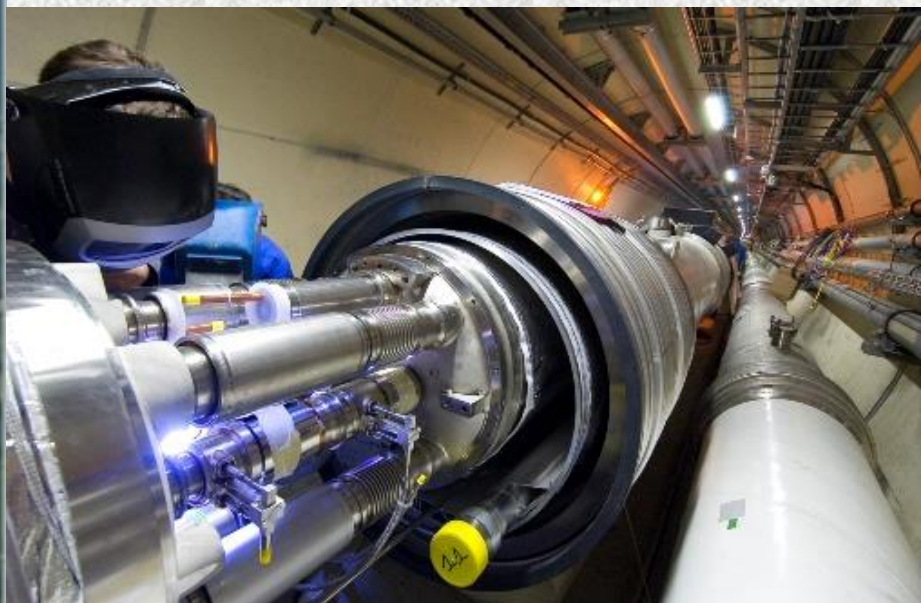


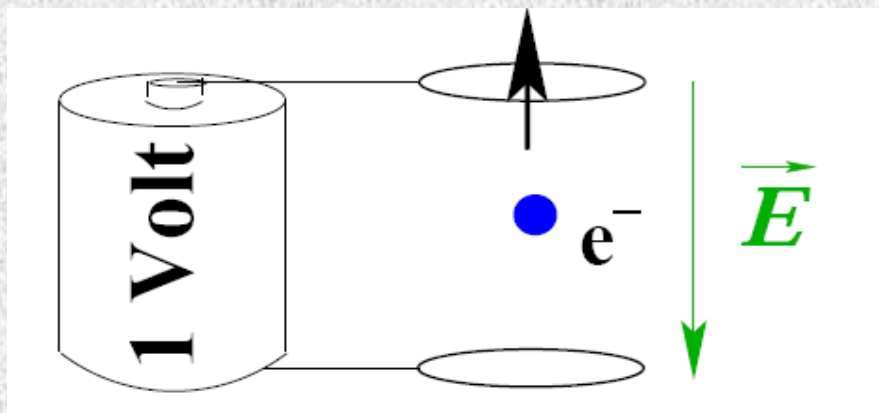
Úvod do urýchlovačov

Karel Šafařík (CERN)

**s použitím materiálov od
O.Brüning, E.Wildner...**

Úvod do urýchlovačov





Elektrónvolt, jednotka energie, označovaná ako eV, sa používa pre malé energie:

1 eV je definovaný ako energia dodaná častici s nábojom jeden elektrón (t.j. okolo $1.602 \cdot 10^{-19}$ C) elektrickým polom s rozdielom potenciálov 1 Volt:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$$

Úrýchľovanie

Vo fyzike častíc jednotka eV sa používa taktiez ako jednotka hmotnosti, pretože hmotnosť a energia sú úzko spojené Einsteinovým vzťahom:

$$E = mc^2$$

kde m je hmotnosť častice a c je rýchlosť svetla vo vákuu

Hmotnosť elektrónu je okolo 0.5 MeV

Celková energia

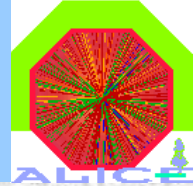
Ked' sú častice urýchelné na veľkú energiu, ich rýchlosť v sa približuje rýchlosti svetla vo vákuu c

musíme zobrať do úvahy relativistické efekty

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}; \quad \beta = v/c$$

$$\gamma = E/m \quad \beta = p/E \quad \gamma\beta = p/m$$

Prečo urýchlovače? Prečo stále vyššia energia?



- ◆ častice – vlny (de Broglie)
- ◆ Rozlišovacia schopnosť je daná vlnovou dĺžkou
$$\lambda = h / p \quad (\text{h – Planckova konštanta})$$

(napríklad elektrónový mikroskop má lepšie rozlíšenie než svetelný pre ktorý $\lambda \sim \text{few } 10^2 \text{ nm} \leftrightarrow \text{less than } 1\text{eV}$)
- ◆ 200 MeV \leftrightarrow 1 fm (10^{-13} cm)
- ◆ 1 GeV \leftrightarrow 0.2 fm
- ◆ 100 GeV \leftrightarrow 2×10^{-16} cm (LEP)
- ◆ 10 TeV \leftrightarrow 2×10^{-18} cm (LHC)

