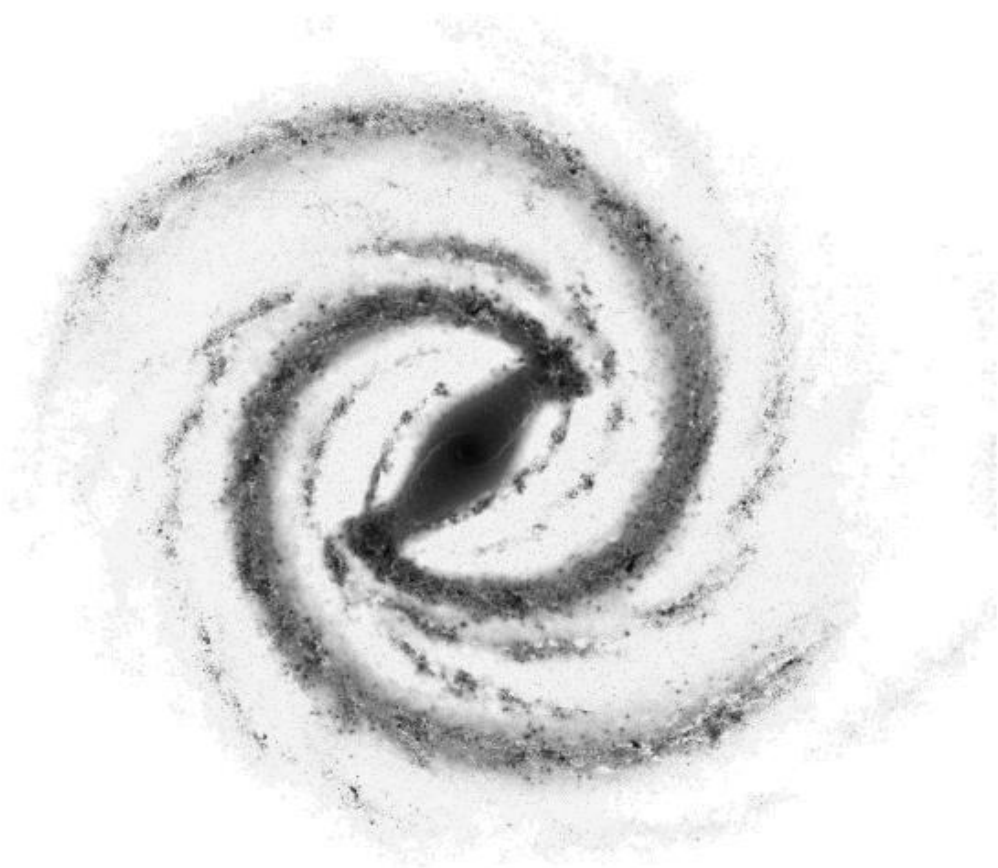


Ο Νόμος του Hubble και η διαστολή του Σύμπαντος



Ίδρυμα Ευγενίδου

Δημήτριος Σταθόπουλος: Δρ. Αστροφυσικής

Κωνσταντίνος Μουστάκας: Φυσικός



Πίνακας περιεχομένων

1.	Στόχοι.....	1
2.	Εισαγωγή.....	2
3.	Το διάγραμμα Hubble.....	4
3.1.	Υπολογισμός της ερυθρομετάθεσης (z) και της ταχύτητας απομάκρυνσης γαλαξιών	4
3.1.1.	Φάσματα γαλαξιών	5
3.1.2.	Αναγνώριση φασματικών γραμμών	6
3.1.3.	Υπολογισμός ερυθρομετάθεσης (z)	12
3.1.4.	Υπολογισμός της ταχύτητας απομάκρυνσης	12
3.1.5.	Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	13
3.2.	Υπολογισμός της απόστασης των γαλαξιών.....	14
3.3.	Διάγραμμα Hubble.....	16
4.	Κοσμολογική vs Doppler μετατόπισης	18
5.	Φύλλο αξιολόγησης.....	21
6.	Βιβλιογραφία.....	22

1. Στόχοι

Η χρήση και ανάλυση πραγματικών αστρονομικών δεδομένων.

Η σύνταξη πίνακα δεδομένων με τα στοιχεία δείγματος γαλαξιών.

Η κατασκευή διαγράμματος και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Αναγνώριση φασματικών γραμμών

Ο καθορισμός της ερυθρομετάθεσης γαλαξία μέσω φασματικών γραμμών.

Ο υπολογισμός της ταχύτητας απομάκρυνσης ενός γαλαξία.

Ο καθορισμός της σχέσης μεταξύ της απόστασης και της ταχύτητας απομάκρυνσης ενός γαλαξία.

Ο προσδιορισμός της σταθεράς του Hubble.

Ο προσδιορισμός της ηλικίας του Σύμπαντος.

2. Εισαγωγή

Η διαστολή του Σύμπαντος είναι μία από τις πιο αναπάντεχες και πιο σημαντικές ανακαλύψεις που έλαβαν χώρα τον 20^ο αιώνα. Για δεκάδες χιλιάδες χρόνια ο άνθρωπος θεωρούσε πως το Σύμπαν ήταν σταθερό, δηλαδή αποτελούσε μια αμετάβλητη σκηνή πάνω στην οποία εκδηλώνονταν τα διάφορα αστρονομικά φαινόμενα. Όμως, τις δεκαετίες του 1910 και του 1920 διαφορετικοί φυσικοί και αστρονόμοι έκαναν μια σειρά ανακαλύψεων οι οποίες ήταν αδύνατο να ερμηνευθούν με την υπάρχουσα γνώση. Κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1920 οι ανακαλύψεις αυτές άρχισαν να συνδυάζονται με αποτέλεσμα το 1929 ο Edwin Hubble να δημοσιεύσει ένα άρθρο το οποίο εξηγούσε τις μέχρι πρότινος ανερμήνευτες ανακαλύψεις.

Πιο συγκεκριμένα, το 1915 ο Albert Einstein δημοσίευσε την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας μέσω της οποίας εξήγησε πως λειτουργεί η βαρύτητα. Όταν ο Einstein εφάρμοσε τη θεωρία σε ολόκληρο το Σύμπαν βρήκε κάτι ιδιαίτερα περίεργο: ο χωρόχρονος θα πρέπει να είναι δυναμικός, είτε να συστέλλεται είτε να διαστέλλεται. Ο Einstein αρνήθηκε να αποδεχθεί τις ίδιες του τις εξισώσεις καθώς και αυτός όπως και όλοι οι αστρονόμοι εδώ και χιλιάδες χρόνια θεωρούσε ότι το Σύμπαν είναι στατικό και δεν μεταβάλλεται.

Κατά την ίδια περίοδο ο αστρονόμος Vesto Slipher στο αστεροσκοπείο Lowell της Αριζόνα μελετούσε τα φάσματα ενός δείγματος «νεφελωμάτων» που παρατήρησε με το τηλεσκόπιό του. Ο Slipher βρήκε ότι τα φάσματα σχεδόν όλων των νεφελωμάτων ήταν μετατοπισμένα προς το ερυθρό. Γνωρίζοντας ότι όταν το φως που εκπέμπει ένα σώμα είναι ερυθρομετατοπισμένο, τότε το σώμα απομακρύνεται από τον παρατηρητή με ταχύτητα η οποία είναι ευθέως ανάλογη της ερυθρομετατόπισης, ο Slipher υπολόγισε τις ταχύτητες απομάκρυνσης των «νεφελωμάτων». Αυτό που παρατήρησε ήταν ότι όλα τα «νεφελώματα» απομακρύνονταν από τη Γη με πολύ μεγάλες ταχύτητες. Ένα νεφέλωμα εξ αυτών το «νεφέλωμα Sombbrero» (γνωστό πλέον ως ο γαλαξίας Sombbrero) απομακρυνόταν από την Γη με ταχύτητα περίπου 1.000 km/s.



Εικόνα 1. Ο γαλαξίας Sombbrero (M104 ή NGC 4594) στον αστερισμό της Παρθένου σε απόσταση 31,1 εκατομμύρια έτη φωτός από την Γη.

Την ίδια περίοδο, αστρονόμοι στην Καλιφόρνια, στο Αστεροσκοπείο Mount Wilson Observatory, κατασκεύαζαν το μεγαλύτερο τηλεσκόπιο του κόσμου με κάτοπτρο διαμέτρου 2.5 μέτρων. Το 1919 ο νεαρός Edwin Hubble μεταβαίνει στο Αστεροσκοπείο

για να εργαστεί με αυτό το τηλεσκόπιο. Εκεί συναντά τον μεγαλύτερο επιστημονικό του αντίπαλο, τον Harlow Sharpley. Ο Sharpley έχει ήδη γίνει διάσημος έχοντας υπολογίσει το μέγεθος του Γαλαξία μας, ο οποίος θεωρείτο ως ο μοναδικός γαλαξίας του Σύμπαντος. Ο Sharpley είχε χρησιμοποιήσει την μέθοδο της Henrietta Leavitt (Harvard College Observatory) η οποία βασιζόταν στην μέτρηση της μεταβαλλόμενης φωτεινότητας αστέρων, γνωστοί ως Κηφείδες¹, μέσω της οποίας είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασής τους από τον παρατηρητή. Ο Sharpley υπολόγισε πως ο Γαλαξίας μας είχε μέγεθος 300000 έτη φωτός από άκρη σε άκρη, τιμή η οποία ήταν 10 φορές μεγαλύτερη από την προηγουμένως αποδεκτή τιμή. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως ο Sharpley, όπως και οι περισσότεροι αστρονόμοι, πίστευε ότι ο Γαλαξίας μας ήταν μοναδικός στο Σύμπαν.

