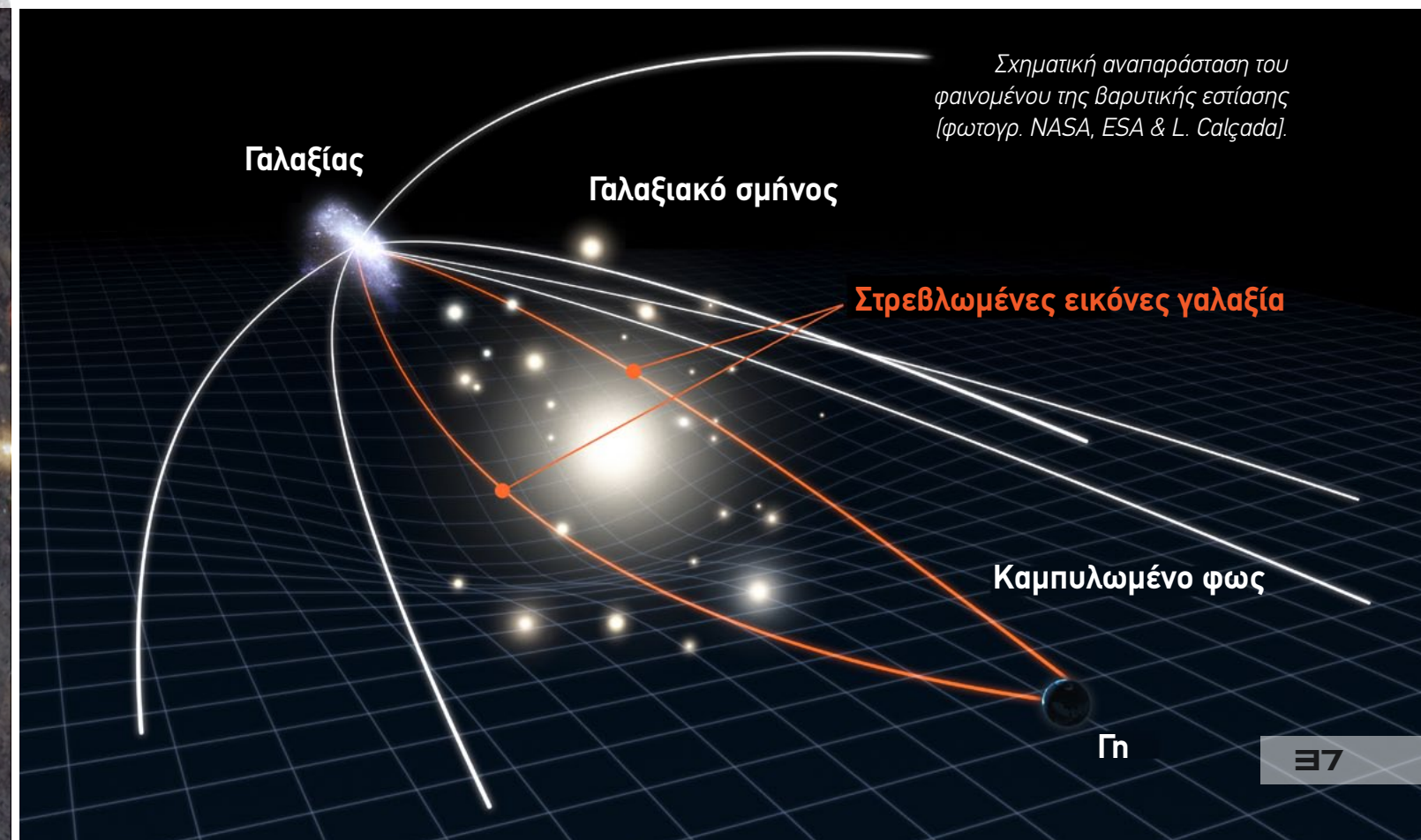
τα οποία σχηματίστηκαν από την σύγκρουση και συγχώνευση δύο μικρότερων. Σε γενικές γραμμές, κάθε γαλαξιακό σμήνος απαρτίζεται από γαλαξίες που εμπεριέχουν εκατοντάδες δισ. άστρα ο καθένας, μεσογαλαξιακά νέφη αερίων και σκοτεινή ύλη, καθένα από τα οποία συμπεριφέρεται διαφορετικά κατά τη διάρκεια των κοσμικών αυτών συγκρούσεων. Για παράδειγμα, παρόλο που οι τροχιές των άστρων επηρεάζονται από τις πολύπλοκες βαρυτικές αλληλεπιδράσεις που αναπτύσσονται ανάμεσά τους, οι αποστάσεις που τα χωρίζουν είναι τόσο μεγάλες, ώστε είναι εξαιρετικά σπάνιο να συγκρουστούν δύο απ' αυτά στην διάρκεια αυτών των συγχωνεύσεων. Τα θερμά νέφη μεσογαλαξιακών αερίων, από την άλλη, υπερθερμαίνονται

εξαιτίας της τριβής και επιβραδύνονται, σε αντίθεση με την σκοτεινή ύλη, που αλληλεπιδρά μόνο βαρυτικά και που γι' αυτό κινείται σχεδόν ανεμπόδιστα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον «διαχωρισμό» της σκοτεινής ύλης και των αερίων, με τη σκοτεινή ύλη να προπορεύεται και τα υπέρθερμα αέρια να την ακολουθούν. Ο διαχωρισμός αυτός, που ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά το 2006 από την ανάλυση των δεδομένων που συνέλεξαν αρκετά τηλεσκόπια για το γαλαξιακό σμήνος **Σφαίρα**, αποτελεί μία από τις ισχυρότερες ενδείξεις σήμερα για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας του σμήνους αυτού οφείλεται στα υπέρθερμα μεσογαλαξιακά



Το γαλαξιακό σμήνος Abell 2218, περίπου 2,1 δισ. έτη φωτός μακριά [φωτογρ. NASA, ESA, and Johan Richard (Caltech, USA)].



Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της βαρυτικής εστίασης [φωτογρ. NASA, ESA & L. Calzada].

νέφη αερίων που εμπεριέχει, τα οποία εξαιτίας της μεγάλης τους θερμοκρασίας εκλύουν ακτίνες Χ. Χάρη στην λεπτομερή ανάλυση των δεδομένων που συνέλεξαν το διαστημικό τηλεσκόπιο ακτίνων Χ **Chandra**, το διαστημικό τηλεσκόπιο **Hubble**, το τηλεσκόπιο **VLT** του Ευρωπαϊκού Νότιου Αστεροσκοπείου (ESO), καθώς και τα δίδυμα οπτικά τηλεσκόπια **Μαγγελάνος**, οι αστρονόμοι κατόρθωσαν να προσδιορίσουν τη σχετική θέση και κατανομή της φωτεινής και της σκοτεινής ύλης του σμήνους, επιβεβαιώνοντας τον διαχωρισμό τους. Η χαρακτηριστική εικόνα του σμήνους Σφαίρα αποτελεί σύνθεση αυτών των δεδομένων, περιλαμβάνει δηλαδή την απεικόνιση του ίδιου του σμήνους στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, στην οποία έχουν προστεθεί με ροζ χρώμα τα δεδομένα που αντιστοιχούν στις ακτίνες Χ, οι οποίες εκλύονται από τα μεσογαλαξιακά νέφη αερίων. Τέλος, με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές όπου έχει συγκεντρωθεί η σκοτεινή ύλη, οι οποίες προσδιορίστηκαν υπολογίζοντας το ποσοστό της ασθενούς βαρυτικής εστίασης που υφίστανται οι γαλαξίες που κρύβονται πίσω από το σμήνος.

Εάν, επομένως, ταξιδεύαμε πίσω στον χρόνο, θα βλέπαμε δύο μικρότερα γαλαξιακά σμήνη σε πορεία σύγκρουσης. Με την σύγκρουσή τους, τα αέρια νέφη του κάθε σμήνους αλληλεπέδρασαν μεταξύ τους, τόσο εξαιτίας της βαρύτητας, όσο και εξαιτίας της τριβής, γεγονός που αύξησε ακόμη περισσότερο την θερμοκρασία τους και τα επιβράδυνε προς το κέντρο του νέου σμήνους. Τα νέφη της σκοτεινής ύλης, αντιθέτως, η οποία αλληλεπιδρά μόνο διά μέσου της βαρύτητας, διήλθαν το ένα μέσα από το άλλο, χωρίς να επιβραδυνθούν. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της ορατής ύλης του νέου σμήνους να συσσωρευτεί προς το κέντρο του, ενώ το μεγαλύτερο

μέρος της συνολικής του μάζας, που είναι σκοτεινή, να συγκεντρωθεί στις παρυφές του σμήνους.