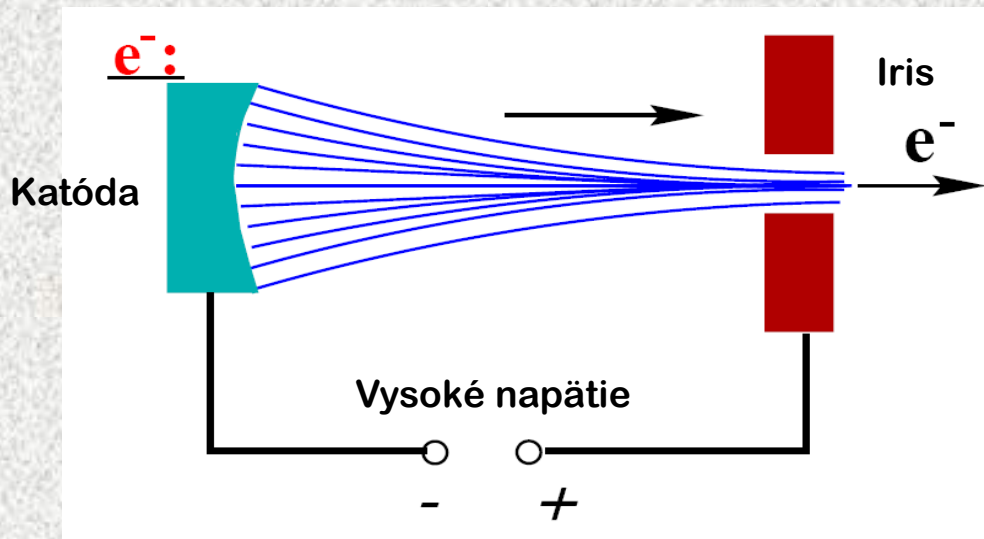
- ◆ elektróny – pozitróny
 - veľmi dobré na objavy nových (neutrálnych) častíc
 - najjednoduchšia interpretácia výsledkov

- ◆ protóny (anti-protóny)
 - tiež objavy nových častíc, ale energia “elementárnych” zrážajúcich sa objektov nie je fixovaná
 - štruktúra hadrónov

- ◆ ťažké ióny (až po Pb)
 - vysokoteplotná QCD, fázové prechody
 - nahrievanie vákua

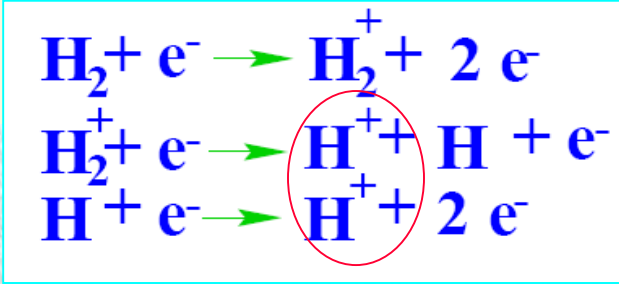
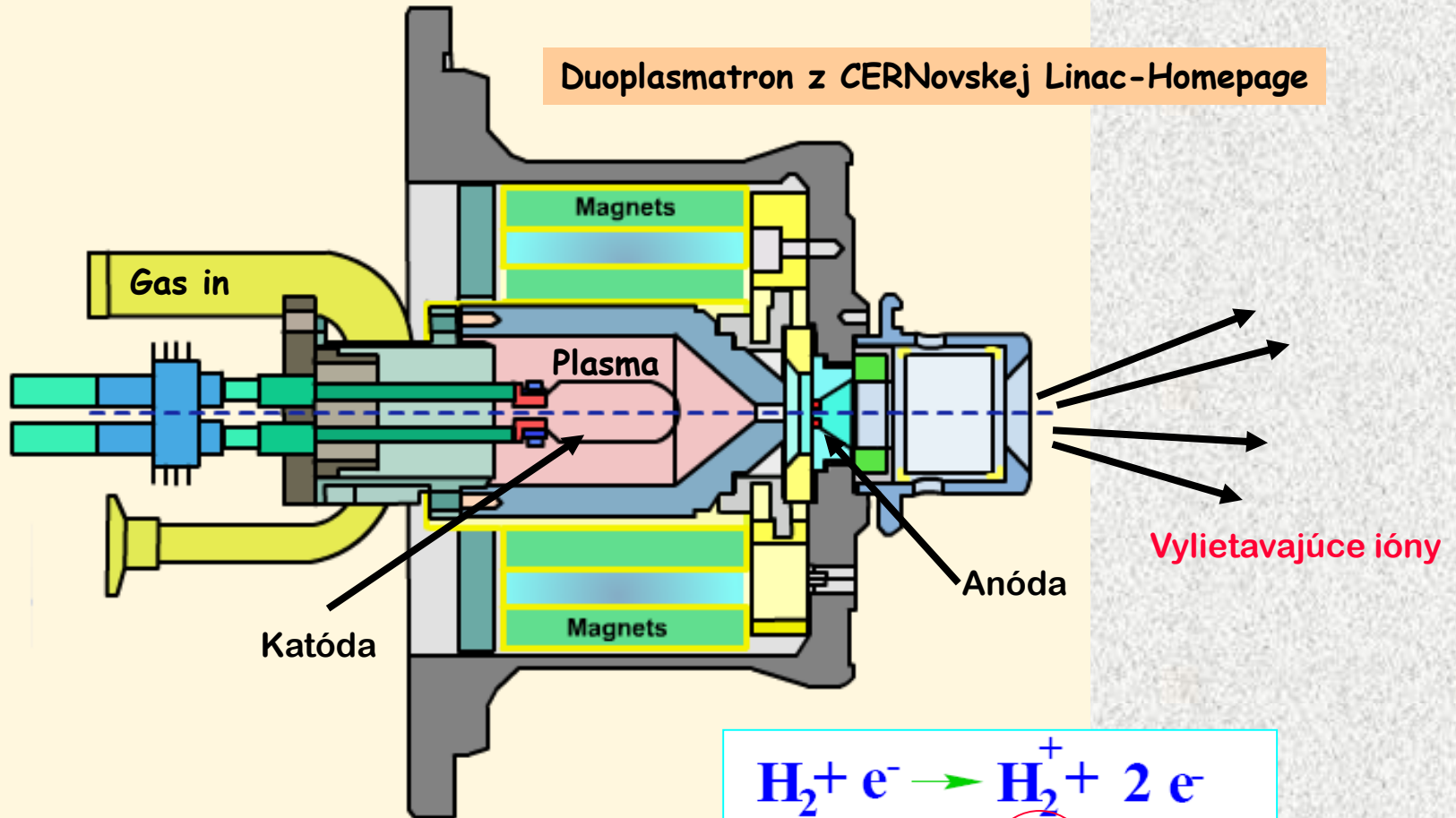
Najjednoduchší zdroj – v podstate elektrónka

