



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΡΕΥΝΑΣ
ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΩΝ
ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών: Γεωεπιστήμες και Περιβάλλον

Μέθοδοι Έρευνας Ορυκτών & Πετρωμάτων

Προσδιορισμός Πορώδους & Ειδικής Επιφάνειας

Δρ. Βάια Ξανθοπούλου, Γεωλόγος

Κ Ε Ρ Α Μ Ο Σ

Κέντρο έρευνας Αρχαιο-υλικών

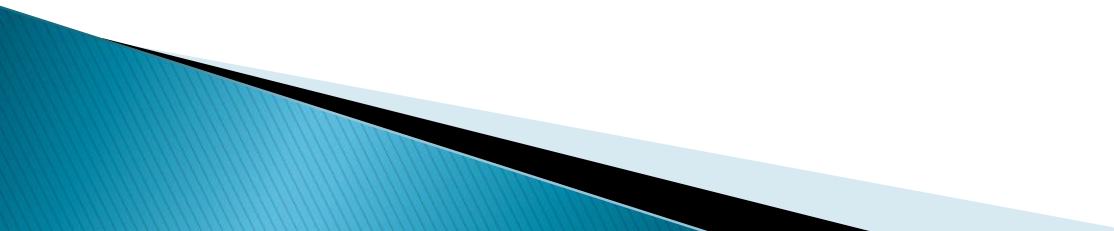


Εργαστήριο
Ηλεκτρονικής
Μικροσκοπίας και
Μικροανάλυσης

Η έννοια του πορώδους στην Γεωλογία

- ▶ Φυσικομηχανική ιδιότητα των πετρωμάτων
- ▶ Κατανόηση και εκτίμηση της συμπεριφοράς και της καταλληλότητας των πετρωμάτων ως δομικών λίθων, διακοσμητικών λίθων και αδρανών υλικών
- ▶ Φυσικομηχανικές ιδιότητες: (1) αντοχή, (2) ειδικό βάρος, (3) φαινόμενο βάρος, (4) πορώδες, (5) διαπερατότητα, (6) ελαστικότητα, (7) συμπίεστικότητα
- ▶ Εξαρτώνται από τις αντίστοιχες ιδιότητες των ορυκτολογικών συστατικών τους, την κρυσταλλική δομή (μέγεθος και σχήμα κόκκων) και τη διάταξη του κρυσταλλικού πλέγματος

Η έννοια του πορώδους στην Γεωλογία

- ▶ Τεχνική γεωλογία
 - ▶ Γεωλογία πετρελαίων
 - ▶ Ορυκτές πρώτες ύλες
 - ▶ Υδρογεωλογία
 - ▶ Κοιτασματολογία
 - ▶ Αρχαιολογικά κεραμικά
- 

Πορώδες

- ▶ Αν θεωρήσουμε ένα δείγμα πετρώματος το πορώδες ορίζεται: από τον φαινόμενο (ολικός) όγκο του (V_T) ο οποίος συνίσταται από τον όγκο που καταλαμβάνουν οι κόκκοι του πετρώματος (V_s) και από τον όγκο των κενών (πόρων) του πετρώματος, V_p
- ▶ Το πορώδες (ϕ) δίδεται από τη σχέση : $\phi = \frac{V_p}{V_T}$ (σε %)

Πορώδες

- ▶ **Ολικό πορώδες (total porosity):** Αναφέρεται στα πάσης φύσεως κενά ανεξαρτήτως της μορφής και της διασυνδεσιμότητας τους
- ▶ **Ενεργό πορώδες (effective porosity):** Εκείνο που αντιστοιχεί σε πόρους που επικοινωνούν (συνδέονται)
 - Εκφράζει την δυνατότητα του πετρώματος να αποθηκεύει ρευστά (νερό, πετρέλαιο, αέριο)
- ▶ **Υπολειμματικό πορώδες (residual porosity):** ορίζεται εκείνο που αντιστοιχεί στο ποσοστό των πόρων (κενών) οι οποίοι είναι απομονωμένοι μεταξύ τους

Πορώδες

Ανάλογα τα επιγεννηματικά ή συγγενηματικά κενά, το πορώδες αναφέρεται ως:

- ▶ **Πρωτογενές** πορώδες: δημιουργείται κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης και αποτελείται είτε από τα διάκενα μεταξύ των κόκκων (διακοκκικό- intergranular), είτε από διάκενα μέσα στη δομή των κόκκων (ενδοσωματιδιακό- intraparticle)
- ▶ **Δευτερογενές** πορώδες: δημιουργείται από διεργασίες διάλυσης, αφυδάτωσης ή ανακρυστάλλωσης, που προκαλούνται αργότερα από τεκτονικές δράσεις οι οποίες επιφέρουν ρωγματώσεις και πτυχώσεις

Πορώδες

- ▶ Κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα
 - Πρωτογενές πορώδες ελέγχεται από:
Σχήμα, διάταξη και την κατανομή του μεγέθους των κόκκων τους
 - Δευτερογενές πορώδες: μηχανικές και γεωχημικές διεργασίες
- ▶ Μείωση του πορώδους????

Ειδική επιφάνεια– Τι είναι;

“ Η ειδική επιφάνεια είναι το μέσο, μέσω του οποίου το στερεό αλληλεπιδρά με τα περιβάλλοντα υλικά (υγρό, αέριο ή άλλο στερεό).”

Πως δημιουργείται μια επιφάνεια;

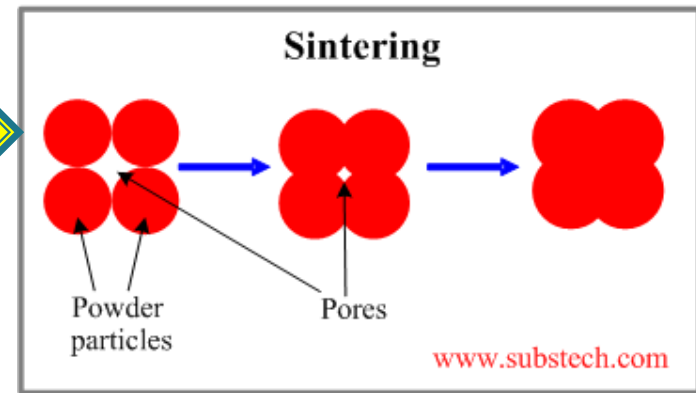
Δημιουργείται από τον διαχωρισμό των σωματιδίων και την παραγωγή-σχηματισμό πόρων:

- ▶ Μείωση του μεγέθους
 - Λείανση
 - Κονιοποίηση
 - Παρασκευή δείγματος στην νανοκλίμακα
- ▶ Σχηματισμός πόρων
 - Μερική αποσύνθεση
 - Έκπλυση

Πως καταστρέφεται μια επιφάνεια;

Καταστρέφεται με:

- ▶ Πυροσυσωματώση (sintering)



- ▶ Τήξη (melting)

- ▶ Φαινόμενο Ostwald ripening

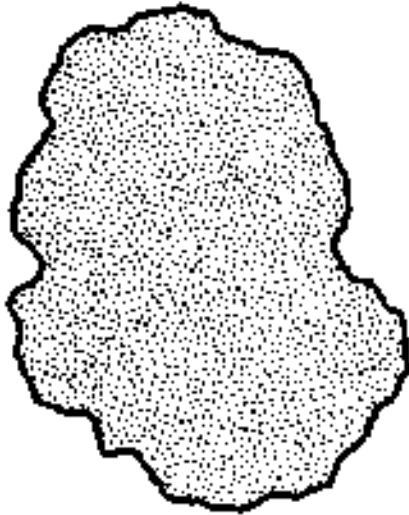


Ostwald ripening	
aggregation	
sedimentation	

Ειδική επιφάνεια

- ▶ Αναφέρεται στην επιφάνεια υλικού ανά μονάδα βάρους και εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος των κόκκων και το είδος των αργιλικών ορυκτών που συνυπάρχουν
- ▶ Όσο πιο μεγάλη είναι η ειδική επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα προσρόφησης, πχ. Υπάρχει **σημαντική διαφοροποίηση** στην ικανότητα προσρόφησης νερού μεταξύ άμμου και αργίλο

Πορώδη υλικά



Μη πορώδες στερεό

- Μικρή ειδική επιφάνεια
- Μικρός όγκος πορώδους



Πορώδες στερεό

- Μεγάλη ειδική επιφάνεια
- Μεγάλος όγκος πορώδους

Σχεδόν όλα τα στερεά είναι πορώδη εκτός των κεραμικών που είναι ψημένα σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες.

Μέτρηση του πορώδους

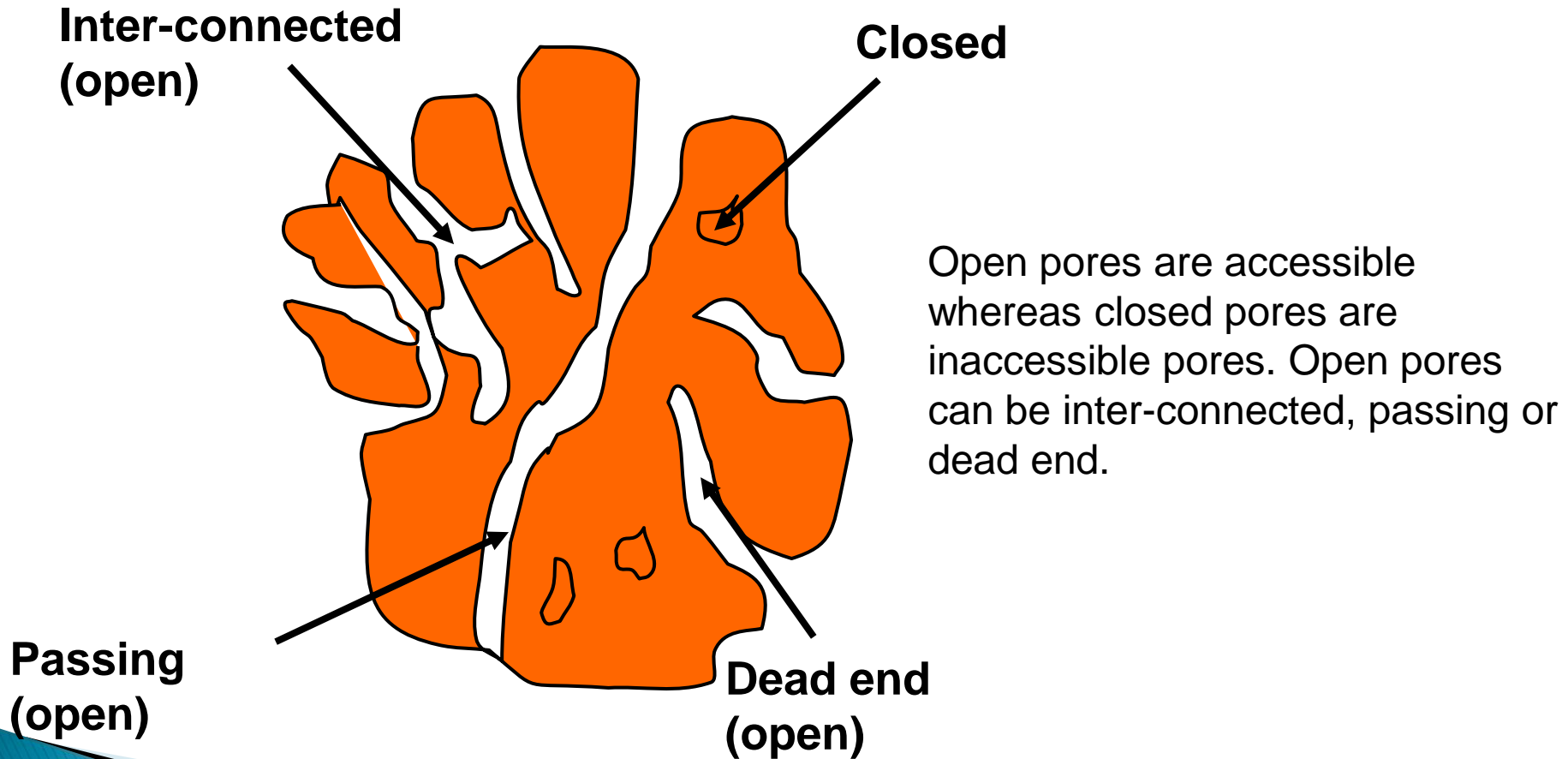
4 παράμετροι χρησιμοποιούνται ως μέτρο του πορώδους: η ειδική επιφάνεια, ο όγκος, το μέγεθος και η κατανομή των πόρων

$$\text{Porosity, \%} = \frac{\text{Volume of pores}}{\text{Volume of solid (including pores)}} \times 100$$