Μία ακόμη απόδειξη για την σκοτεινή ύλη ανακοινώθηκε τον Ιανουάριο του 2007, όταν παρουσιάστηκε ο πρώτος τρισδιάστατος χάρτης, βασισμένος σε πραγματικά παρατηρησιακά δεδομένα, ο οποίος απεικονίζει την κατανομή της σκοτεινής ύλης του Σύμπαντος σε μεγάλη κλίμακα. Η χαρτογράφηση αυτή μάς αποκαλύπτει μία από τις ισχυρότερες έως τώρα ενδείξεις ότι η ύλη στο Σύμπαν, κυρίως με την μορφή γαλαξιών, συσσωρεύεται κατά μήκος πυκνότερων συγκεντρώσεων σκοτεινής ύλης, η οποία σχηματίζει ένα δίκτυο νηματοειδών δομών. Εκεί όπου οι νηματοειδείς δομές της σκοτεινής ύλης τέμνονται μεταξύ τους παρατηρούνται οι μέγιστες συσσωματώσεις ύλης, δηλαδή τα γαλαξιακά σμήνη. Προκειμένου να συνθέσουν αυτόν τον χάρτη, οι αστρονόμοι χρησιμοποίησαν τα δεδομένα της μεγαλύτερης επισκόπησης που είχε πραγματοποιήσει έως τότε το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble, γνωστή ως **Επισκόπηση της Κοσμικής Εξέλιξης** (Cosmic Evolution Survey), ενώ για την απόδοση της τρισδιάστατης κατανομής της σκοτεινής ύλης, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που συνέλεξαν τα επίγεια τηλεσκόπια **VLT** στη Χιλή, **Subaru** στη Χαβάη, **VLA** στο Νέο Μεξικό, καθώς και το διαστημικό τηλεσκόπιο ακτίνων Χ του ESA **XMM-Newton**. Επειδή, όπως είπαμε, η σκοτεινή ύλη δεν μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα, η κατανομή της στο Διάστημα υπολογίστηκε με την βοήθεια της ασθενούς βαρυτικής εστίασης.

Η τελευταία απόδειξη για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης που θα παρουσιάσουμε σ' αυτόν τον Οδηγό Παράστασης προκύπτει από την μελέτη των δομών μεγάλης κλίμακας. Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφερ-

Σύνθετη εικόνα του γαλαξιακού σμήνους Σφαίρα, στην οποία διακρίνεται ο διαχωρισμός φωτεινής και σκοτεινής ύλης (φωτογρ. X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch, Optical: NASA/STScI, Magellan/U.Arizona/D.Clowe, Lensing Map: NASA/STScI, ESO WFI, Magellan/U.Arizona/D.Clowe).

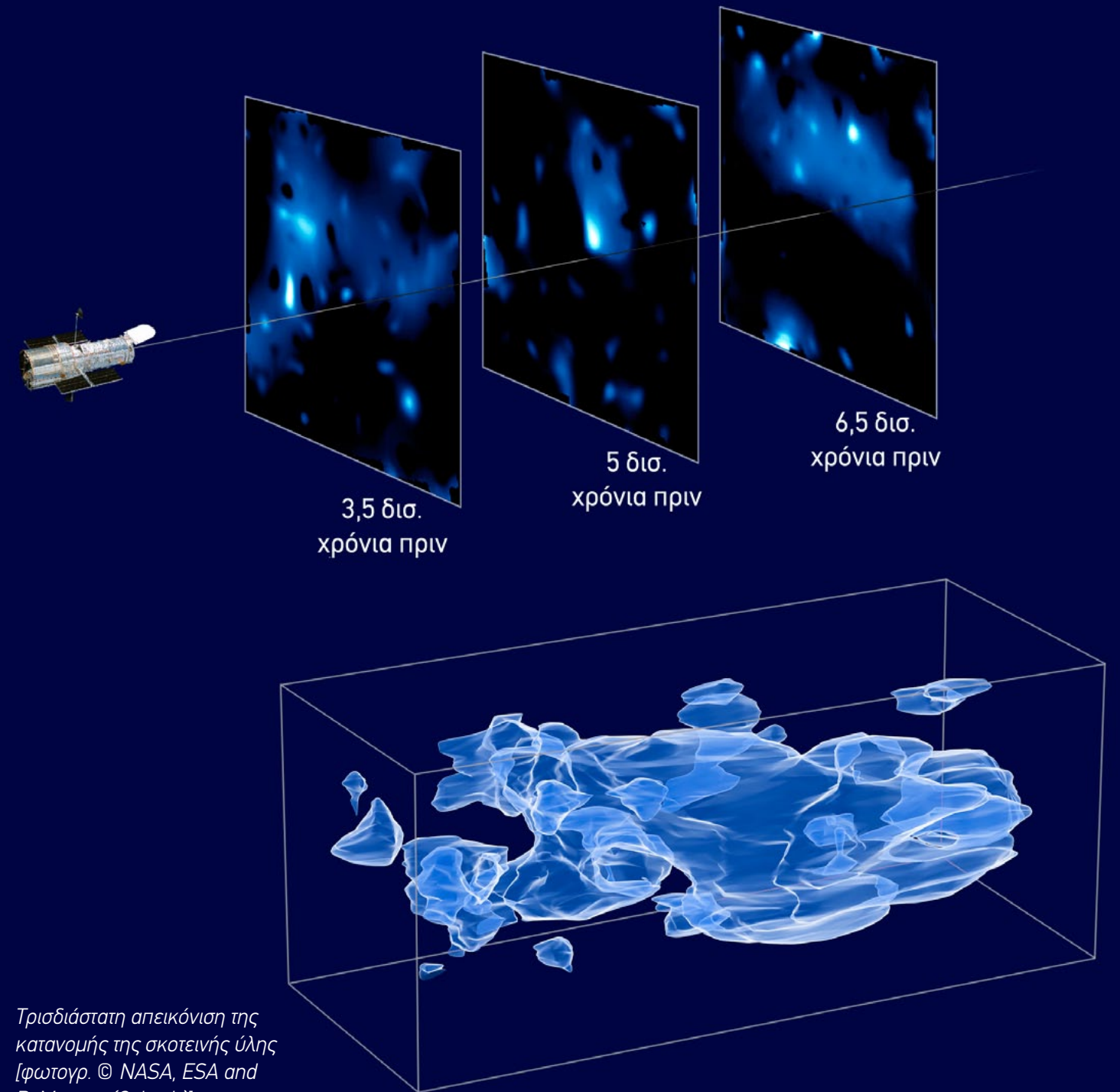
θήκαμε στο Κοσμολογικό Αξίωμα, σύμφωνα με το οποίο το Σύμπαν σε κοσμολογικές κλίμακες φαίνεται παντού και προς κάθε κατεύθυνση το ίδιο. Σε τέτοιες, δηλαδή, κλίμακες, όπου οι γαλαξίες δεν είναι παρά κόκκοι άμμου πάνω στον απέραντο κοσμικό χάρτη, η σχεδόν τέλεια ομοιογένεια και ιστροπία που υπαινίσσεται το Κοσμολογικό Αξίωμα, καθίσταται εμφανής. Αντιθέτως, σε μικρές κλίμακες το Κοσμολογικό Αξίωμα καταρρέει.

Στην διαστημική μας «γειτονιά», για παράδειγμα, η **Ανδρομέδα** είναι ο πλησιέστερος σε μας γιγάντιος σπειροειδής γαλαξίας, ο οποίος υπολογίζεται ότι θα συγκρουστεί και εντέλει θα συγχωνευθεί με τον Γαλαξία μας σε περίπου 4 δισ. χρόνια. Γαλαξιακές συγκρούσεις σαν κι αυτές είναι ιδιαίτερα συχνές στην εξελικτική πορεία του Σύμπαντος. Το γεγονός, μάλιστα, ότι σε σχετικά μικρές αποστάσεις, η βαρυτική έλξη μεταξύ δύο ή περισσότερων γαλαξιών μπορεί τοπικά να υπερισχύει της κοσμικής διαστολής, είναι και ο βασικός λόγος που οι περισσότεροι γαλαξίες πολύ σπάνια εμφανίζονται απομονωμένοι μέσα στην απεραντοσύνη του Σύμπαντος, αφού κάτω απ' την αμοιβαία τους βαρύτητα οργανώνονται σε ομάδες και σμήνη, τα οποία περιλαμβάνουν από μερικές δεκάδες μέχρι και μερικές χιλιάδες γαλαξίες. Ήδη, όμως, από το 1978, οι αστρονόμοι άρχισαν να ανακαλύπτουν και μεγάλες περιοχές στο Διάστημα, οι οποίες εμπεριείχαν ελάχιστους γαλαξίες. Έτσι, άρχισε σιγά-σιγά να γίνεται αποδεκτό ότι όσα περιγράψαμε πιο πάνω δεν είναι παρά μία μικρογραφία του Σύμπαντος, η οποία επαναλαμβάνεται σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις σχηματίζει τις δομές μεγάλης κλίμακας.

Οι έρευνες για τον σχηματισμό και την εξέλιξη των

δομών μεγάλης κλίμακας μάς προσφέρουν ένα από τα ισχυρότερα ερείσματα για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης. Πραγματικά, τόσο η χαρτογράφηση του ουρανού σε κοσμολογικές κλίμακες, όσο και οι αριθμητικές προσομοιώσεις της εξέλιξης των δομών αυτών, βασισμένων στο ΚΠΚ, καταδεικνύουν ότι σ' αυτές τις κλίμακες οι δομές στο Σύμπαν σχηματίζουν ένα συγκεκριμένο «μοτίβο», το οποίο είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αναπαραχθεί από εναλλακτικές θεωρίες βαρύτητας και χωρίς την «βοήθεια» της σκοτεινής ύλης. Οι δομές μεγάλης κλίμακας, δηλαδή, σχηματίζουν ένα αχανές σύμπλεγμα από τεράστιες «φουσαλίδες», που περιέχουν ελάχιστους γαλαξίες, ενώ η επιφάνειά τους καλύπτεται από ένα εξίσου αχανές «δίκτυο» νηματοειδών δομών σκοτεινής ύλης και αερίων, μέσω του οποίου «συνδέονται» μεταξύ τους τα γαλαξιακά σμήνη, που εμφανίζονται διάσπαρτα ως «κόμβοι» συσσωρευμένης μάζας. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο σχηματίστηκαν οι δομές αυτές αποτελεί ένα από τα πιο συναρπαστικά και ενεργά πεδία έρευνας στην Κοσμολογία και αρκετά ερωτήματα που σχετίζονται με την προέλευση και την εξέλιξή τους εξακολουθούν να παραμένουν αναπάντητα. Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, το «έναυσμα» για τον σχηματισμό τους οφείλεται στην σκοτεινή ύλη.

