

# Τεχνολογία Επιταχυντών

Καθηγ. Ευάγγελος Ν. Γαζής  
ΕΜΠ

Δρ. Ιωάννης Παπαφιλίπου  
CERN-BE

Επιμόρφωση Καθηγητών Μ.Ε.  
Αύγουστος 2016  
CERN

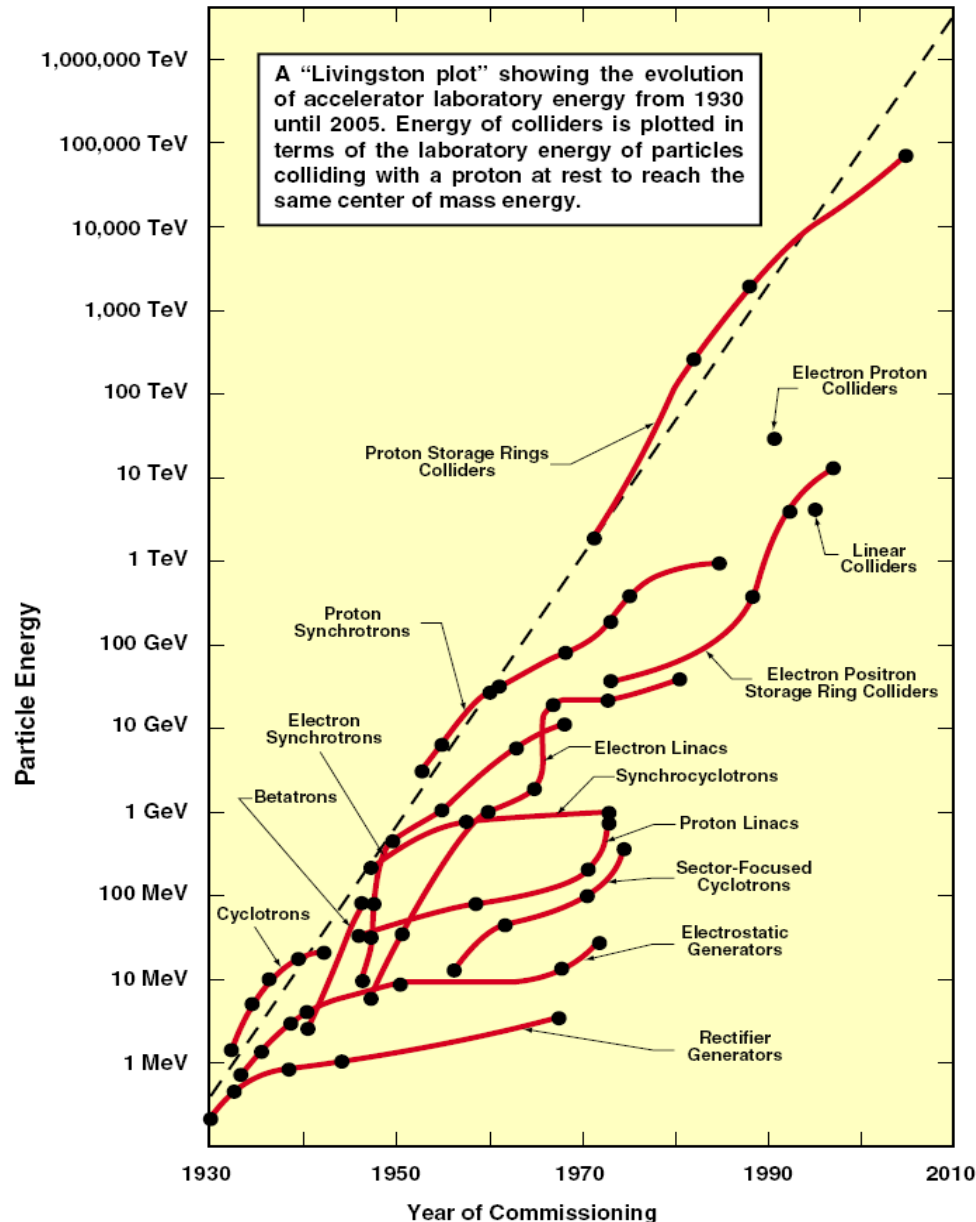
# ΙΑΤΡΙΚΟΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ ~20'000

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΟΓΚΟΛΟΓΙΑ: Ακτινοβόληση κακοήθων όγκων με δέσμες φωτονίων ή φορτισμένων σωματιδίων  
ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ: Ιατρικά Ραδιο-Ισότοπα για την έγκαιρη διάγνωση και θεραπεία σοβαρών ασθενειών

# ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ ~1000

Έρευνα στην Πυρηνική και Σωματιδιακή Φυσική,  
Ανάπτυξη εφαρμογών στη βιομηχανία, Γεωργία,  
Ναυτιλία, Μελέτη Υλικών, κλπ.

# Εξέλιξη της ενεργειας των επιταχυντών



- Το διάγραμμα "Livingston" δείχνει εκθετική αύξηση της ενέργειας με το χρόνο
- Η ενέργεια αυξάνεται μία τάξη μεγέθους κάθε 6-10 χρόνια
- Νέες τεχνολογίες αντικαθιστούν τις παλιές για επίτευξη υψηλότερων ενεργειών, έως ότου επέρχεται κορεσμός και αντικατάσταση με νέα τεχνολογία
- Η διαδικασία συνεχίζεται...

ΑΛΛΑ

- Η ενέργεια δεν είναι το μόνο ενδιαφέρον μέγεθος

- Ένταση δέσμης
- Διατομή της δέσμης

# Κατηγορίες επιταχυντών

Με βάση τις αρχές λειτουργίας

- **Βήατρα** (betatrons), **κύκλοτρα** (cyclotrons), **μίκροτρα** (microtrons), **γραμμικοί επιταχυντές** (linacs), **σύγχροτρα** (synchrotrons), **ενισχυτές** (boosters), **συσσωρευτικοί δακτύλιοι** (accumulator rings), **αποθηκευτικοί δακτύλιοι** (storage rings), **επιταχυντές πλάσματος** (plasma driven accelerators)

Με βάση την ενέργεια

- **Υψηλής** (μερικά GeV, TeV), **μέσης** (μερικά MeV), **χαμηλής** (κάτω από MeV)

Με βάση την ένταση της δέσμης

- **Υψηλής** (μερικά Amps), **μέσης** (μερικά mA), **χαμηλής** (κάτω από mA)

Με βάση το είδος των σωματιδίων

- **Λεπτονικοί** (ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων, μιονίων), **Αδρονικοί** (πρωτονίων, βαρέων ιόντων)

Με βάση τον πειραματικό σκοπό

- **Συγκρουομένων δεσμών** (colliders), **εργοστάσια σωματιδίων** (factories), **πηγές ακτινοβολίας σύγχροτρον** (synchrotron light sources), **πηγές εκπομπής νετρονίων** (spallation neutron sources), **ιατρικοί (medical accelerators)**, **πολλαπλασιαστές ενέργειας** (energy amplifiers)...



# Συμπλέγματα επιταχυντών

## Επιταχυντές υψηλών ενεργειών

- Αδρονικοί συγκρουομένων δεσμών (TeVatron, RHIC, HERA, LHC, VLHC)
- Λεπτονικοί συγκροομένων δεσμών (LEP, CESR, PEP-II, KEKB, DAFNE, ILS, CLIC)

## Συσσωρευτές και σύγχροτρα υψηλής ένστασης

- Πηγές νετρονίων κατα διάσπαση (ISIS, SNS, ESS, JAERI)
- Εργοστάσια παραγωγής νετρίνων (Neutrino factories)
- Πολλαπλασιαστές ενέργειας, εγκαταστάσεις απενεργοποίησης πυρηνικών αποβλήτων (JAERI)

## Πηγές ακτινοβολίας σύγχροτρον

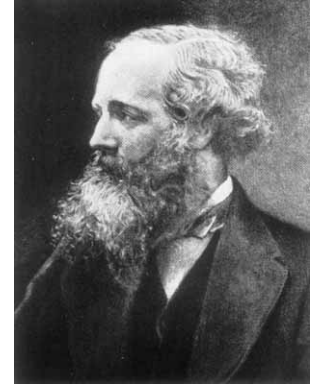
- Πρώτης γενιάς (PETRA, SPEAR)
- Δεύτερης γενιάς (BESSY I, SPEAR II, NSLS)
- Τρίτης γενιάς (ESRF, APS, SPRING-8, SLS, SOLEIL, DIAMOND, ALBA)
- Τέταρτης γενιάς – Laser ελευθέρων ηλεκτρονίων (FEL – TESLA, LCLS)

## Επιταχυντές εφαρμογών

- Ιατρικοί επιταχυντές** (LLUMC, MEDAUSTRON, HICAT, PSI, TERA)
- Βιομηχανικοί επιταχυντές (CAT, Rhodotrons, VARIAN, ACSION)

# Εξισώσεις Maxwell

- **Φυσική των επιταχυντών:** περιγραφή δυναμικής φορτισμένων σωματιδίων παρουσία ηλεκτομαγνητικών πεδίων
- **Εξισώσεις Maxwell:** σχετίζουν τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που παράγονται από φορτία και κατανομές ρεύματος



$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

**Νόμος Gauss:** απόκλιση ηλεκτρικού πεδίου δίνει την πυκνότητα πηγών φορτίου

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

**Νόμος Gauss για μαγνητισμό:** δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}$$

**Νόμος επαγωγής του Faraday:** μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί την παραγωγή ηλεκτρικού πεδίου

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}$$

**Νόμος Ampere-Maxwell:** ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου σε κλειστή καμπύλη είναι ανάλογο του ρεύματος που τρέχει στην καμπύλη (στατικό ηλεκτρικό πεδίο)



$\mathbf{E}$  = ηλεκτρικά πεδία [V/m]

$\mathbf{B}$  = μαγνητική επαγωγή [T]

$\rho$  = πυκνότητα φορτίου [C/m<sup>3</sup>]

$\mathbf{j}$  = πυκνότητα ρεύματος [A/m<sup>2</sup>]

$\mu_0$  (μαγνητική διαπερατότητα) =  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [C V<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>]

$\epsilon_0$  (ηλεκτρική διαπερατότητα) =  $8.854 \cdot 10^{-12}$  [V s A<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>]

