

# Pospeševalniki in transport nabitih delcev

**Samo Stanič**

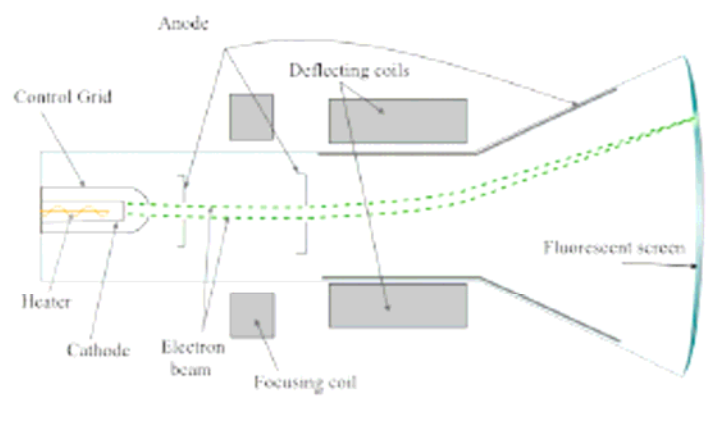
Univerza v Novi Gorici



## Zakaj potrebujemo pospeševalnike?

Z visokoenergijskimi delci lahko:

- Preučujemo strukturo snovi na submikronskem nivoju
- Preučujemo fiziko osnovnih delcev in interakcij med njimi
- Pospeševalnike lahko uporabljamo kot izvore svetlobe za kristalografski študij strukture snovi (ELETTRA...)
- Enostavni pospeševalnike srečamo v vsakodnevnem življenju...



# Elementi pospeševalnika

## Potrebe:

- Nabiti delci
- Električno (oz. s časom spreminjajoče se magnetno) polje za pospeševanje
- Električna oz. magnetna polja za usmerjanje delcev med pospeševanjem

## Elementi:

- Izvor ionov ( $e^-$ ,  $e^+$ , ...)
- Pospeševalna struktura, v kateri enkrat ali večkrat deluje polje
- Žarkovna cev z visokim vakuumom
- Vodilno polje, da žarek ostane v žarkovni cevi
- Sistem za odstranitev delcev iz pospeševalnika (abort)
- Tarča

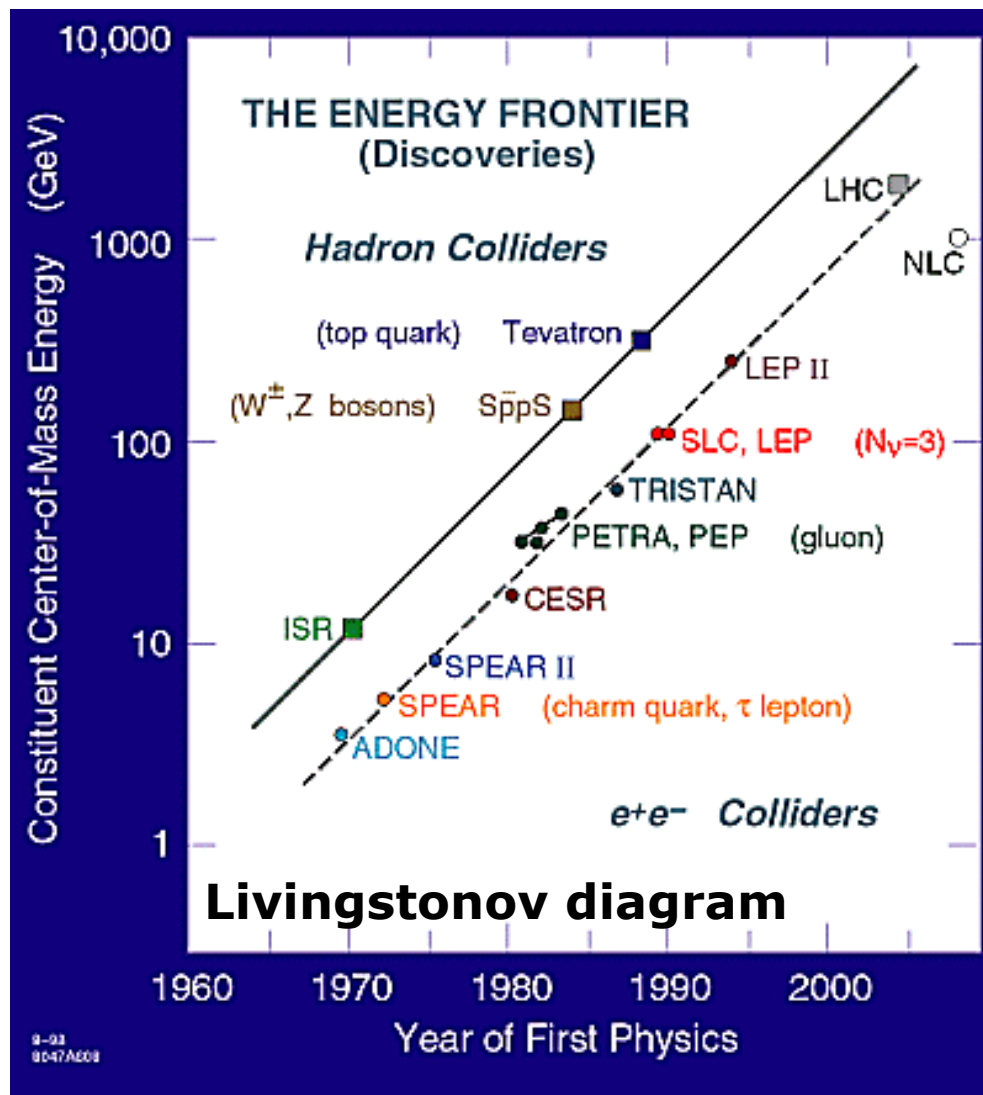
# Težiščna Energija

Če je pri trku na voljo dovolj energije, lahko nastanejo novi delci

$$E_{\text{CMS}} > mc^2$$

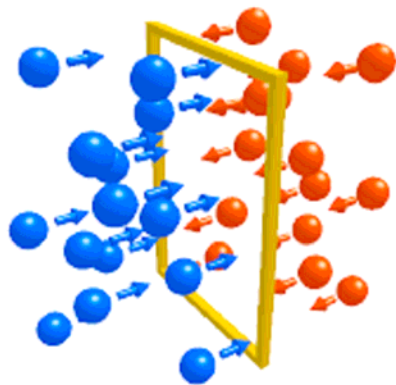


LHC, CERN: iskanje Higgsovih bozonov,  $m_{\text{Higgs}} > 100\text{GeV}$



# Luminoznost

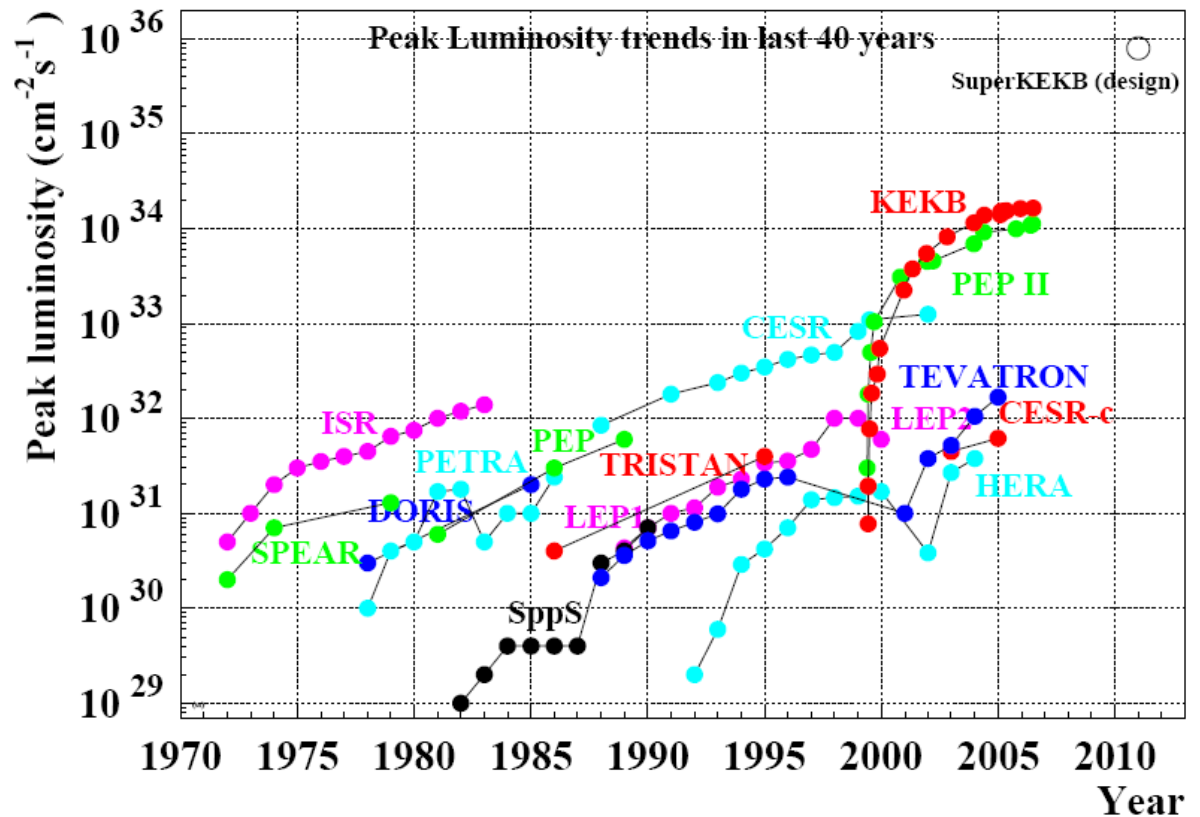
$$R = \mathcal{L}\sigma$$



(number of events/unit time)  
= (cross section) X (luminosity)

$$\mathcal{L} = \frac{I_{LER} I_{HER}}{e^2 f_{rev} N_{bunch} A_{eff}}$$

Tudi luminoznost eksponentno narašča s časom



Čimvečjo luminoznost potrebujemo za študij redkih procesov

# Transport delcev

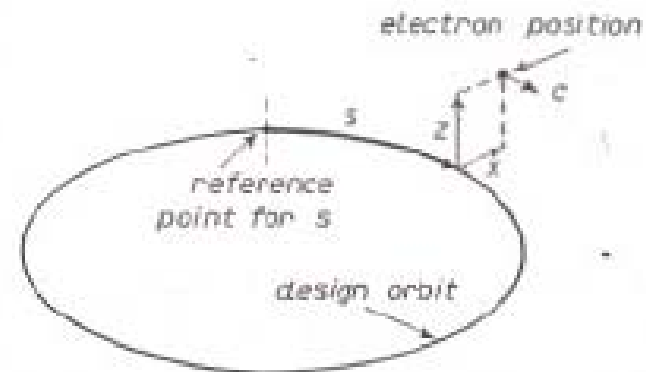
Potrebujemo magnetno polje, ki bo držalo nabite delce med pospeševanjem znotraj pospeševalnika – magnetna optika