Η σκοτεινή ύλη, δηλαδή, που «γεννήθηκε» τις πρωταρχικές στιγμές της συμπαντικής εξέλιξης, συμπυκνώθηκε σε νήματα και απλώθηκε στο Σύμπαν, σχηματίζοντας έναν αόρατο «ιστό αράχνης», που παγίδευσε με την βαρυτική του έλξη την βαρυονική ύλη, απ' την οποία γεννήθηκαν τα πρώτα άστρα. Με την πάροδο, όμως, του χρόνου και καθώς το Σύμπαν συνέχισε να διαστέλλεται και να ψύχεται, στις διασταυρώσεις των νημάτων αυτών σχηματίστηκαν οι πρώτοι μικροί γαλαξίες, ενώ εκεί όπου η βαρυτική έλξη μεταξύ επιμέ-



Τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της σκοτεινής ύλης [φωτογρ. © NASA, ESA and R. Massey (Caltech)].

ρους γαλαξιών υπερίσχυε της κοσμικής διαστολής, οι γαλαξίες συγχωνεύονταν σε όλο και μεγαλύτερους και σχημάτιζαν γαλαξιακά σμήνη. Σήμερα, οι τεράστιες αυτές κοσμικές δομές, που ξεκίνησαν ως μικροσκοπικές διακυμάνσεις στην πυκνότητα της ύλης του αρχέγονου Σύμπαντος, μάς προσφέρουν μία ακόμη ισχυρή ένδειξη για την σκοτεινή ύλη, χωρίς την οποία είναι πολύ δύσκολο να εξηγήσουμε πώς εντέλει σχηματίστηκαν οι δομές αυτές που ανακαλύψαμε με τα τηλεσκόπιά μας, εξερευνώντας το διαστελλόμενο Σύμπαν.

Παρόλο, όμως, που η βαρύτητα «αναλαμβάνει» να διογκώσει αυτές τις διακυμάνσεις, «χτίζοντας» όλο και μεγαλύτερες δομές με τον τρόπο περίπου που μόλις περιγράψαμε, αδυνατεί να τις «δημιουργήσει». Ο επικρατέστερος φυσικός μηχανισμός, που μπορεί να «δημιουργήσει» με «φυσικό» τρόπο αυτές τις διακυμάνσεις, είναι η θεωρία **Πληθωριστικού Σύμπαντος**. Σύμφωνα με την θεωρία αυτή, το Σύμπαν προήλθε από μία αδιανόητα μικροσκοπική περιοχή, εμποτισμένη με μία μυστηριώδη μορφή ενέργειας με

βαρυτικά απωστικές ιδιότητες, που προκάλεσαν την ραγδαία, εκθετική διαστολή του για ένα απειροελάχιστο μικρό χρονικό διάστημα, με το πέρας του οποίου το Σύμπαν συνέχισε να διαστέλλεται με επιβραδυνόμενο ρυθμό, όπως περιγράφει η ΘΜΕ (υπενθυμίζουμε ότι τα τελευταία 6 δισ. χρόνια περίπου η σκοτεινή ενέργεια έδωσε το έναυσμα για μία νέα περίοδο επιταχυνόμενης διαστολής, στην οποία ωστόσο δεν θα αναφερθούμε περαιτέρω). Μικροσκοπικές τυχαίες κβαντικές διακυμάνσεις, που προϋπήρχαν της επο-

χής του πληθωρισμού, «τεντώθηκαν» στη διάρκεια της πληθωριστικής εποχής με την εκθετική διαστολή του Σύμπαντος κατά πολλές τάξεις μεγέθους, με αποτέλεσμα η πυκνότητα της ύλης σε κάποιες περιοχές του Σύμπαντος να είναι ελάχιστα μεγαλύτερη απ' ό,τι σε κάποιες άλλες. Αυτές οι διακυμάνσεις, που σχηματίστηκαν στην πυκνότητα της αρχέγονης ύλης, «αποτυπώθηκαν» στην CMBR με τη μορφή των μικροσκοπικών θερμοκρασιακών διακυμάνσεων, στις οποίες αναφερθήκαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και απο-



Το παράξενο σχήμα του γαλαξία NGC 2623, περίπου 250 εκατ. έτη φωτός μακριά προς τον αστερισμό του Καρκίνου, είναι το αποτέλεσμα της σύγκρουσης δύο μικρότερων, οι οποίοι σταδιακά συγχωνεύονται (φωτογρ. Hubble Legacy Archive, ESA, NASA).

τέλεσαν τις κοσμικές «φύτρες», μέσα απ' τις οποίες αναδύθηκαν οι πρώτες δομές στο Σύμπαν.

Γιατί, όμως, οι επιστήμονες θεωρούν τόσο «απαραίτητη» την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης στον σχηματισμό αυτών των δομών; Υπό κανονικές συνθήκες, εάν στο αρχέγονο Σύμπαν είχαν σχηματιστεί κάποιες περιοχές με ελάχιστα μεγαλύτερη πυκνότητα από τις γειτονικές τους, θα προσέλκυαν με την ελάχιστη μεγαλύτερη βαρυτική τους έλξη όλο και περισσότερη ύλη από τις γειτονικές τους περιοχές, που σημαίνει ότι ο σχηματισμός όλο και μεγαλύτερων δομών συνηθισμένης ύλης θα έπρεπε να αρχίσει άμεσα. Ωστόσο, οι συνθήκες κάθε άλλο παρά κανονικές ήταν στο αρχέγονο Σύμπαν! Εξαιτίας των τεράστιων θερμοκρασιών και πυκνοτήτων που επικρατούσαν στα αρχικά στάδια της συμπαντικής εξέλιξης, τα σωματίδια της βαρυονικής ύλης συγκρούονταν διαρκώς μεταξύ τους, αλλά και με τα φωτόνια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, εμποδίζοντας τα τελευταία να διασχίσουν ελεύθερα το Διάστημα, δηλαδή η ύλη ήταν **συζευγμένη** με τα φωτόνια. Επειδή, όμως, η ακτινοβολία των φωτονίων ασκεί ένα είδος πίεσης, που αντιστέκεται στην βαρυτική κατάρρευση αυτών των περιοχών, οι αρχικές διακυμάνσεις στην κατανομή της βαρυονικής ύλης δεν μπορούσαν να διευρυνθούν και να σχηματίσουν μεγαλύτερες δομές, για όσο χρονικό διάστημα η ύλη παρέμενε συζευγμένη με τα φωτόνια.

Τα σωματίδια της σκοτεινής ύλης, αντιθέτως, που όπως έχουμε πει δεν αλληλεπιδρούν με τα φωτόνια, μπορούσαν υπό την επίδραση της αμοιβαίας τους βα-

ρυτικής έλξης να διευρύνουν τις αρχικές διακυμάνσεις στην πυκνότητά τους, έλκοντας όλο και περισσότερη ύλη, πολύ πριν απελευθερωθεί η CMBR. Στις ακραίες, δηλαδή, θερμοκρασίες εκείνης της αρχέγονης εποχής, επειδή η πίεση της ακτινοβολίας υπερίσχυε της βαρύτητας, η «κλασική» βαρυονική ύλη αδυνατούσε να καταρρεύσει σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Η σκοτεινή ύλη, αντιθέτως, που δεν αλληλεπιδρά με την ακτινοβολία, κατέρρευσε βαρυτικά, σχηματίζοντας τις πρωταρχικές συσσωματώσεις ύλης, πάνω στις οποίες άρχισε σταδιακά να έλκεται και βαρυονική ύλη, και από τις οποίες προήλθαν εντέλει οι πρώτες δομές στο Σύμπαν. Για να το πούμε διαφορετικά, χωρίς την σκοτεινή ύλη, ο σχηματισμός των δομών στο Σύμπαν θα είχε καθυστερήσει αρκετά και το Σύμπαν θα ήταν διαφορετικό απ' αυτό που παρατηρούμε.

Συμπερασματικά, το γεγονός ότι η σκοτεινή ύλη «απαιτείται» από τόσες διαφορετικές ερευνητικές κατευθύνσεις (και σε καμία περίπτωση δεν έχουμε αναφερθεί σε όλες) ωθεί μεγάλο ποσοστό της επιστημονικής κοινότητας να θεωρεί ότι η σκοτεινή ύλη όντως υπάρχει, παρόλο που η φύση της εξακολουθεί να παραμένει άγνωστη. Δεδομένου, ωστόσο, ότι οι μοναδικές παρατηρήσιμες επιδράσεις της σκοτεινής ύλης είναι μέχρι στιγμής βαρυτικής φύσης, ορισμένοι επιστήμονες άρχισαν να διερευνούν την πιθανότητα η σκοτεινή ύλη τελικά να μην υπάρχει και αυτό που θεωρούμε ότι είναι μία νέα μορφή ύλης να οφείλεται απλά στο γεγονός ότι η κατανόσή μας της βαρύτητας, όπως προκύπτει μέσα από την ΓΘΣ, είναι ελλιπής ή λανθασμένη.

Στιγμιότυπο από την προσομοίωση δομών μεγάλης κλίμακας, που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο των [Κοσμολογικών Προσομοιώσεων Bolshoi](#) (φωτογρ. Stefan Gottlober, AIP).