$c$  (ταχύτητα φωτός) =  $2.99792458 \cdot 10^8$  m/s

$1/c^2 = \mu_0 \epsilon_0$

# Δύναμη Lorentz

- Δύναμη πάνω σε φορτισμένα σωματίδια που κινούνται υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \text{ή} \quad \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m_0\gamma\mathbf{v}) = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- Στους επιταχυντές: Τα ηλεκτρικά πεδία χρησιμοποιούνται για επιτάχυνση σωματιδίων και τα μαγνητικά πεδία για καθοδήγηση της δέσμης:
  - Ολοκλήρωση της δύναμης ως προς το μήκος της τροχιάς για τον υπολογισμό της κινητικής ενέργειας (ή υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής της ενέργειας)

Με άλλα λόγια:

- Η Κινητική ενέργεια της δέσμης αλλάζει από **ηλεκτρικά** αλλά **όχι** από **μαγνητικά πεδία**

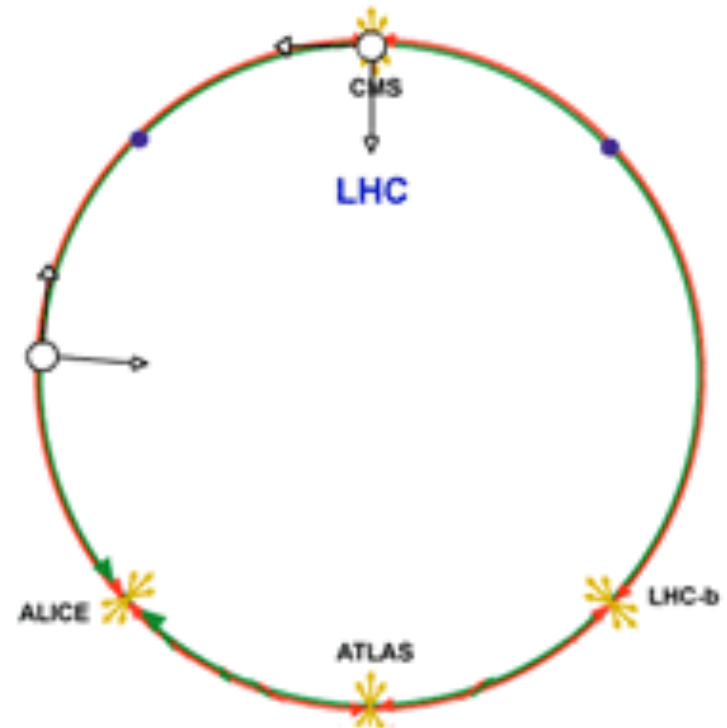
# Δύναμη Lorentz

Πώς οι μαγνήτες του LHC Magnets συγκρατούν τα σωματίδια σε κυκλική τροιά?

$$F = qvB = \frac{mv^2}{\rho}$$

$$B\rho = \frac{p}{q}$$

$B\rho$  = Μαγνητική ακαμψία (Magnetic Rigidity)



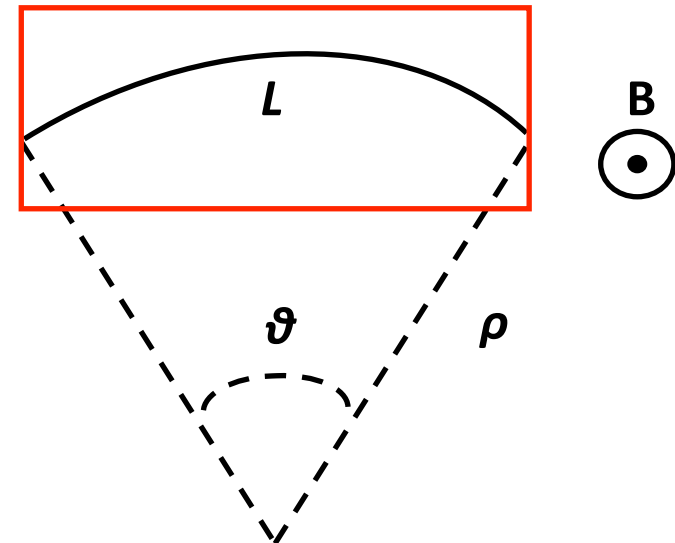
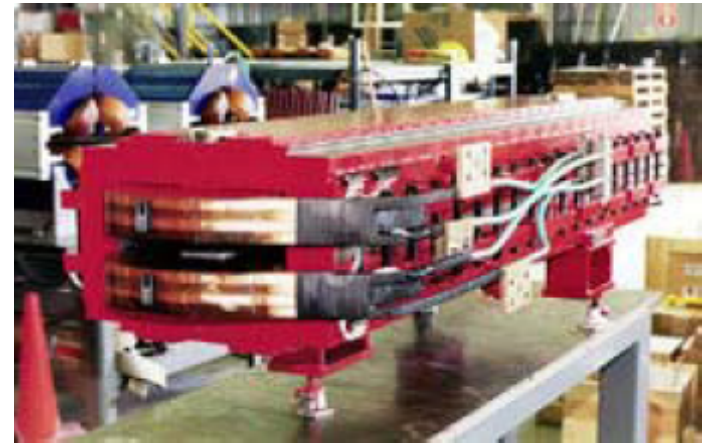
# Δίπολα

- Θεωρούμε κυκλικό επιταχυντή σωματιδίων ενέργειας  $E$  με  $N$  δίπολα μήκους  $L$
- Γωνία κάμψης  $\theta = \frac{2\pi}{N}$
- Ακτίνα κάμψης  $\rho = \frac{L}{\theta}$
- Ολοκληρωμένο διπολικό πεδίο  $BL = \frac{2\pi}{N} \frac{\beta E}{q}$

Επιλέγοντας ένα διπολικό μαγνητικό πεδίο, καθορίζεται και το μήκος του, και αντιστρόφως

Για υψηλότερα πεδία, μικρότερα και λιγότερα δίπολα μπορούν να χρησιμοποιηθούν

Η περιφέρεια του δακτυλίου (κόστος) επηρεάζεται από την επιλογή του πεδίου



# LHC Dipole Magnets

Οι διπολικοί μαγνήτες αποκλίνουν την τροχιά των σωματιδίων και τα σε κυκλική κίνηση.

Για ενέργεια πρωτονίων  $E = 7 \text{ TeV}$

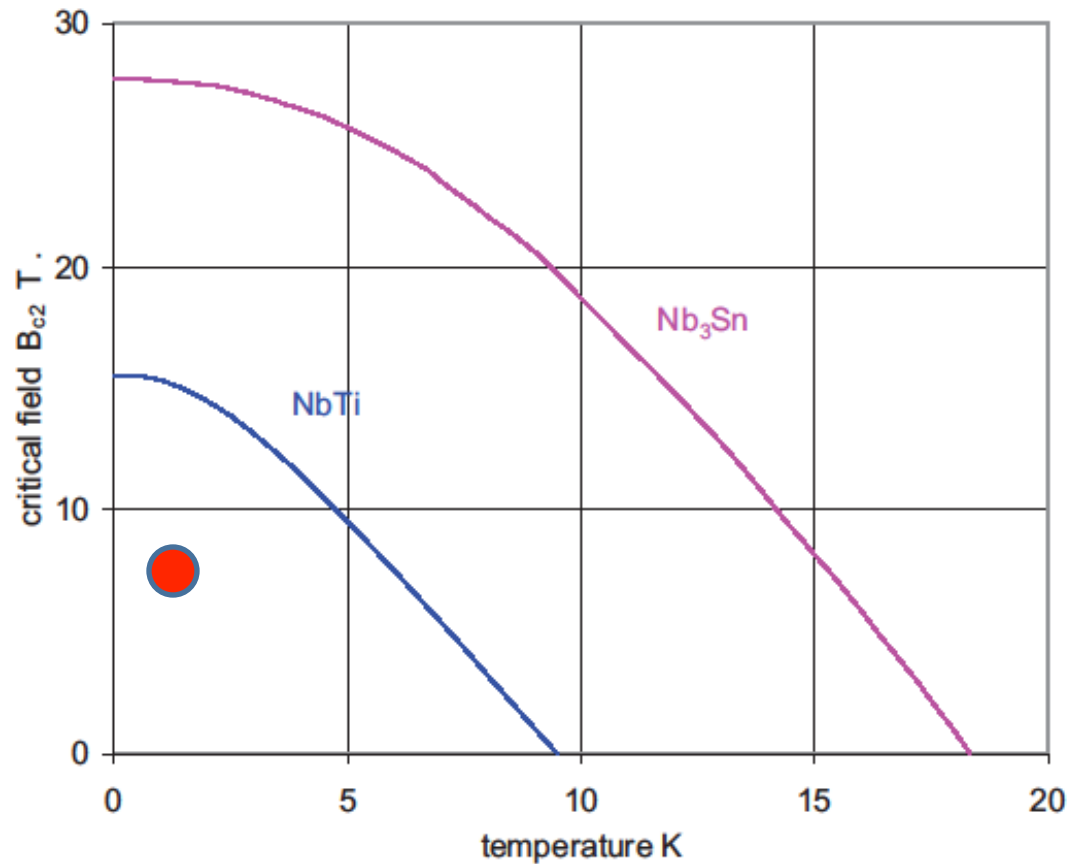
Οι διπολικοί μαγνήτες του LHC πρέπει να έχουν

