

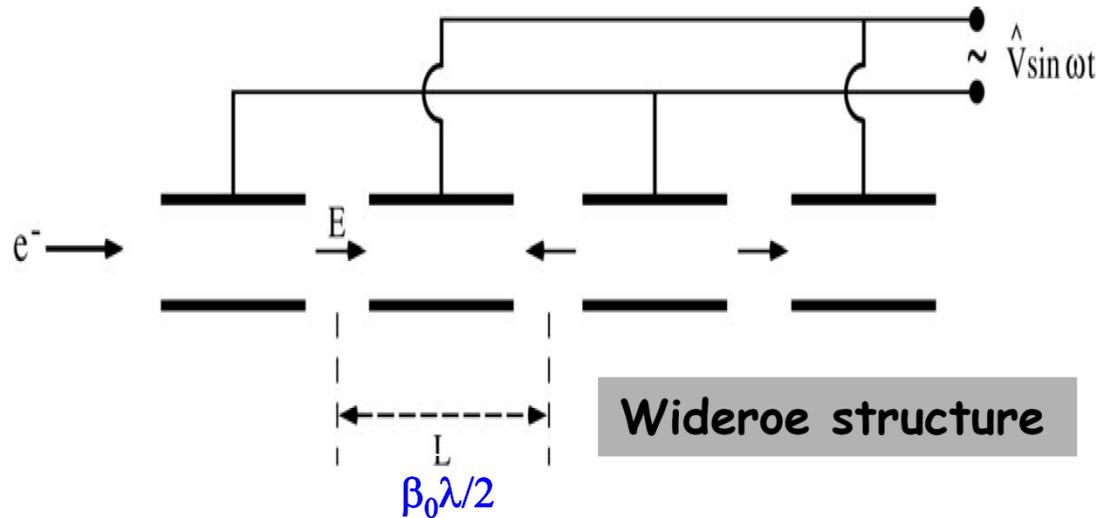
Acceleratori di Particelle

A. Pisent

INFN-Laboratori Nazionali di Legnaro

Acceleratori lineari

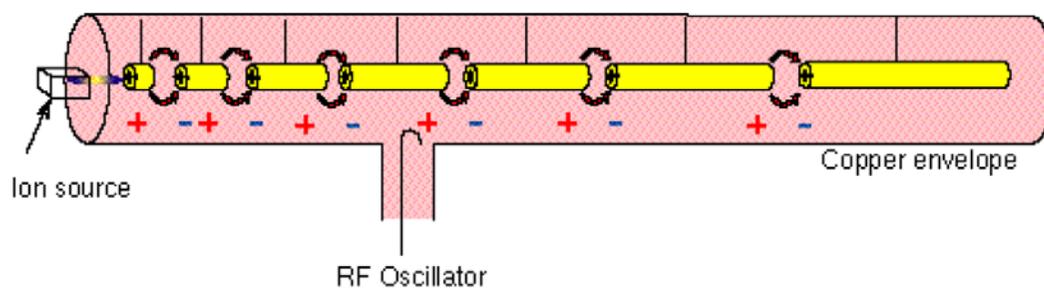
Acceleratore lineare (linac)



- Dopo ogni gap la lunghezza L definisce β_0 , quindi l'energia nominale w_0 ed il suo incremento dopo un gap accelerante

$$\frac{dw_0}{dn} = eV \cos \phi_0$$

- ϕ_0 è detta fase sincrona, dn variabile adimensionale che aumenta di una unità ogni periodo



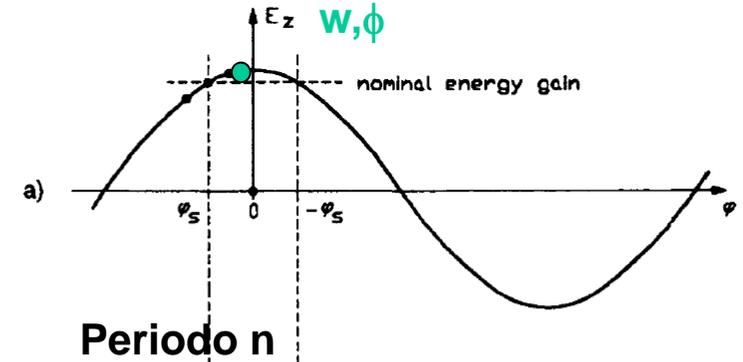
Stabilità di fase

La particella generica, con fase f ed energia w , avrà (passando nel gap accelerante) una variazione di energia:

$$\frac{d(w - w_0)}{dn} = eV[\cos \phi - \cos \phi_0]$$

Mentre dopo la lunghezza $\beta_0 \lambda$ del periodo arriverà con un ritardo rispetto alla particella nominale:

$$\frac{d(\phi - \phi_0)}{dn} \approx -2\pi \frac{\beta - \beta_0}{\beta} = -2\pi \frac{w - w_0}{\beta^2 \gamma^3 mc^2}$$



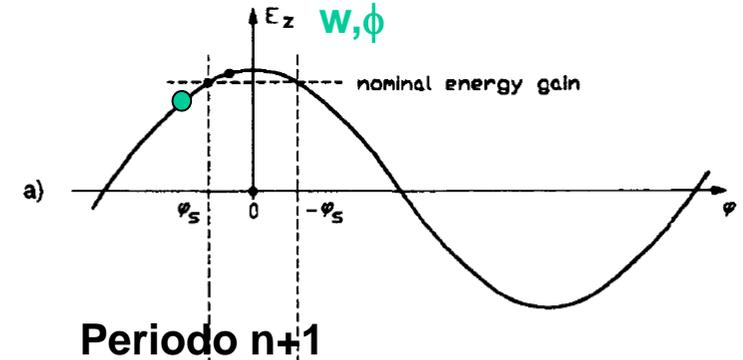
Stabilità di fase

La particella generica, con fase f ed energia w , avrà (passando nel gap accelerante) una variazione di energia:

$$\frac{d(w - w_0)}{dn} = eV[\cos \phi - \cos \phi_0]$$

Mentre dopo la lunghezza $\beta_0 \lambda$ del periodo arriverà con un ritardo rispetto alla particella nominale:

$$\frac{d(\phi - \phi_0)}{dn} \approx -2\pi \frac{\beta - \beta_0}{\beta} = -2\pi \frac{w - w_0}{\beta^2 \gamma^3 mc^2}$$



Stabilità di fase

La particella generica, con fase ϕ ed energia w , avrà (passando nel gap accelerante) una variazione di energia:

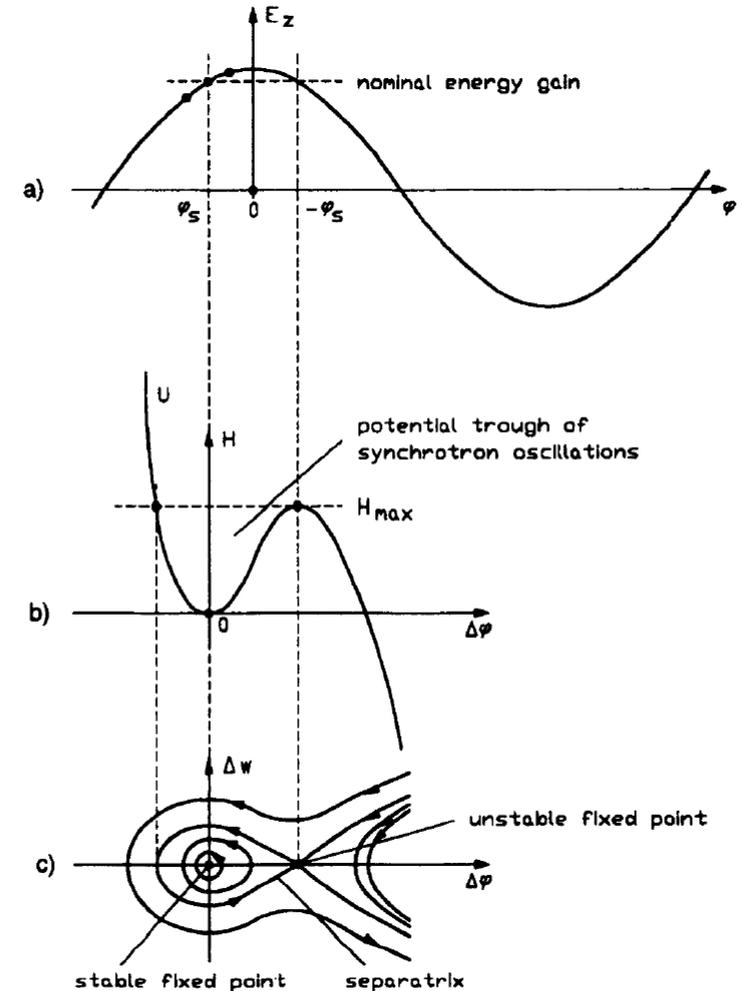
$$\frac{d(w - w_0)}{dn} = eV[\cos \phi - \cos \phi_0]$$

Mentre dopo la lunghezza $\beta_0 \lambda$ del periodo arriverà con un ritardo rispetto alla particella nominale:

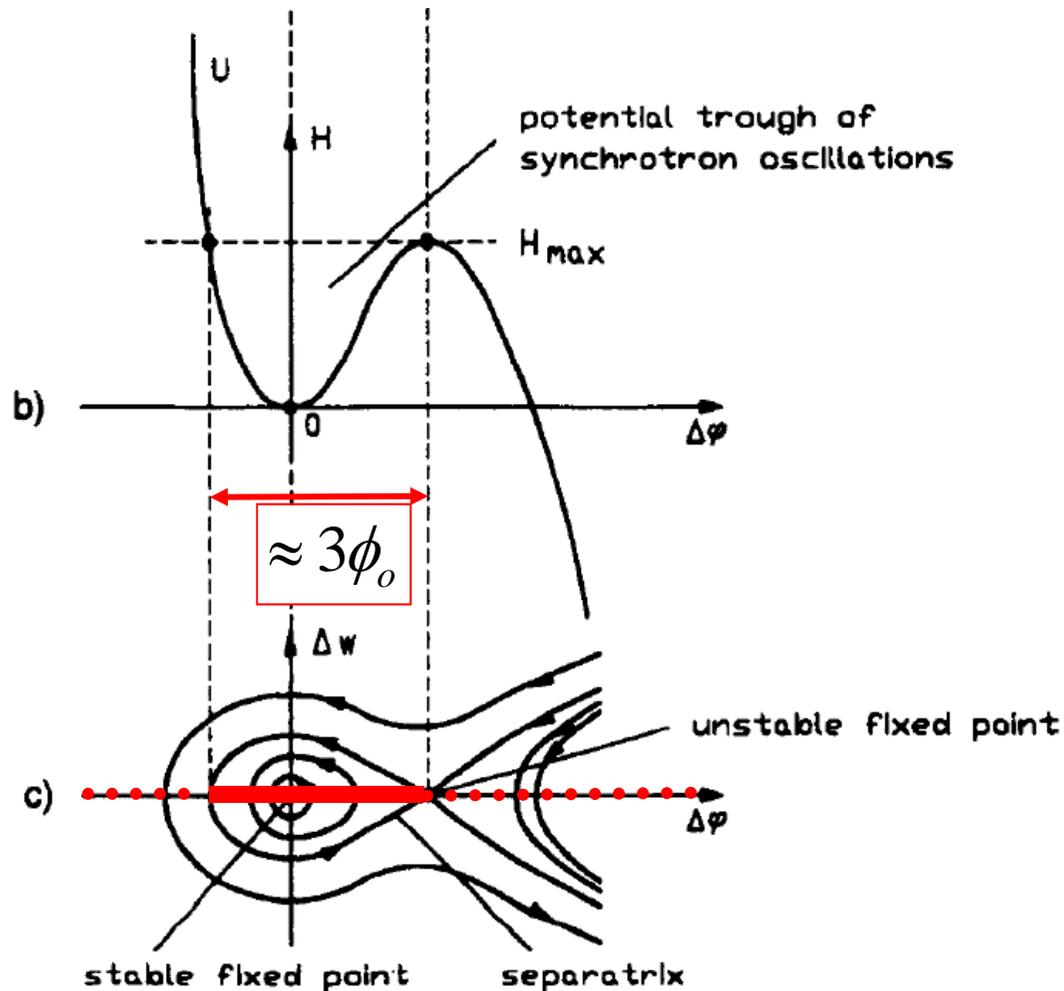
$$\frac{d(\phi - \phi_0)}{dn} \approx -2\pi \frac{\beta - \beta_0}{\beta} = -2\pi \frac{w - w_0}{\beta^2 \gamma^3 mc^2}$$

L'evoluzione del sistema è riducibile all'Hamiltoniano

$$H(w, \phi) = \pi \frac{(w - w_0)^2}{\beta^2 \gamma^3 mc^2} + \underbrace{eV[\sin \phi_0 - \phi \cos \phi_0]}_{U(\phi)}$$

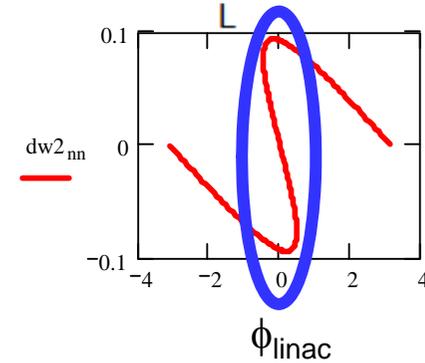
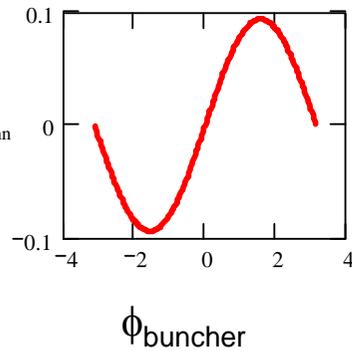
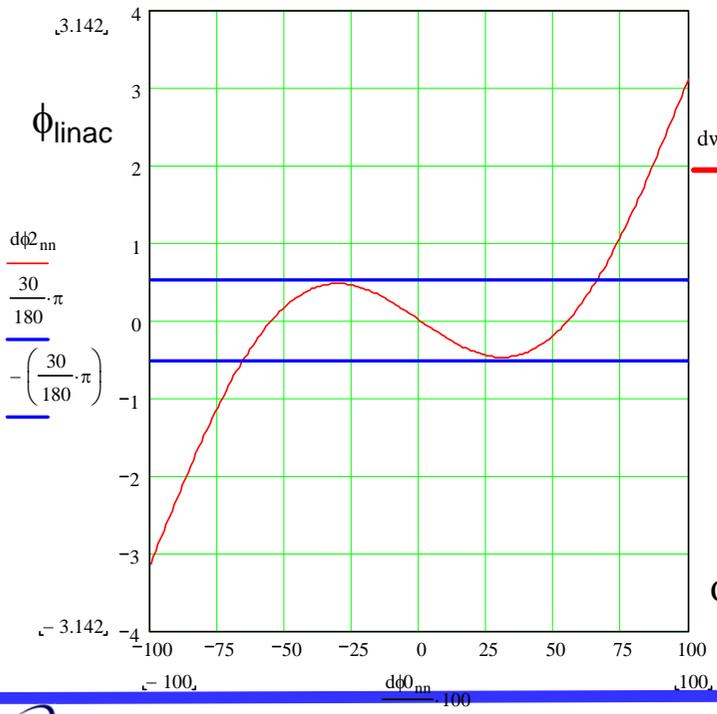
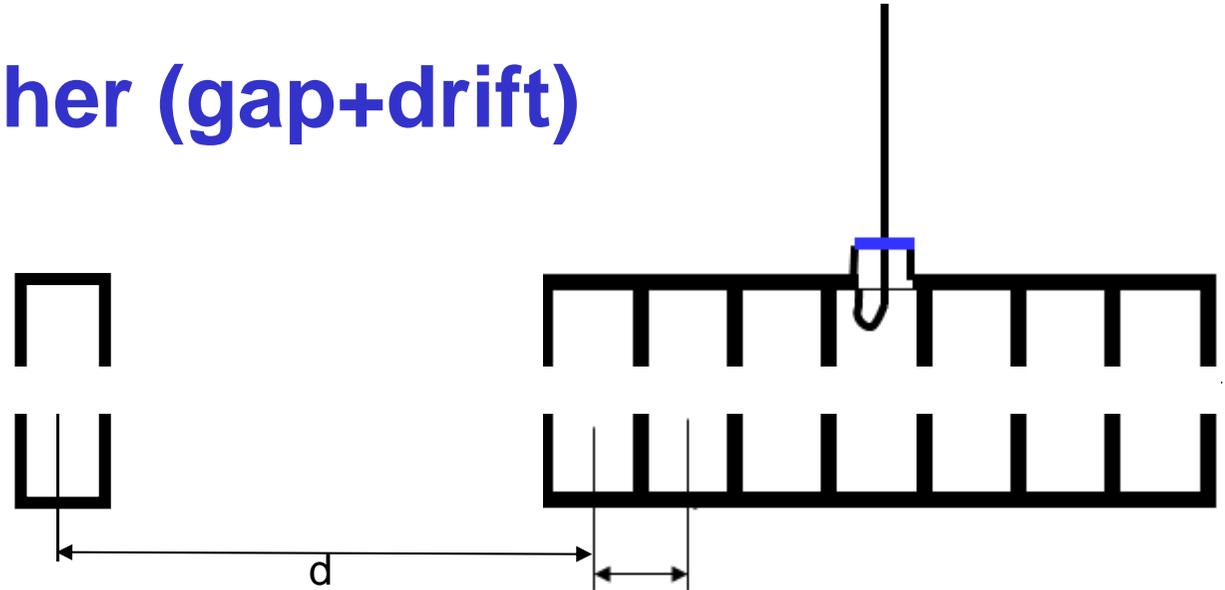


Efficienza di cattura



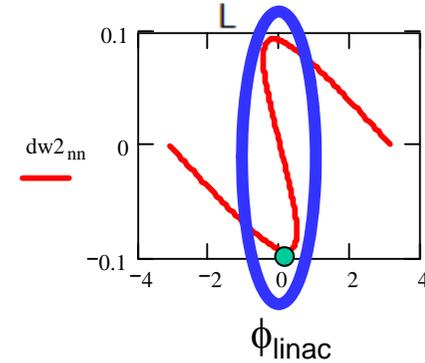
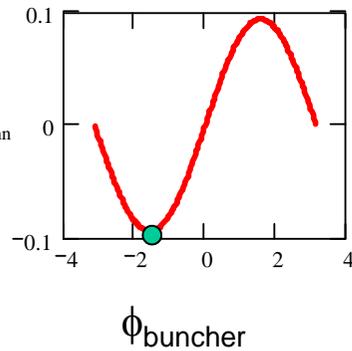
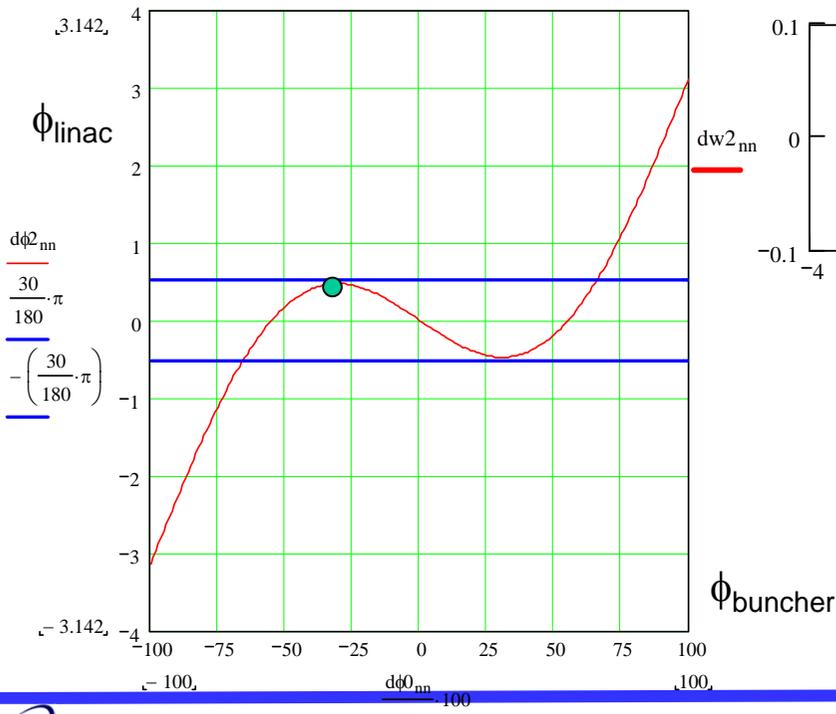
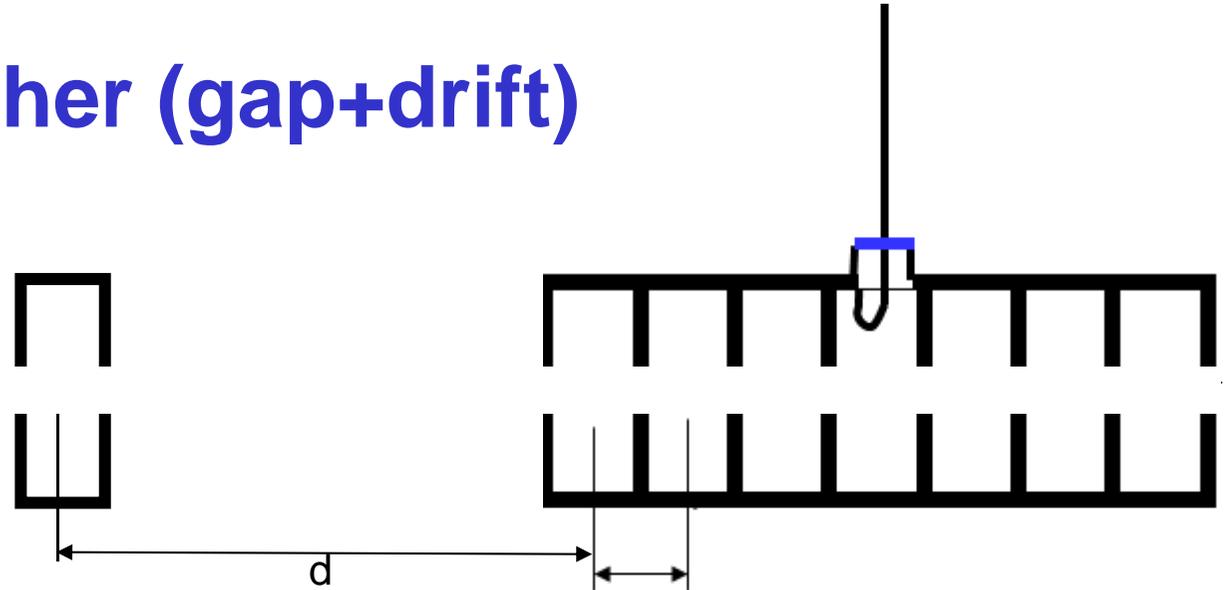
- Mandando un **fascio continuo** monoenergetico in un linac catturo solo le particelle che arrivano con una fase nella zona stabile
- Tipicamente se $\phi_0 = -20^\circ$ catturo $60/360 = 17\%$ delle particelle
- Occorre inventarsi qualcosa (specie se la sorgente ha una corrente limitata o se l'intensità è alta)

