



Τεχνικές Παρατήρησης  
κι  
Ανάλυσης Δεδομένων  
στην Αστρονομία

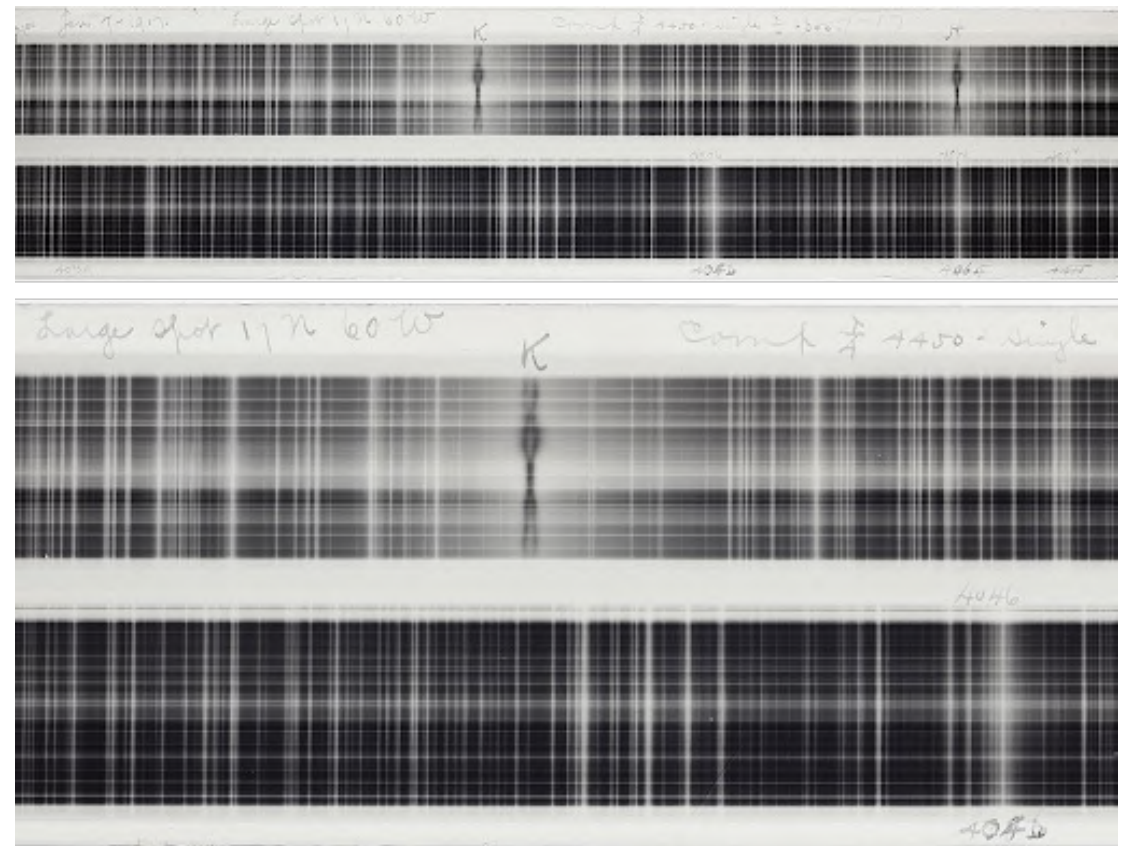
---

Κ. Δασύρα  
([kdasyra@phys.uoa.gr](mailto:kdasyra@phys.uoa.gr))

Integral Field Unit

## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Ξεκινώντας από εικόνες και φάσματα σε φωτογραφικές πλάκες

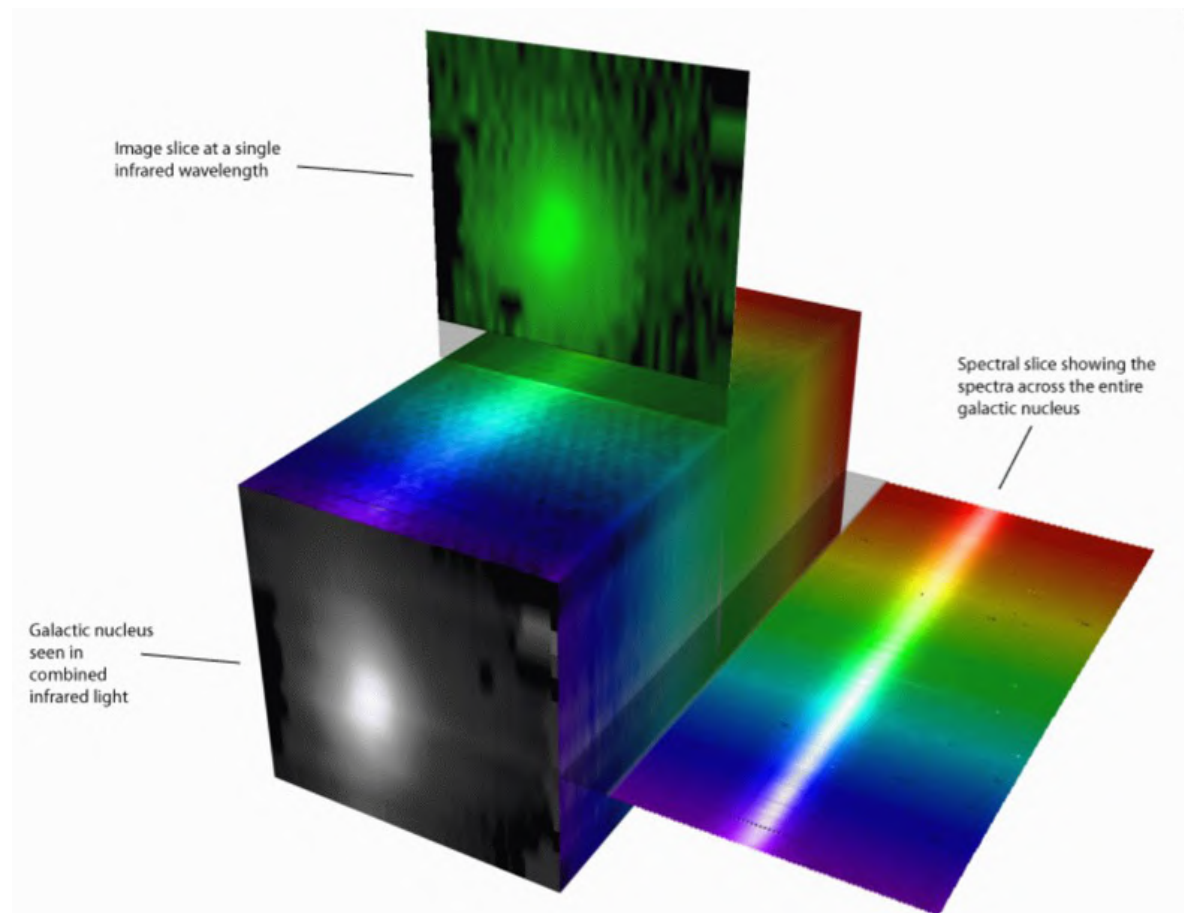


**Integral Field Units (IFUs):** Φωτοφασματογράφοι— πλέον είναι τα **στάνταρντ όργανα** σε όλα τα σύγχρονα οπτικά/υπέρυθρα τηλεσκόπια. Τα IFU είναι τα **βασικότερα** όργανα στα **μεγαλύτερα επίγεια και διαστημικά τηλεσκόπια** λόγω της **αποδοτικότητας των παρατηρήσεων** (εικόνες+χάρτες ταυτόχρονα) που σημαίνει λιγότερα overheads χρόνου για βαθμονομήσεις καθώς το κόστος επιχειρήσεων είναι υψηλό. Ειδικά τα διαστημικά τηλεσκόπια, έχουν κόστος επιχειρήσεων χιλιάδων Ευρώ ανά ώρα.



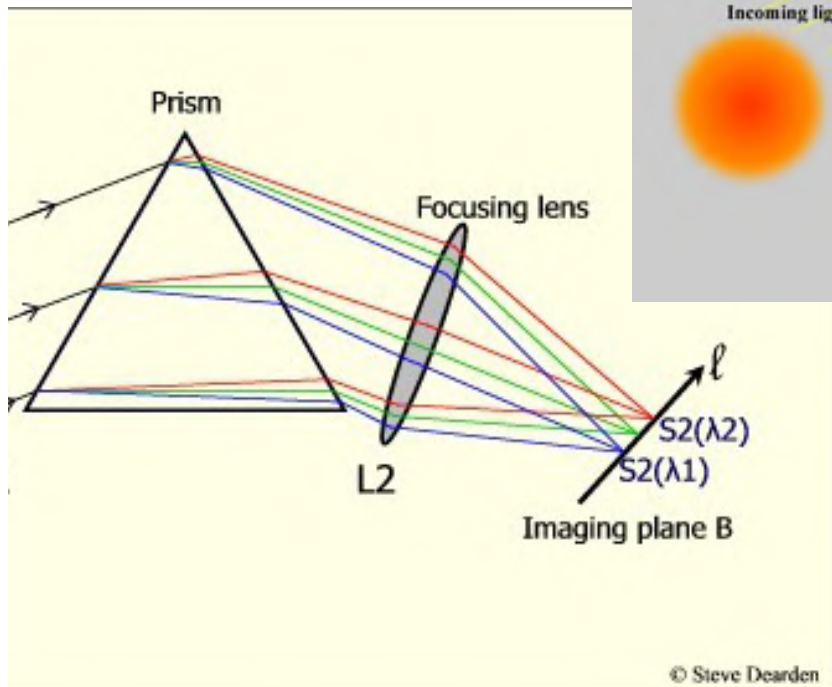
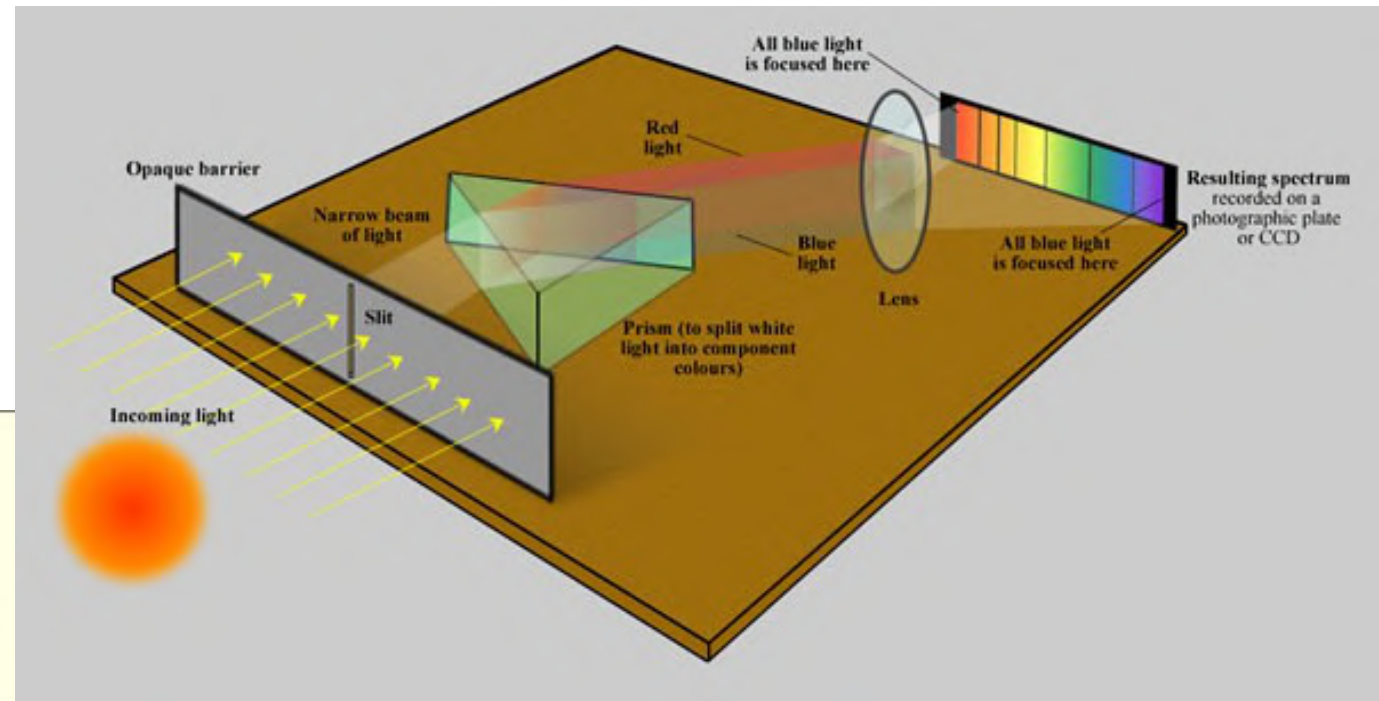
## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

**IFUs:** Βασίζονται σε αρχές **τόσο φωτομετρίας όσο και φασματοσκοπίας**, για τις οποίες θα μιλήσουμε, και θα δούμε παράδειγματα από IFU , που συνδυάζουν τα παραπάνω. Τι **βαθμονομήσεις σχεδιασμός παρατήρησης** και επεξεργασία πρέπει να γίνουν ώστε να πάρουμε χρήσιμες μετρήσεις;



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Η αρχή λειτουργίας είναι κατά βάση η ίδια σε σχέση με έναν 'απλό' φασματογράφο.  
Π.χ., Φασματογράφος πρίσματος – βασίζεται στο διαφορετικό δείκτη διάθλασης μ ανά λ.  
Απλά επαναλαμβάνονται πολλές φορές οι διατάξεις, π.χ., πολλαπλά πρίσματα.



$$\mu_{\lambda} = A + \frac{B}{\lambda - C}$$

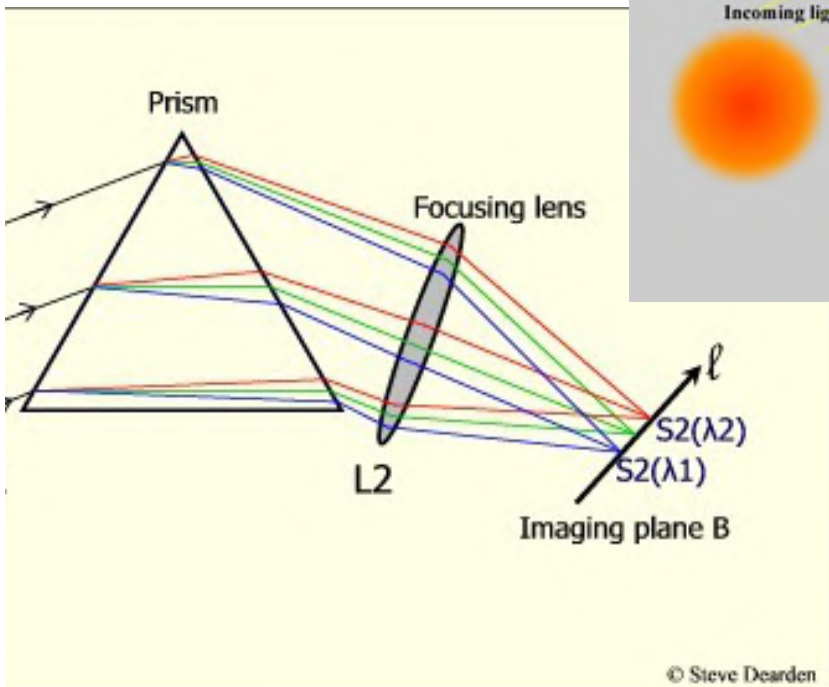
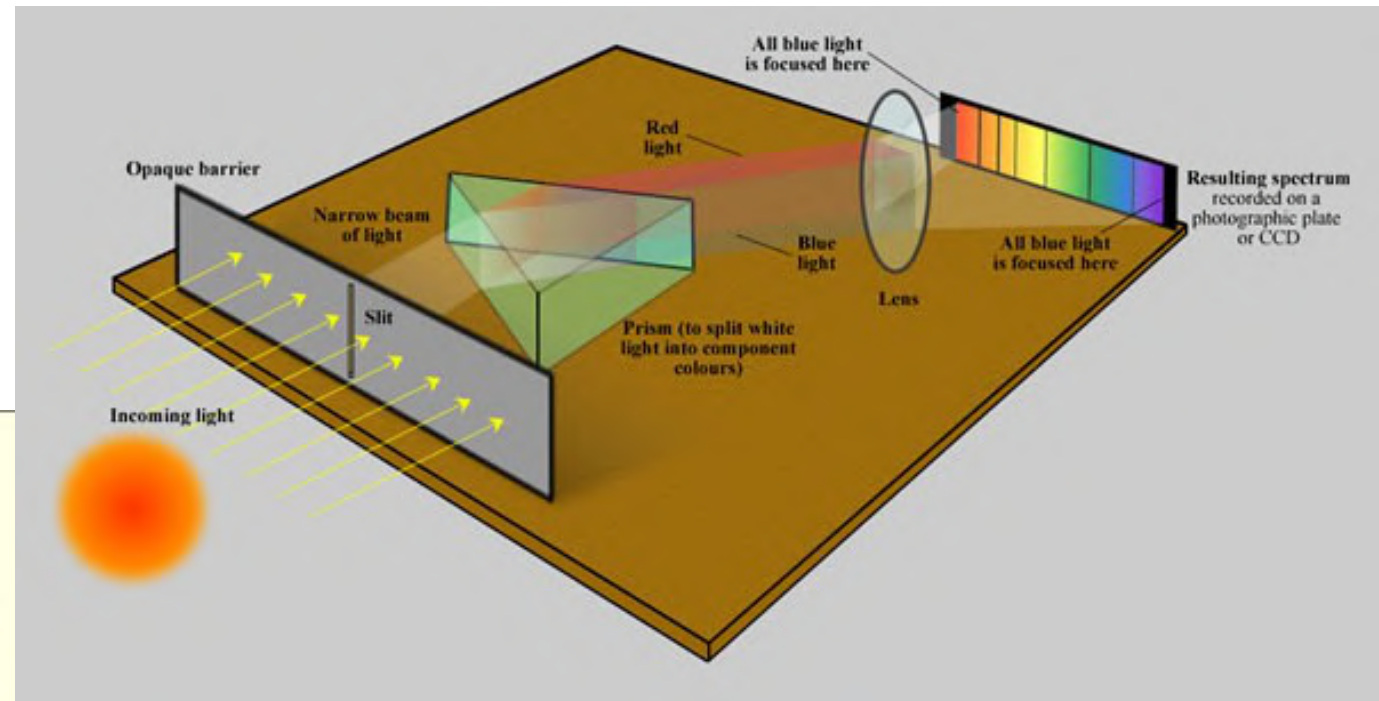
(Hartmann), A,B,C, σταθερές που περιγράφουν το κάθε υλικό

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2}}{\cos i_1} \left( -\frac{B}{(\lambda - C)^2} \right)$$

