



Καθοδοφωταύγεια

Cathodoluminescence

Ι. Ηλιόπουλος

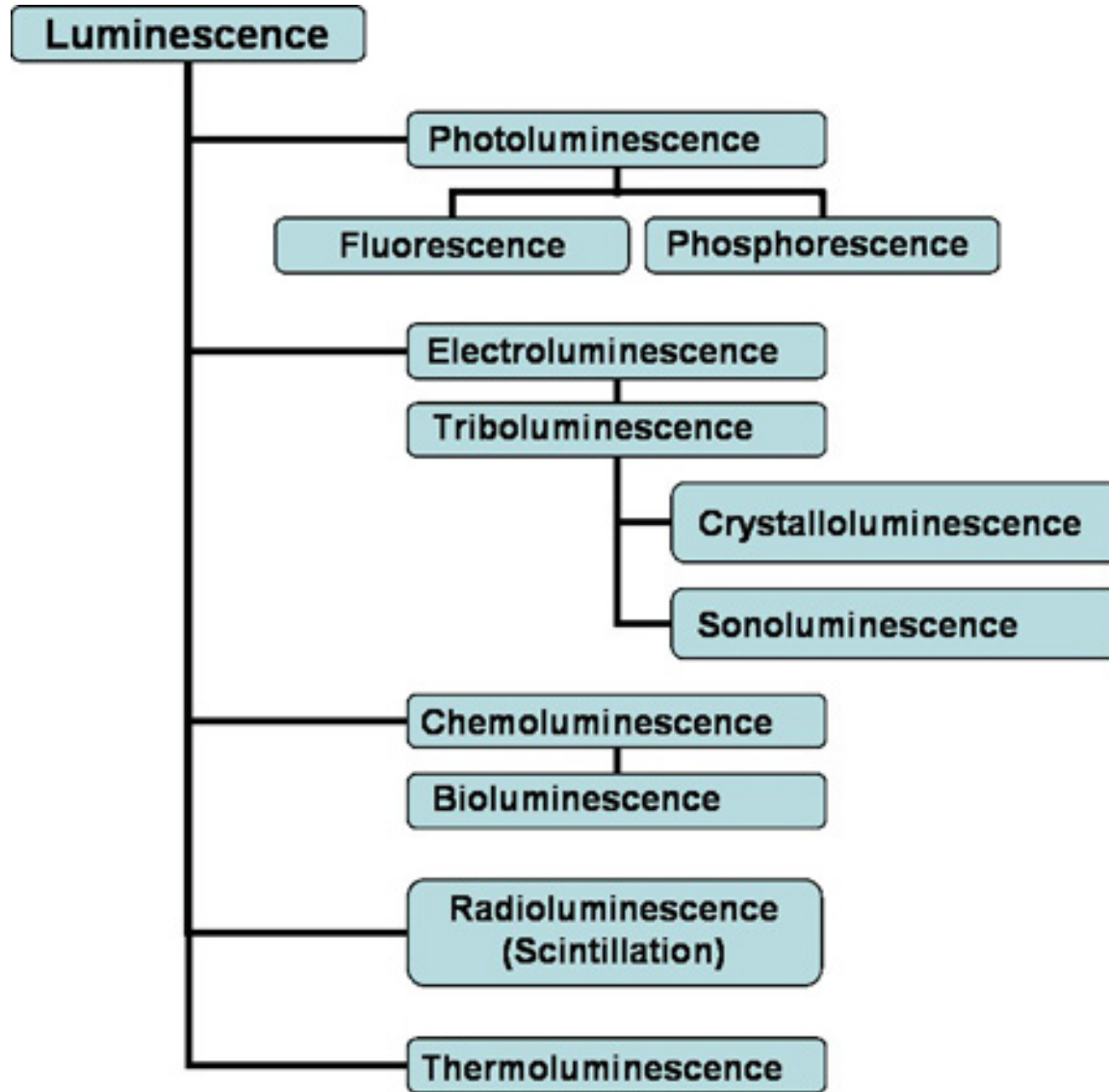
Ακαδ. Έτος 2023-2024

Το φαινόμενο της φωταύγειας

- Ως φωταύγεια στερεάς κατάστασης ορίζεται το φαινόμενο της εκπομπής φωτός από ένα υλικό, λόγω διέγερσης, η οποία είναι το αποτέλεσμα της απορρόφησης προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
- Το υλικό πρέπει να είναι κρυσταλλικό σώμα (ημιαγωγός ή μονωτής), αλλά πιθανώς και άμορφο, με εντοπισμένες όμως ενεργειακές στάθμες.

Διάφορα είδη φωταύγειας

- **Θερμοφωταύγεια:** διέγερση με θέρμανση
- **Φωτοφωταύγεια:** με ορατό, υπέρυθρο ή υπεριώδες φως
- **Ραδιοφωταύγεια:** με ακτίνες γ , β , X , κλπ.
- **Καθοδοφωταύγεια:** από δέσμη ηλεκτρονίων
- **Χημειοφωταύγεια:** από χημική ενέργεια
- **Βιοφωταύγεια:** από βιοχημική ενέργεια
- **Τριβοφωταύγεια:** από μηχανική καταπόνηση
- **Ηλεκτροφωταύγεια:** από ηλεκτρική ενέργεια
- **Ηχοφωταύγεια:** από ηχητικά κύματα
- **Κρυσταλλοφωταύγεια:** από την κρυστάλλωση υλικών



Φωτοφωταύγεια



Diamonds can show a wide range of hues and fluorescence colours. GIA regularly uses photoluminescence spectroscopy to confirm the natural origin of such diamonds. Photos of a portion of the Aurora Butterfly of Peace by Robert Weldon.

<https://www.gia.edu/UK-EN/gia-news-research/2016-gems-gemology-photoluminescence-review-gem-material-unusual-locales>

Θερμοφωταύγεια



The method relies on the fact that fired clay ceramics — like bricks, tile and pottery — start to chemically combine with water as soon as they are exposed to the atmosphere. A big breakthrough came in 2003 when the researchers realized that this process has occurred at a predictable rate throughout history, related to temperatures.

Ραδιοφωταύγεια



Radio-luminescence is a phenomena that causes a material to give off light when excited by a source of radiation. A self-glowing paint was developed in the early 1900's, made from a Radium salt (radium barium carbonate), a fluorescent material (zinc sulfide) and a binder (linseed oil). This material was used for decades to make watch dials glow in the dark. During World War 2, it was used to make whole instrument panels glow in aircraft used for night missions. (από: <http://www.free-energy.ws/radio-luminescence.html>)

Χημοφωταύγεια



Chemiluminescence is the production of light from a chemical reaction. Two chemicals react to form an excited (high-energy) intermediate, which breaks down releasing some of its energy as photons of light (see glossary for all terms in bold) to reach its ground state (από: <http://www.free-energy.ws/radio-luminescence.html>)

Χημειοφωταύγεια



Χρήση λουμινόλης στον ...τόπο του εγκλήματος (από:
<http://www.scienceinschool.org/2011/issue19/chemiluminescence/greek>)

Βιοφωταύγεια



Bioluminescent phytoplankton washes up on Maldives beach (Picture: Will Ho)

1 / 1

A natural phenomenon captured by Taiwanese photographer Will Ho. This Maldives beach was actually down to a massive tide of bioluminescent phytoplankton called *Lingulodinium polyedrum* . (από: <http://www.independent.co.uk/news/world/asia/maldives-beach-becomes-sea-of-stars-thanks-to-bioluminescent-phytoplankton-9072197.html>)

Βιοφωταύγεια



The tiny organisms emit light when stressed, be it by the lapping of waves, the carving action of a surf board or other, creating what looks like a network of stars. (από: <http://www.independent.co.uk/news/world/asia/maldives-beach-becomes-sea-of-stars-thanks-to-bioluminescent-phytoplankton-9072197.html>)

Βιοφωταύγεια

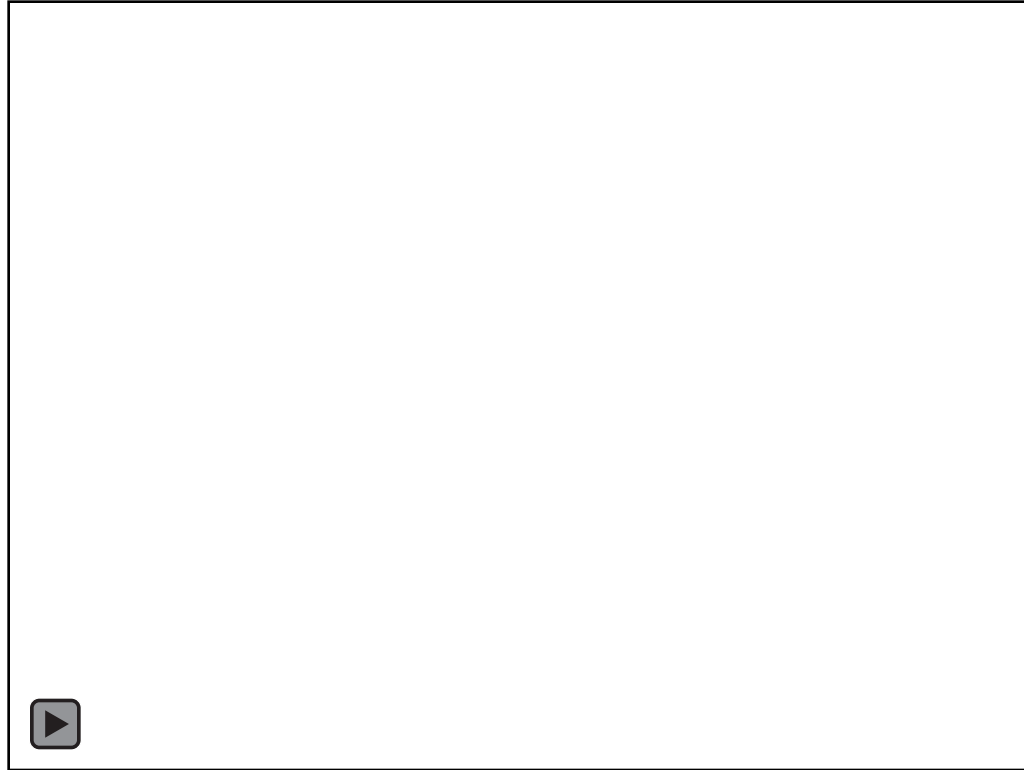


Τριβοφωταύγεια



Camara et al., 2008, Correlation between nanosecond X-ray flashes and stick–slip friction in peeling tape, *Nature* **455**, 1089-1092

