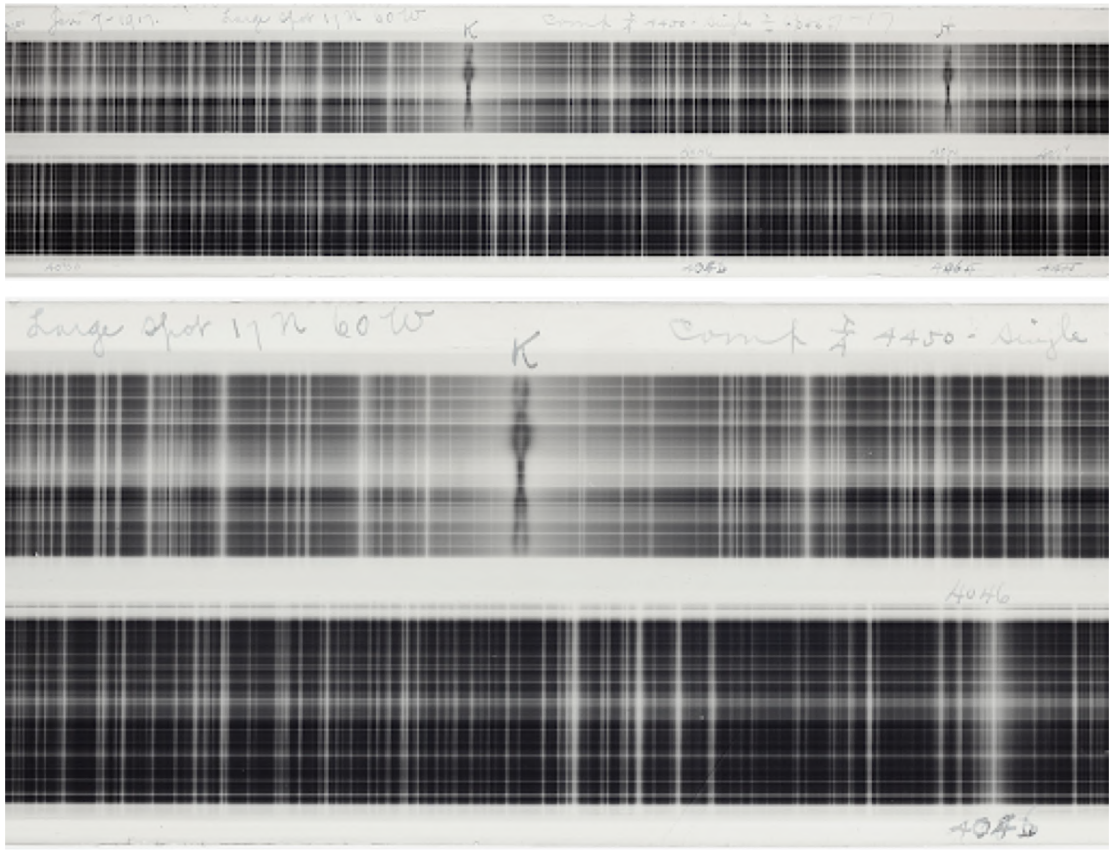
Τεχνικές Παρατήρησης και Ανάλυσης Δεδομένων στην Αστρονομία

Κ. Δασύρα
(kdasyra@phys.uoa.gr)

Integral Field Unit

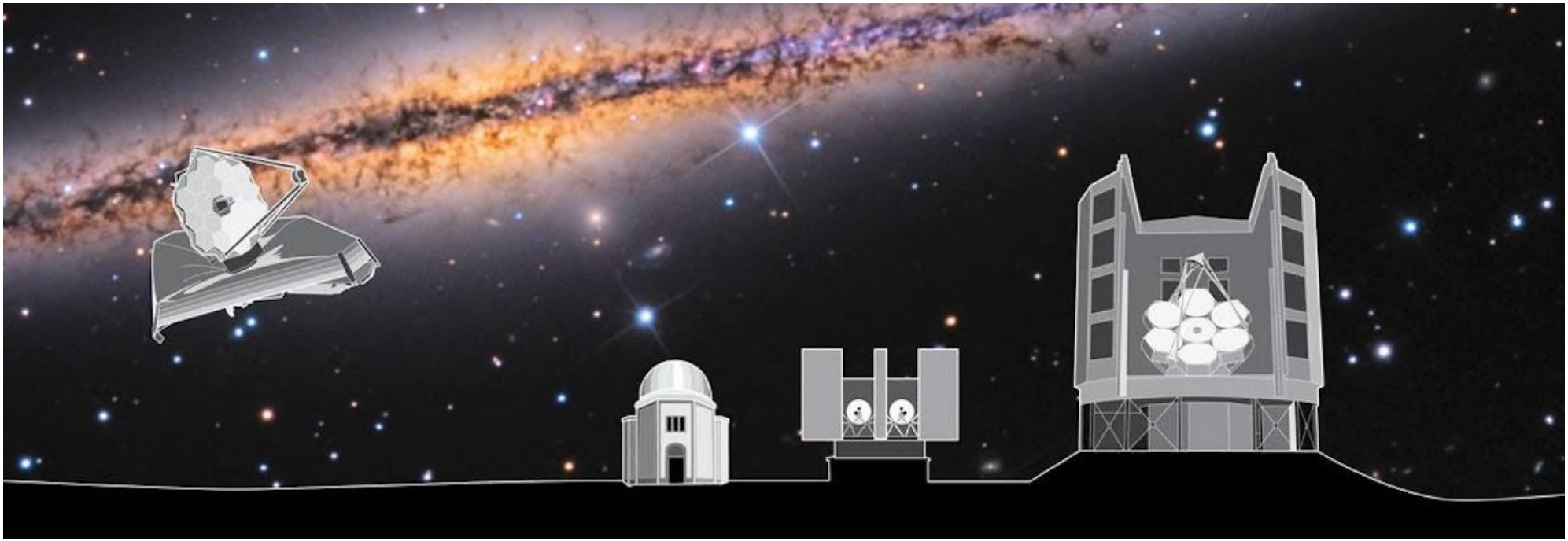
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Ξεκινώντας από εικόνες και φάσματα σε φωτογραφικές πλάκες



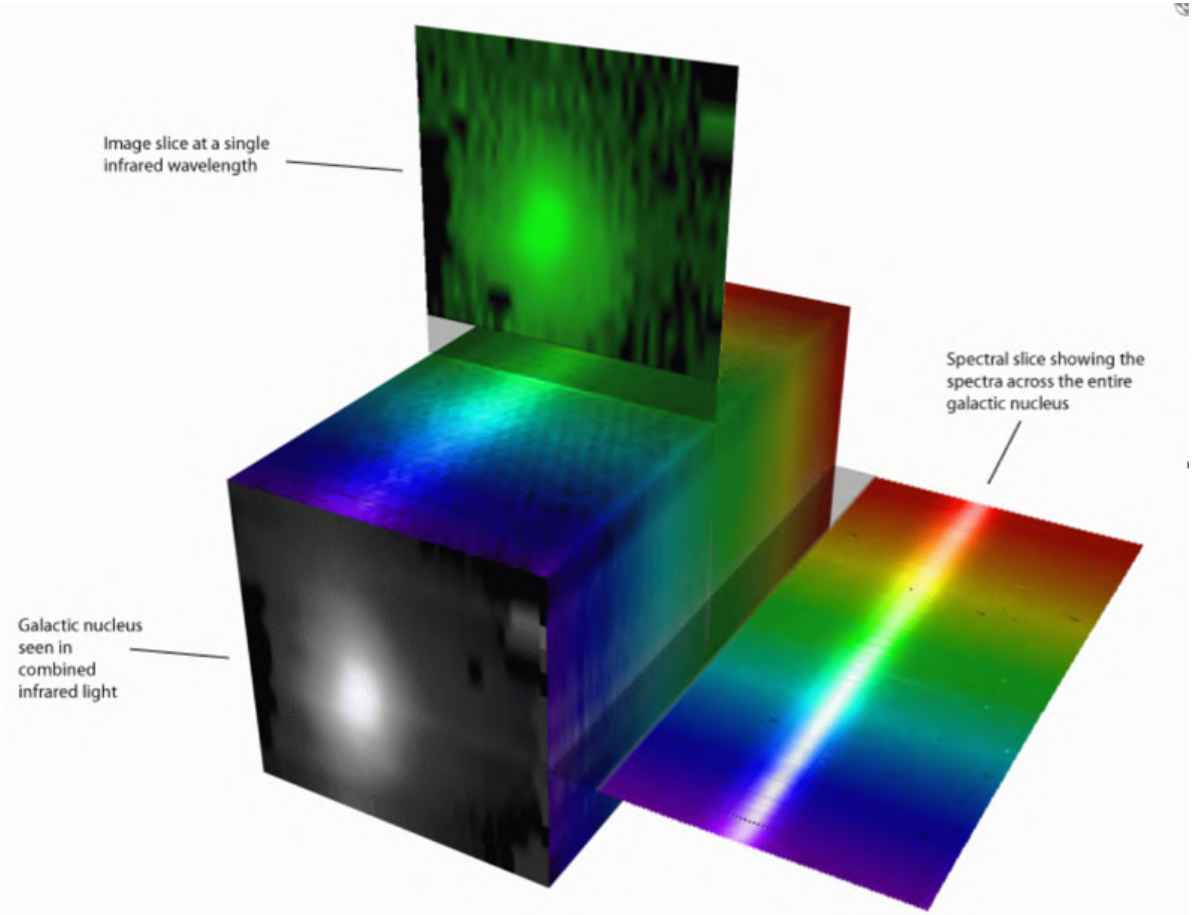
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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 επιχειρησεων χιλιάδων Ευρώ ανά ώρα.



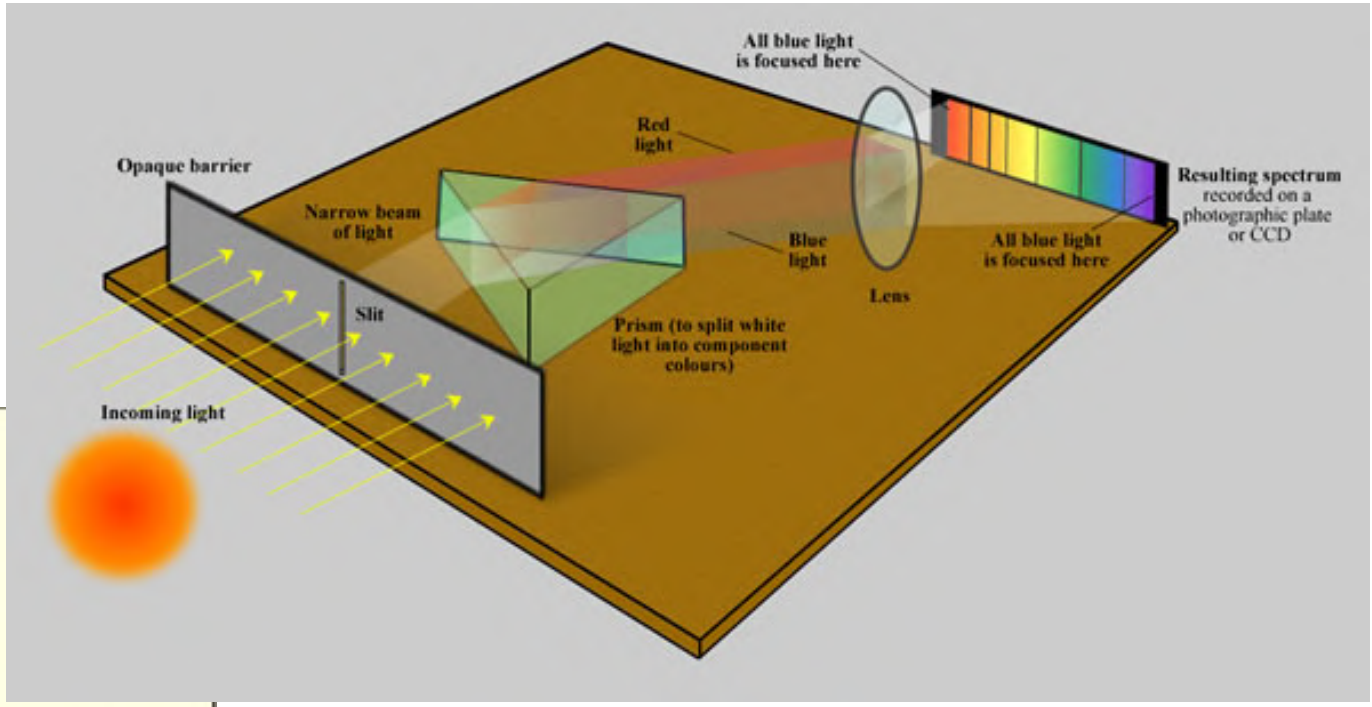
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

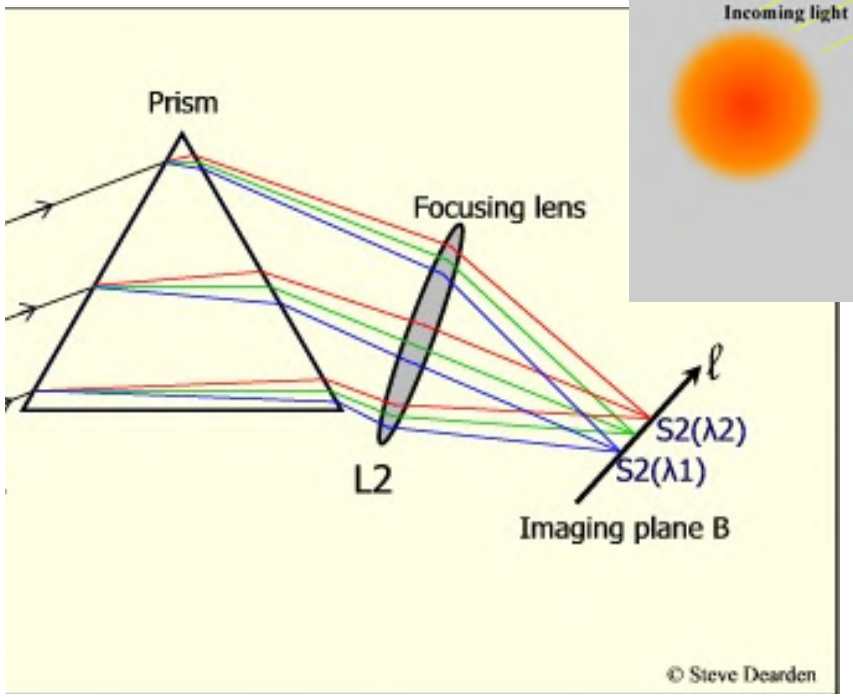
IFUs: Βασίζονται σε αρχές **τόσο φωτομετρίας όσο και φασματοσκοπίας**, για τις οποίες θα μιλήσουμε, και θα δούμε παράδειγματα από IFU , που συνδυάζουν τα παραπάνω. Τι **βαθμονομήσεις σχεδιασμός παρατήρησης** και επεξεργασία πρέπει να γίνουν ώστε να πάρουμε χρήσιμες μετρήσεις;



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.





