

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	
	<p>4 Εισαγωγικές πληροφορίες Εισαγωγή στη σκοτεινή ύλη Σύνδεση με το πρόγραμμα σπουδών Προτεινόμενοι τρόποι χρήσης αυτού του πακέτου Συμβουλές για διδάσκοντες</p>
	<p>10 Η σκοτεινή ύλη με λίγα λόγια Μια περίληψη μιας σελίδας των περιεχομένων του βίντεο.</p>
	<p>11 Δραστηριότητες σπουδαστών Αυτές οι δραστηριότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό με άλλες. Το υλικό μπορεί να προσαρμοστεί σε μια ποικιλία επίπεδα τάξεων και μαθημάτων. Τα φύλλα δραστηριοτήτων περιλαμβάνονται στο DVD-ROM σε επεξεργάσιμη ηλεκτρονική μορφή ώστε να μπορείτε να τα προσαρμόσετε στην τάξη σας.</p>
	<p>11 Πρόβλεψη, Παρατήρηση, Εξήγηση, Επίδειξη: Ομαλή κυκλική κίνηση Αυτή η επίδειξη χρησιμοποιεί μια συσκευή ομαλής κυκλικής κίνησης για να εισαγάγει τους μαθητές στην έννοια της σκοτεινής ύλης.</p>
	<p>14 Επίδειξη : Βαρυτική κάμψη Αυτές οι επιδείξεις χρησιμοποιούν απλά αντικείμενα για να προσομοιώσουν την βαρυτική κάμψη.</p> <p>Δραστηριότητα 1: Σύνοψη βίντεο Ένα σύνολο ερωτήσεων συζήτησης που εξετάζουν το περιεχόμενο του βίντεο.</p>
	<p>18 Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες Ένα φύλλο ερωτήσεων που επιτρέπει στους μαθητές να μπουν βαθύτερα στο θέμα τόσο αριθμητικά όσο και εννοιολογικά.</p>
	<p>20 Δραστηριότητα 3: Βαρύτητα και τροχιακή κίνηση Μια δραστηριότητα όπου οι σπουδαστές χρησιμοποιούν ελαστικό ύφασμα «χωρόχρονο» και μια ποικιλία από μπάλες</p>

		<p>για να μοντελοποιήσουν την τροχιακή κίνηση.</p> <p>22 Δραστηριότητα 4: Σκοτεινή ύλη μέσα σε ένα γαλαξία Οι μαθητές χρησιμοποιούν πραγματικά δεδομένα για να διερευνήσουν τη σύγκρουση μεταξύ του αναμενόμενου αποτελέσματος και του παρατηρούμενου αποτελέσματος.</p> <p>24 Δραστηριότητα 5: Προχωρημένη μαθηματική ανάλυση Μια δραστηριότητα εμπλουτισμού / επέκτασης για ισχυρότερες μαθητές.</p> <p>27 Δραστηριότητα 6: Εργαστήριο σκοτεινής ύλης Οι μαθητές χρησιμοποιούν μια συσκευή ομαλής κυκλικής κίνησης για να διερευνήσουν τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας και του κεντρομόλου δύναμης δύναμη.</p> <p>34 Περιλήψεις Κεφάλαιο βίντεο Αυτή η ενότητα παρέχει πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με το περιεχόμενο του βίντεο, καθώς και παραπέρα θέματα για επέκταση του βίντεο. Οι ερωτήσεις είναι αναμενόμενες και σαφείς, συνοπτικές, και παρέχονται ακριβείς πληροφορίες.</p>
--	--	--

Perimeter Institute



ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΕΙΣ PERIMETER

Αυτή η σειρά εκπαιδευτικών πακέτων για την τάξη έχει σχεδιαστεί για να βοηθήσει τους εκπαιδευτικούς να εξηγήσουν μια σειρά από σημαντικά θέματα στη Φυσική. Οι Εξερευνήσεις Perimeter είναι το προϊόν της εκτεταμένης συνεργασία μεταξύ διεθνών ερευνητών, του προσωπικού του Ινστιτούτου Perimeter και εκπαιδευτικών των επιστημών . Κάθε διδακτική ενότητα έχει σχεδιαστεί τόσο με ειδικούς όσο και με τη άποψη διδασκόντων με μικρότερη εμπειρία, και έχει δοκιμαστεί σχολαστικά.

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ PERIMETER

Το Ινστιτούτο Perimeter για τη θεωρητική Φυσική είναι ένα ανεξάρτητο, μη κερδοσκοπικό, ερευνητικό Ινστιτούτο που αποστολή του είναι η επίτευξη προόδου στην αντίληψή μας για το σύμπαν και τις δυνάμεις που το κυβερνούν. Τέτοια επιτεύγματα προωθούν την πρόοδο στις επιστήμες και την ανάπτυξη μετασχηματιστικών νέων τεχνολογιών. Βρίσκεται στο Βατερλώ του Οντάριο Καναδά, το Perimeter επίσης παρέχει ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων εκπαίδευσης στην έρευνα και με σκοπό την καλλιέργεια ταλαντούχων επιστημόνων και μοιράζεται τη σημασία της ανακάλυψης και της καινοτομίας με τους μαθητές , τους εκπαιδευτικούς και το ευρύ κοινό. Σε συνεργασία με τις κυβερνήσεις του Καναδά και του Οντάριο, το Perimeter αποτελεί ένα επιτυχημένο παράδειγμα συνεργασίας μεταξύ του δημόσιου και του ιδιωτικού τομέα στην επιστημονική έρευνα, την κατάρτιση και την προβολή.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για χιλιάδες χρόνια η αστρονομία ήταν περίπου φως. Οι αστρονόμοι έχουν μελετήσει το φως από μακρινά άστρα, γαλαξίες, πλανήτες και άλλα αντικείμενα στο διάστημα. Ωστόσο τις τελευταίες λίγες δεκαετίες, οι Φυσικοί έχουν συνειδητοποιήσει ότι τα ουράνια αντικείμενα που εκπέμπουν κάθε μορφή φωτός (ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) αποτελούν μόνο ένα πολύ μικρό κλάσμα του σύμπαντος.

Το υπόλοιπο σύμπαν αποτελείται από αόρατη ύλη που δεν εκπέμπει, ανακλά ή απορροφά καμία μορφή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτή η «σκοτεινή ύλη» κυριαρχεί στους γαλαξίες, αποτελώντας περίπου το 90% της μάζας κάθε γαλαξία στο σύμπαν. Χωρίς αυτήν, οι γαλαξίες (του δικού μας συμπεριλαμβανομένου) θα περιστρέφονταν πολύ πιο αργά από ότι τώρα περιστρέφονται.

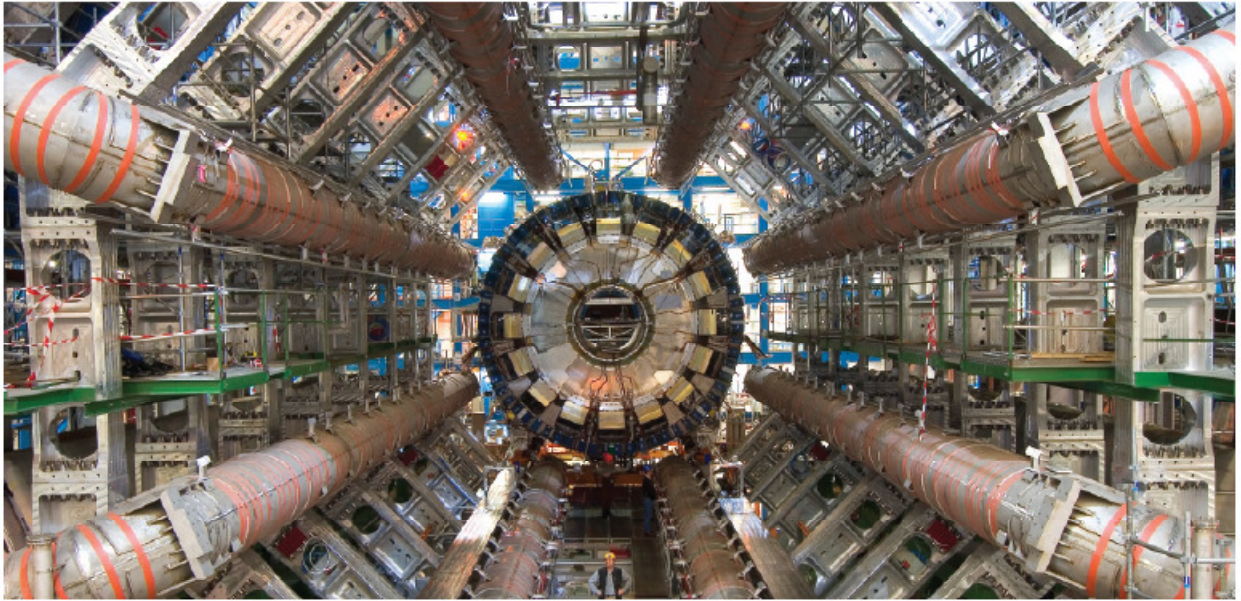
Το θέμα της σκοτεινής ύλης αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά θέματα στη Φυσική σήμερα, καθώς επίσης είναι πολύ προσιτό. Αυτό το διδακτικό πακέτο μας εισάγει στη «σκοτεινή ύλη» χρησιμοποιώντας τις έννοιες της παγκόσμιας έλξης και της ομαλής κυκλικής κίνησης. Απευθύνεται σε μαθητές Λυκείου και οι μόνες εξισώσεις που χρειάζονται για την κατανόησή του είναι:

$$F = G \frac{M \cdot m}{r^2} , \quad F_{net} = m \cdot a , \quad a = \frac{v^2}{r}$$

Το βίντεο ξεκινάει εξηγώντας πως αν και οι Φυσικοί δεν μπορούν να δουν τη σκοτεινή ύλη, μπορούν να δουν τα αποτελέσματα που προκαλεί στην ταχύτητα των άστρων στο εσωτερικό των γαλαξιών. Στη συνέχεια περιγράφει τις υπάρχουσες θεωρίες σχετικά με τη σύσταση της και τελειώνει περιγράφοντας διάφορα τρέχοντα πειράματα αναζήτησης της σκοτεινής ύλης στη Γη. Τα πειράματα αυτά είναι τόσο κρίσιμα στην κατανόηση του σύμπαντος ώστε η πρώτη ομάδα που το πείραμά της θα πετύχει θα κερδίσει πιθανότατα το βραβείο Νόμπελ.

Συχνά μπερδεύουμε τη σκοτεινή ύλη με τη σκοτεινή ενέργεια. Δεν υπάρχει γνωστή σχέση ανάμεσα στα δύο φαινόμενα. Η σκοτεινή ύλη εξηγεί την υπερβολική δύναμη βαρύτητας που παρατηρείται στους γαλαξίες. Η σκοτεινή ενέργεια περιγράφει την αρνητική πίεση που απομακρύνει τα συστατικά του σύμπαντος σε όλο και αυξανόμενη έκταση (διαστολή σύμπαντος).

Αυτό το διδακτικό υλικό είναι το αποκορύφωμα μιας διαδικασίας χρόνων στην οποία είχαν εμπλοκή διδάσκοντες, ερευνητές, μαθητές και ειδικοί της βιομηχανίας θεαμάτων. Όλο το υλικό που παρουσιάζεται έχει δοκιμαστεί σε σχολικές τάξεις σε πολλαπλές ευκαιρίες. Σας υποσχόμαστε ότι το υλικό αυτό θα είναι μια χρήσιμη προσθήκη για την τάξη σας.



The ATLAS detector at the Large Hadron Collider (LHC) experiment at CERN.

ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΘΕΜΑ	ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΥΛΗ	ΣΧΕΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ
Τροχιακή κίνηση	Οι πλανητικές τροχιές γύρω από τον ήλιο γίνονται με προβλέψιμο τρόπο. Οι πλανήτες που απέχουν περισσότερο από τον ήλιο περιστρέφονται πιο αργά από αυτούς που απέχουν λιγότερο.	Δραστηριότητα 1: Περίληψη βίντεο Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες Δραστηριότητα 3: Βαρύτητα και τροχιακή κίνηση Κεφάλαια βίντεο: 1,2 και 3
Ομαλή κυκλική κίνηση	Ένα από τα πιο ισχυρά αποδεικτικά στοιχεία για τη σκοτεινή ύλη προέρχεται από την τροχιακή ταχύτητα των άστρων στην ομαλή κυκλική κίνηση	Δραστηριότητα 1: Περίληψη βίντεο Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες Δραστηριότητα 3: Βαρύτητα και τροχιακή κίνηση Δραστηριότητα 4: Σκοτεινή ύλη στο πλαίσιο ενός γαλαξία Δραστηριότητα 6: Εργαστήριο σκοτεινής ύλης Πρόβλεψη, παρατήρηση, εξήγηση, επίδειξη Κεφάλαια βίντεο: 1,2 και 3
Παγκόσμια έλξη	Καθώς δεν μπορούμε να δούμε τη σκοτεινή ύλη, η γνώση μας για την ύπαρξη της προέρχεται μέσω των βαρυτικών φαινομένων	Δραστηριότητα 1: Περίληψη βίντεο Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες Δραστηριότητα 3: Βαρύτητα και τροχιακή κίνηση Δραστηριότητα 4: Σκοτεινή ύλη στο πλαίσιο ενός γαλαξία Πρόβλεψη, παρατήρηση, εξήγηση, επίδειξη Κεφάλαια βίντεο: 1,2 και 3
Κρούσεις σε δύο διαστάσεις	Ένας αριθμός πειραμάτων είναι σε εξέλιξη παγκοσμίως. Στα πειράματα αυτά γίνεται προσπάθεια ανίχνευσης σωματίων σκοτεινής ύλης σε ελαστικές κρούσεις με ατομικούς πυρήνες	Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες Δραστηριότητα 5: Προχωρημένη μαθηματική ανάλυση Κεφάλαια βίντεο: 7
Η φύση της επιστήμης	Υπάρχουν αρκετές θεωρίες που ανταγωνίζονται σχετικά με τη σύσταση της σκοτεινής ύλης. Σε μερικούς Φυσικούς ούτε περνάει από τη σκέψη τους ότι η σκοτεινή ύλη υπάρχει.	Δραστηριότητα 1: Περίληψη βίντεο Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες Κεφάλαια βίντεο: 7
Μαθηματικές σχέσεις	Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας ενός άστρου και της μάζας του γαλαξία μέσα στον κύκλο της τροχιάς του είναι $v \propto \sqrt{M_{gal}}$	Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες Δραστηριότητα 4: Σκοτεινή ύλη στο πλαίσιο ενός γαλαξία Δραστηριότητα 5: Προχωρημένη μαθηματική ανάλυση Κεφάλαια βίντεο: 2 και 3
Βαρυτική κάμψη	Η μάζα παραμορφώνει το χωρόχρονο. Το φως που διέρχεται από την παραμορφωμένο χωρόχρονο εκτρέπεται, αποκαλύπτοντας την παρουσία αόρατης μάζας	Δραστηριότητα 5: Προχωρημένη μαθηματική ανάλυση Επίδειξη Κεφάλαιο βίντεο: 5

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Στο σχεδιασμό αυτού του διδακτικού πακέτου προσπαθήσαμε να έχετε στη διάθεσή σας επιλογές και ευελιξία. Επιπλέον ενός βίντεο για την τάξη και μιας σειράς πειραματικών επιδείξεων το πακέτο περιλαμβάνει έξι φύλλα εργασίας για τους μαθητές. Σας συστήνουμε να επιλέξετε εκείνα που ταιριάζουν καλύτερα στις ανάγκες σας και να κάνετε τροποποιήσεις σε όποιο από τα φύλλα εργασίας νομίζετε, ώστε να γίνει πιο κατάλληλο για τις ανάγκες σας .

Περίγραμμα για μία διδακτική ώρα

Πρόβλεψη, παρατήρηση, ερμηνεία, επίδειξη (5-10λεπτά)

Χρησιμοποιήστε την παρουσίαση της ομαλής κυκλικής κίνησης για να συνδέσετε μάζα και ταχύτητα.

Βίντεο (25 λεπτά)

Τα διαλλείματα μεταξύ των κεφαλαίων διευκολύνουν τη διακοπή για επανάληψη και συζήτηση.

Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες (15-20λεπτά)

Χρησιμοποιώντας A,B, C, D περιστρεφόμενες κάρτες ή πίνακα θα διευκολυνθεί η συζήτηση αυτής της επανάληψης.

Εργασία για το σπίτι

Δραστηριότητα 1: Περίληψη βίντεο

Περίγραμμα για δύο διδακτικές ώρες

1^η ώρα

Δραστηριότητα 6: Εργαστήριο σκοτεινής ύλης

Οι μαθητές εξερευνούν πως η ταχύτητα ενός περιστρεφόμενου αντικειμένου εξαρτάται από τη μάζα του σώματος που βρίσκεται στο κέντρο

2^η ώρα

Πρόβλεψη, παρατήρηση, ερμηνεία, επίδειξη (5-10λεπτά)

Χρησιμοποιήστε την παρουσίαση της ομαλής κυκλικής κίνησης για να συνδέσετε μάζα και ταχύτητα.

Βίντεο (25 λεπτά)

Τα διαλλείματα μεταξύ των κεφαλαίων διευκολύνουν τη διακοπή για επανάληψη και συζήτηση.

Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες (15-20λεπτά)

Χρησιμοποιώντας A,B, C, D περιστρεφόμενες κάρτες ή πίνακα θα διευκολυνθεί η συζήτηση αυτής της επανάληψης.

Εργασία για το σπίτι

Δραστηριότητα 4: Η σκοτεινή ύλη μέσα σε ένα γαλαξία

ΣΥΜΒΟΥΛΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΑ

Το βίντεο των 30 λεπτών έχει διαιρεθεί σε κεφάλαια βασισμένα στη σύνδεση με το πρόγραμμα σπουδών. Το βίντεο μπορεί να προβληθεί ολόκληρο ή κατά τμήματα, ανάλογα με τις προτιμήσεις σας. Οι προτάσεις που ακολουθούν είναι το προϊόν από τη χρήση του υλικού από έμπειρους διδάσκοντες στους μαθητές τους. Είμαστε βέβαιοι ότι αυτές οι δραστηριότητες θα προκαλέσουν το ενδιαφέρον και θα εμπνεύσουν τους μαθητές σας να εξερευνήσουν το μυστήριο της σκοτεινής ύλης. Κάθε δραστηριότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα ή σε συνδυασμό με άλλες.

Η σκοτεινή ύλη με λίγα λόγια

Αυτή η μιας σελίδας περίληψη των εννοιών που αναφέρονται στο βίντεο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για την εισαγωγή των μαθητών σας στο θέμα ή σαν φύλλο επανάληψης για να παγιώσουν την πληροφορία.

Πρόβλεψη, παρατήρηση, ερμηνεία, επίδειξη: Ομαλή κυκλική κίνηση

Στις επιδείξεις που έχουν τη μορφή Πρόβλεψη, Παρατήρηση, Ερμηνεία (ΠΠΕ) ο διδάσκων προκαλεί τους μαθητές να γράψουν στο χαρτί ή στον πίνακα προβλέψεις και ερμηνείες πριν κάνει την επίδειξη. Αφού οι μαθητές παρακολουθήσουν την πειραματική διαδικασία, εξετάζουν τις προβλέψεις τους για να εντοπίσουν παρερμηνείες που ίσως έχουν. Οι οδηγίες από ομοίους τους (άλλους μαθητές) στη φάση αυτή ενθαρρύνονται για να δώσουν στους μαθητές την ευκαιρία να παγιώσουν τη γνώση.