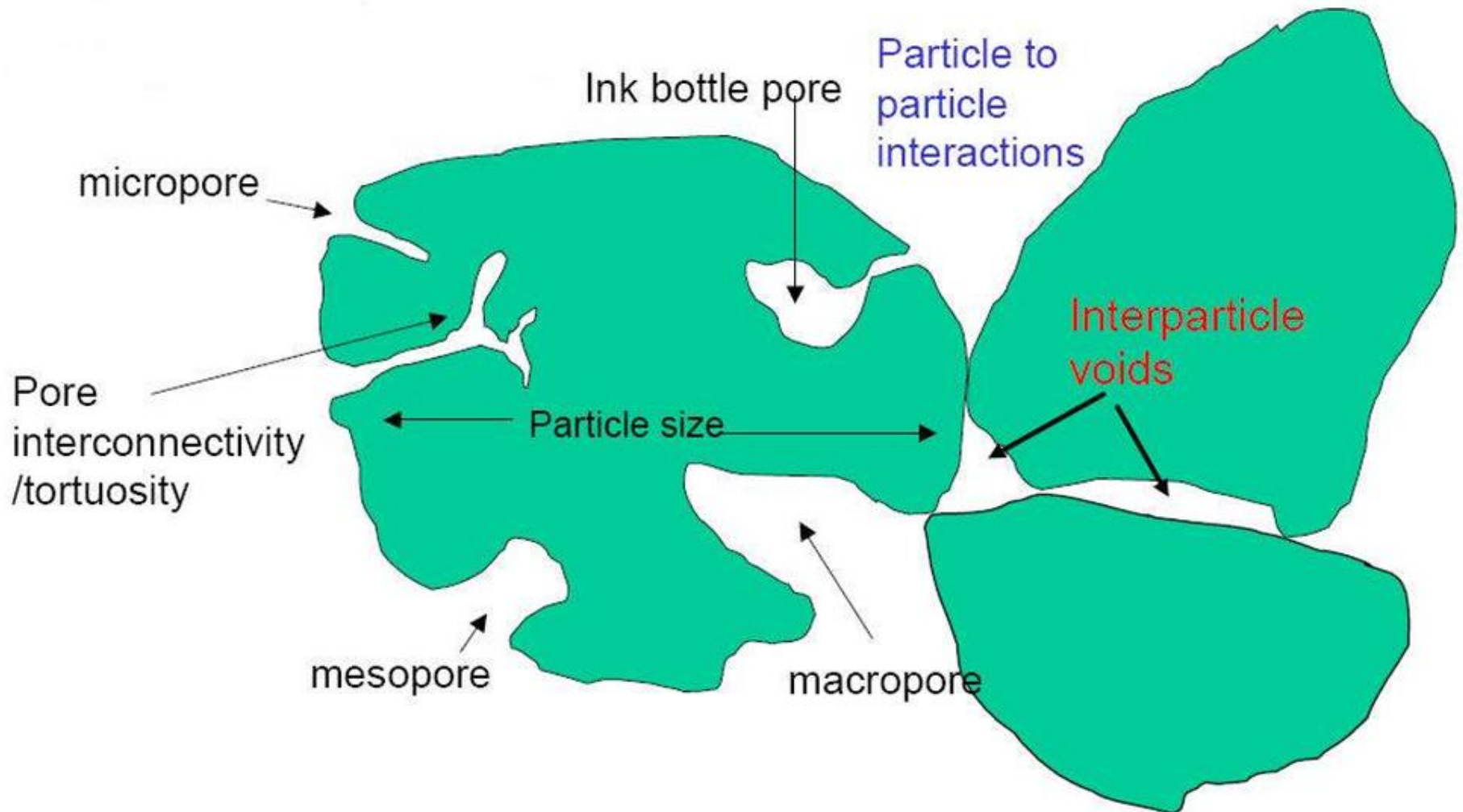
$$\text{Specific Surface Area, m}^2/\text{g} = \frac{\text{Total surface area, m}^2}{\text{Mass of the solid, g}}$$

$$\text{Specific Pore volume, cm}^3/\text{g} = \frac{\text{Total pore volume, cm}^3}{\text{Mass of the solid, g}}$$

Open vs. Closed Pores

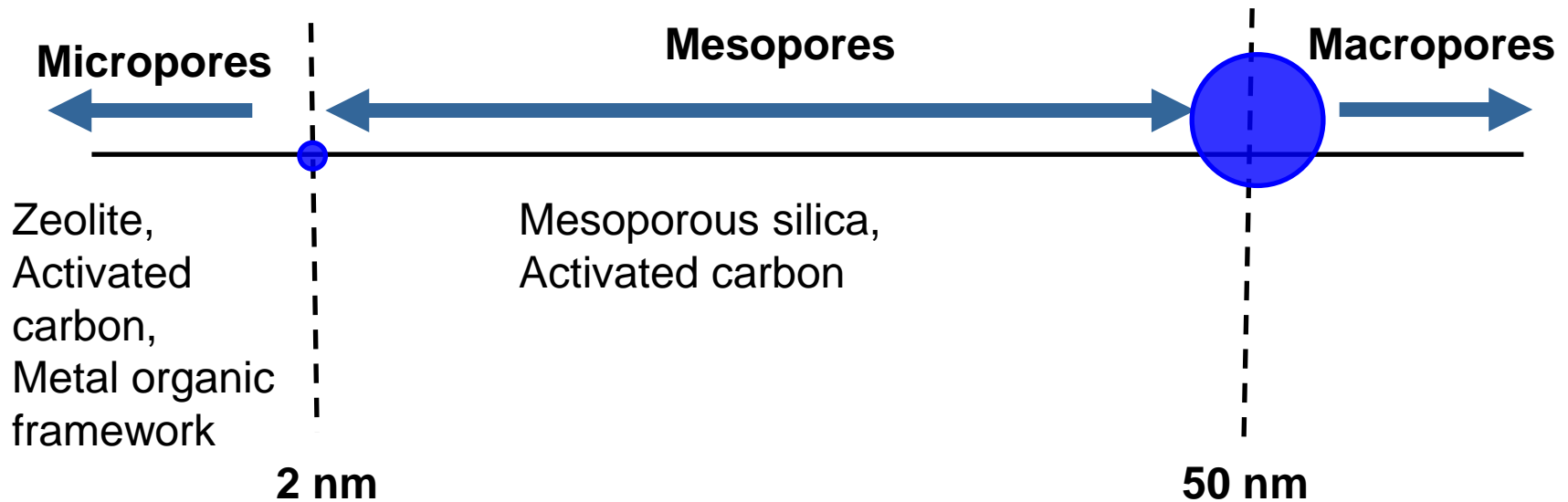


Open vs. Closed Pores



Μέγεθος πόρων κατ' IUPAC

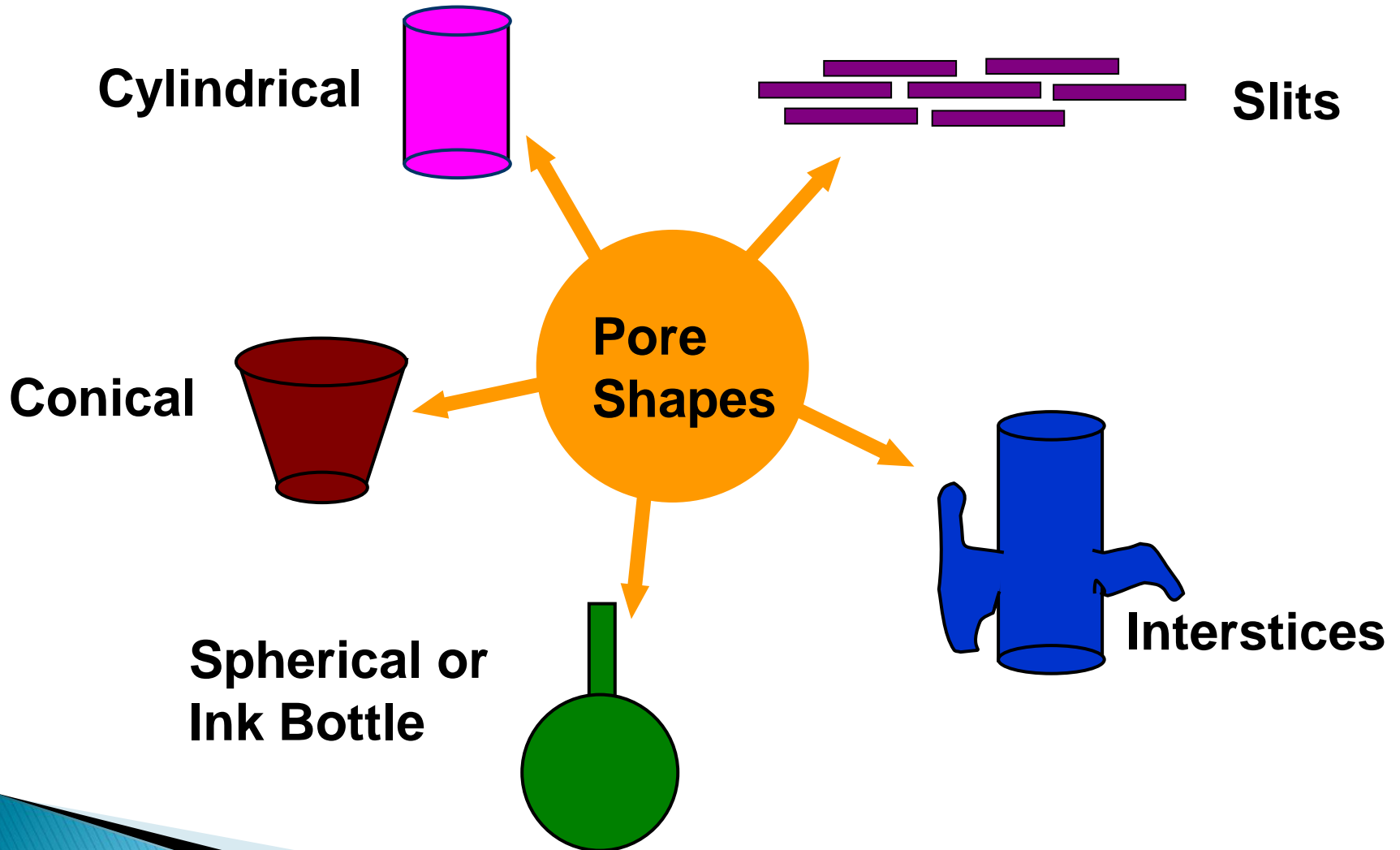
(International Union of Pure and Applied Chemistry)



