

# **Introduzione agli Acceleratori di Particelle**

## **Parte 2: Acceleratori circolari ed altro...**

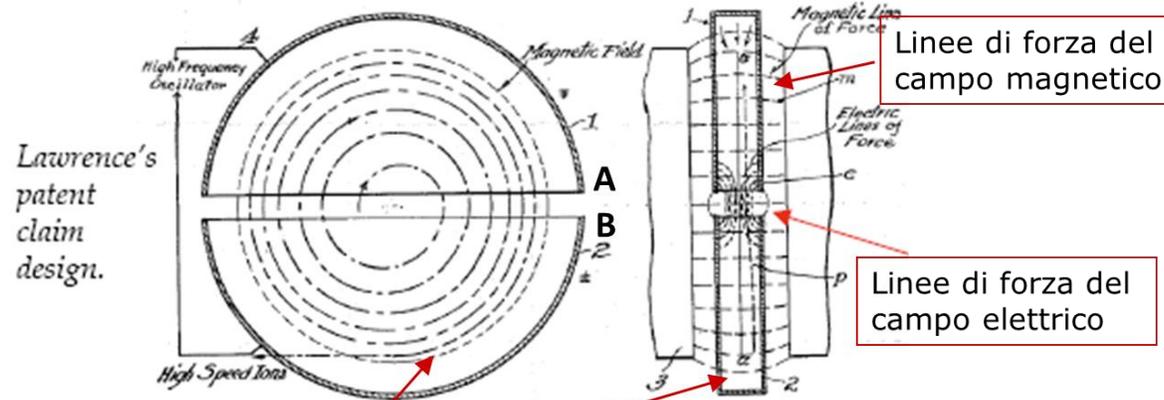
Antonio Palmieri  
INFN-LNL

- Macchine circolari (ciclotrone, sincrotrone, collisionatori)
- Alcune applicazioni
- Storia di un RFQ
- Considerazioni conclusive

# Ernest Orlando Lawrence

Intanto...nell'aprile del 1929, Ernest Orlando Lawrence, un giovane fisico dell'Università di Berkeley, si imbatte nella pubblicazione di Wideroe. Lawrence, sebbene non fosse in grado di leggere il tedesco, comprese il principio di funzionamento della macchina di Wideroe, ma non solo...

Lawrence capì che, se le particelle fossero state accelerate su un percorso circolare, certamente la struttura sarebbe stata più compatta. Affinché la traiettoria rimanesse circolare occorre che la forza centrifuga  $F_c = mv^2/R$  e la forza di Lorentz  $F_B = qvB$  dovessero essere uguali, per cui  $R = mv/qB$ ,  $\omega = 2\pi f = v/R = qB/m$ ! La velocità angolare non dipendeva dal raggio, ma solo dal campo  $B$  e dal rapporto carica/massa  $q/m$ . Il campo elettrico applicato ad una frequenza pari a  $qB/(2\pi m)$  fornisce la necessaria accelerazione. Questo tipo di macchina prende il nome di **Ciclotrone**



Elettrodo cavo a forma di "D"

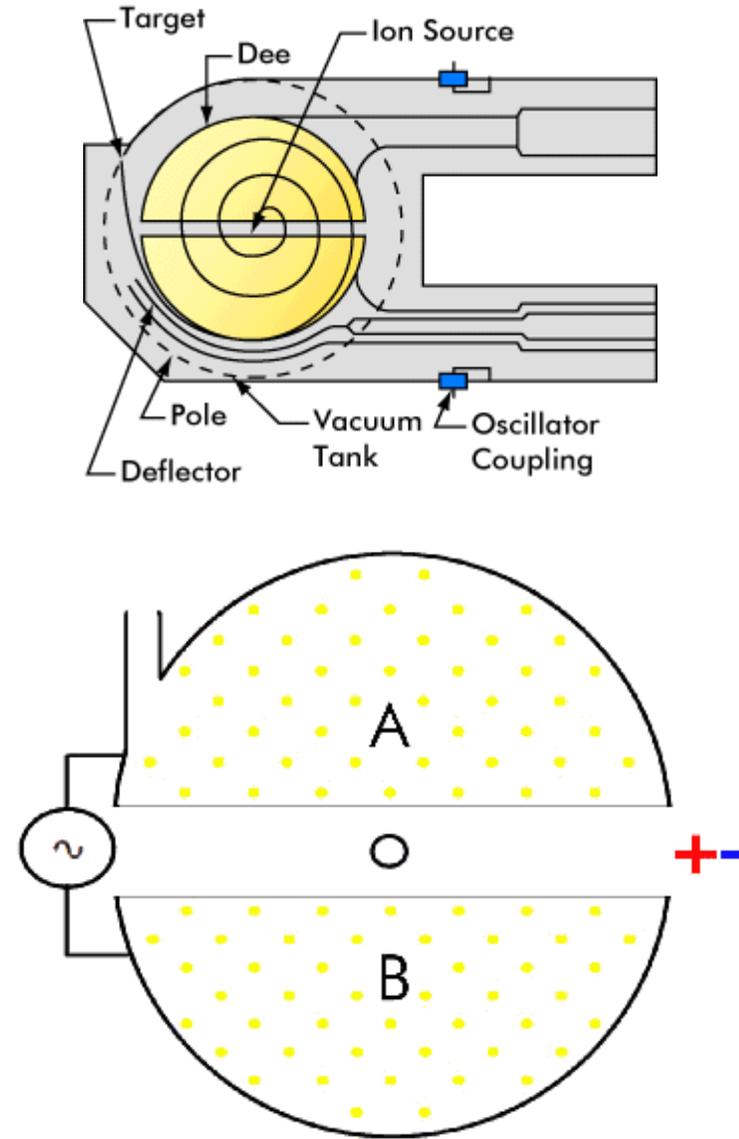
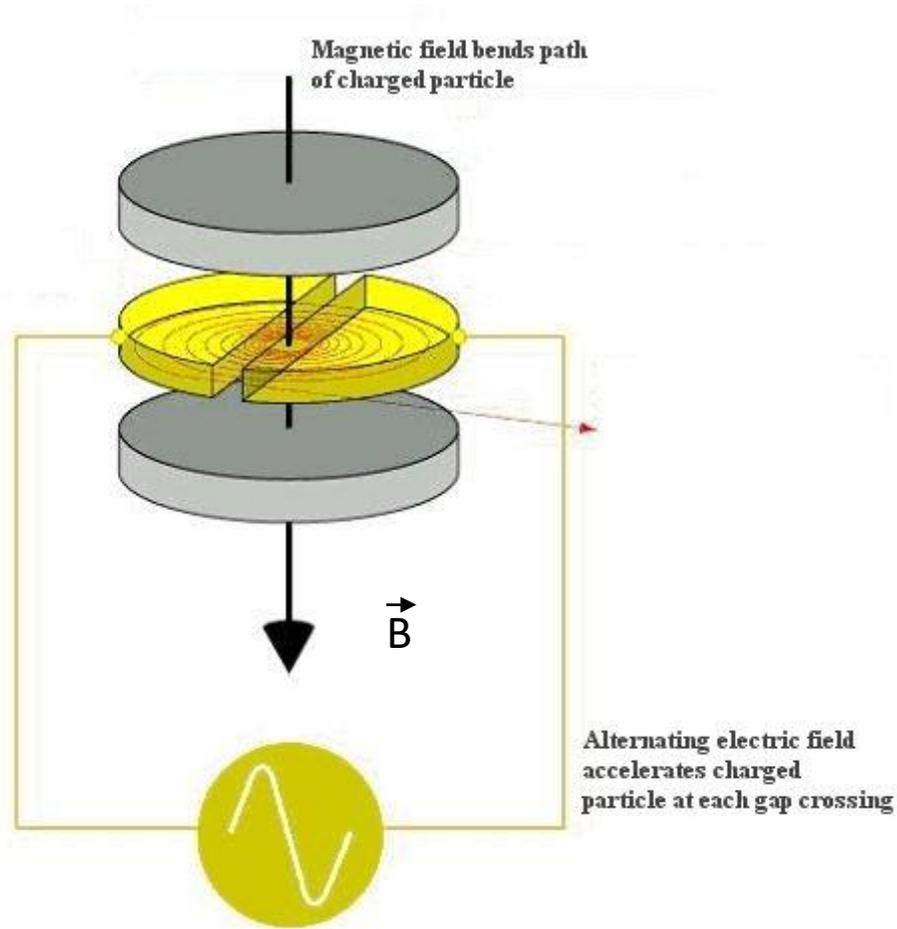
Linee di forza del campo magnetico

Linee di forza del campo elettrico

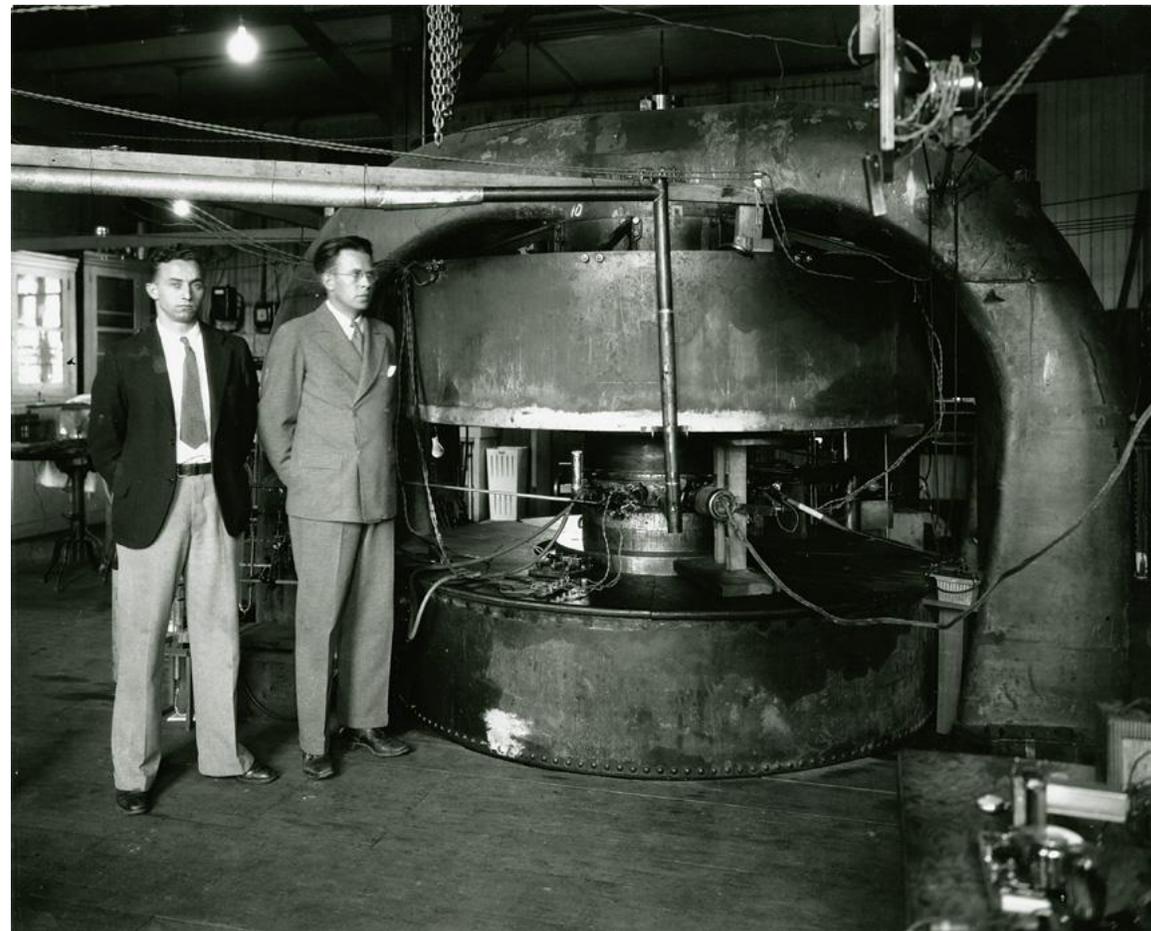
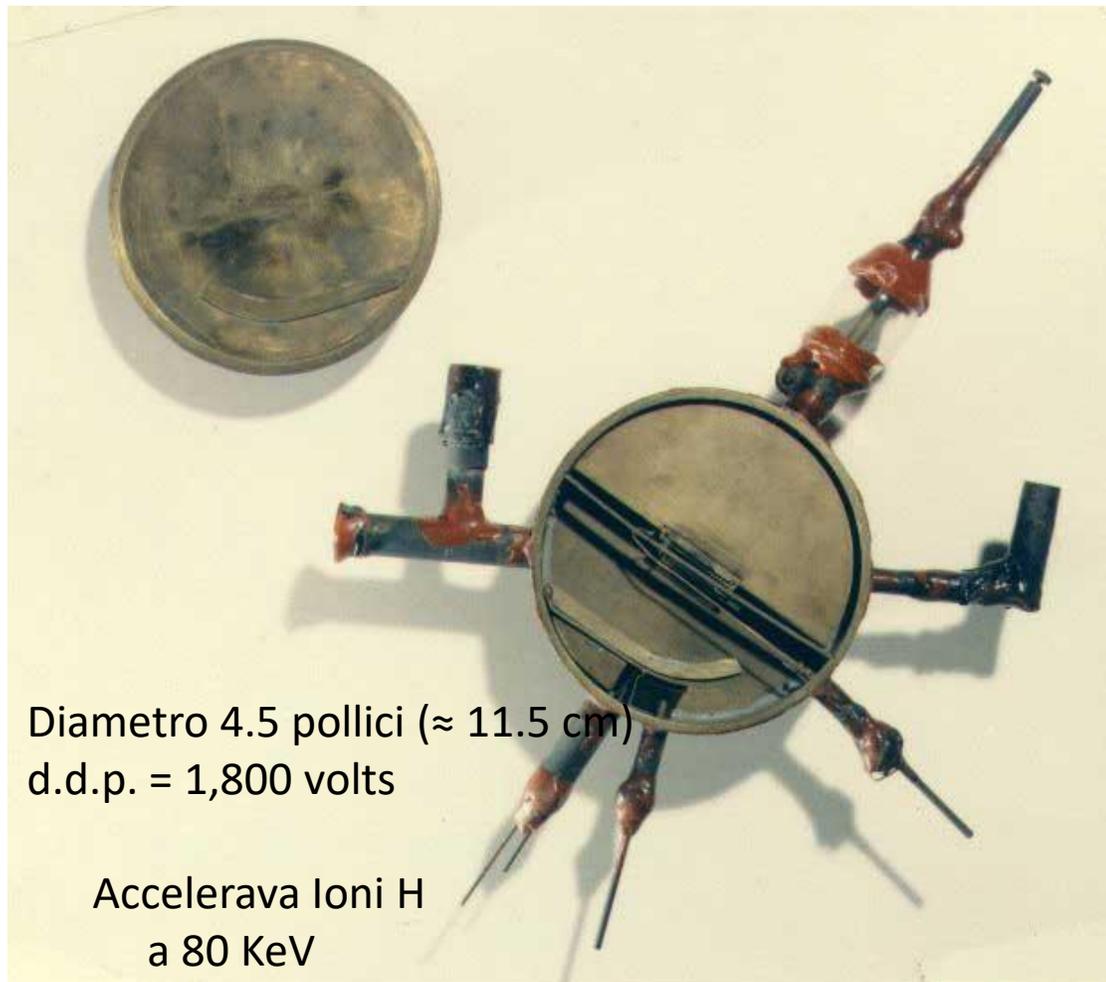


