

Επιταχυντές

International Masterclasses

24/02/2026 & 27/02/2026

Δρ. Σωτηρούλα Κωνσταντίνου & Δρ. Αλέξανδρος Αττίκης



University
of Cyprus



Από τι αποτελείται ο κόσμος γύρω μας και ποιοι οι νόμοι που τον διέπουν; ²

Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model):

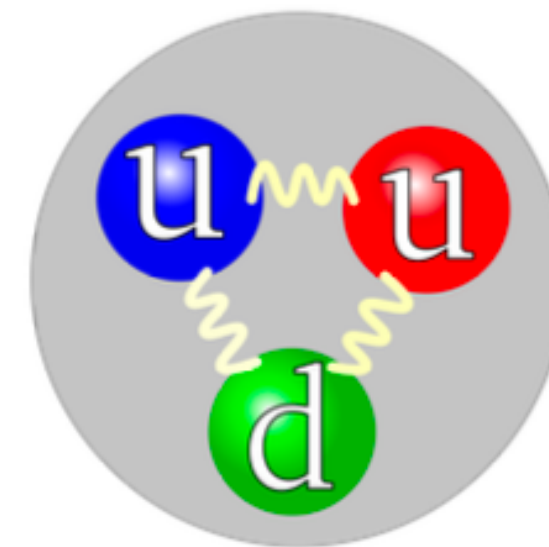
- Περιγράφει το σύμπαν από τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) μέχρι σήμερα:

		FERMIONS			BOSONS	
generation		I	II	III		
QUARKS	up type	u_p $S=\frac{1}{2}$ $Q=+\frac{2}{3}e$ $m=2.3$ MeV	c_{harm} $S=\frac{1}{2}$ $Q=+\frac{2}{3}e$ $m=1.28$ GeV	t_{op} $S=\frac{1}{2}$ $Q=+\frac{2}{3}e$ $m=173.2$ GeV	FORCE CARRIERS	
		d_{own} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-\frac{1}{3}e$ $m=4.8$ MeV	s_{trange} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-\frac{1}{3}e$ $m=95$ MeV	b_{ottom} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-\frac{1}{3}e$ $m=4.18$ GeV		
	LEPTONS	charged	e_{lectron} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-1e$ $m=0.51$ MeV	μ_{uon} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-1e$ $m=105.7$ MeV		τ_{au} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-1e$ $m=1.777$ GeV
			ν_e neutrino $S=\frac{1}{2}$ $Q=0$ $m < 2$ eV	ν_μ neutrino $S=\frac{1}{2}$ $Q=0$ $m < 2$ eV		ν_τ neutrino $S=\frac{1}{2}$ $Q=0$ $m < 2$ eV
		neutral				
		g_{luon} $S=1$ $Q=0$ $m=0$	γ_{photon} $S=1$ $Q=0$ $m < 10^{-18}$ eV	W[±] boson $S=1$ $Q=±1e$ $m=80.4$ GeV	Z⁰ boson $S=1$ $Q=0$ $m=91.2$ GeV	H_{iggs} $S=0$ $Q=0$ $m=125.7$ GeV

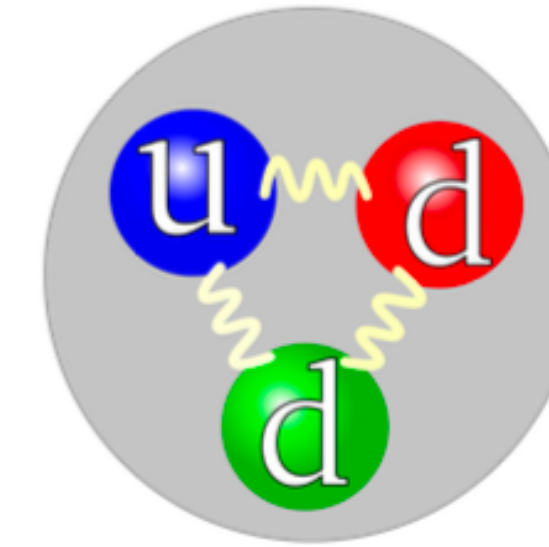
Στοιχειώδη συστατικά της ύλης (Φερμιόνια)

- **Quarks:** σχηματίζουν σύνθετα σωματίδια, τα αδρόνια (hadrons)

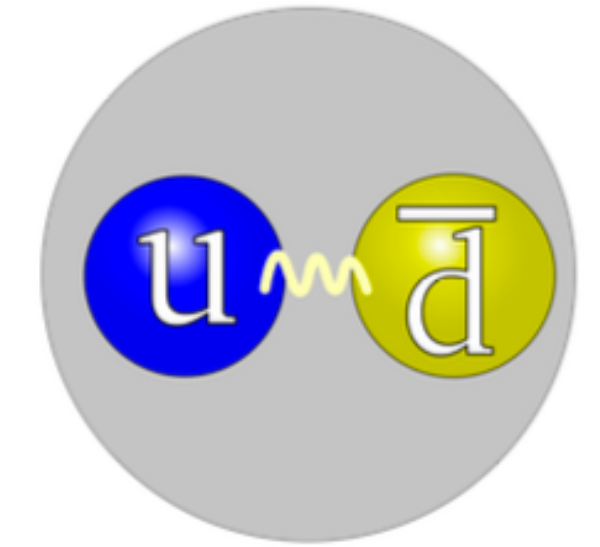
πρωτόνιο (*p*)



νετρόνιο (*n*)



πιόνιο π⁺



Από τι αποτελείται ο κόσμος γύρω μας και ποιοι οι νόμοι που τον διέπουν; ³

Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model):

- Περιγράφει το σύμπαν από τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) μέχρι σήμερα:

		FERMIONS			BOSONS
generation		I	II	III	
QUARKS	up type	u_p $S=\frac{1}{2}$ $Q=+\frac{2}{3}e$ $m=2.3$ MeV	c_{harm} $S=\frac{1}{2}$ $Q=+\frac{2}{3}e$ $m=1.28$ GeV	t_{op} $S=\frac{1}{2}$ $Q=+\frac{2}{3}e$ $m=173.2$ GeV	FORCE CARRIERS
	down type	d_{own} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-\frac{1}{3}e$ $m=4.8$ MeV	s_{trange} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-\frac{1}{3}e$ $m=95$ MeV	b_{ottom} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-\frac{1}{3}e$ $m=4.18$ GeV	
LEPTONS	charged	e_{lectron} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-1e$ $m=0.51$ MeV	μ_{uon} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-1e$ $m=105.7$ MeV	τ_{au} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-1e$ $m=1.777$ GeV	
	neutral	ν_e^{neutrino} $S=\frac{1}{2}$ $Q=0$ $m < 2$ eV	ν_μ^{neutrino} $S=\frac{1}{2}$ $Q=0$ $m < 2$ eV	ν_τ^{neutrino} $S=\frac{1}{2}$ $Q=0$ $m < 2$ eV	
		g_{luon} $S=1$ $Q=0$ $m=0$	γ_{photon} $S=1$ $Q=0$ $m < 10^{-18}$ eV	W[±]_{boson} $S=1$ $Q=\pm 1e$ $m=80.4$ GeV	
				H_{iggs} $S=0$ $Q=0$ $m=125.7$ GeV	

Στοιχειώδη συστατικά της ύλης (Φερμιόνια)

- **Quarks:** σχηματίζουν σύνθετα σωματίδια, τα αδρόνια (hadrons)
- **Λεπτόνια:** π.χ ηλεκτρόνιο

Από τι αποτελείται ο κόσμος γύρω μας και ποιοι οι νόμοι που τον διέπουν; ⁴

Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model):

- Περιγράφει το σύμπαν από τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) μέχρι σήμερα:

		FERMIONS			BOSONS	
generation		I	II	III		
QUARKS	up type	u_p $S=\frac{1}{2}$ $Q=+\frac{2}{3}e$ $m=2.3$ MeV	c_{harm} $S=\frac{1}{2}$ $Q=+\frac{2}{3}e$ $m=1.28$ GeV	t_{op} $S=\frac{1}{2}$ $Q=+\frac{2}{3}e$ $m=173.2$ GeV	FORCE CARRIERS	
	down type	d_{own} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-\frac{1}{3}e$ $m=4.8$ MeV	s_{trange} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-\frac{1}{3}e$ $m=95$ MeV	b_{ottom} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-\frac{1}{3}e$ $m=4.18$ GeV		
LEPTONS	charged	e_{lectron} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-1e$ $m=0.51$ MeV	μ_{uon} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-1e$ $m=105.7$ MeV	τ_{au} $S=\frac{1}{2}$ $Q=-1e$ $m=1.777$ GeV		g_{luon} $S=1$ $Q=0$ $m=0$
	neutral	ν_e^{neutrino} $S=\frac{1}{2}$ $Q=0$ $m < 2$ eV	ν_μ^{neutrino} $S=\frac{1}{2}$ $Q=0$ $m < 2$ eV	ν_τ^{neutrino} $S=\frac{1}{2}$ $Q=0$ $m < 2$ eV		γ_{photon} $S=1$ $Q=0$ $m < 10^{-18}$ eV
						W[±]_{boson} $S=1$ $Q=\pm 1e$ $m=80.4$ GeV
						Z⁰_{boson} $S=1$ $Q=0$ $m=91.2$ GeV
				H_{iggs} $S=0$ $Q=0$ $m=125.7$ GeV		

Στοιχειώδη συστατικά της ύλης (Φερμιόνια)

- **Quarks:** σχηματίζουν σύνθετα σωματίδια, τα αδρόνια (hadrons)
- **Λεπτόνια:** π.χ ηλεκτρόνιο

Φορείς των τριών εκ των τεσσάρων θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων:

- **Ισχυρή Πυρηνική:** Γκλουόνιο (g)
- **Ηλεκτρομαγνητική:** Φωτόνιο (γ)
- **Ασθενής Πυρηνική** (W^{\pm} , Z^0)
- **Βαρύτητα:** Βαρυτόνιο;

Από τι αποτελείται ο κόσμος γύρω μας και ποιοι οι νόμοι που τον διέπουν; ⁵

Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model):

- Περιγράφει το σύμπαν από τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) μέχρι σήμερα:

		FERMIONS			BOSONS	
generation		I	II	III		
QUARKS	up type	u_p S= $\frac{1}{2}$ Q= $+\frac{2}{3}e$ m=2.3 MeV	c_{harm} S= $\frac{1}{2}$ Q= $+\frac{2}{3}e$ m=1.28 GeV	t_{op} S= $\frac{1}{2}$ Q= $+\frac{2}{3}e$ m=173.2 GeV	FORCE CARRIERS	
	down type	d_{own} S= $\frac{1}{2}$ Q= $-\frac{1}{3}e$ m=4.8 MeV	s_{trange} S= $\frac{1}{2}$ Q= $-\frac{1}{3}e$ m=95 MeV	b_{ottom} S= $\frac{1}{2}$ Q= $-\frac{1}{3}e$ m=4.18 GeV		
LEPTONS	charged	e_{lectron} S= $\frac{1}{2}$ Q= $-1e$ m=0.51 MeV	μ_{uon} S= $\frac{1}{2}$ Q= $-1e$ m=105.7 MeV	τ_{au} S= $\frac{1}{2}$ Q= $-1e$ m=1.777 GeV		g_{luon} S=1 Q=0 m=0
	neutral	ν_e^{neutrino} S= $\frac{1}{2}$ Q=0 m < 2 eV	ν_μ^{neutrino} S= $\frac{1}{2}$ Q=0 m < 2 eV	ν_τ^{neutrino} S= $\frac{1}{2}$ Q=0 m < 2 eV		γ_{photon} S=1 Q=0 m < 10 ⁻¹⁸ eV
						W[±]_{boson} S=1 Q= $\pm 1e$ m=80.4 GeV
						Z⁰_{boson} S=1 Q=0 m=91.2 GeV
				H_{iggs} S=0 Q=0 m=125.7 GeV		

