

Διαστολή του σύμπαντος

**Ricardo Moreno, Susana Deustua,
Rosa M. Ros, Beatriz García**

International Astronomical Union

Colegio Retamar de Madrid, Spain

Space Telescope Science Institute, USA

Technical University of Catalonia, Spain

ITeDA and Technological National University, Argentina



Στόχους

- Κατανοήστε τη διαστολή του σύμπαντος
- Κατανοήστε ότι δεν υπάρχει κέντρο του σύμπαντος
- Κατανοήστε το νόμο Hubble-Lemaître
- Κατανοήστε πώς να ανιχνεύσετε τη σκοτεινή ύλη



Παρουσίαση

Το εργαστήριο αφορά:

- Η προέλευση του σύμπαντος: η Μεγάλη Έκρηξη
 - Οι γαλαξίες: δεν «κινούνται» μέσα στο διάστημα, ο χώρος είναι αυτός που διαστέλλεται
 - Η σταθερά του Hubble : $v = H \times d$
 - Δεν υπάρχει κέντρο του σύμπαντος
 - Το κοσμικό μικροκυματικό υπόβαθρο (CMB)
- Βαρυτικοί φακοί.



Μοντέλα, προβλέψεις, επαλήθευση: Πειραματιστείτε με ένα τραπεζομάντιλο



Πρόβλεψη: αν τραβήξετε ένα τραπεζομάντιλο πολύ γρήγορα, τίποτα στο τραπέζι δεν θα πέσει κάτω. Εάν είμαστε σε θέση να το επαληθεύσουμε, η πρόβλεψή μας εκπληρώνεται.

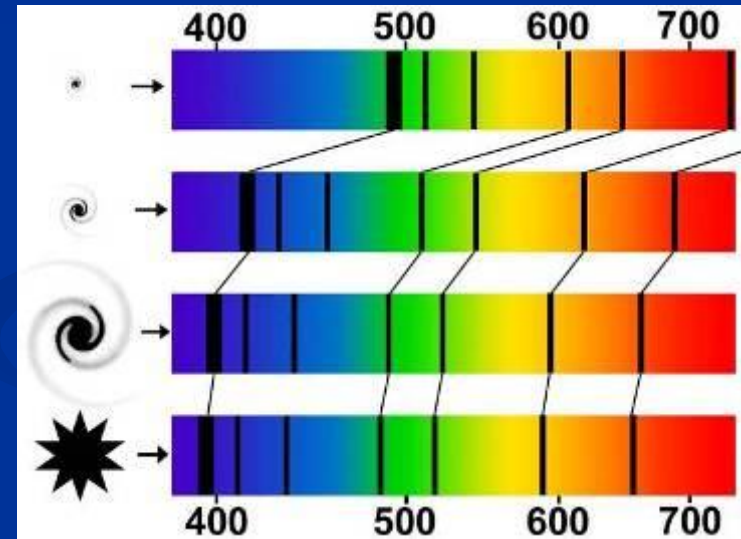
Εάν κάποιος τραβήξει γρήγορα το τραπεζομάντιλο, οι δυνάμεις τριβής δεν έχουν χρόνο να δράσουν στα αντικείμενα στο τραπέζι, γεγονός που εξηγεί γιατί δεν πέφτουν. Το πείραμα είναι επιτυχές επειδή η φυσική είναι μια επιστήμη που προβλέπει τι θα συμβεί.

Η Φυσική που αναπτύξαμε στη Γη είναι η ίδιο που εφαρμόζουμε στο υπόλοιπο Σύμπαν.



Κίνηση προς το κόκκινο

- Η απορρόφηση φωτός είναι διαφορετική για κάθε χημικό στοιχείο. Το φάσμα απορρόφησης φωτός παρουσιάζει χαρακτηριστικές γραμμές για κάθε χημικό στοιχείο.
- Όταν παρατηρούμε το φως από τους γαλαξίες, μπορούμε να δούμε ότι οι γραμμές μετατοπίζονται προς το κόκκινο άκρο του φάσματος. Όσο πιο μακριά είναι ο γαλαξίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η μετατόπιση προς το ερυθρό.
- Αυτό ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα της απομάκρυνσης του γαλαξία από εμάς.



Κίνηση προς το κόνκβινο

- Οι κοντινοί γαλαξίες έχουν σχετικά μικρές και ακανόνιστες κινήσεις: το Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου $+13$ km/s, το Μικρό Νέφος του Μαγγελάνου -30 km/s, ο Γαλαξίας της Ανδρομέδας -60 km/s, M32 $+21$ km/s.
- Στο σμήνος της Παρθένου, (50 εκατομμύρια λύρες μακριά), όλοι οι γαλαξίες απομακρύνονται από εμάς με ταχύτητες μεταξύ 1.000 και 2.000 km/s.
- Στο υπερσμήνος Coma Berenice (300 εκατομμύρια λύρες μακριά) οι ταχύτητες κυμαίνονται μεταξύ 7 000 και 8 500 km/s.



Κίνηση προς το κόνκβινο

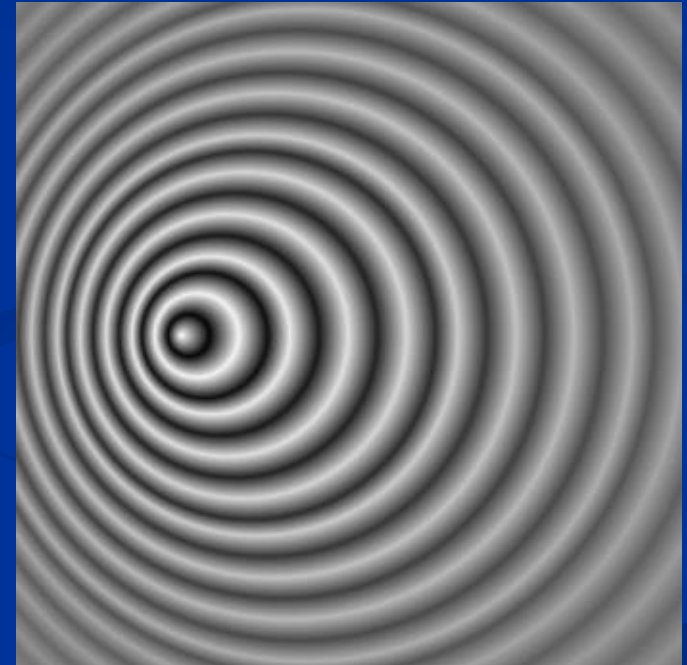
- Στην αντίθετη κατεύθυνση, το M 74 απομακρύνεται με ταχύτητα 800 km/s και η M 77 με ταχύτητα 1 130 km/s.
- Αν παρατηρήσουμε μακρινούς και αμυδρούς γαλαξίες, η ταχύτητα ύφεσης είναι ακόμη μεγαλύτερη: ο γαλαξίας NGC 375 απομακρύνεται με ταχύτητα 6.200 km/s, ο NGC 562 με ταχύτητα 10.500 km/s και ο NGC 326 με ταχύτητα 14.500 km/s.
- Ανεξάρτητα από την κατεύθυνση προς την οποία παρατηρούμε, όλοι, εκτός από τους πολύ κοντινούς γαλαξίες, απομακρύνονται από εμάς.



Φαινόμενο Doppler

Με τον ίδιο τρόπο όπως στο παράδειγμα του τραπεζομάντιλου, μπορούμε να εφαρμόσουμε άλλες φυσικές αρχές στη μελέτη του σύμπαντος.

- Εάν πλησιάζει ένα ασθενοφόρο, μια μοτοσικλέτα ή ένα τρένο, θα ακούσουμε έναν υψηλότερο ήχο. Όταν απομακρύνονται ακούμε έναν χαμηλότερο ήχο.
- Υψηλότερο βήμα \rightarrow το μήκος κύματος μειώνεται
- Χαμηλότερο βήμα \rightarrow το μήκος κύματος επιμηκύνεται



Δραστηριότητα 1: Φαινόμενο Doppler



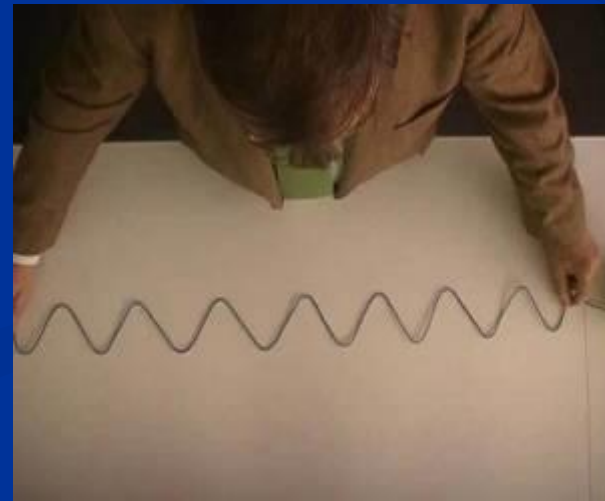
- Το φαινόμενο Doppler μπορεί να ακουστεί περιστρέφοντας ένα ξυπνητήρι ή βομβητή σε οριζόντιο επίπεδο.
- Όταν πλησιάζει τον ακροατή, λ μειώνεται και ο τόνος του ήχου είναι υψηλότερος.
- Όταν απομακρύνεται, το λ τεντώνεται και ο τόνος του ήχου είναι χαμηλότερος.
- Αυτό συμβαίνει με τους ήχους των μοτοσικλετών, των ασθενοφόρων, των τρένων...



Στο πείραμα, το φαινόμενο Doppler οφείλεται στη σχετική μετατόπιση πηγής-δέκτη και επισημαίνεται με ήχους. Στην περίπτωση της διαστολής του Σύμπαντος, το φαινόμενο συμβαίνει με ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Δραστηριότητα 2: «Τέντωμα» φωτονίων

- ❑ Το σύμπαν, όταν διαστέλλεται, «τεντώνει» τα φωτόνια μέσα του.
- ❑ Μπορείτε να δημιουργήσετε ένα μοντέλο αυτού του τεντώματος χρησιμοποιώντας ένα ημι-άκαμπτο καλώδιο του τύπου που χρησιμοποιείται στην οικιακή καλωδίωση.
- ❑ Όσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή του φωτονίου, τόσο περισσότερο τεντώνονται.