PLATE 1.4 Lawrence as a young associate professor. University Archives, TBL.

# Il Ciclotrone



Primo prototipo funzionante di ciclotrone  
(E.O.Lawrence e M.S.Livingston, 1931, Berkeley, CA)



Ciclotrone da 27 pollici (1932)

# Un moderno ciclotrone



70  $\mu$ A 70 MeV, proton driver installato a LNL nel 2016 per il progetto SPES

# Il Sincrotrone (1945)

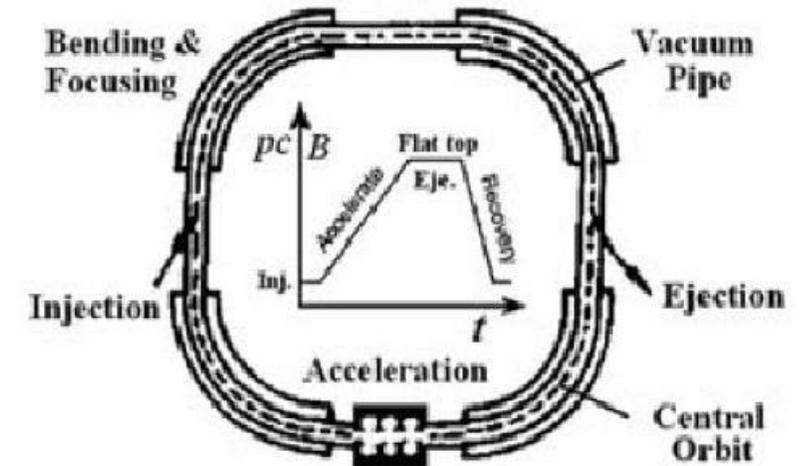
Per Ernest Lawrence, l'unico limite per l'energia era la dimensione del magnete. Nel suo stile, Ernest stava progettando il ciclotrone da 60 pollici prima che il 27 pollici fosse completo. Aveva persino visioni di macchine a 100MeV, ma:

- 1) L'ottenimento di energie elevate nei ciclotroni richiede magneti molto grandi. A partire da  $\sim 400\text{MeV}$  la produzione di ciclotroni diventa sconveniente e costosa
- 2) Alte energie  $\Rightarrow$  effetti relativistici  $\Rightarrow \omega$  non più costante (poiché  $m$  aumenta con  $v$  secondo la Relatività). Le particelle vanno fuori fase con i campi acceleranti, e alla fine non vi è più accelerazione.

Il sincrotrone permette di superare queste difficoltà, in quanto

- I campi magnetici si adattano nel tempo piuttosto che nello spazio, al fine di compensare le variazioni di velocità e di massa.
- Per le particelle che non sono vicine alla velocità della luce, la frequenza del campo elettromagnetico applicato può anche variare per seguire il loro tempo di circolazione non costante.
- Aumentando questi parametri quando le particelle ottengono energia, il percorso di circolazione può essere mantenuto costante.
- La preaccelerazione può essere ottenuta da una catena di altre strutture di acceleratore come un linac o un altro sincrotrone

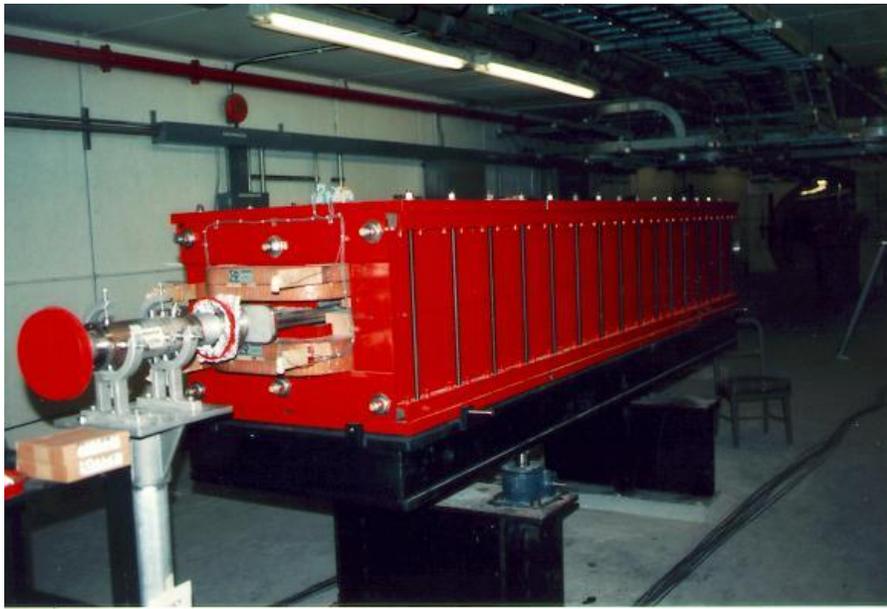
Il principio fu inventato da Vladimir Veksler nel 1944. Edwin Mc Millan costruì il primo sincrotrone per elettroni nel 1945, arrivando all'idea in modo indipendente. Il primo sincrotrone per protoni fu progettato da Sir Marcus Oliphant e costruito nel 1952,



$$r = m(t)v(t)/qB(t) = \text{const}$$

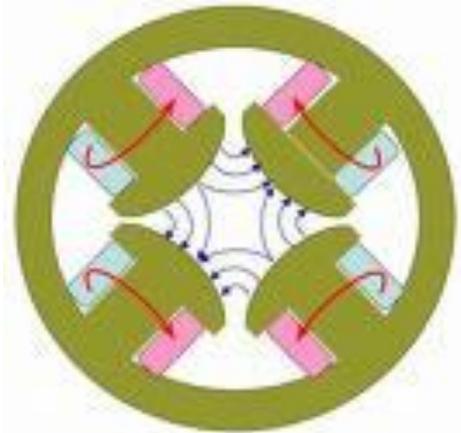
$$\omega(t) = qB(t)/2\pi m(t)$$

Nome	Tipo	$E_{(\text{GeV})}$	Anni di operatività	Laboratorio
PS	p	28 - 30	1959 -	CERN
SPS	p	450	1976 -	CERN
Tevatron	p	350 - 1000	1985 -	FNAL
ISR	$p\bar{p}$	28 - 63	1972 - 1984	CERN
SppS	$p\bar{p}$	450 - 900	1983 - 1989	CERN
Tevatron	pp	1000 - 2000	1985 -	FNAL
HERA	$e^+ - p$	30 + 920 nel laboratorio	1990 -	DESY
RHIC	Ioni pes.		2000 -	BNL

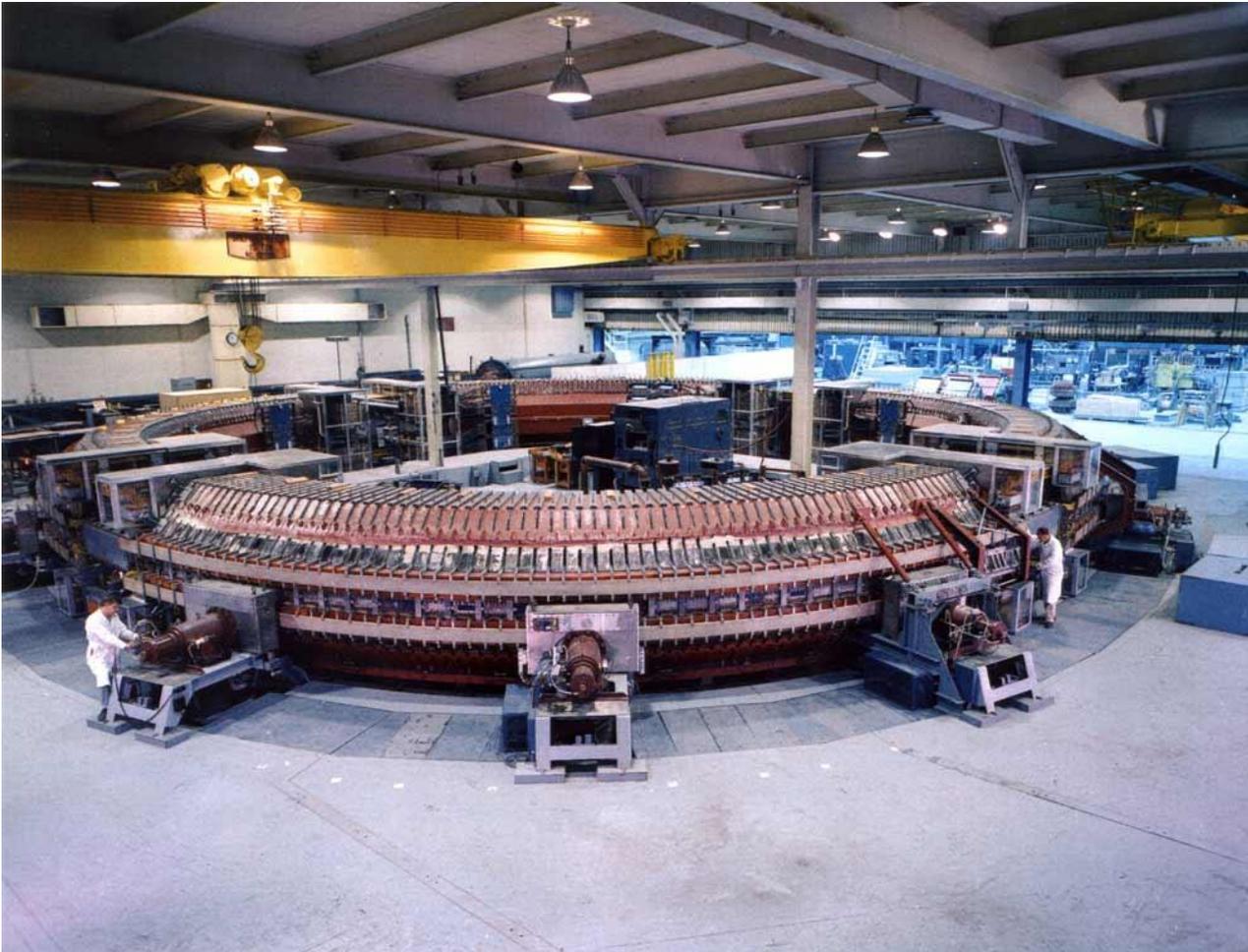


Magnete dipolare (bending magnet)

Magnete quadrupolare per il  
foccheggiamento



## Cosmotron – BNL 1953 - 1968



Il primo acceleratore a superare la barriera del GeV e il primo ad avere una estrazione del fascio per esperimenti all'esterno.