Στοιχειώδη συστατικά της ύλης (Φερμιόνια)

- **Quarks:** σχηματίζουν σύνθετα σωματίδια, τα αδρόνια (hadrons)
- **Λεπτόνια:** π.χ ηλεκτρόνιο

Φορείς των τριών εκ των τεσσάρων θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων:

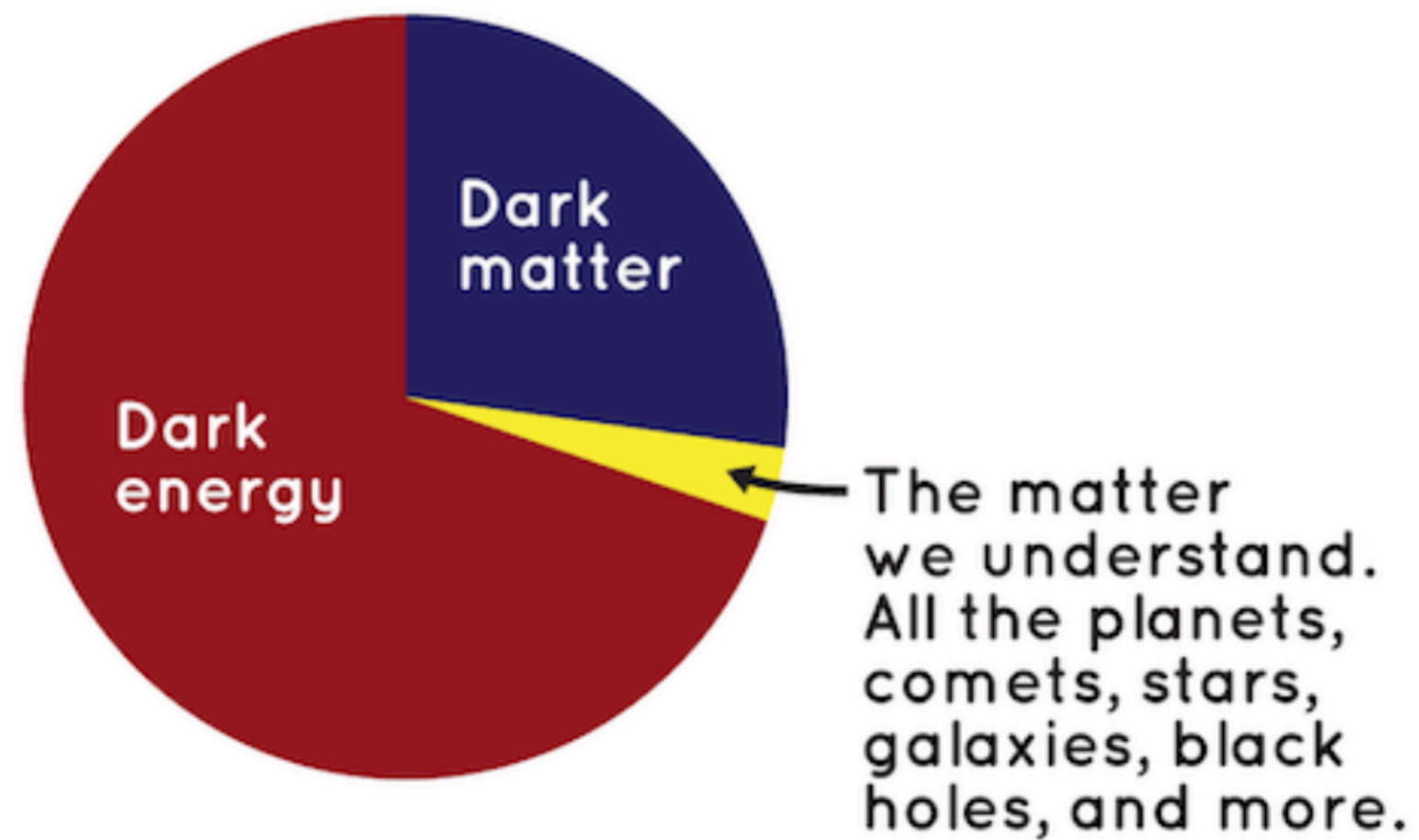
- **Ισχυρή Πυρηνική:** Γκλουόνιο (g)
- **Ηλεκτρομαγνητική:** Φωτόνιο (γ)
- **Ασθενής Πυρηνική** (W^{\pm}, Z^0)
- **Βαρύτητα:** Βαρυτόνιο;

Μποζόνιο Higgs: Προσδίδει μάζα στα φερμιόνια, W^{\pm}, Z^0

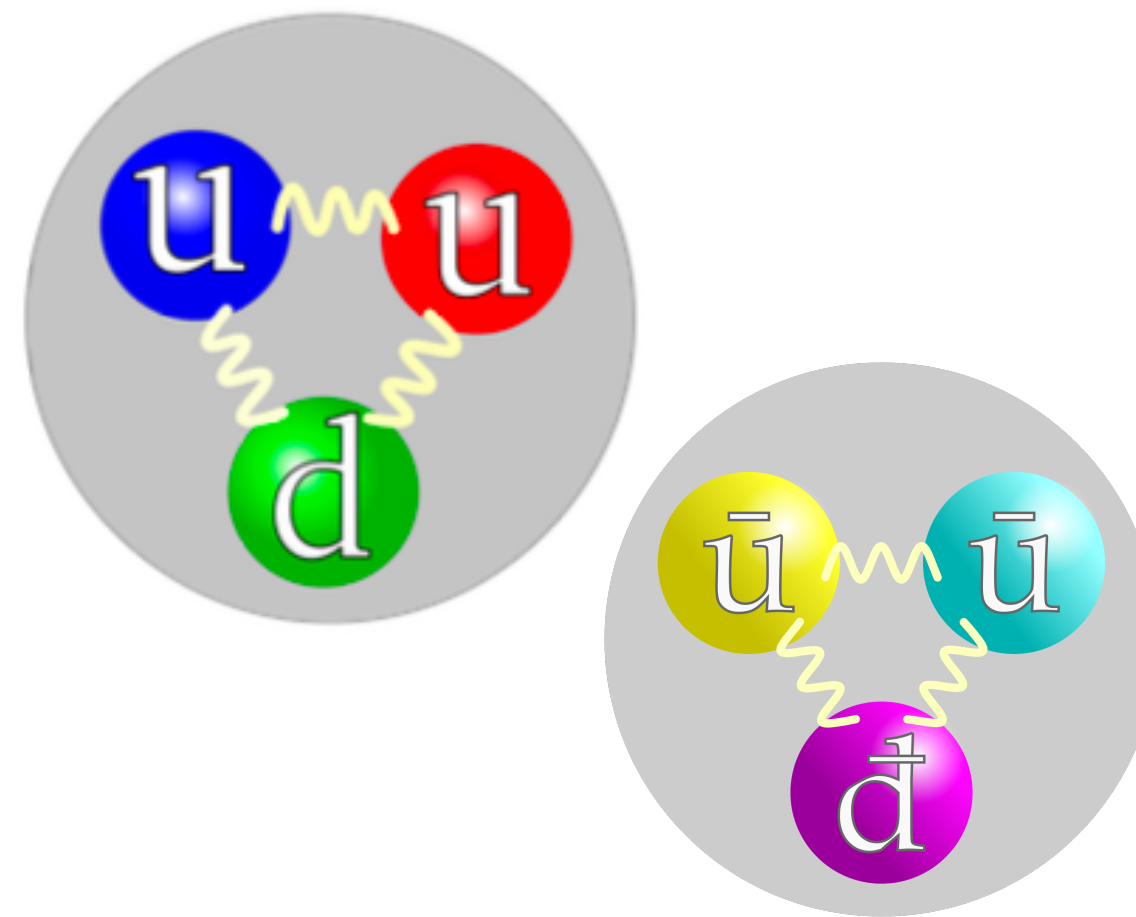
Από τι αποτελείται ο κόσμος γύρω μας και ποιοι οι νόμοι που τον διέπουν; ⁶

Το Καθιερωμένο πρότυπο εξηγεί όλα τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά είναι ελλιπής θεωρία αφού αδυνατεί να εξηγήσει φαινόμενα όπως:

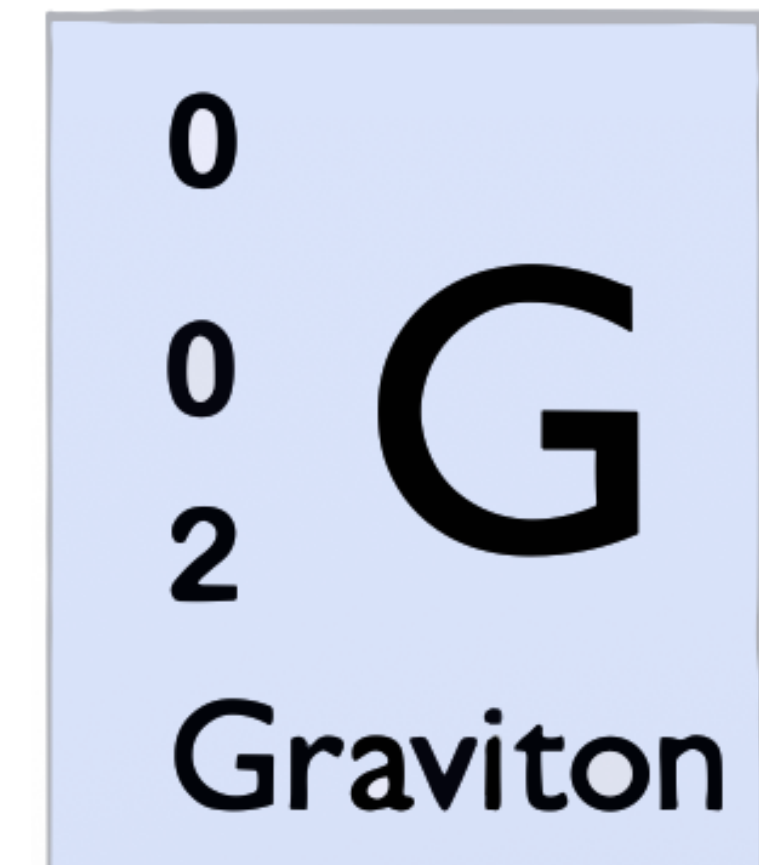
Σκοτεινή ύλη/
σκοτεινή ενέργεια



Ασυμμετρία ύλης- αντιύλης;



