

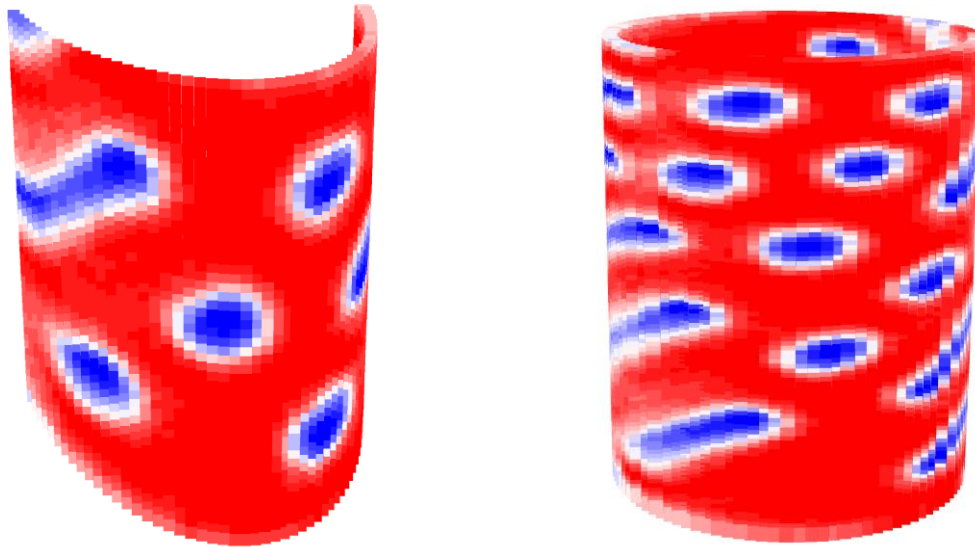


ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

## ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΚΥΡΜΙΟΝΙΩΝ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΟΓΡΑΜΜΕΣ ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ



Πατσόπουλος Αριστοτέλης

Αθήνα 2019

# ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

- Γιατί Μαγνητικά Σκυρμιόνια (ΜΣκ)?
- Γιατί Καμπυλόγραμμες Νανοδομές?

## **2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ**

- Οι αλληλεπιδράσεις Dzialoshinskii-Moriya (DMI)
- Υλικά που παρουσιάζουν DMI
- Τύποι Μαγνητικών Σκυρμιονίων

## **3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ**

- Γεωμετρική Περιγραφή Καμπυλόγραμμων Νανοδομών – Νανοσωλήνων
- Μαγνητική δομή στη βασική κατάσταση

## **4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

- Σκυρμιονική Φάση
- Υπολογισμός ακτίνας ΜΣκ

## **5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

# ΓΙΑΤΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΣΚΥΡΜΙΟΝΙΑ

## Τεχνολογικό ενδιαφέρον

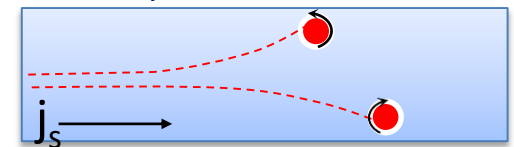
Αξιοποίηση των Μαγνητικών Σκυρμιονίων ως φορείς ψηφιακής πληροφορίας σε διατάξεις **Τρισδιάστατης Μαγνητικής Μνήμης** (racetrack memory), λόγω των υπερεχουσών ιδιοτήτων τους, όπως:

- Εξαιρετικά μικρό μέγεθος ( $\sim 10\text{nm}$ )
- Υψηλή Ευστάθεια σε δομικές-θερμικές διαταραχές
- Χαμηλές τιμές κρίσιμου πολωμένου ρεύματος για την μετακίνησή τους  
[ $j_{sk} \sim (1/10^5) j_{DW}$ ]
- Μεγάλη ευκινησία

## Βασικό ενδιαφέρον

- Έλεγχος γεωμετρικών χαρακτηριστικών ΜΣκ (πχ μέγεθος, σχήμα)
- Αντιμετώπιση **Σκυρμιονικού Φαινομένου Hall (SkHE)**

Skyrmion Hall Effect



- Αποφυγή ανεξέλεγκτου σχηματισμού ΜΣκ στα πλευρικά άκρα νανολωρίδων (**edge effect**)
- Σχεδιασμός μεθόδων **ηλεκτρικής ανίχνευσης** ΜΣκ

# ΓΙΑΤΙ ΚΑΜΠΥΛΟΓΡΑΜΜΕΣ ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ

**Κυλινδρικές νανοδομές:** Το σχεδόν «μονοδιάστατο» σχήμα τους αλλά και η καμπυλότητα της επιφάνειάς τους τα καθιστούν κατάλληλα για **μαγνητικές, σπιντρονικές** και **βιοτεχνολογικές** εφαρμογές.

➤ **«Μονοδιάστατο σχήμα»:**

- Αύξηση Ενεργούς ανισοτροπίας => μέσα μαγνητικής αποθήκευσης
- Ελεγχόμενη διάδοση διαμορφώσεων σολιτονικού χαρακτήρα (Μαγνητικά Σκυρμιόνια, Μαγνητικά Τοιχώματα)

➤ **Κυλινδρικές Νανοδομές:**

- Καμπυλότητα => Αντισυμμετρική αλληλεπίδραση ανταλλαγής (DMI)
- Κυλινδρική γεωμετρία : Δομές **χωρίς πλευρικά όρια** =>
  - (α) αποφυγή καταστροφής ΜΣκ εξαιτίας του SkHE
  - (β) αποφυγή μη-ελεγχόμενης δημιουργίας ΜΣκ (edge effect)

# ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ DZIALOSHINSKII-MORIYA

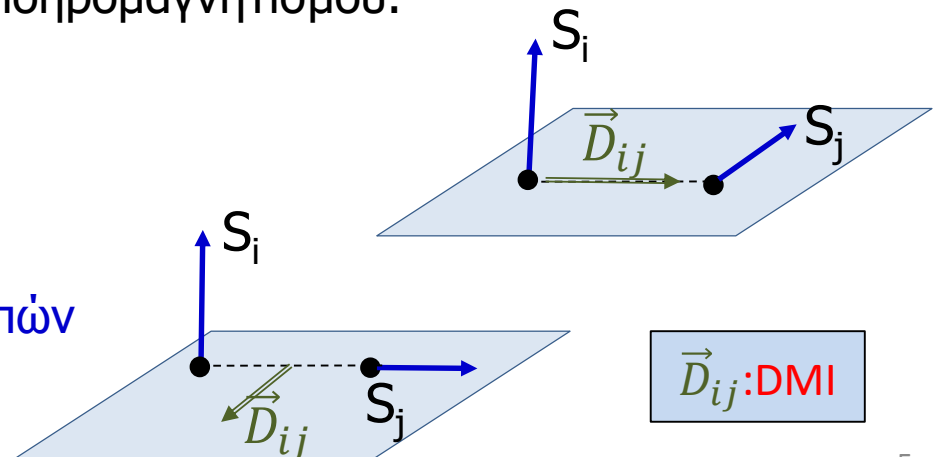
**Dzialoshinskii:** Χρησιμοποιώντας την θεωρία του Landau για τις μεταβάσεις φάσεων έδειξε ότι:

- Ο ασθενής Σιδηρομαγνητισμός σε αντισιδηρομαγνητικά υλικά (**weak ferromagnetism**) οφείλεται στην σχετικιστική αλληλεπίδραση **spin-πλέγματος** και στις διπολικές αλληλεπιδράσεις.
- Το φαινόμενο έχει μεγάλη εξάρτηση από την **συμμετρία** του πλέγματος.

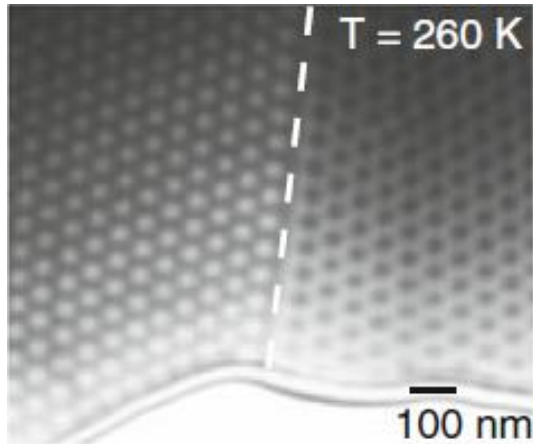
**Moriya:** Επεκτείνοντας την θεωρία του Anderson και εισάγοντας την σύζευξη spin-τροχιάς (**spin-orbit coupling**), ανέδειξε από πρώτες αρχές την ύπαρξη των **αντισυμμετρικών αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής** στις οποίες αποδίδεται η ύπαρξη του ασθενούς σιδηρομαγνητισμού.

$$H_{DMI} = \vec{D}_{ij} \cdot (\vec{S}_i \times \vec{S}_j)$$

Ορθογώνια διάταξη μαγνητικών ροπών

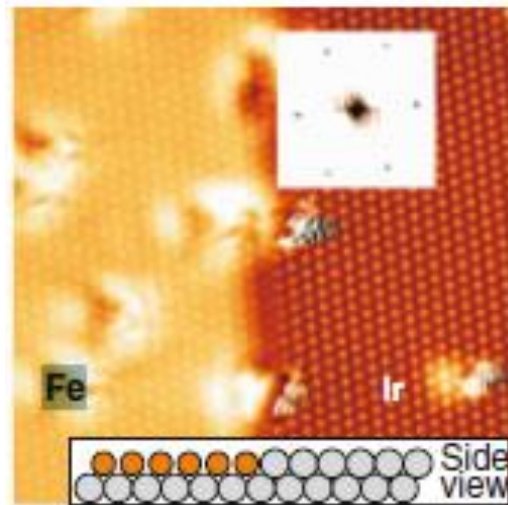


# ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΟΥΝ DMI

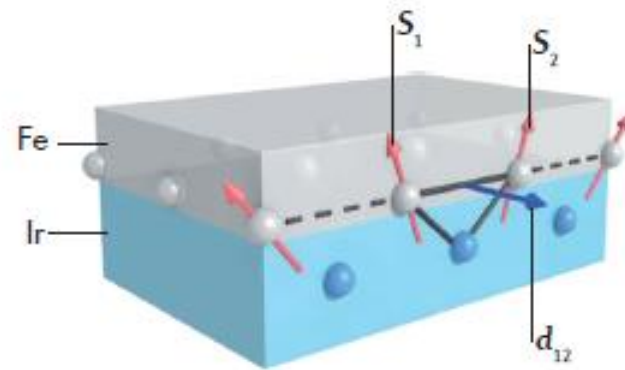


Ελικομαγνήτες της ομάδας B20 με έλλειψη συμμετρίας αντιστροφής κέντρου:

Λεπτά υμένια FeGe πάχους 10 nm (LTEM),  
X.Z. Yu et al Nat. Mater. 2011



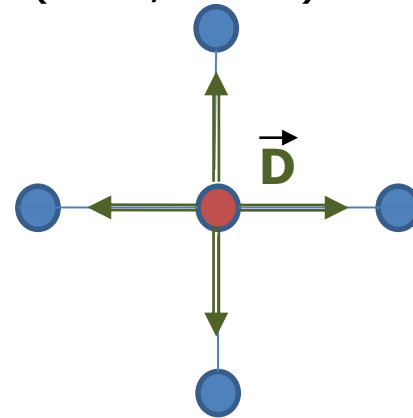
Διεπιφάνειες Fe/Ir (FM/HM)  
S, Heinze et al Nat. Phys 2011



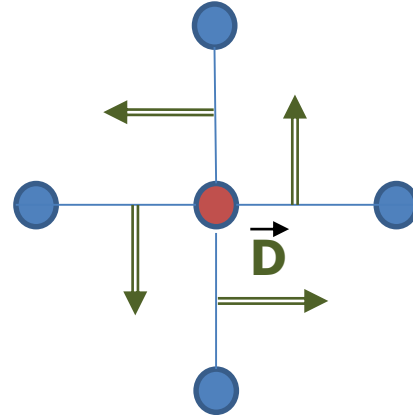
Σύζευξη spin τροχίας μέσω αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής μεταξύ ηλεκτρονίων του Ir και spins του Fe.

# ΤΥΠΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΚΥΡΜΙΟΝΙΩΝ

Bloch (spiral) ΜΣκ : Μη-κεντροσυμμετρικά Υλικά (MnSi, MnGe)



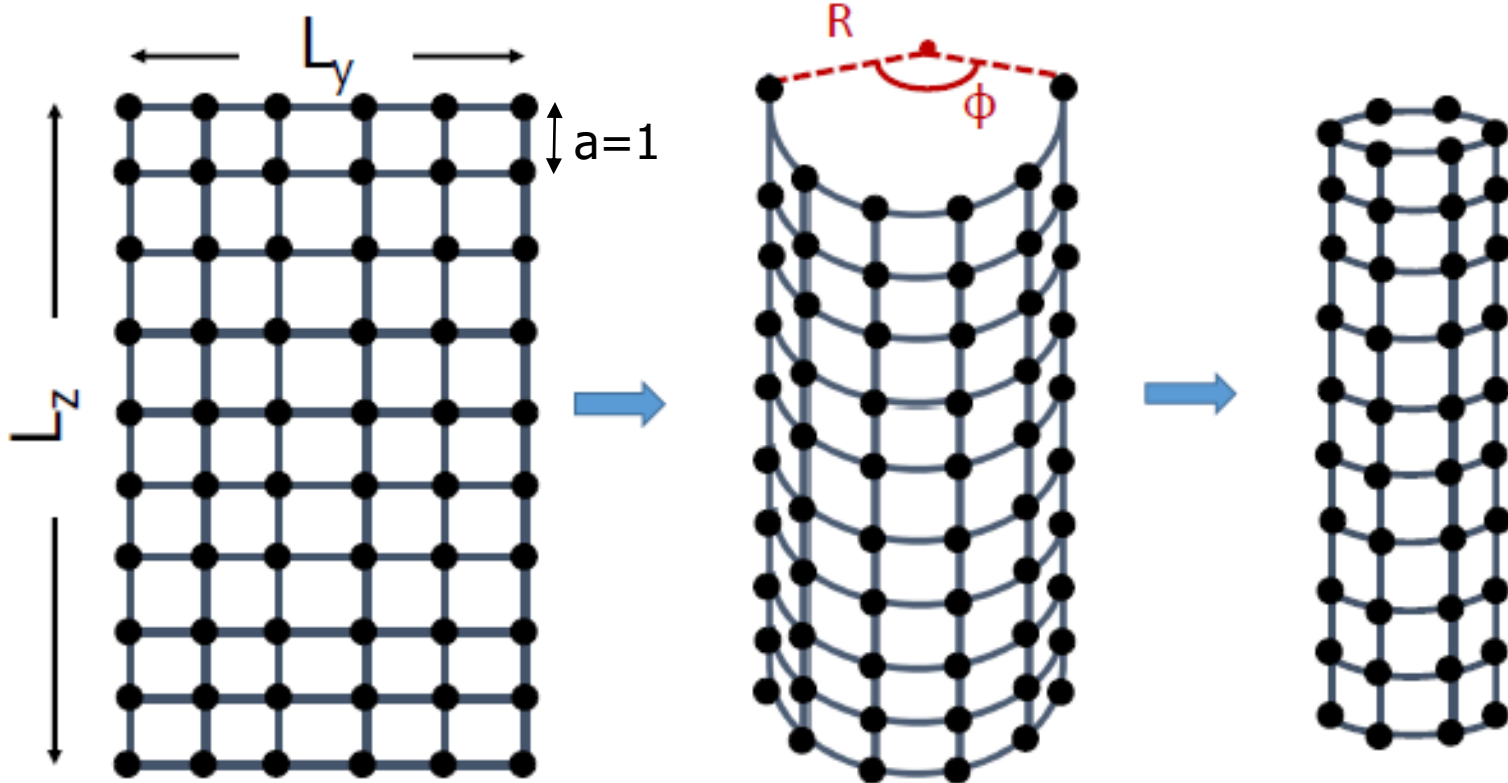
Néel (hedgehog) ΜΣκ : Υμένια FM/HM (Fe/Ir)



Τοπολογικό φορτίο  $Q = \frac{1}{4\pi} \int \mathbf{s} \left( \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial x_1} \times \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial x_2} \right) dx_1 dx_2$

Τα ΜΣκ έχουν τοπολογικό φορτίο  $Q = 1$

# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ



Επίπεδη Λωρίδα

$$R \rightarrow \infty$$

$$\phi = 0$$

Κυλινδρική Λωρίδα

$$R > 0$$

$$\phi > 0$$

Κυλινδρικός Σωλήνας

$$R > 0$$

$$\phi = 360^\circ$$

Διατήρηση μεγέθους δείγματος κατά τη δίπλωση:  $L_y = R * a$



# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

## Ολική Ενέργεια

$$E = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - \sum_{ij} \mathbf{D}_{ij} (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j) - K_1 \sum_i (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{e}_i)^2 - H \sum_i \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{h}_i$$

Ανταλλαγής                      DM                      Ανισοτροπία                      Zeeman

## Παράμετροι Υλικών

$J = +1$  (μονάδα ενέργειας)