$$B = 8.3 \text{ T}$$

**ΛΥΣΗ: ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΙ μαγνήτες (NbTi)**

**ψυχόμενοι με υγρό Ηλιο στους  $T = 1.9 \text{ K}$  !**

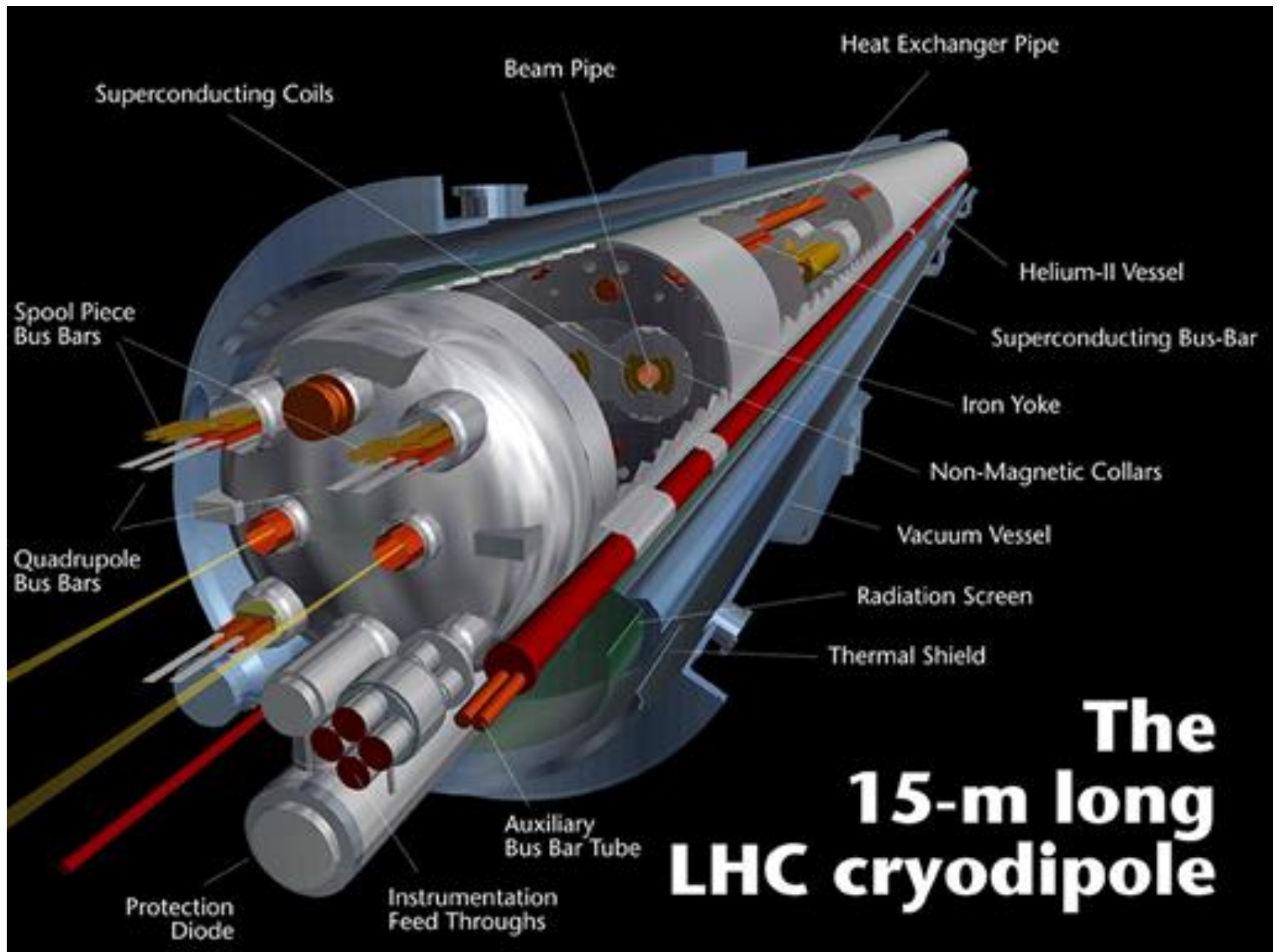
## Critical field & temperature of metallic superconductors



To date, all superconducting accelerators have used NbTi.

Of the intermetallics, only Nb<sub>3</sub>Sn has found significant use in magnets

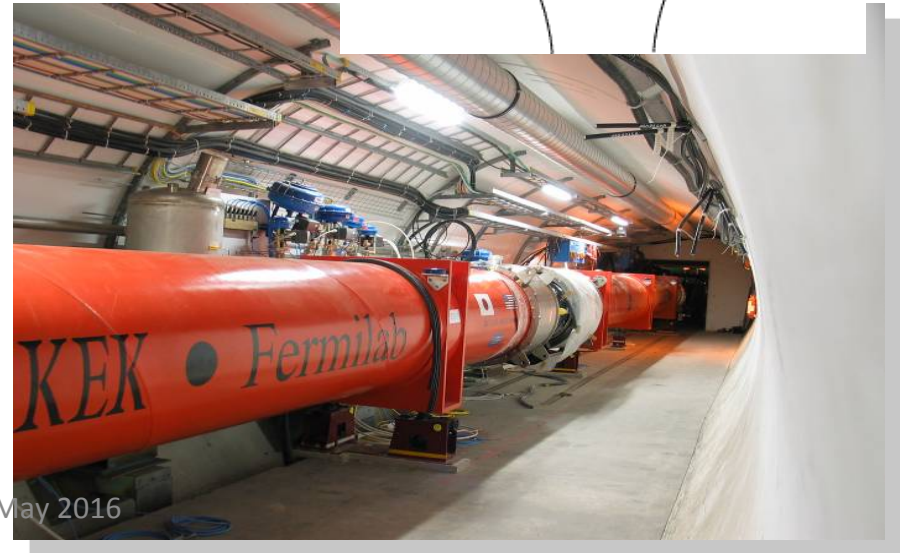
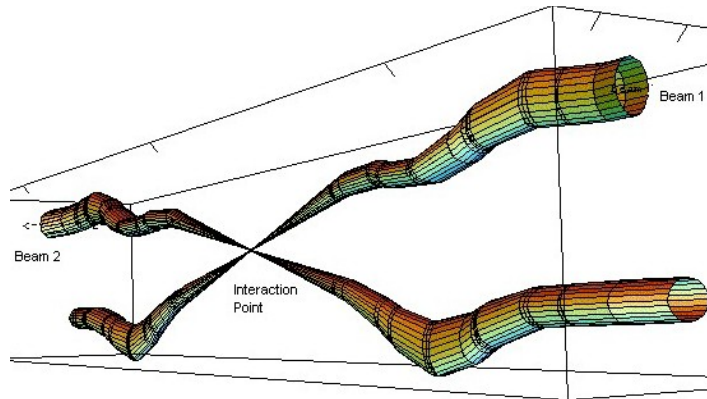
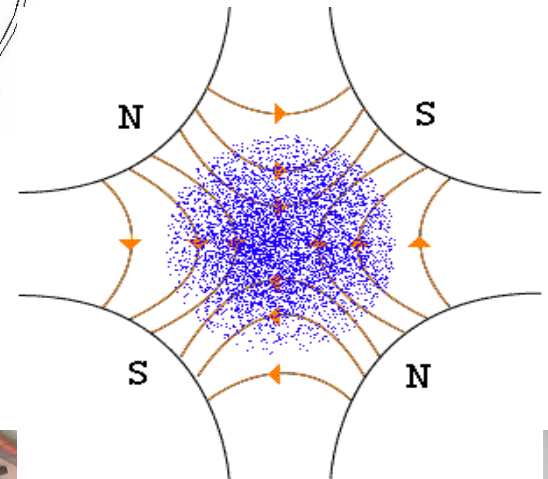
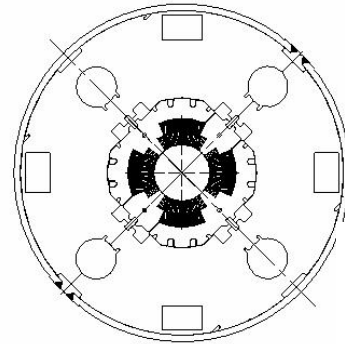






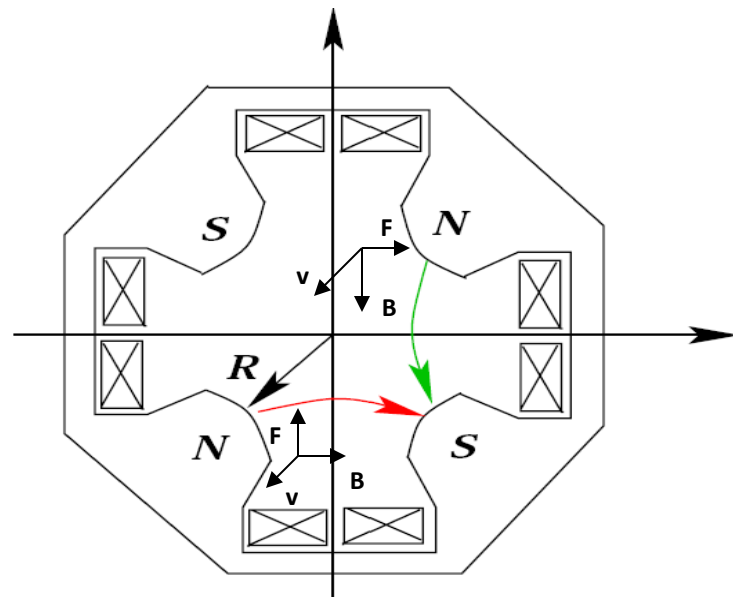
# Beam focusing - LHC quadrupoles

- Superconducting
- Length about 3.5 m
- Many types
- Special type in the interaction points
- Other correctors: sextupoles, octupoles, decaipoles



