

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΟΡΜΟΥ Ι
Τμήμα Φυσικής, ΕΚΠΑ

Άσκηση Αστροφυσικής 1 - Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΤΩΝ ΑΣΤΕΡΩΝ
Ήλιος - Ηλιακή Σταθερά – Ηλιακό Φάσμα

Καλλιόπη Δασύρα



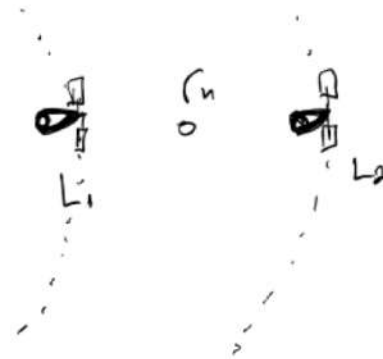
Πρώτη άσκηση εργαστηρίου αστροφυσικής – στόχοι

1. Εισαγωγή σε βασικούς ορισμούς (παρατηρήσιμων) ποσοτήτων
2. Εισαγωγή στην έννοια του μέλανος σώματος και (παρατηρήσιμων) ποσοτήτων του
3. Εισαγωγή στη φασματοσκοπία (κατανόησης της εκπομπής ανά μήκος κύματος, παρατήρηση φασματικών γραμμών σε γνωστά μήκη κύματος)
4. Βαθμονόμηση φασμάτων για την εξεύρεση των παραπάνω πληροφοριών.

Θα πάρουμε φάσματα, θα τα βαθμονομήσουμε όπου απαιτείται και θα βγάλουμε φυσικές πληροφορίες για τη θερμοκρασία του Ηλίου και για τη σύστασή του.

Βασικοί ορισμοί :

H₂O
*



Ανιχνεύει ο δορυφόρος
ιδία ποή από τον Ήλιο.

$$\text{ποή - flux} = \frac{\eta}{t \cdot S}$$

Ποή μπορεί να αναφέρεται σε αριθμό η (σωμάτων ή φωτονίων)
αλλά και ποή τμήμα σωμάτων ή ποή ενεργειακά φωτονίων. Συνήθως

$$f = \frac{E}{t \cdot S} \quad \text{Η ποσότητα } \frac{E}{t} \text{ είναι εσωτερικά φέγεται ως ηηής ακτινοβολίας}$$

- δειν εξαρτάται από τη θέση του παρατηρητή. \rightarrow luminosity

$$L = \frac{E}{t} \quad (\text{λαμπρότητα, } L_{\odot} = \text{λαμπρότητα του Ήλιου μας})$$

$$f = \frac{L}{4\pi R^2}, \quad \text{όπου } R = \text{απόσταση ηηής ακτινοβολίας από το δειν}$$

Ανάλογα με τη φύση της ηηής, δηλ ποιος νόμος περιγράφει την ενεργειακή
κατανομή συνάρτηση της συχνότητας, φτράντε να βάλουμε νόμο στο L .

(σε όρα να προβλέψουμε τόσο την λαμπρότητα αλλά συχνότητα, αλλά και
τη ποή να θα ανιχνεύει ένας παρατηρητής ανάλογα με τη θέση του

Για αστερία : L από το νόμο του Planck

Μέλαν Σώμα (υπενθύμιση από οδηγό εργαστηρίου):

- Μέλαν σώμα: σώμα που απορροφά φωτόνια, θερμαίνεται ομοιόμορφα θερμοκρασία T , εκπέμπει και βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το πεδίο ακτινοβολίας του.
- Τα αστέρια σε πρώτη προσέγγιση μπορούν να θεωρηθούν μελανά σώματα, εφόσον το εσωτερικό του αστέρα είναι σχεδόν αδιάφανες (απορροφά) τα φωτόνια που παράγονται στο εσωτερικό του.
- Εκπέμπονται φωτόνια με φασματική κατανομή ανά συχνότητα ν ή μήκος κύματος λ που δίνεται από το νομό του Planck

Συνάρτηση Planck:

Ειδική ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη μονάδα επιφάνειας μέλανος σώματος θερμοκρασίας T

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

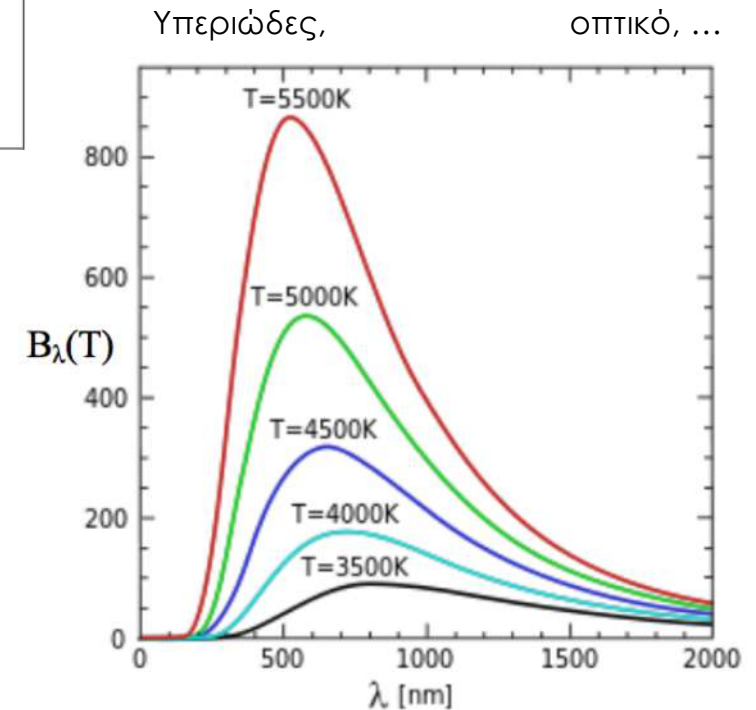
ή $(W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1} \cdot sr^{-1})$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ (σταθερά του Planck)

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

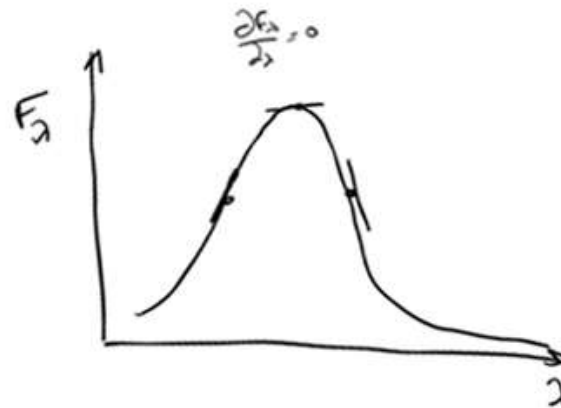
$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (σταθερά του Boltzmann)



Μέλαν Σώμα:

Από τον νομό του Planck, μπορούν να διεξαχθούν 2 ακόμα νόμοι:

1) Ο νόμος του Wien, παίρνοντας την παράγωγο του νόμου του Planck και θέτοντας την ίση με το μηδέν, για να δούμε πού αλλάζει η κλίση από θετική σε αρνητική, κι άρα που είναι το μέγιστο!



Νόμος του Wien

Η συνάρτηση του Planck έχει μέγιστο για $\lambda = \lambda_{\max}$ που είναι αντιστρόφως ανάλογο της T

$$\lambda_{\max} T = hc / 5k = 2.8978 \times 10^{-3} m.K$$

Από την **κορυφή** και μόνο της φασματικής καμπύλης βρίσκουμε τη **θερμοκρασία** του μέλανος σώματος

Μέλαν Σώμα:

Από τον νομό του Planck, μπορούν να διεξαχθούν 2 ακόμα νόμοι:

2) Ο νόμος Stefan-Boltzmann: Δίνει τη ροή από την επιφάνεια του μέλανος σώματος και προκύπτει από την ολοκλήρωση του νόμου του Planck στις στερέες γωνίες και στις συχνότητες (ή μήκη κύματος). Δίνει λοιπόν συνολική, όχι μονοχρωματική ροή.

Νόμος Stefan-Boltzmann Δίνει την επιφανειακή ροή του αστέρα	$F(T) = \sigma T^4 \quad (W \ m^{-2})$ $\sigma = 5.6705 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ (σ: σταθερά Stefan-Boltzmann)
---	---

Αν: διαίρεση ενέργειας, άρα και L

$$L = F(r_*) \cdot 4\pi r_*^2 = F(R) \cdot 4\pi R^2$$

$$\Rightarrow F(R) = \frac{F(r_*) \cdot r_*^2}{R^2} \Rightarrow F(R) = \sigma T^4 \cdot \frac{r_*^2}{R^2}$$

Αν, λοιπόν μετρήσουμε τη θερμοκρασία του Ηλίου μας, ξέρουμε την ακτίνα του (700.000km) και την απόσταση στην οποία θα τοποθετήσουμε το δέκτη μας (πχ., Ηλίου – ατμόσφαιρα Γης), γνωρίζουμε ακριβώς το θεωρητικό μοντέλο τη ροής που θέλουμε να μετρήσουμε!

Φασματοσκοπία:

Για να δούμε την εκπομπή ανά συχνότητα ή μήκος κύματος ενός μέλανος σώματος, χρειαζόμαστε έναν φασματογράφο (π.χ., πρίσμα).