05

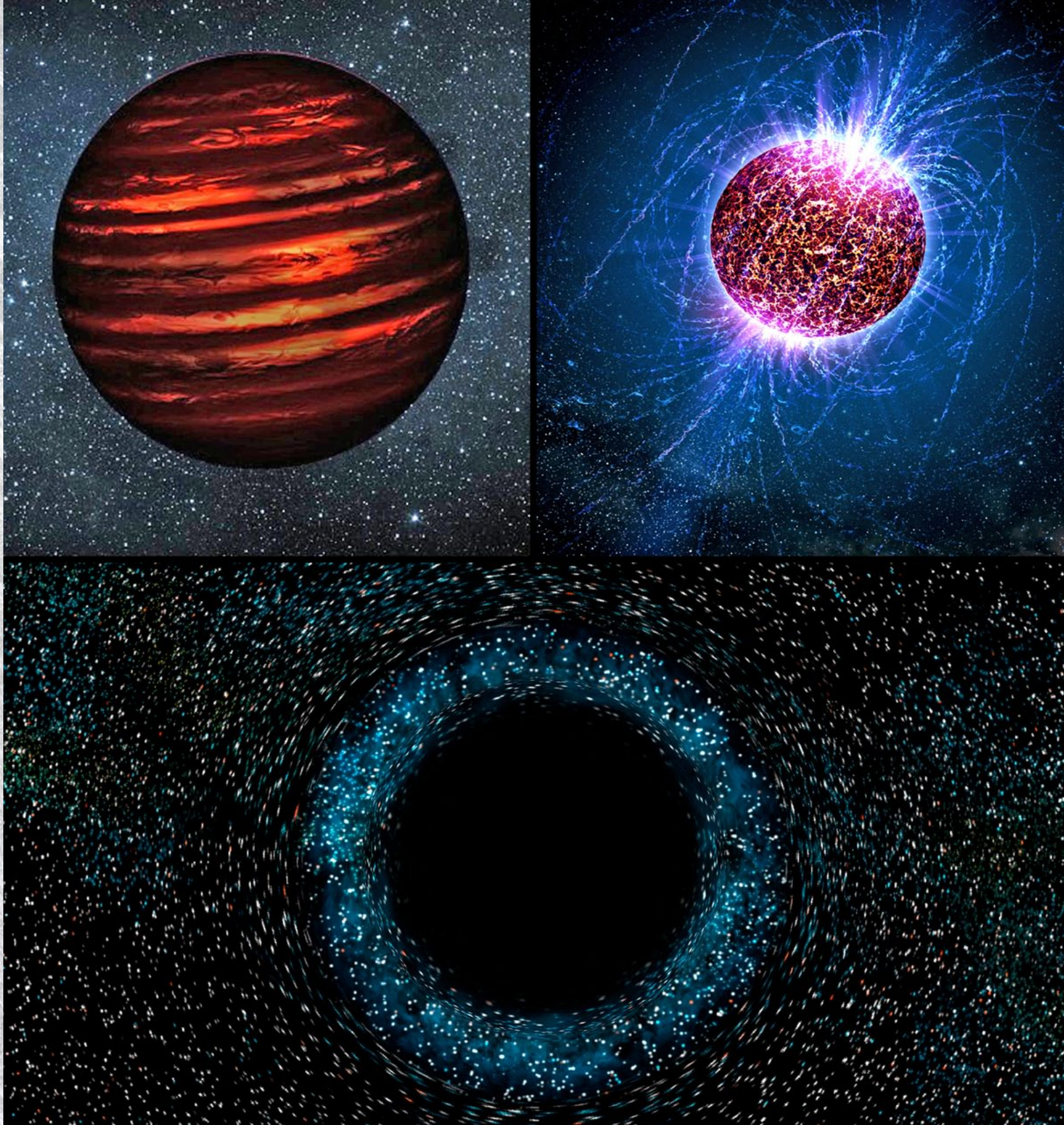
ΕΠΙΛΟΓΟΣ:
ΑΝΑΖΗΤΩΝΤΑΣ ΤΗΝ
ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΥΛΗ

Μήπως, λοιπόν, όλα αυτά είναι τελικά μία «αυταπάτη»; Μήπως, δηλαδή, οι γνώσεις μας για την βαρύτητα, την ασθενέστερη απ' όλες τις αλληλεπιδράσεις της φύσης, είναι εντέλει ελλιπείς; Όπως μας έδειξε και η περίπτωση του περιηλίου του Ερμή, θεωρητικά τουλάχιστον, η πιθανότητα αυτή δεν μπορεί να αποκλειστεί, γι' αυτό και ορισμένοι επιστήμονες έχουν ήδη στραφεί προς αυτήν την κατεύθυνση, προτείνοντας εναλλακτικές θεωρίες βαρύτητας. Οι προβλέψεις, ωστόσο, της ΓΘΣ έχουν επιβεβαιωθεί πειραματικά τόσες φορές και το θεωρητικό αυτό οικοδόμημα είναι τόσο ευφυές στην σύλληψή του, που η συντριπτική πλειονότητα των επιστημόνων θεωρεί ότι η πιθανότητα αυτή δεν έχει μεγάλη βάση.

Κολάζ εικόνων που σχετίζονται με τις προσπάθειες ανίχνευσης της σκοτεινής ύλης (φωτογρ. NSF/J. Yang, Felipe Pedreros, Icacube/NSF, NASA, ATLAS Experiment 2016 © CERN, © Carlos H. Faham, Enrico Saccheti).

Το 1983, για παράδειγμα, ο **Mordechai Milgrom** παρουσίασε ένα τροποποιημένο μοντέλο της Νευτώνειας δυναμικής, το οποίο μπορούσε να εξηγήσει τις ταχύτητες περιφοράς των άστρων στους γαλαξίες, χωρίς να «προσφεύγει» στην σκοτεινή ύλη. Το μοντέλο αυτό, που ονομάστηκε **MOND** (M**O**dified Newtonian Dynamics, δηλ. Τροποποιημένη Νευτώνεια Δυναμική), τροποποιεί τον νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα, ώστε υπό ορισμένες συνθήκες η βαρυτική έλξη μεταξύ δύο σωμάτων να μειώνεται πιο «ήπια» από το αντίστροφο τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης. Μετέπειτα έρευνες, ωστόσο, έδειξαν ότι το μοντέλο αυτό ήταν ασύμβατο με τις παρατηρήσεις που σχετίζονται με τα γαλαξιακά σμήνη και υπερσμήνη. Εκτός αυτού, η MOND αδυνατεί να ερμηνεύσει την πληθώρα των σχετικιστικών φαινομένων που ανακαλύφθηκαν έως τώρα, τα οποία βρίσκονται σε εξαιρετική συμφωνία με την ΓΘΣ. Όπως, άλλωστε, δείξαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, όλες οι κοσμολογικές παρατηρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα, από την αρχέγονη πυρηνοσύνθεση μέχρι τις διακυμάνσεις της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου και την εξέλιξη των δομών μεγάλης κλίμακας, είναι συμβατές με ένα Σύμπαν, το οποίο εμπεριέχει σκοτεινή ύλη και μάλιστα σε πενταπλάσια ποσότητα σε σχέση με την βαρυονική ύλη.

Περίπου 20 χρόνια αργότερα, ο **Jacob Bekenstein**, βασισμένος στην MOND του Milgrom, παρουσίασε το 2004 τη σχετικιστική εκδοχή της, γνωστή ως **TeVeS**, η οποία εξηγούσε αρκετά από τα σχετικιστικά φαινόμενα που προαναφέραμε. Ωστόσο, η ανακάλυψη όλο και περισσότερων διπλών αστρικών συστημάτων που αποτελούνται από πάλσαρ, αστέρες νετρονίων ή/και λευκούς νάνους δίνει για πρώτη φορά την ευκαιρία να ελεγχθούν οι προβλέψεις των δύο θεωριών σε



συνθήκες ακραίας βαρύτητας και μάλιστα με μεγάλη ακρίβεια. Καθώς τα αστρικά λείψανα αυτών των συστημάτων στροβιλίζονται το ένα γύρω από το άλλο, εκλύουν βαρυτικά κύματα και η επακόλουθη μείωση της συνολικής τους ενέργειας εξαναγκάζει τις τροχιές τους να συρρικνώνονται. Μέχρι στιγμής, οι σχετικές μετρήσεις δείχνουν ότι η συρρίκνωση αυτή βρίσκεται σε εξαιρετική συμφωνία με τις θεωρητικές προβλέψεις της ΓΘΣ, όχι όμως και της TeVeS. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με τα ως τώρα δεδομένα, η σκοτεινή ύλη πρέπει να υπάρχει, παρόλο που εξακολουθούμε να αγνοούμε την φύση της.

Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, οι επιστήμονες διερευνούν δύο «οικογένειες» σκοτεινής ύλης: την **βαρυονική** και την **μη βαρυονική**. Η πρώτη είναι συνηθισμένης μορφής ύλη, την οποία δεν μπορούμε να δούμε, επειδή για διάφορους λόγους εκπέμπει ελάχιστη (ή και καθόλου) ακτινοβολία. Συλλογικά, τα ουράνια σώματα που αποτελούν την βαρυονική σκοτεινή ύλη ονομάζονται **MACHOs** (M**A**ssive C**O**mpact H**A**lo Objects, δηλαδή Μεγάλης Μάζας Συμπαγή Αντικείμενα της Άλλω), με χαρακτηριστικά παραδείγματα τους καφέ νάνους, τους αστέρες νετρονίων και τις μαύρες τρύπες. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει παράξενα στοιχειώδη σωματίδια, εξωτικές μορφές ύλης που, αν και προβλέπονται θεωρητικά, η ύπαρξή τους δεν

Τα MACHOs, όπως οι καφέ νάνοι (πάνω αριστερά), οι αστέρες νετρονίων (πάνω δεξιά) και οι μαύρες τρύπες (κάτω), δεν υπάρχουν στις ποσότητες που απαιτούνται για να ερμηνεύσουν την σκοτεινή ύλη στο Σύμπαν [φωτογρ. NASA/JPL/Jonathan Gagne, Casey Reed/Penn State University, ESA, NASA and Felix Mirabel (FAEC & Institute for Astronomy and Space Physics/Conicet of Argentina)].

έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά. Οι πλέον υποσχόμενοι υποψήφιοι για την μη βαρυονική ύλη είναι τα **WIMPs** (Weakly Interacting Massive Particles, δηλαδή Ασθενώς Αλληλεπιδρώντα Βαρέα Σωματίδια) και τα **αξιόνια**.

Όπως μαρτυρεί και το όνομά τους, τα WIMPs δεν αλληλεπιδρούν με την βαρυονική ύλη, παρά μόνο διά μέσου της ασθενούς και της βαρυτικής αλληλεπίδρασης, γεγονός που καθιστά την ανίχνευσή τους ιδιαίτερα δύσκολη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων σωματιδίων που αναζητούν οι επιστήμονες στα πειράματά τους είναι το **νετραλίνο**, το ελαφρύτερο από τα υποθετικά υπερσυμμετρικά σωματίδια, στα οποία αναφερθήκαμε με συντομία στην εισαγωγή αυτού του Οδηγού Παράστασης. Τα αξιόνια, από την άλλη, είναι κι αυτά υποθετικά σωματίδια, τα οποία προτάθηκαν στην προσπάθεια των φυσικών να επιλύσουν μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων, αναφορικά με την παρατηρούμενη **ασυμμετρία** μεταξύ ύλης και αντιύλης. Εάν δηλαδή στα πρώτα κλάσματα του δευτερολέπτου μετά την Μεγάλη Έκρηξη η ύλη και η αντιύλη παράγονταν σε ίδιες ακριβώς ποσότητες, τότε η μεταξύ τους επαφή θα έπρεπε να τις είχε εξαϋλώσει σε καθαρή ενέργεια και το Σύμπαν θα ήταν κενό από ύλη. Επομένως, θα πρέπει να λειτούργησε κάποιος φυσικός μηχανισμός, χάρη στον οποίο δημιουργήθηκε ελάχιστα περισσότερη ύλη από αντιύλη, ένα μικρό πλεόνασμα απ' το οποίο προέρχονται όλα όσα παρατηρούμε στο Σύμπαν. Η κατανόηση αυτού του μηχανισμού συνιστά μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για την φυσική του μικρόκοσμου και του μακρόκοσμου.

Όπως έχει υπολογιστεί θεωρητικά, τα αξιόνια έχουν απειροελάχιστη μάζα και είναι ηλεκτρικά ουδέτερα,

που σημαίνει ότι, εάν όντως υπάρχουν, η ανίχνευσή τους είναι εξίσου δύσκολη. Θεωρητικά, μάλιστα, τα WIMPs και τα αξιόνια, εάν βέβαια υπάρχουν, σχηματίστηκαν σε τόσο μεγάλες ποσότητες, σχεδόν άμεσα μετά τη Μεγάλη Έκρηξη, ώστε θα μπορούσαν να εξηγήσουν το μεγάλο πλεόνασμα της σκοτεινής ύλης που εμπεριέχει το Σύμπαν. Σύμφωνα, πάντως, με τις έρευνες που έχουν διεξαχθεί έως τώρα, η πιθανότητα να αποτελούν τα MACHOs την κυρίαρχη μορφή της σκοτεινής ύλης στο Σύμπαν είναι ουσιαστικά μηδενική, που σημαίνει ότι η σκοτεινή ύλη «πρέπει» να απαρτίζεται κυρίως από εξωτικά σωματίδια, όπως τα WIMPs και τα αξιόνια. Ποιο απ' αυτά αποτελεί τον κύριο όγκο της σκοτεινής ύλης εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο ενδελεχούς έρευνας.

Οι προσπάθειες των επιστημόνων να απαντήσουν σ' αυτό το ερώτημα τους έστρεψε από τα βάθη του ουρανού στα βάθη εγκαταλελειμμένων ορυχείων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο Μεγάλος Υπόγειος Ανιχνευτής Ξένων **LUX** (Large Underground Xenon Detector), ο οποίος είναι εγκαταστημένος σ' ένα παλιό ορυχείο χρυσού στην Νότια Ντακότα, 1.500 m κάτω από την επιφάνεια της Γης. Οι ανιχνευτές σκοτεινής ύλης κατασκευάζονται σε τέτοια βάθη, ώστε τα πετρώματα που τους περιβάλλουν να λειτουργούν ως «ασπίδα», περιορίζοντας στο ελάχιστο δυνατό τις «παρεμβολές» άλλων σωματιδίων, όπως οι κοσμικές ακτίνες, που θα «κατέκλυζαν» τον ανιχνευτή. Ο LUX αποτελείται από μία τεράστια δεξαμενή νερού 300 τόνων, που λειτουργεί ως επί πλέον ασπίδα για τον πυρήνα του ανιχνευτή, ο οποίος αποτελείται από ένα δοχείο γεμάτο με υγροποιημένο ξένο, ένα ευγενές αέριο που λειτουργεί ως «δόλωμα» για την ανίχνευση της σκοτεινής ύλης. Σύμφωνα με την θεωρία, κάποια σωματίδια σκοτεινής ύλης θα προσκρούουν

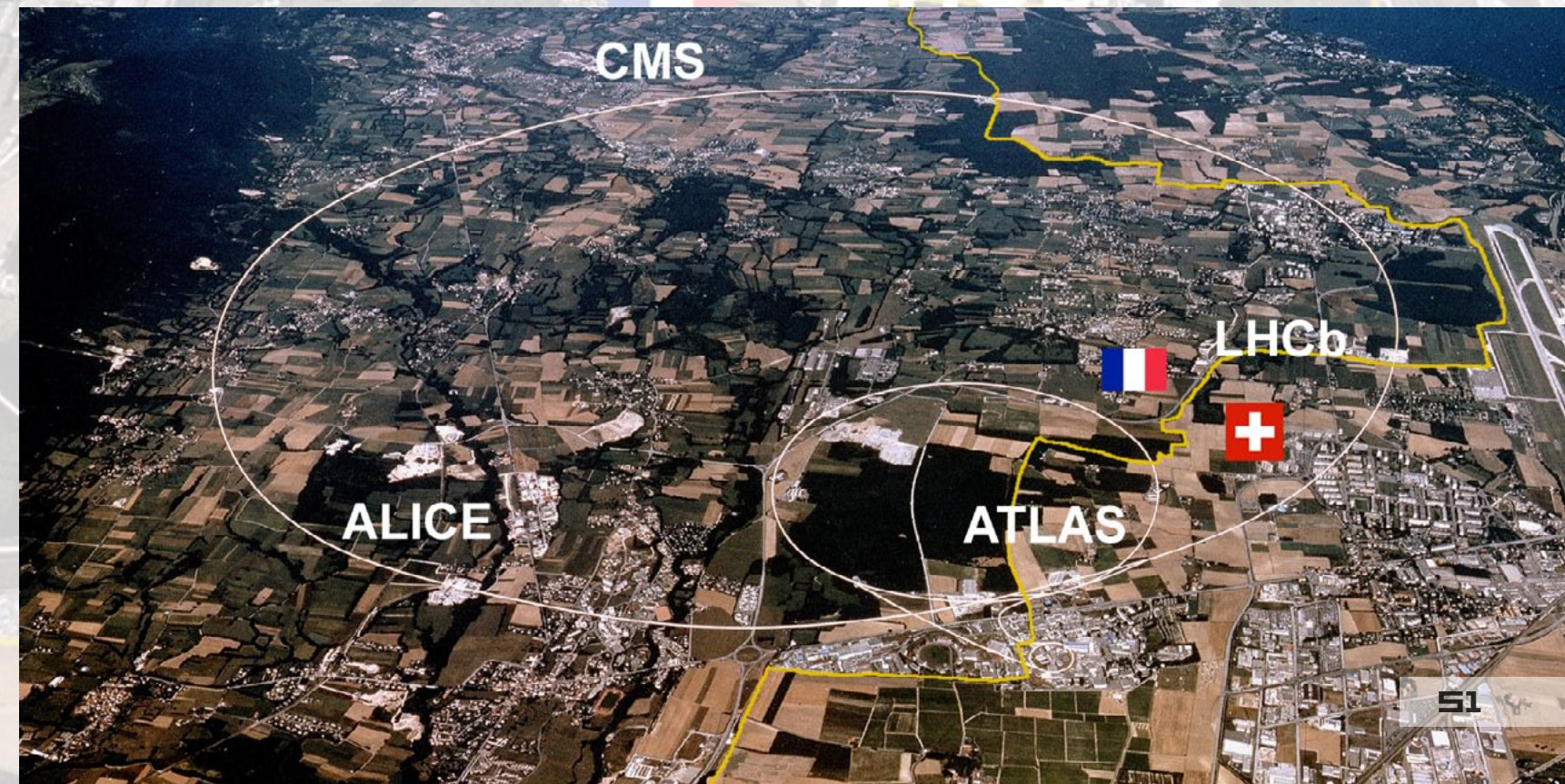
πάνω στους πυρήνες ξένου, εκπέμποντας φωτόνια, ή απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια, τα οποία προσπαθούν να ανιχνεύσουν οι επιστήμονες με την βοήθεια ειδικών ανιχνευτών.