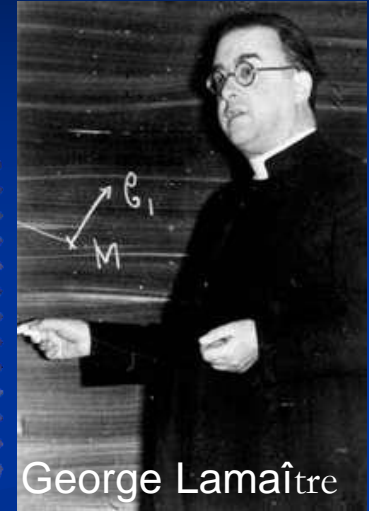
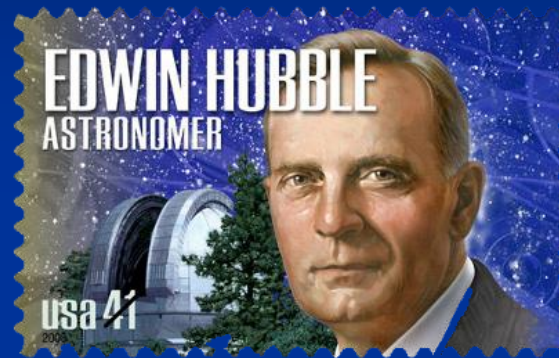
Νόμος Hubble-Lemaître

Μεταξύ 1920 και 1930, ο George Lemaître και ο Edwin Hubble συνειδητοποίησαν ότι οι πιο μακρινοί γαλαξίες απομακρύνονται γρηγορότερα από τους κοντινούς.

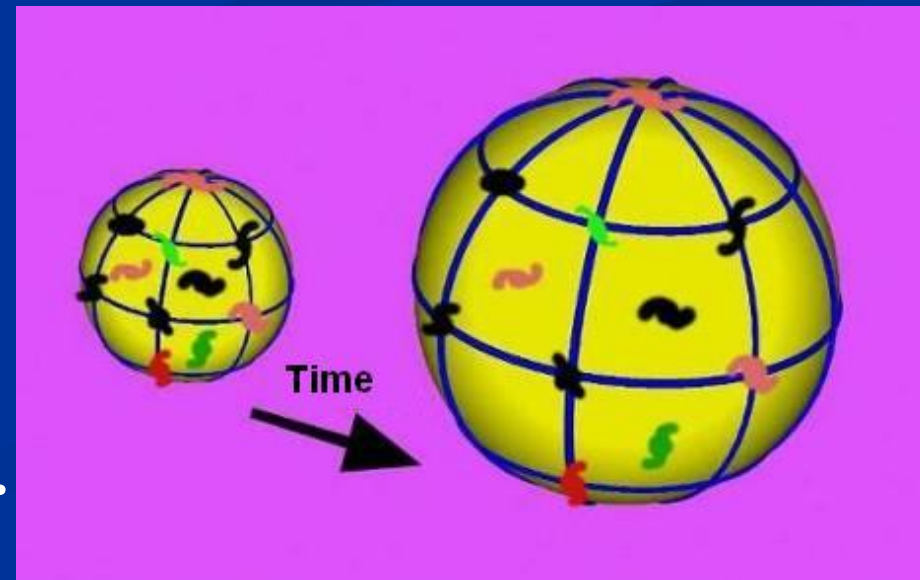
Νόμος Hubble-Lemaître:

$$v = H \times d$$

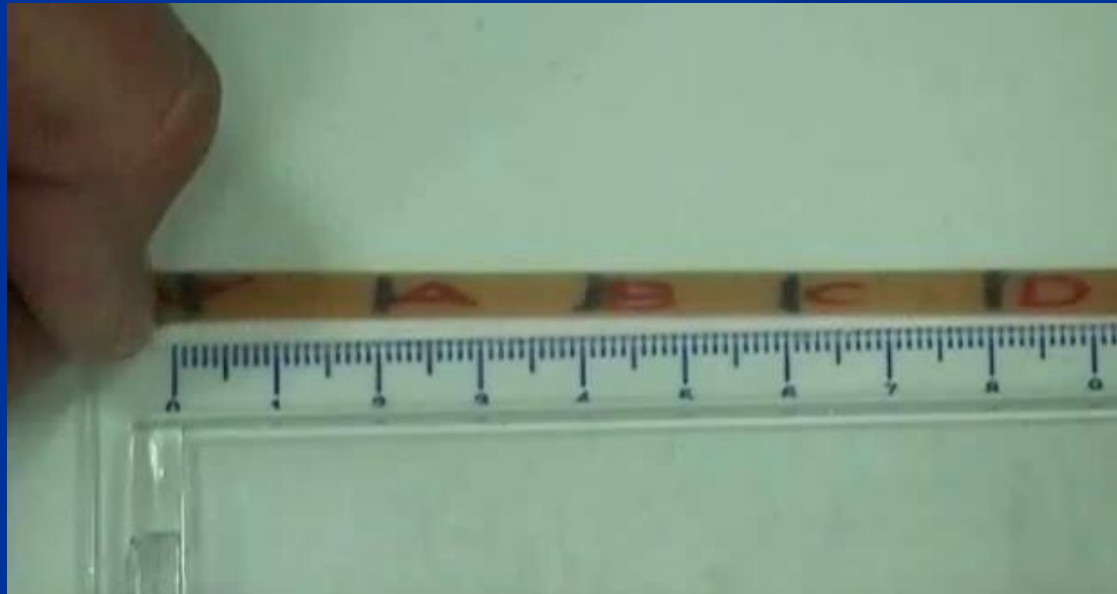
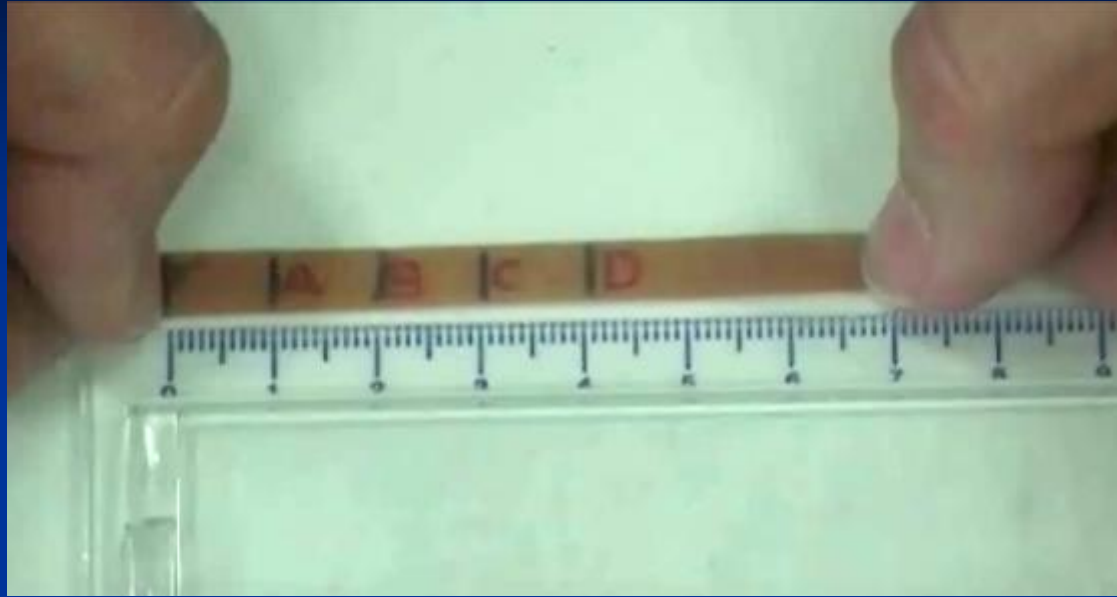
Οι γαλαξίες δεν κινούνται μέσα στο διάστημα: είναι ο χώρος που διαστέλλεται, παρασύροντας τους γαλαξίες.



George Lemaître



Δραστηριότητα 3: Το σύμπαν σε μια ελαστική ταινία



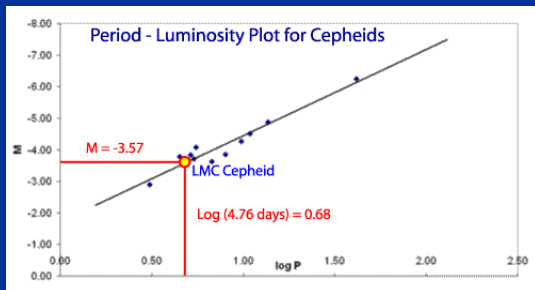
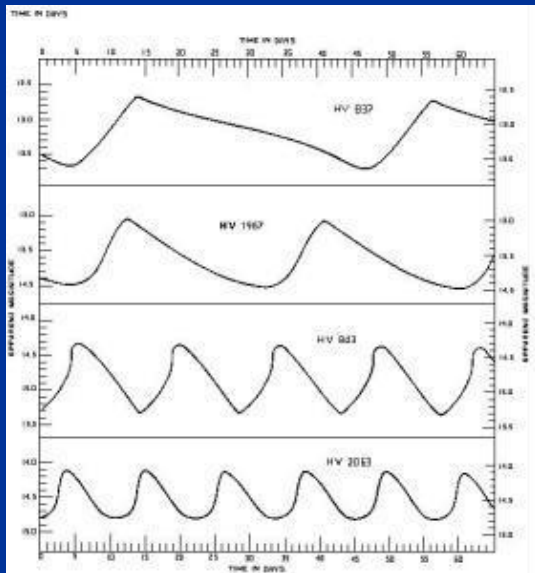
Δραστηριότητα 4: Το σύμπαν σε ένα μπαλόνι



- Η απόσταση μεταξύ των γαλαξιών αυξάνεται με την επέκταση.
- Οι γαλαξίες δεν κινούνται μέσα από το μπαλόνι
- Τοποθετώντας τον εαυτό μας σε οποιοδήποτε "γαλαξία" στο μπαλόνι
Βλέπουμε ότι οι άλλοι απομακρύνονται από εμάς.