Παράδειγμα φάσματος Ηλίου εντός κι εκτός ατμοσφαιράς της Γης:
Παρατηρήστε τις μονάδες ($\text{erg/s/m}^2/\mu\text{m}$ ή ανά Hz)

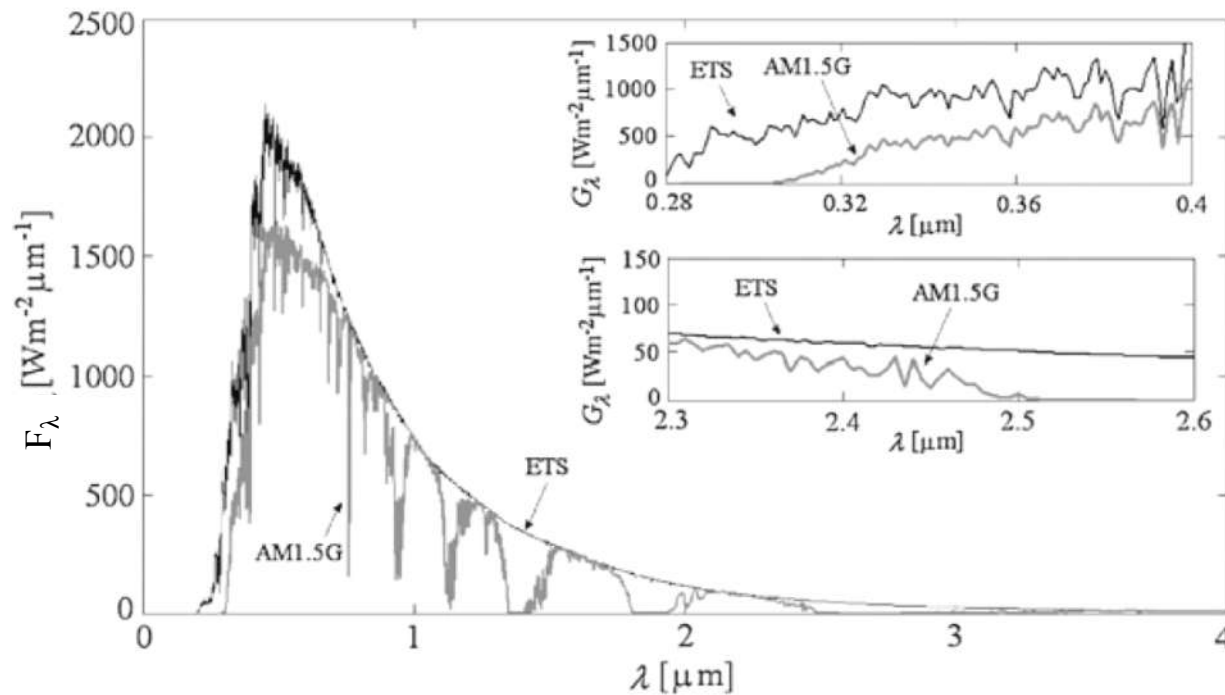
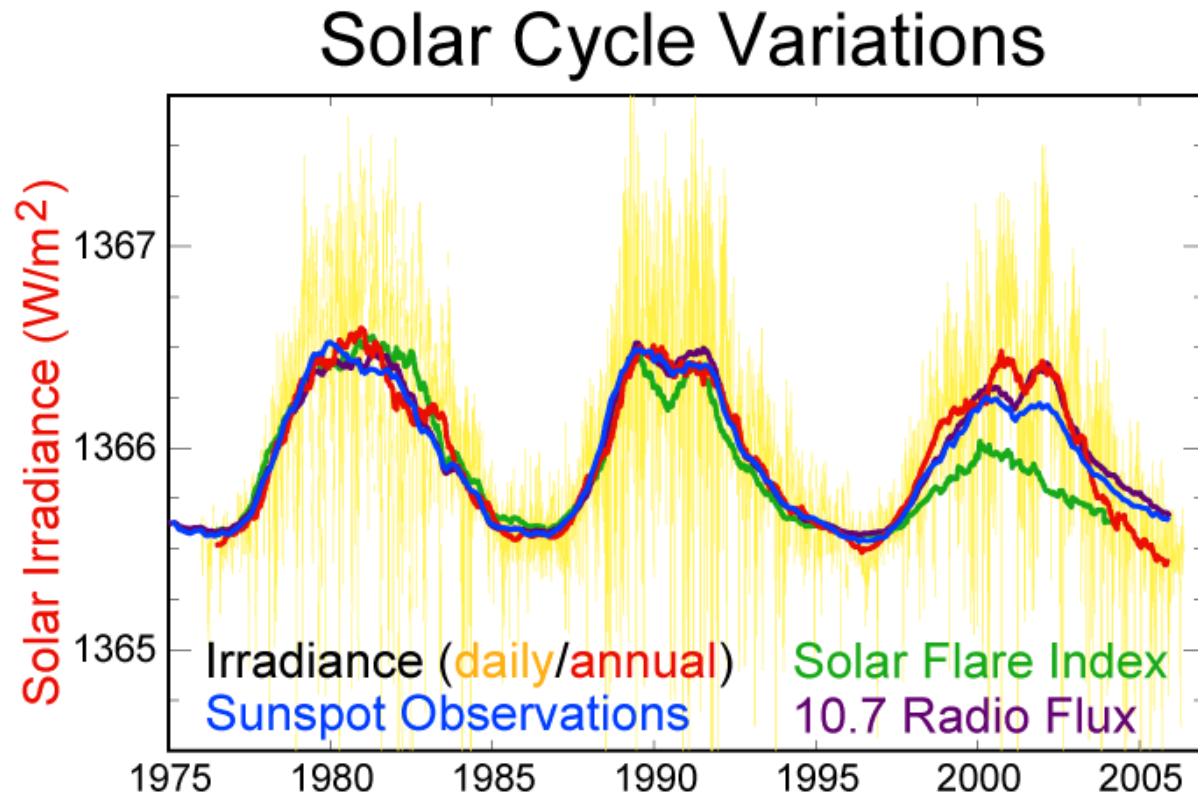


Fig. 2.1 Extraterrestrial solar spectrum (ETS) and terrestrial standard solar spectrum AM1.5G. Details of ultraviolet and infrared spectral domains are presented inset F_λ is the extraterrestrial spectral flux density and λ is the photon wavelength

Φασματοσκοπία:

Αν ολοκληρώσουμε τη ροή F_λ (από το παραπάνω φάσμα) στο μήκος κύματος, ακριβώς έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα, και πάρουμε τη μέση τιμή στο χρόνο παίρνουμε την επονομαζόμενη ηλιακή σταθερά ($f=1.36 \text{ kW/m}^2$). Μπορεί να έχει διακυμάνσεις με το χρόνο λόγω ηλιακού κύκλου (+κηλίδων).

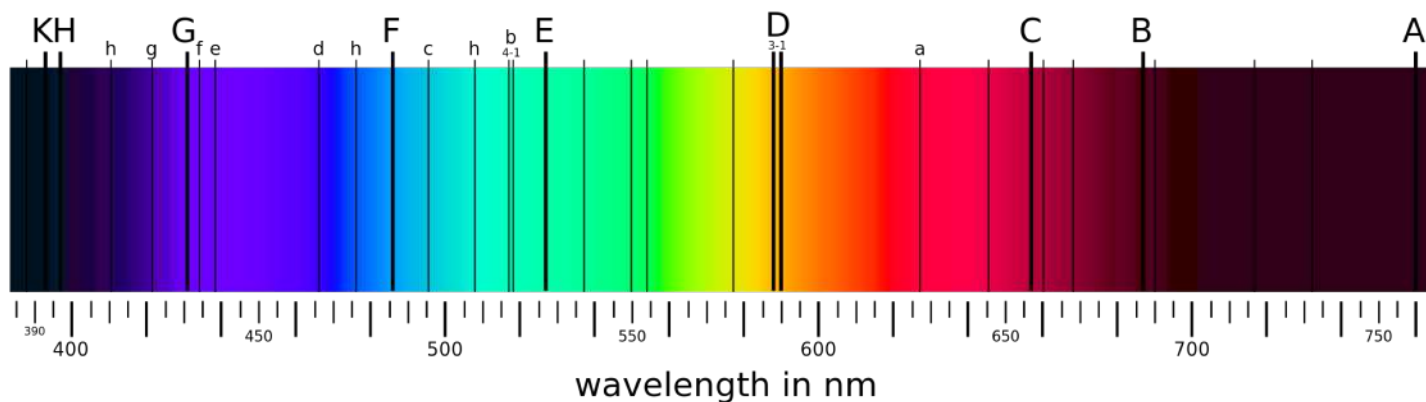
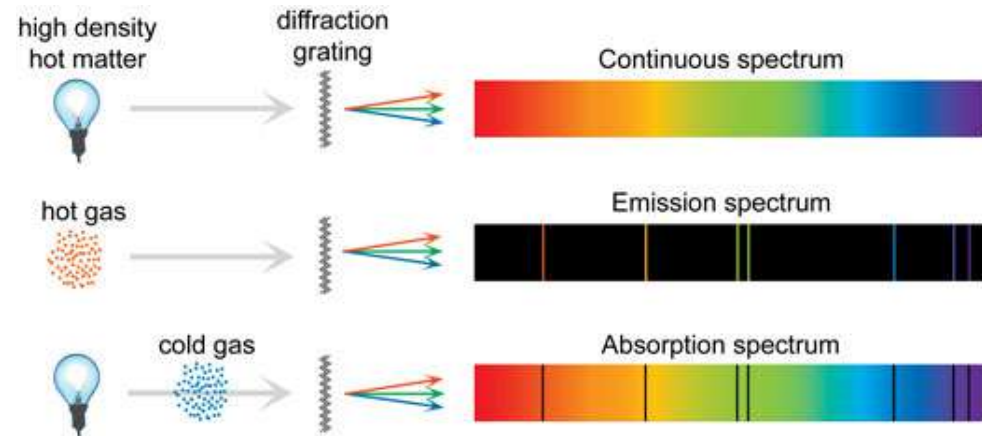


Πολλαπλασιάζοντας την ηλιακή σταθερά με $4\pi R^2$, παίρνουμε την τιμή της Ηλιακής λαμπρότητας που είναι μονάδα μέτρησης για την Αστροφυσική, $3.83 \times 10^{26} \text{ W}$.

Φασματοσκοπία:

Τώρα παρατηρήστε τις αλλαγές εντός κι εκτός ατμόσφαιρας στο σχήμα λόγω **απορρόφησης**!

Πέραν της συνεχούς απορρόφησης λόγω σκόνης, υπάρχει απορρόφηση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος από αέριο, με διακριτές, κβαντισμένες ενεργειακές στάθμες κι άρα μεταβάσεις ανάμεσα σε αυτές. Αν βρεθεί αέριο μπροστά από μια πιο θερμή, λαμπρή πηγή, θα απορροφήσει ακτινοβολία. Θα χαθεί σήμα από την ευθεία παρατήρησης, π.χ., γιατί το αέριο θα την σκεδάσει σε όλες τις γωνίες.