$K_1/J = 0.1$

$D/J = 0.5$

Vedmedenko *et al* / Nat. Comm. (2015)

## Μέθοδος Προσομοίωσης

Προσομοίωση Ανόπτωσης (Simulation Annealing )

Αλγόριθμος Metropolis Monte Carlo

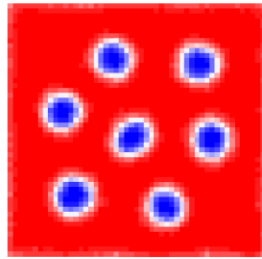
Βήματα mcss = 10.000

Ρυθμός ψύξης υπό πεδίο  $dT/T = 0.90$

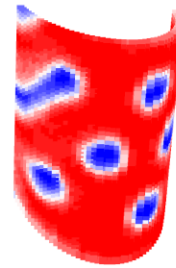
# ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΜΙΟΝΙΩΝ

$$L_y = L_z = 50$$

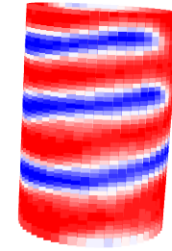
$$\rho = 13.6$$



Επίπεδη



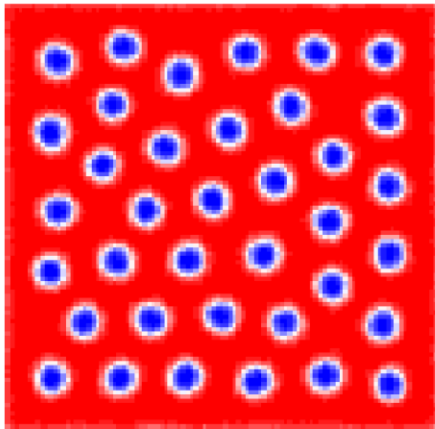
$R = 19.1$   
 $\varphi = 150^\circ$



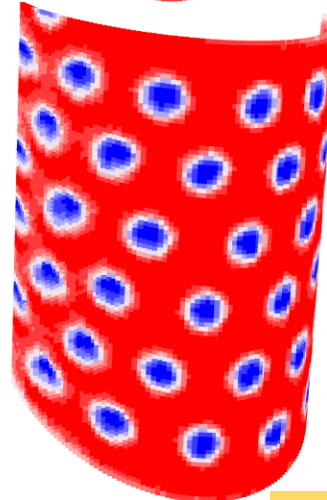
$R = 7.95$   
 $\varphi = 360^\circ$

$$L_y = L_z = 100$$

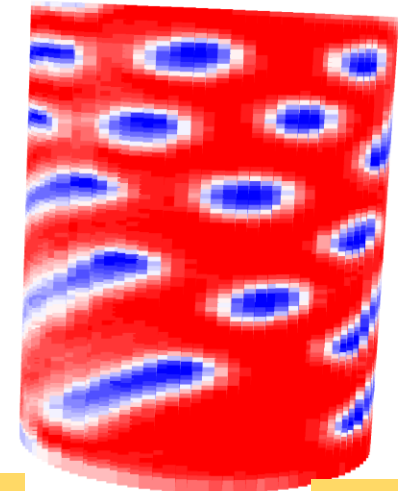
$$\rho = 13.6$$



Επίπεδη