Ηχοφωταύγεια

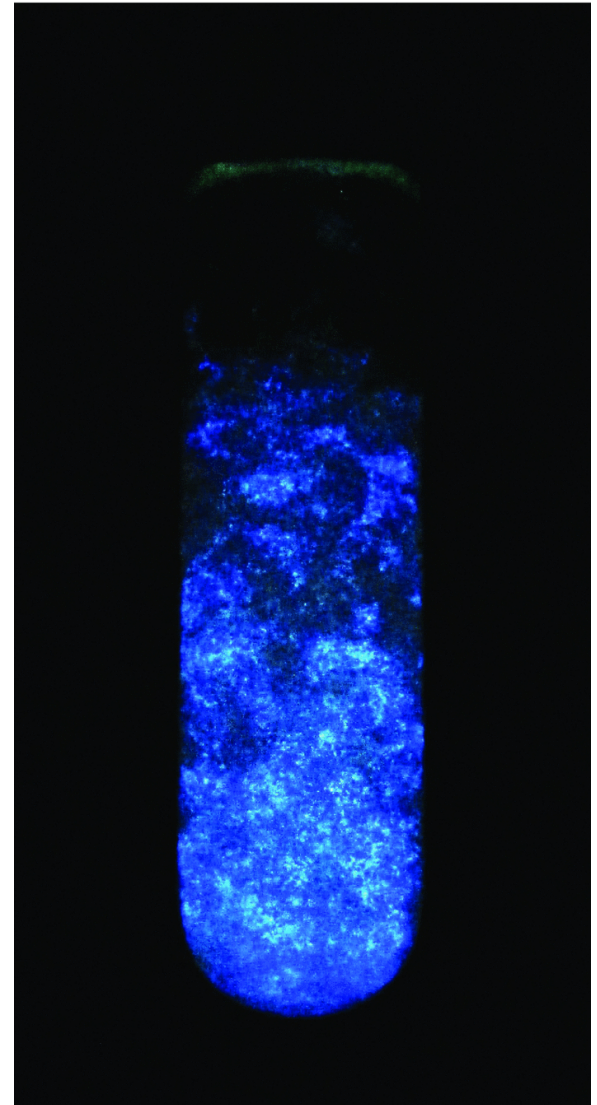


Sonoluminescence is the production of light from sound. This effect, discovered just over ten years ago, has been, and continues to be, the subject of considerable experimental and theoretical research.

Κρυσταλοφωταύγεια

Crystalloluminescence is the effect of luminescence produced during crystallization. There is a time lag between the achievement of supersaturation in a solution and the appearance of crystalloluminescence flashes from crystal nuclei. The incubation time of crystalloluminescence decreases systematically with the concentration of the solution. A new method based on crystalloluminescence measurements is proposed for the determination of the critical size of the crystal nucleus.

Andrew, J.A., 2012. Deep ultraviolet and visible crystalloluminescence of sodium chloride. *J. Chem. Phys.* **136**,



Μερικοί όροι πρώτα....

Το γενικό φαινόμενο της **φωταύγειας** εμπεριέχει την **φωτο-φωταύγεια** που περιλαμβάνει δύο μηχανισμούς: τον φωσφορισμό και τον φθορισμό.

Φωσφορισμός: όταν η εκπομπή ακτινοβολίας από το δείγμα συνεχίζει να υφίσταται μετά την παύση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Φθορισμός: όταν η εκπομπή ακτινοβολίας από το δείγμα αίρεται ταυτόχρονα σχεδόν με την παύση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Σαν όριο τα 10^{-8} sec

Ο νόμος που διέπει το φαινόμενο

- Όταν ένα υλικό υφίσταται ακτινοβολία, μέρος αυτής της ενέργειας μπορεί να απορροφηθεί και στη συνέχεια να επανεκπεμφθεί ως φως (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) μεγαλύτερου μήκους κύματος (Νόμος του Stoke).
- Το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός εξαρτάται από την ακτινοβολημένη ουσία-δείγμα και όχι από την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Τι είναι η καθοδοφωταύγεια

- Ορισμένα υλικά, όταν ενεργοποιηθούν από ηλεκτρόνια, ενεργοποιούν συγκεκριμένα «δευτερογενή» ηλεκτρόνια τα οποία ακολούθως απελευθερώνουν μικρά quanta ενέργειας εύρους μερικών eV... που αν το εκφράσουμε με όρους μήκους κύματος, αποτελούν το φάσμα ορατού φωτός.
- Οι απεικονίσεις CL μπορούν να αποφέρουν πολύτιμες πληροφορίες που με άλλα μέσα δεν θα ήταν προσβάσιμες.

Τι δεν είναι...

Φωτοφωταύγεια: ακτινοβολία που προκύπτει από την διέγερση μέσω UV ή ορατού φωτός (1.8 to 4.9 eV)

Ούτε

Φωσφορισμός: ακτινοβολία που παραμένει μετά την παύση της εκπεμπόμενης από την πηγή ακτινοβολίας

Αλλά

εμπίπτει στην γενική κατηγορία του φθορισμού, όπου η εκπομπή ακτινοβολίας τερματίζεται αμέσως (εντός 10^{-8} sec) με τον τερματισμό της ακτινοβολίας από την πηγή.

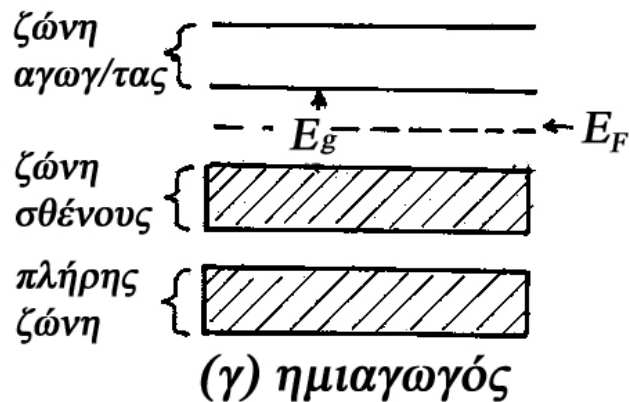
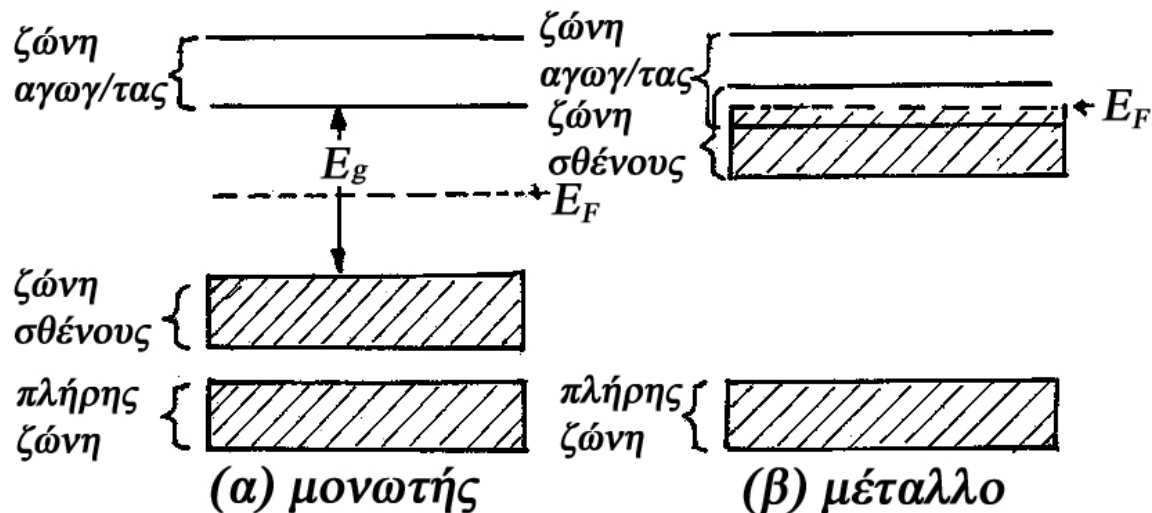
Καθοδοφωταύγεια

Αποτελεί ένα οπτικό φαινόμενο (ορατό/εγγύς ορατό πεδίο φωτός). Συμβαίνει σε ημιαγωγούς/μονωτές, τεχνητούς ή φυσικούς.

Ηλεκτρόνια των υλικών αυτών από τη ταινία σθένους τους διεγείρονται και οδηγούνται στην ταινία αγωγιμότητας για ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.

Ακολουθως τα ηλεκτρόνια αυτά επανασυνδυάζονται με τα κενά που δημιουργήθηκαν στην ταινία σθένους. Η διαφορά ενέργειας απελευθερώνεται ως ένα φωτόνιο στο μήκος κύματος του ορατού φωτός.

Ορίζουμε σαν ταινία ή ζώνη σθένους (Valence band) την ανώτερη πλήρως κατειλημμένη ενεργειακή ταινία και σαν ταινία ή ζώνη αγωγιμότητας (Conduction band) την κατώτερη άδεια από ηλεκτρόνια ενεργειακή ταινία.



Καθοδοφωταύγεια

Δύο είναι τα συνήθη πεδία εφαρμογής της μεθοδου:

- (1) Εντοπισμός παραμορφώσεων (κακός συνδυασμός δικτυωτών πλεγμάτων) σε ημιαγωγούς, και
- (2) Αξιολόγηση ορυκτών με σκοπό τον προσδιορισμό ανομοιογενούς ανάπτυξής τους (σύνθετη ιστορία σχηματισμού, overgrowths, dissolution, crack infilling).

και εγένετο Φως...

Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι απεικόνισης του φαινομένου:

- μέσω SEM ή microprobe,
- ή μέσω ενός μικρού εξαρτήματος για οπτικό μικροσκόπιο (static cold cathode electron source). Επιπρόσθετα, το φάσμα φωτός είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθεί μέσω ενός χρωματοφασματομέτρου.