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

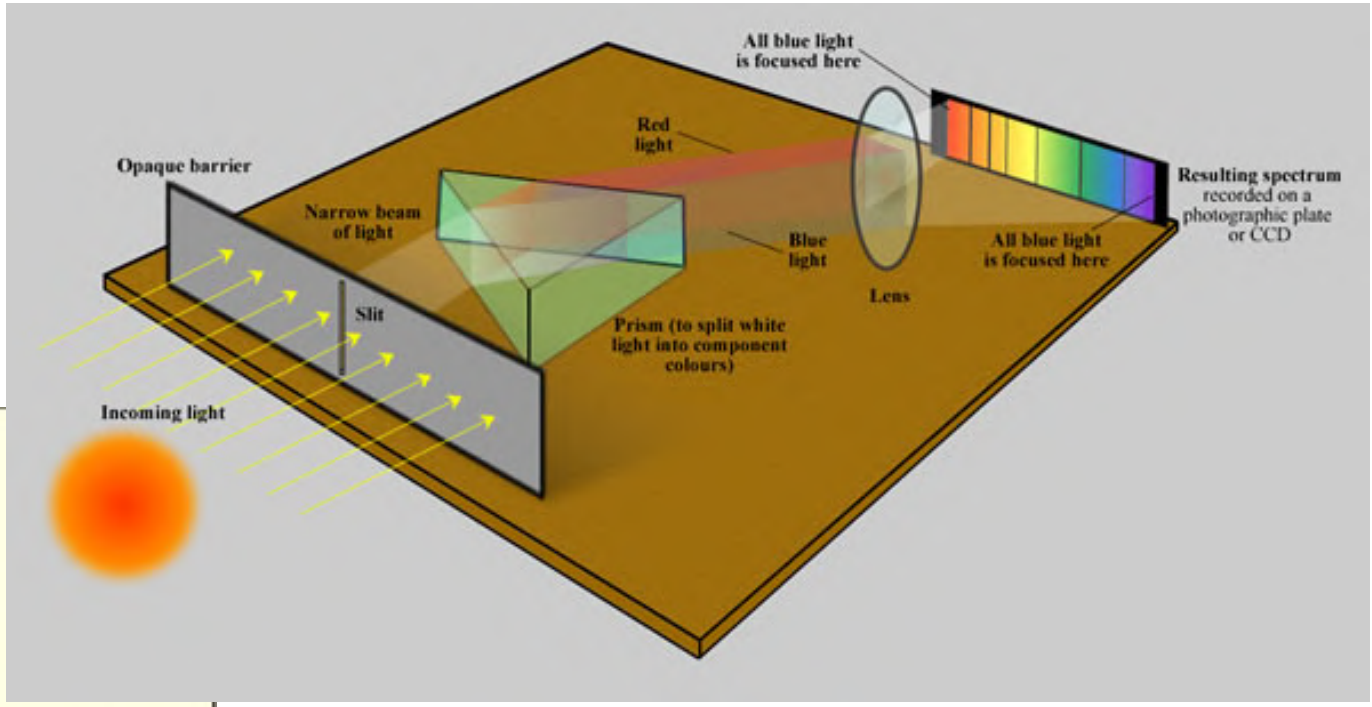
(Hartmann), A,B,C, σταθερές που περιγράφουν το κάθε υλικό

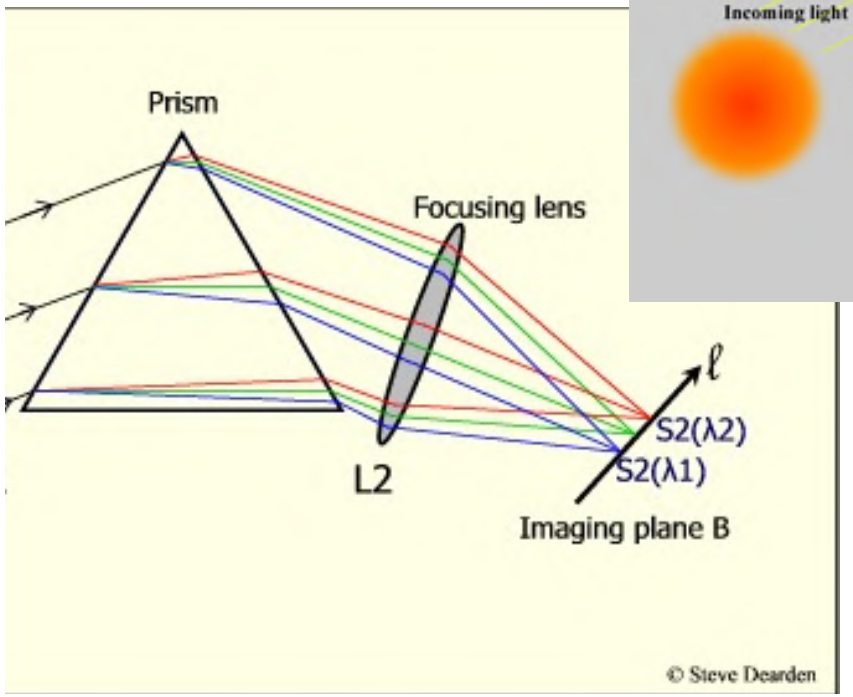
$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2}}{\cos i_1}\left(-\frac{B}{(\lambda - C)^2}\right)$$

Γωνιακή διασπορά,
dφ/dλ = δφ/dμ * dμ/dλ
- στο δφ/dμ υπεισέρχεται η γεωμετρία του πρίσματος

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

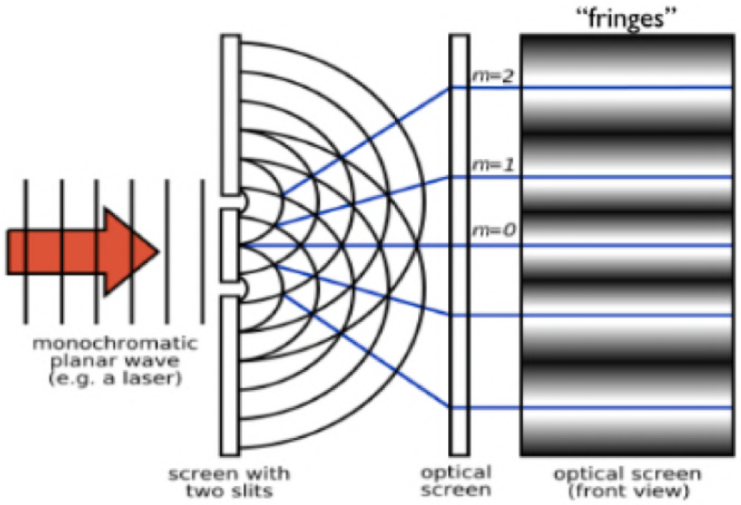
Η αρχή λειτουργίας είναι κατά βάση η ίδια σε σχέση με έναν 'απλό' φασματογράφο.
Π.χ., Φασματογράφος πρίσματος – βασίζεται στο διαφορετικό δείκτη διάθλασης μ ανά λ.
Απλά επαναλαμβάνονται πολλές φορές οι διατάξεις, π.χ., πολλαπλά πρίσματα.

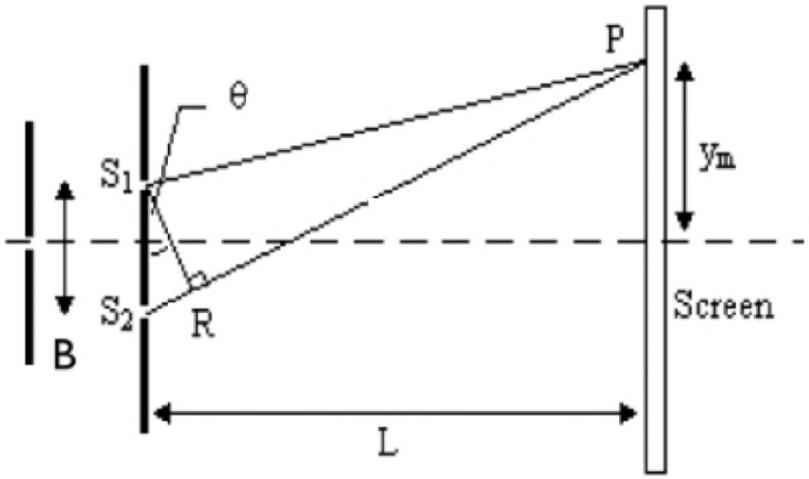




Συχνά, σε IFUs χρησιμοποιούνται
φασματογράφοι φράγματος όχι πρίσματος

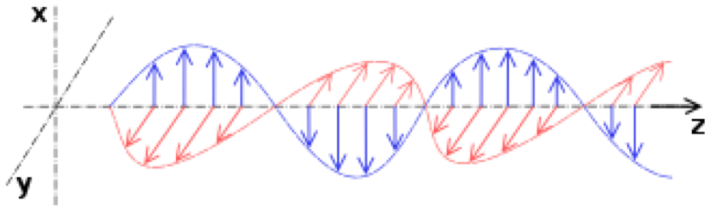
Φράγματα diffraction grating – **αρχή ανάλογη με πείραμα διπλής οπής** του Young.
Η ιδέα είναι να εισάγουμε έξτρα μήκος που πρέπει να καλυφθεί από μια δέσμη φωτός.



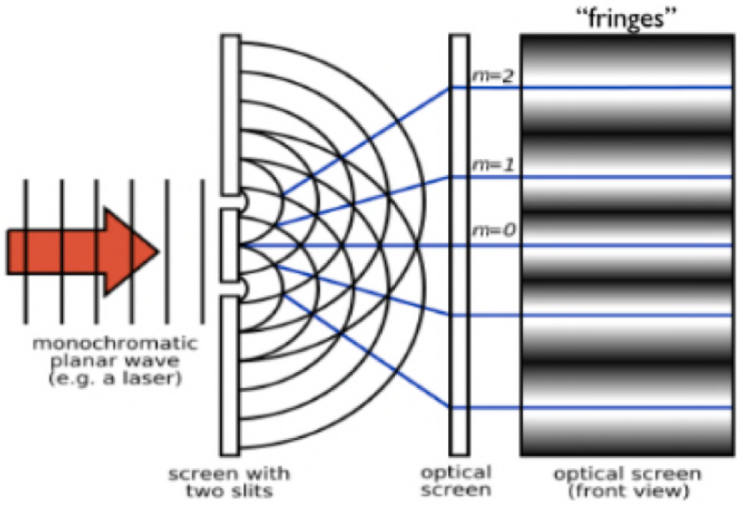


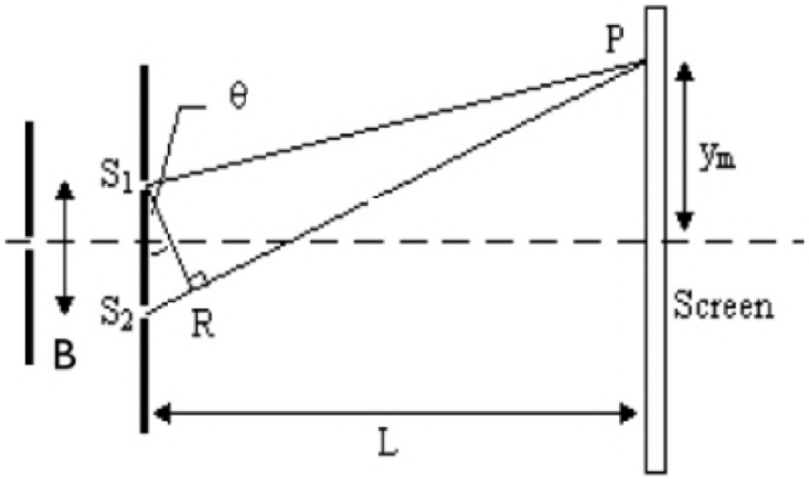
B sinθ είναι το έξτρα μήκος (που αντιστοιχεί σε καθυστέρηση φάσης) των ακτίνων που πέρασαν από την κάτω σχισμή.

Ενισχυτική συμβολη: B sinθ = mλ,
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.

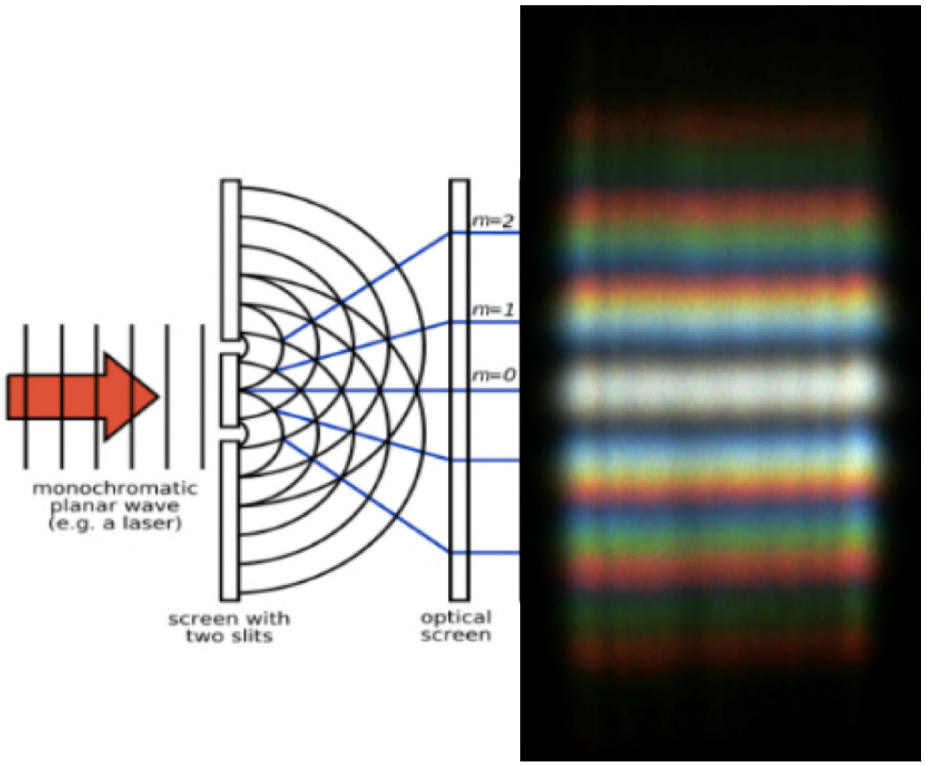


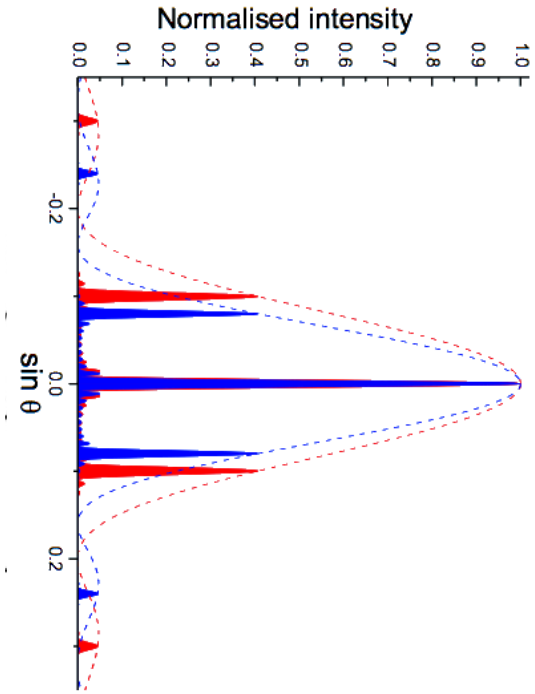


B sinθ είναι το έξτρα μήκος (που αντιστοιχεί σε καθυστέρηση φάσης) των ακτίνων που πέρασαν από την κάτω σχισμή.

Ενισχυτική συμβολη: B sinθ = mλ,
Καταστρεπτική συμβολή: B sinθ = (m + 1/2) λ 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 θ ώστε να ικανοποιείται το B sinθ = mλ.

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

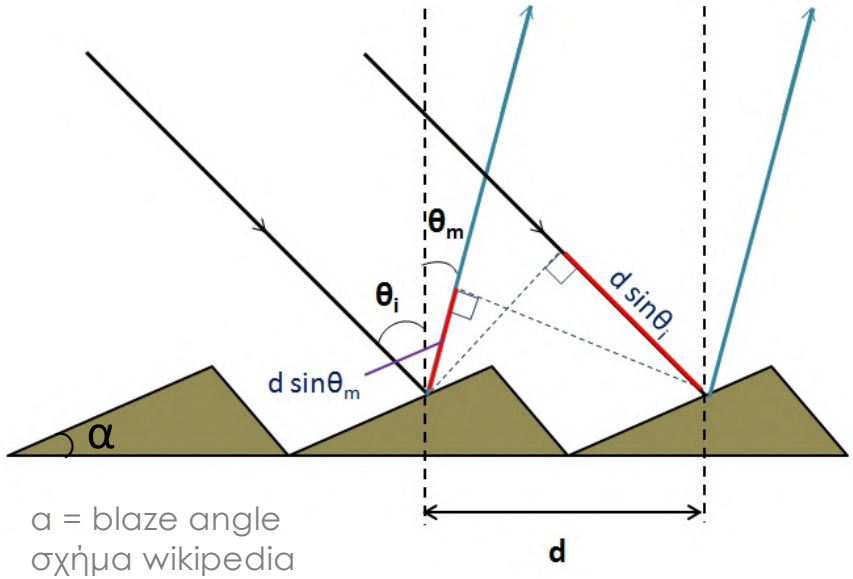
Πώς κατασκευάζεται; αντί για 2 σχισμές, βασίζονται στην ανάκλαση του φωτός από (μεταλλικές) επιφάνειες με πολλαπλά «σκαλοπάτια» που εισάγουν "extra light path" .

Οι ακτίνες είναι παράλληλες εώς ότου ανακλαστεί η 1η και μετά πάλι όταν ανακλαστεί η 2η.

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:

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

Παραγωγίζουμε τη σχέση ως προς λ, θ_m για να βρούμε τη γωνιακή διασπορά, λαμβάνοντας υπ'όψιν ότι σε κάθε φασματογράφο το φως **πέφτει με καθορισμένη θ_i** έχουμε, αγνοώντας το πρόσημο που αφορά στην κατεύθυνση. Δηλ. το κάθε μήκος κύματος έχει ενισχυτική συμβολή για άλλη γωνία θ_m, δίνοντας φάσμα.



a = blaze angle
σχήμα wikipedia

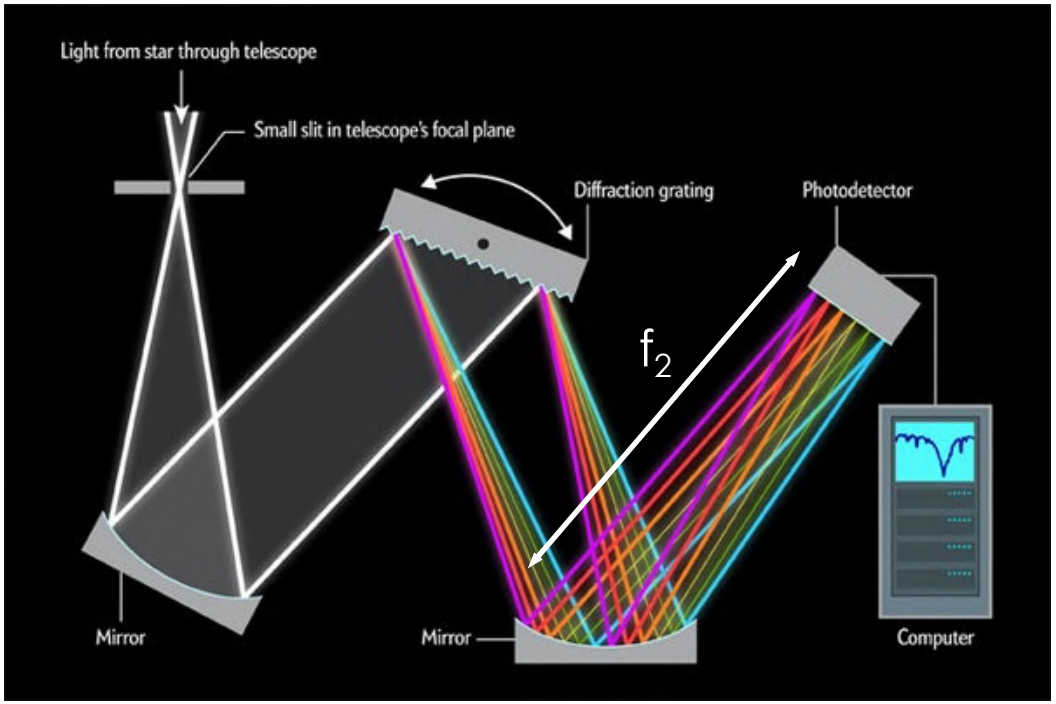
$d \cos\theta_m \, \delta\theta_m = m \, \delta\lambda$

-> **$\delta\theta_m / \delta\lambda = m / (d \cos\theta_m)$** -> μεγάλες γωνίες και τάξεις, μεγαλύτερη ανάλυση του φάσματος.