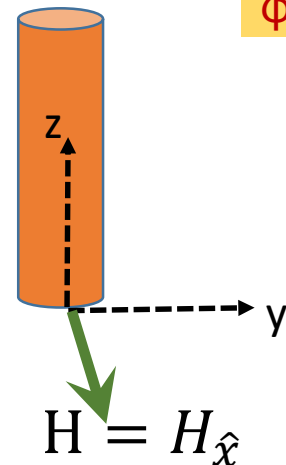


$R = 38.2$   
 $\varphi = 150^\circ$

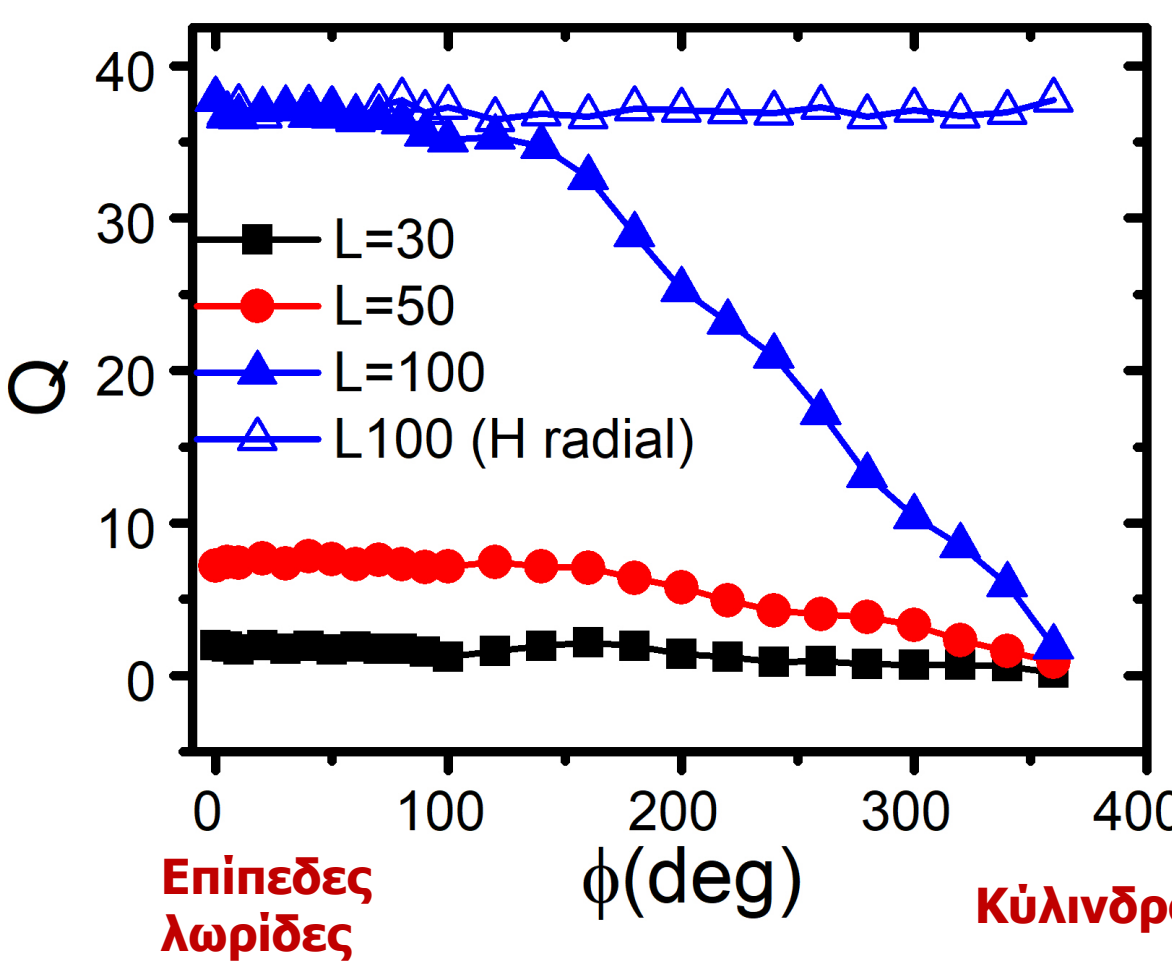


$R = 15.9$   
 $\varphi = 360^\circ$

- Σχηματισμός ΜΣκ σε καμπυλόγραμμες νανοδομές
- Σχηματισμός μαγνητικών σπειρών σε κυλινδρικά συστήματα «μικρής» ακτίνας
- Σχηματισμός ΜΣκ σε nanotubes «μεγάλης» ακτίνας όταν  $H \perp$
- Σχηματισμός σπειρών όταν  $H \parallel$



# ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (Q) ΑΠΟ ΤΗ ΓΩΝΙΑ ΚΑΜΠΥΛΩΣΗΣ (φ)



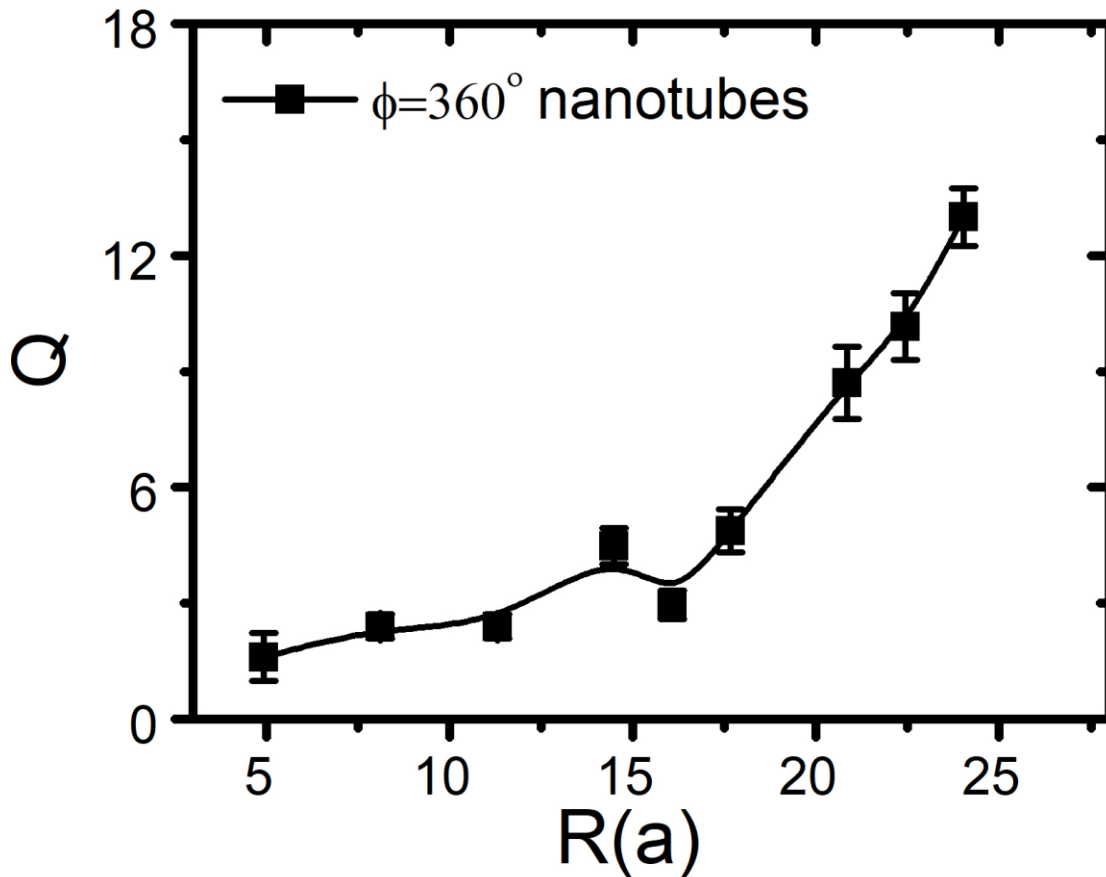
Ομογενές Πεδίο  $H//x$

- $Q \uparrow$  όταν  $L \uparrow$
- $Q \downarrow$  όταν  $\phi \uparrow$
- Ο σχηματισμός ΜΣκ πραγματοποιείται σε περιοχές όπου το εξωτερικό πεδίο  $H$  είναι κάθετο στο σύστημα.