Φασματοσκοπία:

Επειδή γνωρίζουμε την ενέργεια για ηλεκτρονικές στάθμες διέγερσης ατόμων ή ακόμα και περιστροφής/ταλάντωσης πυρήνων μορίων, μπορούμε να υπολογίσουμε σε ποιο λ περιμένουμε ποια φασματική γραμμή ποιανού στοιχείου.

Σας δίνεται σχετικός πίνακας για να αναγνωρίσετε τα στοιχεία που βλέπετε στο φάσμα. Άπαξ και τα αναγνωρίσετε, καλείστε να υποθέσετε την προέλευσή τους!

Πίνακας 1.8: Βασικές γραμμές απορρόφησης Fraunhofer στο ηλιακό φάσμα

$\lambda(\text{nm})$	όνομα	στοιχείο	$\lambda(\text{nm})$	όνομα	στοιχείο
299.444	t	Ni I	516.733	b ₄	Mg I
302.108	T	Fe I	516.891	b ₃	Fe I
336.112	P	Ti II	517.270	b ₂	Mg I
358.121	N	Fe I	518.362	b ₁	Mg I
382.044	L	Fe I	527.039	E ₂	Fe I
393.368	K	Ca II	546.073	e	Hg I
396.847	H	Ca II	587.562	D ₃ ή d	He I
410.175	h	H I (H δ)	588.995	D ₂	Na I
430.774	G	Ca I	589.592	D ₁	Na I
430.790	G	Fe I	627.661	a	O ₂
434.047	G'	H I (H γ)	656.281	C	H I (H α)
438.355	e	Fe I	686.719	B	O ₂
466.814	d	Fe I	759.370	A	O ₂
486.134	F	H I (H β)	822.696	Z	O ₂
495.761	c	Fe I	898.765	y	O ₂

* Το σύμβολο «I» που ακολουθεί το στοιχείο υποδηλώνει ουδέτερο άτομο, το σύμβολο «II» απλά ιονισμένο άτομο, κ.ο.κ.

Προσοχή – Βαθμονόμηση Οργάνου:

Το φάσμα στην προηγούμενη διαφάνεια είναι ήδη βαθμονομημένο!!! Το ίδιο ισχύει για το φάσμα που σας δίνεται έτοιμο για να μετρήσετε τη θερμοκρασία του Ηλίου και την Ηλιακή σταθερά. Είναι όμως σχετικά χαμηλής ανάλυσης, και δεν φαίνονται οι γραμμές απορρόφησης καλά!!!

Έστω, λοιπόν, ότι δε βρέθηκε στη βιβλιογραφία και χρειάστηκε να αποκτήσουμε ένα νέο φάσμα υψηλότερης ανάλυσης με δικό μας φασματογράφο!

Τι θα βλέπαμε στο φάσμα στους άξονες x και y ; Στον x θα βλέπαμε τον αριθμό του pixel της κάμερας ενώ στον y θα βλέπαμε αριθμό ηλεκτρονίων που προσμετρήθηκαν στα ηλεκτρονικά μας!

Πώς γίνεται η **βαθμονόμηση**;

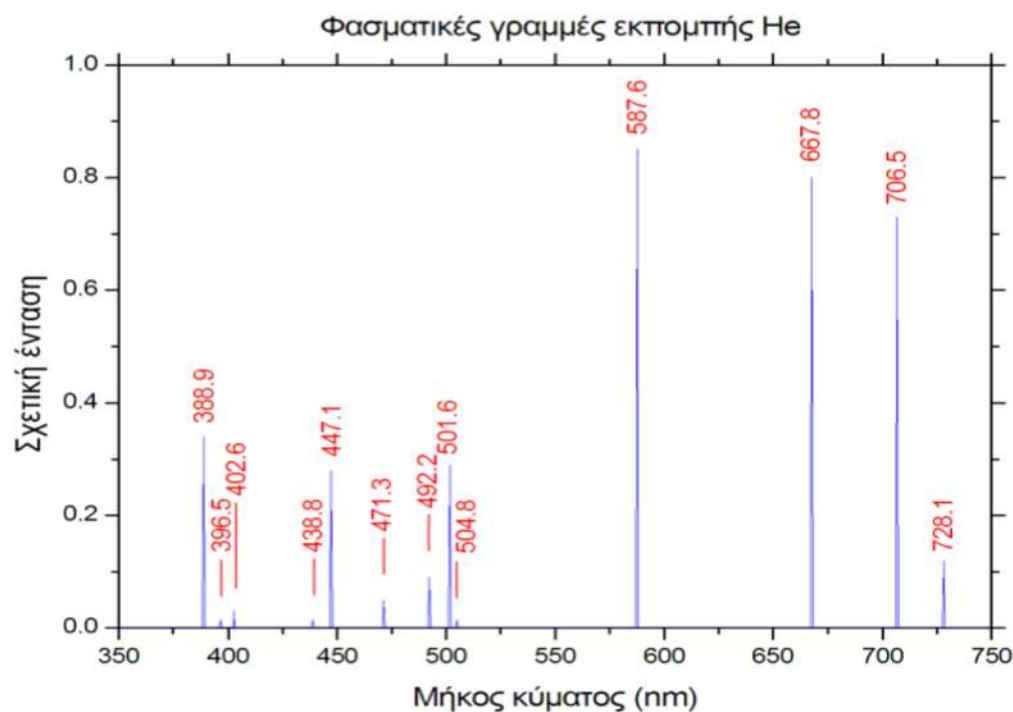
- Για τον y άξονα, κοιτάμε αστέρι γνωστής, σταθερής ροής (π.χ., Vega) και αντιστοιχούμε τον αριθμό e^- σε ροή (γίνεται και μέσω μεγεθών) – δεν χρειάζεται να γίνει για το παρών εργαστήριο
- Για τον x άξονα, χρειαζόμαστε πηγή η οποία να εκπέμπει διακριτά(!) στα μήκη κύματος που μας ενδιαφέρουν. Άρα, πάλι αέριο, π.χ., λάμπες μέσα στο θόλο του τηλεσκοπίου: Ne, Xe, He, Ar (ή συνδυασμούς αυτών!)

Προσοχή – Βαθμονόμηση Οργάνου:

Π.χ., λάμπα στοιχείου He – προσοχή! Το στοιχείο αυτό ονομάζεται έτσι επειδή το He παράγεται από σύντηξη H στον Ήλιο. Προφανώς όμως, τοπικά βρίσκεται μέσα στο θόλο από τη λάμπα...



Σχ. 1.12α Το φάσμα εκπομπής του ατομικού στοιχείου ηλίου (He).



Σύνοψη:

- Από έτοιμο φάσμα, βαθμονομημένο, που θα σας δοθεί θα βρείτε την Ηλιακή σταθερά κι αποκλίσεις από τη γνωστή τιμή, τις οποίες θα συζητήσετε.
- Σε άλλο, υψηλότερης ανάλυσης φάσμα που θα δείτε στο εργαστήριο, θα πρέπει να κάνετε βαθμονόμηση στον x άξονα, για να αντιστοιχήσετε pixel \leftrightarrow λ, να αναγνωρίσετε στοιχεία (άτομα και μόρια) και να συζητήσετε τη χωρική τους προέλευση.

Άσκηση A1 – Εργαστηριακά βήματα της Άσκησης

Ε. Μητσάκου

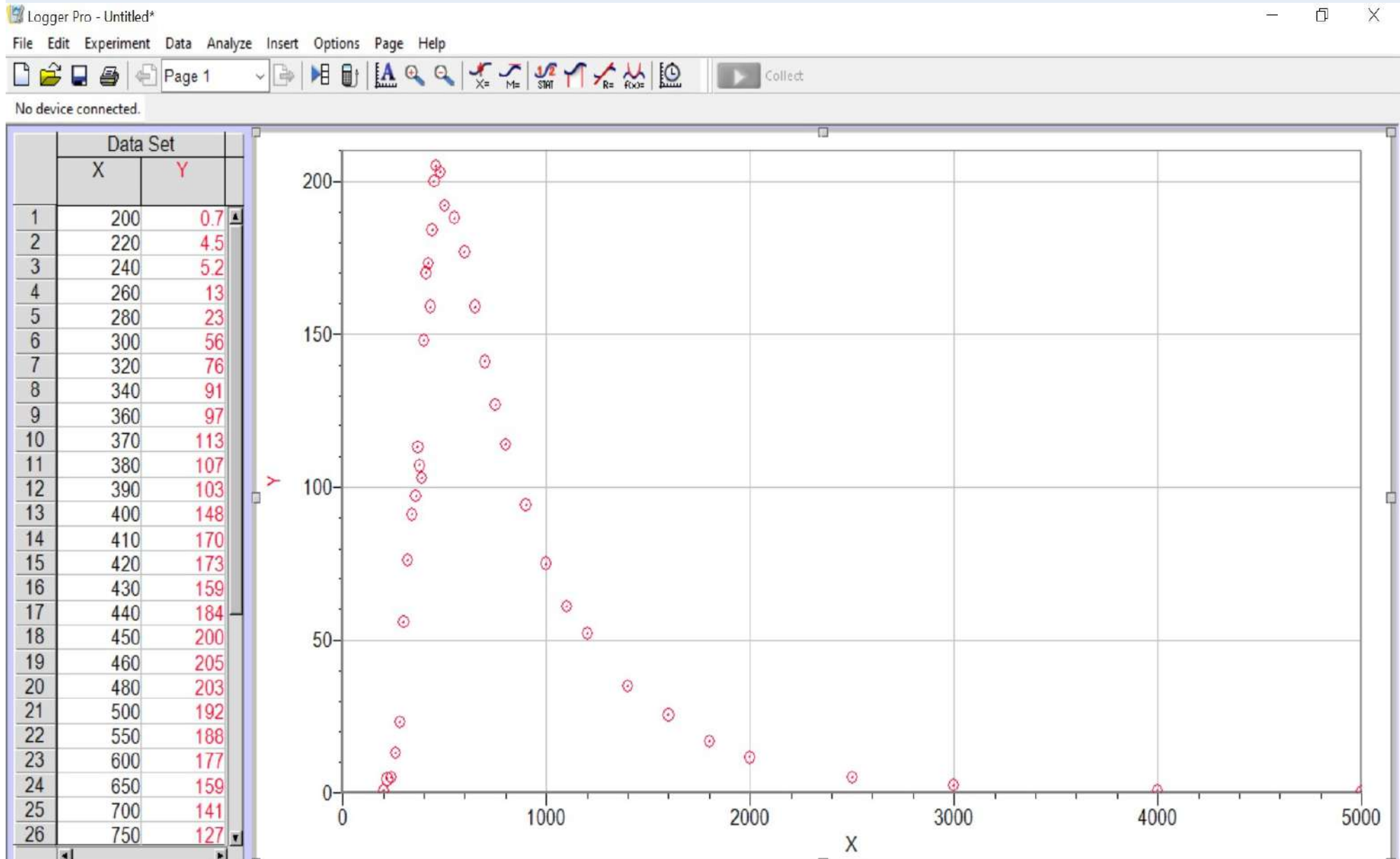
Α' μέρος

Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας έξω
από την γήινη ατμόσφαιρα