Buncher (gap+drift)



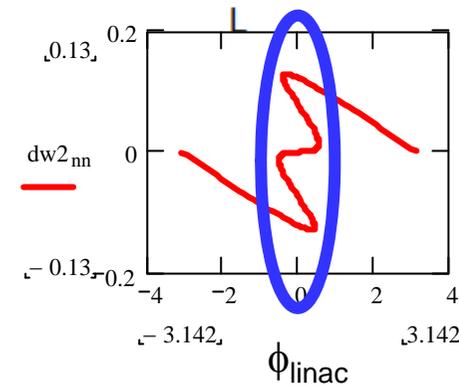
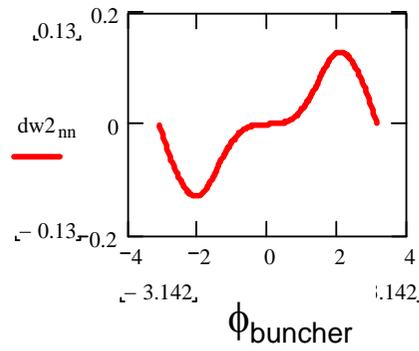
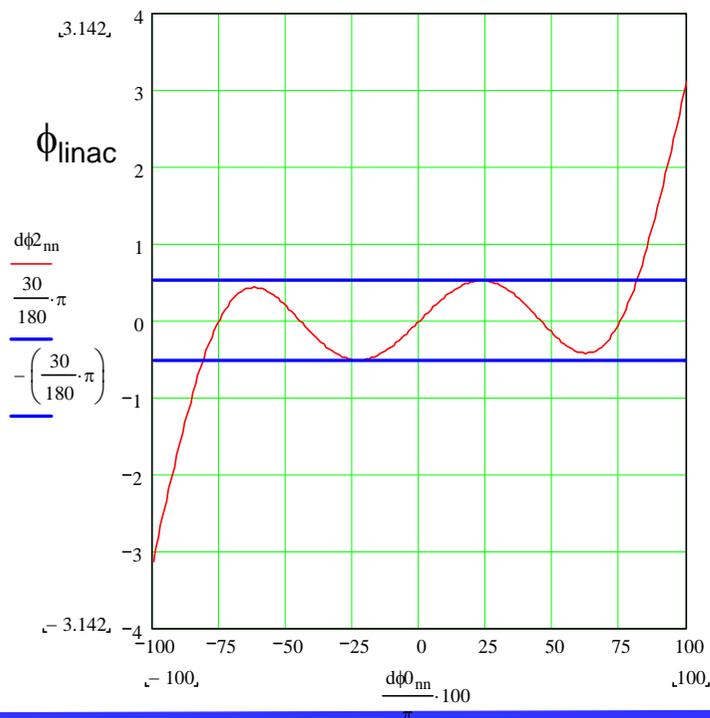
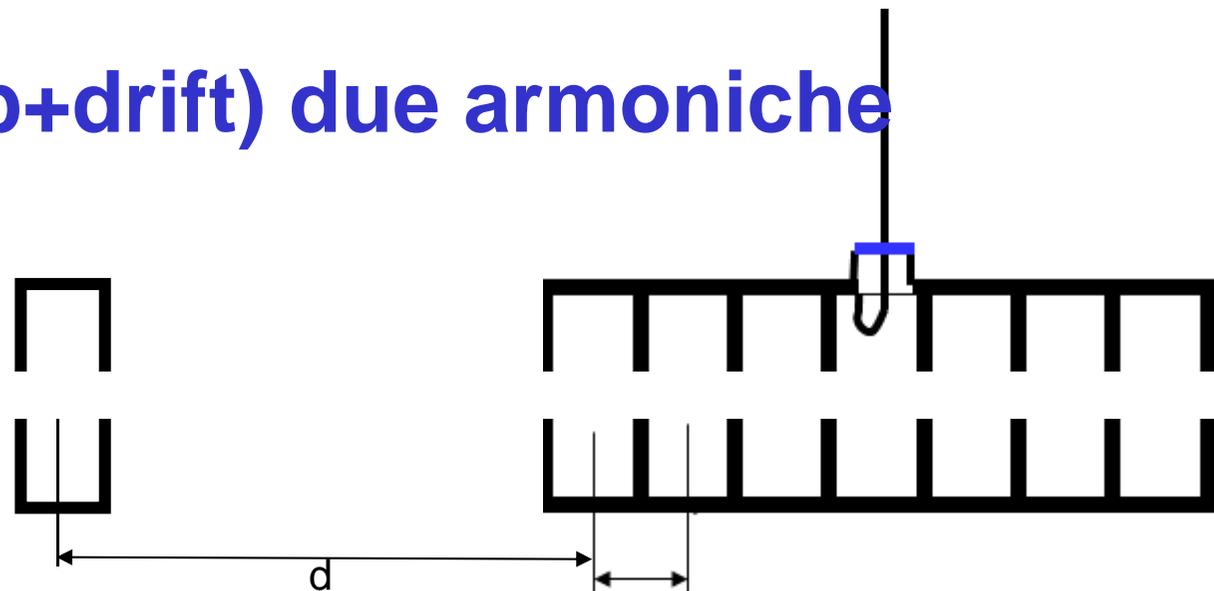
Dopo la cavità di buncher il fascio evolve aumentando la Densità di particelle nell'intervallo di fase desiderato

Buncher (gap+drift)



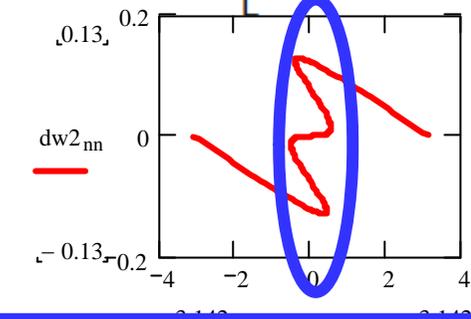
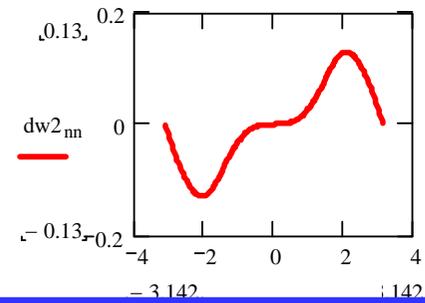
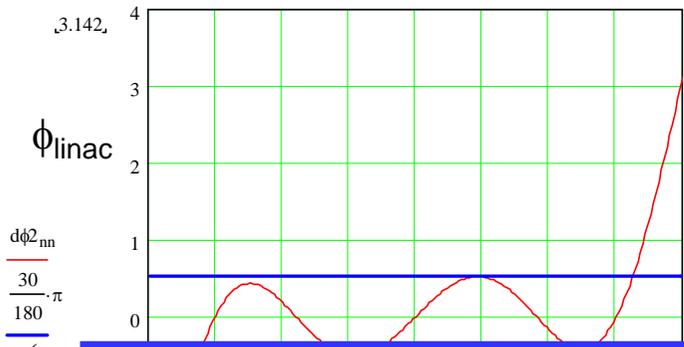
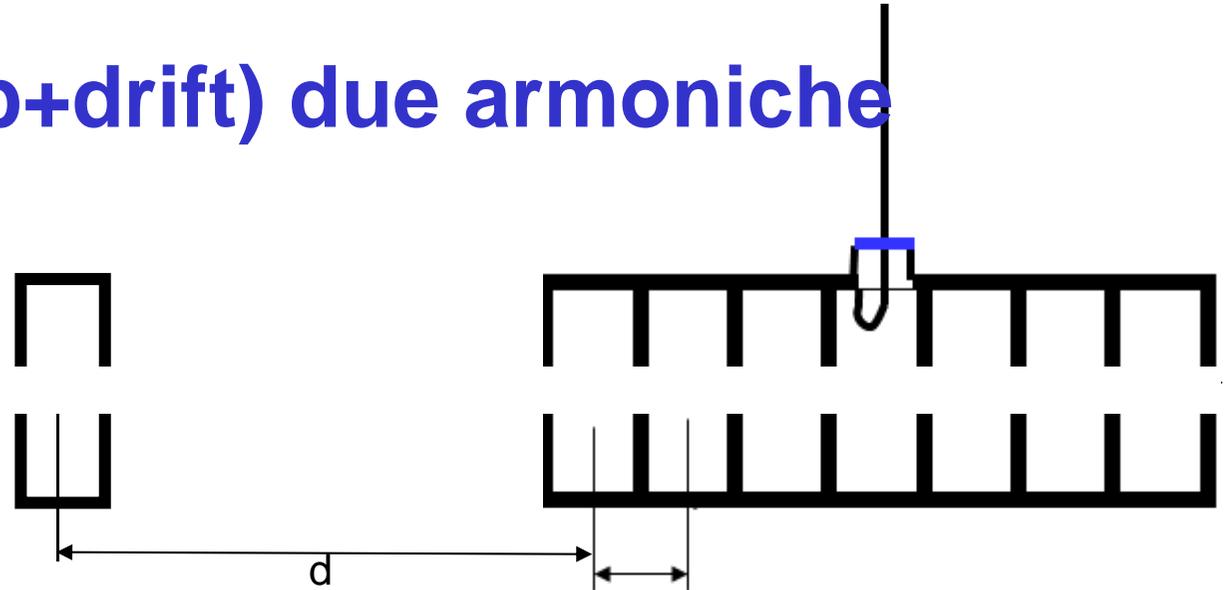
Dopo la cavità di buncher il fascio evolve aumentando la Densità di particelle nell'intervallo di fase desiderato
 In questo caso circa 60% delle particelle sono catturate

Buncher (gap+drift) due armoniche

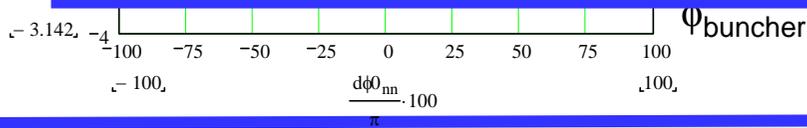


Dopo la cavità di buncher il fascio evolve aumentando la Densità di particelle nell'intervallo di fase desiderato

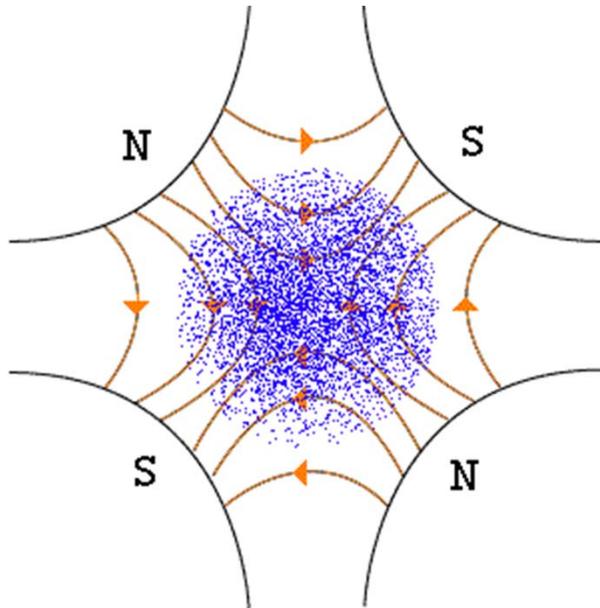
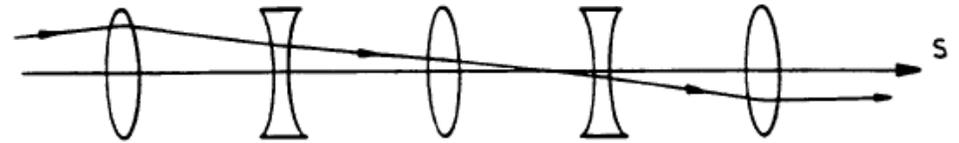
Buncher (gap+drift) due armoniche



Queste stesse tecniche di bunching sono utilizzate nei ciclotroni e nei linac per elettroni. In questo secondo caso la cavità singola viene chiamata prebuncher, mentre buncher viene chiamata la struttura multicella (fino a circa 5 MeV) dove avviene tutta la dinamica non relativistica del linac.



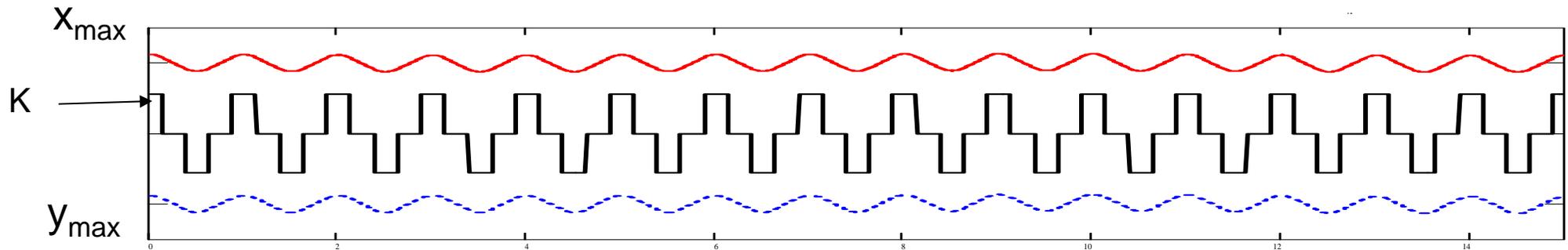
Gradiente alternato



- Non è possibile avere $K > 0$ ovunque in x ed y (oscillatore armonico)
- In molte condizioni l'effetto di una successione di lenti focalizzanti e defocalizzanti è focalizzante
- Il trasporto del fascio avviene secondo le soluzioni stabili dell'equazione di Hill:

$$x'' + [K(s)]x = 0$$

$$y'' + [-K(s)]y = 0$$

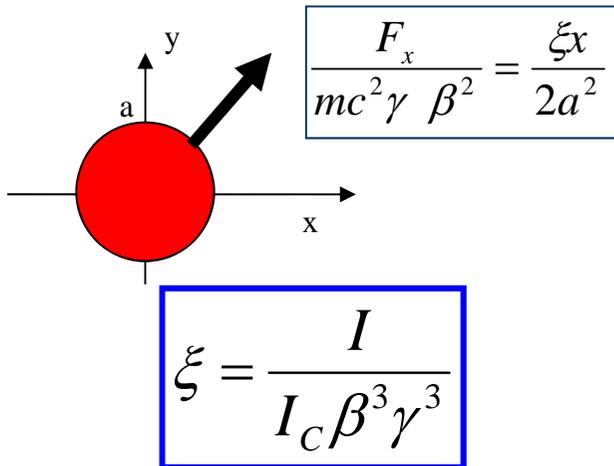


Campi elettromagnetici generati dal fascio

Carica Spaziale

Bassa energia

Campi per una densità di carica omogenea


$$\frac{F_x}{mc^2 \gamma \beta^2} = \frac{\xi x}{2a^2}$$
$$\xi = \frac{I}{I_C \beta^3 \gamma^3}$$

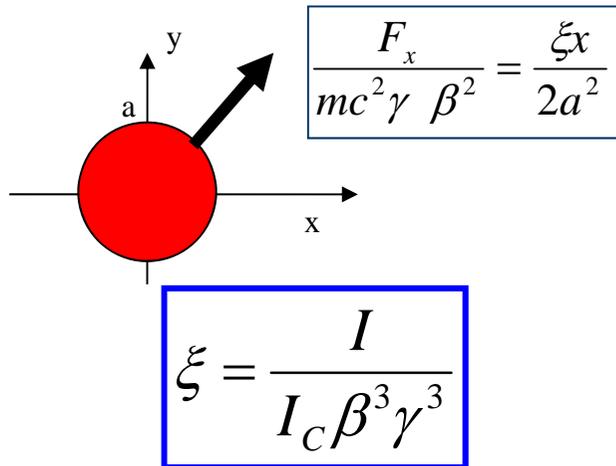
$I_C = \frac{\pi \epsilon_0}{e} mc^3 = 7.8 \text{ MA}$ corrente caratteristica per protoni

Campi elettromagnetici generati dal fascio

Carica Spaziale

Bassa energia

Campi per una densità di carica omogenea



$I_C = \frac{\pi \epsilon_0}{e} mc^3 = 7.8 MA$ corrente caratteristica per protoni

Effetto della carica spaziale è un'attenuazione della focalizzazione esterna

$$x'' + \left[K(s) - \frac{\xi}{a^2} \right] x = 0$$

Se la distribuzione di carica (come per lo più accade) non è omogenea la forza diviene non lineare, intervengono risonanze, si può formare un alone intorno al fascio

Focalizzazione RF

Linearizzando l'equazione del **moto longitudinale**
diviene

$$\frac{d^2(\phi - \phi_0)}{dz^2} = -2\pi \frac{eV[\cos \phi - \cos \phi_0]}{\beta^2 \gamma^3 mc^2 (\beta\lambda)^2} \approx 2\pi \frac{eE_0 \sin \phi_0}{\beta^3 \gamma^3 mc^2 \lambda} (\phi - \phi_0)$$

Dove utilizziamo la definizione di campo accelerante medio $V = E_0 \beta \lambda$ ed il parametro $dz = \beta \lambda dn$; alla focalizzazione longitudinale è associata una **defocalizzazione trasversale**:

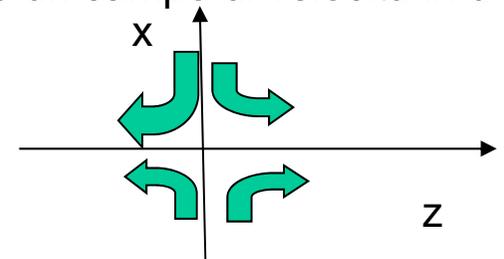
$$x'' + \left[K(s) + \pi \frac{eE_0 \sin \phi_0}{\beta^3 \gamma^3 mc^2 \lambda} \right] x = 0$$

Fenomeno legato a proprietà fondamentali del campo elettrico (**div E=0** come un campo di velocità in un fluido)

Se focalizza in z defocalizza in x e y

Particolarmente forte a **campi acceleranti alti, energia bassa,**

Frequenza alta



Focalizzazione RF

Linearizzando l'equazione del **moto longitudinale**
diviene

$$\frac{d^2(\phi - \phi_0)}{dz^2} = -2\pi \frac{eV[\cos\phi - \cos\phi_0]}{\beta^2 \gamma^3 mc^2 (\beta\lambda)^2} \approx 2\pi \frac{eE_0 \sin\phi_0}{\beta^3 \gamma^3 mc^2 \lambda} (\phi - \phi_0)$$

Dove utilizziamo la definizione di campo accelerante medio $V = E_0 \beta \lambda$ ed il parametro $dz = \beta \lambda dn$; alla focalizzazione longitudinale è associata una **defocalizzazione trasversale**:

$$x'' + \left[K(s) + \pi \frac{eE_0 \sin\phi_0}{\beta^3 \gamma^3 mc^2 \lambda} \right] x = 0$$

$\phi_0 < 0$ focalizza long e def. Trasv.

