

Αστρονομία τάξεως μεγέθους: Εκτιμώντας την ηλικία του Σύμπαντος με τη βοήθεια ανάλυσης παρατηρησιακών δεδομένων αστέρων τύπου SNI_a. Ένα διδακτικό σενάριο βασισμένο στην Επιστημολογία STEM

Χρίστος Ξενάκης^{1*}, Απόστολος Ξενάκης^{1,2}

¹ Εταιρεία Αστρονομίας και Διαστήματος Βόλου (ΕΑΔ)

² Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

* ch_xenakis@yahoo.com

Περίληψη

Η επιστημολογία STEM σχετίζεται με την «Ολοκληρωμένη Εκπαίδευση STEM», στην οποία η ενσωμάτωση του περιεχομένου STEM στο πρόγραμμα σπουδών βασίζεται σε θεωρίες κonstruktivismού. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για την ενσωμάτωση της εκπαίδευσης STEM: η ενσωμάτωση περιεχομένου και η ολοκλήρωση του πλαισίου. Επιπλέον, η υπολογιστική παιδαγωγική είναι ένα διδακτικό μοντέλο που εφαρμόζει την προσέγγιση της Υπολογιστικής Επιστήμης (CS) για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο εκτίμησης και δημιουργίας προβλέψεων, σε ευθυγράμμιση με τις πρακτικές της Υπολογιστικής Σκέψης (CT). Στην πρότασή μας, εφαρμόζεται η διδακτική προσέγγιση που βασίζεται στην ανακαλυπτική μάθηση, όπως ευθυγραμμίζεται με τον άξονα της ανάλυσης δεδομένων STEM για τον υπολογισμό της «σταθεράς του Σύμπαντος» του Hubble και για την εκτίμηση του «χρόνου Hubble», η οποία αποκαλύπτει τη χρονική ύπαρξη του Σύμπαντος. Η διδακτική μας προσέγγιση συμφωνεί με τις τυπικές Επιστημονικές και πρακτικές εκπαίδευσης Μηχανικών που πρέπει να θεωρούνται υπολογιστικό πείραμα.

Λέξεις-κλειδιά: Επιστημολογία STEM, Εκτίμηση ηλικίας Σύμπαντος, Σταθερά Hubble, Χρόνος Hubble, Ανακαλυπτική Μάθηση

1. Εισαγωγή

Οι συγγραφείς στην εργασία αυτή έχουν βασιστεί στο μοντέλο της STEM Υπολογιστικής Παιδαγωγικής (Computational Pedagogy STEM) για την υλοποίηση STEM διδακτικού σεναρίου, βασισμένο στην ανακαλυπτική μάθηση και την ανάλυση πραγματικών παρατηρησιακών δεδομένων αστρονομίας. Ο στόχος του προτεινόμενου εκπαιδευτικού σεναρίου είναι να εμπλέξει δημιουργικά τους μαθητές ως προς τη χρήση και ανάλυση των παρατηρησιακών δεδομένων από άστρα τύπου Supernova, να υπολογίσουν από αυτά τη σταθερά Hubble διαστολής του σύμπαντος και να εξάγουν ποιοτικά συμπεράσματα για το μοντέλο Κοσμολογικής διαστολής που διέπει το Σύμπαν. Το περιεχόμενο του σεναρίου βασίζεται στην επιστημολογία περιεχομένου STEM, σύμφωνα με την Υπολογιστική Παιδαγωγική και περιλαμβάνει εγκάρσιες ιδέες, όπως η αναγνώριση προτύπων, οι αναλογίες, οι κλίμακες.

Το διδακτικό σενάριο, έχει ως στόχο να δώσει στους μαθητές/-τριες το ρόλο του «μικρού ερευνητή», εφαρμόζοντας διεπιστημονική προσέγγιση και ταυτόχρονα «καθοδηγούμενη ανακάλυψη». Εφαρμόστηκε σε μαθητές ηλικίας 16 – 18 ετών, που εργάστηκαν σε ομάδες των 2-3 ατόμων.