- Matrični formalizem, uporaben pri načrtovanju transportnih sistemov v pospeševalnikih

- Definiramo  $s$  v smeri gibanja delca ter  $x$  in  $z$  pravokotno

- Delce določa njihova lega in smer

- V splošnem iščemo transportne matrike iz trajektorij, ki so rešitve enačb gibanja, npr. v magnetnem polju



$$x'_0 = \tan \alpha_0 = \left. \frac{dx}{ds} \right|_{s_0}, \quad x' = \tan \alpha = \left. \frac{dx}{ds} \right|_s$$

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \quad \Bigg|$$

## “Optični elementi” transportnega sistema

- Magnetna leča,  $1/f=1/p+1/q$

$$M_{tl} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$$

- Prazen prostor dolžine  $l$

$$M_d = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Debela magnetna leča, sestavljena iz tanke leče in dveh praznih “drift” prostorov

$$M_{dl} = \begin{pmatrix} 1 - z_2/f & z_1 + z_2 \\ -1/f & 1 - z_1/f \end{pmatrix}$$

Osnovni ravnini debele leče

$$z_1 = \frac{M_{22} - 1}{M_{21}}, \quad z_2 = \frac{M_{11} - 1}{M_{21}}$$

## Enačbe gibanja $m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}$

- Odvajanje po času prevedemo na odvajanje po koordinati  $s$

- Najsplošnejša rešitev je lin. komb. dveh neodvisnih rešitev

- Robni pogoji so jasni:

$$C(0)=1, S(0)=0$$

$$C'(0)=0, S'(0)=1$$

$$x'' + g(s)x' + f(s)x = f_1(s), \quad ' \equiv \frac{d}{ds}$$

$$x(s) = x_0 C(s) + x'_0 S(s)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(s) & S(s) \\ C'(s) & S'(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}$$

- Enačbe običajno niso linearne, lineariziramo jih, da lahko kaj izračunamo

- Sila je lahko silno zapletena

- Dodatna težava je računanje v krivočrtnih koordinatah



# Kvadrupolni magnet – magnetna leča

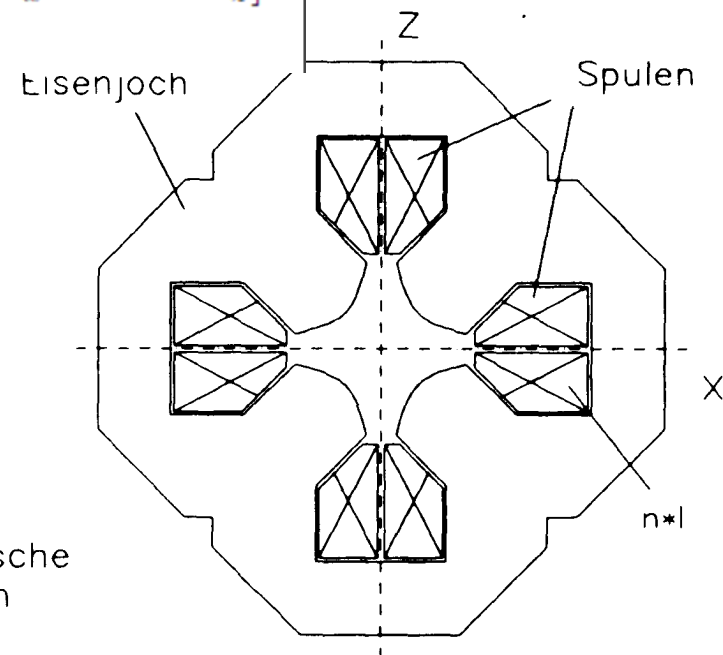
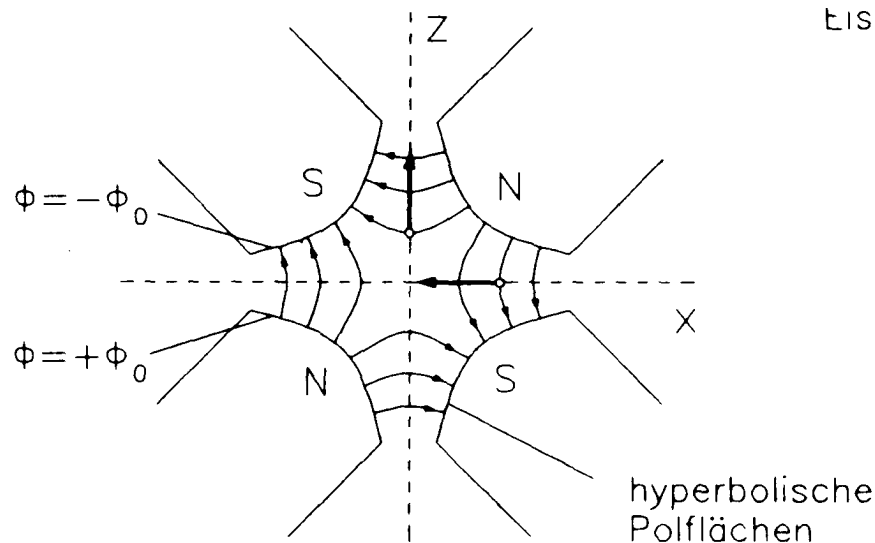
- Nabit delec se giblje v magnetnem polju

$$m\ddot{\vec{r}} = e\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{r} = x\hat{x} + z\hat{z} + s\hat{s}, \quad \vec{B} = (B_z, B_x, B_s)$$

$$x'' = -\frac{e}{n} \sqrt{1 + z'^2 + x'^2} [z' B_s - (1 + x'^2 B_x + x' z' B_z)]$$

$$z'' = \frac{e}{p} \sqrt{1 + z'^2 + x'^2} [x' B_s - (1 + z'^2 B_x + x' z' B_z)]$$



## Kvadrupolni magnet 2

- Enačbe gibanja lineariziramo s hipربولoidnim magnetnim poljem

$$g = \frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial z} = \text{konst.}$$

$$B_x = gz, \quad B_z = gx, \quad B_s = 0$$

$$z'' + kz = 0, \quad x'' - kx = 0, \quad k = \frac{eg}{p}$$

- Rešitve so različne za x in z:

V eni ravnini deluje kvadrupolni magnet kot zbiralna leča, v drugi kot razpršilna

$$\begin{pmatrix} z \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \sqrt{k}s & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \sqrt{k}s \\ -\sqrt{k} \sin \sqrt{k}s & \cos \sqrt{k}s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_0 \\ z'_0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{k}s & \frac{1}{\sqrt{k}} \sinh \sqrt{k}s \\ \sqrt{k} \sinh \sqrt{k}s & \cosh \sqrt{k}s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}$$

## Sistemi leč

Potrebujemo zbiranje v obeh ravninah, da žarek ostane v pospeševalniški cevi

- Dublet (dva kvadrupola, zasukana za 90 stopinj okoli osi s) – zbira v obeh ravninah, vendar pride do popačenja slike

- Triplet (trije kvadrupoli) – v prvem redu slika ni popačena

$$\frac{1}{f^*} = \left| \frac{d}{f^2} \right| < \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{f^*} = 2 \frac{d}{f^2} \left( 1 - \frac{d}{f} \right)$$

## Odklonski magneti

- Gibalna enačba je  $m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}$

vendar ni enostavno, ker se smer ("opt. os") zdaj krivi in potrebujemo krivočrtne koordinate

$$z'' + \frac{\ddot{s}}{\dot{s}^2} z' = \frac{ev}{p\dot{s}} \left[ x' B_s - \left(1 - \frac{x}{\rho}\right) B_x \right]$$

$$x'' + \frac{\ddot{s}}{\dot{s}^2} x' + \frac{1}{\rho} \left(1 - \frac{x}{\rho}\right) = -\frac{ev}{p\dot{s}} \left[ z' B_s - \left(1 - \frac{x}{\rho}\right) B_z \right]$$

- Ob privzeti simetriji okrog centralne ravnine (gibanje je vedno v ravnini pravokotni na smer z) lahko zapišemo

$$x'' - \left(k - \frac{1}{\rho^2}\right)x = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{p_0}$$

- Linearizirane enačbe ob razvoju mag. polja do 1. reda

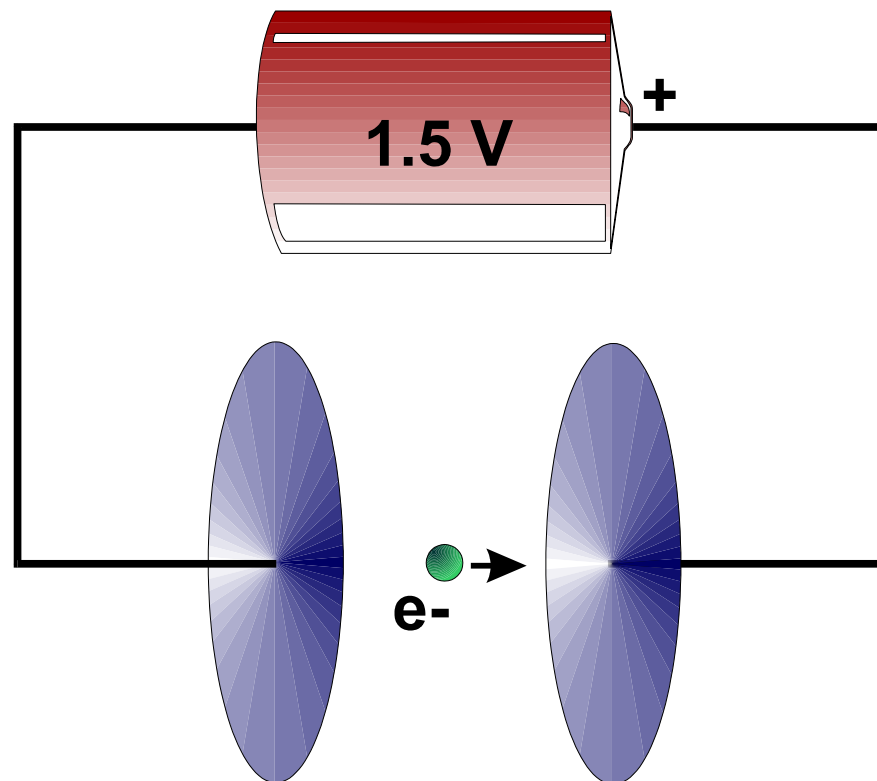
$$z'' = 0, \quad x'' + \frac{x}{\rho^2} = 0$$

- Sektorski magnet:

$$\begin{pmatrix} z \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_0 \\ z'_0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos l/\rho & \rho \sin l/\rho \\ -/\rho \sin l/\rho & \cos l/\rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}$$