Διαστολή του σύμπαντος

1) Η απόσταση από τους πλησιέστερους γαλαξίες μπορεί να ληφθεί από τη σχέση περιόδου-φωτεινότητας των μεταβλητών αστερών των Κηφείδων (που ανακαλύφθηκε από την Henrietta Leavitt, στο Χάρβαρντ, στις αρχές του 20ου αιώνα)



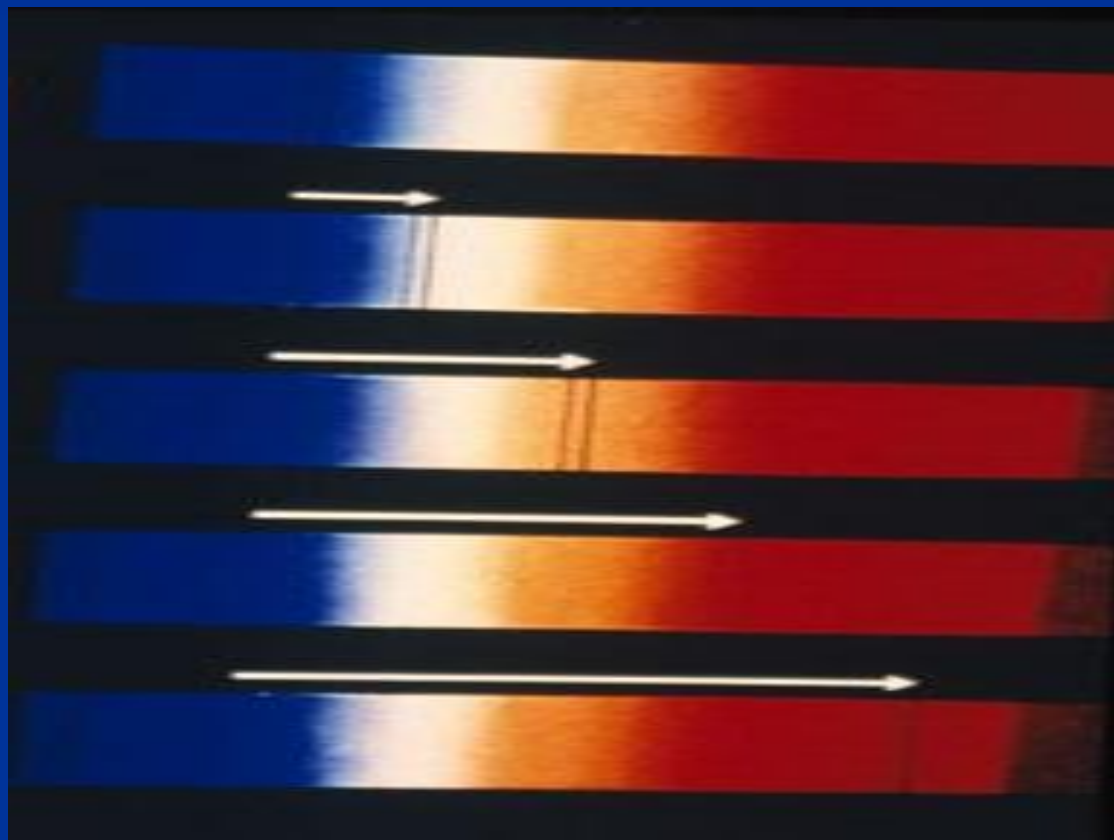
- Από την καμπύλη φωτός είναι δυνατόν να ληφθεί η περίοδος P
- Από τη σχέση περιόδου-φωτεινότητας μπορούμε να πάρουμε το απόλυτο μέγεθος M
- Με M και m , Είναι δυνατή η μέτρηση της απόστασης από τον γαλαξία $d=10^{(m-M+5)/5}$
- Παρσέν
- Για να προσδιορίσουν τις αποστάσεις των πιο απομακρυσμένων γαλαξιών, οι αστρονόμοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν έναν συγκεκριμένο τύπο σουπερνόβα (τύπου Ia), οι οποίοι έχουν παρόμοιες μέγιστες φωτεινότητες.



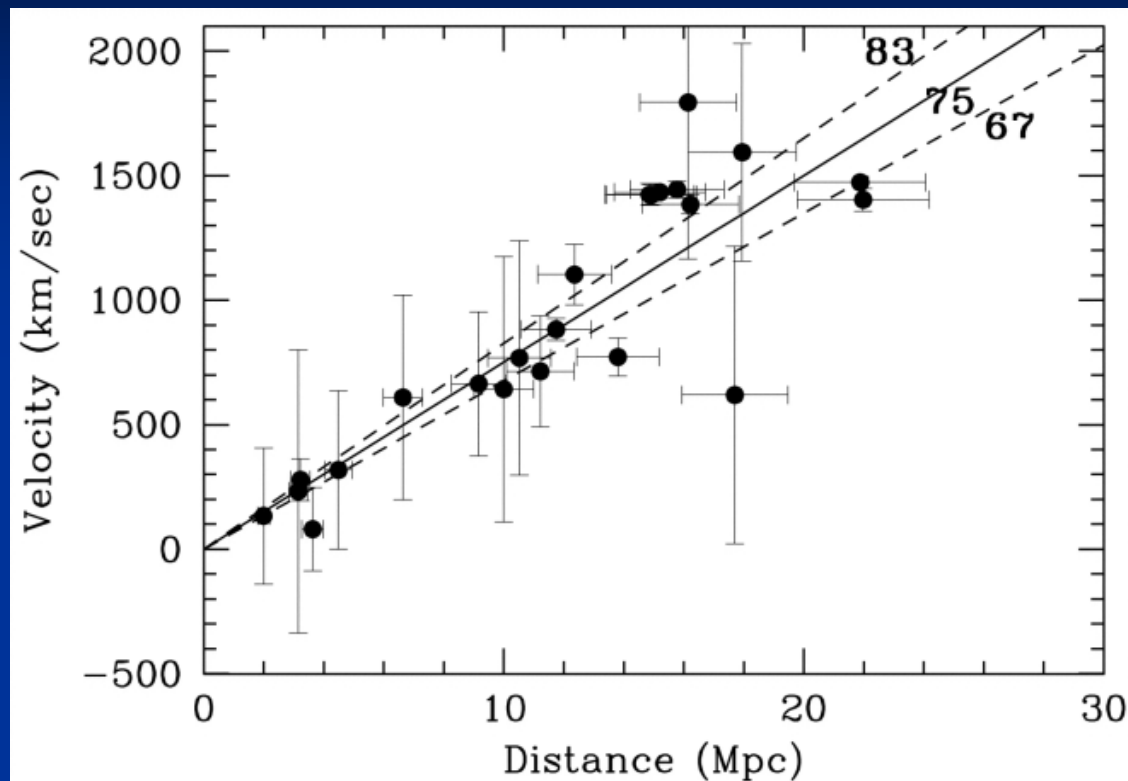
Διαστολή του σύμπαντος

2) Η ταχύτητα υποχώρησης μετράται από τη μετατόπιση των γραμμών απορρόφησης στο φάσμα, χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$v = (\Delta \lambda / \lambda) \times c$$



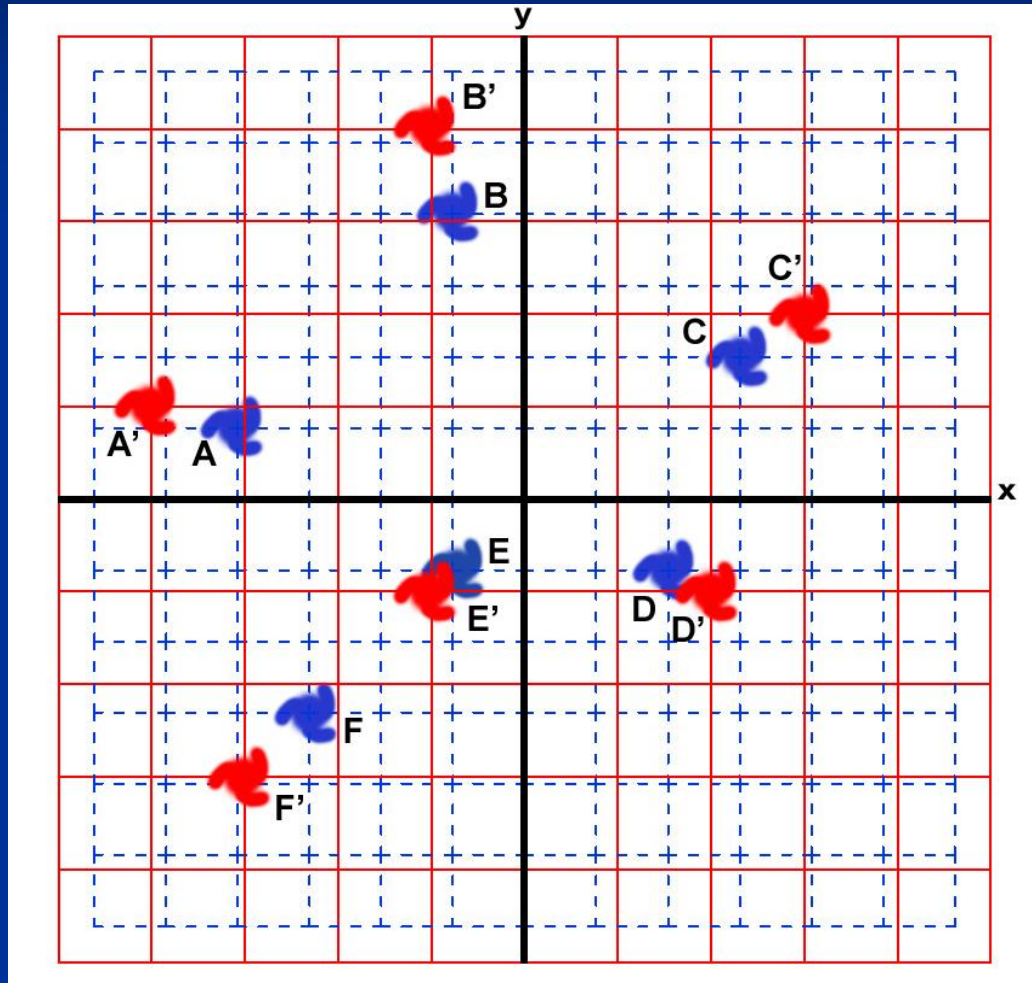
Διαστολή του σύμπαντος



(from Freedman et al, 2001, ApJ, vol 553, p47)