Γωνιακή διασπορά,  
 $d\phi/d\lambda = d\phi/d\mu * d\mu/d\lambda$   
- στο  $d\phi/d\mu$  υπεισέρχεται  
η γεωμετρία του πρίσματος

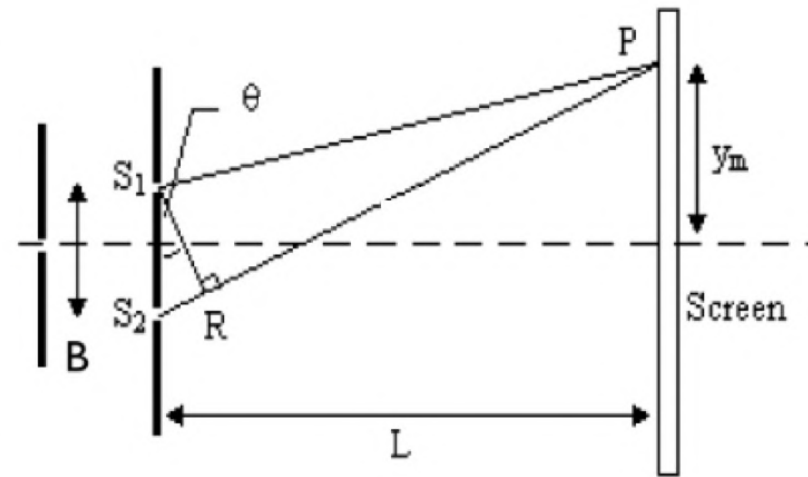
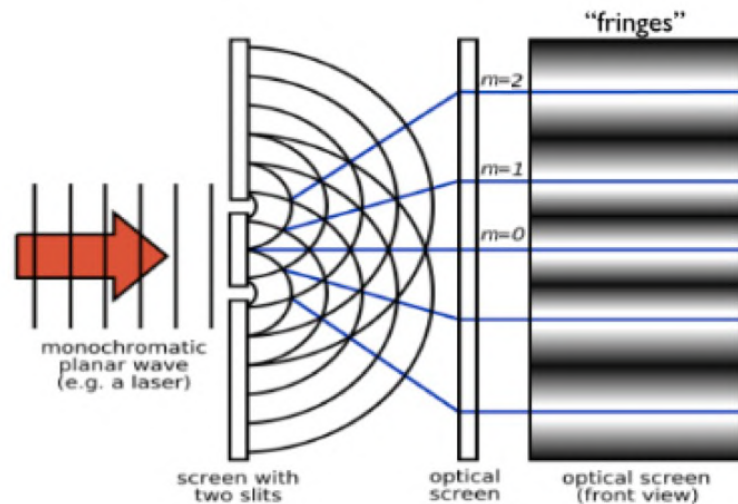
## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Η αρχή λειτουργίας είναι κατά βάση η ίδια σε σχέση με έναν 'απλό' φασματογράφο.  
Π.χ., Φασματογράφος πρίσματος – βασίζεται στο διαφορετικό δείκτη διάθλασης  $\mu$  ανά  $\lambda$ .  
Απλά επαναλαμβάνονται πολλές φορές οι διατάξεις, π.χ., πολλαπλά πρίσματα.



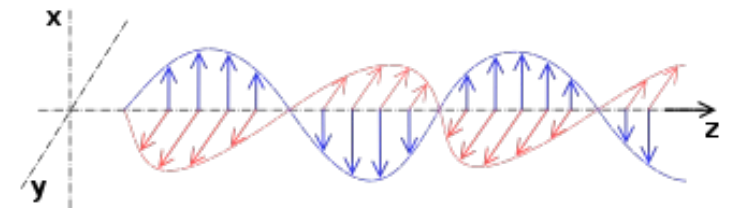
Συχνά, σε IFUs χρησιμοποιούνται  
**φασματογράφοι φράγματος όχι πρίσματος**

**Φράγματα** diffraction grating – **αρχή ανάλογη με πείραμα διπλής οπής** του Young.  
Η ιδέα είναι να εισάγουμε έξτρα μήκος που πρέπει να καλυφθεί από μια δέσμη φωτός.

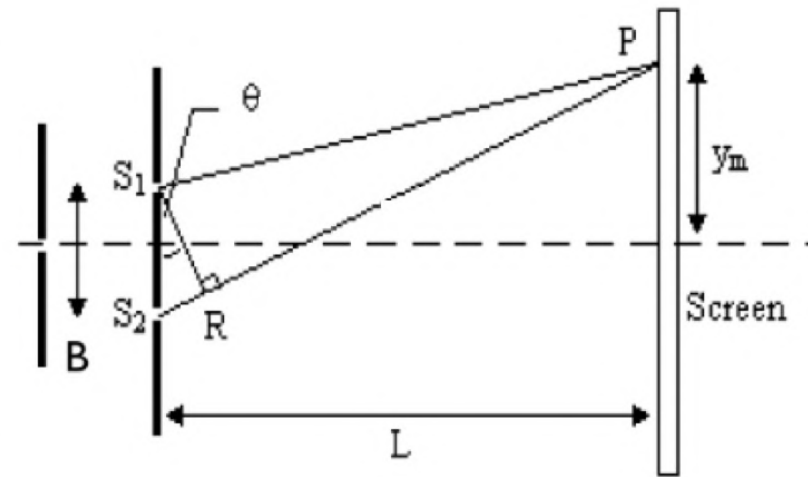
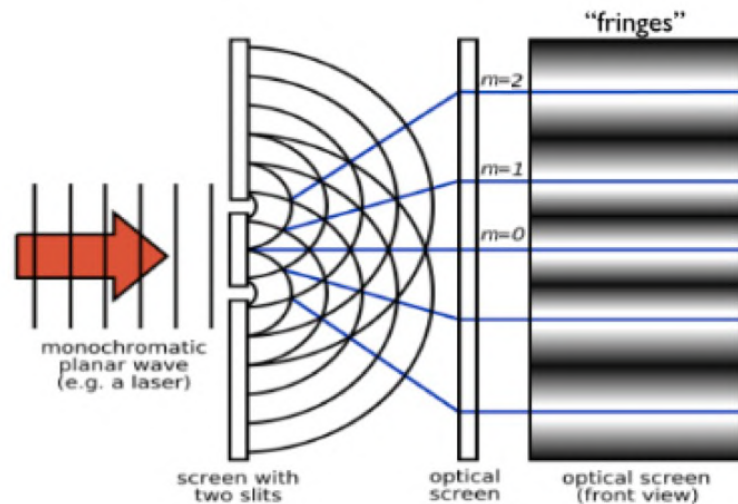


$B \sin \theta$  είναι το έξτρα μήκος (που αντιστοιχεί σε καθυστέρηση φάσης) των ακτίνων που πέρασαν από την κάτω σχισμή.

Ενισχυτική συμβολή:  $B \sin \theta = m\lambda$ ,  
εφόσον οι 2 δέσμες φωτός έχουν ίδια φάση.



**Φράγματα** diffraction grating – **αρχή ανάλογη με πείραμα διπλής οπής** του Young.  
Η ιδέα είναι να εισάγουμε έξτρα μήκος που πρέπει να καλυφθεί από μια δέσμη φωτός.

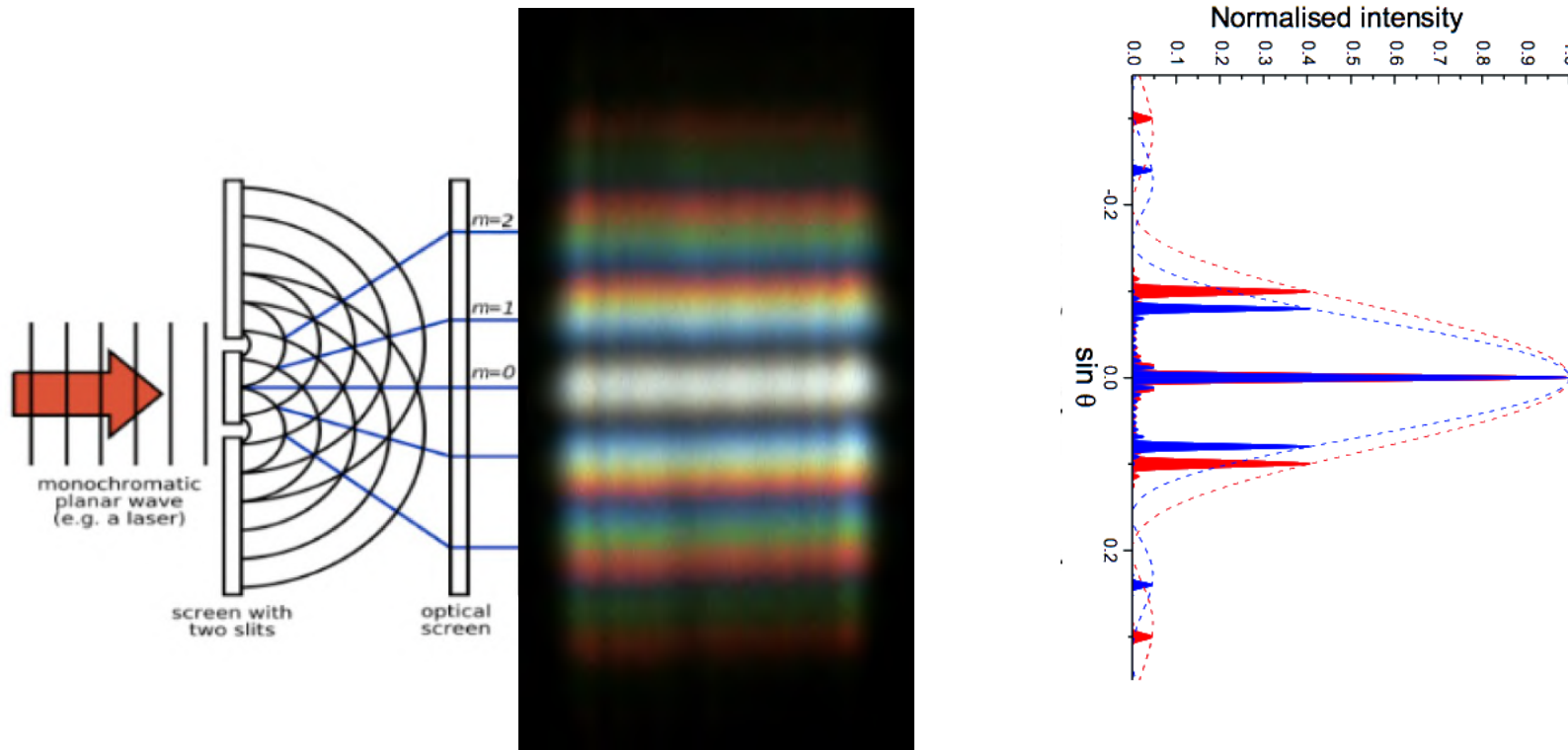


$B \sin \theta$  είναι το έξτρα μήκος (που αντιστοιχεί σε καθυστέρηση φάσης) των ακτίνων που πέρασαν από την κάτω σχισμή.

Ενισχυτική συμβολή:  $B \sin \theta = m\lambda$ ,

Καταστρεπτική συμβολή:  $B \sin \theta = (m + 1/2) \lambda$  όπου  $m$  ακέραιος

**Φράγματα** diffraction grating – αρχή ανάλογη με πείραμα διπλής οπής του Young.  
Το προηγούμενο γράφημα αφορούσε μονοχρωματικό φως (π.χ., από laser)



Αν το φως που περάσει δεν είναι μονοχρωματικό, τότε για τάξεις περίθλασης  $m > 0$  μέγιστα σε διαφορετικά  $\theta$  ώστε να ικανοποιείται το  $B \sin \theta = m\lambda$ .

**Τοποθετούμε κάμερα σε κάποια από τις παραπάνω τάξεις** -> ισχύ/λ -> φάσμα  
και μάλιστα με μεγαλύτερη διασπορά όσο ανεβαίνει η τάξη (με αντίτιμο στην ισχύ).

**Πώς κατασκευάζεται;** αντί για 2 σχισμές, βασίζονται στην ανάκλαση του φωτός από (μεταλλικές) επιφάνειες με πολλαπλά «σκαλοπάτια» που εισάγουν "extra light path".

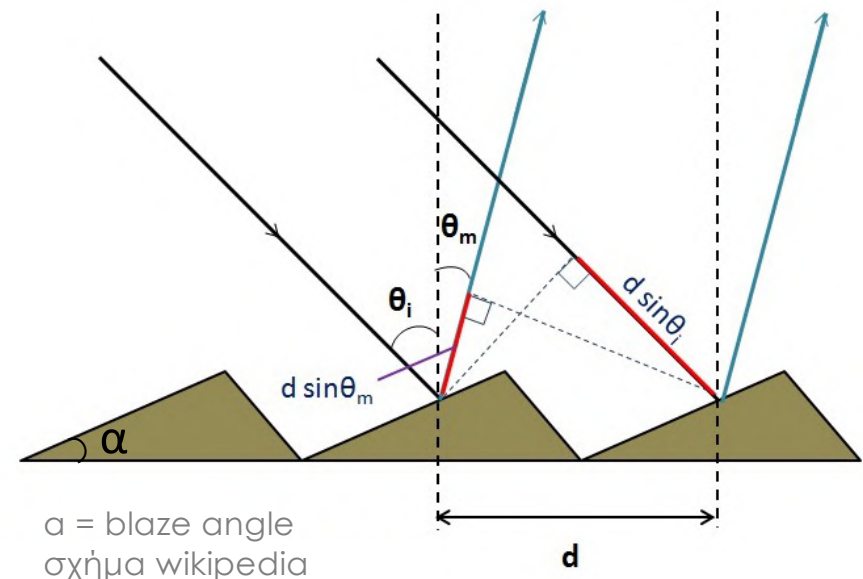
Οι ακτίνες είναι παράλληλες εώς ότου ανακλαστεί η 1<sup>η</sup> και μετά πάλι όταν ανακλαστεί η 2<sup>η</sup>.

Το έξτρα μήκος που έχει διανυθεί είναι  $d \sin \theta_i - d \sin \theta_m$  και πάλι μπορούμε να έχουμε ενισχυτική ή καταστρεπτική συμβολή, ανάλογα με τη γωνία ανάκλασης. Για ενισχυτική:

$$d \sin \theta_i - d \sin \theta_m = m \lambda$$

Η παράγωγος της σχέσης δίνει τη γωνιακή διασπορά, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι σε κάθε φασματογράφο το φως **πέφτει με καθορισμένη  $\theta_i$** . Αγνοώντας το πρόσημο που αφορά στην Κατεύθυνση, έχουμε,  $d \cos \theta_m \delta \theta_m = m \delta \lambda$   
->  $\delta \theta_m / \delta \lambda = m / (d \cos \theta_m)$

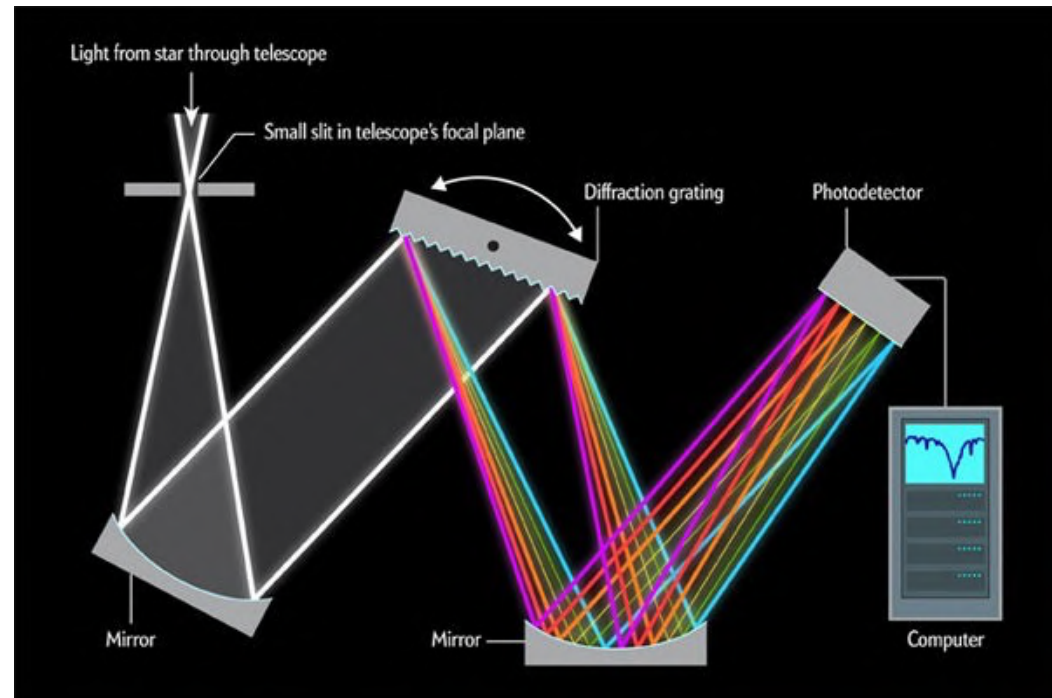
Δηλ. το κάθε μήκος κύματος έχει ενισχυτική συμβολή για άλλη γωνία  $\theta_m$ , δίνοντας φάσμα.  
-> μεγάλες γωνίες και τάξεις, μεγαλύτερη ανάλυση του φάσματος.



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Τη γωνιακή διασπορά ( $d\phi$  ή  $d\theta_m$ ) μπορούμε να την μετατρέψουμε σε και μήκος τόξου ( $\sim$  μήκος επί του ανιχνευτή μας για μικρές γωνίες), άρα τελικά σε γραμμική διασπορά χρησιμοποιώντας την εστιακή απόσταση  $f_2$  του τελικού καθρεπτη/φακού που εστιάζει και πάλι το φως ανά  $\lambda$  στον ανιχνευτή.

$$\frac{d\ell}{d\lambda} = f_2 \frac{d\phi}{d\lambda}$$



Αν όπου  $d\ell$  βάλουμε το μήκος κύματος του φωτός  $\lambda$ , τότε έχουμε τον ορισμό της **Φασματικής ανάλυσης** ή **διακριτικής ικανότητας φάσματος – spectral resolution** ή **resolving power**,  $R = \lambda/\Delta\lambda$ .

