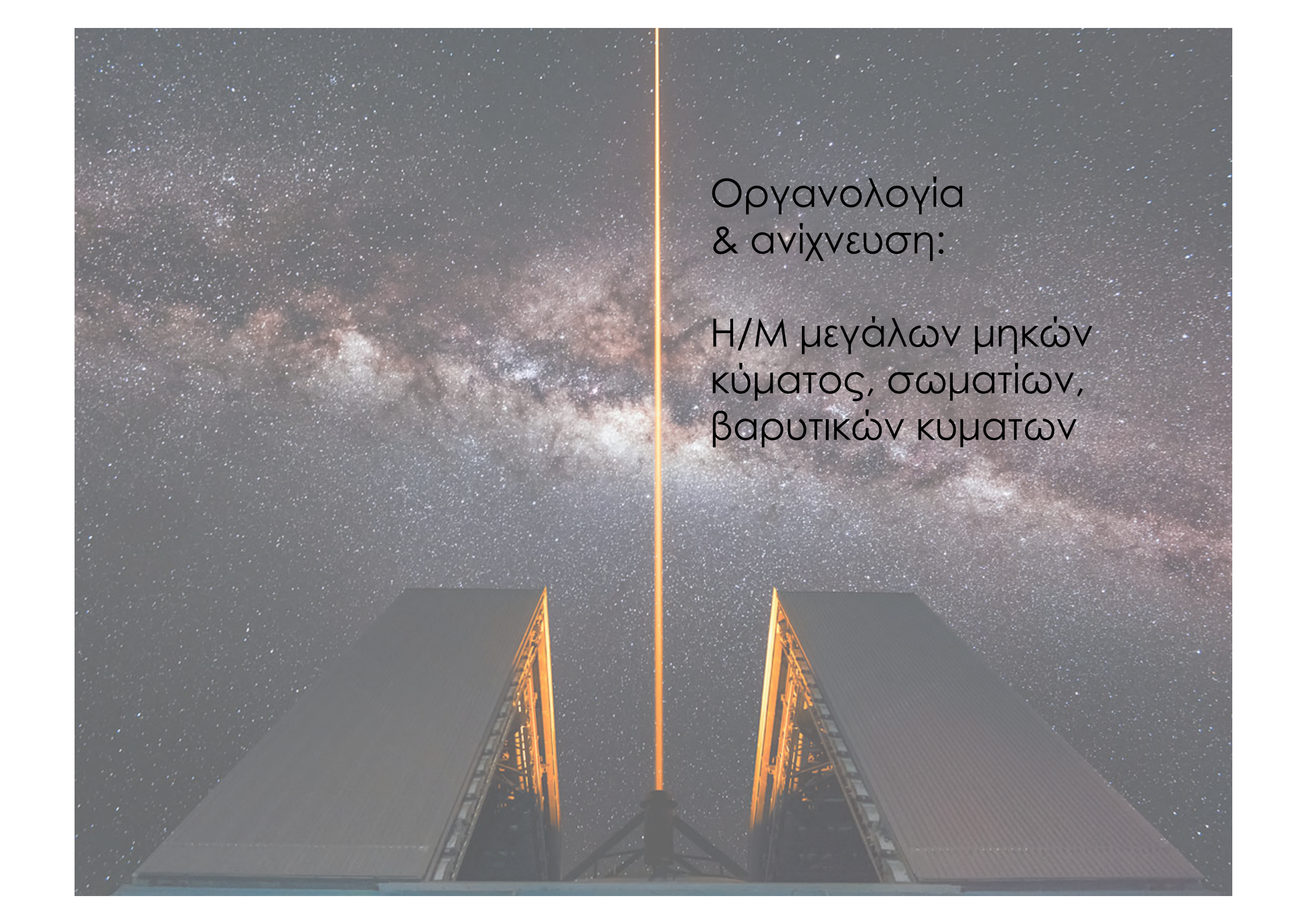




Οργανολογία
& ανίχνευση:

Η/Μ μεγάλων μηκών
κύματος, σωματίων,
βαρυτικών κυμάτων

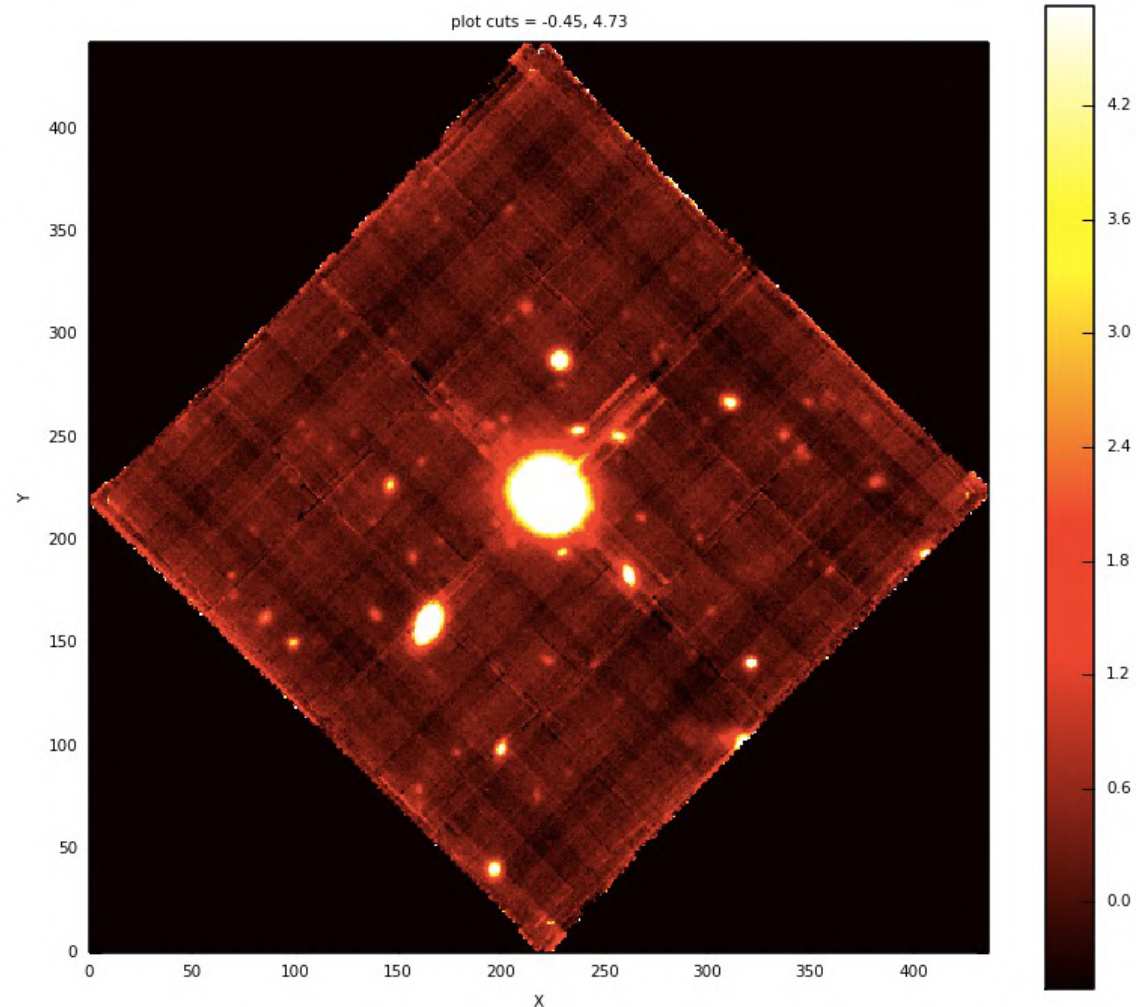
Ανίχνευση H/M ακτινοβολίας: σύντομη αναφορά στο οπτικό (ως εύρος αναφοράς)

Δέκτες: Charge Coupled Devices (CCDs)

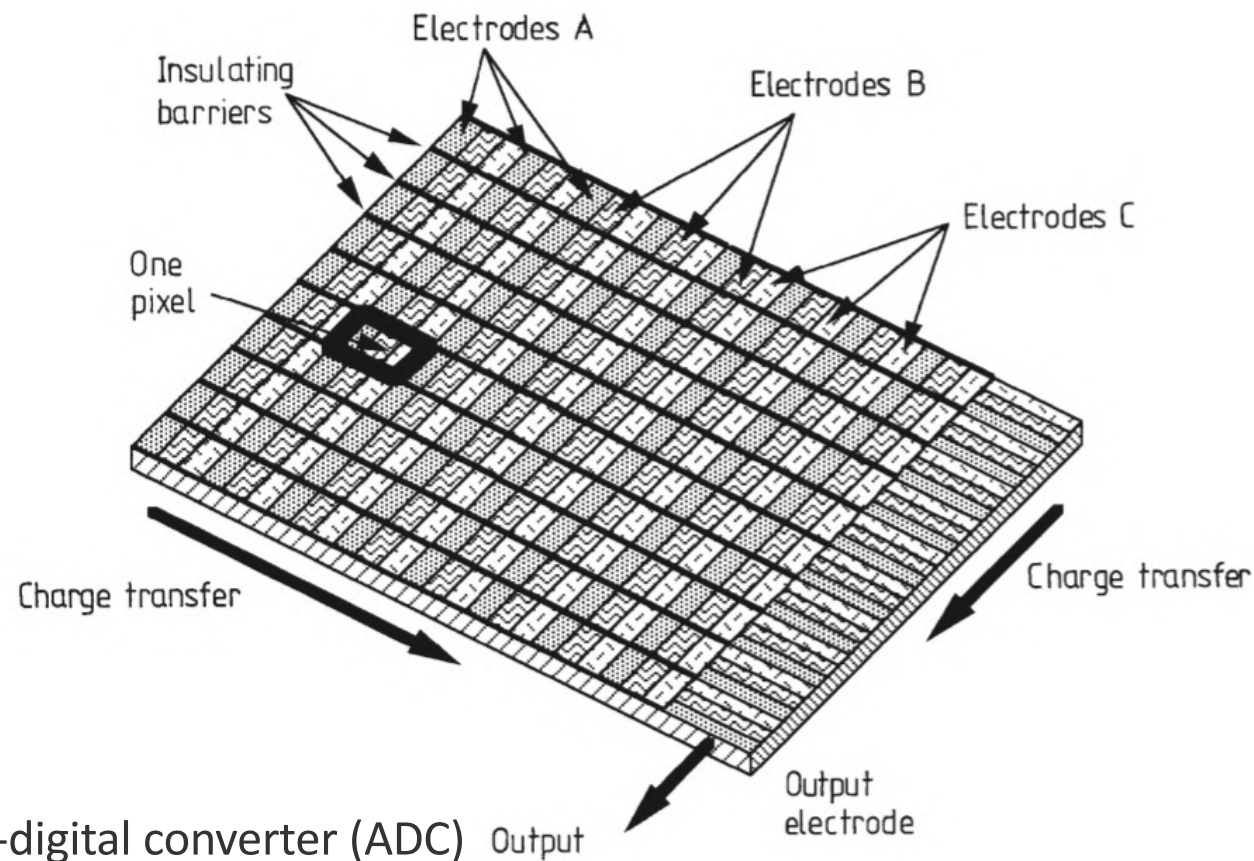
– Ανακάλυψη 1969 - Nobel 2009 σε Boyle & Smith

Χρησιμοποιούνται από το 70 στην αστρονομία, κι ακόμα και σήμερα είναι στον πυρήνα νέων Οργάνων,

Π.χ., MUSE IFU του VLT

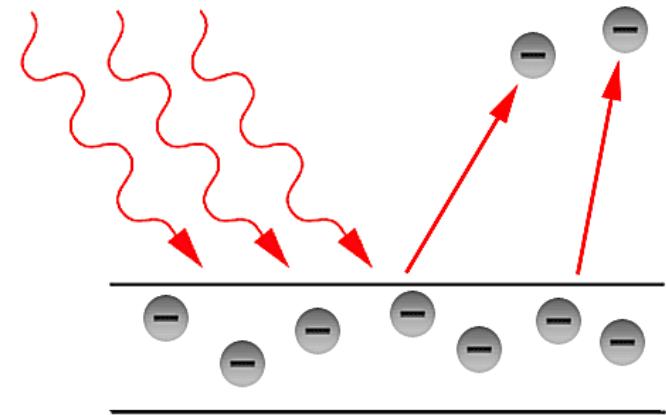
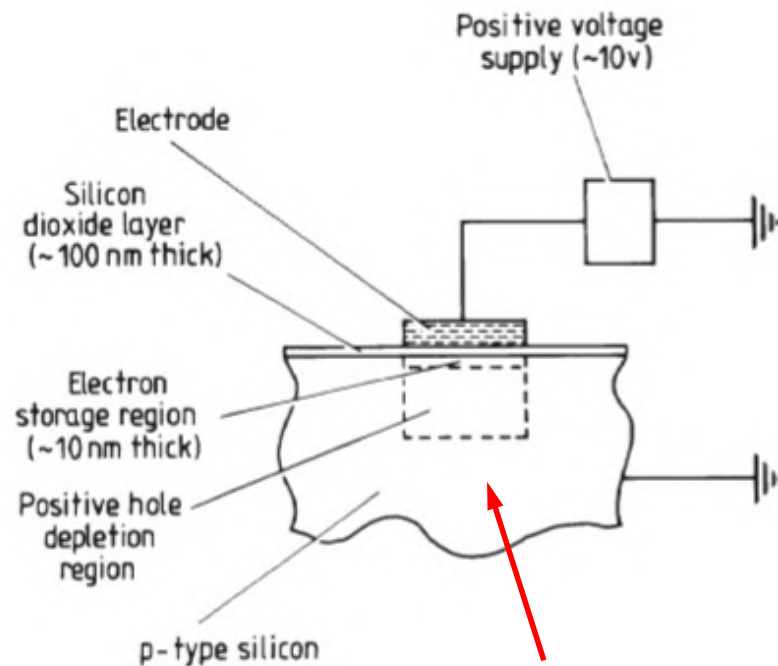


Βασική αρχή : φωτοηλεκτρικό φαινόμενο σε ημιαγωγό, και μεταφορά φορτίων από pixel σε pixel κατά την ανάγνωση. Καταμέτρηση του σήματος μόνο σε 1 κοινή έξοδο.



Βασικό «στοιχείο» μιας CCD.

.



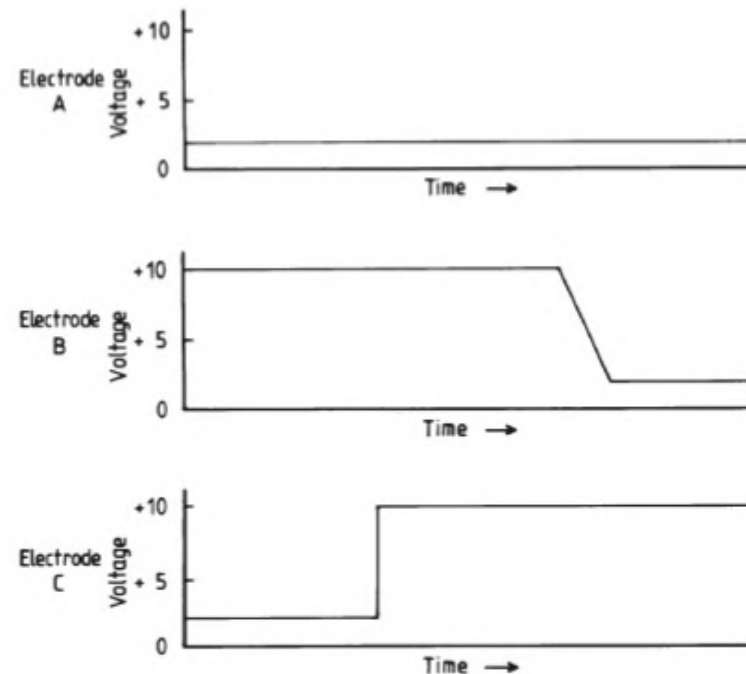
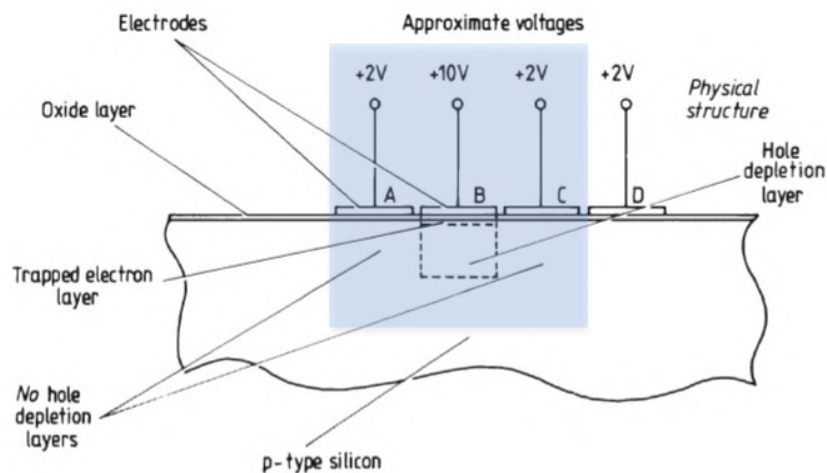
Στρώση ημιαγωγού (Si)
όπου δημιουργούνται δυάδες e^- - hole (θετικό φορτίο)
από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, καθώς τα άτομα στον
κρύσταλλο έχουν διάκριτα ενεργειακά επίπεδα και με την
απορρόφηση ενέργειας $> 1.26 \text{ eV}$ ($\sim 9800 \text{ Angstrom}$)
περνάνε στη ζώνη αγωγιμότητας.

Οργανολογία

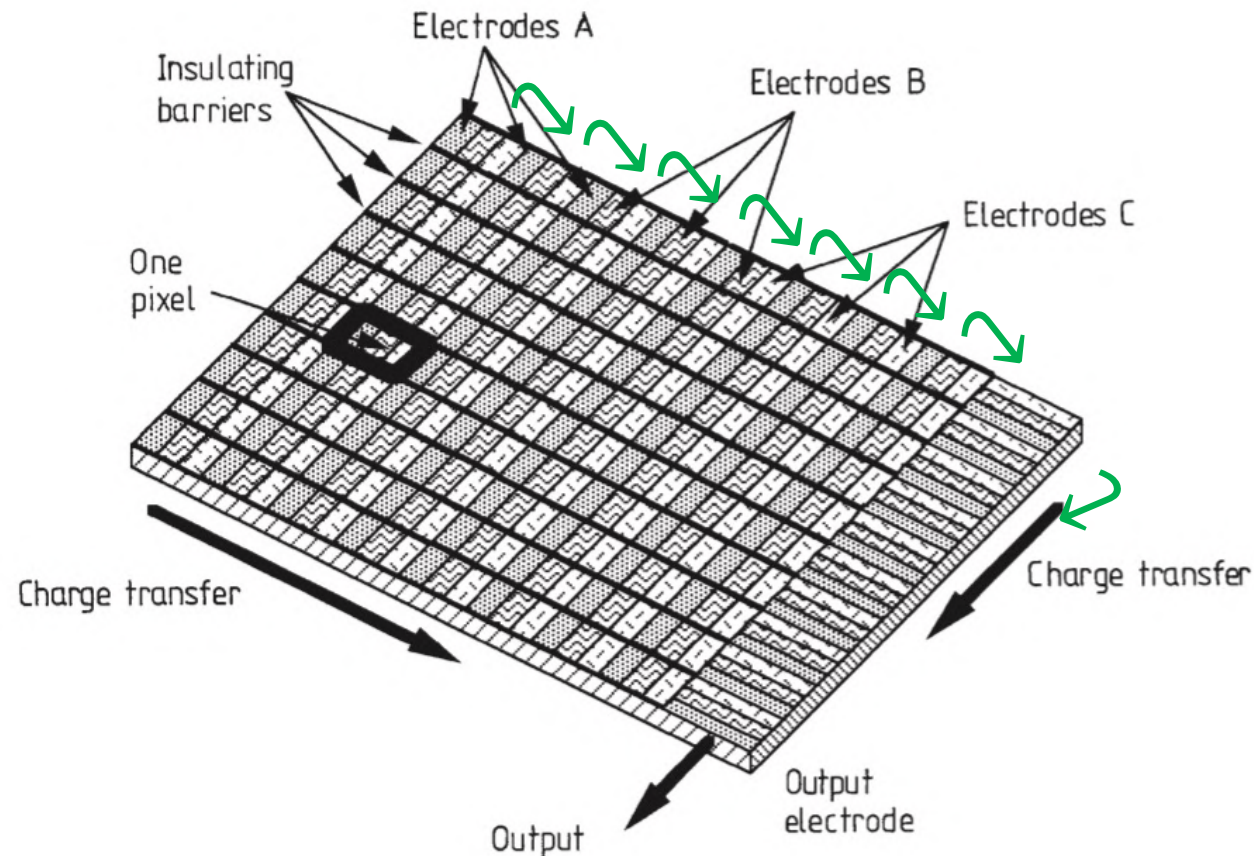
Εν αντιθεσει με τις κολώνες, οι «γραμμές» επικοινωνούν μεταξύ τους, και τα pixel χτίζονται μέσω δυναμικού από γειτονικά ηλεκτρόδια. 3 στοιχεία φτιάχνουν ένα pixel.

Κατά τη διάρκεια της έκθεσης, κρατάμε τα κεντρικό στοιχείο σε υψηλότερο δυναμικό, 'Ωστε τα e να συγκεντρωθούν γύρω από αυτό.

Κατά τη διάρκεια της ανάγνωσης, μεταβάλλουμε τα δυναμικά ώστε το φορτίο να πάει στο δίπλα στοιχείο, στην άκρη του pixel. Αυτό μετά το κάνουμε και για το επόμενο στοιχείο, που ανήκει σε άλλο pixel. Άρα έχουμε μεραφορά φορτίου από pixel σε pixel.



Καθώς το σήμα μεταφέρεται ένα pixel τη φορά, το προσωρινά τελευταίο pixel ανά γραμμή μεταφέρεται στην τελευταία στήλη της οποίας τα ηλεκτρόδια (και η διάταξη) είναι κάθετα στην προηγούμενη κατεύθυνση. Έτσι κατευθύνονται, με τον ίδιο τρόπο προς την κοινή έξοδο. Αυτό γίνεται ανά γραμμή έως ότου αναγνωστεί όλος ο πίνακας.



Συνεπακόλουθα:

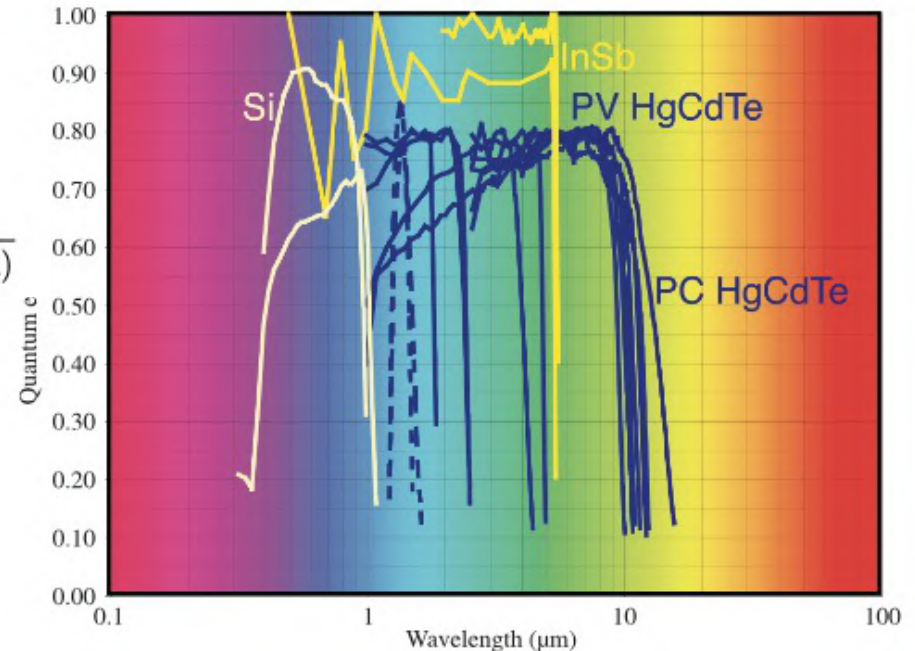
1) Η ανάγνωση της εικόνας είναι «καταστροφική», δηλ., δεν μπορεί να επανέλθει το σήμα στην αρχική του θέση άπαξ και διαβαστεί.

2) Χρόνος αναγνώσης (read-out time) ανάλογος του αριθμού των pixels που προσθέτει στα λεγόμενα “overheads” μιας μέτρησης, δηλ. σε ο,τιδήποτε άλλο πλην της έκθεσης

3) Είναι σχετικά εύκολο να «αιμορραγήσει» ένα pixel στο γειτονικό του.

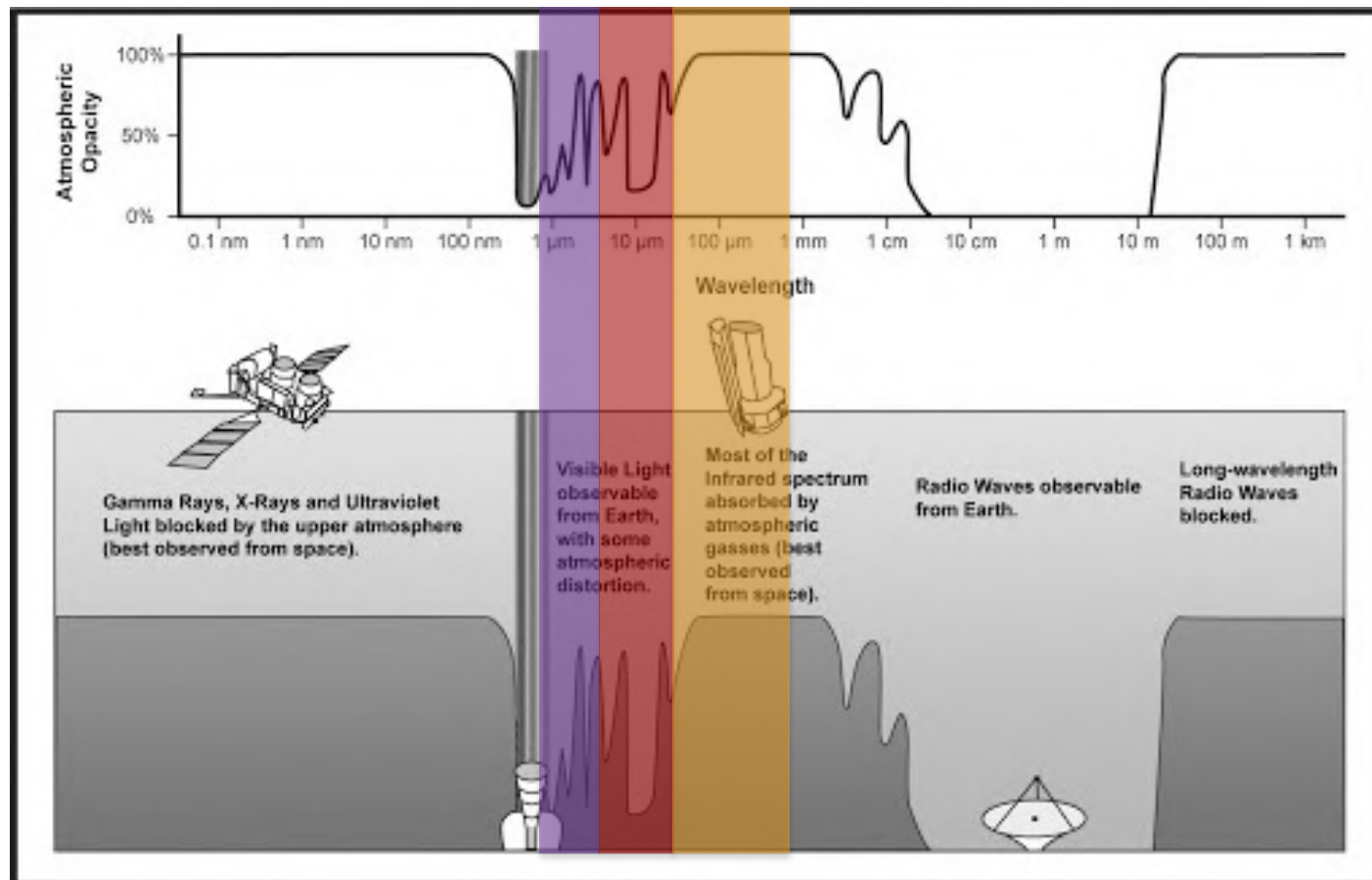
4) Απόδοση κάμερας διαφορετική ανά λ.
quantum efficiency:

$$QE = \frac{\text{electrons/sec}}{\text{photons/sec}} = \frac{(\text{current})/(\text{charge of one electron})}{(\text{total power of photons})/(\text{energy of one photon})}$$



Υπέρυθρο:

Το χωρίζουμε σε **κοντινό** $\sim[0.8-5] \mu\text{m}$, **μεσαίο** $\sim[5-35]\mu\text{m}$, και **μακρινό** $[35\text{m}-600\mu\text{m}]$
Η τεχνολογία και οι τεχνικές ανάλυσης των δεδομένων στο κοντινό υπέρυθρο μοιάζουν πιο πολύ με αυτές στο οπτικό, ενώ στο μακρινό υπέρυθρο πιο πολύ στο ραδιοφωνικό.



Φωτονικοί ανιχνευτές στο υπερύθρο:

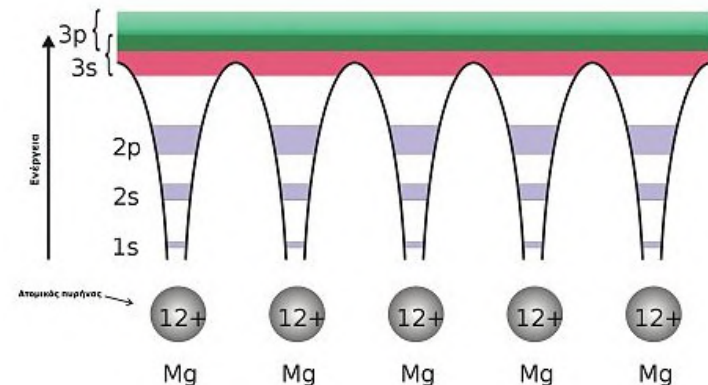
- CCDs αλλά και
- CMOS Ίδια βασική αρχή με CCD: φωτοηλεκτρικό φαινόμενο σε ημιαγωγό
Χρήση ημιαγωγών **με μικρό ενεργειακό χάσμα** από το κάθε άτομο προς τη ζώνη αγωγιμότητας του πλέγματος.

Κρύσταλλοι με προσμίξεις στοιχείων με μεγαλύτερο ατομικό αριθμό από το Mg (12) ή το Si (14) ώστε να υπάρχουν e^- που να μπορούν να μεταβούν στη **ζώνη αγωγιμότητας** του κρυστάλλου με χαμηλότερη E από του οπτικού, κι αντίστοιχη με αυτή των υπερύθρων φωτονίων.

Optical: Si (~1.3 eV)

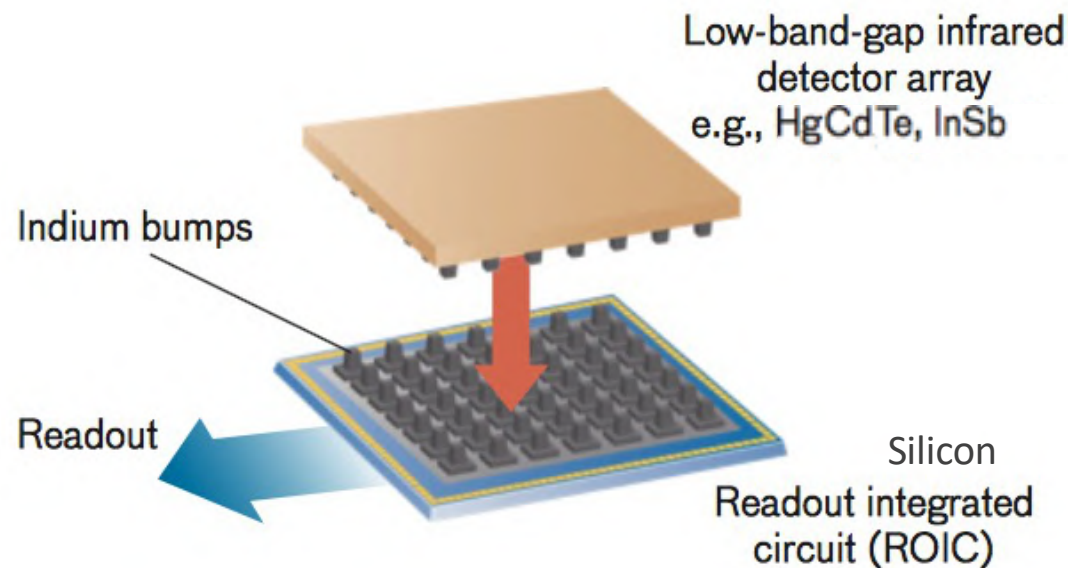
NIR: HgCdTe (Mercury cadmium telluride) 0.8 – 2.5 μm ,
InSb (Indium Antimonide - μετάβαση στη ζώνη αγωγιμότητας 0.23 eV σε 80K) 0.8 – 5.4 μm ,
{ατομικοί αριθμοί Cd: 48, Hg: 80, Te: 52}

MIR: Si:As 5 – 28 μm



Φωτονικοί ανιχνευτές στο υπερύθρο:

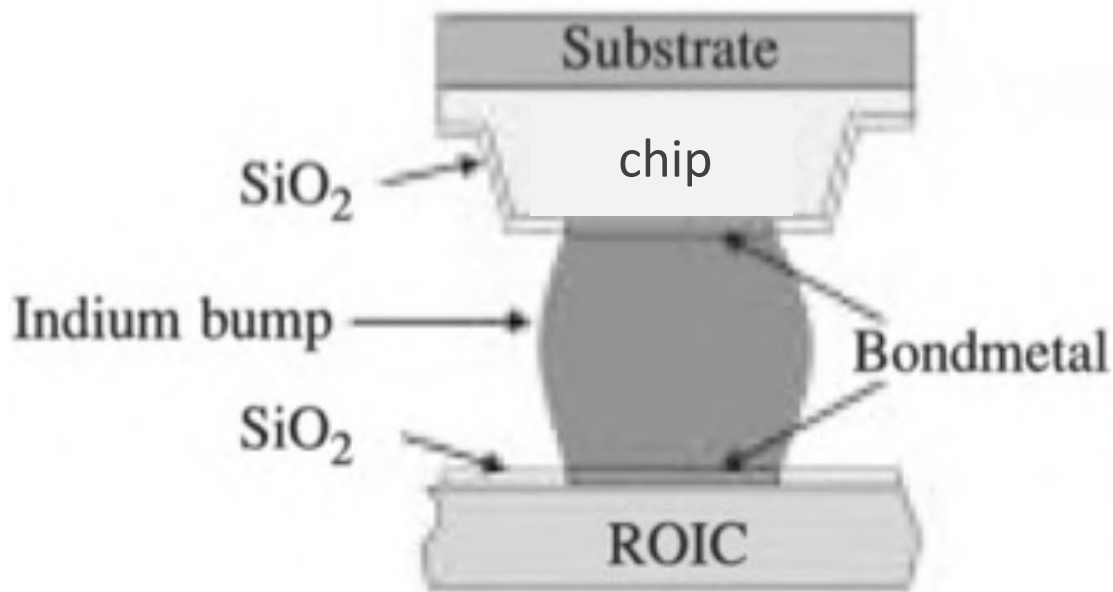
- Καταμέτρηση του σήματος δυνατή σε περισσότερες από 1 εξόδους:
κάθε pixel έχει δικό του read-out κύκλωμα
 - **βασική οσον αφορά στη χρήση στο οπτικό: η αρχιτεκτονική CMOS**
Complimentary Metal Oxide Semiconductor
 - χρησιμοποιεί τρανζίστορ σε κάθε pixel



The photocurrent generated by a detector is accumulated and stored locally as in a capacitor. Simple switching and buffer circuits connect the capacitor voltage to a multiplexor circuit for readout. After the image is collected at the ROIC, the current is transferred to a set of output ports for row by row analog-to-digital conversion.