2. Στάδια Διδακτικού Σεναρίου

Τα στάδια του σεναρίου ήταν τα ακόλουθα:

1. Θεωρητική ενημέρωση για το προς επίλυση πρόβλημα και ενημέρωση για το ισχύον θεωρητικό μοντέλο.
2. Χρήση και επεξεργασία παρατηρησιακών δεδομένων.
3. Εκτίμηση των σφαλμάτων και της βαρύτητας του ρόλου τους στο προς επίλυση πρόβλημα.
4. Δημιουργία, από τη χρήση και επεξεργασία των παρατηρησιακών δεδομένων, νέου μοντέλου και σύγκριση με το υπάρχον θεωρητικό.
5. Αποτελέσματα και συζήτηση.

3. Καθορισμός Προβλήματος και Θεωρητικές Πληροφορίες

Για την εκτίμηση της ηλικίας του Σύμπαντος, οι βασικές σκέψεις ήταν οι εξής: Ας υποθέσουμε ότι το Σύμπαν διαστέλλεται με σταθερή ταχύτητα (στην πραγματικότητα δεν ισχύει). Η παραπάνω διαστολή περιγράφεται από το νόμο του Hubble:

$$v = H_0 d \quad (1)$$

όπου v είναι η ταχύτητα απομάκρυνσης πολύ μακρινών φωτεινών πηγών (όπως π.χ. ενεργοί πυρήνες γαλαξιών, Σουπερνόβα, κτλ.), H_0 είναι η σταθερά του Hubble, και d είναι η απόσταση του παρατηρούμενου αντικειμένου από εμάς. Από το νόμο του Hubble, σύμφωνα με τη σχέση (1), προκύπτει με κατάλληλο μετασχηματισμό ότι:

$$\frac{d}{v} = \frac{1}{H_0} = t_H \quad (2)$$

όπου t_H είναι ο χρόνος Hubble, δηλαδή η ηλικία του Σύμπαντος. Πώς όμως μπορούμε να προσδιορίσουμε τη σταθερά του Hubble; Αυτό μπορεί να γίνει μόνο έμμεσα με τον προσδιορισμό της απόστασης της παρατηρούμενης πηγής φωτός και της ταχύτητας απομάκρυνσής της από εμάς. Και στα δύο αυτά μεγέθη δεν μπορούν να προσδιοριστούν άμεσα, αλλά μόνο έμμεσα. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα απομάκρυνσης v , αν δεν είναι συγκρίσιμη με κλάσμα της ταχύτητας του φωτός, δίνεται από τη σχέση:

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (3)$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός και $(\Delta\lambda/\lambda) = z$, η μετατόπιση προς το ερυθρό του φάσματος της απομακρυνόμενης πηγής λόγω φαινομένου Doppler. Αν οι ταχύτητες απομάκρυνσης, είναι σημαντικό κλάσμα της ταχύτητας του φωτός, τότε δεν χρησιμοποιείται η παραπάνω σχέση, αλλά άλλη, πιο σύνθετη. Η απόσταση της παρατηρούμενης πηγής μπορούσε να προσδιοριστεί, επίσης έμμεσα, με τη βοήθεια της σχέσης που συνδέει τα φωτομετρικά μεγέθη της παρατηρούμενης πηγής, φαινόμενο μέγεθος m και απόλυτο μέγεθος M με την απόστασή της, από το νόμο του Pogson, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$m - M = 5 \log(d) - 5 \quad (4)$$

όπου d = απόσταση της πηγής από εμάς, η οποία μετριέται σε pc.

Ένας συγκεκριμένος τύπος αστέρων Σουπερνόβα, οι SNI_a, έχουν όλοι στο μέγιστο της λαμπρότητάς τους, απόλυτο μέγεθος M ίσο με $M = -19,0 (+/-0,4)$. Άρα, αν διαθέταμε παρατηρησιακά δεδομένα για το φαινόμενο μέγεθος m πολλών Σουπερνόβα της κατηγορίας SNI_a και τα επεξεργαζόμασταν με κατάλληλο τρόπο ώστε τελικά να προσδιορίσουμε τη σταθερά του Hubble, θα μπορούσαμε να επιλύσουμε το πρόβλημα, εκτιμώντας το χρόνο Hubble και συνεπώς την ηλικία του παρατηρούμενου Σύμπαντος! Αν συνδυάσουμε το νόμο του Hubble, το νόμο Doppler της ερυθράς μετατόπισης του φάσματος των παρατηρούμενων πηγών και το νόμο

του Pogson, καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση, δηλαδή στο θεωρητικό μοντέλο:

$$m = 5 \log(z) + \text{const} (5)$$

Παρατηρούμε γραμμική εξάρτηση των m και $\log(z)$.