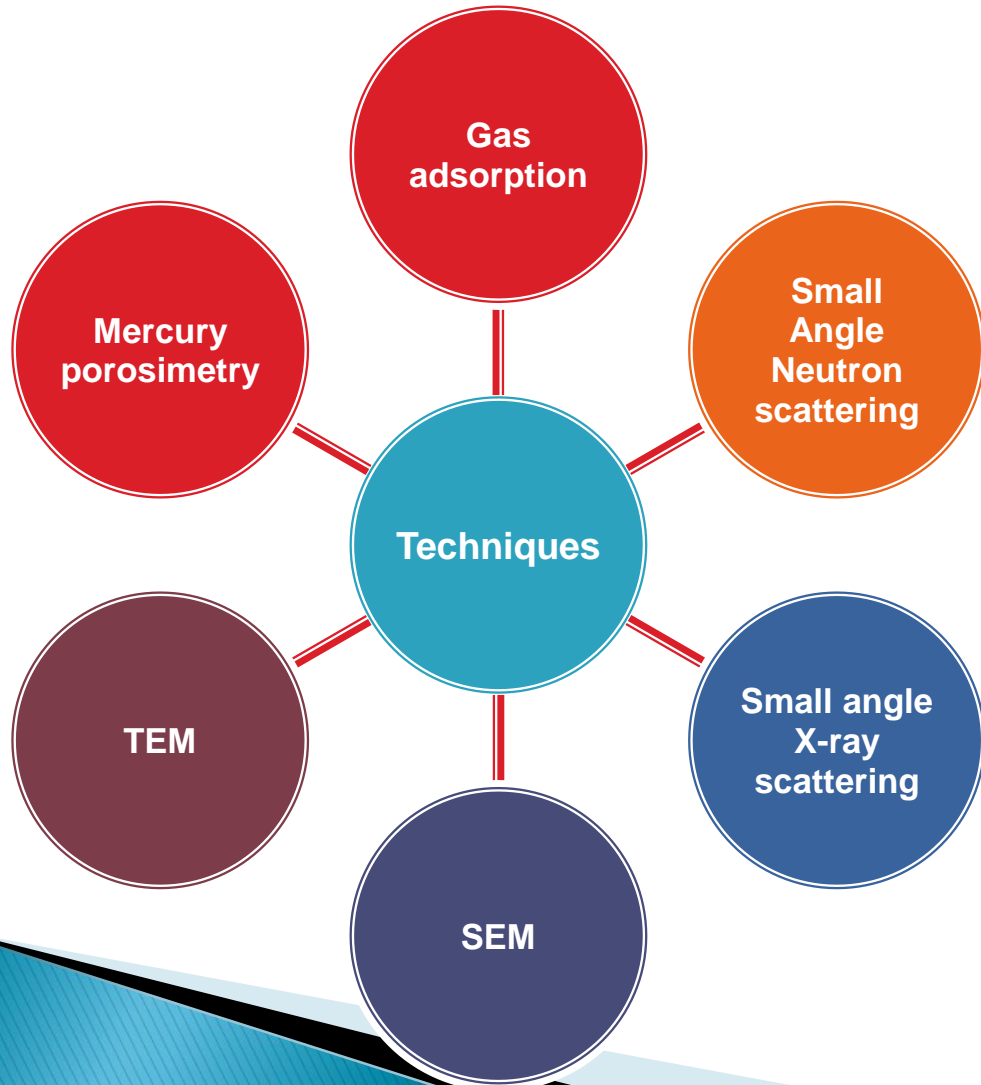
Τα πορώδη υλικά κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- Μικροπορώδη υλικά με άνοιγμα πόρων < 2 nm
- Μεσοπορώδη υλικά με άνοιγμα πόρων > 2 και 50 nm
- Μακροπορώδη υλικά με άνοιγμα πόρων > 50 nm

Σχήμα των πόρων

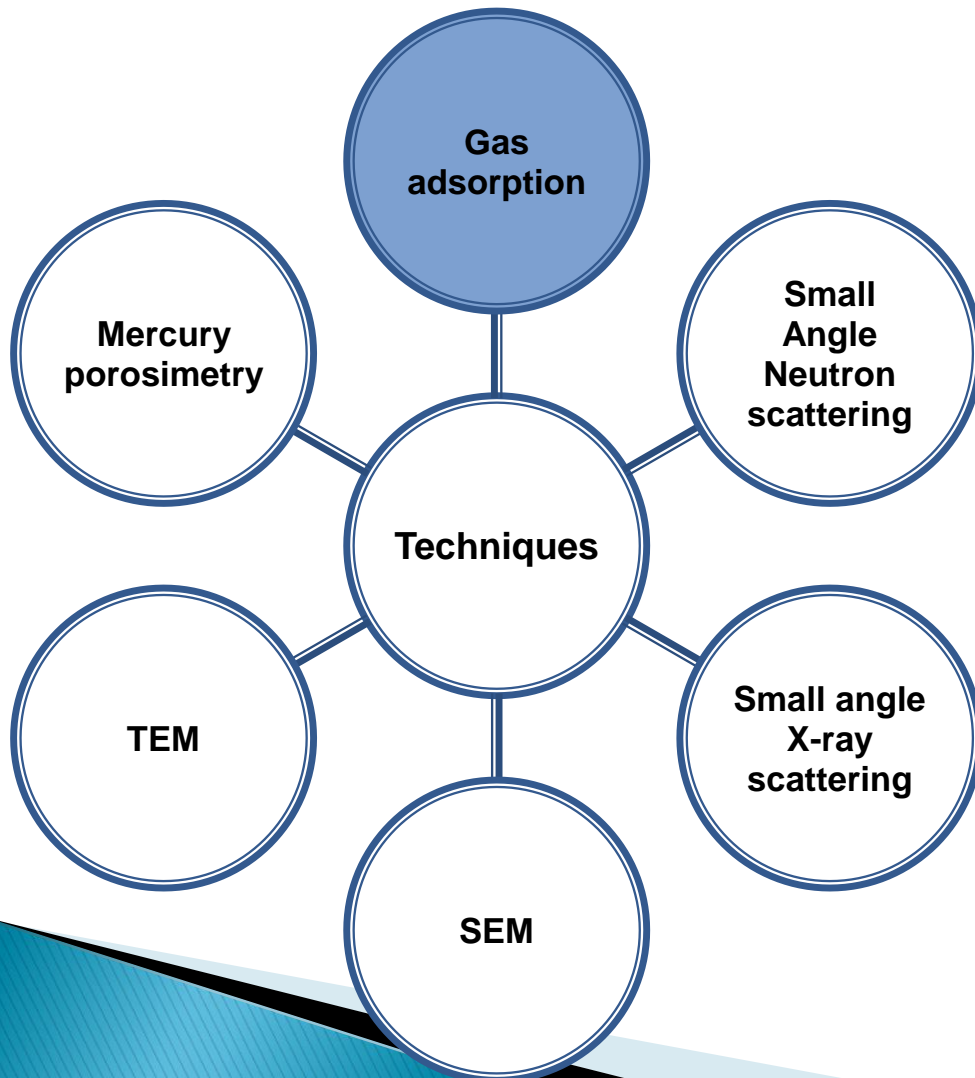


Τεχνικές μέτρησης του πορώδους

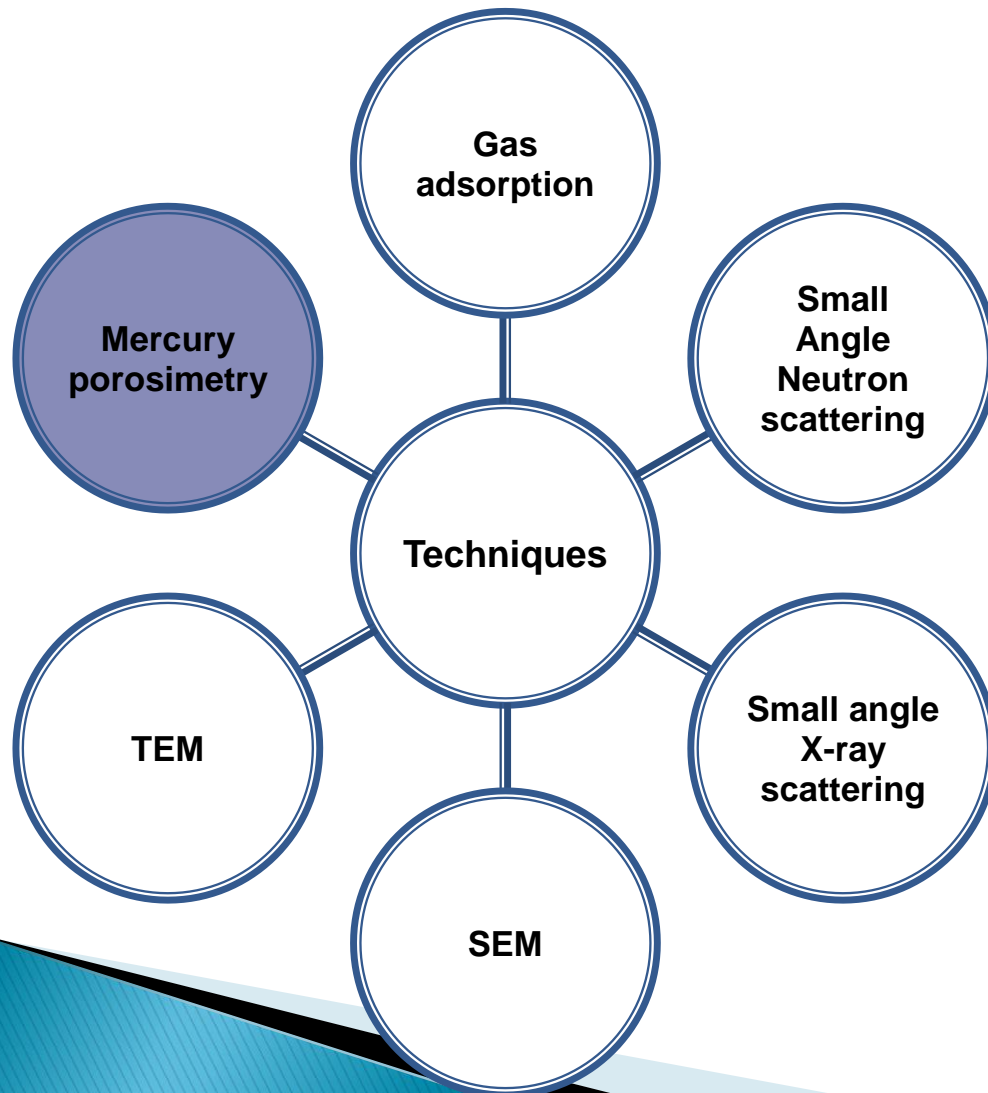


Τεχνικές μέτρησης του πορώδους

- Μετράει μόνο ανοιχτούς πόρους
- Μέγεθος πόρων: 0.4 nm – 50 nm
- Εύκολη τεχνική
- Συνιστώμενη τεχνική