Αυτή η επίδειξη χρησιμοποιεί μια τυπική συσκευή ομαλής κυκλικής κίνησης για να εισάγει τους μαθητές στην έννοια της σκοτεινής ύλης. Ξεκινάει με τη σχέση του μέτρου της ταχύτητας του περιστρεφόμενου αντικειμένου (λαστιχένιο πώμα) και της μάζας που έχουν οι αιωρούμενες ροδέλες. Όταν η σχέση αυτή έχει εδραιωθεί σταθερά η έννοια επεκτείνεται στην αστρονομία όπου οι ταχύτητες των περιστρεφόμενων πλανητών χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η μάζα του Ήλιου και οι ταχύτητες των περιστρεφόμενων άστρων χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η μάζα του κέντρου των γαλαξιών.

Επίδειξη προσομοίωσης: Κάμψη λόγω βαρύτητας

Αυτές οι επιδείξεις χρησιμοποιούν απλά αντικείμενα για την αναπαράσταση της κάμψης των φωτεινών ακτίνων λόγω της βαρύτητας. Ένα αντεστραμμένο πιατάκι και χαρτοταινία χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της εκτροπής φωτός από τον ήλιο. Η χαρτοταινία αναπαριστά το φως από ένα μακρινό άστρο που ταξιδεύει σε ευθεία σε μια επίπεδη επιφάνεια το οποίο κάμπτεται όταν διέρχεται από την καμπύλη επιφάνεια του πιάτου. Πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε η ταινία να είναι πιεσμένη όσο το δυνατόν πιο ομαλά σε όλη τη διάρκεια της δραστηριότητας. Η βάση ενός κολονάτου ποτηριού δρα σαν φακός παραμορφώνοντας την εικόνα κύκλων που έχουν σχεδιασθεί στη σελίδα. Οι μαθητές παρατηρούν ένα σύνολο από κύκλους από διαφορετικές γωνίες για να εξερευνήσουν τα πιθανά αποτελέσματα. Σημειώστε ότι τα τόξα που παράγονται από το γυαλί μοιάζουν πολύ με αυτά που έχουν βρεθεί σε αστρονομικές εικόνες.

Δραστηριότητα 1: Περίληψη βίντεο

Ένα φύλλο ερωτήσεων σχεδιάστηκε για να ενθαρρύνει το διάλογο ανάμεσα στους μαθητές. Οι μαθητές μπορούν να δουλέψουν ανεξάρτητα, σε ζευγάρια ή συμμετέχοντας σε συζητήσεις μεγαλύτερων

ομάδων. Η χρήση εργαλείων ανατροφοδότησης όπως οι περιστρεφόμενες κάρτες ή ο πίνακας επιτρέπουν στο διδάσκοντα να μετρήσει πόσο καλά οι έννοιες έχουν ληφθεί.

Δραστηριότητα 2: Βασικές έννοιες

Το φύλλο ερωτήσεων επιτρέπει στο μαθητή να «σκάψει» λίγο βαθύτερα στο υλικό αριθμητικά και εννοιολογικά.

Δραστηριότητα 3: Βαρύτητα και τροχιακή κίνηση

Σε αυτή την Πρόβλεψη, Παρατήρηση, Ερμηνεία (ΠΠΕ) δραστηριότητα οι μαθητές χρησιμοποιούν ελαστικό ύφασμα «χωρόχρονο» και μια ποικιλία από μπάλες για αναπαράσταση της τροχιακής κίνησης. Το πιο κατάλληλο για τη δραστηριότητα αυτή ύφασμα θα πρέπει να είναι αρκετά χονδρό και ελαστικό σε όλες τις διευθύνσεις, διατίθεται στα περισσότερα μεγάλα καταστήματα υφασμάτων για ντύσιμο αθλητικών δραστηριοτήτων ή κολύμβησης. Αγοράστε τετράγωνα κομμάτια υφάσματος όσο το δυνατόν μεγαλύτερα, το ιδανικό είναι το μήκος της πλευράς να είναι το λιγότερο 1,5 μέτρα. Παγιδέψτε ένα μικρό αντικείμενο στο κέντρο του τετραγώνου για να έχετε κάτι να κρατάτε. Διαλέξτε μικρές λείες μπάλες όπως βόλους, μπίλιες από ποντίκια Η/Υ ή ρουλεμάν για να χρησιμοποιηθούν ως πλανήτες. Αποφύγετε μπάλες μπιλιάρδου (πολύ βαριές) ή μπάλες πινκ-πονκ (πολύ ελαφριές). Το ύφασμα είναι ομοιόμορφα τεντωμένο με ένα άτομο να τραβάει το κέντρο προς τα κάτω για να δημιουργήσει μια εσοχή. Οι μαθητές εξερευνούν τις μεταβλητές που εμπλέκονται στην τροχιακή κίνηση - είναι επιτακτικό οι μαθητές να κάνουν «στέρεες» προβλέψεις πριν την εξερεύνηση. Θέλουμε οι μαθητές να κάνουν νοητικά μοντέλα για την κίνηση, όχι να παίζουν.

Δραστηριότητα 4: Σκοτεινή ύλη μέσα σε ένα γαλαξία

Σε αυτή τη δραστηριότητα ανάλυσης δεδομένων οι μαθητές χρησιμοποιούν δεδομένα της τροχιακής ταχύτητας από το γαλαξία UGC 11748 και εξερευνούν τη σύγκρουση μεταξύ του αναμενόμενου και του παρατηρούμενου. Οι μαθητές κάνουν υπολογισμούς και σχεδιάζουν τη γραφική παράσταση που αναμένεται να προκύψει από τις τροχιακές ταχύτητες μερικών άστρων, βασιζόμενοι στην απόστασή τους από το κέντρο του γαλαξία, και τις συγκρίνουν με τις πραγματικές (αυτές που παρατηρήθηκαν) τροχιακές ταχύτητες των άστρων αυτών. Η καμπύλη περιστροφής που παράγεται σε αυτή τη δραστηριότητα είναι ουσιαστικά ίδια με αυτή που η Vera Rubin παράγαγε για την Ανδρομέδα. Σημειώνεται ότι αυτοί οι υπολογισμοί είναι πολύ ευαίσθητοι στα σημαντικά ψηφία οπότε οι απαντήσεις μπορεί να ποικίλουν μια και είναι εξαρτώμενες από τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε.

Δραστηριότητα 5: Προχωρημένη μαθηματική ανάλυση

Μια δραστηριότητα επέκτασης/εμπλουτισμού που περιέχει το υλικό πέραν του τυπικού αναλυτικού προγράμματος της μέσης εκπαίδευσης, που είναι όμως μέσα στα πλαίσια της ικανότητας δυνατότερων μαθητών. Για μια πιο αναλυτική συζήτηση για την εξίσωση γωνίας εκτροπής, δείτε το Einstein Online: http://www.einstein-online.info/spotlights/equivalence_light.

Δραστηριότητα 6: Εργαστήριο σκοτεινής ύλης

Σε αυτή την εργαστηριακή δραστηριότητα οι μαθητές χρησιμοποιούν μια τυπική συσκευή ομαλής κυκλικής κίνησης για να ερευνήσουν τη σχέση μεταξύ τροχιακής ταχύτητας και κεντρομόλου δύναμης. Οι μαθητές εμφανίζουν ένα μαθηματικό μοντέλο βασισμένο στην ανάλυση του διανυσματικού διαγράμματος δυνάμεων και στη συνέχεια το συγκρίνουν με τα πειραματικά δεδομένα. Το μοντέλο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη μάζα ενός άγνωστου αντικειμένου από

τη μέτρηση της τροχιακής του ταχύτητας. Έχοντας καθιερώσει ότι η μάζα του κεντρικού αντικειμένου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την τροχιακή ταχύτητα οι μαθητές εξετάζουν αστρονομικά δεδομένα για να υπολογίσουν τη μάζα του ήλιου και του εσωτερικού ενός γαλαξία.

Η ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΥΛΗ ΜΕ ΛΙΓΑ ΛΟΓΙΑ

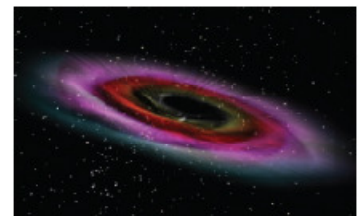
- Το 1967 η Vera Rubin παρατήρησε ότι άστρα μέσα στο γαλαξία Ανδρομέδα είχαν μεγαλύτερες από ότι αναμενόταν τροχιακές ταχύτητες
- Οι Φυσικοί έχουν επίσης παρατηρήσει το ίδιο φαινόμενο στον κοντινό γαλαξία Triangulum.
- Μετρώντας τις τροχιακές ταχύτητες άστρων μέσα στον Triangulum και χρησιμοποιώντας τον τύπο $M_{gal} = \frac{v^2 \cdot r}{G}$ οι Φυσικοί έχουν υπολογίσει ότι η μάζα του γαλαξία μέσα σε μια ακτίνα $r=4,0 \times 10^{20} \text{m}$ ισοδυναμεί με 46 δισεκατομμύρια Ήλιους.
- Όμως μετρώντας τη λαμπρότητα του Triangulum, έχουν επίσης υπολογίσει ότι η μάζα του μέσα σε μια ακτίνα $r=4,0 \times 10^{20} \text{m}$ ισοδυναμεί με 7 δισεκατομμύρια Ήλιους.
- Η διαφορά ανάμεσα σε αυτά τα δύο αποτελέσματα συνεπάγεται ότι υπάρχουν 39 δισεκατομμύρια ήλιοι από αόρατη μάζα μέσα στον Triangulum.
- Αυτή η αόρατη μάζα ονομάζεται «σκοτεινή ύλη».
- Οι Φυσικοί έχουν παρατηρήσει πολλούς άλλους γαλαξίες και οι περισσότεροι έχουν πειστεί ότι, κατά μέσο όρο, η σκοτεινή ύλη υπολογίζεται στο 90% της μάζας από κάθε ένα γαλαξία στο σύμπαν.
- Οι φυσικοί επίσης έχουν ανεξάρτητα αποδεικτικά στοιχεία για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης από παρατηρήσεις παραμορφωμένων εικόνων μακρινών γαλαξιών (βαρυτική καμψη).
- Αν και κανείς δεν γνωρίζει από τι είναι φτιαγμένη η σκοτεινή ύλη, επί του παρόντος οι φυσικοί έχουν ένα αριθμό θεωριών.
- Μια από τις πρώτες θεωρίες για τη σκοτεινή ύλη ήταν ότι αποτελείται εξ ολοκλήρου από συμπαγή ουράνια αντικείμενα όπως οι πλανήτες, τα άστρα νάνοι και οι μαύρες τρύπες. Προσεκτικές παρατηρήσεις έχουν αποκλείσει αυτή τη θεωρία.
- Οι περισσότεροι Φυσικοί σήμερα πιστεύουν ότι η σκοτεινή ύλη αποτελείται από ένα είδος υποατομικού σωματιδίου που ονομάζεται WIMP το οποίο μέχρι σήμερα, ποτέ δεν έχει ανιχνευτεί στο εργαστήριο.
- Πολυάριθμα πειράματα που προσπαθούν να ανιχνεύσουν ένα από αυτά τα σωματίδια είναι σε εξέλιξη σήμερα παγκοσμίως.
- Η σκοτεινή ύλη δεν συνδέεται με τη σκοτεινή ενέργεια. Η σκοτεινή ενέργεια αναφέρεται στο μυστηριώδη μηχανισμό που ωθεί το σύμπαν σε διαστολή.



Mass-Luminosity Relationship



The Andromeda galaxy



Black hole

ΠΡΟΒΛΕΨΗ, ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΙΞΗ ΟΜΑΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ

Αν και η σκοτεινή ύλη είναι ένα πολύ αφηρημένο θέμα μερικές από τις βασικές έννοιες βασίζονται σε αποδεικτικά στοιχεία που μπορούν να εξηγηθούν πολύ καλά με πειραματικές επιδείξεις. Αυτή η επίδειξη χρησιμοποιεί τη συσκευή κεντρομόλου δύναμης σε κυκλική κίνηση που φαίνεται στο **Σχήμα 1** για να συνδέσει την ταχύτητα αντικειμένων σε κυκλική τροχιά με τη μάζα του αντικειμένου γύρω από το οποίο περιστρέφονται.

Η συσκευή αποτελείται από ένα λαστιχένιο πώμα δεμένο στο άκρο ενός νήματος. Το νήμα περνάει μέσα από ένα στενό πλαστικό ή μεταλλικό σωλήνα και μερικές ροδέλες που προσαρτώνται στο άλλο άκρο του νήματος. Ένας συνδετήρας (ή κάτι ισοδύναμο π.χ. κροκοδειλάκι) προσαρτάται κατά μήκος του νήματος και χρησιμοποιείται για να καθορίζει ότι οι δυνάμεις που δρουν κατά μήκος του νήματος μεταβάλλονται όπως παρακάτω περιγράφεται.

Για να χρησιμοποιήσετε τη συσκευή, κρατήστε το σωλήνα κατακόρυφο, προσαρτήστε το συνδετήρα στην επιθυμητή θέση κατά μήκος του νήματος και βάλτε σε περιστροφή το λαστιχένιο πώμα έτσι ώστε να κινείται σε οριζόντιο κύκλο. Η μεταβολή στην ταχύτητα του πώματος θα τροποποιεί την ακτίνα της τροχιάς και συνεπώς το ύψος που είναι ο συνδετήρας. Ρυθμίστε την ταχύτητα του πώματος έτσι ώστε ο συνδετήρας να στέκεται 1-2cm παρακάτω από το άκρο του σωλήνα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2**. Όσο ο συνδετήρας βρίσκεται στο ίδιο ύψος γνωρίζουμε ότι οι ασκούμενες δυνάμεις ισορροπούν και η ακτίνα και η ταχύτητα του περιστρεφόμενου αντικειμένου (λαστιχένιο πώμα) είναι σταθερές.

Η παρακάτω επίδειξη κάνει τους μαθητές να σκεφτούν πως συμπεριφέρονται οι δυνάμεις στη συσκευή κεντρομόλου δύναμης και να οδηγηθούν στη σύνδεση μεταξύ ταχύτητας και κεντρομόλου δύναμης. Τα σημεία κλειδιά είναι:

- Η δύναμη που ενεργεί στο λαστιχένιο πώμα προέρχεται από το βάρος που έχουν οι ροδέλες.
- Μεγαλύτερη ταχύτητα απαιτεί μεγαλύτερη δύναμη
- Η ταχύτητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί η μάζα των αναρτημένων ροδελών

Όταν η σύνδεση μεταξύ ταχύτητας και μάζας έχει θεμελιωθεί μπορεί να επεκταθεί: Η τροχιακή ταχύτητα των πλανητών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορισθεί η μάζα του Ήλιου και η τροχιακή ταχύτητα των άστρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορισθεί η μάζα των γαλαξιών.

Η επίδειξη ακολουθεί τη μορφή Πρόβλεψη, Παρατήρηση, Εξήγηση. Οι μαθητές προβλέπουν τι θα συμβεί, εξηγούν γιατί το σκέφτηκαν, παρατηρούν τι συμβαίνει και εξηγούν κάθε διαφορά από την πρόβλεψή τους. Πίνακας ή παρόμοια μέσα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να κάνουν προβλέψεις, για να εκμαιεύσουν εξηγήσεις και να διευκολύνουν το διάλογο με ομότιμους. Είναι κρίσιμο για την κατανόηση από τους μαθητές, ότι διατυπώνουν απόψεις, επικοινωνούν και ασκούν κριτική στις προβλέψεις και τις εξηγήσεις που δίνονται.

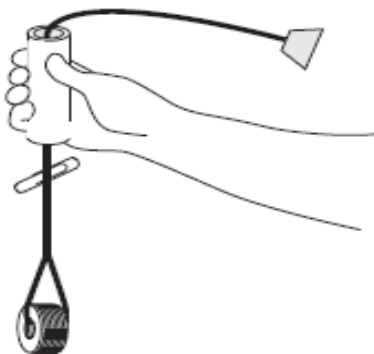


Figure 1 Centripetal motion apparatus.

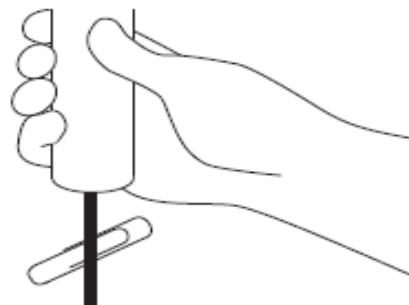


Figure 2 Set the orbital radius by adjusting the speed of the stopper so that the paper clip lies just below the bottom of the tube.

Παρατηρήστε το ελαστικό πώμα να κινείται σε οριζόντιο κύκλο με ταχύτητα σταθερού μέτρου.
(α) Σχεδιάστε το διανυσματικό διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στις αιωρούμενες ροδέλες. Συγκρίνετέ το και συζητήστε το με τα αντίστοιχα διαγράμματα γειτονικών σας ομάδων.

(β) Ποιο από τα παρακάτω διανυσματικά διαγράμματα δυνάμεων αναπαριστά τις δυνάμεις που ασκούνται στο λαστιχένιο πώμα;



(γ) **Προβλέψτε** τι θα συμβεί στο συνδετήρα αν διπλασιάσουμε τον αριθμό των αιωρούμενων ροδελών διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα σταθερά. **Αιτιολογήστε** την απάντησή σας .

(δ) **Παρατηρήστε** και **εξηγήστε** τις διαφορές μεταξύ της παρατήρησης και της πρόβλεψης που κάνατε.

(ε) **Προβλέψτε** τι χρειάζεται να αλλάξει ώστε να παραμείνει ο συνδετήρας στην αρχική του θέση. **Αιτιολογήστε** την απάντησή σας .

(στ) **Παρατηρήστε** και **εξηγήστε** τις διαφορές μεταξύ της παρατήρησης και της πρόβλεψης που κάνατε.

(ζ) Δύο συστήματα (σαν αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 1) είναι πανομοιότυπα με μόνη διαφορά ότι το ένα έχει διπλάσιες αιωρούμενες ροδέλες από το άλλο. **Προβλέψτε** τι θα παρατηρήσετε αν σταλαστιχένια πώματα των δύο συστημάτων έχουν επικολληθεί λαμπάκια LED που αναβοσβήνουν με τον ίδιο ρυθμό και τα σταλαστιχένια πώματα τεθούν σε περιστροφή κάνοντας ομαλή κυκλική κίνηση μέσα σε σκοτεινό δωμάτιο (με το συνδετήρα σε σταθερή θέση). **Αιτιολογήστε** την απάντησή σας .

(η) **Παρατηρήστε** και **εξηγήστε** τις διαφορές μεταξύ της παρατήρησης και της πρόβλεψης που κάνατε.