Ένας άλλος τρόπος να αποδείξουμε οριστικά την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης δεν είναι να την ανιχνεύσουμε στους ουραμούς ή στα βάθη εγκαταλελειμμένων ορυχείων, αλλά να την αναδημιουργήσουμε στο εργαστήριο! Λίγο έξω από την Γενεύη, βρίσκεται ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Πυρηνικών Ερευνών **CERN**, το σπουδαιότερο ερευνητικό κέντρο στην φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων. Χιλιάδες φυσικοί απ' όλον τον κόσμο συνεργάζονται εδώ, διερευνώντας ορισμένα από τα πλέον θεμελιώδη και αναπάντητα ακόμη

ερωτήματα για τα βασικά δομικά συστατικά της ύλης και την λειτουργία του Σύμπαντος. Και εδώ ακριβώς, μία ομάδα φυσικών προσπαθεί να αναδημιουργήσει και να ανιχνεύσει σωματίδια σκοτεινής ύλης.

Αρκετές δεκάδες μέτρα κάτω από τα γαλλοελβετικά σύνορα, λειτουργεί ο Μεγάλος Αδρονικός Επιταχυντής **LHC**: ο μεγαλύτερος, ισχυρότερος και πιο πολυπλοκός επιταχυντής σωματιδίων που έχει κατασκευαστεί ποτέ. Εγκατεστημένος σε μία κυκλική σήραγγα 27 km, ο LHC επιταχύνει με την βοήθεια ηλεκτρικών πεδίων αντίθετα κινούμενες δέσμες πρωτονίων ή/και ιόντων μολύβδου σε ταχύτητες παραπλήσιες με την ταχύτητα του φωτός, προσδίδοντάς τους τεράστιες ενέργειες. Χιλιάδες πανίσχυροι μαγνήτες, τοποθετη-

Χάρτης που δείχνει την σήραγγα του επιταχυντή LHC, καθώς και την θέση των 4 ανιχνευτών ATLAS, CMS, ALICE και LHCb.



μένοι περιμετρικά του κεντρικού δακτυλίου, καθοδηγούν τις δέσμες αυτές στις κυκλικές τους τροχιές και εντέλει τις κατευθύνουν σε διαφορετικά σημεία, όπου οι δύο δέσμες συγκρούονται μετωπικά, μετατρέποντας την ενέργειά τους σε νέα σωματίδια. Όσο, μάλιστα, μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των συγκρουόμενων σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερη είναι η μάζα των νέων σωματιδίων που παράγονται, ενώ συχνά παράγονται σωματίδια με μάζα πολύ μεγαλύτερη εκείνων που τα δημιούργησαν. Για την ανίχνευση και καταγραφή των δεδομένων που παράγονται από τις εκατοντάδες εκατ. συγκρούσεις σωματιδίων το δευτερόλεπτο, στα 4 σημεία όπου οι δέσμες διασταυρώνονται έχουν εγκατασταθεί 4 ανιχνευτές πρωτόγνωρης ακρίβειας και ευαισθησίας. Οι πληροφορίες που καταγράφουν για τις τροχιές, την ενέργεια, την μάζα και το ηλεκτρικό φορτίο των νέων σωματιδίων βοηθούν τους φυσικούς να προσδιορίσουν την ταυτότητά τους.

Τα πειράματα που διεξάγονται στον LHC παράγουν 15 εκατ. gigabytes δεδομένων τον χρόνο. Αρκεί μόνο να πούμε ότι, εάν αποθηκεύονταν όλα τα δεδομένα που καταγράφει ο ένας μόνο από τους δύο μεγαλύτερους ανιχνευτές, θα γέμιζαν 100.000 CD το δευτερόλεπτο, αρκετά για να δημιουργήσουμε μία στοίβα που θα έφτανε ως τη Σελήνη σε 6 μήνες! Προκειμένου να μειωθεί ο τεράστιος αυτός όγκος των δεδομένων σε πιο διαχειρίσιμα νούμερα, ειδικά υπολογιστικά συστήματα «φιλτράρουν» τα περισσότερα απ' αυτά, αποστέλλοντας εκείνα που κρίνονται πιο σημαντικά στους κεντρικούς υπολογιστές του CERN για αποθήκευση και μελλοντική ανάλυση. Ακόμα και έτσι όμως, ο όγκος των δεδομένων παραμένει μεγάλος, γι' αυτό και λειτουργεί ένα παγκόσμιο δίκτυο υπολογιστών, το οποίο μεταφέρει τα δεδομένα αυτά σε κάθε γωνιά της Γης, σε όλα τα ερευνητικά ινστιτούτα που συμμετέχουν σ' αυτά τα πειράματα.

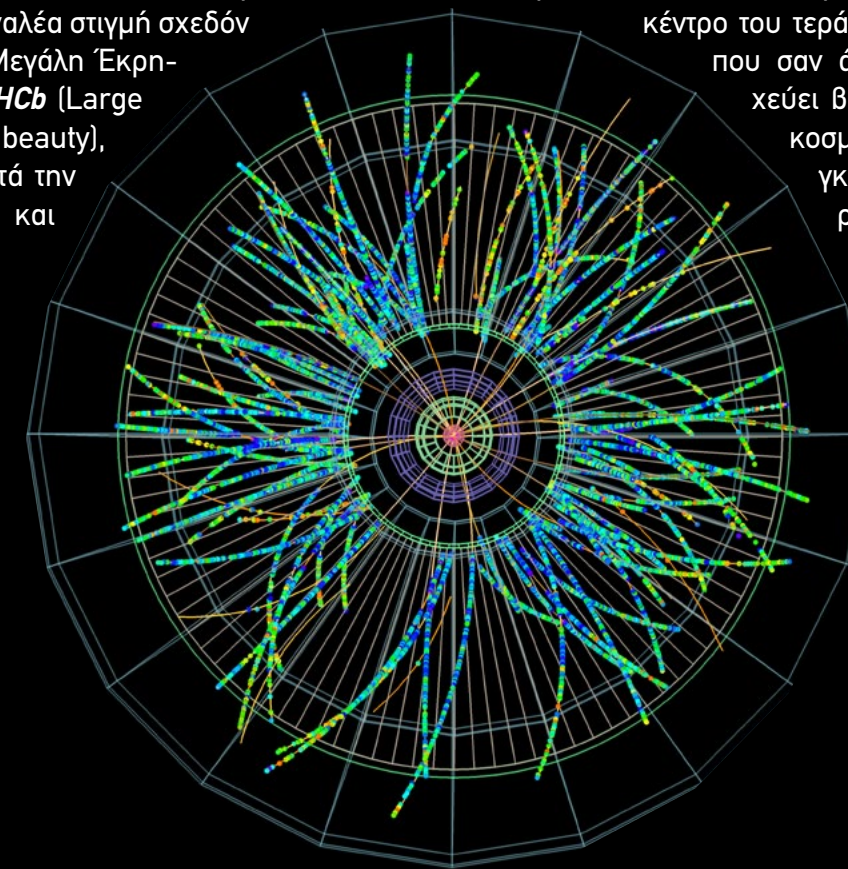


Ισχυροί διακομιστές που χρησιμοποιεί το CERN για το Υπολογιστικό Πλέγμα του LHC (φωτογρ. CERN).

Ο ανιχνευτής **ALICE** (A Large Ion Collider Experiment), για παράδειγμα, διερευνά το επονομαζόμενο **πλάσμα κουάρκ-γλουονίων**, μέσα από την καταγραφή και την ανάλυση των σωματιδίων που σχηματίζονται κατά τις συγκρούσεις ιόντων μολύβδου, οι οποίες παράγουν θερμοκρασίες 100.000 φορές υψηλότερες απ' αυτές που επικρατούν στο κέντρο του Ήλιου. Στις θερμοκρασίες αυτές τα πρωτόνια και τα νετρόνια «αποδεσμεύουν» τα κουάρκ και τα γλουόνια, δημιουργώντας το πλάσμα κουάρκ-γλουονίων, δηλαδή μία κατάσταση ύλης που θεωρείται ότι υπήρξε για μία φευγαλέα στιγμή σχεδόν αμέσως μετά την Μεγάλη Έκρηξη. Ο ανιχνευτής **LHCb** (Large Hadron Collider beauty), από την άλλη, μελετά την ασυμμετρία ύλης και αντιύλης.