# Τετράπολα

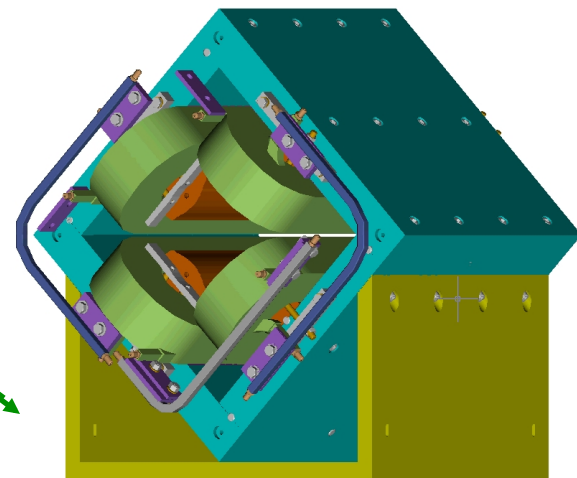
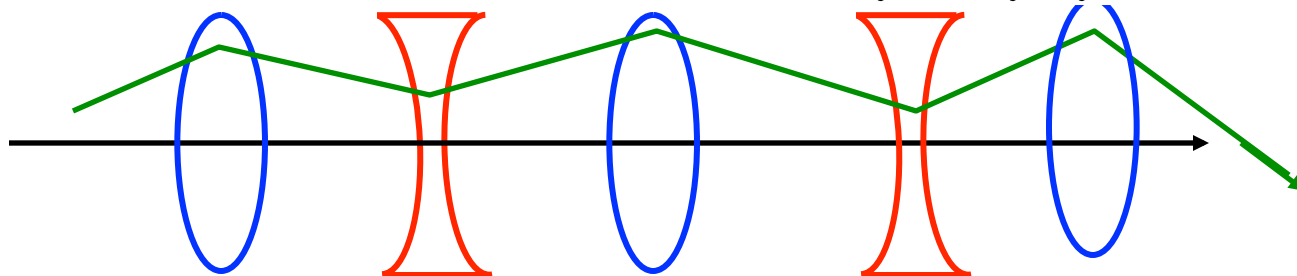
- Τα τετράπολα εστιάζουν στο ένα επίπεδο και αποεστιάζουν στο άλλο
- Το πεδίο είναι
- Η δύναμη γράφει  $(B_x, B_y) = g(y, x)$
- Χρειάζεται εναλλασσ  $(F_x, F_y) = k(y, -x)$ ία ώστε να ελεγχθεί η δέσμη, **εναλλασσόμενη εστια απόκλισης**
- Απο την οπτική γνωρίζουμε ότι ο συνδυασμός δύο φακών με εστιακές αποστάσεις οπτικής  $f_1$  και  $f_2$  που απόσταση  $d$  δίνει ολική εστιακή απόσταση



- Εάν  $f_1 = -f_2$ , υπάρχει ένα καθαρό **φαινόμενο εστίασης**

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

$$\frac{1}{f} = \left| \frac{d}{f_1 f_2} \right|$$



# Ραδιο-κυματικές Κοιλότητες

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ:

Είδος σωματιδίου δέσμης

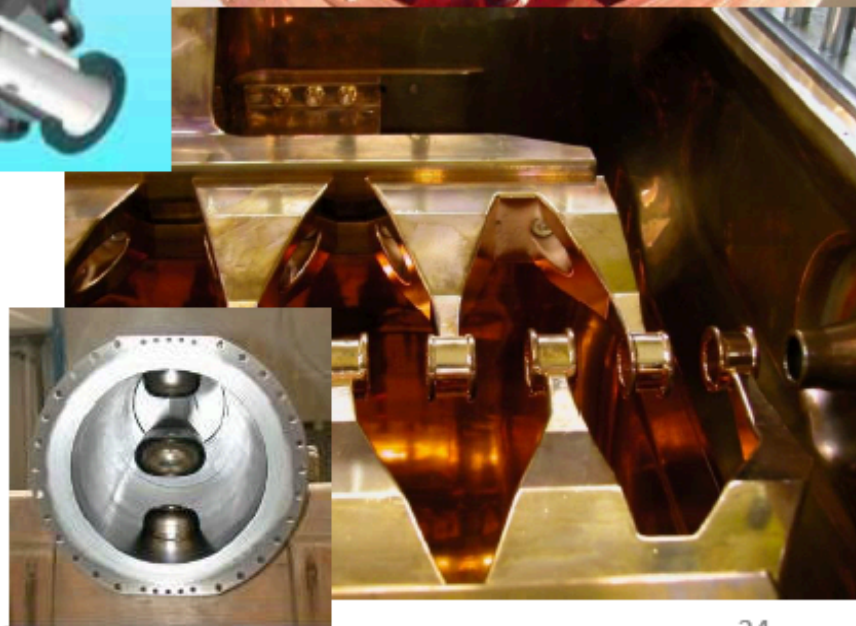
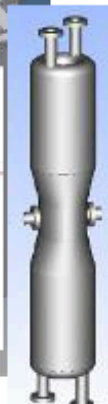
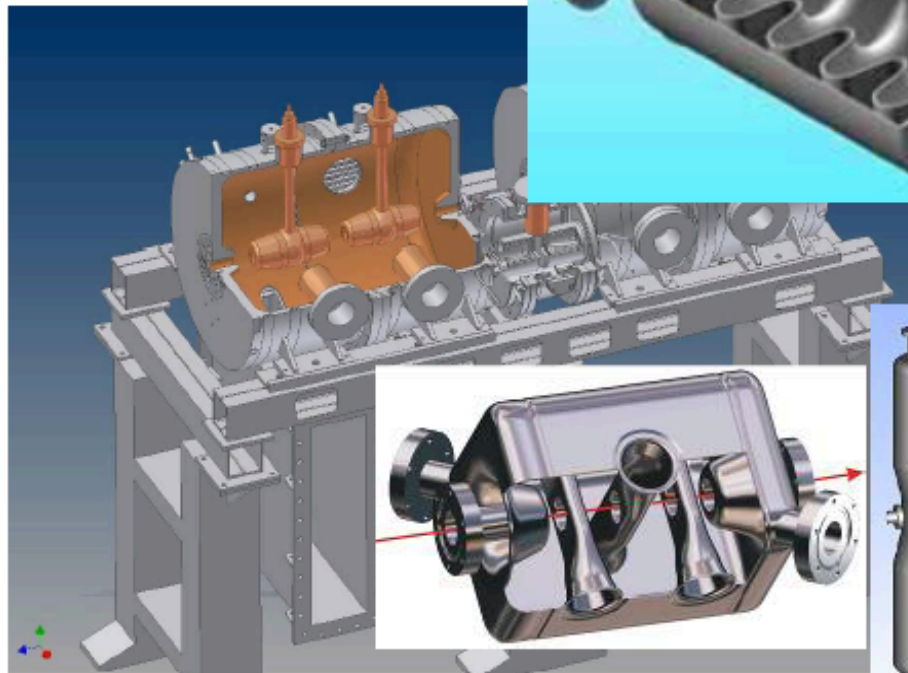
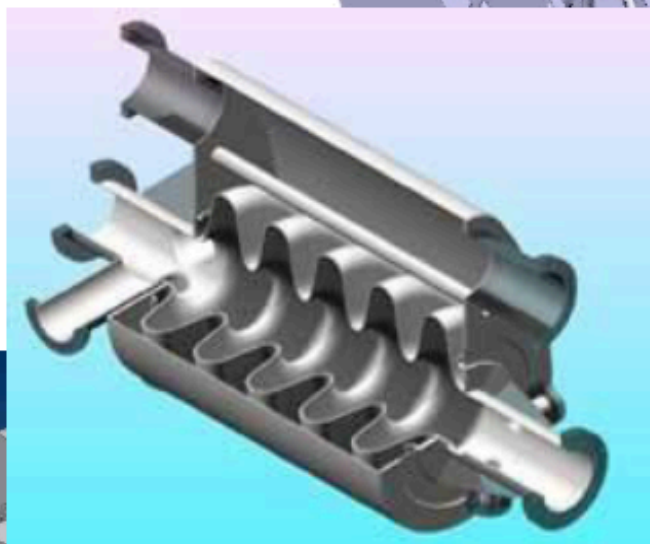
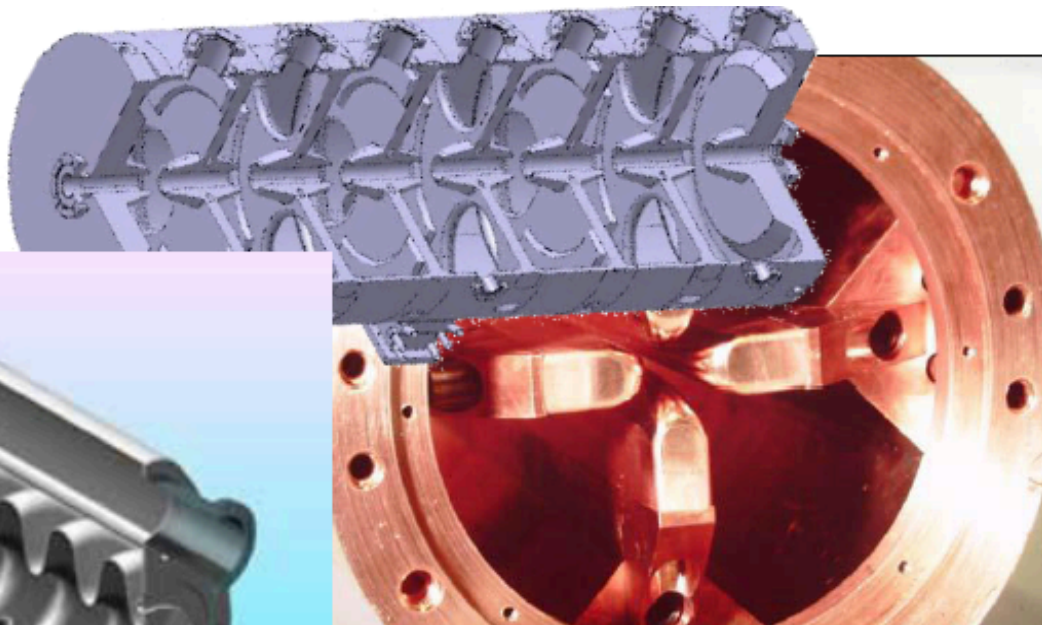
Συχνότητα

Είσοδος/Εξοδος

ενέργειας

Κύκλος εργασίας

κλπ





# ΙΑΤΡΙΚΑ ΡΑΔΙΟ-ΙΣΟΤΟΠΑ

- ΟΛΑ τα στοιχεία του Περιοδικού Συστήματος, περιέχουν αρκετά ΙΣΟΤΟΠΑ το καθένα
- Έχουν προσδιοριστεί 1600 ισότοπα
- Κάθε ισότοπο είναι σταθερό ή ΑΣΤΑΘΕΣ (Ραδιενεργό)

**ΥΔΡΟΓΟΝΟ:** H-1 (99.985%, σταθερό),  
H-2 (0.015%, σταθερό),  
H-3 (Ραδιενεργό,  $T_{1/2} = 12.32$  χρόνια)

**ΑΝΘΡΑΚΑΣ:** 13 Ισότοπα: 2 σταθερά, 9 ασταθή  
C-8, C-9, C-10, C-11, C-12 (98.9%, σταθερό), C-13 (1.1%,  
σταθερό), C-14, C-15, C-16, C-17, C-18, C-19, C-20