Ανάλυση αστρονομικών παρατηρήσεων

(α) Χρησιμοποιήστε το νόμο της παγκόσμιας έλξης, το 2^ο νόμο του Νεύτωνα για την κίνηση και την εξίσωση της κεντρομόλου επιτάχυνσης για να βρείτε τη μαθηματική σχέση με την οποία μπορείτε να υπολογίσετε τη μάζα του ήλιου χρησιμοποιώντας πλανητικές τροχιές.

(β) Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο σε ακτίνα $1.5 \times 10^9 \text{ m}$. Προσδιορίστε τη μάζα του ήλιου.

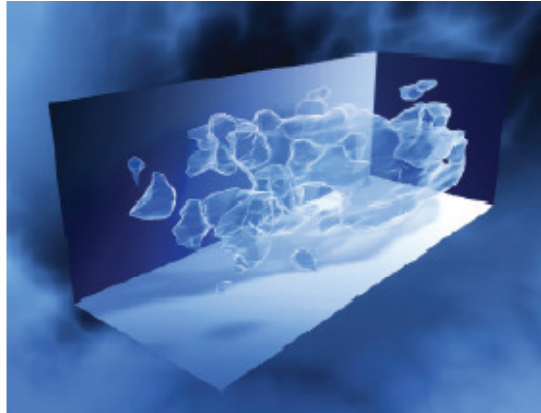
(γ) Ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από το κέντρο του γαλαξία σε απόσταση $2.56 \times 10^{20} \text{ m}$ με περίοδο 200 εκατομύρια χρόνια. Υπολογίστε τη μάζα του κέντρου του γαλαξία.

(δ) Πόσο σίγουροι είστε ότι οι φυσικοί νόμοι που περιγράφουν την κυκλική κίνηση ενός ελαστικού πώματος δεμένου στην άκρη ενός νήματος μπορούν να επεκταθούν σε συστήματα τόσο μεγάλα όσο οι γαλαξίες; Συζητήστε στη ομάδα σας.

ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΠΙΔΕΙΞΗΣ

Βαρυτική κάμψη

Η βαρυτική κάμψη του φωτός είναι από τα βασικά παρατηρησιακά δεδομένα που αναδεικνύουν την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης. Σύμφωνα με τη γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν η μάζα παραμορφώνει το χωρόχρονο και το φως που διέρχεται από τον παραμορφωμένο χωρόχρονο αλλάζει κατεύθυνση. Προσεκτικές παρατηρήσεις απομακρυσμένων αντικειμένων έχουν δώσει πολύ λεπτομερείς απεικονίσεις της κατανομής της σκοτεινής ύλης.

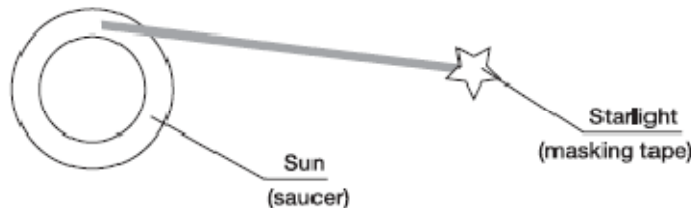


COSMOS 3D dark matter map

1. Το φως παραμορφώνεται από αντικείμενα μεγάλης μάζας.

Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε αυτοκόλλητη χαρτοταινία για να δείξετε πως ταξιδεύει το φως από ένα μακρινό άστρο. Πάρτε ένα κομμάτι χαρτοταινία 50cm και κολλήστε περίπου 20cm στην επιφάνεια του τραπεζιού, διατηρώντας τη όσο το δυνατόν επίπεδη και λεία. Τοποθετήστε την άκρη ενός αντεστραμμένου μικρού πιάτου στη διαδρομή της χαρτοταινίας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Προσεκτικά πιέστε το υπόλοιπο της ταινίας ώστε να «ταξιδεύσει» ομαλά κατά μήκος της περιφέρειας του μικρού πιάτου για λίγο και στη συνέχεια πάνω στην επιφάνεια του τραπεζιού πάλι.

(α) Σχεδιάστε τη διαδρομή του φωτός στο παρακάτω σχήμα. Βάλτε τη Γή στο τέλος της διαδρομής.



(β) Βάλτε το μάτι σας στο επίπεδο της σελίδας στο τέλος της χαρτοταινίας και κοιτάξτε προς τα πίσω κατά μήκος της διαδρομής του φωτός. Που νομίζετε ότι βρίσκεται το άστρο; Σχεδιάστε το στο σχήμα.

(γ) Η κάμψη των φωτεινών ακτίνων για πρώτη φορά παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της έκλειψης ηλίου το 1919. Για ποιο λόγο η παρατήρηση έγινε κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής έκλειψης;

2. Αντικείμενα που παρατηρούνται δια μέσου κεκαμένου χώρου θα εμφανιστούν παραμορφωμένα.

Βάλτε ένα κολονάτο ποτήρι πάνω σε καθένα από τους παρακάτω κύκλους. Μετακινήστε το γύρω-γύρω ελαφρά ενώ παρατηρείτε τους κύκλους από τη βάση του. Σχεδιάστε αυτό που βλέπετε.



3. Οι αστρονομικές παρατηρήσεις δείχνουν τη σκοτεινή ύλη

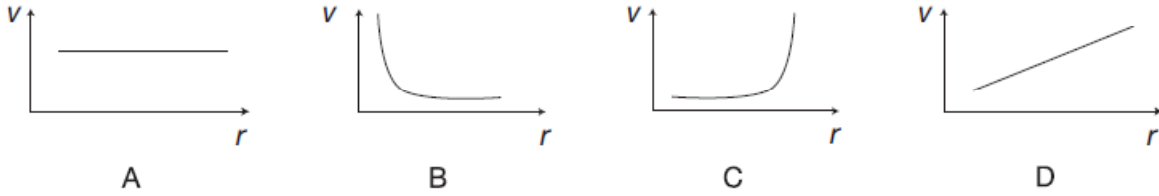
Δείτε την εξαιρετική προσομοίωση της βαρυτικής κάμψης που βρήκαμε στην ιστοσελίδα του Ινστιτούτου Αστρονομίας του Πανεπιστημίου της Χαβάης.

http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/Bolton7-08/lensing_animation.html

Σχεδιάστε με τι μοιάζει ένας μακρινός γαλαξίας όταν υπάρχει μεγάλη μάζα ανάμεσα σε μας και το γαλαξία.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 1

Σύνοψη βίντεο



1. Ποιο από τα παραπάνω διαγράμματα αναπαριστά τη σχέση μεταξύ ταχύτητας (v) και ακτίνας (r) για πλανήτες που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο;
 α) A β) B γ) C δ) D
2. Ποιο από τα παραπάνω διαγράμματα αναπαριστά τη σχέση μεταξύ ταχύτητας (v) και ακτίνας (r) που παρατηρήθηκε για άστρα που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από το κέντρο του γαλαξία;
 α) A β) B γ) C δ) D
3. Οι Φυσικοί μπορούν να υπολογίσουν τη μάζα του Ήλιου χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις της ακτίνας
 α) του Ήλιου και της ταχύτητας του Ήλιου.
 β) της τροχιάς του Ήλιου και της ταχύτητας του Ήλιου.
 γ) ενός πλανήτη και της ταχύτητας του πλανήτη.
 δ) της τροχιάς ενός πλανήτη και της ταχύτητας του πλανήτη.
4. Όταν οι αστρονόμοι μετρούν την μάζα του γαλαξία Triangulum χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της φωτεινότητας το αποτέλεσμα που παίρνουν είναι πολύ μικρότερο από το αποτέλεσμα που παίρνουν όταν τη μετρούν με την τροχιακή μέθοδο. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα από το γεγονός ότι:
 α) Τα άστρα στον Triangulum αποτελούνται από φωτεινότερα στοιχεία από εκείνα του Ήλιου.
 β) Η τροχιακή μέθοδος υποτιμά τη μάζα του Triangulum.
 γ) Ο Triangulum περιέχει μεγάλη ποσότητα σκοτεινής ύλης.
 δ) Ο Triangulum περιέχει μόνο μάζα που εκπέμπει ορατό φως
5. Παρατηρήσεις που δείχνουν την παρουσία της σκοτεινής ύλης έχουν γίνει:
 α) Μόνο στους γαλαξίες Ανδρομέδα και Triangulum
 β) Μόνο στους γαλαξίες Ανδρομέδα, Triangulum και σε αυτόν που ανήκουμε.
 γ) Κάθε γαλαξίας έχει ερευνηθεί για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης.
 δ) Πολλοί αλλά όχι όλοι οι γαλαξίες έχουν ερευνηθεί για την ύπαρξη σκοτεινής ύλης.
6. Οι αποδείξεις για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης προέρχονται από παρατηρήσεις:
 α) της τροχιάς της Σελήνης γύρω από τη Γή και της βαρυτικής παραμόρφωσης.
 β) των τροχιών των άστρων και της βαρυτικής παραμόρφωσης.
 γ) της τροχιάς της Σελήνης γύρω από τη Γή και των τροχιών των άστρων
 δ) των τροχιών των άστρων, της τροχιάς της Σελήνης γύρω από τη Γή και της βαρυτικής παραμόρφωσης.

7. Η μάζα που υπολογίστηκε με τη βαρυτική παραμόρφωση συμφωνεί με την ποσότητα μάζας που βρέθηκε από:
 - α) τις τροχιακές μεθόδους.
 - β) τις μεθόδους φωτεινότητας.
 - γ) και από τις δύο παραπάνω.
 - δ) από καμιά από τις παραπάνω.

8. Η σκοτεινή ύλη ονομάζεται «σκοτεινή» επειδή:
 - α) Εκπέμπει μόνο ακτινοβολία υψηλής ενέργειας όπως οι ακτίνες Χ και οι ακτίνες γ.
 - β) Εκπέμπει μόνο ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας όπως τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα
 - γ) Ανακλά το φως αλλά δεν εκπέμπει άλλη ακτινοβολία όπως τα άστρα.
 - δ) Δε εκπέμπει ή ανακλά κανενός είδους ακτινοβολία ή φως

9. Οι περισσότεροι Φυσικοί πιστεύουν ότι η περισσότερη σκοτεινή ύλη αποτελείται από:
 - α) WIMPS (weakly interacting massive particles) δηλαδή: ασθενώς αλληλεπιδρώντα σωματίδια μεγάλης μάζας ή axions δηλαδή: υποθετικά στοιχειώδη σωματίδια που αν υπάρχουν έχουν μικρή μάζα.
 - β) Άστρα καφέ νάνοι (η μάζα τους είναι μικρότερη από 0,08 μάζες Ήλιου και μεγαλύτερη από 13 μάζες του Δία)
 - γ) Μαύρες τρύπες ή πλανήτες
 - δ) Άστρα όπως ο Ήλιος

10. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι αληθής:
 - α) Οι Φυσικοί γνωρίζουν με ακρίβεια από τι αποτελείται η σκοτεινή ύλη.
 - β) Οι Φυσικοί δεν έχουν ιδέα από τι αποτελείται η σκοτεινή ύλη.
 - γ) Μόνο μερικοί Φυσικοί γνωρίζουν από τι αποτελείται η σκοτεινή ύλη.
 - δ) Οι Φυσικοί έχουν κάποιες θεωρίες σχετικά με τη σκοτεινή ύλη, οι οποίες τώρα εξετάζονται με πειραματικό έλεγχο.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 2

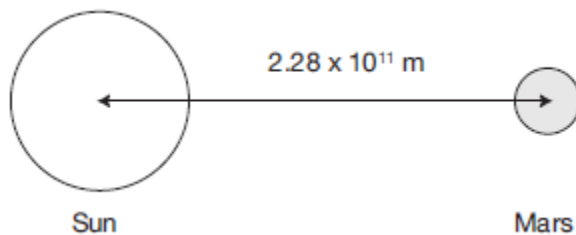
Βασικές έννοιες

Χρήσιμες σχέσεις

$$F_{net} = m \cdot a \quad F_C = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad F_G = G \frac{M \cdot m}{r^2} \quad G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$$

$$E_K = \frac{1}{2} m v^2$$

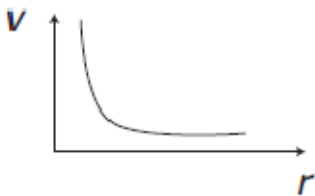
1. Ο Άρης διαγράφει ομαλή κυκλική κίνηση γύρω από τον Ήλιο. Η ακτίνα της τροχιάς του Άρη είναι $2,28 \times 10^{11} \text{ m}$ και η τροχιακή του ταχύτητα $2,41 \times 10^4 \text{ m/s}$.



α) Σχεδιάστε το διανυσματικό διάγραμμα δυνάμεων του Άρη και χρησιμοποιήστε το για να βρείτε τη σχέση της μάζας του Ήλιου με την τροχιακή ταχύτητά του Άρη, την ακτίνα της τροχιάς του Άρη και τη σταθερά παγκόσμιας έλξης.

β) Χρησιμοποιήστε τη σχέση του ερωτήματος (α) για να υπολογίσετε τη μάζα του Ήλιου.

2. Το παρακάτω διάγραμμα περιγράφει την τροχιακή ταχύτητα των πλανητών σε συνάρτηση της ακτίνας των τροχιών τους.



α) Ποια δύναμη κρατά τους πλανήτες στις τροχιές τους
 β) Γιατί οι «εξωτερικοί» πλανήτες κινούνται πιο αργά από τους «εσωτερικούς»;
 γ) Επαναυπολογίστε τη σχέση που βρήκατε στο ερώτημα (1α) για να βρείτε την εξίσωση του παραπάνω διαγράμματος.

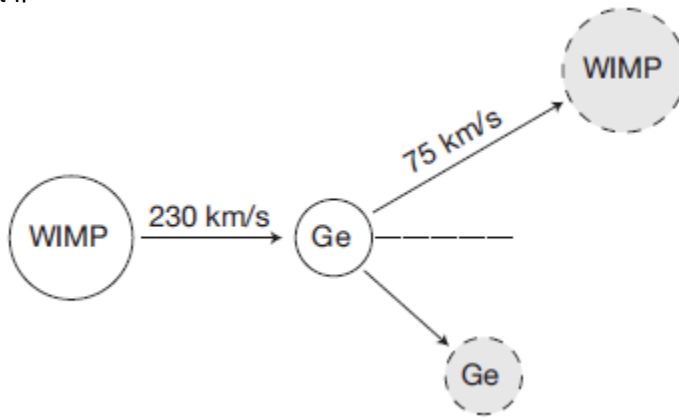
3. Οι αστρονόμοι έχουν μελετήσει το γαλαξία UGC 128 για πολλά χρόνια. Έχουν μετρήσει τη φωτεινότητα του και έχουν υπολογίσει τη μάζα των άστρων που βρίσκονται μέσα σε ακτίνα $1,30 \times 10^{21} \text{ m}$ από το κέντρο του σε $3,34 \times 10^{40} \text{ kg}$. Τα άστρα που περιστρέφονται στην

ακτίνα αυτή έχουν υπολογιστεί να έχουν ταχύτητα $1.30 \times 10^5 \text{ m/s}$. Τι ποσοστό της μάζας μέσα στην ακτίνα αυτή είναι σκοτεινή ύλη;

4. Στη Μινεσότα των ΗΠΑ υπάρχει ένας ανιχνευτής σκοτεινής ύλης γνωστός ως Cryogenic Dark Matter Search (CDMS) που βρίσκεται σε βάθος 700 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της γης σε ένα εγκαταλελειμμένο ορυχείο. Εκεί υπάρχουν 250g κρυστάλλων Γερμανίου (Ge) που ψύχονται σε θερμοκρασία λίγο παραπάνω από το απόλυτο μηδέν (-273°C).

Σύμφωνα με τη θεωρία «ασθενώς αλληλεπιδρώντα σωματρία μεγάλης μάζας» (WINPS) δισεκατομμύρια (WINPS) από το διάστημα πέφτουν σαν βροχή κάθε δευτερόλεπτο στη γη. Παρόλο που συνήθως περνούν δια μέσου στερεών αντικειμένων σαν να μην υπάρχουν αυτά, υπάρχει μια μικρή πιθανότητα ένα WIMP να συγκρουστεί με ένα πυρήνα ατόμου μέσα σε οποιοδήποτε υλικό συμβεί να διαπεράσει.

Στο CDMS δηλαδή υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα ένα WIMP να συγκρουσθεί με τον πυρήνα ενός ατόμου Γερμανίου μέσα στον ανιχνευτή όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



α) Στο παραπάνω σχήμα ένα WIMP μάζας $1.07 \times 10^{-25} \text{ kg}$ και αρχική ταχύτητα 230m/s συγκρούεται με ένα σταθερό πυρήνα Γερμανίου μάζας $1.19 \times 10^{-25} \text{ kg}$. Αν το WIMP σκεδαστεί και η ταχύτητά του μειωθεί στα 75km/s προσδιορίστε την ενέργεια που μεταφέρεται στον πυρήνα χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης της κινητικής ενέργειας. (Αυτή είναι η ενέργεια που οι επιστήμονες πρέπει να ανιχνεύσουν με κάποιο τρόπο). Για τους υπολογισμούς σας υποθέστε ότι η σύγκρουση είναι ελαστική.

β) Πόσες φορές μικρότερη είναι η ενέργεια αυτή από την ενέργεια που απαιτείται για την ανύψωση ενός κόκκου άμμου κατά ένα χιλιοστό ($1 \times 10^{-7} \text{ J}$);

5. Ένας φίλος σου στέλνει ένα e-mail στο οποίο εκφράζει το σκεπτικισμό του σχετικά με την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης. «Νόμιζα ότι η επιστήμη ασχολιόταν με την παρατήρηση αντικειμένων που μπορείς να δεις; Πως μπορείς να ισχυρίζεσαι ότι η σκοτεινή ύλη υπάρχει όταν κανείς δεν μπορεί να τη δει;». Γράψε μια απάντηση πέντε ως δέκα προτάσεων που να περιγράφει τα στοιχεία (αποδείξεις) και να υπερασπίζεται την άποψη ότι δεν είναι αναγκαίο κάτι να είναι ορατό για να γίνεται κατανοητό από την επιστήμη. Στην απάντησή σου δώσε ένα παράδειγμα της καθημερινής ζωής για κάτι που υπάρχει αλλά δεν είναι ορατό.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 3

Βαρύτητα και τροχιακή κίνηση

Για να μοντελοποιήσετε την τροχιακή κίνηση θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσετε ένα μεγάλο τετράγωνο κομμάτι ελαστικού υφάσματος. Τραβήξτε το ύφασμα προς τα κάτω στο κέντρο του υφάσματος χρησιμοποιώντας ένα βαρίδι ή ένα άτομο που θα το τραβάει προς το μέρος του ενώ βρίσκεται από κάτω. Η πρόκληση είναι να κυλίσετε μια σφαίρα πάνω στο ύφασμα έτσι ώστε να περιστρέφεται σε αυτό όσες πιο πολλές φορές γίνεται. Δεν θα πρέπει να μετακινήσετε το ύφασμα για να διατηρήσετε τη περιστροφή.