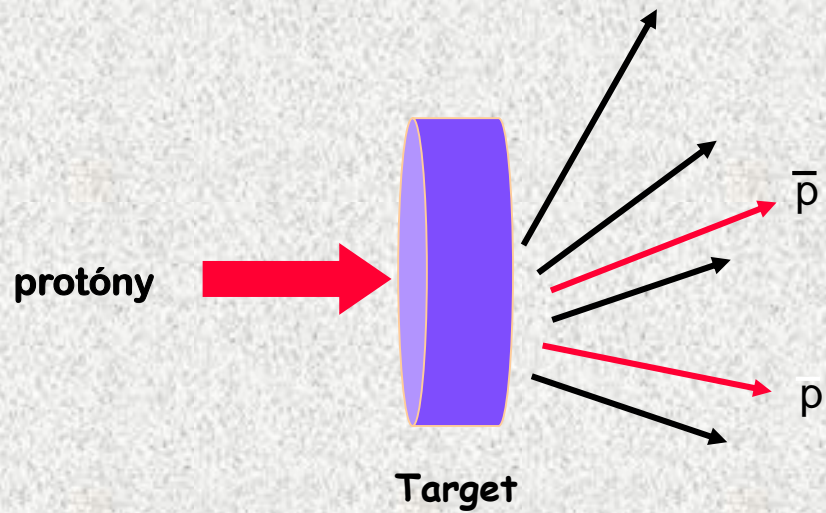
Obrazovka (starých) televízorov – typický elektrónový urýchlovač na ~ 10 KeV



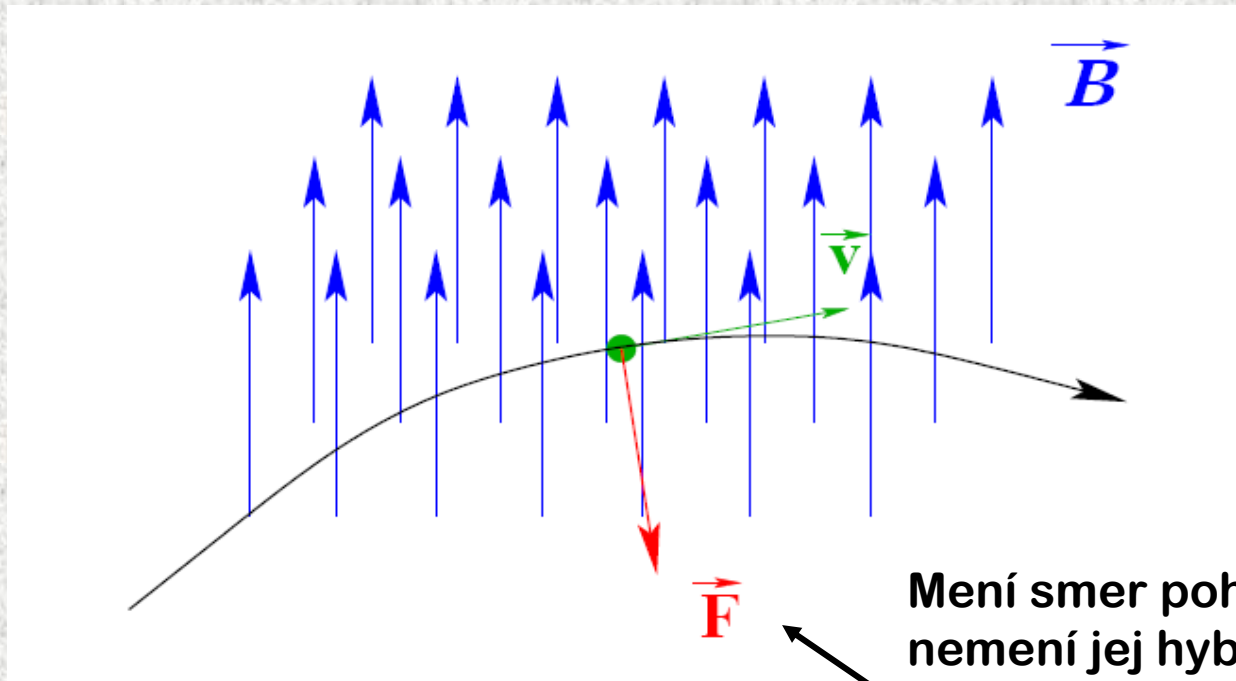
Elektrónový zväzok

Duoplasmatron z CERNovskej Linac-Homepage





Zber antiprotónov
a chladenie!