Τον Οκτώβριο του 1923, ο Hubble παρατήρησε στον αστερισμό της Ανδρομέδας, στο «νεφέλωμα» M31, μια βίαη αναλαμπή την οποία θεώρησε αρχικά ως υπερκαινοφανή αστέρα. Έπειτα από επισταμένους ελέγχους στις φωτογραφικές πλάκες της ίδιας περιοχής που είχαν ληφθεί από άλλους αστρονόμους, ο Hubble συνειδητοποίησε πως η «παράξενη» αναλαμπή ήταν ένας παλλόμενος μεταβλητός αστέρας (Κηφέας ή Κηφεύς). Ο Hubble χρησιμοποίησε τη μέθοδο του Sharpley για να υπολογίσει την απόσταση του αστέρα από τη Γη. Μέσω των υπολογισμών του κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το «νεφέλωμα» M31 βρισκόταν σε απόσταση ενός εκατομμυρίου ετών φωτός από την Γη, δηλαδή σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από την έκταση του δικού μας Γαλαξία. Ο Hubble κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι ο M31 δεν ήταν ένα νεφέλωμα αλλά ένας γαλαξίας, ο οποίος σαν τον δικό μας περιέχει εκατομμύρια αστέρια.

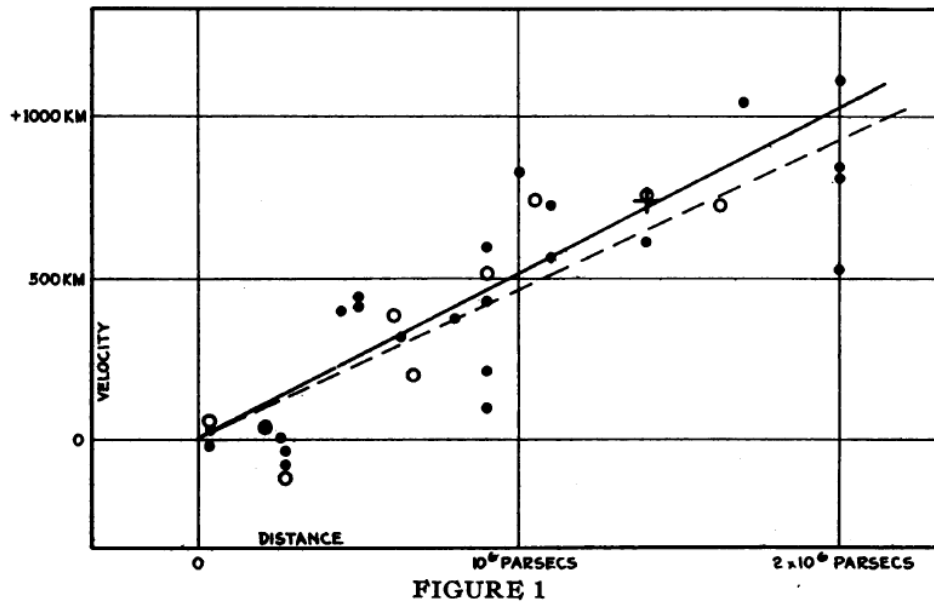
Την επόμενη δεκαετία, ο Hubble συνέχισε τις μελέτες του προσπαθώντας να μετρήσει τις αποστάσεις εκατοντάδων γαλαξιών από την Γη. Το 1929, ο Hubble συσχέτισε τις αποστάσεις των υπό μελέτη γαλαξιών, με τις ταχύτητες απομάκρυνσής τους από την Γη (βλέπε Εικόνα 3). Το διάγραμμα που κατασκεύασε κατέδειξε ότι όσο μακρύτερα από τη Γη βρίσκεται ένας γαλαξίας τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα απομάκρυνσής του από αυτή. Η απλούστερη ερμηνεία αυτής της παρατήρησης είναι ότι το Σύμπαν διαστέλλεται όπως ακριβώς προέβλεπαν οι εξισώσεις του Einstein.

Τα ευρήματα του Hubble έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξη της θεωρίας της Μεγάλης Έκρηξης. Αν το Σύμπαν διαστέλλεται τότε κάποια στιγμή στο παρελθόν θα έπρεπε να έχει ξεκινήσει από ένα σημείο. Η ανακάλυψη του διαστελλόμενου Σύμπαντος και η μετέπειτα ανάπτυξη της Θεωρίας της Μεγάλης Έκρηξης άλλαξαν για πάντα το πρόσωπο της αστρονομίας και αστροφυσικής.



Εικόνα 2. Edwin Hubble

¹ Οι Κηφείδες είναι ένα είδος μεταβλητών αστέρων που χαρακτηρίζονται από περιοδικές διακυμάνσεις στη φωτεινότητά τους λόγω περιοδικών μεταβολών των διαστάσεων, της θερμοκρασίας ή κάποιας άλλης ιδιότητας του αστέρα που οφείλεται σε εσωτερικές του διαδικασίες.



Εικόνα 3. Διάγραμμα Hubble το οποίο δημοσιεύτηκε το 1929 (Hubble, E., PNAS, 1929, 15, 168-173, A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae).

3. Το διάγραμμα του Hubble

Στο παρόν εργαστήριο θα ακολουθήσουμε τα βήματα των Slipher και Hubble προκειμένου να κατασκευάσουμε το διάγραμμα Hubble, να υπολογίσουμε την ομώνυμη σταθερά και την ηλικία του Σύμπαντος.

3.1. Υπολογισμός της ερυθρομετάθεσης (z) και της ταχύτητας απομάκρυνσης γαλαξιών

Η ενότητα αυτή εστιάζει στον υπολογισμό της ερυθρομετάθεσης και της ταχύτητας απομάκρυνσης γαλαξιών

Ο υπολογισμός της ερυθρομετάθεσης (ή της μετάθεσης προς το μπλε) απαιτεί τέσσερα βήματα.

- i. Εντοπισμός φάσματος γαλαξία που επιδεικνύει φασματικές γραμμές.
- ii. Αναγνώριση των φασματικών γραμμών που παράγονται από συγκεκριμένα άτομα, ιόντα ή μόρια, μέσω του μοτίβου που επιδεικνύουν οι φασματικές γραμμές.
- iii. Μέτρηση της μετατόπισης κάθε μίας εκ των φασματικών γραμμών του φάσματος ενός γαλαξία ως προς το εργαστηριακό μήκος κύματος και υπολογισμός της ερυθρομετάθεσης (z)
- iv. Χρήση της μαθηματικής σχέσης που συνδέει την ερυθρομετάθεση του γαλαξία με την ταχύτητα απομάκρυνσής του.

Τύποι redshift (ή blueshift)

1. Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler είναι η παρατηρούμενη αλλαγή στη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός κύματος από παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων. Αν για παράδειγμα μια ηχητική πηγή πλησιάζει προς τον παρατηρητή, η συχνότητά του ήχου αυξάνεται ενώ αντίστοιχα μειώνεται όταν η πηγή απομακρύνεται από αυτόν. Στην αστροφυσική το φαινόμενο Doppler εκδηλώνεται μέσω φωτεινών πηγών. Τα πάντα στο Σύμπαν βρίσκονται σε σχετική κίνηση, τα άστρα και οι γαλαξίες βρίσκονται σε διαρκή κίνηση μεταξύ τους. Αν το φάσμα ενός αστέρα/γαλαξία εμφανίζεται ερυθρομετατοπισμένο έπεται πως το αντικείμενο απομακρύνεται από τον παρατηρητή. Κάνοντας χρήση της αντίστοιχης εξίσωσης είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την ταχύτητα του αστρονομικού αντικείμενου που απομακρύνεται από εμάς ή πλησιάζει προς εμάς. Μελετώντας, το φάσμα του γειτονικού γαλαξία της Ανδρομέδας βρίσκουμε ότι αυτός πλησιάζει τον γαλαξία μας με ταχύτητα 140 km/s γεγονός που σημαίνει ότι οι δύο γαλαξίες θα συγκρουστούν σε περίπου 5 δισεκατομμύρια χρόνια.

2. Βαρυτική μετατόπιση

Αυτό το είδος μετατόπισης είναι συνέπεια της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας. Σύμφωνα με την ΓΘΣ, όταν φωτόνια διαφεύγουν ενός ισχυρού βαρυτικού πεδίου υπόκεινται σε ερυθρομετάθεση. Ας θεωρήσουμε ότι ένα αστέρι εκπέμπει, από την επιφάνειά του, ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος και εμείς θέλουμε να μελετήσουμε αυτή την ακτινοβολία μακριά από την επιφάνεια. Τότε η ακτινοβολία αυτή θα εμφανίζεται σε εμάς ερυθρομετατοπισμένη. Το μήκος κύματος του φωτονίου μετατοπίζεται προς τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (προς το κόκκινο) όταν παρατηρείται από ένα σημείο χαμηλότερου βαρυτικού δυναμικού. Η ενέργεια του φωτονίου μειώνεται (συνεπώς το μήκος κύματος αυξάνεται) καθώς το φωτόνιο διαφεύγει του βαρυτικού πεδίου του αστεριού. Σε γενικές γραμμές η βαρυτική μετατόπιση είναι εξαιρετικά μικρή και παίζει σημαντικό ρόλο μόνο στην περίπτωση αστέρων νετρονίων ή μελανών οπών (σχέση μεταξύ μάζας του σώματος και του μεγέθους του).

3. Κοσμολογική μετατόπιση

Η κοσμολογική μετατόπιση είναι απόρροια της διαστολής του χωροχρόνου. Το 1920 ο Edwin Hubble βρήκε ότι όσο μακρύτερα βρίσκεται ένας γαλαξίας με τόσο μεγαλύτερη ταχύτητα απομακρύνεται από εμάς. Αυτός είναι ο νόμος του Hubble και αποτελεί απόδειξη της διαστολής του Σύμπαντος.