Φωτονικοί ανιχνευτές στο υπερύθρο:

- Καταμέτρηση του σήματος δυνατή σε περισσότερες από 1 εξόδους:
κάθε pixel έχει δικό του read-out κύκλωμα
 - **βασική οσον αφορά στη χρήση στο οπτικό: η αρχιτεκτονική CMOS**
Complimentary Metal Oxide Semiconductor
 - χρησιμοποιεί τρανζίστορ σε κάθε pixel



Substrate: υλικό για ελαχιστοποίηση σκέδασης

chip: στρώσεις ημιαγωγών όπου θα γίνει το φωτοηλεκτρικό .

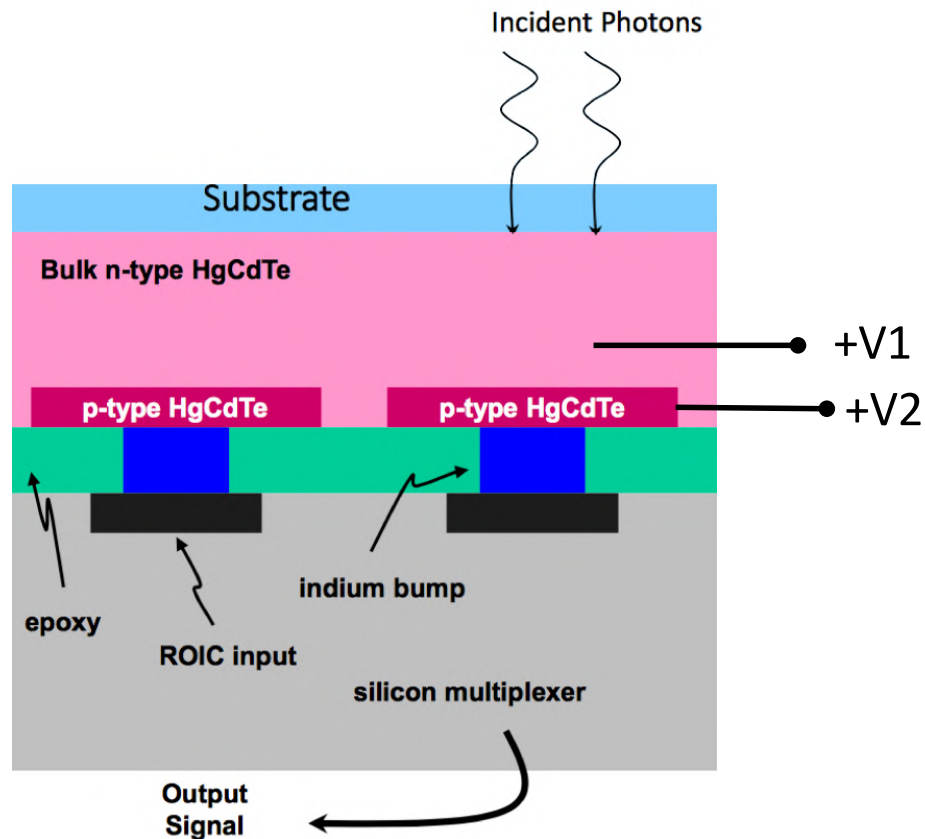
SiO₂: δρα σαν μονωτής (διηλεκτρικό υλικό που πολώνεται σε ηλεκτρικό πεδίο).

In: αγωγός, που συνδέει τα 2 chip με καλή αγωγιμότητα ακόμα και σε θερμοκρασίες ψύξης με υγρό άζωτο.

ROIC: chip πυριτίου με insulated pixels από όπου θα μετρηθούν τα φωτοηλεκτρόνια

Φωτονικοί ανιχνευτές στο υπερύθρο:

- Καταμέτρηση του σήματος δυνατή σε περισσότερες από 1 εξόδους:
κάθε pixel έχει δικό του read-out κύκλωμα
 - **βασική οσον αφορά στη χρήση στο οπτικό: η αρχιτεκτονική CMOS**
Complimentary Metal Oxide Semiconductor
 - χρησιμοποιεί τρανζίστορ σε κάθε pixel



<σχήμα modified από Teledyne detectors>
ενδεικτικό για την κατανόηση της αρχής

N-type semiconductor =
ντοπαρισμένος με άτομα-δότες e^- , δηλ.
άτομα που όταν ενσωματωθούν στον
κρύσταλλο παρέχουν ελεύθερα e^-

Όταν εφαρμόσουμε τάση στο V1,
Τα e^- συσσωρεύονται εκεί, μετά
αν βάλουμε μεγαλύτερη τάση στο
V2 θα μεταφερθούν στην p-doped
περιοχή της διόδου, προς αγωγό In.

Φωτονικοί ανιχνευτές στο υπερύθρο:

- Καταμέτρηση του σήματος δυνατή σε περισσότερες από 1 εξόδους:
κάθε pixel έχει δικό του read-out κύκλωμα
– **πολύ διαφορετική μεταχείριση ως προς τον τρόπο αύξησης χρόνου έκθεσης.**

Το κάθε read-out προσθέτει στο σήμα που καταγράφηκε σε κάθε pixel!
Το read-out ΔΕΝ είναι καταστροφικό!

Μόνο το reset οδηγεί σε νέα έκθεση όταν όλη η κάμερα διαβάζεται!

Αυτό σημαίνει πως μπορούμε να κάνουμε πολύ μεγάλες εκθέσεις με μικρότερες υπο-εκθέσεις για να αποφύγουμε σφάλματα (πχ. Cosmic ray hits, κορεσμό).

Παράδειγμα από detectors Που έχουν φτιαχτεί για το James Webb Space Telescope

→ One of its kind

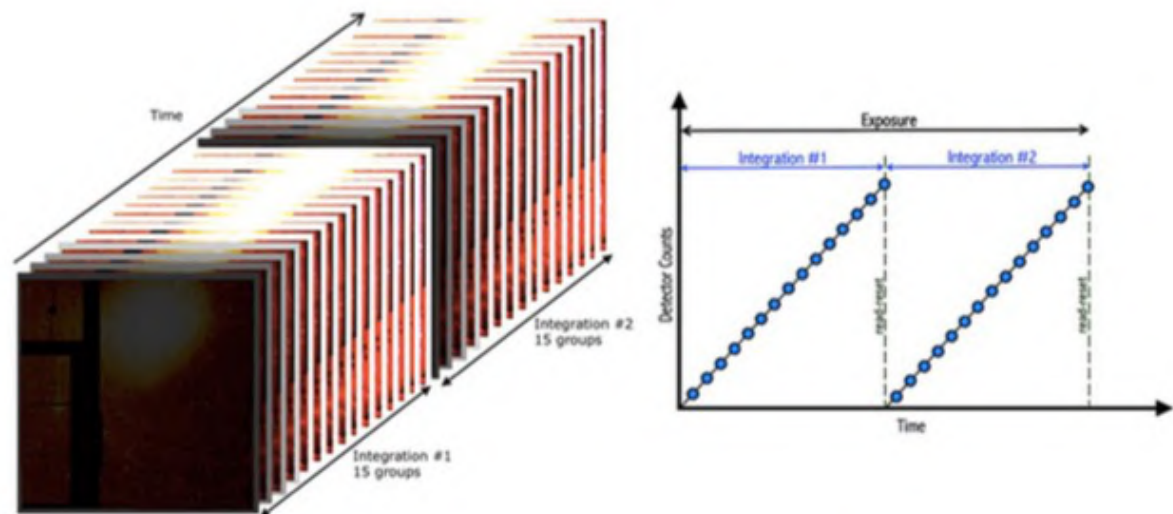
IR constructive read outs
Ονομάζονται αλλιώς και
UP-THE-RAMP integration.

→ Όλα αυτά γίνονται για
διαστημικό τηλεσκόπιο για
να διορθωθούν προβλήματα
από κοσμικές ακτίνες.

Detector Readout Method

All JWST detectors use the up-the-ramp (MULTIACCUM) readout method, that reads and records the signal of individual pixels multiple times as it is accumulated during an exposure (see illustration in Figure 1). This allows the recovery of discrete information on how the pixel charge/signal increases with time. This method provides several benefits:

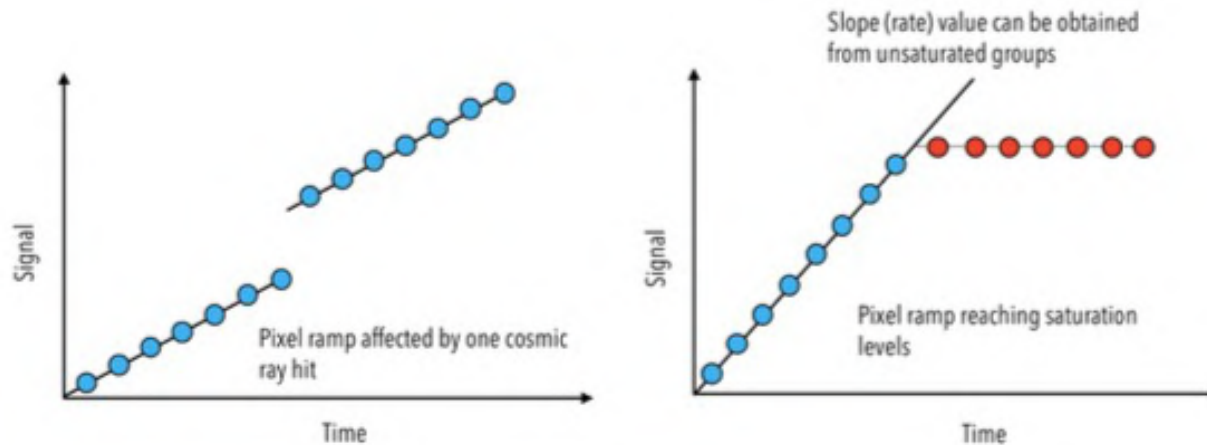
- Fitting to multiple reads reduces the effective readout noise (by approximately the square root of the number of samples).
- By collecting individual reads of the signal in a given pixel, it is possible to see the "jumps" in signal level that indicate a cosmic ray has contaminated the signal (see Fig 2, Left). The integration is effectively divided into two or more sub-ramps, depending on the number of cosmic ray hits; sub-ramps can be used to recover signal information.
- When a pixel saturates the groups (or reads) before saturation can be used to estimate the signal rate. This increases the dynamic range of the image. Note that when the source is so bright that the first pixel read is already saturated information cannot be recovered.



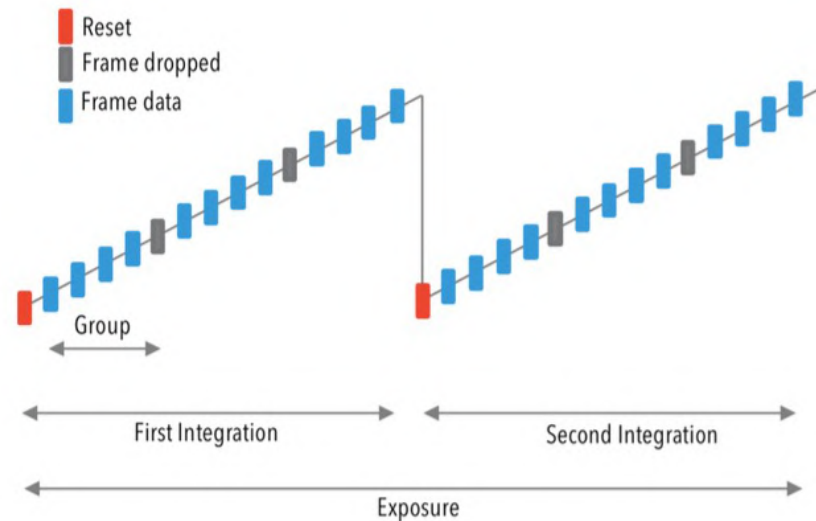
Οργανολογία

πλεονεκτήματα:

- Διόρθωση της ροής σε pixels που κορέστηκαν ή χτυπήθηκαν από κοσμικές ακτίνες
 $5-10 \text{ CRs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Thus, 20-25% chance that ALL pixels get hit at least once in 1000s.



- Λιγότερος θόρυβος,
(δεν είμαστε κοντά στο θόρυβο των ηλεκτρονικών σε κάθε επανεκκίνηση)
- λιγότερος όγκος δεδομένων
(μπορούμε να πετάμε frames)



Οργανολογία

Επιπλέον πλεονεκτήματα:

- Ακόμα μεγαλύτερη οικονομία στην αποθήκευση δεδομένων: grouping ή εύρεση της κλίσης της καμπύλης!
Πολύ σημαντικό για διαστημικά τηλεσκόπια για την αποστολή των μετρήσεων.
- partial array read-out!
Σημαντικό για εξοικονόμηση χρόνου

Σύνοψη αντίστοιχης ονοματολογίας:

- Subarray: All JWST detectors can be read in FULL or subarray mode. In subarray mode only a portion of the detectors is read out; this effectively reduces readout times and data volume, enabling rapid observations of bright objects without saturation (see more information in JDox links below).
- Frame: A single read of all pixels in the detector array or subarray.
- Group: A group is the on-board average of one or multiple frames. A group is transferred to the solid-state recorder for downlinking to the ground. The time duration of each group depends on the instrument readout mode and readout pattern selected. Please see JDox documentation (links below) for further details. On-board averaging is needed to reduce the data volume/data rate associated with an exposure.
- Drop/skip frames: These are frames between groups that are sampled but not included in the group average.
- Reset: The action of closing the detector readout circuit reset switch to establish

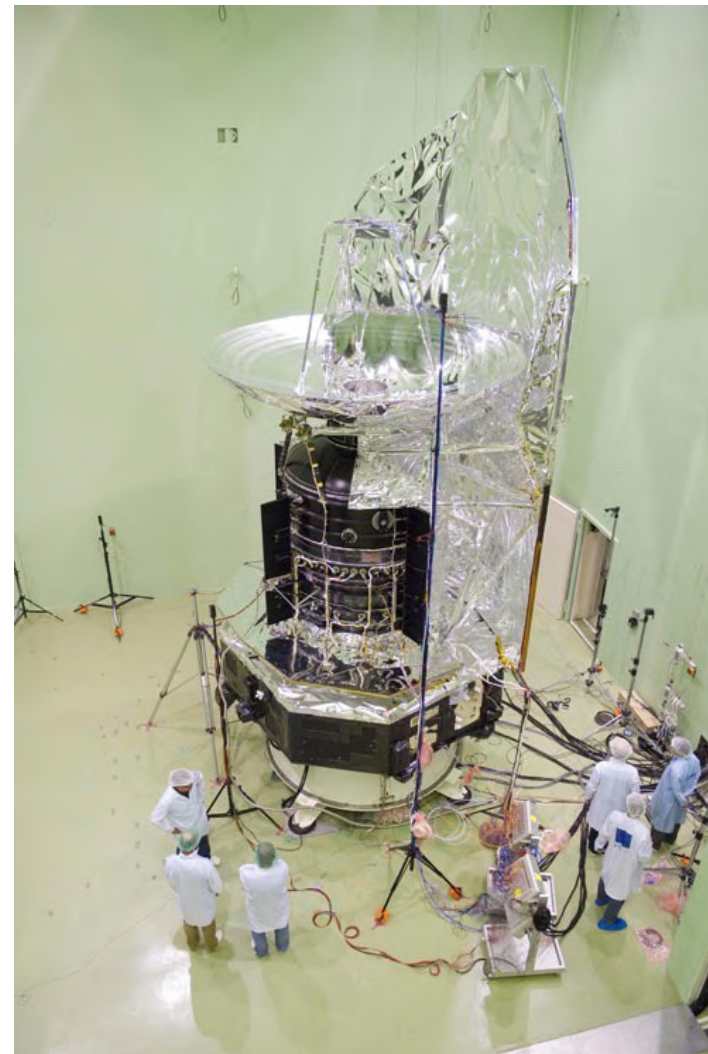
Ένα σημαντικό μειονέκτημα:

Σε θερμοκρασία δωματίου, τα ηλεκτρόνια στον ανιχνευτή έχουν επαρκή θερμική ενέργεια ώστε να μπορούν να εισέλθουν στη ζώνη αγωγιμότητας μέσω θερμικής διέγερσης. Τότε παράγεται το λεγόμενο («σκοτεινό ρεύμα» - dark current). Το φαινόμενο υπάρχει και σε οπτικές κάμερες, αλλά είναι ακόμα πιο έντονο στο IR.

Λύση: η λειτουργία του ανιχνευτή σε χαμηλή θερμοκρασία (μέσω cryocooler)
Π.χ., JWST MIRI's detectors (Arsenic-doped Silicon, Si:As), πρέπει να είναι $<7\text{K}$!

Μακρινό Υπέρυθρο (35-600 μm) / sub-mm (600-1000 μm):

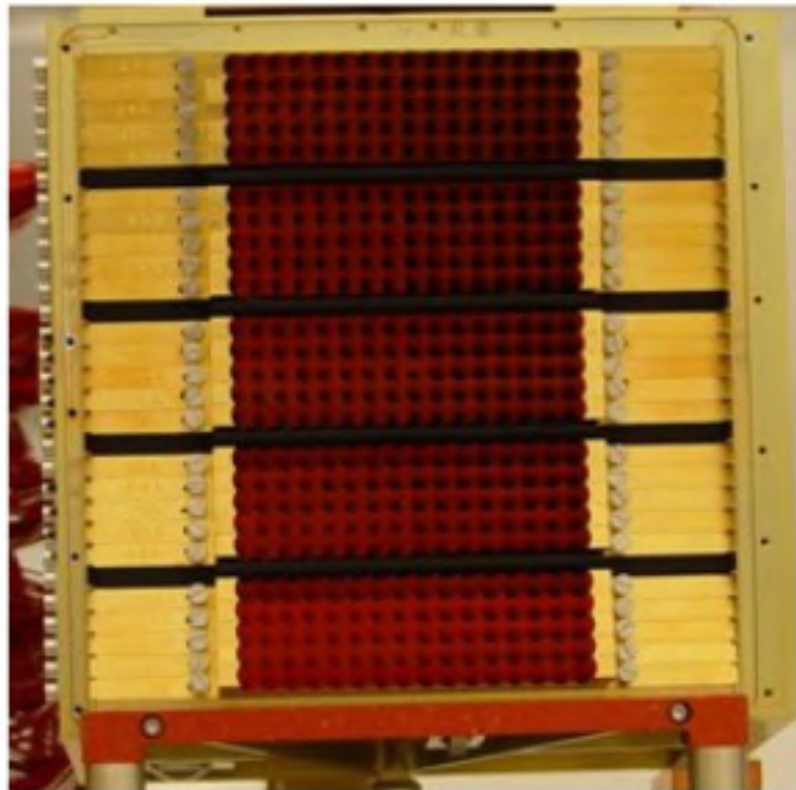
Μεγάλη συνεισφορά σε παρατηρήσεις στο μακρινό υπέρυθρο είχε το διαστημικό τηλεσκόπιο Herschel (2009-2013).



Μακρινό Υπέρυθρο (35-600 μm) / sub-mm (600-1000 μm):

Herschel PACS Integral Field Unit – η τεχνολογία του οπτικού μέχρι τα 210 μm !

“two Ge:Ga photoconductor arrays with 16 × 25 pixels”

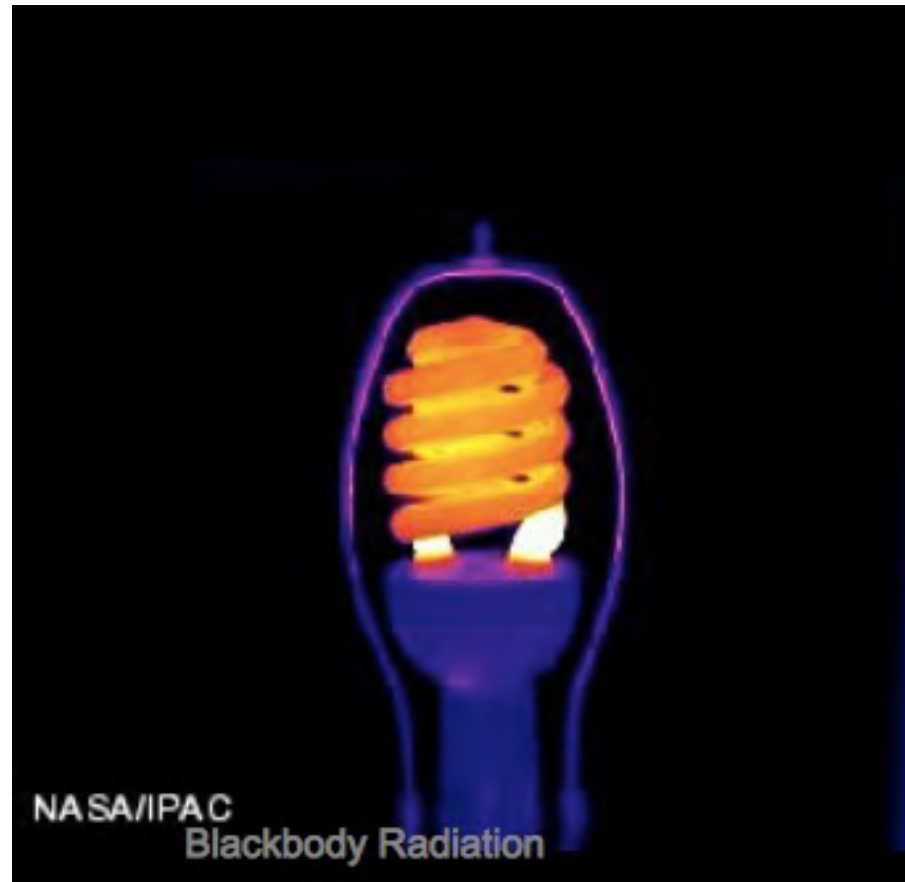


Όμως... το μακρινό υπέρυθρο έχει ιστορικά διαφορετικές μεθόδους ανίχνευσης – είτε ίδιες με το ραδιοφωνικό, είτε εγγενείς του.

Καλοριμετρία και βολόμετρα

Τεχνική που μετράει τη θέρμανση από την απορρόφηση του φωτός (θερμοηλεκτρικό)
- σημερινές εφαρμογές κυρίως σε **μακρίνο υπέρυθρο και ραδιοφωνικό**

Με αυτόν τον τρόπο αποδείχθηκε η ύπαρξη υπέρυθρης ακτινοβολίας



Ιστορία: Η αντιστοίχιση υπέρυθρης ακτινοβολίας και θερμότητας.



1800 William Herschel
Ανακάλυψη της υπέρυθρης
ακτινοβολίας
“Calorific Rays”

1856:
Charles Piazzi Smyth
Υπέρυθρη ακτινοβολία
από τη Σελήνη
(με θερμοστοιχείο)

Το υπέρυθρο ανακαλύφθηκε από τον Herschel, 'Ηθελε να μετρήσει πόση ενέργεια υπάρχει σε κάθε μήκος κύματος μέσω της θερμότητας που εναποθέτει το φως. Χρησιμοποίησε ένα πρίσμα και θερμόμετρα σε διαφορετικά μήκη κύματος, κι είδε ότι υπάρχει σημαντική εκπομπή πέραν του οπτικού.

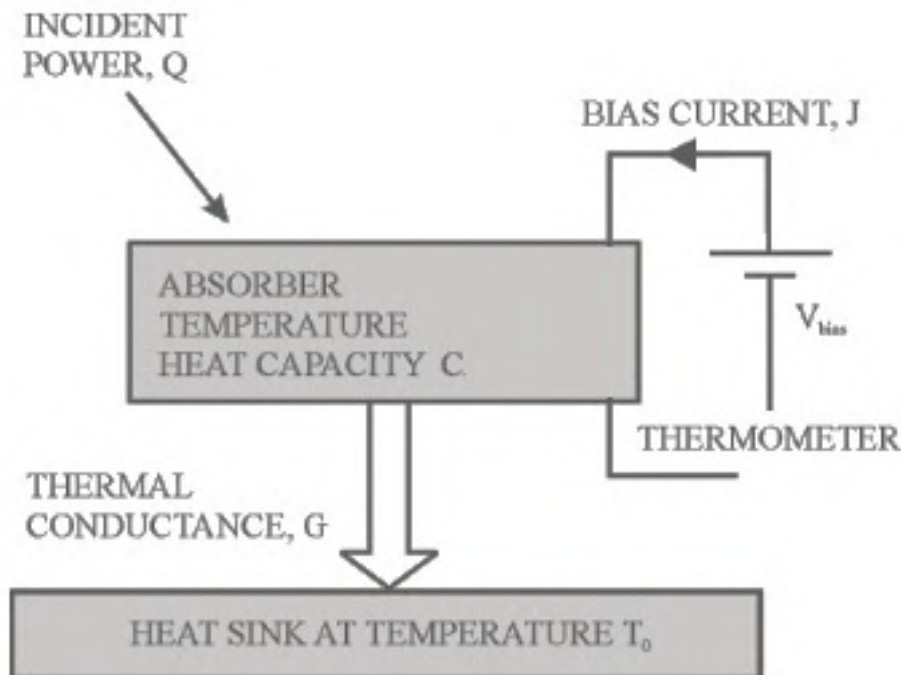
Πείραμα με τη Σελήνη, όταν μετρήσεις έγιναν με τηλεσκόπιο σε διαφορετικά υψόμετρα, έδειξαν ότι η υπέρυθρη ακτινοβολία επηρεάζεται από το υψόμετρο.

Οργανολογία

Βολόμετρο: Συσκευή που μετράει τη θέρμανση ενός απορροφητικού υλικού και την μετατρέπει σε ρεύμα χάρη στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο: Η διαφορά της θερμοκρασίας σε δυο αγωγούς μετατρέπεται σε ρεύμα κι άρα διαφορά τάσης, καθώς φορτία μεταφέρονται από το θερμό υλικό στο πιο ψυχρό υλικό.

Εναλλακτικά, μετράται σαν διαφορά στην αντίσταση του υλικού με τη θερμοκρασία όταν περνάει ρεύμα γνωστής τάσης (resistance thermometer).

Πρώτο βολόμετρο (Langley) – 1878. 2 μεταλλικές πλάκες, ενωμένες μεταξύ τους με αγωγό. Η μια εκτεθειμένη στην ακτινοβολία, η άλλη προστατευμένη. Κατά τη διάρκεια της έκθεσης, υπήρχε ΔT . Περνώντας ρεύμα από αυτή μετρούσε την διαφορά στην αντίσταση κι άρα τη ΔT .



Εξίσωση διάχυσης θερμότητας: συνδέει το απορροφηθέν ποσοστό η της ισχύος της προσπιπτουσας ακτινοβολίας P με το ΔT :

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G(\Delta T) = \eta P$$

→ Ε που αποθηκεύεται + Ε που διαχέεται προς το περιβάλλον, όπου
 G = θερμική αγωγιμότητα προς το περιβάλλον,
και C = θερμοχωρητικότητα υλικού.

Οργανολογία

Χρησιμοποιούμε το ίδιο το απορροφητικό υλικό σαν θερμόμετρο: πριν την έκθεση το είχαμε συνδέσει με τάση V_{bias} . Η αντίστοιχη ισχύς ήταν $P_{\text{bias}} = V_{\text{bias}} I$, αλλά καθώς η ένταση αυξάνεται, το ΔT μπορεί να μετρηθεί για υλικό γνωστής αντίστασης $R(T)$.

Αν δεν υπάρχουν απώλειες προς τα έξω και $\eta=1$:

$$P = VI \quad (\text{και από νόμο Ohm: } V = IR)$$
$$(\text{μετράμε } V, I \text{ με ποζόμετρο})$$

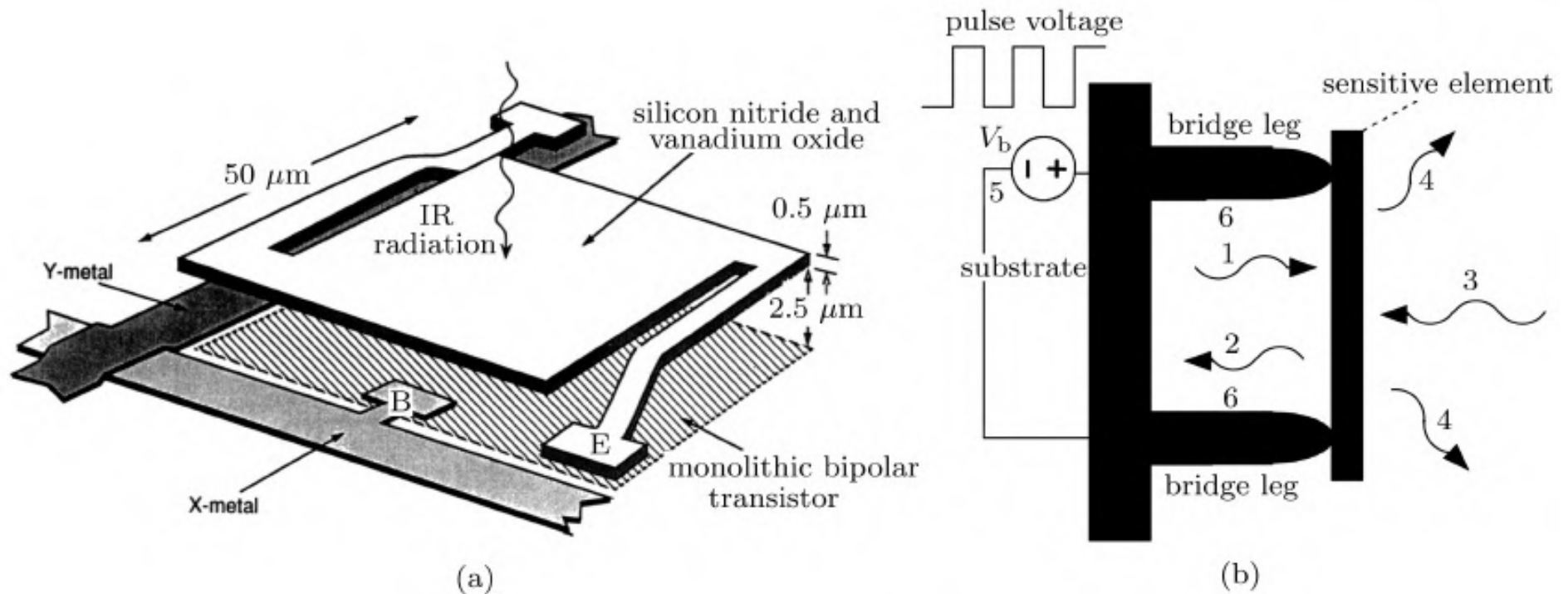
$$Q = Pt \quad (Q = \text{απορροφημένη ενέργεια})$$

$$Q = G \Delta T \quad (G = \text{συνολική θερμοχωρητικότητα})$$

$$\text{άρα } VIt = G \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{VI}{G} \cdot t$$

$$\Rightarrow \text{Μετράμε άμεσα } \Delta T$$

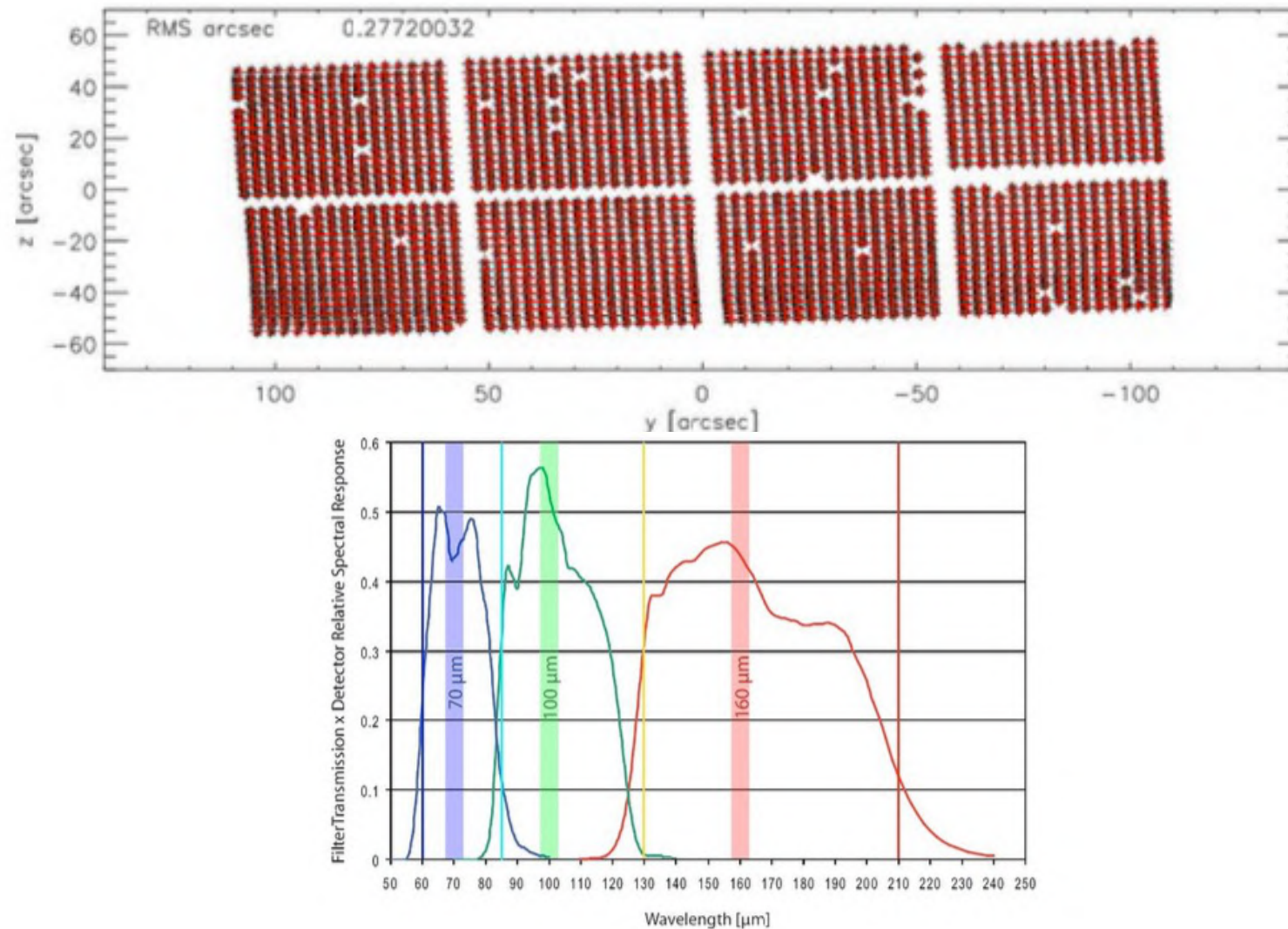
βολόμετρο. Μοντέρνος (flat) σχεδιασμός.