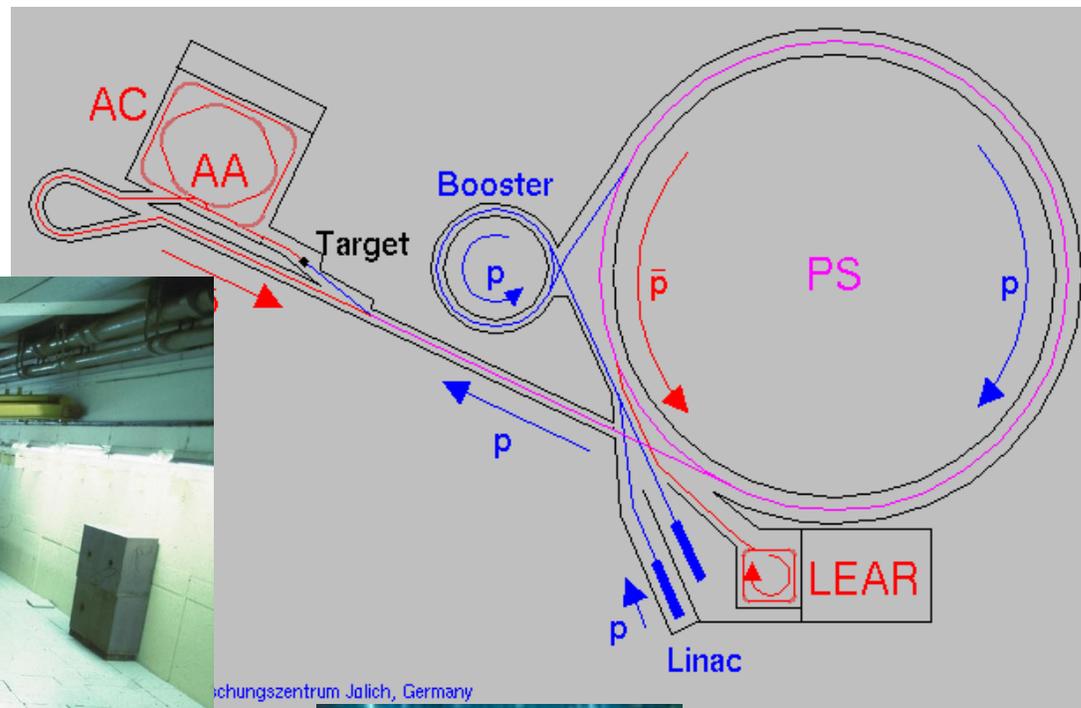
## Bevatron – Berkeley



1956 scoperta dell'antiprotone  
(necessari almeno 6.5 GeV)

1959 Premio Nobel a  
E. Segrè e O. Chamberlain

# PS CERN 1959 28 GeV



Scoperta correnti deboli neutre

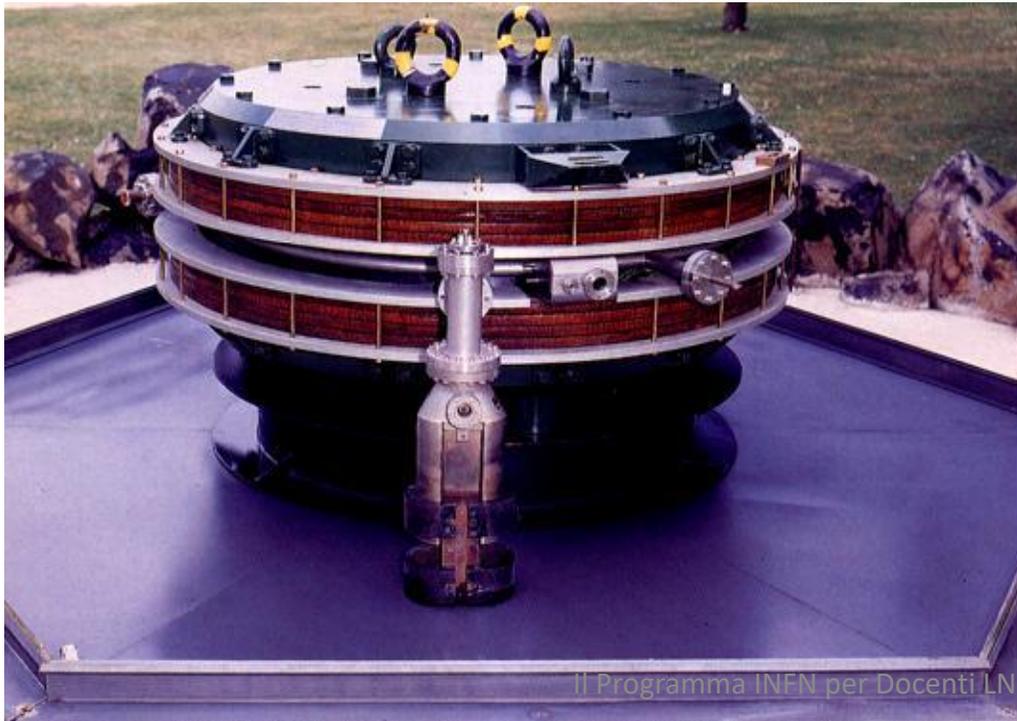
# I collisionatori

Negli anni '50 in diversi laboratori (Novosibirsk, CERN, Stanford, Frascati ecc), si sviluppò la tecnologia delle collisioni fra fasci di particelle, grazie soprattutto agli studi di Bruno Touschek, Gersh Budker e Don Kerst

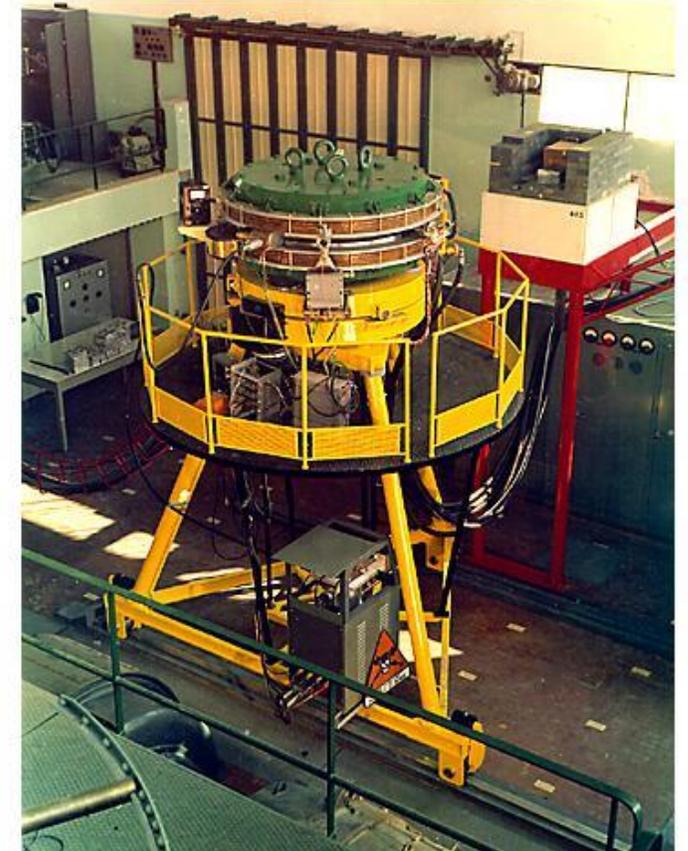


Bruno Touschek

ADA – LNF 1961



Il Programma INFN per Docenti LNL, 10-14/02/2020

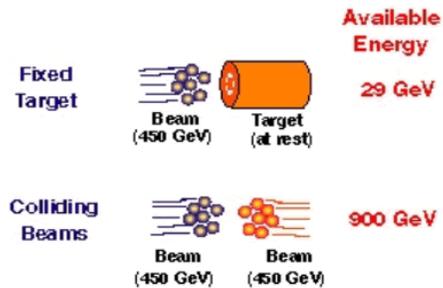


Il primo collider materia-antimateria  
 $\sqrt{s} = 400 \text{ MeV}$

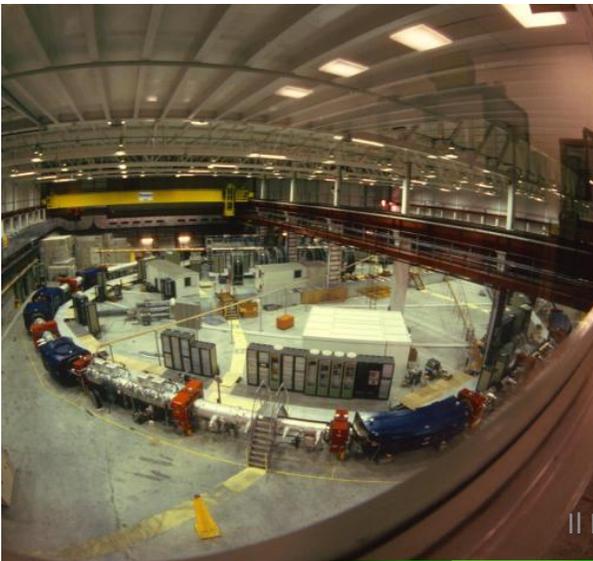
Colliders  $e^+ e^-$

**Super Proto Sincrotrone  
del CERN (SPS) E = 450 GeV  
Tunnel di 7 Km**

Alla fine degli anni '70 viene convertito  
in un collider protone – antiprotone con  
 $v_s = 540 - 900 \text{ GeV} !!$



**Accumulatore di antiprotoni**



Carlo Rubbia

Premio Nobel 1984 per la scoperta  
dei mediatori della forza debole

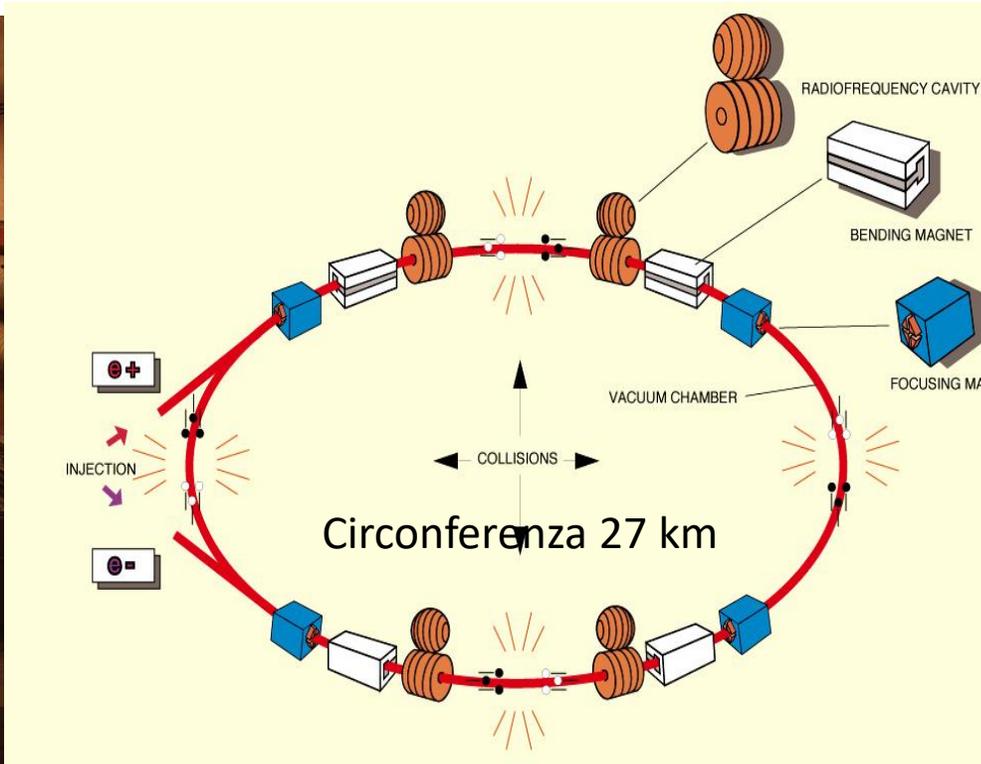
$$W^+ W^- Z^0$$



Simon Van Der Meer



Il primo collisionatore p+/p+, ISR al CERN, operante a 26 GeV (anni '70)