Mení smer pohybu častice,
nemení jej hybnosť !

Lorentzova sila:

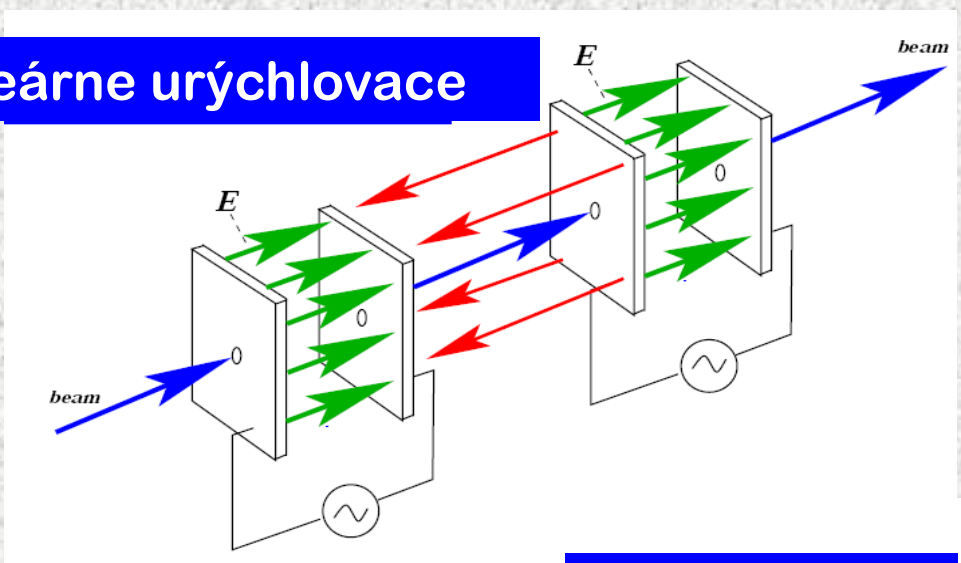
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = Q * (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Urýchluje častice !

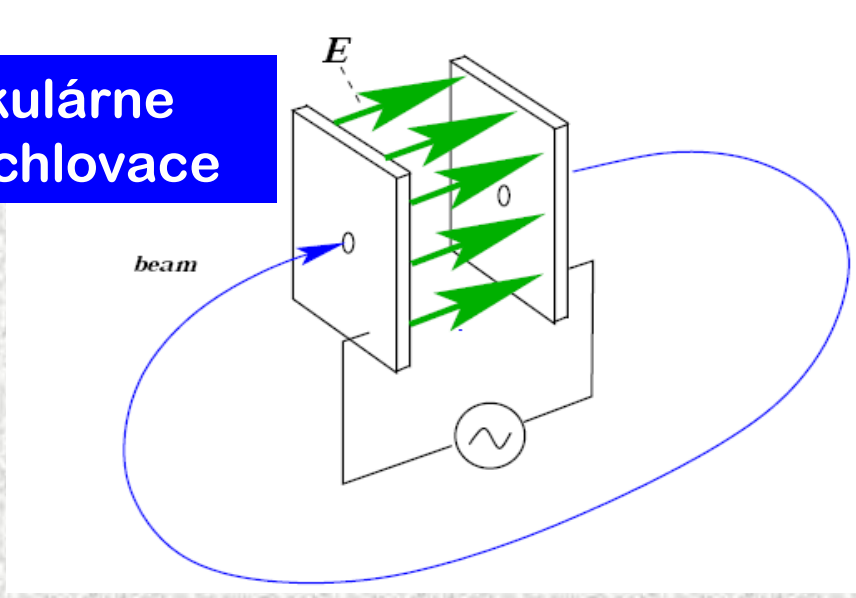
Princíp urýchľovania: časovo meniace sa elektrické pole