3. Η σταθερά του Hubble είναι η κλίση του γραφήματος συναρτήσεων: $v = H_0 \times d$, πού H_0 είναι ο ρυθμός διαστολής του σύμπαντος: $H_0 = 72 \text{ km/s.Mpc}$

Δραστηριότητα 5: Υπολογισμός της σταθεράς Hubble-Lemaître

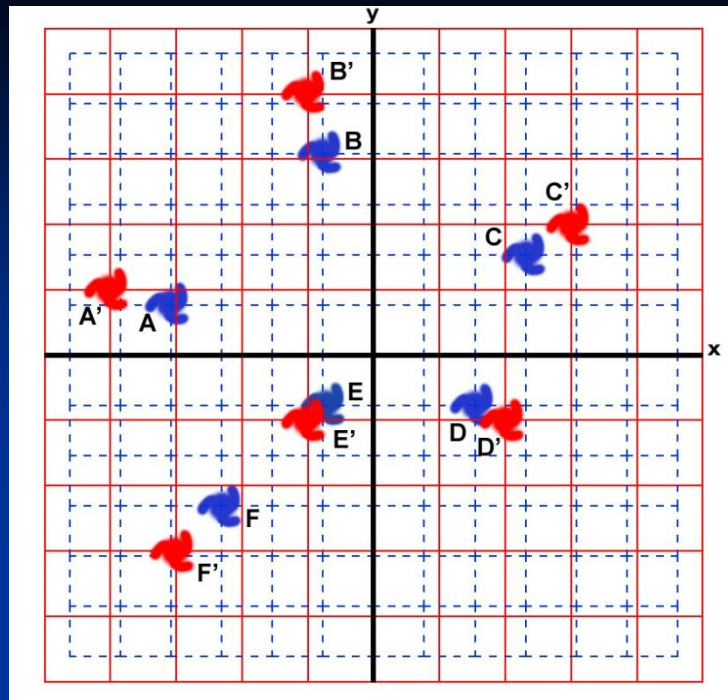


**Μπλε = Σύμπαν
πριν επεκταθεί**

**Κόκκινο =
Σύμπαν μετά την
επέκταση**

Δραστηριότητα 5: Υπολογισμός της σταθεράς Hubble-Lemaître

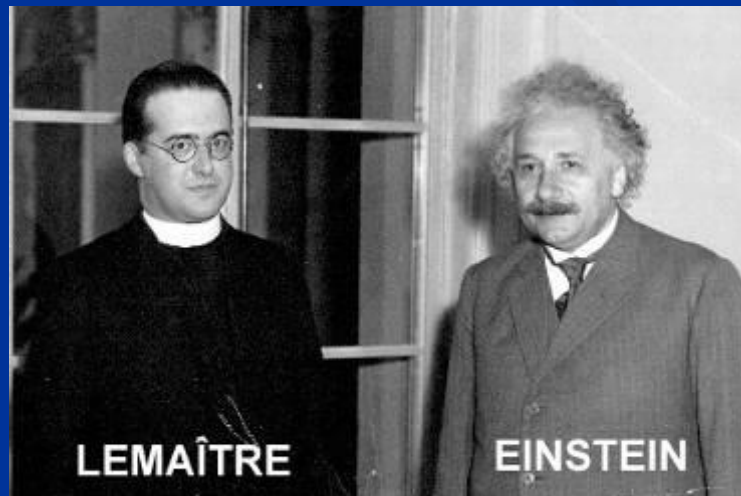
<i>Galaxy</i>	<i>Coordinates x,y</i>	<i>d=distance to origin</i>	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
<i>A</i>					
<i>A'</i>					
<i>B</i>					
<i>B'</i>					
<i>C</i>					
<i>C'</i>					
<i>D</i>					
<i>D'</i>					
<i>E</i>					
<i>E'</i>					
<i>F</i>					
<i>F'</i>					



Galaxy	Coordinates x,y	d =distance to origin	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

Η Μεγάλη Έκρηξη

- Αν πάμε πίσω, υπήρξε μια εποχή που όλα ήταν ενωμένα: σύμπαν σε επέκταση.
- Ο Georges Lemaître, λύνοντας τις εξισώσεις της σχετικότητας, κατέληξε στην ιδέα ενός διαστελλόμενου σύμπαντος που ξεκίνησε ως ένα «κοσμικό αυγό».



Η Μεγάλη Έκρηξη

- Όνομα της Μεγάλης Έκρηξης: μεγάλη έκρηξη.
- Ο Φρεντ Χόιλ, με ορισμένες αντιθρησκευτικές προκαταλήψεις, πίστευε ότι φαινόταν πολύ συνεπής με την ιδέα ενός Δημιουργού.
- Η S & T έκανε διαγωνισμό για να το μετονομάσει. Υποβλήθηκαν 12 000 προτάσεις. Κανένα δεν ήταν καλύτερο!

Η Μεγάλη Έκρηξη

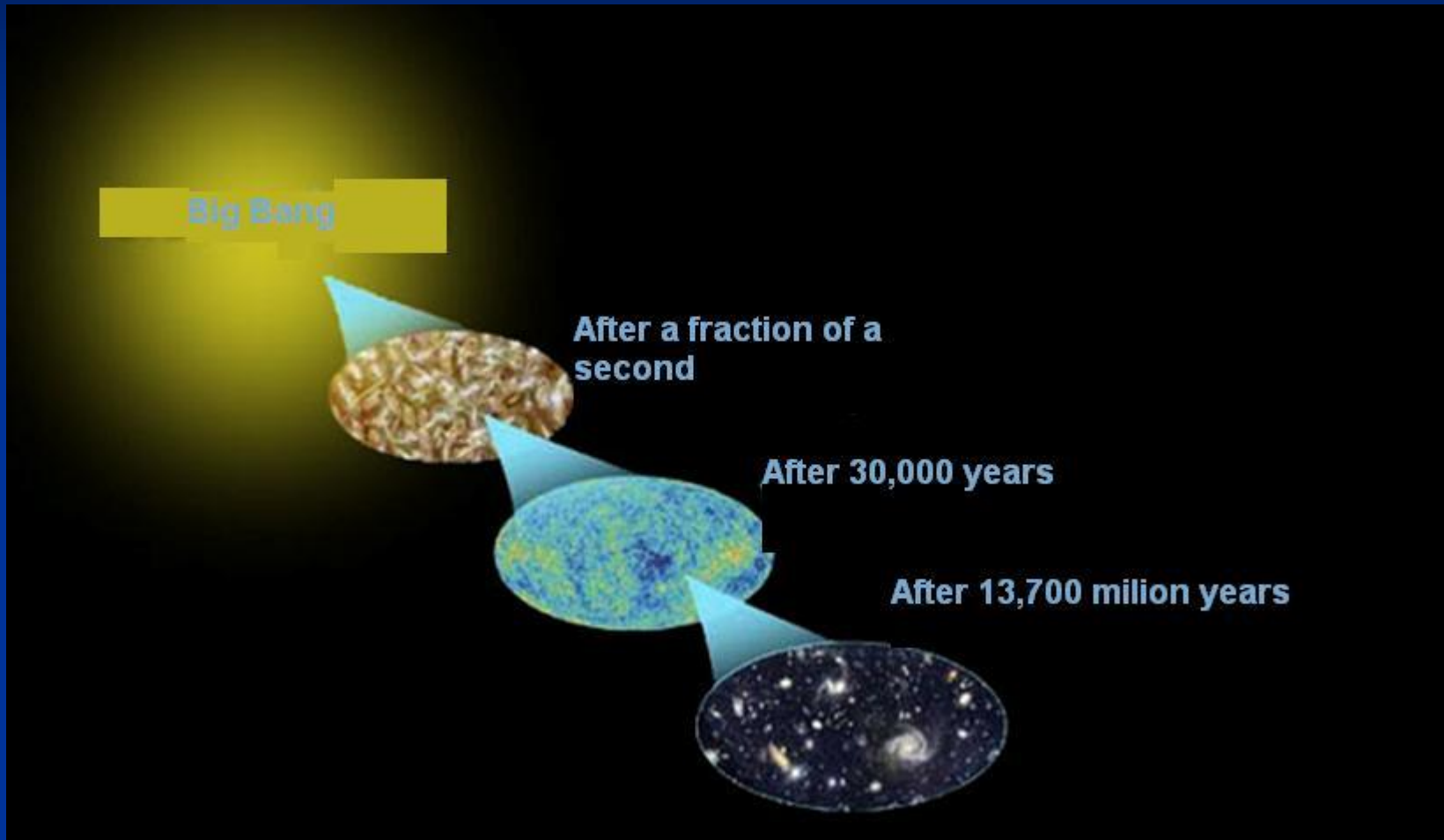
- Πριν από το Big Bang; Δεν γνωρίζουμε τίποτα.
- Ποια ήταν η αιτία; Γιατί συνέβη αυτό; Γιατί τηρεί παντού τους ίδιους φυσικούς νόμους;
- Η φυσική έχει να κάνει με το πώς λειτουργούν τα υπάρχοντα πράγματα, όχι με το γιατί υπάρχουν.
- Η φυσική μελετά την ύλη από την προέλευσή της (από τη Μεγάλη Έκρηξη), όχι πριν, ούτε μελετά τον λόγο ή τον σκοπό της ύπαρξής της. Αυτά είναι φιλοσοφικά και θρησκευτικά ζητήματα, αλλά όχι επιστημονικά ερωτήματα.