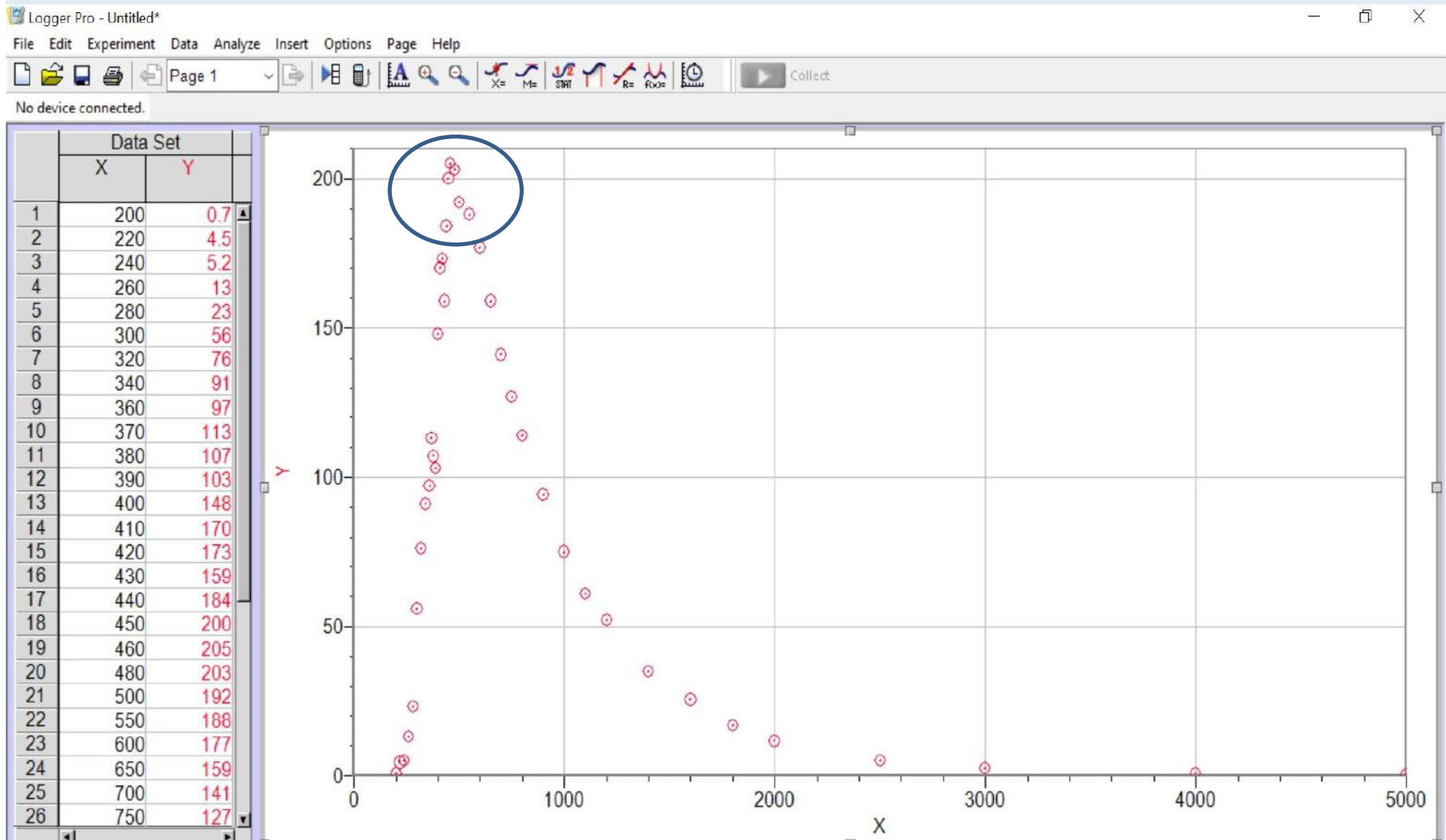
Πίνακας 1.5: Ηλιακή φασματική κατανομή
 Ροή ηλιακής ακτινοβολίας f_λ (σε $10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$) στο
 αντίστοιχο μήκος κύματος λ , ανά μονάδα επιφάνειας
 και ανά διάστημα μήκους κύματος

λ	f_λ	λ	f_λ	λ	f_λ
(nm)	($10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$)	(nm)	($10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$)	(nm)	($10^{-3} \text{ W m}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$)
200	0.7	410	170.0	800	114.0
220	4.5	420	173.0	900	94.0
240	5.2	430	159.0	1000	75.0
260	13.0	440	184.0	1100	61.0
280	23.0	450	200.0	1200	52.0
300	56.0	460	205.0	1400	35.0
320	76.0	480	203.0	1600	25.5
340	91.0	500	192.0	1800	16.9
360	97.0	550	188.0	2000	11.6
370	113.0	600	177.0	2500	5.2
380	107.0	650	159.0	3000	2.6
390	103.0	700	141.0	4000	0.9
400	148.0	750	127.0	5000	0.4

1. Να κατασκευάσουμε την καμπύλη φασματικής κατανομής του ηλιακού φωτός



2. Να εκτιμήσουμε το μήκος κύματος στο οποίο η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται μέγιστη και το αντίστοιχο σφάλμα.



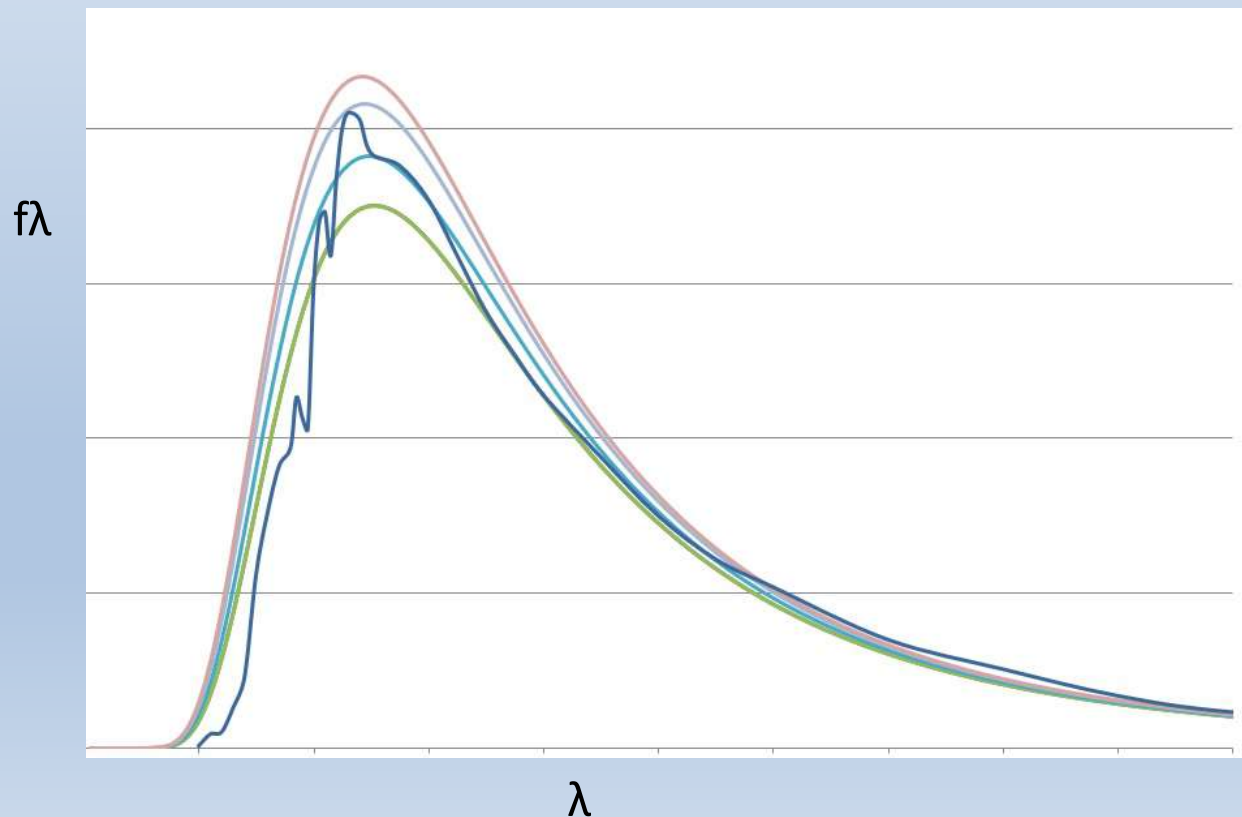
5.Υποθέτοντας ότι η καμπύλη μας προσεγγίζει
ικανοποιητικά την καμπύλη μέλανος σώματος,
βρίσκουμε την **ενεργό θερμοκρασία του ήλιου**
χρησιμοποιώντας τον νόμο του Wien και το αντίστοιχο
σφάλμα.