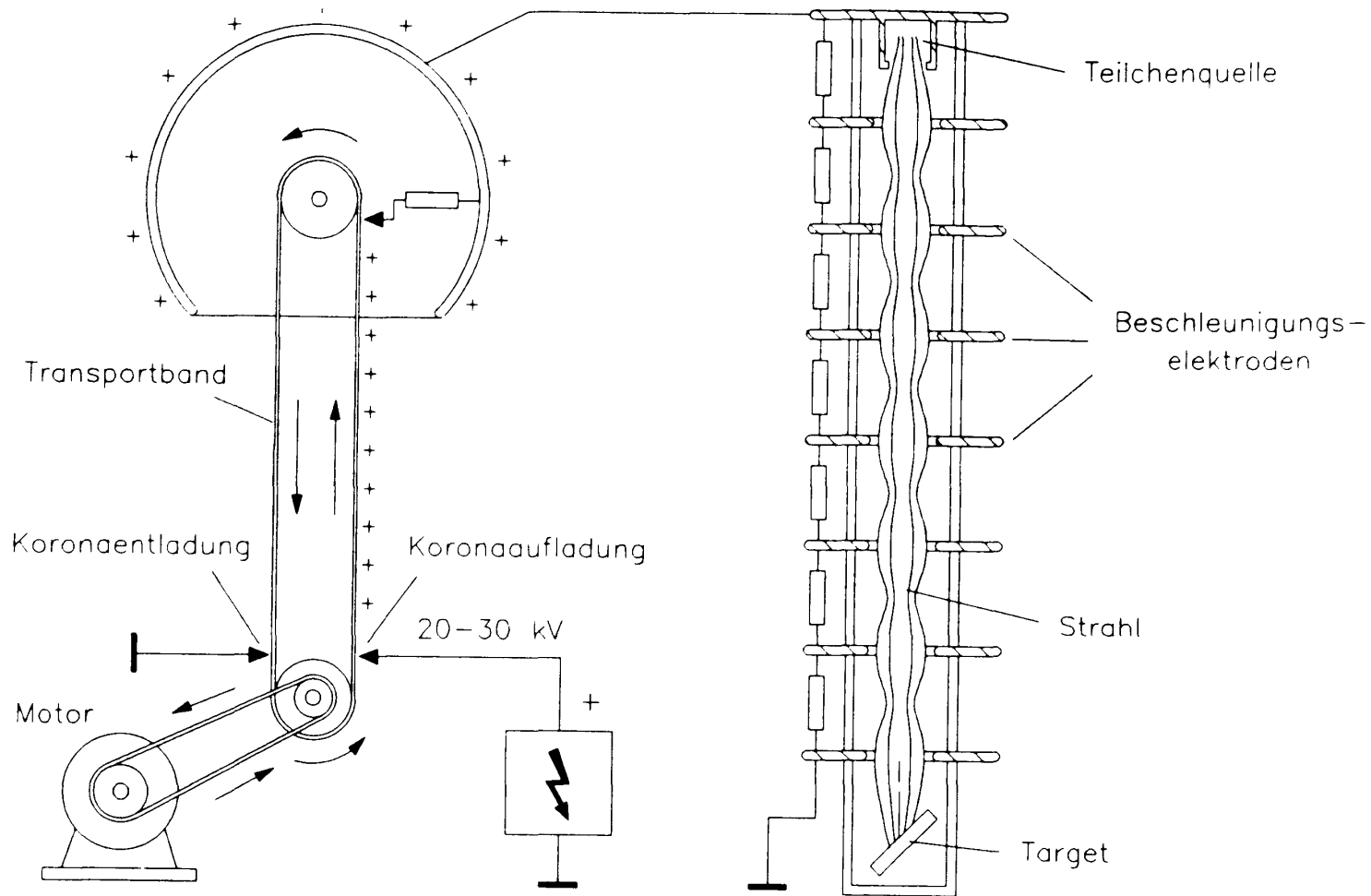
## Pospeševalni sistemi - Elektrostatski pospeševalniki

- Nabit delec dobi kinetično energijo pri preletu določene potencialne razlike
- Energijo maksimiziramo z uporabo največje možne napetosti in ionov s čimvečjim nabojem
- Energija omejena z napetostjo, največja dosežena energija nekaj 10 MeV



**"1.5eV pospeševalnik"**

# Van de Graaf pospeševalnik



Statično el. polje, potencialna razlika porazdeljena med elektrode

## Cockroft - Volton

Pospeševanje preko tanke reže z vmesno elektrodo, ki zagotavlja homogeno polje. Delci:  $p$ ,  $d$ ,  $\alpha$ . Dosega visoke tokove  $>150\text{mA}$



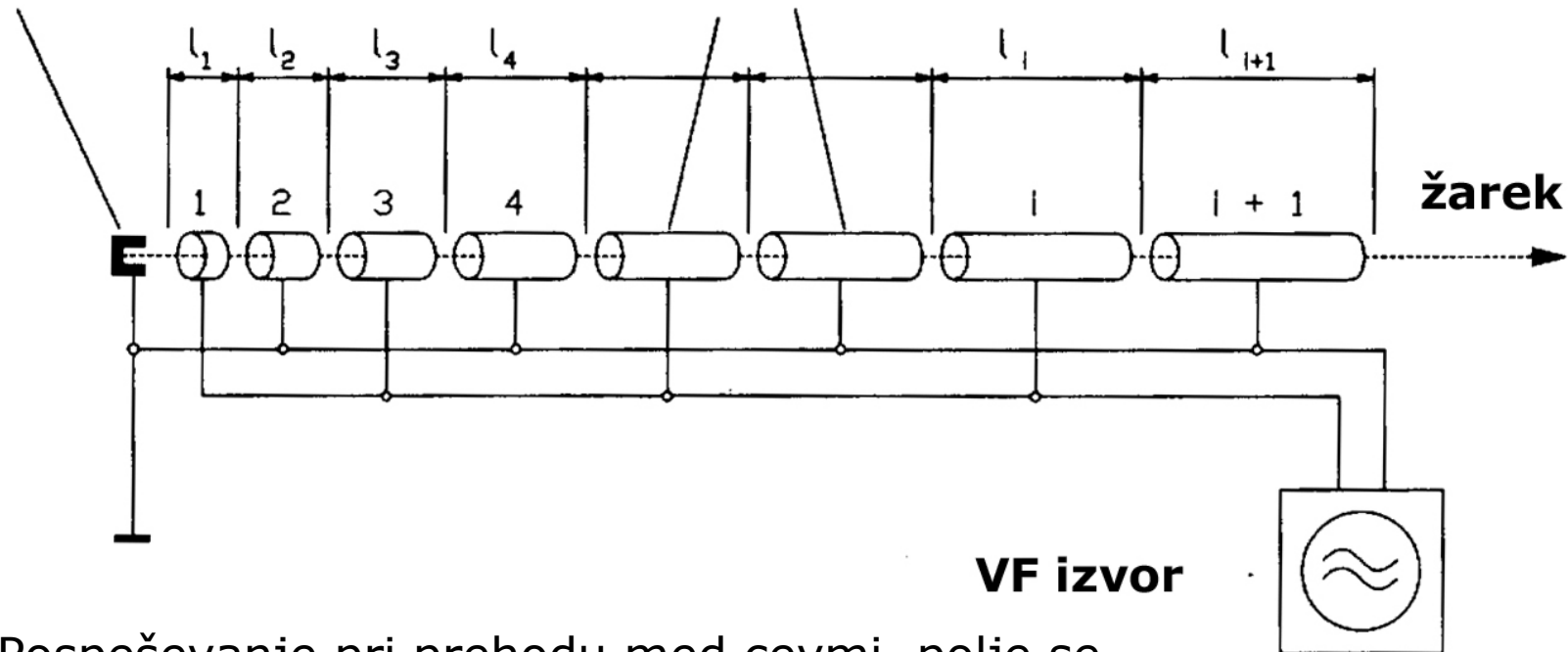
- V Faradayevi kletki
- Modernejša uporaba za injektor



# Linac – prvi pospeševalnik s spreminjajočim se poljem

Izvor ionov

“drift” cevi



- Pospeševanje pri prehodu med cevmi, polje se obrne, ko je delec znotraj določene sekcije
- $L = \beta c / 2f$  (Wideroe),  $L = \beta c / f$  (Alvarez), se spreminja
- Prvič začeli uporabljati magnetne resonatorje in stojne valove v njih za pospeševanje



## LINAC v kratkem

### Plusi

- Visoki gradienti pospeševanja
- Majhne izgube zaradi zavornega sevanja

$$P_L = \frac{2}{3} \frac{e^2}{m^3 c^3} \left( \frac{dE}{ds} \right)^2$$

### Minusi

- Visoka cena pospeševalnih struktur
- Majhni tokovi pospeševanih žarkov

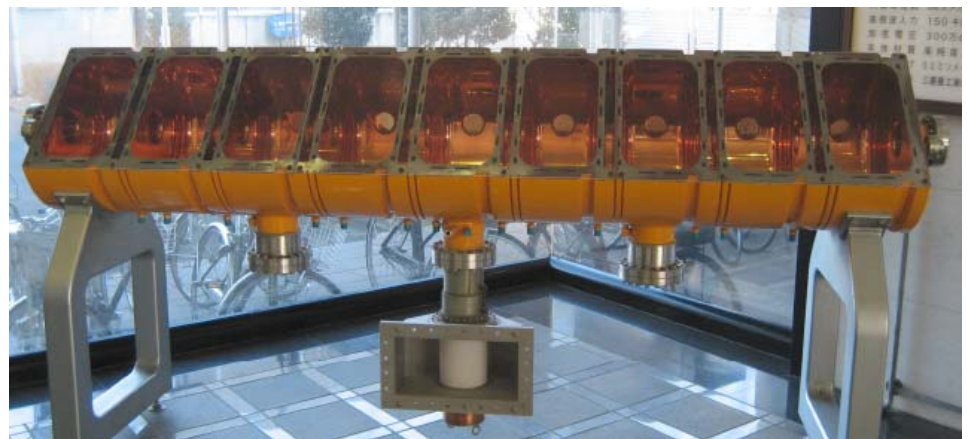
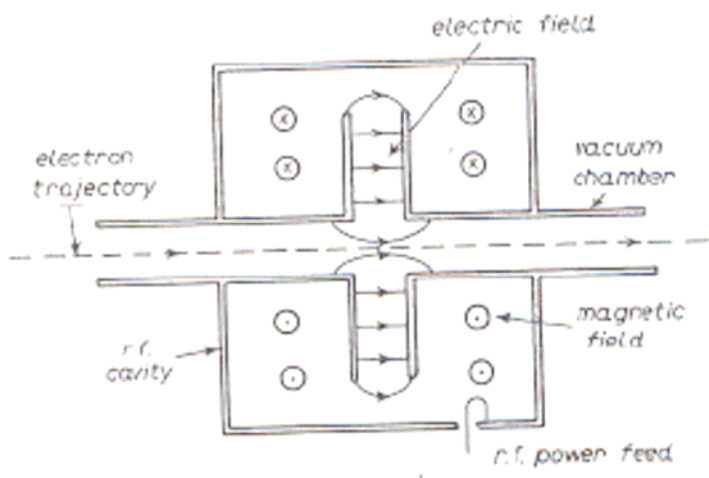
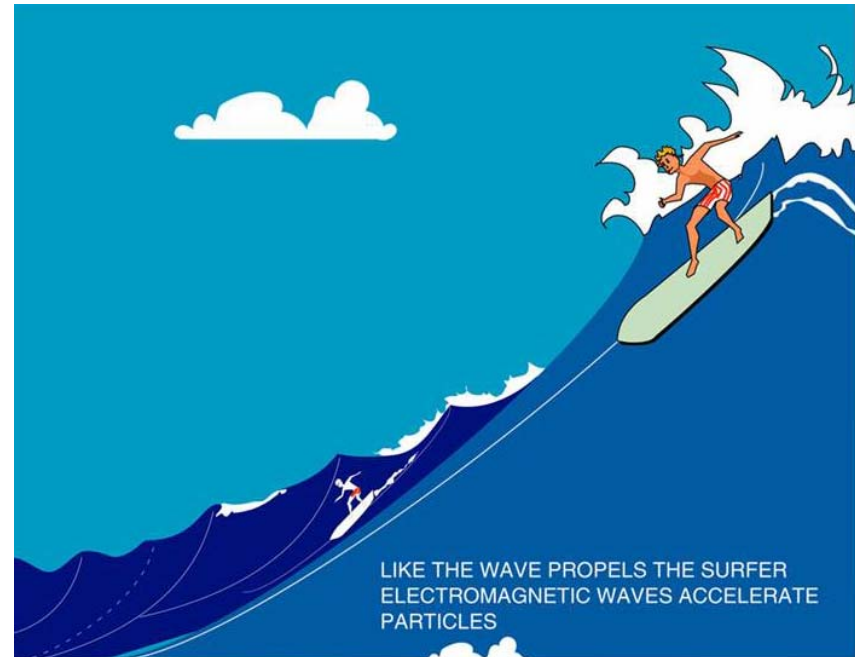
### Uporaba