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Τη γωνιακή διασπορά (dφ ή $\delta\theta_m$) μπορούμε να την μετατρέψουμε σε μήκος τόξου (= μήκος επί του ανιχνευτή μας για μικρές γωνίες), άρα τελικά σε γραμμική διασπορά χρησιμοποιώντας την εστιακή απόσταση του κάτοπτρου (ή φακού) που την εστιάζει εκεί.

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



Αν όπου dl βάλουμε το μήκος κύματος του φωτός λ, τότε έχουμε τον ορισμό της **Φασματικής ανάλυσης ή διακριτικής ικανότητας φάσματος – spectral resolution ή resolving power, R = λ/Δλ.**

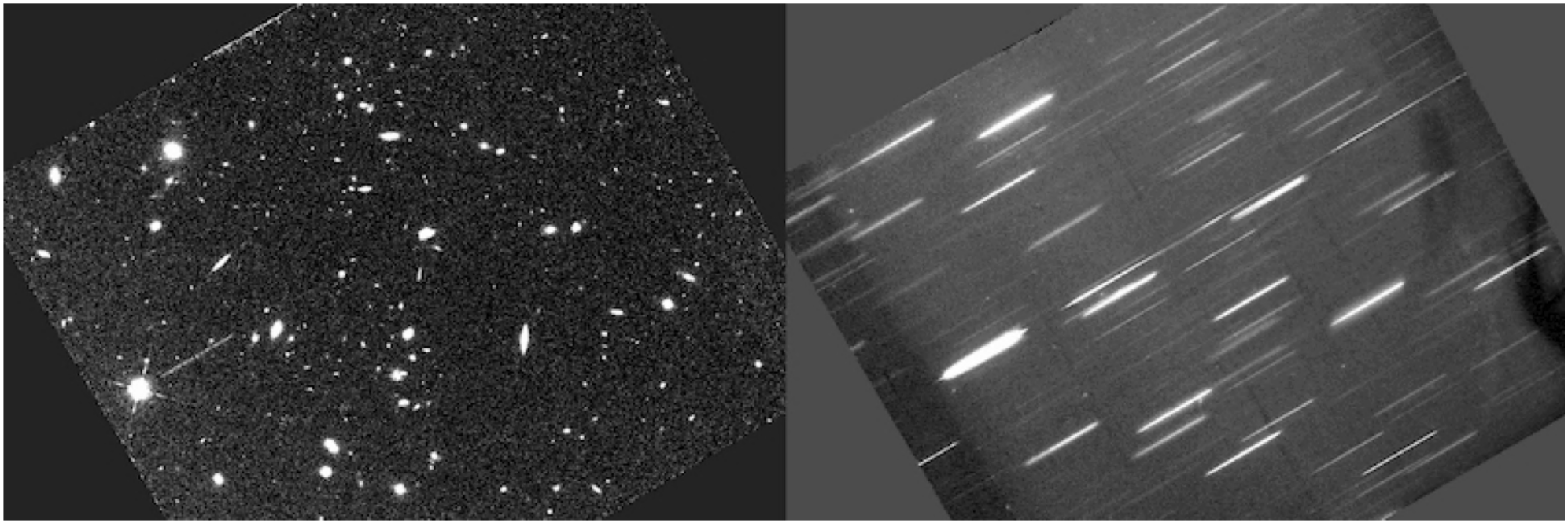
Θυμηθείτε επίσης από τον ορισμό της ερυθρομετατόπισης ότι V= cz = c Δλ/λ
άρα η διακριτική ικανότητα εκφρασμένη σε ταχύτητα είναι **V_R = c/R ~ 3*10^5 / R km/s.**

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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

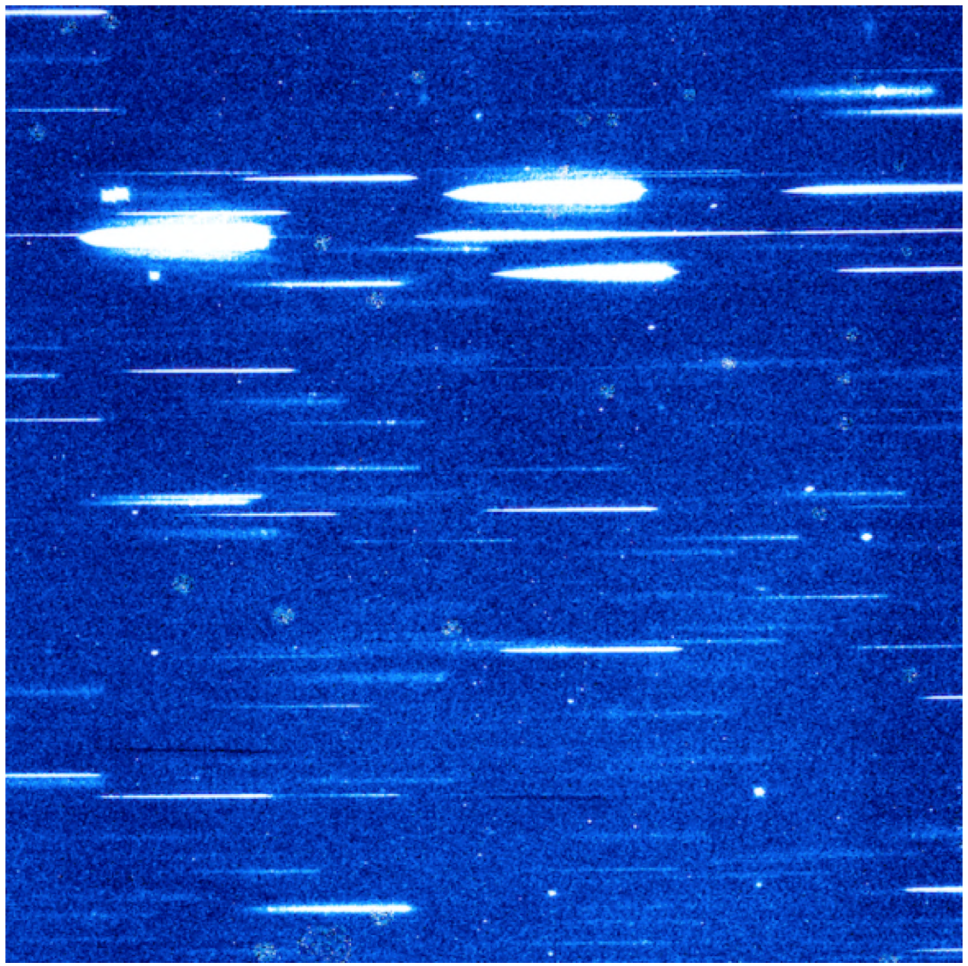
Οπτικό σύστημα με φράγμα και πρίσμα, διατεταγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε σε επιλεχθέν μηκος κύματος το φως να περνάει ευθυγραμμα. Τότε, μπορεί μια κάμερα να χρησιμοποιηθεί εναλλάξ για φωτομετρία ή φασματοσκοπία,
χωρίς βέβαια να αλλάξουν θέση τα οπτικά του συστήματος…

Π.χ., WFC3 grism δεδομένα



δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

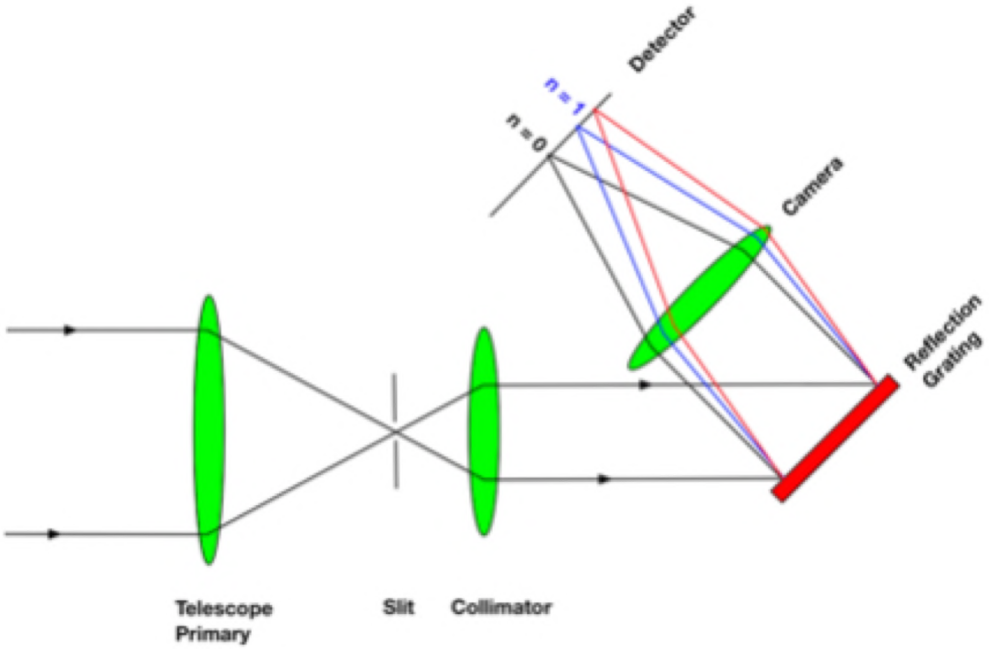
Για τη **φασματοσκοπία**, πέραν του «**dispersive element**», δηλ. του πρίσματος/φράγματος, χρειαζόμαστε και μια μάσκα, που μπλοκάρει το σήμα από τον ουρανό εκτός της **σχισμής** που μας ενδιαφέρει. Αλλιώς θα έχουμε slitless spectroscopy, δηλαδή θα σκεδαστεί το φως όλων των αντικειμένων στην εικόνα,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

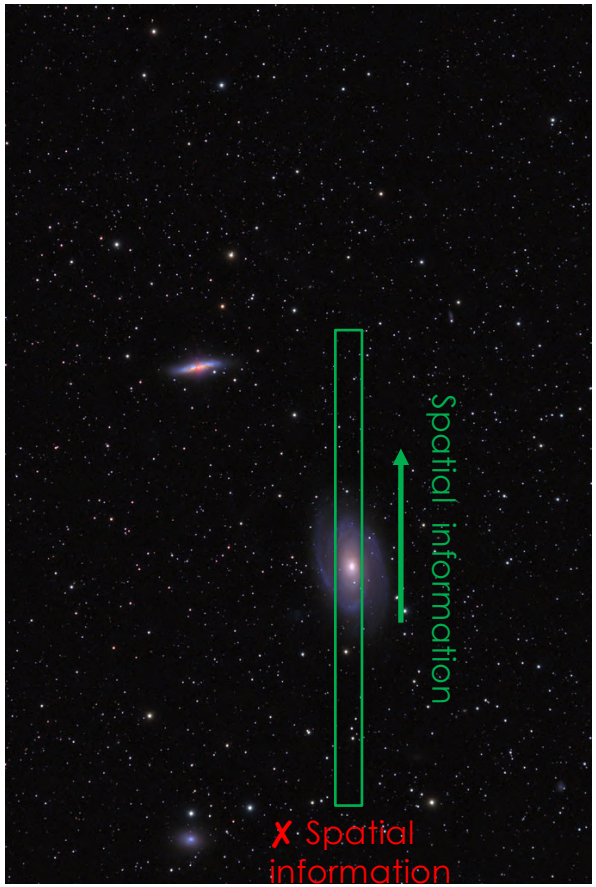


δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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.



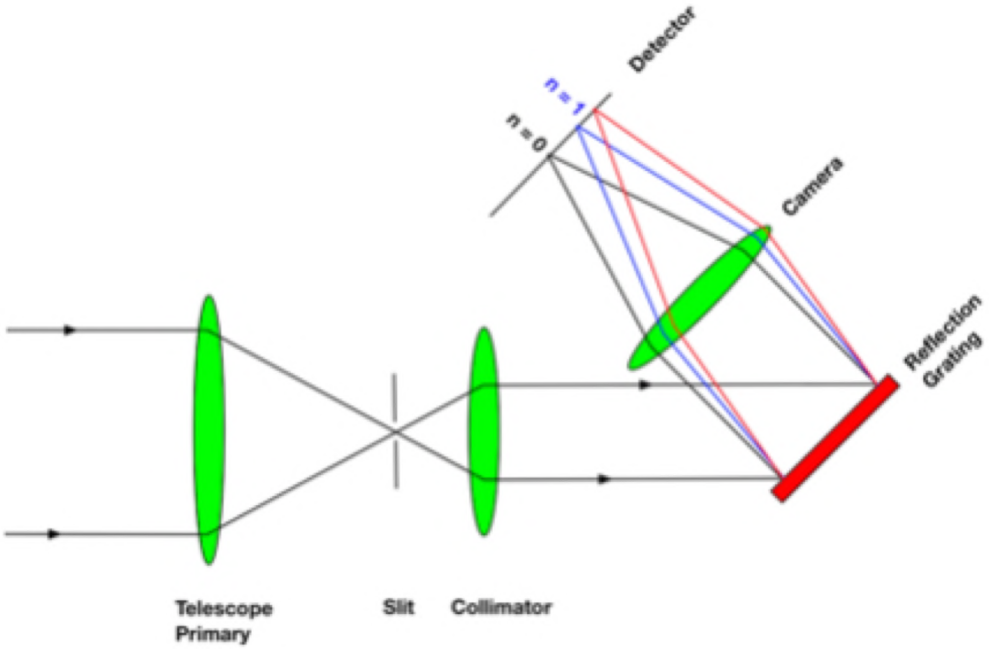


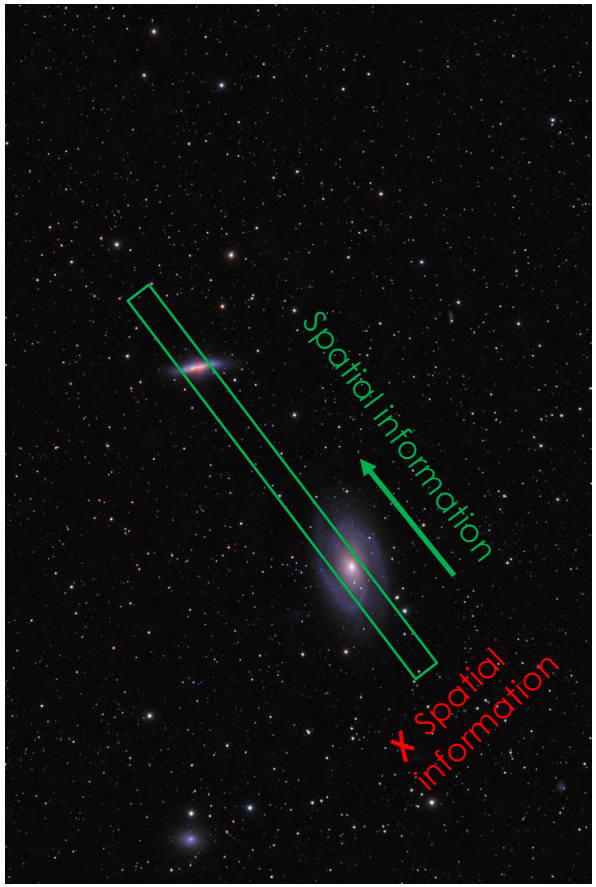
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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.