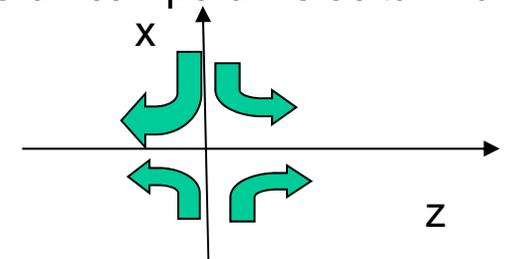
$\phi_0 > 0$ def. Long. e focalizza Trasv

Fenomeno legato a proprietà fondamentali del campo elettrico (**div E=0** come un campo di velocità in un fluido)

Se focalizza in z defocalizza in x e y

Particolarmente forte a campi acceleranti alti, energia bassa,

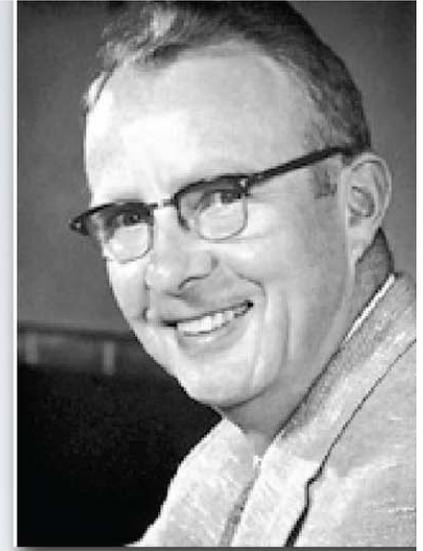
Frequenza alta



Primo esempio: Drift Tube Linac

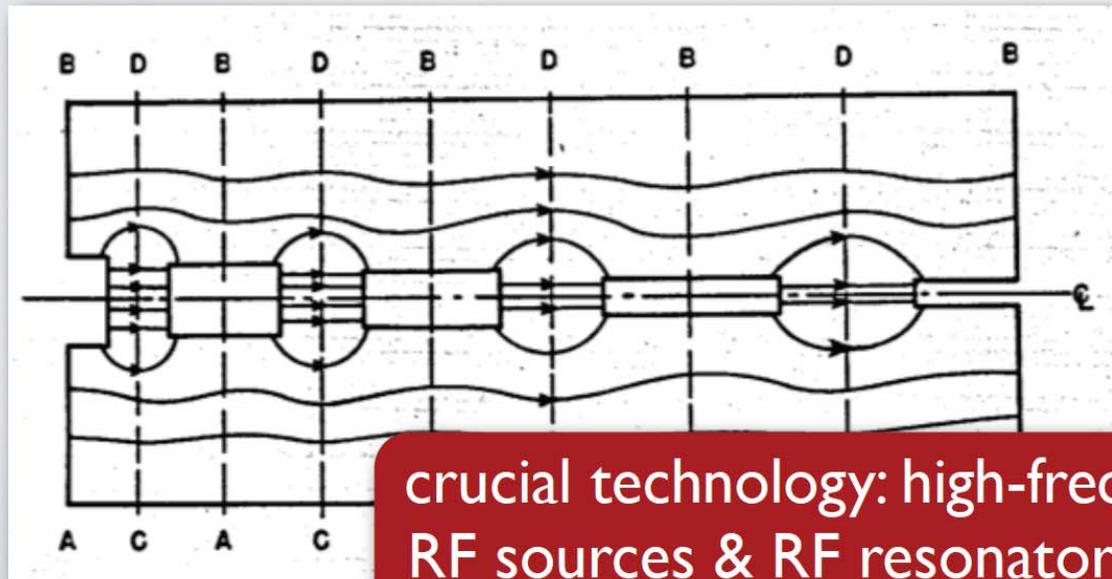
Tutti i parametri di fascio sono in mano al progettista

THE ALVAREZ LINAC (1946)



after WW2 high-power high-frequency RF sources became available (radar technology):

most old linacs operate at 200 MHz!



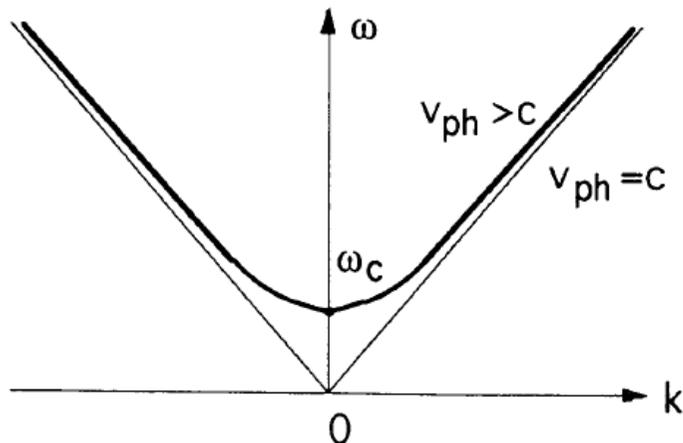
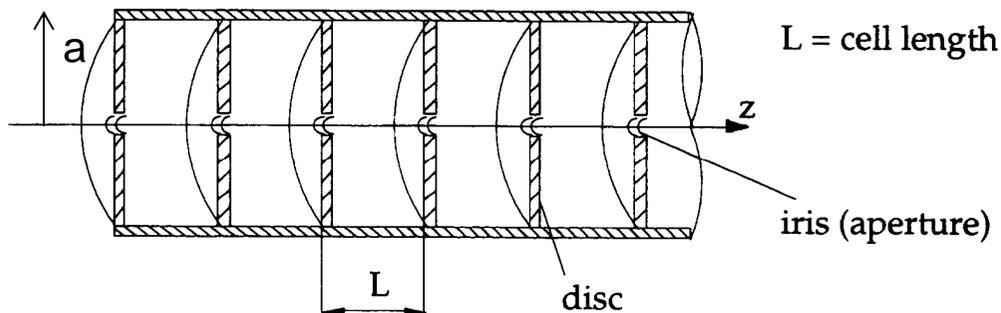
crucial technology: high-freq.
RF sources & RF resonators

the RF field was enclosed
in a box: RF resonator

While the electric fields point in the “wrong direction” the particles are shielded by the drift tubes.

Campo in una cavità cilindrica

equazione delle onde sulla componente E_z



$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0 ,$$

$$E_z = Z(z) R(r) T(t) .$$

$$T(t) \propto e^{j\omega t} \quad Z(z) \propto e^{-jkz}$$

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \underbrace{\left(\frac{\omega^2}{c^2} - k^2 \right)}_{K_r^2} R = 0$$

$$R(r) = A J_0(K_r r)$$

$$K_r a = 2.405 ,$$

$$J_0(K_r a) = 0$$

$$K_r = \frac{2.405}{a} .$$

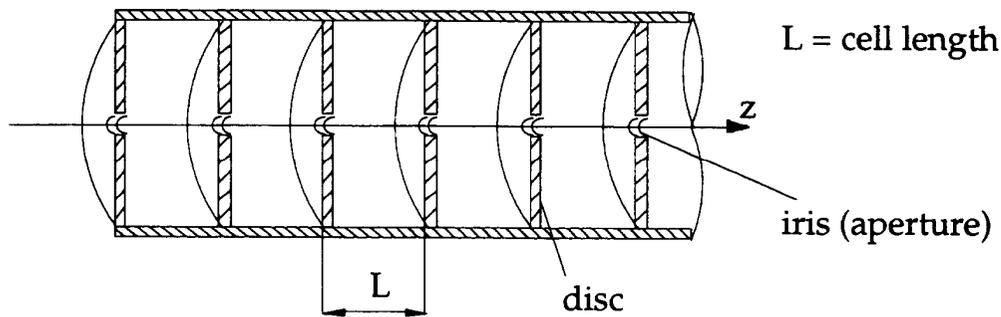
- Primo zero della funzione J dei Bessel (condizione $E_z=0$ sul conduttore)

Il DTL funziona nel modo fondamentale ($k=0$).

Per gli altri modi si impone $kL=\pi/n$ n numero del modo

-
- $\frac{\omega^2}{c^2} = K_r^2 + k^2 .$
-

Dissipazione di potenza in una cavità



$$P_d = \frac{V^2}{R_{sh}}$$

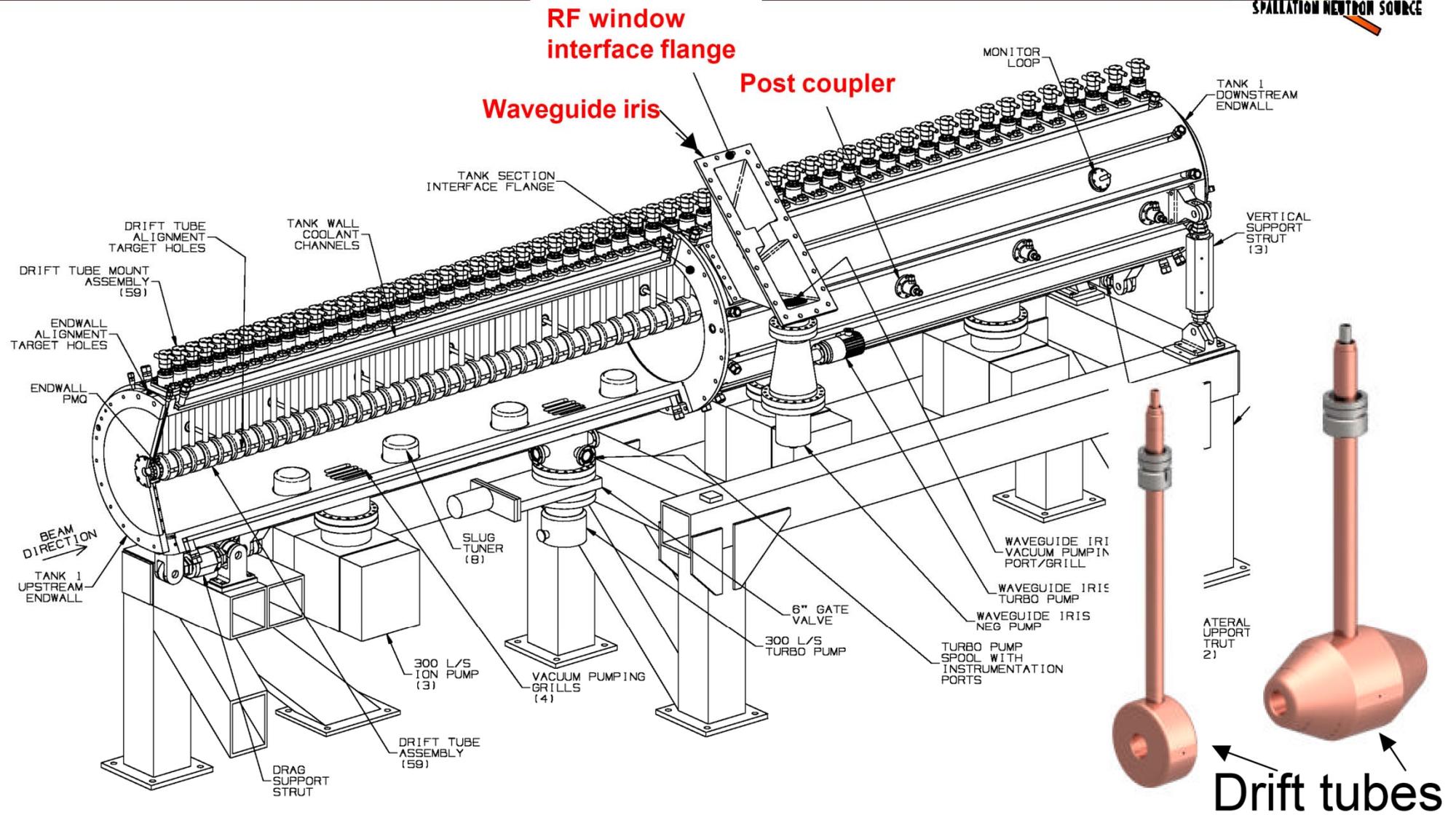
$$Q = \frac{U\omega}{P_d}$$

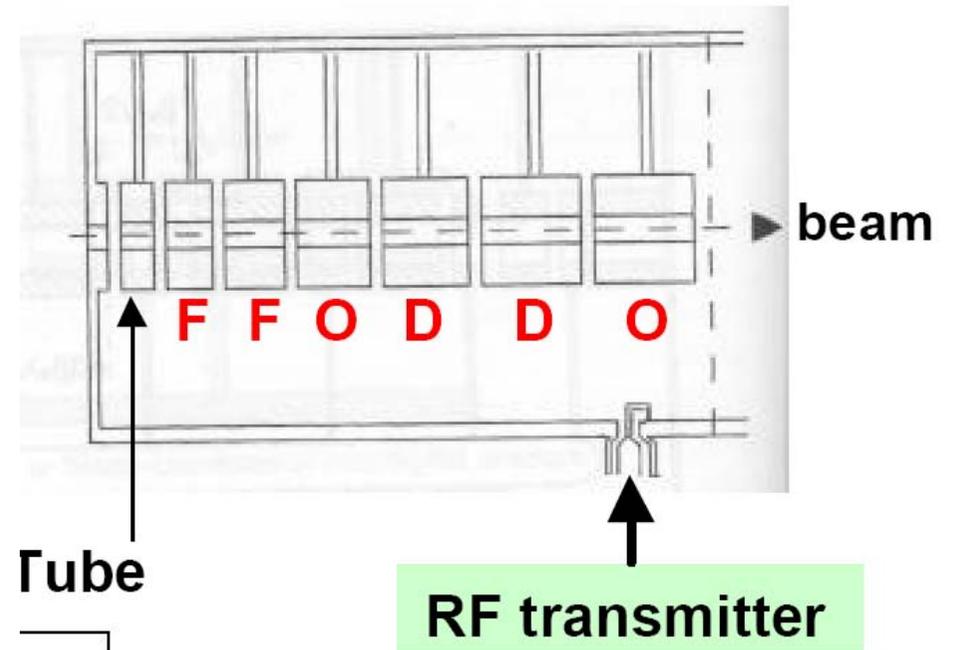
$$R_{sh} / Q = \frac{V^2}{U\omega} = \frac{1}{C\omega}$$

$$P_d = \frac{V^2}{[R_{sh} / Q]} Q$$

- Si definiscono la shunt impedance ed il fattore di merito Q. Passando da cavità normal conduttive a superconduttive Q passa da 10^3 - 10^4 a 10^8 - 10^9

SNS DTL Tank 1 Assembly Cutaway View



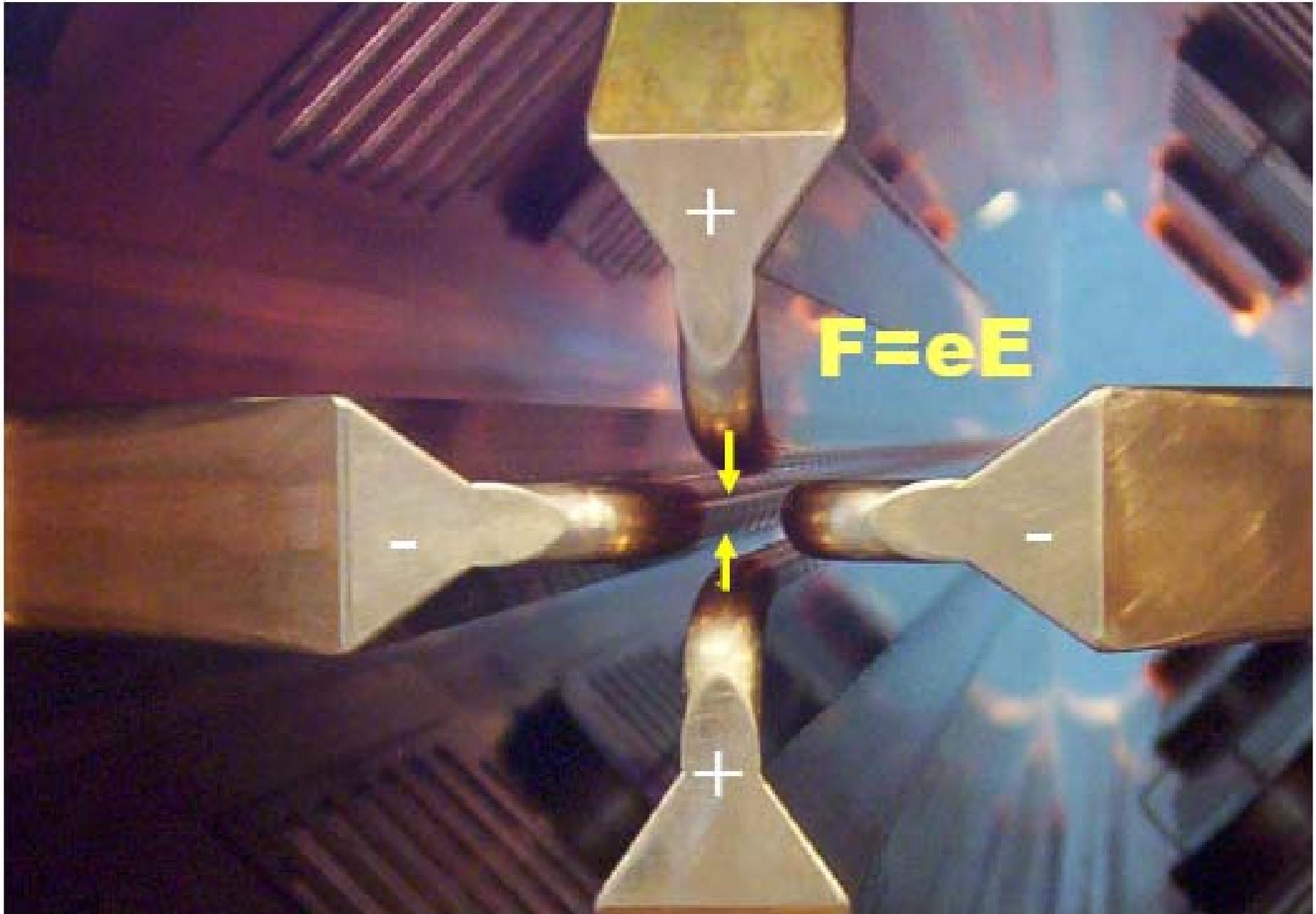


Magneti permanenti



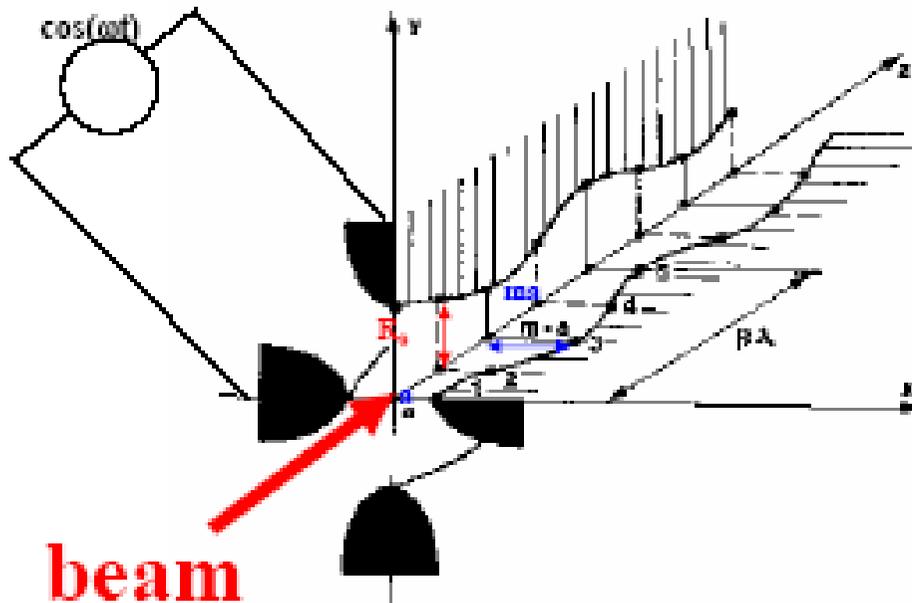
Primo esempio: TRASCO RFQ

Tutti i parametri di fascio sono in mano al progettista



Quadrupolo elettrico a radiofrequenza

Il campo elettrico alternato
Fornisce sia la focalizzazione che l'accelerazione.



$$\vec{E} = -grad[\Phi(x, y, z) \cos(\omega t)]$$

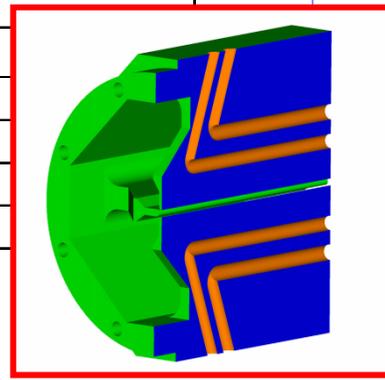
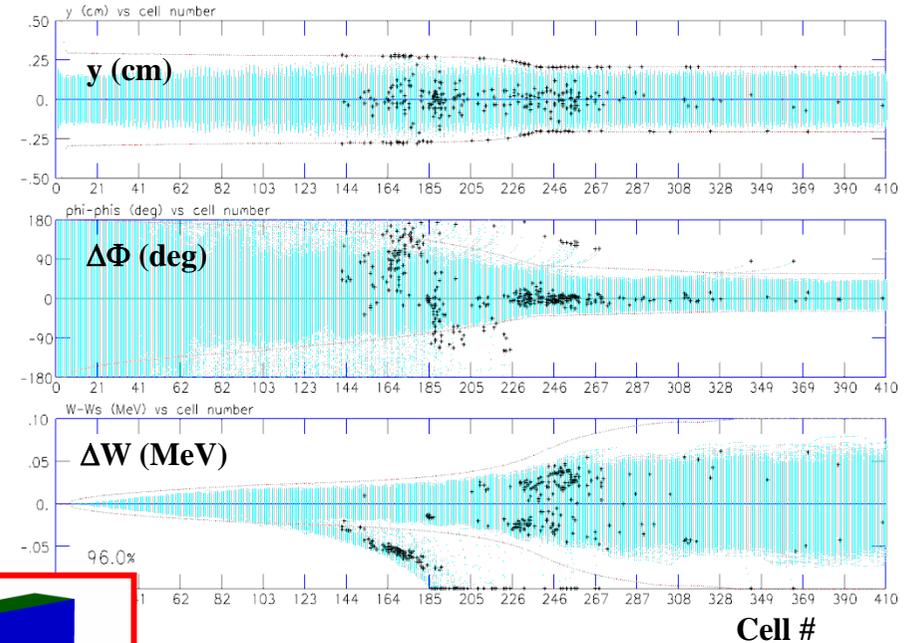
$$\Phi(x, y, z) \approx \frac{V}{2} \left[\frac{x^2 - y^2}{R_0^2} + \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \cos \frac{2\pi z}{\beta\lambda} \right]$$

R_0 apertura media e m (fattore di modulazione) rapporto fra apertura massima e apertura minima.