Περιγραφή
βαρυτικής δύναμης;



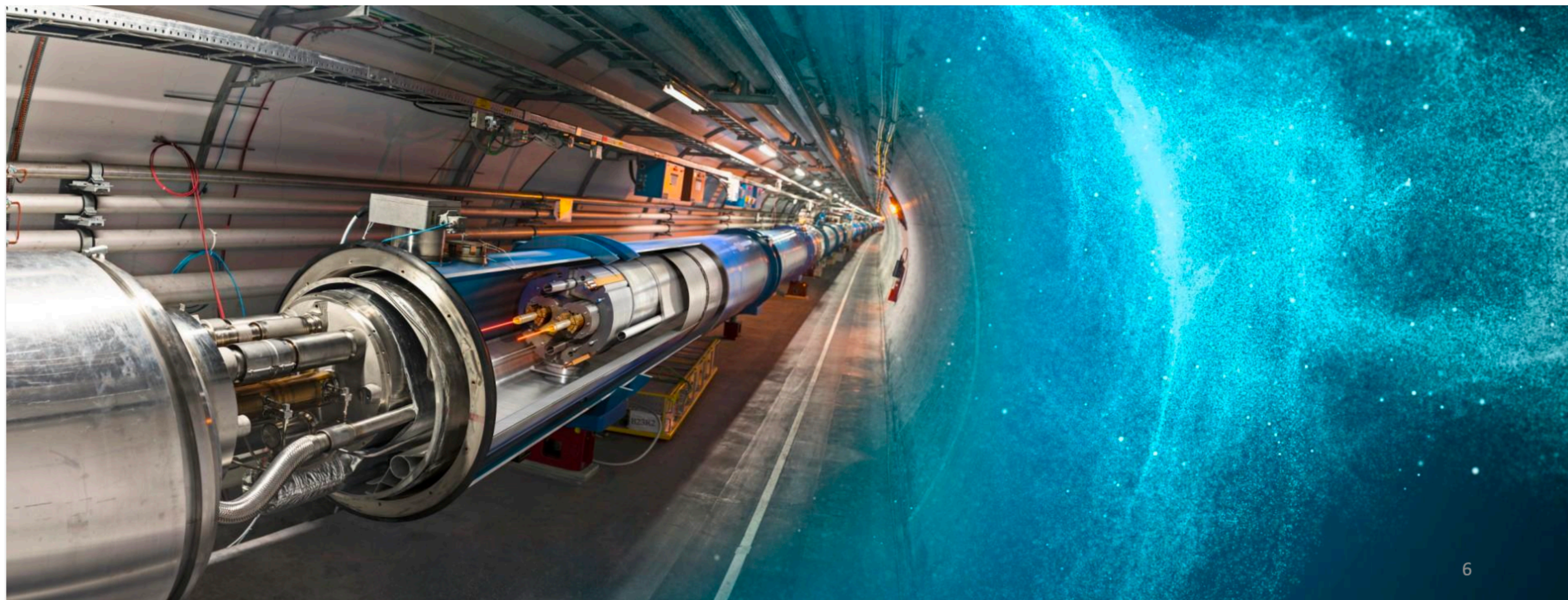
Χρειαζόμαστε μια νέα θεωρία, προέκταση του ΚΠ που να δίνει λύσεις στα πιο πάνω ερωτήματα.

Οι έρευνες επικεντρώνονται στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) που βρίσκεται στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών (CERN).

Τι είναι οι επιταχυντές;

Οι επιταχυντές είναι εργαλεία της σωματιδιακής φυσικής

- Επιταχύνουν φορτισμένα σωματίδια (π.χ. e , p) σε υψηλές ταχύτητες, κοντά στην ταχύτητα του φωτός
- Τα σωματίδια συγκρούονται με άλλα σωματίδια αντίθετης κατεύθυνσης.
- Τα αποτελέσματα των συγκρούσεων διερευνώνται ώστε να κατανοήσουμε τον μικρόκοσμο

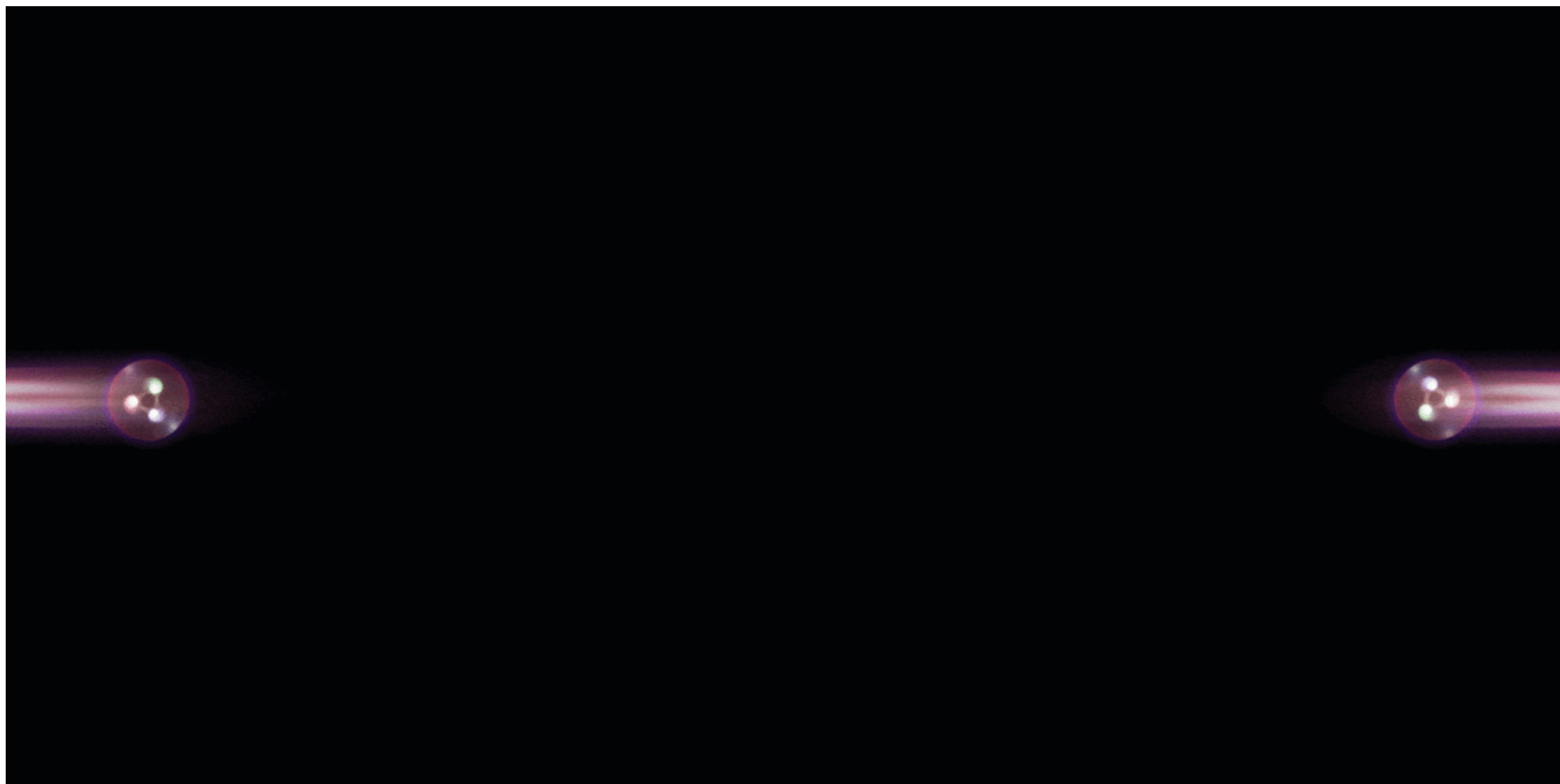


Τι είναι οι επιταχυντές;

Οι συγκρούσεις σωματιδίων υψηλής ενέργειας παράγουν σωματίδια μεγάλης μάζας

- Η ενέργεια της σύγκρουσης μετατρέπεται σε ύλη με τη μορφή νέων σωματιδίων τα οποία υπήρχαν στο πρώιμο Σύμπαν.
- Αυτό το φαινόμενο περιγράφεται από την περίφημη εξίσωση του Einstein

$$E = mc^2$$

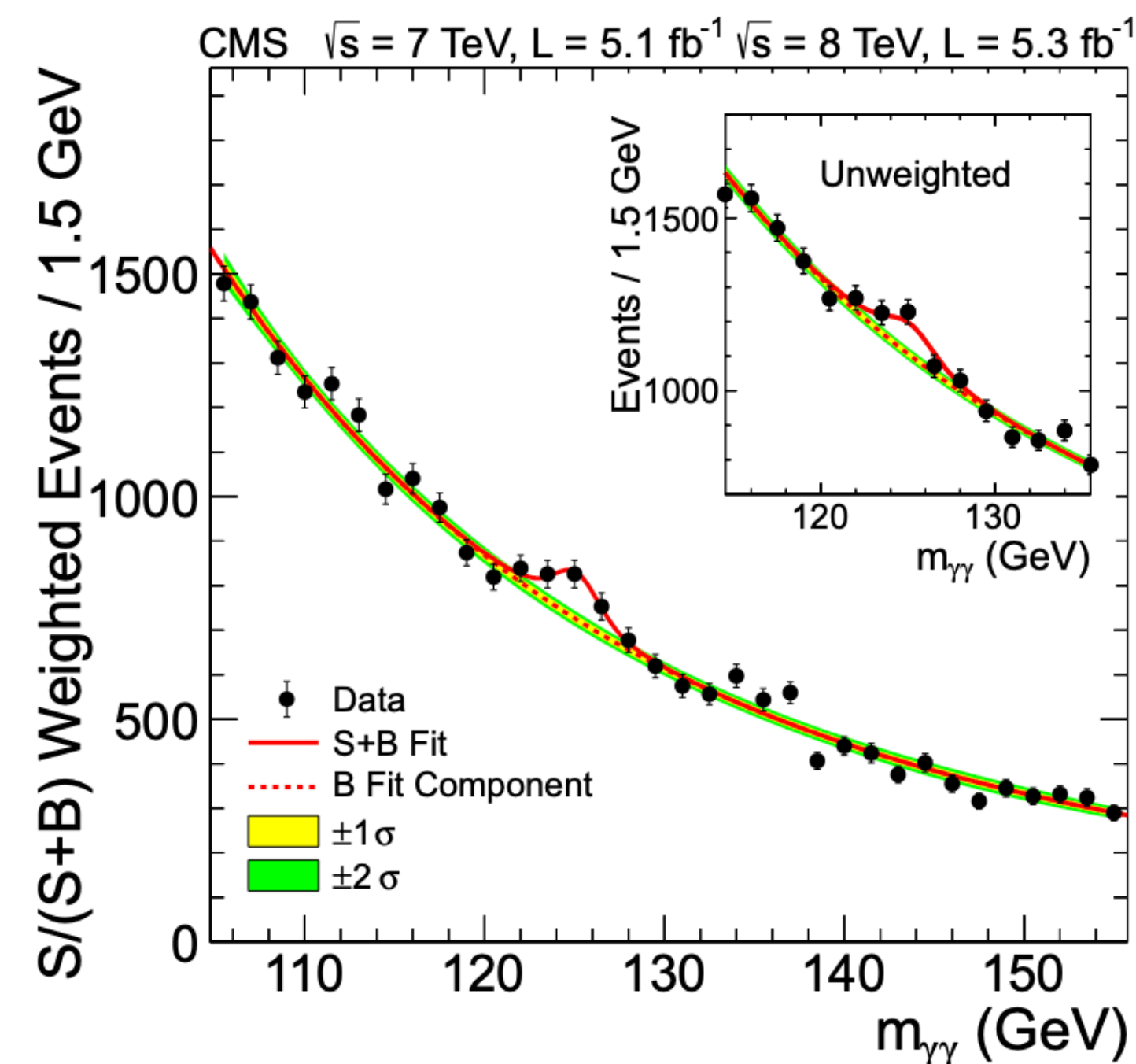


Τι είναι οι επιταχυντές;

Σε μεγάλες ενέργειες, η κινητική ενέργεια των σωματιδίων μετατρέπεται σε μάζα νέων σωματιδίων. Αν έχουμε αρκετή ενέργεια στη σύγκρουση, μπορούμε να δημιουργήσουμε βαριά σωματίδια.

