

Η Σκοτεινή Ενέργεια Μέρος 3ο

Άρθρο του Robert R Caldwell, Από το περιοδικό Physics World, Μάιος 2004

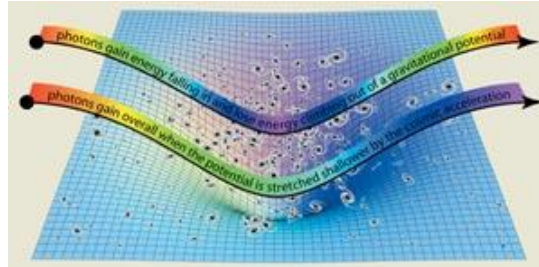
1ο, 2ο, 3ο, 4ο

Κοσμική αρμονία

Η μόνη άμεση ένδειξη που έχουμε για την κοσμική επιτάχυνση προέρχεται από τα δεδομένα των σούπερ νόβα. Τα πράγματα όμως αρχίζουν να αλλάζουν. Συνδυάζοντας τις ακριβείς μετρήσεις του CMB από τον WMAP, με ανιχνευτές ραδιοσημάτων, οπτικού φάσματος και ακτίνων X, οι οποίοι ανιχνεύουν πολύ μεγάλης κλίμακας κατανομές της ύλης, οι αστροφυσικοί αρχίζουν να έχουν και άλλες ενδείξεις ότι η διαστολή επιταχύνεται. Φαίνεται ότι τα φρέατα βαρυτικού δυναμικού των πυκνών και υπέρ-πυκνών περιοχών του σύμπαντος, έχουν τεντωθεί αρκετά και έχουν γίνει πιο ρηχά με τον χρόνο, σα να βρίσκονται υπό την επήρεια απωστικής βαρύτητας.

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ολοκληρωμένο φαινόμενο Sachs-Wolfe (ISW), και οδηγεί σε συσχέτιση μεταξύ ανισοτροπιών της θερμοκρασίας του CMB και της πολύ μεγάλης κλίμακας δομής του σύμπαντος. Αν και το πρωταρχικό πλάσμα έγινε διαφανές στα φωτόνια μετά την ψύξη του σύμπαντος, τα φωτόνια δεν ταξίδεψαν ανεμπόδιστα στη συνέχεια. Ο κόσμος ήταν γεμάτος με ισχυρές ανομοιογένειες στη μικρή κλίμακα, (όπου η ύλη έχει αρχίσει να συγκεντρώνεται για να σχηματιστούν άστρα, νεφελώματα και γαλαξίες.) ενώ οι ανομοιογένειες αυτές εξασθενούν προοδευτικά όσο πηγαίνουμε σε μεγαλύτερες κλίμακες, όπου γαλαξίες και σμήνη γαλαξιών ακολουθούν κάποιες κυμάνσεις της πυκνότητας της ύλης. Κατά τις διαδρομές τους τα φωτόνια είτε πέφτουν μέσα στα αντίστοιχα φρέατα βαρυτικού είτε σκαρφαλώνουν στα τοιχώματα αυτών των φρεάτων.

Όταν πρωτανιχνεύτηκε η κοσμική ακτινοβολία πριν από 40 χρόνια, οι Rainer Sachs και Art Wolfe έδειξαν ότι ένα δυναμικό μεταβαλλόμενο με το χρόνο θα προσδώσει μια ενεργειακή μετατόπιση στα φωτόνια του CMB που περνούν μέσα από αυτό (εικόνα 2).



Εικόνα 2.