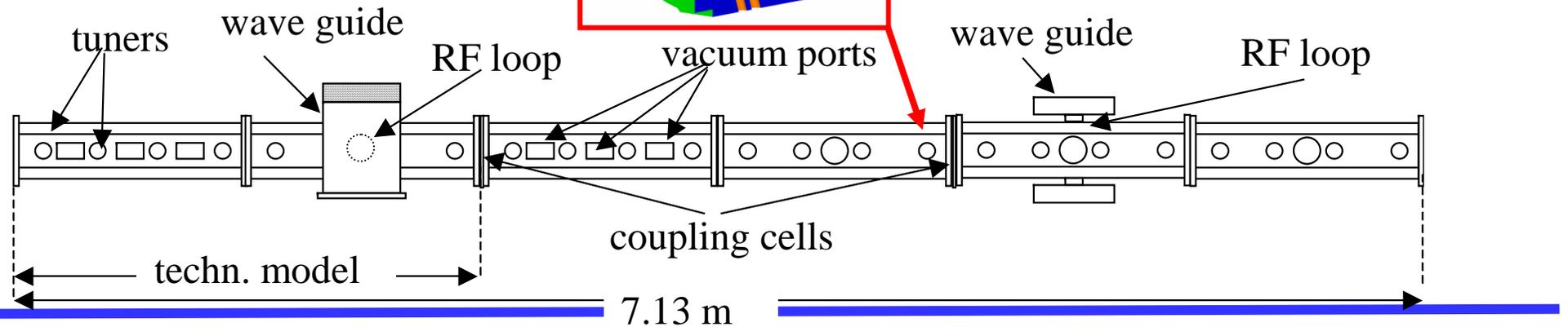
La determinazione cella per cella di apertura, fattore di modulazione m (campo accelerante ed energia sincrona (lunghezza $\beta\lambda$ della modulazione) consente di realizzare una dinamica adiabatica che cattura, impacchetta e accelera il fascio.

TRASCO RFQ (5 MeV, 30 mA)

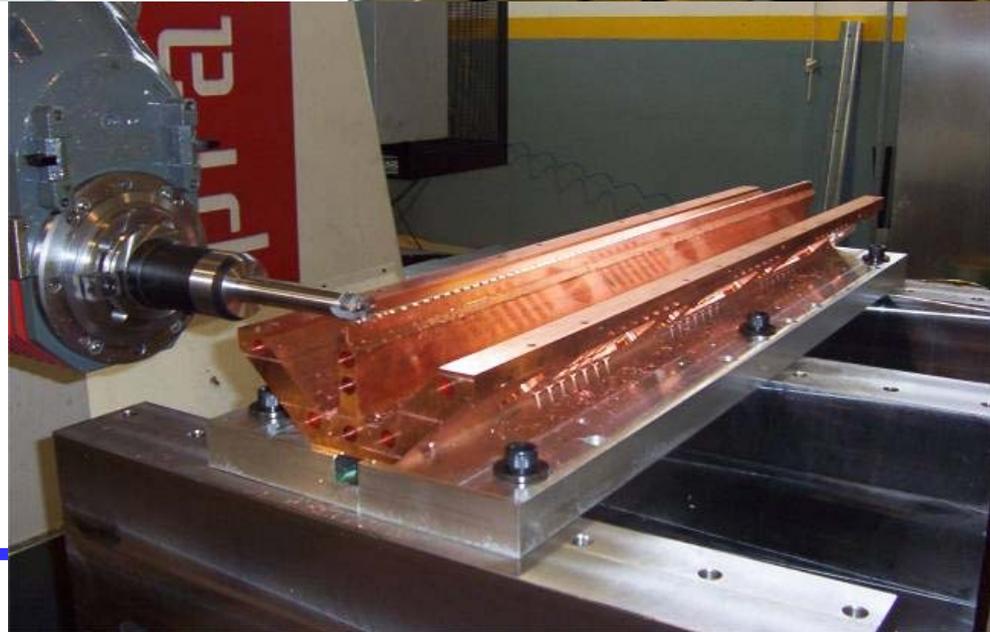
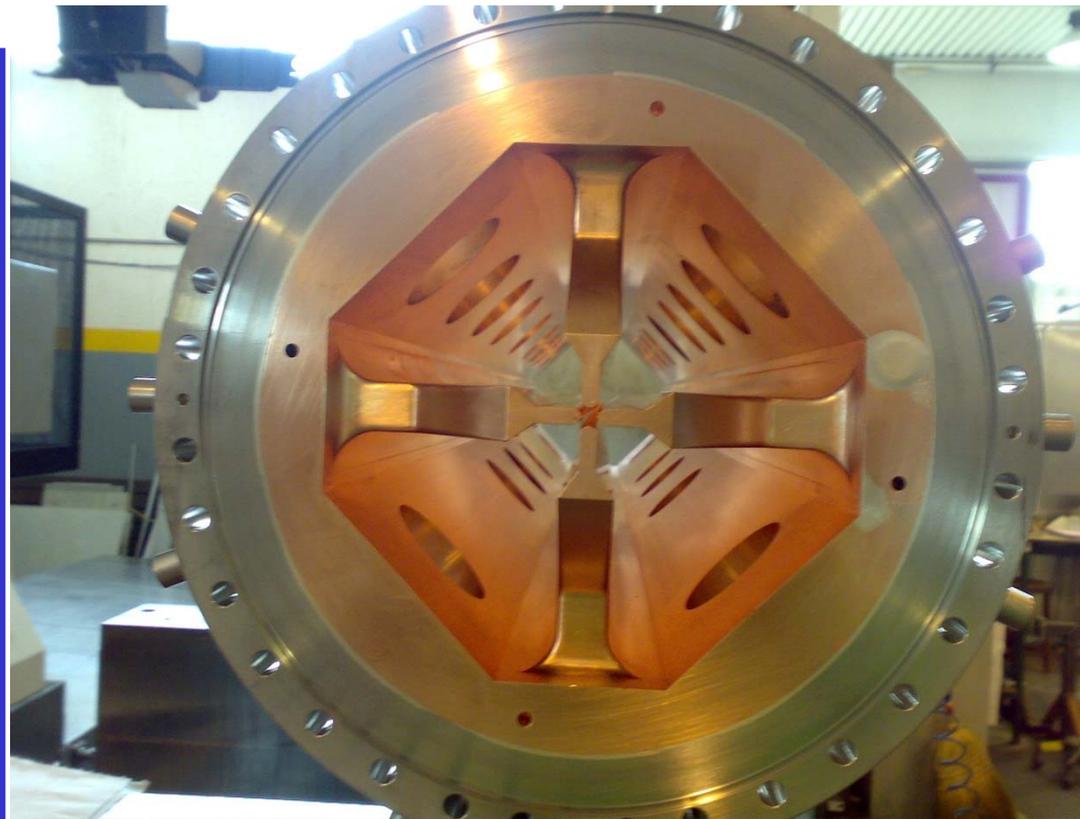
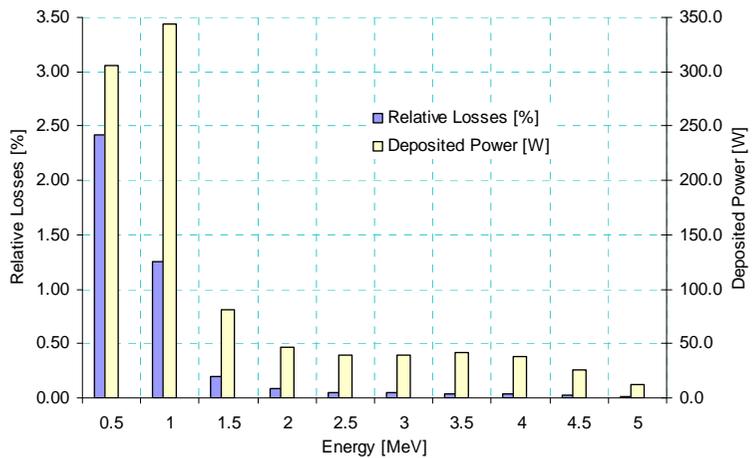
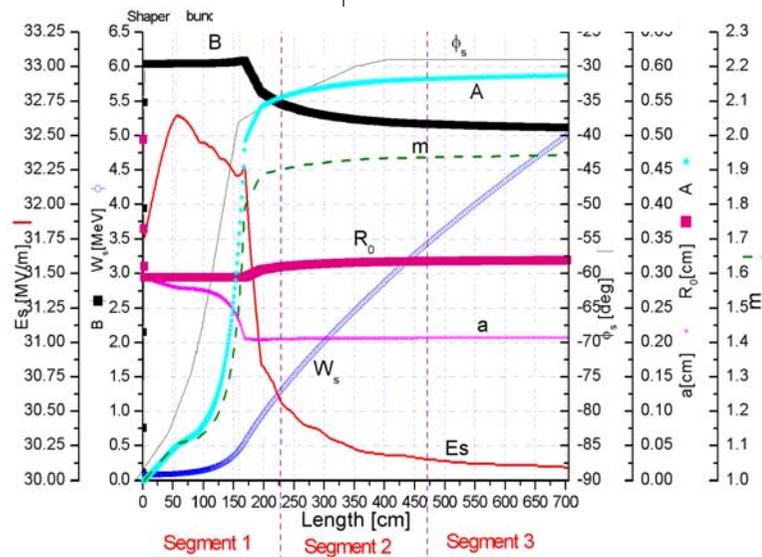
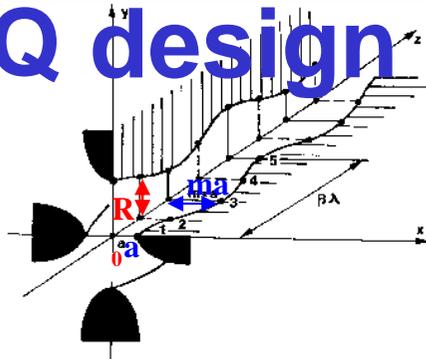
Energy range	0.08-5	MeV
Frequency	352.2	MHz
proton current	30	mA
Duty factor	100	%
Maximum surface field	33	MV/m (1.8 Kilp.)
Emittance T RMS in/out	0.2/0.2	mm mrad norm.
Emittance L RMS	0.18	MeV deg
RFQ length	7.13	m (8.4 λ)
Intervane Voltage	68	kV
Transmission	96	%
Modulation	1-1.94	
Average aperture R_0	0.29-0.32	cm
Synchronous phase	-90 \div -29	deg
Dissipated power SF*1.2	0.579	MW
Quality factor (SF/1.2)	8261	
Beam loading	0.1476	MW
RF power	0.726	MW



- Brazed OFE copper
- Tolerances about 20 μm



RFQ design



Terzo esempio: ALPI

Praticamente tutti i parametri di fascio sono in mano all'operatore

ALPI at INFN LEGNARO

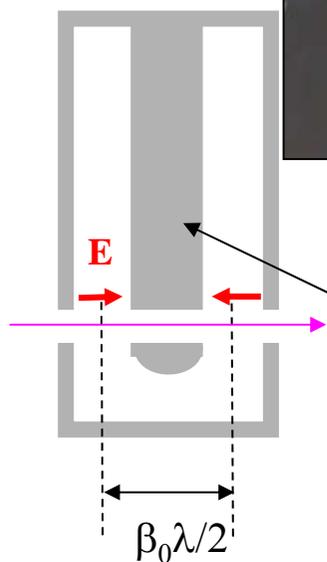


criostato



criostato

Quadrupoli magnetici



Cavità coassiale superconduttiva

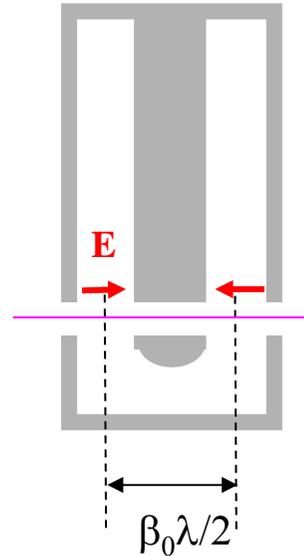
Acceleratore lineare per ioni pesanti (circa 10 MeV/u) basato su cavità superconduttive

Transit Time Factor TTF (cavità a 2-gaps)

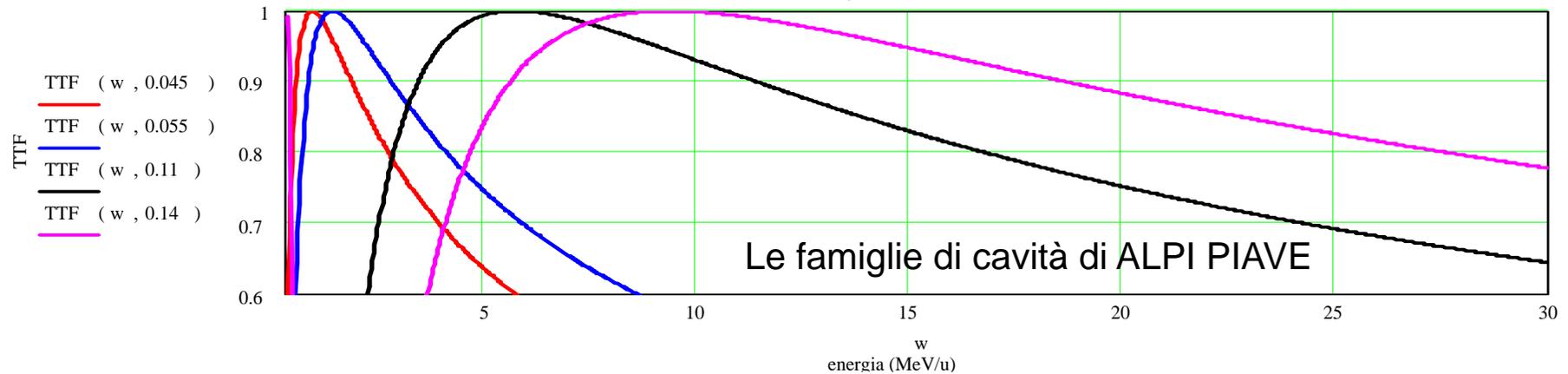
Il guadagno di energia per ogni cavità è pari a:

$$dw = qE\ell[TTF(w)]\cos\phi_s$$

Con $E=3-5$ MV/m, $\ell=0.18$ m

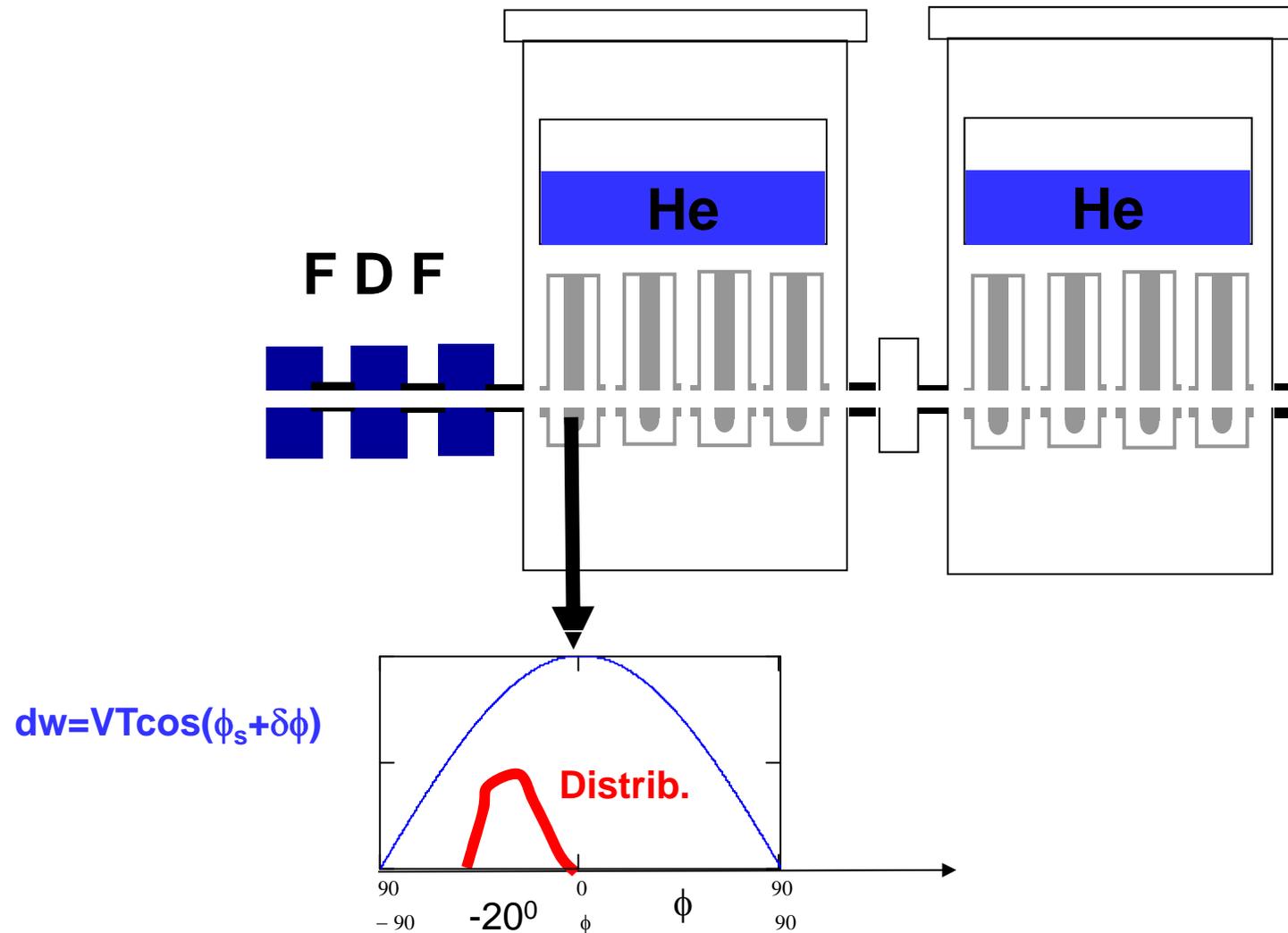


beta0	Es MV/m	present ALPI	Nb techn.
0.047	4	12	bulk
0.056	4	12	bulk
0.11	4.2	44	sputtered
0.13	4.2	8	sputtered