Παραδείγματα

CL: ο κόσμος των χρωμάτων

CL σε έγχρωμο
φίλμ:

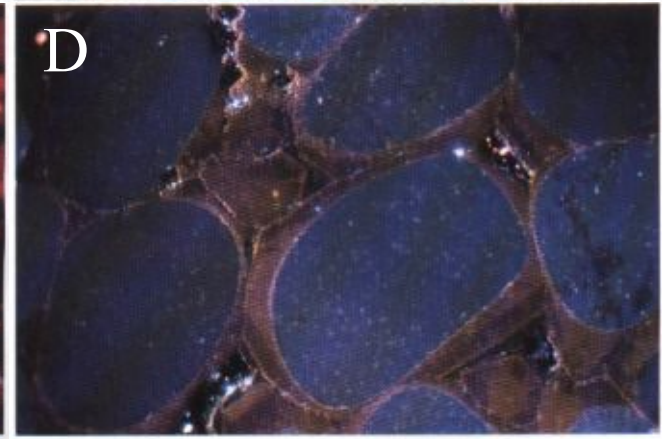
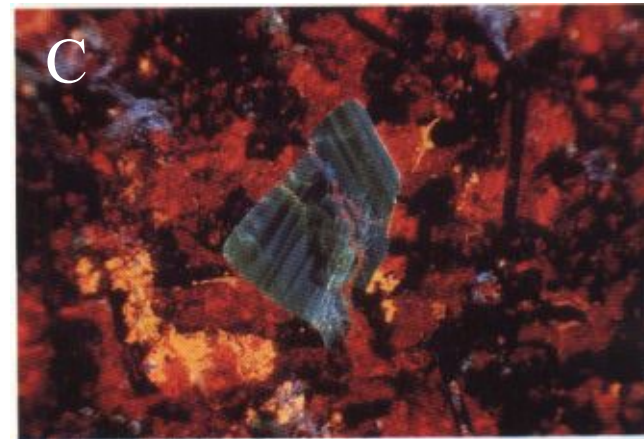
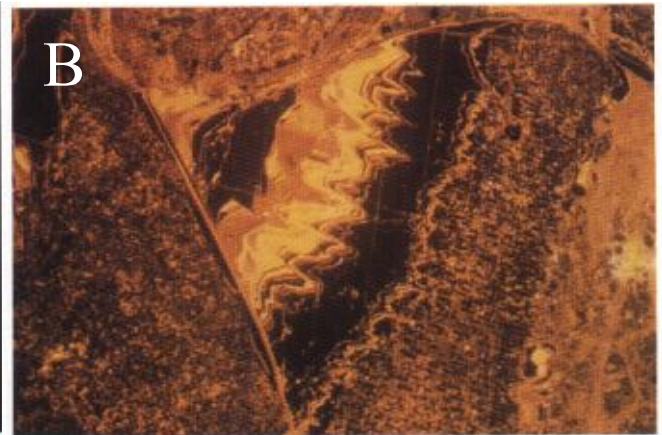
A: Κασσιτερίτης, SnO_2

B: Κρινοειδής ασβεστόλ.

C: Κόκκινο = δολομίτης,
πορτοκαλί = ασβεστίτης;
γκρί = baddeleyite (ZrO_2)

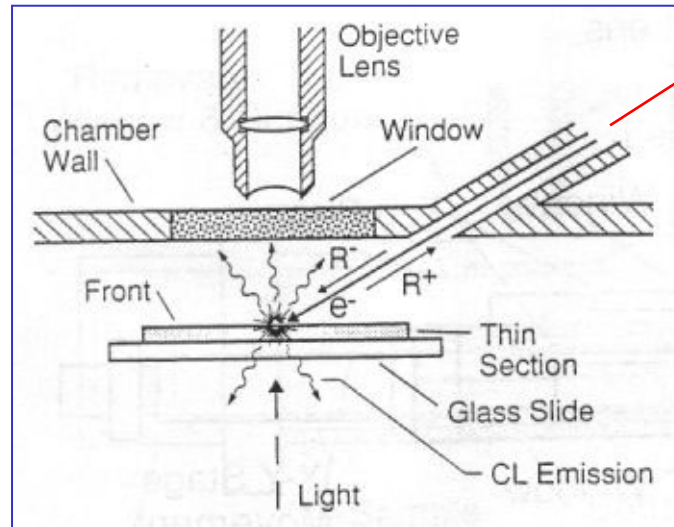
D: Ψαμμίτης. Ωριμος
χαλαζίας με ζωνώδη
ανάπτυξη αυθιγενή
χαλαζία

(από Marshall, 1988, CL of
Geological Materials)



Η CL που εκπέμπεται ποικίλει σε μήκη κύματος (=χρώματα), και μπορεί να καταγραφεί με τον κατάλληλος εξοπλισμό. Έχουν κατασκευαστή διάφορα εξαρτήματα CL οπτικής μικροσκοπίας που μπορούν να προσαρμόζονται στην τράπεζα κοινών μικροσκοπίων

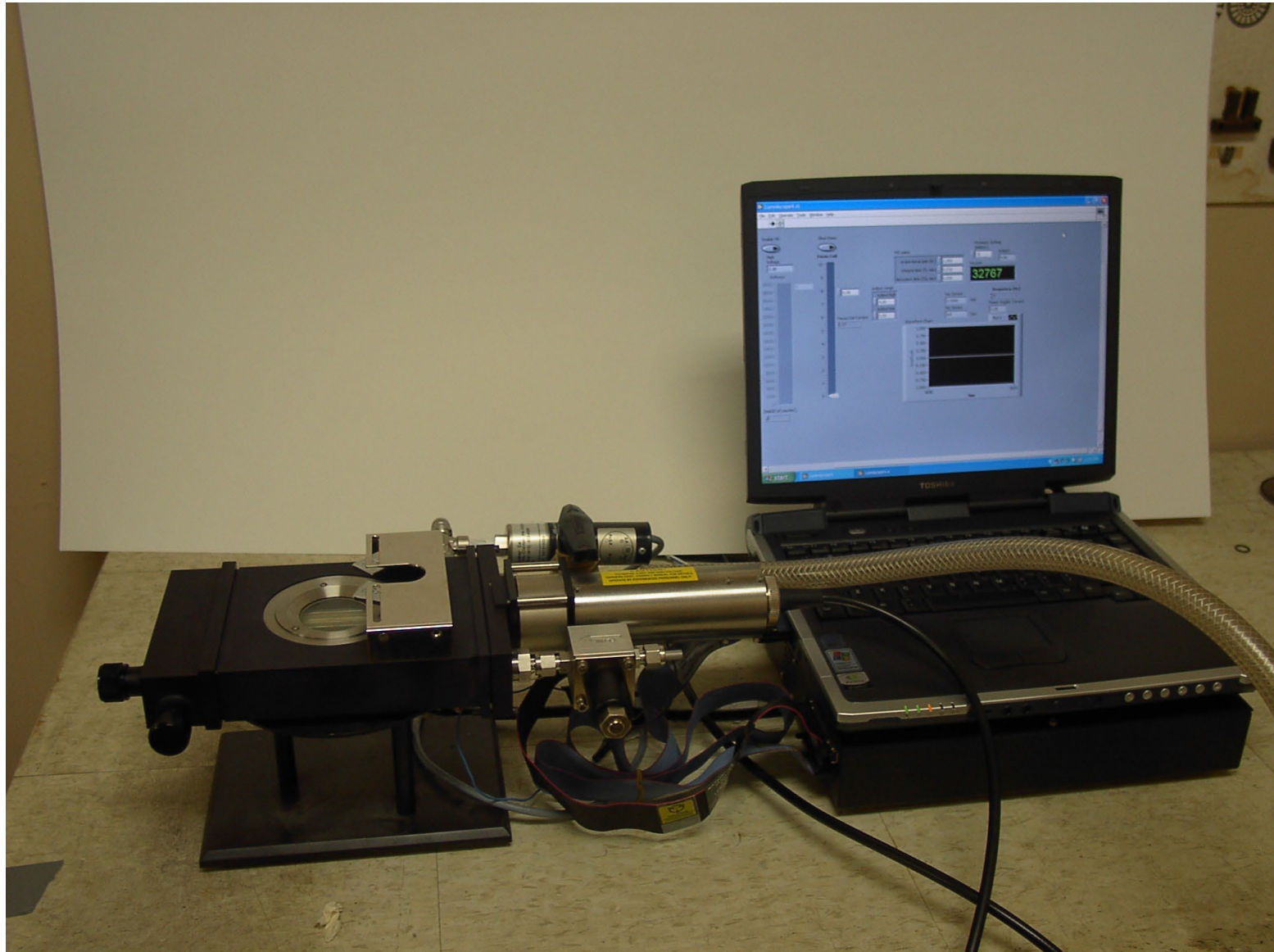
Εξαρτήματα μικροσκοπίου (ψυχρής) CL



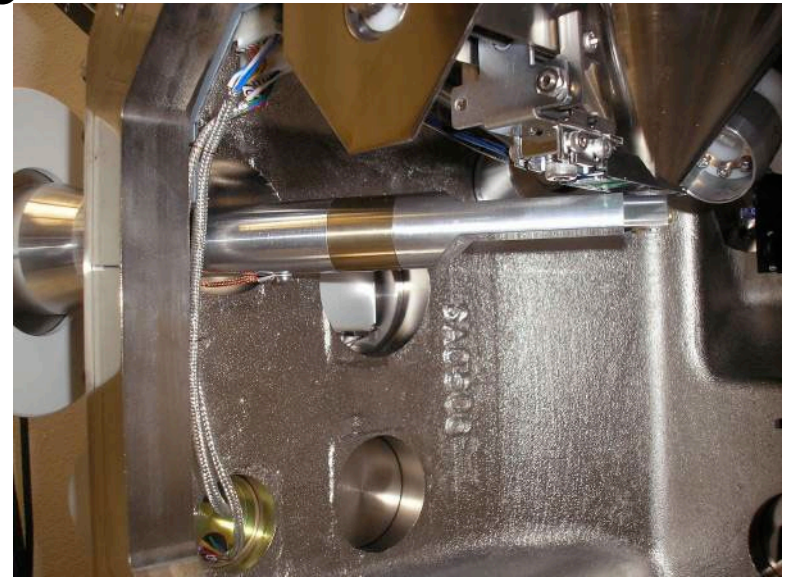
Πυροβόλο
ψυχρής καθόδου

Τα CMAs είναι σχετικά φθηνά εξαρτήματα για μικροσκόπια. Ένα υψηλού δυναμικού (10-30 keV) πυροβόλο ψυχρής καθόδου βομβαρδίζει ηλεκτρόνια εντός θαλάμου χαμηλού κενού. Προκύπτει ένα εκνέφωμα (plasma) που παρέχει ουδετεροποίηση του φορτίου (συνεπώς δεν απαιτείται επικάλυψη με αγώγιμο υλικό). Μία κάμερα (φίλμ ή ψηφιακή) ή/και ένα μονοχρωματόμετρο προσαρμόζονται ώστε να καταγράφουν εικόνες ή/και μήκη κύματος του φωτός.