4. Εφαρμογή Διδακτικού Σεναρίου

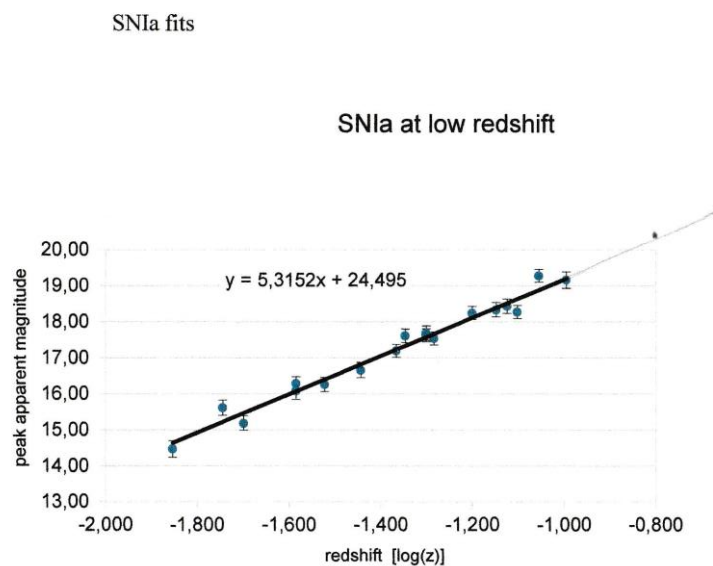
Στη διάθεσή μας έχουμε τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) με τα παρατηρησιακά δεδομένα, σύμφωνα με την πηγή S. Perlmutter *et al* 1999 *ApJ* **517** 565. Τα δεδομένα της πρώτης στήλης του πίνακα αφορούν τη μετατόπιση προς το ερυθρό (redshift) z , η δεύτερη στήλη αφορά το φαινόμενο μέγεθος (apparent mag.) m των παρατηρηθέντων πηγών SNI_a και η τρίτη στήλη αφορά το αντίστοιχο σφάλμα (error) στο φαινόμενο μέγεθος Δm κάθε πηγής.

Πίνακας 1: Παρατηρησιακά Δεδομένα

redshift (z)	apparent mag. (m)	error in m (Δm)
0,030	16,26	0,20
0,050	17,63	0,18
0,026	16,08	0,24
0,075	18,43	0,20
0,026	16,28	0,20
0,075	18,43	0,20
0,014	14,47	0,23
0,101	19,16	0,23
0,020	15,18	0,20
0,036	16,66	0,21
0,045	17,61	0,19
0,043	17,19	0,18
0,018	15,61	0,21
0,079	18,27	0,18
0,088	19,28	0,18
0,063	18,24	0,18
0,071	18,33	0,20
0,052	17,54	0,18
0,050	17,69	0,20

Το ερώτημα που τέθηκε στους μαθητές/-τριες ήταν εάν, τα παρατηρησιακά δεδομένα των πηγών SNI_a, m και $\log(z)$, ακολουθούν την ίδια γραμμική εξάρτηση με την υπάρχουσα

θεωρητική, όπως αυτή εκφράζεται από την εξίσωση (5). Έτσι, υπολογίστηκε το $\log(z)$ για κάθε πηγή και στη συνέχεια με τη βοήθεια του Excel, έγινε σε διάγραμμα m και $\log(z)$, η τοποθέτηση των παρατηρηθέντων τιμών, του σφάλματος Δm και χαράχθηκε η ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1 παρακάτω.