Οι δύο μεγαλύτεροι ανιχνευτές **CMS** (Compact Muon Solenoid) και **ATLAS** (A Toroidal LHC ApparatuS) είναι πειραματικές διατάξεις «γενικού σκοπού», καθώς και οι δύο έχουν σχεδιαστεί έτσι, ώστε να διερευνούν μία ευρύτατη ποικιλία φυσικών φαινομένων: από τον μηχανισμό που προσδίδει στα θεμελιώδη σωματίδια την μάζα τους μέχρι την ύπαρξη επιπλέον χωρικών διαστάσεων και την φύση της σκοτεινής ύλης. Ο ATLAS, ειδικότερα, με ύψος όσο μία οκταώροφη πολυκατοικία και με βάρος 7.000 τόνων, απασχολεί περισσότερους από 3.000 επιστήμονες από 38 χώρες. Στο

κέντρο του τεράστιου αυτού ανιχνευτή, που σαν άλλο μικροσκόπιο στοχεύει βαθιά μέσα στον μικρόκοσμο των σωματιδίων, συγκρούονται πρωτόνια, με ρυθμό ακόμη και 1 δισ. συγκρούσεις το δευτε-

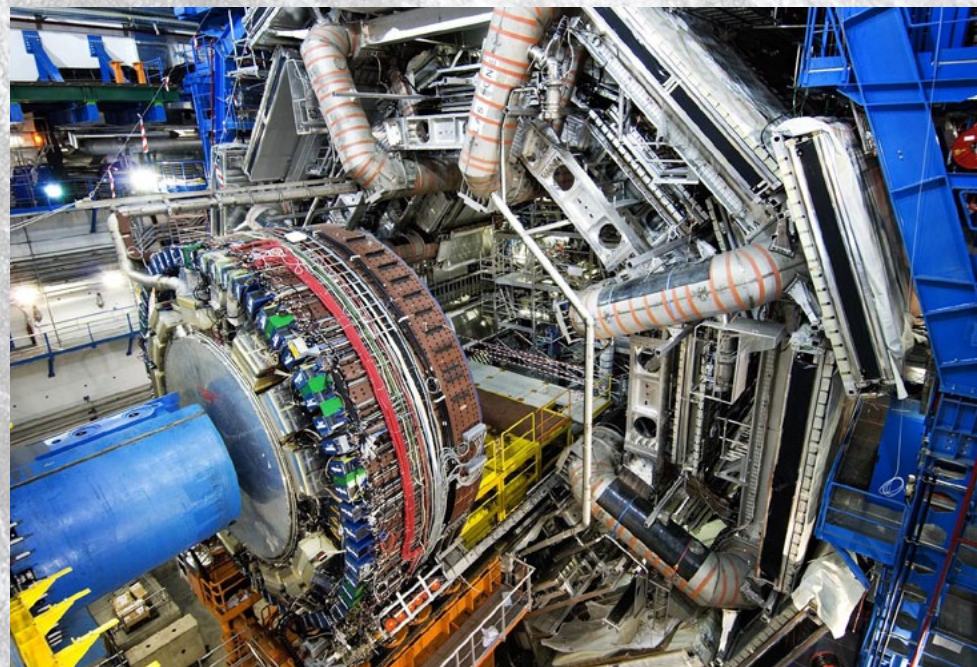


Τα δεδομένα που κατέγραψε ο ανιχνευτής ALICE σε δύο από τις πρώτες συγκρούσεις πρωτονίων-μολύβδου το 2013 (φωτογρ. © 2012 CERN, for the benefit of the ALICE Collaboration).

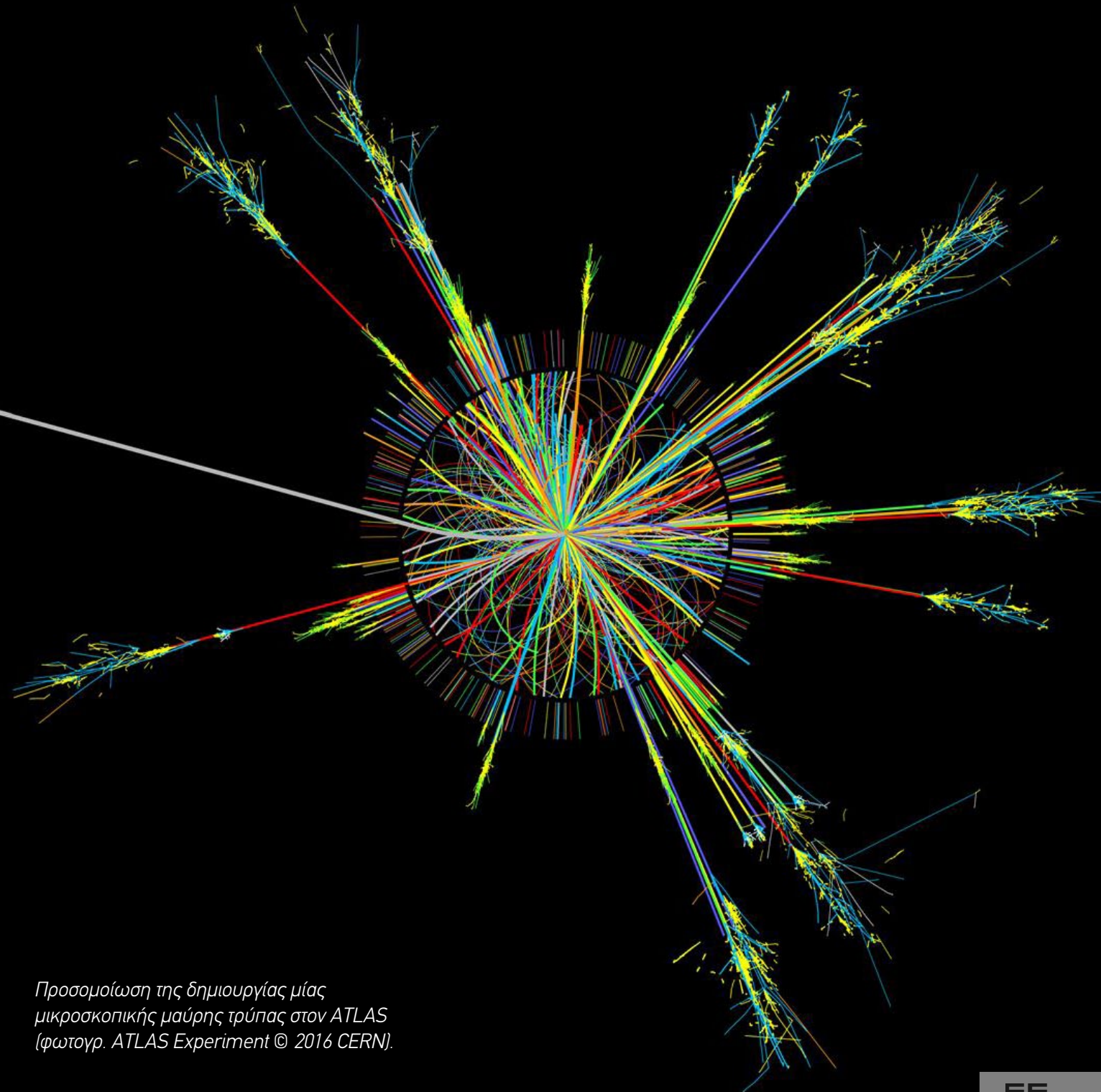
ρόλεπτο, απελευθερώνοντας τεράστια ποσά ενέργειας, που μετασχηματίζονται σε εκατοντάδες νέα σωματίδια. Ο ATLAS καταγράφει τις συγκρούσεις αυτές με πολλαπλούς ανιχνευτές, τοποθετημένους σε ομόκεντρες στοιβάδες, καθένας απ' τους οποίους ανιχνεύει διαφορετικά σωματίδια. Το παράδοξο όμως είναι ότι, εάν σχηματιστούν σωματίδια σκοτεινής ύλης, ο ATLAS δεν θα μπορεί να τα ανιχνεύσει. Επειδή, όμως, τα σωματίδια αυτά μεταφέρουν ενέργεια και ορμή και επειδή η ενέργεια και η ορμή πριν και μετά από μία σύγκρουση σωματιδίων διατηρούνται, οι φυσικοί θα συμπεραίνουν την ύπαρξη σωματιδίων σκοτεινής ύλης από το ποσοστό της ενέργειας και της ορμής που θα είχε «χαθεί» μετά από την σύγκρουση.

Παρόλο που δεν έχουμε ακόμη κατορθώσει να ανακαλύψουμε από τι αποτελείται η σκοτεινή ύλη, η προ-

σπάθεια συνεχίζεται. Από τον LHC, τον ισχυρότερο επιταχυντή σωματιδίων του κόσμου, μέχρι τους ανιχνευτές σκοτεινής ύλης που έχουν εγκατασταθεί στα βάθη εγκαταλελειμμένων ορυχείων, και από τον ανιχνευτή νετρίνων ICECUBE της Ανταρκτικής μέχρι τα διαστημικά μας τηλεσκόπια, το «κυνήγι» για την ανίχνευση της σκοτεινής ύλης και για την κατανόηση της φύσης της συνεχίζεται πιο έντονο από ποτέ. Δεν χρειάζεται να πούμε ότι εάν οι επιστήμονες κατορθώσουν να ανιχνεύσουν WIMPs, αξιόνια ή οποιοδήποτε άλλο σωματίδιο μπορεί να απαρτίζει την σκοτεινή ύλη, το γεγονός αυτό θα αποτελέσει ορόσημο στην εξέλιξη των φυσικών επιστημών και θα ανοίξει τον δρόμο σε νέα, ανεξερεύνητα ακόμη, πεδία έρευνας, πέρα από τα Καθιερωμένα Πρότυπα, που περιγράφουν τον μικρόκοσμο των στοιχειωδών σωματιδίων και τον μακρόκοσμο του Σύμπαντος.



Ο γιγάντιος ανιχνευτής ATLAS κατά την συναρμολόγησή του (φωτογρ. ATLAS Experiment © 2007 CERN).



Προσομοίωση της δημιουργίας μίας μικροσκοπικής μαύρης τρύπας στον ATLAS (φωτογρ. ATLAS Experiment © 2016 CERN).