προσοχή, τα βολόμετρα δεν μπορούν να λειτουργήσουν ως φασματογραφοί.
Λειτουργούν για φωτόνια συγκεκριμένου εύρους συχνοτήτων.

Οργανολογία

Herschel PACS bolometer array (camera) – εικόνα βάσει πολλαπλών βολομέτρων και φίλτρα για την προεπιλογή φωτονίων.



Οργανολογία

Ραδιοφωνικό:

Ραδιοτηλεσκόπια λειτουργούν σε μήκη κύματος $\sim 0.3\text{m}$ με 20 m, είτε με βολόμετρα, είτε κυρίως με ανίχνευση του φωτός σαν κύμα, από H/M ταλαντώσεις που επάγουν ρεύμα.

Επίγεια τηλεσκόπια, αλλά... έχουν προταθεί και για... Σελήνη!

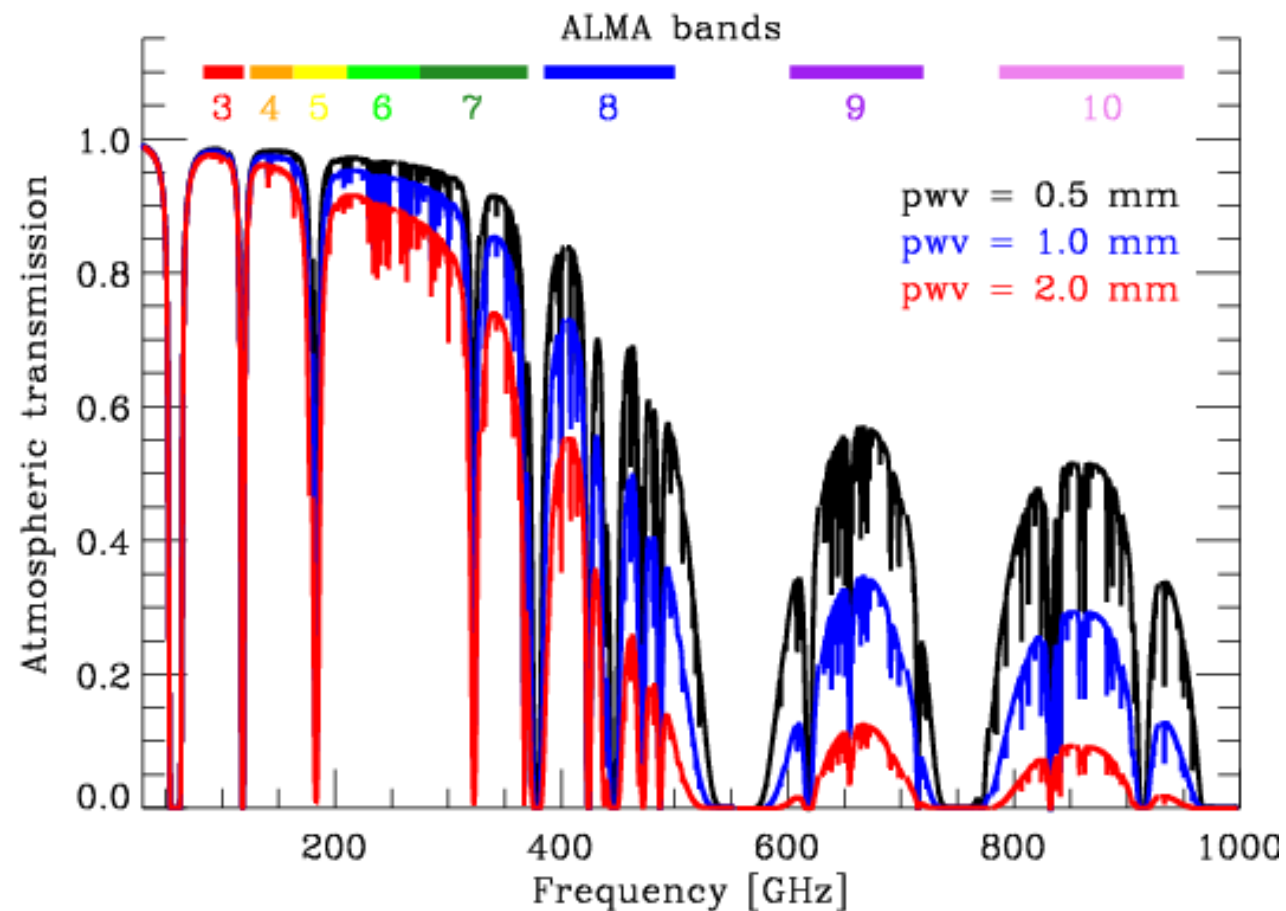
(ερώτηση: τι μας περιορίζει από το να έχουμε διαστημικά;)



Οργανολογία

Εστιάζοντας στην άκρη του ραδιοφωνικού παραθύρου – στο mm η απορρόφηση είναι έντονη
- Τα περισσότερα facilities είναι σε μεγάλο υψόμετρο. ALMA 5000m, JCMT 4000m, NOEMA 2500m.

Στο (sub)mm, οι μπάντες είναι από τα 80-1000GHz, λόγω απορρόφησης.
Στο «κλασσικό» ραδιοφωνικό παράθυρο, >1GHz και εκπομπή από υδρατμούς κι άλλα μόρια.



1 350-1 525 MHz

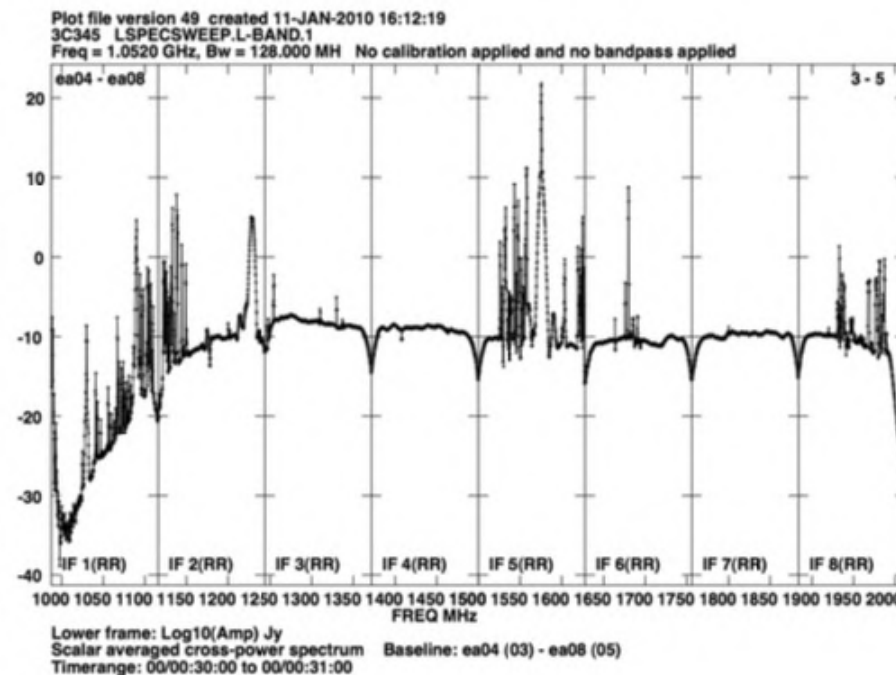
Όρια ζώνης (MHz)	Κατανομή στις Υπηρεσίες	Εφαρμογές (Applications)	Σημειώσεις
1 350-1 400	ΣΤΑΘΕΡΗ (*) ΚΙΝΗΤΗ (*) ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ E32 5.149 5.338A 5.339	- Αμυντικά συστήματα	(*) Ε.Δ.
1 400-1 427	ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΙΝΗΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (παθητική) ΡΑΔΙΟΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (παθητική) 5.340, 5.341, E33	- Αμυντικά συστήματα	
1 427-1 429	ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ (Γη προς Διάστημα) ΣΤΑΘΕΡΗ (*) ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής (*) 5.338A, 5.341	- Αμυντικά συστήματα	(*) Ε.Δ.
1 429-1 437,5	ΣΤΑΘΕΡΗ (*) ΚΙΝΗΤΗ εκτός αεροναυτικής κινητής (*) 5.338A, 5.341	- Αμυντικά συστήματα	(*) Ε.Δ.
1 437,5-1 452	ΣΤΑΘΕΡΗ 5.338A, 5.341	- Ραδιοζεύξεις χαμηλής χωρητικότητας - Συνδρομητικά Αγροτικά Ραδίουσυστήματα - Συνδρομητικά Αγροτικά Ραδίουσυστήματα - T-DAB - Επίγεια συστήματα ικανά να παρέχουν ηλεκτρονικές επικοινωνίες	
1 452-1 465,5	ΣΤΑΘΕΡΗ E35 ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗ 5.345, 5.341		
1 465,5-1 486,5	ΣΤΑΘΕΡΗ (*) ΚΙΝΗΤΗ ΞΗΡΑΣ (*) ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗ 5.345 ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗ 5.345, 5.341	- S-DAB - T-DAB - Επίγεια συστήματα ικανά να παρέχουν ηλεκτρονικές επικοινωνίες	
1 486,5-1 492	ΣΤΑΘΕΡΗ E35 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗ 5.345 ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗ 5.345, 5.341	- Συνδρομητικά Αγροτικά Ραδίουσυστήματα - S-DAB - T-DAB - Επίγεια συστήματα ικανά να παρέχουν ηλεκτρονικές επικοινωνίες	
1 492-1 518	ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΙΝΗΤΗ εκτός αεροναυτικής κινητής 5.341	- Συνδρομητικά Αγροτικά Ραδίουσυστήματα	
1 518-1 525	ΣΤΑΘΕΡΗ (*) ΚΙΝΗΤΗ εκτός αεροναυτικής κινητής (*) ΚΙΝΗΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη) 5.348, 5.351A 5.341		(*) Ε.Δ.

1 610-1 660 MHz

Όρια ζώνης (MHz)	Κατανομή στις Υπηρεσίες	Εφαρμογές (Applications)	Σημειώσεις
1 610-1 610,6	ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ (*) ΚΙΝΗΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.351A 5.341, 5.359, 5.364, 5.366, 5.367, 5.368, 5.371, 5.372, E36	- Κινητές δορυφορικές επικοινωνίες	(*) ΥΠΑ
1 610,6-1 613,8	ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ (*) ΚΙΝΗΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.351A ΡΑΔΙΟΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ 5.149, 5.341, 5.359, 5.364, 5.366, 5.367, 5.368, 5.371, 5.372, E36	- Κινητές δορυφορικές επικοινωνίες	(*) ΥΠΑ
1 613,8-1 626,5	ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ (*) ΚΙΝΗΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.351A Κινητή δορυφορική (Διάστημα προς Γη) 5.341, 5.359, 5.364, 5.365, 5.366, 5.367, 5.368, 5.371, E36	- Κινητές δορυφορικές επικοινωνίες	(*) ΥΠΑ

Επίσης, μεγάλο πρόβλημα στο κλασσικό παράθυρο οι ανθρώπινες παρεμβολές (radio frequency interference). Κινητά, ραντάρ, ραδιοφωνο, δορυφόροι, ...

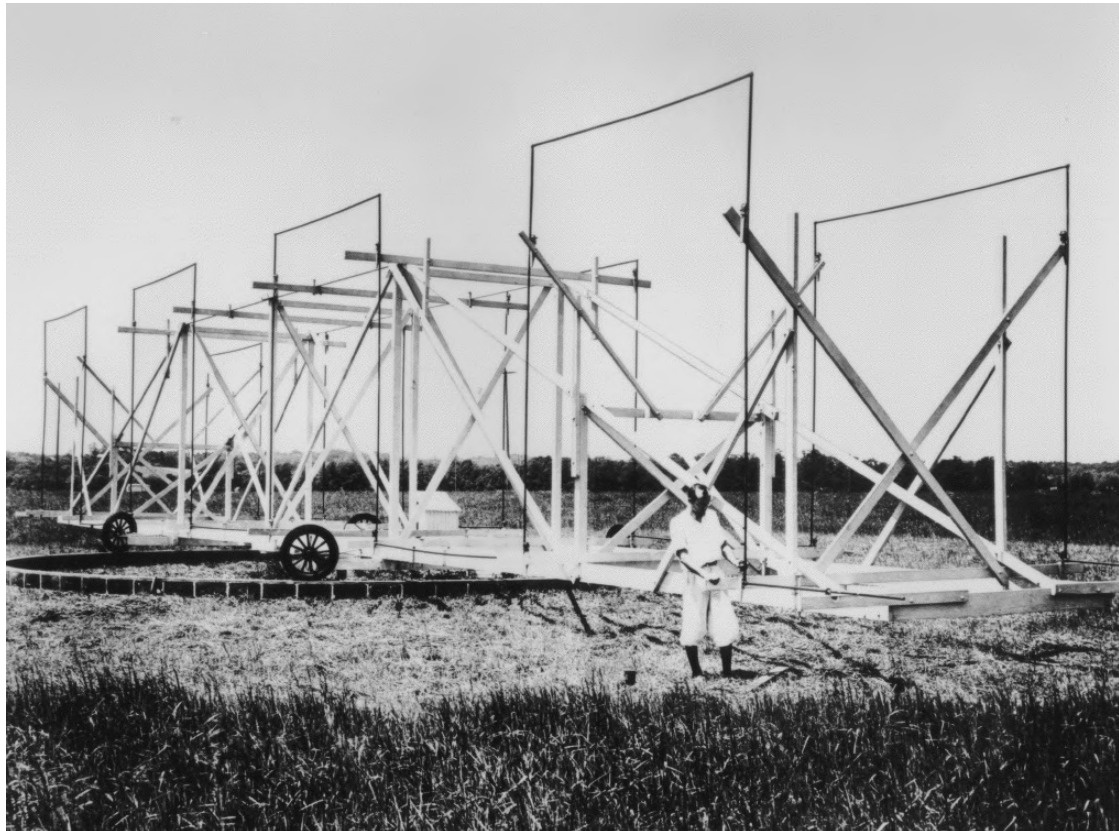
RFI in L-band from 1 to 2 GHz



Οργανολογία

Γέννηση της ραδιοαστρονομίας:

Ανακάλυψη ραδιοκυμάτων που γίνονταν πιο ισχυρά ανά 24 ώρες, βρέθηκαν καθώς στο Bell Lab έψαχναν πηγές θορύβου στις διηπειρωτικές επικοινωνίες [20.5 MHz].
1930-33 – Karl Jansky, Bell Labs (couple of years of solar minimum)



Οργανολογία

Γέννηση της ραδιοαστρονομίας:

Ανακάλυψη ραδιοκυμάτων που γίνονταν πιο ισχυρά ανά 24 ώρες, βρέθηκαν καθώς στο Bell Lab έψαχναν πηγές θορύβου στις διηπειρωτικές επικοινωνίες [20.5 MHz].

1930-33 – Karl Jansky, Bell Labs (couple of years of solar minimum)

1937-44: Grote Reber έφτιαξε το πρώτο ραδιοτηλεσκόπιο, χαρτογράφησε τον ουρανό στα 160 MHz και αντιλήφθηκε ότι εκπομπή προέρχεται από το (τώρα γνωστό) κέντρο του Γαλαξία.



COSMIC STATIC

GROTE REBER

Wheaton, Illinois

Received May 8, 1944

ABSTRACT

Cosmic static is a disturbance in nature which manifests itself as electromagnetic energy in the radio spectrum arriving from the sky. The results of a survey at a frequency of 160 megacycles per second show the center of this disturbance to be in the constellation of Sagittarius. Minor maxima appear in Cygnus, Cassiopeiae, Canis Major, and Puppis. The lowest minimum is in Perseus. Radiation of measurable intensity is found coming from the sun.

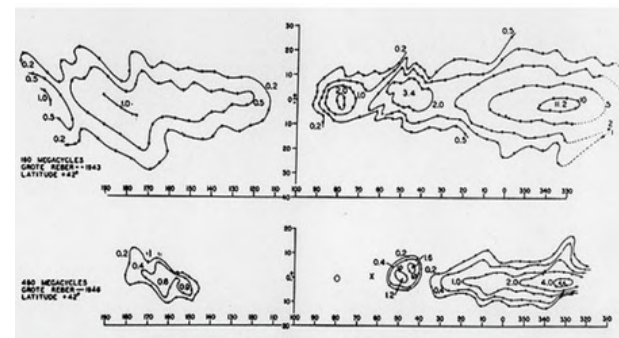


Figure 8. Contours of constant radio intensity on the sky at 160 MHz (top panel) and 480 MHz (bottom) taken by Reber from Wheaton, Illinois, in 1943 and 1946 respectively.

Γέννηση της ραδιοαστρονομίας:

Ανακάλυψη ραδιοκυμάτων που γίνονταν πιο ισχυρά ανά 24 ώρες, βρέθηκαν καθώς στο Bell Lab έψαχναν πηγές θορύβου στις διηπειρωτικές επικοινωνίες [20.5 MHz].

1930-33 – Karl Jansky, Bell Labs (couple of years of solar minimum)

1937-44: Grote Reber έφτιαξε το πρώτο ραδιοτηλεσκόπιο, χαρτογράφησε τον ουρανό στα 160 MHz και αντιλήφθηκε ότι εκπομπή προέρχεται από το κέντρο του Γαλαξία.

Β' ΠΠ: Ηλιακές ραδιο-εκλάμψεις ως θορύβο στα ραντάρ αεροπλάνων -> 1948: Hey

1951: Ewen & Purcell - ανακάλυψη HI (21 εκ.) στο μεσοαστρικό χώρο

SOME CHARACTERISTICS OF SOLAR RADIO EMISSIONS

J. S. Hey, S. J. Parsons and J. W. Phillips

(Received 1948 September 9)

Summary

An analysis is given of solar radio emissions, observed mainly at a wavelength of 4.1 metres between 1946 March and 1947 September, and their relation to visual solar phenomena and their geophysical accompaniments.

The associations of solar radio bursts with flares are considered in detail and it is shown that the most intense flares are the most likely to produce radio bursts. It is also shown that in general the radio emission lags by several minutes behind the visual or ultra-violet flare radiations.



Οργανολογία

Γέννηση της ραδιοαστρονομίας:

Ανακάλυψη ραδιοκυμάτων που γίνονταν πιο ισχυρά ανά 24 ώρες, βρέθηκαν καθώς στο Bell Lab έψαχναν πηγές θορύβου στις διηπειρωτικές επικοινωνίες [20.5 MHz].
1930-33 – Karl Jansky, Bell Labs (couple of years of solar minimum)

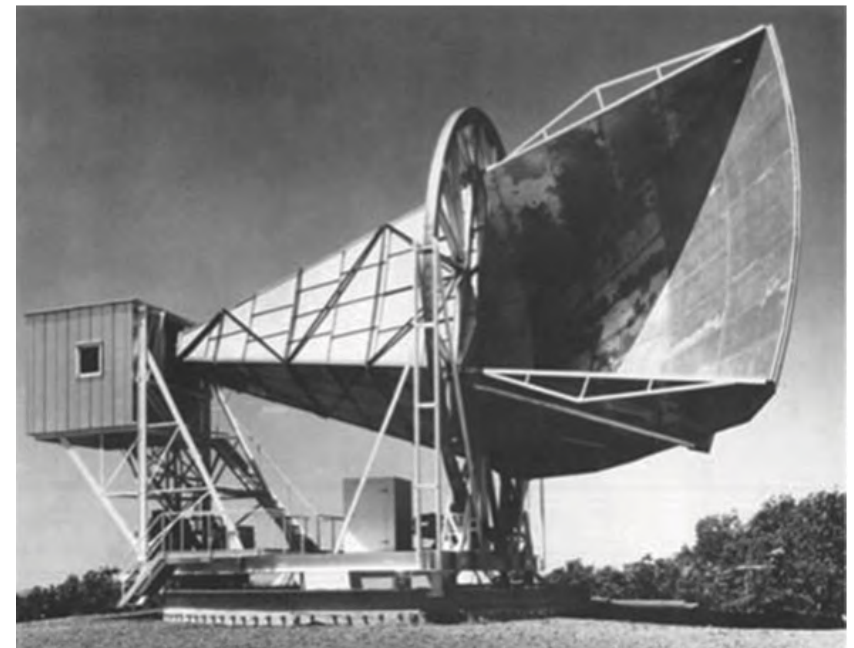
1937-44: Grote Reber έφτιαξε το πρώτο ραδιοτηλεσκόπιο, χαρτογράφησε τον ουρανό στα 160 MHz και αντιλήφθηκε ότι εκπομπή προέρχεται από το κέντρο του Γαλαξία.

Β' ΠΠ: Ηλιακές ραδιο-εκλάμψεις ως θορύβο στα ραντάρ αεροπλάνων -> 1948: Hey
1951: Ewen & Purcell - ανακάλυψη HI (21 εκ.) στο μεσοαστρικό χώρο

1965: Penzias & Wilson - CMB

1967: Bell-Burnell – ανακάλυψη pulsars

Bell lab antenna, Penzias & Wilson ανακάλυψη CMB



Γέννηση της ραδιοαστρονομίας:

Ανακάλυψη ραδιοκυμάτων που γίνονταν πιο ισχυρά ανά 24 ώρες, βρέθηκαν καθώς στο Bell Lab έψαχναν πηγές θορύβου στις διηπειρωτικές επικοινωνίες [20.5 MHz].
1930-33 – Karl Jansky, Bell Labs (couple of years of solar minimum)

1937-44: Grote Reber έφτιαξε το πρώτο ραδιοτηλεσκόπιο, χαρτογράφησε τον ουρανό στα 160 MHz και αντιλήφθηκε ότι εκπομπή προέρχεται από το κέντρο του Γαλαξία.

Β' ΠΠ: Ηλιακές ραδιο-εκλάμψεις ως θορύβο στα ραντάρ αεροπλάνων -> 1948: Hey
1951: Ewen & Purcell - ανακάλυψη HI (21 εκ.) στο μεσοαστρικό χώρο

1965: Penzias & Wilson - CMB

1967: Bell-Burnell – ανακάλυψη pulsars

Σχετικά Βραβεία Nobel:

- **Radio astrophysics (aperture synthesis / pulsars)** – Ryle & Hewish 1974
- **CMB discovery** – Penzias & Wilson 1978
- **Binary pulsar & gravitational waves** – Hulse & Taylor 1993
- **CMB (blackbody & anisotropy)** – Mather & Smoot 2006

Οργανολογία

Ραδιοτηλεσκόπια –

παρατηρήσεις μέρα και νύχτα: (δεν υπάρχει το πρόβλημα του Rayleigh scattering στο οπτικό, και για κεραία 20μ στα 20 εκ ο ήλιος που έχει γωνιακή διαμετρο 1800'' είναι σημειακή πηγή)

Συνήθης τύπος κεραίας / συχνότητα:

Reflector antennas ($\lambda < 1\text{m}$)

Hybrid antennas– Wire reflectors $\lambda \sim 1\text{m}$

Wire antennas – (Half) Dipole ($\lambda > 1\text{m}$)



Operational facilities:

Low-frequency Array (LOFAR);

Σταθμοί σε Ολλανδία, Αγγλία, Γερμανία, Πολωνία, Γαλλία, Σουηδία, Ιρλανδία, Ιταλία.
1.3 m (230 MHz)-30 m (10.0 MHz). Επιλογή 'στόχου' στον ουρανό γίνεται με software.



Operational facilities:

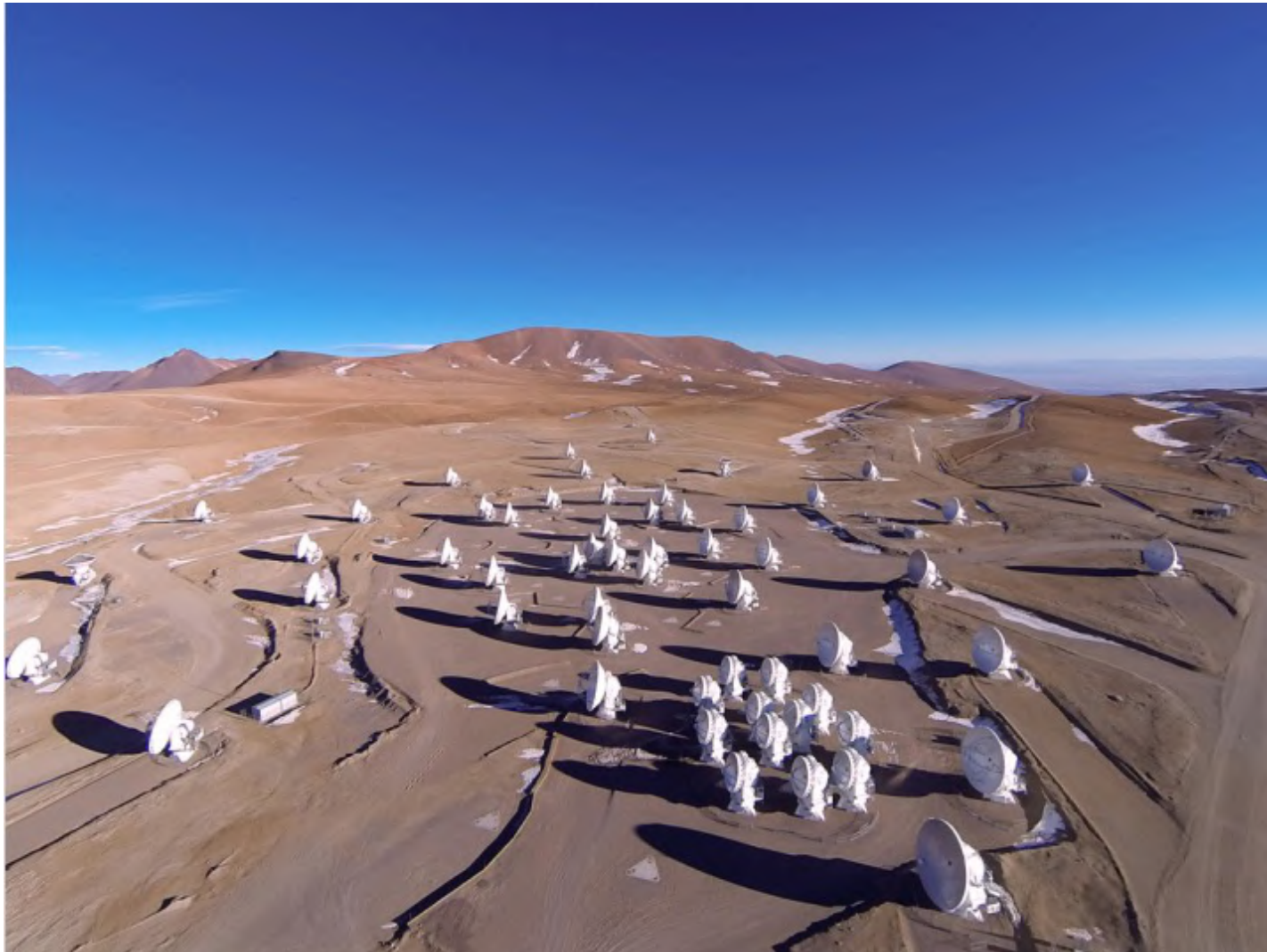
MeerKat: (64 dishes, ~13.5 μέτρων)

– το πιο ευαίσθητο σε: 3 - 20 cm (1,000 MHz-14.5GHz)



Operational facilities:

Atacama Large Millimeter array: 54x 12m + 12x 7m κεραιές
35 - 950 GHz / 0.3- 8.5 mm



Οργανολογία

Ένα μεγάλο κομμάτι της μελλοντικής αστροφυσικής - The Square Kilometer Array (SKA):

χιλιάδες κεραίας σε χιλιάδες χιλιόμετρα - Australia & South Africa

(project €1.8 δις – participants: Australia, China, Italy, the Netherlands, Portugal, South Africa, UK)



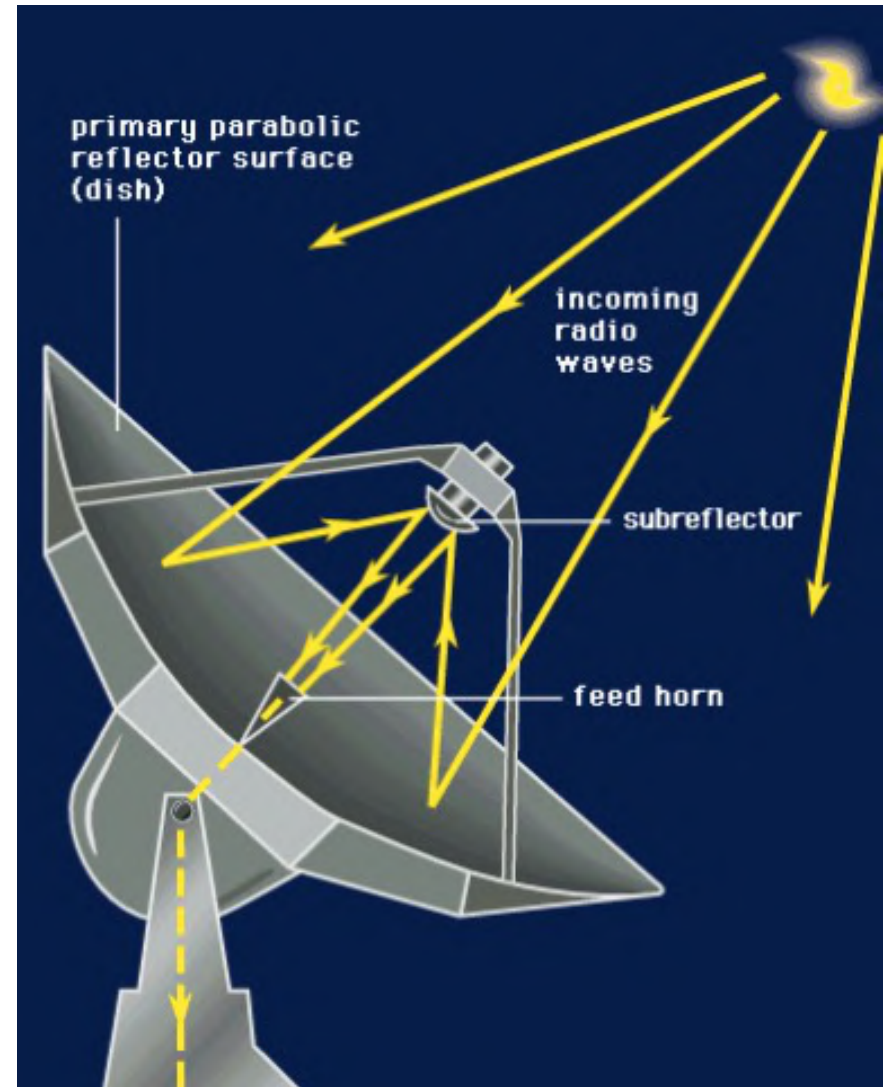
Ανίχνευση σήματος

Frontend:

Reflector(s)