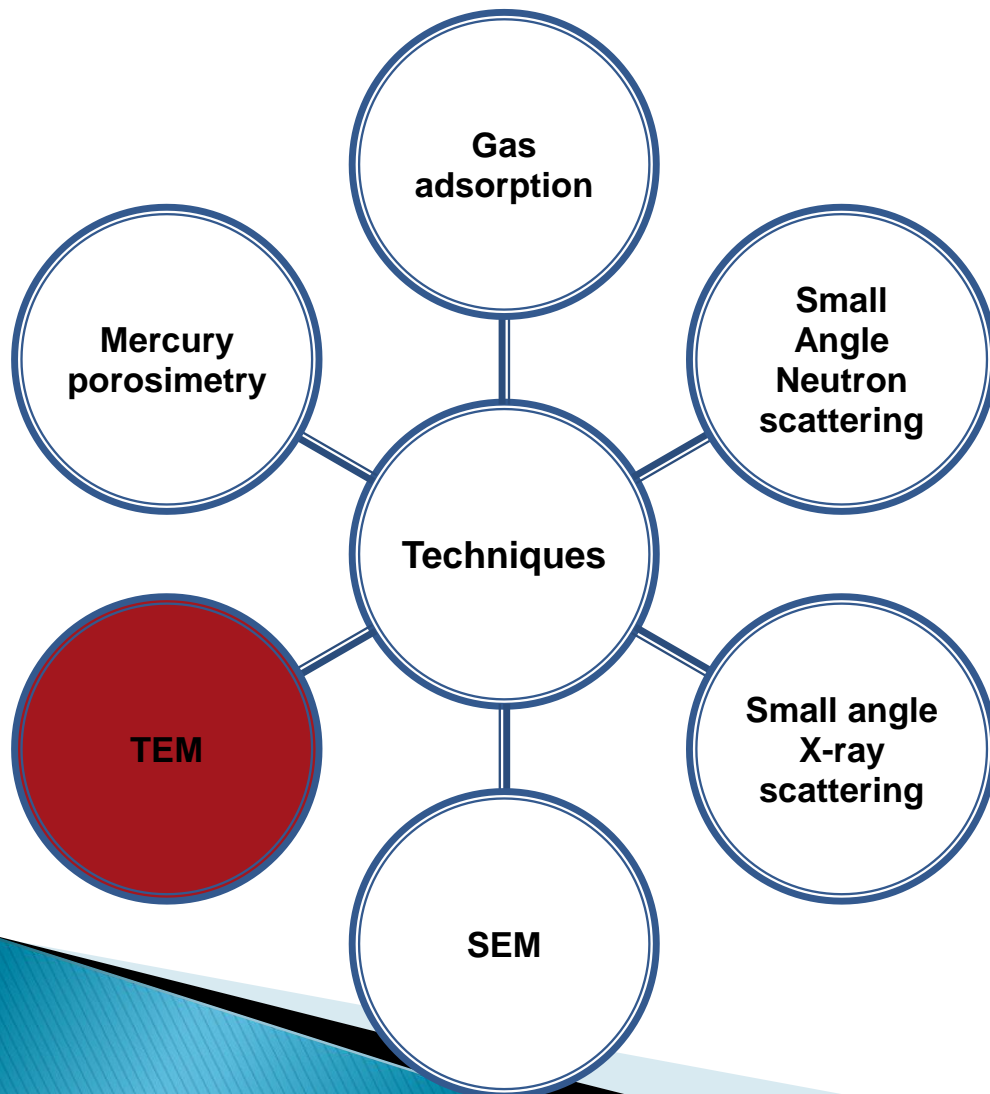


Τεχνικές μέτρησης του πορώδους



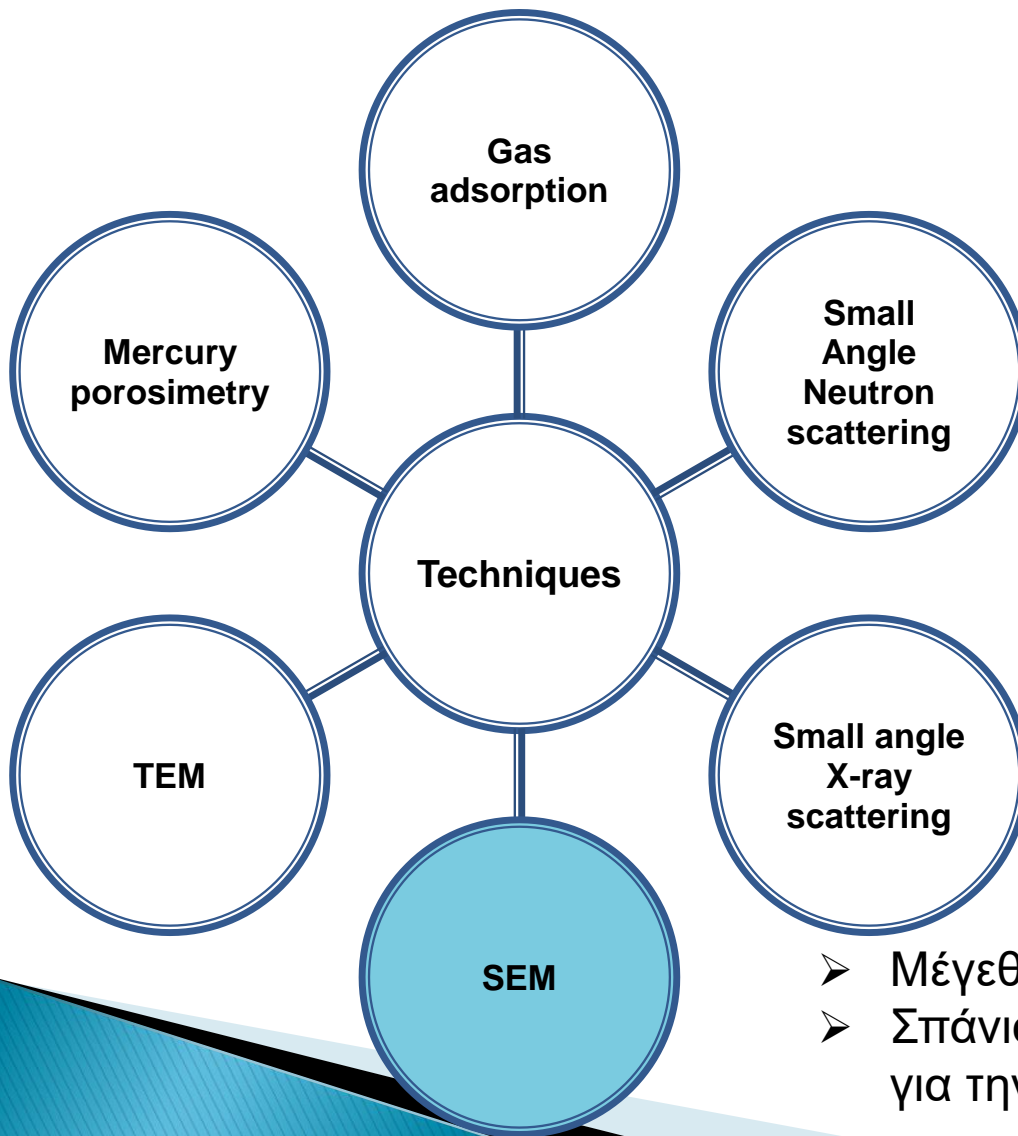
- Μετράει μόνο ανοιχτούς πόρους
- Μέγεθος πόρων > 1.5 nm
- Εύκολη τεχνική
- Συνιστώμενη τεχνική

Τεχνικές μέτρησης του πορώδους



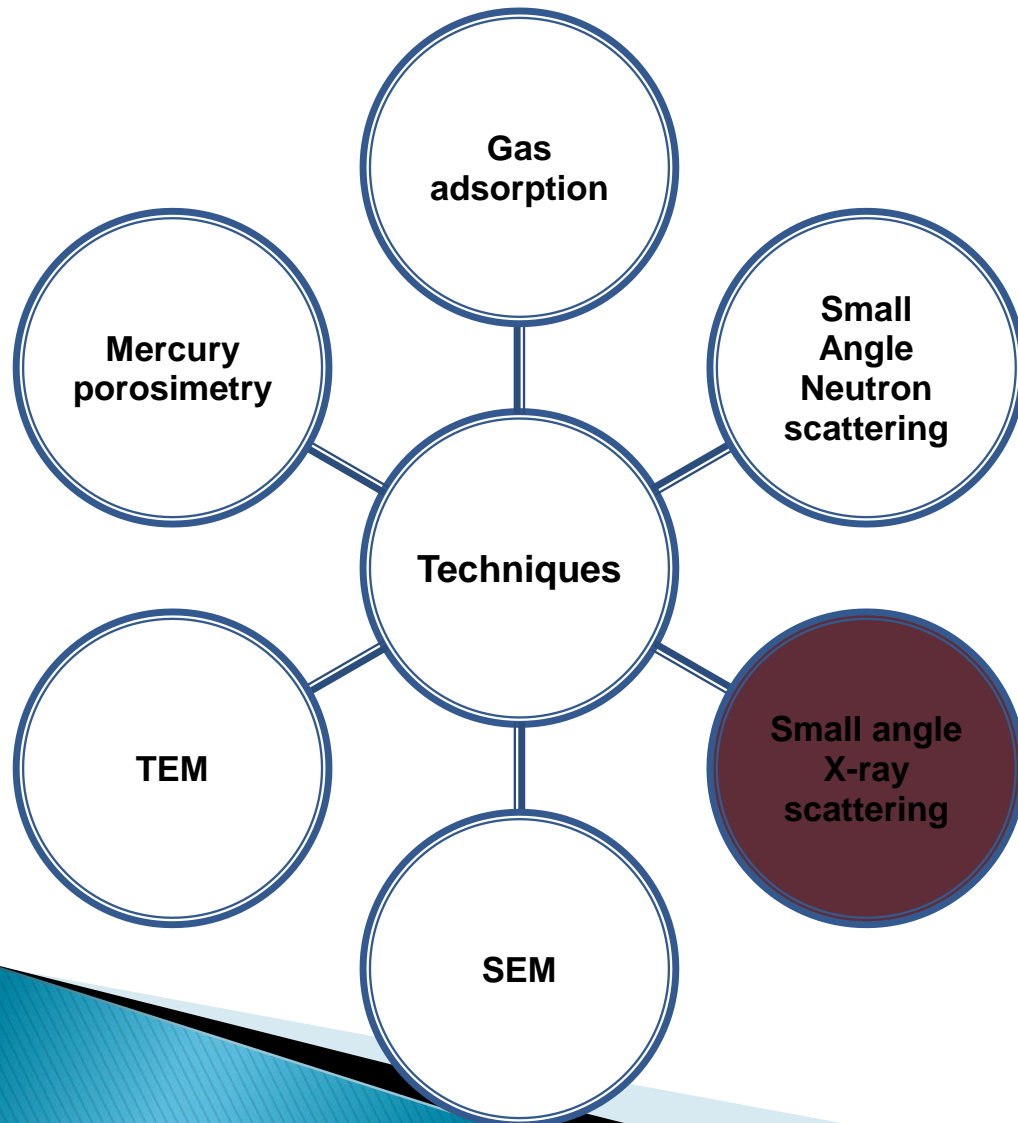
- Παρέχει πληροφορίες σχετικά με την σύνδεση των πόρων
- Το μέγεθος των πόρων μπορεί να μετρηθεί αν τα υλικά περιέχουν διατεταγμένους πόρους
- Σπάνια χρησιμοποιείται για την ανάλυση πόρων

Τεχνικές μέτρησης του πορώδους



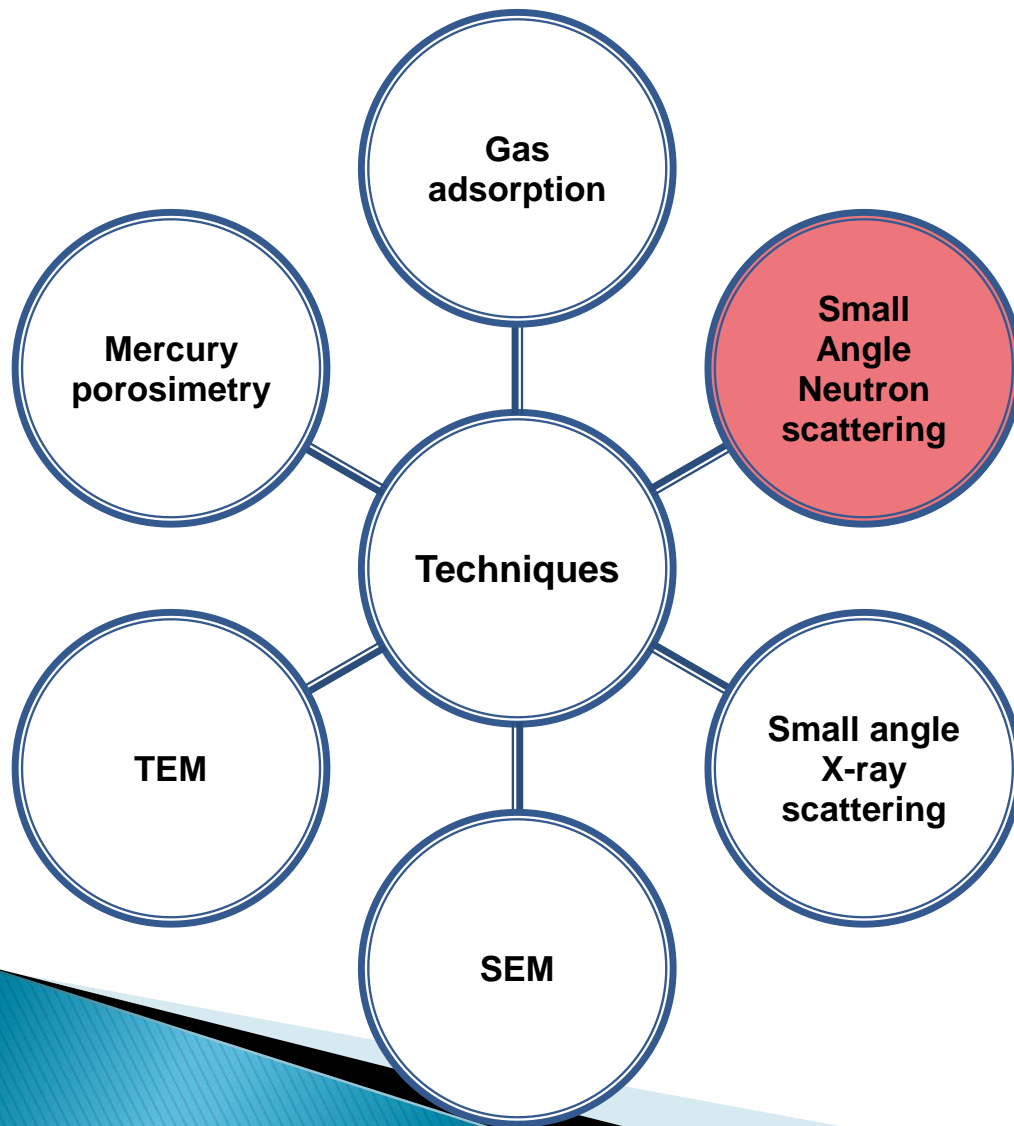
- Μέγεθος πόρων > 5nm
- Σπάνια χρησιμοποιείται για την ανάλυση πόρων