3.1.1. Φάσματα γαλαξιών

Για την αναγνώριση των φασματικών γραμμών και τον υπολογισμό της ερυθρομετάθεσης θα μελετηθούν οι γραμμές Balmer του υδρογόνου σε ένα δείγμα 6 γαλαξιών από τη βάση δεδομένων SDSS DR 15 (<http://skyserver.sdss.org/dr15/en/home.aspx>). Οι γαλαξίες που θα μελετηθούν εμφανίζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Γαλαξίες προς μελέτη

SDSS Name	Link
J121612.91+632635.6	http://skyserver.sdss.org/dr15/en/tools/explore/summary.aspx?ra=12%3A16%3A12.91&dec=%2B63%3A26%3A35.6
J121231.22+664415.5	http://skyserver.sdss.org/dr15/en/tools/explore/summary.aspx?id=1237671751901380755
J223244.14+302704.5	http://skyserver.sdss.org/dr15/en/tools/explore/Summary.aspx?id=1237680474978058982
J221302.84+020841.4	http://skyserver.sdss.org/dr15/en/tools/explore/summary.aspx?ra=22%3A13%3A02.84&dec=%2B02%3A08%3A41.4
J104918.85+585357.0	http://skyserver.sdss.org/dr15/en/tools/explore/Summary.aspx?id=1237655109446664344
J165057.84+334449.6	http://skyserver.sdss.org/dr15/en/tools/explore/Summary.aspx?id=1237659326032576560

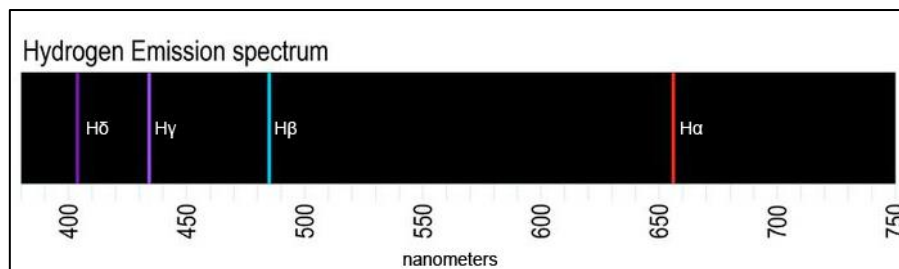
3.1.2. Αναγνώριση φασματικών γραμμών

Οι φασματικές γραμμές δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια αλλάζουν ενεργειακές στάθμες εντός ατόμων ή ιόντων. Το πιο άφθονο χημικό στοιχείο στο Σύμπαν είναι το Υδρογόνο και παρατηρείται πολύ συχνά στα φάσματα γαλαξιών. Το φάσμα μιας περιοχής που περιέχει ατομικό υδρογόνο εμφανίζει ένα μοτίβο ή αλλιώς μια σειρά φασματικών γραμμών. Μία από αυτές τις σειρές γραμμών καλείται σειρά Balmer. Τα εργαστηριακά μήκη κύματος στα οποία εμφανίζονται οι φασματικές γραμμές της σειράς Balmer εμφανίζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Σειρά Balmer του Υδρογόνου

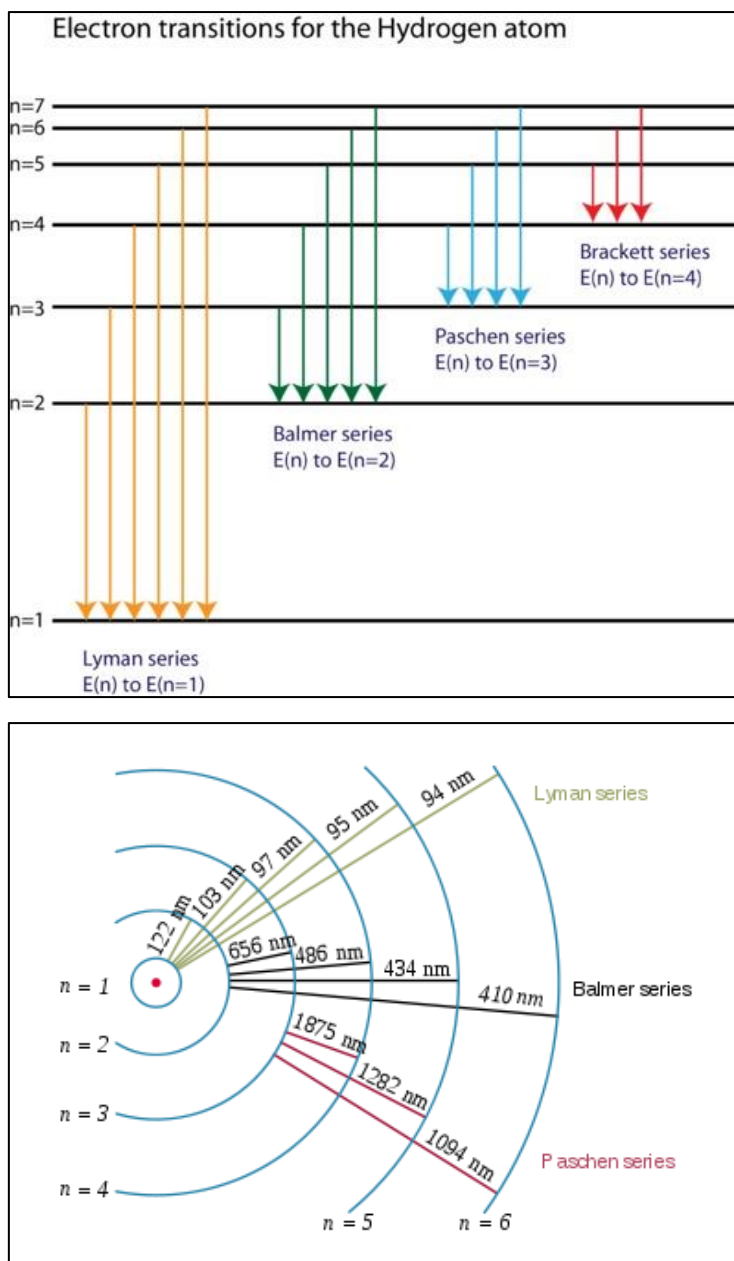
Hydrogen Balmer Series		
Όνομα	Χρώμα	Εργαστηριακό μήκος κύματος (Å ²)
Alpha (α)-Hα	Κόκκινο	6562.8
Beta (β)-Hβ	Μπλε-Πράσινο	4861.3
Gamma (γ)-Hγ	Ιώδες	4340.5
Delta (δ)-Hδ	Βαθύ Ιώδες	4101.7

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται το φάσμα εκπομπής του υδρογόνου μεταξύ ~4000-7500 Å ενώ στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται οι ατομικές μεταβάσεις του υδρογόνου που παράγουν τις γραμμές εκπομπής της σειράς Balmer.



Εικόνα 4. Το φάσμα εκπομπής του υδρογόνου μεταξύ 4000-7500 Å. Στην εικόνα διακρίνονται οι γραμμές εκπομπής της σειράς Balmer.

² 1 Angstrom (Å) = $1 \cdot 10^{-10}m = 1 \cdot 10^{-1}nm$



Εικόνα 5. Ηλεκτρονικές μεταβάσεις του ατόμου του υδρογόνου. Οι γραμμές της σειράς Balmer αντιστοιχούν στην εκπομπή φωτονίων από ηλεκτρόνια τα οποία βρίσκονται σε διεγερμένες καταστάσεις και μεταπίπτουν στο κβαντικό επίπεδο το οποίο περιγράφεται από τον κβαντικό αριθμό $n=2$.

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται το οπτικό φάσμα του Wolf Rayet αστέρα NGC 595-WR5. Στην Εικόνα 6 εκτός από τις γραμμές εκπομπής Ηα, Ηβ, Ηγ, Ηδ, μπορούμε να αναγνωρίσουμε και τις γραμμές εκπομπής άλλων στοιχείων. Στην περίπτωση του NGC 595-WR5 οι γραμμές εκπομπής βρίσκονται πολύ κοντά στα εργαστηριακά μήκη κύματος εμφανίζοντας ελάχιστη μετατόπιση.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται το φάσμα του γαλαξία SDSS J020346.70-064306.7 ο οποίος εμφανίζει ερυθρομετάθεση $z = 0.3$. Οι γραμμές εκπομπής Ηα, Ηβ, Ηγ εμφανίζονται μετατοπισμένες προς τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (προς το κόκκινο).

μεταβαίνουμε στην εφαρμογή της βάσης SDSS που περιέχει το διαδραστικό φάσμα (βλέπε Εικόνα 9)

DR15

Explore Home

Search

Imaging Summary

- FITS
- Finding chart
- Other Observations
- Neighbors
- Galaxy Zoo

PhotoTag

- Field
- Frame
- PhotoObj
- PhotoZ

Cross-ID

Spec Summary

- All Spectra
- FITS
- Plate
- SpecObj
- sppLines
- galSpecLine
- galSpecIndx
- galSpecInfo

Fit Parameters

- sppParams
- StarformingPort
- PassivePort
- emissionLinesPort
- PCAWiscBC03
- PCAWiscM11
- FSPSGranEarlyDust
- FSPSGranEarlyNoDust
- FSPSGranWideDust
- FSPSGranWideNoDust

NED search

SIMBAD search


ADS search

Notes

- Save in Notes
- Show Notes

Print

Powered by



SDSS J140042.98-003020.7

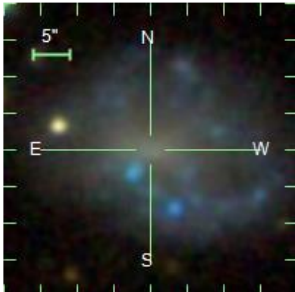
Look up common name

Type	run	rerun	camcol	field	obj	SDSS ObjID
GALAXY	756	301	2	630	78	1237648720707059790

RA, Dec		Galactic Coordinates (<i>l</i> , <i>b</i>)	
Decimal	Sexagesimal	<i>l</i>	<i>b</i>
210.179123931, -0.505756246	14:00:42.98, -00:30:20.72	336.823645705	57.733739168

Imaging WARNING: This object's photometry may be unreliable. See the photometric flags below.