CL εξάρτημα για οπτικό μικροσκόπιο



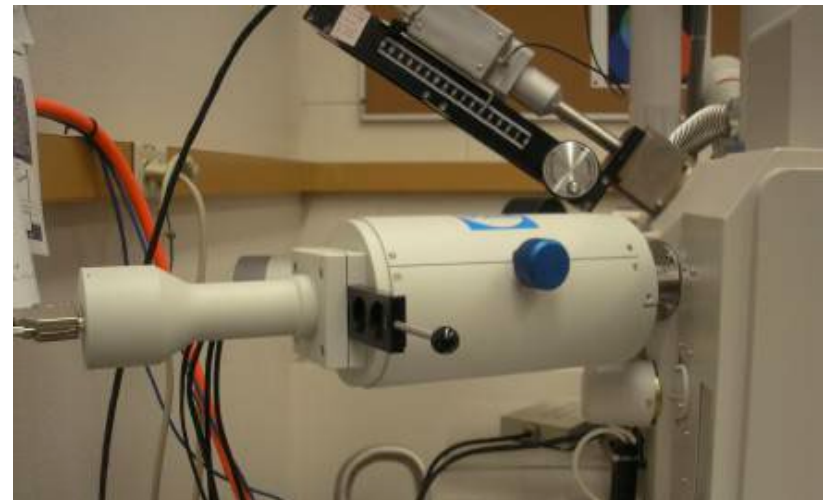
CL ανιχνευτές σε SEM/EP



Επάνω: PM on SX51

Επάνω δεξιά: Gatan PanaCL σε Hitachi

Δίπλα: PM με φίλτρα εκτός του θαλάμου.



CL: ‘υπερπηδώντας την ζώνη χάσματος’

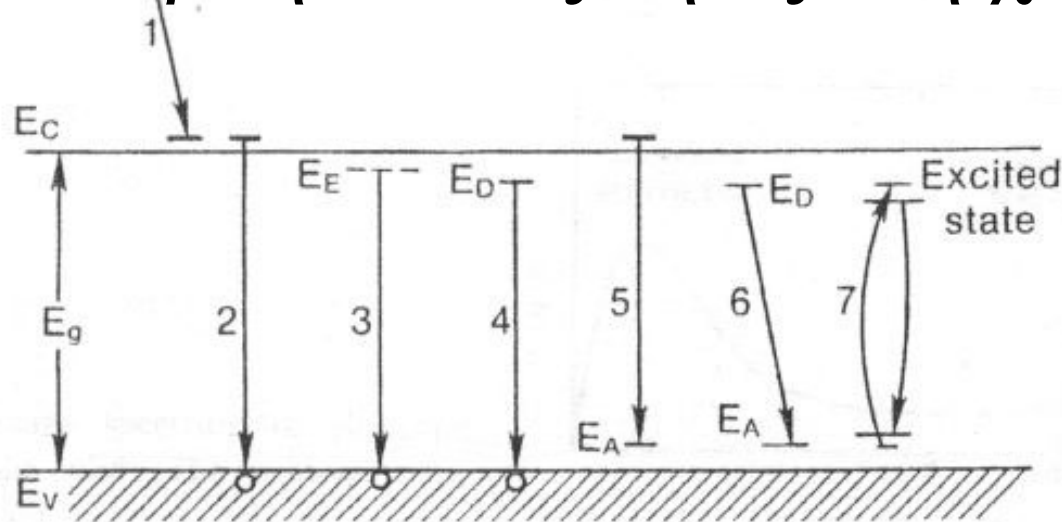
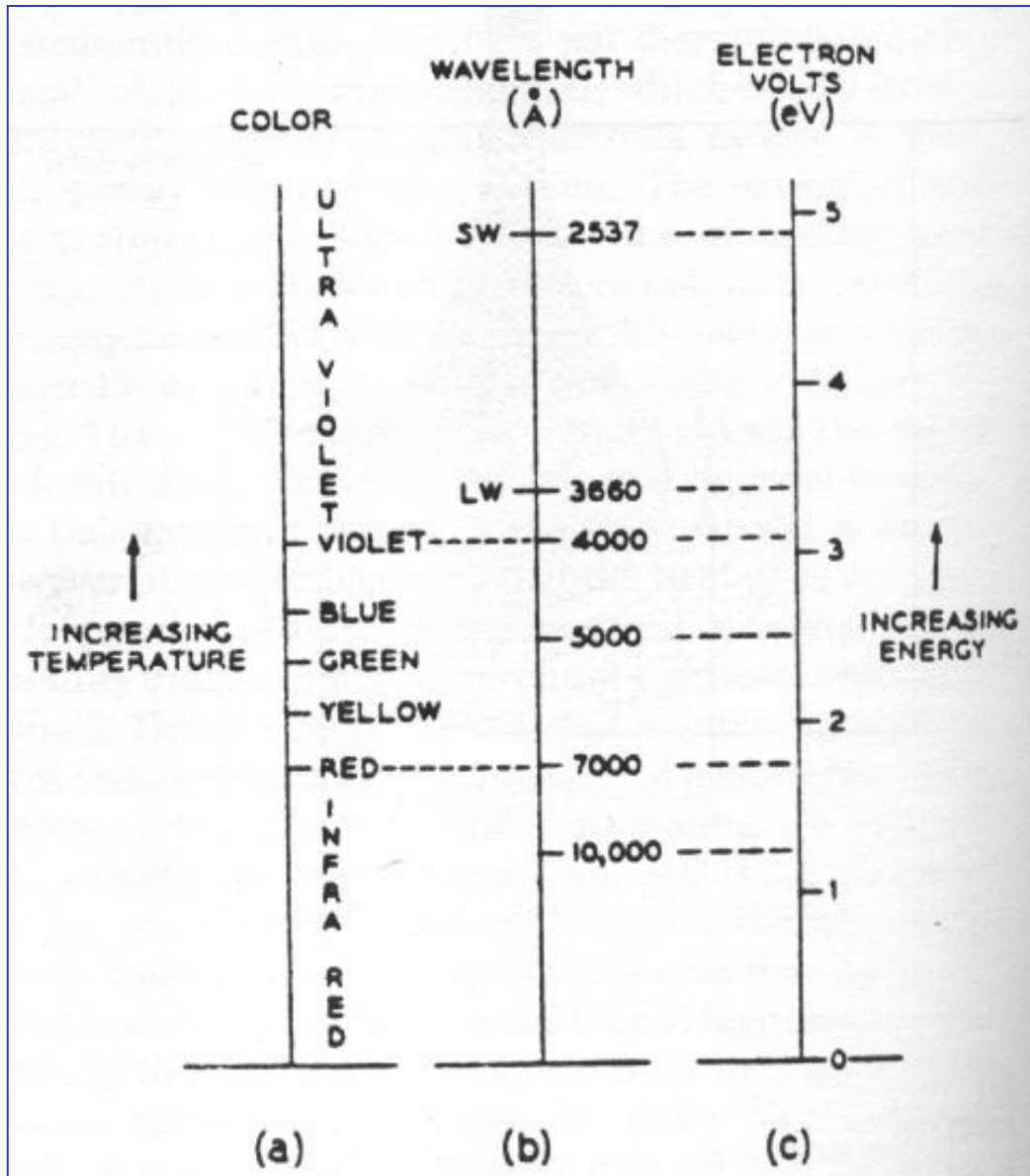


Figure 2.12. Schematic diagram of luminescence transitions between the conduction band (E_C), the valence band (E_V), and exciton (E_E), donor (E_D), and acceptor (E_A) levels in the luminescent material. Process 1: an electron excited above the conduction band edge dribbles down, resulting in phonon-assisted photon emission, or, more likely, the emission of phonons only. Process 2: intrinsic luminescence resulting from direct recombination between an electron in the conduction band and a hole in the valence band. Process 3: the exciton decay observable at low temperatures. Processes 4, 5, and 6: transitions that start and/or finish on localized states of impurities (e.g., donors and acceptors) in the gap produce extrinsic luminescence, and these account for most of the processes in many luminescent materials. Process 7: the excitation and radiative deexcitation of an impurity with incomplete inner shells, such as a rare earth ion or a transition metal.

Διάφοροι μηχανισμοί εκπομπής φωτονίων κατά τη διεργασία προώθησης ηλεκτρονίων της ζώνης σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας μέσω της επίδρασης ηλεκτρονίων υψηλού δυναμικού.

CL: χρώμα και eV



Οι διάφορες ενέργειες ζωνών χάσματος και η αντιστοιχία τους με τα μήκη κύματος και τα χρώματα.

(από Marshall, 1988, Fig 1.4, p. 4)

Θεωρίες για την CL

Ένας συχνά χρησιμοποιούμενος όρος : “intrinsic CL” (εγγενής CL), που υπονοεί ότι ορισμένα ορυκτά παρουσιάζουν *έμφυτη* CL, π.χ. όλα τα πυριτικά ορυκτά έχουν CL στη χρωματική περιοχή του μπλέ. Όχι και τόσο ικανοποιητική θεώρηση.

Η εγγενής CL μπορεί να ενισχυθεί από

- μη στοιχειομετρία
- δομικές ατέλειες
 - φτωχή ταξιθέτηση
 - radiation damage
 - βλάβη λόγω μηχανικού shock
- προσμίξεις ή υποκαταστάσεις, που παραμορφώνουν το δικτυωτό πλέγμα

Σημ: αυτά τροποποιούν τους δεσμούς και την ηλεκτρονική δομή.