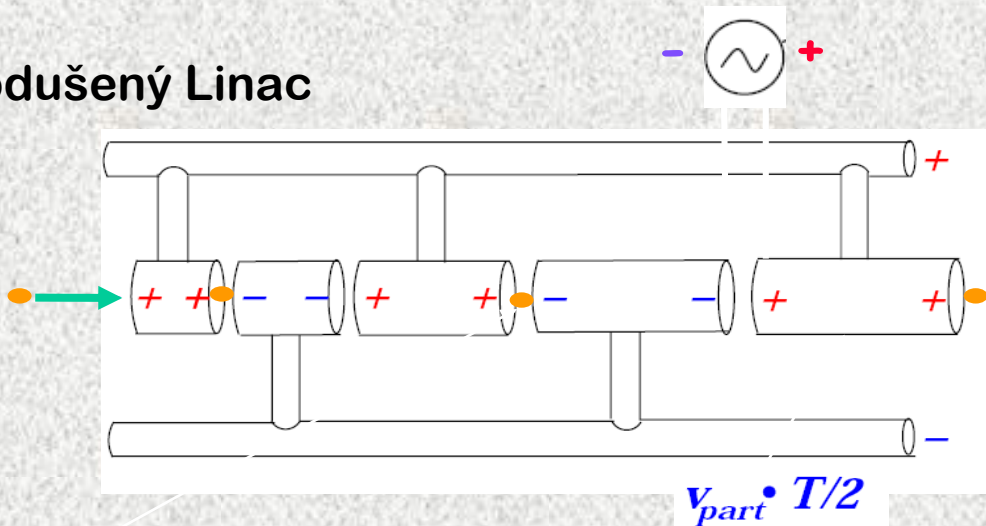
Lineárne urýchľovacie



Cirkulárne urýchľovacie



Zjednodušený Linac

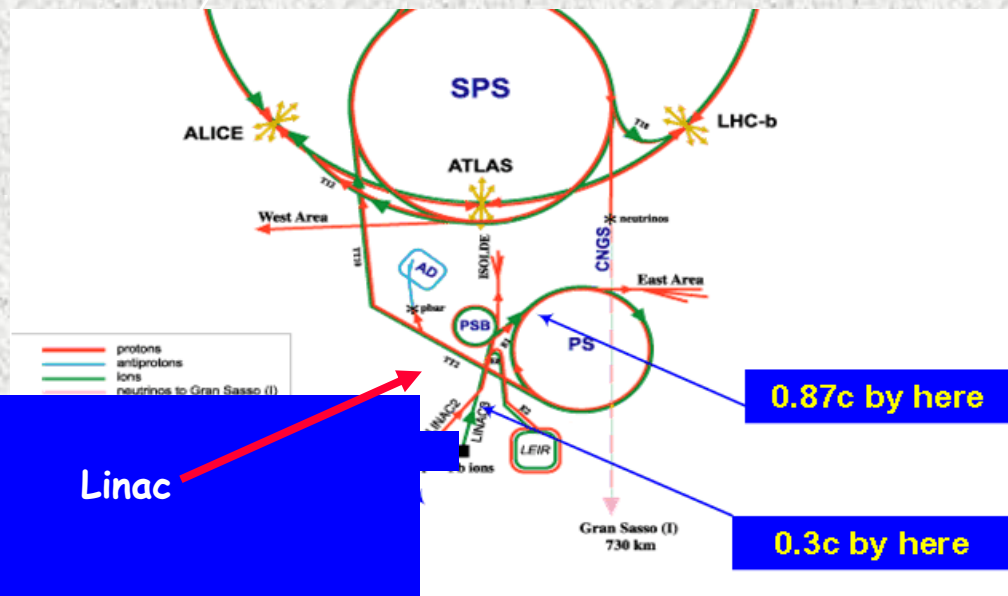


Wideroe

1928.

častice sa zgrupujú dokopy (klobásky), aby sme zaistili, že elektrické pole má správny smer v čase keď klobáska príleti do danej "medzery"

Rýchlosť častíc sa stále zvyšuje, preto dĺžka modulov sa zväčšuje tak, aby prílet častíc bol synchronizovaný zo smerom elektrického pola v danej medzere



Alvarez: Resonance tank

Dostredivá sila = -Odstredivej sila:

$$\frac{mv^2}{r} = Bqv$$

Kontinuálny tok častíc (nie klobásky)

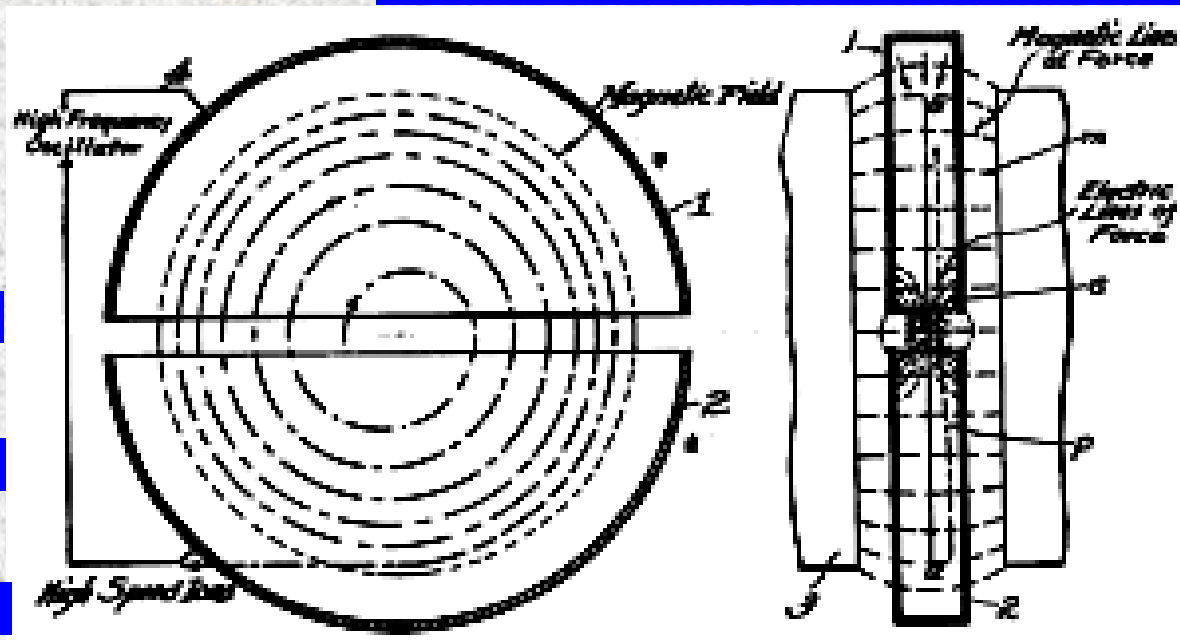
To isté, inak:

$$\frac{v}{r} = \frac{Bq}{m}$$

$$\omega = \frac{Bq}{m}$$

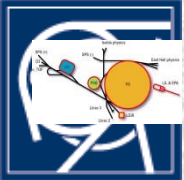
$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$f = \frac{Bq}{2m\pi}$$