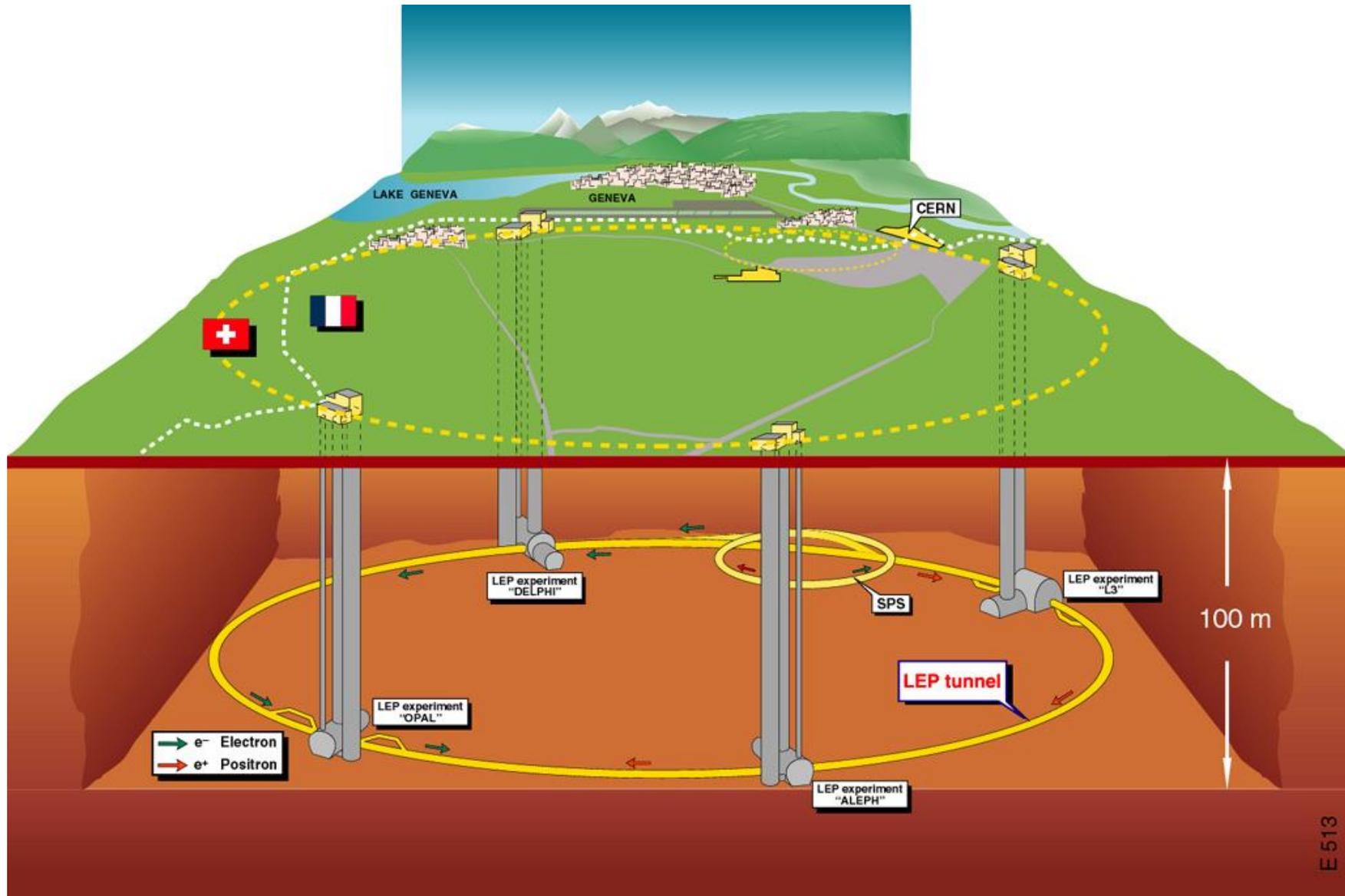


Il collisionatore è+/- LEP costruito al CERN di Ginevra operava a 352.21 MHz con una energia massima di 208 GeV . E' stato attivo dal 1989 al 2000



Cavità acceleratrici a RF

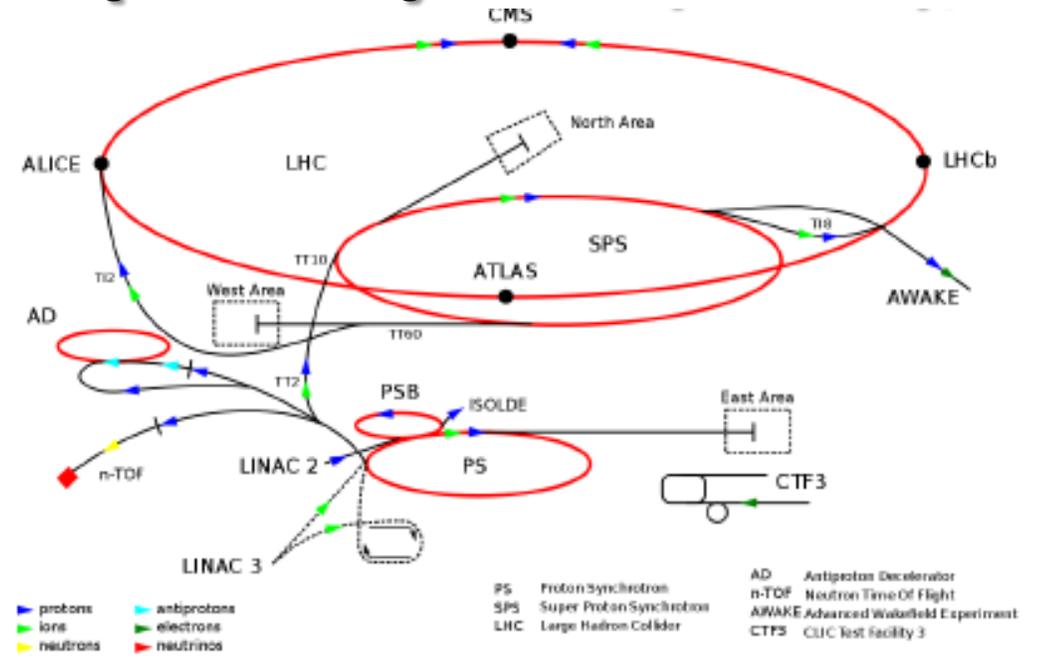




# LHC al CERN (2008)

- LHC (Large Hadron Collider) accelera protoni da 450 GeV fino a 7000 GeV. I due fasci collidono in quattro aree sperimentali

LHC (Large Hadron Collider) è costituito da un anello di 27 chilometri di magneti SC, ricavato nello stesso tunnel del LEP, con un certo numero di strutture acceleranti SC per aumentare l'energia delle particelle. I fasci raggiungono velocità molto prossime a quelle della luce nei punti di collisione.



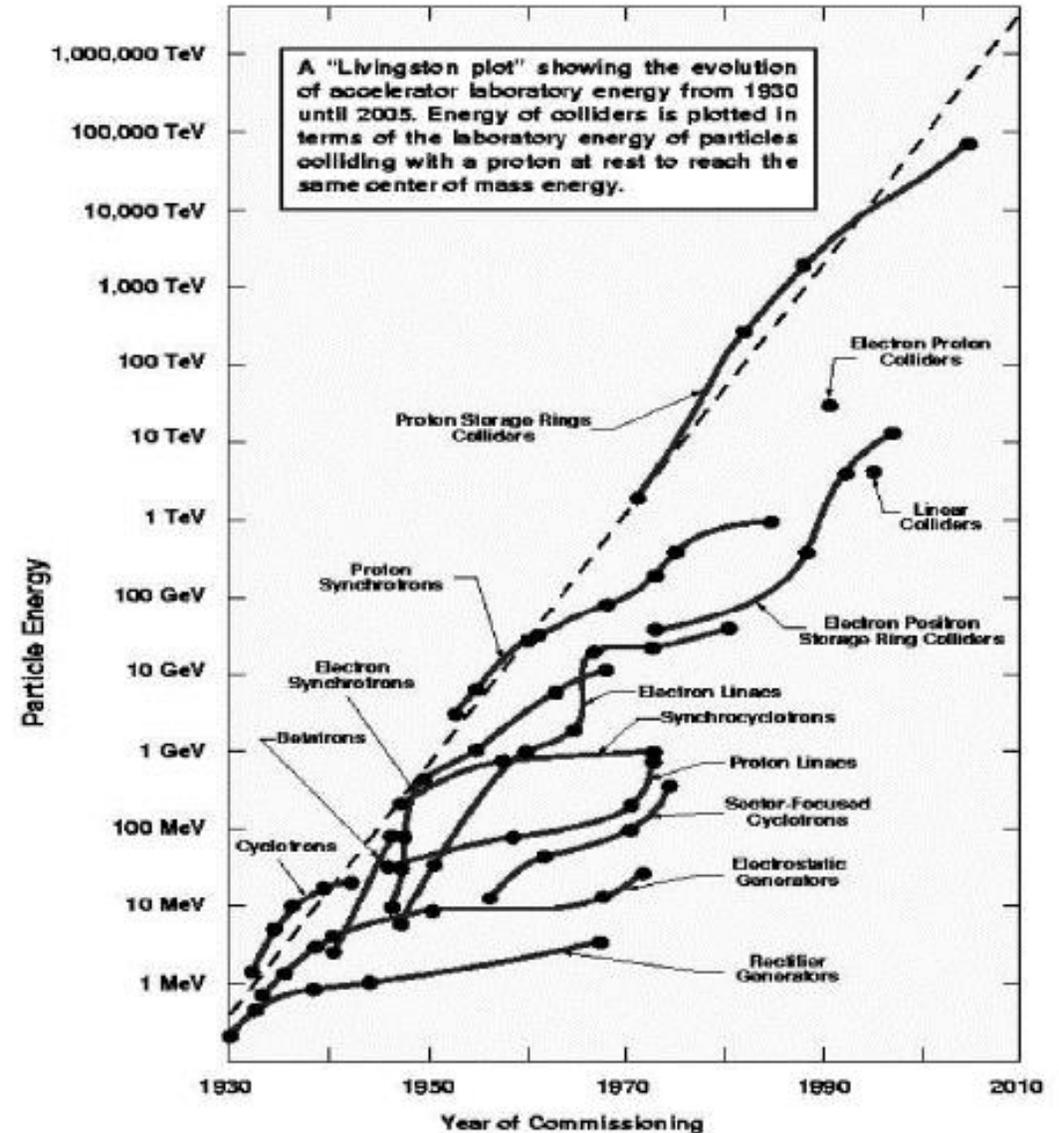
L'obiettivo di LHC è riprodurre le condizioni dell'universo  $\sim 10^{-6}$  secondi dopo il big-bang per studiare fenomeni fisici mai osservati.

Nel 2012 è stato scoperto al Large Hadron Collider del CERN il bosone di Higgs, l'anello mancante al Modello Standard, la teoria che attualmente descrive le particelle elementari e le loro interazioni fondamentali.