Εικόνα 1: Ευθεία Ελαχίστων Τετραγώνων

Σύμφωνα με την Εικόνα 1, παρατηρήθηκαν τα εξής:

1. Η ευθεία m ($\log z$) συμπίπτει σχεδόν με την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.
2. Υπάρχει γραμμική εξάρτηση των m και $\log(z)$ και συνεπώς οι παρατηρήσεις επαληθεύουν το θεωρητικό μοντέλο.
3. Η κλίση της ευρεθείσας ευθείας αποκλίνει μόνον 6% από τη θεωρητική τιμή! (5,3152 έναντι 5)

Στη σχέση που συνδέει το m με τον $\log(z)$, δηλαδή στην εξίσωση $m=5\log z+\text{const.}$, η σταθερά που εμφανίζεται, περιέχει το H_0 και ισούται αριθμητικά με $\text{const.}=24,495$ όπως φαίνεται από την εξίσωση του γραφήματος. Συγκεκριμένα, αυτή η σταθερά είναι, μετά την εισαγωγή των αριθμητικών δεδομένων και των κατάλληλων μονάδων, $\text{const.}=[M+5\log(3 \times 10^{10}/H_0)]$, όπου $M=-19,0$. Τελικά, προέκυψε $H_0 \cong 62 \text{ km/s/Mpc}$ και άρα: $t=(1/H_0) \cong 16,12 \text{ Gyr}$, δηλ. 16,6% μεγαλύτερη από την τιμή του καθιερωμένου μοντέλου που είναι 13,8 Gyr.

Συζητήθηκε το αποτέλεσμα με τους μαθητές/-τριες για την απόκλιση του αποτελέσματος και τους ζητήθηκαν να το αιτιολογήσουν. Τελικά, με τη βοήθειά μας, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δύο ήταν οι κύριες αιτίες της υπολογισθείσας απόκλισης:

1. Το σύμπαν δεν διαστέλλεται με σταθερή ταχύτητα, όπως είχαμε υποθέσει
2. Τα δεδομένα που έχουμε για τον υπολογισμό της σταθεράς του Hubble, ήταν από αστέρες SNIa σχετικά κοντινούς.

Πάντως, όλοι οι μαθητές, συμφώνησαν ότι η τάξη μεγέθους του αποτελέσματός τους, ήταν αποδεκτή.

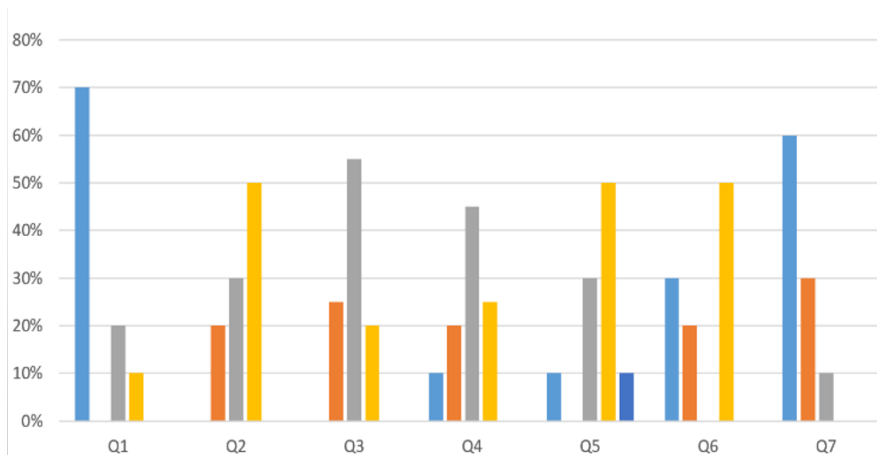
5. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Μετά την ολοκλήρωση του διδακτικού σεναρίου, δόθηκε για συμπλήρωση (ανωνύμως) ένα ερωτηματολόγιο, βασισμένο στην κλίμακα Likert: 1= πάρα πολύ (μπλέ ανοιχτό), 2= πολύ (πορτοκαλί), 3= αρκετά (γκρί), 4= λίγο (κίτρινο) και 5= καθόλου (μπλέ βαθύ). Οι ερωτήσεις δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2: Ερωτήσεις προς απάντηση