- Pospeševanje elektronov, kjer so izgube zaradi zavornega sevanja kritične
- Injektorji za hadronske pospeševalnike

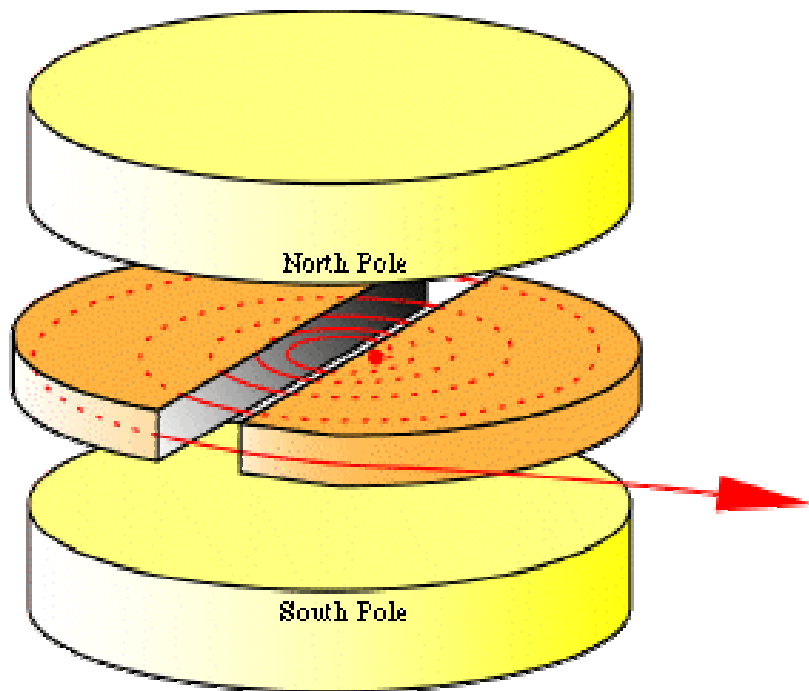
# RF Pospeševalne komore

## Ideja

- Ko delec leti skozi resonator, "posurfa" na valu EMP, in sicer tako, da je sprememba kinetične energije čim večja
- Polje dovedemo v resonančno komoro iz klistrona po valovnem vodniku



# Ciklotron – prvi krožni pospeševalnik



Iz Lorentzove enačbe pogoj za resonanco ciklotrona:

$$\omega = -q B_z / m$$

## Ideja

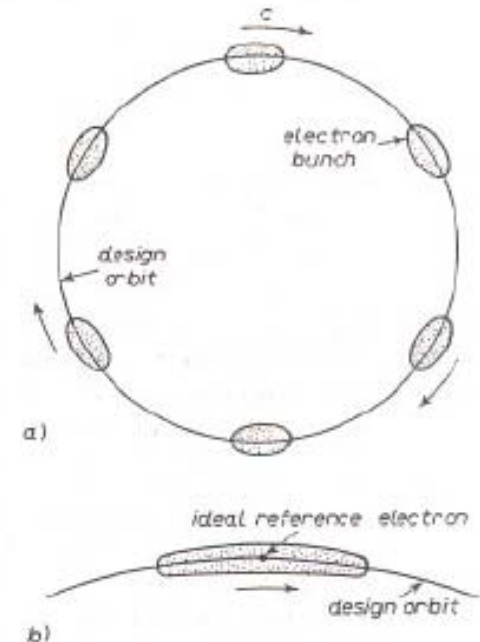
- Pospeševalno strukturo bi radi večkrat uporabili (\$\$)

## Izvedba

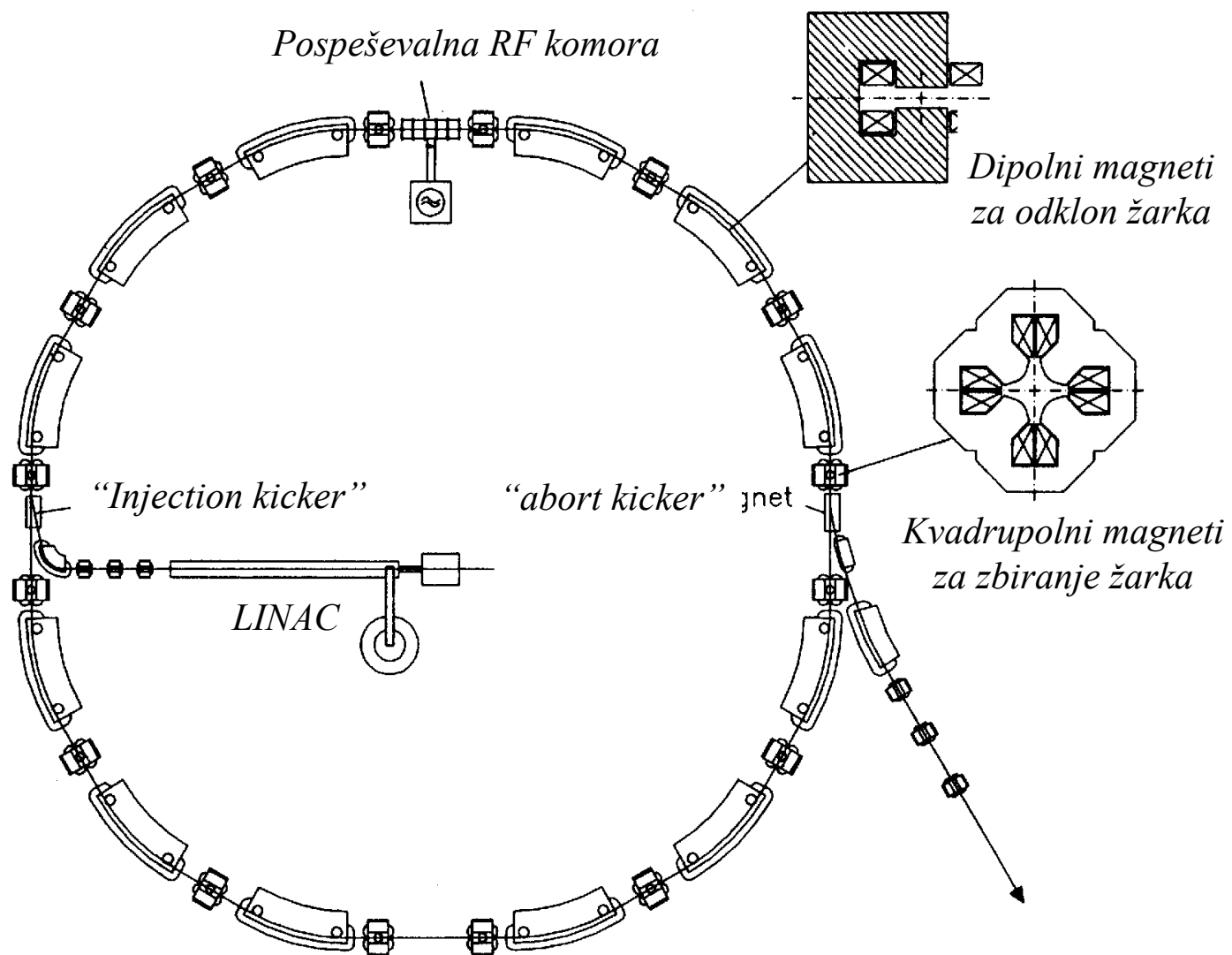
- Vertikalno homogeno magnetno polje ohranja nabit delec s konst. energijo v krožni orbiti
- Do pospeševanja pride pri prehodu skozi režo, v kateri je spremenljivo EMP, katerega frekvenca je prilagojena energiji delca
- Ko se energija in s tem radij krožnice delca poveča do skrajne meje, delec zapusti pospeševalnik

# Sinhrotron

- Nabiti delci se gibljejo v vakuumski cevi ( $10^{-8}\text{Pa}$ ), obdajajoče mag. polje pa jih vodi po bolj ali manj **zaključenih trajektorijah**
- mag. polje delce zbira proti t.i. idealni trajektoriji, okrog katere nihajo tako v vert. kot horiz. smeri (**betatronske oscilacije**)
- V vsakem obhodu delec izgubi del energije zaradi **zavornega sevanja**, ki jo kompenziramo z **RF** pospeševalnimi komorami, v katerih je dinamično longitudinalno električno polje
- Frekvenca RF polja je mnogokratnik ponavadi revolucijske frekvence



# Sinhrotron – shematski prikaz



## Betatronske oscilacije

Magnetno polje ki fokusira delce proti idealni, načrtovani orbiti, vzbuja betatronske oscilacije okoli te orbite.