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{σταθερά} = 2,8978 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

6. Από τον νόμο του Planck, υπολογίζουμε την f_λ και την σχεδιάζουμε με άλλο χρώμα πάνω στην καμπύλη με τα παρατηρησιακά δεδομένα.

$$F_\lambda(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$4\pi R^2 F_\lambda = 4\pi Q^2 f_\lambda$$



Τουλάχιστον 3
διαφορετικές T :

a. από ν. Wien

b. από
βιβλιογραφία

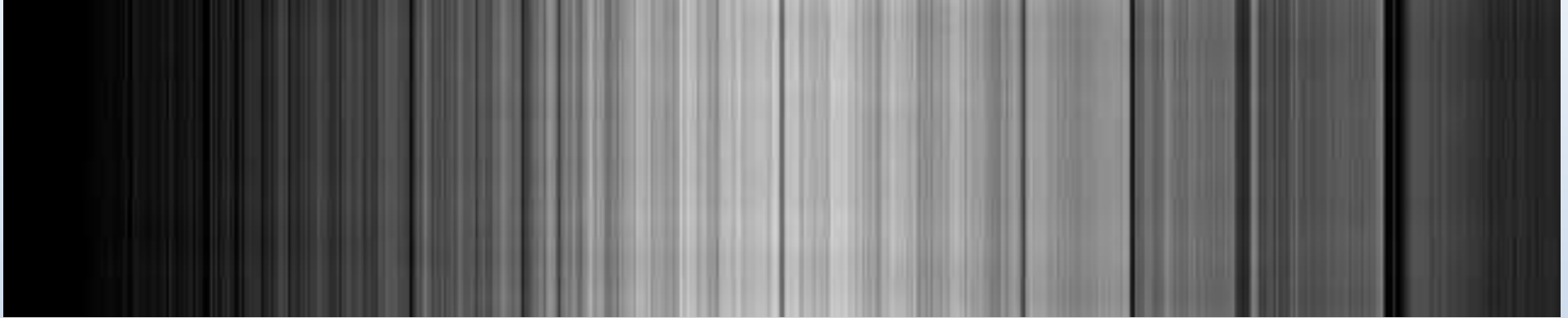
c. καλύτερη
προσαρμογή

Άσκηση A1 - Βήματα της Άσκησης

Β' μέρος

Ανάλυση ηλιακού φάσματος

Ηλιακό φάσμα

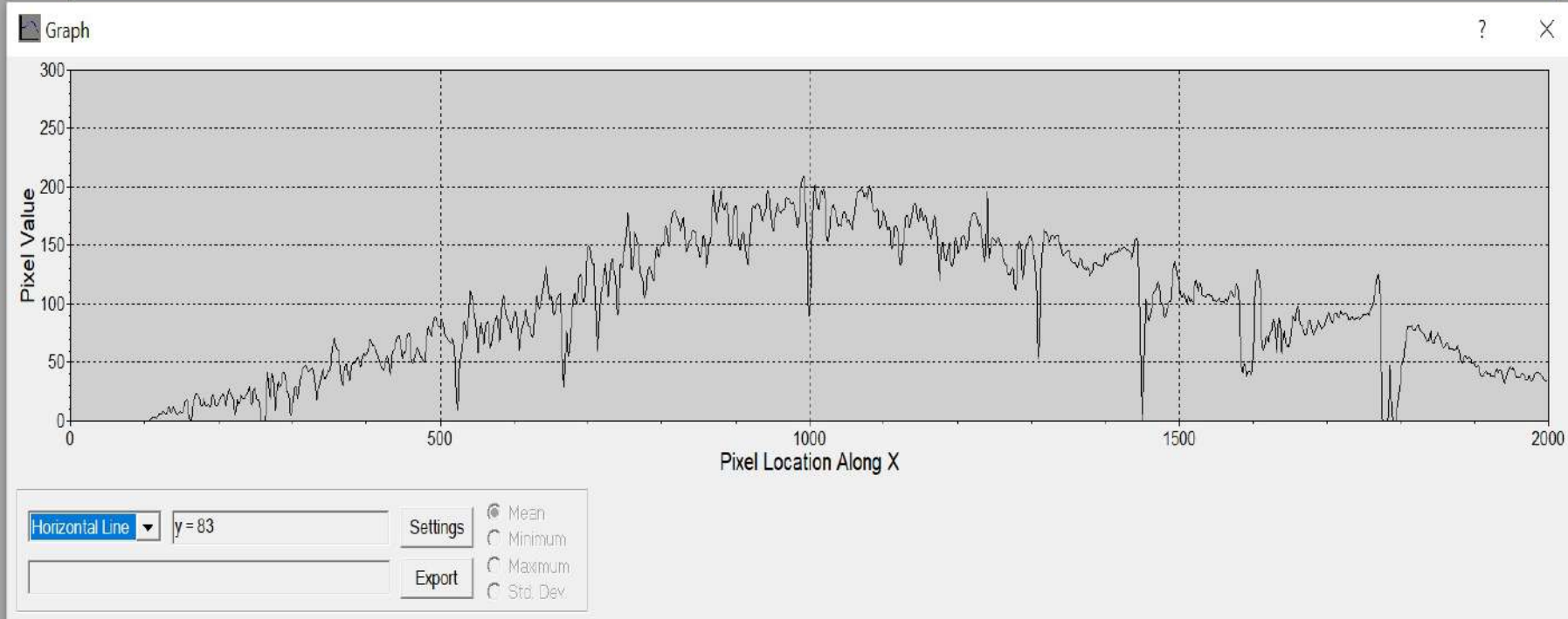


φασματογράφος DADOS

File Edit View Analyze Process Filter Color Plug-in Window Help

79.7

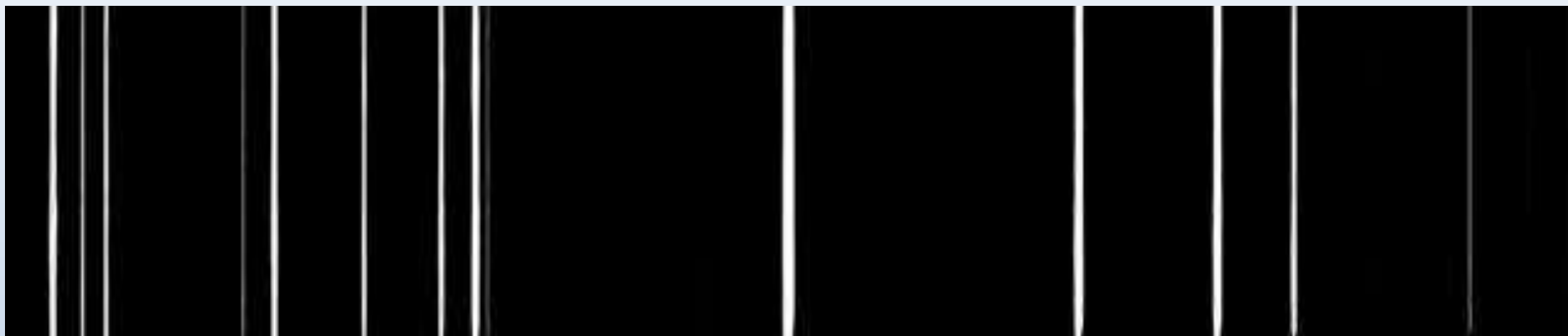
solar_spectrum



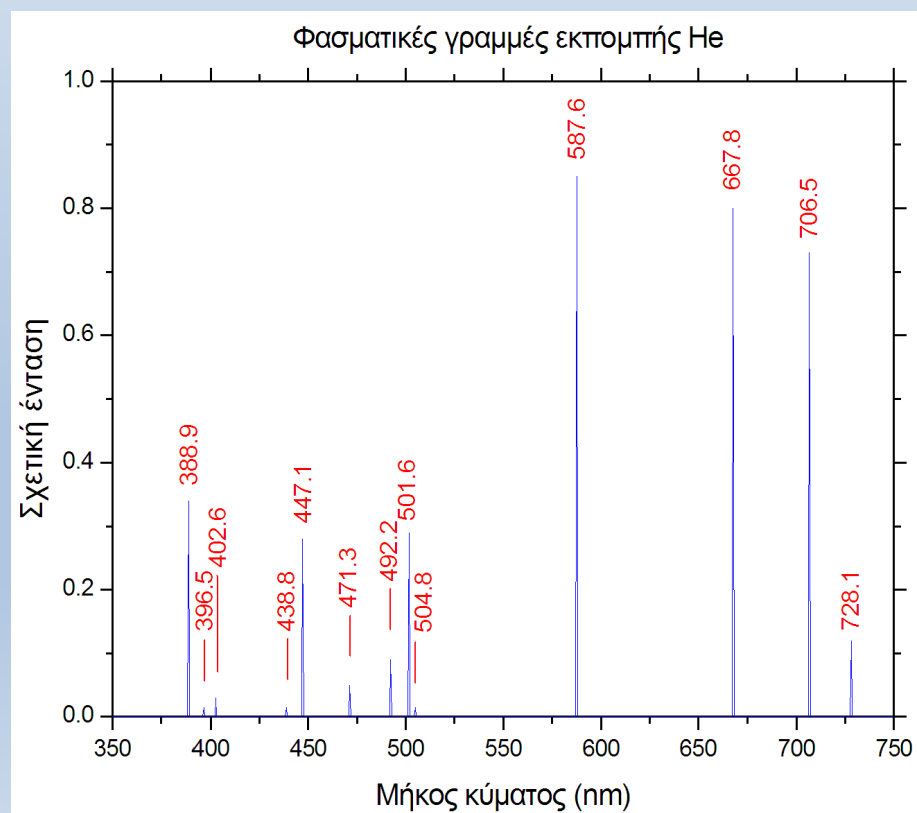