Προσμίξεις: activators/quenchers

ενεργοποιητές/αποσβέστες

- Η υποκατάσταση ενός στοιχείου για το «σύννηθες» στοιχείο (π.χ. Ti^{4+} για Si^{4+} στο χαλαζία, Mn^{2+} για Ca^{2+} στον ασβεστίτη) θεωρείται ότι παίζει ρόλο κλειδί στην παραμόρφωση του δικτυωτού πλέγματος (δομική ατέλεια) ενός ορυκτού. Οι προσμίξεις που λειτουργούν με ανάλογο τρόπο καλούνται “activators” (ενεργοποιητές).
- Λίγα στοιχεία είναι εκείνα που μπορούν να δράσουν κατά αντίθετο τρόπο: να τροποποιήσουν την ταξινόμηση των ενεργειακών επιπέδων έτσι ώστε να απουσιάζει η CL ή να ελαττώνεται δραστικά. Αυτά καλούνται “quenchers” (αποσβέστες), με τον Fe^{2+} να είναι ο συνηθέστερα απαντώμενος.
- Εάν τα επίπεδα του quencher είναι χαμηλά, είναι πιθανό ότι και μόνο μερικά ppm (ή 50 ppb) κάποιου activator είναι αρκετά για να υπάρξει εκπομπή CL.

Πλεόνασμα ενεργοποιητή?

- Έχει παρατηρηθεί ότι η ένταση της CL γενικά αυξάνει με την αύξηση της συμμετοχή του ιόντος-ενεργοποιητή, φτάνει ένα μέγιστο και έπειτα η CL μειώνεται με την περαιτέρω αύξηση του ενεργοποιητή.
- Η μέγιστη ένταση CL φαίνεται να συμβαίνει όταν τα επίπεδα συμμετοχής του ενεργοποιητή κυμαίνονται μεταξύ 0.1 - 1 wt%, π.χ η ένταση CL σε εμπλουτισμένους αστρίους φτάνει το μέγιστο σε ~1.5 wt% Fe³⁺ ή Mn²⁺.

Όμορφα χρώματα

- Ένα ορυκτό μπορεί να δεχθεί διάφορους activators, και θα δώσει διαφορετικό χρώμα για κάθε έναν από αυτούς: οι άστριοι μπορούν να δεχθούν Eu^{3+} - μπλέ, Mn^{2+} - πρασινωπό κίτρινο, και Fe^{3+} - κόκκινο.
- Ένας activator μπορεί να συμμετέχει σε διάφορα ορυκτά δημιουργώντας διαφορετικού χρώματος CL: π.χ. το Mn^{2+} μπορεί να γίνεται αποδεκτό από τους αστρίους – πρασινοκίτρινο, τον απατίτη - κίτρινο, και τα ανθρακικά – κοκκινοπορτοκαλί.
- Πολλές από τις REE που δρουν ως activators (π.χ. Dy^{3+} , Sm^{3+} , Eu^{3+}) παράγουν φάσματα με οξύληκτες κορυφές των οποίων το μήκος κύματος είναι σχεδόν ανεξάρτητο από τον ξενιστή κρύσταλλο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποιοτική στοιχειακή αξιολόγηση.

Φάσματα CL

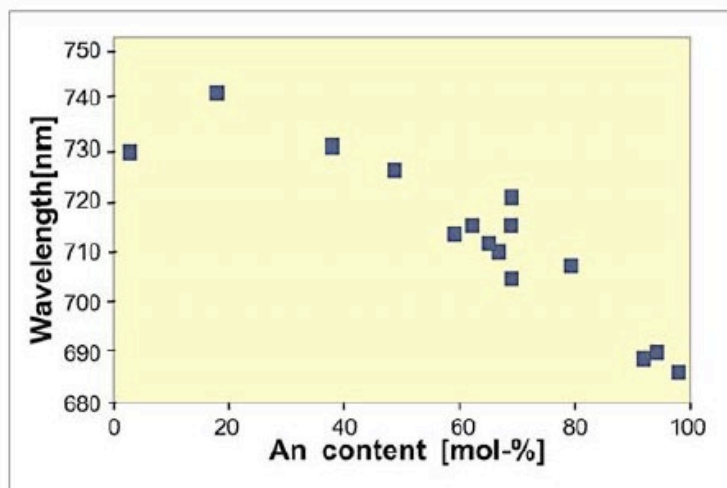
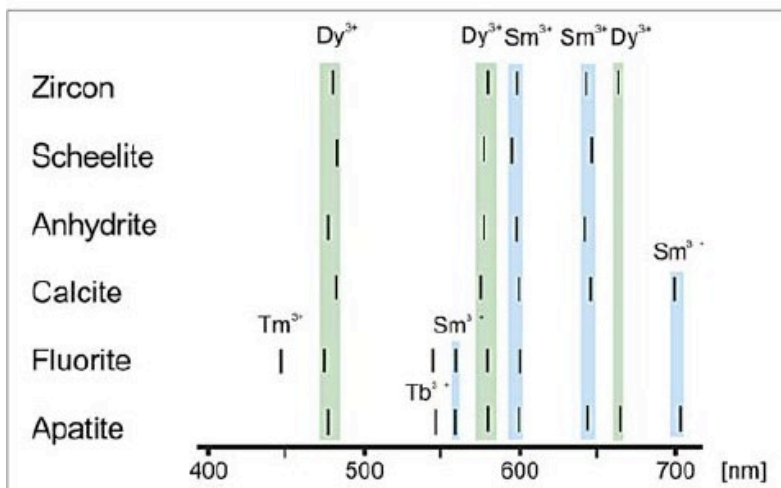
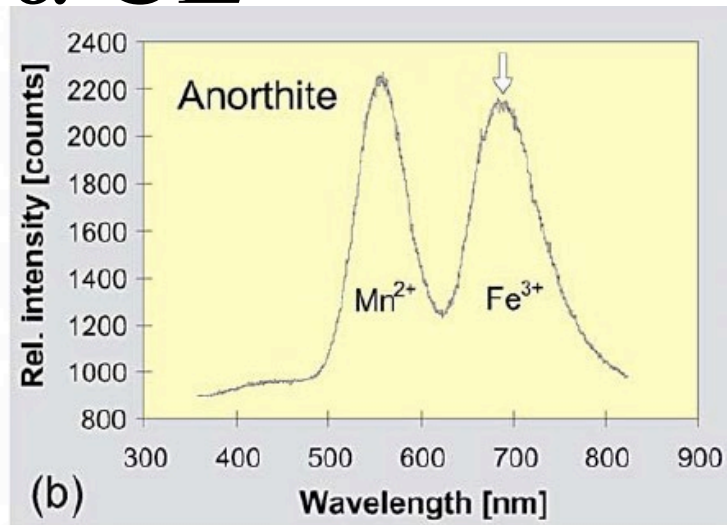
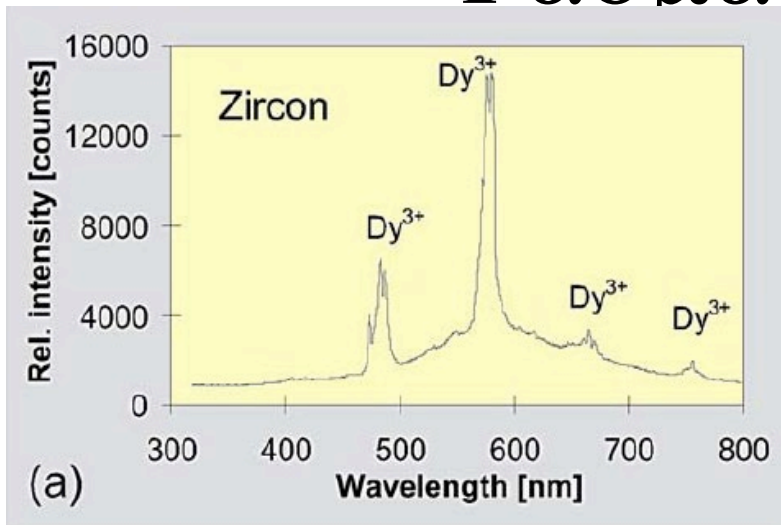


Fig. 5a,b Influence of the crystal field on the shape and position of CL emission spectra: a sharp emission lines with more or less constant peak positions independent on the host crystal (no influence of the crystal field); b broad emission bands with shift of the emission maxima depending on mineral composition (anorthite content in feldspar) due to the varying influence of the local crystal field

Οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας

- Η ένταση της CL είναι δυνατόν να μεταβάλλεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας του δείγματος.
- Υπάρχουν περιπτώσεις που παρατηρήθηκε αύξηση της έντασης (σε διαφορετικά υλικά) τόσο με υψηλότερες όσο και με χαμηλότερες θερμοκρασίες δείγματος.
- Για παράδειγμα, έχει βρεθεί ότι η CL του χαλαζία μπορεί να ενισχυθεί με την ψύξη του δείγματος.

Οι επιπτώσεις του χρόνου

Η ένταση της CL μπορεί να εξασθενεί συναρτήσει του χρόνου βομβαρδισμού από τη δέσμη: γνωστό ως γήρανση δέσμης ακτινοβολίας (electron beam aging) στην βιομηχανία φωσφόρου. Δεν θεωρείται σημαντικό πρόβλημα σε κανονικές συνθήκες βομβαρδισμού και παρατήρησης του δείγματος. Έχει αναφερθεί για χαλαζία με μεταβολή από κόκκινο σε μπλε εντός μερικών δεκάδων sec.