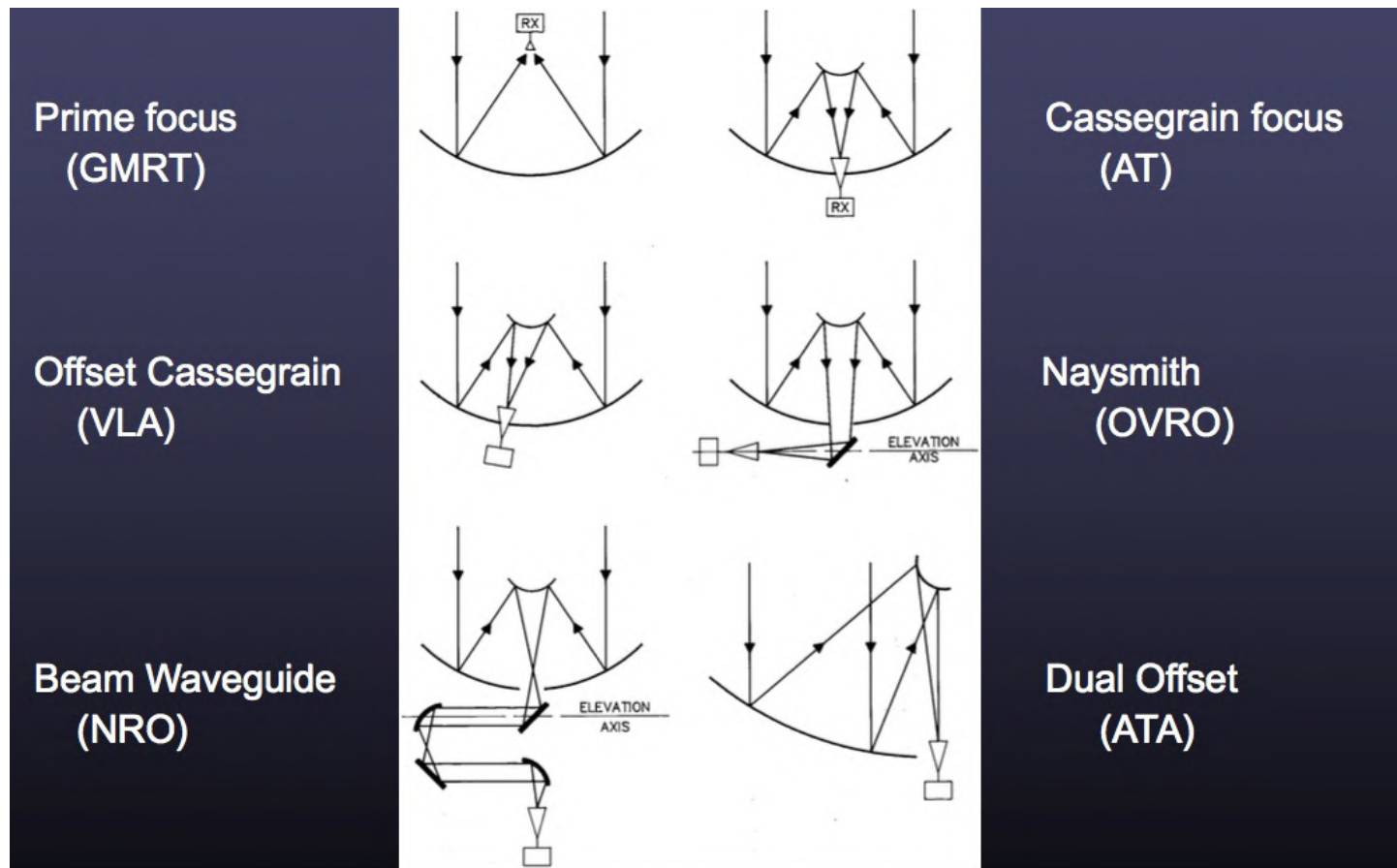
+ beam switching device:
chopper/wobbler

+
Feed (κυματοδηγός)



Ανίχνευση σήματος

Frontend:



Οργανολογία

Ανίχνευση σήματος

Frontend:

Prime focus
(GMRT)



Cassegrain focus
(AT)



Offset Cassegrain
(VLA)



Naysmith
(OVRO)



Beam Waveguide
(NRO)



Dual Offset
(ATA)

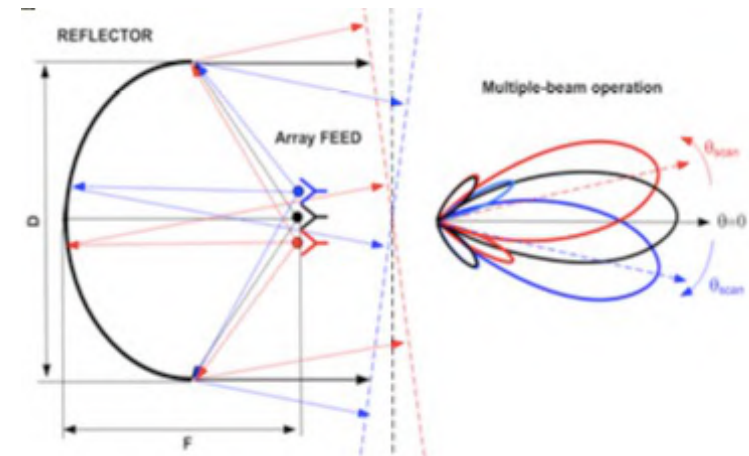
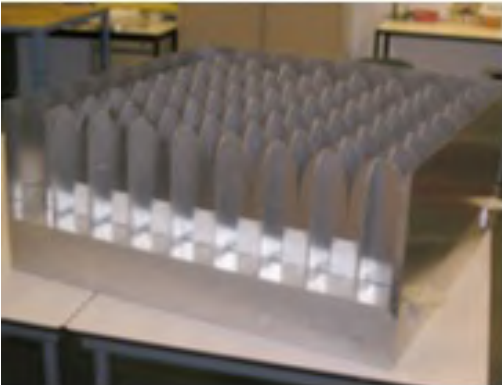


Ανίχνευση σήματος - **Frontend**:

Ένας reflector + ένα feed = ένα χωρικό pixel (δεν έχουμε χωρική πληροφορία – ό,τι είναι στο FOV)
(μεγάλες ανακαλύψεις: CMB temp, pulsar discovery, pulsar period delay due to GW)

Ένας reflector + πολλαπλοί κυματοδηγοί feeds + δέκτης με πολλαπλά input -> εικόνες στον ουρανό

APERTIF, Westerbork:
multiple feeds



Προσέξτε για κάθε feed τα 2 κάθετα μέταλα, που λαμβάνουν το σήμα από διαφορετικές πολώσεις του φωτός

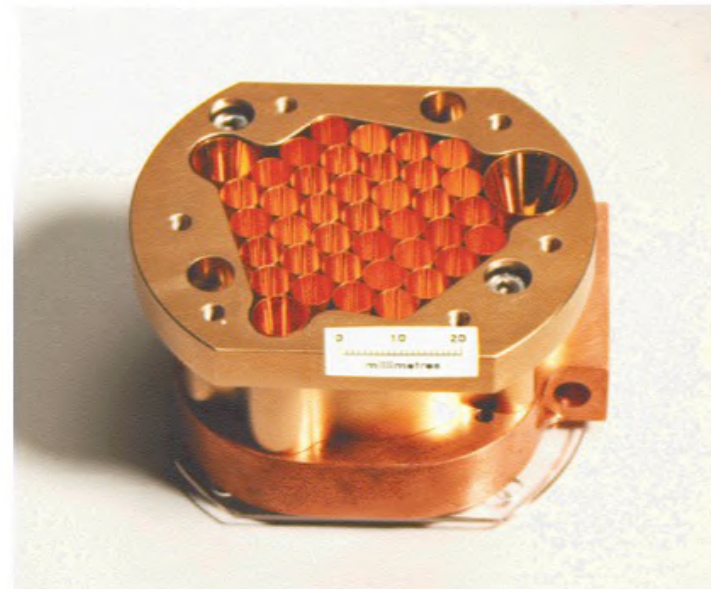
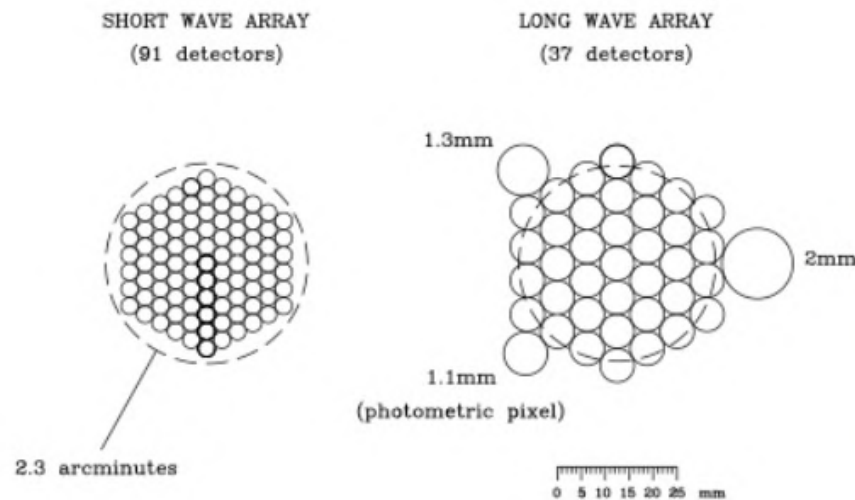
Οργανολογία

Παρενθεση για συνδυασμό frontend+backend:

Πολλαπλοί κυματοδηγοί πρέπει να οδηγήσουν σε κάμερες με πολλαπλά βολόμετρα, που δρουν ως χωρικά pixels. Π.χ., SCUBA (JCMT), MAMBO (IRAM 30m)

Λειτουργούν στο (sub)mm, καταγράφουν την ένταση του φωτός σε ~ολόκληρο το ατμοσφαιρικό παράθυρο. Δεν δίνουν φάσμα λόγω της αρχής λειτουργίας τους (θερμοηλεκτρικό φαινόμενο).

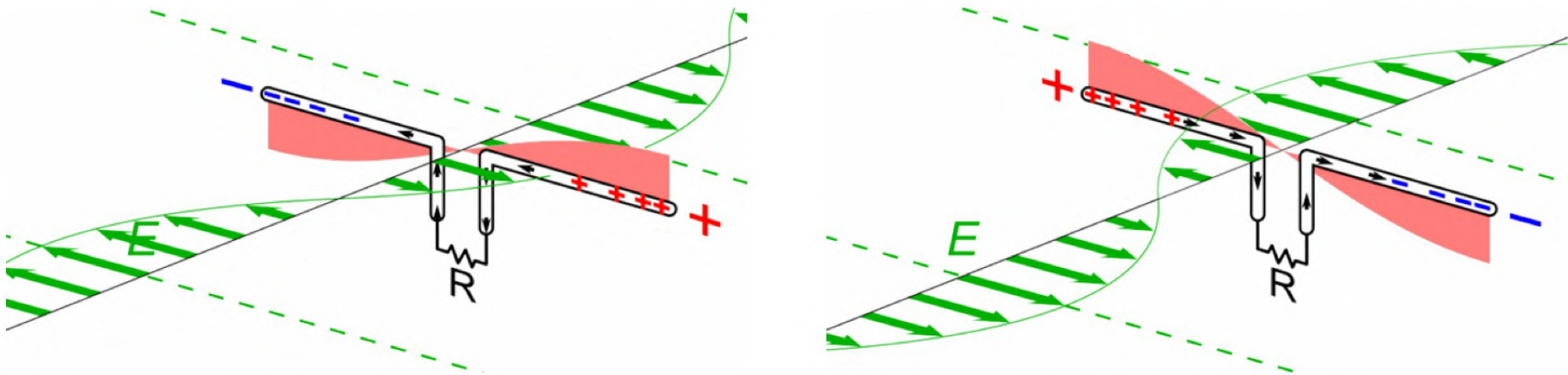
SCUBA instrument installed on the JCMT in Hawaii:



Ανίχνευση σήματος: Τι συμβαίνει στο feed:

η 'κλασική' ανίχνευση σήματος στο ραδιοφωνικό βασίζεται στις κυματικές ιδιότητες (H/M ταλαντώσεις) του φωτός κι εφαρμόζεται για όλες τις συχνότητες (m, cm, mm, sub-mm).

Οι ταλαντώσεις του ηλεκτρικού πεδίου του ραδιοκύματος δημιουργούν εναλλασσόμενο ρεύμα στον ανιχνευτή – αγωγό: $\sim I_0 \sin(\omega t - \phi)$ ή $\sim I_0 \cos(\omega t - \phi - \pi/2)$. Παράδειγμα για ανιχνευτή - δίπολο:



Η πληροφορία για την ένταση, συχνότητα, και φάση του H/M πεδίου είναι λοιπόν μετρήσιμες μέσω των I_0 , ω , και ϕ . Επίσης, διατηρείται η πληροφορία ανά πόλωση και συχνότητα.

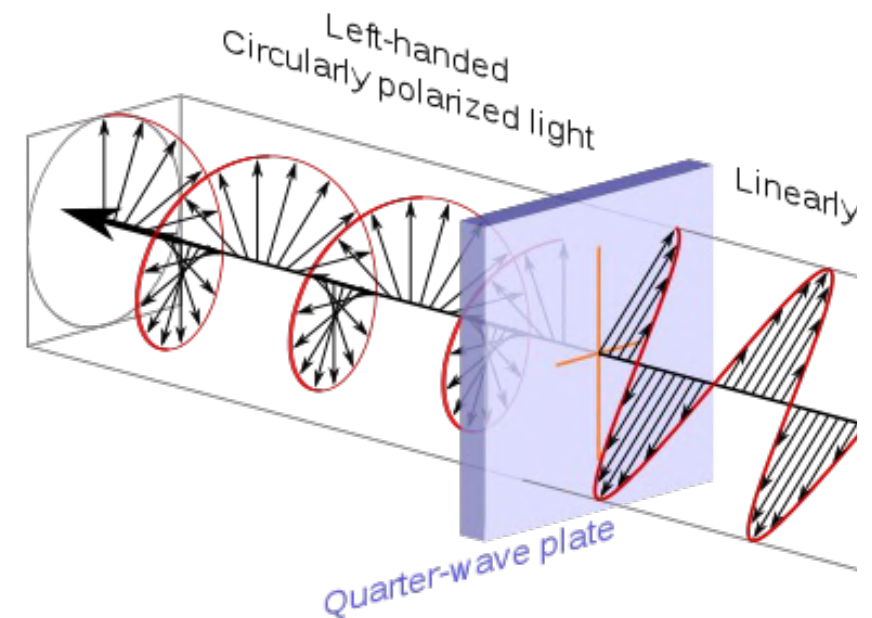
Οργανολογία

Ανίχνευση σήματος: Τι συμβαίνει στο feed:

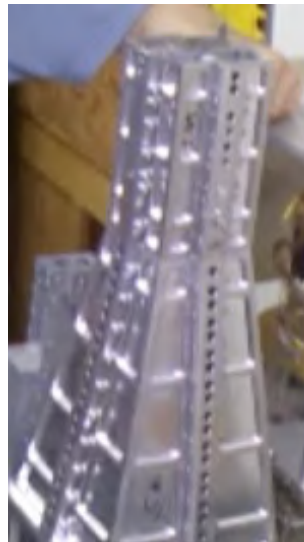
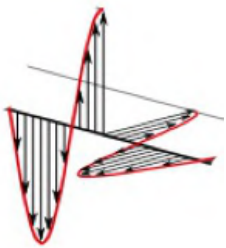
η 'κλασσική' ανίχνευση σήματος στο ραδιοφωνικό βασίζεται στις κυματικές ιδιότητες (H/M ταλαντώσεις) του φωτός κι εφαρμόζεται για όλες τις συχνότητες (m, cm, mm, sub-mm).

Ο ανιχνευτής - δίπολο λειτουργεί για 1 πόλωση του φωτός -> χρειαζόμαστε 2 κάθετα δίπολα και για τις 2 πολώσεις. Στις αντένες-πίατα, ο διαχωρισμός των πολώσεων και η επαγωγή 2 αντίστοιχων ρευμάτων γίνεται από το feed (που έχει ortho-mode transducer).

Χρειαζόμαστε επίσης 2 ανιχνευτές.



OMD of the VLA

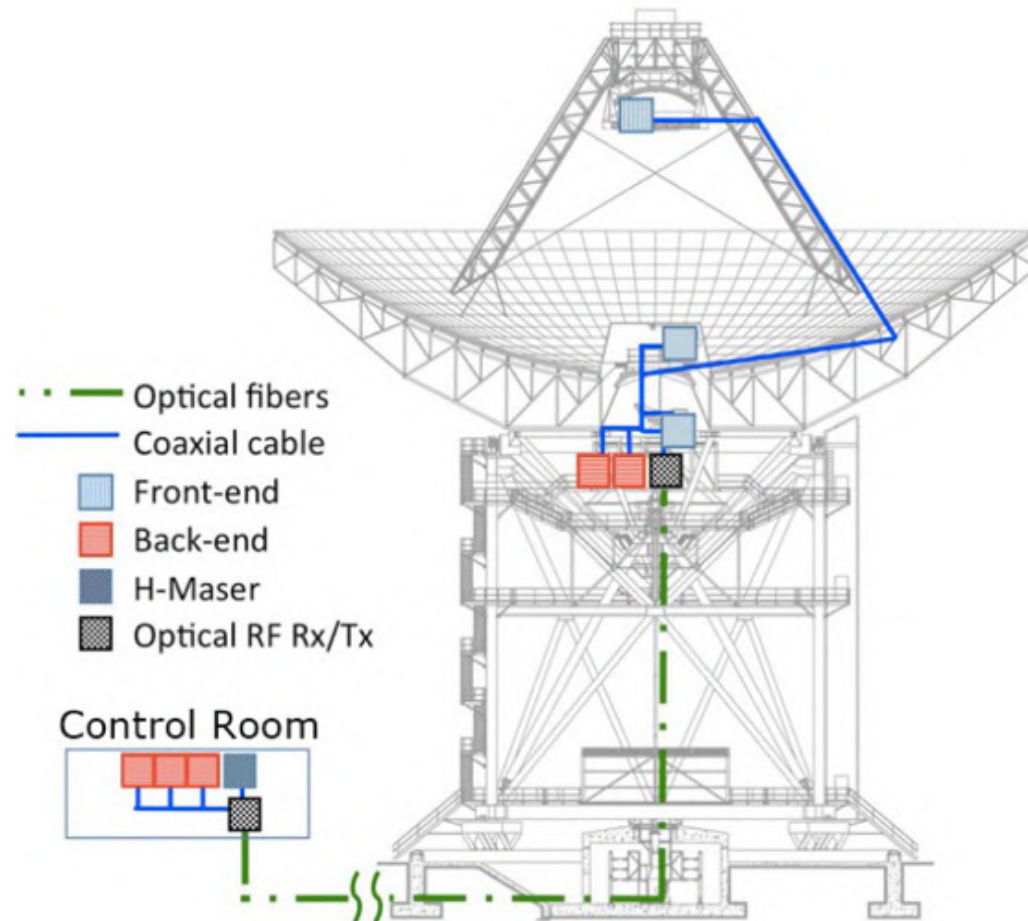
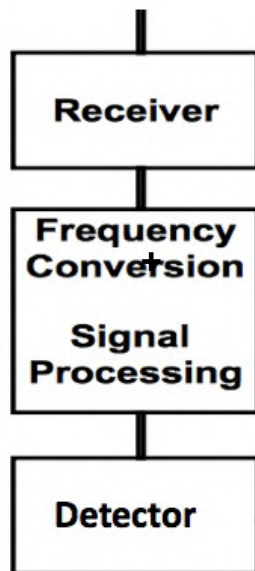


Οργανολογία

Ανίχνευση σήματος:

Η εξαγωγή του φάσματος (ισχύς ανά συχνότητα) από το ρεύμα γίνεται μέσω μιας σειράς συστημάτων που συνολικά ονομάζονται backend.

Backend: σειρά στοιχείων, τοποθετημένα σε πολλά σημεία του τηλεσκοπίου. Σήμερα μπορεί να είναι και ένα μόνο ηλεκτρονικό

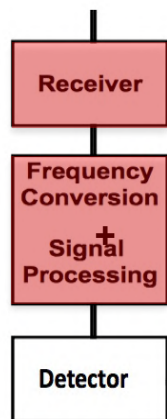


Heterodyne receiver: Ένας δέκτης που χαμηλώνει τη συχνότητα του σήματος

Οι απώλειες σήματος (π.χ., στα καλώδια) **αυξάνουν με v^2** .

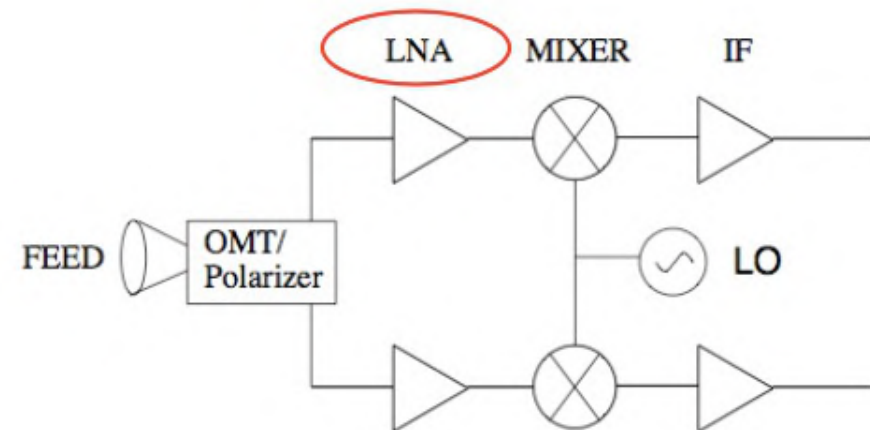
Επίσης ο χρόνος να κάνουμε sample το σήμα μπορεί να είναι εξαιρετικά μικρός!!! (βλ. σήμα 1.4 GHz)

Είναι ευκολότερο να επεξεργαστούμε (amplify/filter/delay/process/digitise) **σήμα σε χαμηλότερες συχνότητες**.



A typical heterodyne receiver amplifies the incoming signal from the feed with a low-noise amplifier (usually cryogenically cooled to minimize added noise) and “down-converts” it to a lower frequency where it can be more easily sampled or processed. For mm signal, amplification after mixing.

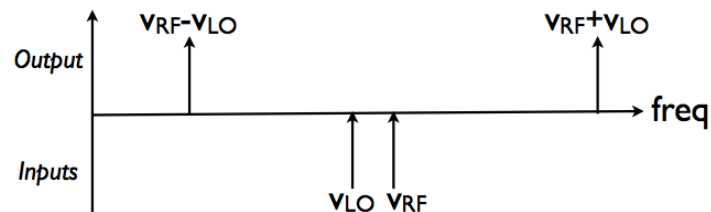
Mixer mixes the input signal with a pure, monochromatic signal, generated by a Local Oscillator (LO) and producing signal at intermediate frequency (IF).



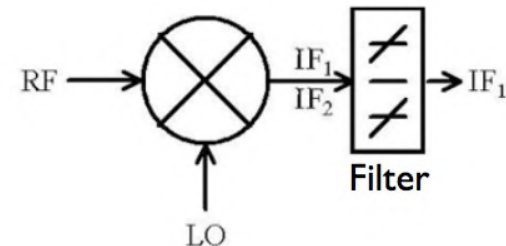
Heterodyne receiver: Ένας δέκτης που χαμηλώνει τη συχνότητα του σήματος κάνοντας μίξη (συνέλιξη) με σήμα αναφοράς που παράγεται τοπικά (από συσκευή που λέγεται τοπικός ταλαντωτής/(local oscillator).

Συνέλιξη σήματος με σήμα του τοπικού ταλαντωτή

$$\sim \sin(\omega t)\sin(\omega_o t) = 1/2(\underbrace{\cos(\omega - \omega_o)t}_{\text{-- Difference frequency --}} + \underbrace{\cos(\omega + \omega_o)t}_{\text{-- Sum frequency --}})$$

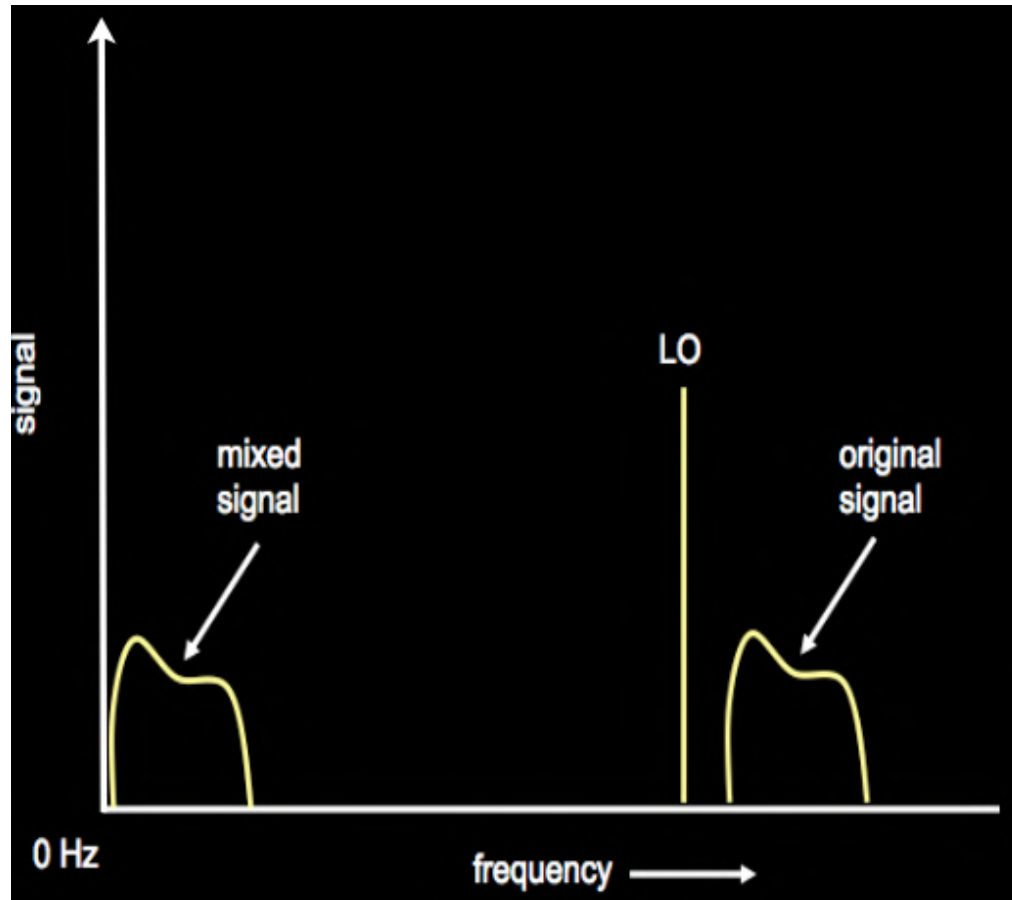


Με φίλτρο, κρατάμε μόνο τις χαμηλές συχνότητες



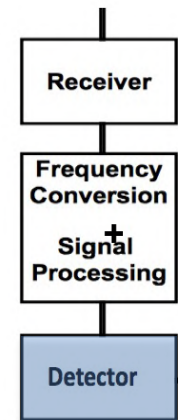
Οργανολογία

Μπορούν να γίνουν πολλές διαδοχικές μίξεις για να κατέβει η συχνότητα όσο χαμηλά θέλουμε και να επεξεργαστούμε το σήμα ευκολότερα.

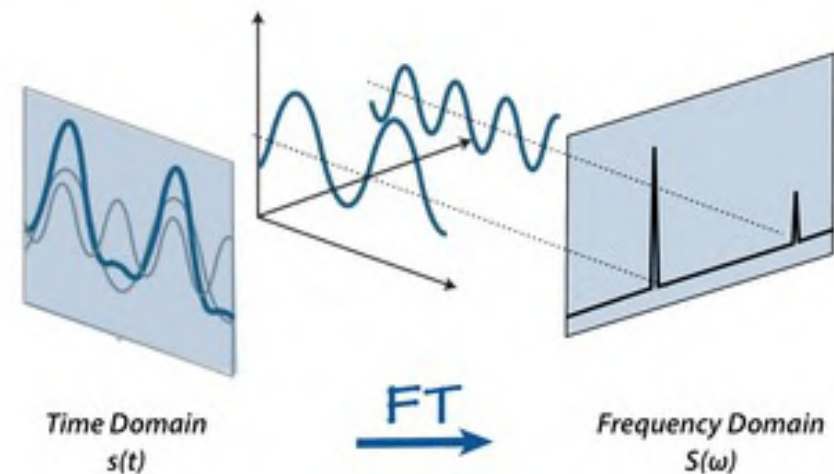
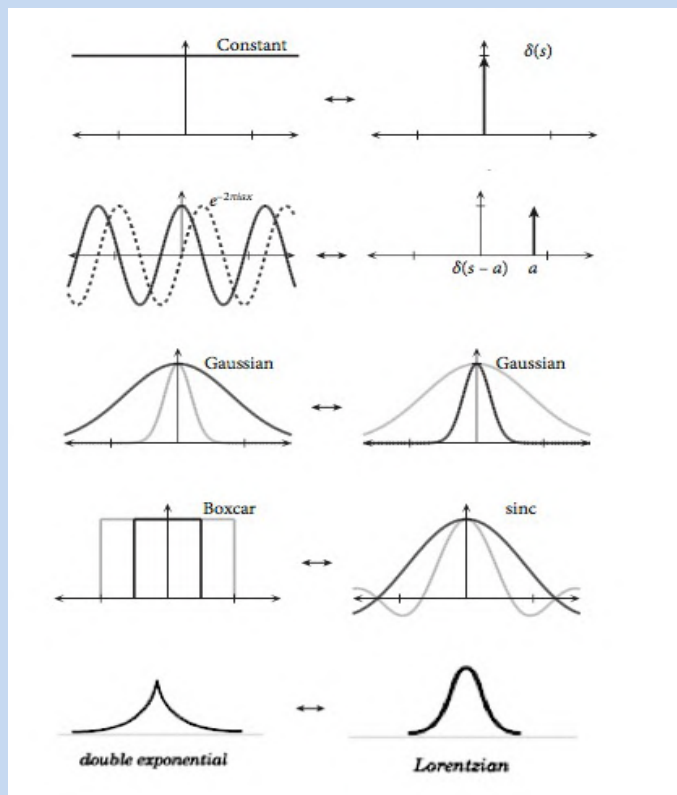


Detector (ανιχνευτής = φασματογράφος)

- Filterbank (πρώτη γενιά – πολλά αναλογικά φίλτρα: το καθένα με δικό του ανιχνευτή)
Μειονέκτημα: εύρος κάθε φίλτρου περιορίζει τη φασματική ανάλυση σε km/s.
- Fourier Transform Spectrometer (FTS; πιο καινούριοι – πλέον γίνεται μέσω υπολογιστών).
Επειδή το σήμα είναι η επαλληλία (συν)ημιτονοειδών σημάτων $\sum_i V_i \cos(\omega_i t - \phi_i)$,
κι επειδή ο μετασχηματισμός Fourier του (συν)ημιτόνοειδους είναι συνάρτηση δ
στη συχνότητα, παίρνουμε συναρτήσεις δ που δίνουν την συνολική ισχύ ανά ν .



Αρχικός χώρος – Χώρος Fourier

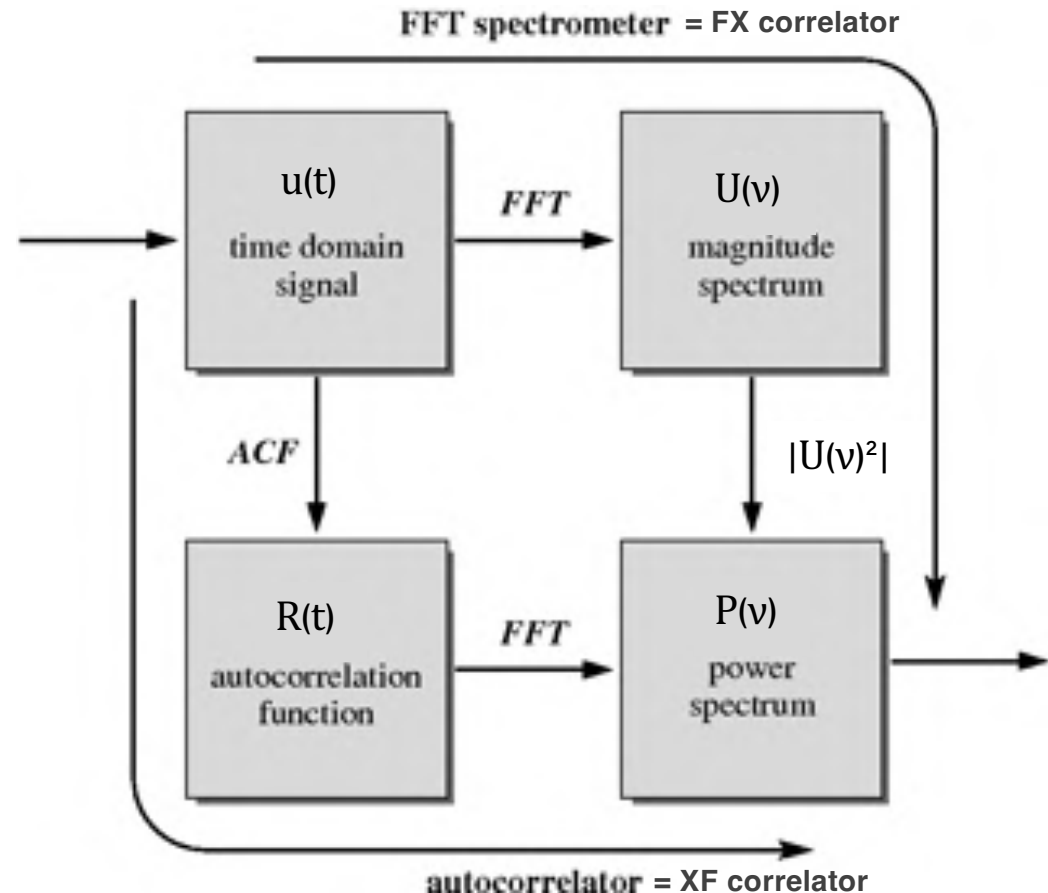


Detector (ανιχνευτής = φασματογράφος)

- Filterbank (πρωτη γενιά – πολλά αναλογικά φίλτρα: το καθένα με δικό του ανιχνευτή)
- Fourier Transform Spectrometer (FFT ή FX)
- Autocorrelator (XF)

Ενδιάμεση ‘γενιά’ φασματογράφων: Κάνει ακριβώς το ίδιο με το να ψηφιοποιήσει σήμα, να το περάσει από FT και να πάρει το φάσμα υψώνοντας στο τετράγωνο, απλά το κάνει αναλογικά και με ανάστροφη σειρά. Κάνει δηλαδή διάκριτο μετασχηματισμό Fourier.