Ακτινικό Πεδίο  $H$

- Δεν εξαρτάται το  $Q$  από την καμπυλότητα ( $\phi$ ).

# ΕΞΑΡΤΗΣΗ Q ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΑ ΤΩΝ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ



- Ο αριθμός  $Q$  παραμένει μικρός σε μικρές ακτίνες (Σχηματισμός σπειρών στα Nanotubes).
- Απότομη αύξηση του  $Q$  σε ακτίνα  $R=16a$  (υβριδική κατάσταση).
- Ο αριθμός  $Q$  που δημιουργείται στη ράχη των Nanotubes εξαρτάται από την ακτίνα  $R$ .

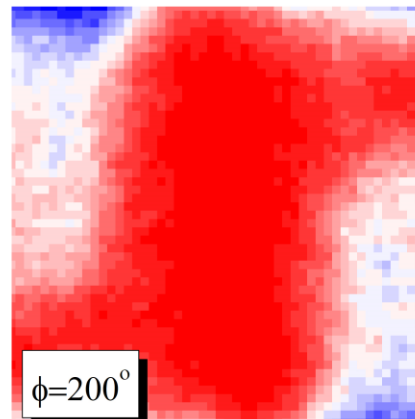
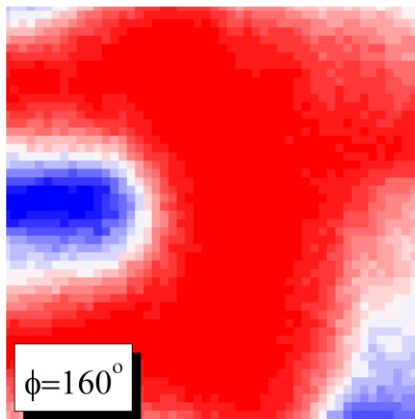
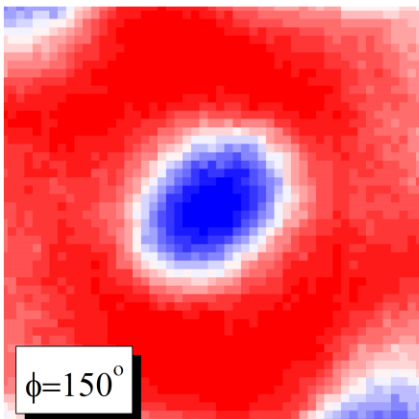
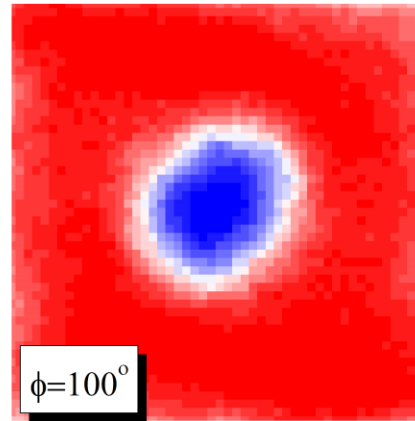
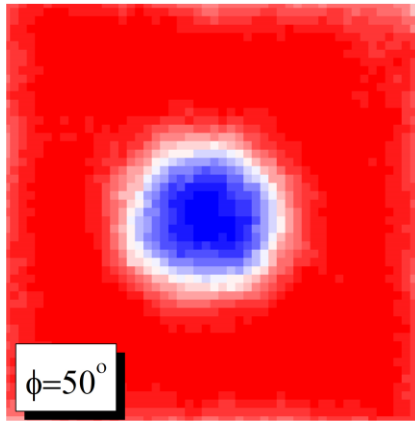
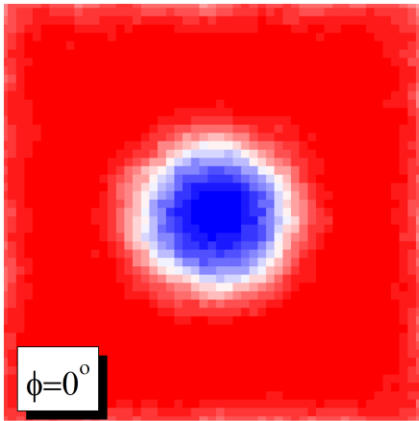
# ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΚΥΡΜΙΟΝΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ

Αλλαγή στη διακριτοποίηση του συστήματος με προσαρμογή των παραμέτρων.