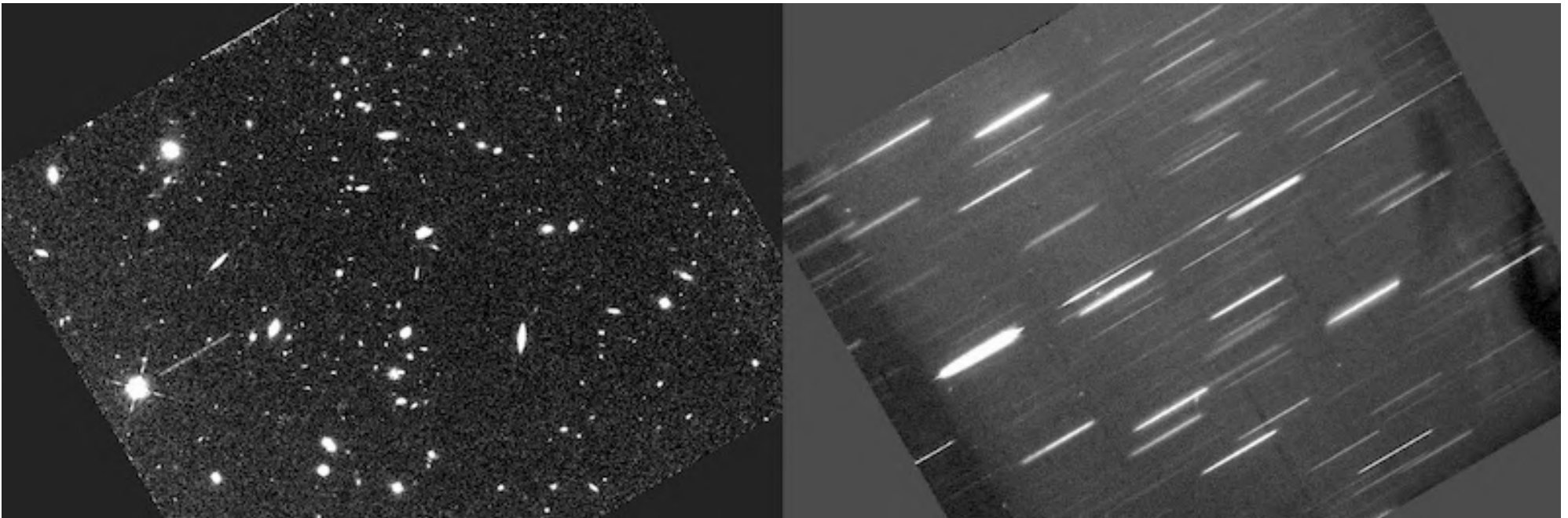
Θυμηθείτε επίσης από τον ορισμό της ερυθρομετατόπισης ότι  $V = cz = c \Delta\lambda/\lambda$   
άρα η διακριτική ικανότητα εκφρασμένη σε ταχύτητα είναι  **$V_R = c/R \sim 3 \cdot 10^5 / R \text{ km/s}$** .

## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Συνδυάζοντας πρίσματα και φράγματα: **grism** (grating prism)

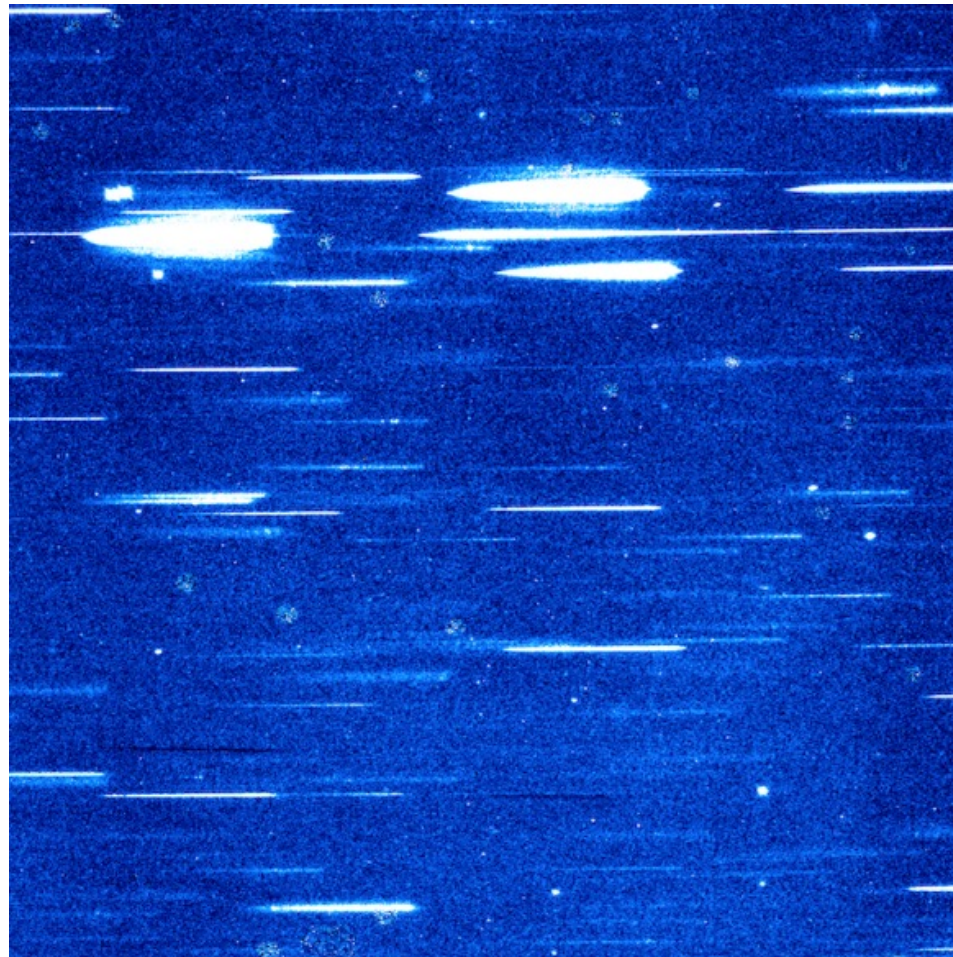
Οπτικό σύστημα με φράγμα και πρίσμα, διατεταγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε σε επιλεχθέν μήκος κύματος το φως να περνάει ευθυγράμμα. Τότε, μπορεί μια κάμερα να χρησιμοποιηθεί εναλλάξ για φωτομετρία ή φασματοσκοπία

Π.χ., WFC3 grism δεδομένα



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

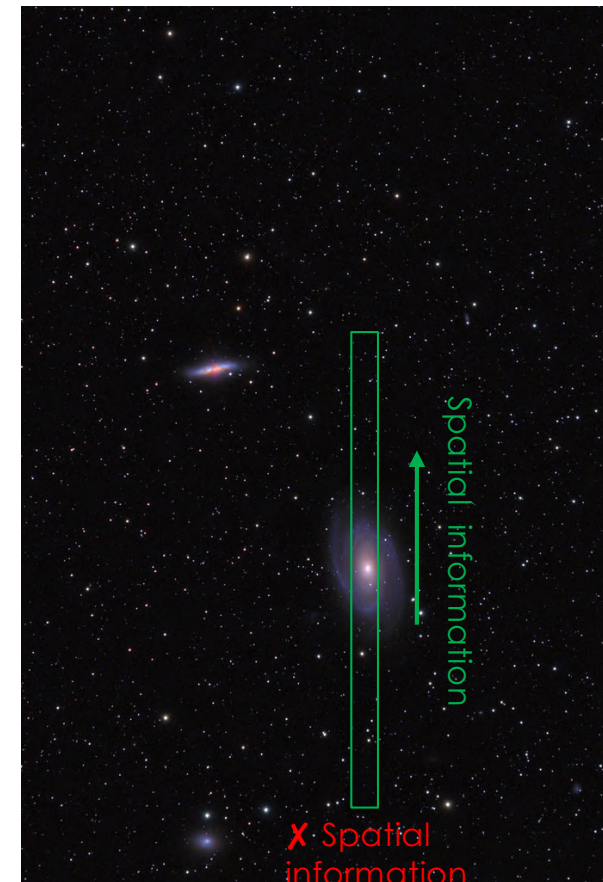
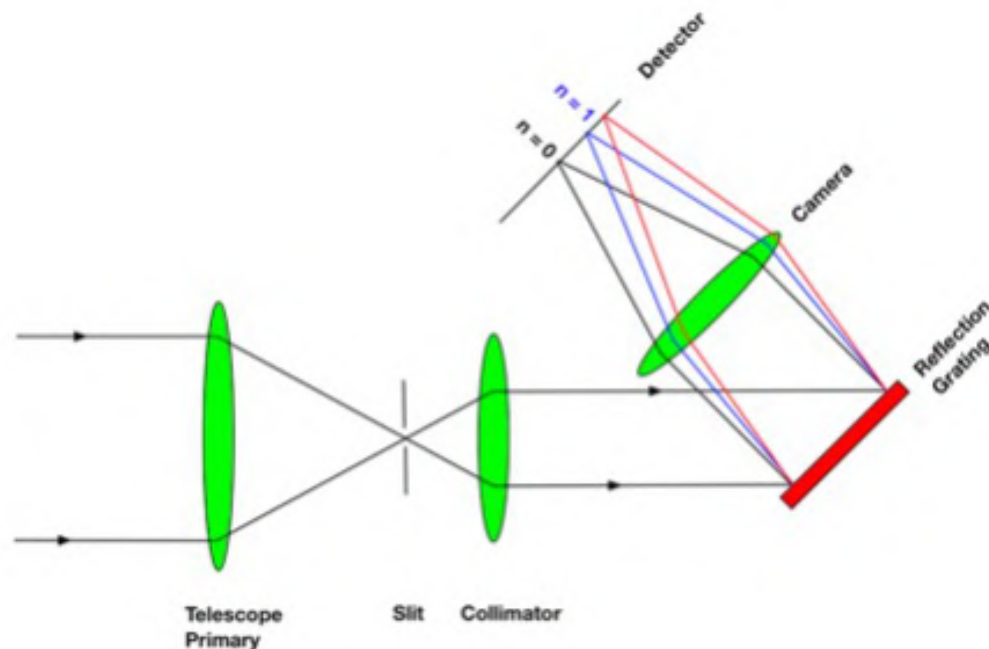
Για τη **φασματοσκοπία**, πέραν του «**dispersive element**», δηλ. του πρίσματος/φράγματος, χρειαζόμαστε και μια μάσκα, που μπλοκάρει το σήμα από τον ουρανό εκτός της **σχισμής** που μας ενδιαφέρει. **Αλλιώς θα έχουμε slitless spectroscopy, δηλαδή θα σκεδαστεί το φως όλων των αντικειμένων στην εικόνα, διαχωρισμένων χωρικά μόνο στον ένα άξονα.**



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Για τη **φασματοσκοπία**, πέραν του «**dispersive element**», δηλ. του πρίσματος/φράγματος, χρειαζόμαστε και μια μάσκα, που μπλοκάρει το σήμα από τον ουρανό εκτός της **σχισμής** που μας ενδιαφέρει όπως **φαίνεται στην εικόνα**.

Για να μπει η μάσκα με τη σχισμή, χρησιμοποιούνται καθρέπτες για να συγκλίνει το φως στην περιοχή της μάσκας και να αποκλίνει πάλι μετά, αλλιώς θα έπρεπε η μάσκα να μπει μπροστά από το τηλεσκόπιο με εξωπραγματικές διαστάσεις, π.χ., για τηλεσκόπιο 8 μέτρων.

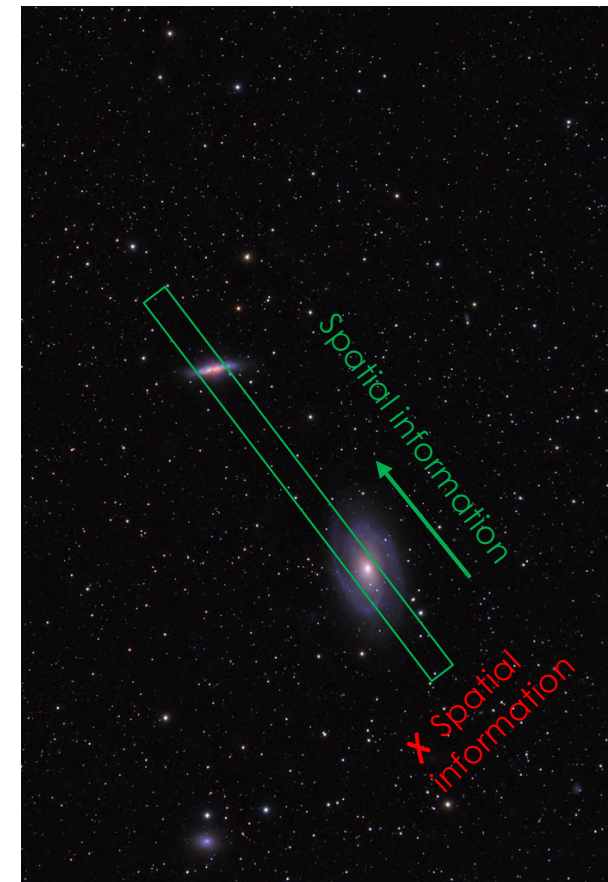
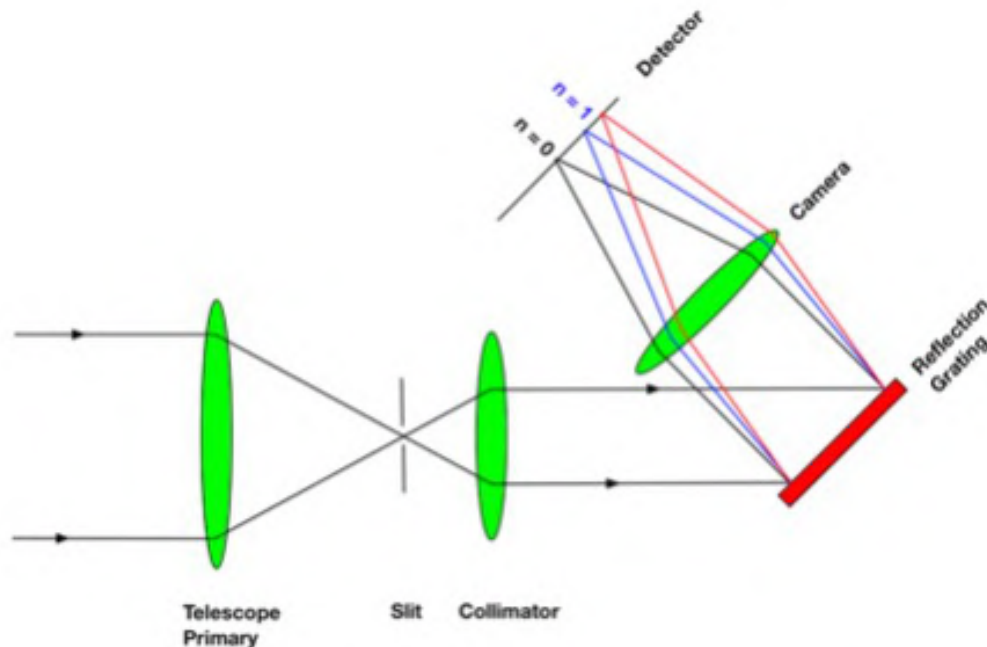


## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Για τη **φασματοσκοπία**, πέραν του «**dispersive element**», δηλ. του πρίσματος/φράγματος, χρειαζόμαστε και μια μάσκα, που μπλοκάρει το σήμα από τον ουρανό εκτός της **σχισμής** που μας ενδιαφέρει όπως **φαίνεται στην εικόνα**.

Για να μπει η μάσκα με τη σχισμή, χρησιμοποιούνται καθρέπτες για να συγκλίνει το φως στην περιοχή της μάσκας και να αποκλίνει πάλι μετά, αλλιώς θα έπρεπε η μάσκα να μπει μπροστά από το τηλεσκόπιο με εξωπραγματικές διαστάσεις, π.χ., για τηλεσκόπιο 8 μέτρων.

Η μάσκα στρέφεται ή μπορεί να έχει πολλές σχισμές.  
Η χωρική πληροφορία σώζεται μόνο **κατά τον 1 άξονα**.



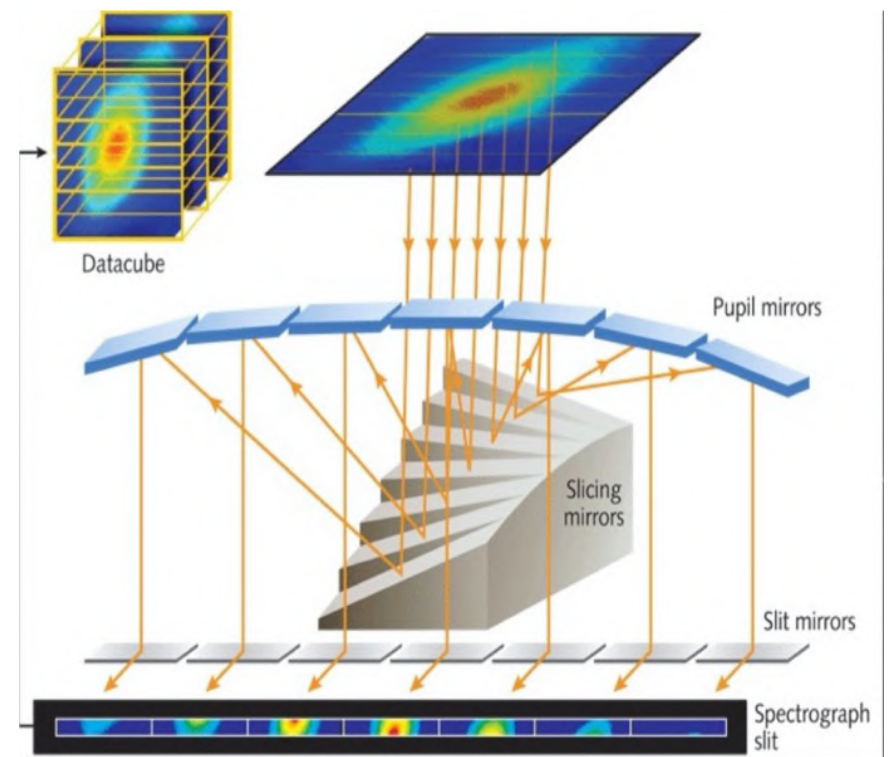
## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Ένα βήμα παραπέρα - **IFU data**:

Όμως η εισερχόμενη στο τηλεσκόπιο πληροφορία είναι τρισδιάστατη (2 άξονες για θέση στον ουρανό, 1 άξονα για  $\lambda$ ). Πώς μπορούμε τώρα να βάλουμε **πολλούς τέτοιους φασματογράφους** μαζί ώστε να μπορέσουμε να έχουμε φάσματα για κάθε pixel;

Η παλαιότερη μέθοδος: **image slicer** - αντικαθιστούμε τα slits της προηγούμενης σελίδας με σύστημα καθρεπτών υπό γωνία μεταξύ τους, το οποίο στέλνει το φως σε διαφορετική κατεύθυνση ανάλογα με το που ήρθε. Αντικαθιστούμε επίσης, τον φακό μετά τη σχισμή με σύστημα πολλών φακών, που ο καθένας εστιάζει το φως της αντίστοιχης ψευδο-σχισμής.