Οι autocorrelators βασίζονται στο θεώρημα Wiener-Khinchin, που λέει ότι το φάσμα ισχύος ενός σήματος είναι ο μετασχηματισμός Fourier της autocorrelation function.



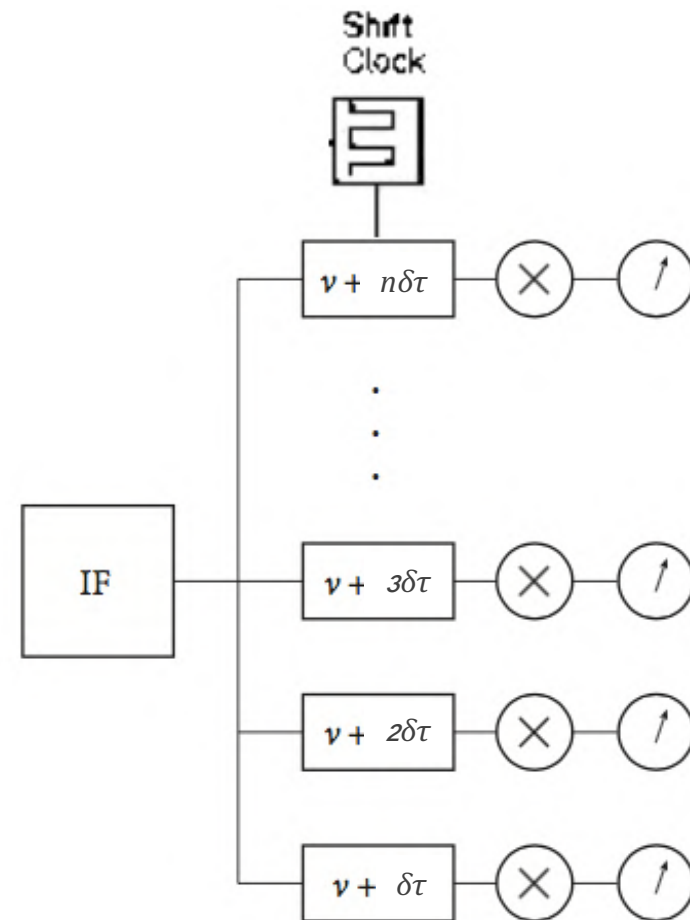
Detector (ανιχνευτής = φασματογράφος)

- Filterbank (πρωτη γενιά – πολλά αναλογικά φίλτρα: το καθένα με δικό του ανιχνευτή)
- Fourier Transform Spectrometer (FFT ή FX)
- Autocorrelator (XF)

Η αναλογική autocorrelation γίνεται μέσω **σάρωσης** πολλαπλασιασμένων σημάτων:

Αντίγραφο μέρους του αρχικού (input) σήματος, καθυστερείται με κατά σειρά αυξανόμενο τρόπο ($+n \cdot \delta\tau$), και το σήμα με την εκάστοτε καθυστέρηση πολλαπλασιάζεται με το αρχικό (autocorrelation).

Το γινόμενο τους ολοκληρώνεται για κάθε $\delta\tau$ (FT).

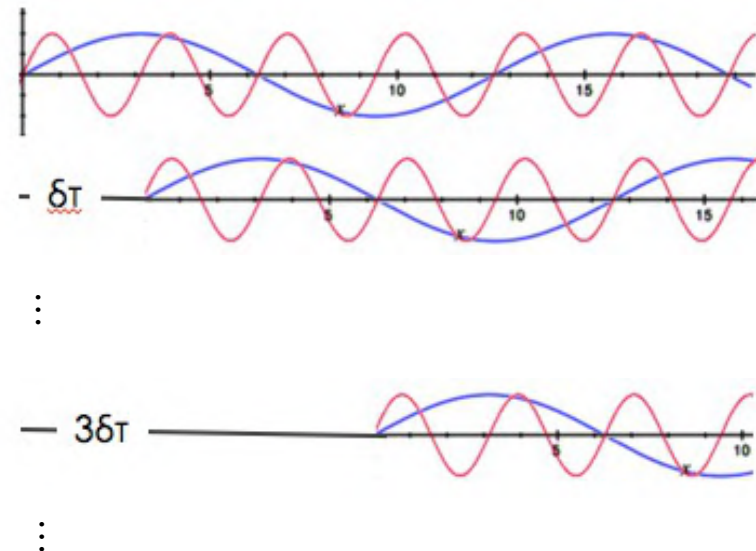
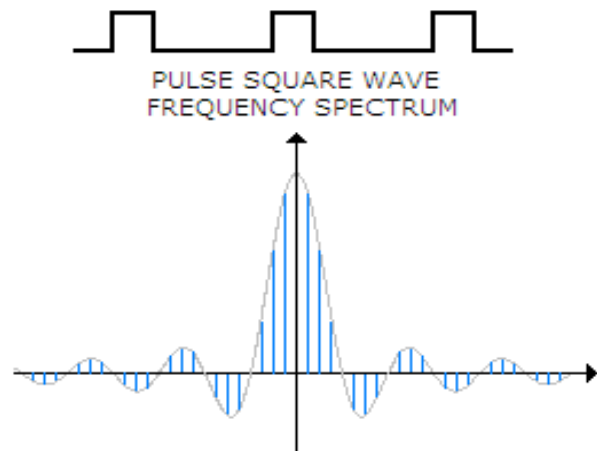


Detector (ανιχνευτής = φασματογράφος)

- Filterbank (πρωτη γενιά – πολλά αναλογικά φίλτρα: το καθένα με δικό του ανιχνευτή)
- Fourier Transform Spectrometer (FFT ή FX)
- Autocorrelator (XF)

Γιατί δουλεύει; Το κάθε δt επιτρέπει να συντονίζεται το σήμα άλλης συχνότητας, π.χ. για τις 2 συχνότητες στο παράδειγμα, η μια μόνο συντονίζεται: η περίοδος του κόκκινου αντιστοιχεί στο δt . Για το μπλε, σε $3\delta t$ έχουμε καταστρεπτική συμβολή.

Το δt μπαίνει μέσω επαναλαμβανόμενου παλμού απο 'ρολόι' (π.χ., maser clock)



Το βήμα στο χρόνο, δt , μας δίνει και το πόσο συχνά κάνουμε sample το σήμα κι άρα την ανάλυση (resolution) του τελικού φάσματος.

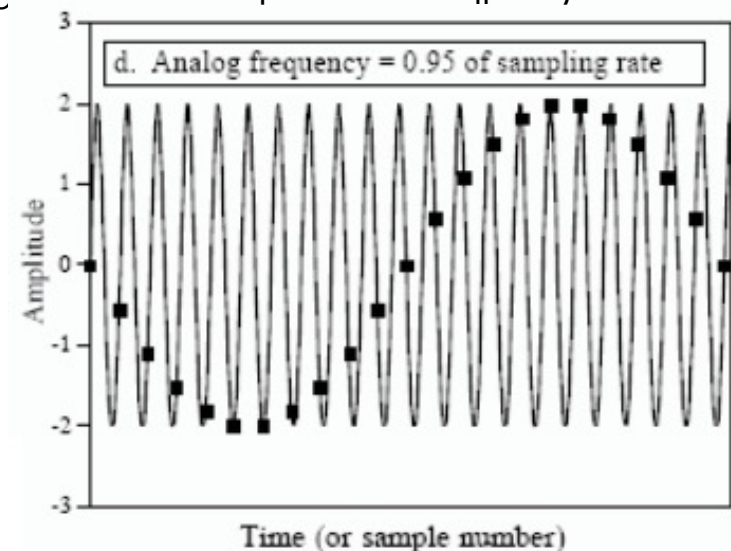
Digitizer for computer processing:

Είτε πριν είτε μετά τον ανιχνευτή, ανάλογα με την τεχνολογία του (FX vs. XF), το σήμα για τις 2 πολώσεις περνά από ADC (analog-to-digital converter) όπου Γίνεται ψηφιακό (με Nyquist sampling ή oversampling), δηλ. το ψηφιοποιούμε με συχνότητα >2 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του ρολογιού που έφτιαξε τον παλμό για να μπορούμε να τον αναπαράξουμε αξιόπιστα (χωρίς aliasing).

Τελικά το σήμα καταγράφεται ψηφιακά σε τυχαίες μονάδες Και μέσω βαθμονόμησης μετατρέπεται σε ροή ή σε αντίστοιχη θερμοκρασία. Περισσότερα για αυτό θα δούμε στο κεφάλαιο της συμβολομετρίας.



(παράδειγμα aliasing φαίνεται στα παρακάτω σημεία).

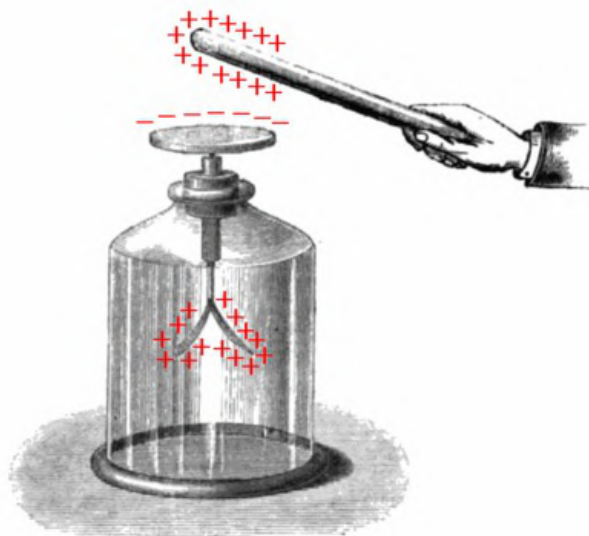


Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Η ανίχνευση σωματίων αφορά κυρίως σε 2 είδη ενδιαφέροντα για αστροφυσική: νετρίνο και CRs

1) Κοσμικές ακτίνες (cosmic rays – CRs):

- Σωματίια, που είτε τα βλέπουμε ως πρόβλημα στα ηλεκτρονικά μας (κυρίως δορυφόρων), είτε ως φορείς πληροφορίας
- Ανιχνεύτηκαν το 1912 από τον Hess, σε μετρήσεις από αερόστατο μέσω ηλεκτροσκοπίου, κατά τη διάρκεια ηλιακής έκλειψης, μάλιστα τα επίπεδα της ακτινοβολίας ανέβαιναν με το υψόμετρο {Νόμπελ}



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Οι κοσμικές ακτίνες είναι πυρήνες ατόμων που έχουν επιταχυνθεί σε πολύ μεγάλες ταχύτητες (10^7 - 10^{20} eV).

ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΑΚΤΙΝΕΣ!! Σύσταση:

- πρωτόνια (89%),
- πυρήνες He – α particles (10%)
- πυρήνες C, O, Ne, Mg, Fe, Ni, ...U (1%)

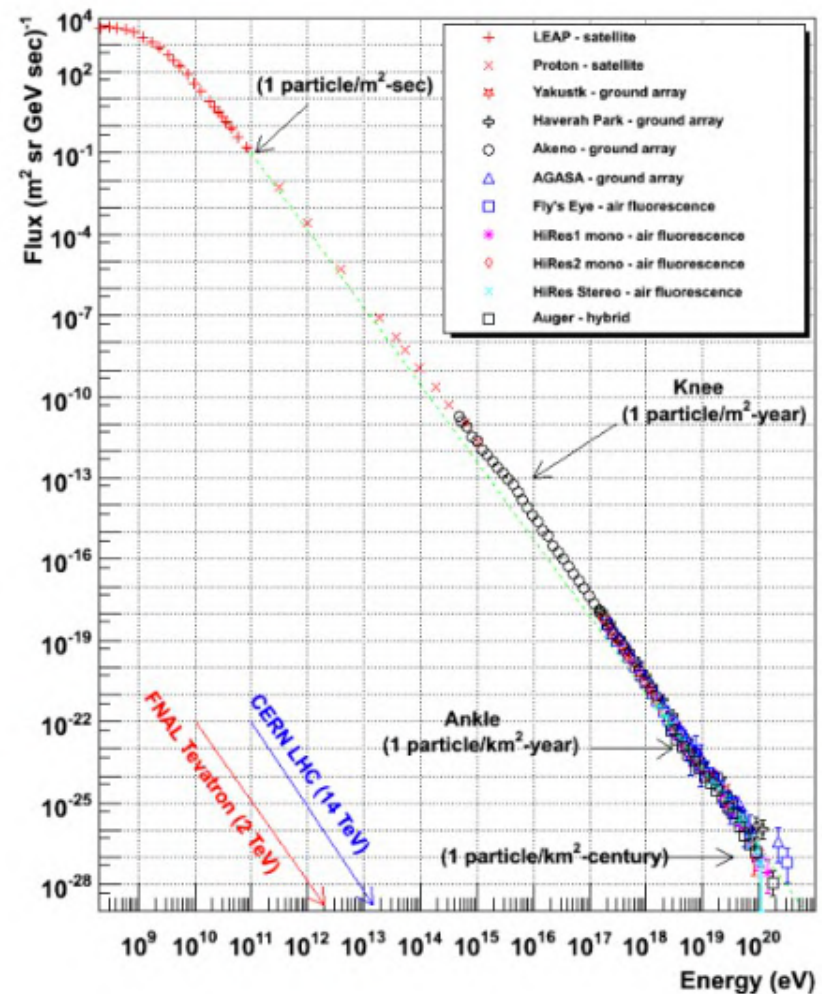
Η φασματική κατανομή όλων των σωματίων μαζί ακολουθεί ~ νόμο δύναμης

Ροές (στη Γη):

Χαμηλή E ~ 1 σωματίο /m² /s

(για αστροφυσικές κλίμακες είναι σημαντικό)

Υψηλή E ~ 1 σωματίο /km²/100yrs



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Οι κοσμικές ακτίνες είναι πυρήνες ατόμων που έχουν επιταχυνθεί σε πολύ μεγάλες ταχύτητες. Είναι από δυναμικής/ενεργητική απόψεως σημαντικές για γαλαξίες.
Π.χ., Milky Way energy density (από Gabici+)

$$\text{CR energy density: } w_{CR} \sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$$

$$\text{Magnetic field energy density: } w_B = \frac{B^2}{8\pi} \sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$$

$$\text{Gas thermal energy density: } w_{gas}^{turb} = \rho_{gas} v_{turb}^2 \sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$$

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

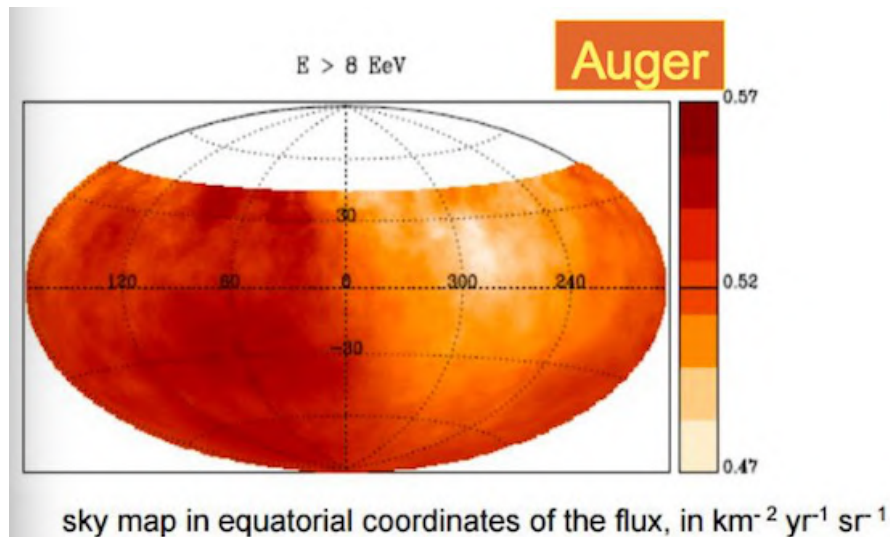
Πηγές κοσμικών ακτίνων:

- **Ήλιος** (ηλιακός άνεμος ~ 750 km/s, flares, coronal ejections σε $0.1c...$)
 - χαμηλοενεργειακά: για μάζα ηρεμίας πρωτονίου ($900\text{MeV}/c^2$), 750km/s αντιστοιχούν σε 3keV
- **Supernovae**
 - ανιχνεύσεις μέχρι 10^{15} eV έχουν ταυτοποιηθεί να προέρχονται από SN.
- **Επιτάχυνση κοντά σε compact objects (μαύρες τρύπες)**
- **Shock waves στο μεσοαστρικό χώρο (γύρω από SN ή εκεί που διαδίδονται άνεμοι)**

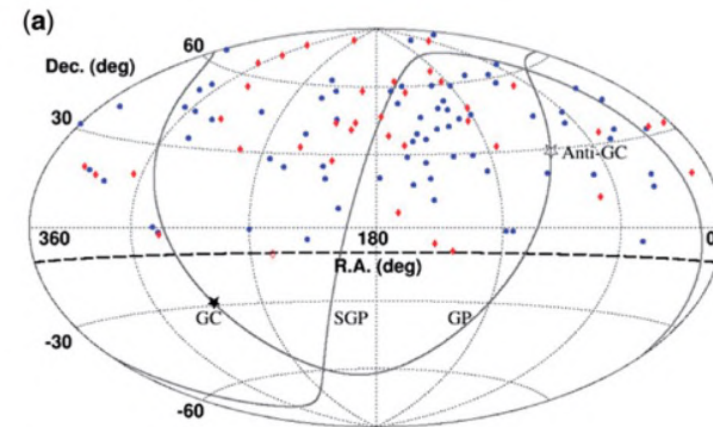
Επιτάχυνση Fermi – τρόπος να επιταχυνθούν σε ultra-relativistic E.
Τα σωματίδια συγκρούονται με ένα διαδιδόμενο μέτωπο και παίρνουν ενέργεια από αυτό, όμως δεν μπορούν να απομακρυνθούν λόγω μαγνητικών πεδίων, επιστρέφουν, επανασυγκρούονται και η διαδικασία ‘καθρεπτισμάτων’ συνεχίζεται μέχρι να πάρουν αρκετή E για να βγουν από το μαγνητικό πεδίο.

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

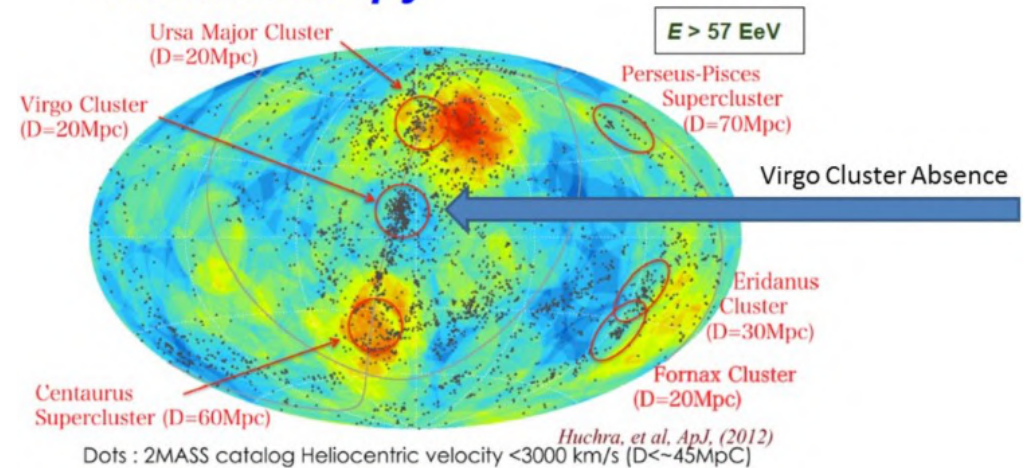
Πηγές κοσμικών ακτίνων: Η προέλευση στις πολύ υψηλές ενέργειες είναι ακόμα υπο μελέτη, καθώς έχει βρεθεί excess από 2 εγκαταστάσεις (telescope array, Auger) που όμως δεν συσχετίζεται με γαλαξιακό κέντρο (αντίκεντρο), δίσκο, clusters γαλαξιών.



$$1 \text{ Exa eV} = 10^{18} \text{ eV}$$



TA Anisotropy

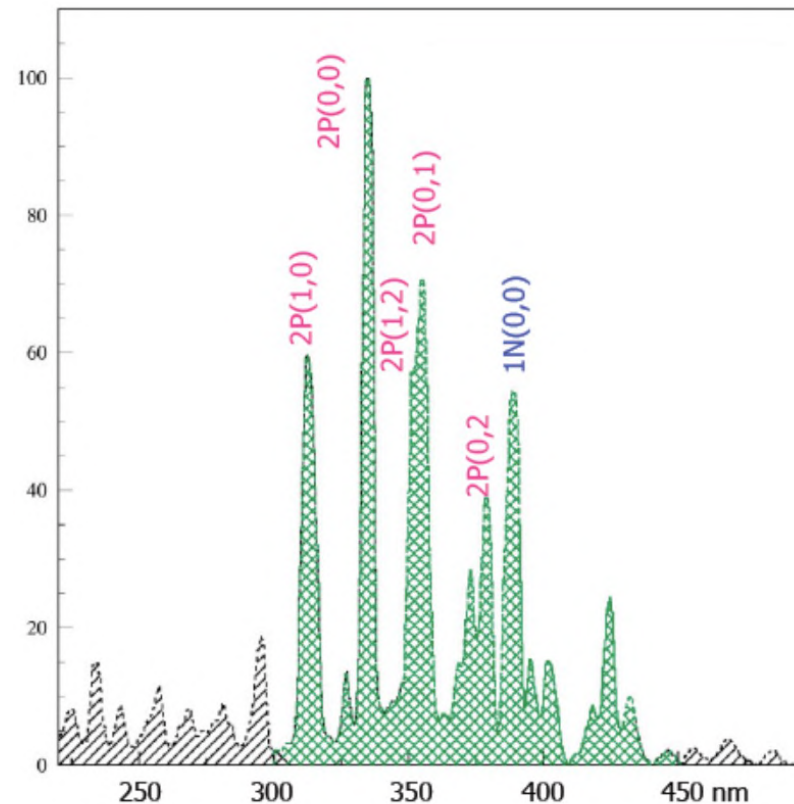


Aitoff projection in equatorial coordinates of the UHECRs detected at the Telescope Array. The solid curves stand for the Galactic plane (GP) and supergalactic plane (SGP), while the closed and open stars stand for the Galactic center (GC) and the anti-Galactic center (Anti-GC), respectively. (a) The directions of the UHECRs with $E > 57 \text{ EeV}$ for the first five-year observation time are shown as the blue points, while those for the sixth and seventh observation years are shown as the red diamonds. (Note that one event with $\delta < -10^\circ$ was not included in this analysis and is shown as the red open diamond). (b) Significance map for the seven-year observation period using the 20° oversampling radius. The maximum significance is 5.1σ .

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Ανίχνευση κοσμικών ακτίνων για υψηλές E ($>10^{18}\text{eV}$): Pierre Auger Observatory

2 τύποι κατασκευών: 4x6 **τηλεσκόπια για ανίχνευση φθορισμού** (fluorescence) στο UV. Τα σωματρία καθώς περνούν την ατμόσφαιρα συγκρούονται με μόρια (κυρίως αζώτου) N_2 , τα οποία τα διεγείρουν και αυτά αποδιεγείρονται σχεδόν ταυτόχρονα μέσω συγκεκριμένων στάθμων που οδηγούν σε εκπομπή στο οπτικό καθώς αποδιεγείρονται.

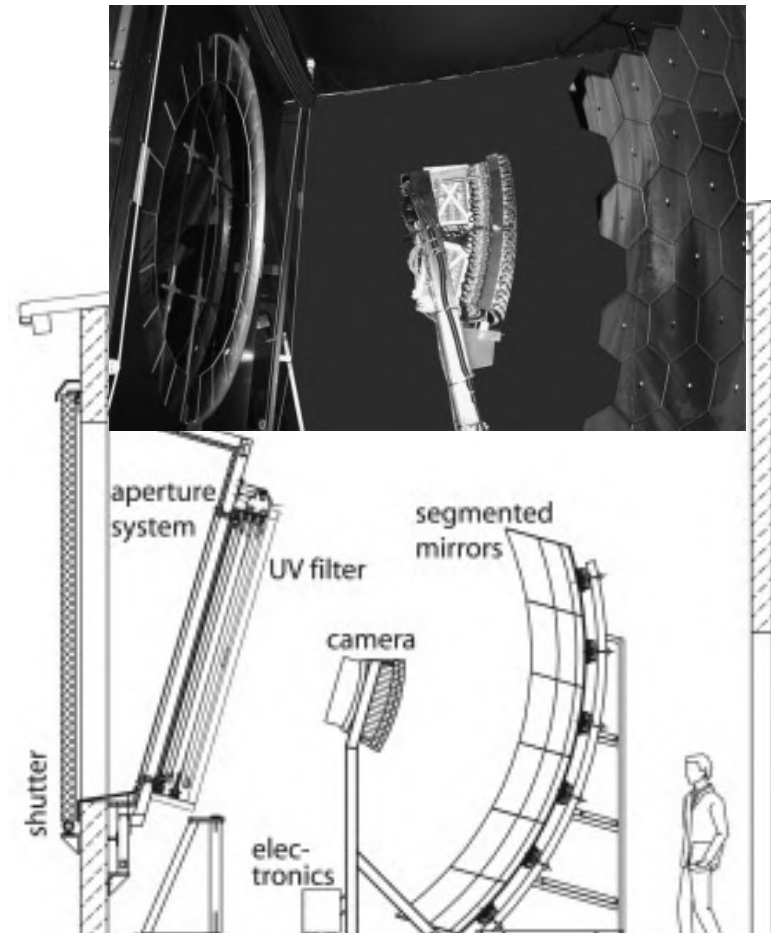


Fluorescence spectrum

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Ανίχνευση κοσμικών ακτίνων για υψηλές E ($>10^{18}\text{eV}$): Pierre Auger Observatory

2 τύποι κατασκευών: 4x6 **τηλεσκόπια για ανίχνευση φθορισμού** (fluorescence) στο UV.
Τα σωματρία καθώς περνούν την ατμόσφαιρα συγκρούονται με μόρια (κυρίως αζώτου) N_2 , τα οποία τα διεγείρουν και αυτά αποδιεγείρονται σχεδόν ταυτόχρονα μέσω συγκεκριμένων στάθμων που οδηγούν σε εκπομπή στο οπτικό καθώς αποδιεγείρονται.



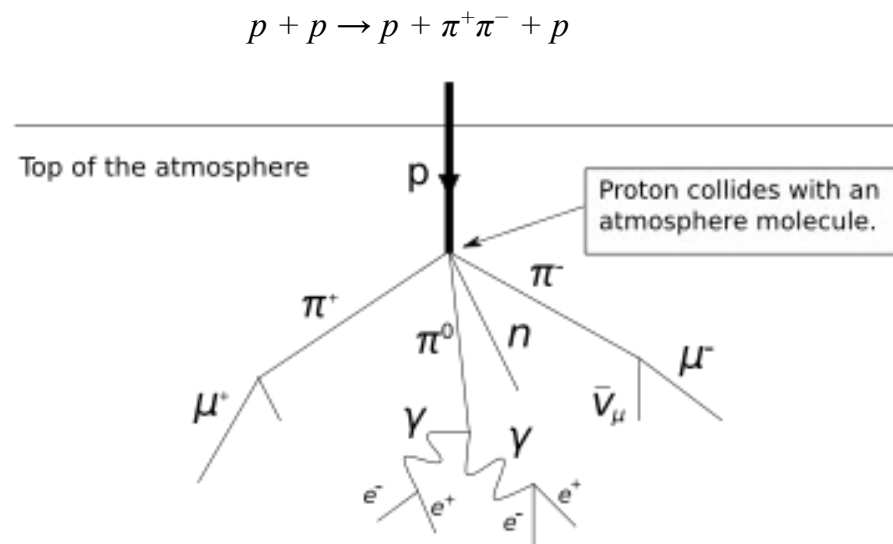
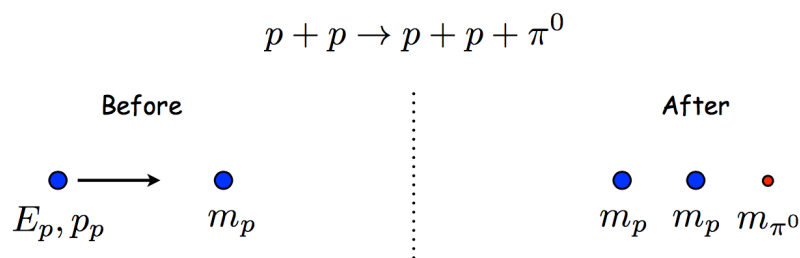


Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Ανίχνευση κοσμικών ακτίνων για υψηλές E ($>10^{18}\text{eV}$): Pierre Auger Observatory

2 τύποι κατασκευών: 4x6 **τηλεσκόπια για ανίχνευση φθορισμού** (fluorescence) στο UV και 200 δεξαμενές νερού για ανίχνευση **Cherenkov**

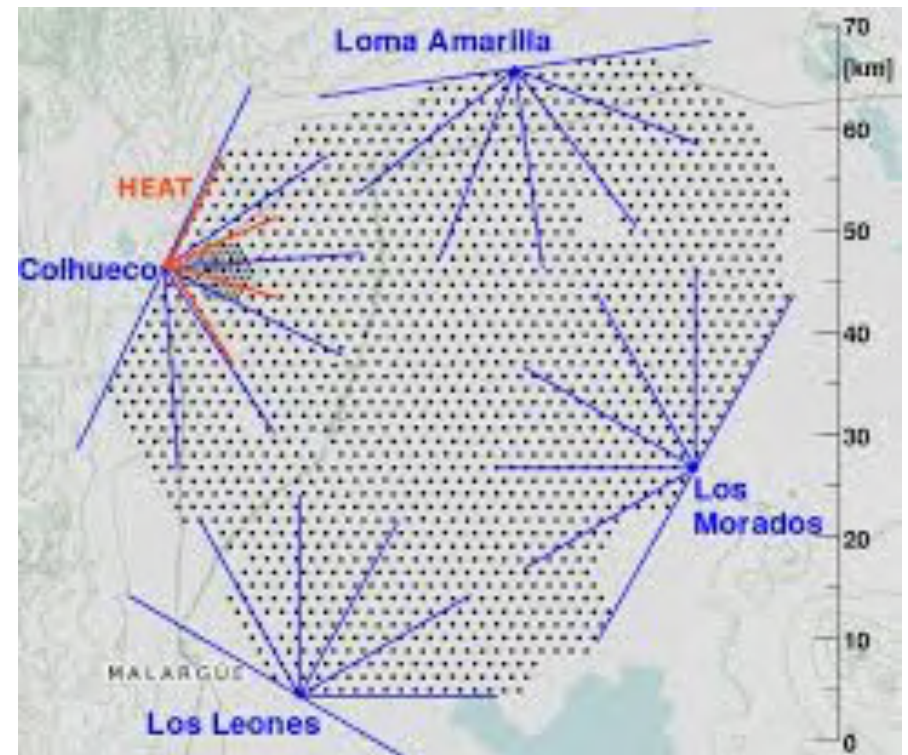
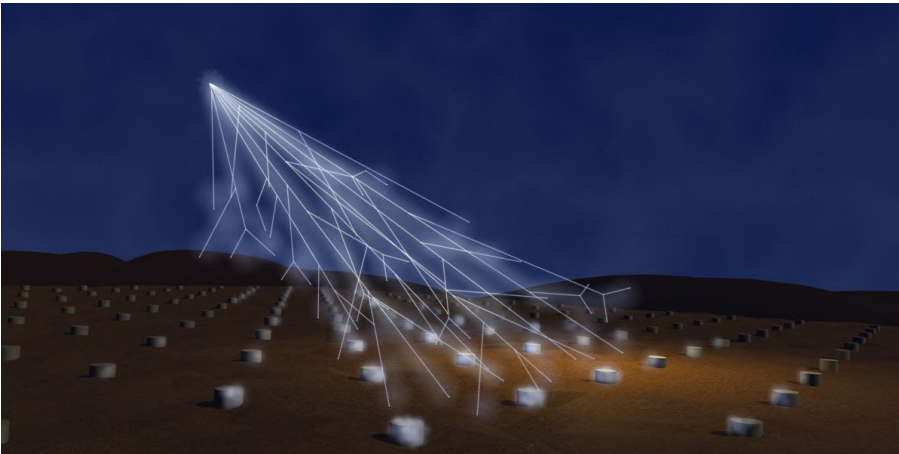
- Κατά την είσοδο των κοσμικών ακτίνων παράγονται μέσω μιας σειράς αντιδράσεων φωτόνια και διάφορα σωματίια που συμπεριλαμβάνουν λεπτόνια (π.χ. e^- , e^+) + αδρόνια (π.χ., πιόνιο 2 quark, ελαφρύτερο του p , υπεύθυνο για την ισχυρή πυρηνική).
- Τα πιόνια μπορούν να δώσουν $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$.
- Τα πιόνια είναι ασταθή και διασπώνται επίσης σε μιόνια μ (λεπτόνιο με φορτίο -1, spin $\frac{1}{2}$) + νευτρίνα ως $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$. Τα μιόνια συμπεριφέρονται όπως και τα e^- στην παραγωγή Cherenkov radiation. Όμως επειδή είναι πιο μαζικά, επιβραδύνονται πιο δύσκολα και εκπέμπουν λιγότερο Bremsstrahlung, οπότε φτάνουν πιο βαθιά, π.χ., στην επιφάνεια της Γης.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Ανίχνευση κοσμικών ακτίνων για υψηλές E ($>10^{18}\text{eV}$): Pierre Auger Observatory

2 τύποι κατασκευών: 4x6 **τηλεσκόπια για ανίχνευση φθορισμού** (fluorescence) στο UV και 200 δεξαμενές νερού για ανίχνευση **Cherenkov** σε έκταση $>3.000\text{ km}^2$ στην Αργεντινή.