$$\frac{D}{J} = \tan\left(\frac{2\pi}{p}\right)$$

$$K \rightarrow \frac{K'J'}{D'^2}$$

$$H \rightarrow \frac{H'J'}{D'^2}$$

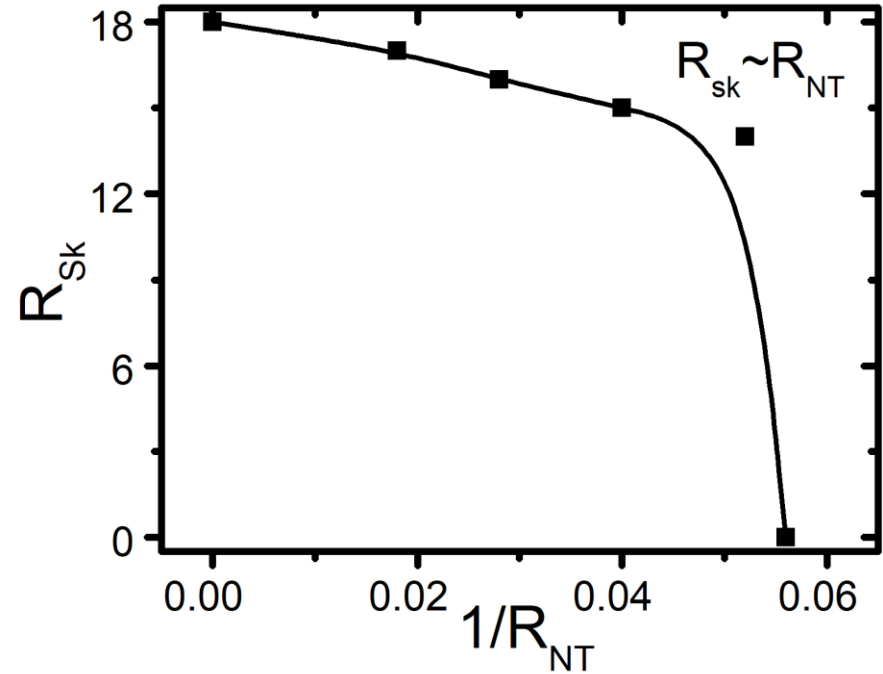
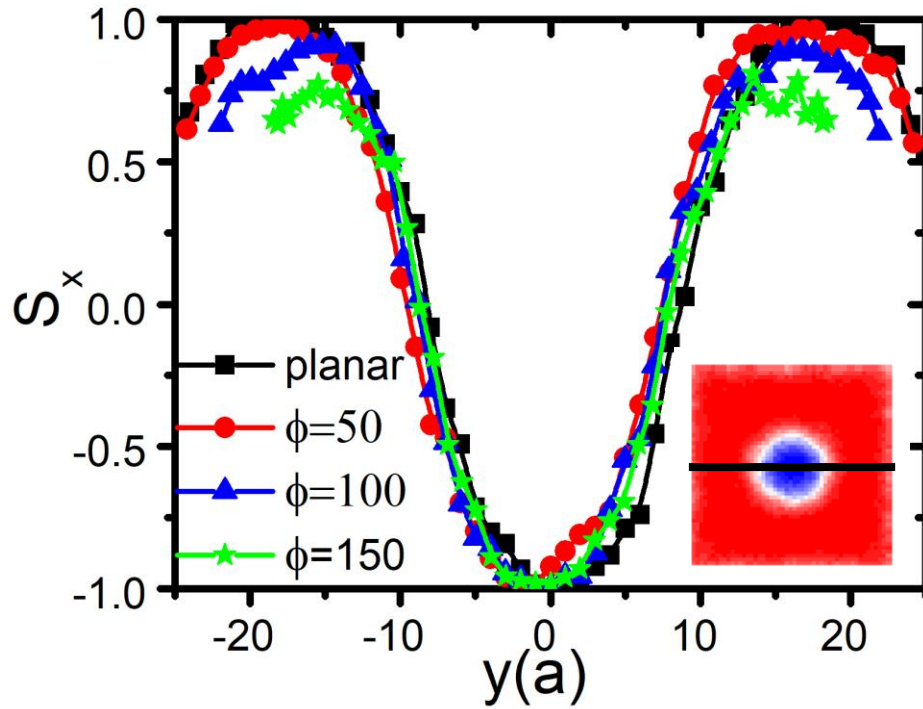


Length/P=50/30.

- Σχηματισμός ενός μόνο ΜΣκ
  - i.  $a=0$   $R_{Sk} \ll R_{stripe}$
  - ii.  $a \uparrow$   $R_{Sk} \rightarrow R_{stripe}$
  - iii.  $a \gg 0$   $R_{Sk} > R_{stripe}$

- Το ΜΣκ καταστρέφεται στα συστήματα με μεγάλη καμπυλότητα.
- Η καμπυλότητα διαφοροποιεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ΜΣκ.

# ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΚΤΙΝΑΣ ΣΚΥΡΜΙΟΝΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ

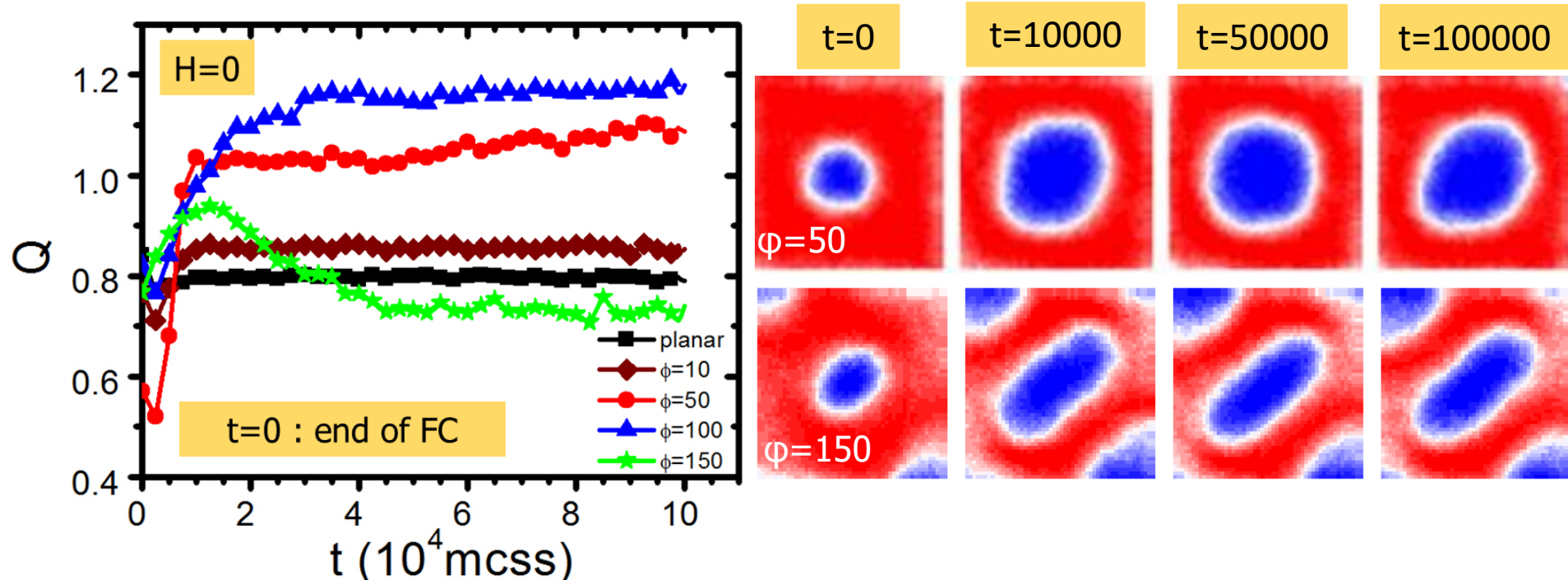


- **Σκυρμιόνιο:** Διπλό Μαγνητικό τοίχωμα
- **Συμπίεση** της Σκυρμιονικής περιοχής