$T_{1/2}$  C-14= 5715 χρόνια, Εκπέμπει ηλεκτρόνια (e-)

$T_{1/2}$  C-11= 20.3 λεπτά, Εκπέμπει ποζιτρόνια (e+)



# ΙΑΤΡΙΚΑ ΡΑΔΙΟ-ΙΣΟΤΟΠΑ

<b>Ισότοπο</b>	<b>Half Life</b>	<b>Μεγίστη Ενέργεια (MeV)</b>	<b>Εμβέλεια στο ύδωρ (mm)</b>
<b>F-18</b>	<b>109.7min</b>	<b>0.635</b>	<b>2.39</b>
<b>C-11</b>	<b>20.4min</b>	<b>0.96</b>	<b>4.11</b>
<b>N-13</b>	<b>9.96min</b>	<b>1.19</b>	<b>5.39</b>
<b>O-15</b>	<b>2.07min</b>	<b>1.72</b>	<b>8.2</b>
<b>Rb-82</b>	<b>1,27min</b>	<b>3,150</b>	<b>15,50</b>

# ΙΑΤΡΙΚΑ ΡΑΔΙΟ-ΙΣΟΤΟΠΑ

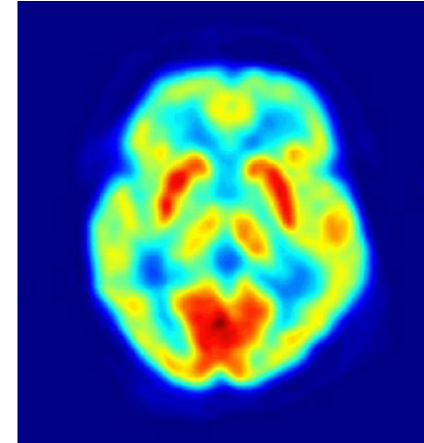
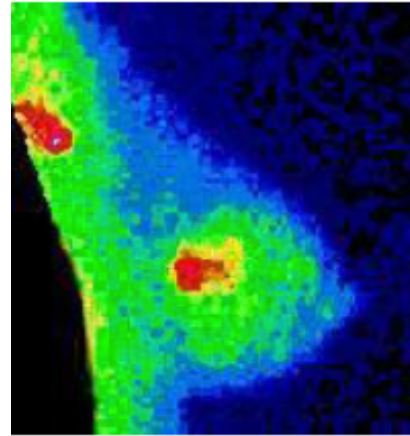
Χρησιμεύουν για

## ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΑΣΘΕΝΕΙΩΝ

Τομογραφία PET

Τομογραφία SPECT

Συνδυαστική Τομογραφία PET/CT



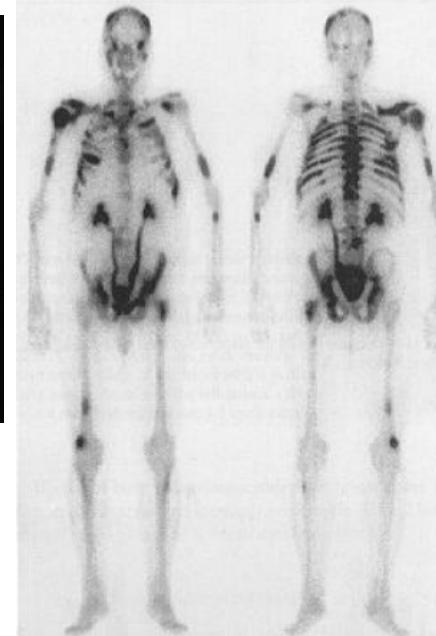
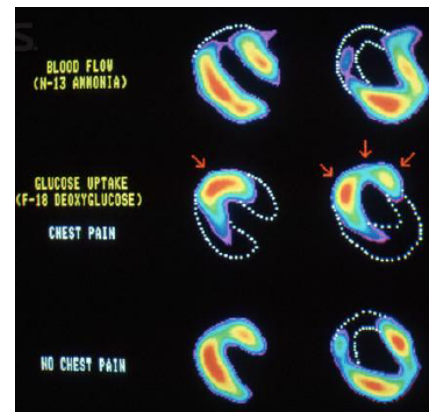
## ΘΕΡΑΠΕΙΑ

Βραχυθεραπεία

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Καρκίνος: Μαστού, Προστάτη, Εγκεφάλου, Οστών