Η Μεγάλη Έκρηξη

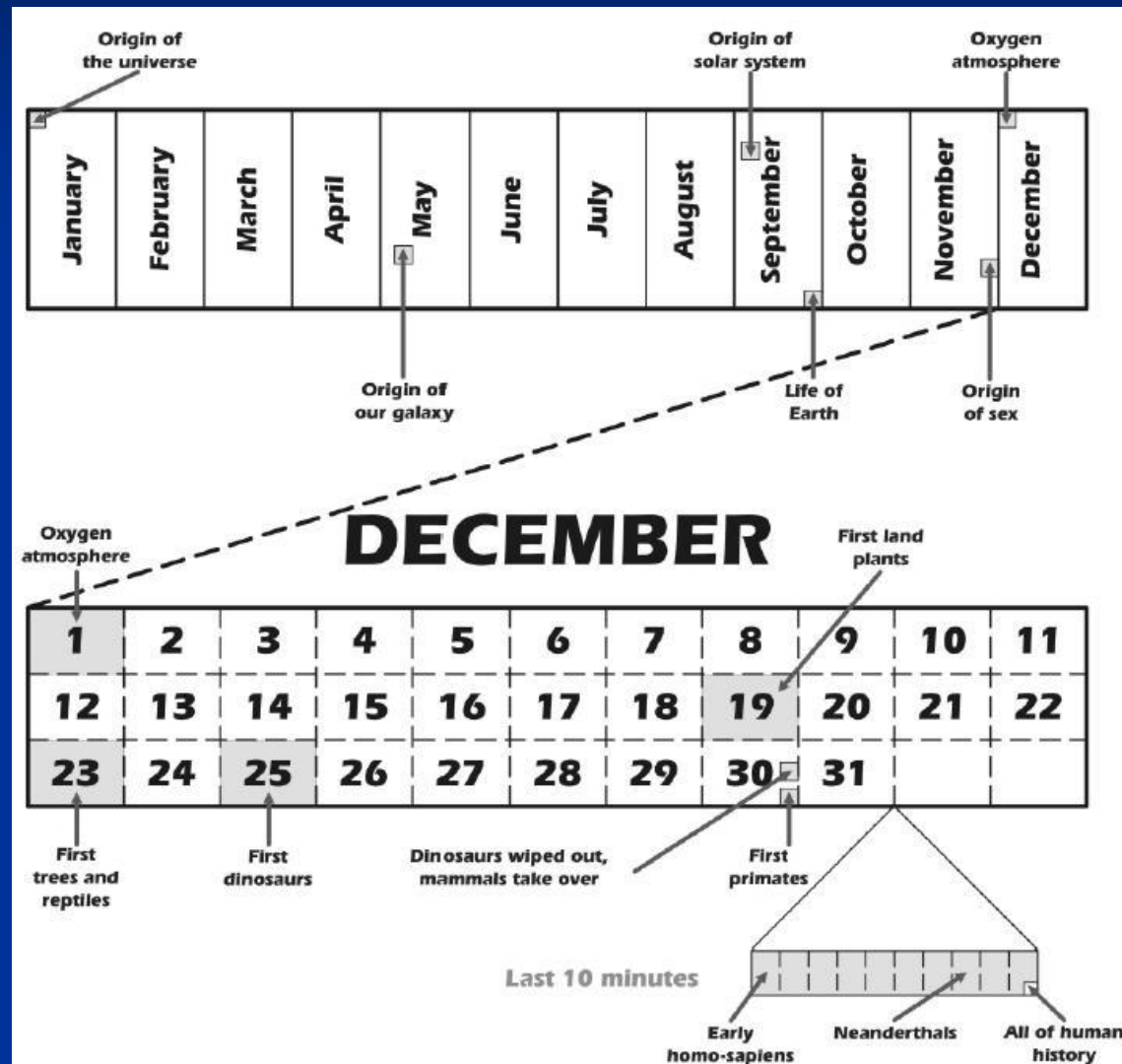
- Διακύμανση του κβαντικού κενού;
- Το κενό δεν είναι τίποτα, υπάρχει.
- Πολλαπλά σύμπαντα; Εξ ορισμού αναπόδεικτο.