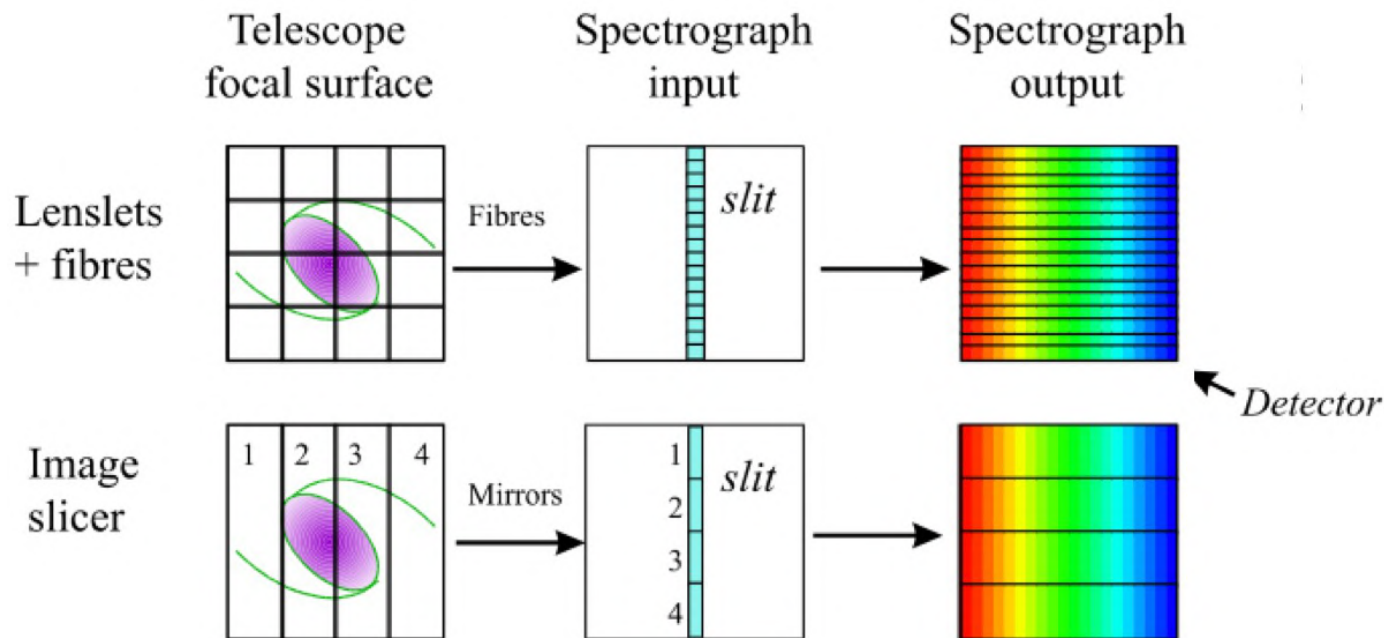
Μάλιστα, η γωνία είναι τέτοια ώστε το φως να εισέρχεται **σειριακά** στον φασματογράφο.



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Ένα βήμα παραπέρα - **IFU data**:

Εναλλακτική μέθοδος: **χρήση διδιάστατου πλέγματος φακών (lenslets)**, που 'διαχωρίζουν' το input από το τηλεσκόπιο σε υπο-περιοχές και το έσωζαν σε υπο-arrays. Η βέλτιστη μέθοδος σύνδεσης είναι το φως από τα lenslets να οδηγείται στο φασματογράφο με **οπτικές ίνες**, έτσι ώστε η εικόνα στην είσοδο του φασματογράφου να επαναδιοργανώνεται σαν ένα μεγαλύτερο γραμμικό pseudo-slit.



Έστω, τώρα, ότι έχουμε πάρει IFU δεδομένα (ακατέργαστα) και θέλουμε να τα αναλύσουμε...

Βαθμονομήσεις και μετρήσεις – διαφορετικοί τύποι frames:

- **Dark:** έκθεση με κλειστό κλείστρο ή κλειστο θόλο χωρίς φως. Στόχος: η μέτρηση του θερμικού θορύβου της κάμερας, δηλ. του σκοτεινού ρεύματος (dark current).

- Παίρνουμε τόσες μετρήσεις όσοι και οι διαφορετικοί χρόνοι έκθεσης όλων των εικόνων που θα πάρουμε κατά τη διάρκεια της νυχτας.

- Τα dark συμπεριλαμβάνουν το **bias**, δηλ. σταθερό σήμα που μετράμε θέτοντας την κάμερα σε δεδομένη τάση, με στόχο οι διακυμάνσεις του θορύβου να μην είναι γύρω από το 0 (σημείωση: το έλλειμα  $e^-$  χάνεται κατά τη ψηφιοποίηση μιας εικόνας).

Διόρθωση: αφαίρεση dark από την εικόνα, π.χ., γαλαξία.

- **Flat:** Χρησιμοποιώντας λάμπα συνεχούς και ομογενή φωτισμό στο θόλο, ελέγχουμε την απόκριση του κάθε pixel της κάμερας (αφορά και την quantum efficiency αλλά και το gain, την αποδοτικότητα της μετατροπής  $e^-$ /analog-to-digital units).

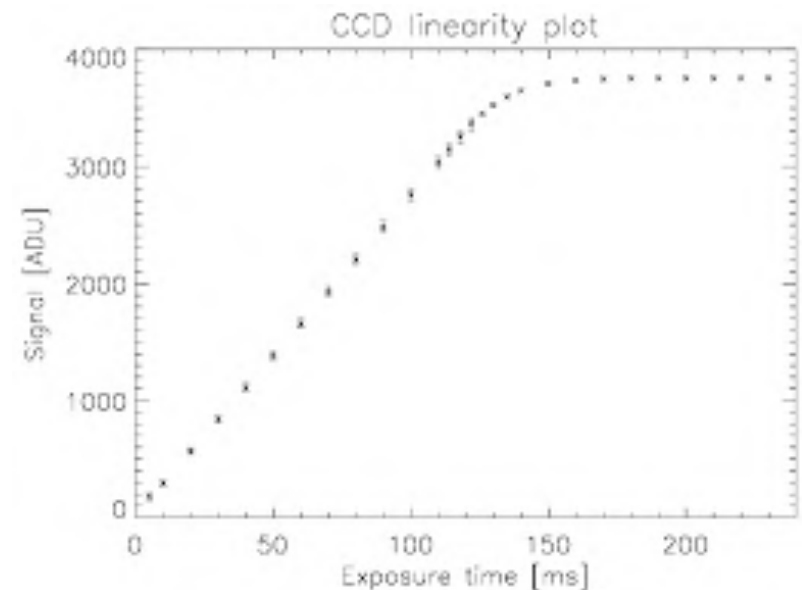
Διόρθωση: διαίρεση όλων των εικόνων με flat για να ληφθεί υπ' όψιν η χαμένη ροή

Βαθμονομήσεις και μετρήσεις – διαφορετικοί τύποι frames:

- **Linearity:** όπως ακριβώς και για το flat, χρησιμοποιούμε ομογενή φωτισμό του θόλου, αλλά για αυξανόμενο σε ένταση φως, ώστε να ελέγξουμε πότε η κάμερα θα σταματήσει να αποκρίνεται γραμμικά από την αύξηση των φωτονίων. Π.χ., πότε θα έρθει κορεσμός.

Διόρθωση:

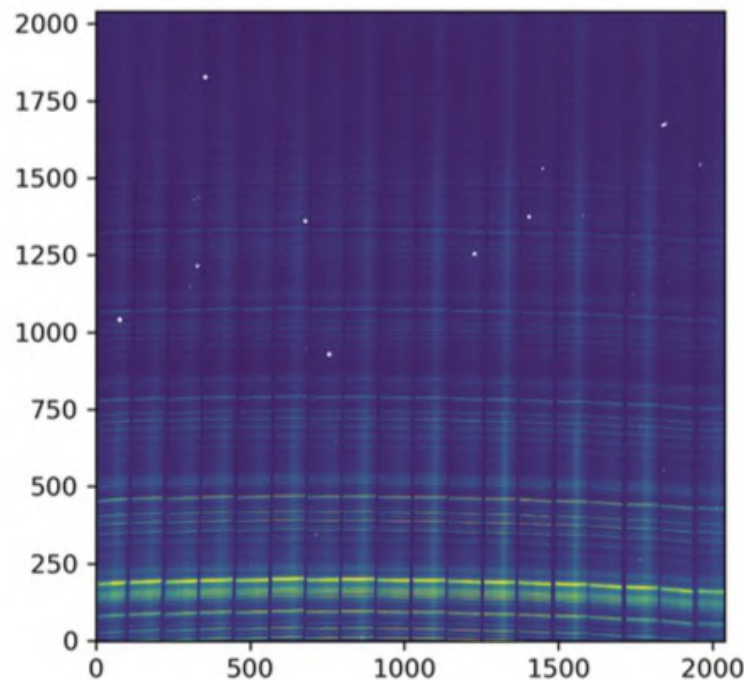
- τόσο το flat όσο και οι επιστημονικές εικόνες πρέπει να παρθούν σε περιοχές γραμμικής απόκρισης της κάμερας. Η μέτρηση αυτή γίνεται πριν από τα flat.



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Βαθμονομήσεις και μετρήσεις – διαφορετικοί τύποι frames:

- **distortion:** οι εικόνες στην κάμερα έχουν distortions εξ' αιτίας των οπτικών δηλ. ένα φάσμα δεν είναι απαραίτητα γραμμικό (βλέπε παράδειγμα).



Βάζουμε μια σημειακή πηγή – ένα οπτικό νήμα κοντά στη καθεμία ψευδοσχισμή, φωτίζοντάς την ώστε να ιχνηλατίσουμε το φάσμα.

Διόρθωση: κάνουμε πολυωνυμικό fit σε 2 διαστάσεις, ακολουθώντας το εκάστοτε φάσμα/γραμμή και διορθώνουμε την εικόνα με αυτό.

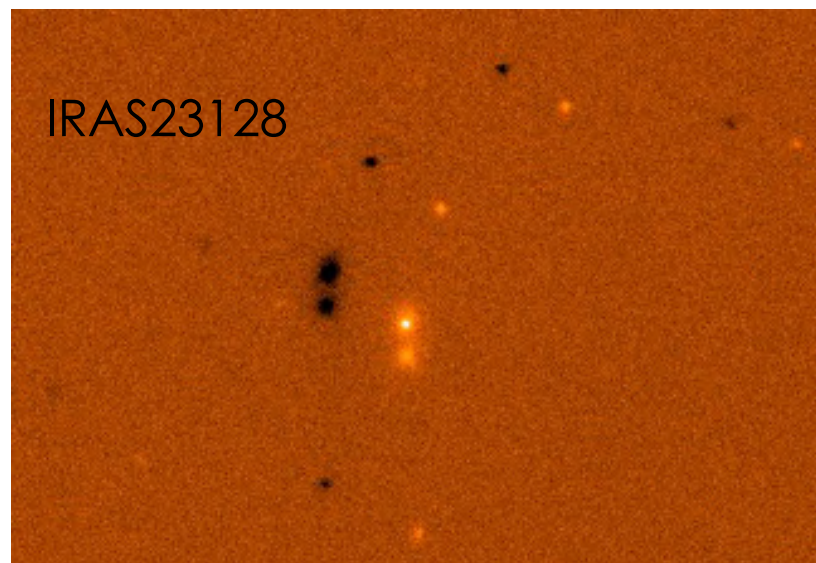
## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Βαθμονομήσεις και μετρήσεις – διαφορετικοί τύποι frames:

- **sky:** έκθεση στον ουρανό για την αφαίρεση του κοσμικού υποβαθρου, συν κάποιων γραμμών εκπομπής της ατμόσφαιρας (π.χ., OH) πλέον του σήματος της πηγής. Πρέπει να έχει ίδιο χρόνο έκθεσης με την εικόνα από την οποία θα αφαιρεθεί.

Παράδειγμα παρατήρησης γαλαξία από target acquisition καμερα του Very Large Telescope: για να φανεί ο γαλαξίας πρέπει να αφαιρεθεί ο ουρανός μετακινώντας το τηλεσκόπιο.

Η ορολογία μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τις κινήσεις του τηλεσκοπίου, αλλά συχνά μιλάμε για nod και dither. Nod αν είναι μικρό το offset και ο στόχος παραμένει στο field-of-view της κάμερας. Dither αν όχι. Επίσης υπάρχει το chop, που χρησιμοποιείται κυρίως στο ραδιοφωνικό και κινείται ένα δευτερεύον μέρος της διάταξης (δευτερεύον κάτοπτρο ή άλλο τμήμα).

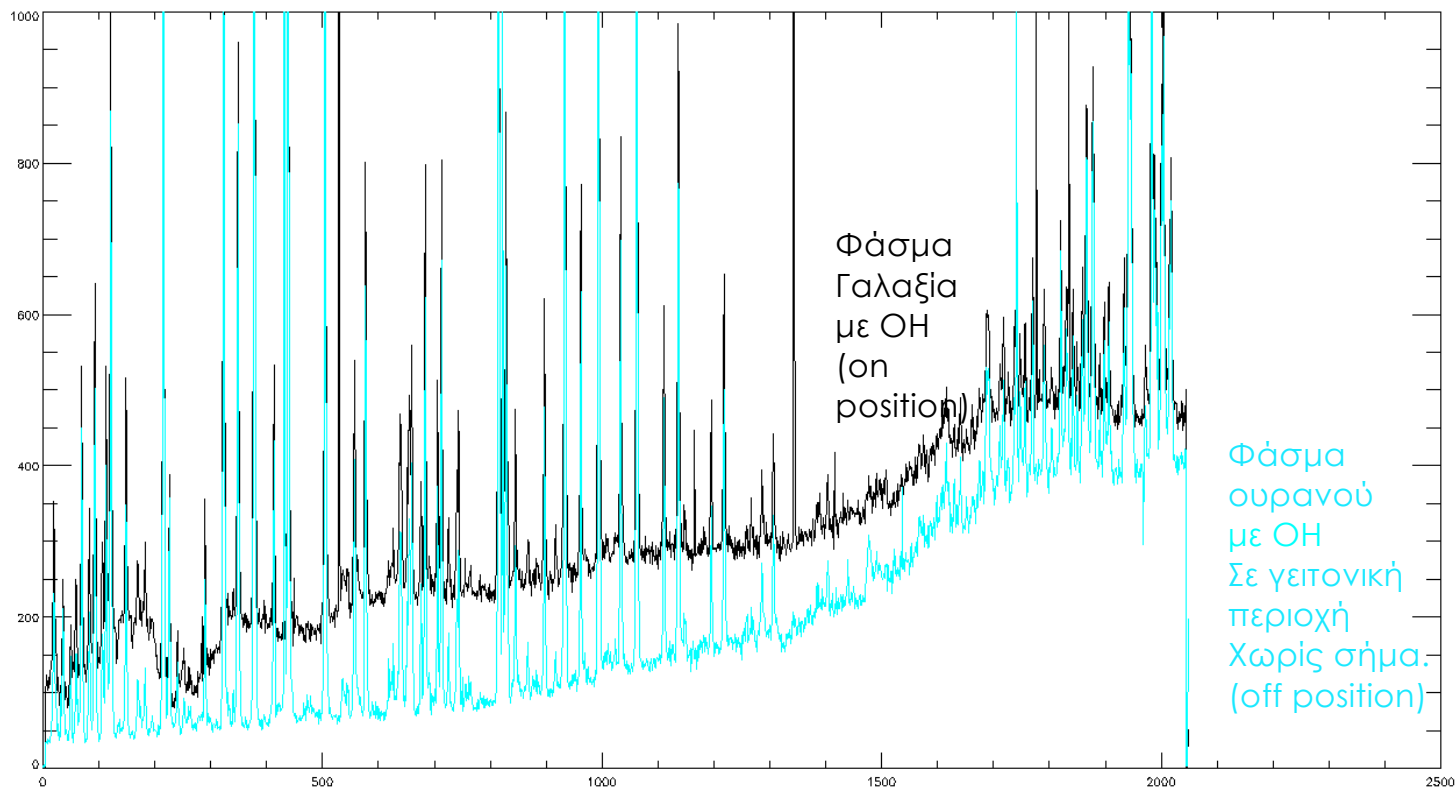


## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Βαθμονομήσεις και μετρήσεις – διαφορετικοί τύποι frames:

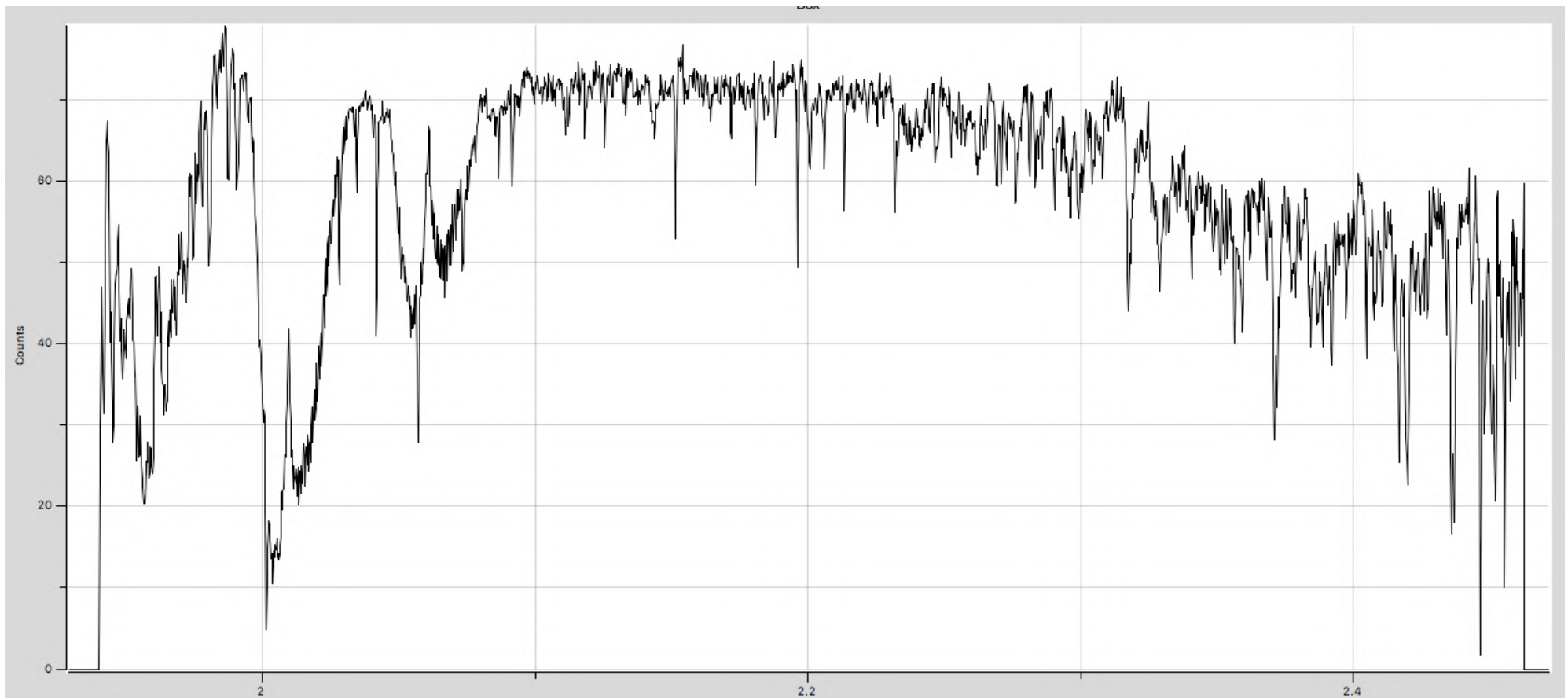
- **wavelength:** λάμπα από 1 ή περισσότερα στοιχεία, που μας επιτρέπουν να βαθμονομήσουμε το φασματοσκοπικό άξονα. Μπορούν, στο υπέρυθρο, αντί λάμπας να χρησιμοποιήσουμε τα OH τα ίδια.