Flags: DEBLEND_DEGENERATE DEBLENDED_AT_EDGE BINNED1
INTERP COSMIC_RAY NODEBLEND CHILD BLENDED



Magnitudes				
u	g	r	i	z
16.64	15.57	15.18	15.00	14.89

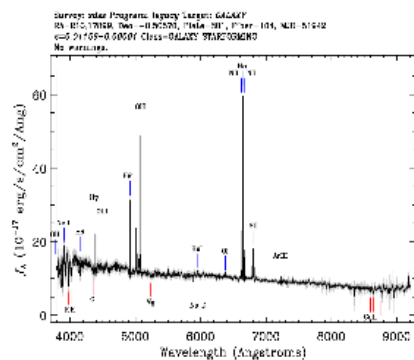
Magnitude uncertainties				
err_u	err_g	err_r	err_i	err_z
0.01	0.00	0.00	0.00	0.01

Image MJD	mode	Other observations	parentID	nChild	extinction_r	PetroRad_r (arcsec)
51259	PRIMARY	1	1237648720707059783	0	0.11	17.84 ± 0.402

Mjd-Date	photoZ (KD-tree method)	Galaxy Zoo 1 morphology
03/22/1999	0.014 ± 0.0072	-

Cross-identifications [Show](#)

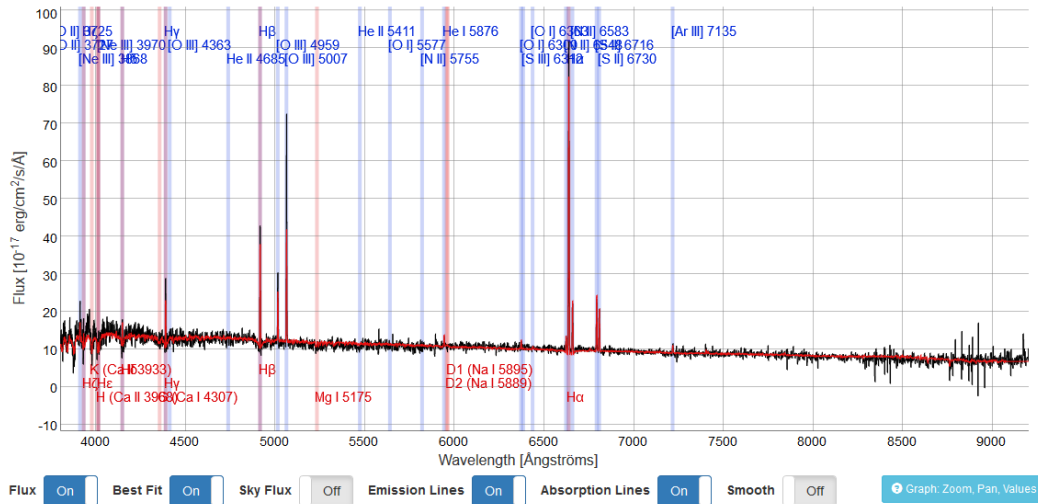
Optical Spectra SpecObjID = 33892449184332096 [Interactive spectrum](#)



Property	Value
Spectrograph	SDSS
class	GALAXY
Redshift (z)	0.012
Redshift error	0.00001
Redshift flags	OK
survey	sdss
programname	legacy
primary	1
Other spec	1
sourcetype	GALAXY
Velocity dispersion (km/s)	42.61
veldisp_error	21.910
targeting_flags	GALAXY
plate	301
mjd	51942
fiberid	104

SciServer

Εικόνα 8. Κεντρική σελίδα του γαλαξία J121612.91+632635.6. στην βάση δεδομένων SDSS DR15



Εικόνα 9. Διαδραστικό φάσμα γαλαξία.

2. Στον σύνδεσμο εμφανίζεται το φάσμα του γαλαξία. Στον άξονα x δίνεται το μήκος κύματος σε Angstrom ενώ στον άξονα y η ροή της ακτινοβολίας σε $erg/cm^2 sec \text{ \AA}$. Κάτω από το φάσμα απενεργοποιούμε τις επιλογές **Best Fit**, **Sky Flux**, **Emission Lines** και **Absorption Lines** ενώ διατηρούμε τα υπόλοιπα ενεργοποιημένα.
3. Για να μεγεθύνουμε μια συγκεκριμένη περιοχή την επιλέγουμε από αριστερά προς τα δεξιά κρατώντας το αριστερό κουμπί του ποντικιού πατημένο. Για να επιστρέψουμε στην αρχική κατάσταση κάνουμε διπλό κλικ μέσα στην περιοχή του φάσματος.
4. Συγκρίνουμε το υπό μελέτη φάσμα με τα φάσματα των Εικόνων 6 και 7 και προσπαθούμε να αναγνωρίσουμε τις γραμμές της σειράς Balmer.
5. Μετά την αναγνώριση των γραμμών H α , H β , H γ και H δ πρέπει να εντοπίσουμε το παρατηρούμενο μήκος κύματος της κάθε γραμμής. Μεγεθύνουμε την φασματική περιοχή γύρω από την οποία εμφανίζεται η γραμμή H α (βλέπε Εικόνα 10). Τοποθετούμε τον κέρσορα προσεκτικά στην κορυφή της φασματικής γραμμής και σημειώνουμε το μήκος κύματος το οποίο αναγράφεται πάνω και δεξιά του παραθύρου που περιλαμβάνει το φάσμα (βλέπε Εικόνα 10). Καταγράφουμε το μήκος κύματος στον Πίνακα 3. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για τις φασματικές γραμμές H β , H γ , H δ σημειώνοντας τα αντίστοιχα μήκη κύματος στον Πίνακα 3.

Οι γραμμές Balmer αποτελούν ένα πολύ χαρακτηριστικό μοτίβο γραμμών με πολύ συγκεκριμένες σχετικές αποστάσεις μεταξύ τους. Το μοτίβο αυτών των γραμμών παραμένει αναλλοίωτο όσο μεγάλη ερυθρομετάθεση και να έχει ο γαλαξίας από τον οποίο εκπέμπονται. Η πιο εύκολα αναγνωρίσιμη γραμμή της σειράς Balmer είναι η H α εξαιτίας της μεγάλης της έντασης. Σε ένα φάσμα που δεν μπορούμε να διακρίνουμε με το μάτι τις γραμμές H β , H γ , H δ , είτε επειδή είναι ασθενείς είτε επειδή είναι μπλεγμένες με άλλες φασματικές γραμμές μπορούμε να τις εντοπίσουμε χρησιμοποιώντας τη σχετική απόστασή τους από την H α .

Για παράδειγμα η σχετική απόσταση της H β από την H α , στα εργαστηριακά μήκη κύματος είναι:

$$\frac{\lambda_{H\beta(lab)} - \lambda_{H\alpha(lab)}}{\lambda_{H\alpha(lab)}} = \frac{4861.3 - 6562.8}{6562.8} \cong -0.26 \quad (1\alpha)$$

όπου $\lambda_{H\alpha(lab)}$, $\lambda_{H\beta(lab)}$ είναι τα εργαστηριακά μήκη κύματος.

Όμοια η σχετική θέση των H_γ, H_δ από την H_α θα είναι:

$$\frac{\lambda_{H\gamma(lab)} - \lambda_{H\alpha(lab)}}{\lambda_{H\alpha(lab)}} = \frac{4340.5 - 6562.8}{6562.8} \cong -0.34 \quad (1\beta)$$

$$\frac{\lambda_{H\delta(lab)} - \lambda_{H\alpha(lab)}}{\lambda_{H\alpha(lab)}} = \frac{4101.7 - 6562.8}{6562.8} \cong -0.38 \quad (1\gamma)$$

Έτσι, αν αναγνωρίσουμε την H_α στο φάσμα ενός γαλαξία και μετρήσουμε το μήκος κύματός της ($\lambda_{H\alpha(obs)}$) μπορούμε να αναζητήσουμε την H_β (και αντίστοιχα τις H_γ και H_δ) στο μήκος κύματος που θα προκύπτει από την σχέση:

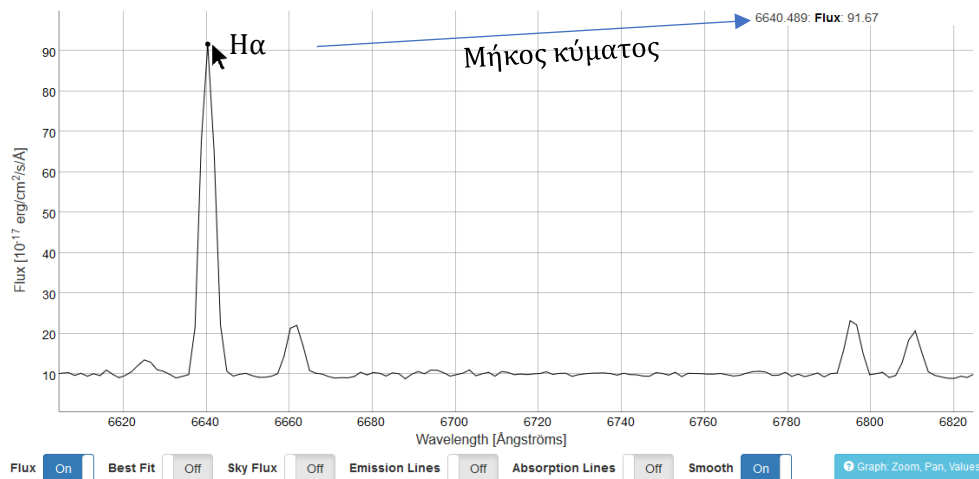
$$\lambda_{H\beta(obs)} = -0,26 \cdot \lambda_{H\alpha(obs)} + \lambda_{H\alpha(obs)} = 0,74\lambda_{H\alpha(obs)} \quad (2\alpha)$$

Με παρόμοιο τρόπο εργαζόμαστε και για τις γραμμές H_γ και H_δ .

$$\lambda_{H\gamma(obs)} = -0,34 \cdot \lambda_{H\alpha(obs)} + \lambda_{H\alpha(obs)} = 0,66\lambda_{H\alpha(obs)} \quad (2\beta)$$

$$\lambda_{H\delta(obs)} = -0,38 \cdot \lambda_{H\alpha(obs)} + \lambda_{H\alpha(obs)} = 0,62\lambda_{H\alpha(obs)} \quad (2\gamma)$$

6. Συνεχίζουμε την ίδια διαδικασία για τους υπόλοιπους 5 γαλαξίες.