La progettazione e costruzione di LHC hanno preso più di 15 anni ed il costo complessivo è stato di circa 6 miliardi di EUR

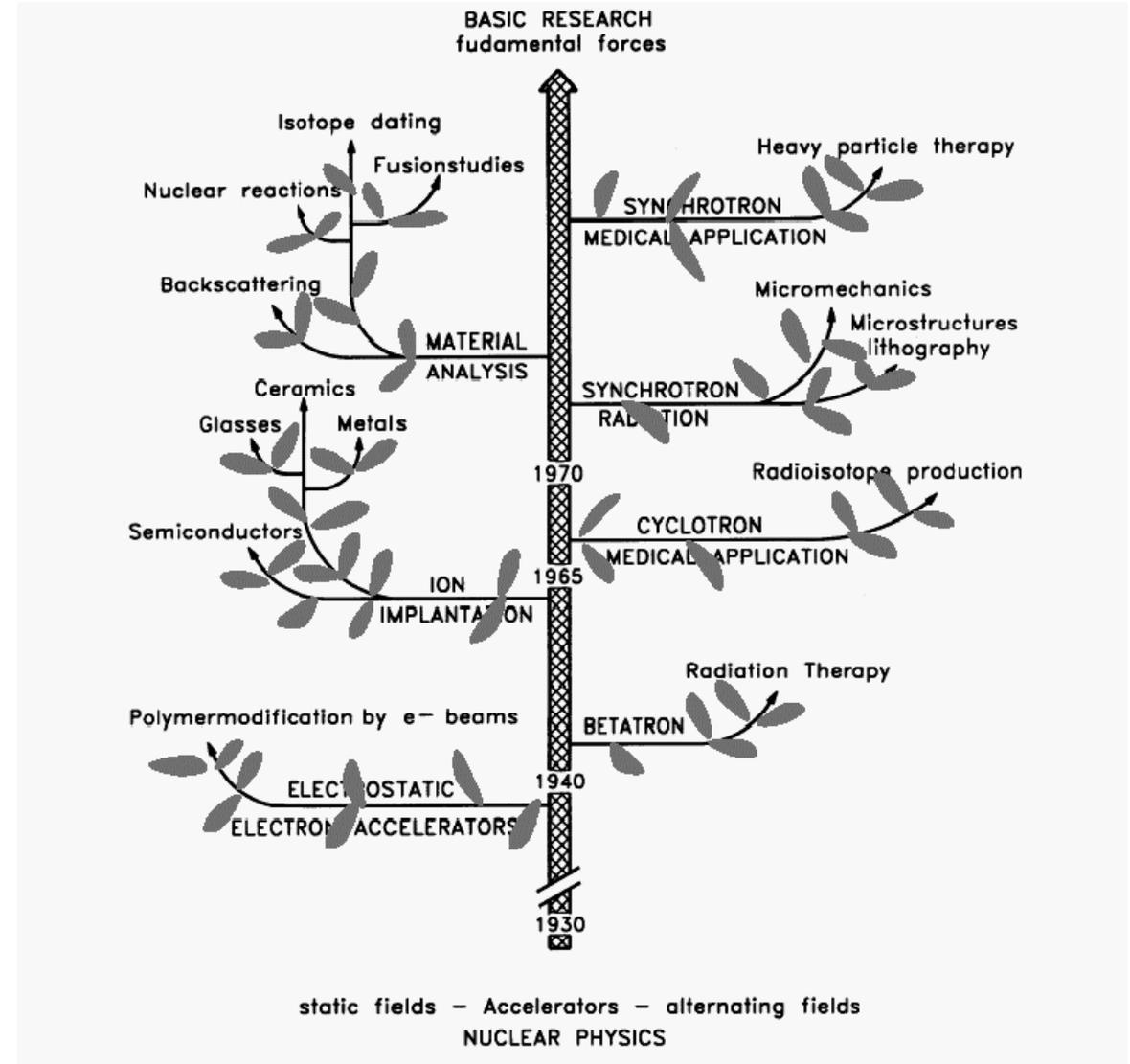
# Il diagramma di Livingstone

Nel 1950 Livingstone rappresentò l'energia degli acceleratori espressa in una scala semi-logaritmica in funzione dell'anno di costruzione osservando una crescita lineare. L'aumento di energia di un fattore 33 ogni decennio, è dovuto soprattutto alle scoperte ed ai progressi tecnologici.



# Usi degli Acceleratori

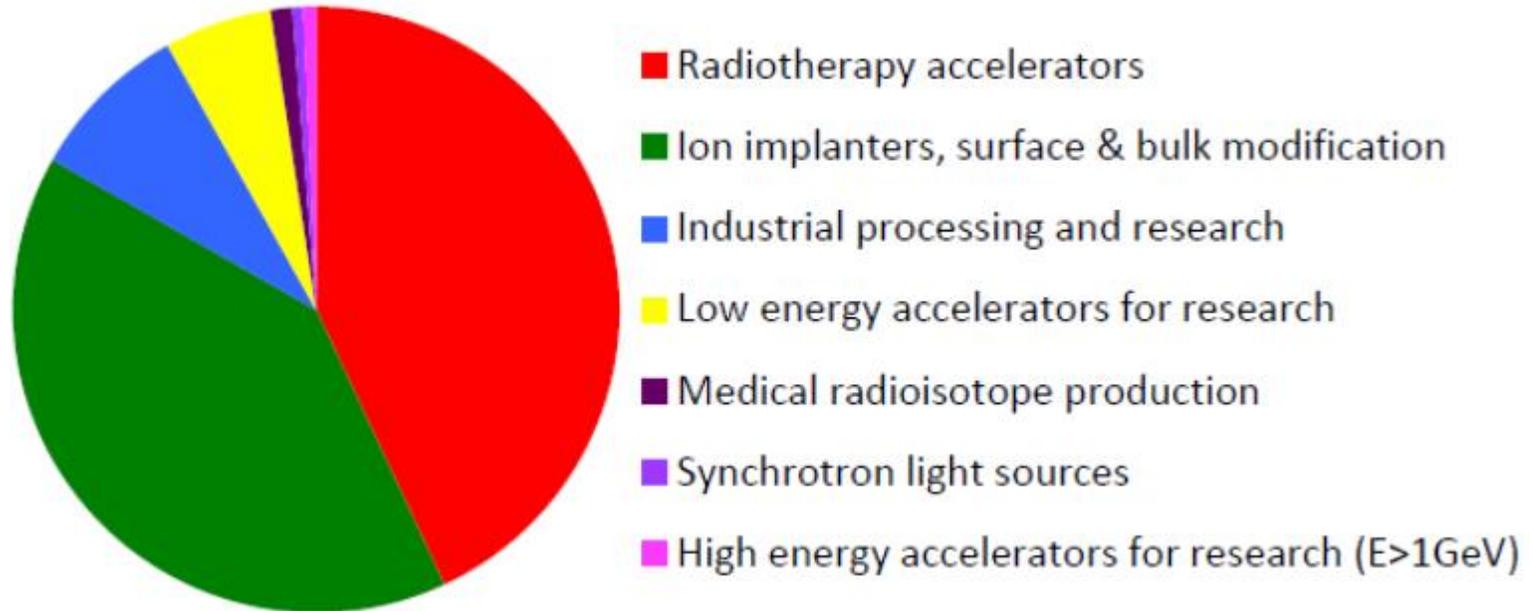
CATEGORIA	NUMERO
Impiantazioni ioniche	7000
Altri acceleratori nell'industria	1500
Acceleratori in ricerca non-nucleare	1000
Radioterapia	5000
Produzione di isotopi per medicina	200
Adroterapia	20
Sorgenti di luce di sincrotrone	70
Ricerca nucleare e subnucleare	110
<b>TOTALE</b>	<b>15000</b>



# Fate il vostro Acceleratore!

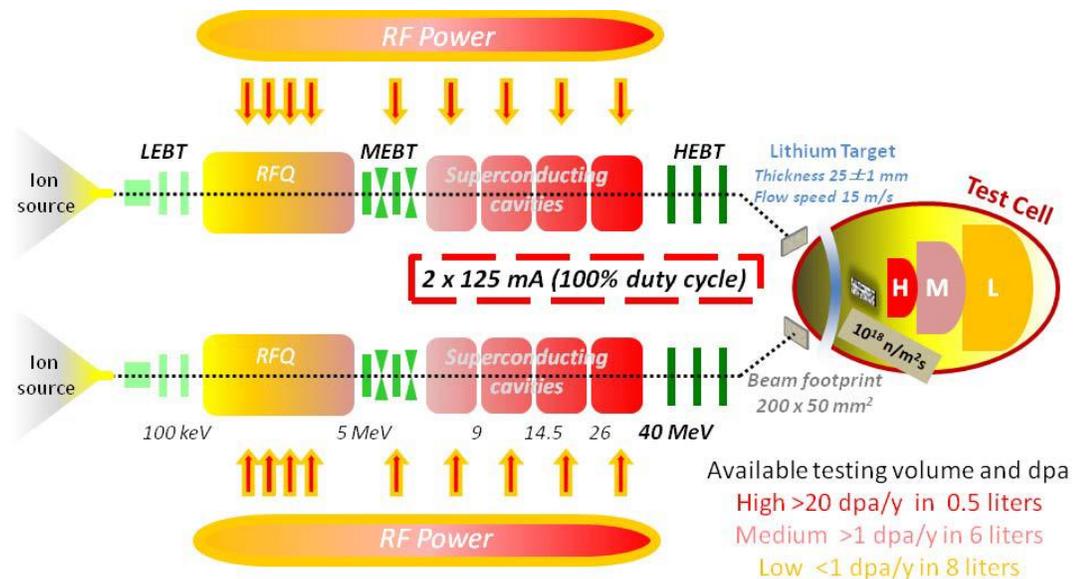
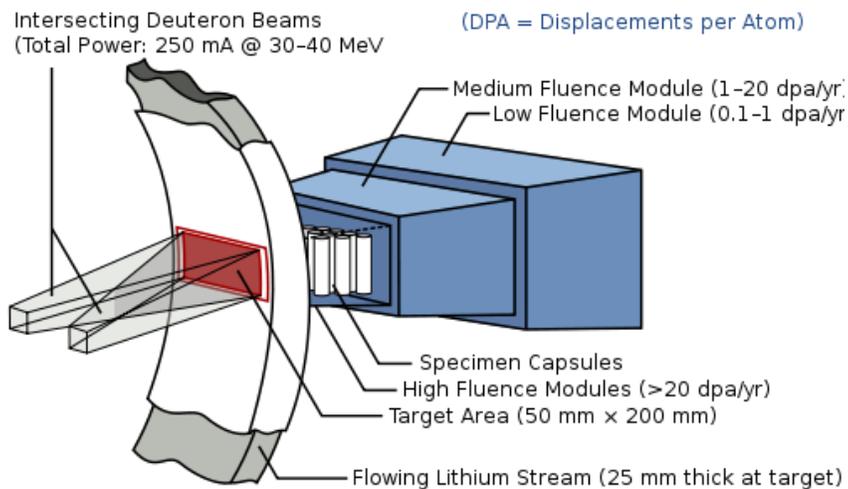
La scelta della struttura accelerante dipende dall'applicazione, che determina anche i parametri più importanti:

- Energia
- Corrente del fascio
- Tipo di particella accelerata



# Un'applicazione al limite: Il Progetto IFMIF

La **International Fusion Materials Irradiation Facility**, (IFMIF), è una installazione per testare i materiali candidati ad essere usati nei reattori a fusione. IFMIF deve produrre un flusso estremamente intenso di neutroni, con caratteristiche energetiche simili a quelle che si presenteranno in un reattore a fusione. Per generare tale flusso due Acceleratori di particelle per Deuteroni in parallelo in grado di accelerare una corrente  $I_b=125$  di D+ fino all'energia  $W=40$  MeV.



La potenza del fascio  $P_b = I_b \cdot W / q = 125 \text{ mA} \cdot 40 \text{ MeV} \cdot 2 = 10 \text{ MW}$ . È equivalente a quella necessaria per accelerare 135 automobili (900 kg di peso) da 0 a 100 km/h.