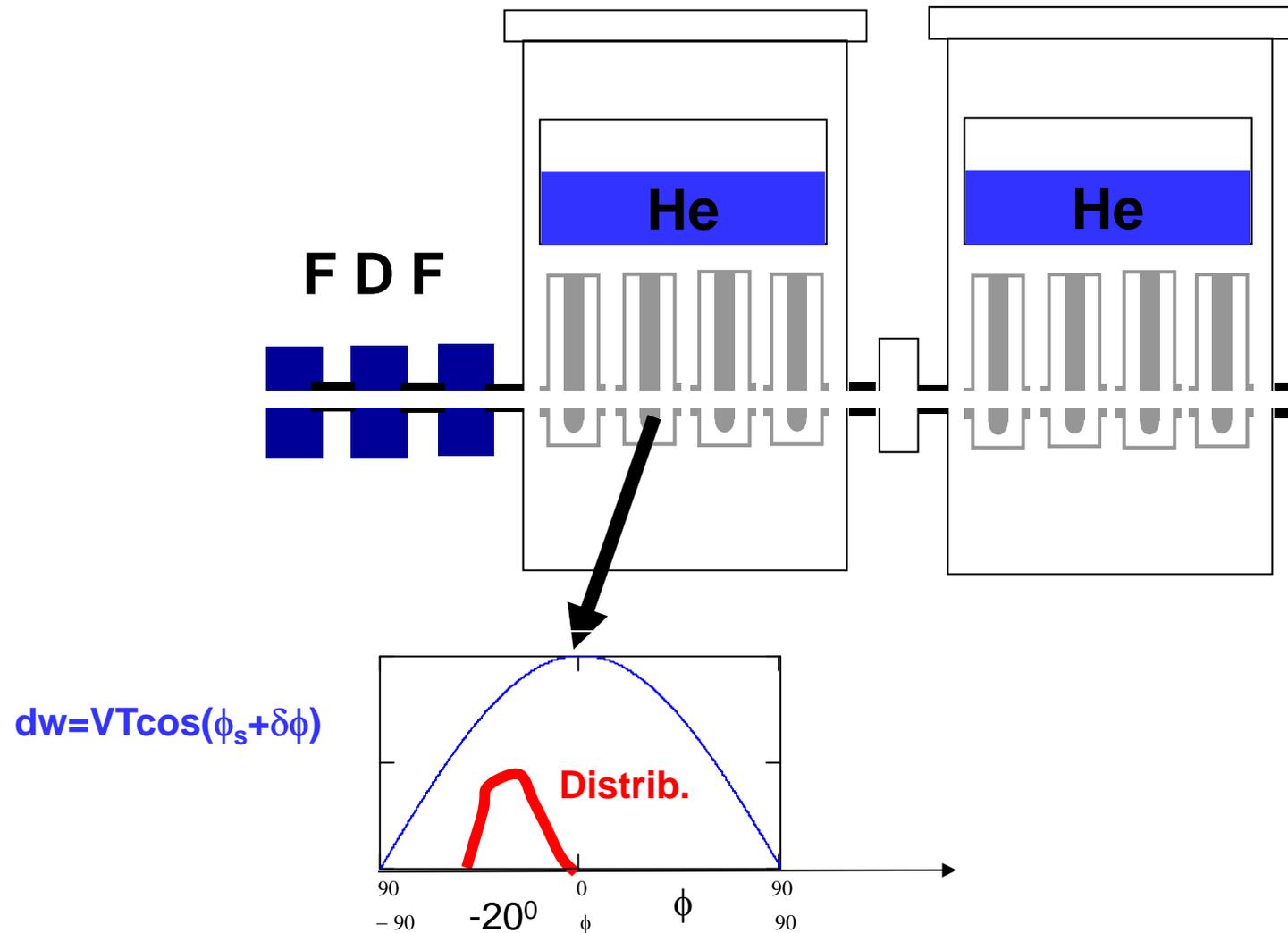


All'uscita degli RFQ $w=0.35$ MeV/u

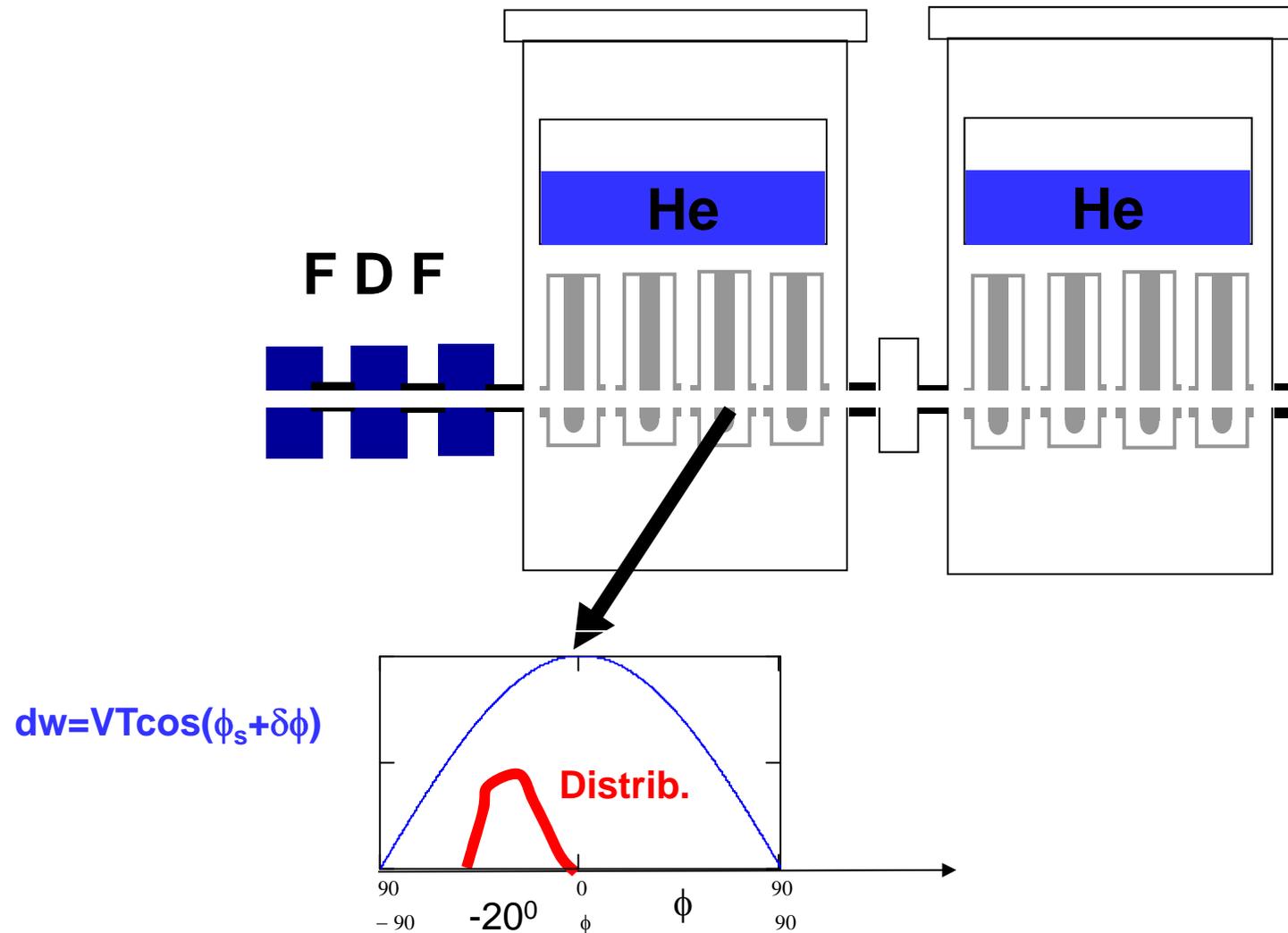
Il profilo di velocità in ALPI è dato dall'operatore per ogni fascio



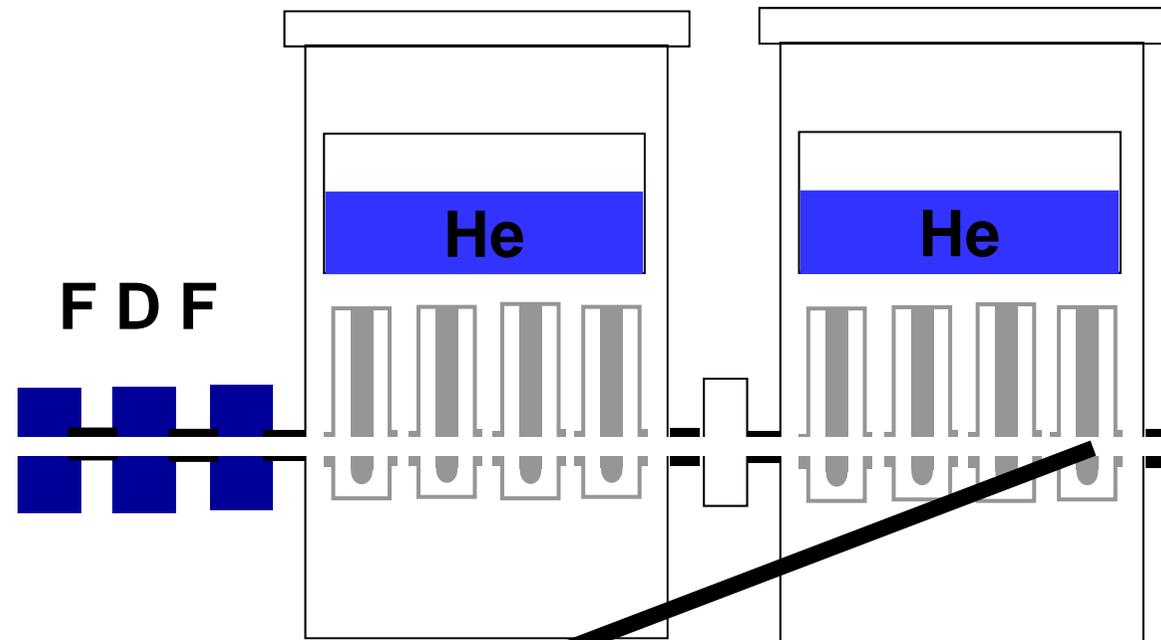
Il profilo di velocità in ALPI è dato dall'operatore per ogni fascio



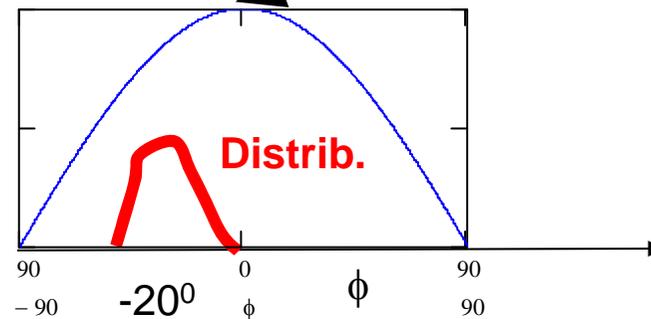
Il profilo di velocità in ALPI è dato dall'operatore per ogni fascio



Il profilo di velocità in ALPI è dato dall'operatore per ogni fascio

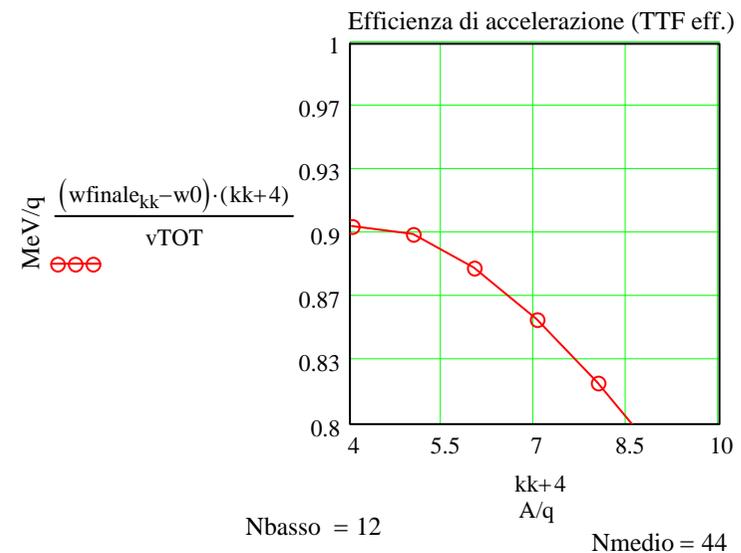
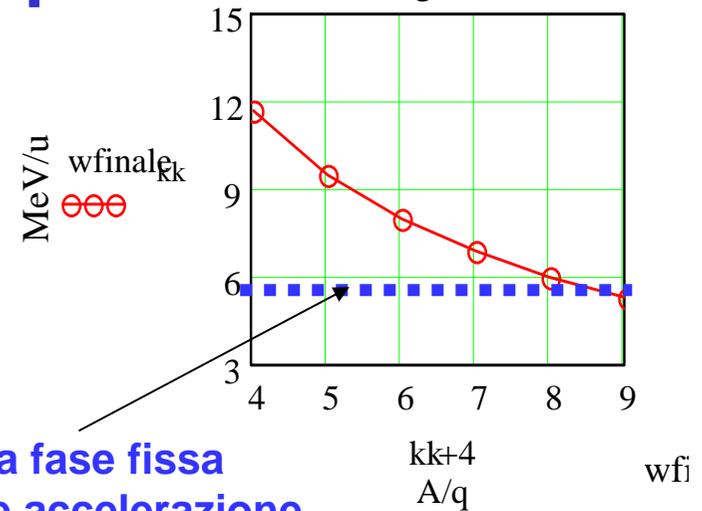


$$dw = VT \cos(\phi_s + \delta\phi)$$

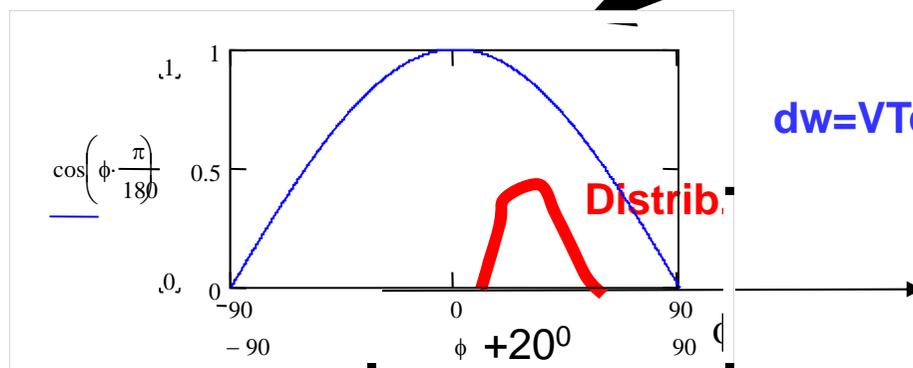
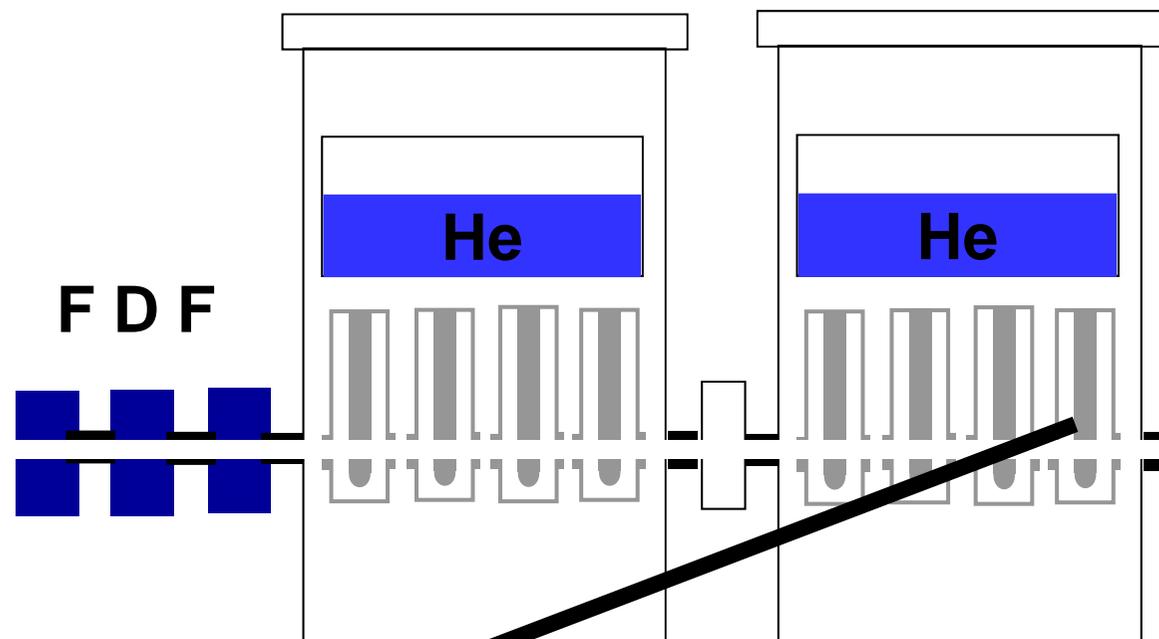


Utilizzo di cavità fasate indipendentemente

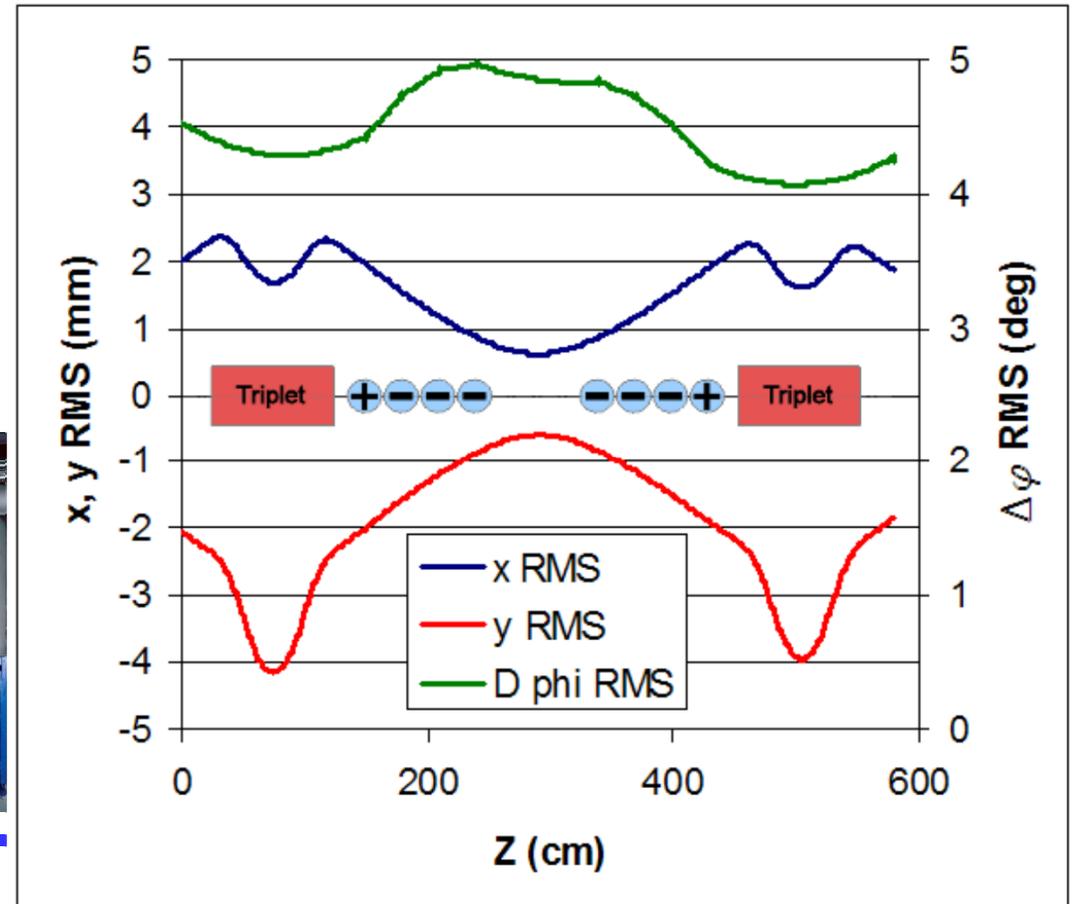
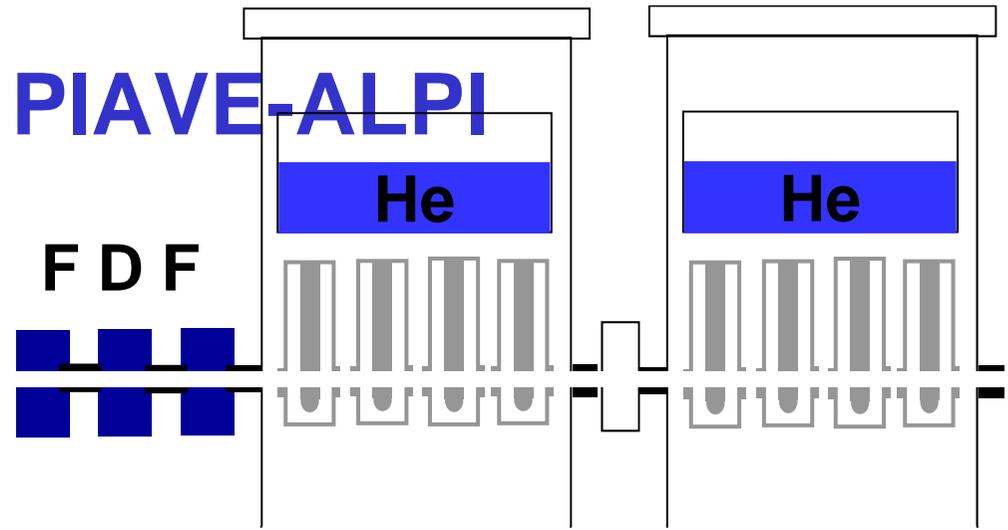
- Si può utilizzare l'intero campo accelerante per un ampio intervallo di A/q
- Si può far funzionare il linac anche nel caso di mancato funzionamento (o riduzione di prestazioni) di una cavità o di un criostato.
- Questo secondo punto è essenziale per ottenere la dovuta affidabilità in un sistema complesso, con una ventina di criostati, più di 50 sistemi RF indipendenti.....