Εικόνα 10. Μεγέθυνση γύρω από την περιοχή της φασματικής γραμμής H_α .

Πίνακας 3. Φασματικά δεδομένα των υπό μελέτη γαλαξιών

J121612.91+632635.6				
Φασματική Γραμμή	Εργαστηριακό μήκος κύματος λ_{lab} (Å)	Παρατηρούμενο μήκος κύματος λ_{obs} (Å)	Ερυθρομετάθεση z	Ταχύτητα v (km/s)
H_α	6562.8			
H_β	4861.3			
H_γ	4340.5			
H_δ	4101.7			
Μέση τιμή				
J121231.22+664415.5				
H_α	6562.8			
H_β	4861.3			
H_γ	4340.5			
H_δ	4101.7			

Μέση τιμή				
J223244.14+302704.5				
Hα	6562.8			
Hβ	4861.3			
Hγ	4340.5			
Hδ	4101.7			
Μέση τιμή				
J221302.84+020841.4				
Hα	6562.8			
Hβ	4861.3			
Hγ	4340.5			
Hδ	4101.7			
Μέση τιμή				
J104918.85+585357.0				
Hα	6562.8			
Hβ	4861.3			
Hγ	4340.5			
Hδ	4101.7			
Μέση τιμή				
J165057.84+334449.6				
Hα	6562.8			
Hβ	4861.3			
Hγ	4340.5			
Hδ	4101.7			
Μέση τιμή				

3.1.3. Υπολογισμός ερυθρομετάθεσης (z)

Για να υπολογίσουμε την ερυθρομετάθεση z κάνουμε χρήση της Εξίσωσης (3):

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{lab}}} - 1 \quad (3)$$

όπου

z: ερυθρομετάθεση (αδιάστατη)

λ_{obs} : παρατηρούμενο μήκος κύματος σε Å

λ_{lab} : εργαστηριακό μήκος κύματος σε Å

Καταγράφουμε τα αποτελέσματά μας στον Πίνακα 3. Ελέγχουμε αν οι τιμές του z που μετράμε μέσω των γραμμών Hα, Hβ, Hγ, Hδ, για κάθε γαλαξία είναι κοντά μεταξύ τους. Άλλωστε και οι τέσσερις φασματικές γραμμές προέρχονται από τον ίδιο γαλαξία. Από τις τέσσερις τιμές του z βγάζουμε μέσο όρο ώστε να έχουμε μια καλύτερη εκτίμηση της ερυθρομετάθεσης.

3.1.4. Υπολογισμός της ταχύτητας απομάκρυνσης

Για να υπολογίσουμε την ταχύτητα απομάκρυνσης (σε km/s) κάθε γαλαξία χρησιμοποιούμε την Εξίσωση (4). Σημειώνεται ότι η ερυθρομετάθεση z είναι αδιάστατο μέγεθος.

$$v = c \cdot z$$

(4)

όπου

v : ταχύτητα απομάκρυνσης του γαλαξία (σε km/s)

c : η ταχύτητα του φωτός ($c = 300.000$ km/s)

Καταγράφουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας στον Πίνακα 3.

❖ **Σημείωση:** Η ερυθρομετάθεση (z) και η ταχύτητα απομάκρυνσης του κάθε γαλαξία μπορούν να υπολογιστούν κάνοντας χρήση του excel. Εισάγοντας στον Πίνακα 3 του excel τις τιμές των παρατηρούμενων μηκών κύματος υπολογίζονται άμεσα η ερυθρομετάθεση και η ταχύτητα απομάκρυνσης.

3.1.5. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Επειδή η Εξ. (4) μπορεί να γραφεί ως $z = v/c$ μπορούμε να πούμε ότι η ερυθρομετάθεση z δίνει την ταχύτητα απομάκρυνσης του γαλαξία ως προς την ταχύτητα του φωτός.

Σημειώνεται ότι η Εξ (4) είναι ακριβής μόνο σε εκείνες τις περιπτώσεις που η ερυθρομετάθεση z είναι μικρή σε σύγκριση με την μονάδα. Για μεγάλες ταχύτητες ($z > 0,1$) απαιτείται η χρήση της σχετικιστικής εξίσωσης υπολογισμού της ερυθρομετάθεσης (Εξίσωση 5).

$$z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1 \quad (5)$$

Μέχρι το σημείο αυτό αναφερόμαστε στην ταχύτητα v ως ταχύτητα απομάκρυνσης των γαλαξίων, μια έκφραση που υπονοεί ότι οι γαλαξίες κινούνται στο χώρο. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η εικόνα είναι πλήρως λανθασμένη. Στην πραγματικότητα, αυτό που συμβαίνει είναι ότι ο ίδιος ο χώρος διαστέλλεται, δηλαδή οι γαλαξίες δεν κινούνται στον χώρο αλλά «παρασύρονται» από τον χώρο καθώς αυτός διαστέλλεται. Υπό αυτή την έννοια η ερυθρομετάθεση ενός γαλαξία δεν ερμηνεύεται ως ταχύτητα παρόλο που η παρατηρούμενη μετατόπιση θυμίζει μετατόπιση Doppler.

Στο κοσμολογικό περιεχόμενο η ερυθρομετάθεση μας λέει την σχετική κλίμακα του Σύμπαντος την περίοδο που η μελετώμενη ακτινοβολία εκπέμφθηκε από τον γαλαξία. Ας θεωρήσουμε έναν γαλαξία με ερυθρομετάθεση $z = 0,1$. Έστω $d(z)$ η απόσταση στην οποία βρισκόταν ο γαλαξία όταν εκπέμφθηκε από αυτόν η ακτινοβολία που μετράμε σήμερα (για $z = 0,1$ ο χρόνος αυτός είναι περίπου 1 δισεκατομμύριο χρόνια³). Σε αυτό το χρονικό διάστημα ο χώρος διεστάλθη τόσο που η τωρινή απόσταση από τον γαλαξία είναι $d(0)$. Τότε:

³ $t(z) = \frac{2}{3H_0\Omega_0^{1/2}(1+z)^{3/2}}$, όπου $\Omega_0 = \rho/\rho_{crit}$ και ρ η παρατηρούμενη ενεργειακή πυκνότητα του

Σύμπαντος προς την κρίσιμη ενεργειακή πυκνότητα. Ο λόγος αυτός καθορίζει την γεωμετρία του Σύμπαντος.

$$1 + z = \frac{d(0)}{d(z)} \quad (6)$$

Η Εξίσωση (6) ερμηνεύεται ως εξής: την χρονική περίοδο που αντιστοιχεί σε ερυθρομετάθεση $z = 0,1$ όλοι οι γαλαξίες ήταν πιο κοντά μεταξύ τους κατά 10%. Μπορούμε επίσης να πούμε ότι το Σύμπαν διεστάλη κατά τον ίδιο παράγοντα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του γαλαξία που χαρακτηρίζεται από $z = 0,1$. Αντίστοιχα, τιμή ερυθρομετάθεσης $z = 0,2$ αντιστοιχεί σε μια χρονική περίοδο όπου οι γαλαξίες ήταν κατά 20% πιο κοντά μεταξύ τους από ότι είναι τώρα.

3.2. Υπολογισμός της απόστασης των γαλαξιών

Για τον υπολογισμό της απόστασης κάθε γαλαξία από την Γη θα χρησιμοποιήσουμε το φαινόμενο μέγεθος του, το οποίο παρέχεται από την βάση δεδομένων SDSS.

Το φαινόμενο μέγεθος (m) ενός αστρονομικού αντικείμενου είναι η ροή της ακτινοβολίας που συλλέγουμε από ένα αστρονομικό αντικείμενο σε μια συγκεκριμένη φασματική περιοχή και αποτελεί ένα μέτρο της φαινόμενης λαμπρότητας του αντικείμενου όπως αυτό παρατηρείται από την Γη.

Η βάση δεδομένων SDSS παρέχει το φαινόμενο μέγεθος του κάθε γαλαξία σε 5 διαφορετικά φίλτρα u, g, r, i, z (ultraviolet, green, red, infrared, far infrared). Στην συγκεκριμένη άσκηση θα κάνουμε χρήση του φαινόμενου μεγέθους r γιατί οι CCD κάμερες των φασματογράφων είναι πιο ευαίσθητες σε αυτή την φασματική περιοχή.

Προκειμένου να εντοπίσουμε το φαινόμενο μέγεθος r στην βάση δεδομένων ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

- Χρησιμοποιούμε τον σύνδεσμο του Πίνακα 2 και μεταβαίνουμε στην ιστοσελίδα που περιέχει τα δεδομένα του πρώτου γαλαξία (βλέπε Εικόνα 11). Στην μέση της σελίδας υπάρχει ένας πίνακας με την ονομασία Magnitudes όπου σημειώνονται τα μεγέθη u, g, r, i, z του γαλαξία (βλέπε Εικόνα 11).
- Καταγράφουμε το φαινόμενο μέγεθος r στον Πίνακα 4.
- Κάνουμε την ίδια διαδικασία για τους υπόλοιπους γαλαξίες του δείματός μας.