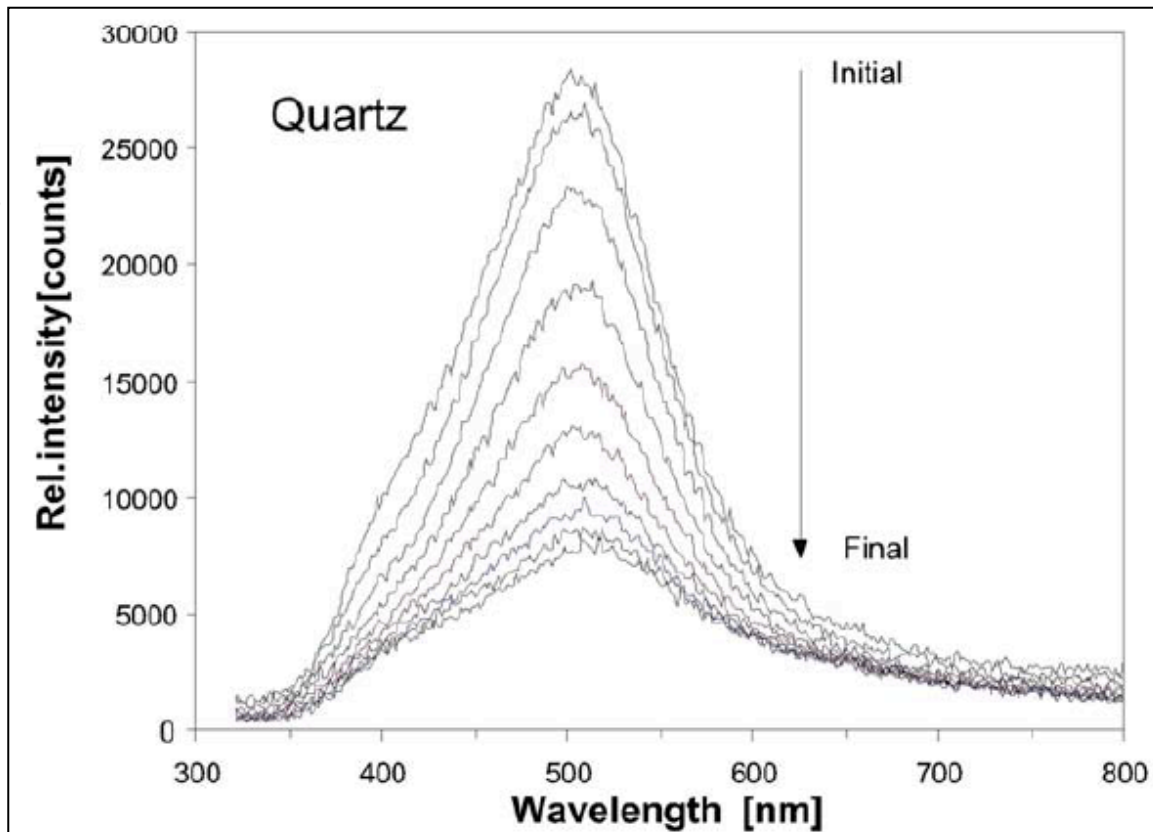


Fig.8 Time-resolved CL emission spectrum of quartz (SiO_2) showing transient behaviour of the emission bands during to electron irradiation

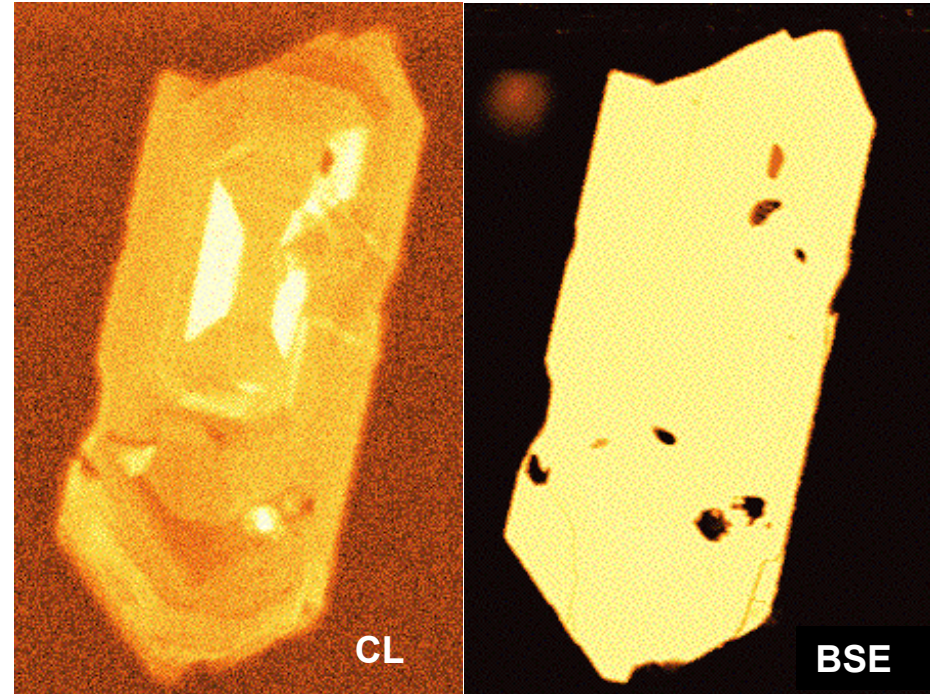
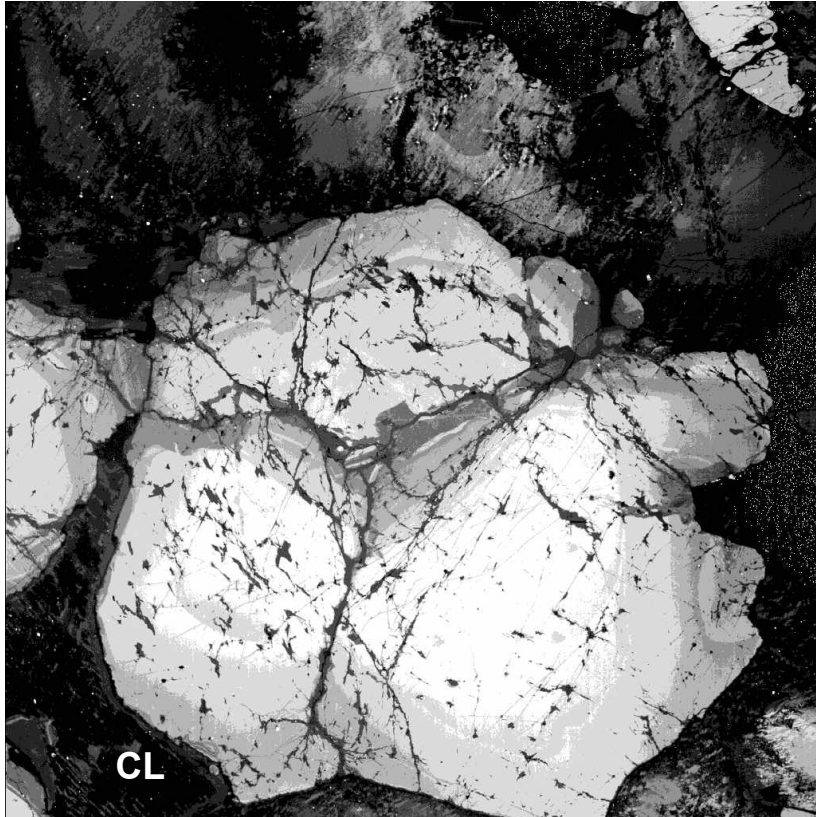
Εφαρμογές στην οπτική μικροσκοπία όταν δεν είναι διαθέσιμο SEM-BSE

- Αποτίμηση της κατανομής διαφορετικών φάσεων που διαφορετικά δεν θα γινόταν αντιληπτή (π.χ. ασβεστίτη και δολομίτη, δύο αστρίων σε γρανίτη).
- ακριβής επισήμανση της παρουσίας και της θέσης μικροσκοπικών ή σπανίων ορυκτών σε ένα πέτρωμα (π.χ. απατίτη σε γρανίτη).

Εφαρμογές όπου το SEM-BSE είναι διαθέσιμο

- Προσδιορισμός διαφορετικών υπο-περιοχών του ίδιου ορυκτού που αντικατοπτρίζουν την διαφορετική και πιο σύνθετη ιστορία σχηματισμού του (π.χ. ζωνώδη ανάπτυξη, επιφάνειες διάλυσης, επουλωμένες ρωγμές, θραυσιγενείς επιφάνειες, σε ανθρακικά ορυκτά, χαλαζία, ζιρκόνιο, αστρίους).

CL: χαλαζίας, ζirkόνιο



Images acquired with the Cameca CL (PM) detector. Left: quartz from Skye with complex history of growth or re-equilibration with hydrothermal system. Trace amounts of Al, Ti or Mn may be involved. Right: CL image of zircon from Yellowstone tuff (**false color**); adjacent BSE image (no zonation obvious).

(from research of Valley, and Bindeman and Valley)

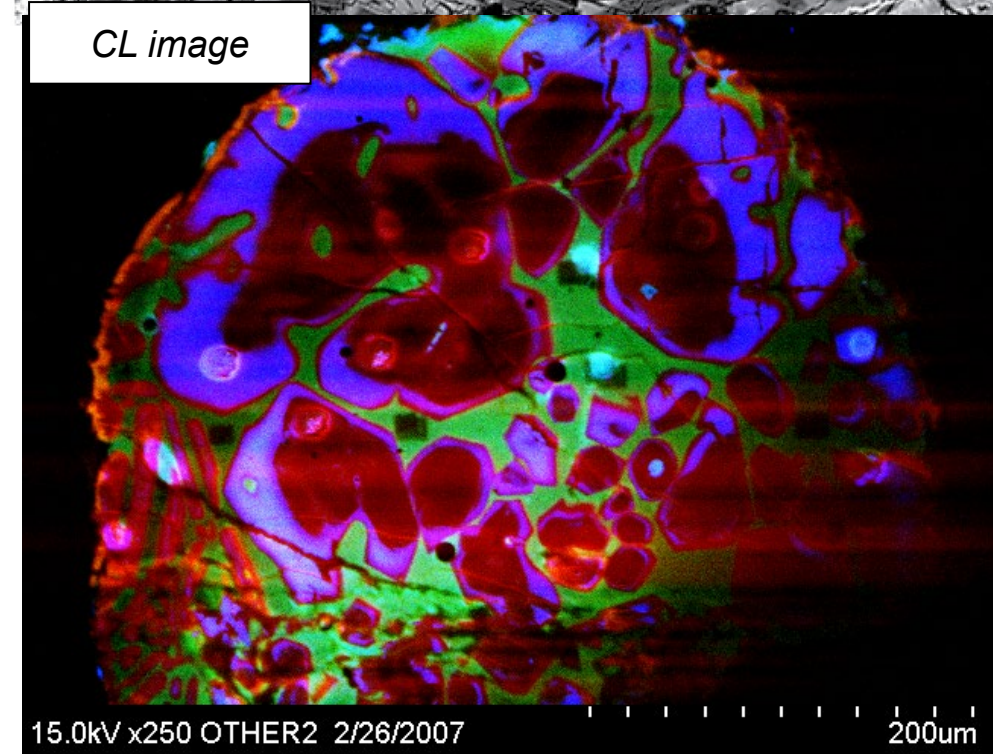
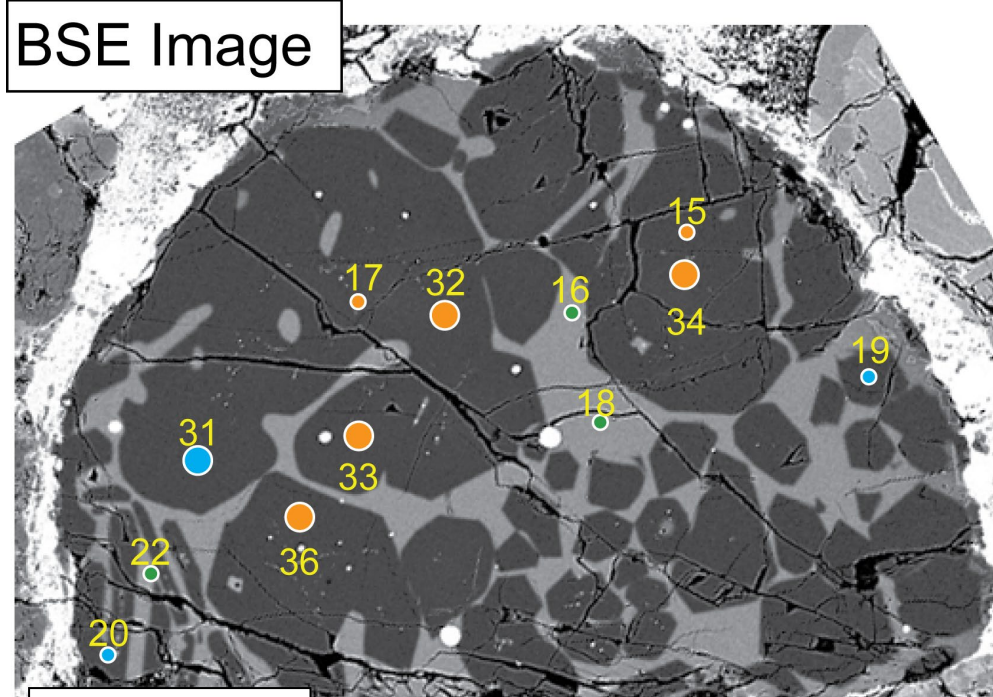
Χρήση CL για αποκόμιση απαραίτητων λεπτομερειών για την εξήγηση ισοτοπικών δεδομένων (SIMS Isotope Data)