1. α) **Προβλέψτε και εξηγήστε:** Ποιες μεταβλητές μπορεί να επηρεάσουν την ικανότητα της μπάλας να διαγράψει τροχιά;

β) **Παρατηρήστε και εξηγήστε:** Ποιος συνδυασμός μεταβλητών πρέπει να είναι ο κατάλληλος για την κίνηση της μπάλας σε κυκλική τροχιά;

γ) **Επεκτείνετε και εξηγήστε:** Γιατί η σελήνη δεν πέφτει στη γη;

2. α) **Προβλέψτε και εξηγήστε:** Πως η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς θα επηρεάσει την περίοδο;

β) **Παρατηρήστε και εξηγήστε:** Κάντε σύγκρισή των περιόδων για μπάλες που περιστρέφονται σε διαφορετικές ακτίνες

γ) **Επεκτείνετε και εξηγήστε :** Τα παρακάτω πλανητικά δεδομένα συμφωνούν με τις παρατηρήσεις σας;

Πλανήτης	Ακτίνα τροχιάς ($\times 10^{10} \text{m}$)	Περίοδος (μέρες)
Ερμής	5,97	88
Αφροδίτη	10,8	225
Γη	14,9	365
Άρης	22,8	688

3. α) **Προβλέψτε και εξηγήστε:** Πως η μάζα μιας μπάλας επηρεάζει την περίοδο.

β) **Παρατηρήστε και εξηγήστε:** Συγκρίνατε τις περιόδους για μπάλες με διαφορετικές μάζες

γ) **Επεκτείνετε και εξηγήστε :** Πώς τα παρακάτω δεδομένα υποστηρίζουν τις παρατηρήσεις σας

Φυσικοί και τεχνητοί δορυφόροι της Γης	Μάζα (kg)	Ακτίνα τροχιάς ($\times 10^6 \text{m}$)	Περίοδος (μέρες)
ISS	$4,17 \times 10^5$	6.73	0.063
Hubble Διαστημικό τηλεσκόπιο	1.11×10^4	6.94	0.067
GPS Δορυφόρος	2.37×10^3	26.6	0.5
Σελήνη	7.35×10^{22}	384	27.3

Συγκρίνατε τα δεδομένα για αντικείμενα που περιστρέφονται γύρω από τη γη με δεδομένα για αντικείμενα που περιστρέφονται γύρω από το Δία. Πως τα δεδομένα δείχνουν ότι η περίοδος δεν εξαρτάται από τη μάζα του κεντρικού αντικειμένου;

Δορυφόροι του Δία	Μάζα ($\times 10^{22} \text{kg}$)	Ακτίνα τροχιάς ($\times 10^8 \text{m}$)	Περίοδος (μέρες)
Ιώ	8,93	4,22	1,77
Ευρώπη	4,80	6,71	3,55
Γανυμήδης	14,8	10,7	7,15
Καλλιστώ	10,8	18,8	16,7

4. Είστε μια ομάδα μαθητών που σκοπεύετε να αναπαραστήσετε την περιστροφή των δορυφόρων του Δία. Ποιες μεταβλητές χρειάζεται να λάβετε υπόψη σας για να είναι η αναπαράσταση ακριβής. Πως συγκρίνονται τα μέτρα των ταχυτήτων των δορυφόρων.
5. Η μάζα της Γης, του Δία και του Ήλιου είναι αντίστοιχα $5,98 \times 10^{24} \text{kg}$, $1,90 \times 10^{27} \text{kg}$, και $1,99 \times 10^{30} \text{kg}$. Οι γονείς σας αναρωτιούνται πως οι αστρονόμοι μετρούν τη μάζα των αστρονομικών αντικειμένων. Περιγράψτε πως θα τους το εξηγήσετε.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 4

Η σκοτεινή ύλη μέσα σε ένα γαλαξία

Χρήσιμοι τύποι

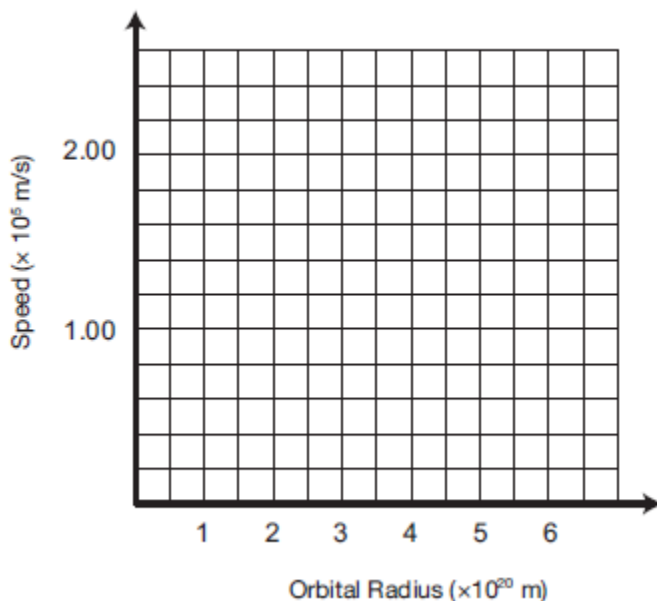
$$F_{net} = m \cdot a \quad F_C = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad F_G = G \frac{M \cdot m}{r^2} \quad G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$$

Τροχιακή ακτίνα άστρων ($\times 10^{20}$ m)	Ταχύτητα που μετρήθηκε ($\times 10^5$ m/s)	Ταχύτητα από υπολογισμούς ($\times 10^5$ m/s)	Βαρυτική μάζα ($\times 10^{41}$ kg)	Μάζα που λείπει (%)
1,85	2,47	2,36	1,69	8,99
2,75	2,40			
3,18	2,37			
4,26	2,25			
6,48	2,47			

Οι αστρονόμοι έχουν αναλύσει τα άστρα στο γαλαξία UGC 11748. Βρήκαν ότι τα περισσότερα άστρα βρίσκονται μέσα σε μια ακτίνα από το κέντρο του $r=1.64 \times 10^{20}$ m και ότι η συνολική μάζα μέσα σε αυτή την ακτίνα είναι 1.54×10^{41} kg, ή 77,4 δισεκατομμύρια φορές η μάζα του Ήλιου.

Αναμένεται ότι τα άστρα που βρίσκονται έξω από αυτή την ακτίνα θα διαγράφουν τροχιές με τον ίδιο τρόπο που οι πλανήτες περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο. Στη δραστηριότητα αυτή θα αναλύσετε την κίνηση των αστεριών που βρίσκονται στις εξωτερικές περιοχές του UGC 11748.

- Χρησιμοποιήστε τις τιμές από τον παραπάνω πίνακα για να σχεδιάσετε το διάγραμμα του μέτρου της ταχύτητας που μετρήθηκε σε συνάρτηση της τροχιακής ακτίνας. Ονομάστε την καμπύλη που θα προκύψει «ταχύτητα που μετρήθηκε».



2. α) Για κάθε ακτίνα του παραπάνω πίνακα υπολογίστε την ταχύτητα αν η μάζα στο κέντρο του γαλαξία έχει βρεθεί από τη φωτεινή ακτινοβολία που εκπέμπει να είναι $1,54 \times 10^{41} \text{ kg}$. Καταγράψτε τις απαντήσεις σας στη στήλη «ταχύτητα από υπολογισμούς». β) Δώστε ένα παράδειγμα των υπολογισμών σας.

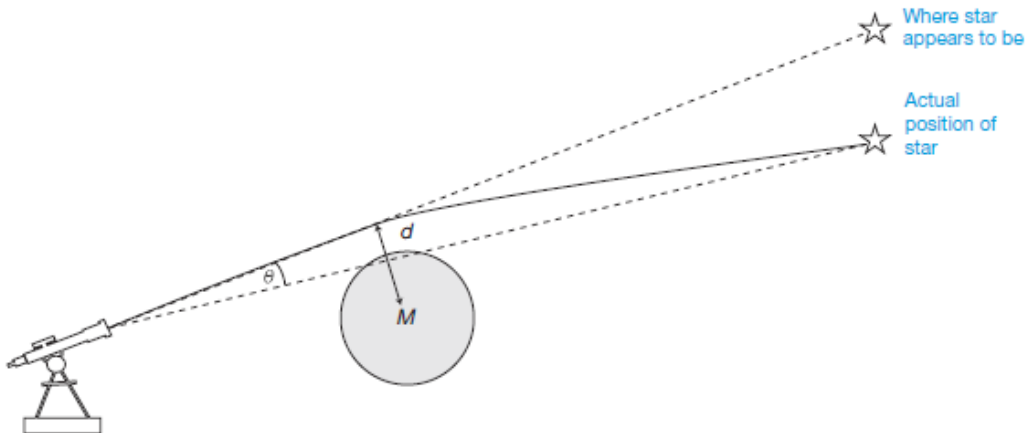
γ) Σχεδιάσετε το διάγραμμα του μέτρου της ταχύτητας από υπολογισμούς σε συνάρτηση της τροχιακής ακτίνας. Ονομάστε την καμπύλη που θα προκύψει «ταχύτητα από υπολογισμούς»
3. Συγκρίνατε την «ταχύτητα που μετρήθηκε» και την «ταχύτητα από υπολογισμούς». Συζητήστε μια πιθανή εξήγηση για τις όποιες διαφορές.
4. α) Χρησιμοποιήστε τις ταχύτητες που μετρήθηκαν για να υπολογίσετε τη μάζα του γαλαξία που περιέχεται στο εσωτερικό κάθε ακτίνας. Καταγράψτε τις απαντήσεις σας στη στήλη «Βαρυτική μάζα». β) Δώστε ένα παράδειγμα των υπολογισμών σας.
5. Για κάθε ακτίνα υπολογίστε τη διαφορά μεταξύ της βαρυτικής μάζας που βρίσκεται μέσα στην ακτίνα και της συνολικής μάζας των ορατών άστρων ($1.54 \times 10^{41} \text{ kg}$). Ξαναπαρουσιάστε αυτή τη διαφορά ως ποσοστό της βαρυτικής μάζας στο εσωτερικό των ακτίνων. Κατά γράψτε τις απαντήσεις σας στη στήλη «Μάζα που λείπει».
6. Τα αποτελέσματα που βρήκατε υποστηρίζουν τη δήλωση που ακολουθεί; «Είναι λογικό να περιμένουμε ότι τα άστρα περιστρέφονται γύρω από τη βαρυτική μάζα που περιέχεται στην ακτίνα της τροχιάς τους με τον ίδιο τρόπο που οι πλανήτες περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο;». Συζητήστε.
7. **Εξηγήστε** την καμπύλη που σχεδιάσατε για την ταχύτητα που μετρήθηκε συναρτήσει της ακτίνας.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 5

Προχωρημένη Μαθηματική ανάλυση

A. Βαρυτική κάμψη

Μερικά από τα πιο πειστικά στοιχεία για τη σκοτεινή ύλη προέρχονται από ένα φαινόμενο που είναι γνωστό με το όνομα «βαρυτική κάμψη». Το φαινόμενο αυτό για πρώτη φορά προβλέφθηκε από τον Αϊνστάιν στη θεωρία της σχετικότητας που διατύπωσε. Στη θεωρία αυτή προβλέπεται ότι οι μεγάλες μάζες στο διάστημα, όπως συστάδες γαλαξιών, προκαλούν κάμψη στις ακτίνες φωτός που διέρχονται κοντά τους. Συνεπώς όταν το φως που προέρχεται από ένα μακρινό άστρο περνάει κοντά από μια μεγάλη μάζα η τροχιά του κάμπτεται λόγω βαρυτικής έλξης. Η βαρυτική κάμψη για πρώτη φορά παρατηρήθηκε το 1919 όταν ο Φυσικός Arthur Eddington παρατήρησε την κάμψη του φωτός ενός μακρινού άστρου από τον Ήλιο.



Οι βασικές μεταβλητές της έκφρασης της γωνίας εκτροπής θ εξάγονται από θεμελιώδεις αρχές και ανάλυση διαστάσεων. Περιμένουμε μια μεγαλύτερη μάζα M να εκτρέπει περισσότερο το φως ενώ μια μεγαλύτερη απόσταση d να το εκτρέπει λιγότερο συνεπώς η έκφραση της εκτροπής θα περιέχει το λόγο M/d . Ο λόγος G/c^2 εκφράζει την ανάλυση διαστάσεων. Το τελικό αποτέλεσμα είναι καθαρός αριθμός.

Αν λύσουμε το πρόβλημα χρησιμοποιώντας την αρχή της ισοδυναμίας παίρνουμε τη Νευτώνεια λύση

$$\theta = \frac{2 \cdot G \cdot M}{dc^2}$$

Αν λάβουμε υπόψη την καμπυλότητα του χωροχρόνου που προβλέπει ο Αϊνστάιν έχουμε

$$\theta = \frac{4 \cdot G \cdot M}{dc^2}$$

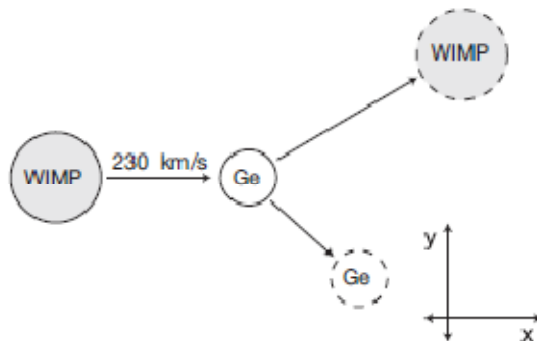
όπου $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$, M είναι η μάζα του αντικειμένου (σε kg), d η μικρότερη απόσταση της φωτεινής διαδρομής (ακτίνας) από το κέντρο του αντικειμένου (σε m) και c είναι η ταχύτητα του φωτός.

1. Δίνεται ότι η μάζα του ήλιου είναι $1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ και η ακτίνα του είναι $6,96 \times 10^8 \text{ m}$, υπολογίστε τη γωνία εκτροπής του φωτός από ένα μακρινό άστρο που διέρχεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ήλιου.
2. Μια ακτίνα φωτός που διέρχεται σε απόσταση 16 εκατομμυρίων ετών φωτός από το κέντρο ενός συμπλέγματος γαλαξιών κάμπτεται κατά γωνία $2,0 \times 10^{-5} \text{ rad}$. Χρησιμοποιήστε τη βαρυτική κάμψη για να υπολογίσετε τη μάζα του συμπλέγματος.
3. Ταξινομήστε τα παρακάτω τρία σενάρια σύμφωνα με τη γωνία απόκλισης (από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη) για φώς που μόλις περνά από τις άκρες των συστάδων γαλαξιών.
 - α) Συστάδα γαλαξιών μάζας 10^{14} φορές τη μάζα του ήλιου και ακτίνα 10^7 έτη φωτός.
 - β) Συστάδα γαλαξιών μάζας 5×10^{14} φορές τη μάζα του ήλιου και ακτίνα 3×10^6 έτη φωτός.
 - γ) Συστάδα γαλαξιών μάζας 2×10^{14} φορές τη μάζα του ήλιου και ακτίνα 4×10^6 έτη φωτός.

B. «Ανιχνεύοντας» τη σκοτεινή ύλη στη γη. Κρούσεις WIMP

Ένα από τα πολλά πειράματα που τώρα διεξάγονται στη Γή για την αναζήτηση σκοτεινής ύλης πραγματοποιείται στην ύπαιθρο της Μινεσότα των Η.Π.Α.. Γίνεται σε βάθος 700m κάτω από την επιφάνεια της Γής σε ένα εγκαταλελειμμένο ορυχείο και ονομάζεται Cryogenic Dark Matter Search (CDMS). Στο πείραμα αυτό μια ποσότητα 250g κρυστάλλων Γερμανίου ψύχεται σε θερμοκρασία λίγο παραπάνω από το απόλυτο μηδέν (-273°C) και έχει σχεδιασθεί για να ανιχνεύσει τη σκοτεινή ύλη αν αποτελείται από ασθενώς αλληλεπιδρώντα σωματίδια μεγάλης μάζας (WIMPs). Μέχρι σήμερα, στο πείραμα δεν έχουν εντοπιστεί καθόλου WIMPs.

4. Αν η σκοτεινή ύλη αποτελείται από WIMPs τότε δισεκατομμύρια από αυτά τα σωματίδια πέφτουν σαν βροχή από το διάστημα στη Γή κάθε δευτερόλεπτο. Παρόλο που συνήθως περνούν δια μέσου στερεών αντικειμένων σαν να μην υπάρχουν αυτά, υπάρχει μια μικρή πιθανότητα ένα WIMP να συγκρουσθεί με ένα πυρήνα ατόμου μέσα σε οποιοδήποτε υλικό συμβεί να διαπεράσει. Στο CDMS δηλαδή υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα ένα WIMP να συγκρουσθεί με τον πυρήνα ενός ατόμου Γερμανίου μέσα στον ανιχνευτή. Αυτή η κρούση θα ήταν ελαστική, και απεικονίζεται στο σχήμα.



Έχετε προσληφθεί ως σύμβουλος από το CDMS και μερικοί από τους Φυσικούς σας ζητούν να τους βοηθήσετε στο παρακάτω πρόβλημα:

- Υποθέτουμε ότι ένα WIMP έχει μάζα $1,07 \times 10^{-25} \text{kg}$ και αρχική ταχύτητα 230km/s .
- Συγκρούεται με τον πυρήνα ενός ακίνητου ατόμου Γερμανίου μάζας $1,19 \times 10^{-25} \text{kg}$.
- Το άτομο Γερμανίου εκτρέπεται με κινητική ενέργεια 10keV ($1 \text{eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{J}$).
- Οι Φυσικοί θα ήθελαν να ξέρουν σε ποια κατεύθυνση θα κινηθεί το άτομο του Γερμανίου μετά τη σύγκρουση.

Βρείτε την απάντηση σε αυτό το πρόβλημα και γράψτε μια σαφή και λεπτομερή εξήγηση για το πώς φτάσατε σε αυτή ώστε να μπορείτε να τη στείλετε στους Φυσικούς του CDMS .

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 6

Εργαστήριο σκοτεινής ύλης: Μέτρηση μάζας μέσω κυκλικής κίνησης

Ένα σώμα που κινείται με ταχύτητα σταθερού μέτρου σε κυκλική τροχιά επιταχύνεται (η κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας μεταβάλλεται σταθερά). Η επιτάχυνση οφείλεται σε μια σταθερή δύναμη που έχει κατεύθυνση προς το κέντρο του κύκλου (κεντρομόλος δύναμη). Κάθε αλλαγή στη σταθερή (σταθερό μέτρο) αυτή δύναμη θα επιφέρει αλλαγή στην κυκλική κίνηση του αντικειμένου.