# L'Acceleratore Prototipo di IFMIF (LIPAc)

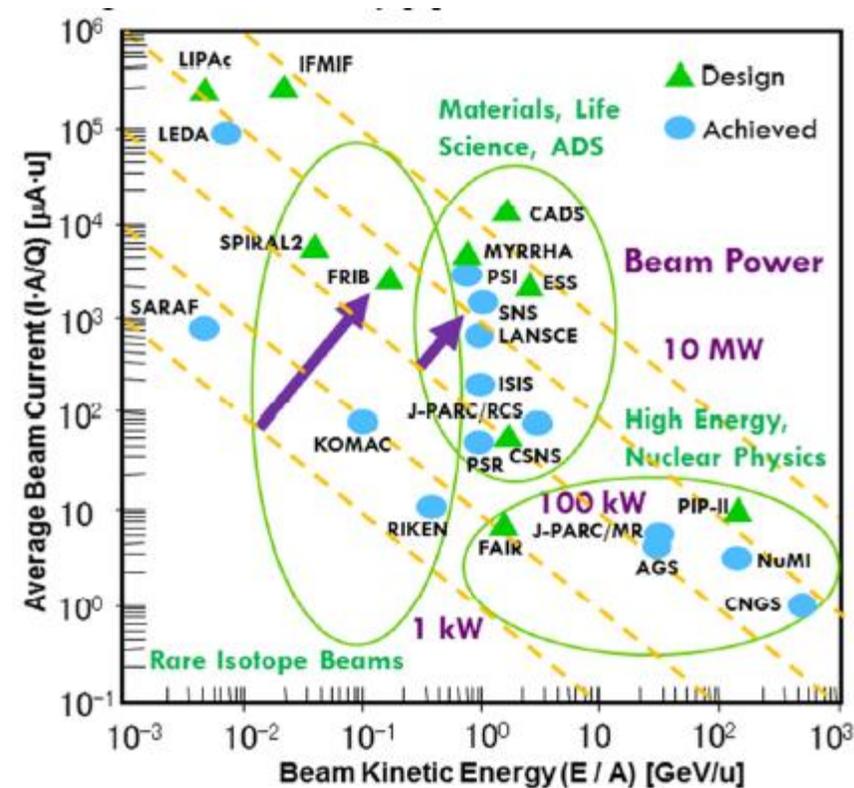
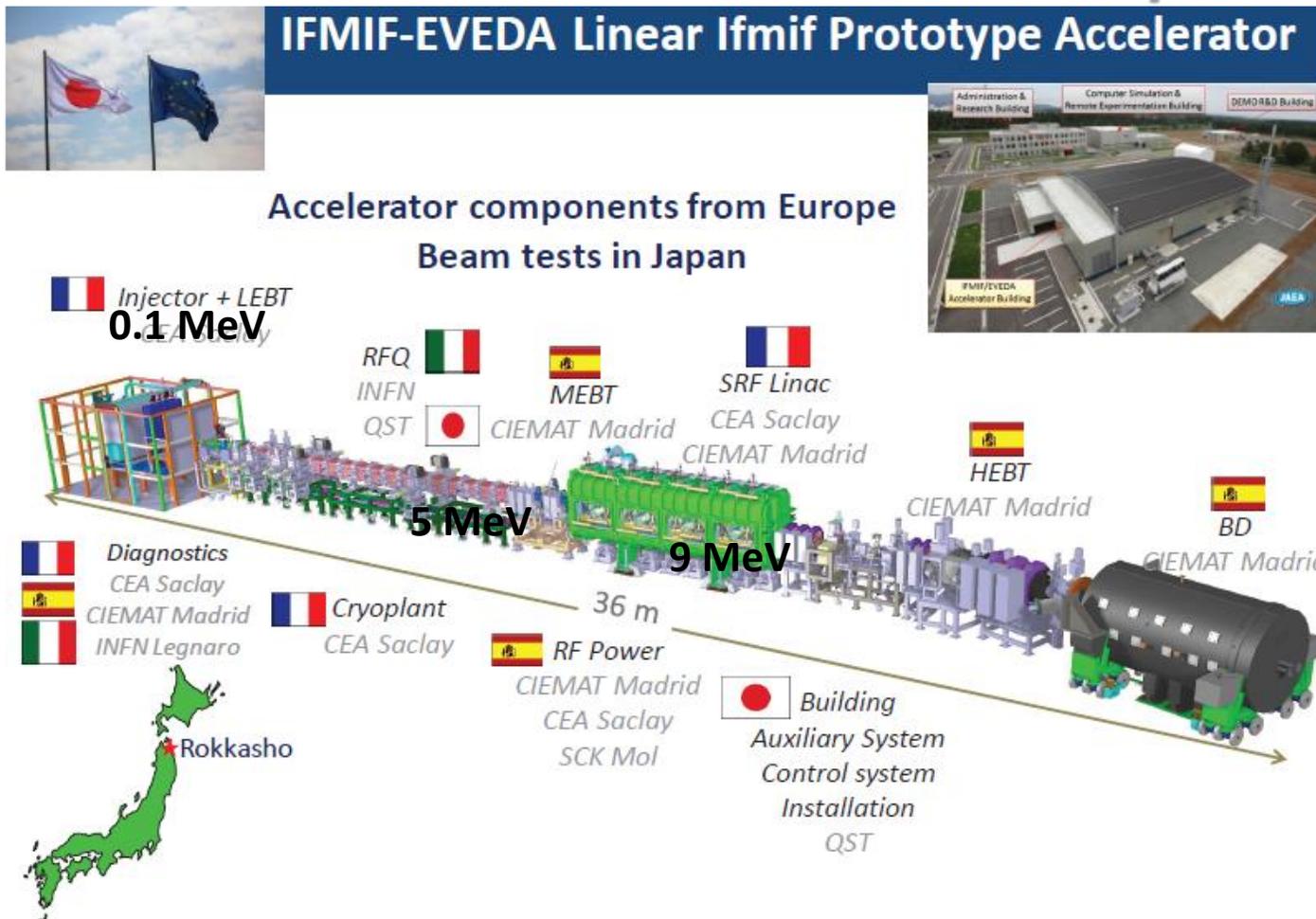


Figure 1: Hadron accelerator power frontier.

$$I = 125 \text{ mA}$$

$$P = V f_{in} I = 9 \text{ MV} * 125 \text{ mA} = 1.125 \text{ MW}$$

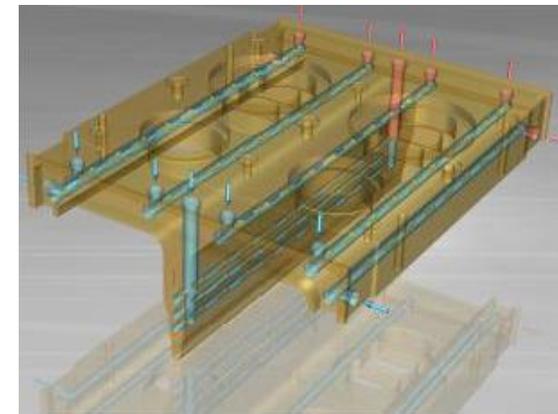
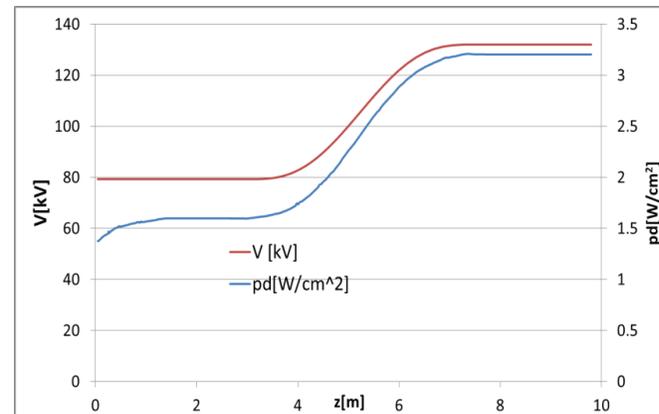
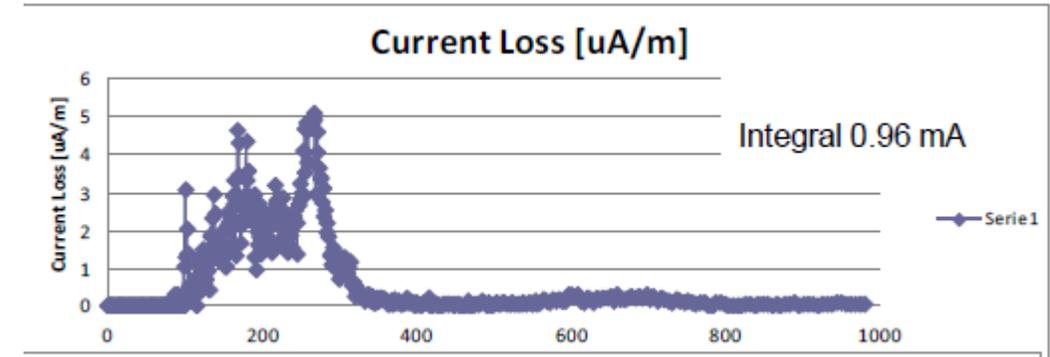
# Le sfide tecnologiche dell'RFQ di IFMIF

**Com'è possibile trasportare correttamente un fascio di deuteron intenso in una piccola apertura di raggio da 4 a 7 mm?** Per questi valori di carica, la forza di repulsione coulombiana è significativa (specialmente a basse velocità), e quindi alcune particelle andranno perse, poiché colpiscono gli elettrodi e/o si scontrano tra loro. Ciò provocherà reazioni nucleari con emissione di raggi neutroni e gamma, che potrebbero impedire una manutenzione «hands on».

Soluzione: concentrazione delle perdite a basse energie (in cui è meno probabile che si verifichino alcune reazioni nucleari) e seguire accuratamente la legge sulla tensione (con un'accuratezza di  $\pm 4\%$ ). In questo caso, le perdite possono essere ridotte a meno del 5%. Ciò implica un'elevata precisione meccanica.

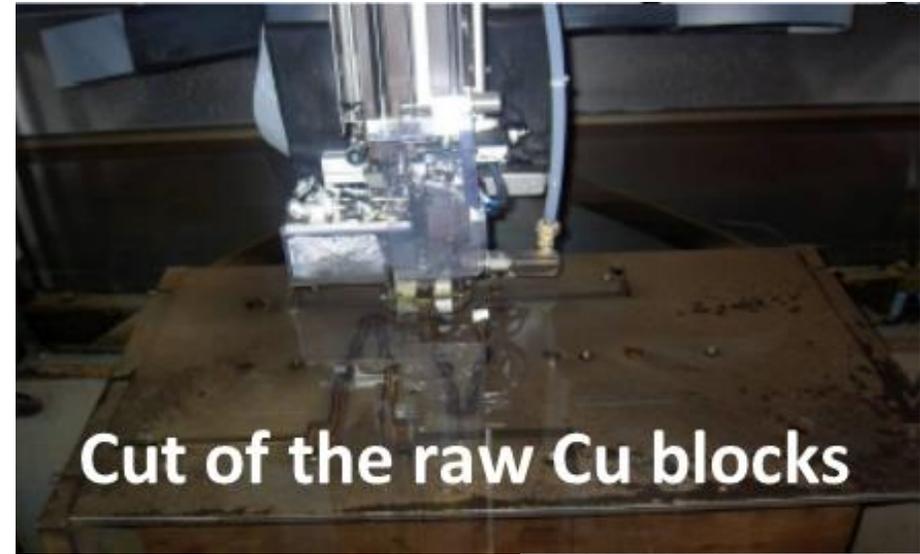
**Com'è possibile rimuovere una potenza di 600 kW dalle pareti della RFQ e minimizzare le deformazioni indotte termicamente?**

Soluzione: utilizzando un sistema di canali di raffreddamento con acqua pressurizzata, con diverse temperature dell'acqua in ingresso per gli elettrodi e per la parete esterna. In questo caso, è possibile sia rimuovere il calore sia controllare le deformazioni della punta dell'elettrodo.



# Le sfide tecnologiche dell'RFQ di IFMIF (2)

- **Qual è il materiale più appropriato?** Per ridurre le perdite ohmiche, l'RFQ deve essere costruito con un metallo ad alta conducibilità elettrica. Il materiale più conduttivo è l'Argento, ma è troppo costoso (il peso complessivo della RFQ è di alcune tonnellate), emette elettroni e risulta difficile da lavorare
- **Soluzione:** utilizzare il rame ultra-puro privo di ossigeno (poiché gli ossidi riducono la conduttività)
- **Come ottenere una legge di tensione accurata?** La modulazione e gli elettrodi devono essere costruiti con una precisione inferiore a 0,1 mm durante l'assemblaggio, ma non esiste una unica macchina utensile che possa costruire da un blocco di rame la geometria richiesta.
- **Soluzione:** dividere l'RFQ di 9,8 m in 18 moduli da 55 cm ciascuno e costruire ciascun elettrodo separatamente (totale #  $18 * 4 = 72$  pezzi).



# Le sfide tecnologiche dell'RFQ di IFMIF (3)

**Com'è possibile unire i 4 elettrodi di ciascun modulo insieme?**

Soluzione: la brasatura è un processo di giunzione del metallo in cui due o più oggetti metallici sono uniti tra loro mediante fusione e scorrimento di un metallo di apporto nel giunto, il metallo di riempimento ha un punto di fusione inferiore rispetto al metallo adiacente. Il metallo di riempimento fluisce nello spazio tra le parti aderenti per azione capillare. Nel nostro caso, il ciclo termico ha raggiunto circa 800 ° C in 15 ore, seguito da una diminuzione della temperatura di 14 ore.