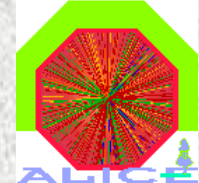


Frenkvencia nezávisí od polomeru, ale len v nerelatickej limite! Toto nie je pravda pri vysokých enrgiách ak prejdeme do relativistického režimu. Frenkvencia sa musí meniť v závislosti na rýchlosti častíc: **synchrociklotron**.



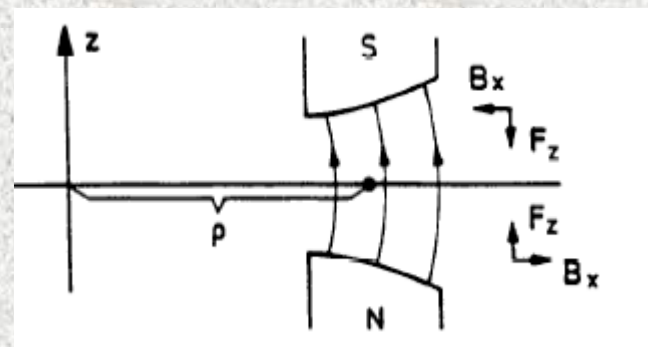
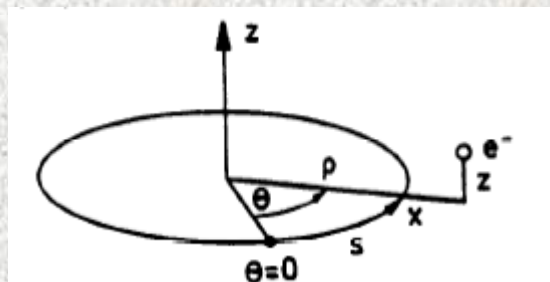
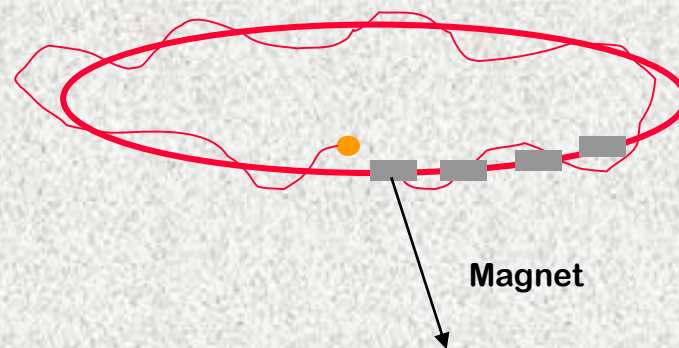
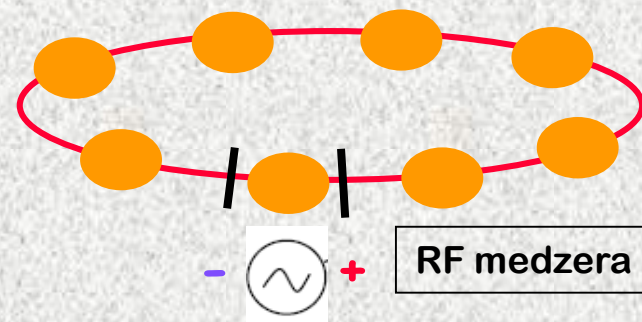


Synchrotrón

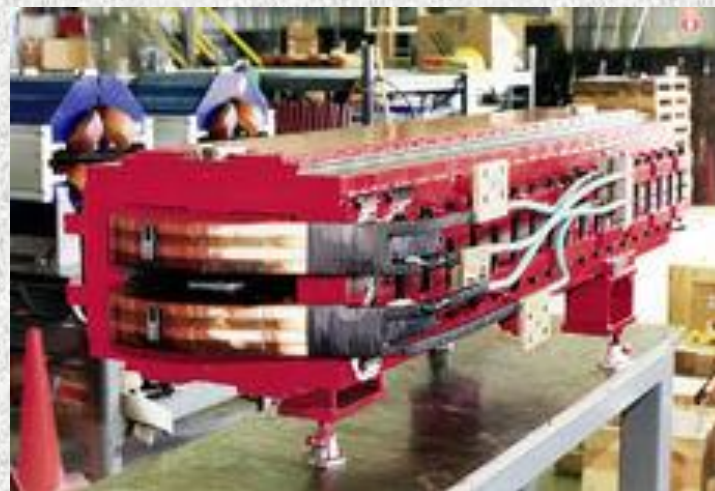


Skupiny častíc (klobásky) obiehajú synchronne s radiofrkvenčným polom v urýchlovacej kavite