Προβλέψτε

Πως θα μεταβληθεί το μέτρο της ταχύτητας ενός σώματος σε κυκλική τροχιά αν διατηρούμε σταθερή την ακτίνα όταν αυξάνεται η εφαρμοζόμενη δύναμη ;

Απαιτούμενα υλικά

Λαστιχένιο πώμα	16 ροδέλες
Νήμα	Χρονόμετρο
Πλαστικός σωλήνας	Ηλεκτρονικός ζυγός
Συνδετήρας	Άγνωστη μάζα

Πειραματική διαδικασία

1. Μετρήστε και καταγράψτε τη μάζα (i) του πώματος (ii) όλων των ροδελών μαζί .
2. Ο καθηγητής σας θα σας δείξει πώς να συναρμολογήσετε τη συσκευή.
3. Ρυθμίστε την ακτίνα περιστροφής του πώματος μεταξύ 40 και 80 cm βάζοντας το συνδετήρα ακριβώς κάτω από την κάτω άκρη του σωλήνα. Καταγράψτε την απόσταση από την πάνω άκρη του σωλήνα μέχρι το μέσο του πώματος.
4. Τοποθετήστε 8 ροδέλες σε ένα δεύτερο συνδετήρα και συνδέστε τον στο ελεύθερο άκρο του νήματος. Θέστε σε περιστροφή το πώμα στο οριζόντιο επίπεδο φροντίζοντας ο πρώτος συνδετήρας να διατηρείται αναρτημένος ακριβώς στην κάτω άκρη του σωλήνα (χωρίς να την ακουμπά). Όταν το πώμα περιστρέφεται με σταθερό ρυθμό καταγράψτε το χρόνο που απαιτείται για 10 περιστροφές.
5. Επαναλάβετε αυξάνοντας τον αριθμό των ροδελών κατά δύο. Διατηρώντας σταθερή την ακτίνα καταγράψτε το χρόνο των 10 περιστροφών. Επαναλάβετε μέχρι να έχετε αποτελέσματα για 5 διαφορετικές μάζες (8, 10, 12, 14, 16 ροδέλες).

Εφαρμογή

Σας δίνεται ένα αντικείμενο άγνωστης μάζας . Ακολουθήστε την παραπάνω διαδικασία και καταγράψτε το χρόνο των 10 περιστροφών.

Ανάλυση

1. Σχεδιάστε το διανυσματικό διάγραμμα δυνάμεων για τις ροδέλες και το πώμα.
2. Χρησιμοποιήστε τα διαγράμματα δυνάμεων για να εξαγάγετε μια έκφραση που συνδέει το v^2 με το m_w . Η γωνία μεταξύ του νήματος και του οριζοντίου επιπέδου είναι πολύ μικρή και για αυτό αγνοήστε τη στους υπολογισμούς σας.
3. Χρησιμοποιήστε τη γεωμετρία της κυκλικής κίνησης για να μετατρέψετε την περίοδο της κίνησης σε γραμμική ταχύτητα του πώματος.

4. Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση του τετραγώνου της ταχύτητας του πώματος (v^2) συναρτήσει της μάζας των ροδελών (m_w). Υπολογίστε την κλίση της καμπύλης (θυμηθείτε να συμπεριλάβετε τις σωστές μονάδες).
5. Χρησιμοποιήστε την έκφραση που εξαγάγατε στο βήμα 2 για να δώσετε τη φυσική σημασία για την κλίση του διαγράμματος $v^2=f(m_w)$. Κάντε σύγκρισή της κλίσης που υπολογίσατε στο βήμα 4 με την κλίση που παράχθηκε από τα διαγράμματα δυνάμεων στο βήμα 2.
6. Χρησιμοποιήστε τα αποτελέσματα αυτά για να υπολογίσετε την άγνωστη μάζα. Συγκρίνατε το αποτέλεσμα που βρήκατε με την τιμή της μάζας ζυγίζοντάς τη.

Ερωτήσεις

1. Δύο μαθητές περιστρέφουν όμοια πώματα σε τροχιές που έχουν ίσες ακτίνες. Το ένα από τα πώματα περιστρέφεται εμφανώς ταχύτερα από το άλλο. Τι συμπεραίνετε για τον αριθμό των ροδελών που συνδέονται στο ταχύτερο πώμα;
2. Η γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο λόγω της βαρυτικής έλξης, Πως θα μπορούσατε να χρησιμοποιήσετε τα δεδομένα της περιστροφής της γης για να μετρήσετε τη μάζα του Ήλιου; Βρείτε τα σχετικά δεδομένα και κάντε τον υπολογισμό.
3. Ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από το κέντρο του γαλαξία σε ακτίνα 8,33kpc (1parsec=3.26 έτη φωτός) και με ταχύτητα 220km/s. Προσδιορίστε τη μάζα του γαλαξία στο εσωτερικό της τροχιάς του Ήλιου.
4. Οι Φυσικοί κάνουν εκτιμήσεις για την ύλη ενός γαλαξία που εκπέμπει φως μετρώντας τη φωτεινότητα (λαμπρότητα) του γαλαξία. Όμως έχουν παρατηρήσει ότι άστρα στο εσωτερικό πολλών γαλαξιών περιστρέφονται γύρω από το κέντρο των γαλαξιών με ταχύτητες που το μέτρο τους είναι μεγαλύτερο από ότι αναμενόταν. Χρησιμοποιώντας ιδέες από αυτή την εργαστηριακή δραστηριότητα, δώσε μια εξήγηση για αυτές τις παρατηρήσεις.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 6

Εργαστήριο σκοτεινής ύλης: Σημειώσεις για τον διδάσκοντα

Περίπου μιλώντας, η σκοτεινή ύλη είναι ύλη που μόνο μέσω της βαρυτικής αλληλεπίδρασης που εμφανίζει με άλλα σώματα μπορούμε να εντοπίσουμε. Μερικά από τα πιο συναρπαστικά στοιχεία για αυτή προέρχονται από την ανάλυση της κίνησης των άστρων που κινούνται πολύ ταχύτερα από ότι περιμέναμε, βασισμένοι στη γύρω τους ορατή μάζα.

Σε αυτή τη δραστηριότητα, παρουσιάζοντας στους μαθητές τη σχέση μάζας – ταχύτητας, τους δίνετε το θεωρητικό υπόβαθρο που χρειάζεται για να ερευνήσουν ένα από τα μεγαλύτερα άλυτα προβλήματα σήμερα.

Ασφάλεια

Αυτή η εργαστηριακή δραστηριότητα περιλαμβάνει περιστροφική κίνηση αντικειμένων με τη βοήθεια ενός νήματος, διαδικασία που είναι από τη φύση της επικίνδυνη όταν γίνεται. Αν το νήμα κοπεί ή οι κόμποι λυθούν, το λαστιχένιο πώμα θα κινηθεί εφαπτομενικά της κυκλικής τροχιάς του. Το ελαστικό πώμα μπορεί επίσης να χτυπήσει το μαθητή που το κρατάει αν δεν είναι προσεκτικός. Επομένως:

1. Πάντα ελέγχετε τα υλικά πριν υλοποιηθεί η εργαστηριακή δραστηριότητα.
2. Δώστε στους μαθητές να φορέσουν γυαλιά εργαστηρίου για να έχουν προστασία από πιθανό τραυματισμό στα μάτια καθώς θα υλοποιούν την εργαστηριακή δραστηριότητα.
3. Βεβαιωθείτε ότι οι μαθητές έχουν αρκετό χώρο για την υλοποίηση της εργαστηριακής δραστηριότητας χωρίς να εκτεθούν σε κίνδυνο άλλοι μαθητές ή οι ίδιοι.

Εισαγωγή

Στη δραστηριότητα αυτή οι μαθητές θα διερευνήσουν τη σχέση ανάμεσα στη μάζα ενός αριθμού ροδελών και στην τροχιακή ταχύτητα ενός ελαστικού πώματος που περιστρέφεται γύρω από τις ροδέλες. Η δραστηριότητα αποδεικνύει ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ταχύτητα (μέτρο) ενός περιστρεφόμενου σώματος για να βγάλουμε συμπεράσματα για τη μάζα που είναι υπεύθυνη για την περιστροφή. Μια σειρά ερωτήσεων στη συνέχεια καθοδηγεί τους μαθητές να δουν πως μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή τη σχέση για να αναλύσουν την κίνηση αστρονομικών αντικειμένων και τελικά να βρουν αποδεικτικά στοιχεία για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης.

Όταν το πώμα κάνει την περιστροφική κίνηση, λόγω του βάρους του, περιστρέφεται πιο κάτω από την κορυφή (δηλ. το άνω άκρο) του σωλήνα. Για το λόγο αυτό το τμήμα του νήματος μεταξύ πώματος και κορυφής του σωλήνα δεν βρίσκεται σε οριζόντιο επίπεδο όπως και στο παρακάτω σχήμα φαίνεται. Η γωνία θ είναι ένα μέτρο αυτής της απόκλισης.

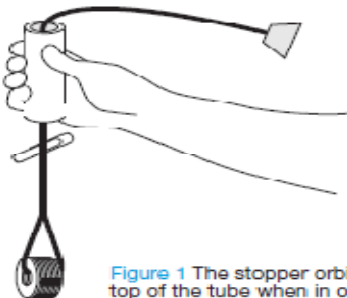
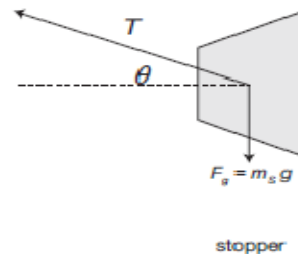
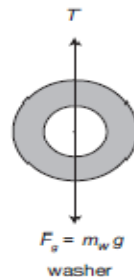


Figure 1 The stopper orbits below the top of the tube when in orbital motion.



Εάν οι μαθητές σωστά συμπεριλάβουν τη γωνία θ κατά την ανάλυση των εργαστηριακών δεδομένων, θα καταλήξουν σε μια αρκετά περίπλοκη έκφραση για την ταχύτητα (v) του πώματος σαν συνάρτηση της μάζας των ροδελών (m_w) που δεν προσφέρεται για επεξεργασία (μπορείτε να δείτε λεπτομέρειες στο παράρτημα Β). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η θ είναι πάντοτε σχετικά μικρή είναι βάσιμοι λόγοι που εξηγούν γιατί οι μαθητές μπορούν να αγνοήσουν τη θ στα βήματα 5 και 6. Αυτό θα τους επιτρέψει να αγνοήσουν περιττές, πολύπλοκες λεπτομέρειες και θα τους βοηθήσει να εστιάσουν στις πιο σημαντικές έννοιες.

Υπόβαθρο

Πριν εκτελέσουν αυτή τη δραστηριότητα, οι μαθητές χρειάζεται να είναι εξοικειωμένοι με τις παρακάτω έννοιες.

- Το μήκος ενός κύκλου δίνεται από τη σχέση $2\pi r$, όπου r είναι η ακτίνα.
- Ο όρος «περίοδος» περιγράφει το χρόνο που χρειάζεται για μια περιστροφή.
- Η περιστροφική κίνηση προκαλείται από μια μη σταθερή δύναμη (μεταβλητή διεύθυνση) που δρα προς το κέντρο του κύκλου.
- Η μεταβλητή δύναμη που ασκείται στους πλανήτες είναι η δύναμη της βαρύτητας, το μέτρο και η διεύθυνσή της οποίας προσδιορίζονται από το νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα.

Τροποποιήσεις

Ανάλογα με τα σημεία που θέλετε να δώσετε έμφαση στην τάξη σας, μπορείτε να δοκιμάσετε κάποιες από τις παρακάτω τροποποιήσεις:

- Μη ζυγίσετε τις ροδέλες. Οι μαθητές θα πρέπει να βρουν μια ποιοτική σχέση μεταξύ μάζας και ταχύτητας.
- Οι μαθητές θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν διανυσματικές αναπαραστάσεις για να βρουν τη σχέση μεταξύ του v^2 και του m_w αντί να σχεδιάσουν το διάγραμμα $v^2 = f(m_w)$.
- Ζητήστε από τους μαθητές να συγκρίνουν αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές της ακτίνας περιστροφής, και να βρουν πως η ταχύτητα επηρεάζεται από την ακτίνα.

Ανάλυση

Δείγματα δεδομένων

Αριθμός ροδελών	8	10	12	14	16
Μάζα ροδελών (g)	43.2	53.9	64.7	75.5	86.3
Χρόνος 10 περιστροφών (s)	8.51	7.58	6.92	6.40	6.00
Ταχύτητα πώματος (m/s)	4.60	5.14	5.63	6.08	6.50

Μάζα λαστιχένιου πώματος= 12 g

Μάζα 16 ροδελών = 86,3 g

Απόσταση της κορυφής του σωλήνα από το μέσο του πώματος = 62 cm

Άγνωστη μάζα

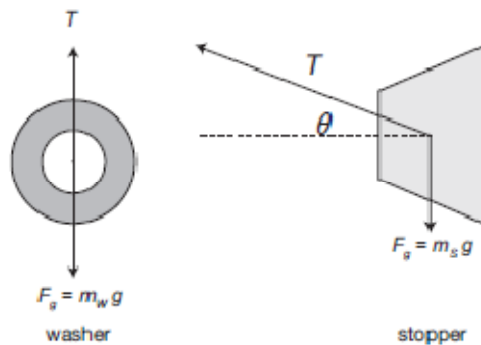
Μάζα όπως μετρήθηκε στο ζυγό = 54,0 g

Χρόνος 10 περιστροφών = 7,68 s

Ταχύτητα πώματος = 5,07 m/s

1. Το m_w αναπαριστά τη μάζα των ροδελών. Έστω ότι με m_s αναπαριστάται η μάζα του πώματος, με T το μέτρο της τάσης του νήματος, με g η επιτάχυνση της βαρύτητας και με θ η γωνία κατά την οποία το τμήμα του νήματος μεταξύ κορυφής του σωλήνα και πώματος αποκλίνει από την οριζόντια διεύθυνση.

Το διανυσματικό διάγραμμα δυνάμεων έχει ως εξής:



2. Καθώς το πώμα περιστρέφεται στο οριζόντιο επίπεδο, το μέτρο της συνισταμένης δύναμης που ασκείται σε αυτό ισούται με την οριζόντια συνιστώσα της τάσης του νήματος. Από το διανυσματικό διάγραμμα δυνάμεων για το πώμα, μπορούμε να δούμε ότι αυτή η συνιστώσα ισούται με $T \sin \theta$. Θεωρώντας $\theta=0$ αυτή περιορίζεται σε T .

Καθώς το πώμα κάνει ομαλή κυκλική κίνηση, η επιτάχυνσή του δίνεται από τη σχέση

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (6.1)$$

Όπου r η απόσταση μεταξύ του πώματος και της κορυφής του σωλήνα.

Αντικαθιστώντας την T και την a_c από την εξίσωση (6.1) στο 2^ο νόμο του Νεύτωνα για την κίνηση του πώματος έχουμε:

$$F_{net} = m_s \cdot a$$

$$T = m_s \frac{v^2}{r} \quad (6.2)$$

Από το διανυσματικό διάγραμμα δυνάμεων για τις ροδέλες, φαίνεται ότι $T = m_w \cdot g$

και έτσι

$$m_w \cdot g = m_s \frac{v^2}{r} \quad (6.3)$$

Λύνοντας ως προς v^2 έχουμε

$$v^2 = \frac{m_w \cdot g \cdot r}{m_s} \Leftrightarrow v^2 = \left(\frac{g \cdot r}{m_s}\right) m_w \quad (6.4)$$

Έτσι, το τετράγωνο της ταχύτητας του πώματος είναι ανάλογο με τη μάζα των ροδελών, με τη σταθερά αναλογικότητας είναι ίση με

$$\frac{g \cdot r}{m_s} \quad (6.5)$$

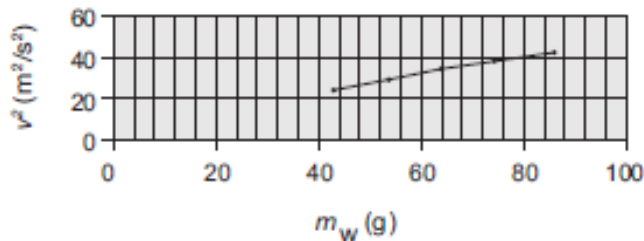
Καθώς η θ είναι σχετικά μικρή για όλες τις τιμές του m_w , αφήνοντας τη ίση με μηδέν στους παραπάνω υπολογισμούς παίρνουμε μια ακριβή προσέγγιση. Αν η τιμή της θ ληφθεί υπόψη στη σχέση μεταξύ v^2 και m_w τότε η σχέση γίνεται πολύ πιο πολύπλοκη και δεν προσφέρεται εύκολα για ανάλυση από τους μαθητές. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορείτε να βρείτε στο παράρτημα Β.

3. Δείγμα υπολογισμών

$$v = \frac{d}{t} = \frac{2\pi \cdot r}{T} = \frac{2\pi(0.62m)}{8.51s} = 4.60m/s$$

Όπου r η ακτίνα της τροχιάς του πώματος και T η περίοδος της περιστροφής του πώματος.

4. Διάγραμμα $v^2=f(m_w)$



Υπολογισμός της κλίσης της καμπύλης:

$$\kappa\lambda\iota\sigma\eta = \frac{\Delta(v^2)}{\Delta m_w} = \frac{40m^2/s^2 - 30m^2/s^2}{0.080kg - 0.060kg} = 5.0 \times 10^2 m^2/(kgs^2)$$

5. Από την εξίσωση 6.4 η κλίση του διαγράμματος $v^2=f(m_w)$ εξαρτάται από τη μάζα του πώματος, την ακτίνα περιστροφής και την επιτάχυνση της βαρύτητας. Χρησιμοποιώντας τα παρακάτω δεδομένα:

$m_s = 12.4g$, $r = 62\text{ cm}$ και $g = 9.8m/s^2$ έχουμε

$$\frac{g \cdot r}{m_s} = \frac{(9.8m/s^2)(0.62m)}{0.0124kg} = 4.9 \times 10^2 m^2/(kgs^2)$$

Συνεπώς η μετρημένη κλίση $5.0 \times 10^2 m^2/(kgs^2)$ είναι 2% μεγαλύτερη από την τιμή που

προβλέπεται από το διανυσματικό διάγραμμα δυνάμεων (θεωρητική τιμή).

6. Χρησιμοποιώντας το δείγμα δεδομένων $r = 62\text{ cm}$ και $v = 5,07\text{ m/s}$ και τον τύπο

$$v^2 = \left(\frac{g \cdot r}{m_s}\right)m_w \Leftrightarrow (5.07m/s)^2 = \left(\frac{(9.8m/s^2)(0.62m)}{0.0124kg}\right)m_w \Leftrightarrow m_w = 0.053kg$$

Σημείωση: Η τελική απάντηση ελήφθη χρησιμοποιώντας όλα τα ψηφία που υπάρχουν στις ενδιάμεσες απαντήσεις χωρίς στρογγυλοποίηση.

Όποτε η τιμή της άγνωστης μάζας, όπως υπολογίσθηκε από την περιστροφή του πώματος είναι 53g. Η διαφορά από την τιμή της μάζας που μετρήθηκε με το ζυγό είναι μόλις 2%.

Κεφάλαιο βίντεο 1

Εισαγωγή

Αυτό το κεφάλαιο του βίντεο:

- Παρουσιάζει τη Vera Rubin και τις μετρήσεις της για τις τροχιακές ταχύτητες των άστρων στην Ανδρομέδα.
- Εξηγεί ότι η Rubin περίμενε να μειώνονται οι τροχιακές ταχύτητες των εξωτερικών άστρων, όσο τα άστρα είναι πιο απομακρυσμένα από το κέντρο της Ανδρομέδας (όπως οι τροχιακές ταχύτητες των πλανητών στο ηλιακό σύστημα).
- Δείχνει ότι, αντιθέτως, οι τροχιακές ταχύτητες παραμένουν σταθερές με την απόσταση (από το κέντρο του γαλαξία) και είναι μεγαλύτερες από ότι αναμενόταν.
- Εξηγεί ότι, με την πάροδο του χρόνου, οι παρατηρήσεις της Rubin οδήγησαν τους φυσικούς να ξανασκεφτούν τη σύσταση του συνόλου του σύμπαντος.