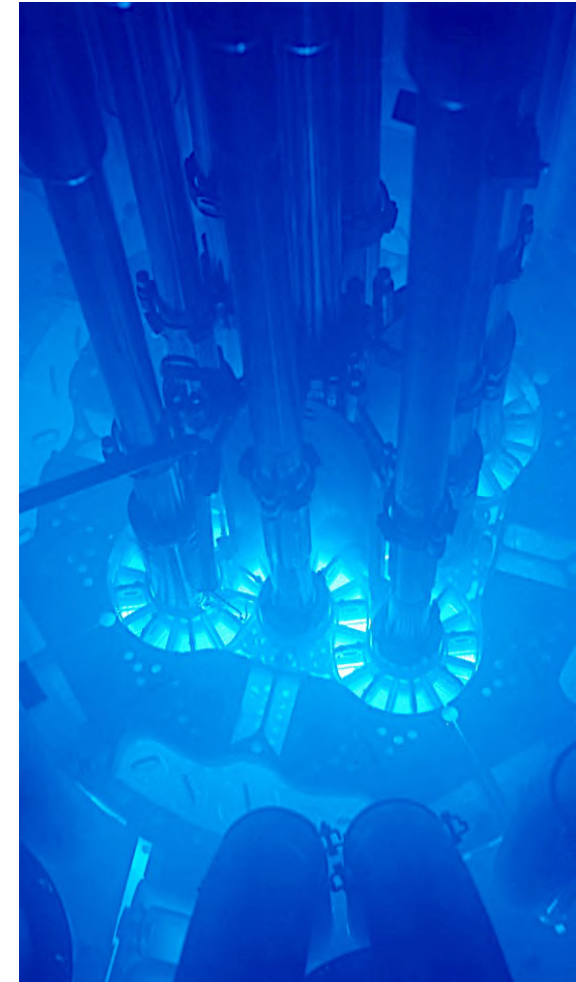


Υπενθύμιση για ανίχνευση ακτινοβολίας **Cherenkov** για υψηλοενεργειακά φωτόνια.

Έστω ότι έχουμε e^- που κινείται πιο γρήγορα σε κάποιο μέσο από ό,τι το φως: π.χ. παράγονται ακτίνες γ και e^- με $U \sim c$ σε κάποιο αντιδραστήρα. Ενώ οι ακτίνες γ επιβραδύνονται εισερχόμενες στην πισίνα γύρω από τον αντιδραστήρα (εφόσον το νερό έχει refractive index $n=1.33$, η ταχύτητα του φωτός γίνεται $0.75c$), η ταχύτητα των e^- διατηρείται ίδια.

Καθώς τα γρήγορα e^- περνούν από το μέσο (θεωρείται διηλεκτρικό υλικό), το πολώνουν, δηλ. κάνουν τα μόρια να ευθυγραμμίζονται με προτιμητέο τρόπο. Καθώς τα μόρια επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, εκπέμπουν φως. **Ακτινοβολία Cherenkov**.

{βλ. παράδειγμα από πυρηνικό αντιδραστήρα}



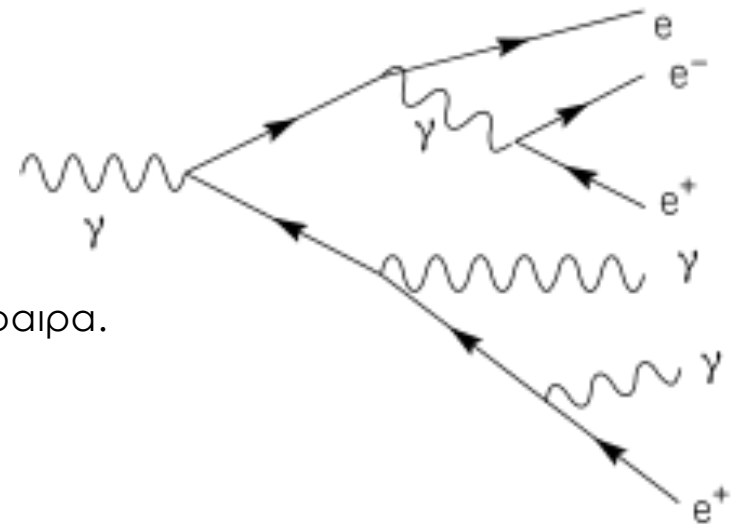
Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Το ίδιο ισχύει και για την ατμόσφαιρα και ακτινοβολία γ ή κοσμικές ακτίνες. Για τον αέρα $n=1.000283$, άρα για $0.9997c$.

Μάλιστα, γίνεται ένα shower ή cascade (χιονοστοιβάδα) από σωματρία, που αλληπάλληλα προκαλούν το ίδιο φαινόμενο, αλλά με λίγο χαμηλότερη E κάθε φορά.

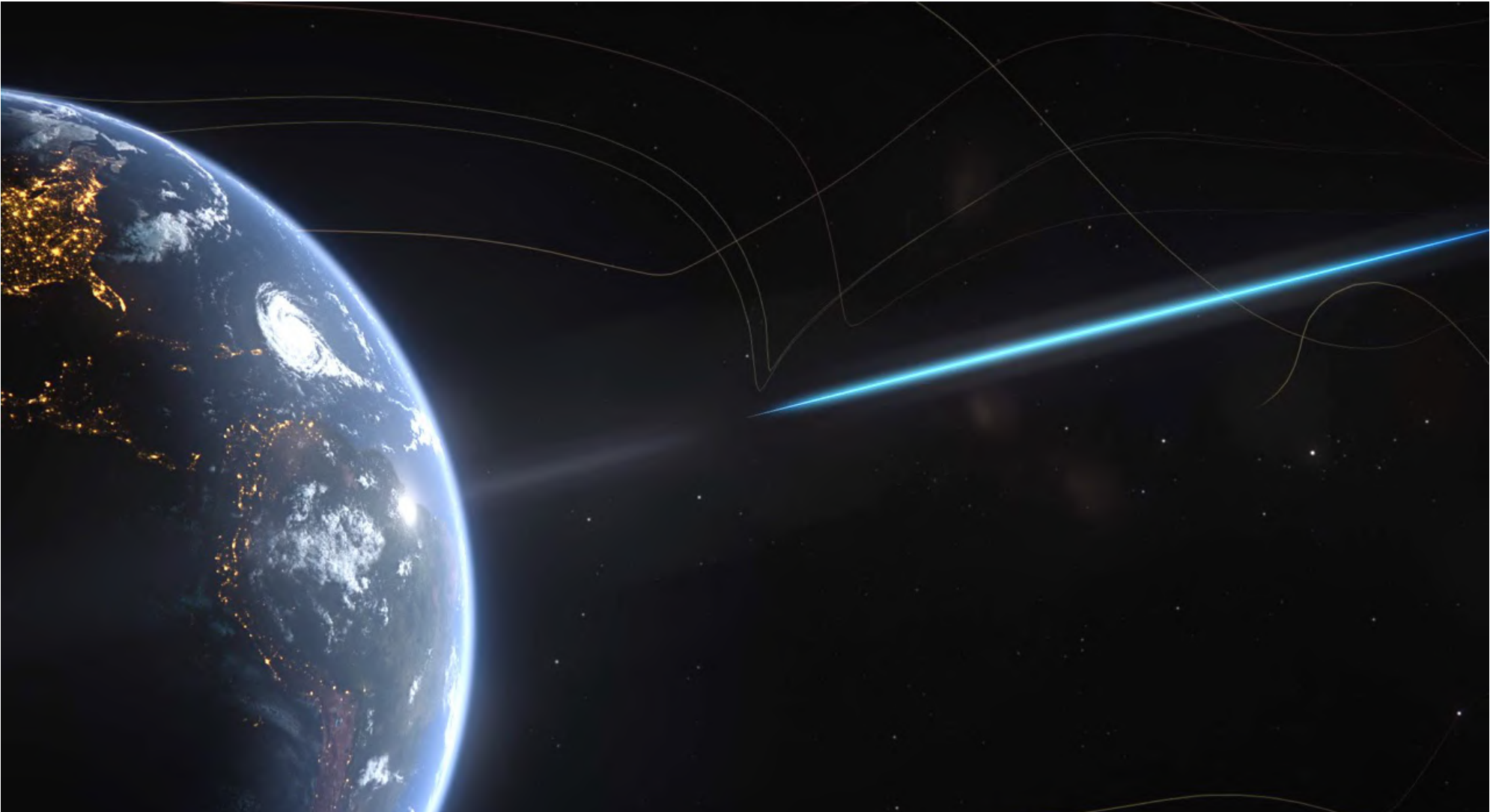
Η χιονοστοιβάδα ξεκινά με παραγωγή ζεύγους (e^- και e^+) από ακτίνα γ . Αυτά ακτινοβολούν νέες ακτίνες γ λόγω **bremsstrahlung** καθώς επιβραδύνονται, που θα δώσουν νέα παραγωγή ζεύγους. Τα 2 φαινόμενα εναλλάσσονται, έως ότου να μην αρκεί η ενέργεια για παραγωγή ζεύγους.

Η $\gamma \rightarrow e^- e^+$ απαιτεί την παρουσία γειτονικού πυρήνα για να διατηρηθούν $E+p$. Η ενεργός διατομή της παραγωγής εξαρτάται από το Z^2 , για αυτό είναι αποδοτική στην ατμόσφαιρα.



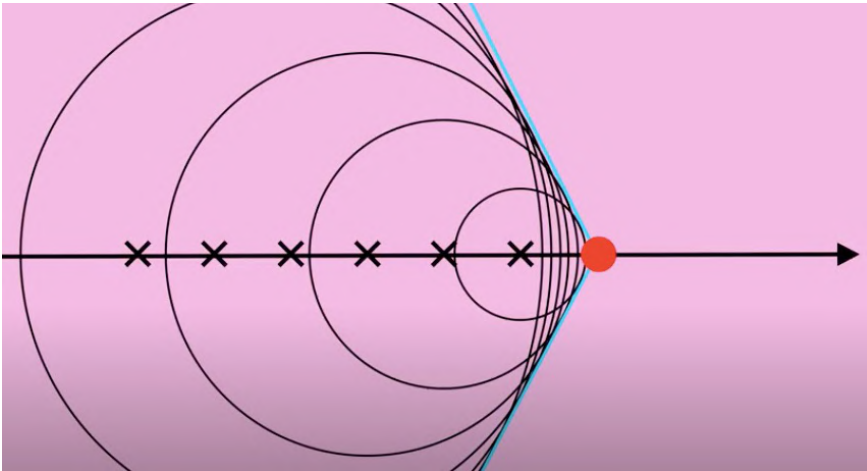
Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Βάσει των παραπάνω, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε **την ατμόσφαιρα σαν ανιχνευτική** διάταξη ακτινοβολίας Cherenkov, που θα παραχθεί από «χιονοστοιβάδα» ενεργητικών e^-



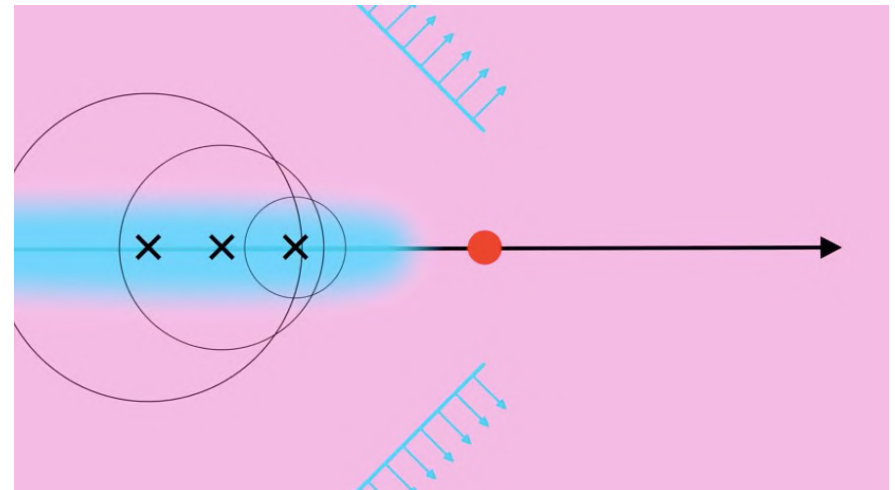
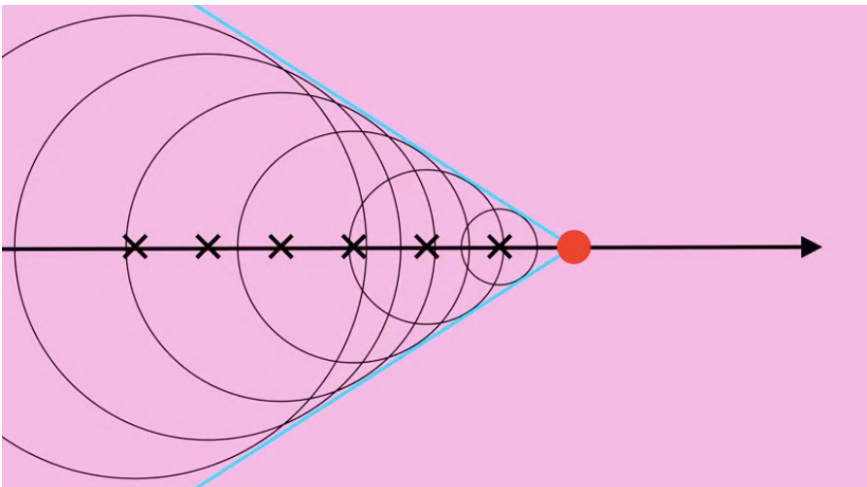
Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Η διαδικασία παράγει ένα κώνο φωτός, καθώς τα κυκλικά κυματικά μέτωπα του φωτός τέμνονται, εφόσον το σωματίο στο οποίο οφείλεται η παραγωγή τους έχει $u > c/n$. Αντίστοιχο του ηχητικού shock front / sonic boom ενός αεροπλάνου, αλλά φως.



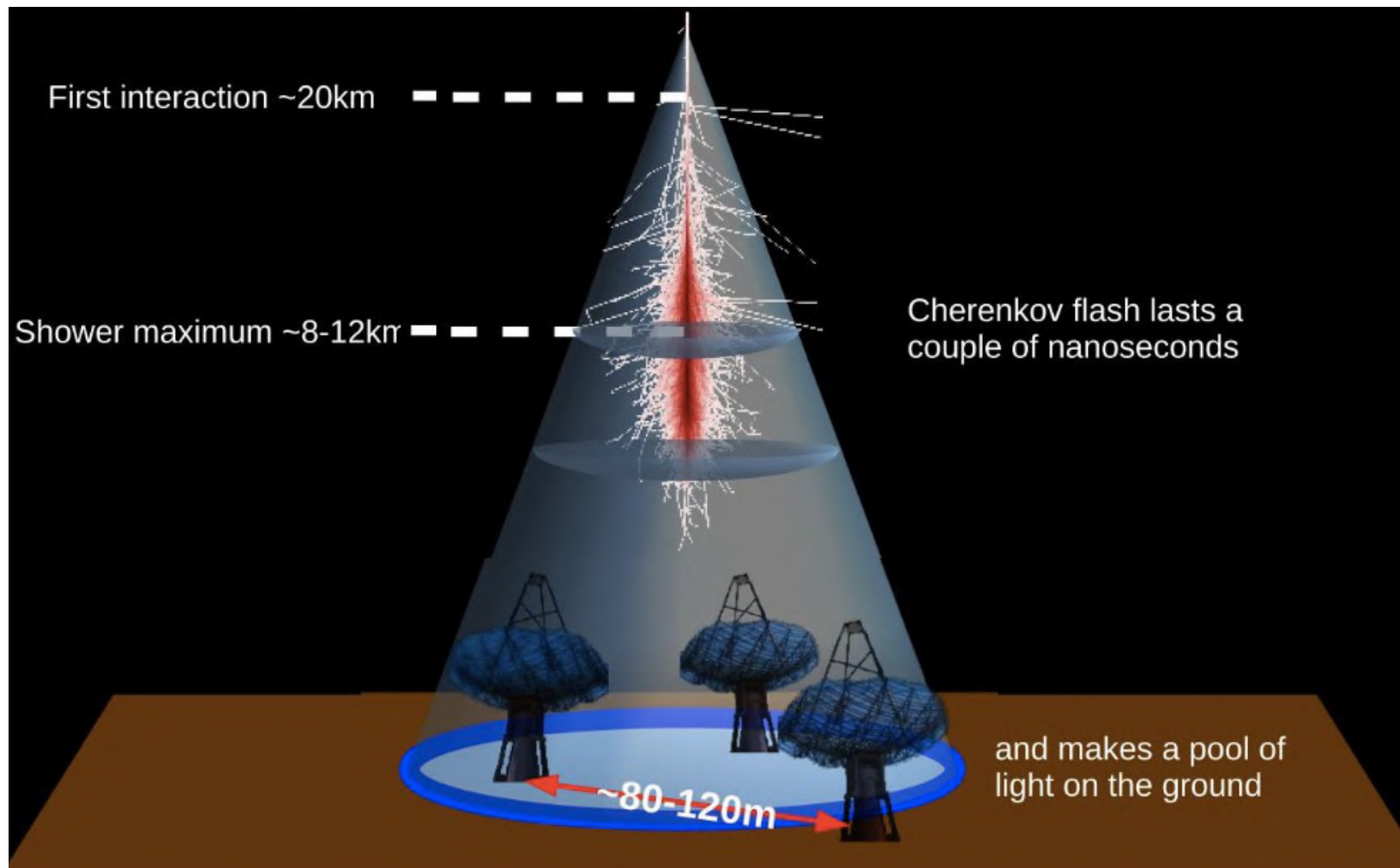
Όσο πιο κοντά στο c η ταχύτητα τόσο πιο «ανοικτός» ο κώνος που ανιχνεύεται κι ανάστροφα.

Σε 3-d χώρο, αυτό που ανιχνεύεται στο τέλος είναι ένα δακτυλίδι φωτός.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Βάσει του υψομέτρου στο οποίο περιμένουμε να αρχίσει η χιονοστοιβάδα, καθορίζουμε και την απόσταση στην οποία έχει νόημα να βάλουμε τις κεραιές μας.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Cherenkov Telescope array – τηλεσκόπια σε Χιλή και σε Κανάρια νησιά.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Άσκηση: Ποιο είναι το κατώφλι ενέργειας για να έχουμε ακτινοβολία Cherenkov από μιονίο (μαζα ηρεμίας $m_0 = 106 \text{ MeV}/c^2$) που περνάει την ατμόσφαιρα, με δείκτη διάθλασης $n \sim 1.0003$

$$E = \gamma m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

και για να υπάρξει ακτινοβολία Cherenkov
 $v \geq \frac{c}{n}$, $n = \text{refractive index}$

$$\text{άρα, για το όριο } E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{\frac{n^2 - 1}{n^2}}} = \sqrt{\frac{n^2}{n^2 - 1}} m_0 c^2$$

$$\text{και } E_{\text{kin}} = E - m_0 c^2 = \left(\sqrt{\frac{n^2}{n^2 - 1}} - 1 \right) m_0 c^2$$

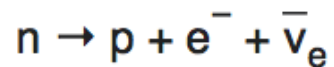
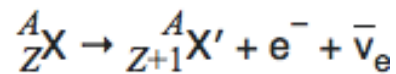
$$\text{για μιονίο στον αέρα: } E_{\text{kin}} = \left(\sqrt{\frac{1.0003^2}{1.0003^2 - 1}} - 1 \right) \cdot 106 \cdot 10^6 \frac{\text{eV}}{c^2} \cdot c^2 \approx 40 \cdot 100 \cdot 10^6 \approx 40 \text{ GeV}$$

2) Νετρίνο

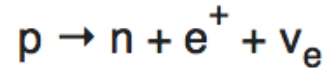
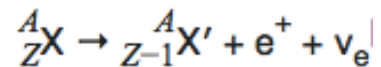
- Στοιχειώδες σωματίο με $spin=1/2$, άρα φερμιόνιο κι ακολουθεί την αρχή του Pauli.

Μάλιστα το εισήγαγε ο Pauli το 1932 για να διατηρήσει E, ορμή στην β decay.

Σε πειράματα μέτρησης της E σε β decay, η κατανομή των e^- ήταν περιορισμένη σε E, καθώς το έξτρα σωματίο έπαιρνε μέρος της ενέργειας.



β^- decay (electron emission)



β^+ decay (positron emission)

- Ηλεκτρικά ουδέτερο (όπως δείχνει το όνομά του – neutral)

Στη β -decay ένα μεγάλης μάζας ουδέτερο δίνει ένα μικρότερο ουδέτερο

- Μάζα ηρεμίας: λιγότερο από ένα εκατομμύριο του e^- (μικρό -ino)

Από β -decay: Κρίνουμε από την ενεργειακή κατανομή των e^- (αγνοώντας τη μικρή recoil του θυγατρικού πυρήνα, και θεωρώντας ότι το ηλεκτρόνιο και το νετρίνο μοιράζονται την E.)

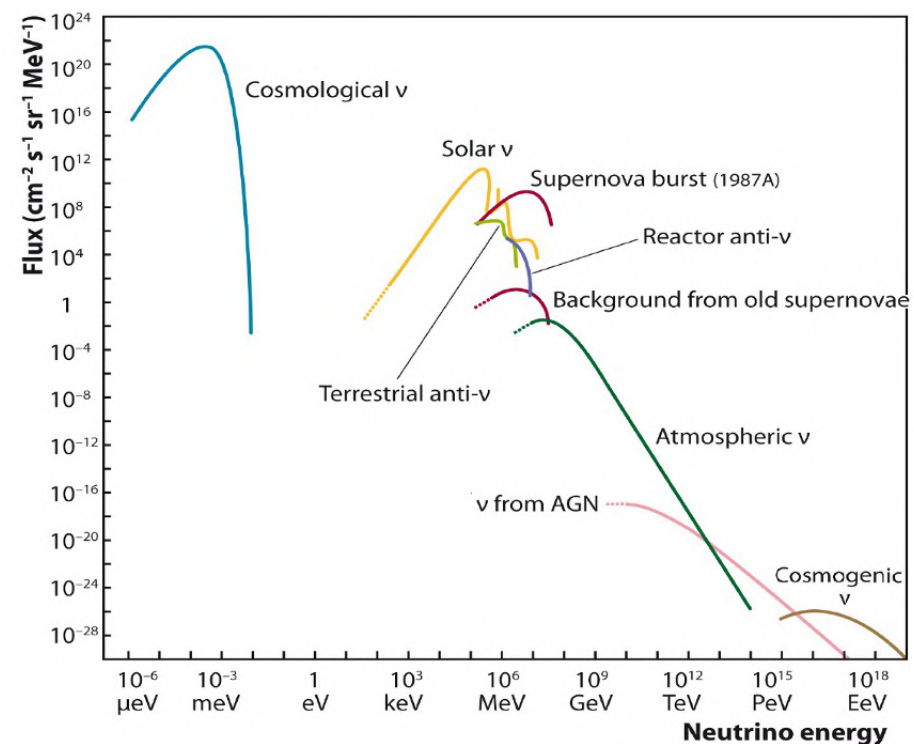
- Αλληλεπιδρά ΜΟΝΟ μέσω της βαρύτητας και της ασθενούς πυρηνικής δύναμης

Δύσκολο στην ανίχνευση

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

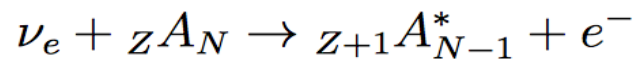
- Τα νετρίνα παράγονται στον Ήλιο, supernovae (SN 1987A) ή κοσμολογικά
δηλ. ή περιπτώσεις όπου γρήγορα ηλεκτρόνια (cosmic rays) χτυπάνε άτομα (σε SN, AGN),
ή πυρηνικές αντιδράσεις – συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής νετρίνων στο Πρώιμο Σύμπαν
που μάλιστα συμβαίνει πολύ νωρίτερα από τελευταία επιφάνεια σκέδασης H/M ακτινοβολίας
(1 min vs. 400.000yrs), άρα αν τη βλέπαμε θα είχαμε πληροφορία σε ακόμα πρωτότερους χρόνους.
- → **diffuse neutrino background** (θεωρητική προσδοκία)
Από κοσμολογία: ο ρυθμός που γίνεται η ασθενής αλληλεπίδραση πρέπει να είναι μεγαλύτερος
από την παράμετρο Hubble (ανάστροφο ηλικίας Σύμπαντος) και να είναι τέτοιος που να συμφωνεί
με το background.

Εξαρτάται από την ενεργό διατομή
της ασθενούς αλληλεπίδρασης,
η οποία εξαρτάται από τη μάζα.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Η ανίχνευση των νετρίνο, για αστροφυσικές πηγές γίνεται κυρίως μέσω ανιχνευτών ακτινοβολίας Cherenkov. Ένα νετρίνο ηλεκτρονίου αντιδρώντας με ένα πυρήνα δίνει νέο πυρήνα με επιπλέον πρωτόνιο (και λιγότερο νετρόνιο) κι ενεργητικό e^- , π.χ.,



Το ηλεκτρόνιο ξεκινάει χιονοστοιβάδα που δίνει ακτινοβολία Cherenkov (εφόσον είναι γρηγορότερο του φωτός στο μέσο)

$e^- \rightarrow$ Bremsstrahlung $\rightarrow$ ακτίνες $\gamma \rightarrow e^- e^+$ pair production $\rightarrow$ Bremsstrahlung $\rightarrow$ ακτίνες γ

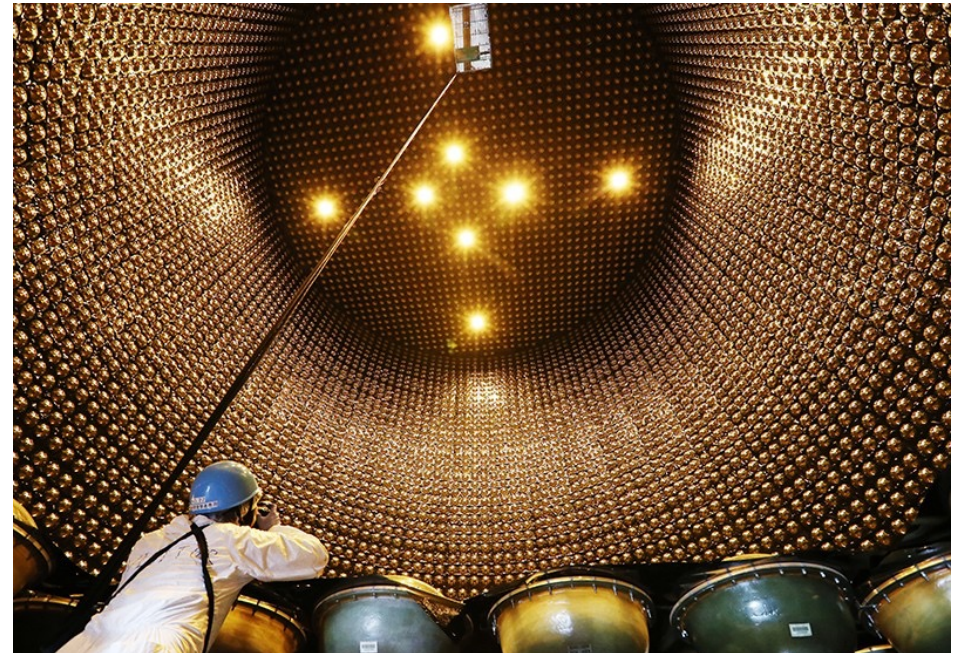
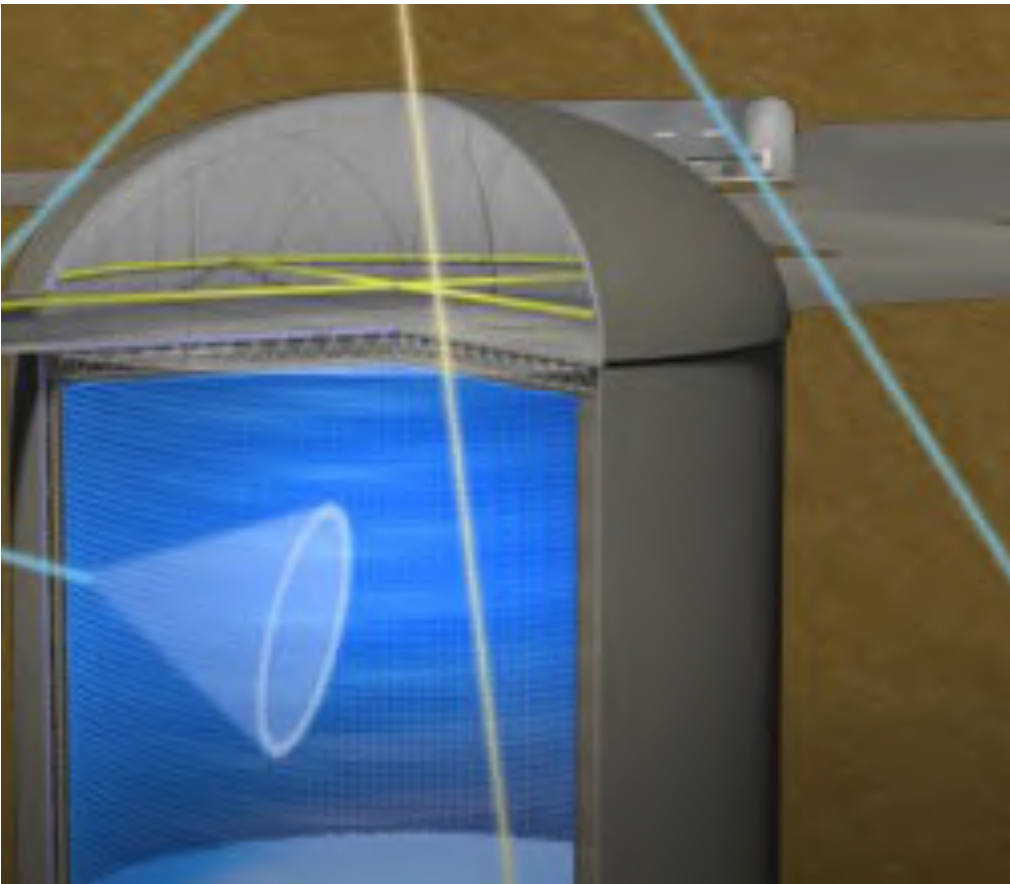
Οι ανιχνευτές σωματιδίων περιτριγυρίζονται από δεξαμενή νερού, η οποία συνήθως είναι υπόγεια ή μέσα σε ένα βουνό για να αποφεύγεται συνεισφορά από, π.χ., ζεύγη που παράχθηκαν από ακτίνες γ στην ατμόσφαιρα της Γης.

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Ο KamiokaNDE ανιχνευτής πέτυχε την πρώτη ανίχνευση νετρίνων από το SN1987A:

- δεξαμενή 16.0 m x 15.6 m χωρητικότητας 3,000 τόνων νερού και ~1,000 φωτοπολλαπλασιαστές στην εσωτερική του επιφάνεια για ενίσχυση σήματος.
- εμφάνιση 11 νετρίνων + αντineτρίνων καταγράφηκε σε μία περίοδο 13 sec, επιβεβαίωση 8 εξ'αυτών από άλλο ανιχνευτή στο Ohio σε λίγα δευτερολεπτα.

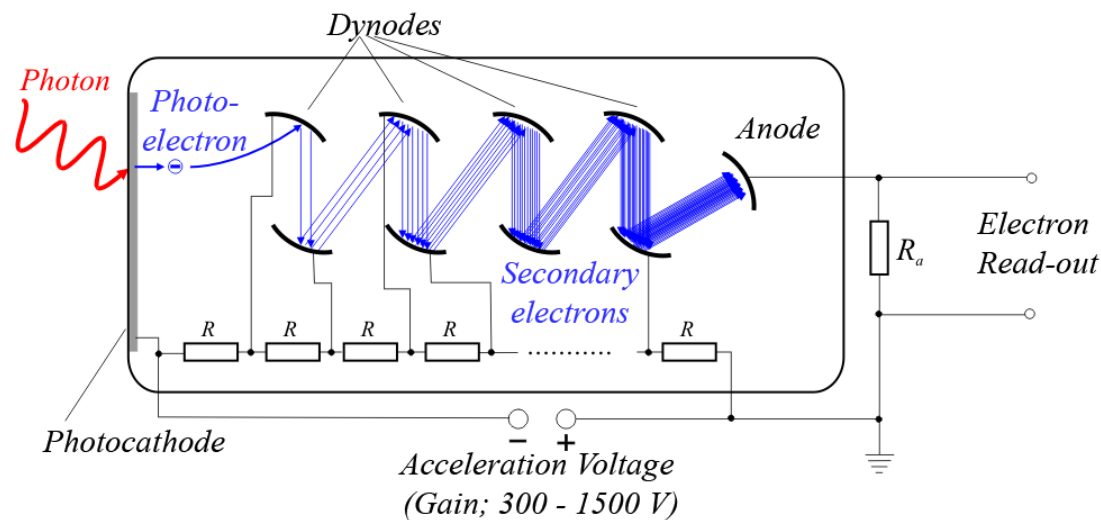
SuperKamiokaNDE: τρέχουσα version, με βελτιώσεις που μπορούν να δουν νετρίνα από SN, Ήλιο, και αντιδραστήρες.
{θυμηθείτε ότι για τα νετρίνα, η Γη είναι διαφανής}



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Ο KamiokaNDE ανιχνευτής πέτυχε την πρώτη ανίχνευση νετρίνων από το SN1987A:

- δεξαμενή 16.0 m x 15.6 m χωρητικότητας 3,000 τόνων νερού και ~1,000 φωτοπολλαπλασιαστές στην εσωτερική του επιφάνεια για ενίσχυση σήματος.
- εμφάνιση 11 νετρίνων + αντineτρίνων καταγράφηκε σε μία περίοδο 13 sec, επιβεβαίωση 8 εξ'αυτών από άλλο ανιχνευτή στο Ohio σε λίγα δευτερολεπτα.