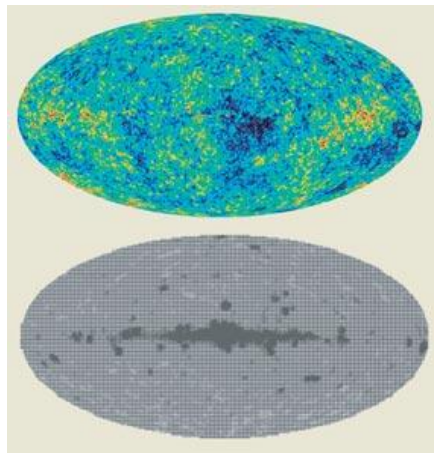
Ένα φωτόνιο κερδίζει ενέργεια όταν πέφτει μέσα σε βαρυτικό δυναμικό μιας υπέρ-πυκνής περιοχής και δαπανά ενέργεια όταν σκαρφαλώνει ξανά έξω από την περιοχή του δυναμικού. Αν το φρέαρ του δυναμικού έχει βαθύνει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εισόδου-εξόδου, το φωτόνιο χάνει συνολικά ενέργεια. Αν το δυναμικό έχει γίνει πιο ρηχό με τον χρόνο, το φωτόνιο κερδίζει συνολικά ενέργεια.

Σ' ένα σύμπαν που ολόκληρη η κρίσιμη ενεργειακή πυκνότητα προέρχεται μόνο από άτομα και τη σκοτεινή ύλη, τα ασθενή βαρυτικά δυναμικά σε πολύ μεγάλες κλίμακες - που αντιστοιχούν σε ήπιες κυμάνσεις της πυκνότητας ύλης, εξελίσσονται πολύ αργά για να αφήσουν κάποιο αποτύπωμα στα φωτόνια του CMB. Αυτές οι υπέρ-πυκνές περιοχές απλά συγκεντρώνουν την ύλη των γύρω περιοχών με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο η κοσμική διαστολή τεντώνει τα κύματα, κάνοντάς τα πιο μακριά, κι έτσι τα δυναμικά μένουν αναλλοίωτα. Κάτω από τη πολύ γρήγορη όμως διαστολή ενός σύμπαντος που περιέχει σκοτεινή ενέργεια, η συγκεντρωση της ύλης δεν μπορεί να αντισταθμίσει το τέντωμα των κυμάτων. Ως αποτέλεσμα, η βαρυτική κατάρρευση επιβραδύνεται από την απωστική σκοτεινή ενέργεια. Συνεπώς τα βαρυτικά δυναμικά γίνονται πιο ρηχά, και τα φωτόνια κερδίζουν συνολικά ενέργεια καθώς τα διασχίζουν.

Αποδεικνύεται ότι τα πολύ μεγάλης κλίμακας βαρυτικά δυναμικά που επηρεάζουν τα φωτόνια του CMB, αντιστοιχούν στις ίδιες υπέρ-πυκνές / υπέρ-αραιές περιοχές που παρατηρούμε στις πολύ μεγάλης κλίμακας επισκοπήσεις του ουρανού με διάφορα μήκη κύματος. Τα φωτόνια του CMB που προέρχονται από τις περιοχές εκείνες όπου οι γαλαξίες σχηματίζουν έντονες συγκεντρώσεις, εμφανίζονται λίγο θερμότερα, όπως προβλέπει το φαινόμενο ISW. Έτσι θα μπορούσε να υπάρξει ένας έντονος συσχέτισμος μεταξύ της θερμοκρασίας CMB και των πολύ μεγάλης κλίμακας δομών στον ουρανό. Τώρα, σχεδόν 5 χρόνια μετά τα πρώτα αποτελέσματα

των σούπερ-νόβα, 4 ανεξάρτητες ομάδες ανήγγειλαν την πρώτη ανίχνευση του φαινομένου ISW.

Ο Stephen Boughn του κολεγίου Haverford και ο Robert Crittenden του πανεπιστημίου του Portsmouth βρήκαν συσχετισμούς μεταξύ των δεδομένων του WMAP και δύο ανιχνευτών της δομής πολύ μεγάλης κλίμακας: ραδιοδεδομένα από το πρόγραμμα ανίχνευσης NRAO/VLA Sky Survey (NVSS) και μετρήσεις του υποβάθρου των πολύ σκληρών ακτίνων X που έγιναν από τον δορυφόρο HEAO-1, που εκτοξεύτηκε το 1977 (εικόνα 3).



Εικόνα 3.

Η ομάδα του WMAP έχει επίσης δει συσχετισμούς μεταξύ των δεδομένων της και των αποτελεσμάτων του NVSS. Επιπλέον η ομάδα του Sloan Digital Sky Survey, από κοινού με τον Pablo Fosalba του Ινστιτούτου Αστροφυσικής στο Παρίσι, και τους συνεργάτες του, βρήκαν ενδείξεις για το φαινόμενο ISW όταν συνέκριναν τα δεδομένα του WMAP και του SDSS.