Ιστορικό υπόβαθρο

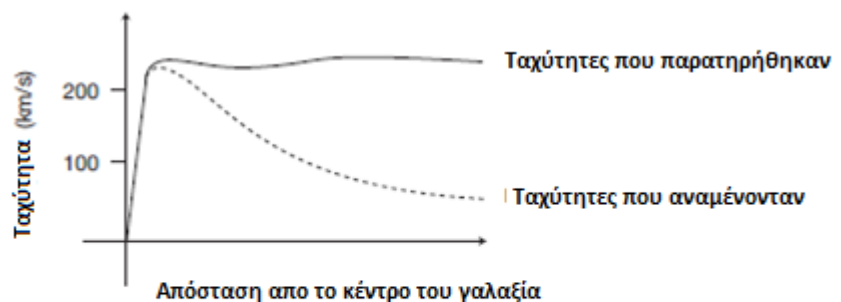
Η Vera Rubin είναι μια αστρονόμος από την Ουάσιγκτον. Μεταξύ 1967 και 1969, με την βοήθεια του συνάδελφου της Kent Ford, χρησιμοποίησε για την παρατήρηση των τροχιακών ταχυτήτων των άστρων στο εσωτερικό του γαλαξία της Ανδρομέδας, δύο τηλεσκόπια (στο Kitt Peak και το Lowell Observatory, και τα δύο στις Η.Π.Α.).

Αν και διάφοροι αστρονόμοι από πιο πριν είχαν μετρήσει τις τροχιακές ταχύτητες των άστρων σε διάφορους γαλαξίες, αυτό που έκανε τις παρατηρήσεις της Rubin μοναδικές ήταν η τεχνολογία που χρησιμοποίησε. Ο Ford είχε πρόσφατα κατασκευάσει ένα πολύ ευαίσθητο φασματοόμετρο που είχε την ικανότητα να συλλέγει δεδομένα από τις «αχνές» εξωτερικές περιοχές των γαλαξιών. Αυτό επέτρεψε στη Rubin να παρατηρήσει φαινόμενα που προηγούμενα (στο παρελθόν) ήταν απροσπέλαστα στους αστρονόμους.

Οι τροχιακές ταχύτητες των πλανητών στο Ηλιακό σύστημα μειώνονται όσο απομακρυνόμαστε από τον Ήλιο έτσι η Rubin περίμενε να παρατηρήσει μια ανάλογη μείωση στις τροχιακές ταχύτητες των άστρων της Ανδρομέδας. Αντιθέτως με αυτό που ανέμενε οι τροχιακές ταχύτητες που παρατήρησε φαίνονται στο **Σχήμα 1**.



Vera Rubin



Σχήμα 1 Αναμενόμενες και παρατηρηθείσες ταχύτητες των άστρων στην Ανδρομέδα. Οι αναμενόμενες ταχύτητες βασίστηκαν στην υπόθεση ότι το μεγαλύτερο μέρος της μάζας της Ανδρομέδας βρίσκεται μέσα στον πυρήνα του γαλαξία όπου και βρίσκονται τα περισσότερα άστρα.

Στις εξωτερικές περιοχές του γαλαξία, οι τροχιακές ταχύτητες ήταν σταθερές, περίπου στα 225km/s όσο μακριά προς τα έξω μπόρεσε να μετρήσει η Rubin. Η υπόθεση για τη σκοτεινή ύλη είναι πιο πειστική στις εξωτερικές περιοχές γιατί σε αυτές η σκοτεινή ύλη υπερισχύει της φωτεινής ύλης. Στις εσωτερικές περιοχές ενός γαλαξία οι τροχιακές ταχύτητες αυξάνονται γραμμικά, όπως αναμενόταν, γιατί εκεί υπάρχει πολύ περισσότερη φωτεινή ύλη από τη σκοτεινή.

Προγενέστερες αποδείξεις για σκοτεινή ύλη

Αν και οι παρατηρήσεις της Rubin στη δεκαετία του 1960 έκαναν τη σκοτεινή ύλη κυρίαρχο ρεύμα στη Φυσική, αποδείξεις, αβέβαιες όμως, για την ύπαρξη της σκοτεινής ύλης υπήρχαν από πολύ νωρίτερα. Το 1933 ο Fritz Zwicky αστρονόμος γεννημένος στην Ελβετία μελέτησε τις ταχύτητες μεμονωμένων γαλαξιών μέσα στο σύμπλεγμα γαλαξιών Coma και τις βρήκε τόσο ψηλές που ξεπερνούσαν την ταχύτητα διαφυγής από το σύμπλεγμα. Αυτό σήμαινε ότι το σύμπλεγμα θα έπρεπε να έχει γίνει ασταθές και να διασπάται, πράγμα που ξεκάθαρα δεν συνέβαινε.

Ο Zwicky κατάληξε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να υπάρχει μια μεγάλη ποσότητα αόρατης μάζας μέσα στο σύμπλεγμα που το κρατάει ενωμένο λόγω της βαρύτητας. Παρά όλα αυτά, τα δεδομένα του Zwicky περιείχαν πολλές αβεβαιότητες που έκαναν τους άλλους Φυσικούς να τα αντιμετωπίζουν με επιφύλαξη.



Fritz Zwicky



Σχήμα 2: Ο γαλαξίας Ανδρομέδα. Τα άστρα στο εσωτερικό του περιστρέφονται κάνοντας ομαλή κυκλική κίνηση

Κεφάλαιο βίντεο 2 Μέτρηση της μάζας του ήλιου

Αυτό το κεφάλαιο του βίντεο:

- Δείχνει πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το νόμο του Νεύτωνα για την παγκοσμία έλξη για να υπολογίσουμε τη μάζα του Ήλιου από την τροχιά οποιουδήποτε πλανήτη.

Η μέθοδος μέτρησης της μάζας που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο του βίντεο είναι κοινώς γνωστό ως δυναμική μέθοδος. Ωστόσο, θα χρησιμοποιήσουμε τον όρο Τροχιακή Μέθοδος για να τονίσουμε την σύνδεση της με τις τροχιακές ταχύτητες των αστεριών.

Ελλειπτικές τροχιές

Οι τροχιές των πλανητών είναι ελλειπτικές με τον Ήλιο να βρίσκεται σε μία από τις εστίες της έλλειψης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Kepler το τετράγωνο της περιόδου T , είναι ανάλογο προς τον κύβο του μεγάλου ημιάξονα της ελλειπτικής τροχιάς, a :

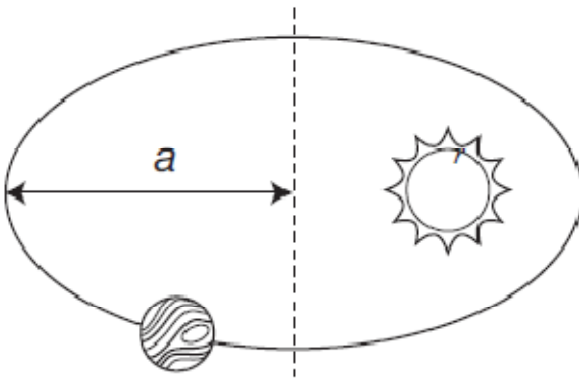


Figure 1 Planet orbiting the Sun in an elliptical orbit. a is the semi-major axis of the orbit.

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_s} a^3 \quad (2.1)$$

Όπου M_s είναι η μάζα του Ήλιου και G η σταθερά παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα. Λύνοντας την εξίσωση ως προς M_s έχουμε:

$$M_s = \frac{4\pi^2}{G \cdot T^2} a^3 \quad (2.2)$$

Στο βίντεο, όπως και στα περισσότερα βιβλία, αντιμετωπίζουμε πλανητικές τροχιές ως κυκλικές με την κεντρομόλο δύναμη που ενεργεί στον πλανήτη να δίνεται από τη σχέση:

$$F_c = \frac{m_p \cdot v^2}{r} \quad (2.3) \quad \text{όπου } m_p \text{ η μάζα του πλανήτη, } v \text{ το μέτρο της γραμμικής ταχύτητας του}$$

πλανήτη και r η ακτίνα της τροχιάς του.

Η δύναμη που ασκείται στον πλανήτη είναι η βαρύτητα, που υπολογίζεται από το νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα

$$F_C = \frac{G \cdot M_s \cdot m_p}{r^2} \quad (2.4)$$

Εξισώνοντας τις δύο δυνάμεις και λύνοντας ως προς M_s έχουμε:

$$\frac{G \cdot M_s \cdot m_p}{r^2} = \frac{m_p \cdot v^2}{r} \Leftrightarrow M_s = \frac{r \cdot v^2}{G} \quad (2.5)$$

Για μια κυκλική τροχιά η απόσταση που διανύεται είναι $2\pi r$ συνεπώς η ταχύτητα είναι:

$$v = \frac{d}{T} = \frac{2\pi \cdot r}{T} \quad \text{Αντικαθιστώντας στη (2.5) έχουμε:}$$

$$M_s = \frac{r \left(\frac{2\pi \cdot r}{T} \right)^2}{G} = \frac{4\pi^2}{G \cdot T^2} r^3 \quad (2.6)$$

Παραγάγαμε μια όμοια εξίσωση με την (2.2). Εφόσον η προσέγγιση $a \approx r$ είναι έγκυρη μπορούμε να αντιμετωπίσουμε τις ελλειπτικές τροχιές σαν να ήταν κυκλικές. Η τροχιά του Δία είναι ελαφρώς ελλειπτική. Η διαφορά στο αποτέλεσμα μεταξύ της υπολογιζόμενης μάζας του Ήλιου υποθέτοντας κυκλική και ελλειπτική τροχιά είναι μικρότερη από 0,01%.

Κεφάλαιο βίντεο 3

Μέτρηση της μάζας ενός γαλαξία: Τροχιακή μέθοδος

Αυτό το κεφάλαιο του βίντεο:

- εξηγεί πώς να υπολογίσει τη μάζα ενός γαλαξία μέσα σε μια δεδομένη ακτίνα από τις τροχιακές ταχύτητες και τις ακτίνες τροχιάς των άστρων του (η τροχιακή μέθοδος).
- εφαρμόζει την τροχιακή μέθοδο στον γαλαξία *Triangulum* και υπολογίζει μάζα 46 δισεκατομμυρίων Ήλιων που βρίσκονται μέσα σε ακτίνα $4,0 \times 10^{20} \text{ m}$.

Κατανομή της μάζας

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της τροχιακής μεθόδου είναι ότι χρησιμοποιείται η ίδια εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μάζας του Ήλιου

$$M = \frac{r \cdot v^2}{G} \quad \text{για να υπολογιστεί η μάζα ενός γαλαξία μέσα σε μια ορισμένη ακτίνα.}$$

Αυτό όμως μας οδηγεί στην ακόλουθη ερώτηση: Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση για ένα γαλαξία, δεν αποδεχόμαστε σιωπηρά ότι η μάζα του γαλαξία είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο του, όπως η μάζα του Ήλιου στο Ηλιακό σύστημα;

Η απάντηση στην ερώτηση είναι ότι δεν κάνουμε αυτή την αποδοχή. Η εξίσωση $M = \frac{r \cdot v^2}{G}$

εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε σφαιρικά συμμετρική κατανομή της μάζας, συμπεριλαμβάνει εκτεταμένες και εντοπισμένες κατανομές. Συνεπώς, εφαρμόζεται σε ένα γαλαξία στο οποίο η μάζα εκτείνεται σε μεγάλη έκταση (όγκο).

Ο λόγος για τον οποίο η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται σε οποιαδήποτε σφαιρικά συμμετρική κατανομή της μάζας είναι ότι τέτοιες κατανομές παράγουν, έξω από την ακτίνα τους βαρυτικό πεδίο που είναι ταυτόσημο με το πεδίο που θα παραγόταν αν όλη η μάζα ήταν εντοπισμένη στο κέντρο της κατανομής. Έτσι το εξωτερικό βαρυτικό πεδίο μιας μάζας σαν αυτή είναι ανεξάρτητο της κατανομής της μάζας και εξαρτάται μόνο από τη συνολική μάζα M που περιέχει η κατανομή.

Χρησιμοποιούμε ήδη σιωπηρά αυτό το γεγονός κατά τον υπολογισμό της βαρυτικής έλξης μεταξύ οποιωνδήποτε δύο εκτεταμένων σωμάτων (π.χ. του Ήλιου και της Γης) χρησιμοποιώντας την απόσταση από κέντρο - σε - κέντρο ως την απόσταση r στον νόμο του Νεύτωνα για την παγκόσμια έλξη (π.χ., μεταξύ του Ήλιου και της Γης).

Ένα δεύτερο θέμα σχετικά με την τροχιακή μέθοδο και την κατανομή μάζας είναι: Γιατί στην τροχιακή μέθοδο μετράμε μόνο τη μάζα του γαλαξία μέσα στη συγκεκριμένη ακτίνα; Δηλαδή γιατί δεν λαμβάνουμε υπόψη στη μέτρησή μας τη μάζα του μακρύτερα από αυτή (την ακτίνα); Μια απάντηση στην ερώτηση αυτή μπορείτε να βρείτε στο παράρτημα C.

Φαινόμενο Doppler

Η βασική αρχή που διέπει τον τρόπο με τον οποίο οι φυσικοί μετράνε την ταχύτητα ενός άστρου χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Doppler είναι ίδια με αυτή χρησιμοποιούμε για τη μέτρηση του μέτρου της ταχύτητας ενός ασθενοφόρου από τη μετατόπιση Doppler της συχνότητας του ήχου της σειρήνας του, όπως στο σχήμα 1. Στην τελευταία αυτή περίπτωση, μετράμε τη φαινόμενη συχνότητα f της σειρήνας και υπολογίζουμε την ταχύτητά της v_s (προς ή από εμάς) από τη γνώση της πραγματικής συχνότητας f_0 και χρησιμοποιώντας τον τύπο

$$f = \left(\frac{v}{v \pm v_s} \right) f_0 \quad (3.1)$$

όπου v είναι η ταχύτητα του ήχου στον ακίνητο αέρα, v_s είναι η ταχύτητα της κινούμενης πηγής και f_0 είναι η πραγματική συχνότητα του ήχου που εκπέμπεται.



Figure 1 We can use the Doppler effect to measure the speed of an ambulance.

Οι φυσικοί χρησιμοποιούν μια παρόμοια εξίσωση για να βρουν τις ταχύτητες των αστεριών μέσα στους γαλαξίες, αλλά υπάρχουν δύο διαφορές. Πρώτον, οι φυσικοί δεν μετρούν απευθείας την μετατόπιση της συχνότητας των φωτεινών κυμάτων που εκπέμπονται από ένα αστέρι. Αντί αυτής, μετρούν τη μετατόπιση της συχνότητας των ραδιοκυμάτων που εκπέμπονται από το αέριο υδρογόνο που κινείται έχοντας την ίδια ταχύτητα με το αστέρι. Αυτή τους επιτρέπει να υπολογίσουν την ταχύτητα του αερίου υδρογόνου και επομένως την ταχύτητα του άστρου.

Η δεύτερη διαφορά είναι ότι οι Φυσικοί χρησιμοποιούν μια ελαφρώς διαφορετική εξίσωση από την εξίσωση (3.1) επειδή η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός και πρέπει να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν, όπως περιγράφεται λεπτομερώς στο Παράρτημα D.

Σημειώστε ότι στην απεικόνιση της μετατόπισης Doppler των άστρων στο βίντεο έχουμε υπερβάλει στις αλλαγές χρώματος που σχετίζονται με το φαινόμενο Doppler, για να το επισημάνουμε.

Φαινόμενο Doppler και προσανατολισμός γαλαξιών

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το φαινόμενο Doppler μετρά μόνο την ταχύτητα ενός άστρου που πλησιάζει ή απομακρύνεται από εμάς. Δεν μετρά οποιαδήποτε πλάγια ή εγκάρσια κίνηση ως προς το Γη.

Αν ένας γαλαξίας είναι προσανατολισμένος έτσι ώστε να είναι ορατό από μας το όριο του επιπέδου στο οποίο διαγράφουν τροχιά τα άστρα (edge-on) μερικά από τα άστρα του κινούνται προς εμάς και μερικά άλλα απομακρύνονται από μας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Μπορούμε να μετρήσουμε τις ταχύτητες αυτών των άστρων χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Doppler.

Ωστόσο, αν το επίπεδο των τροχιών των άστρων ενός γαλαξία φαίνεται άμεσα από τη Γη (face on) τότε όλα τα άστρα του κινούνται με ξεκάθαρα κάθετες ταχύτητες σε σχέση με τη Γη, όπως στο Σχήμα 3. Στην περίπτωση αυτή, τόσο τα άστρα όσο και το αέριο υδρογόνου δεν εμφανίζουν καμία μετατόπιση συχνότητας και συνεπώς δεν μπορούμε να μετρήσουμε τις ταχύτητές τους χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Doppler. Μόνο ένα μικρό κλάσμα γαλαξιών είναι face on.

Οι περισσότεροι γαλαξίες βρίσκονται κάπου μεταξύ των δύο παραπάνω ακραίων περιπτώσεων (edge-on ή face on). Έχουν επίπεδα τροχιών σε κλίση με κάποια γωνία προς εμάς. Συνεπώς, οι φυσικοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν το φαινόμενο Doppler για τη μέτρηση μιας συνιστώσας των ταχυτήτων των άστρων τους. Στη συνέχεια υπολογίζουν τις συνολικές ταχύτητες των άστρων προσδιορίζοντας τη γωνία κλίσης και προσαρμόζοντας τις μετρήσεις των ταχυτήτων Doppler αναλόγως.

Από πού προέρχονται τα δεδομένα για τον Triangulum;

Η ταχύτητα ($v = 123 \text{ km / s}$) και η ακτίνα ($r = 4,0 \times 1020 \text{ m}$) για τον Triangulum που χρησιμοποιήθηκε στο βίντεο προέρχονται πρόσφατες μετρήσεις αυτού του γαλαξία. Το πλήρες σύνολο δεδομένων βρίσκεται στο Παράρτημα Α.

Μέτρηση της ακτίνας της τροχιάς ενός άστρου

Ένα άλλο ερώτημα που προκύπτει από αυτό το κεφάλαιο του βίντεο είναι ο τρόπος με τον οποίο οι φυσικοί μετρούν την ακτίνα της τροχιάς ενός άστρου έναν μακρινό γαλαξία. Το Παράρτημα Ε στο DVD-ROM απαντά σε αυτή την ερώτηση.