Στον οριζόντιο άξονα: pixel

Βαθμονόμηση: αντιστοίχιση pixel με μήκος κύματος

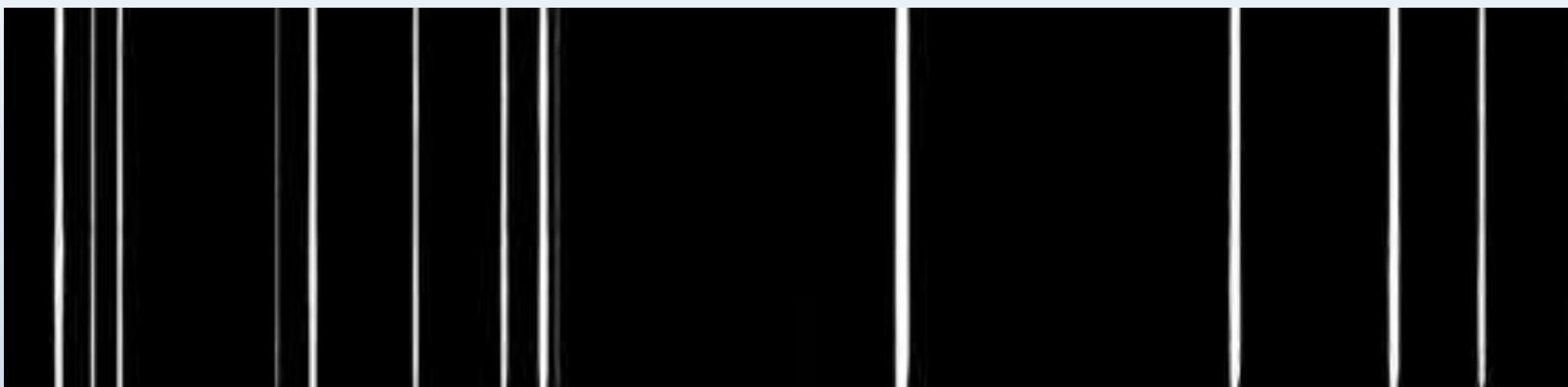
φάσμα βαθμονόμησης He



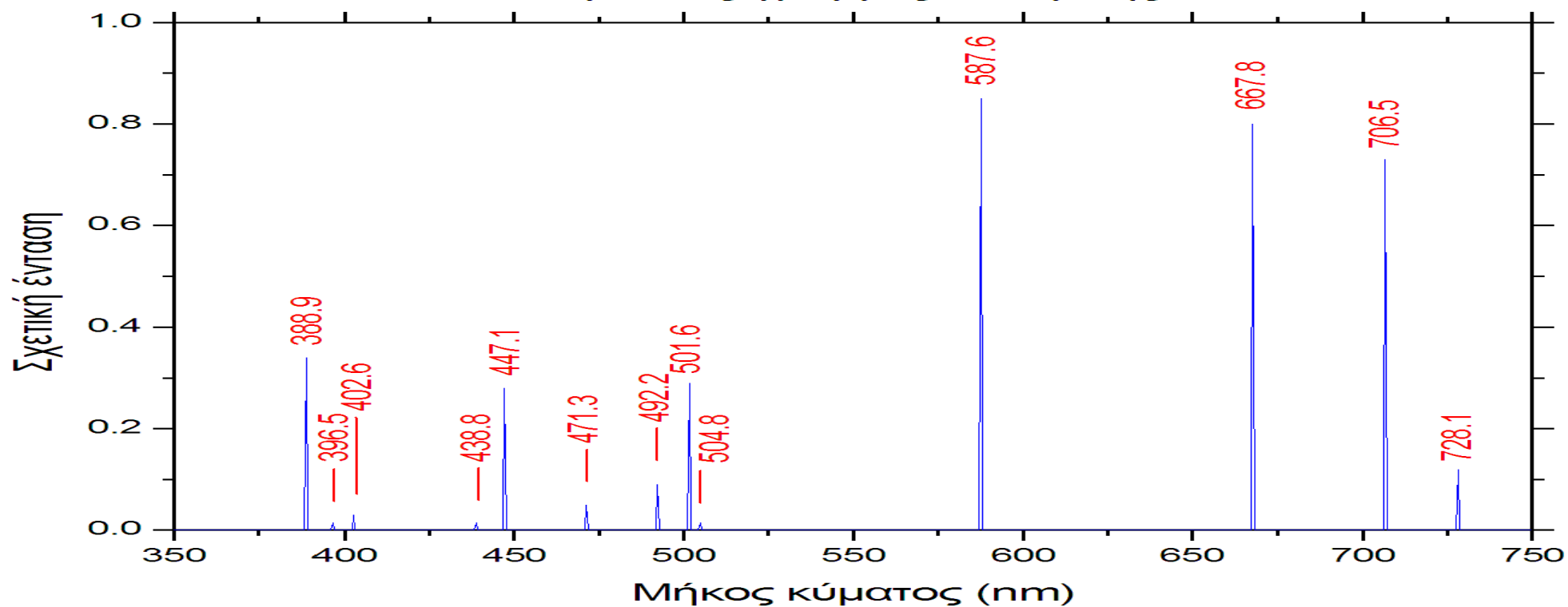
pixel	$\lambda(\text{nm})$	χρώμα	χαρακτηρισμός
	388.9	ιώδες	έντονη
	396.5	ιώδες	αμυδρή
	402.6	ιώδες	μεσαία
	438.8	ιώδες	αμυδρή
	447.1	ιώδες	έντονη
	471.3	κυανό	μεσαία
	492.2	κυανό	μεσαία
	501.6	πράσινο	έντονη
	504.8	πράσινο	αμυδρή
	587.6	κίτρινο	έντονη
	667.8	κόκκινο	έντονη
	706.5	κόκκινο	έντονη
	728.1	κόκκινο	μεσαία

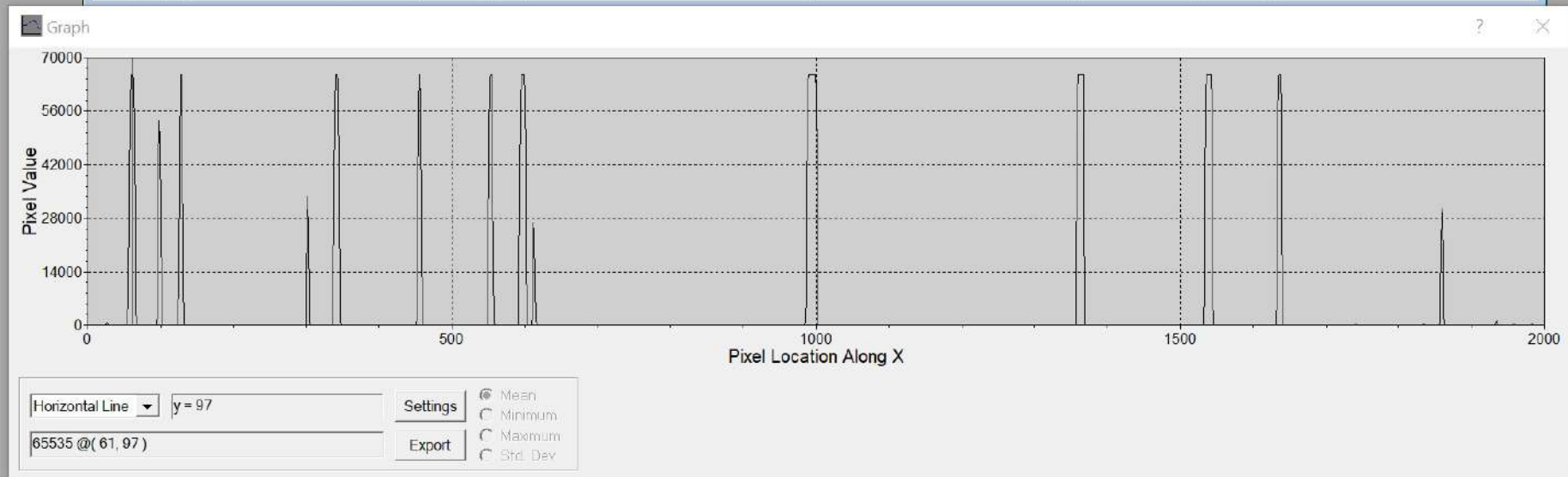


φάσμα βαθμονόμησης He



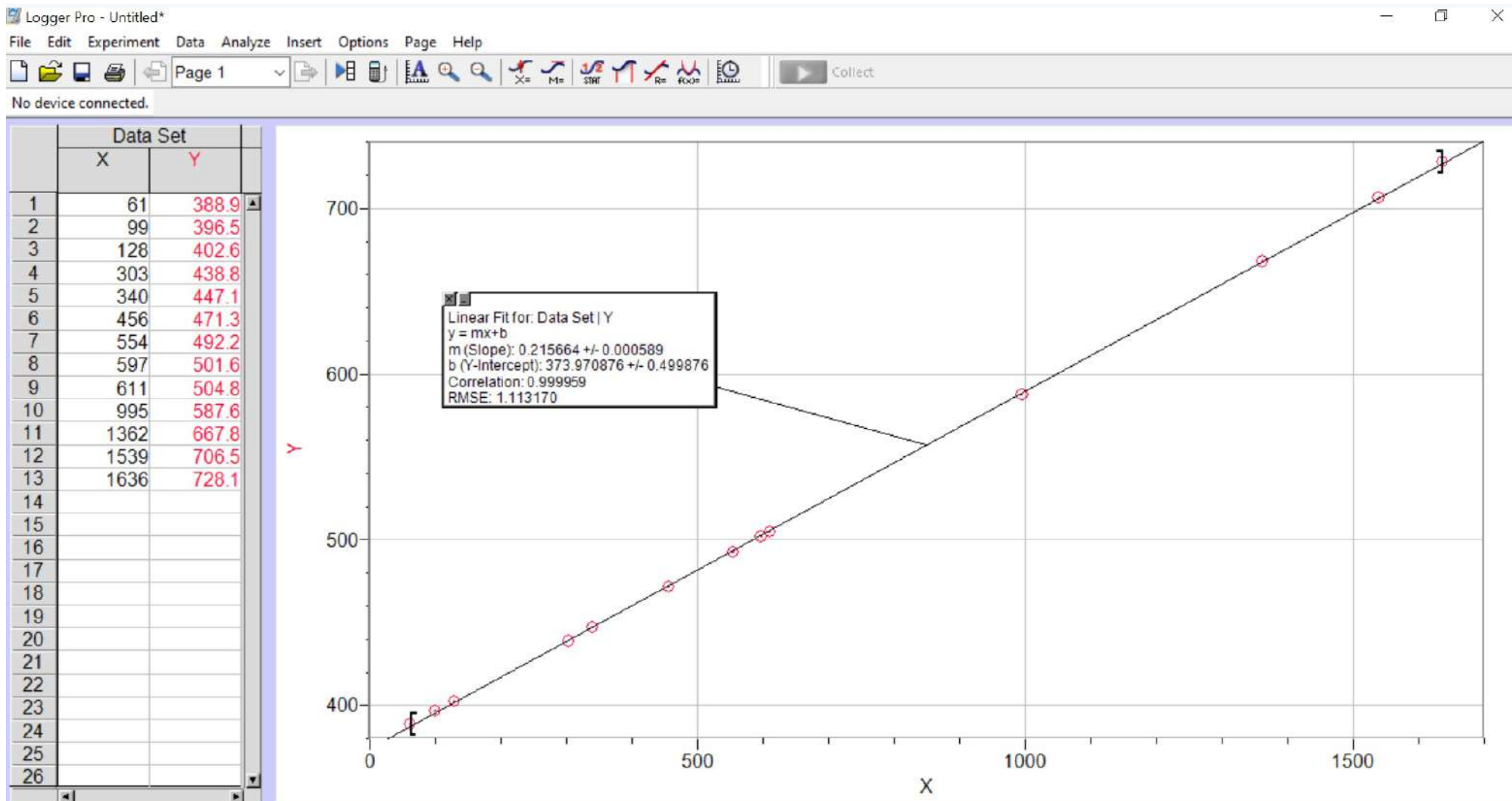
Φασματικές γραμμές εκπομπής He





Αναγνωρίζουμε τις γραμμές εκπομπής και συμπληρώνουμε πίνακα με τον αριθμό pixel και το αντίστοιχο μήκος κύματος στο οποίο αντιστοιχεί κάθε γραμμή