Αν και η ένδειξη του φαινομένου ISW από μόνη της δεν είναι ακόμη αρκετά ισχυρή ώστε να διακρίνει μεταξύ διαστολής που προκαλείται από χωρική καμπύλωση και διαστολή που προκαλείται από σκοτεινή ενέργεια, όταν συνδυαστεί με τα δεδομένα του CMB που μιλούν για ένα επίπεδο σύμπαν, το βάρος της ένδειξης γέρνει υπέρ της σκοτεινής ενέργειας. Απο κοινού τα δεδομένα αυτά μας βάζουν σε πειρασμό. Επιπλέον, οι διερευνητές για ενδείξεις του φαινομένου ISW ερευνούν για αποτελέσματα της σκοτεινής ενέργειας μέχρι αποστάσεις των 100 Mpc, που είναι μια κλίμακα μεγέθους τελείως διαφορετική από αυτήν των σούπερ-νόβα. Κάτι τέτοιο μας δίνει μια νέα και ανεξάρτητη σειρά ενδείξεων για τα αποτελέσματα της σκοτεινής ενέργειας.

Αρνητική πίεση

Το μεγαλύτερο μυστήριο της κοσμικής επιτάχυνσης δεν είναι ότι τα δύο τρίτα του σύμπαντος είναι φτιαγμένα από ύλη που δεν μπορούμε να δούμε, αλλά ότι υπαινίσσεται την ύπαρξη μιας ουσίας που προκαλεί βαρυτική άπωση. Για να εξετάσουμε αυτήν την παράξενη ιδιότητα της σκοτεινής ενέργειας βοηθάει η εισαγωγή της ποσότητας $w = p_{\text{dark}}/\rho_{\text{dark}}$, όπου p_{dark} είναι η μέση πίεση και ρ_{dark} είναι η πυκνότητα της σκοτεινής ενέργειας στο σύμπαν. Η νέα αυτή ποσότητα είναι παρόμοια με την εξίσωση κατάστασης ενός αερίου.

Στη Γενική Σχετικότητα, ο ρυθμός μεταβολής της κοσμικής διαστολής είναι ανάλογος με $-(\rho_{\text{total}} + 3p_{\text{total}})$, όπου ρ_{total} είναι η πυκνότητα όλης της ύλης και της ενέργειας του σύμπαντος και p_{total} είναι η αντίστοιχη πίεση. Για να έχουμε όμως επιταχυνόμενη διαστολή πρέπει η ποσότητα αυτή να είναι θετική. Αφού η ρ_{total} είναι θετική ποσότητα, και η μέση πίεση που οφείλεται στη συνηθισμένη ύλη και τη σκοτεινή ύλη από κοινού, είναι αμελητέα γιατί είναι ψυχρή και συνεπώς μη σχετικιστική, φτάνουμε στην απαίτηση ότι $3w \times \rho_{\text{dark}} + \rho_{\text{total}} < 0$ για μια επιταχυνόμενη διαστολή. Επειδή $\rho_{\text{dark}} \sim^{2/3} \rho_{\text{total}}$ βρίσκουμε ότι $w < -1/2$, κι έτσι η πίεση της σκοτεινής ενέργειας δεν είναι μια μικρή αρνητική ποσότητα, αλλά μεγάλη και αρνητική!

Γιατί όμως η πίεση επηρεάζει τη διαστολή του σύμπαντος; Ο Einstein έδειξε ότι η ύλη και η ενέργεια καμπυλώνουν τον χωροχρόνο. Έτσι λοιπόν για ένα θερμό αέριο, οι άτακτες κινήσεις των ατόμων συμβάλλουν στη βαρυτική έλξη τους, όπως αυτή προσδιορίζεται από την επιτάχυνση μακρινών σωματιδίων υποθεμάτων. Όμως οι δυνάμεις που απαιτούνται για να περιορίσουμε ή να απομονώσουμε το θερμό αέριο είναι αντίθετες προς αυτή την πίεση του αερίου. Το σύμπαν, από την άλλη πλευρά, δεν είναι ούτε περιορισμένο ούτε απομονωμένο. Η διαστολή του σύμπαντος που είναι γεμάτο με θερμά αέρια, επιβραδύνεται από την ελκτική δύναμη της δικής του βαρύτητας, πιο πολύ από ένα σύμπαν που είναι γεμάτο με την ισοδύναμη