Figure 2 Edge-on galaxy



Figure 3 Face-on galaxy. For an edge-on galaxy, we can measure the orbital speeds of stars via the Doppler effect. For a face-on galaxy,

Κεφάλαιο βίντεο 4

Μέτρηση της μάζας ενός γαλαξία: Μέθοδος φωτεινότητας

Αυτό το κεφάλαιο του βίντεο:

- Περιγράφει τον τρόπο μέτρησης της μάζας ενός γαλαξία από τη φωτεινότητα του (μέθοδος φωτεινότητας).
- Εφαρμόζει τη μέθοδο φωτεινότητας στον γαλαξία *Triangulum* και καταγράφει μάζα 39 δισεκατομμυρίων Ήλιων μικρότερη από την καταγεγραμμένη από την τροχιακή μέθοδο.
- Δείχνει πώς αυτή η ασυμφωνία μπορεί να εξηγηθεί από την ύπαρξη μιας τεράστιας ποσότητας αόρατης μάζας που ονομάζεται σκοτεινή ύλη.
- Εξηγεί ότι όλοι οι γαλαξίες που εξετάστηκαν μέχρι σήμερα για σκοτεινή ύλη έχουν βρεθεί να περιέχουν τεράστιες ποσότητες σκοτεινής ύλης

Όπως ίσως να ήταν αναμενόμενο, η μέθοδος που πραγματικά οι φυσικοί χρησιμοποιούν για να υπολογίσουν τη μάζα ενός γαλαξία από τη φωτεινότητα του είναι σημαντικά πιο περίπλοκη από την προσέγγιση που παρουσιάστηκε το βίντεο. Ωστόσο, η βασική αρχή που διέπει τη μέθοδο χρησιμοποιεί το ότι οι γαλαξίες με μεγαλύτερη μάζα συνήθως έχουν περισσότερα άστρα και συνεπώς έχουν την τάση να είναι πιο φωτεινοί.

Μια πιο λεπτομερής ανάλυση των βημάτων που περιλαμβάνονται στη μέθοδο φωτεινότητας είναι η παρακάτω:

1. Πρώτα, οι φυσικοί μετρούν την κατανομή του φωτός μέσα σε έναν γαλαξία κοιτάζοντας μια εικόνα του
2. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούν αυτή την κατανομή για να υπολογίσουν τη συνολικά εμφανιζόμενη φωτεινότητα του γαλαξία στο εσωτερικό μιας ακτίνας r προσθέτοντας όλο το φως μέσα στην r .
3. Μετά, χρησιμοποιούν ότι γνωρίζουν για το πόσο μακριά είναι ο γαλαξίας για να προσδιορίσουν τη συνολική πραγματική φωτεινότητα του (π.χ. τη φωτοβολία) εντός της r .
4. Στη συνέχεια, κάνουν εκτίμηση για το πόση μάζα μέσα στον γαλαξία, κατά μέσο όρο, παράγει μία μονάδα φωτεινότητας. Αυτή η ποσότητα είναι ένας συντελεστής μετατροπής από τη φωτεινότητα σε μάζα και μπορεί να εκτιμηθεί με διάφορα μέσα. Για παράδειγμα, οι φυσικοί χρησιμοποιούν μερικές φορές τη γνώση που έχουν για τη σχετική πληθώρα διαφόρων τύπων άστρων μέσα σε ένα γαλαξία, μαζί με τη φωτεινότητα και τη μάζα του κάθε τύπου, για την εκτίμηση του συντελεστή μετατροπής.
5. Τελικά, πολλαπλασιάζουν τη συνολική πραγματική φωτεινότητα μέσα στην r με τον συντελεστή μετατροπής για να πάρουν ένα αποτέλεσμα για μάζα μέσα στην ακτίνα r .

Επτά δισεκατομμύρια ήλιοι

Το αποτέλεσμα των 7 δισεκατομμυρίων Ήλιων της Μεθόδου Φωτεινότητας είναι η συνολική μάζα των παρακάτω αναφερόμενων μέσα σε ακτίνα $4,0 \times 10^{20} \text{m}$: (i) όλων των άστρων, (ii) όλου του αερίου υδρογόνου, (iii) όλου του αερίου ηλίου. Το ήλιο είναι το δεύτερο σε αφθονία στοιχείο στο σύμπαν μετά το υδρογόνο και υπάρχει μια σημαντική ποσότητα του μέσα στον γαλαξία *Triangulum*.

Πόσο ακριβής είναι η μέθοδος φωτεινότητας;

Όπως πολλοί υπολογισμοί στην αστρονομία, η μέθοδος φωτεινότητας περιέχει ένα αισθητό ποσό αβεβαιότητας. Ωστόσο, αυτό το γεγονός δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό επειδή η απόκλιση μεταξύ της μεθόδου φωτεινότητας και της τροχιακής μεθόδου είναι πάρα πολύ μεγάλη. Ακόμη και αν η πραγματική μάζα των άστρων και των αερίων μέσα στην ακτίνα των $4,0 \times 10^{20} \text{ m}$ ήταν διπλάσια από την τιμή των 7 δισεκατομμυρίων ήλιων (σφάλμα 50%), θα εξακολουθεί να υπάρχει απόκλιση 32 δισεκατομμυρίων ήλιων.

Επιπροσθέτως της αριθμητικής απόκλισης μεταξύ μεθόδου φωτεινότητας και τροχιακής μεθόδου το συνολικό μοτίβο των τροχιακών ταχυτήτων των άστρων μέσα στους γαλαξίες (σταθερή ταχύτητα τροχιάς όσο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο) είναι θεμελιωδώς διαφορετικό από το αναμενόμενο μοτίβο (τροχιακή ταχύτητα που μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο). Έτσι, ακόμη και αν οι πραγματικές μάζες των άστρων σε μακρινούς γαλαξίες ήταν μεγαλύτερες από τους τρέχουσες εκτιμήσεις, το μόνο αποτέλεσμα που θα είχε θα ήταν η μετατόπιση του διαγράμματος για τις αναμενόμενες τροχιακές ταχύτητες στο *σχήμα 1* πιο πάνω. Δεν θα τροποποιούσε το συνολικό μοτίβο έτσι ώστε να ταιριάζει με το διάγραμμα που έχει παρατηρηθεί. Συνεπώς, άστρα και αέριο από μόνα τους δεν μπορούν να εξηγήσουν τις παρατηρούμενες ταχύτητες των άστρων, ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλη είναι η συνολική μάζα.

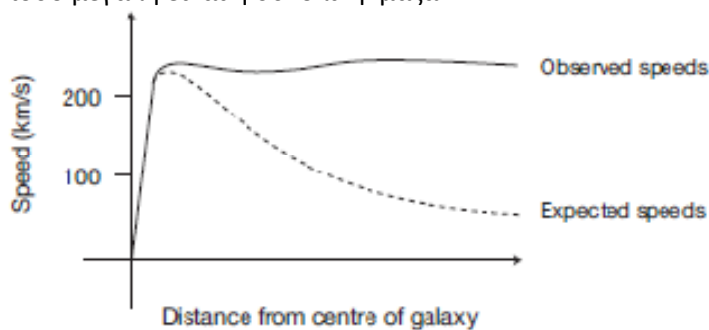


Figure 1 Expected and observed orbital speeds for stars in Andromeda. The expected speeds are based on the assumption that the vast majority of Andromeda's mass lies within the galaxy's core where most of the stars are found.

Σχέση μάζας – φωτεινότητας

Στο διάγραμμα του σχήματος 2 απεικονίζεται η φωτεινότητα (π.χ. φωτοβολία) συναρτήσει της μάζας για μεμονωμένα άστρα. Παρόλο που η σχέση τους εμφανίζεται γραμμική, έχουμε χρησιμοποιήσει λογαριθμικές κλίμακες και στους δύο άξονες για λόγους απλούστευσης.

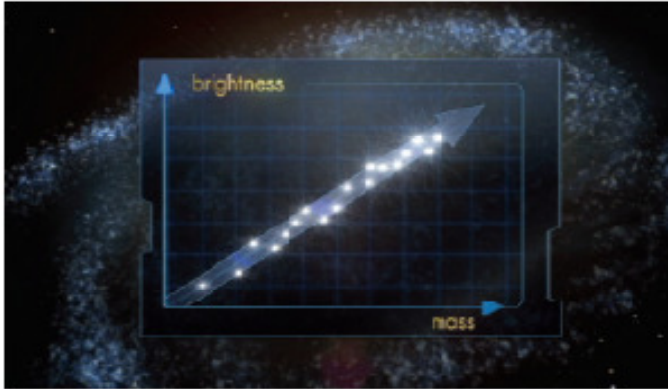


Figure 2 Mass-Luminosity Relationship

Η ακριβής σχέση είναι

$$M = \frac{M_s}{L_s^4} L^4 \quad (4.1)$$

όπου M_s και L_s είναι, αντίστοιχα, η μάζα και η φωτεινότητα του ήλιου. M και L είναι η μάζα και η φωτεινότητα του άστρου που αναρωτιόμαστε. (Σημειώστε ότι ο εκθέτης 4 είναι κατά προσέγγιση και μερικές φορές χρησιμοποιείται κάποιος διαφορετικός, π.χ. 3,5 ή 3,9)

Πυκνότητα της σκοτεινής ύλης

Μετρήσεις τροχιακής ταχύτητας μπορούν να γίνουν σε αποστάσεις πολύ μακρύτερες προς τα έξω από τα πιο απομακρυσμένα άστρα παρατηρώντας τις χαμηλές (αχνές) συγκεντρώσεις αερίου υδρογόνου. Οι φυσικοί έχουν βρει οι ταχύτητες που μετρούν εκεί, παραμένουν σταθερές με την απόσταση και είναι πολύ υψηλότερες από τις αναμενόμενες πολύ παραπέρα από το σημείο που τα αστέρια τελειώνουν.

Από τη μορφή του προκύπτοντος διαγράμματος της τροχιακής ταχύτητας συναρτήσει της ακτίνας, , οι φυσικοί έχουν διαπιστώσει ότι η συνολική μάζα της σκοτεινής ύλης, M_{dark} , μέσα σε ακτίνα r αυξάνεται γραμμικά με την r ,

$$M_{dark} \propto r \quad (4.2)$$

Καθώς η σκοτεινή ύλη ασκεί βαρυτική έλξη σε άλλη σκοτεινή ύλη, εμφανίζει την τάση να βρίσκεται συγκεντρωμένη μαζί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, στην εικόνα της σκοτεινής ύλης (Σχήμα 3) που εμφανίζεται κοντά στο τέλος αυτού του κεφάλαιο του βίντεο, η πυκνότητα της σκοτεινής ύλης είναι μεγαλύτερη στο κέντρο και να μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό.

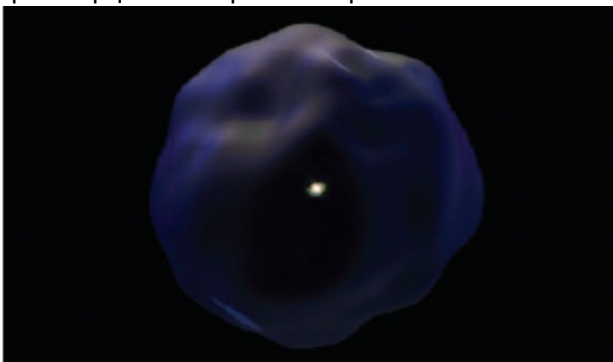


Figure 3 Representation of a cloud of dark matter surrounding a galaxy.

Είναι η σκοτεινή ύλη το ίδιο με τη σκοτεινή ενέργεια;

Η σκοτεινή ύλη ξεχωρίζει από τη σκοτεινή ενέργεια, μια πρόσφατα ανακαλυφθείσα αόρατη ενέργεια που πολλοί φυσικοί επίσης πιστεύουν ότι αποτελεί ένα μεγάλο κλάσμα του σύμπαντος. Η σκοτεινή ενέργεια είναι αντί-βαρυτική και πιστεύεται ότι κάνει το σύμπαν να επεκτείνεται σε ένα συνεχώς αυξανόμενο ποσοστό.

Σκοτεινή ύλη μέσα στον Triangulum

Όπως αναφέρεται στο βίντεο, στον Triangulum μέσα σε ακτίνα $4,0 \times 10^{20} \text{m}$ υπάρχει μάζα μετρημένη με τη μέθοδο φωτεινότητας ίση με 7 δισεκατομμύρια ήλιους και 39 δισεκατομμύρια ήλιοι σκοτεινής ύλης μέσα στην ίδια ακτίνα. Υπάρχουν πολύ λίγα άστρα πέρα από αυτό το σημείο, αν και μικρές ποσότητες υδρογόνου μπορεί να βρεθούν μακρύτερα προς τα έξω. Η σκοτεινή ύλη εκτείνεται πολύ μακρύτερα από τα $4,0 \times 10^{20} \text{m}$ και έτσι, συνολικά, υπάρχουν πολύ περισσότερη σκοτεινή ύλη από τα 39 δισεκατομμύρια ήλιους στον Triangulum.

Κεφάλαιο βίντεο 5

Στοιχεία από τον Αϊνστάιν

Αυτό το κεφάλαιο του βίντεο:

- εξηγεί ότι μεγάλες μάζες στο απώτερο διάστημα κάμπτουν ακτίνες φωτός που διέρχονται σε κοντινή απόσταση από αυτές (βαρυτική κάμψη)
- εξηγεί πώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μέγεθος της κάμψης (παραμόρφωσης) που παρατηρούμε σε εικόνες απομακρυσμένων γαλαξιών για να συμπεράνουμε την παρουσία της σκοτεινής ύλης μέσα στα συμπλέγματα των γαλαξιών.

Η ιδέα ότι η μάζα κάμπτει το φως που ταξιδεύει κοντά της έρχεται από τη γενική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν. Στην πραγματικότητα, ο Αϊνστάιν κατάφερε να πετύχει παγκόσμια φήμη πρώτος το 1919 επειδή ένας άλλος Φυσικός, ο Άρθουρ Έντινγκτον, παρατήρησε ότι το φως κάμπτεται από τον ήλιο, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη αυτού του φαινομένου.

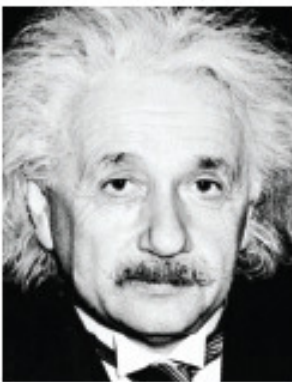
Το μέγεθος της κάμψης του φωτός ακόμη και από μια μεγάλη συστάδα γαλαξιών είναι συνήθως πάρα πολύ μικρό, πολύ μικρότερο από μια μοίρα. Ωστόσο, στο βίντεο, έχουμε μεγαλοποιήσει το φαινόμενο προκειμένου να το τονίσουμε.

Συστάδες γαλαξιών

Η βαρυτική κάμψη επιτρέπει στους φυσικούς να μελετήσουν τη σκοτεινή ύλη σε κλίμακα συστάδων γαλαξιών, που περιλαμβάνουν μεγάλους αριθμούς μεμονωμένων γαλαξιών, όπως φαίνεται στο *σχήμα 1*. Έχει βρεθεί ότι η αναλογία της σκοτεινής ύλης στα άστρα και το αέριο υδρογόνου σε αυτή την κλίμακα είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ότι σε μεμονωμένους γαλαξίες.

Ορισμένες παρατηρήσεις βαρυτικής κάμψης είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να εξηγηθούν χωρίς τη σκοτεινή ύλη και πολλοί Φυσικοί πιστεύουν ότι η βαρυτική κάμψη παρέχει την ισχυρότερη απόδειξη για την ύπαρξη αυτού του απροσδιόριστου υλικού.

Επιπλέον, καθώς η βαρυτική κάμψη είναι χαρακτηριστικό της γενικής θεωρίας σχετικότητας του Αϊνστάιν και όχι της θεωρίας της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα, μας παρέχει στοιχεία για την παρουσία σκοτεινής ύλης ανεξάρτητα από τα στοιχεία των τροχιακών ταχυτήτων των άστρων μέσα στους γαλαξίες.



Albert Einstein

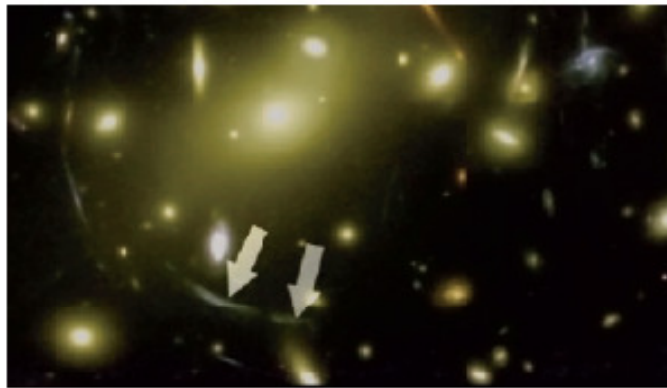


Figure 1 Gravitational lensing in a cluster of galaxies.

Κεφάλαιο βίντεο 6

Αποτυχημένες ιδέες για τη σκοτεινή ύλη

Αυτό το κεφάλαιο του βίντεο:

- δείχνει ότι ο κύριος όγκος της σκοτεινής ύλης δεν αποτελείται από πλανήτες, καφέ αστέρια νάνους ή μαύρες τρύπες.

Μία από τις πρώτες θεωρίες για τη σκοτεινή ύλη (από τη δεκαετία του '70) ήταν ότι αυτή αποτελείται από γνωστά ουράνια αντικείμενα όπως πλανήτες μεγέθους του Δία, καφέ αστέρια νάνους και μαύρες τρύπες. Αυτά, και άλλα σχετικά αντικείμενα, είναι γνωστά συνολικά ως αστροφυσικά συμπαγή αντικείμενα μεγάλης μάζας ή αλλιώς αντικείμενα (MACHOs) και έτσι η θεωρία ότι η σκοτεινή ύλη αποτελείται από αυτά ονομάστηκε θεωρία MACHO της σκοτεινής ύλης.

Πλανήτες

Το κύριο πρόβλημα με την ιδέα ότι ο κύριος όγκος της σκοτεινής ύλης αποτελείται από πλανήτες είναι ότι θα χρειάζονταν τόσο πολλοί από αυτούς. Για παράδειγμα, υπάρχουν 39 δισεκατομμύρια Ήλιοι σκοτεινής ύλης σε ακτίνα $4,0 \times 10^{20}$ m στον Triangulum. Η μάζα του Δία είναι το ένα χιλιοστό της μάζας του Ήλιου συνεπώς θα χρειάζονταν περισσότεροι από δέκα τρισεκατομμύρια πλανήτες σαν τον Δία ώστε να δικαιολογηθεί όλη αυτή η ποσότητα της σκοτεινής ύλης. Αυτό αντιστοιχεί σε χιλιάδες πλανήτες για κάθε άστρο μέσα στην ακτίνα των $4,0 \times 10^{20}$ m, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1*. Δεδομένου ότι το ηλιακό μας σύστημα έχει μόνο οκτώ πλανήτες, αυτό φαίνεται εξαιρετικά απίθανο.



Figure 1 If dark matter is made entirely of planets, there would need to be thousands of planets for every star within a galaxy.