Γραμμές εκπομπής OH: πώς φαίνεται το φάσμα του γαλαξία NGC6328 στο IR.



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

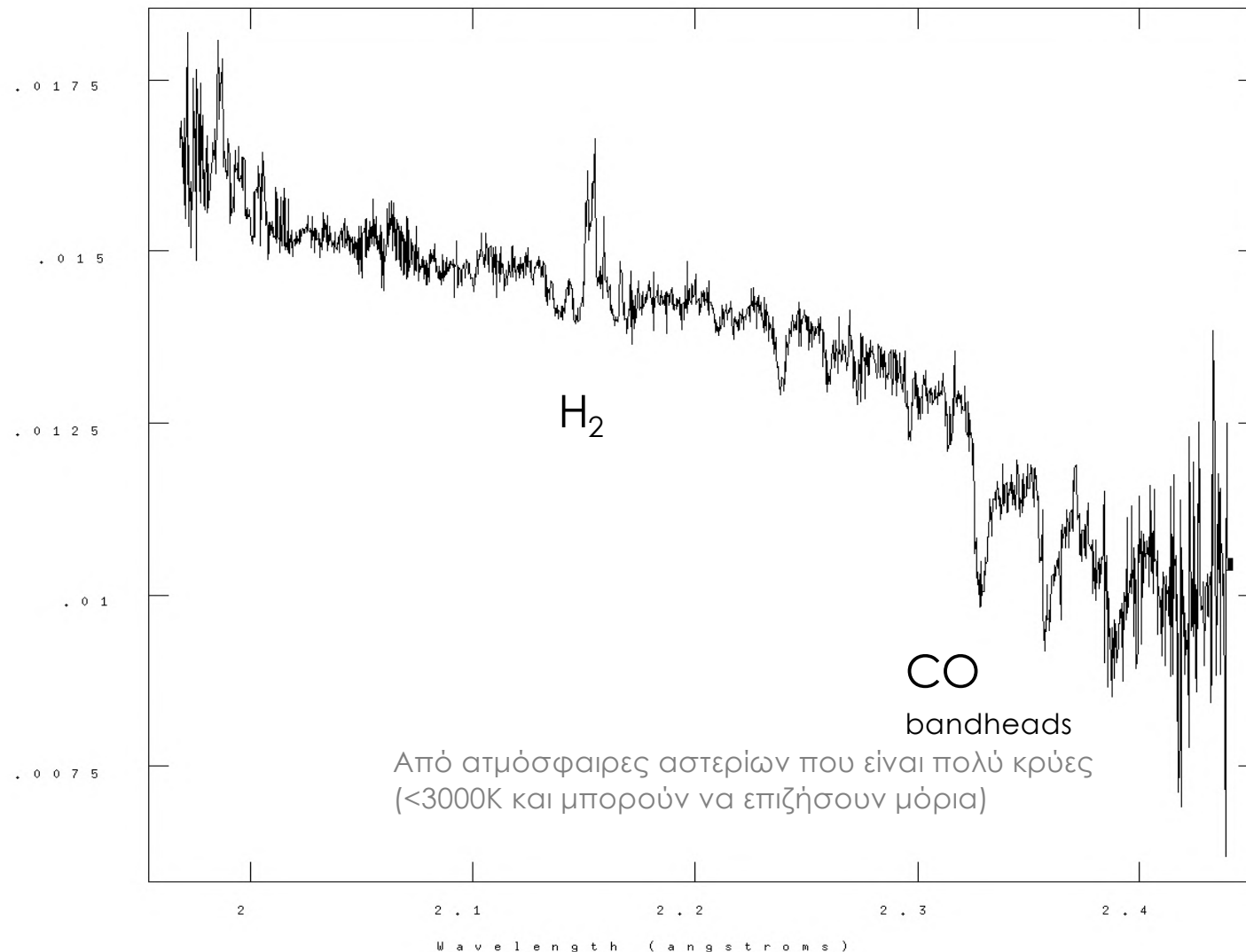
Επόμενο - κι ακόμα πιο σημαντικό πρόβλημα με την ατμόσφαιρα – γιατί αφορά πολλά μήκη κύματος: απορρόφηση του παρατηρούμενου σήματος λόγω (κυρίως) υδρατμών! Αυτό είναι το φάσμα που προκύπτει όταν αφαιρέσουμε φάσμα «ουρανού» από πηγής!



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Μόνο μετά τη διόρθωση της απορρόφησης της ατμόσφαιρας (π.χ., βάσει μοντέλου) μπορούμε να καταλήξουμε στο φάσμα του γαλαξία της παρατήρησης (NGC6328)

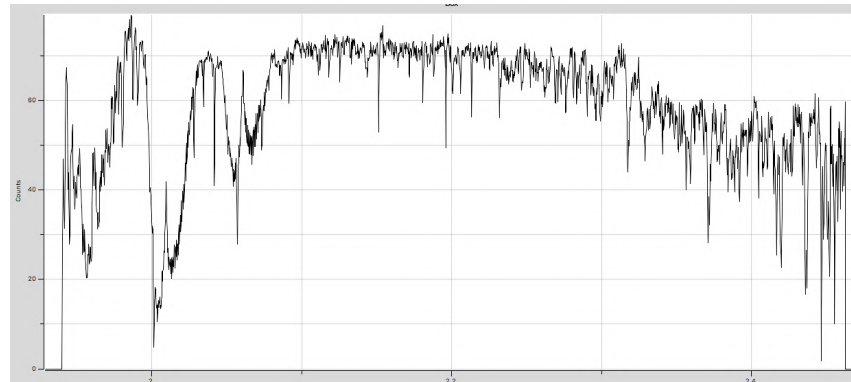
- Το πραγματικό σήμα είναι θαμμένο κάτω από πολλά συστηματικά!



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Βαθμονομήσεις:

- **telluric star:** παρατήρηση άστρου γνωστού φασματικού τύπου και μεταλλικότητας για την εύρεση της απορρόφησης της ατμοσφαιρας. Γίνεται ανά 1 ώρα.



- **Standard star:** flux calibrator. Παρατηρείται για να μπορέσουμε να αντιστοιχήσουμε τα φωτοηλεκτρόνια που λάβαμε σε ροή. Εξαρτάται και από τα μέρη του τηλεσκοπίου αλλά και από τη βραδιά (seeing). Γίνεται παντα, 1 φορά, στην αρχή ή στο τέλος της παρατήρησης.  
Ως telluric και standard star μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η ίδια πηγή.

**Flux calibration:** Πάντα γίνεται βάσει αστεριού γνωστής ροής.

Πολλές φορές όμως, η ροή δίνεται και σαν φαινόμενο μέγεθος, άρα πρέπει να μπορούμε να δουλεύουμε είτε με τη μια ποσότητα είτε με την άλλη. Υπάρχουν 2 συστήματα αναφοράς για να κάνουμε τη μετατροπή σε  $m$ , πάντα σαν  $m - m_0 = -2.5 \log(f/f_0)$ .

**1) Vega mag (κλασσικό):** η ροή του Vega σε κάθε μπάντα αντιστοιχεί σε μηδενικό φαινόμενο μέγεθος  $m_0$ .

$$m = -2.5 \log_{10} \left( \frac{f}{f_0} \right) \quad \text{άρα } m = -2.5 \log(f) + \text{zeropoint}(v)$$

Όμως ο Vega είχε 2 προβλήματα – έχει εκπομπή στο **IR από δίσκο σκόνης** και έχει ροή που κατανέμεται **φασματικά με τρόπο δυσκολομνημόνευτο**. Γι' αυτό το λόγο, αντικαταστήθηκε από άλλο σύστημα, το

**2) AB mag (πιο πρόσφατο):** εδώ το μηδενικό AB mag αντιστοιχεί ροή  $F_\nu = 3631 \text{ Jy}$  σε όλα τα μήκη κύματος. Η ροή αυτή είναι η ίδια με του Vega στην V band – εκεί τα δύο συστήματα ταυτίζονται! Για αυτή τη ροή, έχουμε

$$m_{AB} \approx -2.5 \log_{10} \left( \frac{f_\nu}{3631 \text{ Jy}} \right) \quad \text{ή} \quad m_{AB} = -2.5 \log_{10} f_\nu - 48.6 \text{ αν } [f]: \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

## Vega Flux Zeropoints

| Quantity               | U     | B      | V     | R     | I     | J     | H     | K     | Notes and units                                                                                    |
|------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\lambda_{\text{eff}}$ | 0.36  | 0.438  | 0.545 | 0.641 | 0.798 | 1.22  | 1.63  | 2.19  | microns                                                                                            |
| $\Delta\lambda$        | 0.06  | 0.09   | 0.085 | 0.15  | 0.15  | 0.26  | 0.29  | 0.41  | microns, UBVRI from Bessell (1990), JHK from AQ                                                    |
| $f_{\nu}$              | 1.79  | 4.063  | 3.636 | 3.064 | 2.416 | 1.589 | 1.021 | 0.64  | $\times 10^{-20} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$ , from Bessell et al. (1998)  |
| $f_{\lambda}$          | 417.5 | 632    | 363.1 | 217.7 | 112.6 | 31.47 | 11.38 | 3.961 | $\times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ , from Bessell et al. (1998) |
| $\Phi_{\lambda}$       | 756.1 | 1392.6 | 995.5 | 702.0 | 452.0 | 193.1 | 93.3  | 43.6  | photons $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ , calculated from above quantities        |

These are for the Vega magnitude system and the Bessell et al. (1998) Johnson-Cousins-Glass System.

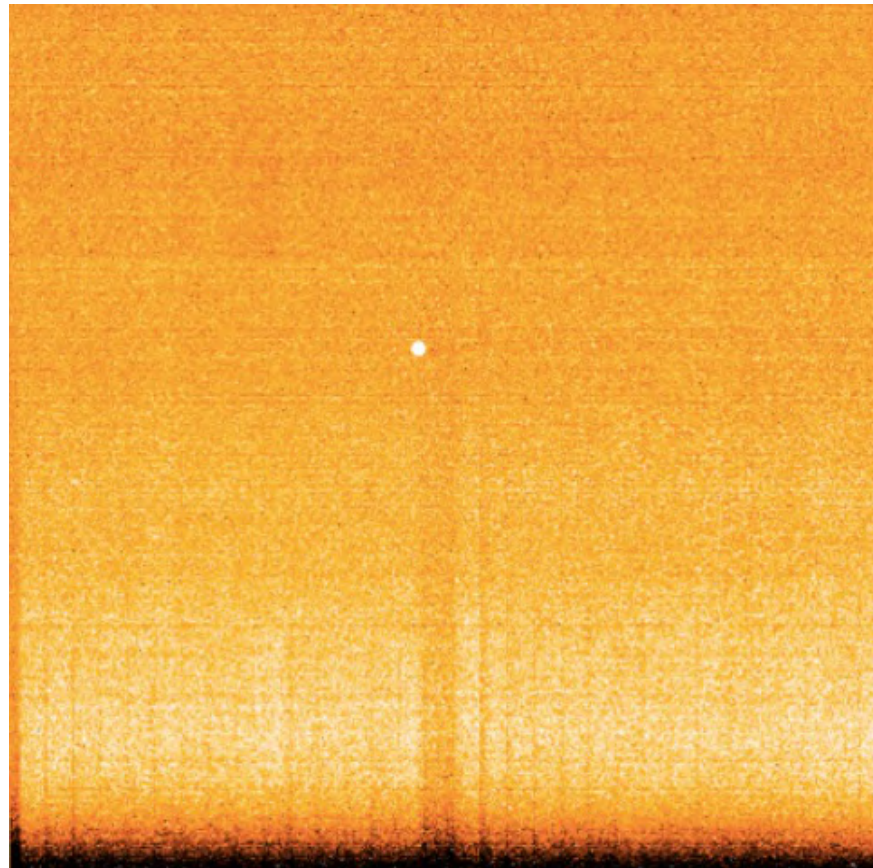
## AB Flux Zeropoints

| Quantity               | u      | g      | r      | i      | z      | Notes and units                                                                                          |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\lambda_{\text{eff}}$ | 0.356  | 0.483  | 0.626  | 0.767  | 0.910  | microns, from Fukugita et al. (1996)                                                                     |
| $\Delta\lambda$        | 0.0463 | 0.0988 | 0.0955 | 0.1064 | 0.1248 | microns, from Fukugita et al. (1996)                                                                     |
| $f_{\nu}$              | 3631   | 3631   | 3631   | 3631   | 3631   | Jy or $\times 10^{-23} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$                               |
| $f_{\lambda}$          | 859.5  | 466.9  | 278.0  | 185.2  | 131.5  | $\times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ , calculated from above quantities |
| $\Phi_{\lambda}$       | 1539.3 | 1134.6 | 875.4  | 714.5  | 602.2  | photons $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ , calculated from above quantities              |

### Παραδείγματα από SINFONI data (IR IFU στο Very Large Telescope):

Dark (για το οπτοηλεκτρονικό θόρυβο):

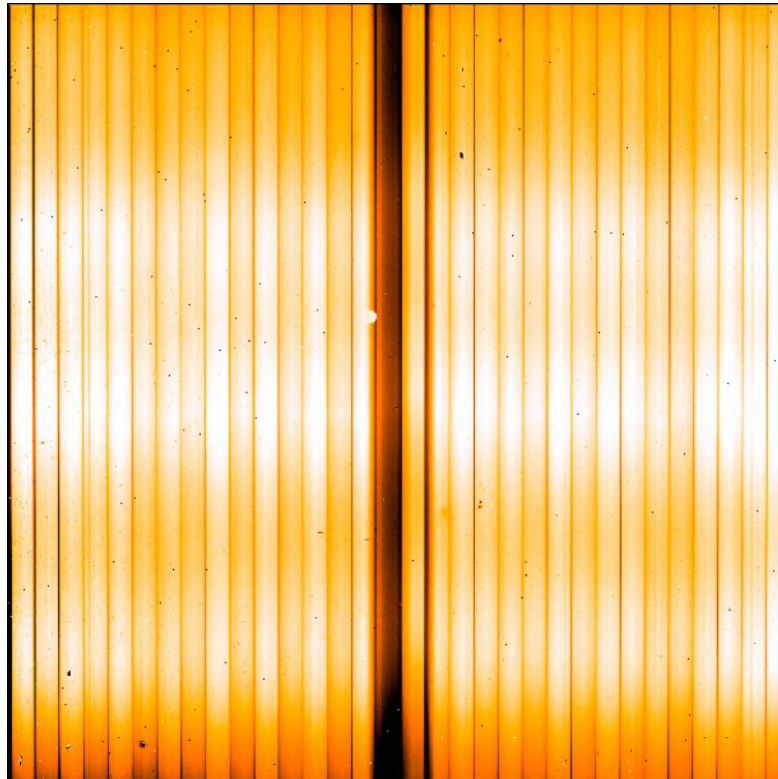
- **Δεν έχουμε {σημαντικό} σήμα** είτε από μέσα είτε έξω από το θόλο.
- παίρνουμε τόσα όσα και **τα exposure times** των εικόνων μας, για οποιαδήποτε εικόνα μας ενδιαφέρει η ροή, ώστε να τα αφαιρέσουμε. Όμως, μπορεί και να μη χρειαστούν: όταν αφαιρούμε ουρανό από εικόνα, αφαιρούνται και τα αντίστοιχα darks.



### Παραδείγματα από SINFONI data:

Flat (για τη διαφορετική απόκριση των pixel):

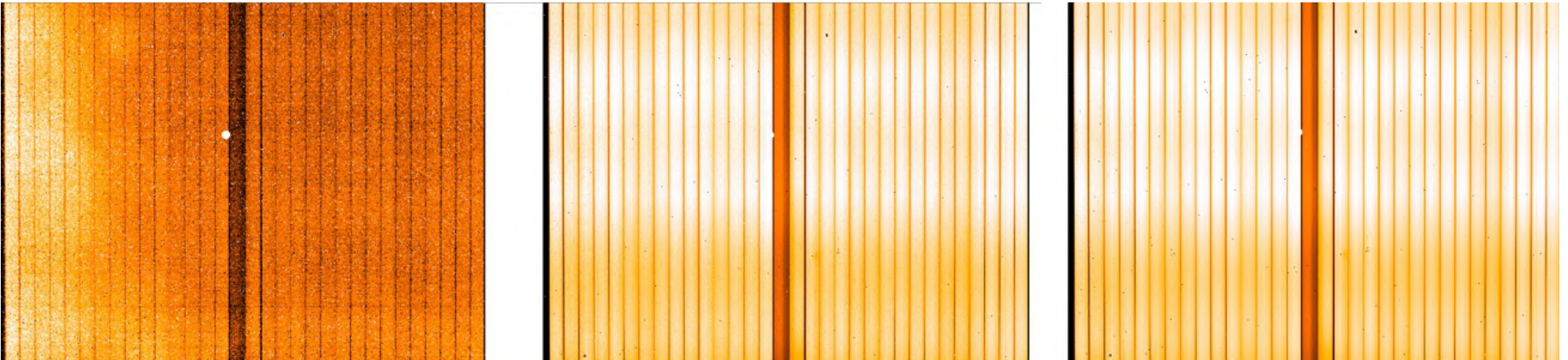
- Εικόνα ομογενούς φωτισμού θόλου με λάμπα συνεχούς,
- η μέγιστη τιμή της έντασης **κανονικοποιημένη στη μονάδα** για να αφορά σε ποσοστό
- δεν υπάρχει σήμα εκτός θόλου (είναι κλειστός).