ATTENZIONE: per trasportare correttamente il fascio in PIAVE ALPI qualche volta $\phi_s = +20^\circ$



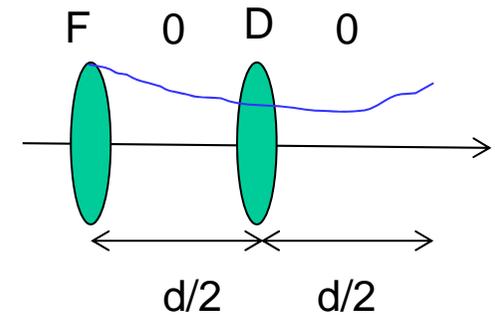
ACCELERATION IN PIAVE-ALPI



Dimensioni del fascio, luminosità

Un esempio una cella FODO

$$M = \begin{bmatrix} 1 & d/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{d}{2f} - \frac{d^2}{4f^2} & d + \frac{d^2}{4f} \\ -\frac{d}{f^2} & 1 + \frac{d}{2f} \end{bmatrix}$$



- Dal criterio di stabilità

$$\cos \mu = 1 - 2 \sin^2 \frac{\mu}{2} = 1 - \frac{d^2}{8f^2} \Rightarrow \sin \frac{\mu}{2} = \frac{d}{4f}$$

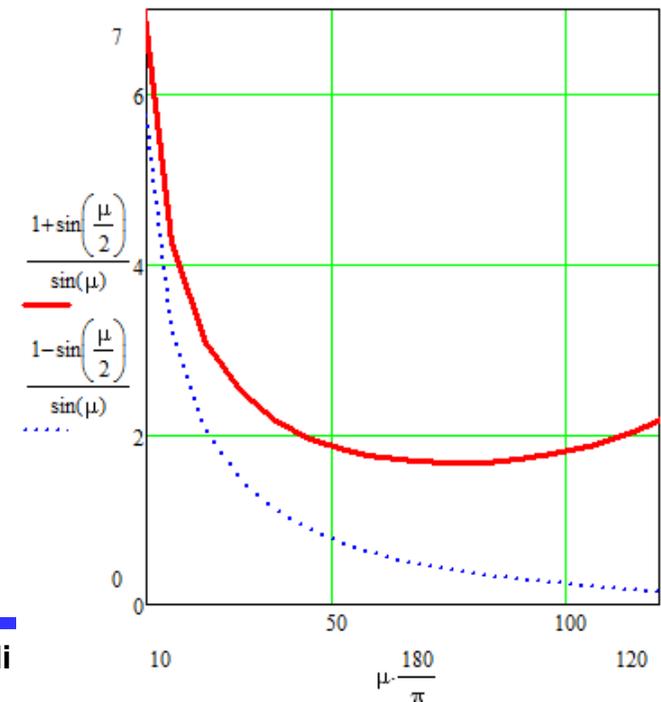
- Identificando con la matrice in forma normale

$$M = \begin{bmatrix} \cos \mu + \alpha \sin \mu & \beta \sin \mu \\ -\frac{1 + \alpha^2}{\beta} \sin \mu & \cos \mu - \alpha \sin \mu \end{bmatrix}$$

Otteniamo per la funzione di betatrone

$$\beta \sin \mu = 1 + \frac{d^2}{4f^2} = d \left[1 + \sin \frac{\mu}{2} \right]$$

$$\beta_{\pm} = d \frac{1 \pm \sin \frac{\mu}{2}}{\sin \mu}$$

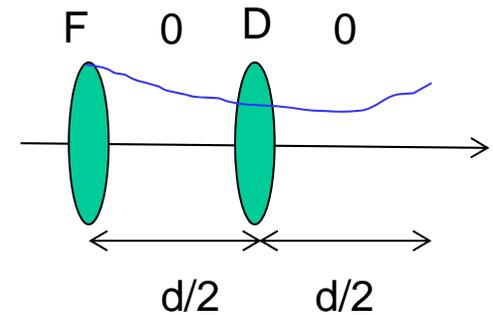


Dimensioni del fascio in un anello

(esempio una cella FODO)

$$\beta \sin \mu = 1 + \frac{d^2}{4 f^2} = d \left[1 + \sin \frac{\mu}{2} \right]$$

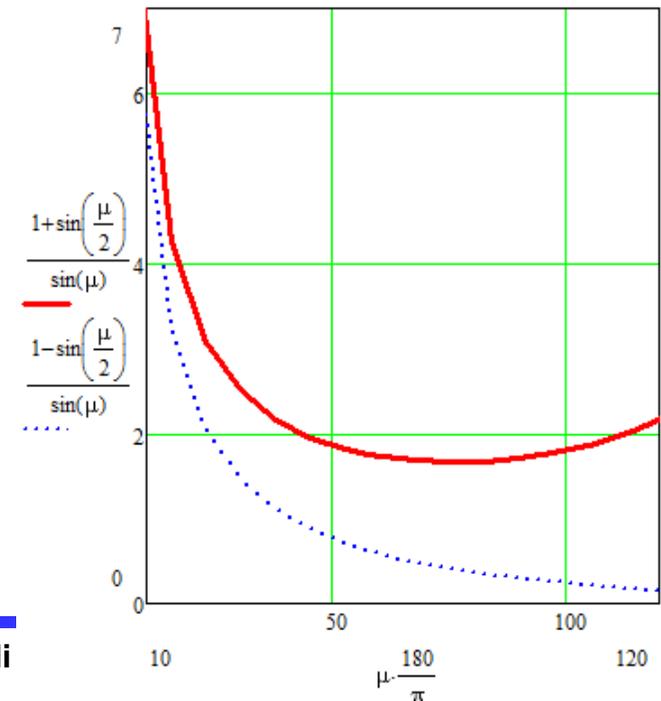
$$\beta_{\pm} = d \frac{1 \pm \sin \frac{\mu}{2}}{\sin \mu}$$



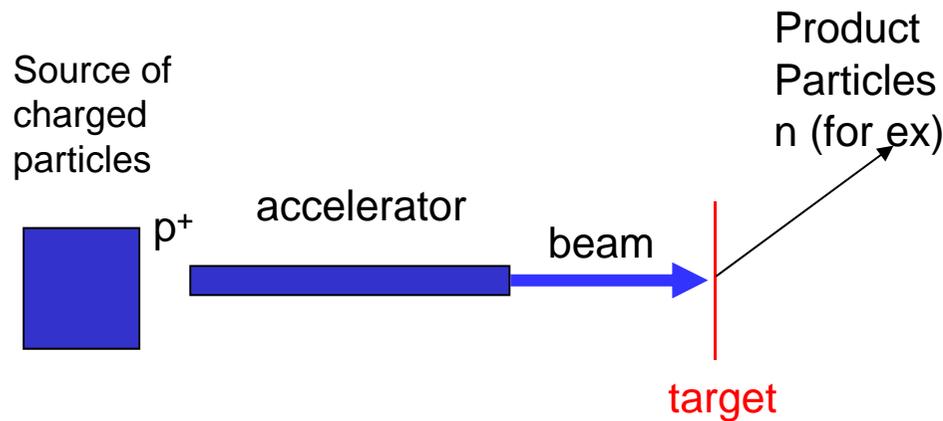
- Dimensione massima del fascio

$$y = \sqrt{\beta_y \varepsilon_y} \approx \sqrt{\frac{2 C}{N_{\text{celleFODO}}} \frac{\varepsilon_N}{\beta \gamma}}$$

- Emittanza normalizzata dell'ordine 1-10 mmmrad
- Lunghezza del periodo dell'ordine dei 10 m
- Dimensioni trasverse del Fascio dell'ordine del cm/sqrt($\beta\gamma$)



Luminosità per esperimento con target fisso sottile



- Luminosità (termine fra parentesi quadra) è definita come il rapporto tra eventi e sezione d'urto.
- Ha le dimensioni di un'area diviso un tempo.
- per bersaglio fisso è pari al prodotto della corrente di fascio per lo spessore del target (non dipende dalle dimensioni del fascio)

$$\frac{dN_e}{dt} = \sigma \left[\frac{N_d}{S} \frac{dN_i}{dt} \right]$$

Cross section Beam current
Target thickness

$\frac{N_d}{S} = \frac{N_{Avogadro}}{A} \text{density} [g/cm^2]$ $N_{Avogadro} = 6 * 10^{23} [g^{-1}]$	$\frac{dN_i}{dt} = \frac{I_{beam}}{e}$ $e = 1.6 * 10^{-19} \text{ Amp}$
--	---

Per esempio 1 microA di protoni su 1 microg/cm² di oro
 Corrisponde ad una luminosità di $2 \cdot 10^{28} \text{ 1/cm}^2/\text{s}$

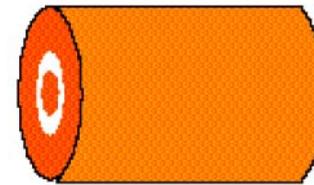
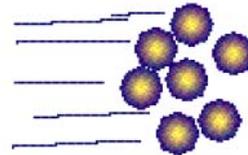
Acceleratori ad alta energia: i collisionatori

- L'utilizzo di un collisionatore, dove l'urto avviene fra le particelle di due fasci (di energia W) che si propagano in direzione opposta, rispetto all'uso di un fascio di particelle di pari intensità (accelerato sino ad energia $2W$) fatto collidere su di un bersaglio fisso, consente di aumentare l'energia cinetica nel sistema del centro di massa della reazione.

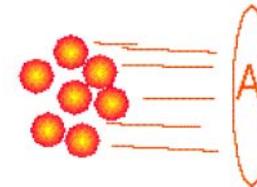
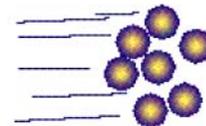
W = Energy available in center-of-mass for making new particles

For **fixed target** :

$$E_{c.m.} \cong \sqrt{2m_T E_B}$$



$$E_{c.m.} \cong 2 E_B$$



Problem: Smaller probability that accelerated particles collide "Luminosity" of a collider

$$L = N_1 N_2 \frac{1}{A} \frac{\beta c}{2\pi R} \approx 10^{29} \dots 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$L \approx \frac{N_{\text{protoni}}^2}{\epsilon_{Nx} \beta_x} f_{\text{collisione}}$$

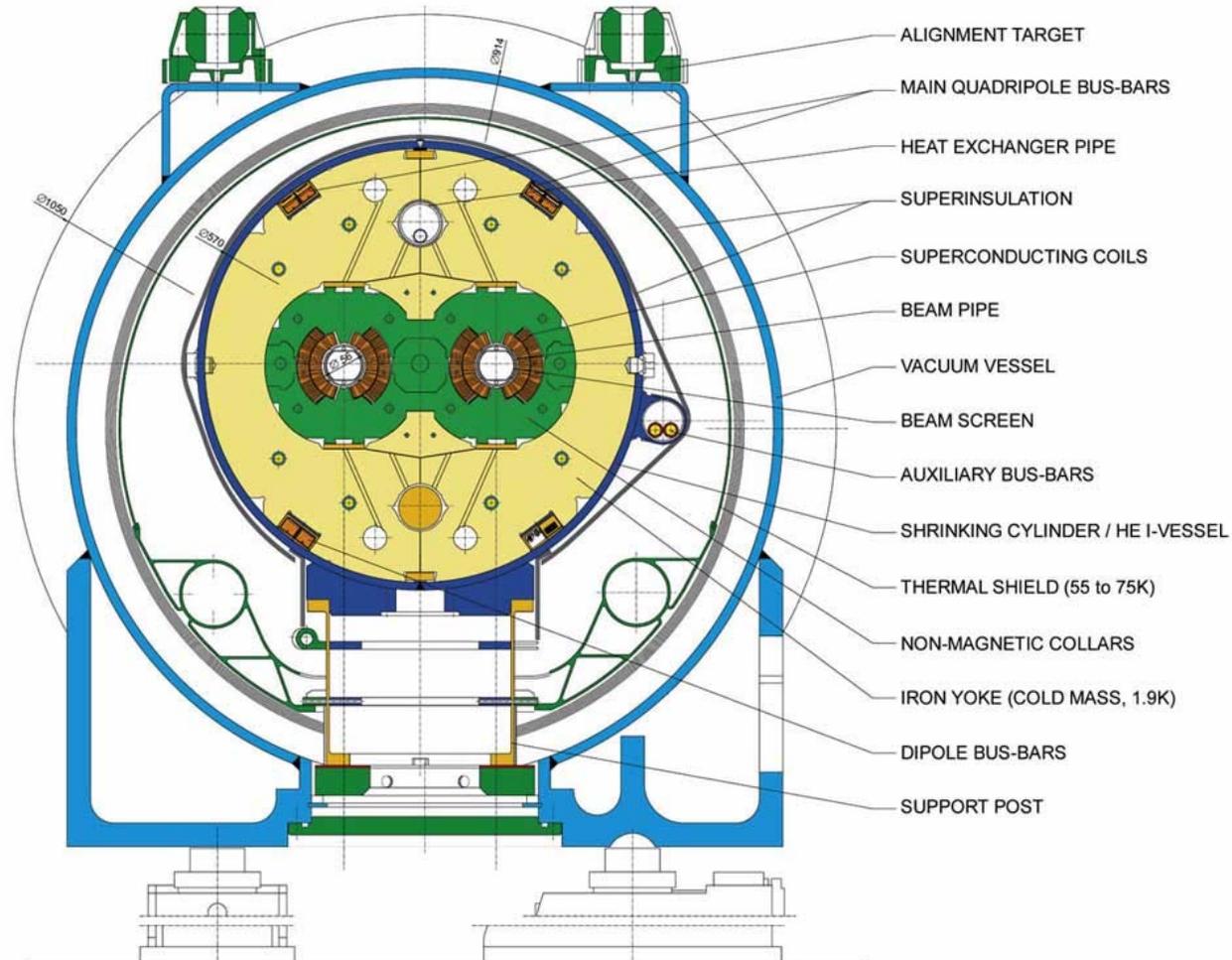
Il Large Hadron Collider circonferenza tunnel 27 km



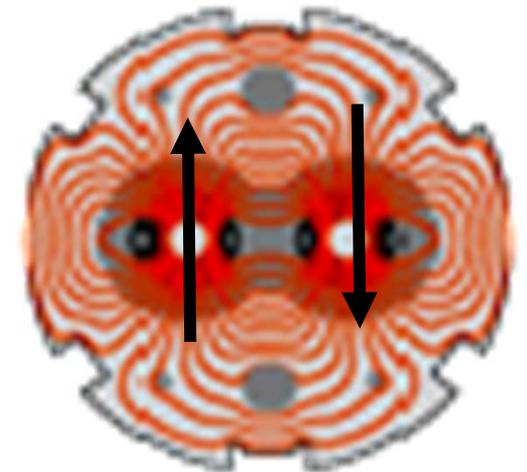
Parametri principali del collisionatore 7+7 TeV ($7 \cdot 10^{12}$ eV, $B=8$ T, $\rho=2.9$ km)

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/DI/MM - HE107 - 30 04 1999



- Linee del campo magnetico (dipolare opposto nelle due camere di fascio)



Parametri principali del collisionatore 7+7 TeV

Table 2.1: LHC beam parameters relevant for the peak luminosity

		Injection	Collision
Beam Data			
Proton energy	[GeV]	450	7000
Relativistic gamma		479.6	7461
Number of particles per bunch		1.15×10^{11}	
Number of bunches		2808	
Longitudinal emittance (4σ)	[eVs]	1.0	2.5 ^a
Transverse normalized emittance	[$\mu\text{m rad}$]	3.5 ^b	3.75
Circulating beam current	[A]	0.582	
Stored energy per beam	[MJ]	23.3	362
Peak Luminosity Related Data			
RMS bunch length ^c	cm	11.24	7.55
RMS beam size at the IP1 and IP5 ^d	μm	375.2	16.7
RMS beam size at the IP2 and IP8 ^e	μm	279.6	70.9
Geometric luminosity reduction factor F^f		-	0.836
Peak luminosity in IP1 and IP5	[$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]	-	1.0×10^{34}
Peak luminosity per bunch crossing in IP1 and IP5	[$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]	-	3.56×10^{30}

$$L \approx \frac{N^2_{\text{protoni}}}{\epsilon_{Nx} \beta_x} f_{\text{collisione}}$$

$$f_{\text{collisione}} = n_{\text{bunch}} c / C$$

$$\beta_x \approx 0.55 \text{m}$$

$$\frac{(1.15 \cdot 10^{11})^2 \cdot 2808 \cdot 3 \cdot 10^8}{.55 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 27 \cdot 10^3} = 1.876 \times 10^{33}$$

La formula della luminosità è approssimata, da cui la sottostima di un fattore 5

^a The base line machine operation assumes that the longitudinal emittance is deliberately blown up at the middle of the ramp in order to reduce the intra beam scattering growth rates.

^b The emittance at injection energy refers to the emittance delivered to the LHC by the SPS without any increase due to injection errors and optics mis-match. The RMS beam sizes at injection assume the nominal emittance value quoted for top energy (including emittance blowup due to injection oscillations and mismatch).

^c Dimensions are given for Gaussian distributions. The real beam will not follow a Gaussian distribution but more realistic distributions do not allow analytic estimates for the IBS growth rates.

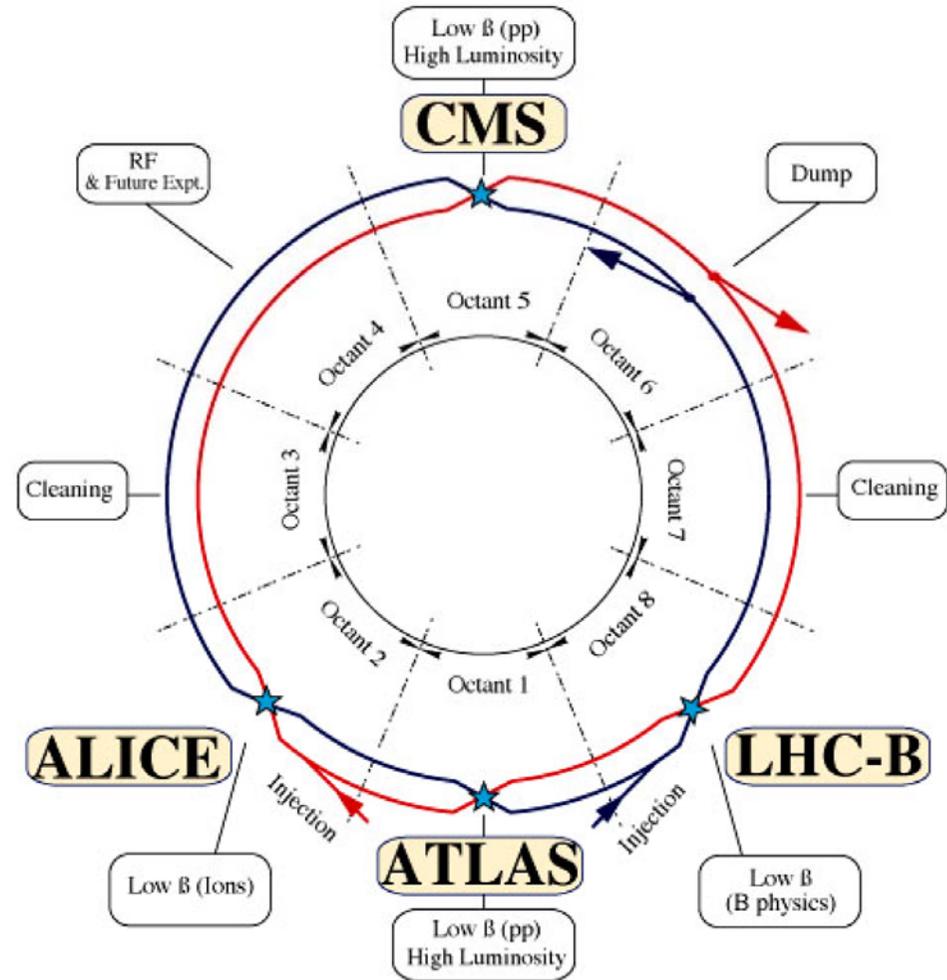
^d The RMS beam sizes in IP1 and IP5 assume a β -function of 0.55 m.

^e The RMS beam sizes in IP2 and IP8 assume a β -function of 10 m.

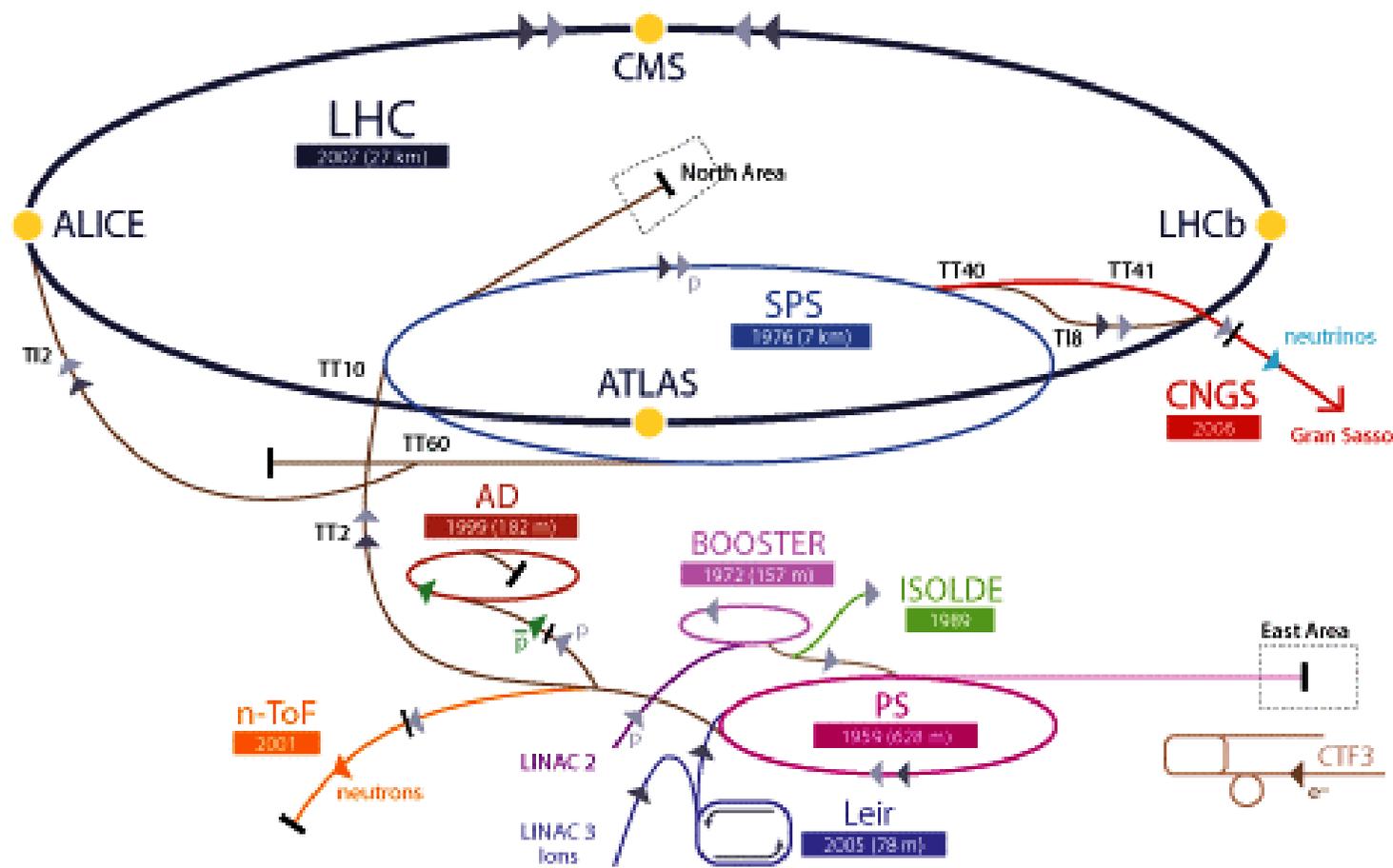
^f The geometric luminosity reduction factor depends on the total crossing angle at the IP (see Sec. 3.1.1). The quoted number in Table 2.1 assumes a total crossing angle of 285 μrad as it is used in IR1 and IR5.