Οι επιταχυντές κάνουν δισεκατομμύρια συγκρούσεις το δευτερόλεπτο!

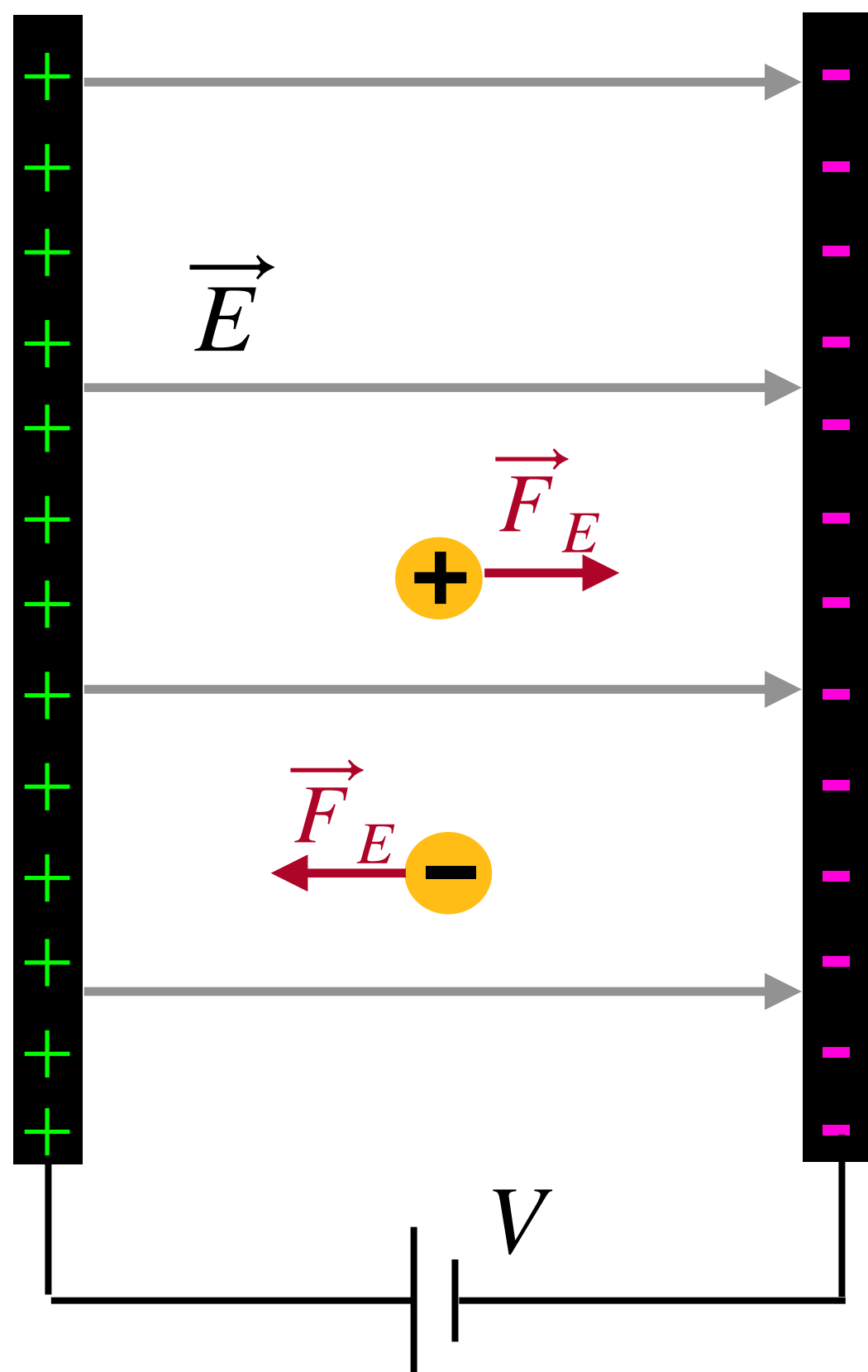
- Αυτό είναι κρίσιμο αφού πολλά σωματίδια παράγονται πολύ σπάνια.
- Η επαναληψιμότητα μας επιτρέπει να συλλέξουμε αρκετά γεγονότα ώστε να ξεχωρίσουμε το σήμα από το υπόβαθρο και να είμαστε στατιστικά βέβαιοι για μια ανακάλυψη.



Επιτάχυνση σωματιδίων

Η βασική ιδέα στηρίζεται στην ηλεκτρική δύναμη.

- Όταν δύο παράλληλες πλάκες συνδέονται σε μια διαφορά δυναμικού V , παράγουν ομογενές ηλεκτρικό πεδίο με ισχύ \vec{E}
- Η δύναμη \vec{F}_E που ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο q μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} είναι:



$$\vec{F}_E = q\vec{E}$$

Σύμφωνα με τον 2ο νόμο του Νεύτωνα: $\vec{F} = m\vec{a}$

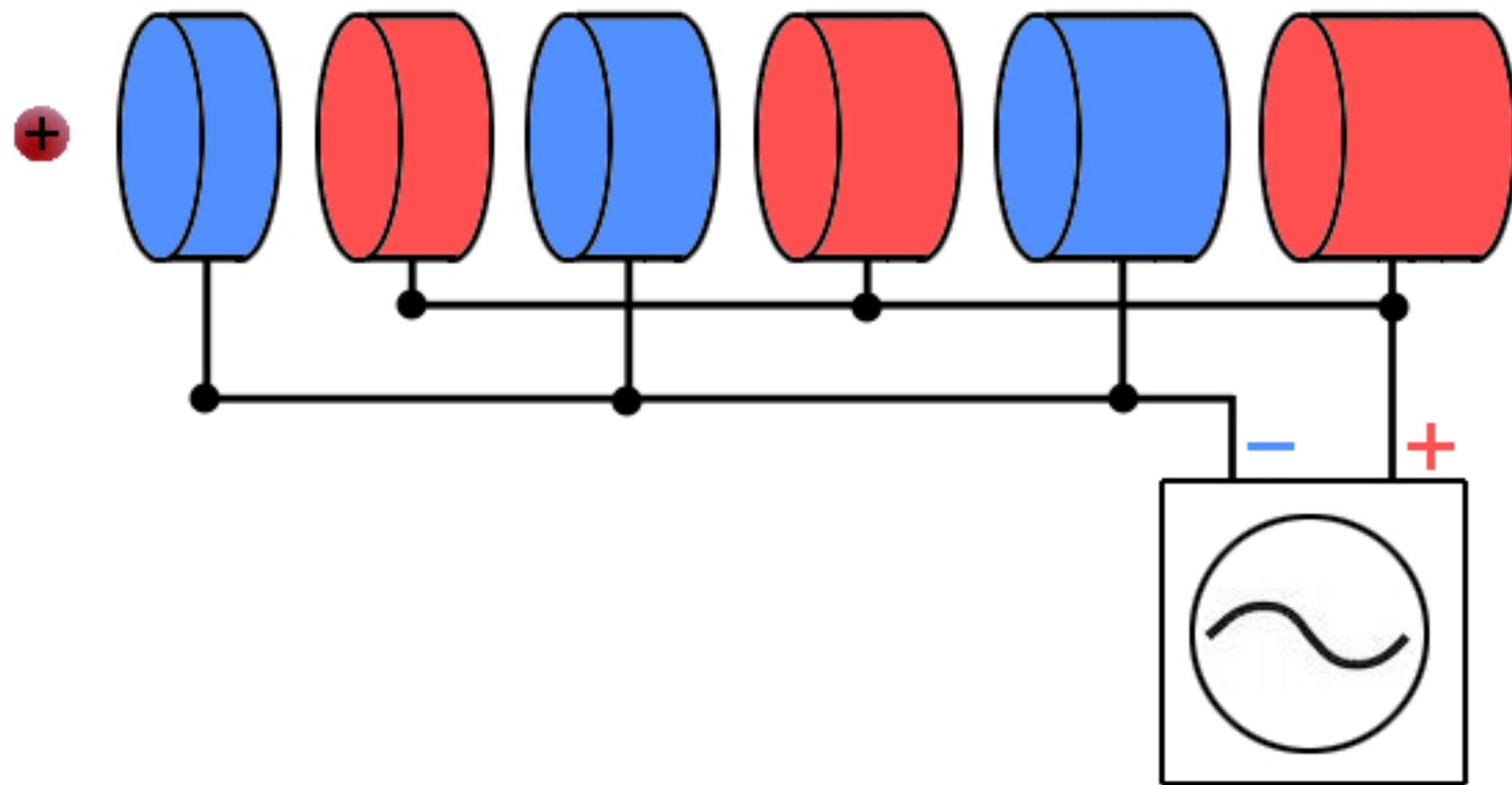
$$\Rightarrow q\vec{E} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$$

Η \vec{F}_E είναι παράλληλη με τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής \Rightarrow παράγει έργο

Γραμμικοί Επιταχυντές

Υπάρχουν δύο είδη επιταχυντών: **Γραμμικοί** και **Κυκλικοί**

Στους **γραμμικούς επιταχυντές** εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού της οποίας η φορά εναλλάσσεται με συγκεκριμένη συχνότητα.