### Παραδείγματα από SINFONI data:

Linearity:

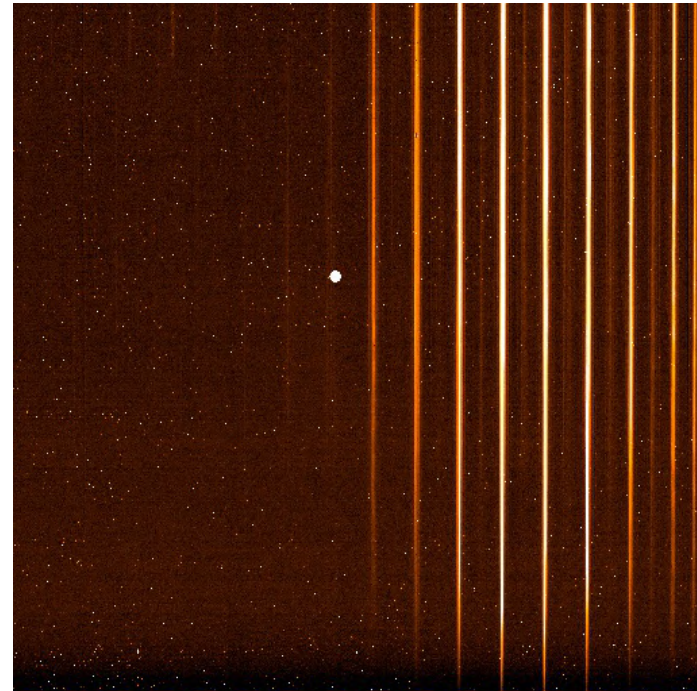
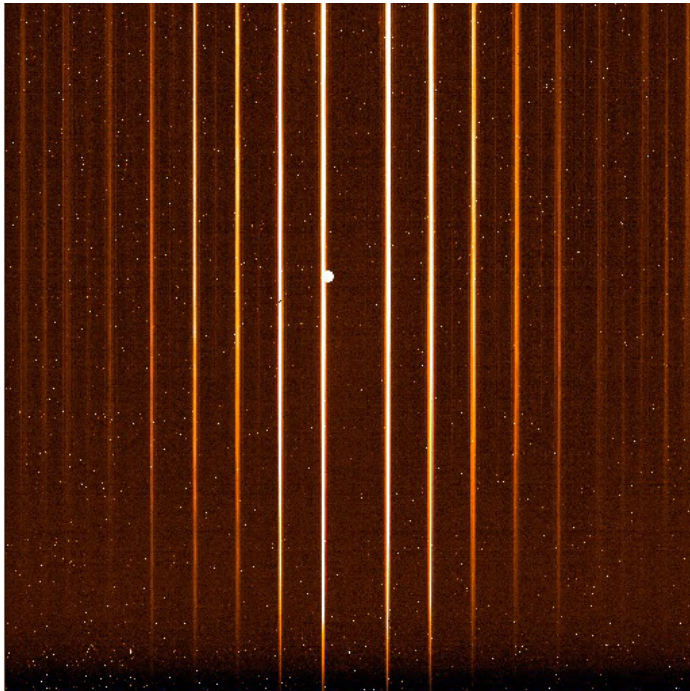
- Ελέγχουμε πότε η κάμερά μας δεν ακολουθεί γραμμικότητα στη μετατροπή φωτονίων σε  $e^-$ , και πότε επέρχεται κορεσμός.
- **Κάνουμε πολλαπλές μετρήσεις**, ρίχνοντας όλο και περισσότερο φως, ομογενώς πάντα κατανεμημένο.



## Παραδείγματα από SINFONI data:

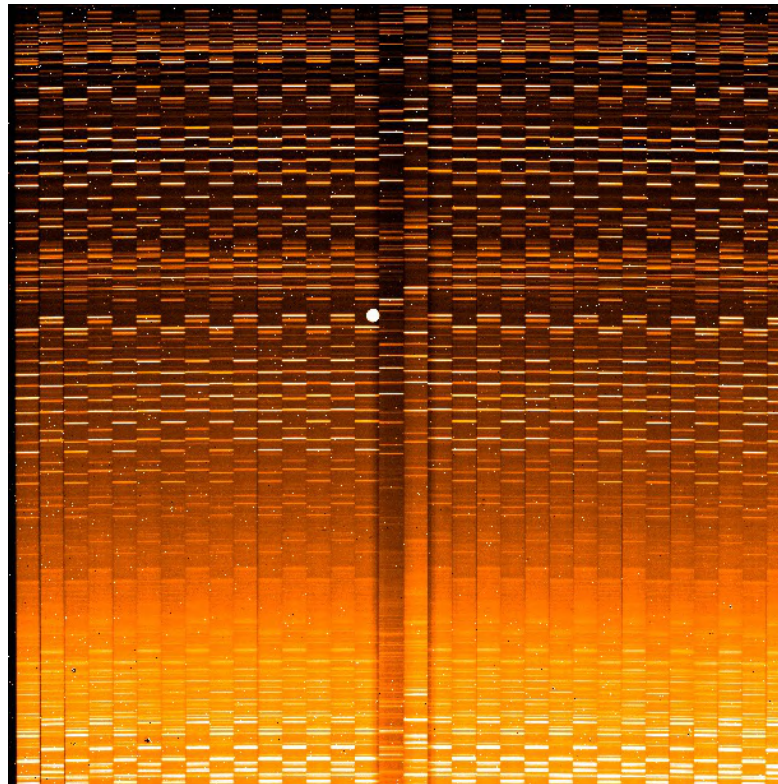
Distortion:

- Φωτισμός από οπτικό νήμα για να μετρήσουμε αποκλίσεις του οπτικού ίχνους από γραμμικότητα. Το οπτικό νήμα μπαίνει εναλλάξ **μπροστά από κάθε slitlet**. Αλλάζει μετά η θέση του.



**Παραδείγματα από SINFONI data:**

Sky subtraction: Εδώ **η διάκριτη πληροφορία αφορά στα OH**. Το κοσμικό υπόβαθρο εννιαίο. (όταν βλέπουμε OHs, ο θόλος είναι ανοιχτός).

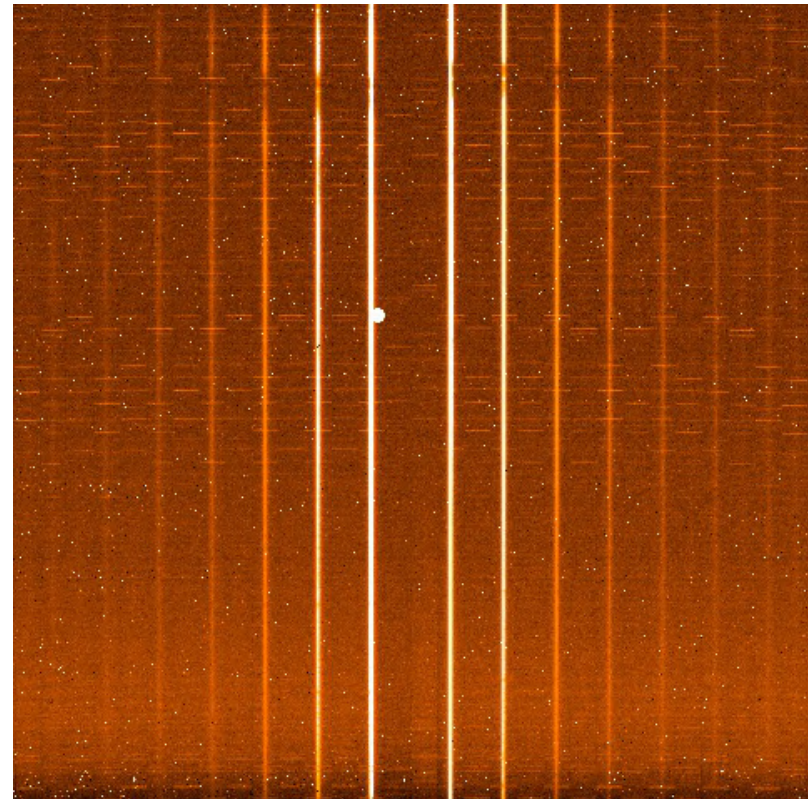
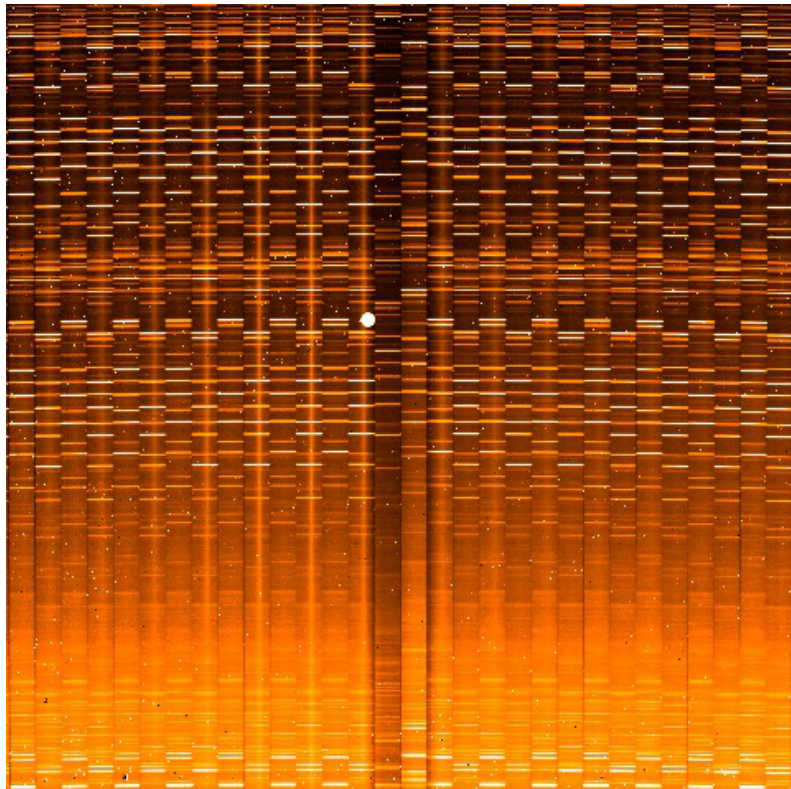


### Παραδείγματα από SINFONI data:

Έκθεση – είτε για αστέρι, είτε για target (π.χ. γαλαξία). Σήμα στον φασματοσκοπικό+ΟΗ.

Πώς μπορούμε να τα ξεχωρίσουμε;

- 1) Από το χρόνο παρατήρησης (φαίνεται σε σχέση με τα ΟΗ) και τη
- 2) το μέγεθος της πηγής στη **χωρική** (μη φασματοσκοπική) κατεύθυνση των δεδομένων:  
ο γαλαξίας εκτεταμένος



- **Science frame** – ο στόχος μας.

Καθοριστικός ο **χρόνος έκθεσης** όταν σχεδιάζουμε μια παρατήρηση:

Έστω ότι έχουμε πηγή γνωστής ροής  $f$  και τηλεσκόπιο/όργανο γνωστής ευαισθησίας ( $1\sigma$ ), ο χρόνος έκθεσης θα καθοριστεί από το πηλίκο σήματος/θόρυβο ( $S/N$ ) στο οποίο θέλουμε να φτάσουμε. Υπενθύμιση: σήμα/χρόνο  $\sim$  ροή  $f = L / (4\pi R^2) = (dE/dt) / (4\pi R^2)$ , Η ροή είναι σταθερή στο χρόνο, ως εσωτερική ποσότητα της πηγής.

Σήμα/signal ( $S$ ):  $S \sim f * n * \Delta t$ ,  $t = n * \Delta t$ , το αθροιστικό σήμα στο συνολικό χρόνο των εκθέσεων μιας εικόνας **μεγαλώνει γραμμικά με το χρόνο**

(π.χ., για ροή  $\sim 10$  φωτονίων ενέργειας  $h\nu$  /sec, σε 10 sec θα έχουμε 100 φωτόνια)

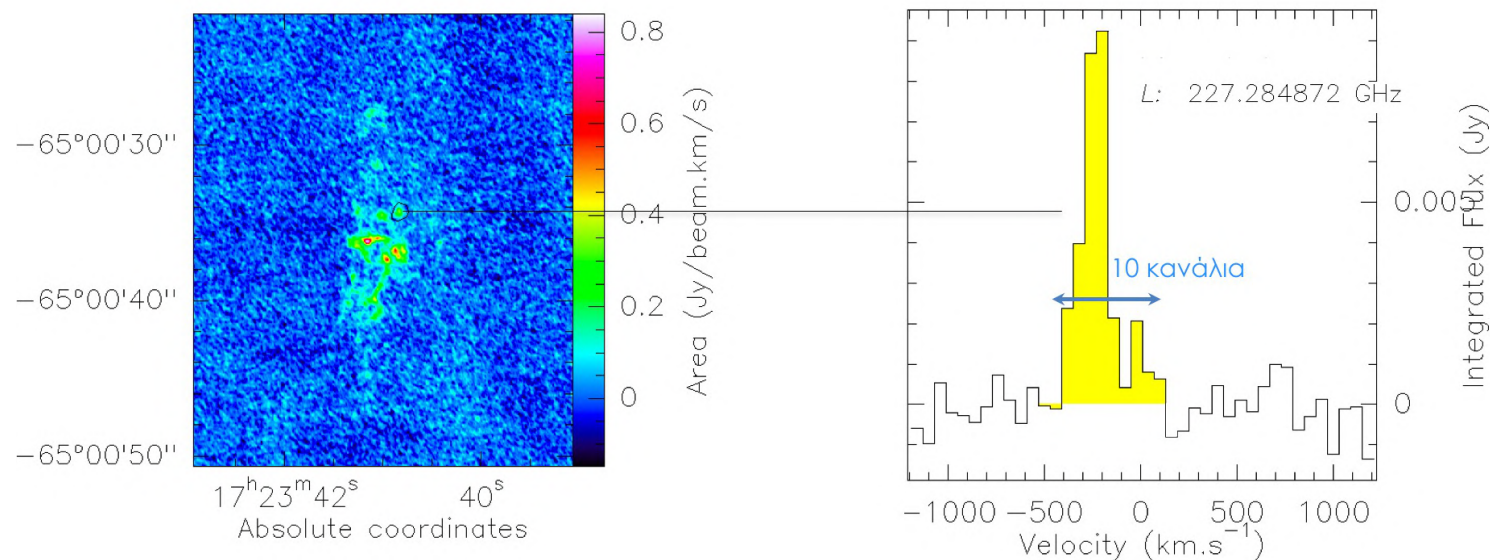
Θόρυβος/noise:  $\sigma_{tot}^2 = \sigma_{t1}^2 + \sigma_{t2}^2 + \dots + \sigma_{tN}^2$  άρα  $\sigma_{tot}^2 = n * \Delta t * \sigma_i^2 \rightarrow \sigma_{tot} = (n\Delta t)^{1/2} \sigma_i$   
για εκθέσεις σταθερού χρόνου.

Άρα signal/noise ratio:  $S/N = f * n * \Delta t / (n\Delta t)^{1/2} \sigma_i = (f / \sigma_i) (n\Delta t)^{1/2}$   
Το  $S/N$  ratio αυξάνει με την **τετραγωνική ρίζα** του χρόνου ολοκλήρωσης!

## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Βλέπουμε σήμα. Πώς ξέρουμε ότι είναι σημαντικό. Είναι αυτό το σήμα ανιχνευμένο;

Εξαρτάται από το πηλίκο  $S/N$ , το οποίο μετράται επί της τελικής εικόνας (για το συνολικό χρόνο έκθεσης): το σήμα μετράται για την εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος, ο θόρυβος από περιοχές μη ανίχνευσης σήματος. Το ίδιο ισχύει για φωτομετρία και φασματοσκοπία. Κάθε εικόνα IFU κύβου θα έχει προφανώς άλλο θόρυβο αν αλλάξουμε τη φασματική του ανάλυση. Μετά συνήθως θέτουμε όριο για ανίχνευση  $S/N > 3$  ή  $S/N > 5$ .



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

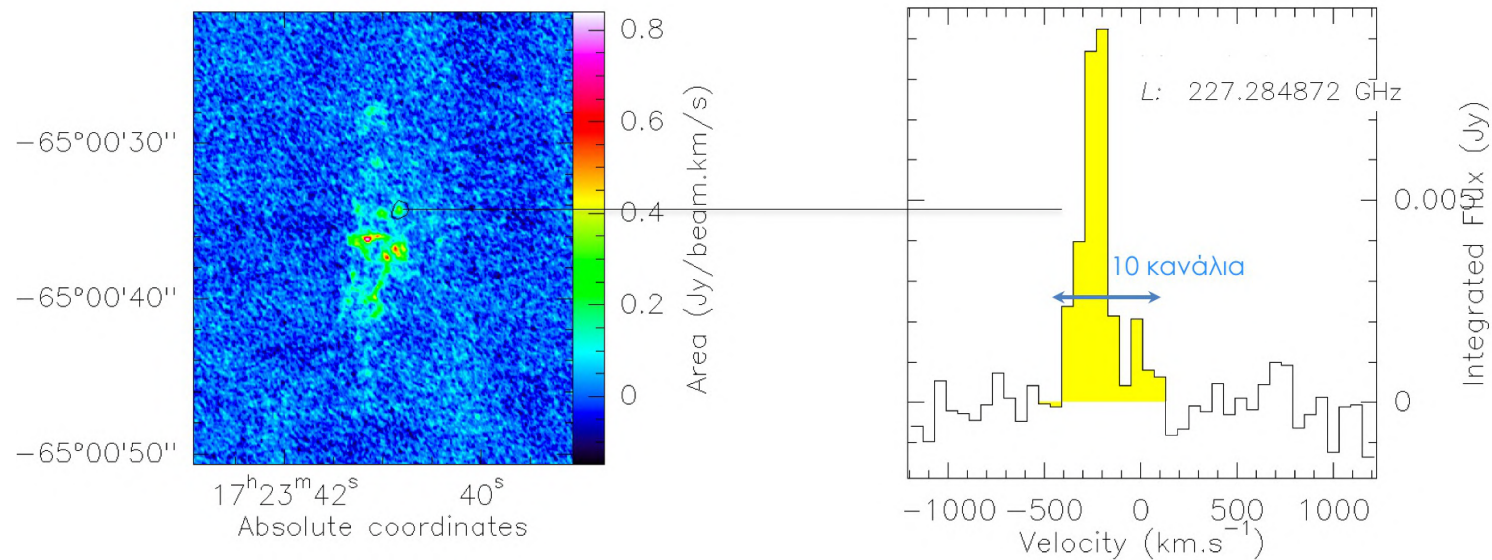
### Άσκηση:

Βρείτε το S/N ratio του κυκλωμένου νέφους χρησιμοποιώντας το φάσμα του στα IFU data.