Large Hadron Collider
CERN
Geneva



CERN Accelerator Complex

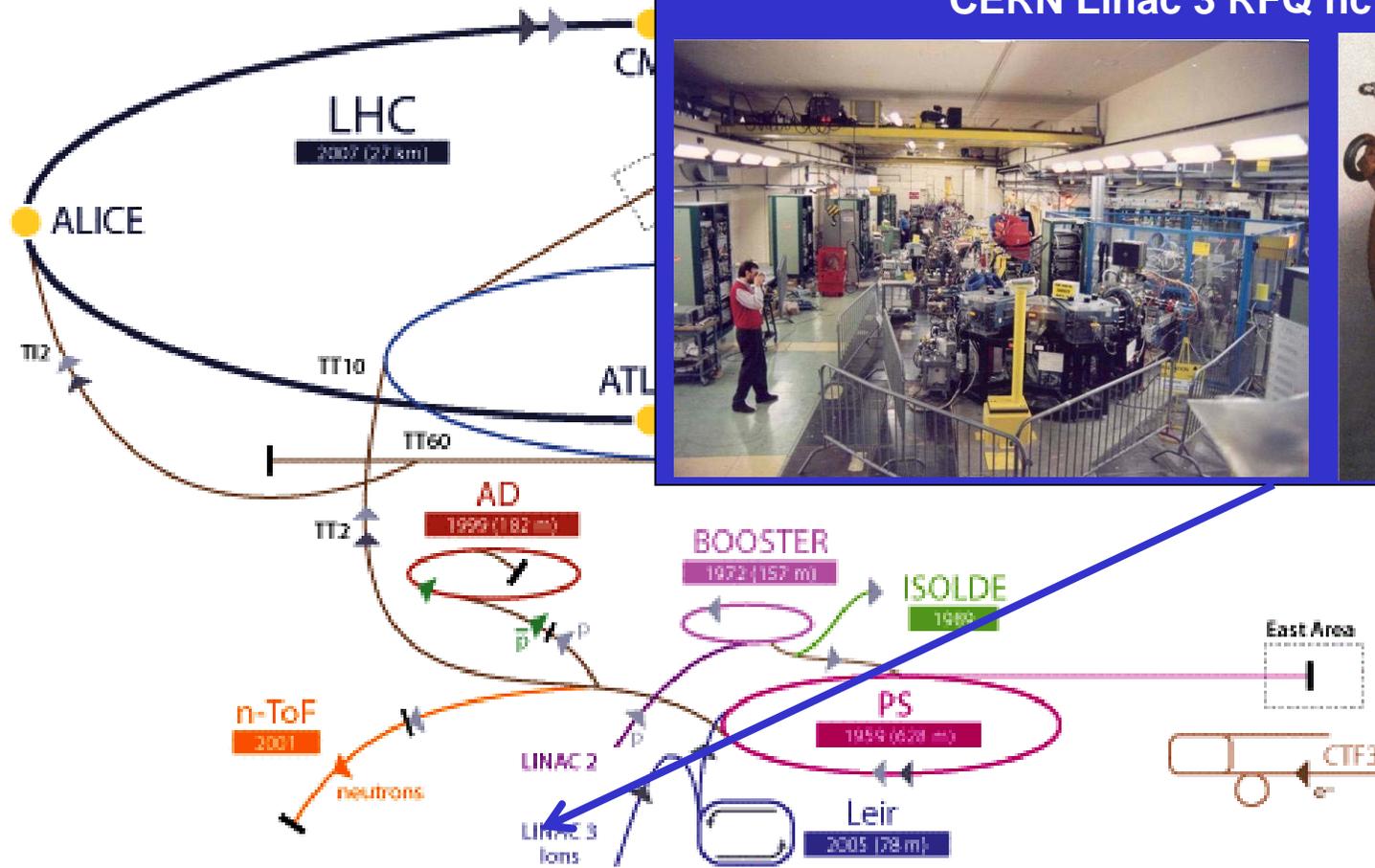


▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ▶ neutrinos ▶ electron
 ⇄⇄⇄ proton/antiproton conversion

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

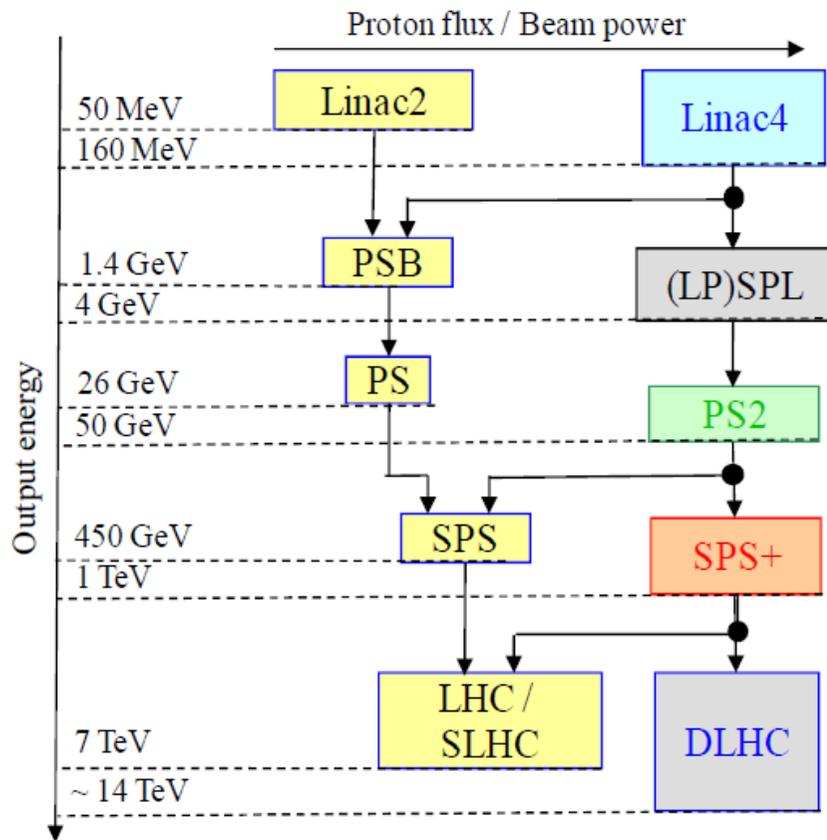
CERN Accelerator Complex

CERN Linac 3 RFQ nc 250 keV/u A/q=8



- ▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ▶ neutrinos ▶ electron
- ↔↔↔ proton/antiproton conversion

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



Per ciascun anello l'energia massima è determinata dal campo magnetico e dalla circonferenza, l'energia minima determina la necessaria apertura dei magneti (il fascio ha dimensioni proporzionali a

$$(\beta\gamma)^{-1/2}$$

Inoltre per evitare le risonanze non lineari deve essere tenuto minore di 0.2 la diminuzione del tune dovuta alla carica spaziale

$$\Delta Q \propto \frac{N_{protoni}}{\epsilon_{Nx} \beta \gamma^2}$$

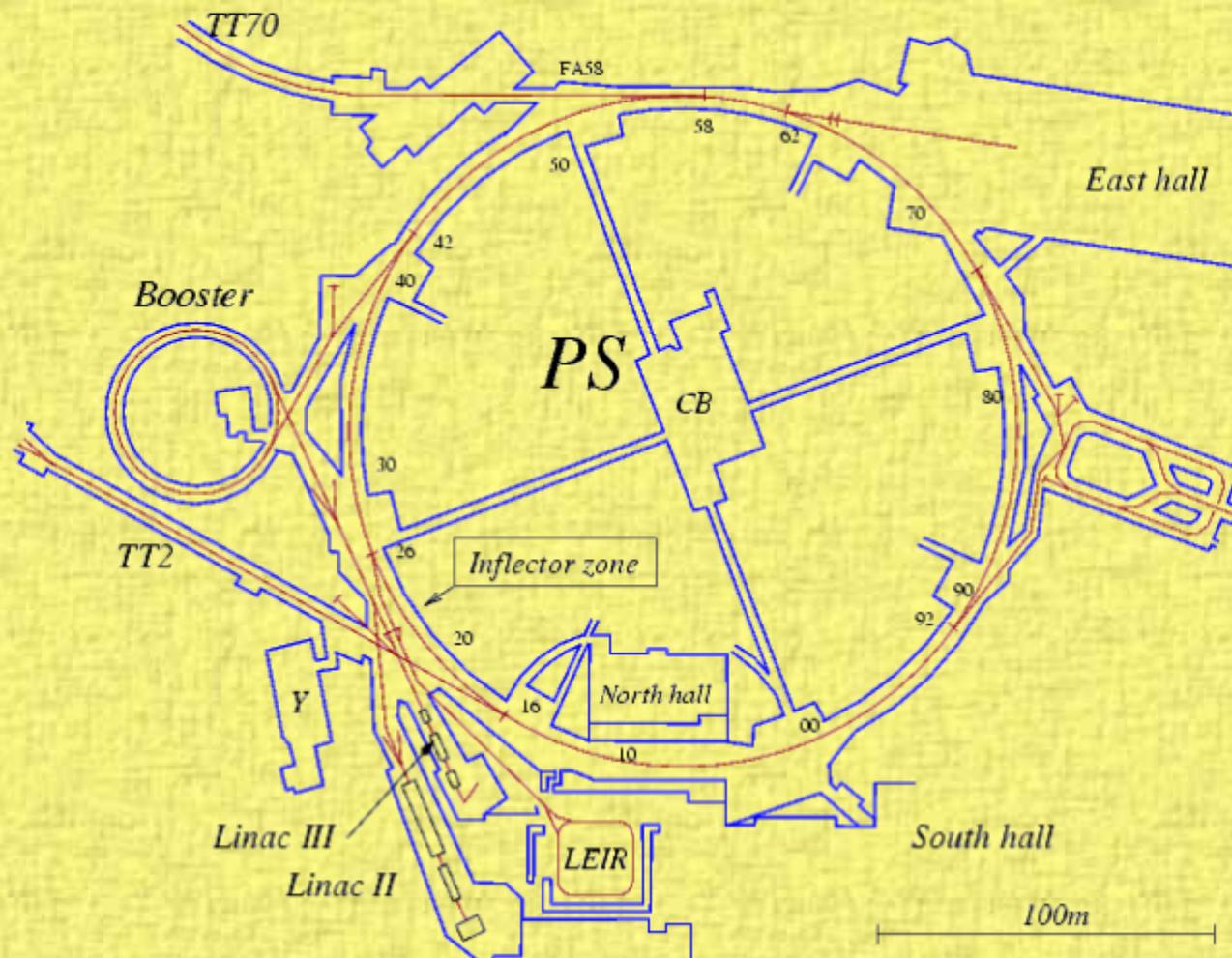
Questo limita il numero di particelle accumulabili in un anello secondo
Rispetto all'energia di iniezione

$$\beta\gamma^2$$

Accelerator	Energy GeV	circomfer km	gamma	beta	Brho T-m	Brho/R	space charge 1/beta*gamma^2	relative to input	emitt beta*gamma	beam dimensions	relative to input
Linac2	0.05		1.05	0.32	1.03		2.8593	none	0.33	0.58	-
PSB	1.4	0.157	2.50	0.92	7.13	0.29	0.1742	16.4097	2.29	1.51	2.63
PS	26	0.678	28.90	1.00	89.72	0.83	0.0012	145.4151	28.88	5.37	3.55
SPS	450	7	483.83	1.00	1503.10	1.35	0.0000	280.5073	483.83	22.00	4.09
LHC	7000	27	7511.73	1.00	23336.44	5.43	0.0000	241.0408	7511.73	86.67	3.94

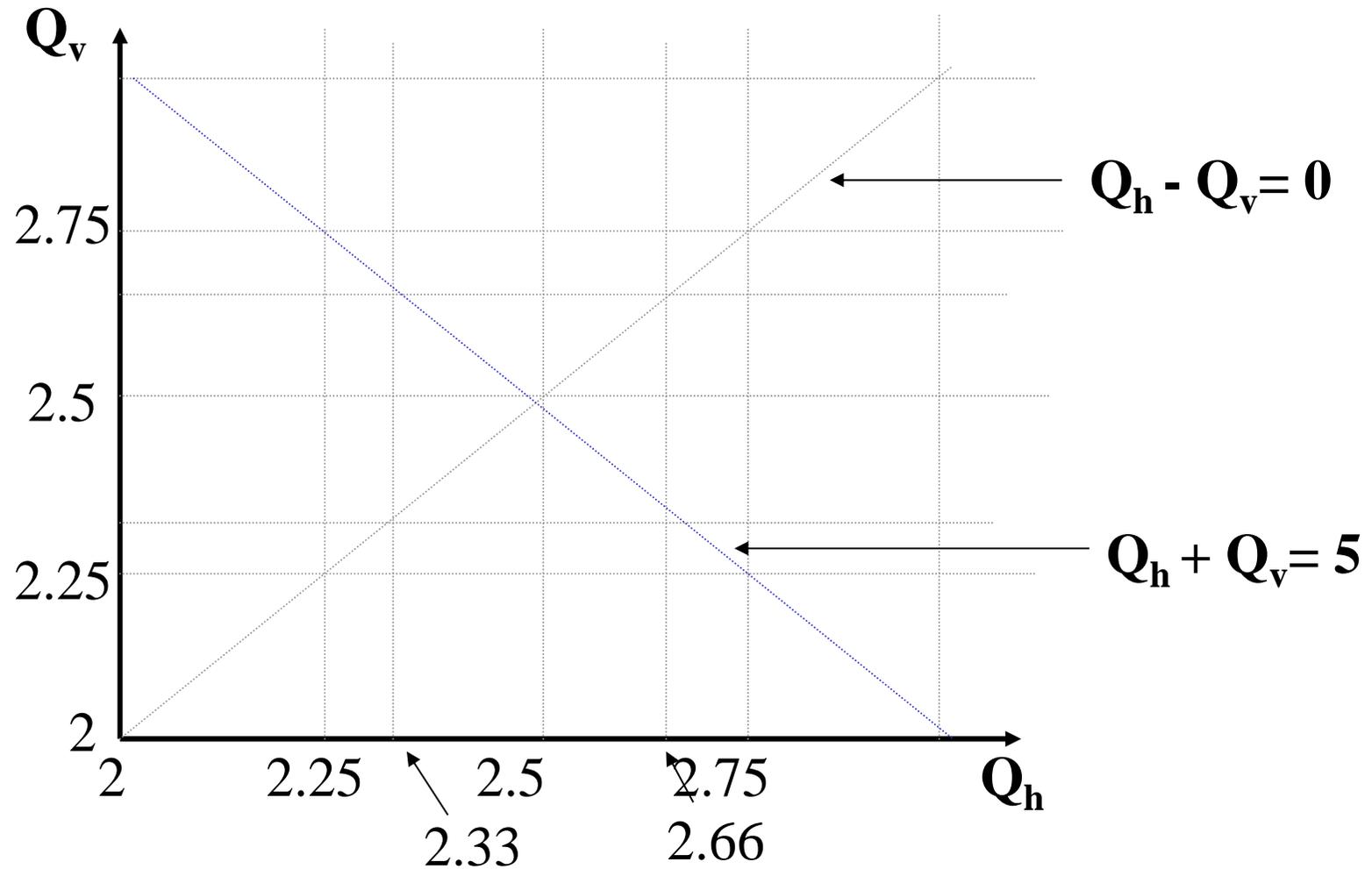


Proton Synchrotron Straight Section Pictures

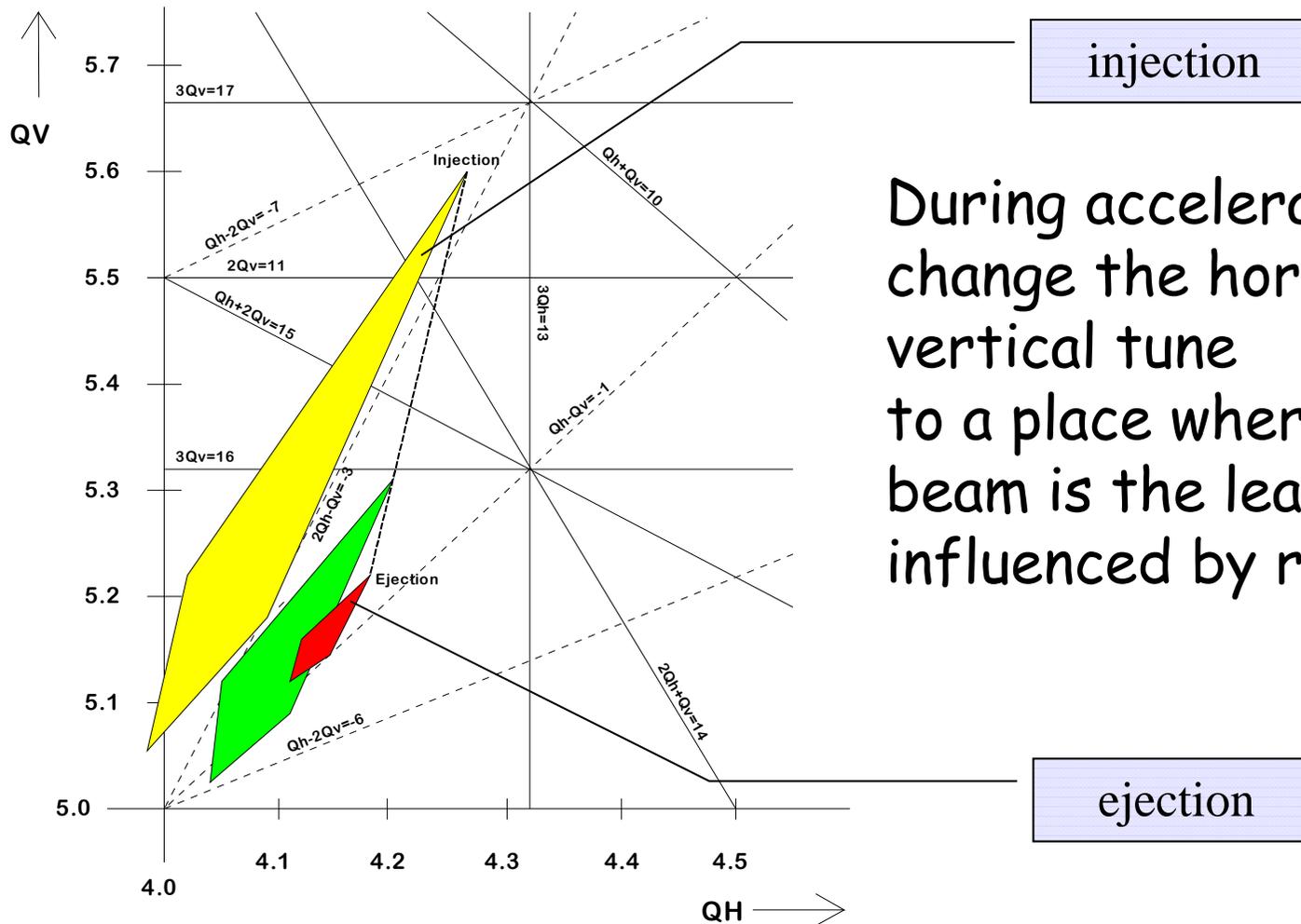


This is a clickable image. Please also try the [schematic view](#) of the PS and let me know what you think.

General tune diagram



P.S. Booster tune diagram



During acceleration we change the horizontal and vertical tune to a place where the beam is the least influenced by resonances.