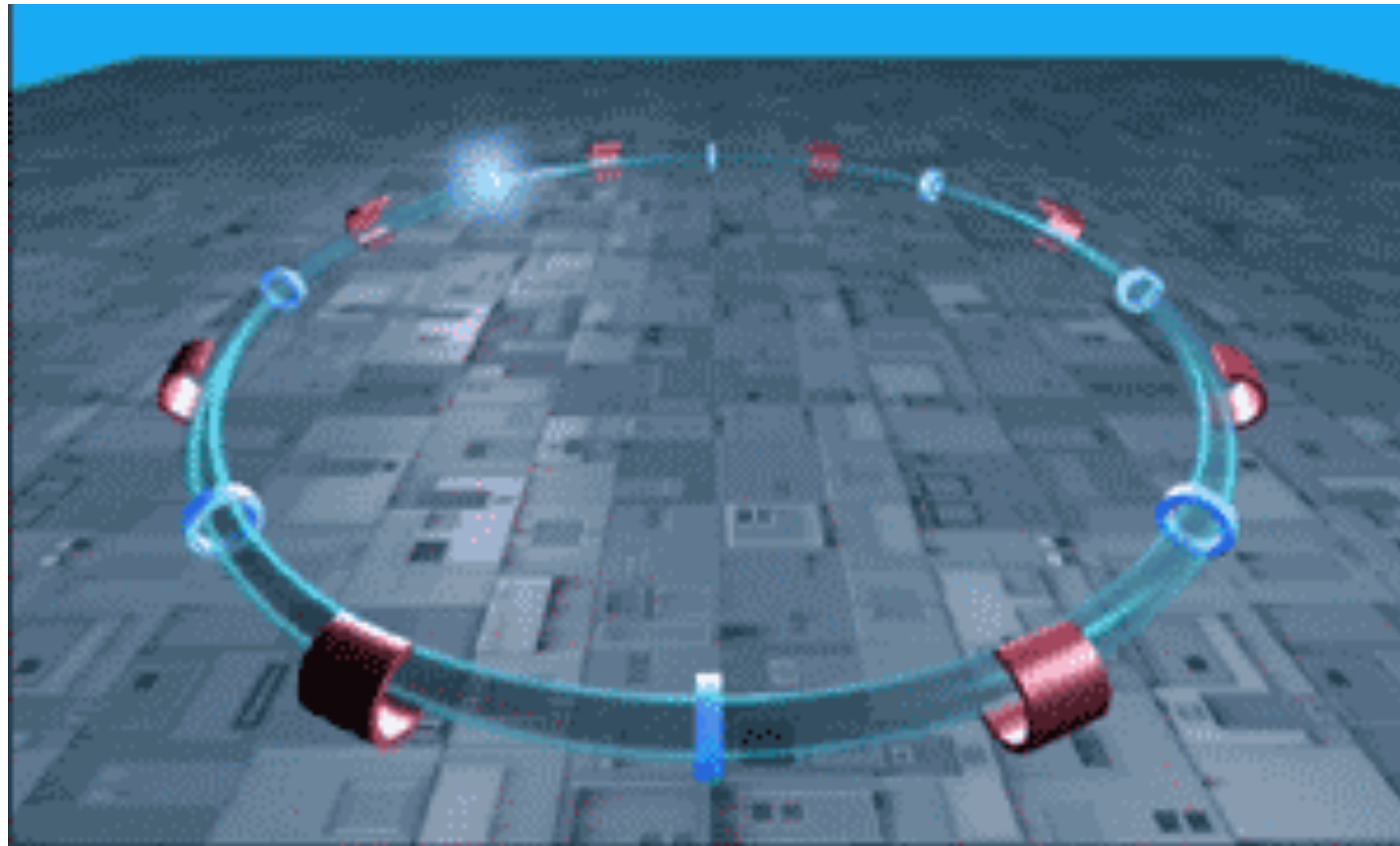
- Κοιλότητες ραδιοσυχνοτήτων σε γραμμική διάταξη
- Τα σωματίδια διαπερνούν μέσα από τις κοιλότητες και επιταχύνονται εάν έχουν τη σωστή φάση ως προς το δυναμικό

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t)$$

Κυκλικοί Επιταχυντές

Στους **κυκλικούς επιταχυντές** περιστρέφονται σε κυκλική τροχιά

- Επαναλαμβάνουν πολλές περιστροφές έως ότου αποκτήσουν την επιθυμητή ενέργεια.



Πως καμπυλώνεται η τροχιά των φορτισμένων σωματιδίων; Με την εφαρμογή **μαγνητικού πεδίου**

Καμπύλωση σωματιδίων

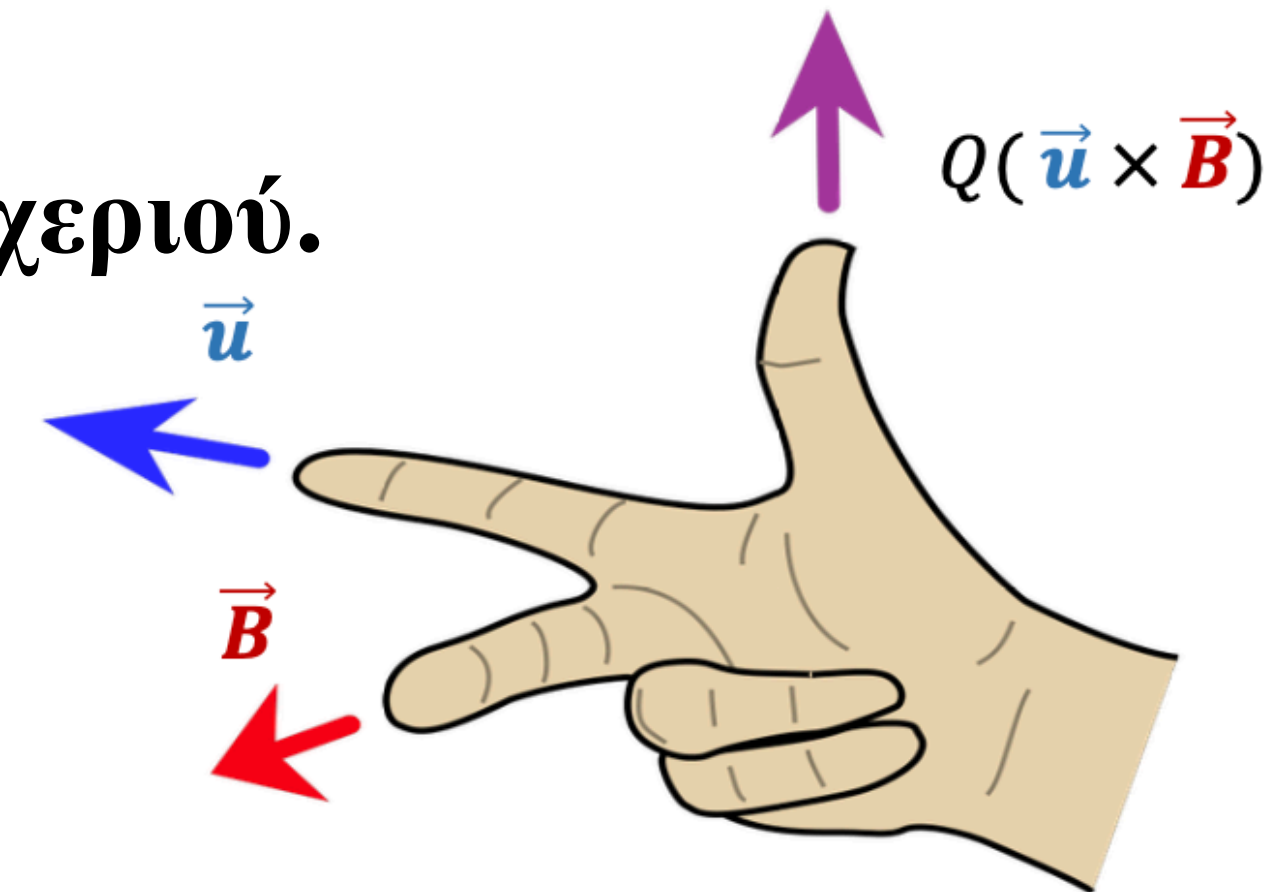
Η δύναμη που ασκείται στο φορτίο q που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο \vec{B} είναι:

$$\vec{F}_B = q(\vec{u} \times \vec{B})$$

Η \vec{F}_B είναι κάθετη στη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της \Rightarrow ΔΕΝ παράγει έργο

Η κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης καθορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού.

- **Θετικό φορτίο:** ο αντίχειρας δείχνει προς την κατεύθυνση της δύναμης.
- **Αρνητικό φορτίο:** η δύναμη έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του αντίχειρα.



Καμπύλωση σωματιδίων

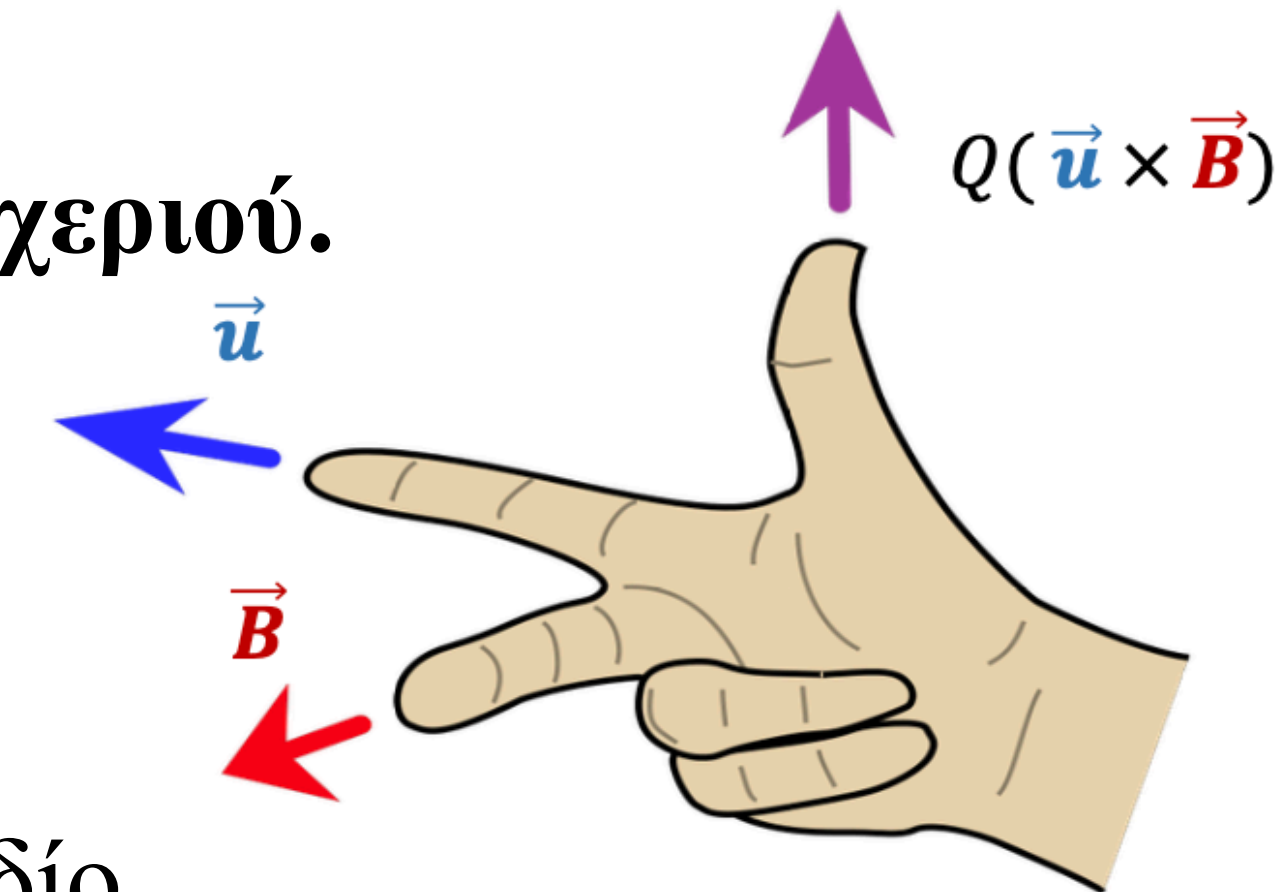
Η δύναμη που ασκείται στο φορτίο q που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο \vec{B} είναι:

$$\vec{F}_B = q(\vec{u} \times \vec{B})$$

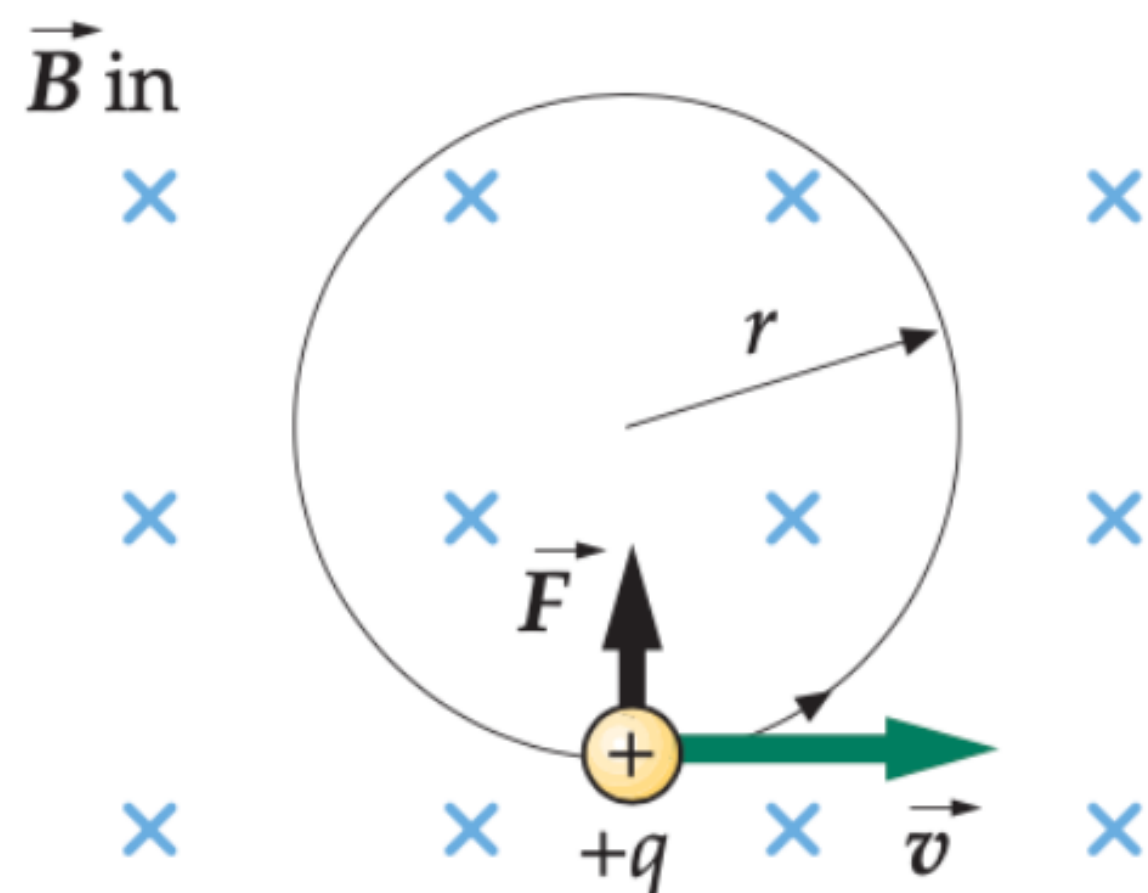
Η \vec{F}_B είναι κάθετη στη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της \Rightarrow ΔΕΝ παράγει έργο

Η κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης καθορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού.

- **Θετικό φορτίο:** ο αντίχειρας δείχνει προς την κατεύθυνση της δύναμης.
- **Αρνητικό φορτίο:** η δύναμη έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του αντίχειρα.



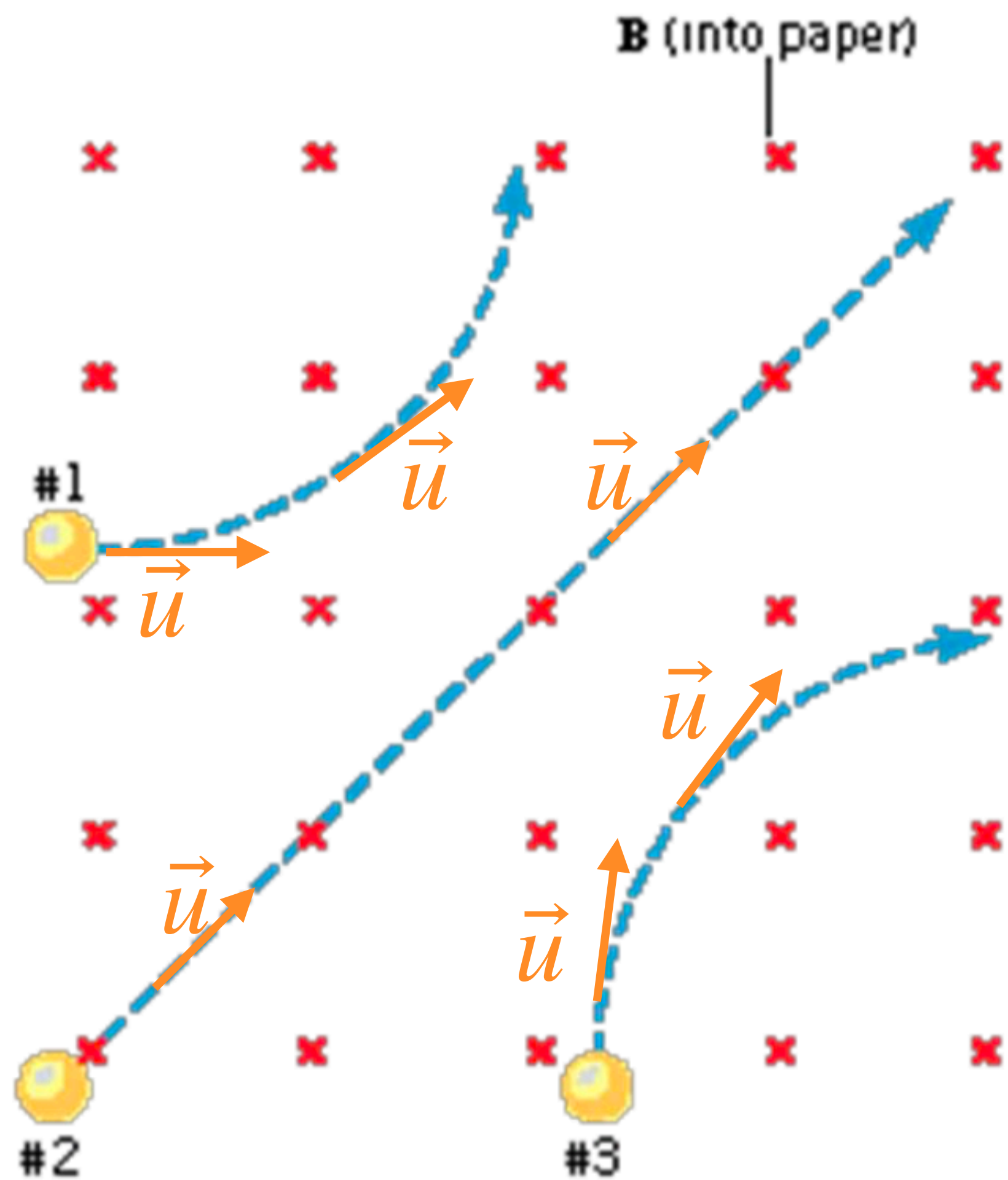
Φορτισμένο σωματίδιο σε ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} και ταχύτητα κάθετη στο πεδίο.



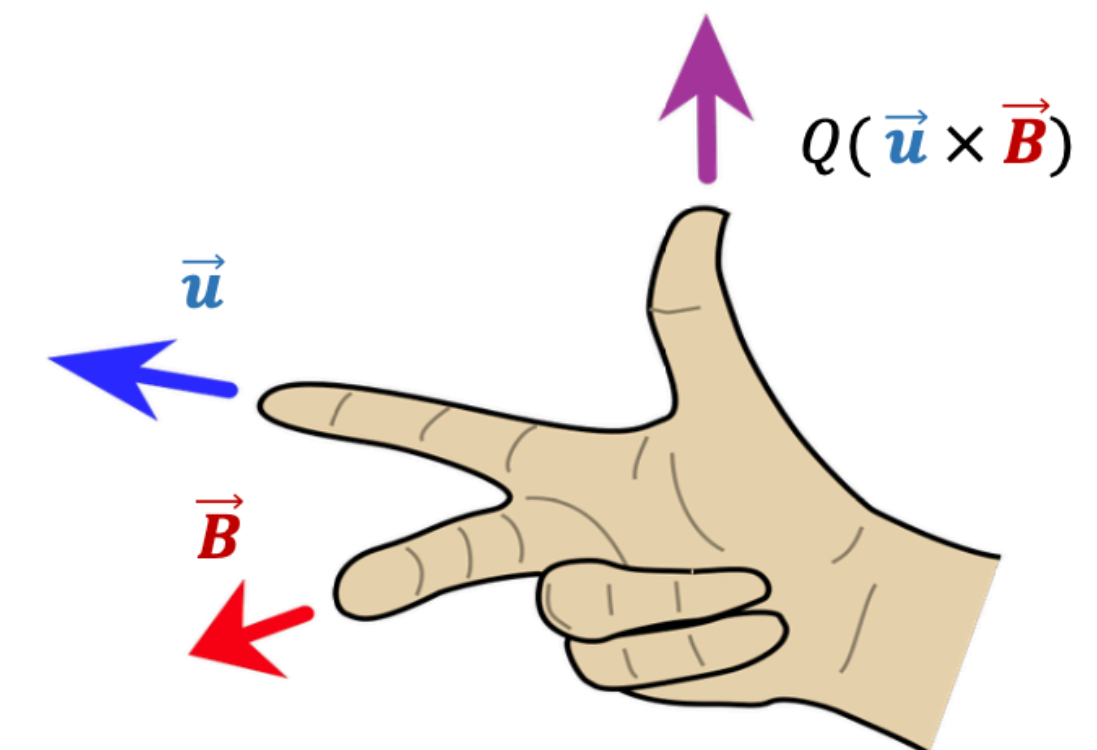
- Το σωματίδιο κινείται σε κύκλο
- Η \vec{F}_B έχει κατεύθυνση πάντοτε προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς
- Δημιουργεί κεντρομόλο επιτάχυνση, η οποία αλλάζει την κατεύθυνση της ταχύτητας του σωματιδίου

Καμπύλωση σωματιδίων: Ερώτηση

Τρία σωματίδια κινούνται μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο, \vec{B} με κατεύθυνση προς το εσωτερικό της σελίδας και ακολουθούν τις τροχιές που φαίνονται στο σχήμα.