<i>pixel</i>	<i>λ(nm)</i>	<i>χρώμα</i>	<i>χαρακτηρισμός</i>
61	388.9	ιώδες	έντονη
99	396.5	ιώδες	αμυδρή
128	402.6	ιώδες	μεσαία
303	438.8	ιώδες	αμυδρή
340	447.1	ιώδες	έντονη
456	471.3	κυανό	μεσαία
554	492.2	κυανό	μεσαία
597	501.6	πράσινο	έντονη
611	504.8	πράσινο	αμυδρή
995	587.6	κίτρινο	έντονη
1362	667.8	κόκκινο	έντονη
1539	706.5	κόκκινο	έντονη
1636	728.1	κόκκινο	μεσαία



Εφαρμόζοντας μια ευθεία ελαχίστων τετραγώνων στα δεδομένα (x-αριθμός pixel και y-μήκος κύματος) θα βρούμε την εξίσωση που μετατρέπει τον αριθμό του κάθε pixel σε μήκος κύματος (nm).

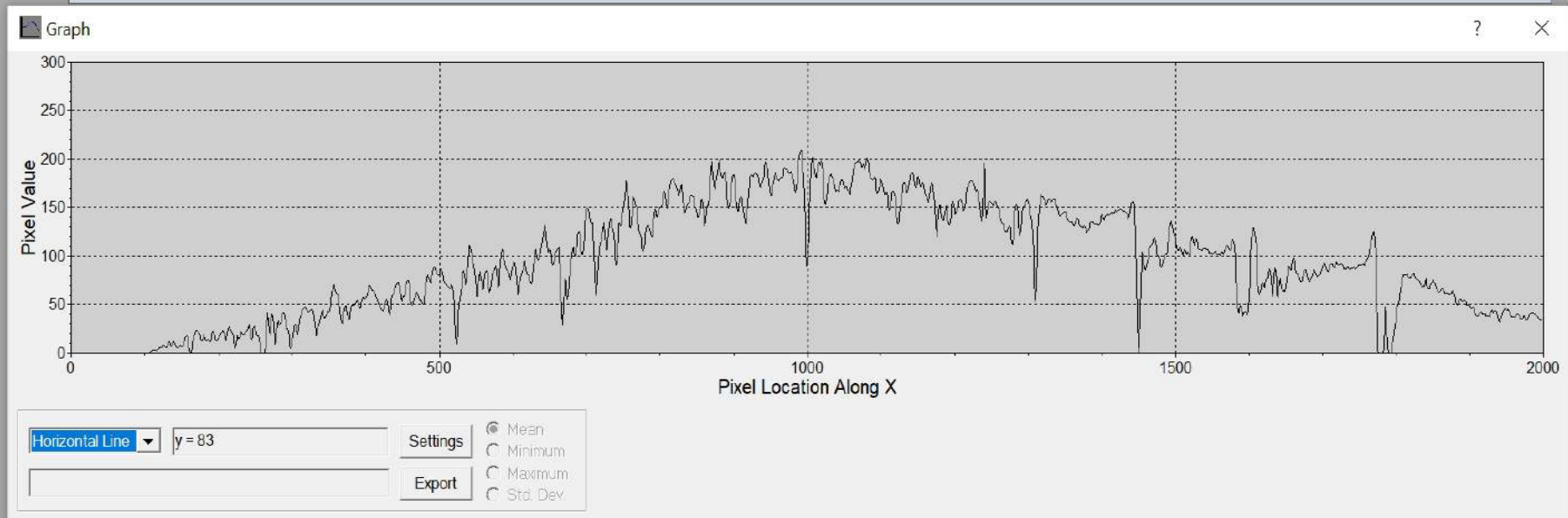
$$y = 0.2157x + 374$$

Επανερχόμαστε στο ηλιακό φάσμα και εφαρμόζοντας αντίστροφα την εξίσωση βαθμονόμησης, μετατρέπουμε τον αριθμό pixel σε μήκος κύματος (nm)

File Edit View Analyze Process Filter Color Plug-in Window Help

79.7

solar_spectrum

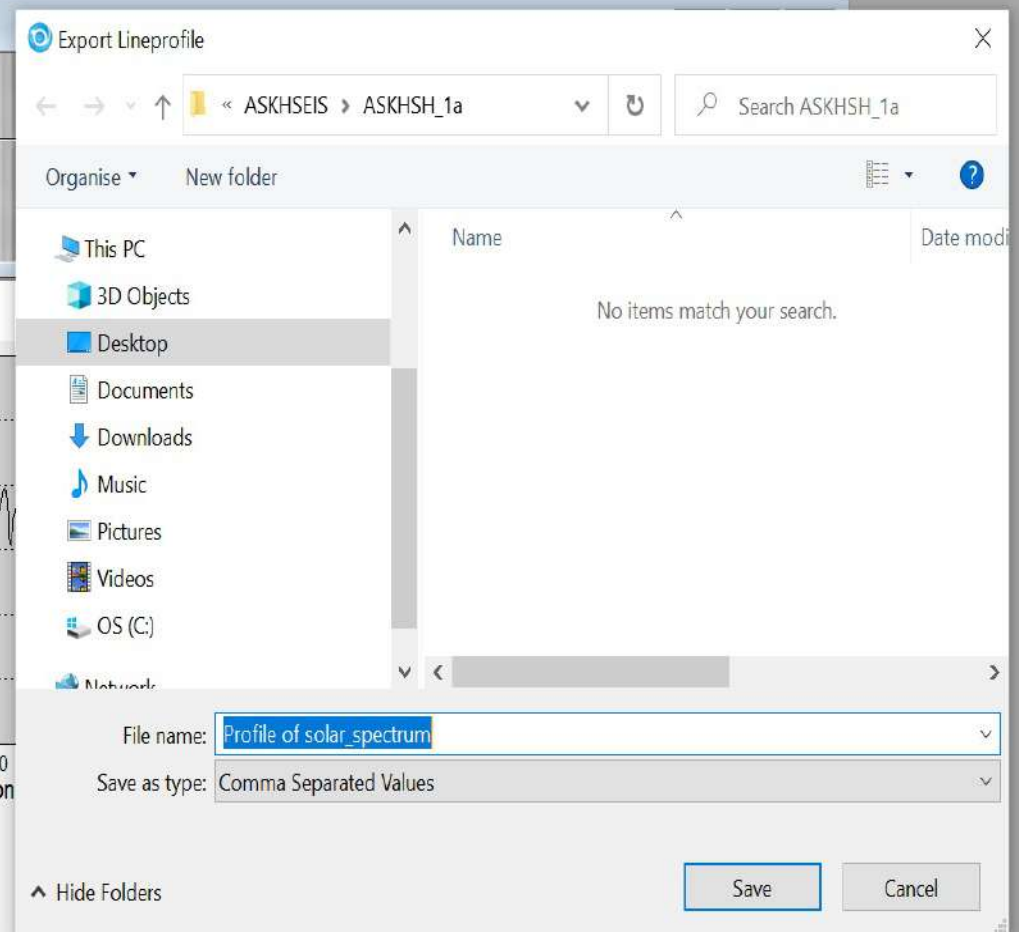
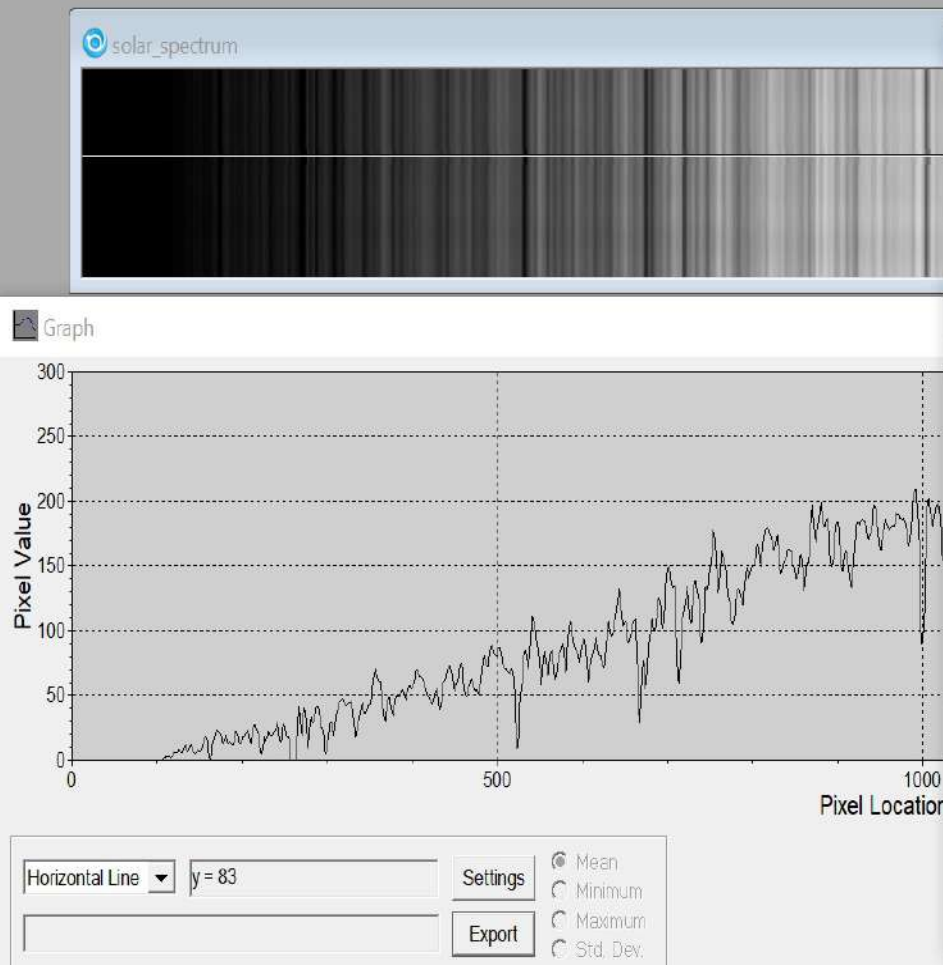


Εξάγουμε τα δεδομένα του ηλιακού φάσματος σε αρχείο csv και εφαρμόζουμε αντίστροφα την εξίσωση βαθμονόμησης.