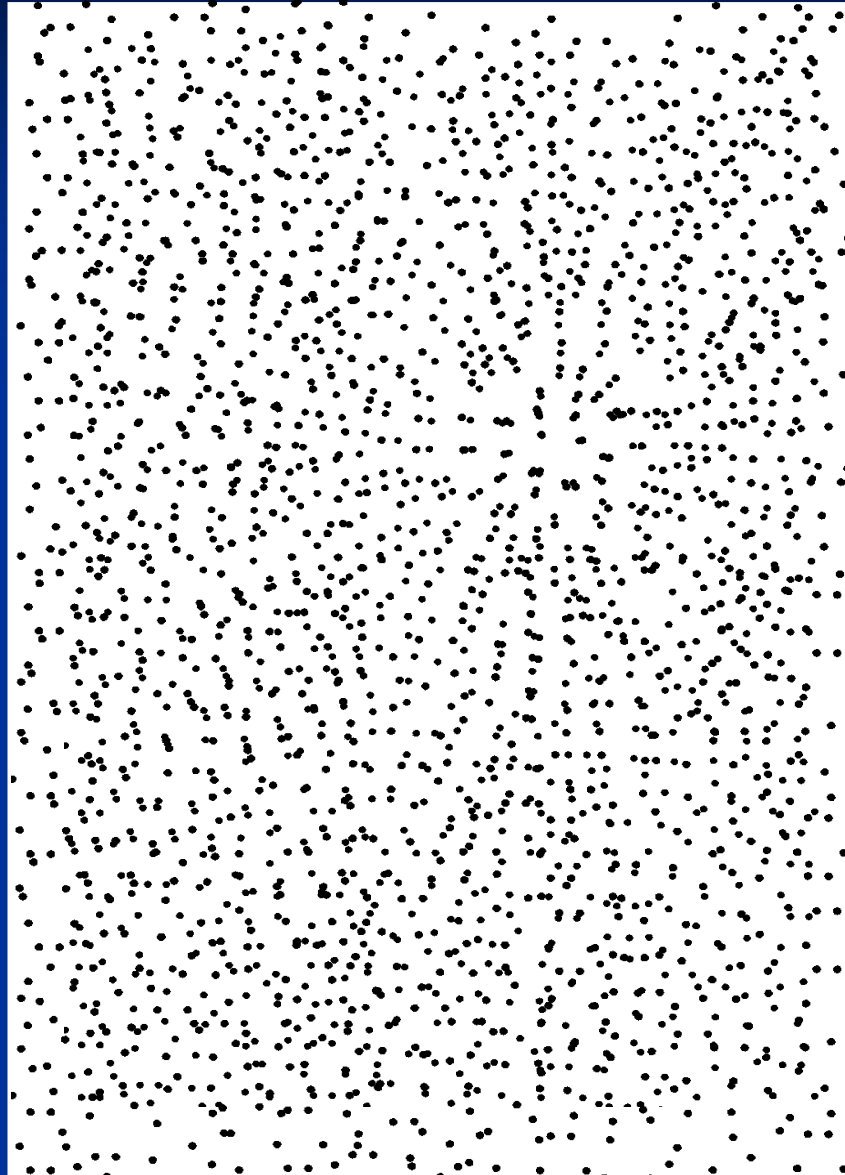
Εξέλιξη του σύμπαντος



Ανάπτυξη του σύμπαντος σε ένα χρόνο



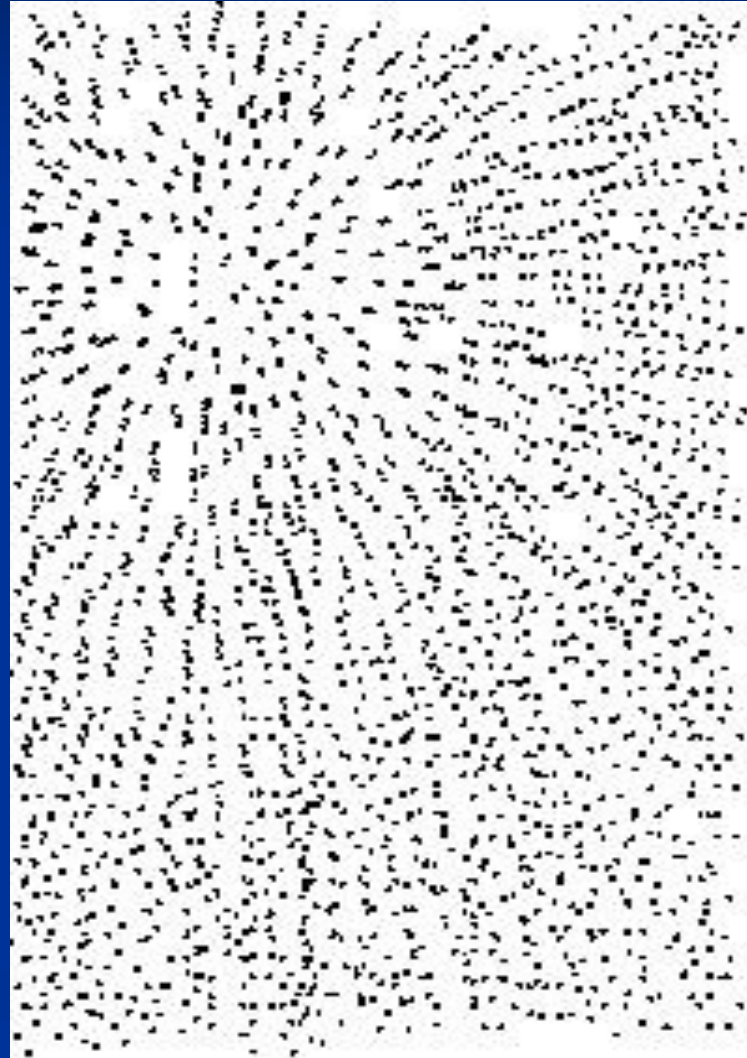
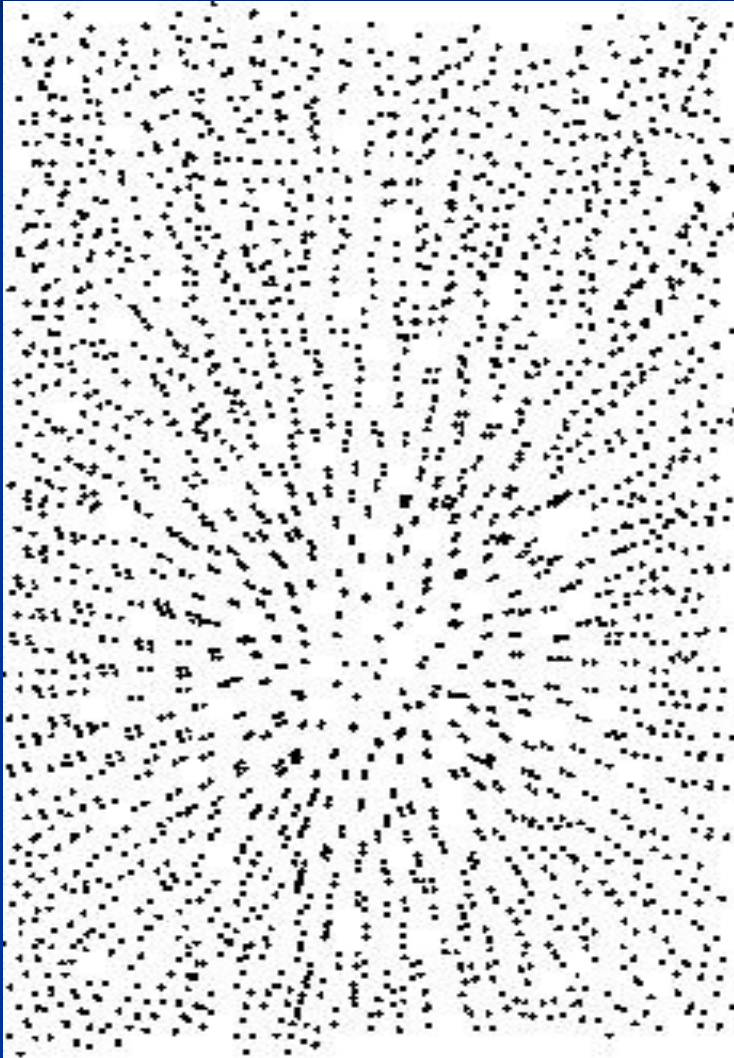
Δραστηριότητα 6: Δεν υπάρχει κέντρο επέιτασης



100%

105%

Δραστηριότητα 6: Δεν υπάρχει κέντρο επέκτασης



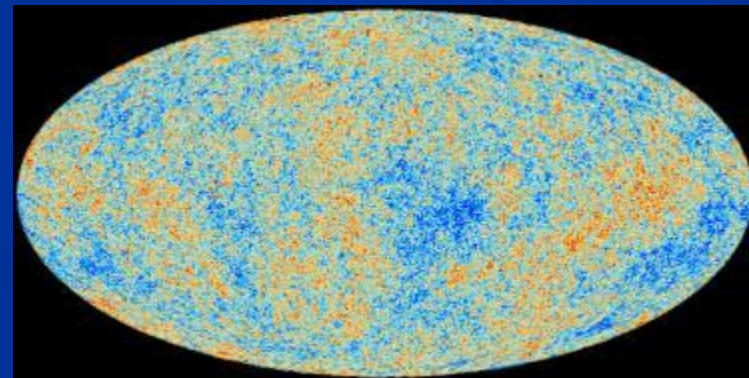
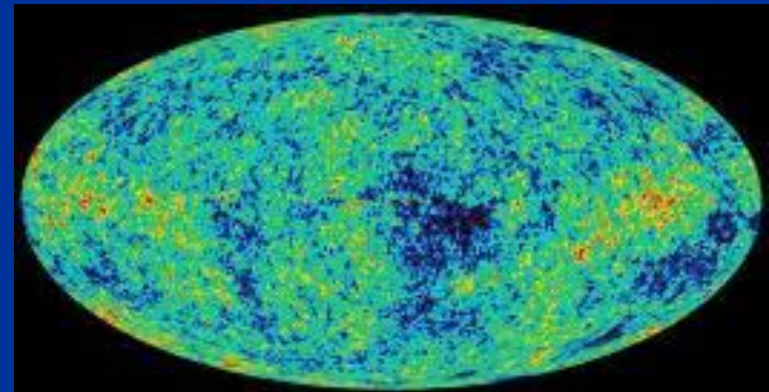
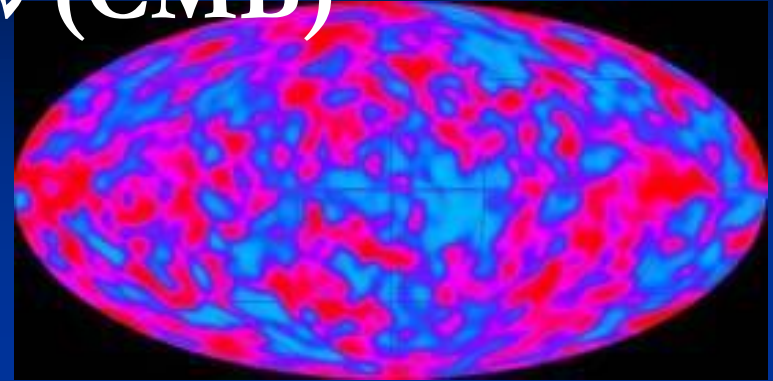
Κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου μικροκυμάτων (CMB)

- Ακτινοβολία που έγινε ελεύθερη στα 380.000 χρόνια μετά τη Μεγάλη Έκρηξη.
- Με την πάροδο του χρόνου, καθώς ο χώρος επεκτείνεται, τα φωτόνια CMB επεκτάθηκαν στο μήκος κύματός τους.
- Τώρα βρίσκονται στην περιοχή μικροκυμάτων.



Κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου μικροκυμάτων (CMB)

- Οι αποστολές COBE, WMAP και PLANCK έφτιαξαν έναν χάρτη του ουρανού της ακτινοβολίας CMB, κάθε φορά με περισσότερες λεπτομέρειες. Ανίχνευσαν μικρές διακυμάνσεις: αποτυπώματα σβώλων ύλης από τους οποίους άρχισαν να σχηματίζονται γαλαξίες.



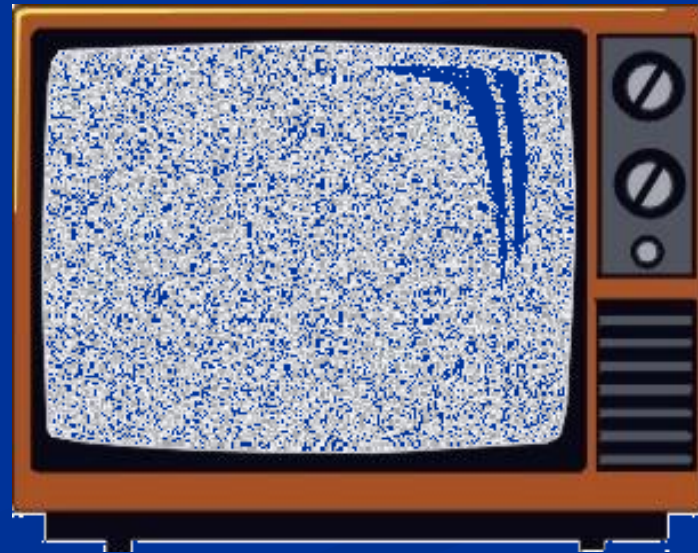
Δραστηριότητα 7: Κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου

- Περισσότερα από 300.000 χρόνια μετά τη Μεγάλη Έκρηξη, τα φωτόνια διαχωρίστηκαν από την ύλη και άρχισαν να ταξιδεύουν ελεύθερα μέσα στο σύμπαν.
- Με την επέκταση του χώρου, τα φωτόνια επέκτειναν το μήκος κύματος τους, σήμερα $\lambda = 2 \text{ mm}$, ισοδύναμο με $T = 2.7 \text{ K} = -270 \text{ }^\circ\text{C}$.



Δραστηριότητα 7: Κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου (CMB)

Μπορούμε να ανιχνεύσουμε CMB με αναλογική τηλεόραση. Σε ένα άδειο κανάλι, ένα στα δέκα σημεία προέρχεται από μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου. Ένα παρόμοιο εφέ μπορεί να ακουστεί σε ένα ραδιόφωνο VHF που είναι συντονισμένο εκτός σταθμού.



Σκοτεινή ύλη: Πίνακας περιστροφής που αντισταθμίζει την έλξη της γήινης βαρύτητας

Οι μαύρες τρύπες είναι αόρατες, αλλά γνωρίζουμε ότι υπάρχουν επειδή η βαρυτική τους δύναμη κάνει τα αστρικά συστήματα να κινούνται γύρω τους.



Αν και η σκοτεινή ύλη είναι αόρατη, ένας τρόπος για να την ανιχνεύσουμε είναι παρατηρώντας και μελετώντας την κίνηση των σπειροειδών βραχιόνων των γαλαξιών.



Ένας άλλος τρόπος ανίχνευσης της σκοτεινής ύλης: βαρυτικός φακός



Ο βαρυτικός φακός λειτουργεί σαν οπτικός φακός, η μάζα του παραμορφώνει τον περιβάλλοντα χώρο και εκτρέπει το φως ενός μακρινού αντικειμένου.