- Ποιο σωματίδιο είναι θετικά φορτισμένο;
- Ποιο σωματίδιο είναι αρνητικά φορτισμένο;
- Ποιο σωματίδιο είναι ουδέτερα φορτισμένο;

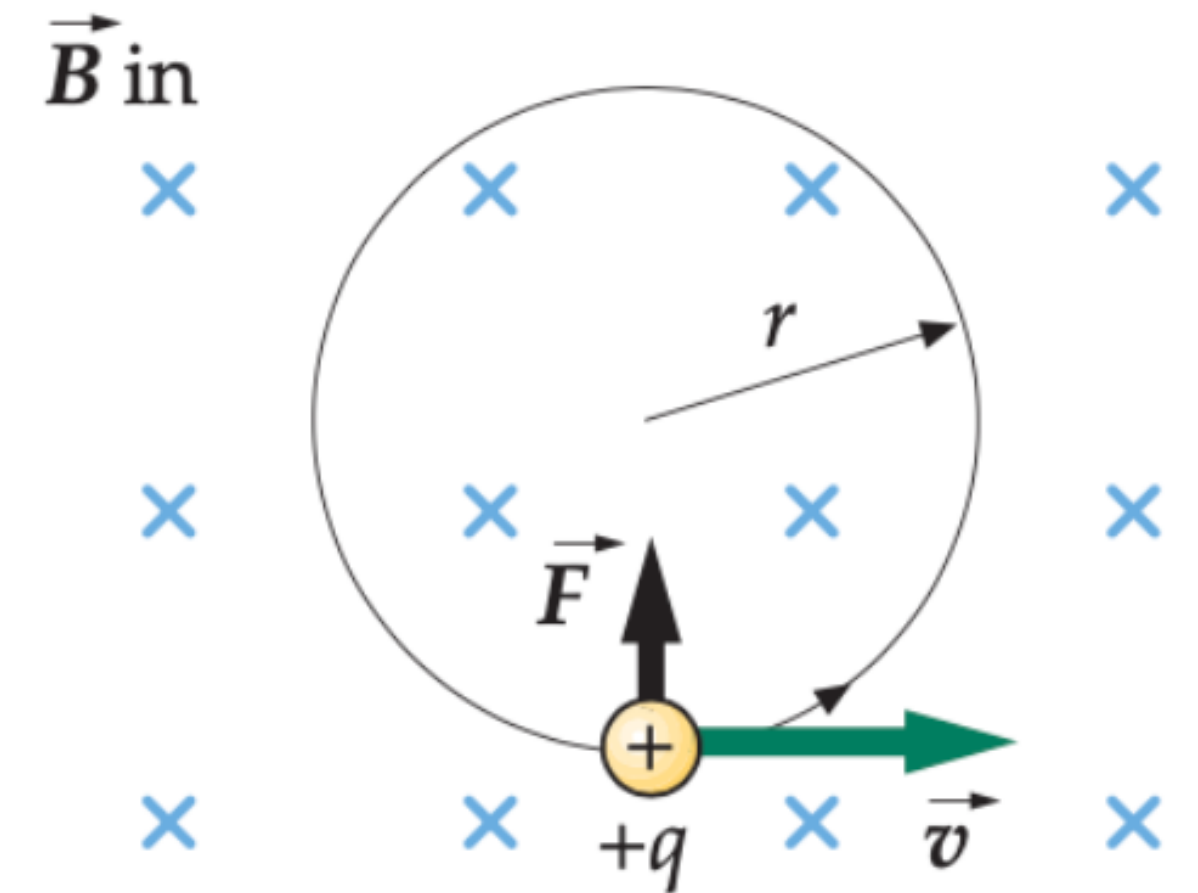


Φορτισμένο σωματίδιο μέσα σε μαγνητικό πεδίο ¹⁶

Από τον 2ο νόμο του Νεύτωνα: $F = ma = m \frac{u^2}{r}$ (κεντρομόλος επιτάχυνση)

Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης: $F_B = qBu$

Επομένως: $quB = m \frac{u^2}{r} \Rightarrow mu = rqB$



Στους επιταχυντές τα σωματίδια αποκτούν εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες

- Υπάρχει τεχνολογικό όριο στο πόσο μεγάλο μπορεί να γίνει το μαγνητικό πεδίο.
- Η ακτίνα r θα πρέπει να είναι μεγάλη για να επιτύχουμε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός

$$r = \frac{mu}{qB}$$

Γραμμικός ή κυκλικός επιταχυντής;

Γραμμικός

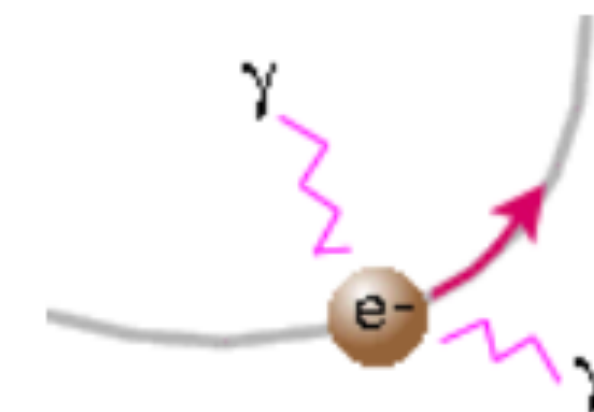
- Φθηνότερος και πιο εύκολος στην κατασκευή αφού δεν χρειάζονται τεράστιοι μαγνήτες για να καμπυλώνουν τη δέσμη
- Μπορούν να επιταχύνουν ηλεκτρόνια (e^-) σε υψηλές ενέργειες

Χρησιμοποιούνται κυρίως για μετρήσεις φυσικών μεγεθών με μεγάλη ακρίβεια



Κυκλικός

- Υψηλές ενέργειες σωματιδίων χωρίς να χρειάζεται ο επιταχυντής να έχει μεγάλο μήκος
- Τα ηλεκτρόνια (e^-) δεν καταφέρνουν να φτάσουν σε υψηλές ενέργειες λόγω εντονότερης ακτινοβολίας



Χρησιμοποιούνται κυρίως για ανακαλύψεις σωματιδίων

Ο μεγάλος αδρονικός επιταχυντής (LHC)

Ο μεγαλύτερος και πιο ισχυρός επιταχυντής σωματιδίων στον κόσμο

- Βρίσκεται στο CERN, στα γαλλο-ελβετικά σύνορα σε βάθος 50-175 m
- Κυκλικός επιταχυντής, με περίμετρο $\sim 27\text{km}$
- Συγκρούει δέσμες πρωτονίων αντίθετης φοράς με ενέργεια κέντρου μάζας έως 14 TeV (7 TeV ανά δέσμη).
- Μαγνητικό πεδίο έντασης 8 Tesla
- Σύγκρουση στα 4 σημεία σκέδαση (4 ανιχνευτές): ATLAS, CMS, ALICE, LHCb

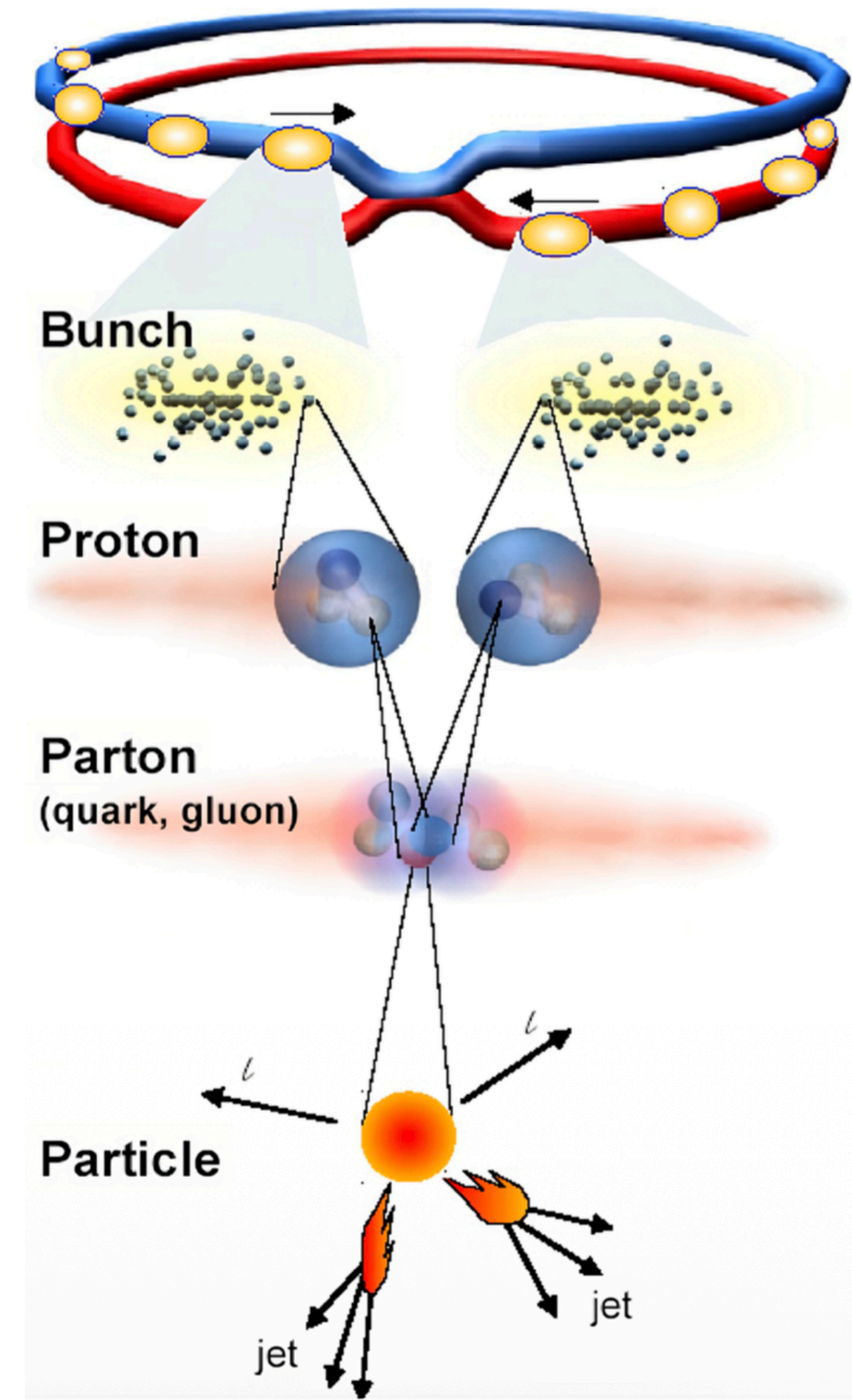


$1eV = 1.6 \times 10^{-19} J$
 Η ενέργεια που αποκτά ένα e όταν κινηθεί σε διαφορά δυναμικού 1 V
 $1TeV = 1 \times 10^{12} eV$