- Enako kot prej, rešimo enačbe gibanja, vendar poti delcev ne razdelimo na sektorje, gledamo cel obroč naenkrat.
- Za sistem s simetrijsko ravnino lahko magnetne lastnosti celega obroča lahko predstavimo s funkcijama  $G(s)$  in  $K(s)$
- V linearni aproksimaciji je gibanje v radialni smeri  $x$  in smeri  $z$  neodvisno, zapišemo lahko odvisnost odmika od ravnovesne orbite zaradi nihanja ločeno od odmika zaradi spremembe energije

$$x''_{\beta} = K_x(s)x_{\beta}, \quad z''_{\beta} = K_x(s)z_{\beta} \quad \left| \quad x''_{\epsilon} = K_x(s)x_{\epsilon} + G(s)\frac{\epsilon}{E_0} \right|$$

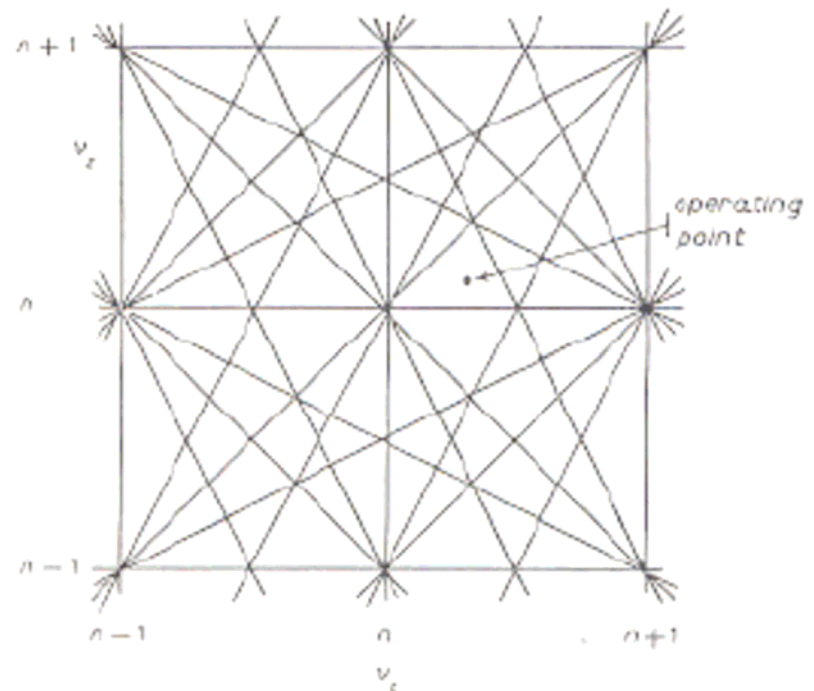
## Betatronske oscilacije 2

- Splošna rešitev enačb gibanja je neharmonično nihanje
- Katerokoli točko  $s$  na obroču vzamemo, tam faza nihanja pri vsakem obhodu napreduje za  $2\pi\nu$
- Vsaka še najmanjša nepravilnost v magnetnem vodniku se v primeru resonance ojača in žarke izgubimo

**Izbira delovne točke trkalnika je bistvena!**

$$x(s) = a\zeta(s)\cos(\phi(s) - \vartheta)$$

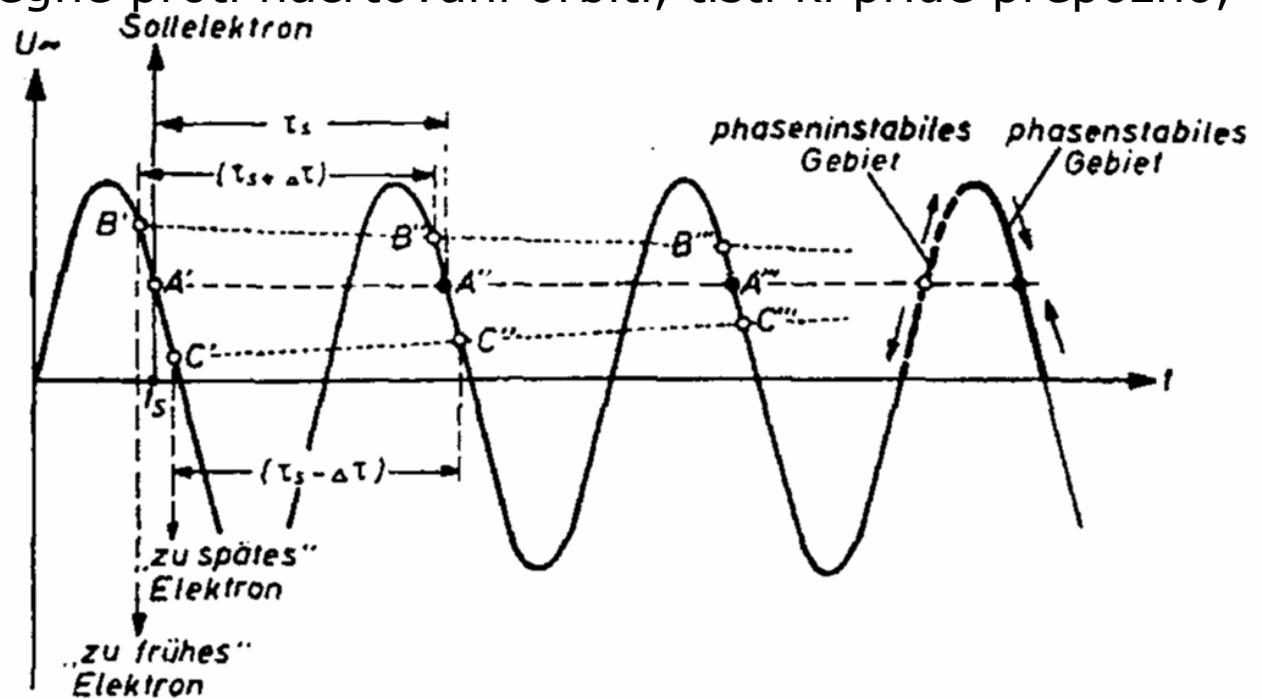
$$\zeta'' = K(s)\zeta + \frac{1}{\zeta^3}$$



## Dušenje zaradi RF pospeševalnih komor

Električni potencial v RF komori se periodično spreminja

- Za sinhrono delce na načrtovani orbiti je en. izguba natančno enaka pridobljeni energiji od RF polj
- Delec, ki pride prepozno zaradi lateralnih odmikov, dobi manj energije, kar ga potegne proti načrtovani orbiti, tisti ki pride prepozno, pa več
- Obstajajo torej stabilna in nestabilna ravnovesja
- Stabilna ravnovesja določajo pakete delcev



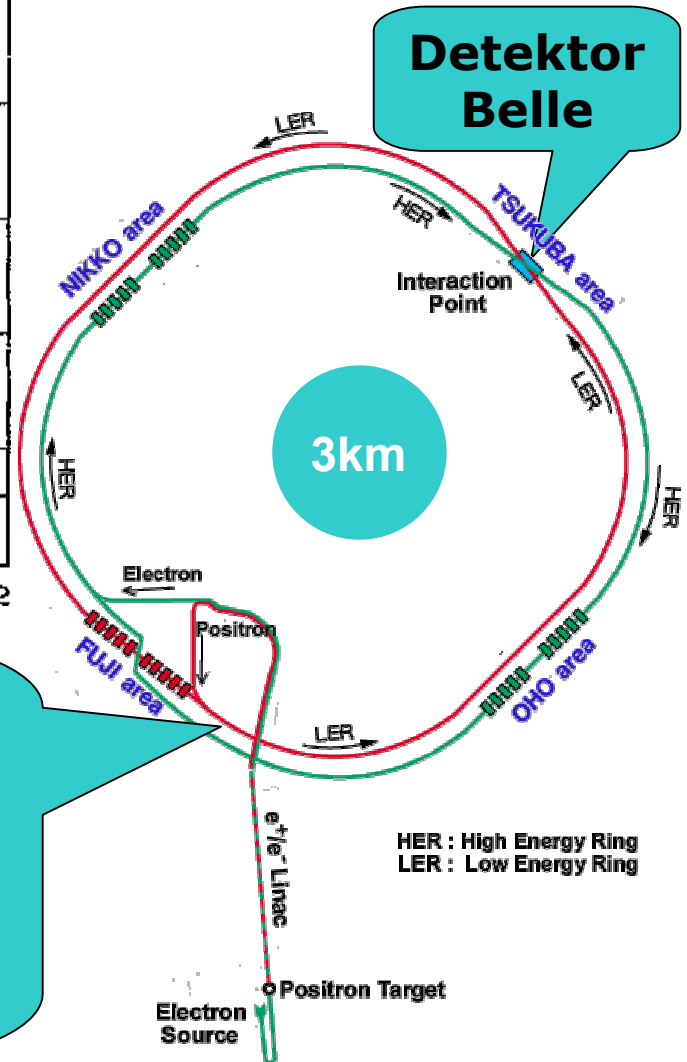
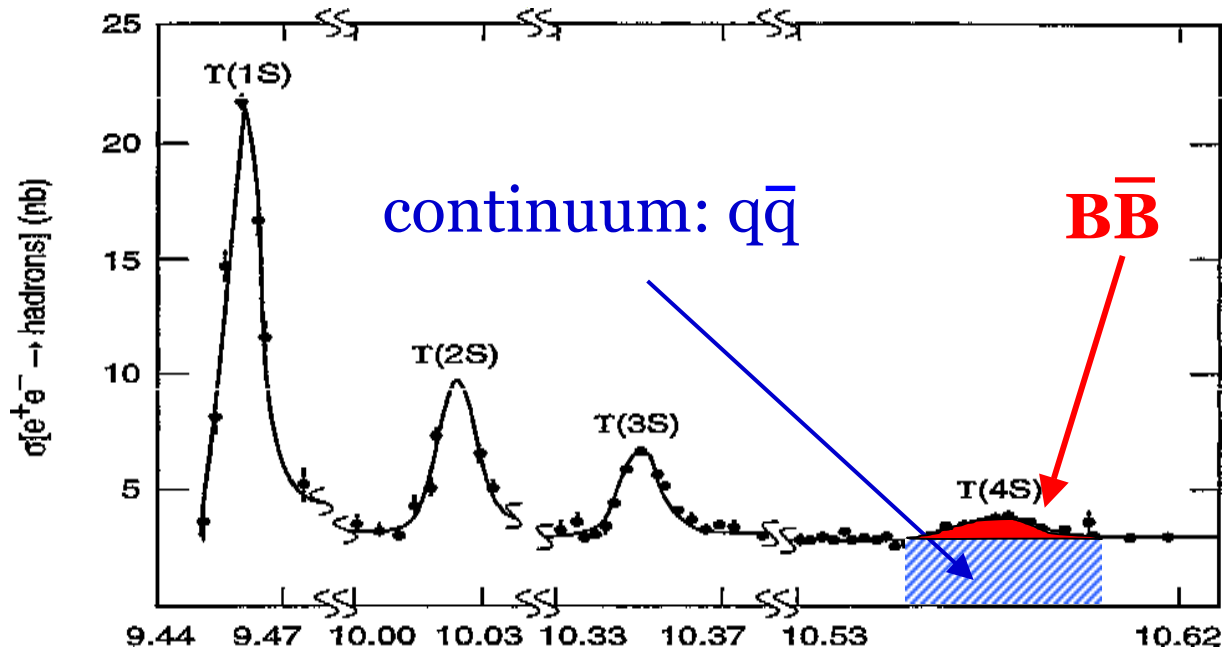


## Sinhrotronske oscilacije

V vsakem obhodu delci izgube del energije zaradi zavornega sevanja, ki pa jo pridobijo nazaj iz RF pospeševalne komore.