Τεχνικές μέτρησης του πορώδους



- Κάθε μέγεθος πόρου
- Κλειστό και ανοιχτό πορώδες

Τεχνικές μέτρησης του πορώδους



- Κάθε μέγεθος πόρου
- Κλειστό και ανοιχτό πορώδες
- Ακριβή τεχνική

Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ



ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

- ▶ Προσρόφηση (desorption) είναι η διεργασία κατά την οποία μόρια ενός αερίου ή υγρού έρχονται σε επαφή και προσκολλώνται σε μία **στερεή επιφάνεια**
- ▶ Σε αντίθεση, απορρόφηση- absorption είναι η διαλυτοποίηση των μορίων μέσα στο μέσο συλλογής, κυρίως σε υγρά

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

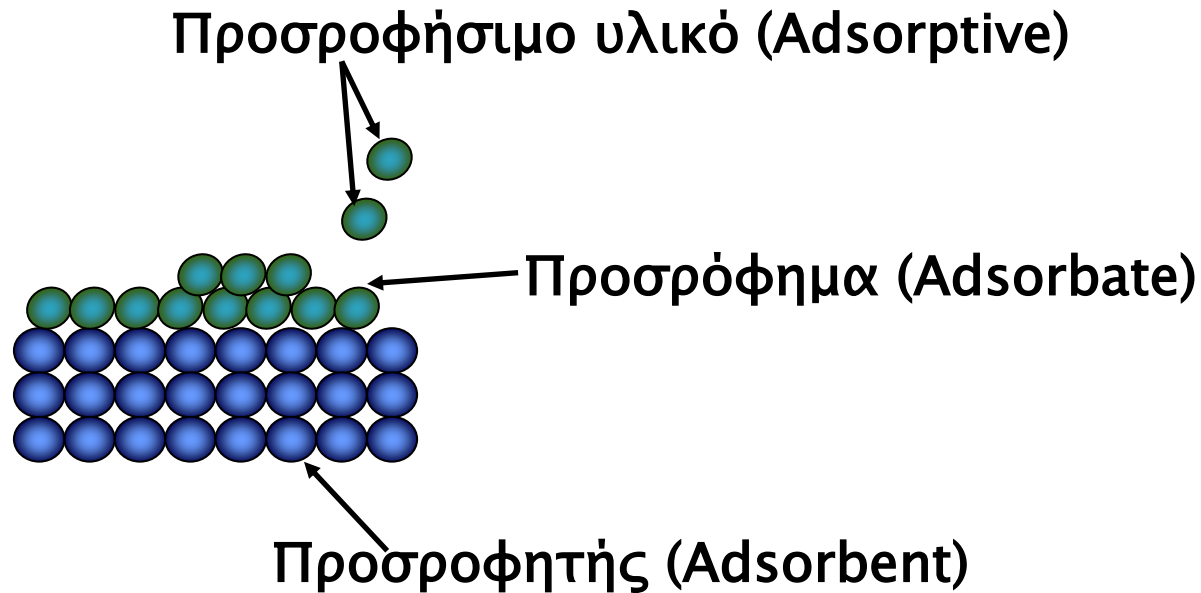
Η διεργασία της προσρόφησης διακρίνεται σε φυσική και χημική

- ❖ Φυσική προσρόφηση (προσρόφηση van der Waals)
 - ▶ Δεν υπάρχει χημικός δεσμός με την επιφάνεια, αλλά τα μόρια κρατούνται στην επιφάνεια με άλλες δυνάμεις συνοχής
 - ▶ Ηλεκτροστατικές (δυνάμεις van der Waals)
 - ▶ Αντιστρεπτή διεργασία (με θέρμανση ή μείωση της πίεσης)
 - ▶ Εξώθερμη-απελευθερώνεται θερμότητα ($\sim 0,1$ kcal/mole)

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

- ❖ Χημειορρόφηση (π.χ. μετατροπή SO_2 σε SO_3 σε ενεργό άνθρακα, προσρόφηση H_2S σε οξείδια Fe)
- ▶ Χημική σύνδεση με αντίδραση (υπάρχει πραγματικός χημικός δεσμός)
- ▶ Μη-αντιστρεπτή διεργασία
- ▶ Ισχυρά εξώθερμη διεργασία ($\sim 10 \text{ kcal/mole}$) [\sim ίδιες θερμότητες με αντιδράσεις]

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ-ΟΡΙΣΜΟΙ



- ▶ Το στερεό υπόστρωμα πάνω στο οποίο επιτελείται η προσρόφηση καλείται προσροφητικό μέσο ή προσροφητής (adsorbent, sorbent)
- ▶ Τα προσροφούμενα είδη είναι το προσροφήσιμο υλικό (adsorptive)
- ▶ Το προσροφημένο υλικό είναι το προσρόφημα (adsorbate, sorbate)
- ▶ Προσρόφηση συμβαίνει στις εσωτερικές επιφάνειες των πόρων
- ▶ **Μονόστρωμα:** ένα στρώμα πάχους ενός μορίου που καλύπτει πλήρως τον προσροφητή

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ-ΟΡΙΣΜΟΙ

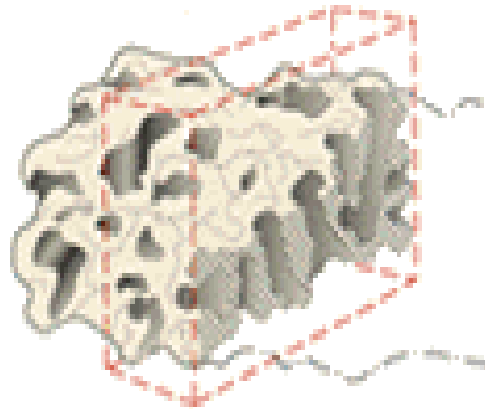
- ▶ Η προσρόφηση μπορεί να περιορίζεται στη δημιουργία ενός στρώματος προσροφημένων μορίων, ή να προχωρά σε εναπόθεση επιπλέον στρωμάτων και να είναι πολυστρωματική.
- ▶ Η χημειορόφηση μπορεί να είναι **ΜΟΝΟ** μονοστρωματική, λόγω του μήκους του χημικού δεσμού.
- ▶ Εκρόφηση είναι το αντίθετο της προσρόφησης, δηλαδή η αναχώρηση του προσροφημένου μορίου από την επιφάνεια.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ-ΟΡΙΣΜΟΙ

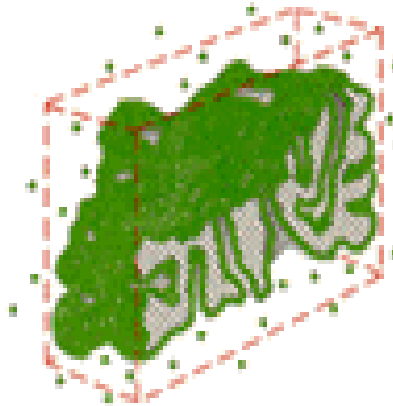
- ▶ Η προσρόφηση είναι εξώθερμη διεργασία, και επομένως αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας.
- ▶ Οι μετρήσεις για φυσιορόφηση γίνονται κοντά στο κρίσιμο σημεία για το προσροφούμενο, όπως 77K για άζωτο, 298K για νερό, 273K για CO₂

ΦΥΣΙΚΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

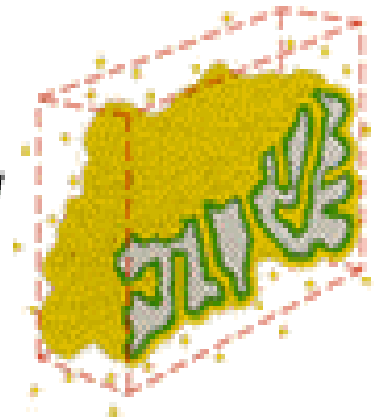
1) A section of one greatly enlarged particle of a solid



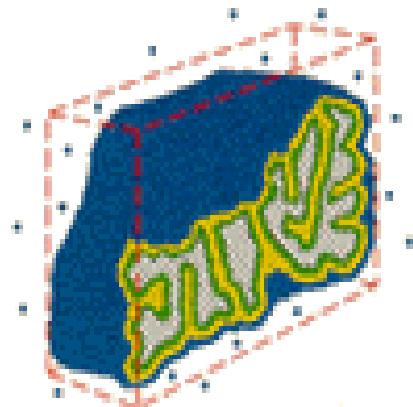
2) The monolayer of adsorbed molecules; approximately 20% saturation.



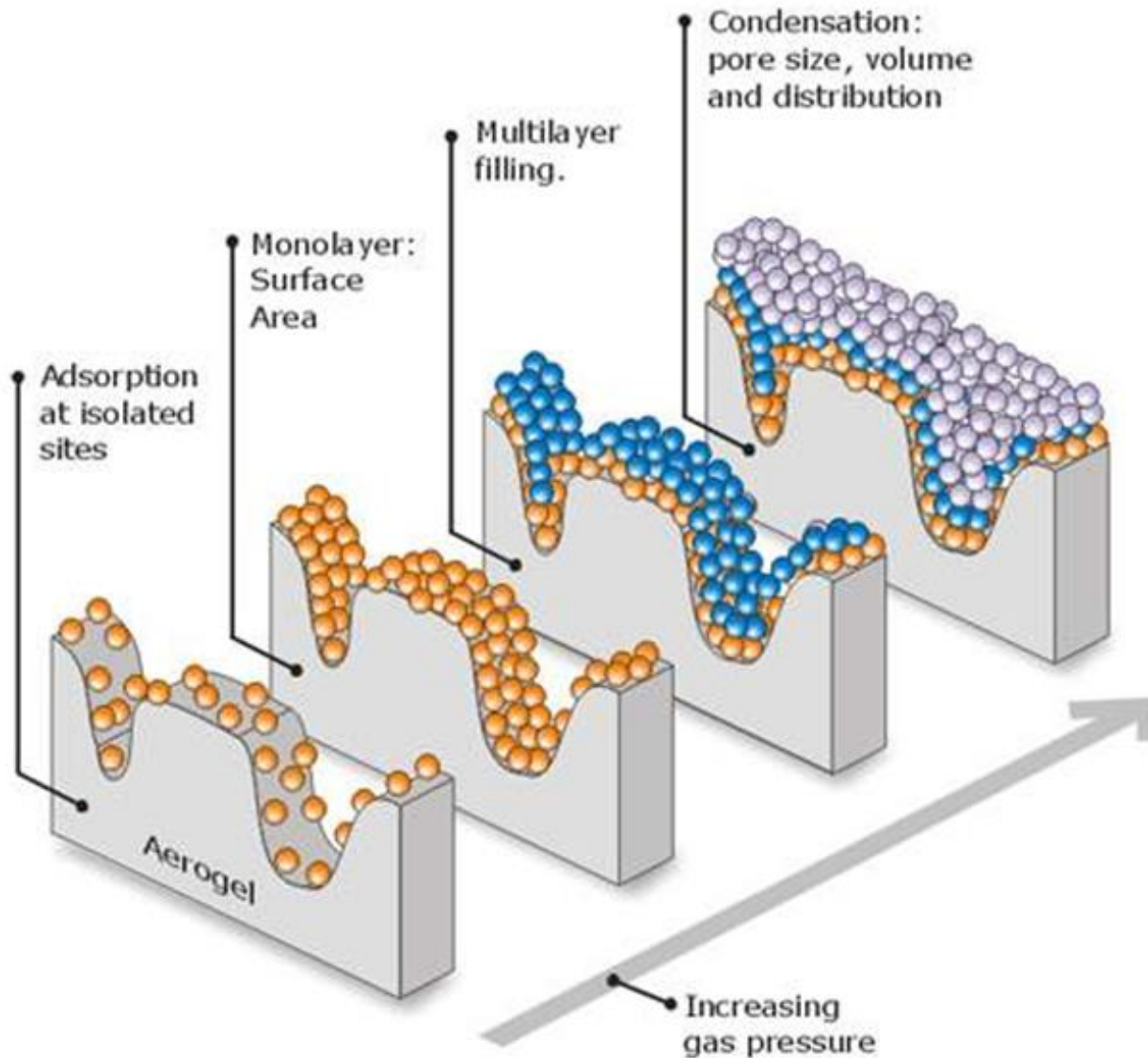
3) The multilayer/capillary condensation stage; approximately 70% saturation.



4) Total pore volume filling; approximately 100% saturation.