Ο μεγάλος αδρονικός επιταχυντής (LHC)

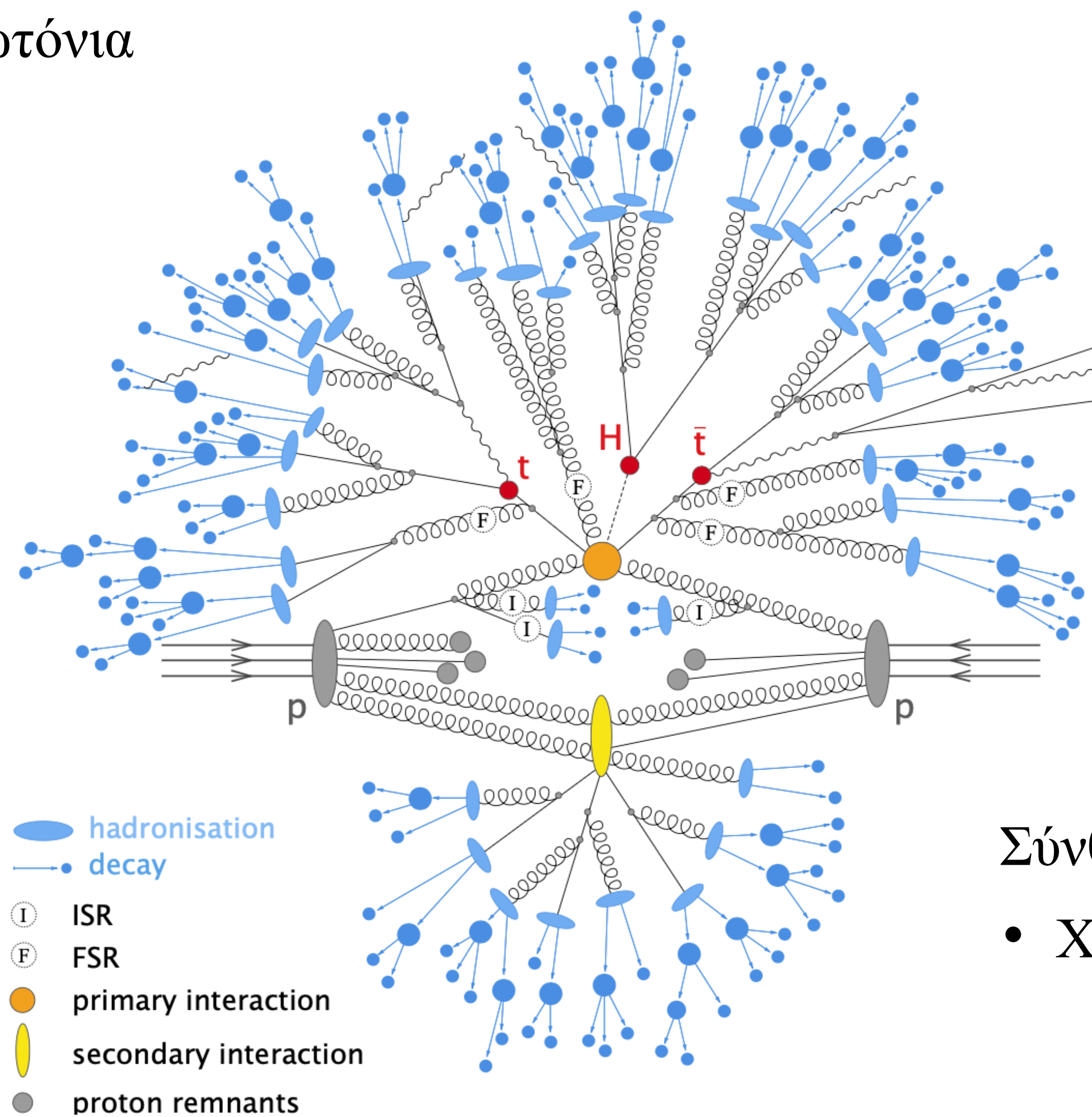
Δέσμες πρωτονίων:

- Κάθε δέσμη αποτελείται από 2808 «πακέτα» πρωτονίων
- Απόσταση μεταξύ των «πακέτων»: $7.5m$ ($25ns$)
- Κάθε «πακέτο» περιέχει 10^{11} πρωτόνια
- Τα πρωτόνια κινούνται με ταχύτητα σχεδόν ίση με την ταχύτητα του φωτός!
- Διαγράφουν 11245 περιστροφές στη σήραγγα μέχρι να σκεδαστούν, $27km$ ανά δευτερόλεπτο
- Συχνότητα σύγκρουσης πρωτονίων-πρωτονίων: $40MHz$



Ο μεγάλος αδρονικός επιταχυντής (LHC)

Οι συγκρούσεις πρωτονίων είναι στην πραγματικότητα συγκρούσεις μεταξύ quarks και gluons που βρίσκονται μέσα στα πρωτόνια



Σύνθετα σωματίδια (έχουν υποδομή):

- Χαοτική τελική κατάσταση

Ο μεγάλος αδρονικός επιταχυντής (LHC)

Πως δημιουργείται η δέσμη πρωτονίων;

Ο μεγάλος αδρονικός επιταχυντής (LHC)

Πως δημιουργείται η δέσμη πρωτονίων;

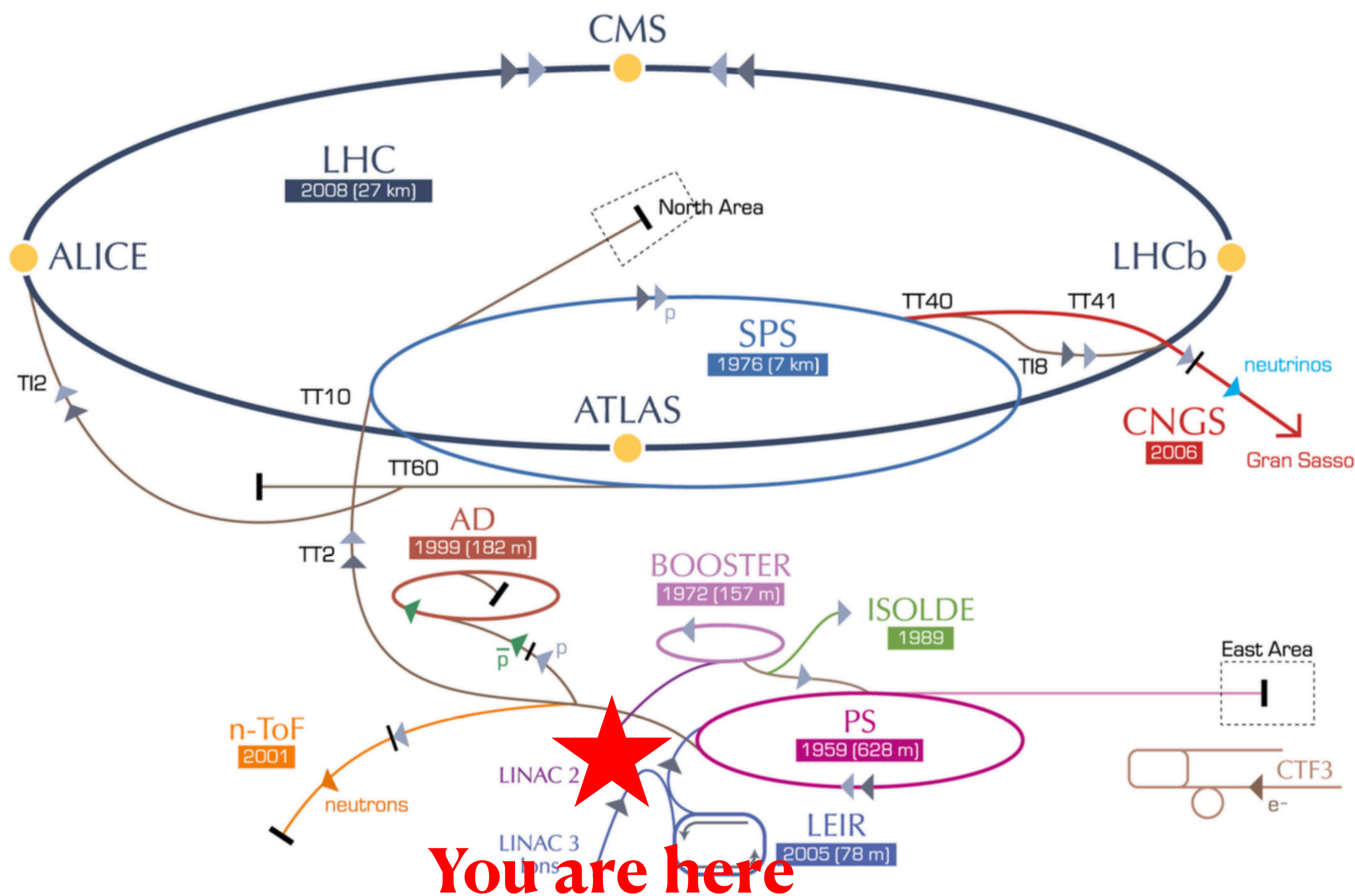
Όλα ξεκινούν από ένα μπουκάλι Υδρογόνου (H_2)

- Το υδρογόνο τοποθετείται σε έναν μεταλλικό κύλινδρο που βρίσκεται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο
- Το υδρογόνο ιονίζεται από τις αλληλεπιδράσεις με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και «σπάει» στα συστατικά του, πρωτόνια και ηλεκτρόνια: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Τα πρωτόνια συλλέγονται και σχηματίζουν μια δέσμη πρωτονίων η οποία μεταφέρεται στο σύμπλεγμα επιταχυντών του LHC



Ο μεγάλος αδρονικός επιταχυντής (LHC): Το σύμπλεγμα επιταχυντών

Οι δέσμες πρωτονίων περνούν από ένα επιταχυντικό σύμπλεγμα το οποίο παρέχει στη δέσμη την αρχική της ενέργεια πρώτου εισέρθει στον LHC



- Γραμμικός επιταχυντής LINAC 2:
 - Ενέργεια 50 MeV
- Proton Synchrotron Booster (PSB):
 - Ενέργεια 1.4 GeV
- Proton Synchrotron (PS):
 - Ενέργεια 28 GeV
- Super Proton Synchrotron (SPS):
 - Ενέργεια 450 GeV
- Large Hadron Collider (LHC):
 - Μέγιστη ενέργεια 7 TeV

Οι δύο δέσμες συγκρούονται στα 4 σημεία ATLAS, CMS, ALICE, LHCb



CERN

Near Geneva

N 46.23076

E 1°51'15.0