- Periodično pospeševalno polje zbere delce v pakete, znotraj katerih posamezni delci nihajo v longitudinalni smeri (s) in energiji glede na lego (energijo) idealnega, referenčnega delca v sredini paketa
- Proces zavornega sevanja in pospeševanja dušta oscilacije, tako da vsi delci težijo proti idealni orbiti in referenčni energiji. Dušenje je navzdol omejeno s kvantnim šumom, fluktuacijami pri energijskih izgubah. Delci, ki jim katerakoli amplituda preseže določeno mejo, so izgubljeni

# Trkalnik KEKB



## Trkalnik KEKB

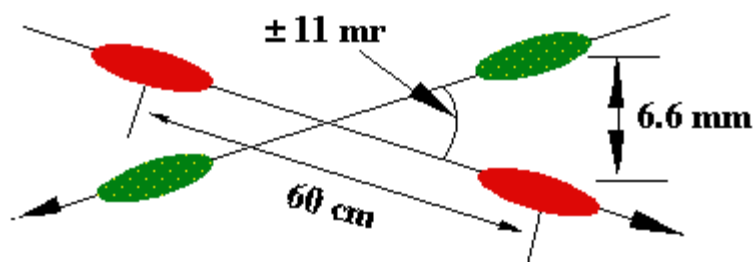
- Asimetrični energiji žarkov  $e^+$  (3.5 GeV)  $e^-$  (8 GeV), deluje pri CMS energiji resonance  $Y(4S)$

- $L_{\text{peak}} = 1.71 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- $\int L dt = 710 \text{ fb}^{-1}$

## KEKB / Belle

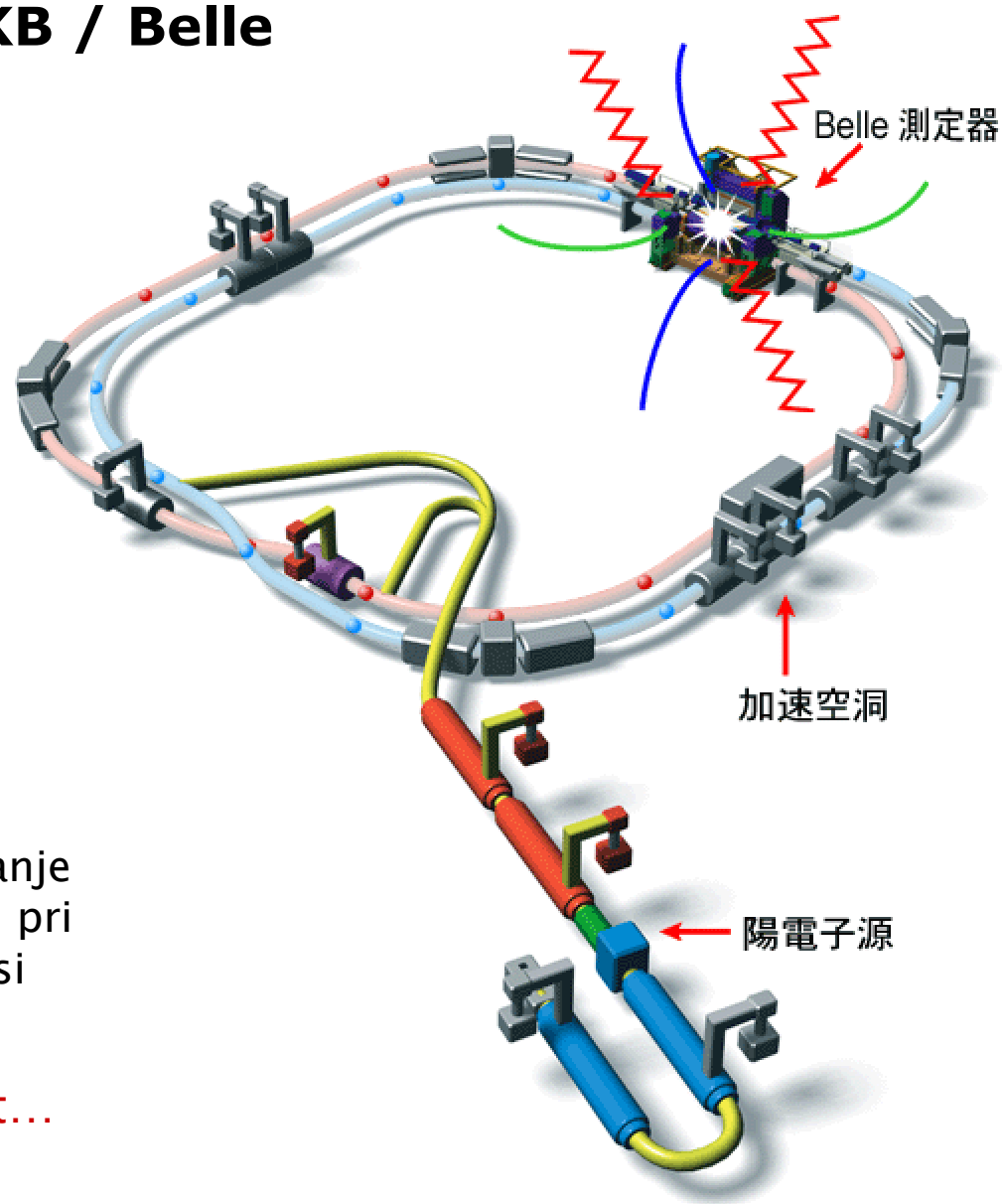
Eksperimentalne zahteve:

- Asimetričen trkalnik:  $E(e^+) = 3.5 \text{ GeV}$  in  $E(e^-) = 8 \text{ GeV}$ ,  $\beta\gamma = 0.425$ , da lahko razdaljo med razpadnima verteksoma B in anti-B sploh merimo



- vpadni kot med zarkoma  $> 0$  (zmanjšanje SR ozadja, izognitev parazitnim trkom pri polni zasedenosti paketov (možen krajši razmik med paketi))