Στη συνέχεια θα πρέπει να μετατρέψουμε το φαινόμενο μέγεθος r σε λαμπρότητα B ($Watt/m^2$) σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$B = B_0 \cdot 10^{-\frac{r}{2,5}} \quad (7)$$

Όπου $B_0 = 1,31 \cdot 10^{-8} W/m^2$ είναι η λαμπρότητα αναφοράς για το φωτομετρικό φίλτρο r που επιλέξαμε. Καταγράφουμε για κάθε γαλαξία τις τιμές του B στην αντίστοιχη στήλη του Πίνακα 4.

Τέλος, έχοντας υπολογίσει την λαμπρότητα του κάθε γαλαξία θα υπολογίσουμε την απόστασή του μέσω της Εξίσωσης (8):

$$B = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (8)$$

όπου

d: η απόσταση στην οποία βρίσκεται ο Γαλαξίας (σε meters)
L: η ενδογενής φωτεινότητα του γαλαξία (σε Watt).

Στο συγκεκριμένο εργαστήριο θα υποθέσουμε για συντομία ότι όλοι οι γαλαξίες του δείγματός μας χαρακτηρίζονται από την ίδια φωτεινότητα $L = 10^{37}$ Watt η οποία είναι περίπου ίδια με την φωτεινότητα του γαλαξία της Ανδρομέδας.

Υπολογίζουμε τις αποστάσεις όλων των γαλαξιών και τις καταγράφουμε στην αντίστοιχη στήλη του Πίνακα 4.

Προσοχή!!! Χρειαζόμαστε τις αποστάσεις σε megaparsecs (Mpc) και όχι σε μέτρα. Συνεπώς, θα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες μετατροπές σύμφωνα με τη σχέση:

$$1 \text{ megaparsec (Mpc)} = 3,09 \cdot 10^{22} \text{ meters} = 3,09 \cdot 10^{19} \text{ km} \quad (9)$$

DR15

Explore Home

Search

Imaging Summary

PhotoTag

Cross-ID

Spec Summary

Fit Parameters

NED search

Notes

Print

Powered by SciServer

SDSS J140042.98-003020.7

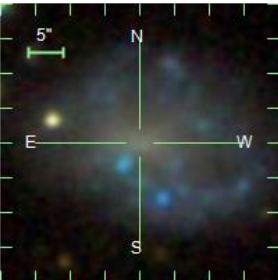
Look up common name

Type	run	rerun	camcol	field	obj	SDSS ObjID
GALAXY	756	301	2	630	78	1237648720707059790

RA, Dec		Galactic Coordinates (l, b)	
Decimal	Sexagesimal	l	b
210.179123931, -0.505756246	14:00:42.98, -00:30:20.72	336.823645705	57.733739168

Imaging WARNING: This object's photometry may be unreliable. See the photometric flags below.

Flags: DEBLEND_DEGENERATE DEBLENDED_AT_EDGE BINNED1 INTERP COSMIC_RAY NODEBLEND CHILD BLENDED



Magnitudes				
u	g	r	i	z
16.64	15.57	15.18	15.00	14.89

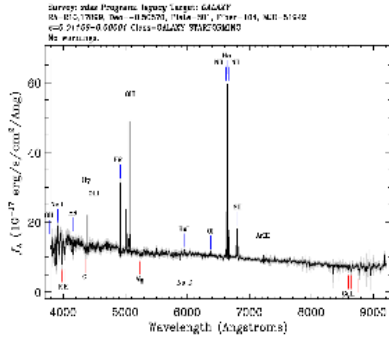
Magnitude uncertainties				
err_u	err_g	err_r	err_i	err_z
0.01	0.00	0.00	0.00	0.01

Image MJD	mode	Other observations	parentID	nChild	extinction_r	PetroRad_r (arcsec)
51259	PRIMARY	1	1237648720707059783	0	0.11	17.84 ± 0.402

Mjd-Date	photoZ (KD-tree method)	Galaxy Zoo 1 morphology
03/22/1999	0.014 ± 0.0072	-

Cross-identifications [Show](#)

Optical Spectra SpecObjID = 338924491843332096 [Interactive spectrum](#)



Property	Value
SDSS	SDSS
class	GALAXY
Redshift (z)	0.012
Redshift error	0.00001
Redshift flags	OK
survey	sdss
programname	legacy
primary	1
Other spec	1
source type	GALAXY
Velocity dispersion (km/s)	42.61
veldisp_error	21.910
targeting_flags	GALAXY
plate	301
mjd	51942
fiberid	104

Εικόνα 11. Κεντρική σελίδα του γαλαξία J121612.91+632635.6. στην βάση δεδομένων SDSS DR15 στην οποία σημειώνονται τα φαινόμενα μεγέθη στα φίλτρα u, g, r, i, z.

Πίνακας 4

SDSS Name	r magnitude	B (W/m^2)	d (Mpc)
J121612.91+632635.6			
J121231.22+664415.5			
J223244.14+302704.5			
J221302.84+020841.4			
J104918.85+585357.0			
J165057.84+334449.6			

❖ **Σημείωση:** Η λαμπρότητα και η απόσταση του κάθε γαλαξία μπορούν να υπολογιστούν αντικαθιστώντας τις τιμές του r στον Πίνακα 4 του φύλλου του excel.

3.3. Διάγραμμα Hubble

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα v (km/s) και d (Mpc) από τους Πίνακες 3 και 4 αντίστοιχα κατασκευάζουμε τον Πίνακα 5.

Πίνακας 5.

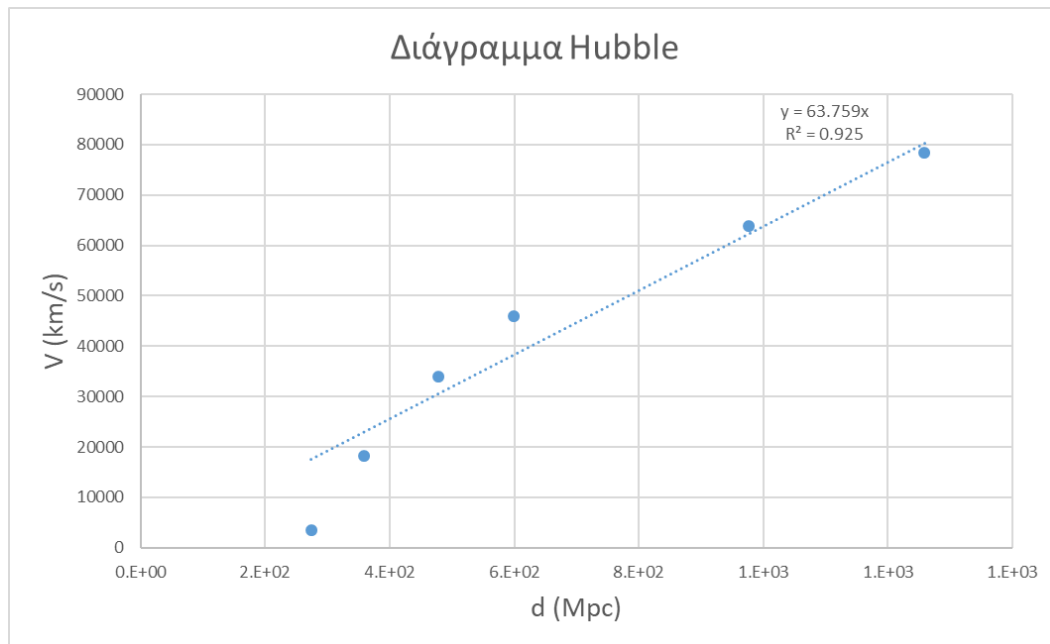
SDSS Name	d (Mpc)	v (km/s)
J121612.91+632635.6		
J121231.22+664415.5		
J223244.14+302704.5		
J221302.84+020841.4		
J104918.85+585357.0		

Κατασκευάζουμε το διάγραμμα της απόστασης των γαλαξιών συναρτήσει της ταχύτητας απομάκρυνσής τους (βλέπε Εικόνα 12). Κάνοντας μια γραμμική παρεμβολή μέσω των σημείων του διαγράμματος μπορούμε να βρούμε την κλίση της εξίσωσης η οποία μας δίνει την σταθερά του Hubble. Στην περίπτωση του παραδείγματος η σταθερά του Hubble είναι $H = 57,07 \frac{km}{s} / Mpc$.

❖ **Σημείωση:** Η γραμμική παρεμβολή γίνεται μέσω της εξίσωσης $y = a \cdot x$ η οποία περνάει από το σημείο O (0, 0). Το σημείο αυτό αντιπροσωπεύει την Γη καθώς εμείς ως παρατηρητές δεν είναι δυνατόν να απομακρυνόμαστε από τον εαυτό μας.

Από την σταθερά του Hubble μπορούμε να υπολογίσουμε την ηλικία του Σύμπαντος μέσω της Εξίσωσης (7):

$$t = 1/H \quad (7)$$



Εικόνα 12. Διάγραμμα Hubble που προκύπτει μέσω των μετρήσεων που κάναμε στην περίπτωση του μικρού δείγματος των 6 γαλαξιών.

❖ **Σημείωση:** Το διάγραμμα μπορεί να κατασκευαστεί άμεσα αντικαθιστώντας τις τιμές των d και v στον Πίνακα 5 του φύλλου εργασίας του excel.

Στην περίπτωση των γαλαξιών του δείγματός μας η ηλικία του Σύμπαντος υπολογίζεται ότι είναι $t \cong 17 \cdot 10^9$ χρόνια.

Η σταθερά του Hubble υπολογίζεται ότι είναι ίση με $H_0 = 68,3 \frac{km}{s} / Mpc$ (μέση τιμή των υπολογισμών του 2019) ενώ ότι η ηλικία του Σύμπαντος είναι $t_0 = 14,3 \cdot 10^9$ χρόνια.