Βαρυτικοί φακοί

- Το φως ακολουθεί πάντα το συντομότερο δυνατό μονοπάτι
- Εάν η επιφάνεια είναι καμπύλη, η διαδρομή είναι καμπύλη.

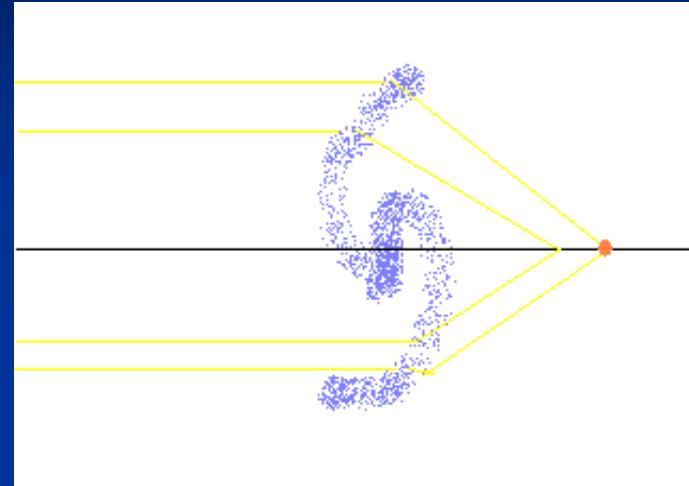
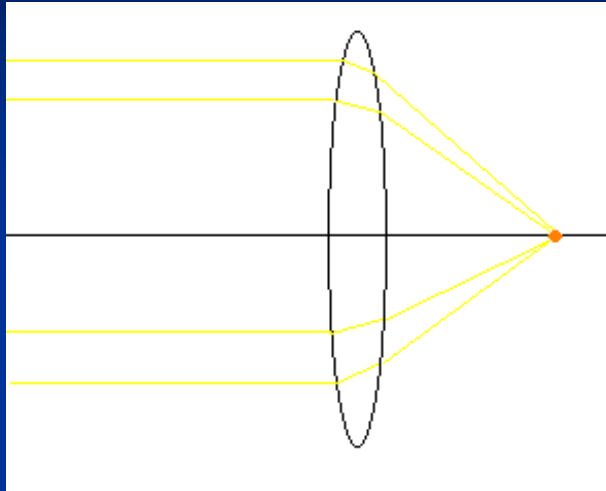


Γιατί το φως κάμπτεται όταν περνάτε κοντά σε ένα σώμα;

- Εάν υπάρχει μάζα, ο χώρος είναι καμπύλος και η συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο σημείων είναι καμπύλη.
- Μια παρόμοια κατάσταση μπορεί να παρατηρηθεί χρησιμοποιώντας μια σφαίρα της Γης.

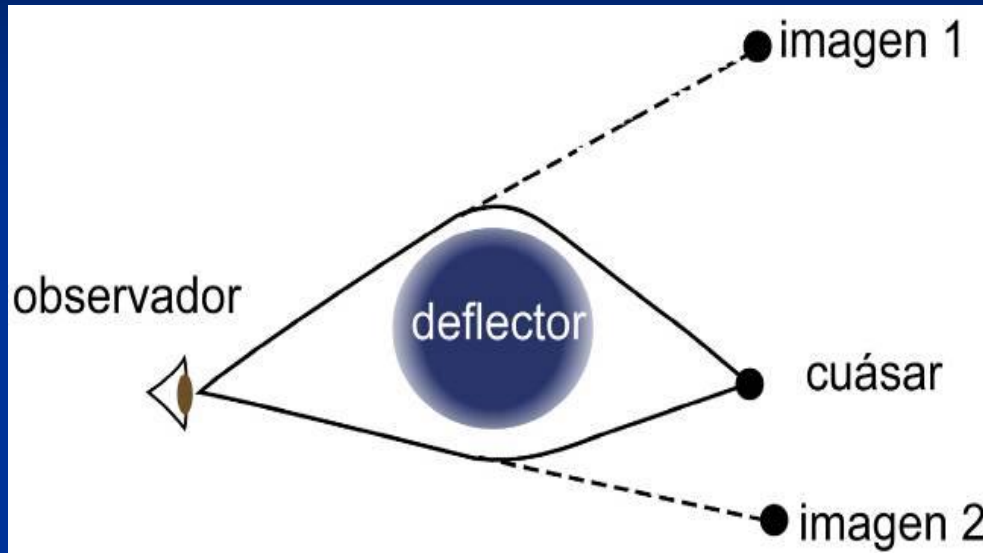


Πώς λειτουργούν οι βαρυτικοί φακοί;



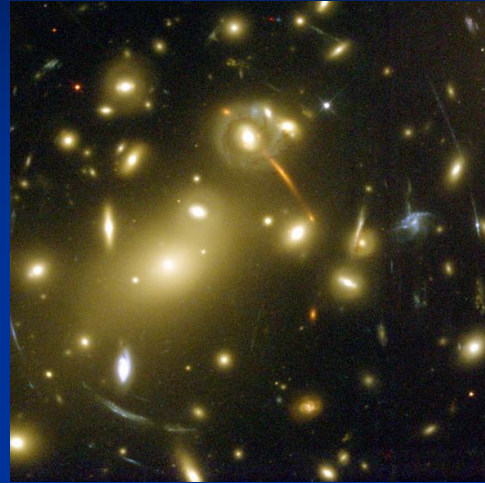
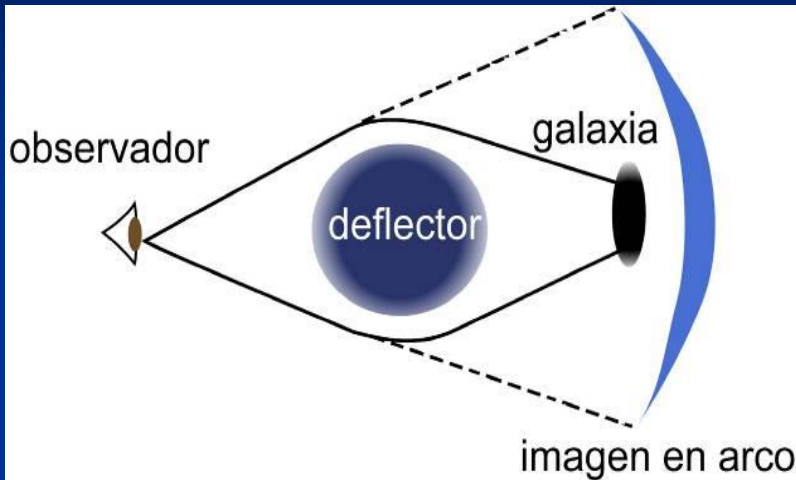
- Ένας κυρτός οπτικός φακός εστιάζει παράλληλες ακτίνες φωτός σε ένα σημείο: την εστίαση.
- Ένας βαρυτικός φακός (π.χ. γαλαξίας ή ομάδα/σμήνος γαλαξιών) εστιάζει τις ακτίνες φωτός σε μια γραμμή αντί για ένα σημείο. Αυτό μπορεί να εισαγάγει
■ αριετές παραμορφώσεις στην εικόνα.

Αλλαγές θέσης και πολλαπλασιασμός



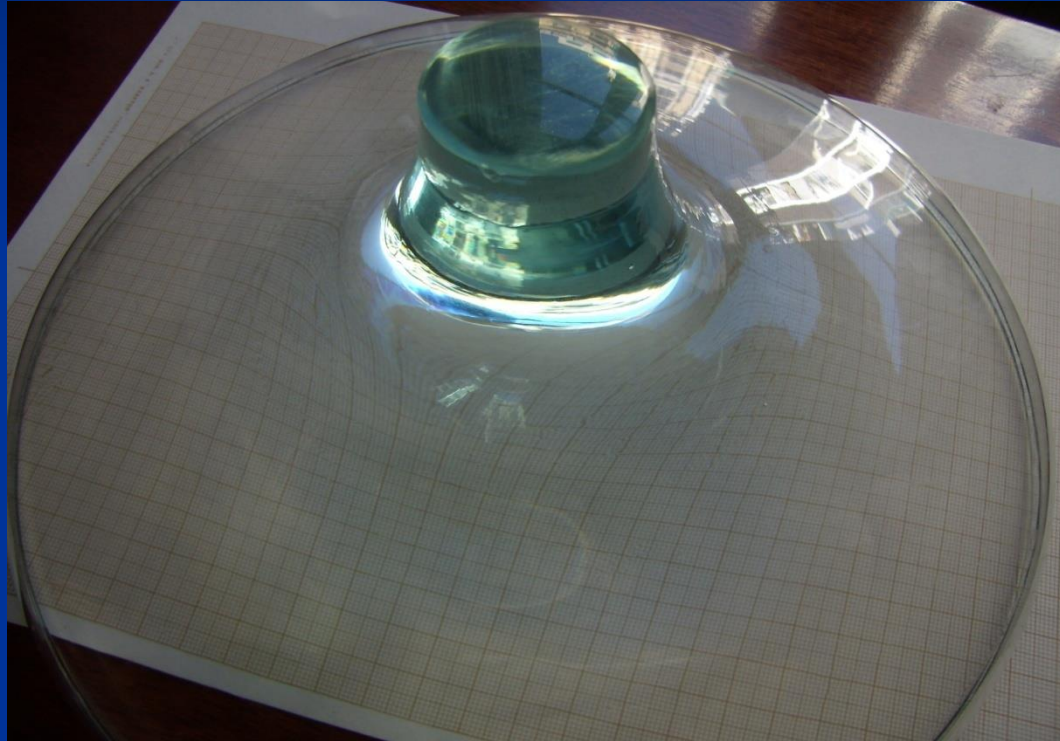
- Η εκτροπή παράγει τη φαινομενική θέση του άστρου, του γαλαξία ή του κβάζαρ.
- Οι βαρυτικοί φακοί δεν είναι τέλειοι, οι μεγαλύτεροι μπορούν να παράγουν πολλαπλές εικόνες.