**Com'è possibile unire i moduli insieme?**

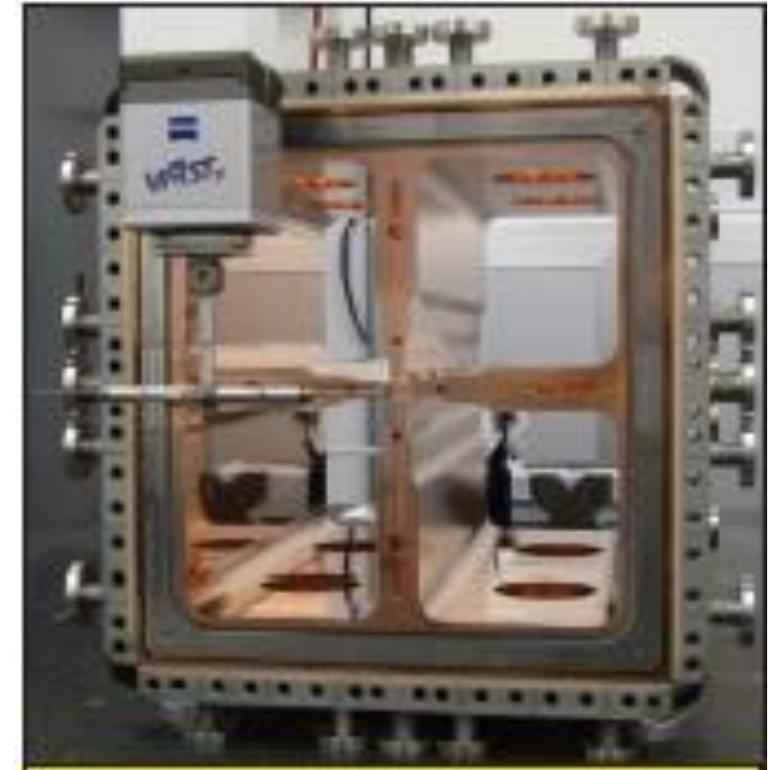
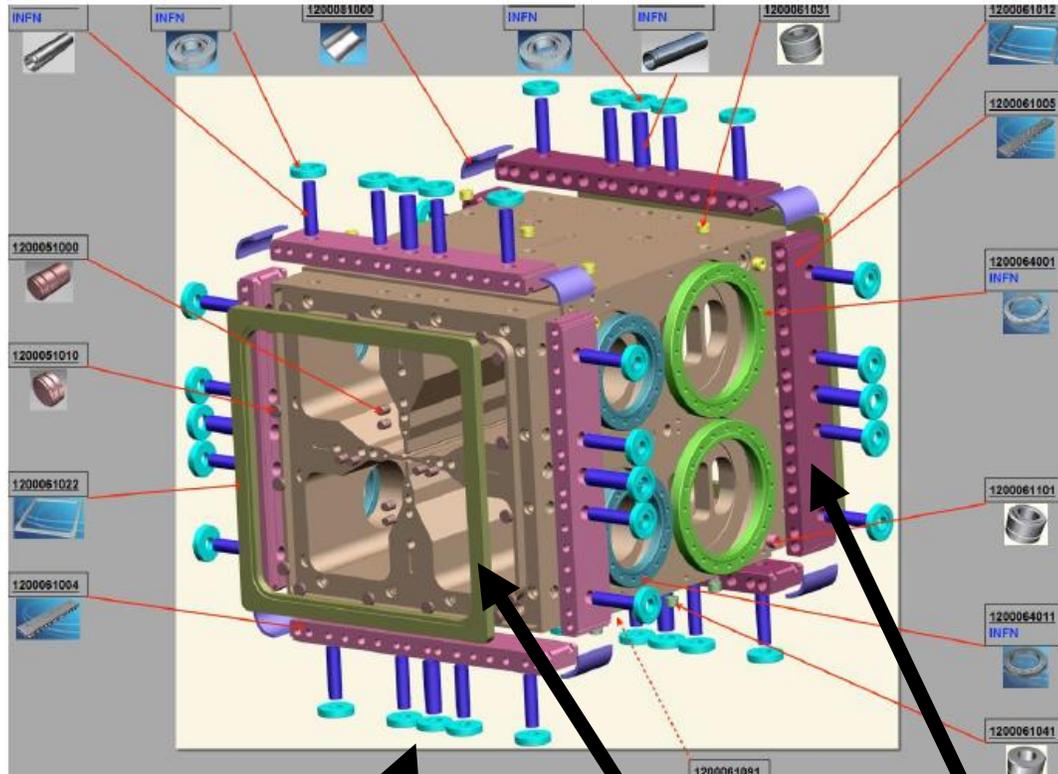
Soluzione: utilizzo di acciaio inossidabile strutturale per l'unione dei moduli e per le flange e le guarnizioni metalliche per garantire affidabilità e tenuta sotto vuoto.

**Com'è possibile eseguire il controllo di qualità?**

Soluzione: esecuzione di misurazioni sia meccaniche che a radiofrequenza per verificare ciascun modulo in ogni fase di produzione.



# Mettere tutto insieme



Canali di raffreddamento

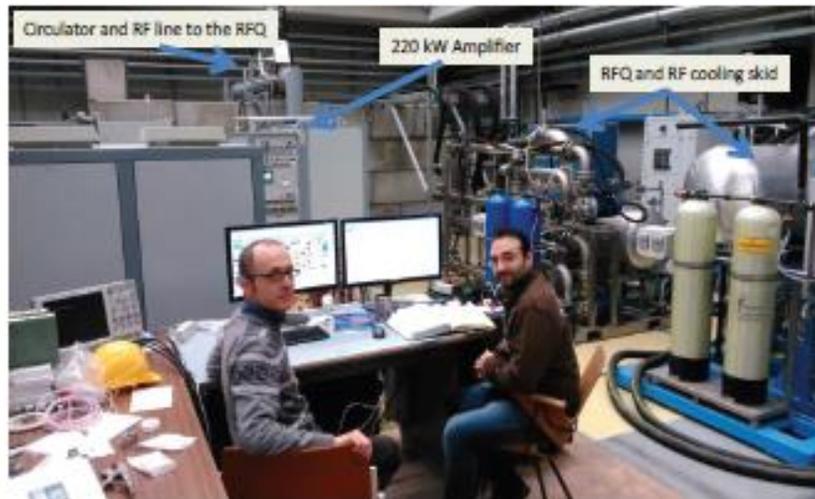
Guarnizioni da vuoto in acciaio inox

Flange esterne in acciaio inox

## ...ed incominciare a testare...



I tre moduli con la più alta energia sono stati uniti a Legnaro e sono stati installati tutti i sottosistemi (alimentazione a radiofrequenza, sistema di raffreddamento, pompe per vuoto, pickup di segnale, strutture di supporto e allineamento). Questo test era finalizzato a dimostrare l'affidabilità (senza fascio). Ovviamente, tutti i segnali devono essere digitalizzati e inviati al sistema di controllo. La potenza RF da 200 kW erogata dall'amplificatore viene trasportata attraverso le linee RF e quindi accoppiata alla RFQ tramite un'antenna loop (accoppiatore)



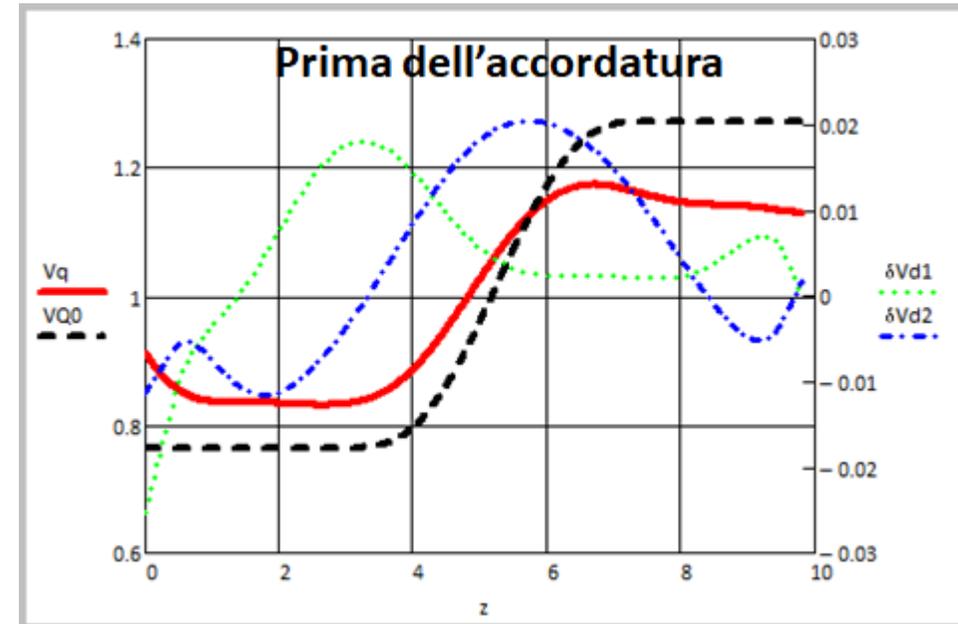
Accoppiatori a loop per l'RFQ sviluppati presso INFN-Legnaro. Inizialmente dovevano essere sviluppati da partner giapponesi, ma tali componenti non hanno superato i test di accettazione.

# Trasporto in Giappone ed accordature finali



Inserendo i tuner (cilindri metallici che sporgono all'interno del volume RFQ), è possibile sintonizzare finemente la frequenza e la tensione fino alle specifiche richieste (variazione massima del  $\pm 4\%$  rispetto al valore di progetto).

Inizialmente vengono inseriti tuner provvisori in alluminio, quindi sostituiti con quelli in rame raffreddati ad acqua e sottovuoto. Il valore di penetrazione di ciascuno dei 108 tuner è determinato iterativamente con misure RF e algoritmi matematici

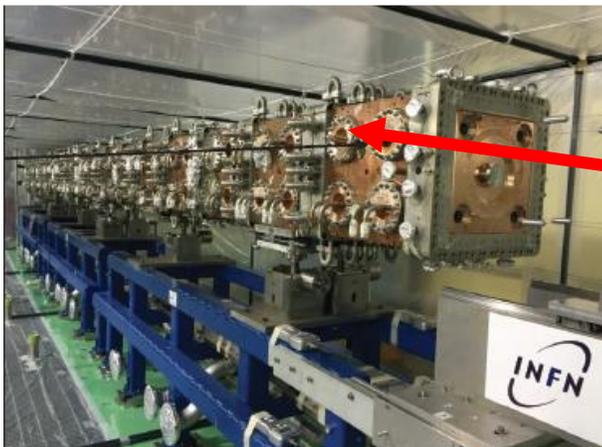
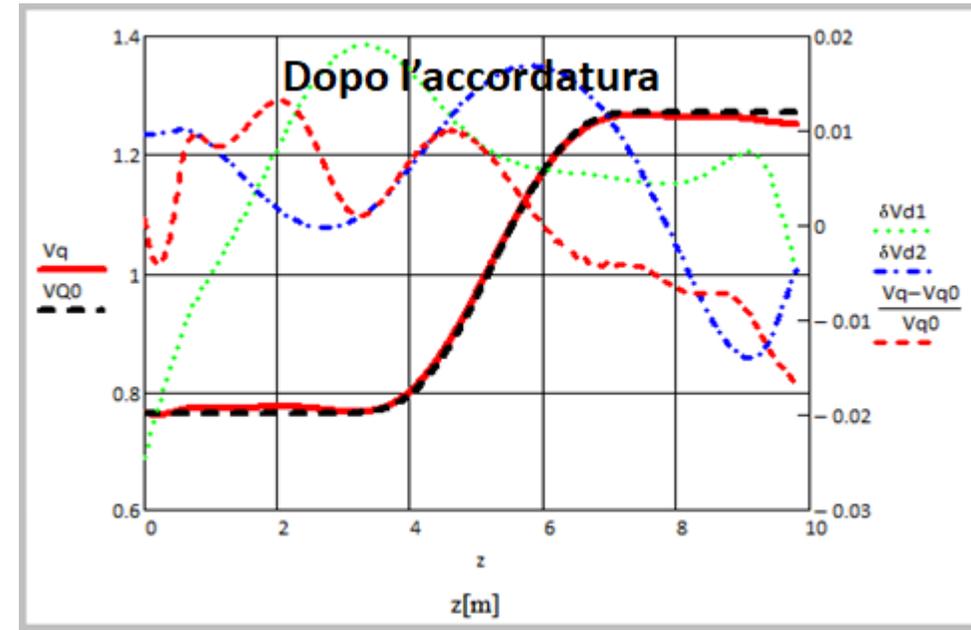


# Trasporto in Giappone ed accordature finali

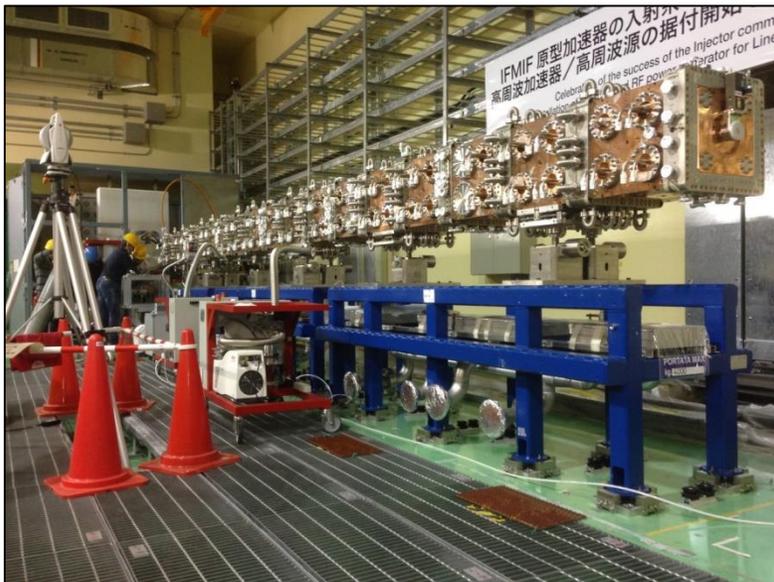


Inserendo i tuner (cilindri metallici che sporgono all'interno del volume RFQ), è possibile sintonizzare finemente la frequenza e la tensione fino alle specifiche richieste (variazione massima del  $\pm 4\%$  rispetto al valore di progetto).