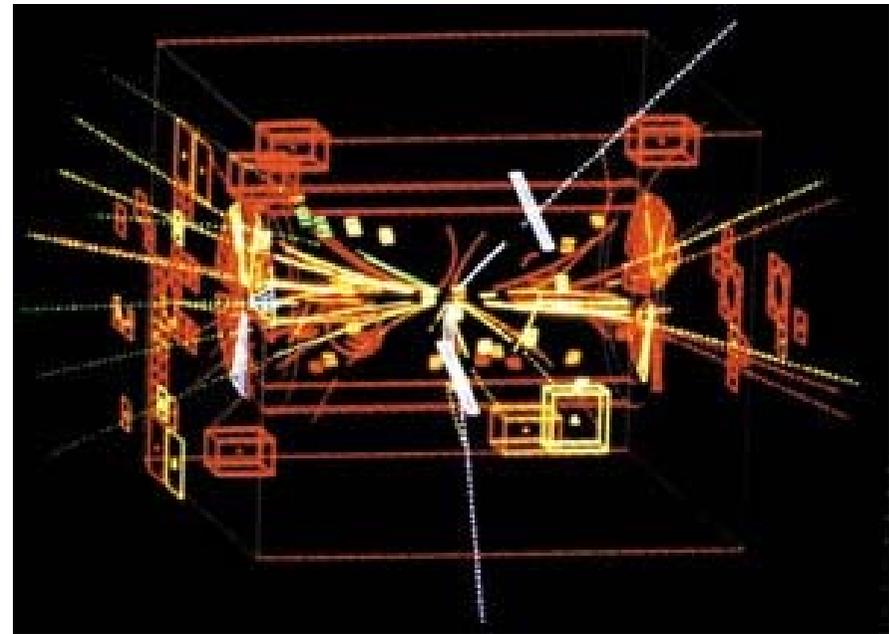
Acceleratori per particelle esotiche

- Gli acceleratori consentono inoltre di accumulare, manipolare ed utilizzare per esperimenti particelle “esotiche”, con vite medie molto brevi e tali da non potere essere utilizzate in per un esperimento tradizionale (come per la preparazione di un target)
- esempi
 - Il collisionatore p p-bar del CERN e la scoperta della Z_0
 - La produzione di fasci di ioni radioattivi con il metodo ISOL

La scoperta della Z_0



Carlo Rubbia Simon van der Meer
The Nobel Prize in Physics 1984
"for their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles W and Z , communicators of weak interaction"

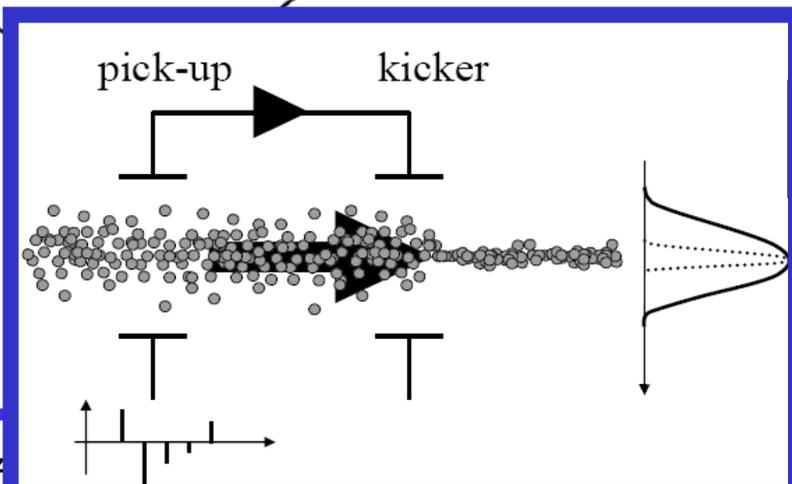
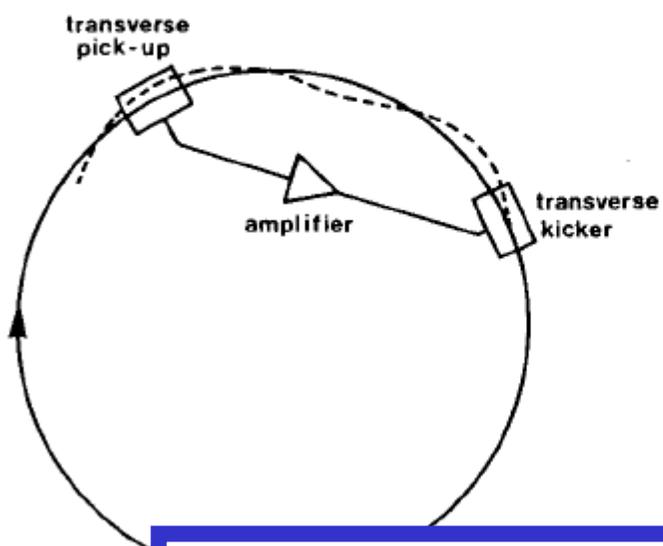


The decay of a W particle in the UA1 detector, showing the track of the high-energy electron towards the bottom. The yellow arrow marks the direction of the missing transverse energy and hence the path of the unseen neutrino

Accumulazione e raffreddamento di un fascio di antiprotoni

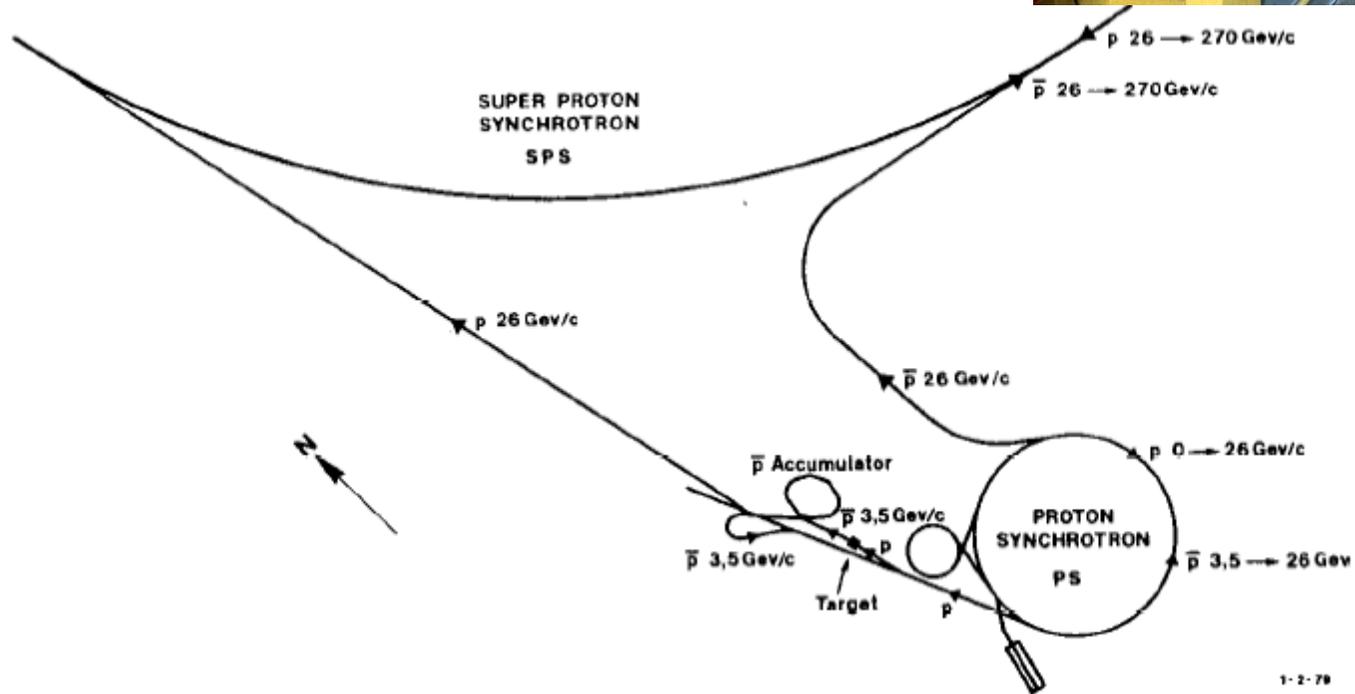
S. van der Meer

293

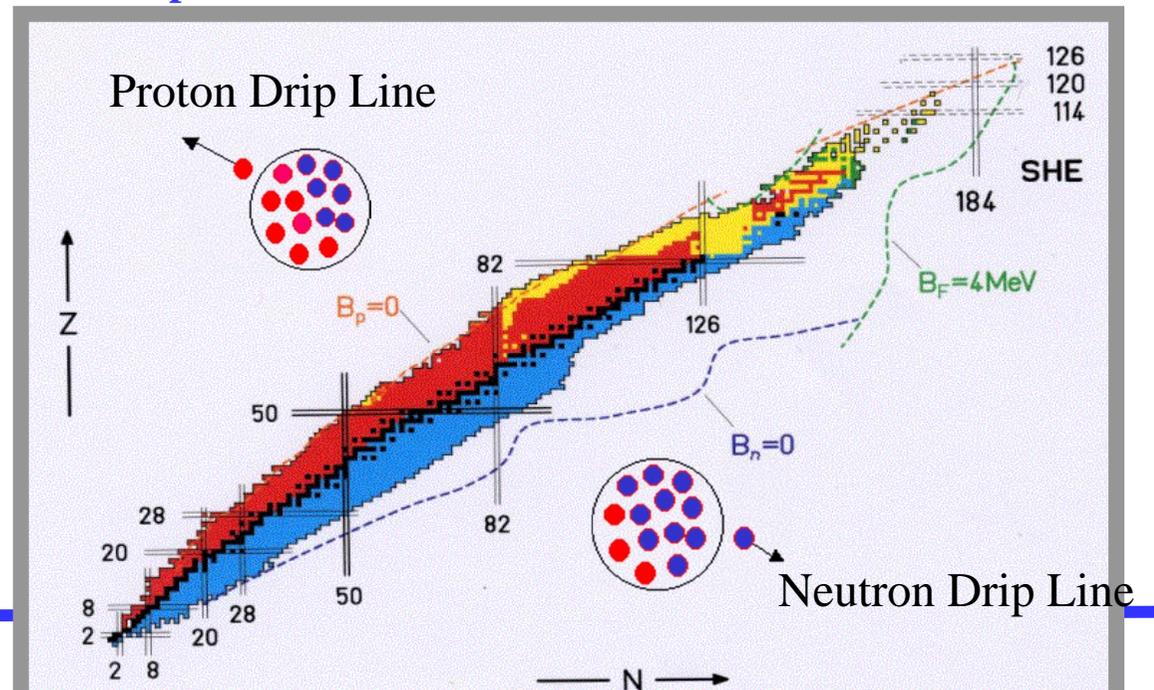
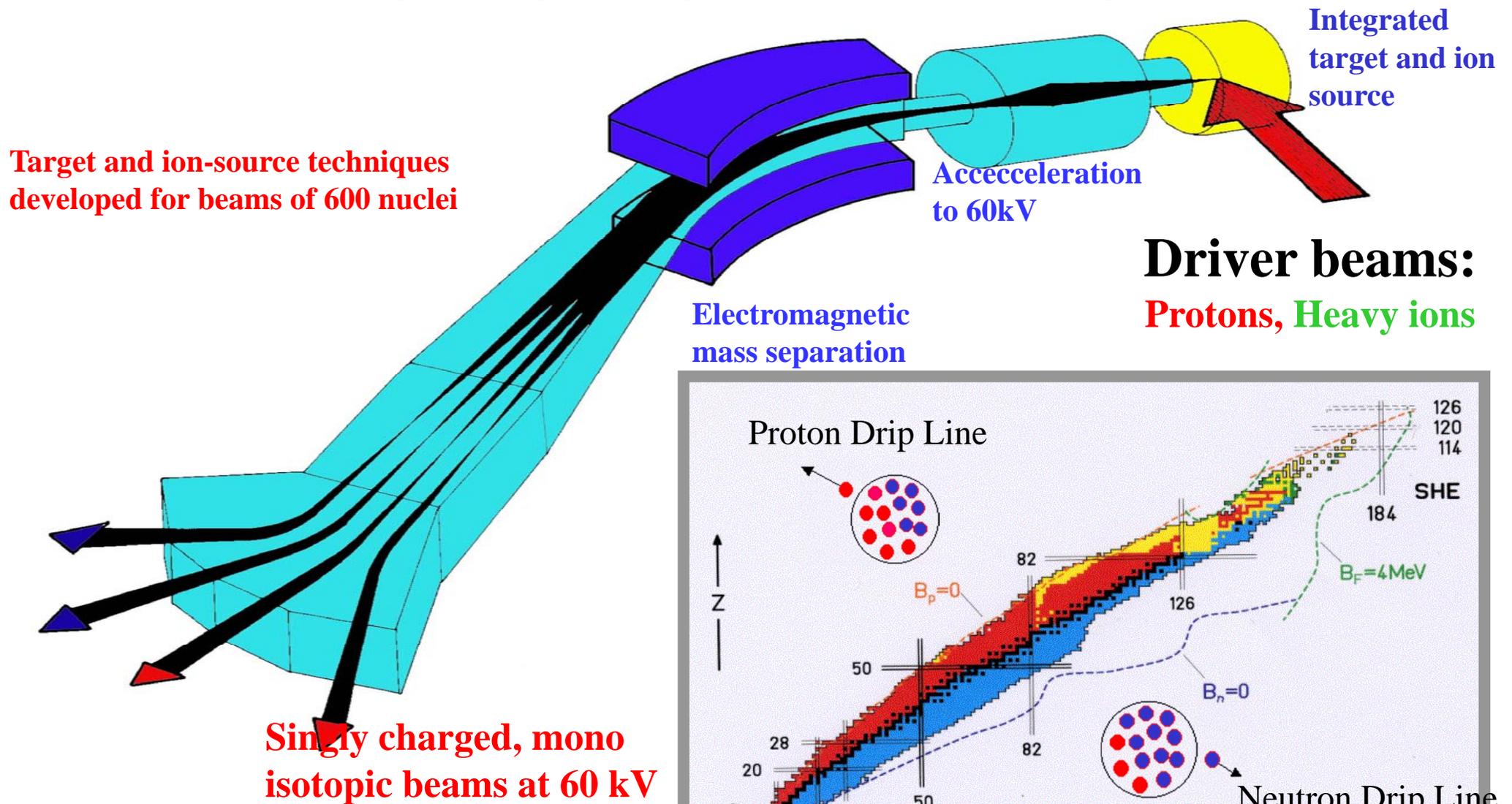


The Antiproton Accumulator, seen here in October 1980, was essential for providing the antiproton beam in the SPS

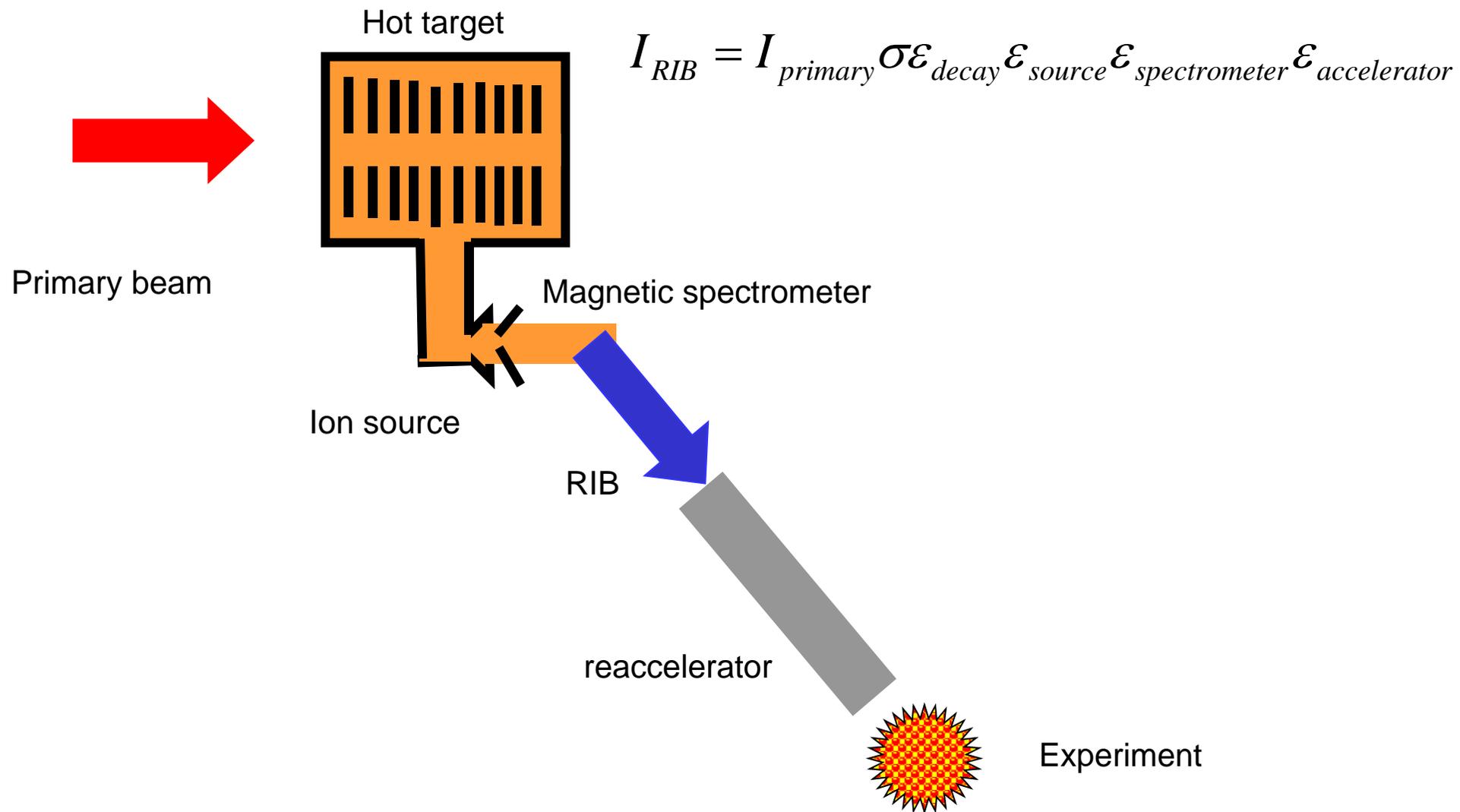
- I due fasci di protoni e antiprotoni venivano accelerati nell'SPS sino a circa 270 GeV/c



Acceleratori per ioni radioattivi: il metodo ISOL (Isotope Separator On-Line)



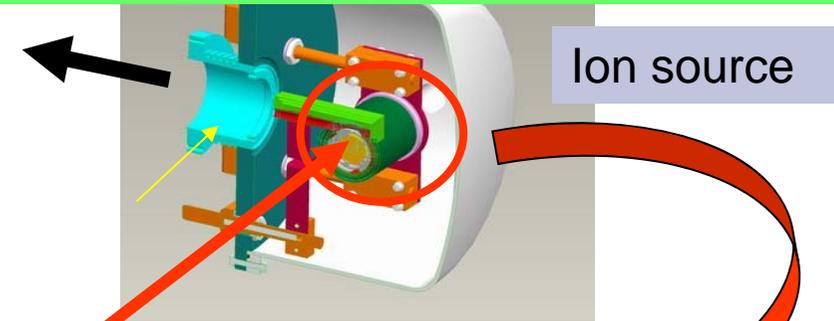
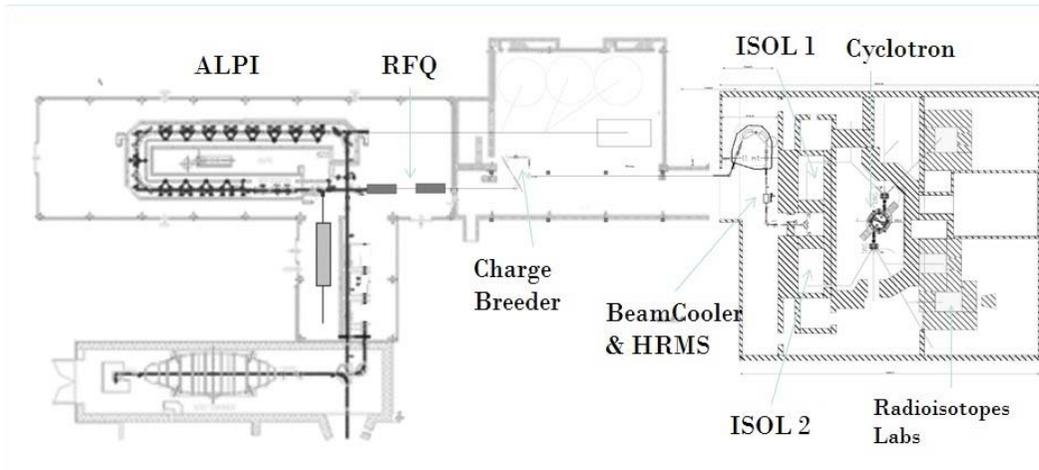
Scheme of principle of an ISOL facility



SPES project at LNL

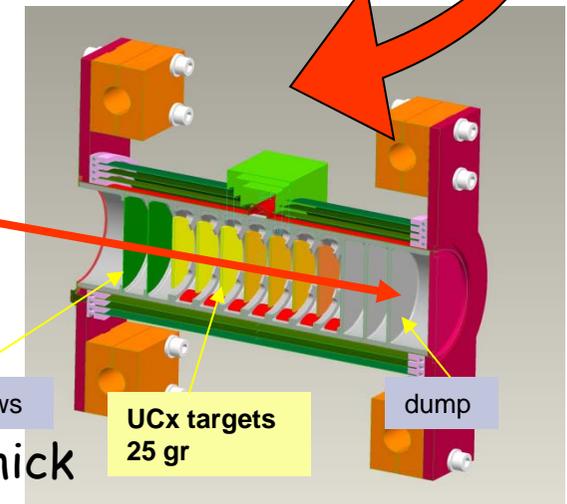


Fission efficiency \rightarrow 100p per 1.5 FF
 $\sim 200 \mu\text{A} \rightarrow 10^{13}$ fissions/sec
 Beam power = 40 MeV p \times 200 μA = 8 KW



Proton beam

40 MeV
200 μA
protons



© 7 UCx SLICES ($\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$) diameter 4cm about 1.3 mm thick each (radiative cooling) Power density in UCx = 140W/gr

© DUMP (slowing down protons with low fission cross section and high power density)

Conclusioni

- Gli acceleratori moderni si basano su
 - accelerazione RF (salvo gli elettrostatici)
 - stabilità di fase (salvo gli isocroni)
 - gradiente alternato (salvo quelli basati su focalizzazione debole)
 - Ad alta energia diviene indispensabile l'utilizzo di collisionatori
- Le forme e le tecnologie impiegate possono essere molto diverse per le varie applicazioni, ma i principi sono gli stessi.
- Fra queste tecnologie particolarmente importante è la superconduttività (sia per i magneti che per le cavità RF)
- Il progresso della fisica degli acceleratori (la comprensione dei fenomeni coinvolti nel funzionamento degli acceleratori e la possibilità di simularli in maniera affidabile) è uno dei punti chiave del successo degli ultimi anni ed è indispensabile per gli sviluppi futuri (vedi ad esempio il calcolo delle perdite di fascio nei nuovi acceleratori ad alta intensità).