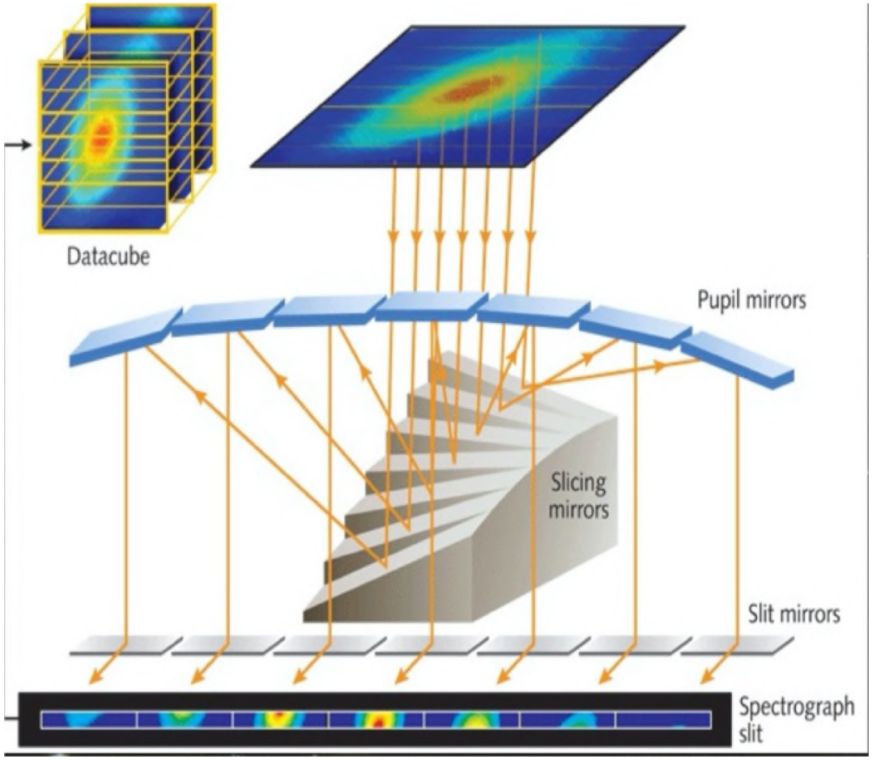
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Ένα βήμα παραπέρα - **IFU data:**

Όμως η εισερχόμενη στο τηλεσκόπιο πληροφορία είναι τρισδιάστατη (2 άξονες για θέση στον ουρανό, 1 άξονα για λ). 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.

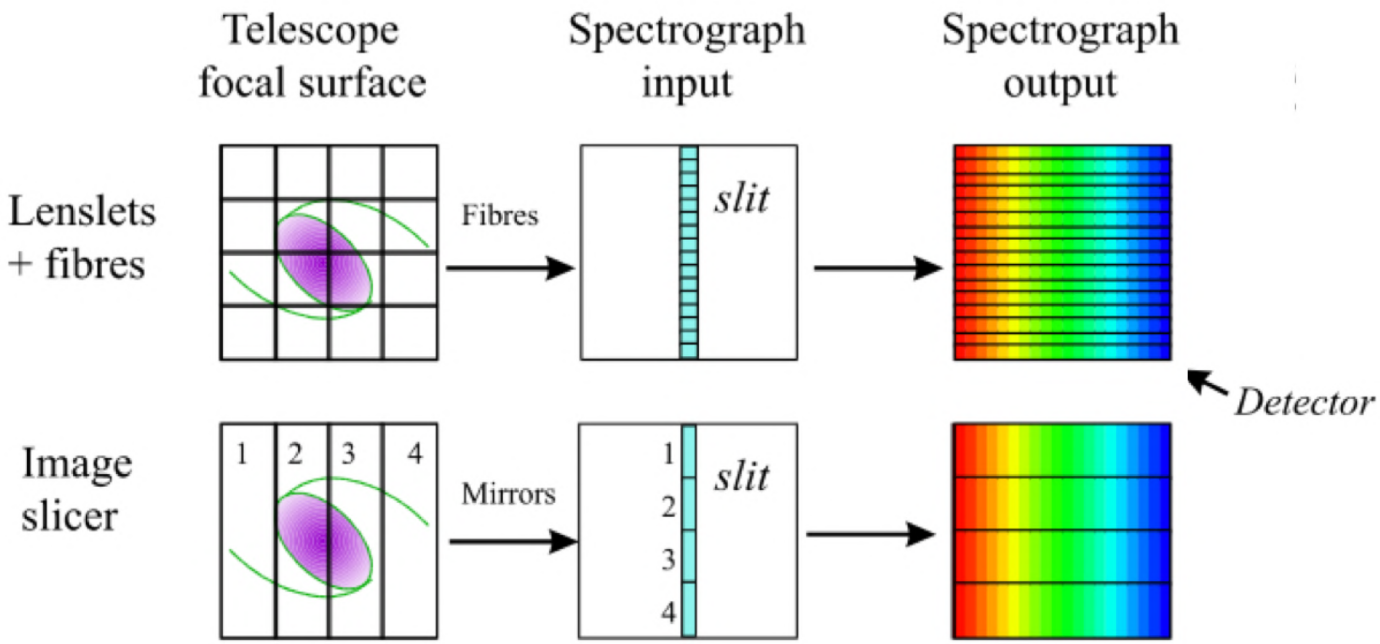
Μάλιστα, η γωνία είναι τέτοια ώστε το φως να εισέρχεται **σειριακά** στον φασματογράφο.



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…

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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 μετατροπης e^-/analog-to-digital units).

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

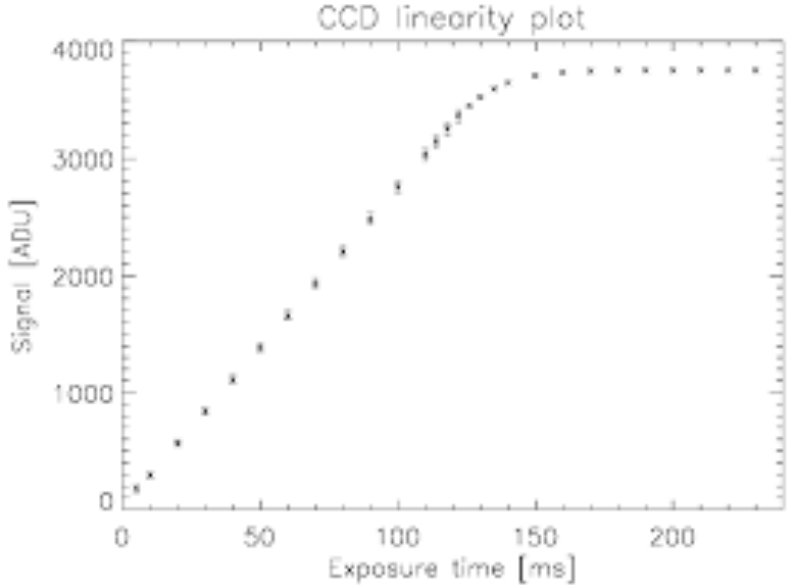
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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:

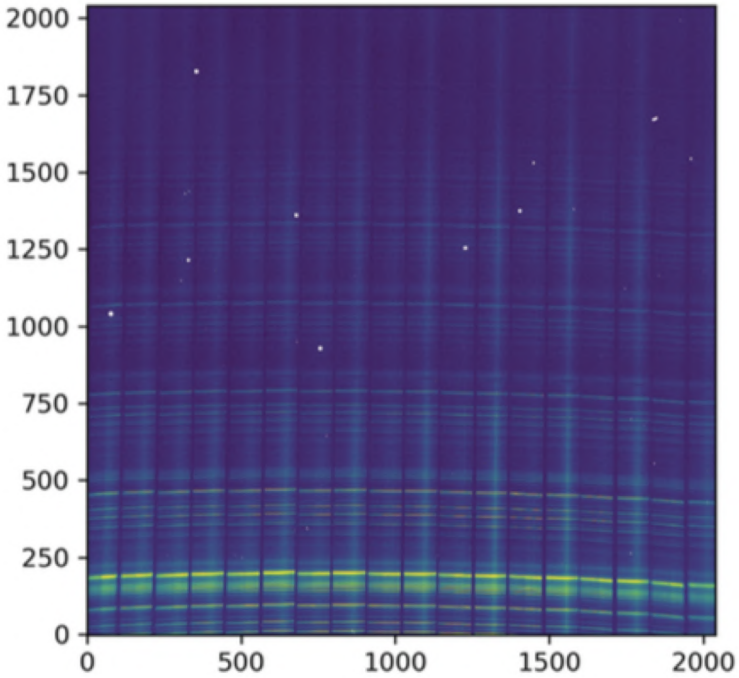
- τόσο το flat όσο και οι επιστημονικές εικόνες πρέπει να παρθούν σε περιοχές γραμμικής απόκρισης της κάμερας. Η μέτρηση αυτή γίνεται πριν από τα flat.



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/γραμμη και διορθώνουμε την εικόνα με αυτό.

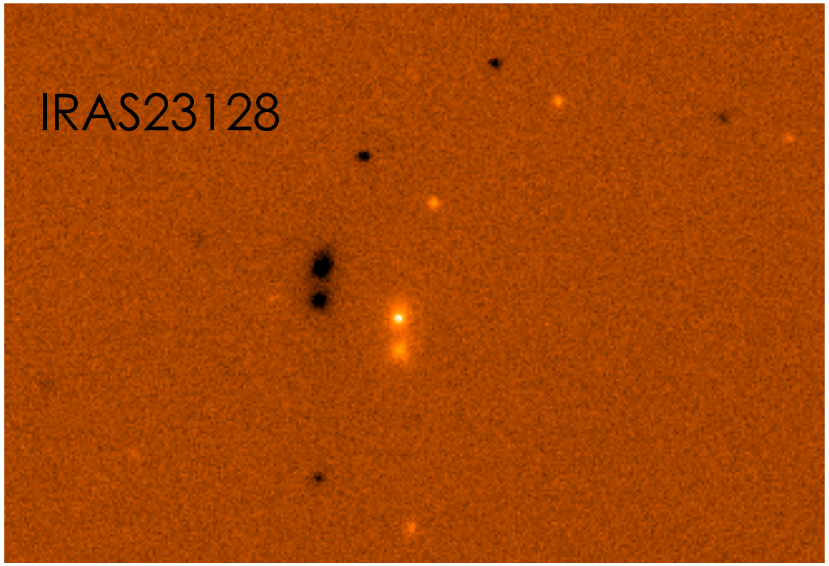
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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 αφαιρεθει.

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 παραμείνει 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).

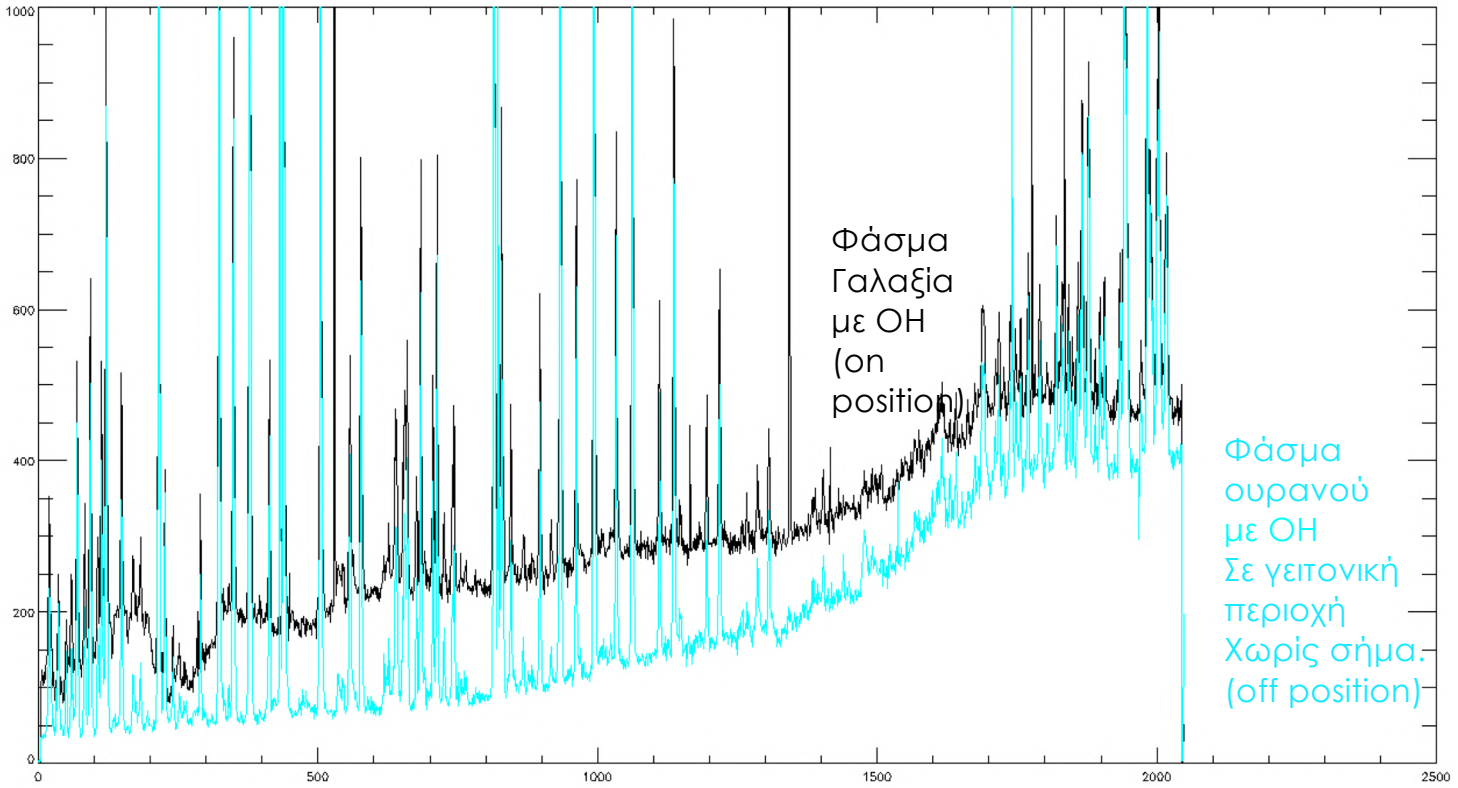


δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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.



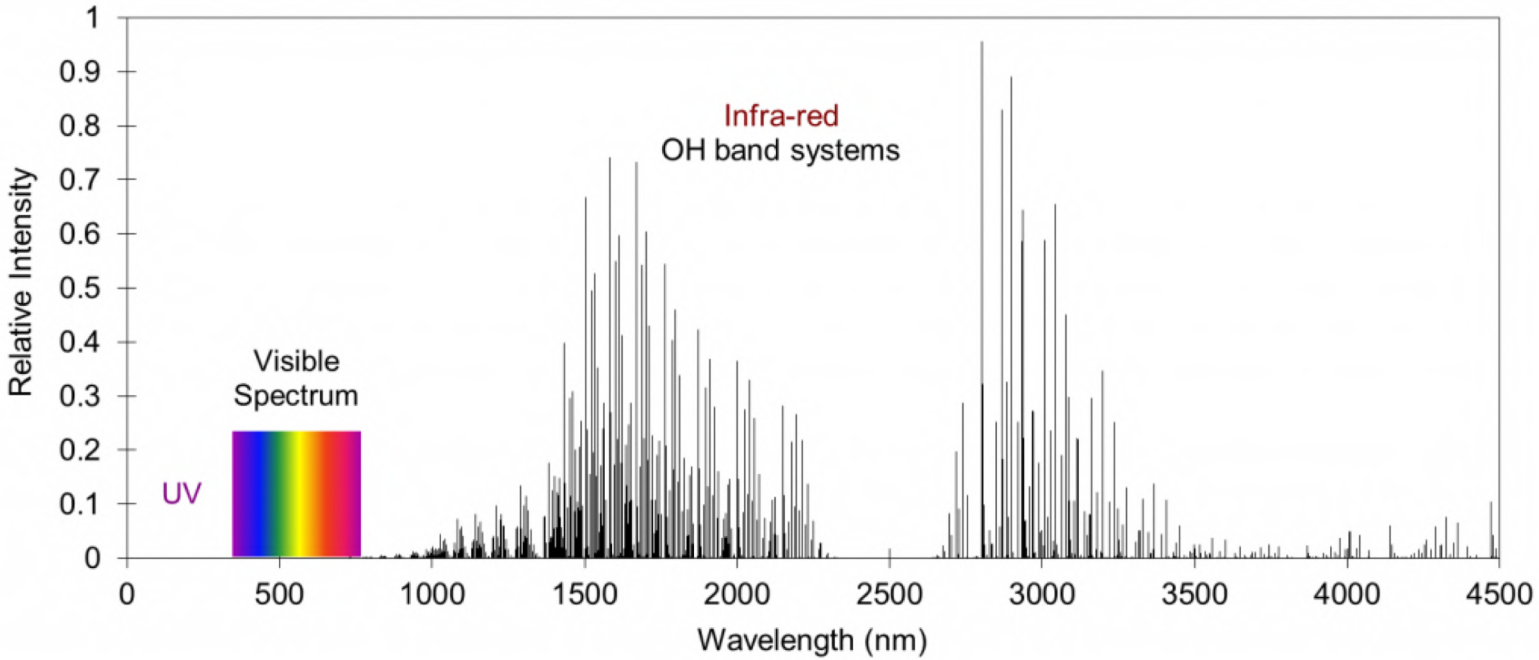
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Από που προέρχεται το υδροξύλιο;
Πολλοί τρόποι παραγωγής από το όζον στην ατμοσφαιρα, π.χ.,

$H + O_3 \rightarrow OH^* + O_2$, αντίδραση που δίνει OH σε διεγερμένη στάθμη.
Κατά την αποδιέγερση παράγονται οι παρατηρούμενες γραμμές. Επίσης:

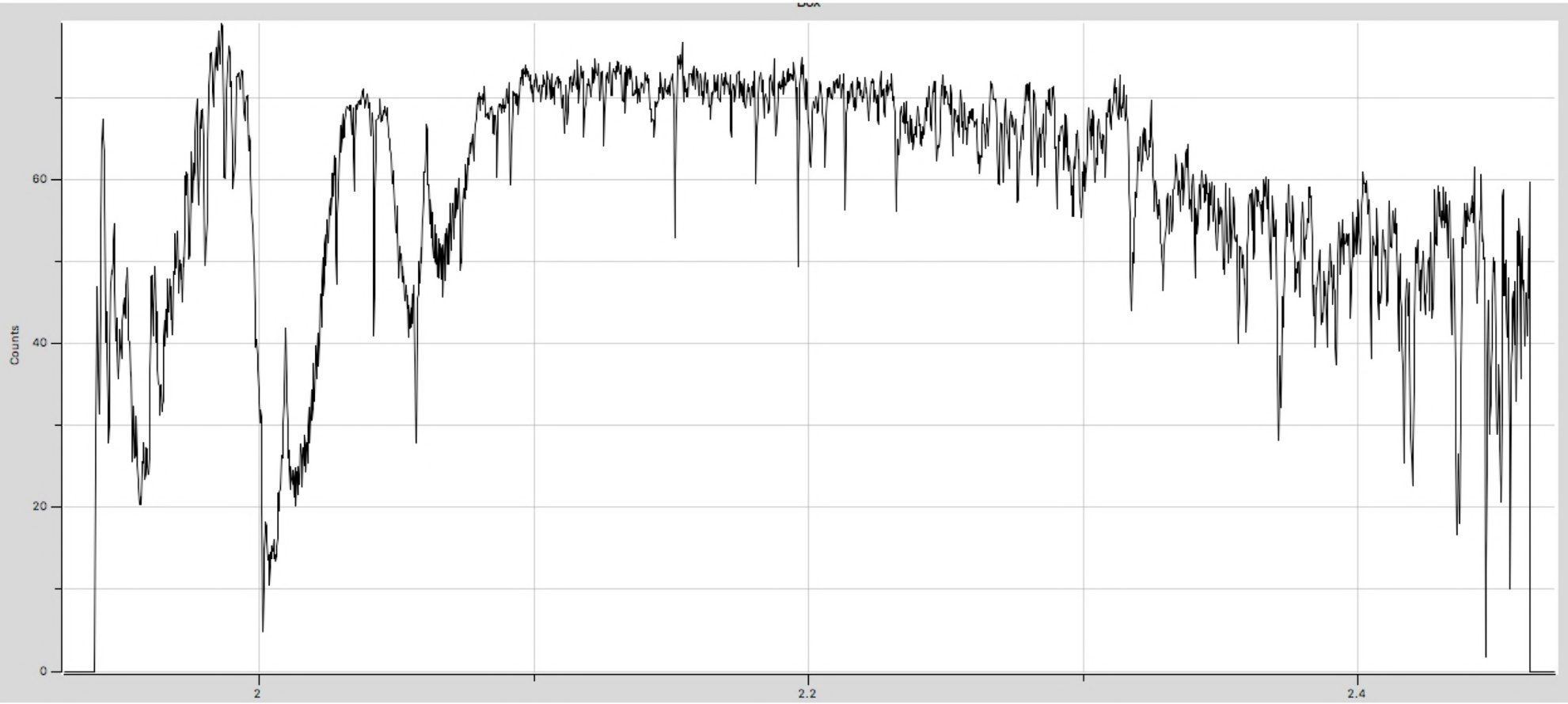
$O_3 \xrightarrow{h\nu}$ φωτόλυση → $O + O_2$ → $O + O_2 + X \rightarrow O_3 + X$ (97%)
→ $O + H_2O \rightarrow 2\ OH$ (3%)

Η παραγωγή είναι πιο έντονη την ημέρα!



δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

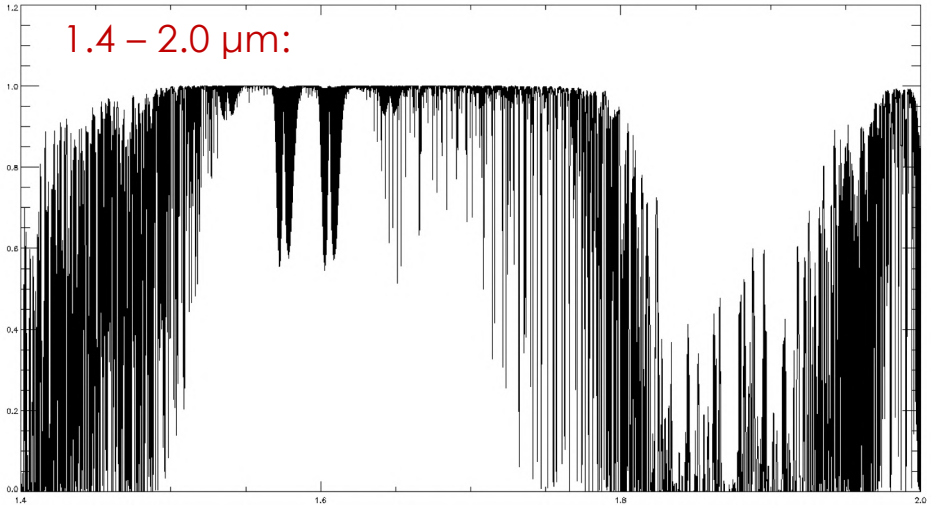
Επόμενο - κι ακόμα πιο σημαντικό πρόβλημα με την ατμόσφαιρα – γιατί αφορά πολλά μήκη κύματος: απορρόφηση του παρατηρούμενου σήματος λόγω (κυρίως) υδρατμών! Αυτό είναι το φάσμα που προκύπτει όταν αφαιρέσουμε φάσμα «ουρανού» από πηγής!



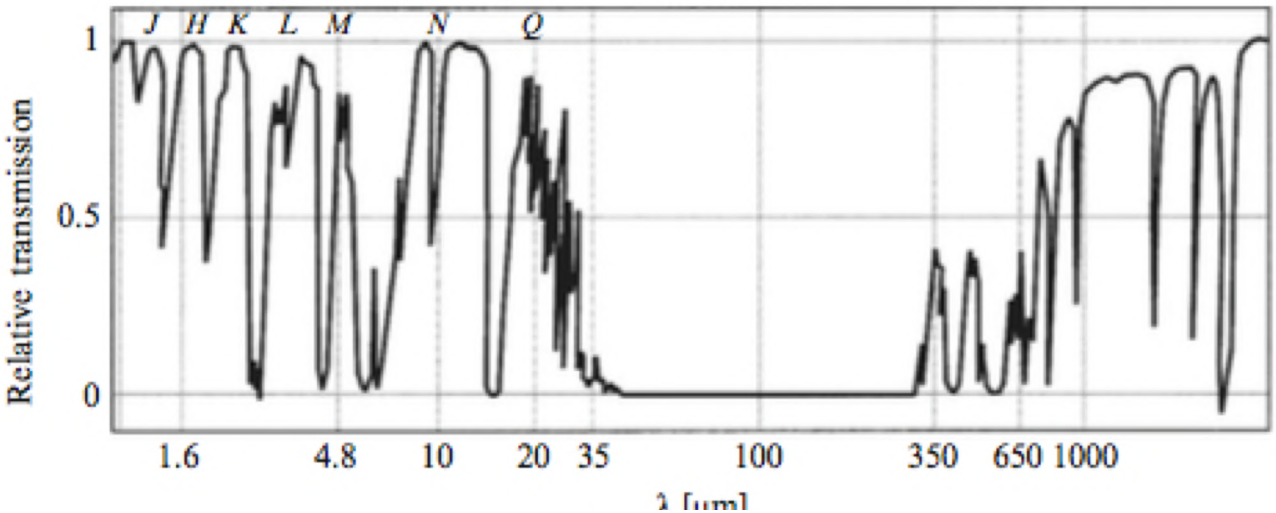
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Μοντέλα της ατμόσφαιρας σε συναφή, υπέρυθρα μήκη κύματος:
η ακτινοβολία μπορεί απορροφάται πλήρως λόγω υδρατμών.

1.4 – 2.0 μm:

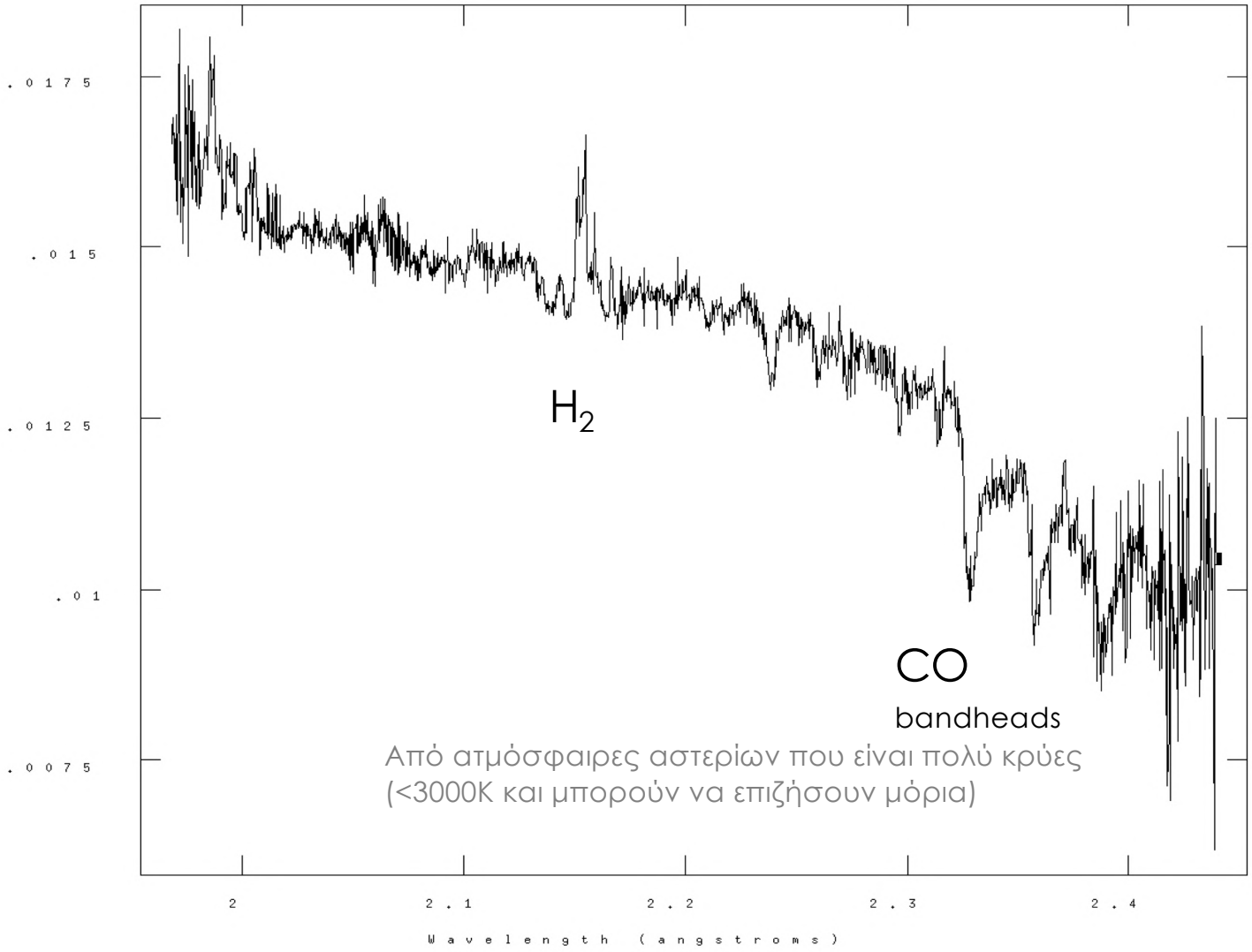


1.6 – 1000 μm:



δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

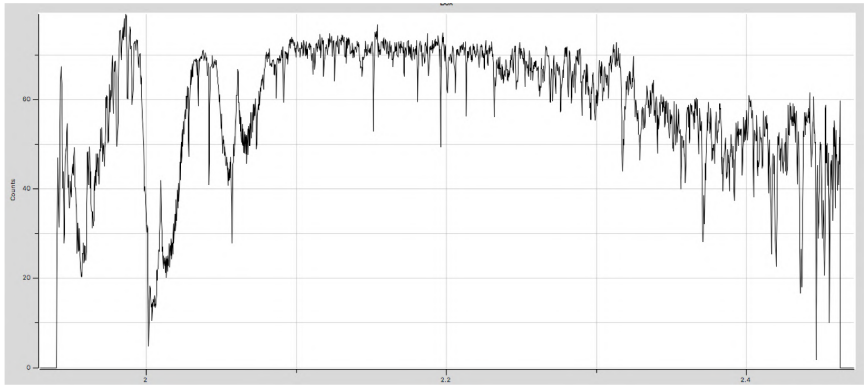
Μόνο μετά τη διόρθωση της απορρόφησης της ατμόσφαιρας (π.χ., βάσει μοντέλου) μπορούμε να καταλήξουμε στο φάσμα του γαλαξία της παρατήρησης (NGC6328)
- Το πραγματικό σήμα είναι θαμμένο κάτω από πολλά συστηματικά!



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.

$$m = -2.5 \log_{10}\left(\frac{f}{f_0}\right)$$ άρα m = -2.5 log(f) + 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 απο άλλο σύστημα, το

2) AB mag (πιο πρόσφατο)**:** εδώ το μηδενικό AB mag αντιστοιχεί ροή F_ν=3631 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

$$m_{\rm AB} \approx -2.5 \log_{10}\left(\frac{f_\nu}{3\,631\ {\rm Jy}}\right)$$ ή $$m_{\rm AB} = -2.5 \log_{10} f_\nu - 48.6$$ αν [f]: erg s^{-1} cm^{-2} Hz^{-1}

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Vega Flux Zeropoints

Quantity	U	B	V	R	I	J	H	K	Notes and units
λ_{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_ν	1.79	4.063	3.636	3.064	2.416	1.589	1.021	0.64	$x10^{-20}$ erg cm^{-2} s^{-1} Hz^{-1}, from Bessell et al. (1998)
f_λ	417.5	632	363.1	217.7	112.6	31.47	11.38	3.961	$x10^{-11}$ erg cm^{-2} s^{-1} A^{-1}, from Bessell et al. (1998)
Φ_λ	756.1	1392.6	995.5	702.0	452.0	193.1	93.3	43.6	photons cm^{-2} s^{-1} A^{-1}, calculated from above quantities

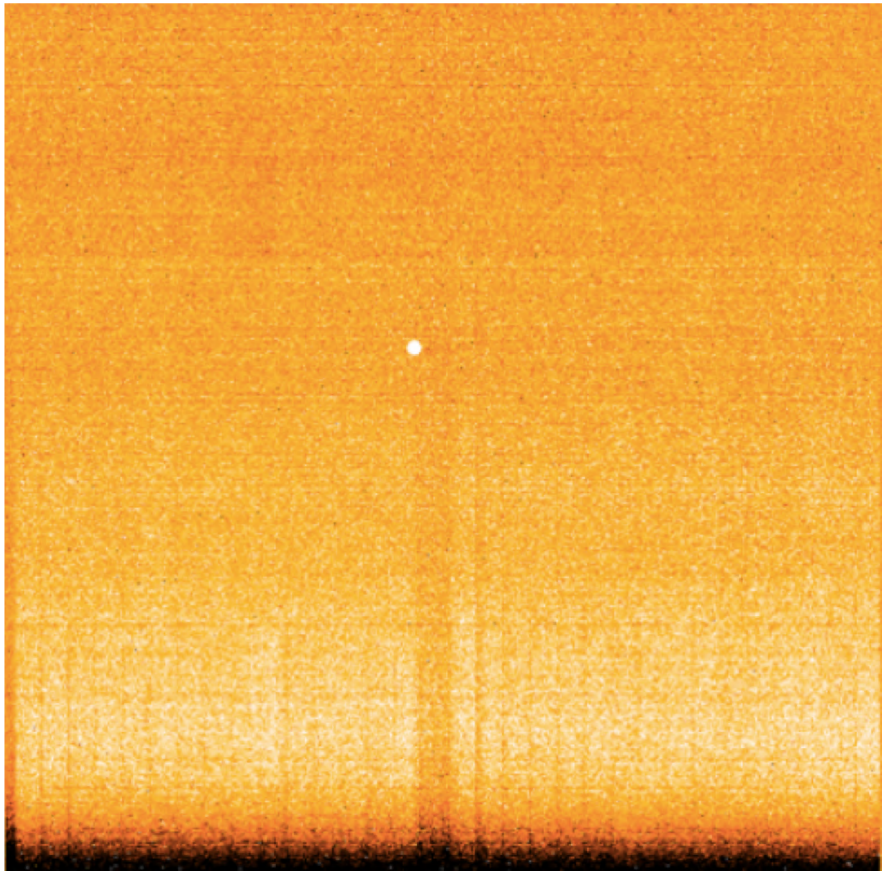
These are for the Vega magnitude system and the Bessell et al. (1998) Johnson-Cousins-Glass System.