Inizialmente vengono inseriti tuner provvisori in alluminio, quindi sostituiti con quelli in rame raffreddati ad acqua e sottovuoto. Il valore di penetrazione di ciascuno dei 108 tuner è determinato iterativamente con misure RF e algoritmi matematici



# Assemblaggio finale



Assemblaggio in  
posizione finale



Installazione  
sistema da vuoto

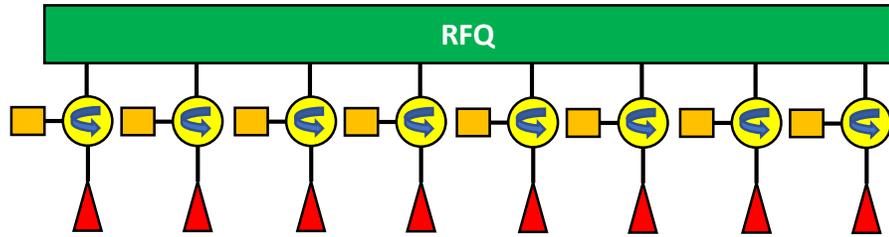
Installazione  
couplers e linee RF



Riscaldamento-degasaggio impurità

# Iniezione di Potenza RF

Amplificatori in fase



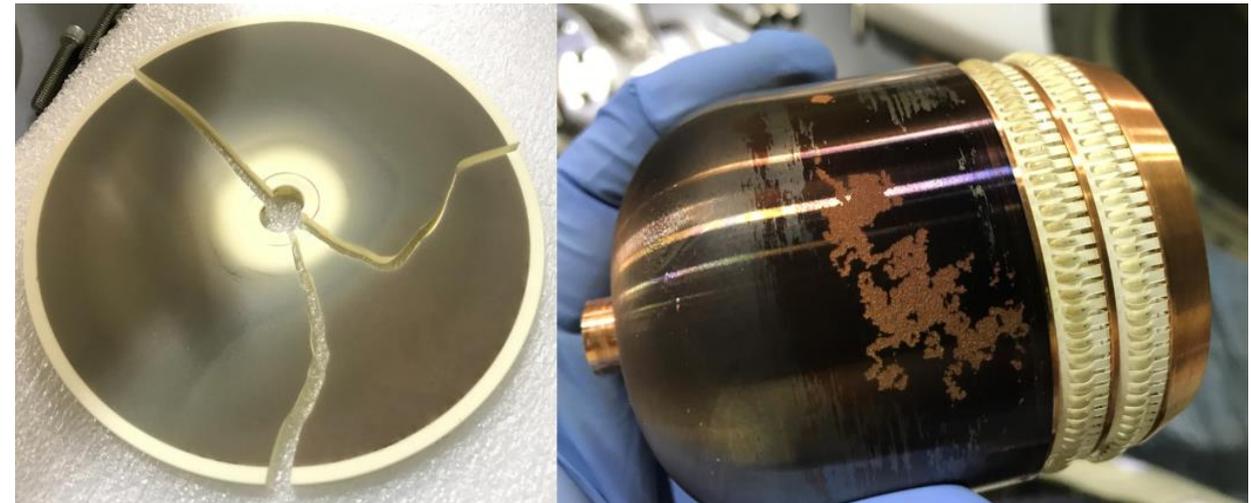
La messa in fase di 8 amplificatori da 200 kW cadauno non è banale!

Amplificatori fuori fase



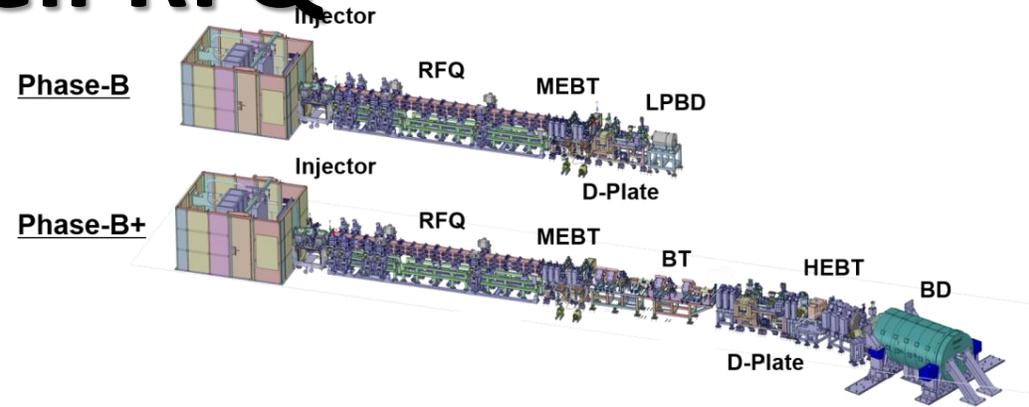
E qualcosa può andare storto...

Durante un test PPS, l'iniezione di potenza RF involontaria nella cavità con il sistema di interblocco disabilitato, un arco incontrollato in una finestra RF ha causato la metallizzazione dell'allumina=> sostituzione della finestra e modifica della logica di controllo



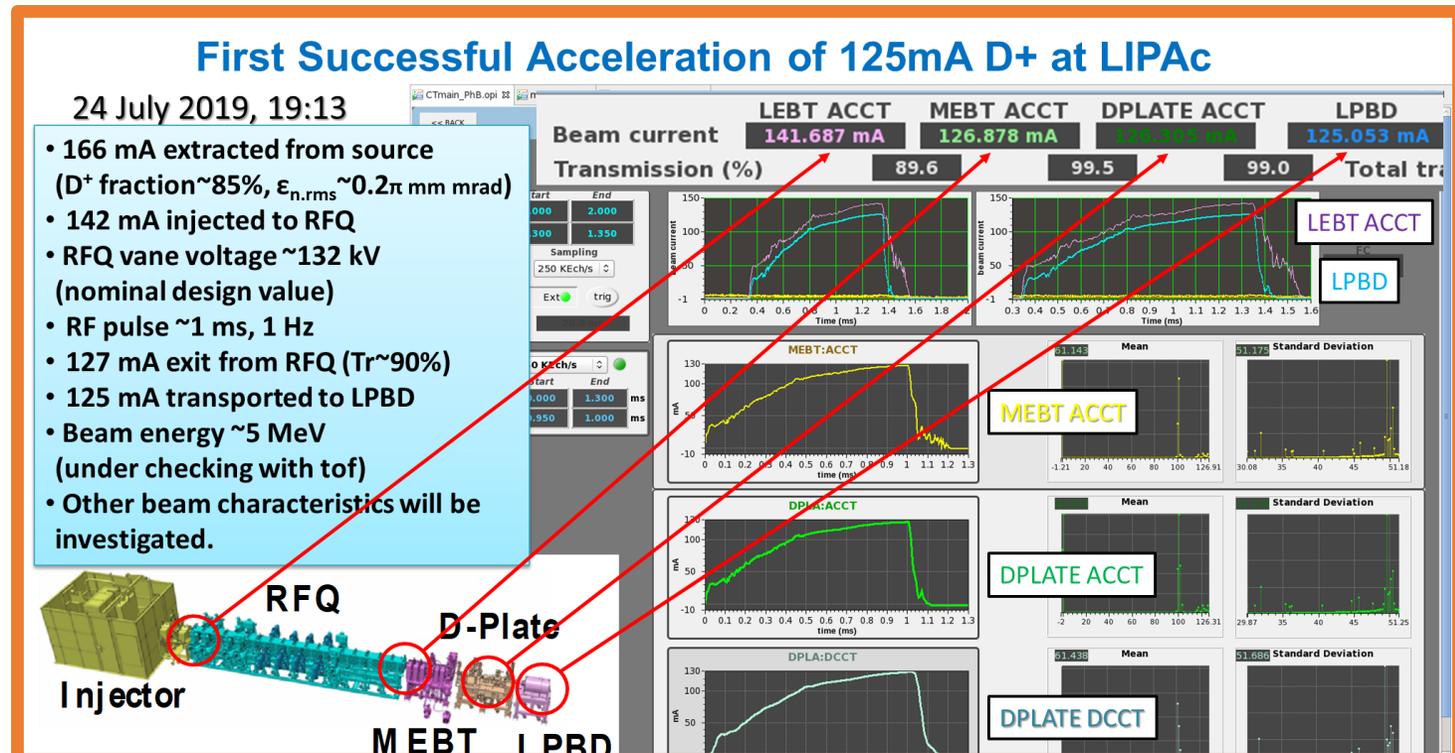
# Test di fascio dell'RFQ

- Fase A: fascio di 140 mA di deuteroni a 100 keV in CW (100% duty cycle)
- Fase B: fascio di 125 mA di deuteroni a 5 MeV a 0.1% duty cycle
- Fase B+: fascio di 125 mA di deuteroni a 5 MeV da 0.1% duty cycle a CW
- Fase C: fascio di 125 mA di deuteroni a 9 MeV a 0.1% duty cycle
- Fase D: Aumento del Duty Cycle fino a CW



## Accelerazione del fascio a 125 MA

- Il primo fascio di protoni è stato iniettato il 13 giugno del 2018, 1 Hz di frequenza di ripetizione Durata impulso RF dell' RFQ = 500  $\mu$ s, Durata impulso di fascio 300  $\mu$ s, Quindi Duty Cycle = 300  $\mu$ s/1s=0.03%
- L'iniezione di Deuteroni ha avuto inizio nella primavera del 2019
- In questo frattempo, operando sui parametri dei solenoidi a monte dell'RFQ si è ottimizzata la trasmissione del fascio (rapporto fra corrente di fascio in uscita dall'RFQ e corrente di fascio in ingresso all'RFQ) , fino a raggiungere il valore di progetto (circa il 90%).



# Principali acceleratori di particelle nel mondo



# Approfondimenti

## Lezioni Introdotive

[https://www.inf.infn.it/edu/stageInf/2012/masterclass\\_acceleratori\\_2012\\_1.pdf](https://www.inf.infn.it/edu/stageInf/2012/masterclass_acceleratori_2012_1.pdf)

<https://cds.cern.ch/record/1017689/files/ab-note-2007-014.pdf>

<https://sites.google.com/iit.edu/uspas2019>

<https://uspas.fnal.gov/materials/09VU/Lecture1a.pdf>

<https://indico.cern.ch/event/22574/contributions/475143/attachments/371243/516589/IntroductionToAccelerators.pdf>

[https://people.nsl.msui.edu/~lund/uspas/ap\\_2018/lec\\_lund/01.intro.pdf](https://people.nsl.msui.edu/~lund/uspas/ap_2018/lec_lund/01.intro.pdf)

## Dispense Scuole di Acceleratori CERN e USPAS (USA) (in inglese)

<https://uspas.fnal.gov/materials/materials-table.shtml>

<https://cas.web.cern.ch/previous-schools>

## Libri di riferimento (in inglese)

<https://www.amazon.it/Particle-Accelerator-Physics-Helmut-Wiedemann/dp/3540490434>

<https://www.amazon.com/Accelerator-Physics-Third-S-Lee/dp/9814374946>

<https://www.amazon.it/RF-Linear-Accelerators-Thomas-Wangler/dp/3527406808>