**In pa seveda cimvecjo luminoznost...**





# High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Trkalnik KEKB

Belle

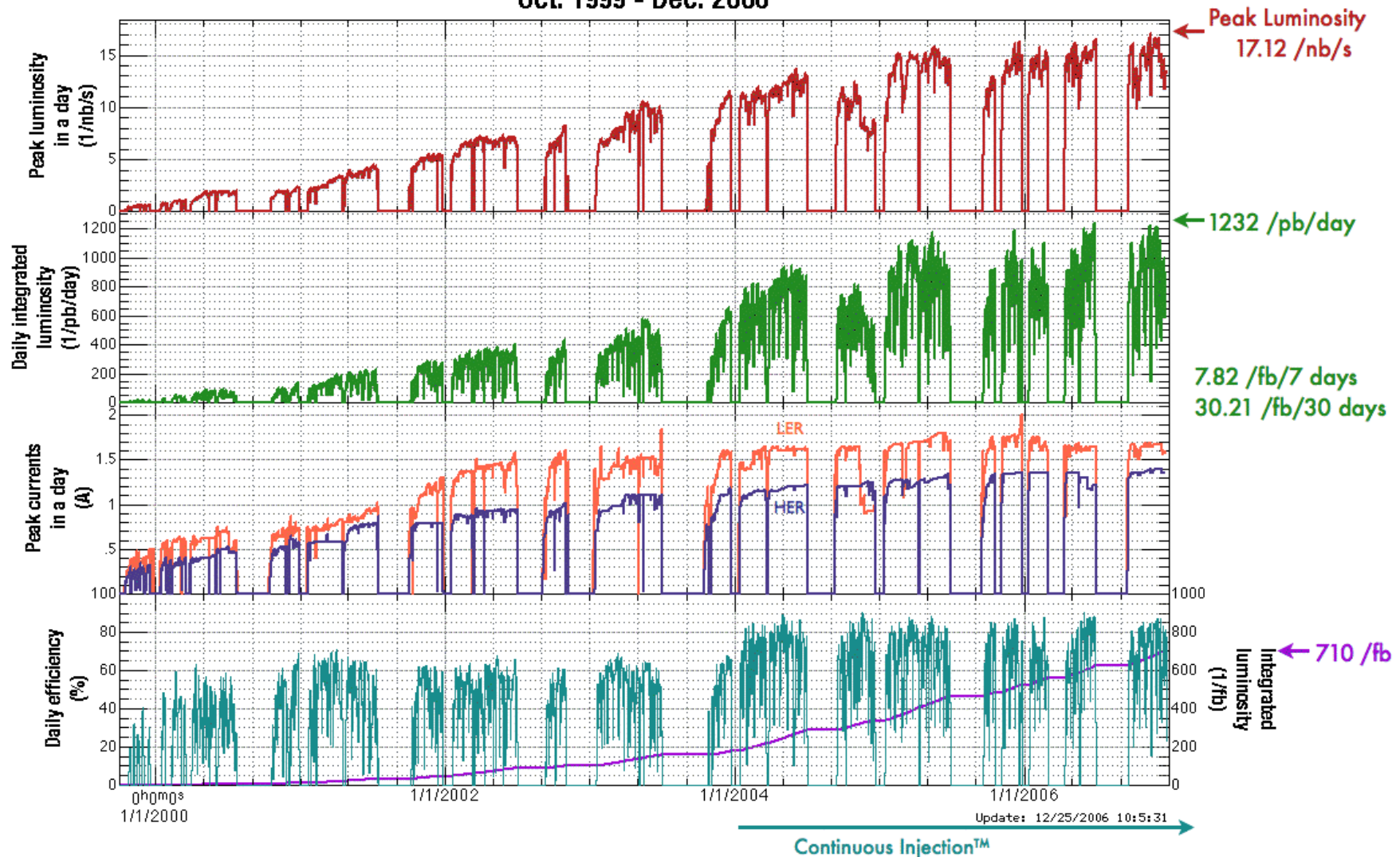
Linac

Bitka za večjo količino podatkov = bitka za luminoznost



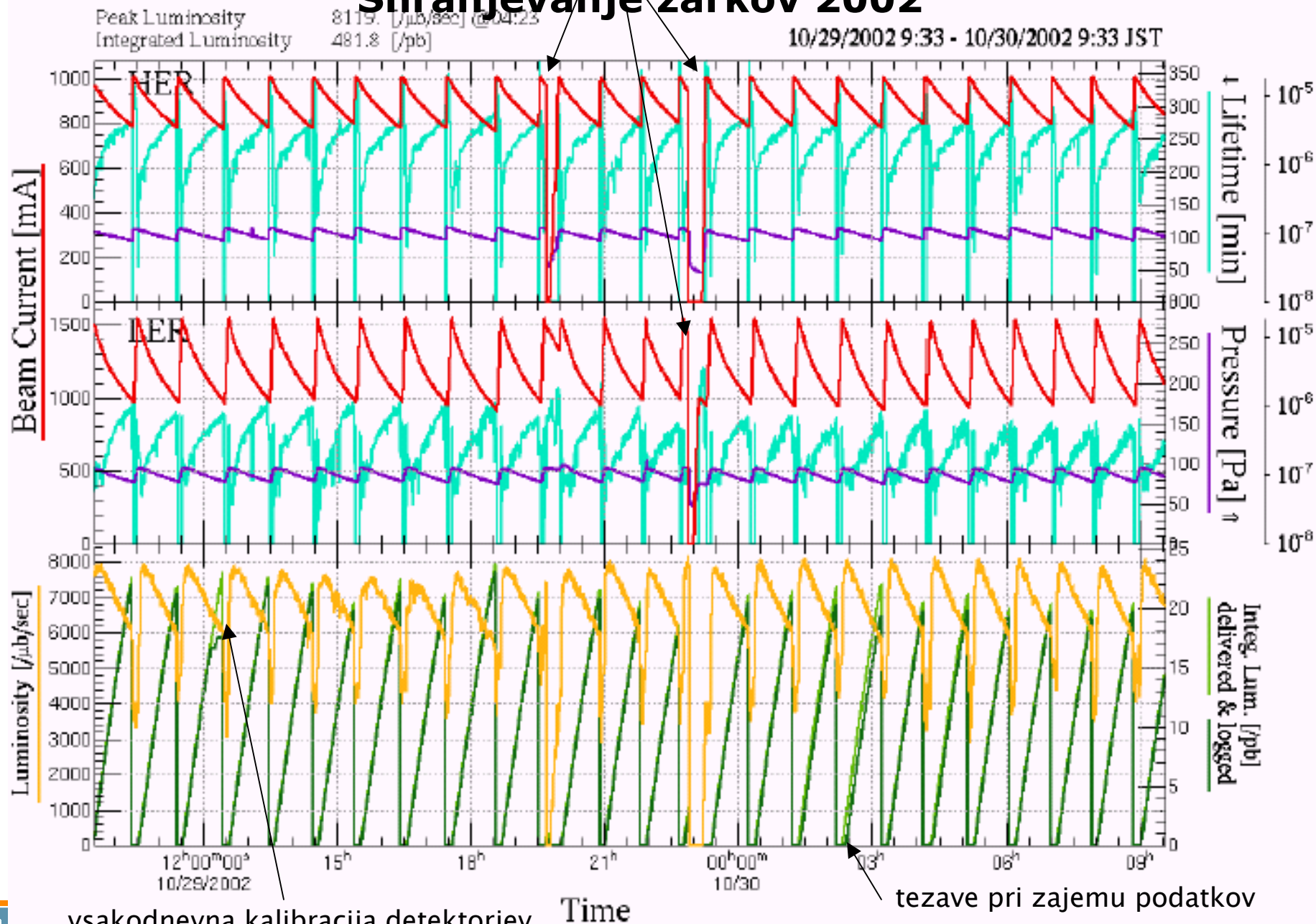
# Integrirana luminoznost = količina podatkov

Luminosity of KEKB  
Oct. 1999 - Dec. 2006



24 fills

# Shranjevanje žarkov 2002



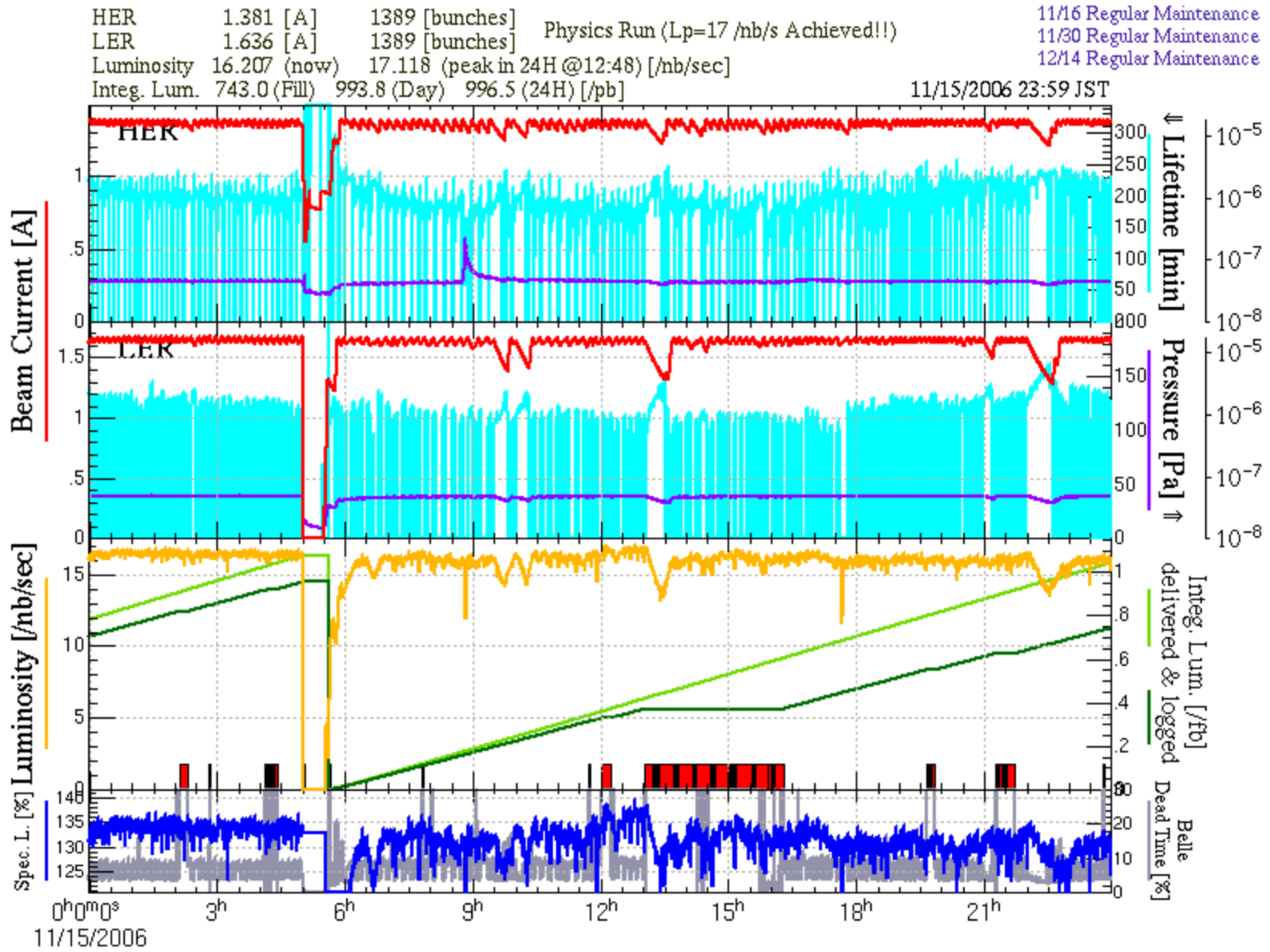
vsakodnevna kalibracija detektorjev

Time

tezave pri zajemu podatkov



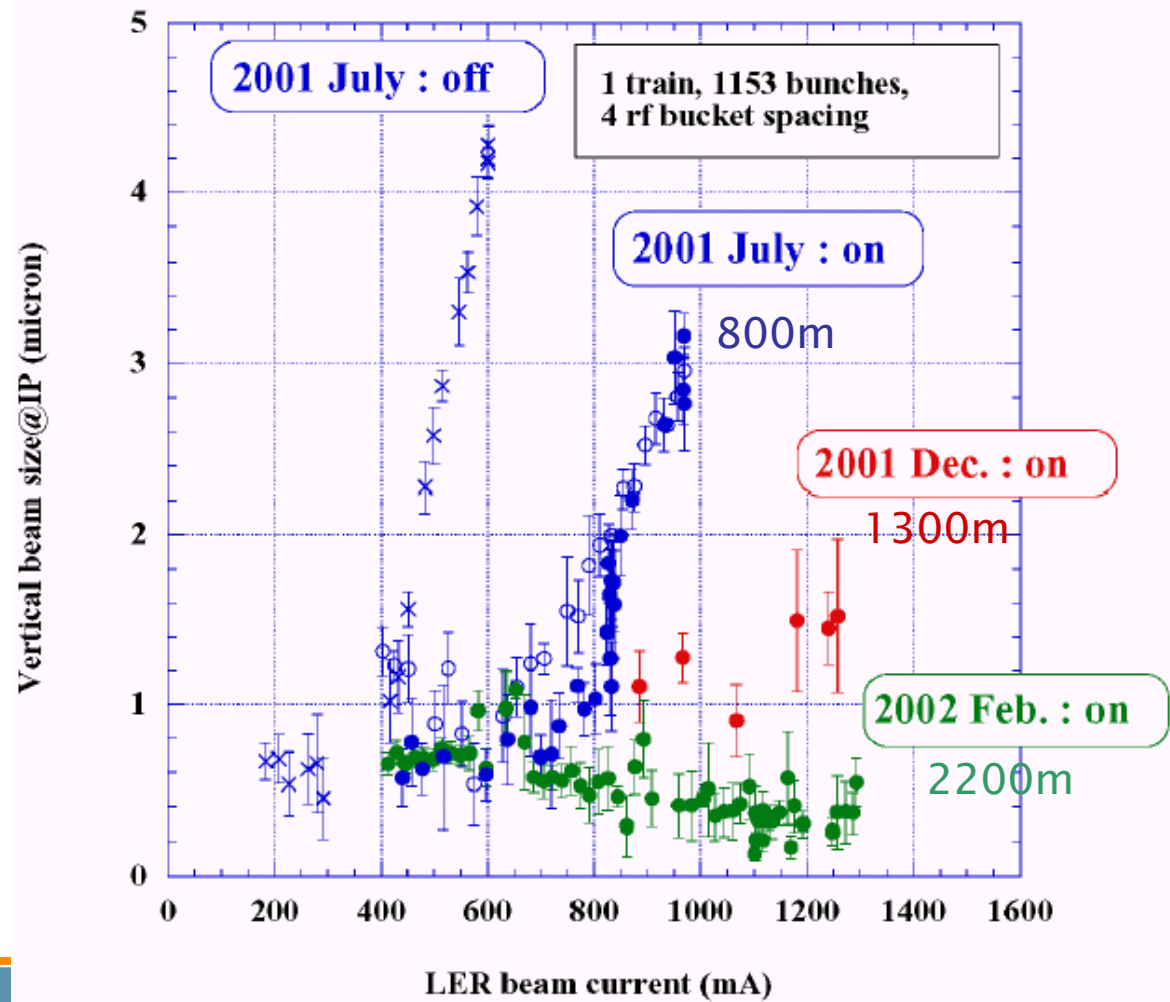
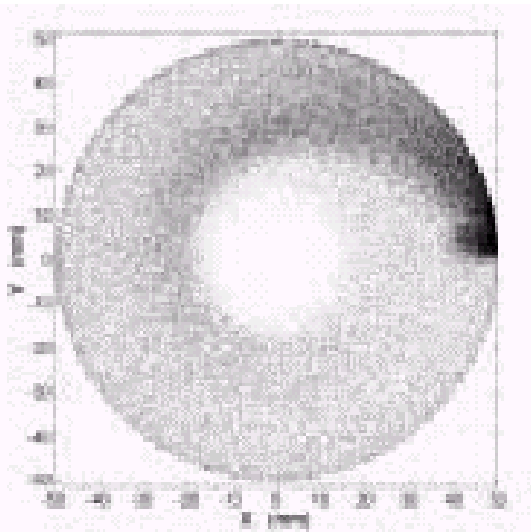
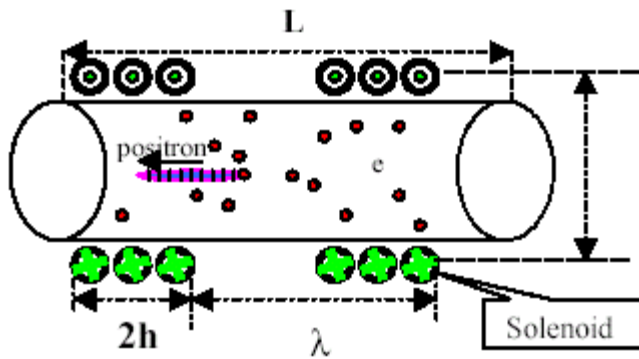
# Shranjevanje žarkov 2006