AB Flux Zeropoints

Quantity	u	g	r	i	z	Notes and units
λ_{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_ν	3631	3631	3631	3631	3631	Jy or $x10^{-23}$ erg cm^{-2} s^{-1} Hz^{-1}
f_λ	859.5	466.9	278.0	185.2	131.5	$x10^{-11}$ erg cm^{-2} s^{-1} A^{-1}, calculated from above quantities
Φ_λ	1539.3	1134.6	875.4	714.5	602.2	photons cm^{-2} s^{-1} A^{-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,

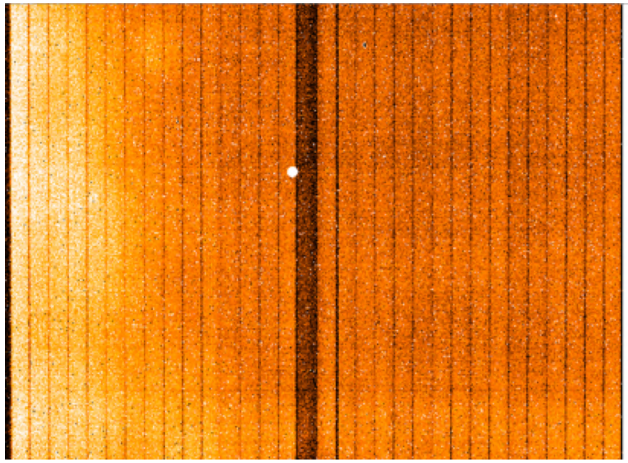
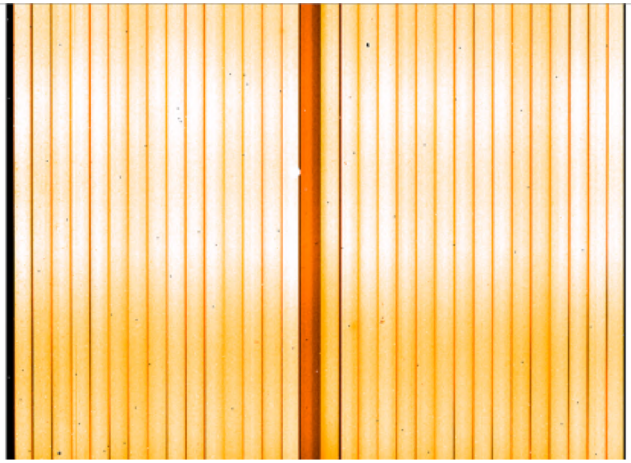
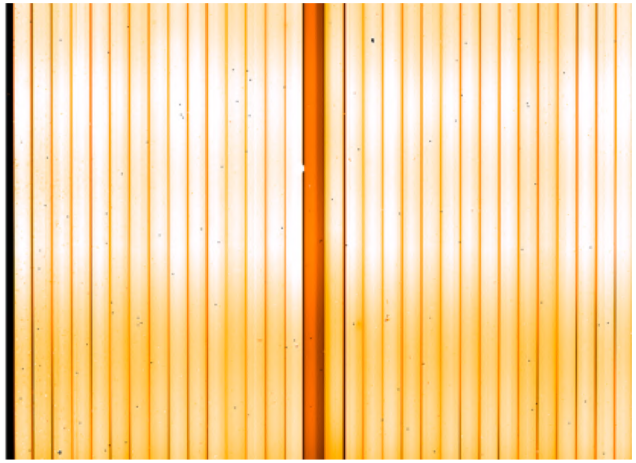
– η μέγιστη τιμή της έντασης **κανονικοποιημένη στη μονάδα** για να αφορά σε ποσοστό

- δεν υπάρχει σήμα εκτός θόλου (είναι κλειστός).

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Παραδείγματα από SINFONI data:

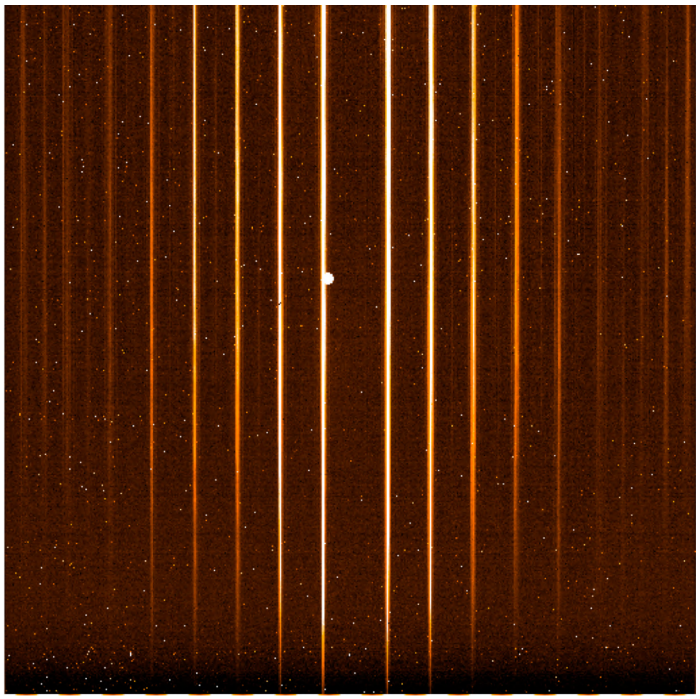
Linearity**:**
- Ελέγχουμε πότε η κάμερά μας δεν ακολουθεί γραμμικότητα στη μετατροπή φωτονίων σε e^-, και πότε επέρχεται κορεσμός.
- **Κάνουμε πολλαπλές μετρήσεις**, ρίχνοντας όλο και περισσότερο φως, ομογενώς πάντα κατανεμημένο.

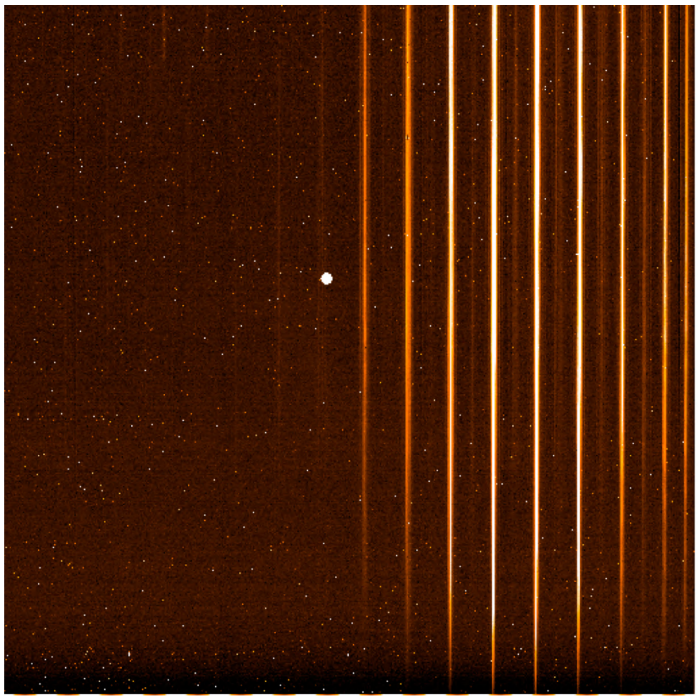




Παραδείγματα από SINFONI data:

Distortion**:**

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

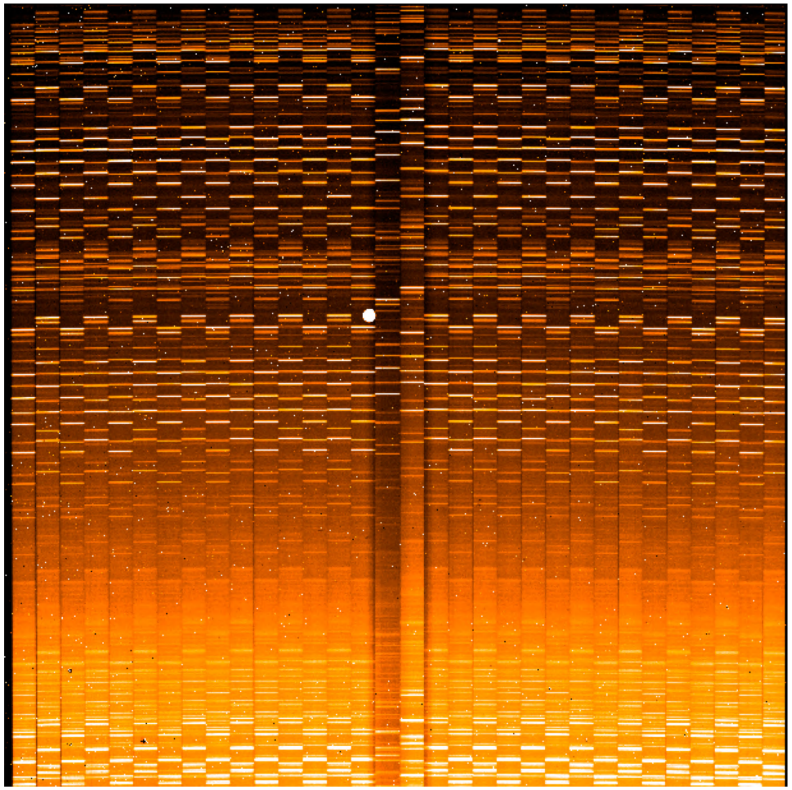




δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Παραδείγματα από SINFONI data:

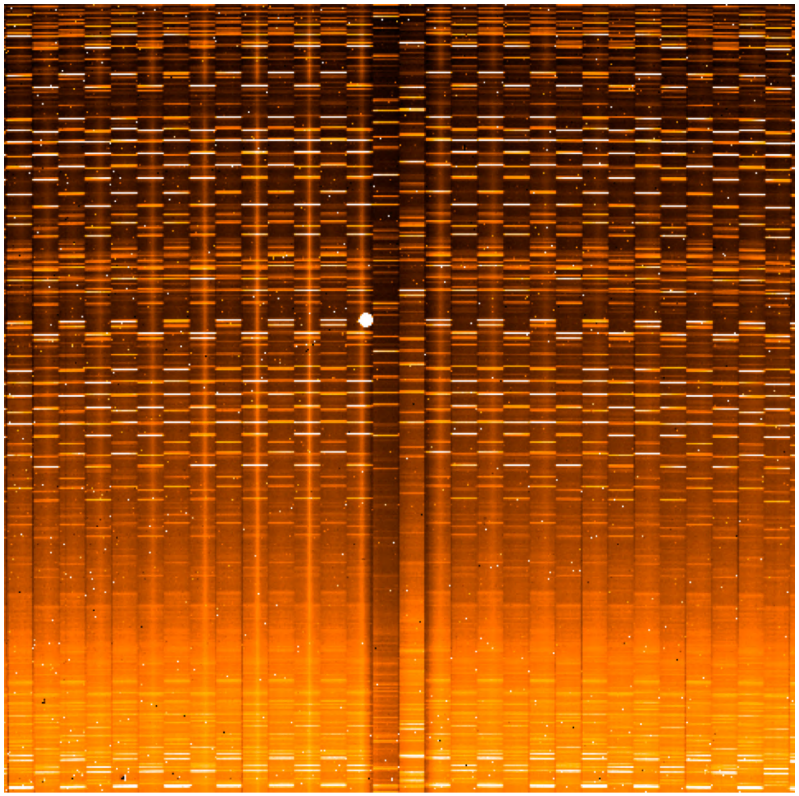
Sky subtraction: Εδώ **η διάκριτη πληροφορία αφορά στα OH**. Το κοσμικό υπόβαθεο εννιαίο. (όταν βλέπουμε OHs, ο θόλος είναι ανοιχτός).

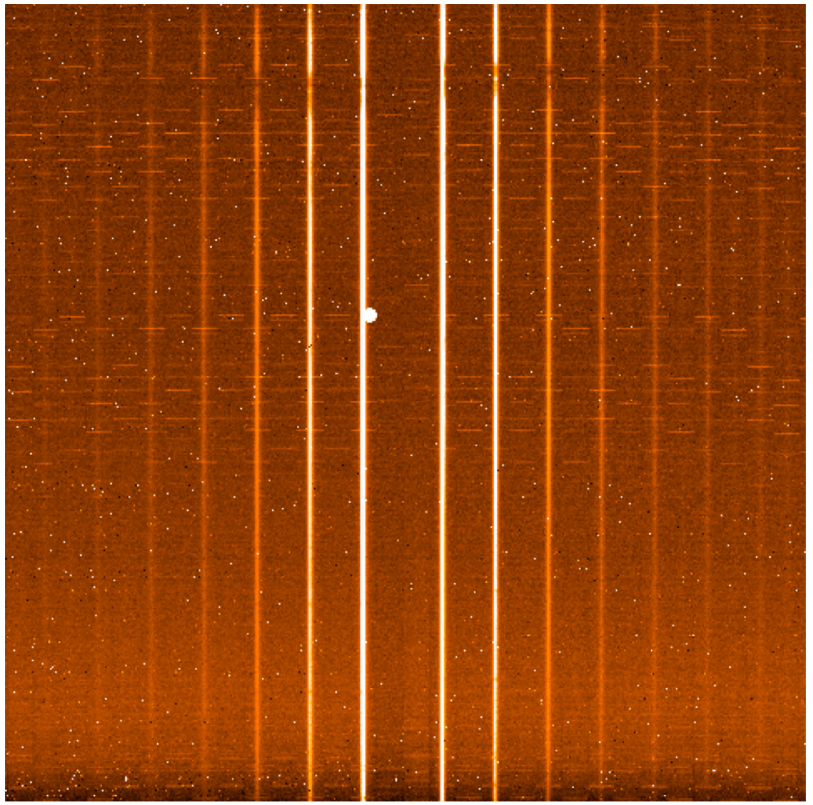


δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Παραδείγματα από SINFONI data:

Έκθεση – είτε για αστέρι, είτε για target (π.χ. γαλαξία). Σήμα στον φασματοσκοπικό+OH.
Πώς μπορούμε να τα ξεχωρίσουμε;
1) Από το χρονο παρατηρησης (φαίνεται σε σχέση με τα OH) και τη
2) το μέγεθος της πηγής στη **χωρική** (μη φασματοσκοπική) κατεύθυνση των δεδομένων:
   ο γαλαξίας εκτεταμένος





δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

- **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 (1σ), ο χρονος εκθεσης θα καθοριστεί από το πηλίκο σήματος/θόρυβο (S/N) στο οποίο θέλουμε να φτάσουμε. Υπενθύμιση: σήμα/χρόνο ~ 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): $S \sim f * t$, το αθροιστικό σήμα στο χρόνο παρατήρησης μιας εικόνας **μεγαλώνει γραμμικά με το χρόνο**
(π.χ., για ροή ~10 φωτονίων ενέργειας hν /sec, σε 10 sec θα έχουμε 100 φωτόνια)

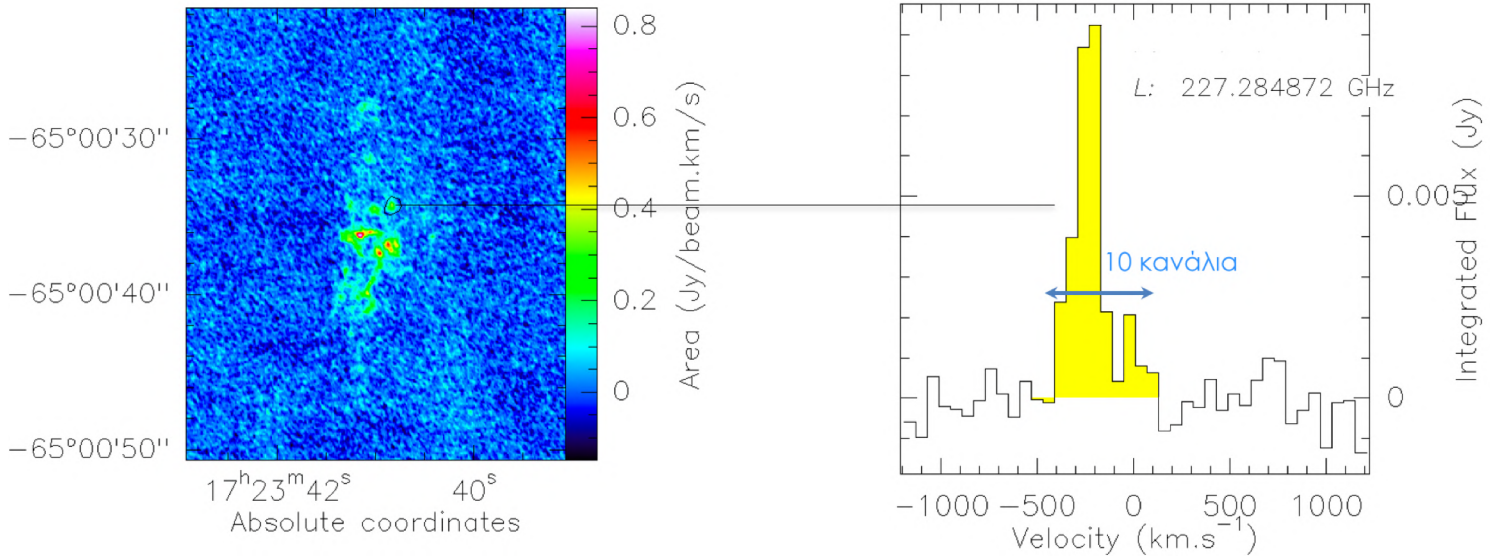
Θόρυβος/noise: $\sigma_{tot}^2 = \sigma_{t1}^2 + \sigma_{t2}^2 + \ldots + \sigma_{tN}^2$ άρα $\sigma_{tot} = \sqrt{t}\, \sigma_i$ για εκθέσεις σταθερού χρόνου

Άρα signal/noise ratio: $S/N = f * t / \sqrt{t}\, \sigma_i = f / \sigma_i * \sqrt{t}$
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.