Φωτοπολλαπλασιαστής: φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στην είσοδο (συνήθως μετά από σπινθηριστή) και μετά το κάθε e παράγει άλλα καθώς επιταχύνεται από τη διαφορά τάσης.

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Μεγάλο πείραμα στο οποίο συμμετέχει και η Ελλάδα: KM3NeT, Ελληνικό site: NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research Project) στη Πύλο, στο βυθό σε βάθος 5 km. Το νερό προσφέρει προστασία κι από κοσμικές ακτίνες.

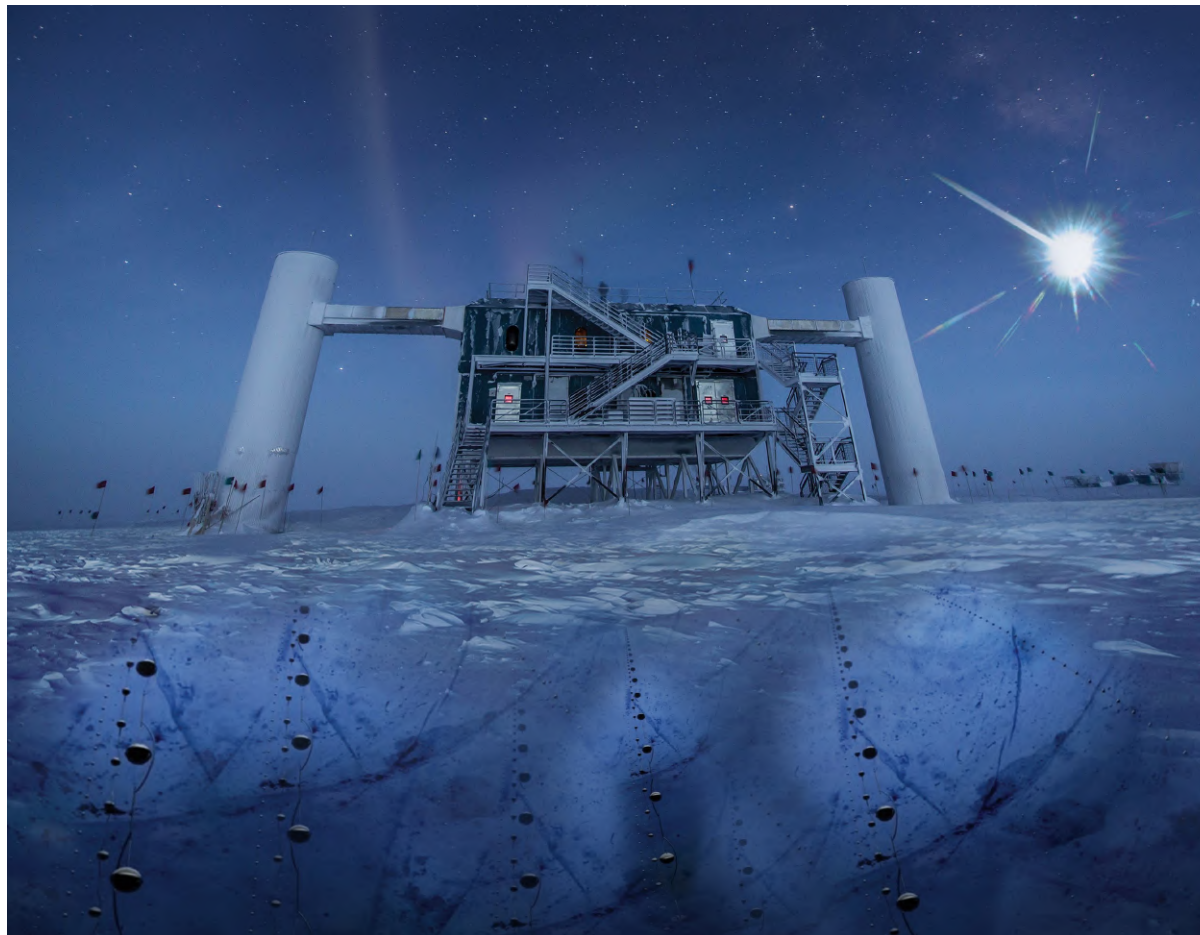
Δομές πολλαπλών εξαγωνικών ορόφων με φωτοπολλαπλασιαστές που στέλνουν το σήμα με οπτικά νήματα στην επιφάνεια..

Συνδυαστικά με τα site σε Ιταλία, Ως στόχος αναφέρθηκαν ακόμα και τα πρώτα νετρίνα από την αρχή της δημιουργίας του Σύμπαντος, καθώς δεν αλληλεπιδρούν εύκολα με την ύλη, οπότε είναι ακόμα ανιχνευσιμα.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

IceCube, Νότιος Πόλος, με ανιχνευτές σκορπισμένους σε 1 κυβικό χιλιόμετρο για να μεγαλώσουν την διατομή ανά line-of-sight. 60 modules σε βάθη 1450 - 2450 μετρων σε τρύπες που έφτιαξαν στον πάγο με ζεστο υδροδράπανο. Το IceCube ψάχνει για νετρίνο σε [TeV](#) range για αστροφυσικές πηγές υψηλότερης E. Το 2013 ανακοίνωσε 28 ανιχνεύσεις, που με τέτοιες ενέργειες είναι πηγές εκτός γαλαξιακού συστήματος.

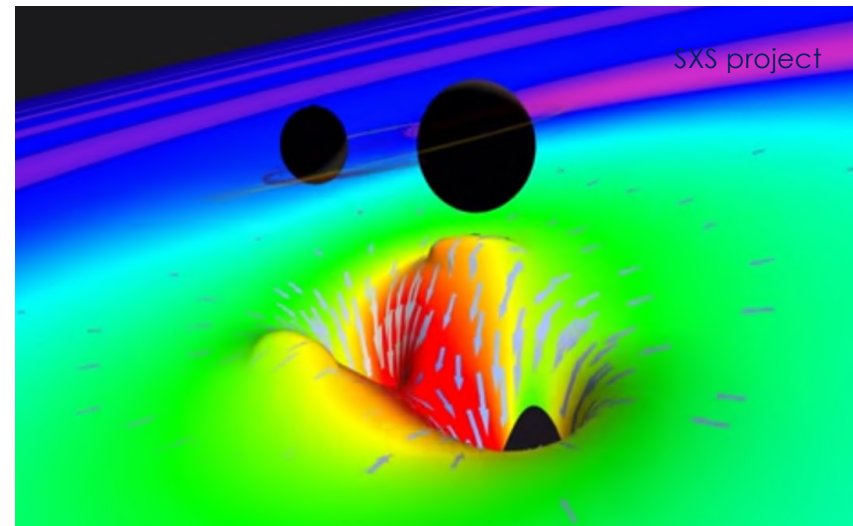


Βαρυτικά κύματα

Ως τώρα, ακόμα και για σωματίδια, έχουμε δει, στην πραγματικότητα, ανίχνευση του φωτός (δηλ. έμμεση ανίχνευση σωματίων) μέσω φθορισμού ή Cherenkov.

Τα βαρυτικά κύματα ανιχνεύονται κατευθείαν από τις διαταραχές που προκαλούν στην καμπυλότητα του χωρόχρονου.

Υπενθύμιση: Ο νόμος του Νεύτωνα περιγράφει το αποτέλεσμα της βαρύτητας - δεν το εξηγεί. Η θεώρηση του Einstein ήταν ότι η βαρύτητα προέρχεται από παραμόρφωση του χωρόχρονου: οποιοδήποτε **επιταχυνόμενο** σώμα εκπέμπει **βαρυτικά κύματα** (όπως ακριβώς οποιοδήποτε επιταχυνόμενο/επιβραδυνόμενο εσωμάτιο κπέμπει H/M ακτινοβολία). Τα βαρυτικά κύματα καμπυλώνουν το χωρόχρονο.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

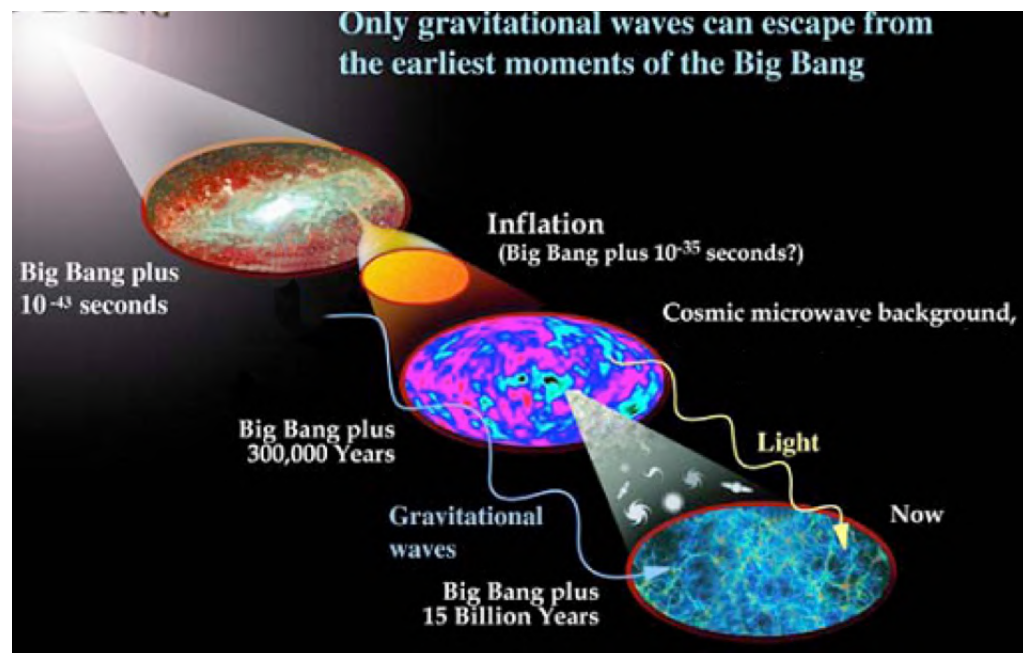
Δεδομένες πηγές βαρυτικών κυμάτων:

- Διπλά συστήματα συμπαγών πηγών (αστέρες νετρονίων ή πηγές τρύπες)

Πιθανές πηγές βαρυτικών κυμάτων:

- **Υπερκαινοφανείς** (+Εκλάμψεις ακτίνων γ) ειδικά για μη ισοτροπική εκτίναξη ύλης
- Pulsars (πάλι για μη ομογενή κατανομή μάζας $\rightarrow$ περιοδικότητα στα βαρυτικά κύματα)
- Το **Σύμπαν**, στις αρχές του, πέρασε μια φάση γρήγορης επέκτασης στα $10^{-36} - 10^{-34}$ sec, οπότε και η ακτίνα του μεγάλωσε κατά έναν παράγοντα 10^{43} λόγω της ενέργειας που απελευθερώθηκε κατά από το διαχωρισμό δυνάμεων (ισχυρή πυρηνική) - **πληθωρισμός**
 $\rightarrow$ θα πρέπει να υπάρχει **κοσμικό υπόβαθρο βαρυτικών κυμάτων!**

Μάλιστα, επειδή επειδή αυτό έγινε πριν την τελευταία επιφάνεια σκέδασης φωτονίων με την ύλη, τα βαρυτικά κύματα θα παρέχουν τρόπο να έχουμε πληροφορία για το τόσο πρώιμο Σύμπαν. όμως, κατά πάσα πιθανότητα, δεν θα είναι ανιχνεύσιμο κατά τις επόμενες αποστολές.



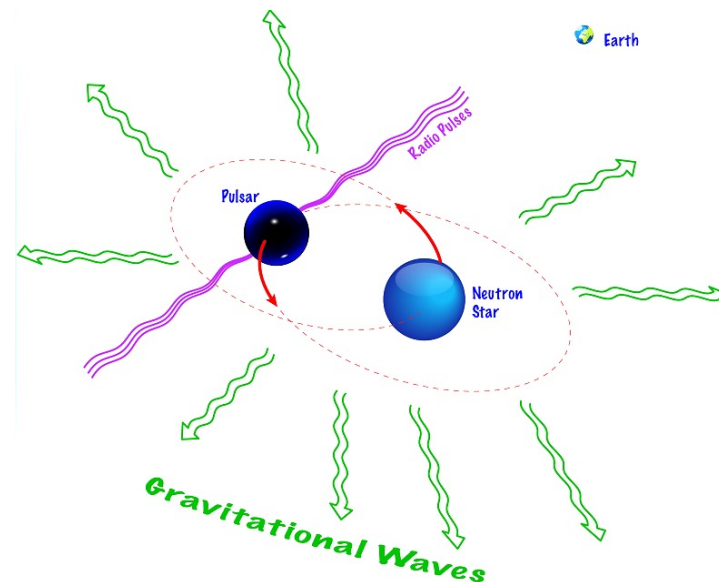
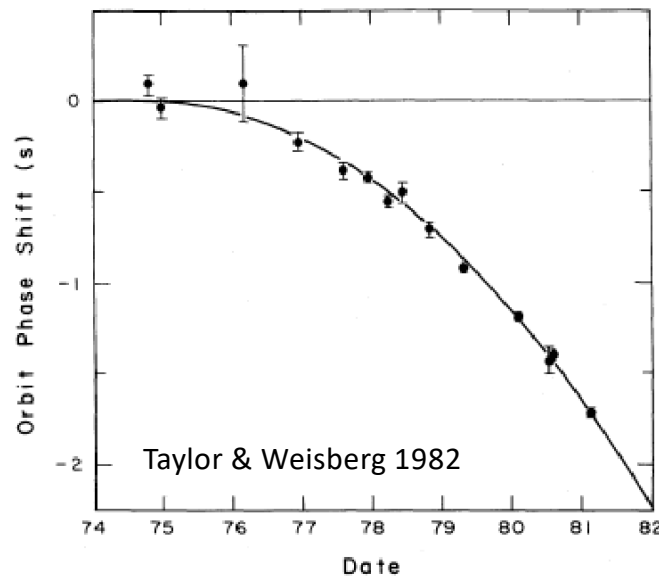
Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Ανιχνεύσεις ως τώρα:

- Έμμεση: pulsar PRS1913 +16, που είναι σε διπλό σύστημα (pulsar+companion):

Hulse & Taylor με δεδομένα από το Arecibo, ανίχνευσαν τον πάλσαρ με περίοδο 59millisec, άρα 17 περιστροφές γύρω από τον άξονά του / sec. Παρατήρησαν όμως ότι υπήρχε μικρή **συστηματική απόκλιση** ανά ~8 ώρες → κάποιες φορές ο παλμός έρχονταν 3 δεύτερα Νωρίτερα κάποιες φορές αργότερα → **διπλό σύστημα** με διάμετρο 3 δευτερόλεπτα φωτός.

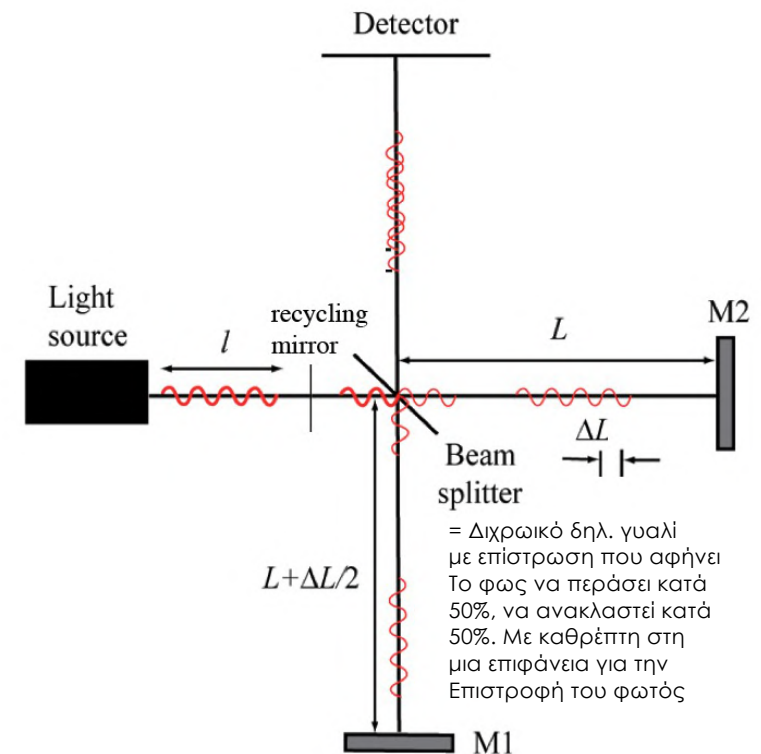
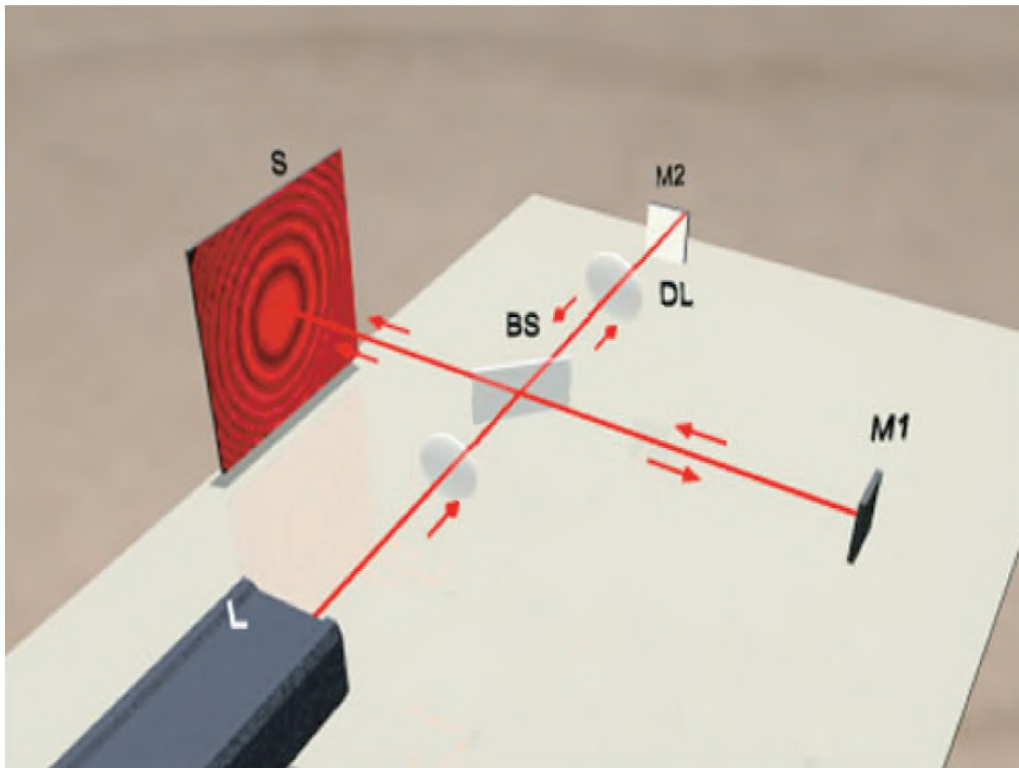
Αργότερα βρέθηκε ότι **η συχνότητα των παλμών μειώνεται λόγω εκπομπής βαρυτικών κυμάτων** (κατά 77 $\mu\text{sec} / \text{yr}$ και 3.5 meters/yr).



Ανιχνεύσεις ως τώρα: Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory

- Άμεση: Διαταραχή στο χώρο που διανύει το φως laser στο συμβολόμετρο τύπου Michelson του πειράματος LIGO. Το φως χωρίζεται σε 2 δέσμες οι οποίες διανύουν διαφορετικά μήκη. Αν οι τελικές διαδρομές έως το πέτασμα είναι ακέραια πολλαπλάσια $\rightarrow$ ενισχυτική συμβολή

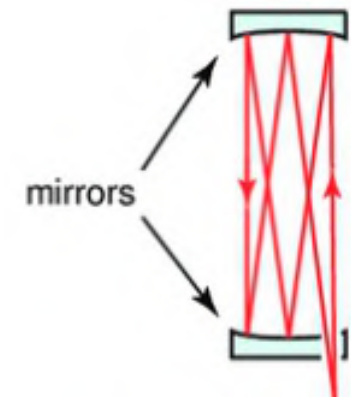
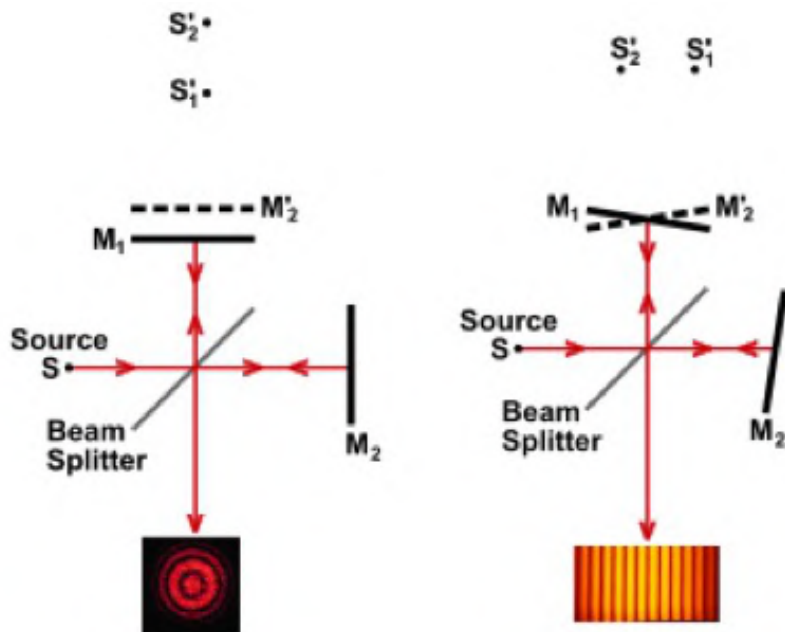
Μεταφέρουμε τον καθρέπτη M1 ή M2 έως ότου συμβάλλουν. Για απλότητα, μπορούμε να βάλουμε και να μεταφέρουμε τον καθρέπτη delay line.



Ανιχνεύσεις ως τώρα: Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory

- Άμεση: Διαταραχή στο χώρο που διανύει το φως laser στο συμβολόμετρο τύπου Michelson του πειράματος LIGO. Το φως χωρίζεται σε 2 δέσμες οι οποίες διανύουν διαφορετικά μήκη. Αν οι τελικές διαδρομές έως το πέτασμα είναι ακέραια πολλαπλάσια $\rightarrow$ ενισχυτική συμβολή

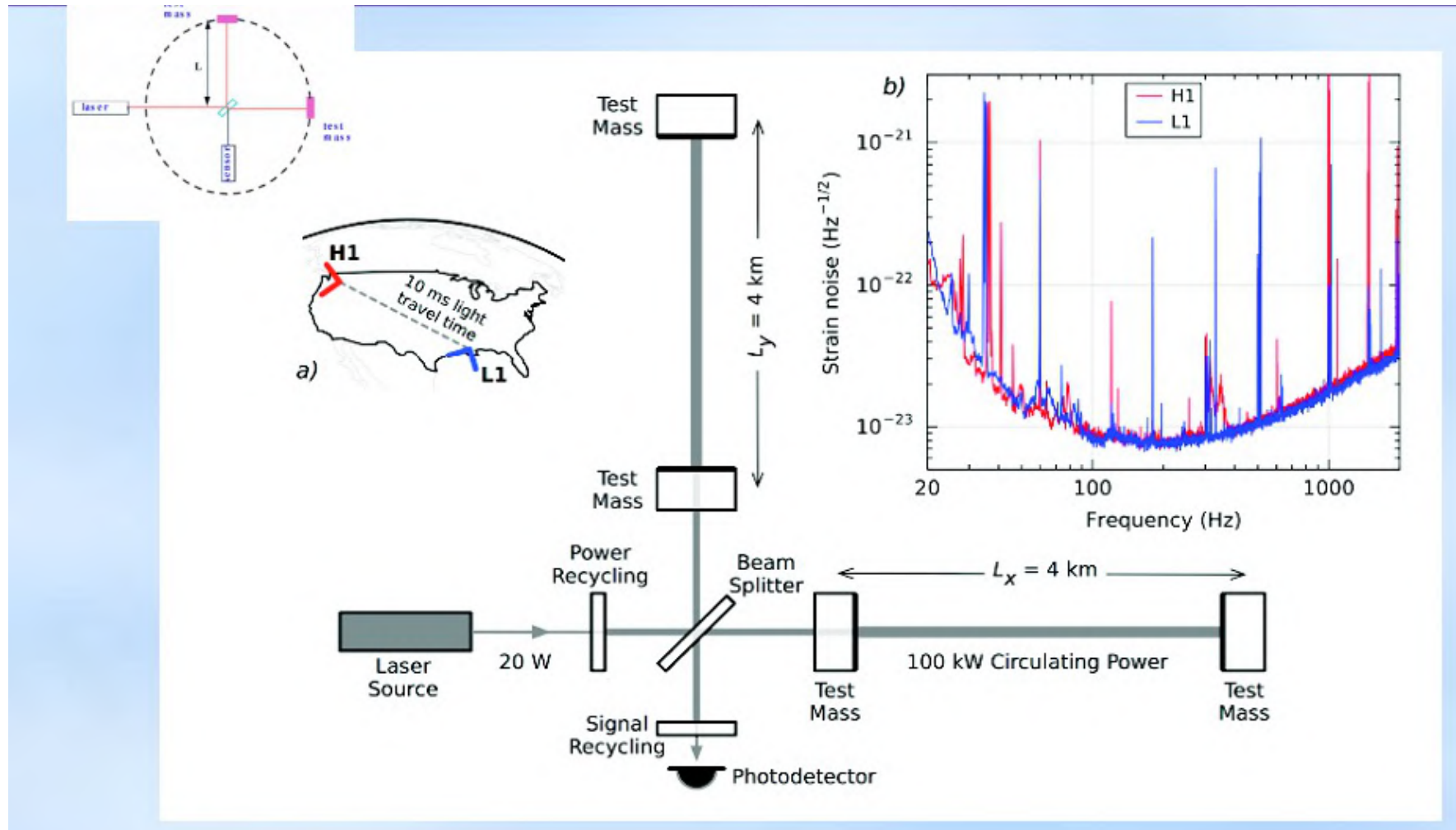
Μεταφέρουμε τον καθρέπτη M_1 ή M_2 έως ότου συμβάλλουν. Για απλότητα, μπορούμε να βάλουμε και να μεταφέρουμε καθρέπτη delay line. Τα διατηρούμε σε αυτή τη θέση ώστε στο πέτασμα να φαίνονται οι κροσσοί συμβολής.



Όταν περάσει βαρυτικό κύμα, το οποίο οδηγεί σε ταλαντώσεις το χώρο, οι αποστάσεις στις 2 κάθετες δέσμες θα αλλάξουν όπως πιθανώς και η γωνία πρόσπτωσης στον εκάστοτε καθρέπτη.

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Ανιχνεύσεις ως τώρα: Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory

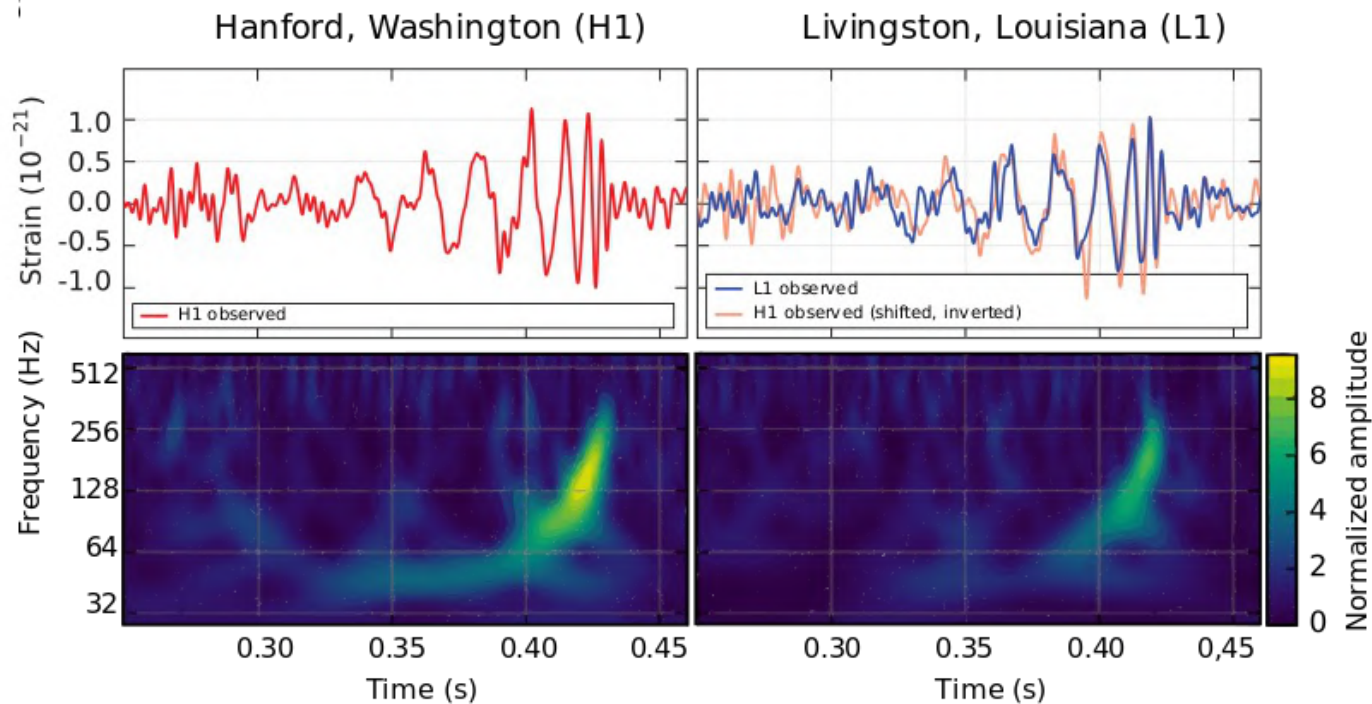


Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Αποτελέσματα.

- 1) Ως τώρα έχουν βρεθεί **δεκάδες** συγκρούσεις διπλών συστημάτων συμπαγών αντικειμ.
- Binary black hole, binary neutron star...

Πρώτη ανίχνευση – σύγκρουση από μαύρες τρύπες (~ηλιακής κλίμακας) –Abbott+2016



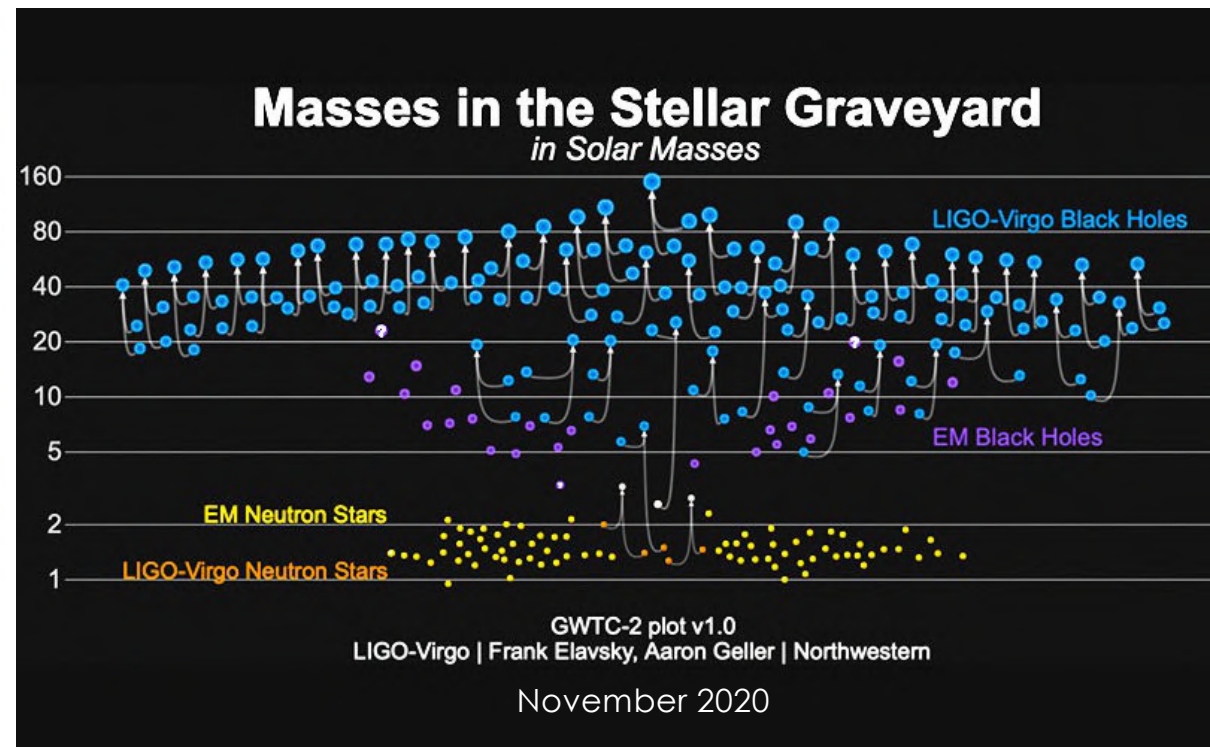
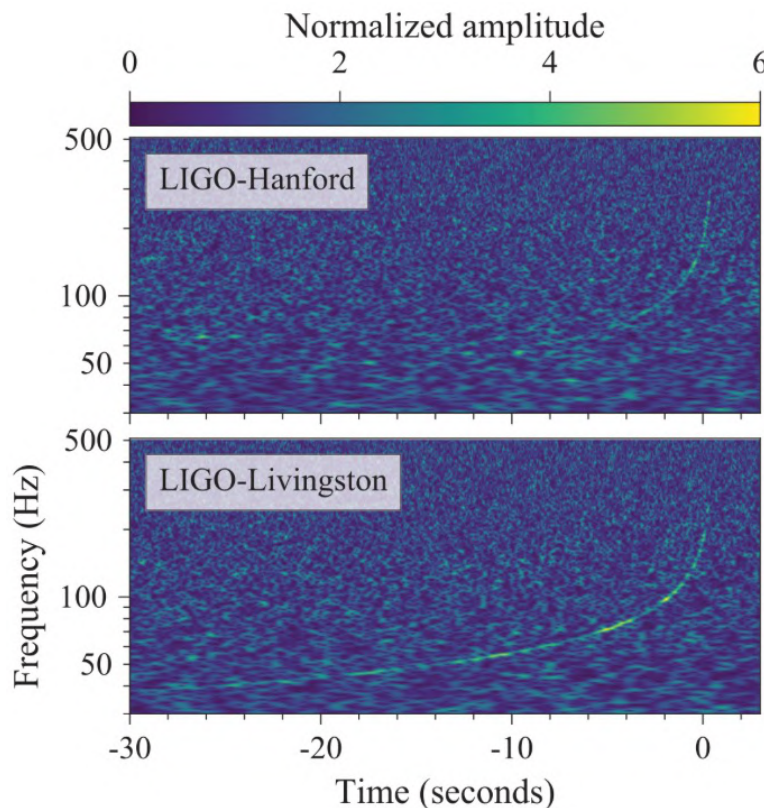
Strain: A passing gravitational wave effectively alters the arm lengths (of 4 km) such that the measured difference ΔL is $\delta L_x - \delta L_y = hL$, where h is the gravitational-wave strain amplitude projected onto the detector.