ΠΛΗΡΩΣΗ ΠΟΡΩΝ



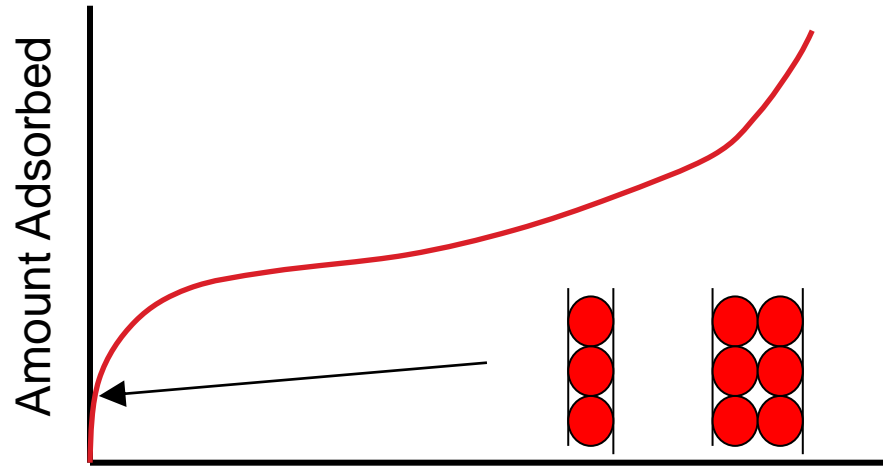
ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ

- Η ικανότητα ενός προσροφητή να προσροφήσει μία συγκεκριμένη ουσία είναι ανάλογη του MB της ουσίας και αντιστρόφως ανάλογη της τάσης ατμών της.
- Τα περισσότερα δεδομένα προσδιορίζονται σε συνθήκες ισορροπίας, δηλαδή στη μέγιστη δυνατή ποσότητα ατμών που μπορεί να προσροφηθεί στις δεδομένες συνθήκες.
- Δύο οι κυριότερες μεταβλητές: **θερμοκρασία και πίεση**
Δύο ειδών διαγράμματα ισορροπίας:
 - (α) ισόθερμες – σε σταθερή T , και
 - (β) ισοβαρείς – σε σταθερή P .
- Η ισόθερμος καμπύλη δείχνει την ικανότητα προσρόφησης ως προς τη μερική πίεση (ή τη συγκέντρωση) της προσροφούμενης ουσίας σε μία θερμοκρασία.

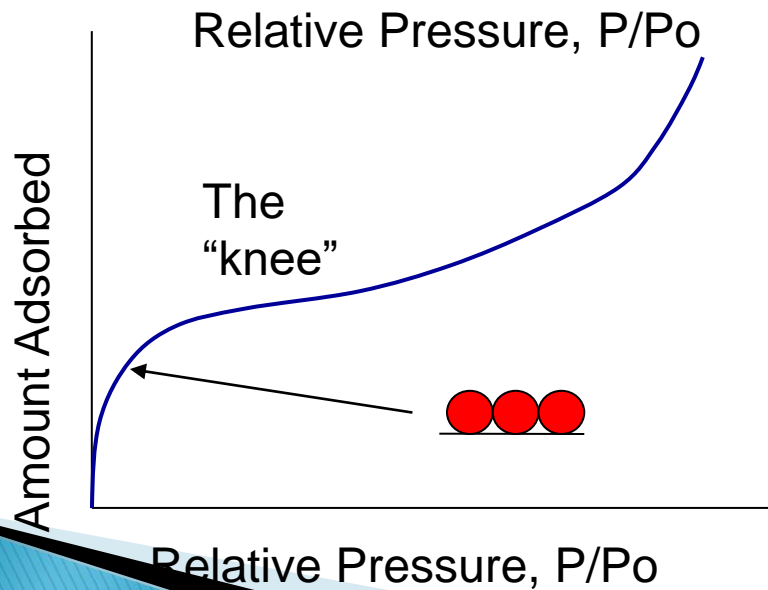
ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ

- ▶ Μετά την αποκατάσταση ισορροπίας μεταξύ των δύο φάσεων (αέριας και στερεάς), η ποσότητα του αερίου (n) που έχει προσροφηθεί ανά μονάδα μάζας στερεού, εξαρτάται:
 - Θερμοκρασία T , την πίεση ισορροπίας του αερίου P , και τη φύση των μορίων αερίου και στερεού που σχετίζονται με την ισχύ της αλληλεπίδρασης των μορίων
 - $n = f(P, T, \text{αέριο, στερεό})$
 - $n = f(P/P_0)T$ όπου P_0 η τάση ατμών του σώματος που προσροφάται στη συγκεκριμένη θερμοκρασία

Προσρόφηση αερίου

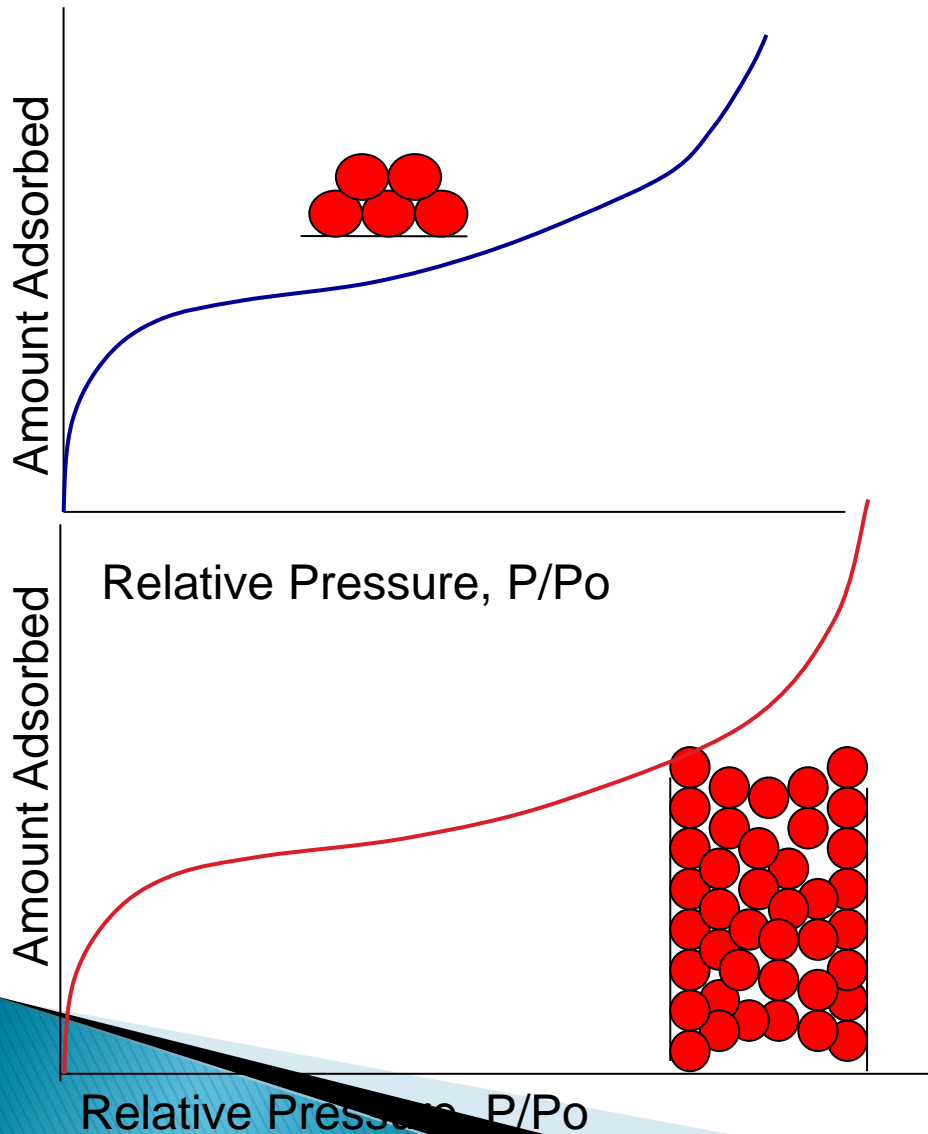


Πολύ χαμηλή πίεση
(συμπλήρωση των
μικροπόρων)



Χαμηλή πίεση (μονόστρωμα
ή μονομοριακό στρώμα)

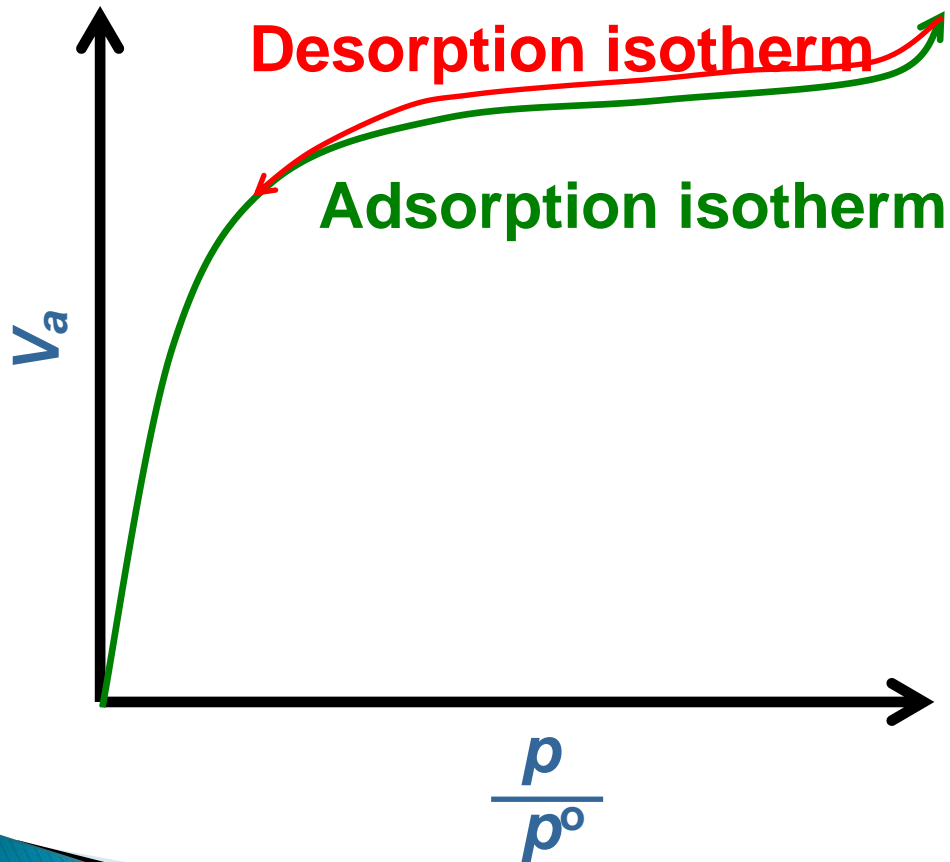
Προσρόφηση αερίου



Μέση πίεση
(πολυστρωματική)

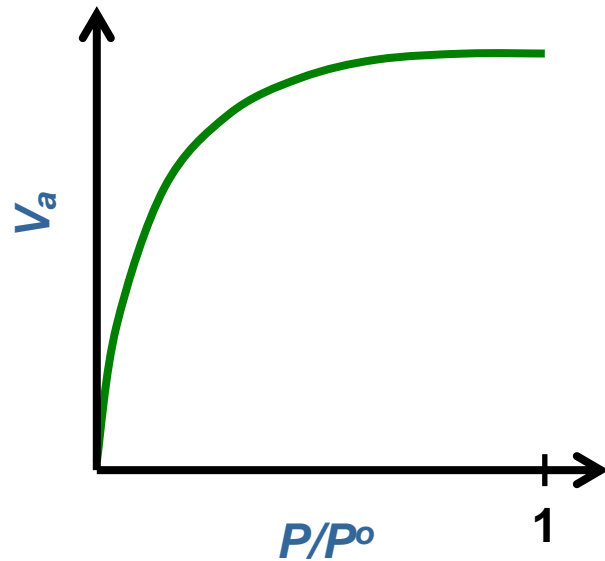
Υψηλή πίεση
(τριχοειδής συμπίκνωση)

Προσρόφηση αερίου: ισόθερμος



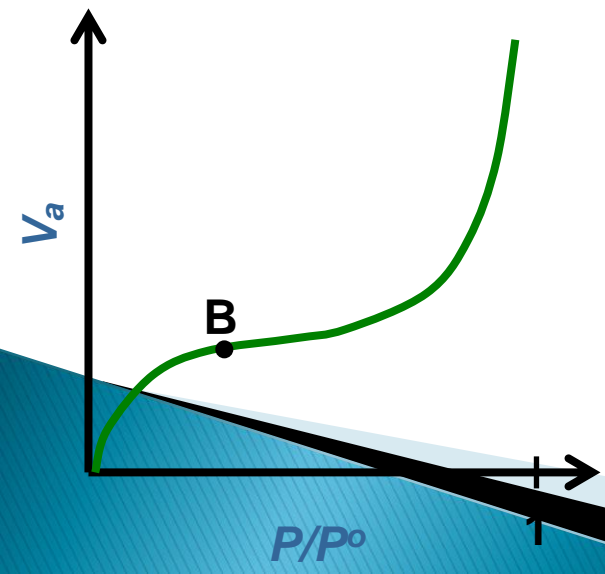
- Ισόθερμος είναι η μέτρηση του όγκου του αερίου του προσροφούμενου αερίου σε σταθερή θερμοκρασία ως συνάρτηση της πίεσης του αερίου.
- Οι ισόθερμες ταξινομούνται σε 6 κλάσεις.