- **Ελάττωση** της ακτίνας του Σκυρμιονίου με την **καμπυλότητα** του συστήματος
- Καταστροφή του Σκυρμιονίου όταν

$$R_{Sk} \simeq R_{stripe}$$

# ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΣΚΥΡΜΙΟΝΙΟΥ ΑΠΟΥΣΙΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ



- Σταθεροποίηση των ΜΣΚ απουσία εξωτερικού πεδίου
- Ο σχηματισμός των ΜΣΚ καταστρέφεται, απουσία πεδίου, σε συστήματα με μεγάλη καμπυλότητα.

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε καμπυλόγραμμες νανοδομές και νανοσωλήνες παρατηρούμε:

- Σχηματισμό Μαγνητικών Σκυρμιονίων, όταν το εξωτερικό **μαγνητικό πεδίο** είναι **κάθετο** στο σύστημα

- Αύξηση του αριθμού των Μαγνητικών Σκυρμιονίων με το μέγεθος του συστήματος

- Σχηματισμό Μαγνητικών Σκυρμιονίων όταν η ακτίνα καμπυλότητας είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα του Σκυρμιονίου – Καταστροφή των Σκυρμιονίων όταν

$$R_{Sk} \simeq R_{stripe}$$

- **Διατήρηση** των Μαγνητικών Σκυρμιονίων **απουσία εξωτερικού Μαγνητικού πεδίου**



## ΕΠΟΜΕΝΟ ΒΗΜΑ

- Διάγραμμα Q vs R/Rsk για διαφορετικά βήματα έλικας p (R=ακτίνα νανοσωλήνα)  
=> Έλεγχος κριτηρίου σχηματισμού ΜΣκ σε νανοσωλήνες
- Στατιστική ανάλυση μεγέθους και σχήματος ΜΣκ σε διαφορετικές καμπυλότητες

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

## Τριμελής επιτροπή:

- Γ. Π. Τριμπέρης, Ομότιμος Καθηγητής ΕΚΠΑ
- Δ. Κεχράκος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΣΠΑΙΤΕ
- Κ. Σιμσερίδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ !

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)»



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,  
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





# ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΚΥΡΜΙΟΝΙΩΝ (Q)

- Πυκνότητα τοπολογικού φορτίου για κλασικά σπιν  $\mathbf{s}$  σε 2-d επιφάνεια

$$dQ = \frac{1}{4\pi} \mathbf{s} \left( \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial x_1} \times \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial x_2} \right)$$

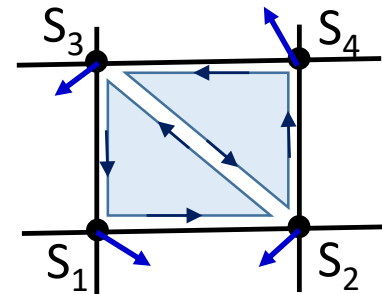
= κλάσμα της προσ/νης στερεάς γωνίας που σχηματίζουν τα σπιν στο στοιχειώδες εμβαδό γύρω από το σημείο  $(x_1, x_2)$ .

- Τοπολογικό φορτίο  $Q = \frac{1}{4\pi} \int \mathbf{s} \left( \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial x_1} \times \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial x_2} \right) dx_1 dx_2$

- Τοπολογικό Φορτίο σε 2d τετραγωνικό πλέγμα (Berg-Luscher Nucl. Phys. 1981)

$$Q = \frac{1}{4\pi} \sum_{\Delta[1,2,3]} (\Omega_{\Delta[1,2,3]} + \Omega_{\Delta[2,4,3]})$$

$\Omega_{\Delta[1,2,3]}$  =  
προσανατολισμένη  
στερεά γωνία των  $[s_1, s_2, s_3]$



- Τα ΜΣκ έχουν τοπολογικό φορτίο  $Q = 1$

# ΒΗΜΑ ΕΛΙΚΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΡΟΠΩΝ

Για  $K_1=0$ , ο ανταγωνισμός της συμμετρικής (J) και αντισυμμετρικής αλληλεπίδρασης ανταλλαγής (D) μπορεί να οδηγήσει σε **ελικοειδή διάταξη** της μαγνήτισης. Το βήμα της έλικας (**pitch length**) δίνεται από τη σχέση:

$$p = \frac{2\pi a}{\tan^{-1}(D/J)}$$

Το **βήμα της έλικας (p)** αποτελεί το **1<sup>ο</sup> χαρακτηριστικό μήκος** του προβλήματος σχηματισμού Σκυρμιονίων σε επιφάνειες. Η **ακτίνα ενός ΜΣκ** είναι κατά προσέγγιση:

$$R_{Sk} \approx p$$

Για κυλινδρικές επιφάνειες το **2<sup>ο</sup> χαρακτηριστικό μήκος** είναι η **ακτίνα καμπυλότητας (R)**.

Το **πλήθος** [και το **μέγεθος**] των ΜΣκ καθορίζεται από τον ανταγωνισμό των χαρακτηριστικών μηκών:

$$N_{Sk} = f(L/p, R/p)$$

όπου  $L$  = μήκος νανοσυστήματος.