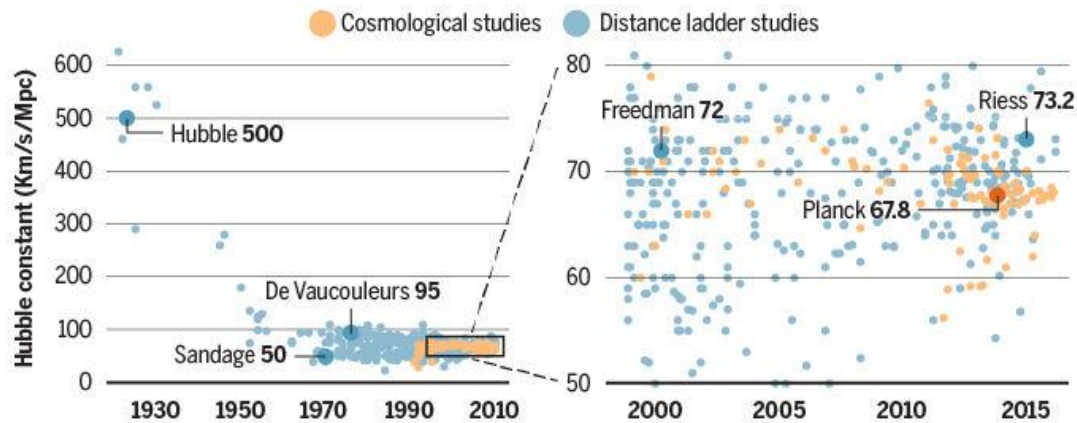
Άρα στην περίπτωση της σταθεράς του Hubble τα ευρήματά μας παρουσιάζουν απόκλιση:

$$\sigma_H = \frac{H_0 - H}{H_0} \cdot 100 = \frac{68,3 - 57,07}{68,3} \cdot 100 \cong 16,4\%$$

Όσον αφορά την ηλικία του Σύμπαντος τα αποτελέσματά μας παρουσιάζουν απόκλιση:

$$\sigma_t = \frac{t_0 - t}{t_0} \cdot 100 \cong 20\%$$

Παρατήρηση: Ο υπολογισμός της σταθεράς του Hubble δεν αποτελεί μια εύκολη διαδικασία και υπάρχουν πολλοί τρόποι για να υπολογισθεί ενώ πολλά και διαφορετικά σφάλματα υπεισέρχονται στον υπολογισμό της ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται. Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα που δίνει τις τιμές της σταθεράς του Hubble που έχουν μετρηθεί από τον ίδιο το 1929 μέχρι και το 2015 από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες. Στον Πίνακα 6 δίνονται οι μετρούμενες τιμές της σταθεράς του Hubble, από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες, εντός του 2019.



1929: **Edwin Hubble's** first value was much too fast. It implied a universe that was only 2 billion years old.

1976–1982: With the Palomar telescope, **Allan Sandage** found much slower rates, about half the value that his rival, **Gérard de Vaucouleurs**, was finding.

2001: In a prominent study, **Wendy Freedman** used the Hubble Space Telescope to settle on a constant of 72.

2015–Present: Debate has resumed. **Adam Riess's** distance ladder value is significantly higher than one derived from **Planck's** map of the cosmic microwave background.

* Data include known published Hubble constants. Cosmological studies rely at least in part on measurements of the cosmic microwave background.

Εικόνα 12. Μετρούμενες τιμές της σταθεράς του Hubble από το 1929 έως το 2015.

Πίνακας 6. Μετρούμενες τιμές της σταθεράς του Hubble εντός του 2019.

Date published	Hubble constant ($\frac{km}{s}/Mpc$)	Ερευνητική ομάδα
2019-11-04	54,4	Di Valentino et al. 2019
2019-08-15	73,5	Chenet et al. 2019
2019-07-16	69,8	van den Bergh et al. 2019
2019-07-08	70,3	Hotokezaka et al. 2019
2019-03-18	74,03	Riess et al. 2019
2019-02-08	67,78	Ryan et al. 2019

4. Κοσμολογική vs Doppler μετατόπιση

Γιατί τα αποτελέσματα του Hubble καταδεικνύουν την διαστολή του Σύμπαντος και όχι απλά την κίνηση των γαλαξιών στον χώρο; Γιατί η παρατηρούμενη ερυθρομετάθεση είναι κοσμολογική και όχι εξαιτίας του φαινομένου Doppler;

Η παρατηρούμενη ερυθρομετάθεση των γαλαξιών είναι το αποτέλεσμα της σύνθεσης επιμέρους μεταθέσεων. Οι περισσότεροι γαλαξίες στο Σύμπαν είναι μέλη γαλαξιακών σμηνών με αποτέλεσμα να αλληλεπιδρούν βαρυτικά με άλλους γαλαξίες. Επειδή η βαρύτητα είναι μια δύναμη που δρα από απόσταση έπεται πως σμήνη γαλαξιών αλληλεπιδρούν βαρυτικά μεταξύ τους. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις έχουν ως αποτέλεσμα οι γαλαξίες να κινούνται στο χώρο προς διάφορες κατευθύνσεις είτε προς εμάς είτε απομακρυνόμενοι από εμάς. Αυτή η ενδογενής κίνηση ενός γαλαξία εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με άλλα αστρονομικά αντικείμενα καλείται *peculiar motion*. Η αντίστοιχη ταχύτητα εξαιτίας αυτής της κίνησης ονομάζεται *peculiar velocity*. Η εν λόγω ταχύτητα είναι η ταχύτητα που προκύπτει μέσω της μετατόπισης Doppler του

κάθε γαλαξία ως προς τον παρατηρητή και δεν έχει καμία σχέση με την κοσμολογική μετατόπιση που οφείλεται στην διαστολή του Σύμπαντος.

Το ερώτημα που προκύπτει λοιπόν στο σημείο αυτό είναι: Πώς γνωρίζουμε ότι οι ερυθρομετατοπίσεις που παρατηρούμε δεν προκαλούνται από peculiar motions αλλά από την διαστολή του χωροχρόνου; Πως κάνουμε την διάκριση μεταξύ κοσμολογικής και Doppler ερυθρομετάθεσης; Πως δηλαδή καταλαβαίνουμε ότι οι γαλαξίες δεν κινούνται στον χώρο αλλά είναι ο ίδιος ο χώρος ο οποίος διαστέλλεται;

Όπως είδαμε προηγουμένως, ο Hubble παρατήρησε ότι η απόσταση και η ερυθρομετάθεση των γαλαξιών είναι ποσά ανάλογα. Δηλαδή ο κάθε γαλαξίας εμφανίζει ερυθρομετάθεση που είναι ανάλογη της απόστασής του από εμάς. Υπάρχουν τέσσερις πιθανές ερμηνείες αυτής της σχέσης μεταξύ ερυθρομετάθεσης και απόστασης:

1. Το φως από τους μακρινούς γαλαξίες εξασθενεί και χάνει ενέργεια καθώς ταξιδεύει στο διάστημα (tired light hypothesis).
2. Οι γαλαξίες εξελίχθηκαν από μια αρχική έκρηξη, με κέντρο της Γη, και απομακρύνονται σαν θραύσματα από τον πυρήνα της έκρηξης.
3. Οι γαλαξίες κινούνται ταχύτατα και οι ταχύτερα κινούμενοι και πιο απομακρυσμένοι γαλαξίες καταλήγουν σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις με την πάροδο του χρόνου.
4. Ο χώρος διαστέλλεται.

1. Η υπόθεση αυτή προτάθηκε το 1929 από τον Fritz Zwicky (Zwicky 1929) σύμφωνα με τον οποίο το Σύμπαν είναι στατικό και τα φωτόνια που εκπέμπονται από τους γαλαξίες χάνουν ενέργεια με την πάροδο του χρόνου εξαιτίας των συγκρούσεών τους με άλλα σωματίδια. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τα πιο απομακρυσμένα αντικείμενα να εμφανίζονται πιο ερυθρά από τα πιο κοντινά σε εμάς.

Μια παράμετρος η οποία μπορεί να μας δώσει απαντήσεις είναι η επιφανειακή λαμπρότητα των γαλαξιών. Σε ένα στατικό Σύμπαν, το φως που φθάνει στη Γη από έναν γαλαξία μειώνεται ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης. Επίσης, η φαινόμενη επιφάνεια του γαλαξία πέφτει ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης. Άρα σε ένα στατικό Σύμπαν, η επιφανειακή λαμπρότητα (φως ανά επιφάνεια) των γαλαξιών θα έπρεπε να είναι ανεξάρτητη της απόστασης. Η μόνη διαφορά μεταξύ των γαλαξιών θα ήταν ότι η ακτινοβολία των πιο απομακρυσμένων θα ήταν πιο κόκκινη.

Σε ένα διαστελλόμενο Σύμπαν η επιφανειακή λαμπρότητα ενός γαλαξία μειώνεται με την απόσταση. Καθώς ο παρατηρούμενος γαλαξίας απομακρύνεται, τα φωτόνια εκπέμπονται με μειούμενο ρυθμό επειδή κάθε φωτόνιο πρέπει να ταξιδέψει απόσταση που είναι λίγο μεγαλύτερη από ότι το προηγούμενο φωτόνιο. Επίσης, η ενέργεια των φωτονίων μειώνεται εξαιτίας της ερυθρομετάθεσης. Επιπροσθέτως, οι πιο απομακρυσμένοι γαλαξίες εμφανίζονται μεγαλύτεροι από ότι είναι στην πραγματικότητα επειδή τα φωτόνια που παρατηρούμε είχαν εκπεμφθεί όταν οι γαλαξίες ήταν πιο κοντά σε εμάς. Αν όλα αυτά συνυπολογιστούν τότε η επιφανειακή λαμπρότητα θα μειώνεται με την απόσταση.