Προσρόφηση αερίου: ισόθερμος



Τύπος I ή Langmuir

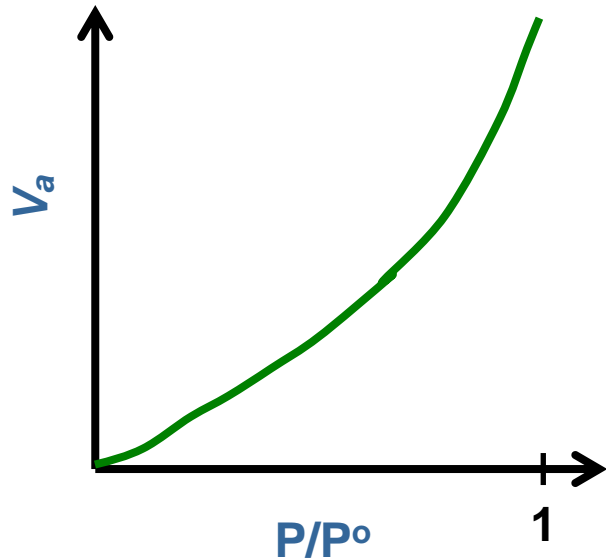
- Η ισόθερμη τύπου I (Langmuir) είναι κοίλη ως προς τον άξονα P/P_0 και το η πλησιάζει μια οριακή τιμή καθώς το P/P_0 τείνει να γίνει 1. Η ισόθερμη τύπου I δίνεται από στερεά με μικρούς πόρους και μικρή επιφάνεια.



Τύπος II

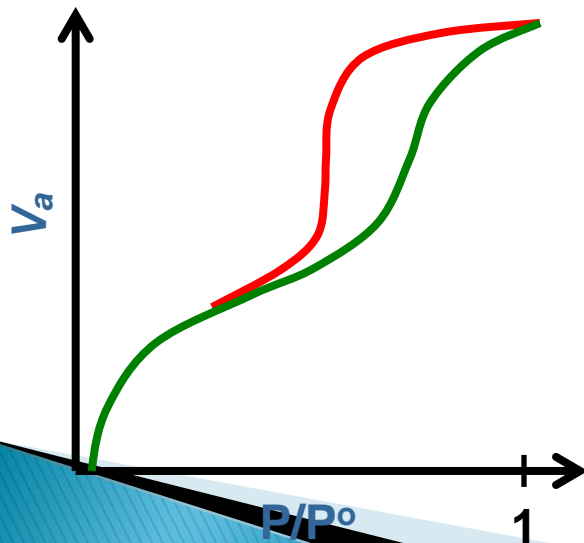
- Η ισόθερμη τύπου II είναι η συνήθης μορφή ισόθερμης με έναν μη πορώδες ή μικροπορώδες προσροφητή ($> 50\text{nm}$).
- Η αρχή του σχεδόν γραμμικού τμήματος της ισόθερμης συχνά δείχνει το στάδιο στο οποίο η επιφάνεια έχει καλυφθεί μονοστρωματικά και αρχίζει η πολυστρωματική προσρόφηση.
- Το σημείο B σημειώνει την σχετική πίεση στην οποία έχει συμπληρωθεί το μονόστρωμα.

Προσρόφηση αερίου: ισόθερμος



Type III

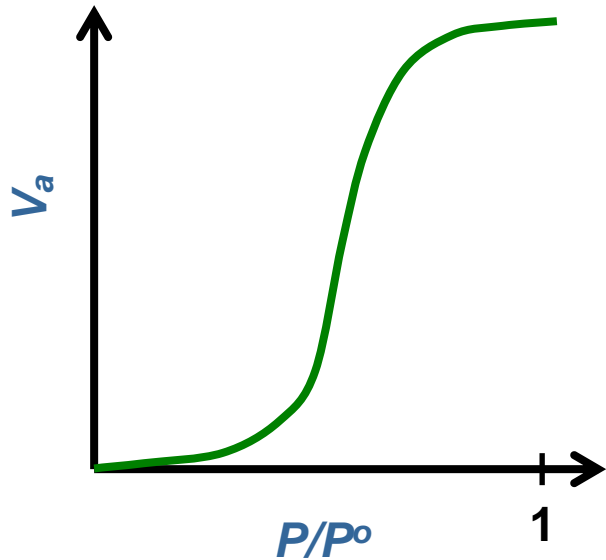
- Η ισόθερμη τύπου III είναι κυρτή στον άξονα P/P_0 καθ' όλη τη διάρκεια της προσρόφησης και για αυτό το λόγο δεν υπάρχουν σημεία καμπής. Οι ισόθερμες αυτού του τύπου δεν είναι συνηθισμένες, συνήθως συμβαίνουν κατά την προσρόφηση αεριοποιούμενου νερού από μη πορώδη άνθρακα.



Type IV

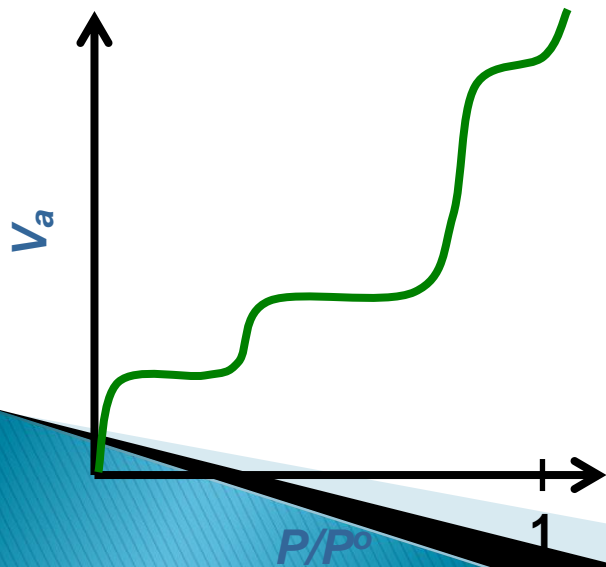
- Τα χαρακτηριστικά της ισόθερμης τύπου IV είναι η φάση υστέρησης της η οποία λαμβάνει χώρα στο μεσοπορώδες (βρίσκεται ανάμεσα του μικροπορώδους και μακροπορώδους). Οι ισόθερμες τύπου IV εμφανίζονται σε πολλούς μεσοπορώδεις βιομηχανικούς προσροφητές

Προσρόφηση αερίου: ισόθερμος



Type V

- Η ισόθερμη τύπου V είναι ασυνήθιστη. Συνδέεται με την ισόθερμη τύπου III γιατί και σε αυτήν η αλληλεπίδραση προσροφητή - προσροφήματος είναι αδύναμη, αλλά η συγκεκριμένη επιτυγχάνεται με προσροφητές συγκεκριμένου πορώδους.



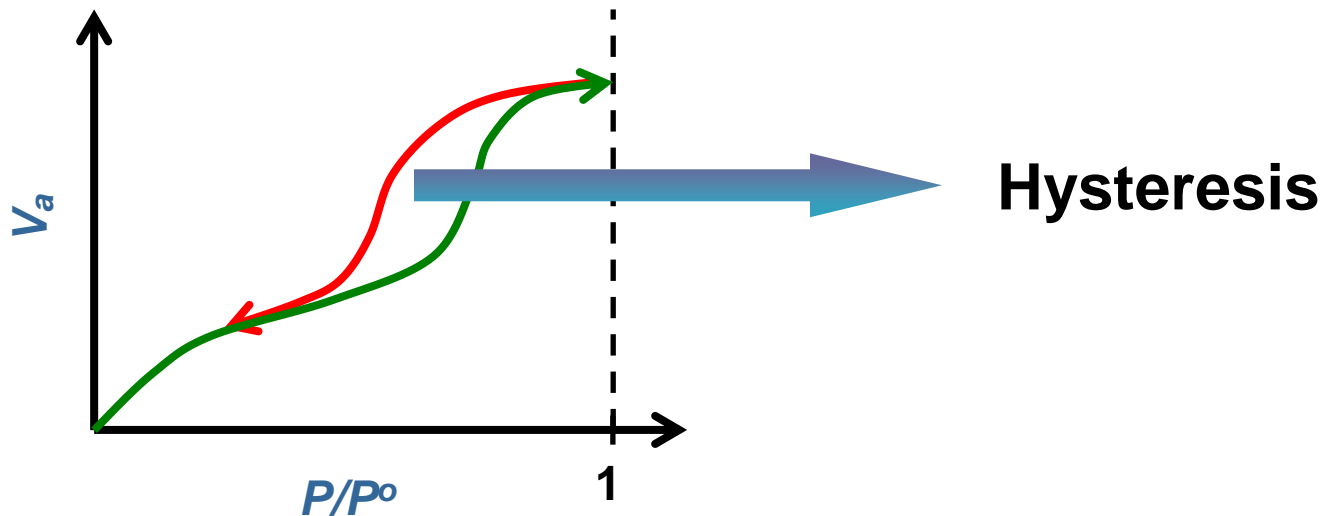
Type VI

- Η ισόθερμη τύπου VI απεικονίζει μια βηματική πολυστρωματική προσρόφηση σε μια μη πορώδη επιφάνεια.

Ισοθέρμοι

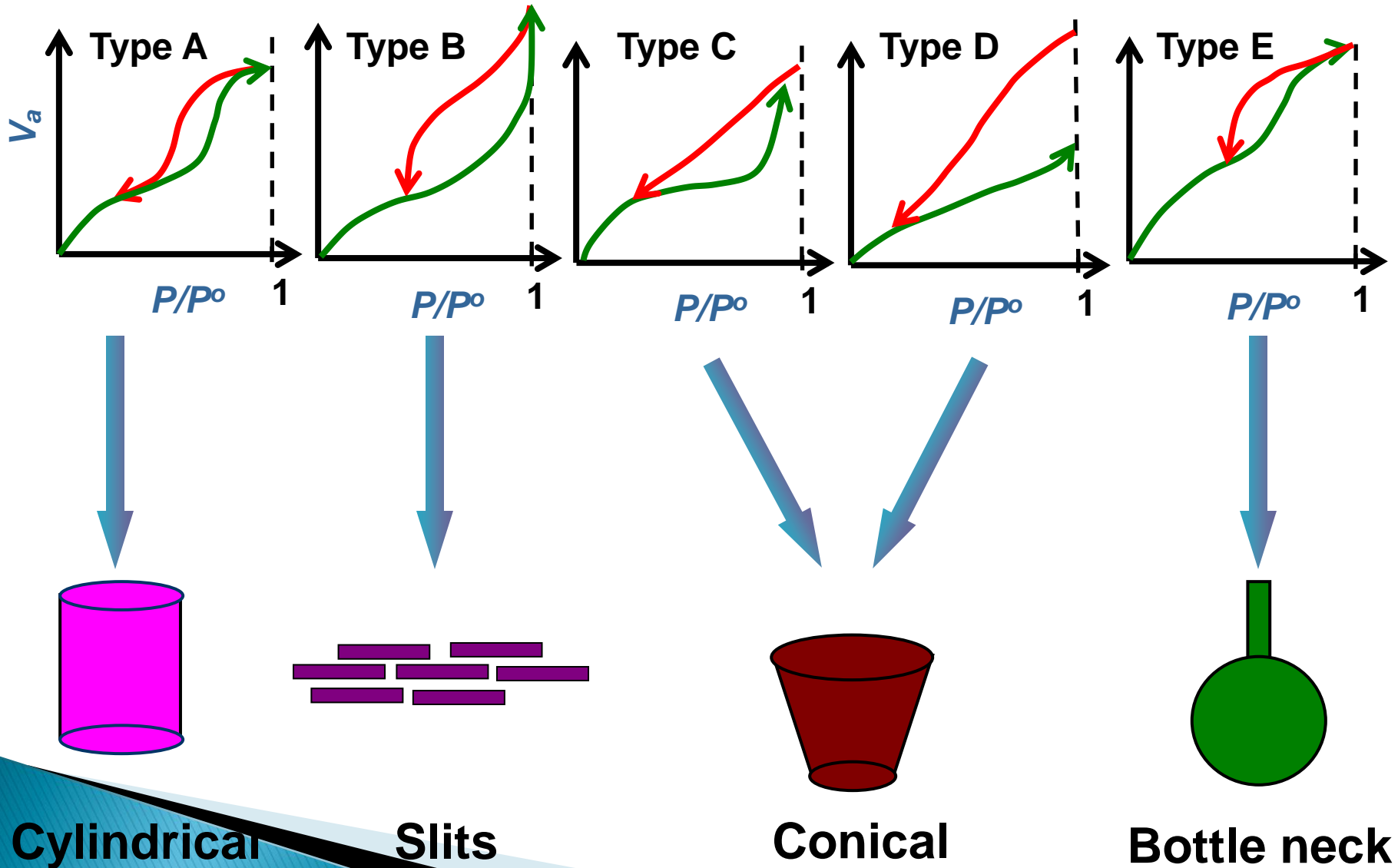
- ▶ Οι θεωρίες που περιγράφουν τις παραπάνω αναφερθέντες ισοθέρμους είναι:
 - Του Langmuir
 - Του Freundlich
 - Του Temkin
 - Του Brunauer–Emmett–Teller (BET)
- ▶ Η BET είναι η πιο επιτυχής και εξηγεί ικανοποιητικά πολλά από τα πειραματικά αποτελέσματα

Προσρόφηση αερίου: υστέρηση



- Η υστέρηση υποδεικνύει μεσοπορώδη υλικά.
- Δίνει πληροφορίες σχετικά με το σχήμα των πόρων.
- Οι τύποι I, II and III ισόθερμων είναι γενικά αντιστρεπτός αλλά στον τύπο I είναι δυνατόν η ύπαρξη υστέρησης. Οι τύποι IV και V επιδεικνύουν υστέρηση.