Každá častice obieha neďaleko ideálnej (teoretickej) orbity: aby toto fungovalo urýchľovanie a magnetické polia musia splnať kritéria stability



Dipolový magnet zatača dráhu častíc v horizontálnej rovine (vertikálne pole)



$$F_x = -ev_s B_y$$

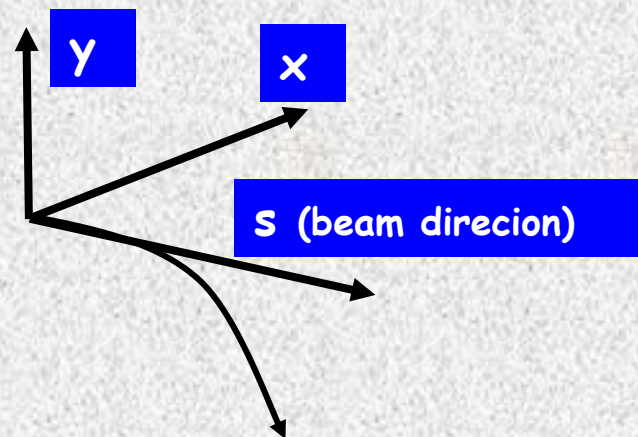
$$F_r = mv_s^2 / \rho$$

$$p = mv_s$$

$$\frac{1}{\rho(x, y, s)} = \frac{e}{p} B_y(x, y, s)$$

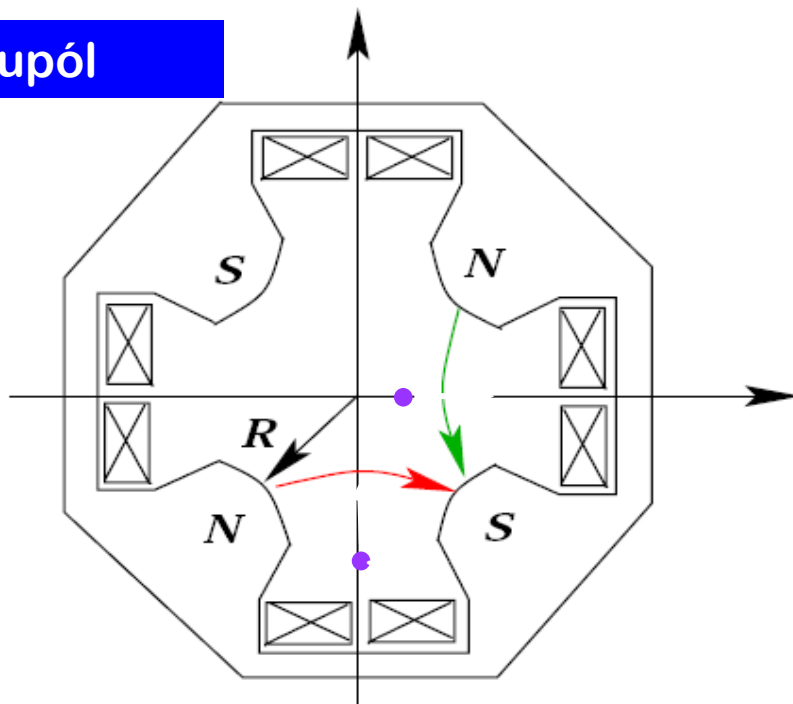
$$B\rho = \frac{p}{e}$$

”Magnetická rigidita”



Castice musíme fukusovať, aby zostali v urýchlovaci
Podobne ako v optickom systéme

Kvadrupól



**Kladný náboj
pohybujúci sa
smerom k nám:
Defokusuje sa v
horizontálnej
rovine, fokuje sa
vo vertikálnej
rovine.**

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = Q * \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