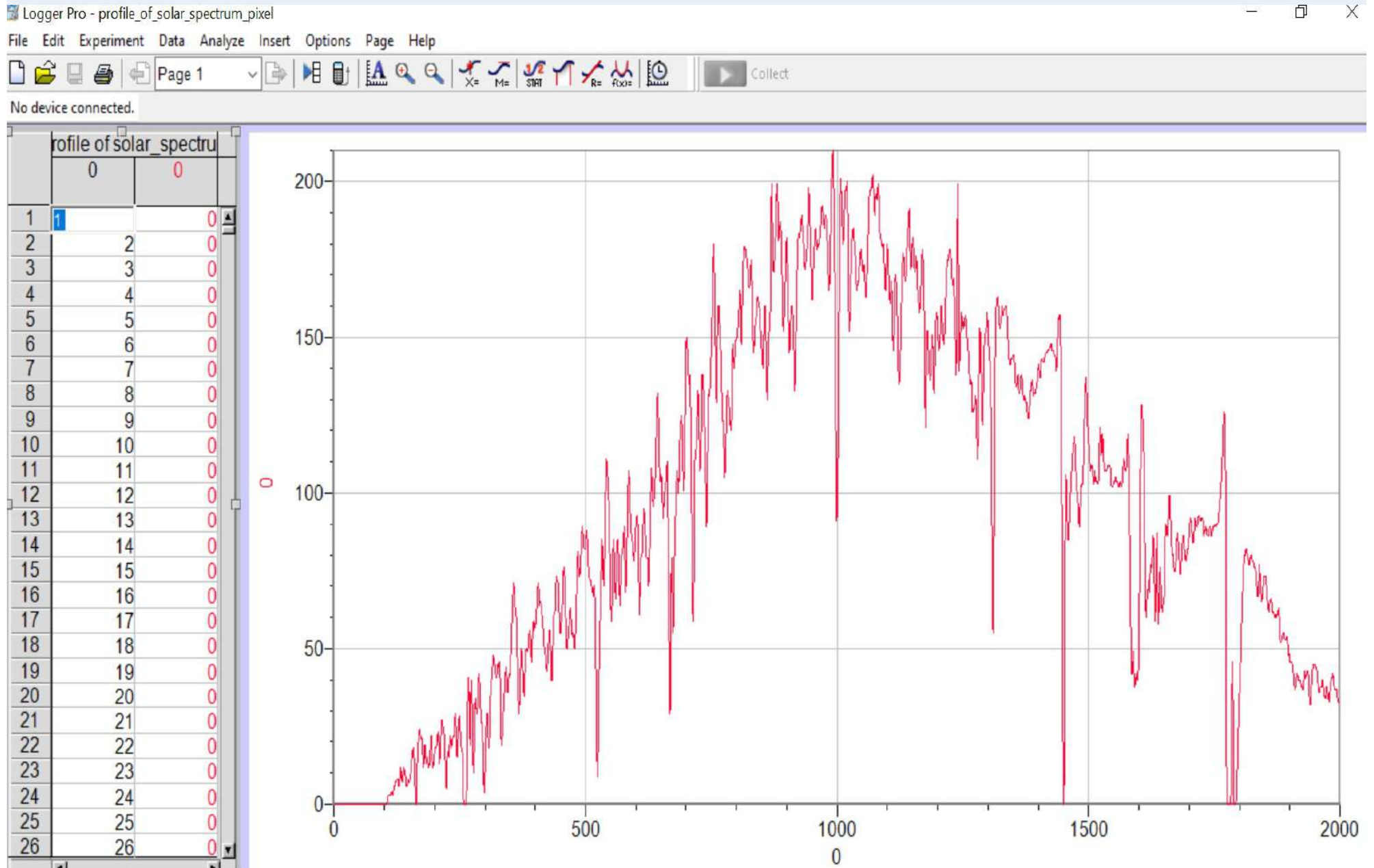
File Edit View Analyze Process Filter Color Plug-in Window Help

79.7

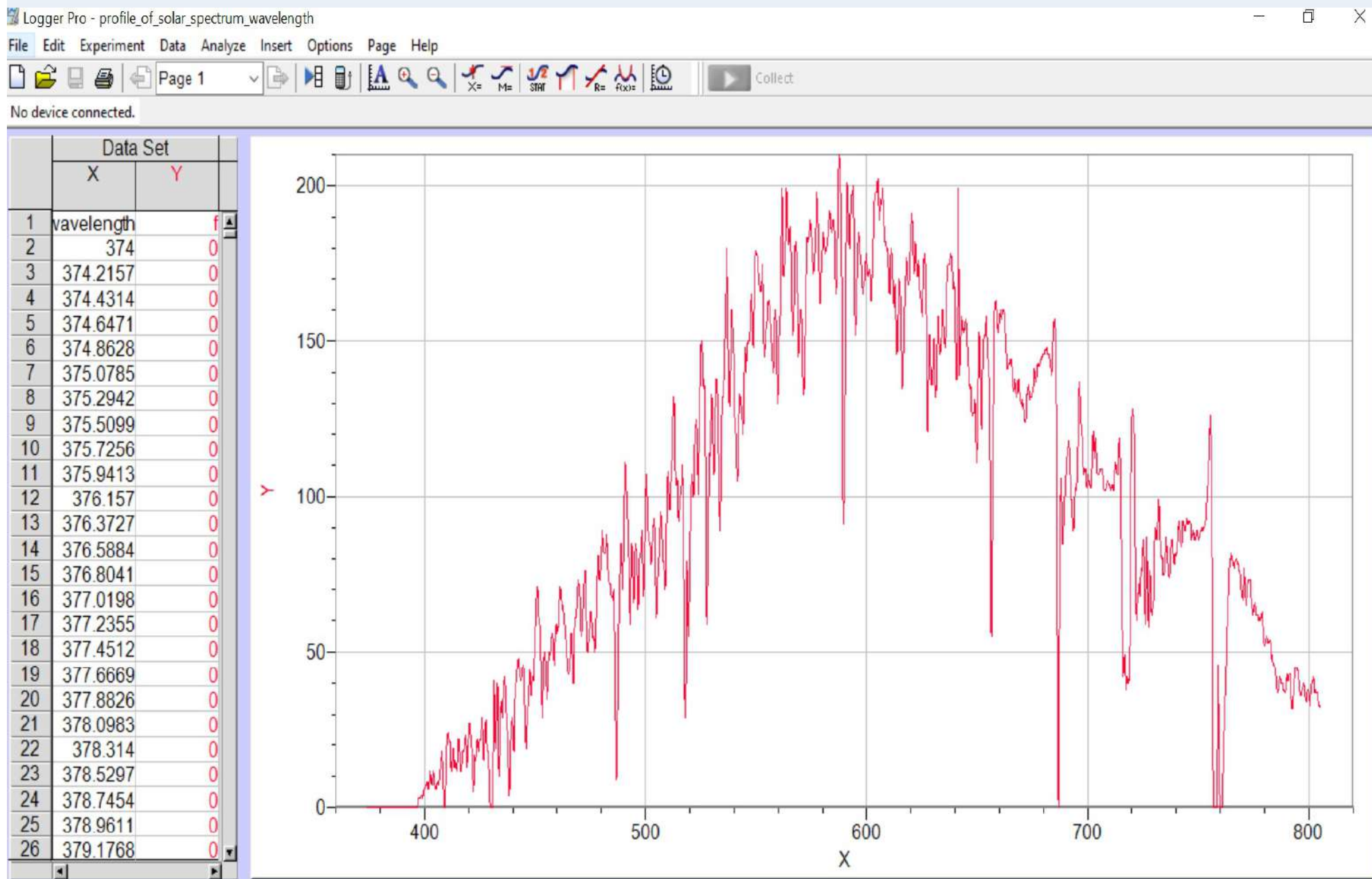
solar_spectrum



Ηλιακό φάσμα αρχικό: άξονας x - pixels



Ηλιακό φάσμα τελικό: άξονας x – μήκος κύματος (nm)



Αναγνωρίζουμε τις βασικές γραμμές απορρόφησης που παρατηρούμε στο ηλιακό φάσμα, χρησιμοποιώντας τον βοηθητικό πίνακα

Βασικές γραμμές απορρόφησης Fraunhofer στο ηλιακό φάσμα

λ(nm)	όνομα	στοιχείο		λ(nm)	όνομα	στοιχείο
299.444	t	Ni I		516.733	b4	Mg I
302.108	T	Fe I		516.891	b3	Fe I
336.112	P	Ti II		517.27	b2	Mg I
358.121	N	Fe I		518.362	b1	Mg I
382.044	L	Fe I		527.039	E2	Fe I
393.368	K	Ca II		546.073	e	Hg I
396.847	H	Ca II		587.562	D3 ή d	He I
410.175	h	H I (Hδ)		588.995	D2	Na I
430.774	G	Ca I		589.592	D1	Na I
430.79	G	Fe I		627.661	a	O ₂
434.047	G'	H I (Hγ)		656.281	C	H I (Hα)
438.355	e	Fe I		686.719	B	O ₂
466.814	d	Fe I		759.37	A	O ₂
486.134	F	H I (Hβ)		822.696	Z	O ₂
495.761	c	Fe I		898.765	γ	O ₂

Θα απαντήσετε τις ερωτήσεις του εργαστηριακού οδηγού.