Προσρόφηση αερίου: υστέρηση



P/P_0 points

P is the bulk pressure in the sample cell and
 P_0 is the saturation pressure of the
adsorptive gas

Μέτρηση Ειδικής Επιφάνειας

▶ Multi BET σημεία:

11 σημεία στην ισόθερμο της προσρόφησης (adsorption)

Εύρος σημείων P/P_0 0.05–0.3

Κατανομή του μεγέθους των πόρων, Μέσος Όρος μεγέθους των πόρων και συνολικός όγκος των πόρων

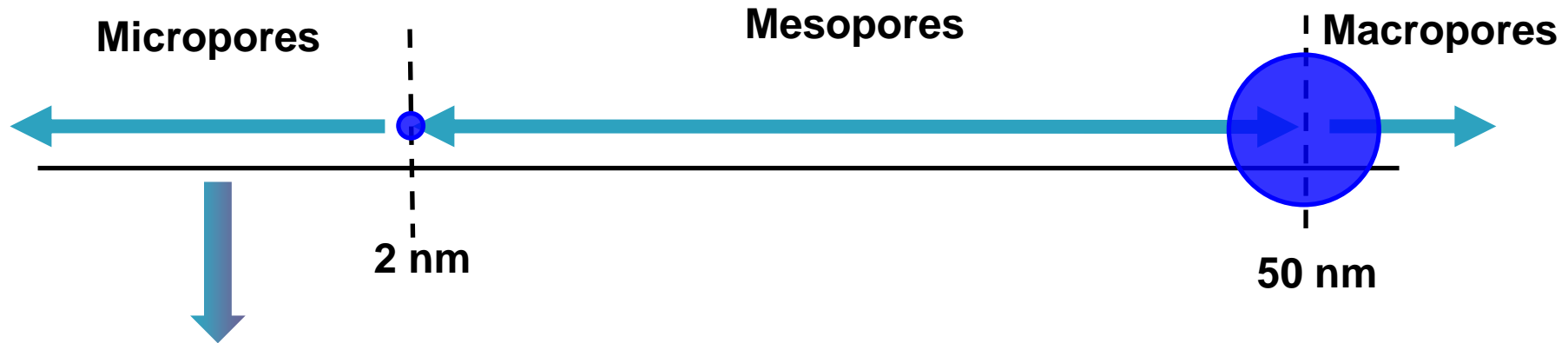
Σημεία Ισόθερμων:

- Σημεία στην ισόθερμο της προσρόφησης, εύρος σημείων P/P_0 0.025–0.99
- Σημεία στην ισόθερμο της εκρόφησης (desorption), εύρος σημείων P/P_0 0.99–0.1

Μέθοδοι υπολογισμού της κατανομής των πόρων

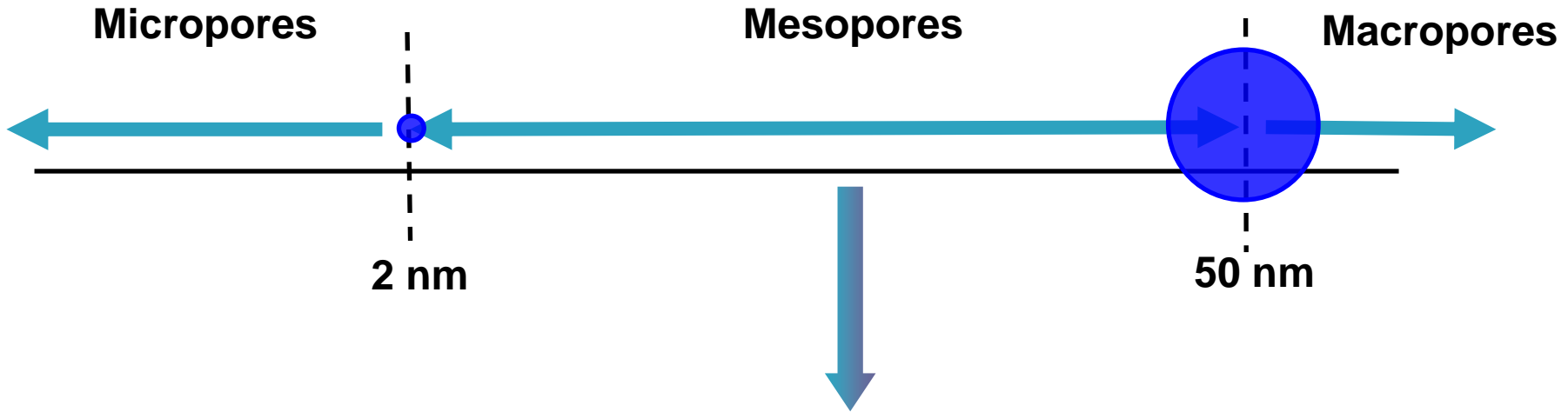
- BJH (Barrett, Joyner and Halenda) method
 - DH (Dollimore Heal) method
 - Dubinin–Astakhov method
 - HK (Horvath–Kawazoe) method
 - Saito–Foley method
 - NLDFT (Non Local Density Functional Theory) and Monte Carlo simulation method
- Mesoporous solids**
- Microporous solids**
- Microporous and Mesoporous solids**

Επιλογή Μεθόδου



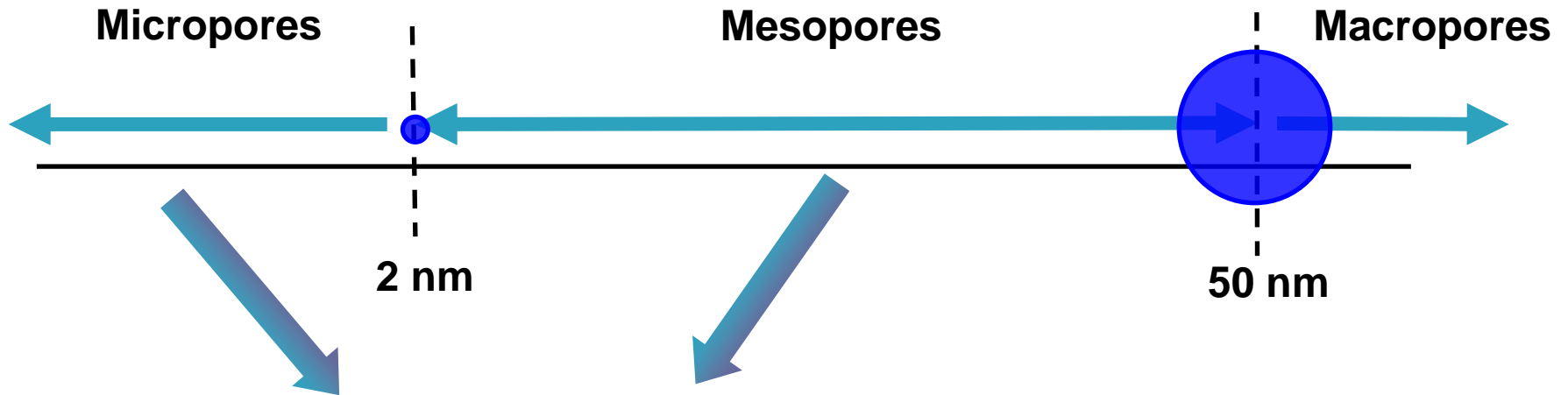
Methods	Assumption	
	Pore Shape	Based on ..
Brunauer MP method	Cylindrical or Slit shaped	de Boer's t-method
Dubinin-Astakhov method	-	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Polanyi potential theory ➤ Independent of Kelvin equation
HK (Horvath-Kawazoe) method	Slit	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Everett and Powl method ➤ Independent of Kelvin equation
Saito-Foley method	Cylindrical	HK method

Επιλογή Μεθόδου



Methods	Assumption	
	Pore Shape	Based on ..
BJH (Barrett, Joyner and Halenda) method	Cylindrical, Slit-shaped	Kelvin equation
DH (Dollimore Heal) method	Cylindrical	t-method

Επιλογή Μεθόδου



Methods	Assumption	
	Pore Shape	Based on ..
NLDFT (Non Local Density Functional Theory) and Monte Carlo simulation method	Cylindrical and slit	Statistical thermodynamics

Πορώδες % πετρωμάτων

Rock type	Genesis	Geological formation		% porosity (average value)	Predominant pore type
		pressure	temperature		
basalt	igneous	low	very high	≈ 1 - 3	macro
granite	igneous	high	very high	≈ 1 - 4	micro
tuff	igneous	low	high	≈ 20 - 30	micro
gneiss	metamorphic	high	high	≈ 0,4 - 2	micro
marble	metamorphic	high	high	≈ 0,2 - 0,3	micro
slate	metamorphic	high	medium-high	≈ 0,1 - 1	micro
coral stone	sedimentary	low	low	≈ 40 - 50	macro
limestone	sedimentary	low	low	≈ 15 - 20 ± equal	micro/macro
sandstone	sedimentary	low	low	≈ 10 - 15	macro

Τύπος πετρώματος	η(%)
Πλουτωνικά	0.2 – 2
Ηφαιστειακά	0.5 – 6
Ηφαιστειακοί τόφφοι	30 - 45
Κίσσηρη	60 – 70
Συμπαγείς ασβεστόλιθοι	1 – 5
Πορώδεις ασβεστόλιθοι	6 – 40
Άμμοι και χαλίκια	30 – 48
Συμπαγής ψαμμίτης	2 – 5
Πορώδης ψαμμίτης	6 – 40
Άργιλος, ιλύς	30 – 60

Rock	Dry Density (g/cm ³)	Porosity (%)
<i>Igneous</i>		
Granite	2.53 – 2.62	1.02 – 2.87
Diorite	2.80 – 3.00	0.10 – 0.50
Gabbro	2.72 – 3.00	1.00 – 3.57
Rhyolite	2.40 – 2.60	0.40 – 4.00
Andesite	2.50 – 2.80	0.20 – 8.00
Basalt	2.21 – 2.77	0.22 – 22.1
<i>Sedimentary</i>		
Conglomerate	2.47 – 2.76	
Sandstone	1.91 – 2.58	1.62 – 26.4
Shale	2.00 – 2.40	20.0 – 50.0
Mudstone	1.82 – 2.72	
Dolomite	2.20 – 2.70	0.20 – 4.00
Limestone	2.67 – 2.72	0.27 – 4.10
<i>Metamorphic</i>		
Gneiss	2.61 – 3.12	0.32 – 1.16
Schist	2.60 – 2.85	10.0 – 30.0
Phyllite	2.18 – 3.30	
Slate	2.71 – 2.78	1.84 – 3.64
Marble	2.51 – 2.86	0.65 – 0.81
Quartzite	2.61 – 2.67	0.40 – 0.65

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!