Φάσμα:  $\text{Noise} - 1\sigma \simeq 5 \cdot 10^{-4} \text{ Jy} = 0.5 \text{ mJy}$  για 1 κανάλι, άρα  $N = \sqrt{10} \cdot 0.5 \simeq 1.5 \text{ mJy}$

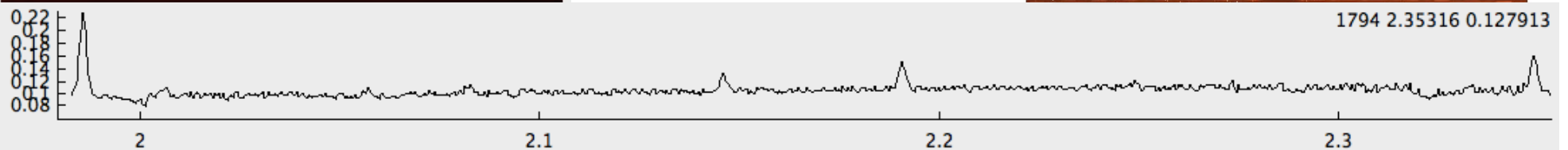
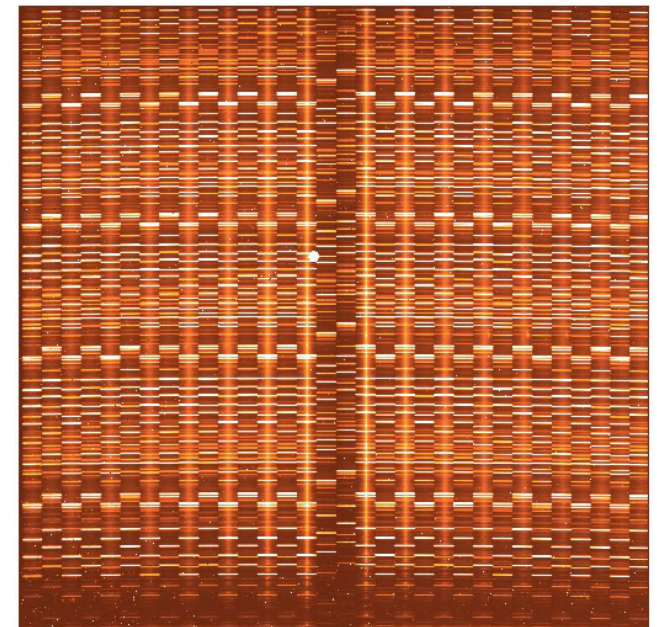
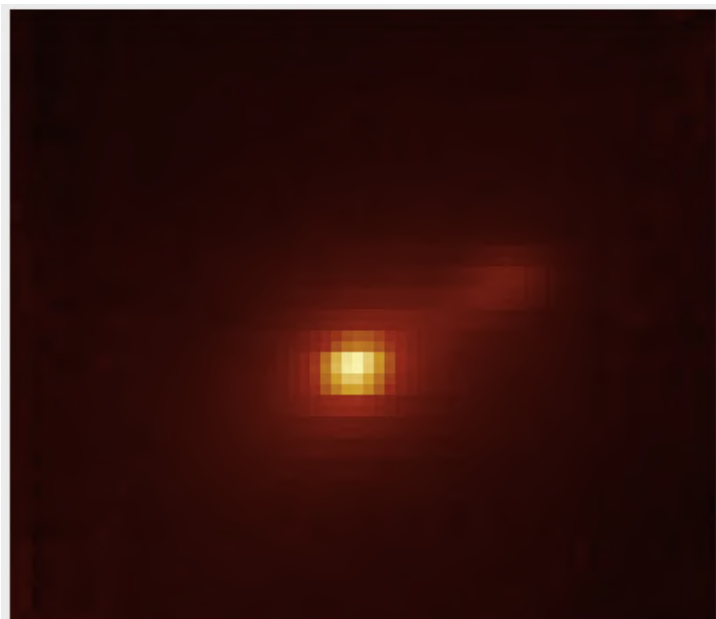
Σητά  $S = \sum_{i=1}^{10} f_i \simeq 2.8 \cdot 10^{-2} \text{ Jy} = 28 \text{ mJy}$

Άρα S/N ratio  $\simeq 20$



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

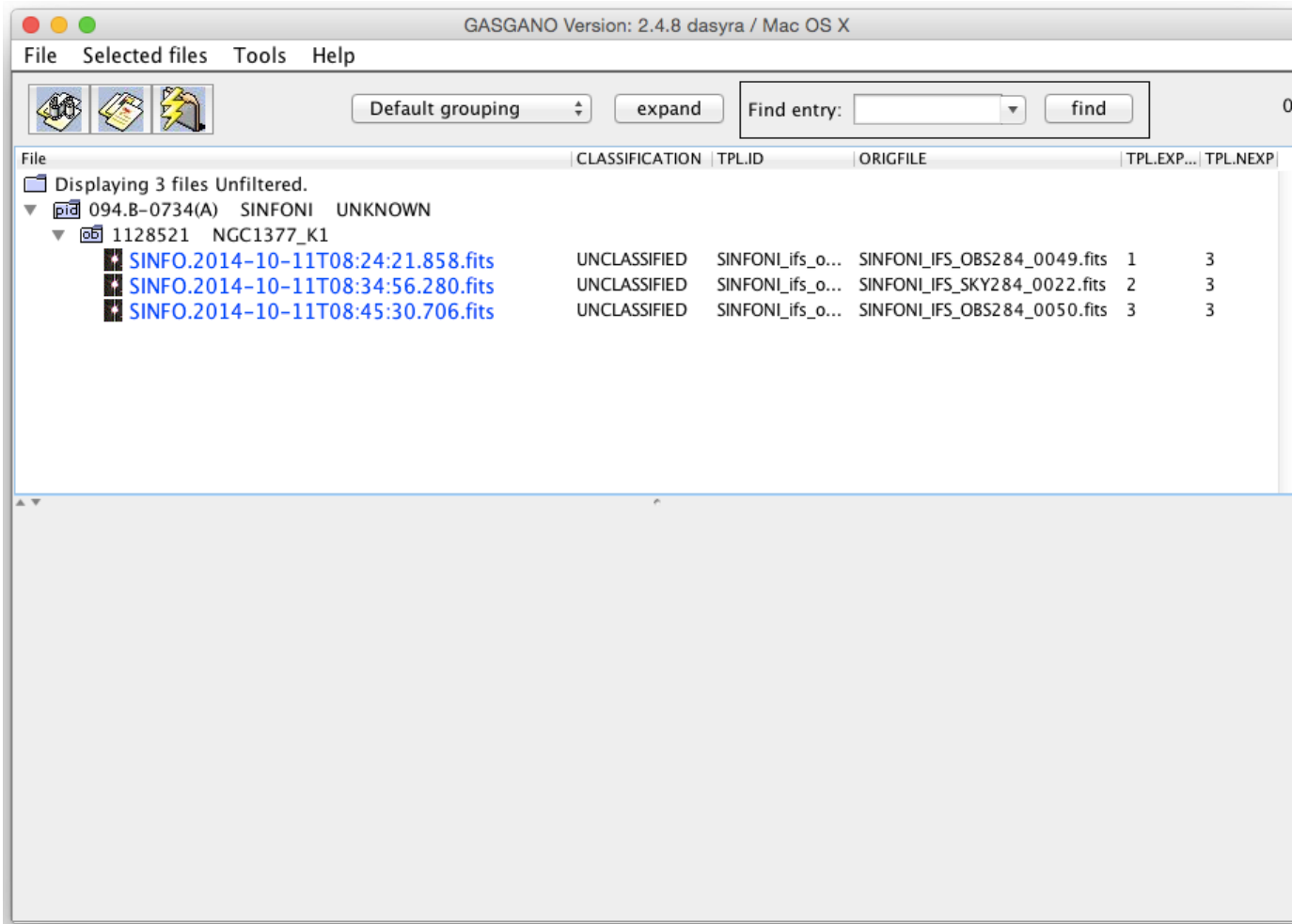
Πώς να φτιάξουμε έναν κύβο IFU για δεδομένα SINFONI  
MUSE, κλπ από το Very Large Telescope του ESO



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

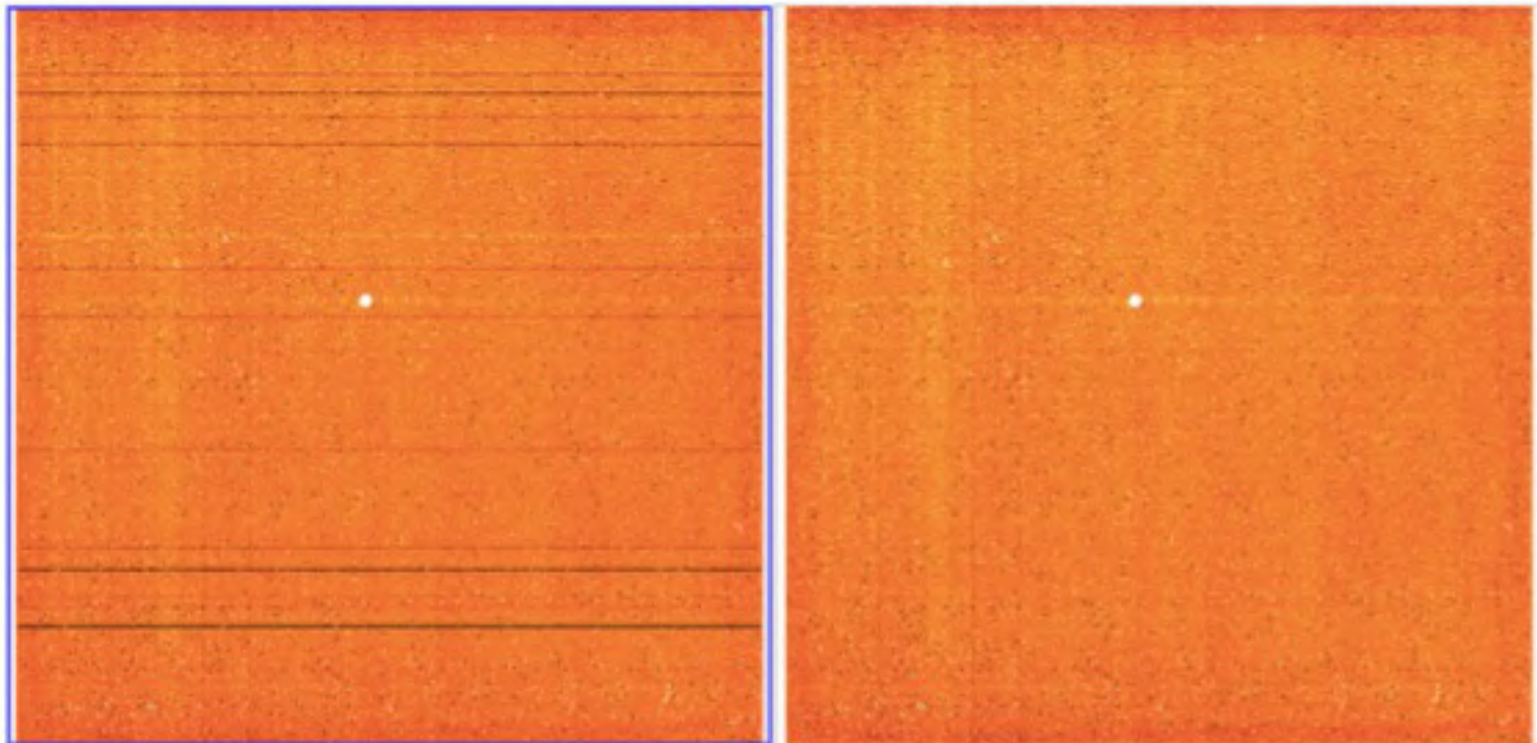
Pre-pipeline

- Gasgano:
  - organising files into directories of calibration files, raw data, etc (which otherwise come in a single directory, with files named after the observation time)



- Before ESOREX (not yet included in the pipeline).

Removal of dark lines related with the detector reading (IDL code provided in cookbook)



- Before ESOREX (not yet included in the pipeline).

Check of file type and exposure time, alternative to Gasgano, also in IDL

Terminal> gdl

GDL> .r show\_header\_parameter

GDL> show\_header\_parameter,"KD/FornaxA/downloads",param="EXPTIME"

Then move files in corresponding directories (flat, dark, science, sky, ...)

Περιγραφή recipes στο manual

[https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/decommissioned/sinfoni/doc/VLT-MAN-ESO-14700-4037\\_v2.0.pdf](https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/decommissioned/sinfoni/doc/VLT-MAN-ESO-14700-4037_v2.0.pdf)

### ESOREX installation

- Esores modules are provided in multiple tar files (make sure to use the compatible version)
- Routines: some generic, some instrument related
- Ideal for the installation is to place all modules in a common directory. Installation order

```
cd /SciApps/esorex/cfitsio-3370
./configure --prefix=/SciApps/esorex --enable-shared --enable-reentrant
make shared
make install
```

```
cd /SciApps/esorex/wcslib-424
./configure --prefix=/SciApps/esorex
make
make install
```

```
cd /SciApps/esorex/fftw-334
./configure --prefix=/SciApps/esorex
make
make install
```

```
cd /SciApps/esorex/cpl-66
./configure --prefix=/SciApps/esorex --with-cfitsio=/SciApps/esorex --with-wcs=/SciApps/esorex --with-fftw=/SciApps/esorex
--enable-shared --enable-reentrant
make
make install
```

```
cd /SciApps/esorex/esorex-312
./configure --prefix=/SciApps/esorex --with-cfitsio=/SciApps/esorex --with-cpl=/SciApps/esorex
make
make install
```

```
(optional)
cd /SciApps/esorex/cpl-66/libcext
./configure --prefix=/SciApps/esorex
make
make install
```

## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

- Untar the SINFONI recipes (sinfo-2.5.2) in /SciApps/esorex/lib/esopipes-plugins and modify the etc/esorex.rc file to include:  
    esorex.caller.recipe-dir=/SciApps/esorex/lib/esopipes-plugins
- To see the available routines (and thus to test the installation), one needs to type in a terminal  
    > esorex --recipes
- To access a routine:  
    > esorex routine\_name INPUT\_FILE

**\*\*** Between some steps, you will need to set system variables in the terminal.

If you have a tcshell for example, you may need to modify your ~/.tcshrc file to include

```
setenv LD_LIBRARY_PATH ${LD_LIBRARY_PATH}:/tools/esorex/lib:/tools/esorex/cfitsio-3370:/tools/esorex/cpl-66/
```

Please read the INSTALL/README file of each tarball.

It helps to also add these to the path to run the routines from any directory

```
setenv PATH ${PATH}:/tools/esorex/gasgano/bin:/tools/esorex/bin
```

## Running ESOREX

**Calibration-related routines:** most of the pipeline steps are related to the creation of calib files.  
In order, these concern:

(1) the detector linearity

```
> esorex sinfo_rec_detlin linearitylist
```

The input file linearitylist contains LINEARITY\_LAMP files

linearity/SINFO.2014-09-27T11:23:48.410.fits LINEARITY\_LAMP

linearity/SINFO.2014-09-27T11:24:14.344.fits LINEARITY\_LAMP

linearity/SINFO.2014-09-27T11:24:38.295.fits LINEARITY\_LAMP

linearity/SINFO.2014-09-27T11:25:47.359.fits LINEARITY\_LAMP

linearity/SINFO.2014-09-27T11:26:53.151.fits LINEARITY\_LAMP

Main output:    out\_bp\_lin.fits    - Non linear pixel map

**Calibration-related routines:** most of the pipeline steps are related to the creation of calib files.  
In order, these concern:

(2) the creation of master darks

```
> esorex sinfo_rec_mdark darklist
```

The input file darklist contains DARK files

dark/SINFO.2014-10-10T11:03:08.976.fits DARK

dark/SINFO.2014-10-10T11:03:30.914.fits DARK

dark/SINFO.2014-10-10T11:03:52.855.fits DARK

dark/SINFO.2014-10-11T10:21:13.667.fits DARK

Main output:

- out\_dark0.fits - Dark for exposure time 1
- out\_dark1.fits - Dark for exposure time 2
- out\_bp\_noise0.fits – Outliers in the dark frames for exp. time 1
- out\_bp\_noise2.fits – Outliers in the dark frames for exp. time 2

**Calibration-related routines:** most of the pipeline steps are related to the creation of calib files.  
In order, these concern:

(3) the creation of a master flat field

```
> esorex sinfo_rec_mflat flatlist_bptime600
```

The input file flatlist\_bptime600 contains

flat/SINFO.2014-10-11T11:47:42.668.fits FLAT\_LAMP

flat/SINFO.2014-10-11T11:48:49.525.fits FLAT\_LAMP

flat/SINFO.2014-10-11T11:49:53.344.fits FLAT\_LAMP

out\_bp\_noise0.fits

BP\_MAP\_HP

out\_bp\_lin.fits

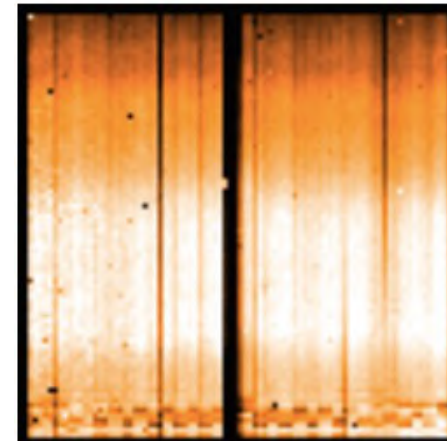
BP\_MAP\_NL

/SciApps/esorex/sinfo-calib-2.5.2/cal/REF\_BP\_MAP.fits

REF\_BP\_MAP

/SciApps/esorex/sinfo-calib-2.5.2/cal/SLIT\_POS\_H\_250.fits SLIT\_POS

|              |                    |                  |                        |
|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| Main output: | out_flat.fits      | MASTER_FLAT_LAMP | master flatfield image |
|              | out_bpmap_sum.fits | MASTER_BP_MAP    | master bad pixel map   |



**Calibration-related routines:** most of the pipeline steps are related to the creation of calib files.  
In order, these concern:

(4) computation of the distortion correction matrix

```
> esorex sinfo_rec_distortion distortion_list_10_11
```

The input file flatlist\_bptime600 contains

distortion/SINFO.2014-10-11T13:55:21.889.fits FIBRE\_NS

distortion/SINFO.2014-10-11T13:55:49.828.fits FIBRE\_NS

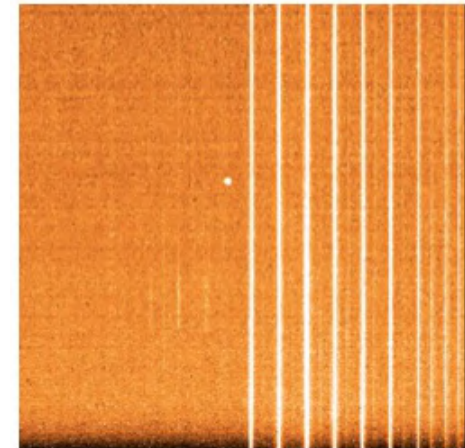
distortion/SINFO.2014-10-11T13:58:05.971.fits FLAT\_NS

distortion/SINFO.2014-10-11T14:00:18.463.fits WAVE\_NS

/SciApps/esorex/sinfo-calib-2.5.2/cal/neonK.fits REF\_LINE\_ARC

/SciApps/esorex/sinfo-calib-2.5.2/cal/drs\_setup\_wave.fits DRS\_SETUP\_WAVE

/SciApps/esorex/sinfo-calib-2.5.2/cal/SLIT\_POS\_H\_250.fits SLIT\_POS



|              |                     |                   |                                       |
|--------------|---------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Main output: | out_flat.fits       | MASTER_FLAT_LAMP  | master flat field image               |
|              | out_distortion.fits | DISTORTION        | table computed optical distortions    |
|              | out_distances.fits  | SLITLETS_DISTANCE | table with computed slitlet distances |