Απεικόνιση: Καρδιακής Λειτουργίας, Θυρεοειδούς



# ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟ-ΙΣΟΤΟΠΩΝ

- Πυρηνικοί Αντιδραστήρες



- Επιταχυντές

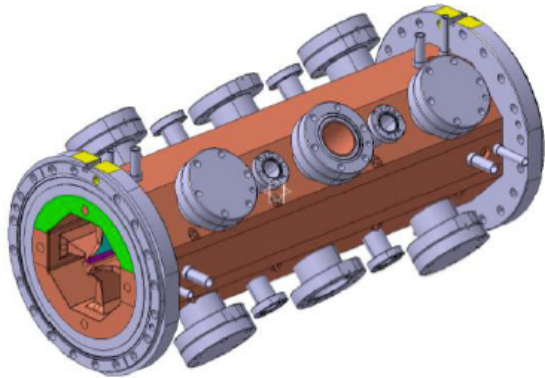
➤ Κυκλικοί



➤ Γραμμικοί

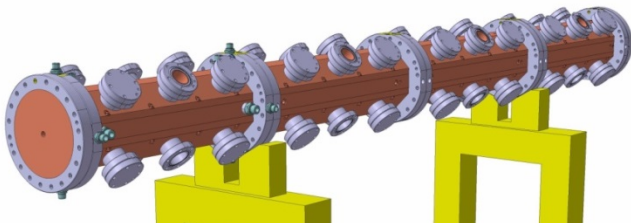


# LINAC = LINEAR ACCELERATOR / ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ



**RFQ:** Σχεδίαση και Κατασκευή  
CERN BE-ABP-HSL

1



**1 RFQ**

**Πηγή Ιόντων  $W = 40 \text{ KeV}$**

**Μήκος  $L = 2 \text{ m}$**

**Έξοδος Επιταχυντή  $W = 5 \text{ MeV}$**

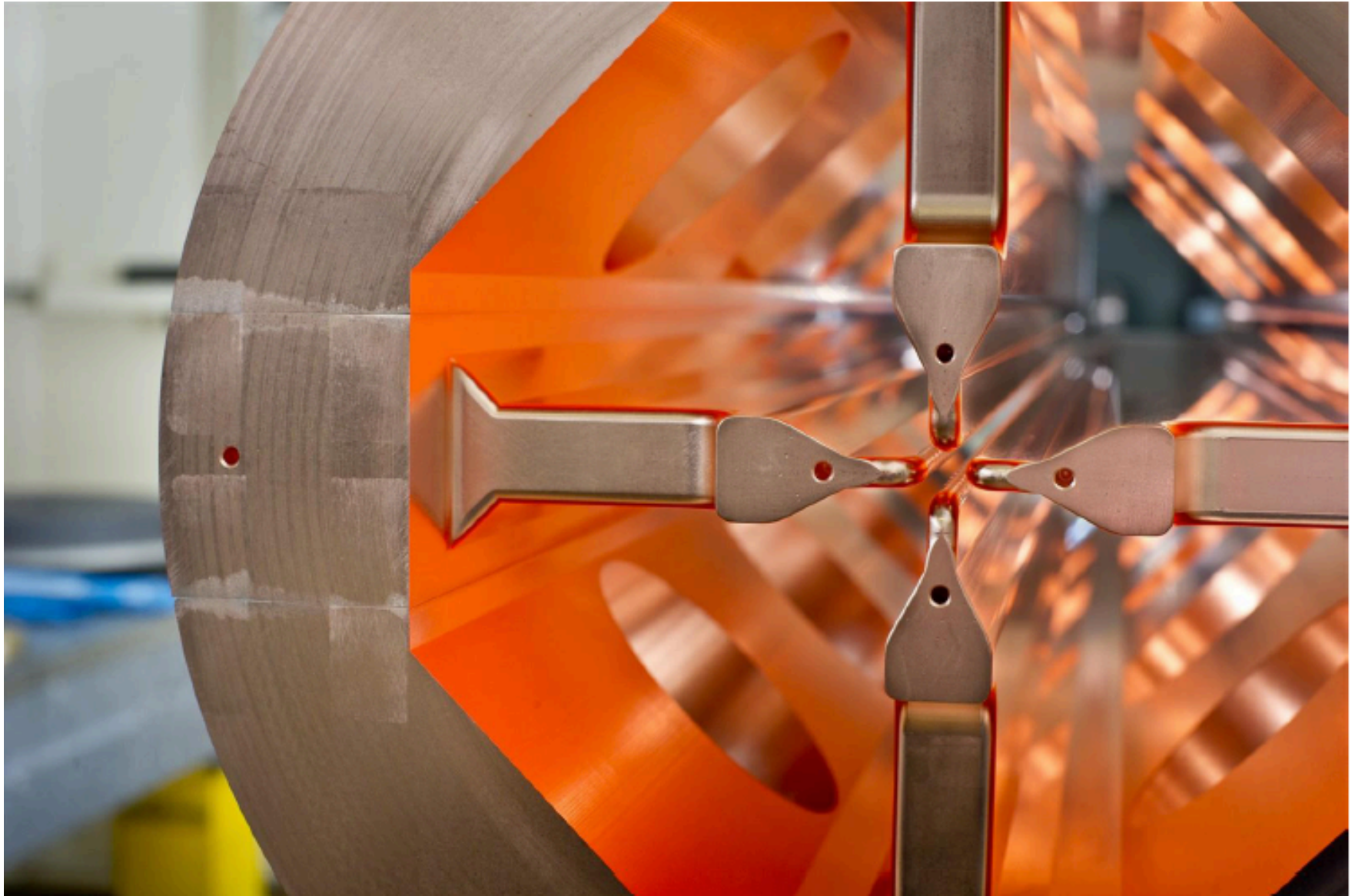
**Συχνότητα =  $750 \text{ MHz}$**

**Ρεύμα Δέσμης = μερικά  $\text{mA}$**

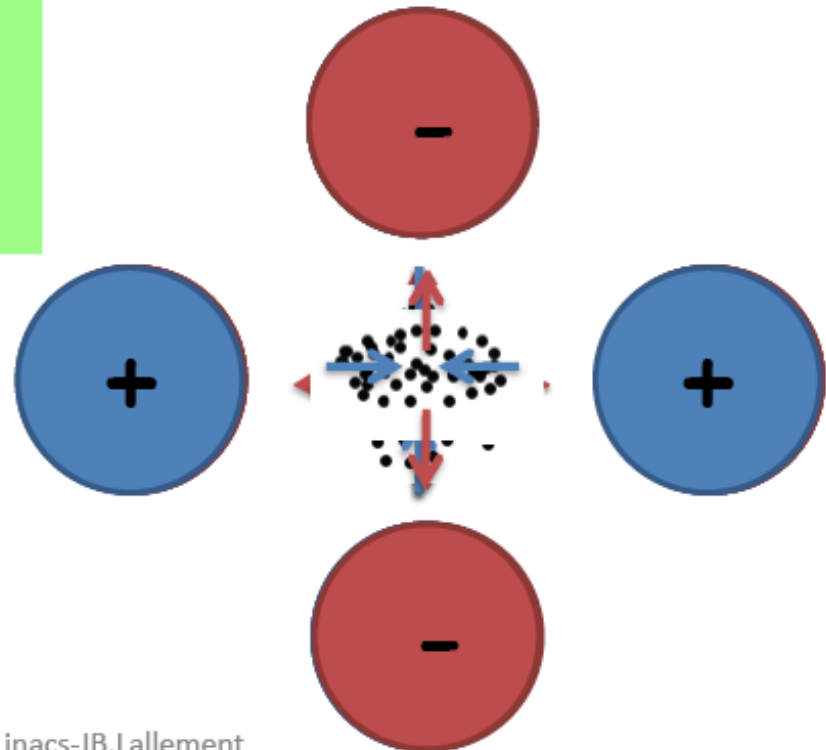
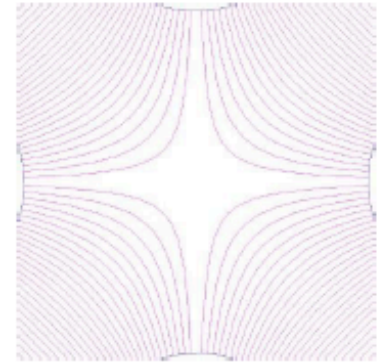
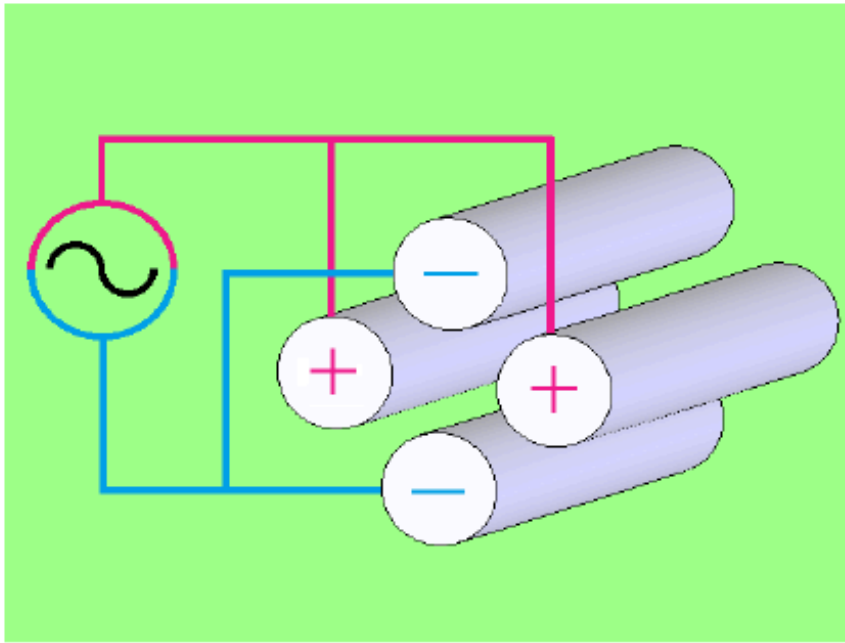
**Κύκλος Εργασίας  $< 1 \%$**



# Radio Frequency Quadrupole



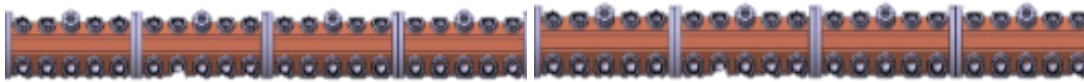
# Radio Frequency Quadrupole



# LINAC = LINEAR ACCELERATOR / ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ

Συμπαγής Γραμμικός Επιταχυντής για παραγωγή Ραδιο-Ισοτόπων σε Νοσοκομεία

2



Πλεονεκτήματα σε σχέση με Κύκλοτρα:

- ΟΧΙ απώλεια δέσμης, ΟΧΙ ακτινοβοληση, ελάχιστη θωράκιση
- Ελάχιστη συντήρηση
- Μικρό Βάρος, Ισχύς (25 kW @ 1.5% duty)

A

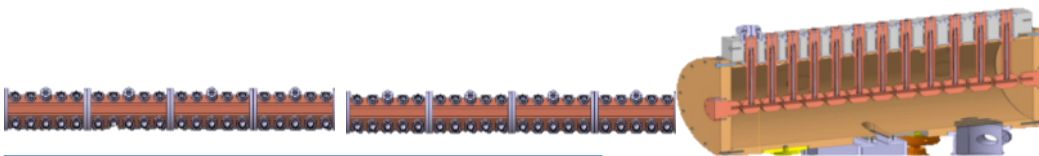
2 RFQs  
Source  $W = 40 \text{ KeV}$   
 $L = 3.2 \text{ m}$   
Output  $W = 8 \text{ MeV}$   
Freq. = 750  
Aver. current = 50 mA  
Duty cycle = 5 %  
Peak current = 1 mA

2 RFQs  
Source  $W > 70 \text{ keV}$   
 $L = 5 \text{ m}$   
Output  $W = 8 \text{ MeV}$   
Freq. = 750  
Aver. current = 150 mA  
Duty cycle = 1.5 %  
Peak current = 10 mA

B

Being designed

$^{99m}\text{Tc}$  για ΒΡΑΧΥΘΕΡΑΠΕΙΑ



3

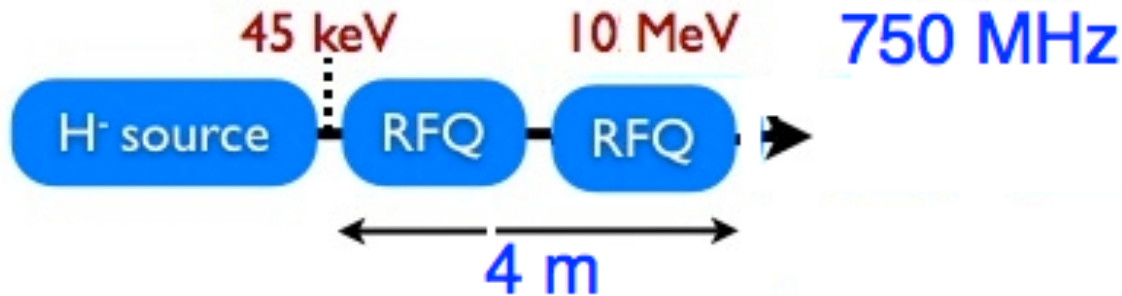
- 1 Klystron as RF power source
- Minimum maintenance, low loss
- Low cost (3 MCHF?)

Option:  
 $d^+$ , 18 MeV, 15 m  
For  $^{147}\text{Lu}$  production

2 RFQs + 1 DTL  
Source  $W = 90 \text{ KeV}$   
 $L = 10 \text{ m}$   
Output  $W = 18 \text{ MeV}$   
Freq. = 704 MHz  
Average current = 2 mA  
Peak current = 20 mA  
Duty cycle = 10 %

# LINAC = LINEAR ACCELERATOR / ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ

The Linac basic architecture is shown here:



**RFQ:**

Σχεδίαση και  
Κατασκευή  
CERN BE-ABP-  
HSL

Ο πρώτος γραμμικός επιταχυντής USA με ενέργεια 7 MeV

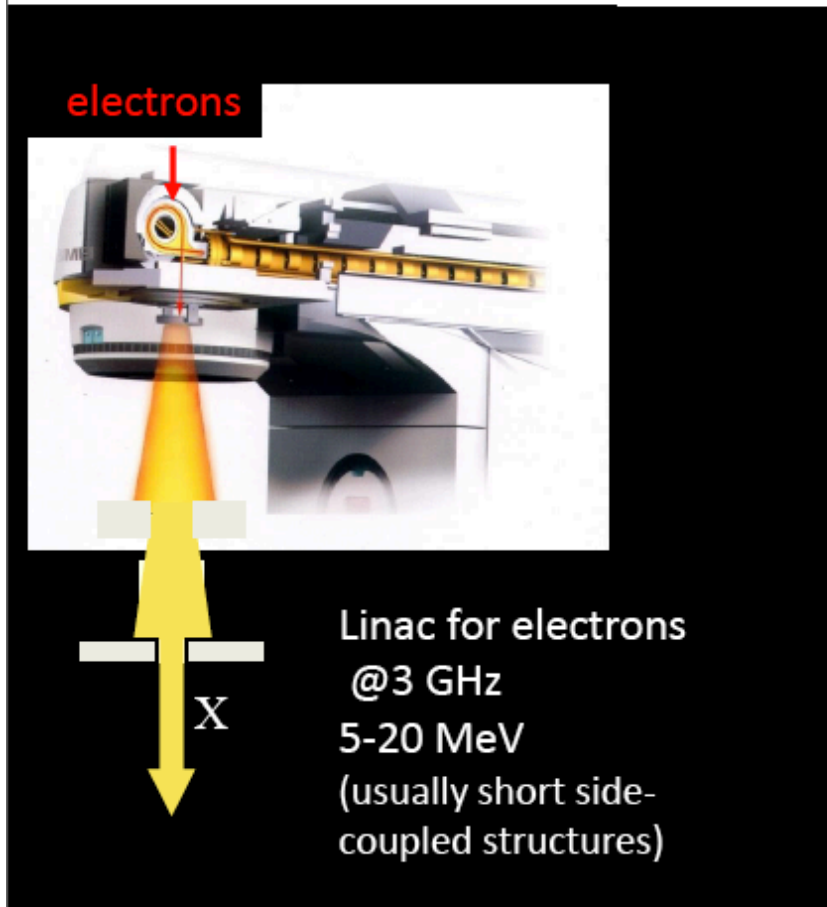
5 Ιατρικά Ισότοπα

11C, 15O, 18F, 111In, 123I





# Ακτινοθεραπεία με Γραμμικούς Επιταχυντές



>7000 electron linacs in the world for radiotherapy

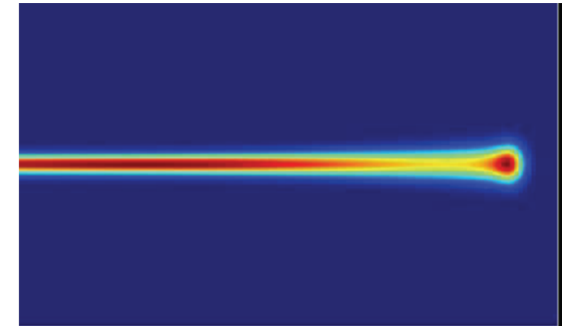
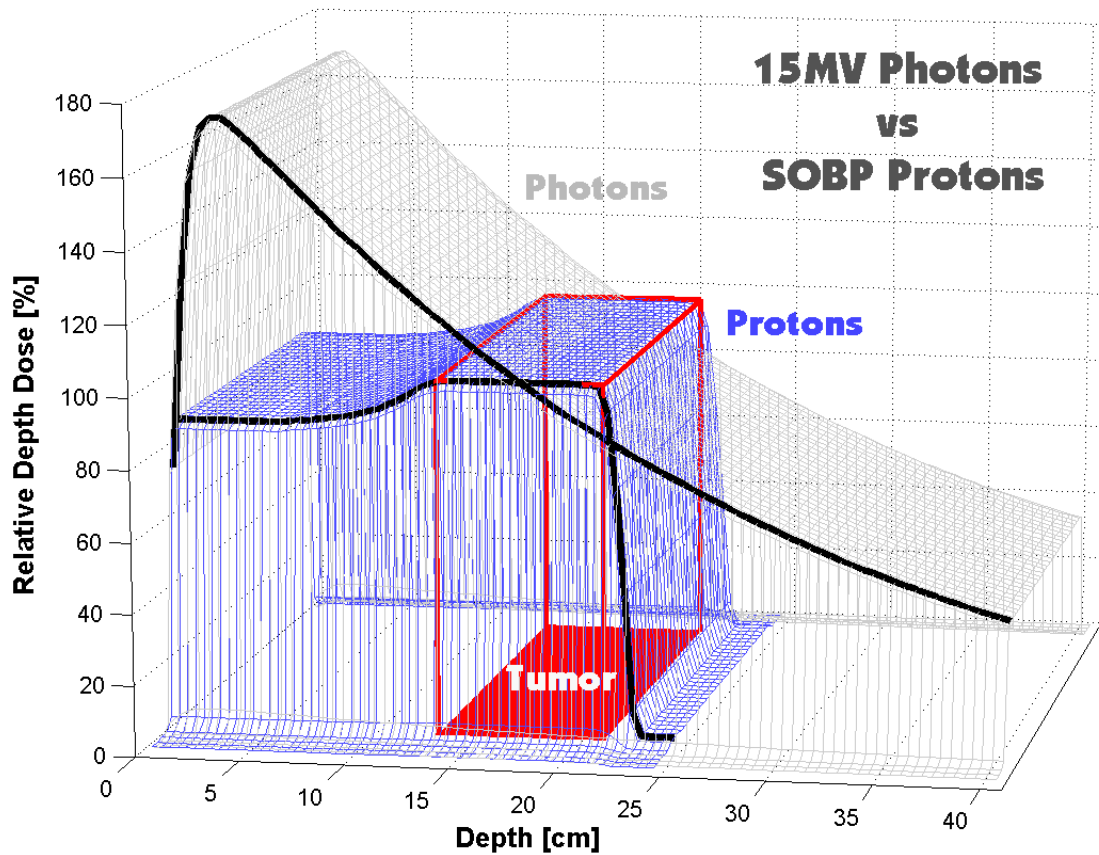


20 000 ασθενείς τον χρόνο για κάθε 10'000'000 κατοίκους



# Θεραπεία Αδρονίων

## Βελτιστοποίηση της φυσικής κατανομής της δόσης



# LHC... and what further?

## R&D on future linear colliders

Competition of two concepts of linear electron-positron colliders:

Length determined by efficiency (gradient) of RF cavities.

**ILC** – **International Linear Collider 0.5 TeV** based on Superconducting RF cavities (**gradient 31.5 MV/m**)

**CLIC** – **Compact Linear Collider**, developed by CLIC Collaboration (CERN), **0.5 -3 TeV** , based on warm RF cavities at 12 GHz with very high el. **gradient ~ 100 MV/m**

**Competition but also cooperation CLIC + ILC > LC**

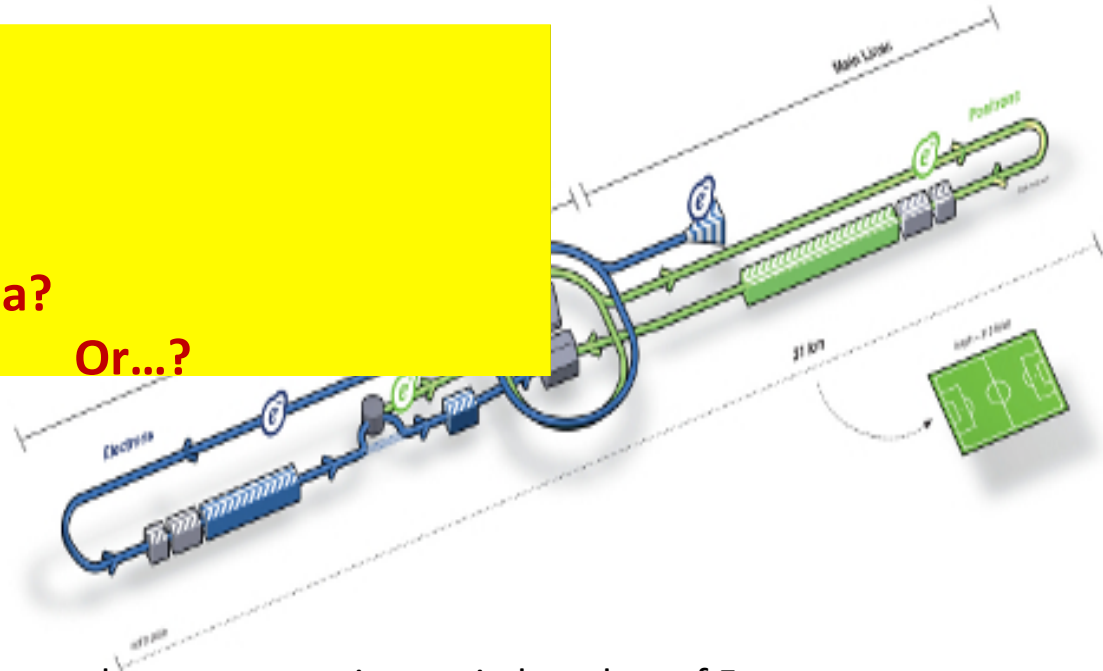
# ILC-International Linear Collider

If ILC, so where?

Japan?

Dubna?

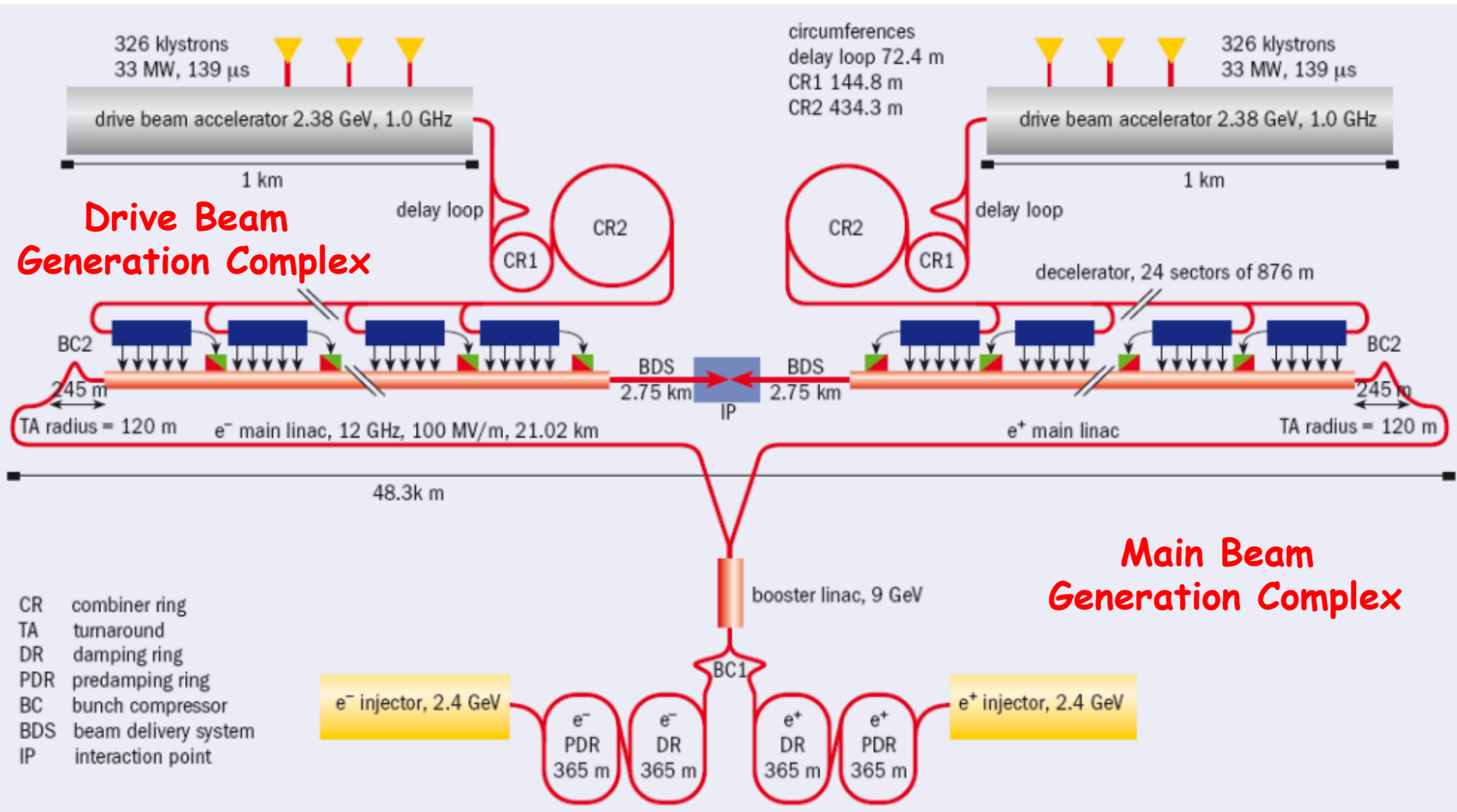
Or...?