# Veliki tokovi

Pri visokih tokovih velikost zarka mocno poveca, kar zmanjsa luminoznost. Problem razlozila K.Ohmi in F.Zimmermann: posledica oblaka fotoelektronov, ki ostane za prejsnjimi paketi.

Namestitev solenoidnih tuljav okrog in okrog obroca LER omogoca visje tokove!





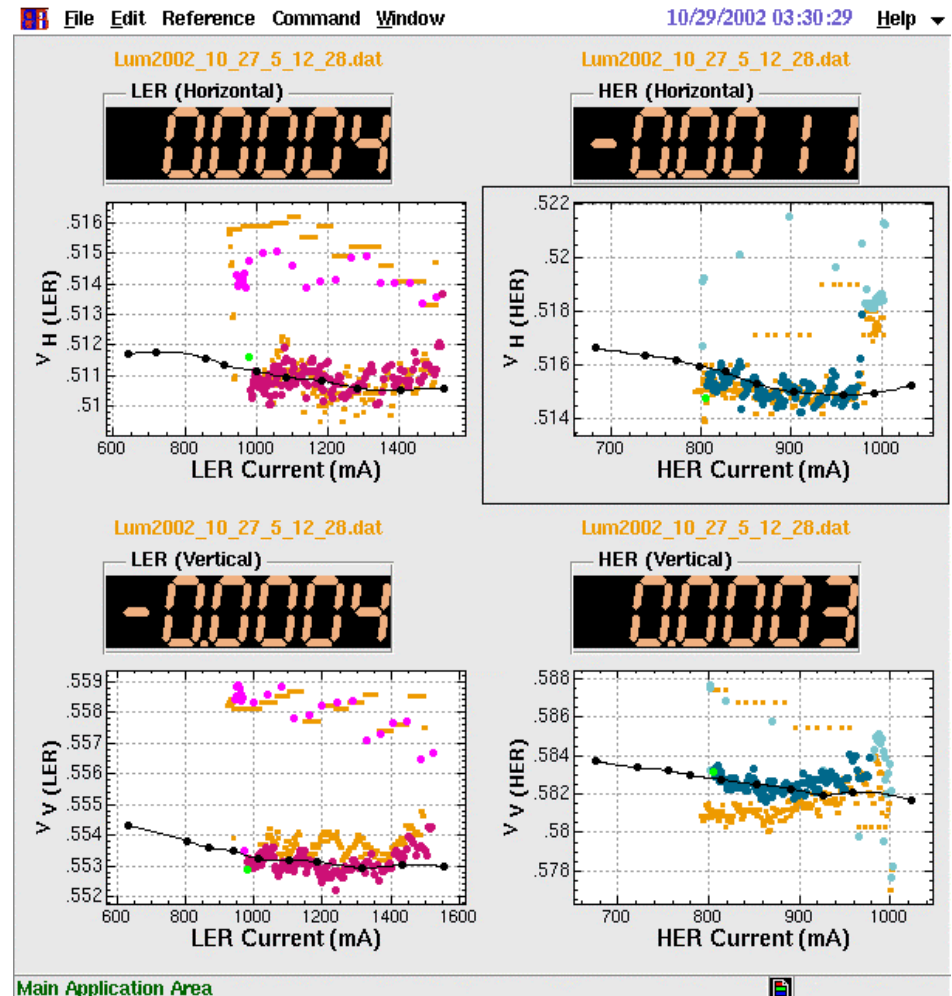
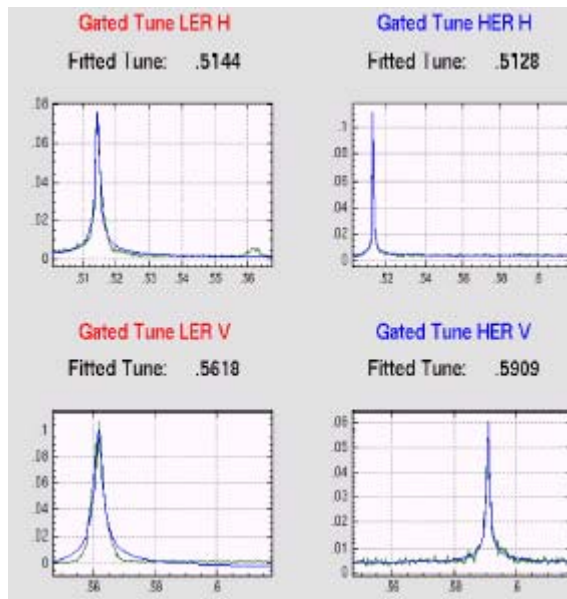
# Tune

Betatronске oscilacije so aperiodicne, faza v vsakem obhodu napreduje za  $2\pi\nu$ , kjer se  $\nu$  imenuje "tune"

- v mnogokratnik **N** ali **N/2**: nihanje bo periodično – najmanjša motnja v vodilnem mag. polju pripelje do **resonantnega vzbujanja** oscilacij in eksp. rasti amplitud

- v primeru, da so  $\nu$  horizontalnih oscilacij **malo nad 0.5**, pride do zbiralnega efekta in dviga lumi. do **20%**

- nujno potrebna je natančna meritev kontrole tune med obratovanjem in redna kalibracija mag. optike

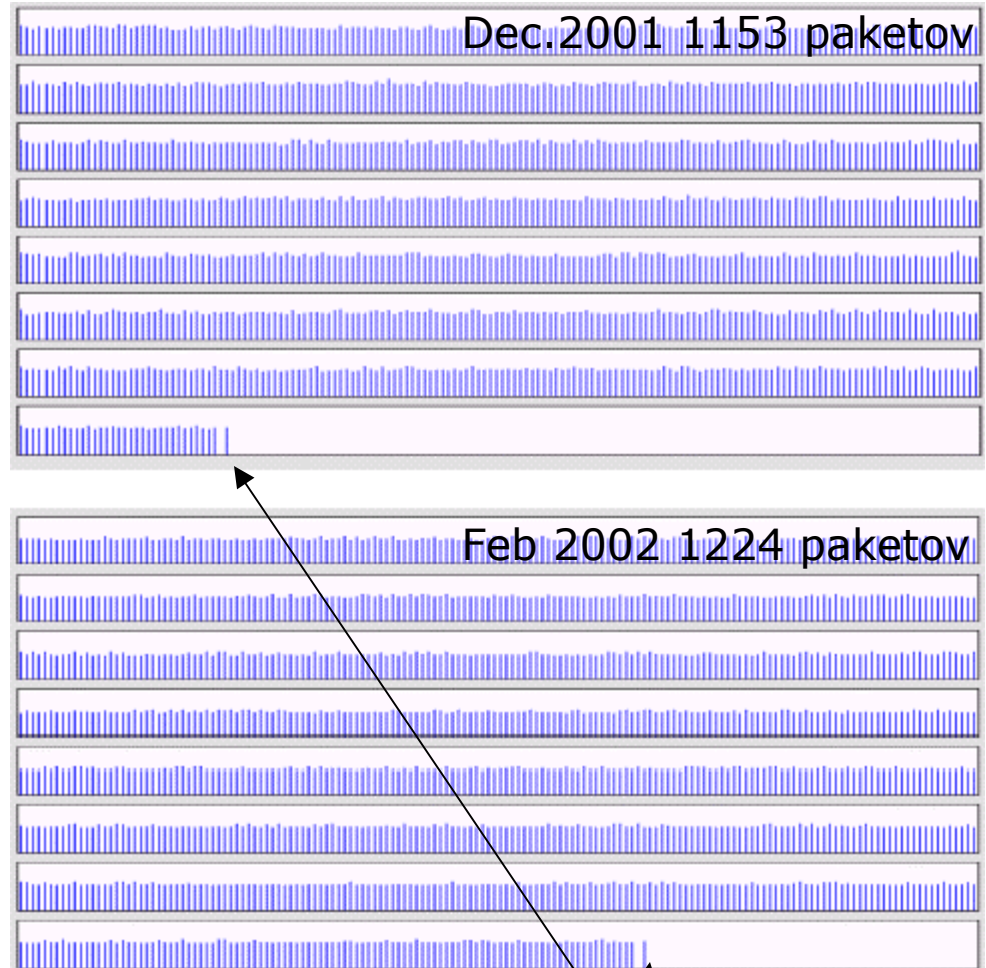


## Zasedenost RF paketov

Gibajoci naboji v nesimetrični prevodni cevi za seboj pustijo t.i. "Wake", elektromagnetno polje, ki lahko:

- Vplivajo na naslednje pakete in povzročijo nestabilnost zarka
- Lahko se "ujamejo" znotraj vakumske komore in tam pustijo svojo energijo – pregrevanje
- Zasedeno je vsako 4. pospeševalno mesto (razmik 8ns) – pri razmiku 5 pride do resonance visjih vzbujenih načinov EM polj (HOM) v IR – **potrebujemo IR brez resonanc!**
- Zaradi HOM je bil  $I_{HER}$  omejen s pregrevanjem premicnih kolimatorjev za zmanjševanje radiacijskega ozadja v Belle – **zamenjani**

Hitrejši mag. za abort – večja popolnitev možnih pospeševalnih mest **6%** večja lumi.



"Pilotski paket" za meritev tune

## “Rakova” komora

V januarju 2007 vgrajena v oba obroča KEKB

Pričakujemo opazno povečanje luminoznosti