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ★ Ξανθόπουλος, Βασίλης Κ., *Περί αστέρων και συμπάντων*, 3^η έκδ., Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1991.
- ★ Οικονόμου, Ελευθέριος Ν., *Από τα κουάρκ μέχρι το σύμπαν: μια σύντομη περιήγηση*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2012.
- ★ Balbi, Amedeo, *The music of the big bang: the cosmic microwave background and cosmology*, Springer, c2008.
- ★ Barnett, R. Michael, *Η γοητεία των παράξενων κουάρκ: αινίγματα και επαναστάσεις στη φυσική σωματιδίων*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, c2006.
- ★ Barrow, John D., *Η απαρχή του σύμπαντος: περιήγηση στη μοντέρνα κοσμολογία*, Κάτοπτρο, 1995.
- ★ Beech, Martin, *The Large Hadron Collider: unraveling the mysteries of the universe*, Springer, 2010.
- ★ Carrigan, Richard A., *Particle physics in the Cosmos: readings from Scientific American Magazine*, Freeman W.H., 1989.
- ★ Cornell, James, *Bubbles voids, and bumps in time: the new cosmology*, Cambridge University Press, 1993.
- ★ Einstein, Albert, *Η θεμελίωση της γενικής θεωρίας της σχετικότητας*, Τροχαλία, 1999.
- ★ Galfard, Christophe, *Το σύμπαν στα χέρια σας: ένα ταξίδι στον πραγματικό κόσμο της επιστήμης*, Καλέντης, 2016.

- ★ Galison, Peter Louis, *Einstein for the 21st century: his legacy in science, art, and modern culture*, Princeton University Press, c2008.
- ★ Garfinkle, David, *Three steps to the universe: from the sun to black holes to the mystery of dark matter*, University of Chicago Press, c2008.
- ★ Gates, Evalyn, *Einstein's telescope: the hunt of dark matter and dark energy in the universe*, Norton W.W. & Company, c2009.
- ★ Greene, Brian, *The elegant universe: superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory*, Random House/Vintage, 2000.
- ★ Gribbin, John, *Μια βιογραφία του σύμπαντος*, Μεταίχμιο, 2008.
- ★ Gubser, Steven S., *The little book of string theory*, Princeton University Press, c2010.
- ★ Guth, Alan H., *The inflationary universe: the quest for a new theory of cosmic origins*, Jonathan Cape, 1997.
- ★ Hawking, Stephen, *Το χρονικό του χρόνου: από τη μεγάλη έκρηξη ως τις μαύρες τρύπες*, Κάτοπτρο, 1997.
- ★ Hawking, Stephen, *Ένα συντομότερο χρονικό του χρόνου*, Κάτοπτρο, 2005.
- ★ Hogan, Craig J., *Το μικρό βιβλίο της μεγάλης έκρηξης: ένα αλφαβητάρι για το Big Bang*, Αλεξάνδρεια, 2008.
- ★ Krauss, Lawrence, *Σκοτεινή ύλη: η πεμπουσία του σύμπαντος*, Τραυλός, 2005.
- ★ Krauss, Lawrence, *Ένα σύμπαν από το τίποτε*, Τραυλός, 2012.
- ★ Liddle, Andrew R., *An introduction to modern cosmology* 2nd ed., Wiley, c 2003.
- ★ Lincoln, Don, *Understanding the universe: from quarks to the cosmos*, World Scientific, 2004.
- ★ Rees, Martin, *Μόνο έξι αριθμοί: οι θεμελιώδεις δυνάμεις που διαμορφώνουν το Σύμπαν*, Κάτοπτρο, 2001.
- ★ Silk, Joseph, *Στις ακτές του αγνώστου: μια συνοπτική ιστορία του σύμπαντος*, Αλεξάνδρεια, 2010.
- ★ Singh, Simon, *Big Bang: η πιο σημαντική επιστημονική ανακάλυψη όλων των εποχών*, Τραυλός, 2005.
- ★ Thorne, Kip S., *Μαύρες τρύπες και στρεβλώσεις του χρόνου: η προκλητική κληρονομιά του Αϊνστάιν*, Κάτοπτρο, 1999.
- ★ Weinberg, Steven, *Όνειρα για μια τελική θεωρία: η αναζήτηση των θεμελιωδών νόμων της φύσης*, Κάτοπτρο, 1995.
- ★ Weinberg, Steven, *Τα πρώτα τρία λεπτά: μια σύγχρονη άποψη για την προέλευση του σύμπαντος*, Octavision Media, 2006.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ

ευχαριστούμε θερμά τους
R. MICHAEL BARNETT
KAUSHIK DE
REINHARD SCHWIENHORST
MARKUS NORDBERG
CARMEN GARCIA
GEORGE F SMOOT III
για την άδειά τους να χρησιμοποιήσουμε
σκηνές από την παραγωγή τους
PHANTOM OF THE UNIVERSE
The Hunt for Dark Matter

αφήγηση
ΓΙΩΡΓΟΣ ΠΥΡΓΙΑΣΟΠΟΥΛΟΣ

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 & compositor
ΓΙΑΝΝΗΣ ΒΑΜΒΑΚΑΣ

graphic design
ΕΥΓΕΝΙΑ ΣΤΑΒΑΡΗ

digital printing support
ΗΛΙΑΣ ΜΠΑΛΝΤΑΣ

τεχνικοί πλανηταρίου
ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΛΟΥΒΑΡΗΣ, ΧΡΗΣΤΟΣ ΧΡΗΣΤΟΓΙΩΡΓΟΣ

computer graphics & 3D animation services
PHANTOM OF THE UNIVERSE
CERN/ATLAS IMAGES
DENVER MUSEUM OF NATURE & SCIENCE
ESO IMAGES

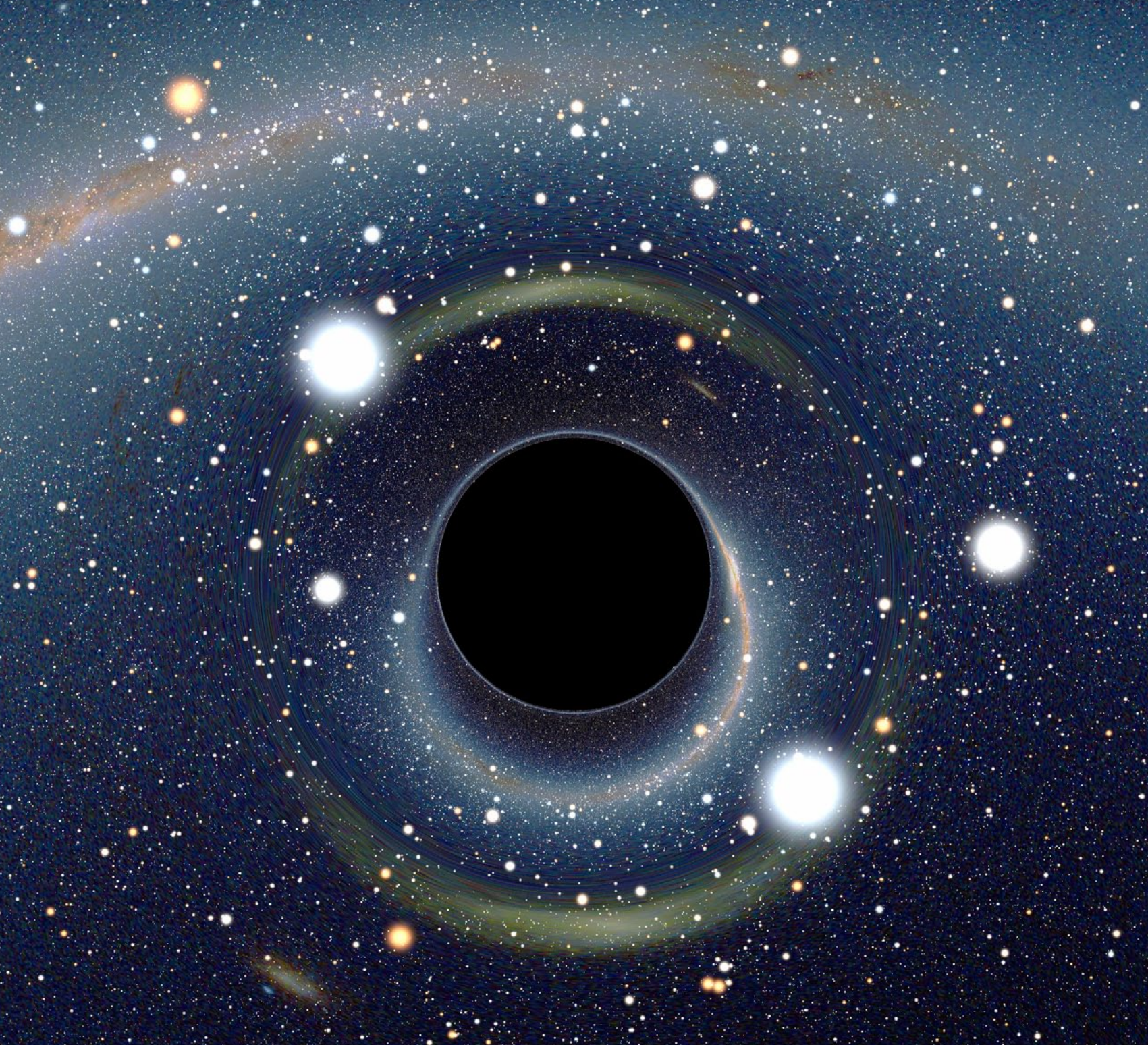
FULLDOMELAB IMMERSIVE MEDIA,
HUBBLE SPACE TELESCOPE IMAGES
ICECUBE IMAGES
LSST IMAGES
MIRAGE 3D STUDIO
MUSEUM OF SCIENCE
NASA IMAGES
NORTHDOCKS
SOFTMACHINE
SKY-SKAN

fulldome & post-production video services
ΕΥΓΕΝΙΔΕΙΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ

post-production audio services
STARGAZER AUDIO



παραγωγή
ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
© 2018



ΣΕΛΙΔΟΠΟΙΗΣΗ - ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΚΔΟΣΕΩΣ: ΕΚΔΟΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