**Calibration-related routines:** most of the pipeline steps are related to the creation of calib files.  
In order, these concern:

(5) computation of the wavelength calibration matrix

```
> esorex sinfo_rec_wavecal wavecallist
```

The input file wavecallist contains

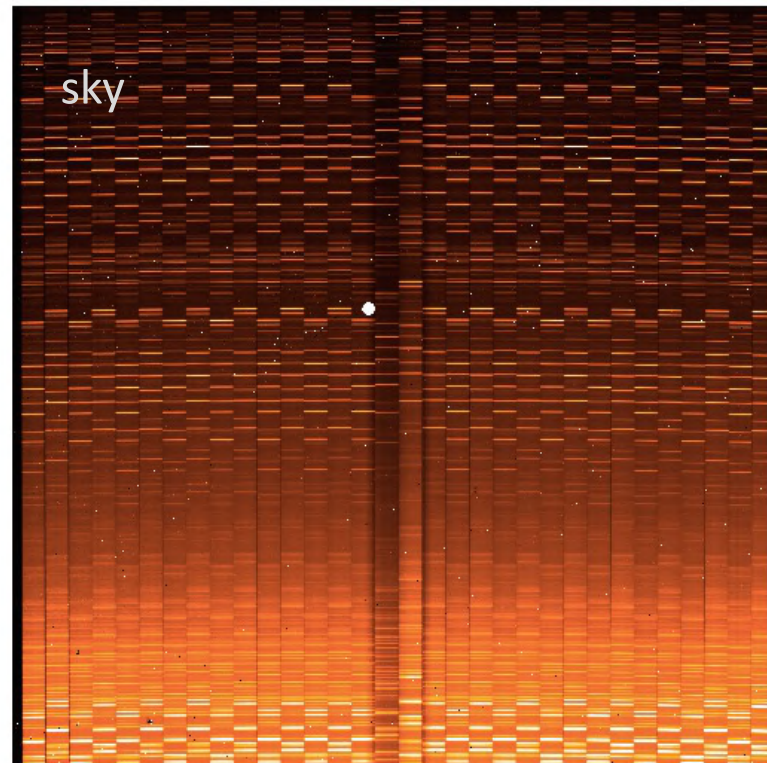
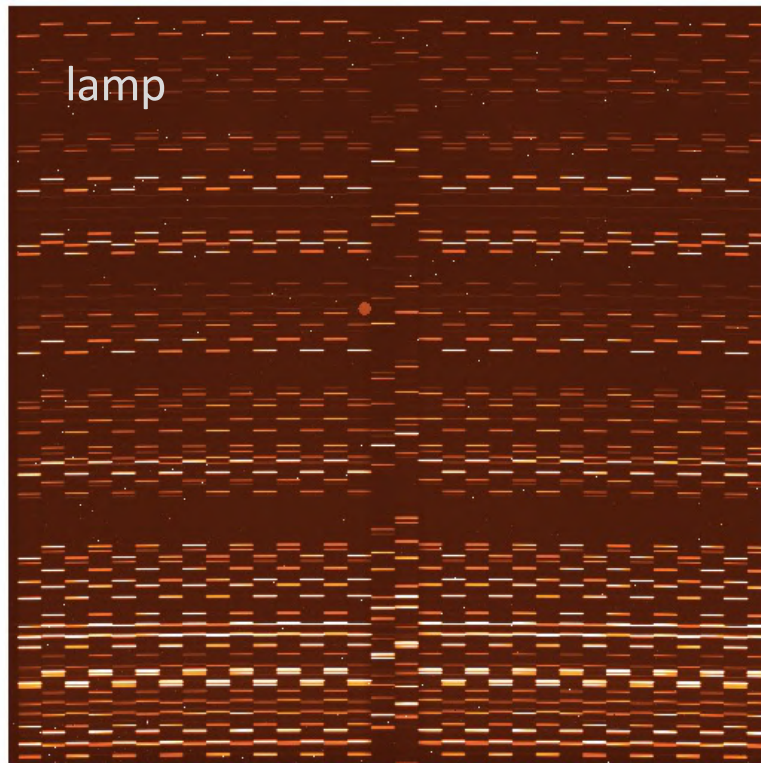
|                                                           |                  |
|-----------------------------------------------------------|------------------|
| wave/SINFO.2014-10-11T11:52:52.511.fits                   | WAVE_LAMP        |
| wave/SINFO.2014-10-11T11:52:15.860.fits                   | WAVE_LAMP        |
| out_flat.fits                                             | MASTER_FLAT_LAMP |
| out_bpmmap_sum.fits                                       | MASTER_BP_MAP    |
| out_distortion.fits                                       | DISTORTION       |
| /SciApps/esorex/sinfo-calib-2.5.2/cal/neonK.fits          | REF_LINE_ARC     |
| /SciApps/esorex/sinfo-calib-2.5.2/cal/drs_setup_wave.fits | DRS_SETUP_WAVE   |
| /SciApps/esorex/sinfo-calib-2.5.2/cal/SLIT_POS_H_250.fits | SLIT_POS         |

Main output:    out\_wavemap\_ima.fits            WAVE\_MAP            wavelength map image

**Calibration-related routines:** most of the pipeline steps are related to the creation of calib files.  
In order, these concern:

(5) computation of the wavelength calibration matrix:

Sky can lead to a better result- but need to be provided manually & patterns are repetitive.



**Data reduction routine:** last of the (basic) pipeline which does **everything** to the science frames.

```
> esorex sinfo_rec_jitter jitterlist_science
```

- Application of previous corrections (dark, flat, application of distortion & wavelength matrix, bp)
- sky subtraction, reconstruction of 3D cubes, creation of the mosaic from different dither positions.

The input file jitterlist\_science contains (at least) the following information:

```
science_10_11_2014/SINFO.2014-10-11T08:24:21.858.fits OBJECT_NODDING
science_10_11_2014/SINFO.2014-10-11T08:34:56.280.fits SKY_NODDING
science_10_11_2014/SINFO.2014-10-11T08:45:30.706.fits OBJECT_NODDING
science_10_11_2014/SINFO.2014-10-11T08:34:56.280.fits SKY_NODDING
calib_10_11_2014/out_flat.fits          MASTER_FLAT_LAMP
calib_10_11_2014/out_bpmmap_sum.fits    MASTER_BP_MAP
calib_10_11_2014/out_wavemap_ima.fits    WAVE_MAP
calib_10_11_2014/out_distances.fits      SLITLETS_DISTANCE
calib_10_11_2014/out_distortion.fits     DISTORTION
/SciApps/esorex/sinfo-calib-2.5.2/cal/SLIT_POS_H_250.fits SLIT_POS
/path_file_cdb/ATM_REF_CORR_J_025.fits ATM_REF_CORR    (OPTIONAL)
```

**Data reduction routine:** last of the (basic) pipeline which does **everything** to the science frames.

```
> esorex sinfo_rec_jitter jitterlist_science
```

- Application of previous corrections (dark, flat, application of distortion & wavelength matrix, bp)
- sky subtraction, reconstruction of 3D cubes, creation of the mosaic from different dither positions.

The main output

|                     |                                                             |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|
| out_cube_objNN.fits | cube, NN=00,01,.. - reconstructed from the slitlet position |
| out_skyNN_med.fits  | stacked sky image                                           |
| out_objnod.fits     | coadded cube (all jitter positions)                         |

If for star, with appropriate keywords, then also

|                            |                                              |
|----------------------------|----------------------------------------------|
| out_ao_performance.fits    | table with strehl information                |
| out_psf.fits               |                                              |
| out_std_star_spectrum.fits | table with extracted spectrum and efficiency |

**Data reduction routine:** last of the (basic) pipeline which does **everything** to the science frames.

```
> esorex sinfo_rec_jitter jitterlist_science
```

### NOTES

#### \* Sky subtraction:

worth finding out which is the best sky to subtract from each frame by using sky exposures

other than the immediately next. To do so, one needs to change the order of sky frames in the input file.

(Software by Ric Davies for ABA observing sequence – not ideal strategy for remote observing due to few skies acquired)

#### \* Running one set of on-off positions at a time (instead of all science and sky frames together)

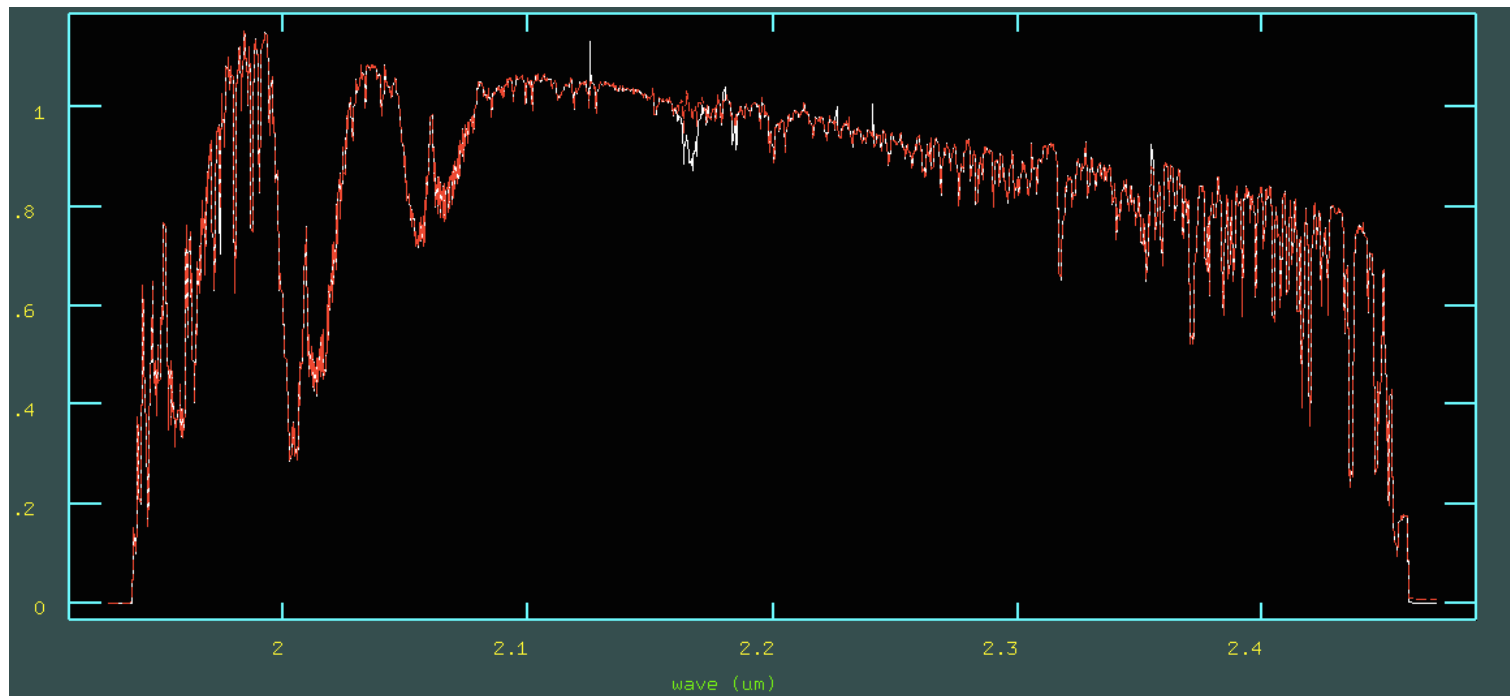
- Will do that anyway if the observations have been executed in >1 nights.
- Adjust the atmospheric correction and the flux calibration for each frame, which vary with time,
- Correct for errors in the dither position: add a manual offset correction due to seeing (if in no AO),  
in addition to the CUMOFFSETX, CUMOFFSETY keywords automatically used to shift images
- In the same way, obtain the maximum possible field covered by the data.

**NOT DONE YET!!!!**

**Things that remain to be done:**

- Atmospheric absorption removal:

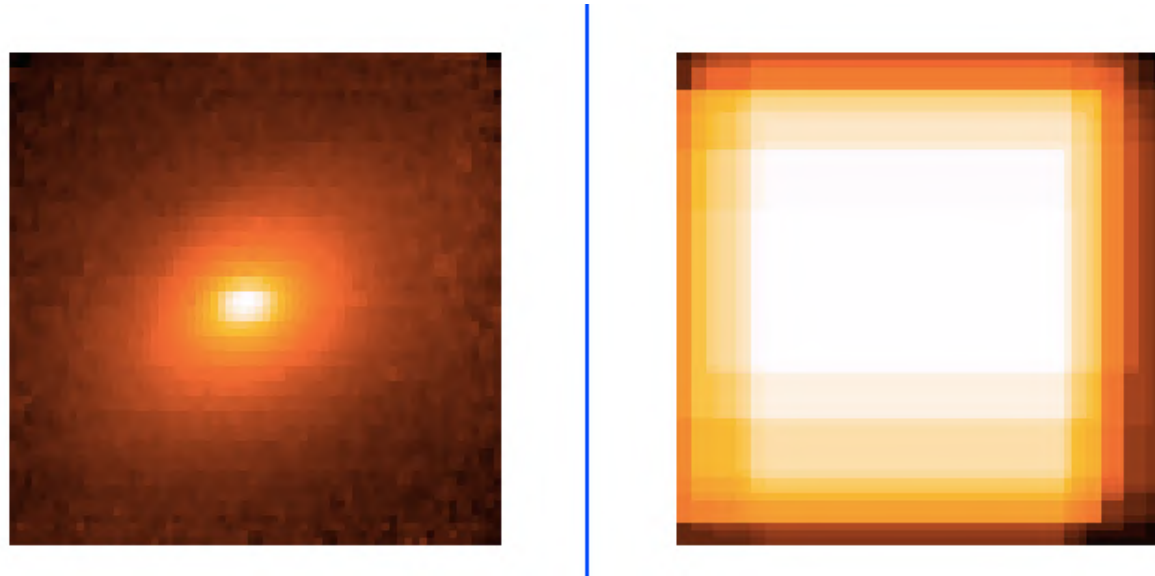
This includes the extraction of a (high S/N) stellar spectrum, the removal of intrinsic absorption (that creates artificial emission when divided away), and the scaling of the spectrum (due to changes in the atmosphere during the integration).



**NOT DONE YET!!!!**

**Things that remain to be done:**

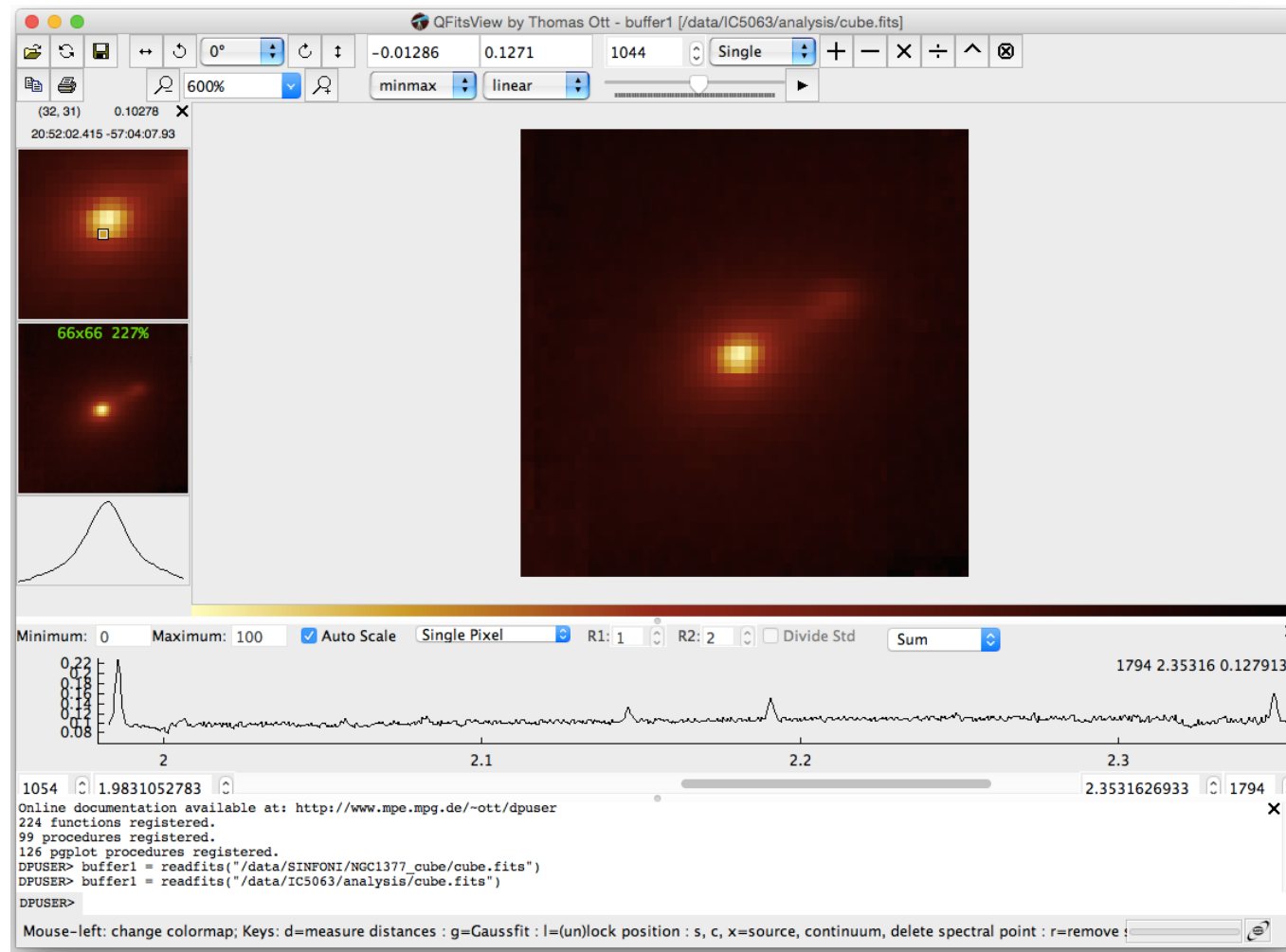
- Flux calibration: stellar counts/second to Jy using known magnitude...
- Merging of data in one mosaic (and corresponding depth map)



These can be done with the aid of external software  
or by editing the pipeline files at `/SciApps/esorex/sinfo-252/recipes` (written in c).

## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

- QFitsView: 3D-cube display, kinematic maps derivation, ..., alternative to ds9



## δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

### Post-pipeline: examining/analyzing the data

- MAPPING: Software of IRAM's PdB interferometer....  
(Can facilitate the identification of weak sources by eye @different V, easy position-velocity diagrams)

For a cube converted in, e.g., velocity, in the MAPPING terminal, type  
fits SINFONI\_velocity\_cube.fits to SINFONI\_cube.lmv-clean  
let name SINFONI\_cube; let type lmv-clean; go view