- ❑ **Collisions:** Between electrons <>positrons, in bunches of 5 nm
- ❑ **Energy: Up to 0.5 TeV with an option to upgrade to 1 TeV**
- ❑ **Acceleration Technology:** 16,000 superconducting accelerating cavities made of pure niobium
- ❑ **Length: Approximately 31 kilometres**
- ❑ **Accelerating Gradient:** 31.5 megavolts per metre



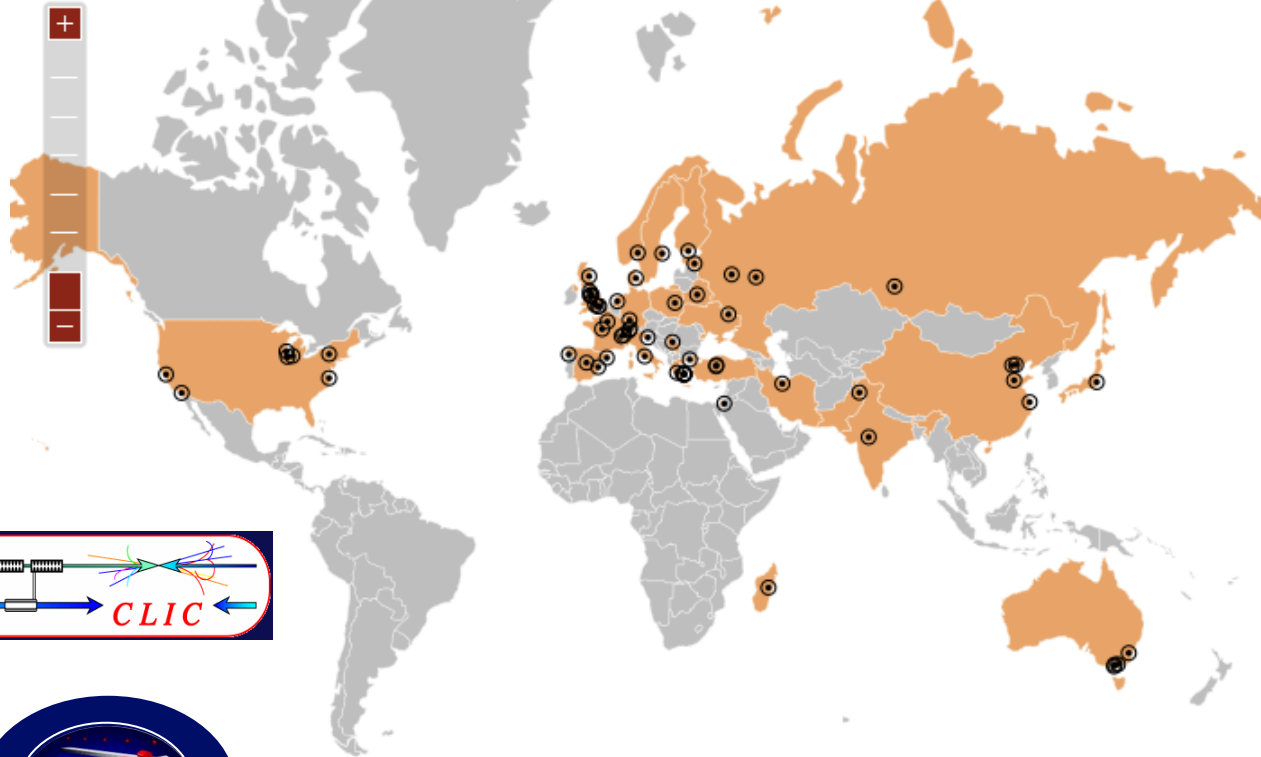
# CLIC - Layout @ 3 TeV (not to scale)



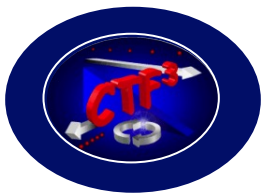
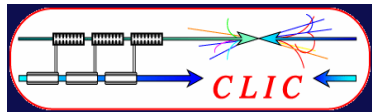
# World-wide CLIC / CTF3 collaboration

[http://clic-meeting.web.cern.ch/clic-meeting/CTF3\\_Coordination\\_Mtg/Table\\_MoU.htm](http://clic-meeting.web.cern.ch/clic-meeting/CTF3_Coordination_Mtg/Table_MoU.htm)

*28 countries*

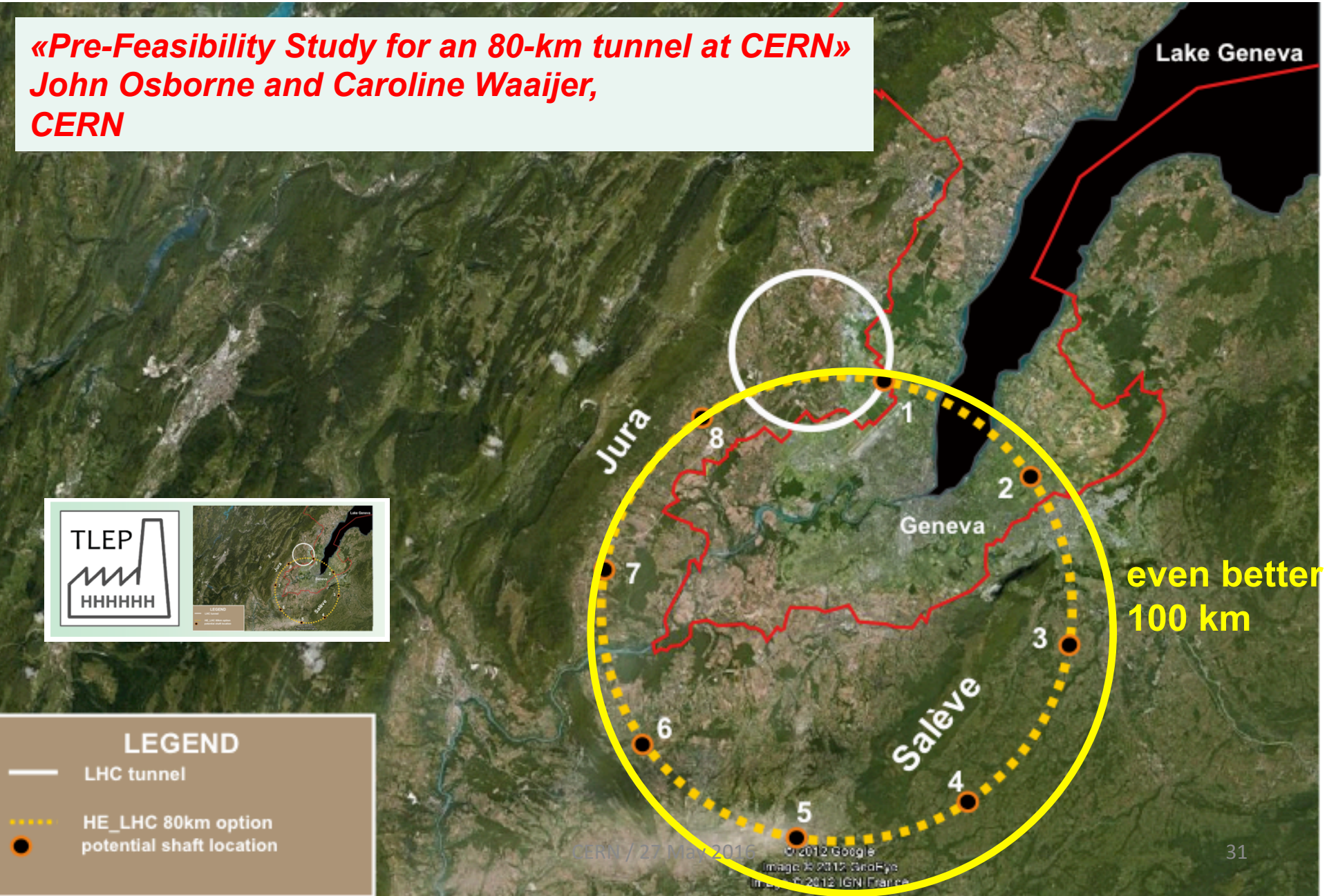


- Australia
- Belarus
- China
- Denmark
- Estonia
- Finland
- France
- Germany
- Greece
- India
- Israel
- Iran
- Italy
- Japan
- Madagascar
- Netherlands
- Norway
- Pakistan
- Poland
- Russian Federation
- Serbia
- Spain
- Sweden
- Switzerland
- Turkey
- Ukraine
- United Kingdom
- United States



# 80-km tunnel for TLEP/VHE-LHC

*«Pre-Feasibility Study for an 80-km tunnel at CERN»  
John Osborne and Caroline Waaijer,  
CERN*



**LEGEND**

- LHC tunnel
- ⋯ HE\_LHC 80km option
- potential shaft location

even better  
100 km

# Concepts of Future Circular Colliders- FCC collaboration at CERN



- **$e^+e^-$  Higgs factories**

**TLEP** at CERN, but also projects in USA, Japan, China...

- **HE-LHC**: in LHC tunnel (2035?).  $E=33$  TeV; magnets  $B=20$ T
- **VHE-LHC**: in new 80-100 km tunnel (2040?).  $E=84-104$  TeV; magnets  $B=20$  T.





# LARP (US LHC program) Magnets