Τον έλεγχο αυτό πρότεινε ο Richard C. Tolman (Tolman, 1930, 1934, Hubble & Tolman 1935). Τα αποτελέσματα του ελέγχου έδειξαν μείωση της επιφανειακής λαμπρότητας των γαλαξιών συναρτήσει της απόστασης γεγονός που δεν ταιριάζει με την ερμηνεία ενός στατικού Σύμπαντος και την υπόθεση του tired light για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του Hubble.

2. Η υπόθεση περί μιας έκρηξης μπορεί να ελεγχθεί παρατηρησιακά. Αν οι γαλαξίες προέρχονταν από μια έκρηξη και εκτοξεύονταν προς τα έξω σαν θραύσματα, θα έπρεπε να παρατηρείται μικρότερος αριθμός γαλαξιών ανά μονάδα όγκου όσο αυξάνεται η απόσταση από τη Γη.

Σε ένα διαστελλόμενο Σύμπαν θα έπρεπε να παρατηρούμε μεγαλύτερο αριθμό γαλαξιών ανά μονάδα όγκου στις μεγαλύτερες αποστάσεις. Συγχρόνως, οι γαλαξίες θα πρέπει να είναι νεαρότεροι, λιγότερο εξελιγμένοι και μικρότερη σε μάζα και μέγεθος, όσο η απόσταση αυξάνεται.

Τα παρατηρησιακά δεδομένα που έχουμε μέσω επίγειων και διαστημικών τηλεσκοπίων καταδεικνύουν πως η τελευταία άποψη είναι ορθή συνηγορώντας στην διαστολή του Σύμπαντος.

3. Το θέμα που προκύπτει με αυτή την υπόθεση είναι η απόσταση στην οποία μπορεί να βρεθεί ένας γαλαξίας και η ταχύτητα απομάκρυνσής του από τη Γη εξαιτίας της κίνησης Doppler.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι τους οποίους οι αστρονόμοι χρησιμοποιούν προκειμένου να μετρήσουν την απόσταση ενός γαλαξία. Οι δύο πιο βασικοί είναι οι ακόλουθοι:

- Μέτρηση της ακτινικής διαμέτρου ενός γαλαξία. Μέσω αυτού του τρόπου και γνωρίζοντας το φυσικό μέγεθος ενός αντικειμένου μετρώντας το πόσο μεγάλο εμφανίζεται στον ουρανό μπορούμε να μετρήσουμε την απόστασή του.
- Μέτρηση της απόστασης μέσω της λαμπρότητας ενός γαλαξία (Luminosity Distance). Γνωρίζοντας την ενδογενή λαμπρότητα ενός σώματος μπορούμε να μετρήσουμε την απόσταση στην οποία βρίσκεται μετρώντας την φαινόμενη λαμπρότητά του, δηλαδή το πόσο φωτεινό φαίνεται σε εμάς.

Αν η απομάκρυνση των γαλαξιών οφείλονταν στην κίνηση Doppler, τότε η μεγαλύτερη απόσταση στην οποία θα μπορούσαμε να βρούμε έναν γαλαξία θα ήταν 13,7 δισεκατομμύρια έτη φωτός, αφού το Σύμπαν έχει ηλικία 13,7 δισεκατομμύρια έτη. Δηλαδή θα ήταν λογικό να θεωρήσουμε ότι το ορατό Σύμπαν είναι μια σφαίρα, με κέντρο της Γη και ακτίνα 13,7 δισεκατομμύρια έτη. Μόνο που αυτό είναι εντελώς λάθος. Ο λόγος είναι ότι αυτό θα ίσχυε στην περίπτωση που το Σύμπαν ήταν στατικό. Όμως οι αστρονόμοι πολύ συχνά παρατηρούν γαλαξίες οι οποίοι βρίσκονται σε αποστάσεις 20-30 δισεκατομμύρια έτη φωτός μακριά. Μάλιστα ο πιο απομακρυσμένος γαλαξίας που έχουν παρατηρηθεί ποτέ βρίσκεται σε απόσταση 32 δισεκατομμυρίων ετών φωτός από εμάς, με ερυθρομετάθεση $z = 11,09$ (Oesch et al. 2016).

Επίσης, αν η κίνηση των γαλαξιών ήταν στον χώρο, τότε ένας γαλαξίας δεν θα μπορούσε να κινηθεί με ταχύτητα η οποία είναι ένα σημαντικό κλάσμα της ταχύτητας του φωτός, π.χ. 0,1c. Παρόλα αυτά οι αστρονόμοι παρατηρούν γαλαξίες με ερυθρομεταθέσεις έως $z = 11,09$, όπως είδαμε ανωτέρω, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα απομάκρυνσης 0,986c. Επειδή δεν είναι δυνατόν ένας γαλαξίας να κινείται στο χώρο με αυτή την εξαιρετικά μεγάλη ταχύτητα έπεται πως η εν λόγω ερυθρομετάθεση δεν μπορεί να είναι εξαιτίας του φαινομένου Doppler.

Όλα τα ανωτέρω δεδομένα καταδεικνύουν ότι το Σύμπαν διαστέλλεται, ότι δηλαδή είναι ο ίδιος ο χώρος ο οποίος «τεντώνει» παρασέρνοντας τα αστρονομικά αντικείμενα.

5. Φύλλο αξιολόγησης

1. Πριν τις παρατηρήσεις του Edwin Hubble, η επικρατούσα επιστημονική άποψη για το Σύμπαν ήταν πως αυτό είναι στατικό και δεν μεταβάλλεται. Τα αποτελέσματα της ανάλυσής σας επιβεβαιώνουν ή απορρίπτουν αυτή την άποψη; Γιατί;
2. Τελευταίες μετρήσεις κατέδειξαν ότι η σταθερά του Hubble έχει τιμή $H_0 = 73,2$ km/s/Mpc. Ο Hubble το 1927 μέτρησε τιμή $H = 500$ km/s/Mpc. Η απόκλιση που είχε η μέτρηση του Hubble είναι ~580% !!! Παρόλα αυτά η ανακάλυψη του Hubble θεωρείται τεραστίας σημασίας για την επιστήμη. Γιατί; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.
3. Στο εργαστήριο υπολογίσατε δύο παραμέτρους, την ταχύτητα απομάκρυνσης των γαλαξιών και την απόστασή τους από τη Γη. Ποια από τις δύο αυτές παραμέτρους πιστεύετε ότι εμφανίζει τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα στις ως προς τις υπολογιζόμενες τιμές; Γιατί;
4. Όπως προαναφέρθηκε πρόσφατα παρατηρησιακά δεδομένα κατέδειξαν ότι η σταθερά του Hubble έχει τιμή $H_0 = 73,2 \frac{\text{km}}{\text{s}} / \text{Mpc}$. Συγκρίνετε την τιμή αυτή με την τιμή που υπολογίσατε μέσω της ανάλυσής σας. Σε ποιους παράγοντες πιστεύετε ότι οφείλεται η διαφορά σας; Πόσο αξιόπιστες ήταν οι μετρήσεις σας;
5. Στο διάγραμμα το σημείο (0, 0) τι αντιπροσωπεύει;
6. Γιατί στο διάγραμμα που κατασκευάσατε τα σημεία δεν βρίσκονται πάνω στην γραμμή ή κλίση της οποίας μας έδωσε τον νόμο και τη σταθερά του Hubble;
7. Γιατί η σταθερά του Hubble δίνεται από την κλίση της ευθείας του διαγράμματος;
8. Γιατί υπολογίσαμε μια μέση τιμή για την σταθερά του Hubble από το δείγμα των 6 γαλαξιών;
9. Υποθέστε ότι η ταχύτητα διαστολής του Σύμπαντος μικραίνει συναρτήσει του χρόνου. Πως θα επηρεάσει αυτό τον νόμο του Hubble; Για παράδειγμα, η ευθεία γραμμή του διαγράμματος, της Εικόνας 12, θα καμφθεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω, στις μεγάλες αποστάσεις;

6. Βιβλιογραφία

Hawley, J. and Holcomb, K., 2009, Foundations of modern cosmology, Oxford, Oxford Univ. Press.

Hubble, E., & Tolman, R. C. 1935, The Astrophysical Journal, Volume 82, page 302

Hubble, E., PNAS, 1929, 15, 168-173, A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae

Oesch, P. A., Brammer, G., van Dokkum, P. G., 2016, The Astrophysical Journal, Volume 819, Issue 2, article id. 129, 11 pp.

Tolman, R. C. 1930, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 16, Issue 7, pp. 511-520

Tolman, R. C. 1934, Relativity, Thermodynamics, & Cosmology (Oxford: Clarendon Press), 467

Zwicky, F., 1929. On the red shift of spectral lines through interstellar space. Proceedings of the National Academy of Sciences, 15, 773-779

Di Valentino, E.; Melchiorri, A.; Silk, J., 2019, "Planck evidence for a closed Universe and a possible crisis for cosmology", Nature Astronomy.

Chen, G.C.-F.; Fassnacht, C.D.; Suyu, S.H., et al., 2019. "An Improved Distance to NGC 4258 and its Implications for the Hubble Constant", arXiv:1908.05625

Sidney van den Bergh; Madore, Barry F.; Hatt, Dylan, et al. 2019, "The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch", The Astrophysical Journal. 882 (1): 34.

Hotokezaka, K.; et al. (8 July 2019). "A Hubble constant measurement from superluminal motion of the jet in GW170817". Nature Astronomy. 3 (10): 940-944.

Riess, Adam G.; Casertano, Stefano; Yuan, Wenlong; Macri, Lucas M.; Scolnic, Dan (18 March 2019). "Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics Beyond LambdaCDM". The Astrophysical Journal. 876 (1): 85

Ryan, Joseph; Chen, Yun; Ratra, Bharat (8 February 2019), "Baryon acoustic oscillation, Hubble parameter, and angular size measurement constraints on the Hubble constant, dark energy dynamics, and spatial curvature", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 488 (3): 3844-3856