Καφέ αστέρια νάνοι και μαύρες τρύπες

Δύο ακόμα υποψήφια συστατικά σκοτεινής ύλης είναι τα καφέ αστέρια νάνοι (επίσης γνωστά ως καφέ νάνοι) και οι μαύρες τρύπες, όπως φαίνονται στα *Σχήματα 2 και 3*. Και τα δύο έχουν μάζα αλλά εκπέμπουν τόσο λίγο φως που δεν μπορούμε να τα δούμε εύκολα χρησιμοποιώντας τηλεσκοπία. Παρ' όλα αυτά, οι Φυσικοί μπορούν να ανιχνεύσουν την παρουσία τους μέσω πειραμάτων βαρυτικής κάμψης μικρής κλίμακας. Αντί να προσπαθούν να παρατηρήσουν παραμορφώσεις του φωτός στις εικόνες ολόκληρων γαλαξιών, αναζητούν παραμορφώσεις στις εικόνες μεμονωμένων άστρων. Αυτές οι παραμορφώσεις είναι προσωρινές μεταβολές στη φωτεινότητα των άστρων που προκαλούνται από άστρα νάνους, μαύρες τρύπες ή άλλα «σκοτεινά» αντικείμενα που κάμπτουν το κοντινό φως και

λειτουργούν σαν συγκλίνοντες φακοί. . Οι φυσικοί έχουν βρει κάποια αόρατη μάζα με αυτόν τον τρόπο, που όμως απέχει πολύ από το να δικαιολογεί όλη την ποσότητα της σκοτεινής ύλης.

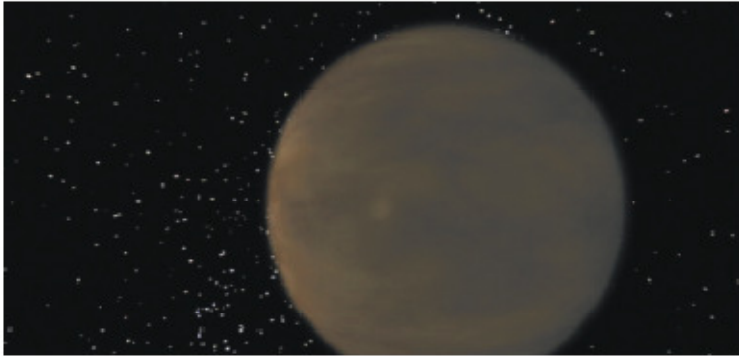


Figure 2 Brown dwarf star

Ένας δεύτερος λόγος για τον οποίο είναι απίθανο ο κύριος όγκος της σκοτεινής ύλης να αποτελείται από μαύρες τρύπες έχει σχέση με τις εκρήξεις που ονομάζουμε «supernova» και συνοδεύουν τη δημιουργία τους. Οι supernova προκύπτουν όταν ένα πολύ μεγάλο άστρο φτάνει στο τέλος της ζωής του και καταρρέει από τη βαρύτητα. Αυτό ακολουθείται από μια απίστευτα φωτεινή έκρηξη (μια supernova) που εκτοξεύει τεράστιες ποσότητες από ένα ευρύ φάσμα χημικών στοιχείων, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4*. Εάν η μάζα του άστρου πριν το supernova είναι μεγαλύτερη από 25 φορές τη μάζα του Ήλιου, η δύναμη της βαρύτητας στην κατάρρευση είναι τόσο έντονη που οδηγεί σε μια μαύρη τρύπα.

Τα στοιχεία που δημιουργούνται σε μια supernova εκπέμπουν χαρακτηριστικό φάσμα εκπομπής και μπορούν εύκολα να ανιχνευθούν από τους Φυσικούς. Οπότε, η δημιουργία μιας μαύρης τρύπας αφήνει ένα πολύ εμφανές ίχνος. Αν η σκοτεινή ύλη αποτελούνταν εξ ολοκλήρου από μαύρες τρύπες, θα υπήρχαν από άκρη σε άκρη στο σύμπαν τεράστιες ποσότητες των στοιχείων που δημιουργούνται σε μια supernova. Ωστόσο, οι τρέχουσες παρατηρήσεις υποδεικνύουν ότι δεν υπάρχει πουθενά κάτι που να υποστηρίζει την ιδέα ότι η σκοτεινή ύλη αποτελείται αποκλειστικά από μαύρες τρύπες.

Οπτική απεικόνιση μιας μαύρης τρύπας

Σε διάφορα σημεία αυτού του κεφαλαίου βίντεο, δείχνουμε μια εικόνα μιας μαύρης τρύπας που περιβάλλεται από έντονα χρωματισμένα ίχνη (*Σχήμα 3*). Αυτά απεικονίζουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από κοντινή ύλη καθώς πέφτει στη μαύρη τρύπα, ένα συνηθισμένο φαινόμενο.

Αέριο υδρογόνο

Ένα άλλο υποψήφιο συστατικό για τη σκοτεινή ύλη είναι, αραιά κατανεμημένο αέριο υδρογόνο. Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο του σύμπαντος και υπάρχουν τεράστιες ποσότητες του μέσα στους γαλαξίες, καθώς και ανάμεσά τους. Όταν είναι αραιά κατανεμημένο, μπορεί να είναι δύσκολο να ανιχνευθεί.

Ωστόσο, υπάρχουν ισχυρά αποδεικτικά στοιχεία ότι το αέριο υδρογόνο (ή και οτιδήποτε άλλο αποτελείται από άτομα) δεν αποτελεί τον κύριο όγκο της σκοτεινής ύλης. Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από την εξαιρετικά επιτυχημένη θεωρία της Νουκλεοσύνθεσης στη Μεγάλης Έκρηξης που επιτρέπει στους φυσικούς για να υπολογίσουν τη συνολική ποσότητα μάζας στο σύμπαν που αποτελείται από οποιονδήποτε τύπο ατόμων (την αποκαλούμενη βαριονική μάζα). Στο σύνολο του

σύμπαντος η βαρυονική μάζα είναι μόνο ένα πέμπτο της συνολικής μάζας της σκοτεινής ύλης και έτσι φαίνεται ότι, στην καλύτερη περίπτωση, μόνο ένα μικρό κλάσμα σκοτεινής ύλης αποτελείται από αέριο υδρογόνο.

Νετρίνα

Μια ακόμη θεωρία για τη σκοτεινή ύλη είναι ότι είναι ότι αυτή αποτελείται από νετρίνα. Αυτά είναι μικροσκοπικά, πολύ ελαφρά υποατομικά σωματίδια που διέρχονται μέσα από στερεά σώματα σαν αυτά να μην υπήρχαν, κάνοντας έτσι πολύ δύσκολο τον εντοπισμό τους.

Υπάρχουν τεράστιες ποσότητες νετρίνων σε όλο το σύμπαν και για αυτό ορισμένοι ερευνητές στη δεκαετία του '80 σκέφτηκαν ότι θα μπορούσαν συνθέτουν το μεγαλύτερο μέρος της σκοτεινής ύλης. Πρόσφατα, ωστόσο, οι φυσικοί μπόρεσαν να εκτιμήσουν τη μάζα του νετρίνο και διαπίστωσαν ότι είναι πολύ μικρό ώστε να δικαιολογήσει την τεράστια ποσότητα της σκοτεινής ύλης

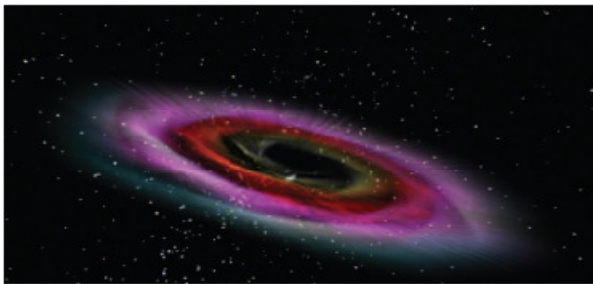


Figure 3 Black hole.

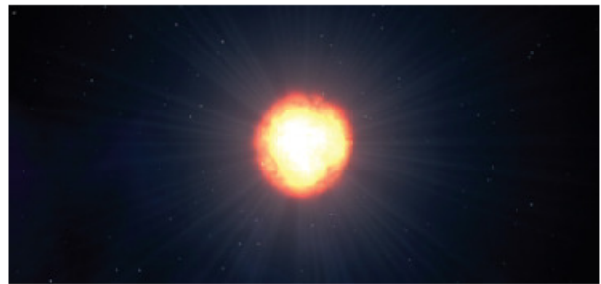


Figure 4 Supernova: an explosion that occurs at the end of the life of a massive star.

Κεφάλαιο βίντεο 7

Οι τρέχουσες θεωρίες της σκοτεινής ύλης

Αυτό το κεφάλαιο του βίντεο:

- συζητά την πιθανότητα να μην υπάρχει σκοτεινή ύλη και ότι, αντί για αυτή, χρειάζεται να τροποποιήσουμε του υπάρχοντες φυσικούς νόμους για τη βαρύτητα.
- περιγράφει πώς οι περισσότεροι φυσικοί πιστεύουν ότι η σκοτεινή ύλη είναι φτιαγμένη από έναν τύπο υποατομικού σωματιδίου, που δεν έχει ακόμη εντοπιστεί.
- συζητά για τις δύο κεντρικές υποψηφιότητες για αυτό το νέο σωματίδιο, τα ασθενώς αλληλεπιδρώντα σωματίδια μεγάλης μάζας (WIMPs) και τα *axions*.
- παίρνει συνεντεύξεις από αρκετούς ερευνητές για τη γνώμη τους σχετικά με τη σκοτεινή ύλη.
- συζητά μερικά από τα πειράματα που γίνονται παγκοσμίως προσπαθώντας να ανιχνεύσουν με άμεσο τρόπο τη σκοτεινή ύλη.

Υπάρχουν τέσσερις βασικές ομάδες στοιχείων που υποδεικνύουν τη σκοτεινή ύλη. Αυτά είναι:

- οι τροχιακές ταχύτητες των άστρων μέσα στους γαλαξίες
- η βαρυτική κάμψη
- η μεγάλης κλίμακας δομή του σύμπαντος
- η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου μικροκυμάτων

Όλες οι θεωρίες για τη σκοτεινή ύλη που αναφέρονται στο κεφάλαιο 6 του βίντεο περιλαμβάνουν σώματα που έχουν εντοπιστεί πειραματικά. Η αποτυχία τους υποδεικνύει ένα από τα δύο παρακάτω ενδεχόμενα:

- η σκοτεινή ύλη να αποτελείται από σώματα που δεν έχουν ανιχνευθεί ποτέ πειραματικά.
- Η σκοτεινή ύλη να μην υπάρχει. Πολλά από τα στοιχεία για αυτήν προέρχονται από φαινόμενα που σχετίζονται με τη βαρύτητα (π.χ. οι τροχιακές ταχύτητες των αστεριών, η βαρυτική κάμψη). Συνεπώς, αν οι τρέχοντες νόμοι που έχουμε για τη βαρύτητα δεν ισχύουν σε κλίμακα γαλαξιών, τα στοιχεία που έχουμε για τη σκοτεινή ύλη υπονομεύονται.

WIMPs

Έχοντας αποκλείσει όλες τις μορφές ύλης που έχουν εντοπιστεί πειραματικά ως συστατικά του μεγαλύτερου μέρους της σκοτεινής ύλης, πολλοί Φυσικοί στράφηκαν σε μη εντοπισμένες μορφές. Μία από τις πιο δημοφιλείς ιδέες είναι ότι η σκοτεινή ύλη αποτελείται από υποθετικά υποατομικά σωματίδια που ονομάζονται "ασθενώς αλληλεπιδρώντα σωματίδια μεγάλης μάζας" ή WIMP, όπως φαίνονται στο *Σχήμα 1*.

Τα WIMPs έχουν πολλές φορές μεγαλύτερη μάζα από το πρωτόνιο και δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δημιουργείται από φορτισμένα σωματίδια, συνεπώς αφού τα WIMPs δεν έχουν φορτίο, δεν εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία οποιασδήποτε συχνότητας και έτσι εμφανίζονται σκοτεινά (αόρατα). Πολλοί φυσικοί είναι σίγουροι ότι η σκοτεινή ύλη αποτελείται από τεράστια σύννεφα WIMPs που ταξιδεύουν με μεγάλη ταχύτητα προς όλες τις διευθύνσεις.

Axions

Μια δεύτερη θεωρία που περιλαμβάνει μη ανιχνευμένα σωματίδια είναι ότι η σκοτεινή ύλη αποτελείται από υποθετικά υποατομικά σωματίδια που ονομάζονται "axions". Τα axions είναι πολλές φορές ελαφρύτεροι από τα ηλεκτρόνια και δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο. Μία από τις βασικές διαφορές μεταξύ WIMPs και axions είναι η μάζα τους. Έτσι, η διαφορά μεταξύ των δύο θεωριών (WIMPs ή axions) είναι ότι η σκοτεινή ύλη είτε αποτελείται από μεγάλο αριθμό ελαφρών σωματιδίων (axions) είτε από μικρότερο αριθμό βαρύτερων σωματιδίων (WIMPs).

Ψάχνοντας για τη σκοτεινή ύλη στη γη

Η Γη βρίσκεται μέσα στον γαλαξία Milky Way ο οποίος κυριαρχείται από σκοτεινή ύλη. Αυτό σημαίνει ότι εάν η σκοτεινή ύλη αποτελείται από WIMPs ή axions, δισεκατομμύρια αόρατα σωματίδια διέρχονται από το σώμα σας κάθε δευτερόλεπτο, όπως στο Σχήμα 2. Οι φυσικοί θα μπορούσαν να ανιχνεύσουν ένα μικρό κλάσμα αυτών των σωματιδίων (εάν υπάρχουν) πραγματοποιώντας εξαιρετικά ευαίσθητα πειράματα. Έτσι, πολλές ομάδες σε όλο τον κόσμο έχουν δημιουργήσει μια σειρά από τέτοια πειράματα, με μερικά από το πιο πολλά υποσχόμενα να πραγματοποιούνται στο SNOLAB (υπόγειο επιστημονικό εργαστήριο) στα 2 χιλιόμετρα κάτω από το έδαφος σε ένα ορυχείο νικελίου που βρίσκεται στο Sudbury, του Οντάριο, στον Καναδά.

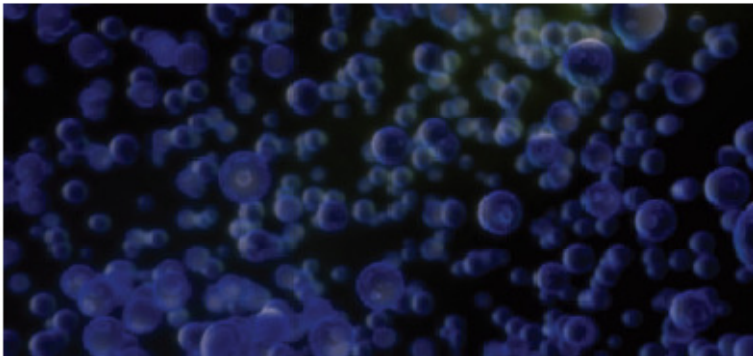


Figure 1 Many physicists think that dark matter is made of WIMPs.



Figure 2 If dark matter is made of WIMPs or axions, then billions of dark matter particles are passing through your body each second.

Πείραμα σκοτεινής ύλης PICASSO

Ένα από τα πειράματα του SNOLAB είναι το PICASSO (Project in Canada to Search for Supersymmetric Objects) πείραμα (Εικόνα 3), που επισημαίνεται στο βίντεο. Αποτελείται από εκατομμύρια μικροσκοπικά σταγονίδια υπέρθερμου υγρού Freon (C4F10) αιωρούμενα μέσα σε ζελέ. Υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα ένα WIMP περνώντας από χώρο του πειράματος να συγκρουστεί με ένα πυρήνα φθορίου σε ένα από τα σταγονίδια. Όταν αυτό συμβεί, ενέργεια θα μεταφερθεί στο σταγονίδιο, προκαλώντας εξάτμιση στο υγρό και έτσι θα δημιουργηθεί μια μικροσκοπική φυσαλίδα. Η φυσαλίδα θα εξαπλωθεί γρήγορα στέλνοντας μια δόνηση που οι φυσικοί θα εντοπίσουν χρησιμοποιώντας ακουστικούς αισθητήρες.

Πείραμα σκοτεινής ύλης ICE CUBE

Ένα άλλο πείραμα σκοτεινής ύλης εντοπίζεται στο Νότιο Πόλο. Το πείραμα ICECUBE αποτελείται από μια τεράστια ποικιλία ευαίσθητων ανιχνευτών φωτός που βρίσκονται σε βαθιές τρύπες 1 χιλιομέτρου στον πάγο. Αν η σκοτεινή ύλη αποτελείται από WIMPs, τότε σκοτεινή ύλη παγιδευμένη από τη βαρύτητα μεταξύ ήλιου και γης θα πρέπει, έμμεσα να προκαλέσει φως που θα πέσει στους ανιχνευτές δημιουργώντας ένα ξεχωριστό μοτίβο.

Το CERN και ο LHC

Ακόμα ένα πείραμα που μπορεί να ανιχνεύσει τη σκοτεινή ύλη πραγματοποιείται λίγο έξω από τη Γενεύη, της Ελβετίας στο CERN, στο μεγαλύτερο επιταχυντή σωματιδίων στον κόσμο. Χρησιμοποιώντας τον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC), οι φυσικοί ελπίζουν να προκαλέσουν τη δημιουργία σωματιδίων σκοτεινής ύλης (WIMPs) μέσω συγκρούσεων εξαιρετικά υψηλής ενέργειας μεταξύ υποατομικών σωματιδίων. Εάν επιτύχουν, θα παρασχεθούν στοιχεία για τη θεωρία WIMP της σκοτεινής ύλης.

Τροποποιώντας τον Νεύτωνα

Μια μικρή μειοψηφία φυσικών υποστηρίζει μια ριζική λύση στο μυστήριο της σκοτεινής ύλης: τροποποίηση του νόμου παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα όταν εφαρμόζεται στην κλίμακα ενός γαλαξία (ή μεγαλύτερη). Μια θεωρία που ονομάζεται Modified Newtonian Dynamics (MOND) μπορεί να εξηγήσει την απόκλιση μάζας μεταξύ της τροχιακής μεθόδου και της μεθόδου φωτεινότητας. Η MOND το κάνει αυτό αλλάζοντας τη σχέση μεταξύ του μέτρου της βαρυτικής δύναμης F και της απόστασης r

από $F \propto \frac{1}{r^2}$ σε $F \propto \frac{1}{r}$ για πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Συμπέρασμα

Ο ανταγωνισμός για το ποιος θα είναι ο πρώτος που θα ανιχνεύσει τη σκοτεινή ύλη στη Γη είναι έντονος. Όποιοι πετύχουν πρώτοι, για πρώτη φορά, να εντοπίσουν το σωματίδιο που αποτελεί κατά μέσο όρο, το 90% της μάζας κάθε γαλαξία στο σύμπαν. Είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα κερδίσουν βραβείο Νόμπελ.



Figure 3 PICASSO dark matter experiment in Ontario, Canada.

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό είναι μετάφραση του οδηγού εκπαιδευτικού του πακέτου:
“The Mystery of Dark Matter” του PERIMETER INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS
Δεν περιλαμβάνει τις απαντήσεις των δραστηριοτήτων, τα παραρτήματα Α και Β και τα στοιχεία των
ατόμων που παρουσιάζονται στο συνοδευτικό video.
Δεκτές παρατηρήσεις και υποδείξεις λαθών στη μετάφραση στο: stogiannos@sch.gr
Χριστόφορος Στογιάννος
Υπεύθυνος του Ε.Κ.Φ.Ε. Αλίμου
10-1-2018