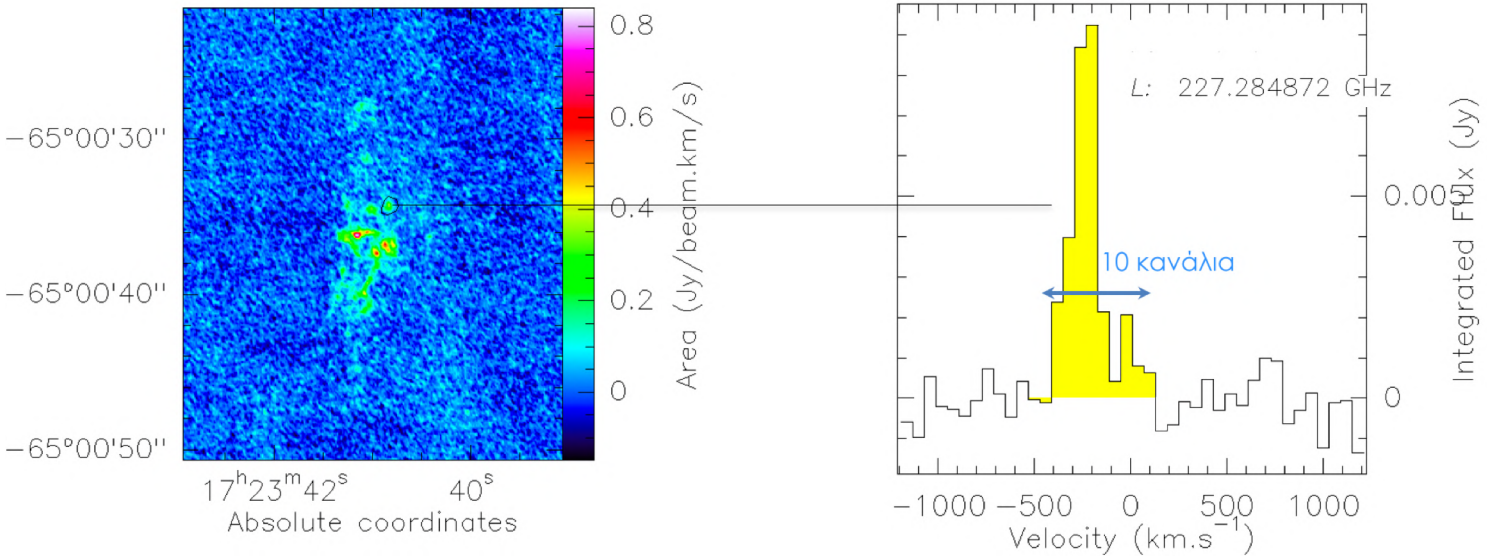
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Άσκηση:
Βρείτε το S/N ratio του κυκλωμενου νέφους χρησιμοποιώντας το φάσμα του στα IFU data.

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

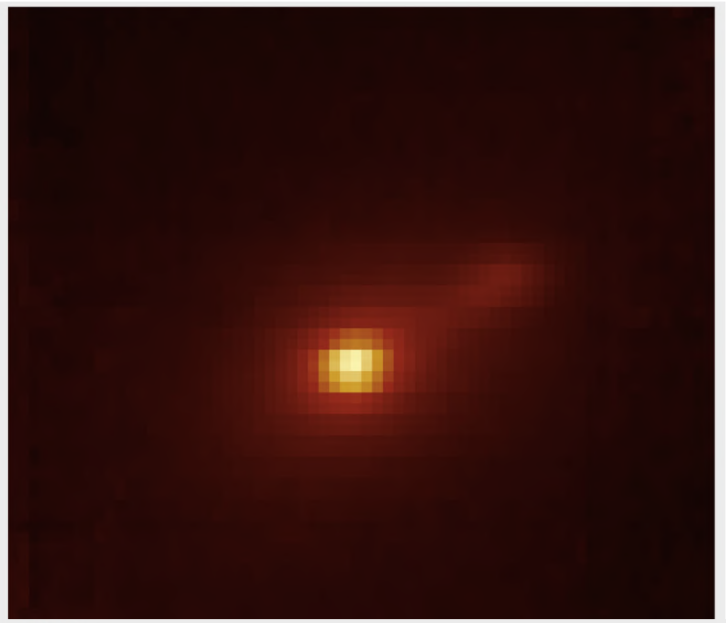
Σήμα $S = \sum_{i=1}^{10} f_i \simeq 2.8 \cdot 10^{-2}$ Jy = 28 mJy

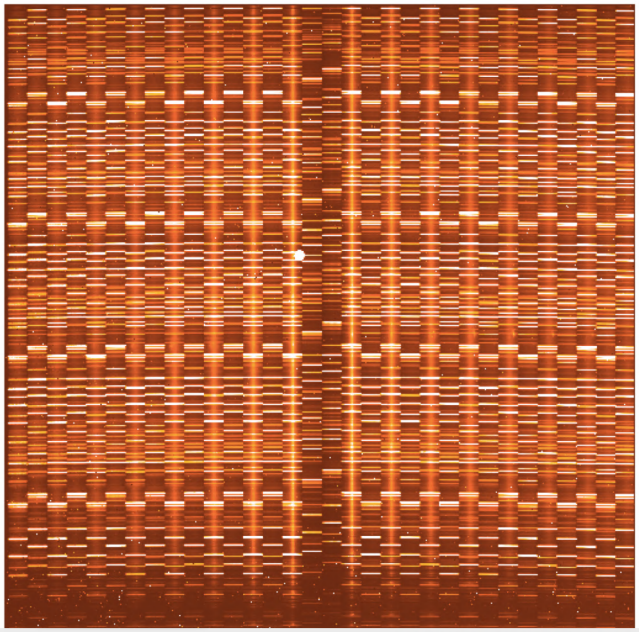
Άρα S/N ratio ~ 20

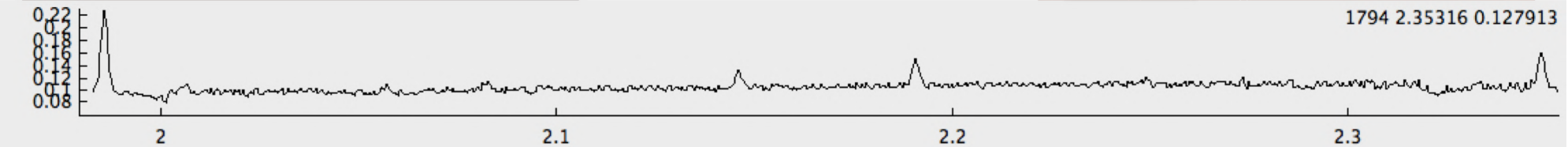


δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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



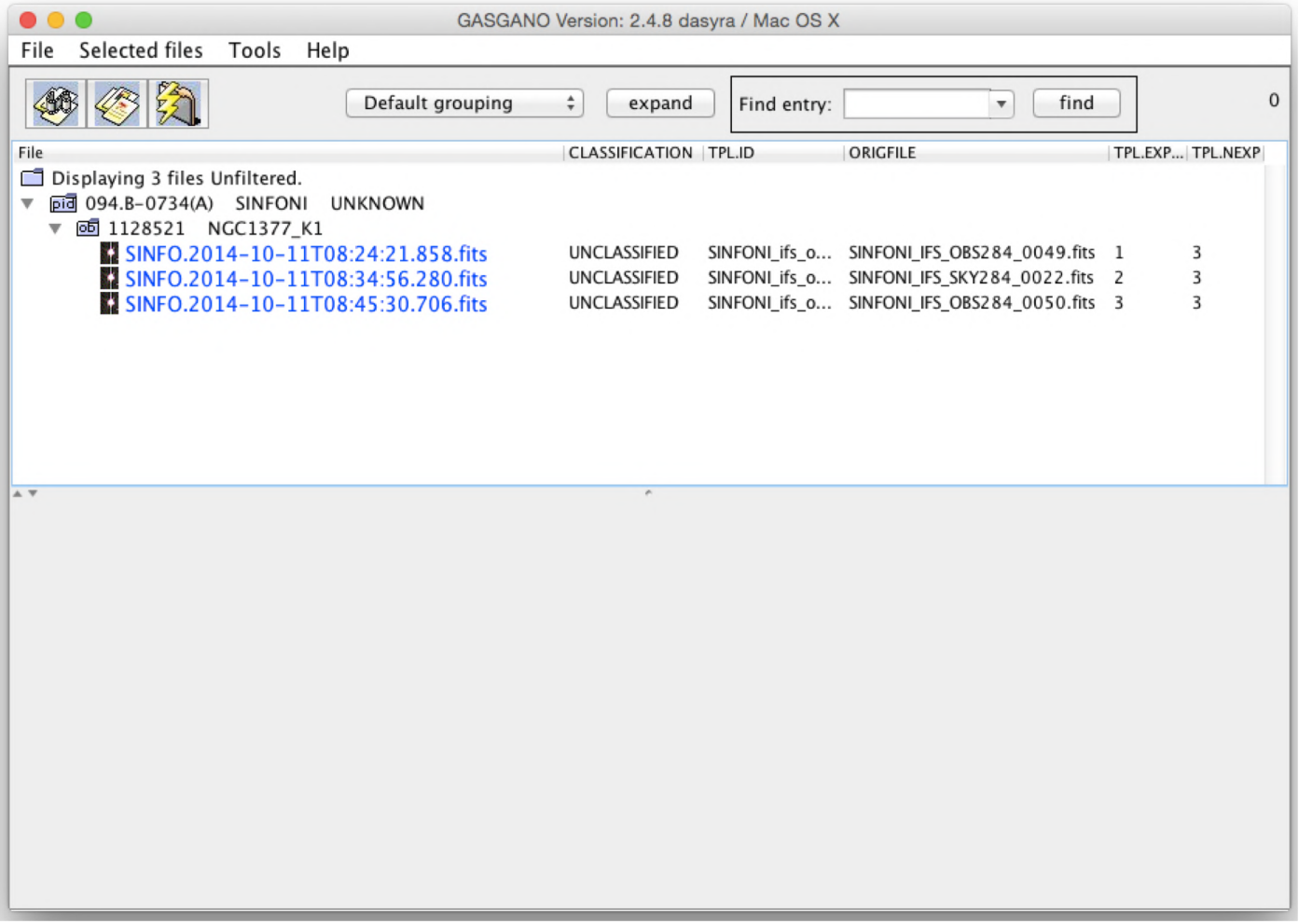




δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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)

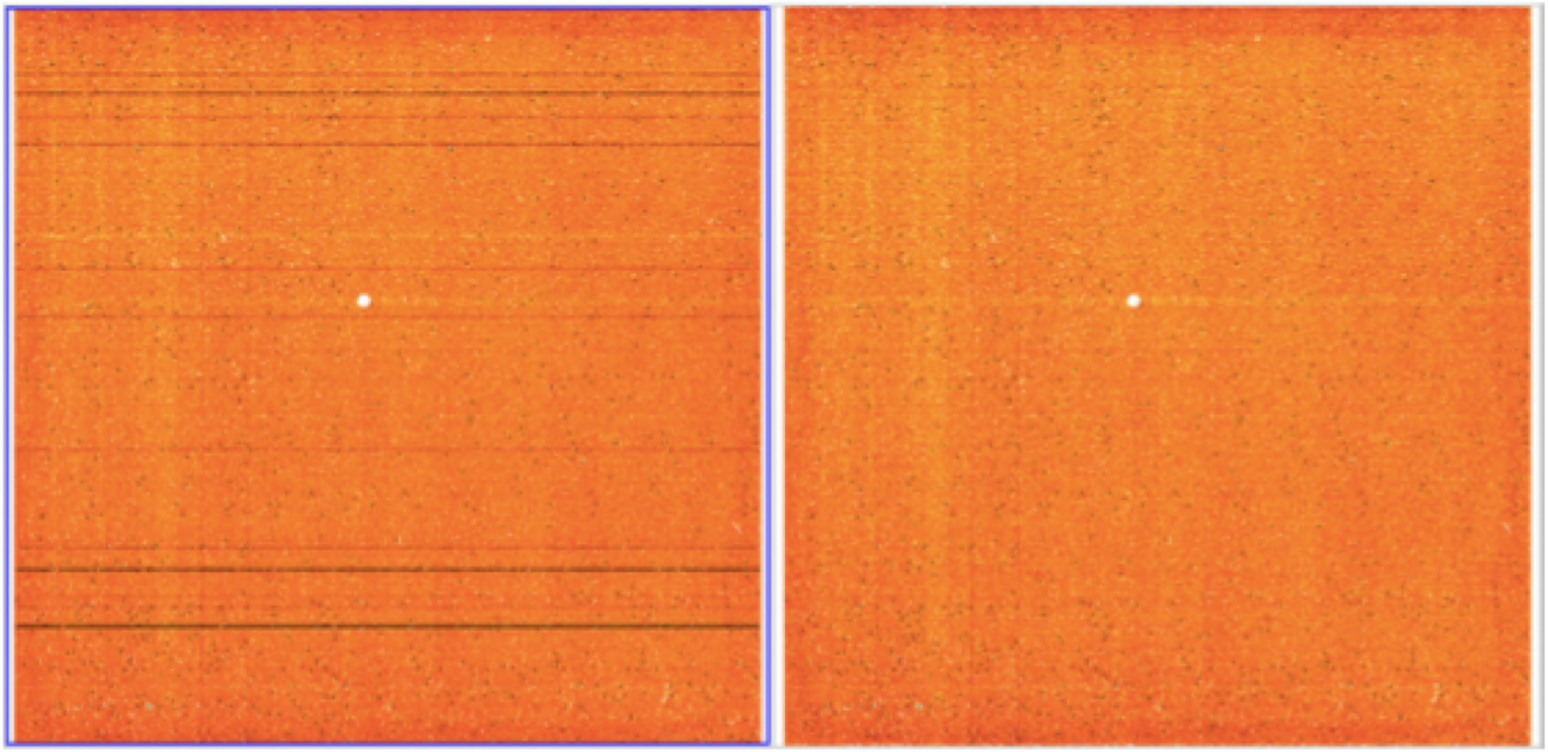


δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Pre-pipeline

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

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



δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

Pre-pipeline

- 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

The pipeline

ESOREX installation

- Esorex 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

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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

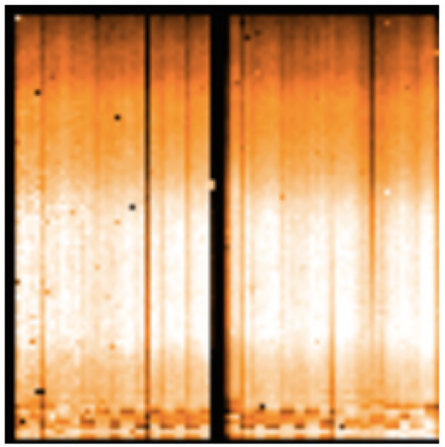
> esorex sinfo_rec_mdark darklist

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

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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

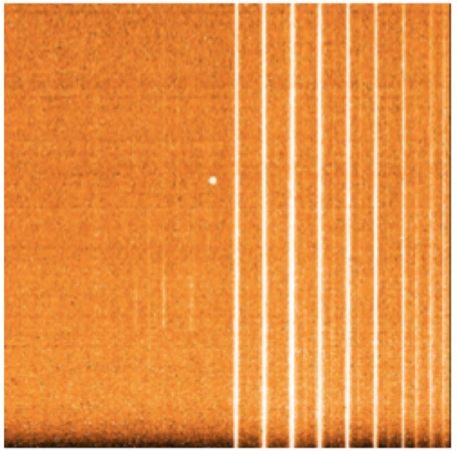
The input file flatlist_bptime600 contains

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

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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.fitsDISTORTION table computed optical distortions
out_distances.fits SLITLETS_DISTANCE table with computed slitlet distances

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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_bpmap_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

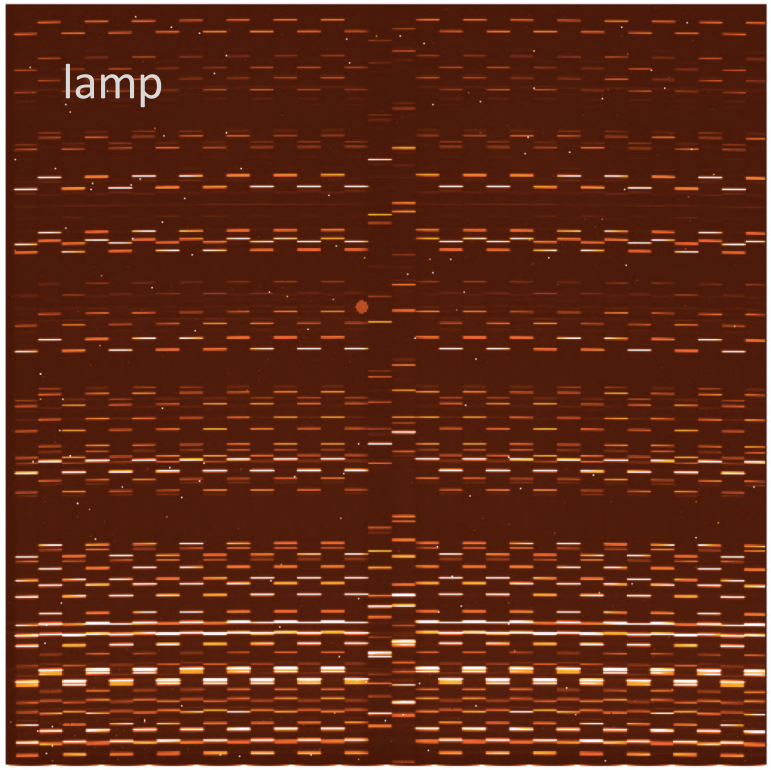
Main output: out_wavemap_ima.fits WAVE_MAP wavelength map image