Δείγμα ολιβίνη σε χόνδρο από τον
μετεωρίτη (χονδρίτη) του Semarkona , ο
οποίος περιέχει ασυνήθιστους κόκκους
φορστερίτη (σκούρο γκρί σε BSE) που
δείχνουν τόσο μπλε όσο και κόκκινη CL,
εγκλεισμένους σε πλούσιο σε Al, Ca
γυαλί (ανοικτό γκρί σε BSE).

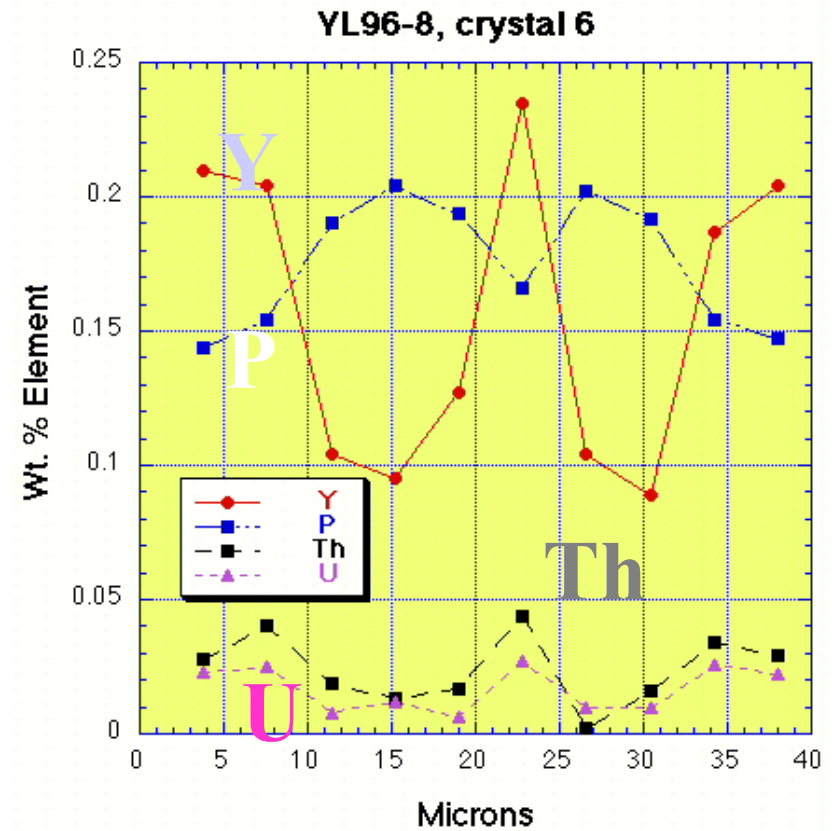
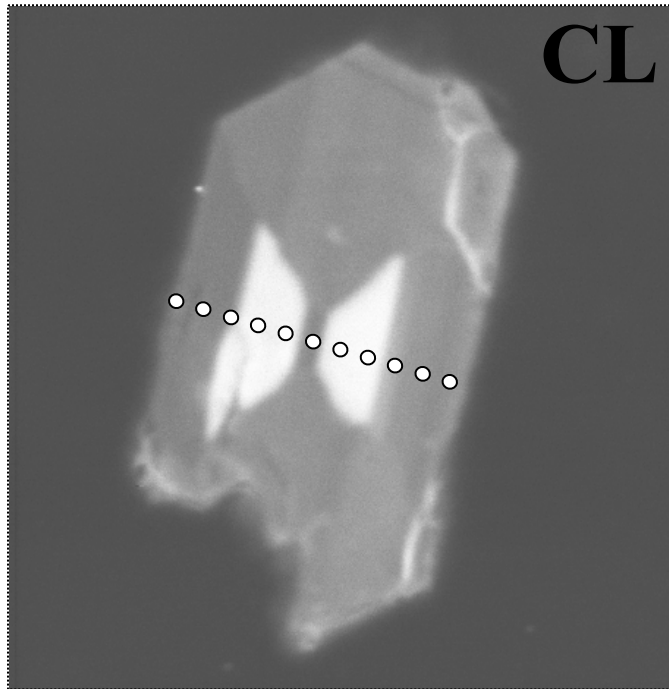
Ο ολιβίνης με μπλε CL είναι φτωχός σε
FeO ($Fo > 99.5$) και εμπλουτισμένος σε
στοιχεία όπως τα Al, Ca, ενώ εκείνος με
κόκκινη CL στον πυρήνα είναι ελαφρά
πιο πλούσιος σε FeO ($Fo < 99.5$).

Τα ισοτοπική σύσταση του O3 είναι πιο
πλούσια σε ^{16}O στο μπλε φορστερίτη
και στο γυαλί.

Το γυαλί εμφανίζει πράσινη CL.



Ιχνοστοιχεία ως αποσβέστες CL



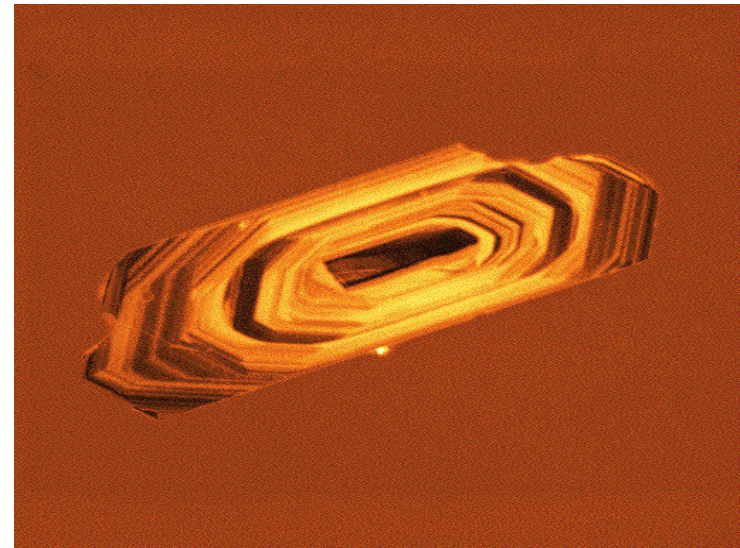
- Sector zoning in Yellowstone Pre-LCT zircon
- Bright CL: high P (and lower Y, U and Th)
- **Dark CL: high Y, U, and Th (compared to Bright CL area)**

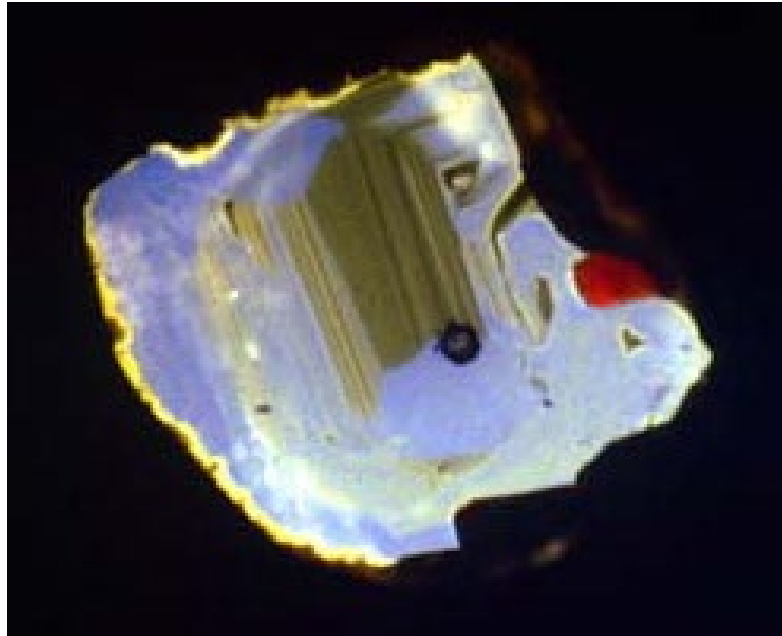
Προετοιμασία δειγμάτων:

Εποξικές ρητίνες και λειαντικά υλικά

- Πολλές , αν όχι όλες, εποξικές ρητίνες παράγουν CL: αλαμπές πράσινο ή μπλέ.
- Τα συνήθη υλικά λείανσης και στίλβωσης (διαμάντι, αλούμινα, καρβοκορούνδιο) εκπέμπουν CL! Το δείγμα θα πρέπει να καθαρίζεται καλά με χρήση συσκευής υπερήχων πριν από την εξέταση του.
- ακάλυπτες συνηθεις γυάλινες αντικειμενοφόρες πλάκες εκπέμπουν αλλαμπές μπλέ χρώμα σε CL.