A/A Ερώτησης	Διατύπωση Ερώτησης
Q1	Μετά τη θεωρητική προετοιμασία σας σχετικά με τα διδακτικά αντικείμενα, πόσο ενδιαφέρον ήταν το σενάριο για εσάς;
Q2	Πόσο σας βοήθησε η σύμπλεξη εννοιών και νόμων από τη Φυσική, πρακτικών από τα Μαθηματικά και δεξιοτήτων και γνώσεων από την Πληροφορική, για την επίλυση ενός Αστρονομικού προβλήματος, λειτουργώντας ως «μικροί ερευνητές»;
Q3	Μετά την επίλυση του προβλήματος, πόσο εξοικειωθήκατε με τη σημασία και τον ρόλο των σφαλμάτων στις μετρήσεις;
Q4	Πόσο δυσκολευθήκατε να κατανοήσετε και να χρησιμοποιήσετε γραφήματα που απεικονίζουν την εξέλιξη των φυσικών φαινομένων;
Q5	Πόσο δυσκολευθήκατε να οπτικοποιήσετε δεδομένα παρατήρησης στο Excel και να υπολογίσετε την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων;
Q6	Σε ποιο βαθμό δυσκολευθήκατε να βγάλετε συμπεράσματα από γραφήματα όπως η διατύπωση του μοντέλου για τη διαστολή του Σύμπαντος, η εικασία για τυχόν σφάλματα κ.λπ.
Q7	Πόσο σημαντική θεωρείτε την ανάλυση των δεδομένων παρατήρησης που σας δίνονται για να κατανοήσετε σε βάθος το προς επίλυση πρόβλημα;

Οι απαντήσεις των μαθητών/-τριών ήταν ενθαρρυντικές και μας βοήθησαν να βελτιώσουμε πτυχές του διδακτικού σεναρίου, ενώ παράλληλα κατανοήσαμε ότι αυτή η διδακτική μεθοδολογία (STEM) εξάπτει το ενδιαφέρον των μαθητών για την επιστήμη, ενεργοποιεί την κριτική και υπολογιστική τους σκέψη και δημιουργεί θετικές στάσεις και προσδοκίες. Τα στατιστικά αποτελέσματα, φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Στατιστικά Απαντήσεων

Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε, σύμφωνα με την Εικόνα 2, ότι:

1. Στην 1^η ερώτηση (Q1), το 70% βρίσκει το σενάριο ιδιαίτερα ενδιαφέρον, που σημαίνει ότι η πλειοψηφία των μαθητών πιστεύει πως η συμμετοχή στο διδακτικό σενάριο παρέχει νέα γνώση, συνδυάζοντας τομείς της STEM πρακτικής, όπως υπολογιστική σκέψη και

- ανάλυση αποτελεσμάτων. Ωστόσο, συνδυάζοντας τις απαντήσεις 20% (αρκετά) και 10% (λίγο), το 30% θεωρεί ότι η προσέγγιση αυτή ενέχει πολλές δυσκολίες.
2. Έπειτα από συζητήσεις με τους μαθητές, σύμφωνα με τις απαντήσεις τους στη 2^η ερώτηση (Q2), διαπιστώσαμε ότι δεν είναι εξοικειωμένοι με τη διαδικασία του συνδυασμού γνώσεων από διάφορα επιστημονικά πεδία, ώστε να φτάσουν στα κατάλληλα συμπεράσματα
 3. Σύμφωνα με τις απαντήσεις στην 3^η ερώτηση (Q3), διαπιστώνουμε ότι οι μαθητές σε ποσοστό 30% έχουν εξοικειωθεί με την κατανόηση των σφαλμάτων στις μετρήσεις. Ωστόσο η πλειοψηφία είναι ακόμη σκεπτική ως προς το ρόλο των σφαλμάτων στα πειραματικά δεδομένα.
 4. Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα απορρέει από τις απαντήσεις της 4^η ερώτησης (Q4), που αφορά την ανάλυση δεδομένων και τη γραφική αναπαράστασή τους, όπου πάνω από το 50% των μαθητών βρίσκει σχετικά δύσκολο να βγάλει συμπεράσματα και να ερμηνεύσει γραφικές παραστάσεις.
 5. Μόνο το 10% των μαθητών συναντά δυσκολία στον υπολογισμό, την κατανόηση και το σχεδιασμό ευθείας ελαχίστων τετραγώνων. Αυτό σημαίνει ότι η πλειοψηφία των μαθητών, μέσω του σεναρίου, έχουν αποκτήσει την εξοικείωση να τη δημιουργούν και να κάνουν νέους υπολογισμούς. Ωστόσο το 30% δυσκολεύεται να βγάλει συμπεράσματα, χρησιμοποιώντας γραφικές παραστάσεις.
 6. Η πλειοψηφία σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% συναντά δυσκολίες στον τρόπο μάθησης μέσω της STEM διαδικασίας
 7. Η πλειοψηφία των μαθητών, σύμφωνα με την 7^η ερώτηση (Q7), πιστεύει ότι η διαδικασία ανάλυσης δεδομένων παρατήρησης τους βοήθησε πολύ στο να κατανοήσουν σε βάθος και να λύσουν το πρόβλημα.