Εικτροπής



- Εάν το σώμα που εκτρέπεται είναι μια εκτεταμένη αστρονομική πηγή, οι εικόνες που προκύπτουν είναι ένα σύνολο φωτεινών τόξων.
- Εάν το σύστημα φακών είναι απόλυτα συμμετρικό, οι ακτίνες συγκλίνουν και το αποτέλεσμα είναι ένας δακτύλιος - ένας δακτύλιος του Αϊνστάιν.
- Εάν το σώμα που εκτρέπεται είναι ένα αστέρι ή ένα κβάζαρ, η εικόνα είναι ένα σημείο.

Δραστηριότητα 8: Προσομοίωση της παραμόρφωσης με το πόδι ενός ποτηριού κρασιού



Αν τοποθετήσουμε τη βάση ενός ποτηριού κρασιού σε ένα χαρτί γραφήματος μπορούμε να δούμε την παραμόρφωση.



Δραστηριότητα 8: Κοιτάζοντας μέσα από τον «πάτο ενός ποτηριού κρασιού»



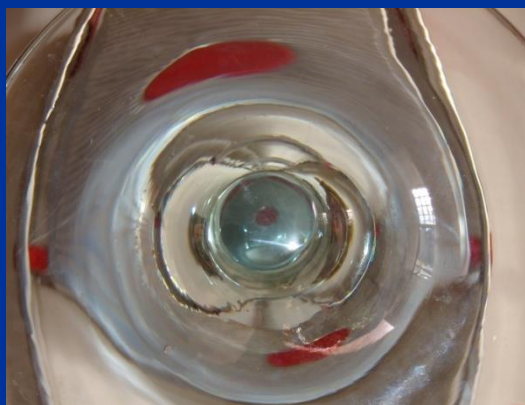
Απλά κόψτε το κάτω μέρος από το γυαλί.



+



=

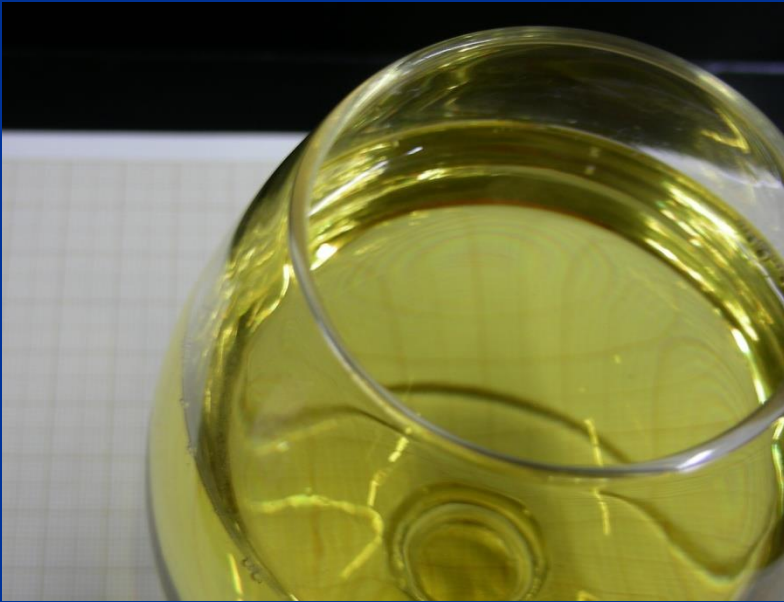


Θραύσμα τόξου Σταυρός του Αϊνστάϊν

Δαχτυλίδι του Αϊνστάϊν



Δραστηριότητα 9: Προσομοίωση της παραμόρφωσης του χώρου με ένα ποτήρι κρασί



Εάν βάλετε ένα ποτήρι λευκό κρασί σε χαρτί γραφήματος και κοιτάξετε μέσα από το κρασί, μπορείτε να δείτε αυτή την παραμόρφωση.

Δραστηριότητα 9: Φτιάξτε έναν φακό και κινηθείτε αργά ενώ κοιτάζετε μέσα από ένα ποτήρι κρασί



Αυτό το απλό μοντέλο δείχνει ότι η «ύλη» μπορεί να αναπαράγει παραμορφώσεις σε εικόνες που παρατηρούνται μέσω αυτής.

(Το κρασί μπορεί να αντικατασταθεί από άλλο ημιδιαφανές υγρό)

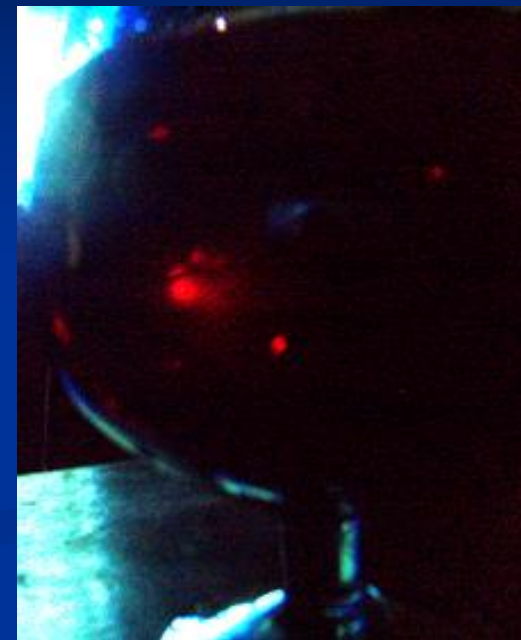
Δραστηριότητα 9: Φτιάξτε έναν φακό και κινηθείτε αργά ενώ κοιτάζετε μέσα από ένα ποτήρι κρασί



Θραύσμα τόξου



Άμορφη φιγούρα



Σταυρός του Αϊνστάϊν



Το δαχτυλίδι του Αϊνστάϊν

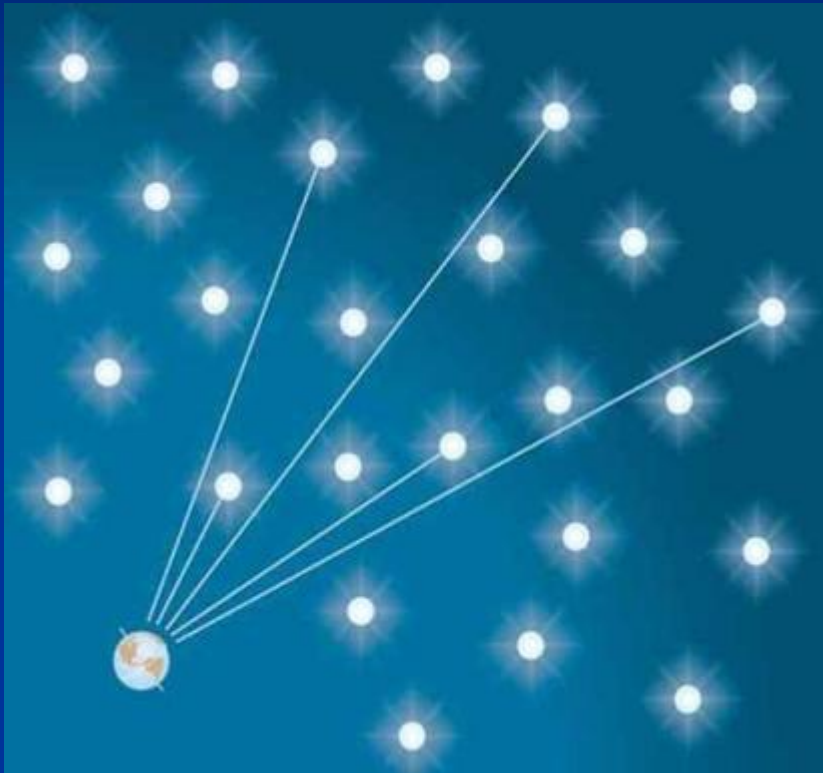
Ένα θέμα έξω από το εργαστήριο:
Γιατί ο ουρανός είναι σκοτεινός τη νύχτα;

Το 1923 ο Olbers πρότεινε ότι εάν:

- Το σύμπαν είναι άπειρο σε έκταση.
- Τα αστέρια κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το σύμπαν.
- Όλα τα αστέρια έχουν παρόμοια φωτεινότητα σε όλο το σύμπαν, τότε...



Ένα θέμα έξω από το εργαστήριο: Γιατί ο ουρανός είναι σκοτεινός τη νύχτα;



... Ένα άπειρο σύμπαν θα έχει άπειρο αριθμό αντικειμένων και θα πρέπει να είναι φωτεινό κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Γιατί ο ουρανός είναι σκοτεινός τη νύχτα;

Τότε:

- Οποιοδήποτε σημείο στον ουρανό θα ήταν φωτεινό, όχι σκοτεινό, αφού θα υπήρχε πάντα ένα μακρινό αστέρι που λάμπει.
- Ο αριθμός των αστεριών σε κάθε «στρώμα κρεμμυδιού» του ουρανού είναι ανάλογος με το r^2 και το φως τους είναι αντιστρόφως ανάλογο με το r^2 , όπου κάθε στρώμα παρέχει την ίδια ποσότητα φωτός στη Γη. Εάν υπάρχει άπειρος αριθμός στρωμάτων, ο ουρανός θα πρέπει να φαίνεται φωτεινός τη νύχτα.



Γιατί ο ουρανός είναι σκοτεινός τη νύχτα;

Αλλά υπάρχουν λάθη σε αυτόν τον συλλογισμό:

- ❑ Τα αστέρια φαίνονται πιο κόκκινα όσο πιο μακριά είναι λόγω της επέκτασης. Είναι λιγότερο φωτεινά λόγω της απόστασής τους.
- ❑ Αλλά πάνω απ' όλα, το σύμπαν δεν έχει άπειρη ηλικία. Δεν υπάρχουν άπειρα στρώματα αστεριών.

Ο Edgar Allan Poe ήταν αυτός που εξηγεί σωστά τα φαινόμενα στο δοκίμιό του "Eureka", που δημοσιεύθηκε το 1848.

Η νύχτα μπορεί να είναι σκοτεινή!



Σας ευχαριστώ πολύ
για την προσοχή σας!