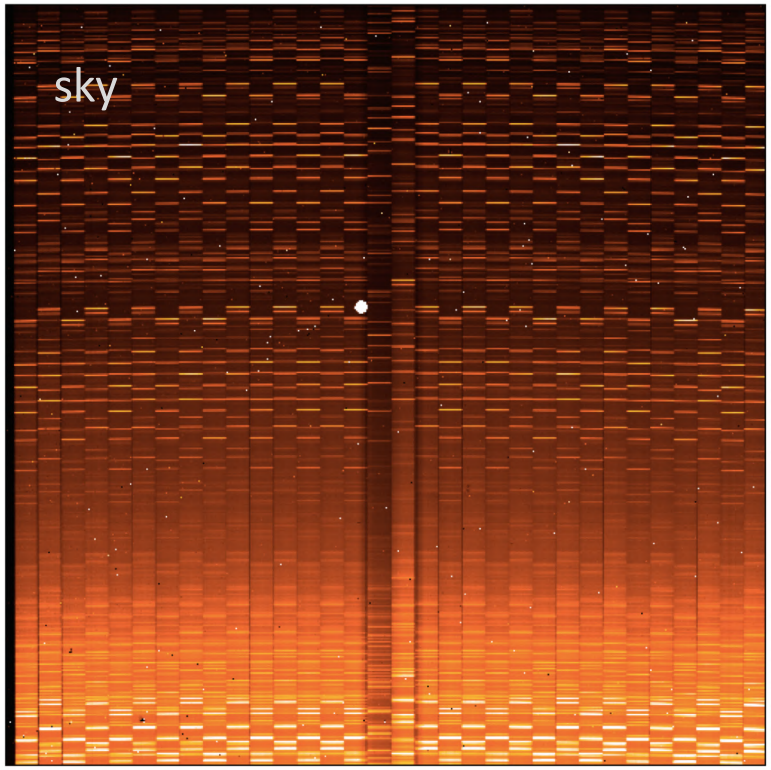
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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.





δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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_bpmap_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)

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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

δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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.

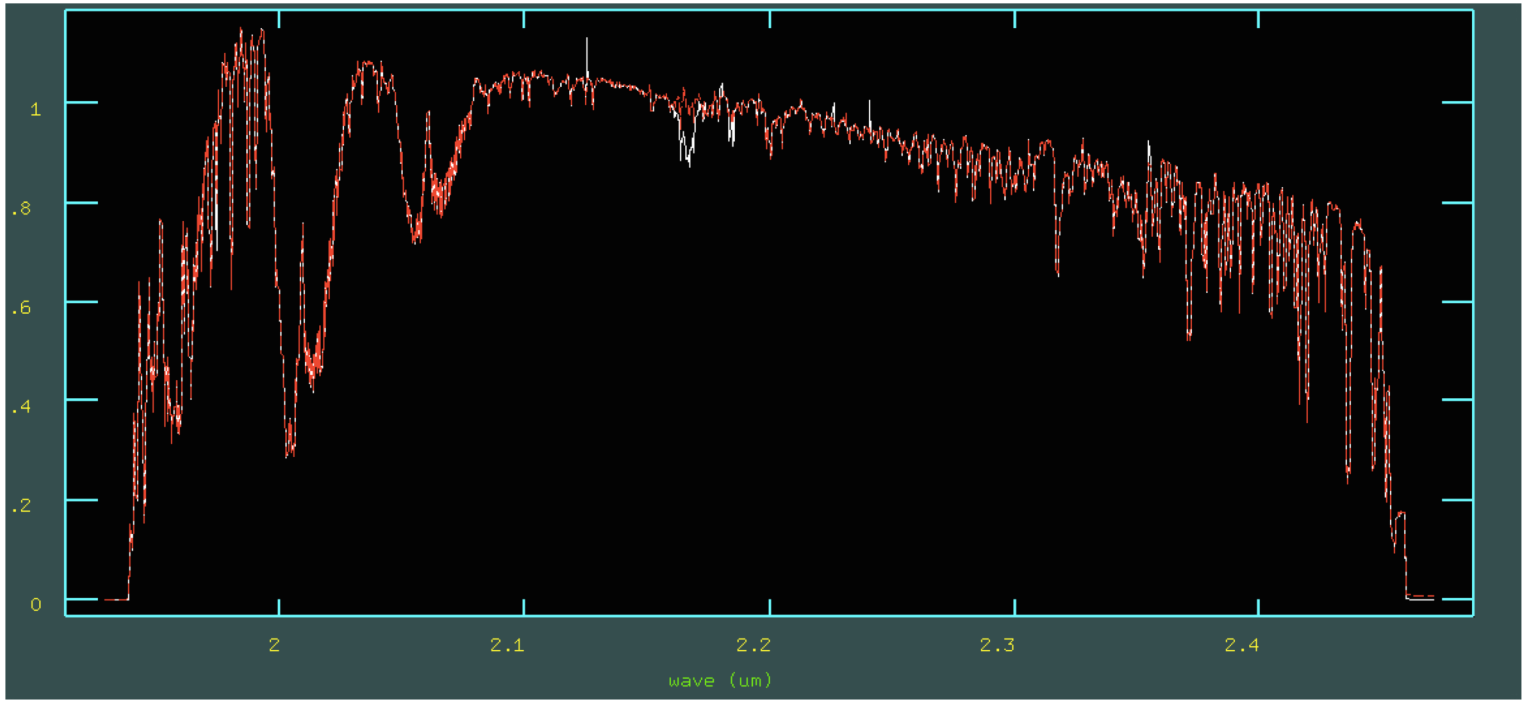
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

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).

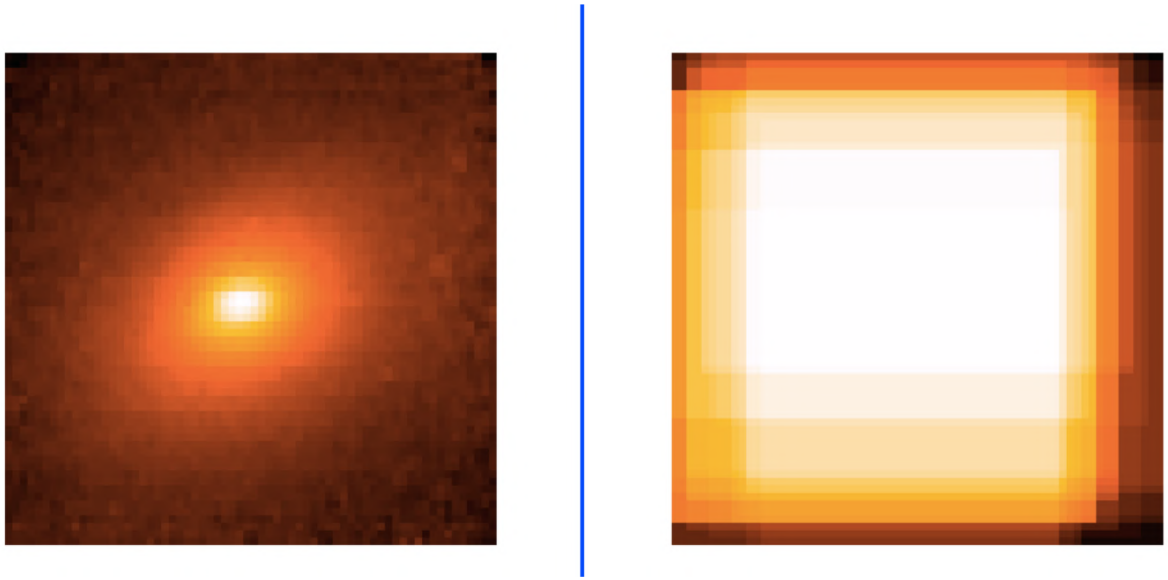


δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

NOT DONE YET!!!!

Things that remain to be done:

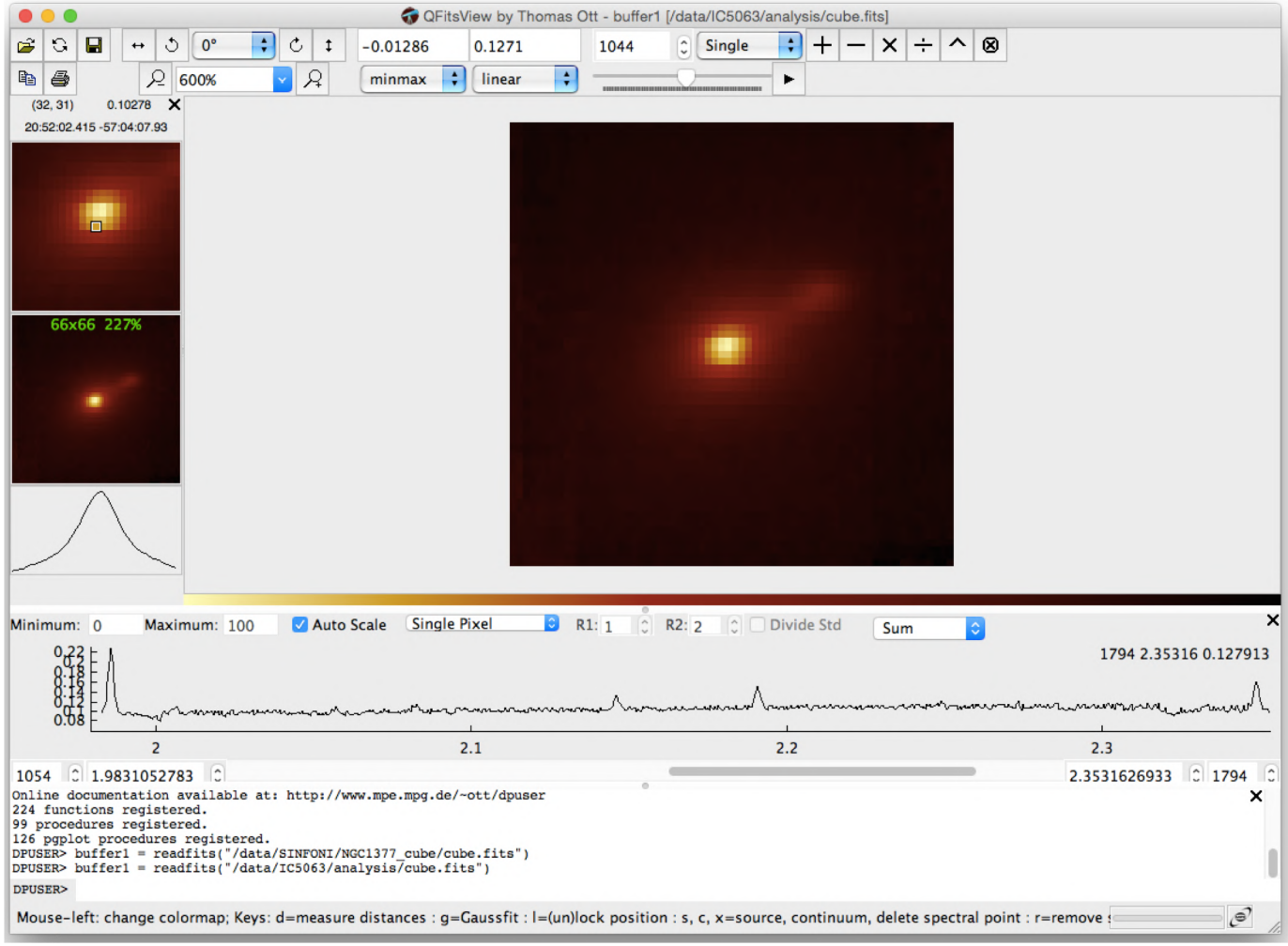
- Flux calibration: stellar counts/second to Jy using known magnitude…
- Merging of data in one mosaic (and corresponding depth map)



These can be done with the aid of external software (e.g., IDL),
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, …



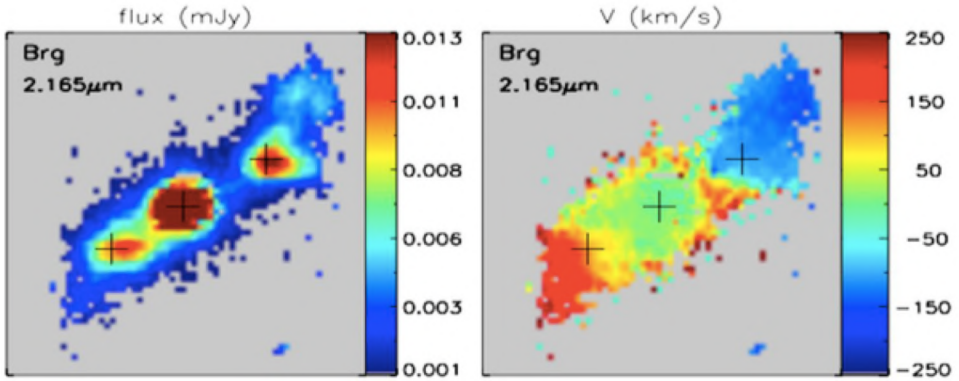
δεδομένα IFU (φωτομετρία και φασματοσκοπία)

- IDL: example for loading an image

```
cube=readfits(cubefile+".fits",hdc,/silent)

tvim,cube[*,*,10],range=[min_flux_lim,max_flux_lim],/noaxis,title="flux",nodata=-1
colorbar,/vertical,/right,range=[min_flux_lim,max_flux_lim],divisions=5
```

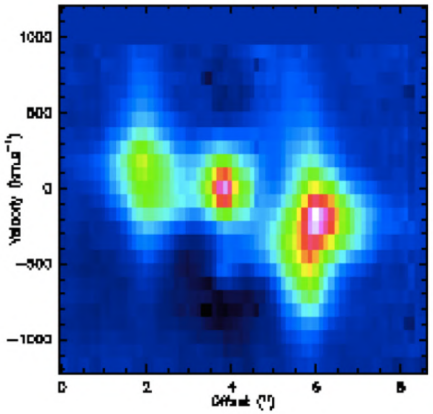
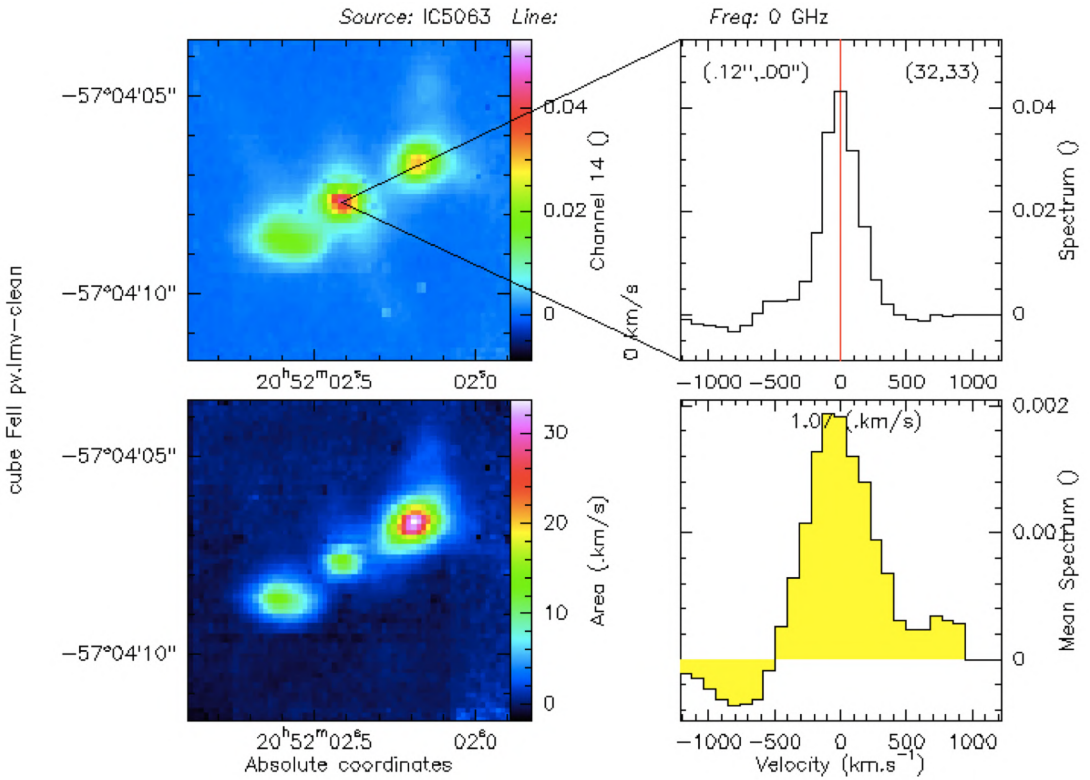
By fitting the data with, e.g., gaussfit on a pixel-by-pixel basis, we can also do kinematic maps



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