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Αποτελέσματα.

1) Ήδη μέχρι το 2020 είχαν βρεθεί **δεκάδες** συγκρούσεις διπλών συστημάτων συμπαγών αντικειμένων. Σε λίγα χρόνια, καταγράφηκαν οι μάζες ~για όσες μαύρες τρύπες έχουν ανιχνευτεί με όλους τους τρόπους (πειράματα ηχούς, κινηματική, ...) για H/M ακτινοβολία.

++ μάζες από αστέρες νετρονίων, όπως στο παρακάτω παράδειγμα.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Αποτελέσματα.

2) Ενέργεια που μεταφέρεται.
 - είναι πολύ μεγάλη, της τάξεως του 10% του ενός σώματος.
 {θυμηθείτε ότι επίσης 10% ακτινοβολείται}

GW event and time (UTC) ^[n 2]	Luminosity distance (Mpc) ^[n 4]	Energy radiated ($c^2 M_\odot$) ^[n 5]	Primary		Secondary	
			Type	Mass ($M_\odot$)	Type	Mass ($M_\odot$)
GW150914 09:50:45	430 ⁺¹⁵⁰ ₋₁₇₀	3.1 ^{+0.4} _{-0.4}	BH [n 9]	35.6 ^{+4.8} _{-3.0}	BH [n 10]	30.6 ^{+3.0} _{-4.4}
GW151012 [fr] 09:54:43	1060 ⁺⁵⁴⁰ ₋₄₈₀	1.5 ^{+0.5} _{-0.5}	BH	23.3 ^{+14.0} _{-5.5}	BH	13.6 ^{+4.1} _{-4.8}
GW151226 03:38:53	440 ⁺¹⁸⁰ ₋₁₉₀	1.0 ^{+0.1} _{-0.2}	BH	13.7 ^{+8.8} _{-3.2}	BH	7.7 ^{+2.2} _{-2.6}
GW170104 10:11:58	960 ⁺⁴³⁰ ₋₄₁₀	2.2 ^{+0.5} _{-0.5}	BH	31.0 ^{+7.2} _{-5.6}	BH	20.1 ^{+4.9} _{-4.5}
GW170608 02:01:16	320 ⁺¹²⁰ ₋₁₁₀	0.9 ^{+0.0} _{-0.1}	BH	10.9 ^{+5.3} _{-1.7}	BH	7.6 ^{+1.3} _{-2.1}
GW170729 18:56:29	2750 ⁺¹³⁵⁰ ₋₁₃₂₀	4.8 ^{+1.7} _{-1.7}	BH	50.6 ^{+16.6} _{-10.2}	BH	34.3 ^{+9.1} _{-10.1}
GW170809 08:28:21	990 ⁺³²⁰ ₋₃₈₀	2.7 ^{+0.6} _{-0.6}	BH	35.2 ^{+8.3} _{-6.0}	BH	23.8 ^{+5.2} _{-5.1}
GW170814 10:30:43	580 ⁺¹⁶⁰ ₋₂₁₀	2.7 ^{+0.4} _{-0.3}	BH	30.7 ^{+5.7} _{-3.0}	BH	25.3 ^{+2.9} _{-4.1}
GW170817 12:41:04	40 ± 10	≥ 0.04	NS	1.46 ^{+0.12} _{-0.10}	NS	1.27 ^{+0.09} _{-0.09}
GW170818 02:25:09	1020 ⁺⁴³⁰ ₋₃₆₀	2.7 ^{+0.5} _{-0.5}	BH	35.5 ^{+7.5} _{-4.7}	BH	26.8 ^{+4.3} _{-5.2}
GW170823 13:13:58	1850 ± 840	3.3 ^{+0.9} _{-0.8}	BH	39.6 ^{+10.0} _{-6.6}	BH	29.4 ^{+6.3} _{-7.1}

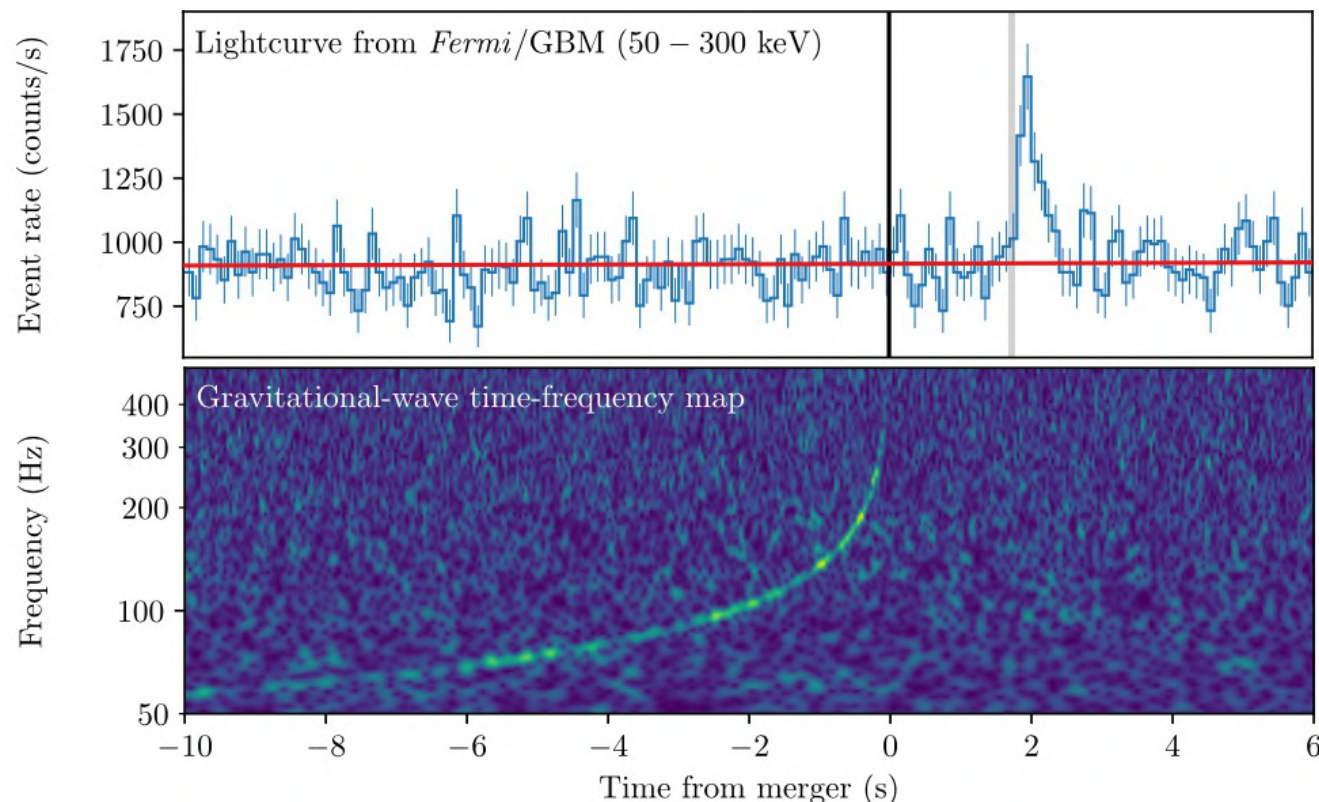
Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Αποτελέσματα:

3) Επιβεβαιώθηκε ότι τα βαρυτικά κύματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός
(από γ-ray burst στο γαλαξία NGC 4993 – απόσταση 100 Myrs)

“On 2017 August 17, the gravitational-wave event GW170817 was observed by the Advanced LIGO and Virgo detectors, and the gamma-ray burst (GRB) GRB 170817A was observed independently by the Fermi Gamma-ray Burst Monitor... The association of GW170817 and GRB 170817A provides new insight into fundamental physics and the origin of short GRBs. We use the observed time delay of $(+1.74 \pm 0.05)$ s between GRB170817A and GW170817 to constrain the difference between the speed of gravity and the speed of light to be between -3×10^{-15} and $+7 \times 10^{-16}$ times the speed of light.”

(<https://arxiv.org/pdf/1710.05834.pdf>)



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

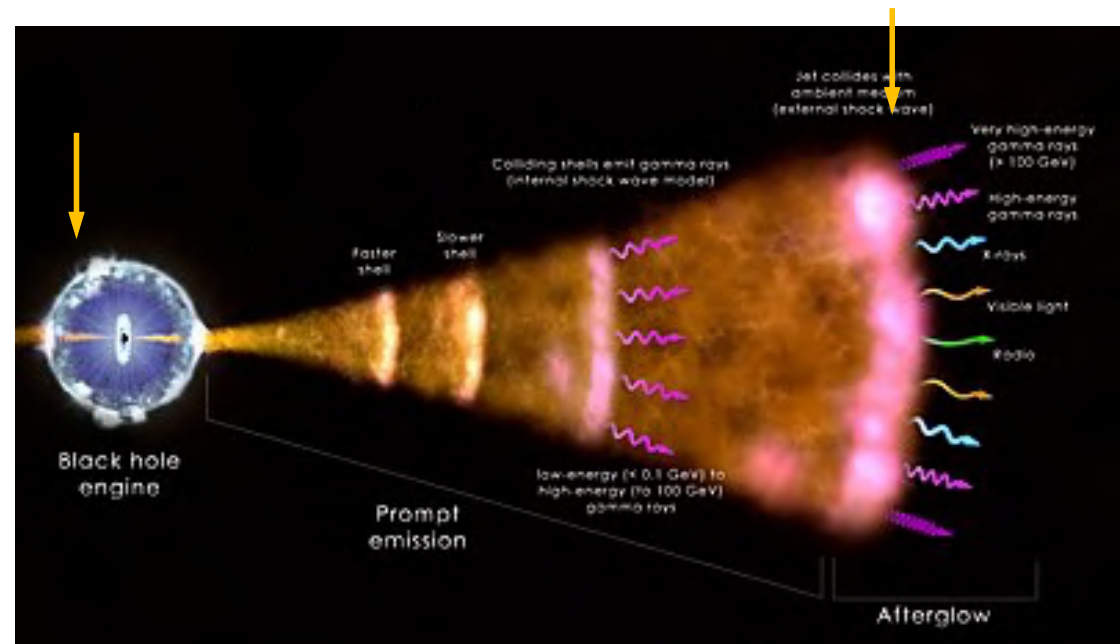
Αποτελέσματα:

3) Επιβεβαιώθηκε ότι τα βαρυτικά κύματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός (από γ-ray burst στο γαλαξία NGC 4993 – απόσταση 100 Myrs)

“On 2017 August 17, the gravitational-wave event GW170817 was observed by the Advanced LIGO and Virgo detectors, and the gamma-ray burst (GRB) GRB 170817A was observed independently by the Fermi Gamma-ray Burst Monitor... The association of GW170817 and GRB 170817A provides new insight into fundamental physics and the origin of short GRBs. We use the observed time delay of $(+1.74 \pm 0.05)$ s between GRB170817A and GW170817 to constrain the difference between the speed of gravity and the speed of light to be between -3×10^{-15} and $+7 \times 10^{-16}$ times the speed of light.”

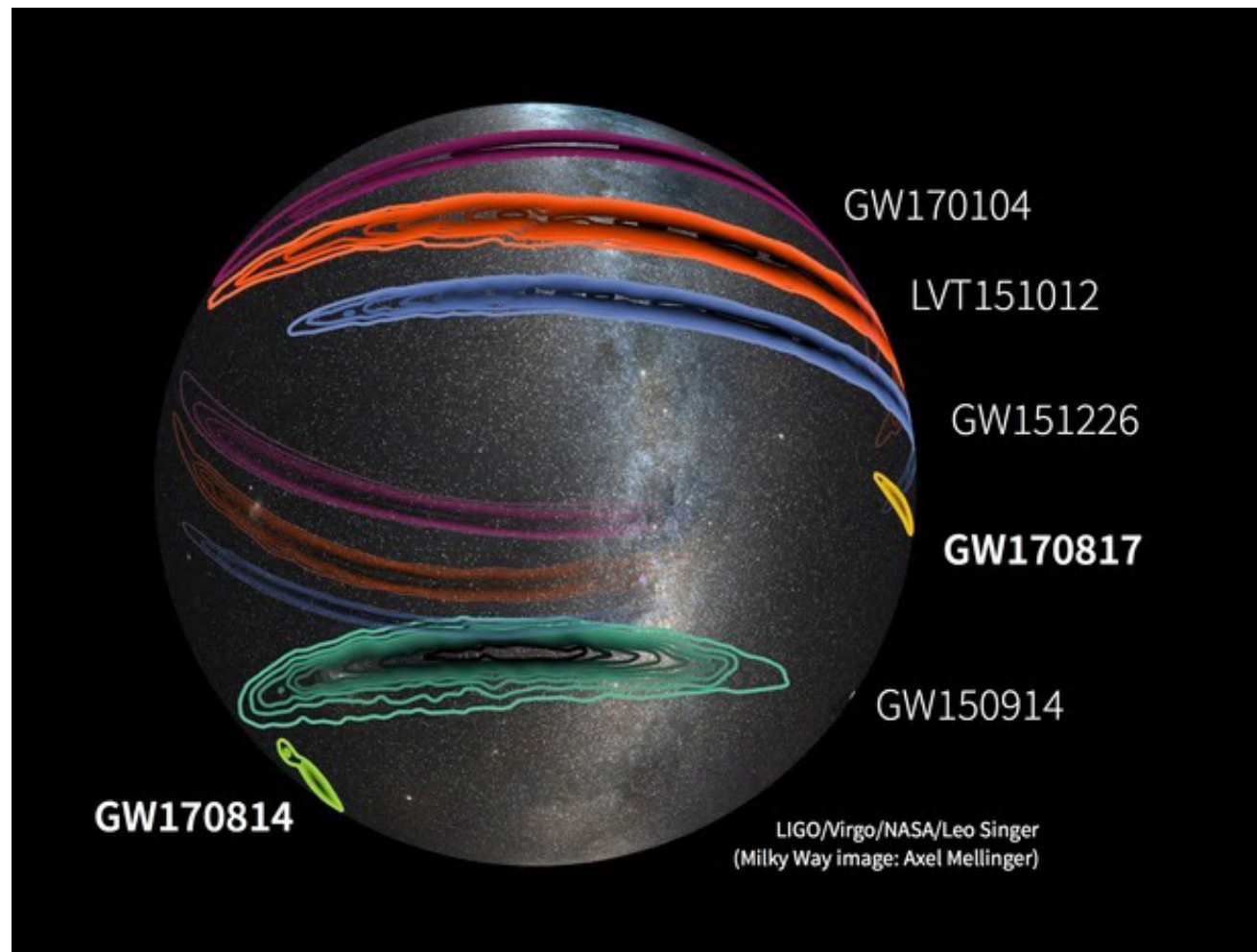
Το νούμερο είναι πιθανόν να βελτιωθεί ακόμα δεδομένου ότι ένα time delay σχετίζεται με το χρόνο που χρειάζεται να διανύσουν τα βαρυτικά κύματα μέχρι την περιοχή εκπομπής γ.

Κάποιες ακτίνες γ πιθανόν να προέρχονται από inverse Compton φωτονίων από πολύ ενεργητικά σωματάρια, στην περιοχή όπου τα ejecta διαδίδονται.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Βελτιώσεις - Χρήση και του Ευρωπαϊκού ανιχνευτή Virgo.
Πέραν της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων, η χρήση ενός ακόμα συμβολόμετρου laser είναι η βελτίωση στη θέση...

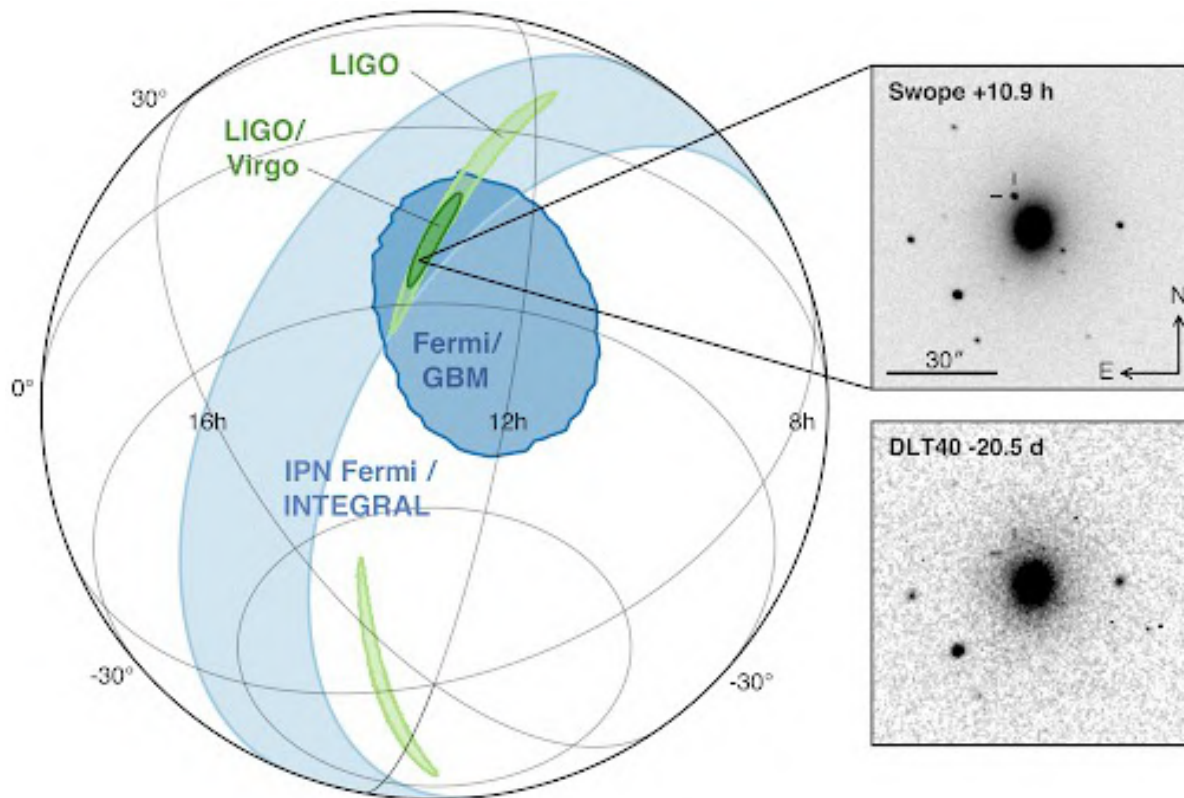


Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Βελτιώσεις - Χρήση και του Ευρωπαϊκού ανιχνευτή Virgo.

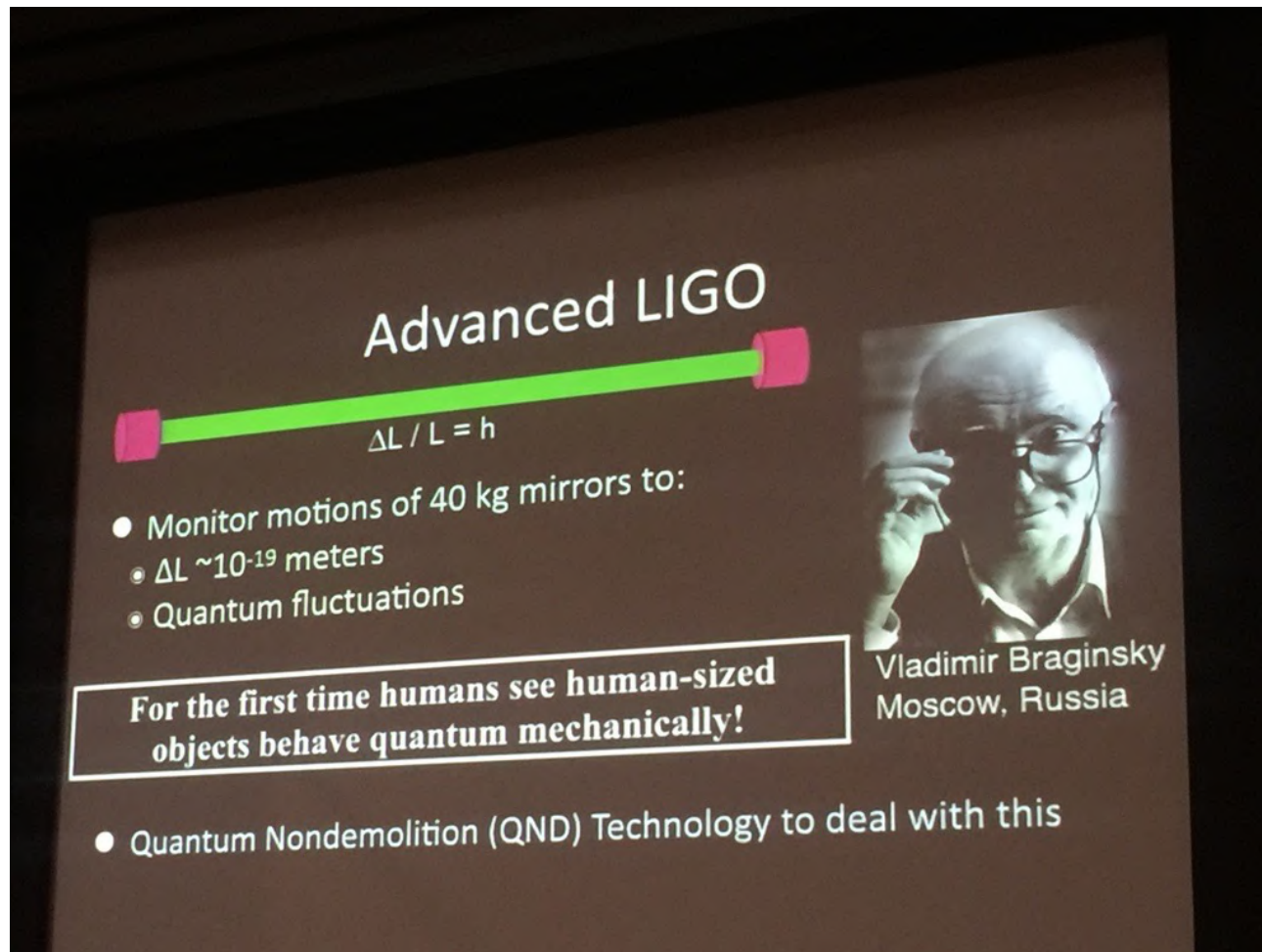
Πέραν της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων, η χρήση ενός ακόμα συμβολόμετρου laser είναι η βελτίωση **της beam, άρα της διακριτικής ικανότητας και της θέσης στον ουρανό.**

Θυμηθείτε τους κροσσούς συμβολής από 2 μόνο συμβολομετρικές μετρήσεις: είναι παράλληλες γραμμές. Άρα λοιπόν χρειαζόμαστε τουλάχιστον 3 για να μπορέσουμε να τοποθετήσουμε στον ουρανό. Η διαφορά φαίνεται στις ισουψείς.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Βελτιώσεις – Ακρίβεια στην ανάγνωση των θέσεων των καθρεπτών... Advanced LIGO..
«Η ακρίβεια στη θέση θα είναι όση η κβαντομηχανική αβεβαιότητα στη θέση ενός e^- ...»
K. Thorne. Πραγματικό όριο διακριτικής ικανότητας λόγω φυσικής, χάρη σε απόσταση
καθρεπτών (με κινητό σύστημα) και καλή περιγραφή των κινήσεών τους.
{αγνοώντας βέβαια σεισμούς, κραδασμούς}.



A presentation slide for Advanced LIGO. At the top, the title "Advanced LIGO" is displayed in white. Below it is a diagram of a green laser beam with pink end caps, labeled with the equation $\Delta L / L = h$. To the left of the beam, a bulleted list specifies the goals: "Monitor motions of 40 kg mirrors to:" followed by "• $\Delta L \sim 10^{-19}$ meters" and "• Quantum fluctuations". To the right is a black and white portrait of Vladimir Braginsky. Below the portrait, his name and location are given: "Vladimir Braginsky, Moscow, Russia". A white-bordered box contains the text: "For the first time humans see human-sized objects behave quantum mechanically!". At the bottom, another bullet point states: "• Quantum Nondemolition (QND) Technology to deal with this".

Advanced LIGO

$\Delta L / L = h$

- Monitor motions of 40 kg mirrors to:
 - $\Delta L \sim 10^{-19}$ meters
 - Quantum fluctuations

For the first time humans see human-sized objects behave quantum mechanically!

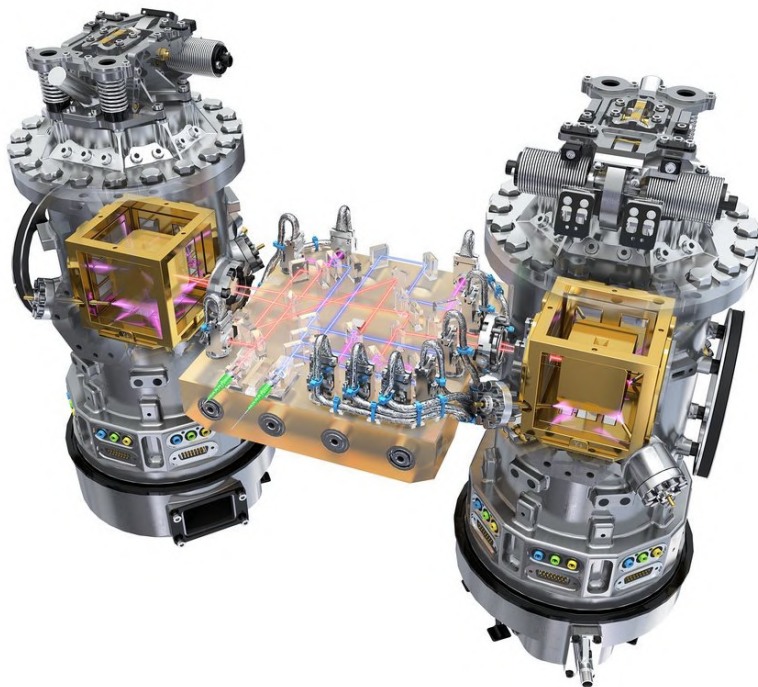
Vladimir Braginsky
Moscow, Russia

- Quantum Nondemolition (QND) Technology to deal with this

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Βελτιώσεις – Για να αποφύγουμε αυτούς τους Γήινους παράγοντες, αλλά κυρίως, για να επεκτείνουμε κατά πολύ το μήκος των «μπράτσων» του συμβολομέτρου, επόμενος στόχος είναι το διάστημα. Προτάσεις στην ESA από το 1980. Η υποδομή που προετοιμάζεται είναι η **LISA - Laser Interferometer Space Antenna** – εγχείρημα του 1990 (ESA/NASA).

Η NASA αποχώρησε το 2011 λόγω αμφιβολιών για την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων. Υπήρξε μια ενδιάμεση αποστολή το LISA Pathfinder για την ESA, με 2 τηλεσκόπια για να τεστάρει ακρίβεια κίνησης.

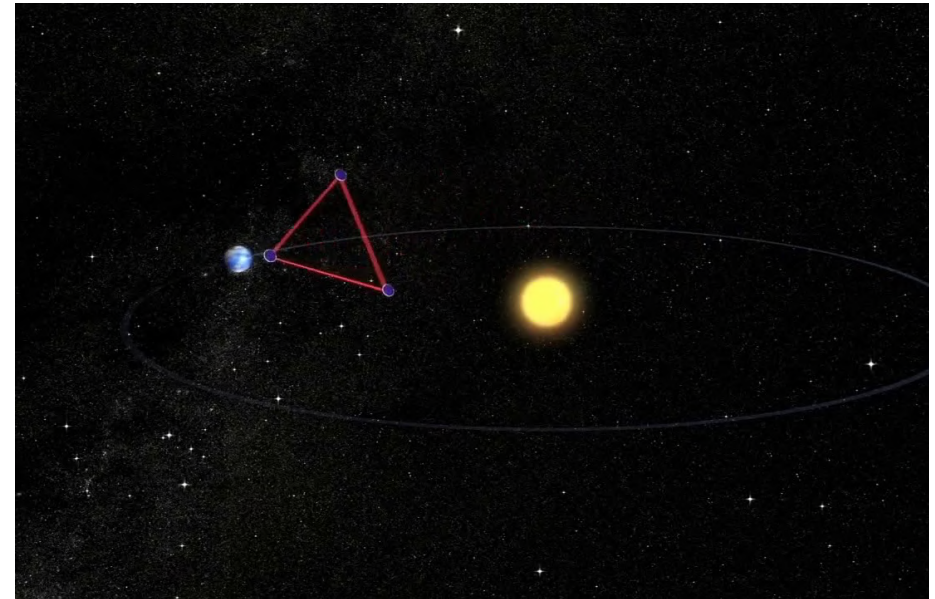
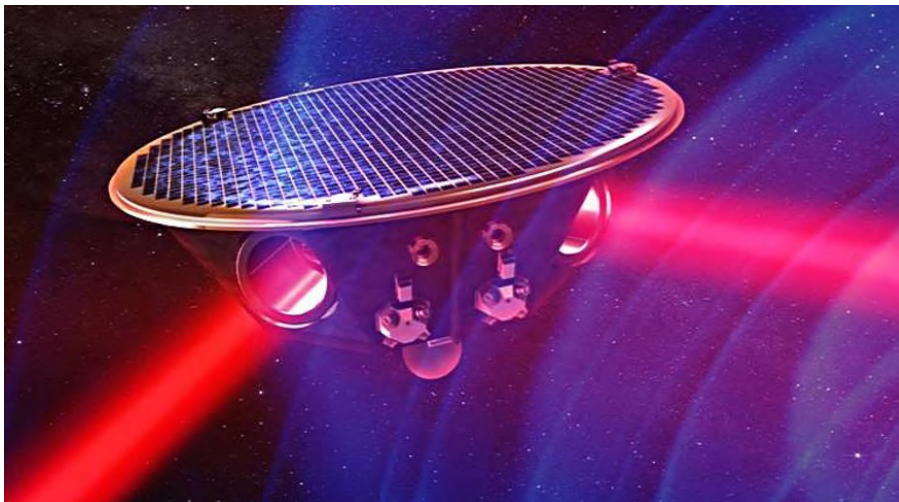


Το **LISA Pathfinder** εισήγαγε μια καινοτόμο αρχή μέτρησης βασισμένη σε μια ελεύθερα **αιωρούμενη μάζα αναφοράς** (test mass που αντιστοιχεί στα οπτικά) μέσα σε ένα θάλαμο σχεδόν τέλειου κενού, χωρίς καμία μηχανική σύνδεση με το διαστημόπλοιο. Η θέση της μάζας μετριόταν με εξαιρετική ακρίβεια μέσω ηλεκτροστατικών αισθητήρων και την ίδια τη laser interferometry, ενώ ανιχνευόταν οποιαδήποτε σχετική μετατόπιση μεταξύ μάζας και σκάφους. Αντί να επιβάλλεται στη μάζα να ακολουθεί το όχημα, χρησιμοποιήθηκε σύστημα drag-free control, όπου μικροπροωθητήρες ρύθμιζαν την κίνηση του σκάφους ώστε να ακολουθεί τη γεωδαισιακή της μάζας. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε **ένα σχεδόν ιδανικό αδρανειακό σύστημα αναφοράς**, απαραίτητο για την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων.

Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Βελτιώσεις – Για να αποφύγουμε αυτούς τους Γήινους παράγοντες, αλλά κυρίως, για να επεκτείνουμε κατά πολύ το μήκος των «μπράτσων» του συμβολομέτρου, επόμενος στόχος είναι το διάστημα. Προτάσεις στην ESA από το 1980. Η υποδομή που προετοιμάζεται είναι η **LISA - Laser Interferometer Space Antenna** – εγχειρημα του 1990 (ESA/NASA).

LISA: Συμβολόμετρο 3 ίδιων τηλεσκοπίων σε απόσταση **6 εκατομμυρίων km** το ένα από το άλλο σε τριγωνικό σχηματισμό, σε Ηλιοκεντρική τροχιά Earth-trailing (που έπεται της Γης). Η LISA θα έχει δυνατότητα να μετρήσει μετατοπίσεις μεγέθους ενός πυρήνα He.



Οργανολογία – Ανίχνευση σωματίων & βαρυτικών κυμάτων

Στόχοι: Ευαίσθητο το όργανο σε μικρές συχνότητες βαρυτικών κυμάτων. Πηγές που θα παράξουν τέτοια βαρυτικά κύματα είναι:

- 1) Συγκρούσεις από υπερμεγέθεις μελανές οπές σε κέντρα γαλαξιών μέχρι $z \sim 15$, δηλ. πιθανή αρχή γέννησης γαλαξιών
- 2) Extreme mass ratio inspirals (supermassive BH με compact object)
- 3) Διπλά συστήματα στο Γαλαξία
- 4) Ίσως κοσμολογικό σήμα λίγο μετά το Big Bang



Μια **νέα αρχή** για την αστρονομία με ταυτόχρονες ή συμπληρωματικές παρατηρήσεις H/M και βαρυτικών κυμάτων!!!