In this false-colored monochrome image, the epoxy is emitting significant CL, intermediate in intensity to the zones in the zircon!



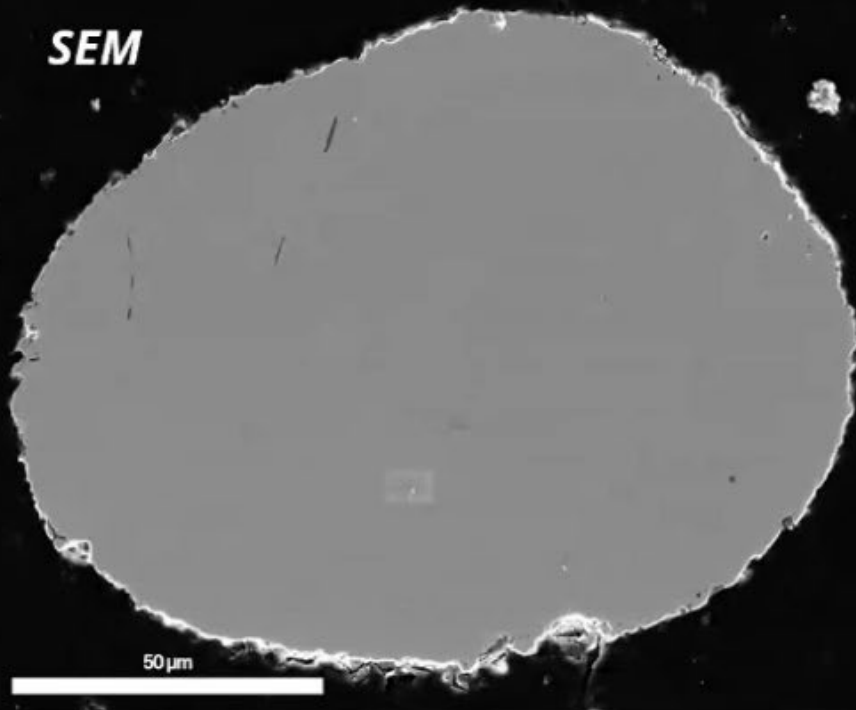


Απεικόνιση καθοδοφωταύγειας από ζιρκόνιο από κιμπερλίτη της περιοχής Yakutian (Ρωσία). Διακρίνεται ο υπολειματικός πυρήνας με λεπτή παλίνδρομη ζώνωση που αντικαθίσταται από ένα ομογενές περιθώριο.

Found on Web: Source, Bill Griffin, Elena Belousova; funded by Rio Tinto, BHP, Macquarie University

Intensity mapping of zircons

SEM



CL

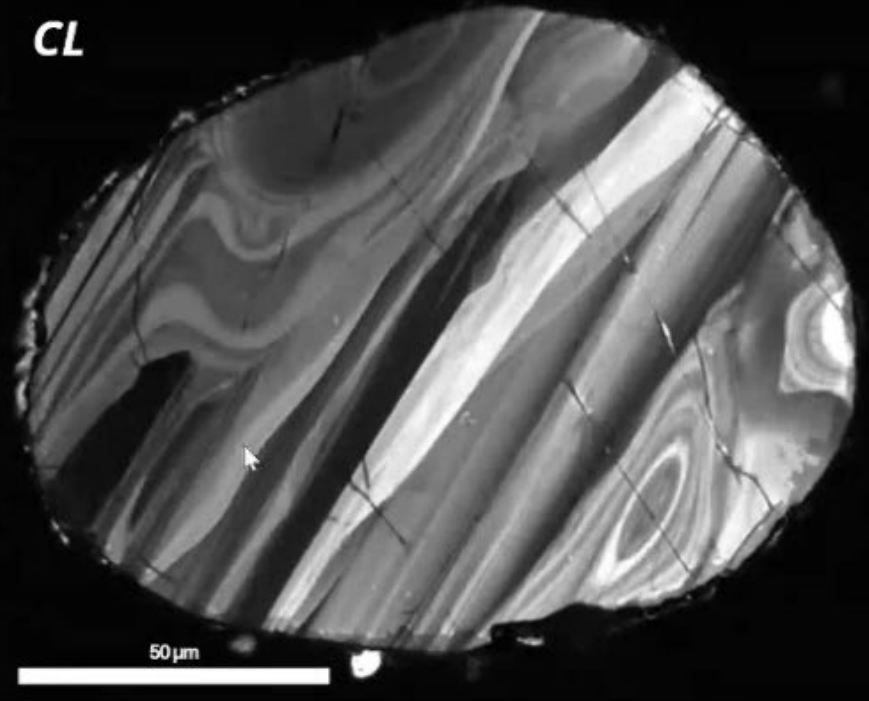
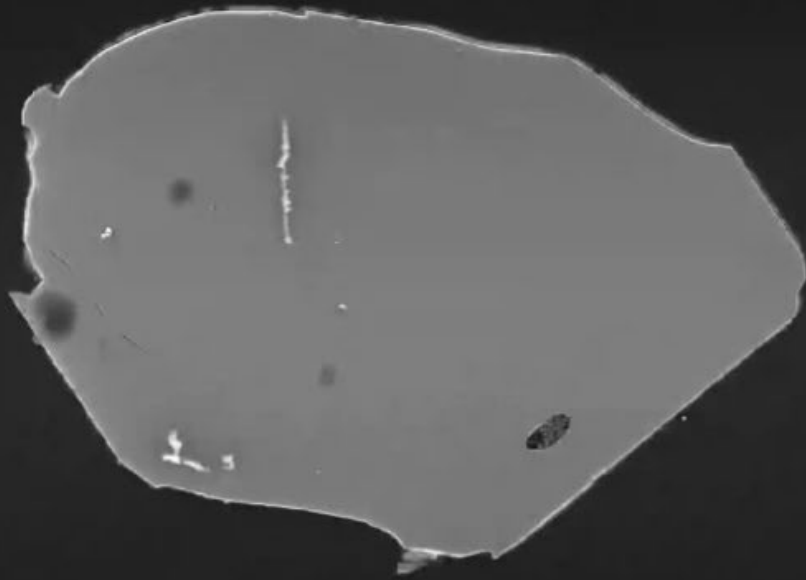


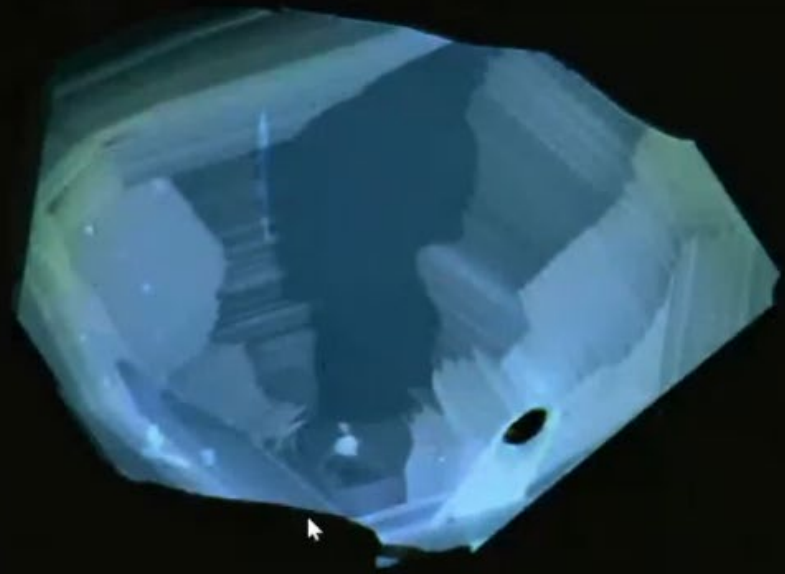
Image courtesy of Siri Simonsen and Bjørgunn H. Dalslåen (University of Oslo)

Intensity mapping of zircons

SEM



CL



50 μm



Sample courtesy of Dr. Chen Zhenyu
(Institute of Mineral Resources Beijing)

CL versus other SEM-based techniques

SE detection:

- Surface topography
- (Minor) Material contrast

BSE detection:

- Density/atomic number
- Material contrast

EBSD:

- Crystal structure
- Crystal orientation

WDS/EDS detection:

- Core transitions
- Quantitative composition

Cathodoluminescence:

- Composition
- Crystal structure
- Trace elements/dopants
- Crystal defects
- Ionization state

CL σε συνήθη ορυκτά -1

Class I: Native elements

- Diamond

Class II: Sulfides

- Sphalerite ZnS (important in phosphor industry)
- Cinnabar HgS
- Realgar AsS

Class III: Oxides

- Periclase MgO
- Spinel $MgAl_2O_4$ (synthetic only)
- Corundum, Ruby, Sapphire Al_2O_3
- Cassiterite SnO_2

CL σε συνήθη ορυκτά -2

Class IV: Halides

- Halite NaCl
- Fluorite CaF_2

Class V: Carbonates

- Calcite and Aragonite CaCO_3
- Rhodochrosite MnCO_3
- Witherite BaCO_3
- Strontianite SrCO_3
- Cerussite PbCO_3

CL σε συνήθη ορυκτά -3

Class VI: Sulfates, Tungstates

- Barites BaSO_4
- Anhydrite CaSO_4
- Gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Scheelite CaWO_4 (a common EPMA focus mineral)

Class VII: Phosphates

- Apatite $(\text{Ca}_5(\text{P})_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$

Class VIII: Silicates

- Quartz, Chalcedony, Tridymite, Cristobalite SiO_2
- Feldspars

CL σε συνήθη ορυκτά - 4

Class VIII: Silicates-continued

- Scapolite
- Kaolinite
- Serpentine
- Muscovite
- Tremolite
- Spodumene
- Wollastonite
- Benitoite $\text{BaTiSi}_3\text{O}_9$ - another EPMA bright light
- Beryl

CL σε συνήθη ορυκτά - 5

Class VIII: Silicates-continued

- Cordierite
- Epidote
- Olivine (Fe-free)
- Andalusite, Sillimanite, Kyanite Al_2SiO_5
- Garnets - limited sightings
- Zircon