6. Συμπεράσματα

Συνολικά, από όλη τη διαδικασία εφαρμογής και εκτέλεσης του STEM σεναρίου, τα συμπεράσματα που προκύπτουν συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία, σύμφωνα με τα οποία οι μαθητές:

1. Κατανόησαν και χειρίστηκαν με σχετική ευκολία τις αστρονομικές μονάδες, το νόμο του Hubble και τα διάφορα φωτομετρικά μεγέθη, όπως το απόλυτο μέγεθος και το φαινόμενο, καθώς και τις μεταξύ τους σχέσεις.
2. Εξοικειώθηκαν με τους υπολογισμούς στο Excel και την ανάλυση δεδομένων, οπτικοποιώντας λάθη (data errors) και χαράσσοντας ευθείες γραμμές, ερμηνεύοντας τις συσχετίσεις μεταξύ των εξισώσεων.
3. Ανέπτυξαν κριτική και συνδυαστική σκέψη στα φυσικά και μαθηματικά προβλήματα που τους δόθηκαν να επιλύσουν.
4. Εξοικειώθηκαν με την οπτικοποίηση δεδομένων παρατήρησης, καθώς και την εξαγωγή πληροφοριών και την ερμηνεία διαγραμμάτων, γραφημάτων και σχημάτων.
5. Ανέπτυξαν υπολογιστική σκέψη και, μέσω αυτής, έδρασαν ως ερευνητές, φτάνοντας σε πολύτιμα συμπεράσματα και προτάσεις για το μοντέλο διαστολής του Σύμπαντος και τη σύγκρισή του με το καθιερωμένο μοντέλο.
6. Έδειξαν έντονο ενδιαφέρον για την εξαγωγή πληροφοριών που, εκ πρώτης όψεως, φαίνεται να είναι κρυμμένη στα δεδομένα παρατήρησης που τους δίνονται, με τη μορφή πινάκων, καλλιεργώντας με τον τρόπο αυτό θετική στάση απέναντι στη χρησιμότητα της ανάλυσης δεδομένων και γενικότερα στη φιλοσοφία της υπολογιστικής σκέψης κατά STEM.

Αναφορές

- [1] Brennan K., Resnick M., (2012), *New frameworks for studying and assessing the development of computational thinking*. Presented at the American Education Researcher Association, Vancouver, Canada

- [2] Landau R., Paez J., Bordeianu, C., A (2008), *Survey of Computational Physics: Introductory Computational Science*, Princeton and Oxford: Princeton University Press
- [3] Psycharis S. (2015), “The Impact of Computational Experiment and Formative Assessment in Inquiry Based Teaching and Learning Approach in STEM Education”, *Journal of Science Education, and Technology* .25(2),316-326, (JOST) DOI 10.1007/s10956-015-9595-z
- [4] N. Tsupros, R. Kohler, J. Hallinen (2010), *STEM education: A project to identify the missing components*, Pennsylvania: Leonard Gelfand Center for Service Learning and Outreach at Carnegie Mellon University and The Intermediate Unit 1 Center for STEM Education
- [5] Xenakis A., Xenakis C., Psycharis S., Kalovrektis K. (2020). Calculation of the Hubble Universe Expansion Constant by Analyzing Observational Data: An Exploratory Teaching Proposal based on STEM Epistemology. *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, pp. 170-177. DOI: 10.1109/EDUCON45650.2020.9125209.
- [6] Perlmutter et. al. (1999), *Measurements of Ω and Λ from 42 High – Redshift Supernovae*, the *Astrophysical Journal (ApJ)*, vol. 517, no. 2,