ενέργεια ενός ψυχρού αερίου χωρίς πίεση. Και με την ίδια λογική, ένα μέσον που επιτρέπει αρνητική πίεση έτσι ώστε $\rho_{\text{total}} + 3p_{\text{total}} < 0$, θα διαστέλλεται πιο γρήγορα, με τις δικές του απωστικές δυνάμεις αντιβαρύτητας.

Η αρνητική πίεση δεν είναι ένα σπάνιο φαινόμενο. Η πίεση του νερού σε μερικά ψηλά δέντρα γίνεται αρνητική, καθώς οι θρεπτικές ουσίες ανεβαίνουν προς τα επάνω μέσω των σωληνίσκων του φυτού, και η πίεση επαπτομενικά προς ένα ομογενές ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο είναι επίσης αρνητική. Στις περιπτώσεις αυτές, η πίεση μοιάζει κάπως σαν ένα τεντωμένο ελατήριο, το οποίο ασκεί μια δύναμη προς τα έσω. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, μια θάλασσα από μποζόνια Higgs - τα υποθετικά σωματίδια που είναι υπεύθυνα για τη γέννηση της μάζας στο καθιερωμένο μοντέλο της σωματιδιακής φυσικής - ασκούν αρνητικές πιέσεις όταν οι θερμικές ή κινητικές διεγέρσεις της είναι μικρές. Πράγματι, το ίνφλατον μπορεί να θεωρηθεί ως μια βαρύτερη εκδοχή του Higgs, και μια από τις προταθείσες μορφές της σκοτεινής ενέργειας που λέγεται πεμπτουσία, μπορεί να είναι μια ακόμα ελαφρύτερη εκδοχή του Higgs. **(βλέπε το παράθεμα: Σκοτεινή ενέργεια. Οι ύποπτοι).**

Κατ' αρχήν, δεν υπάρχει κατώτατο όριο για την πίεση στο σύμπαν, αν και αρχίζουν να συμβαίνουν παράξενα πράγματα καθώς μειώνεται η τιμή του w κάτω από την τιμή -1 (μια απομονωμένη συγκέντρωση από τέτοιο υλικό θα έμοιαζε να έχει αρνητική μάζα, πράγμα που είναι ότι ακριβώς θα χρειαζόταν κάποιος για να διανοίξει μια σκουληκότρυπα. Όμως, οι πιο πολλές προταθείσες μορφές σκοτεινής ενέργειας μπορούν να προκαλούν μόνο μια μικρή παραμόρφωση στο χώρο, και ακόμη και τότε μόνο σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες από τις διαστάσεις των γαλαξιών, κι έτσι γίνεται πολύ δύσκολη η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων τους. Ένα πράγμα όμως είναι βέβαιο: Τέτοιες ισχυρά αρνητικές πιέσεις δεν συμβαίνουν για τα συνηθισμένα σωματίδια και πεδία στη γενική σχετικότητα.

Οι λεπτομερείς παρατηρήσεις οδηγούν σε κάποιους περιορισμούς για τις παραμέτρους της σκοτεινής ενέργειας, μεγαλύτερους οπωσδήποτε από αυτούς που αναφέραμε πιο πάνω. Όταν οι προβλέψεις των διαφόρων θεωρητικών μοντέλων συνδυαστούν με τις καλύτερες μετρήσεις μας της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου, τις συγκεντρώσεις των γαλαξιών και τις αποστάσεις των σούπερ νόβα, βρίσκουμε ότι $0.62 < \Omega_{\text{dark}} < 0.76$, όπου $\Omega_{\text{dark}} = \rho_{\text{dark}}/\rho_{\text{critical}}$ και $-1.3 < w < -0.9$.