$$B_x = -g \cdot y$$

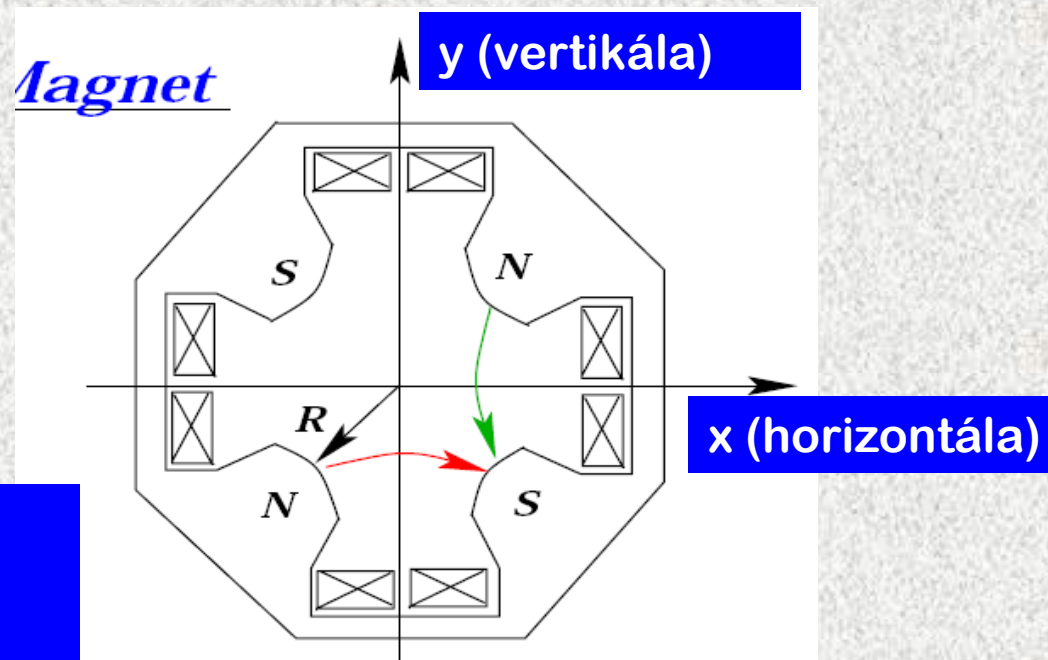
$$B_y = -g \cdot x$$

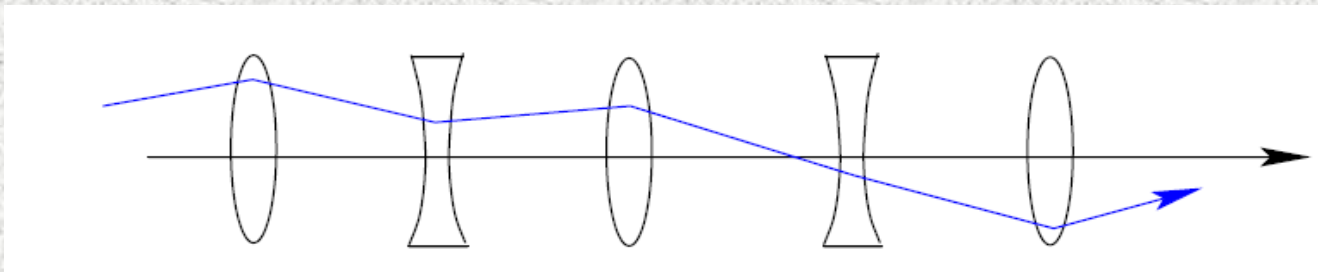
$$F_x = g \cdot x$$

$$F_y = -g \cdot y$$

Sila je úmerná vzdialenosti od stredu:

častice daleko od stredu magnetu sa zatačajú viac, dostanú väčšiu korekciu

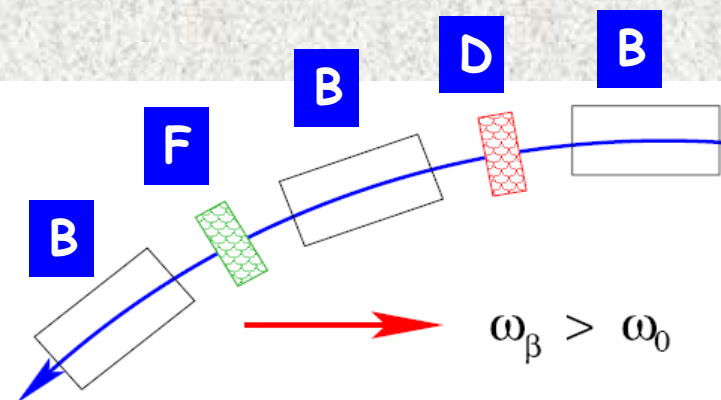


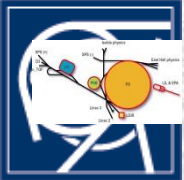


”Alternate gradient focusing” spravý celkový fokusujúci efekt (porovnajete napríklad s optickým systémom v kamerách)

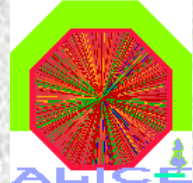
Zväzok potrebuje menej miesta vo vákuovej komore, amplitúdy sú menšie a pri rovnakom rozmere magnetov kvalita magnetického pola je lepšia (optimalizácia ceny)

Synchrotron: Magnety
striedajú orientáciu
kvadrupólového pola
(F – fokusácia, D -defokusácia)
(B – bending, zatocenie)

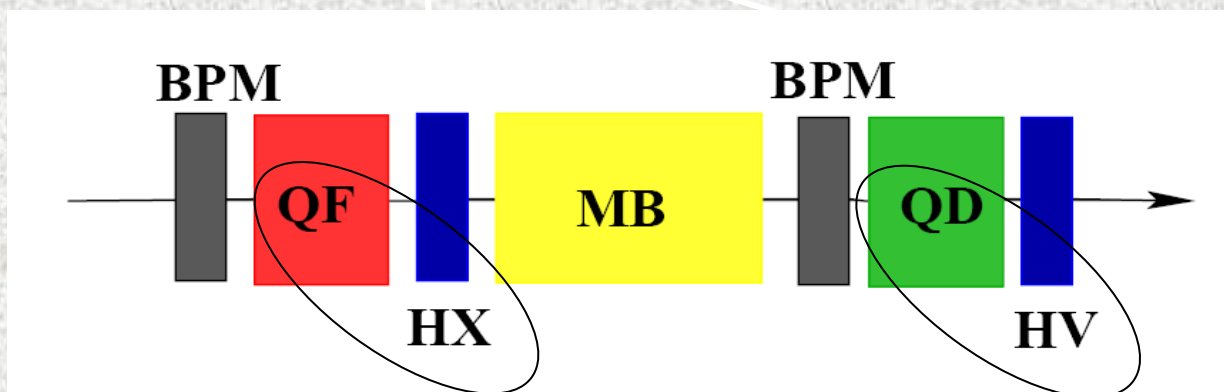




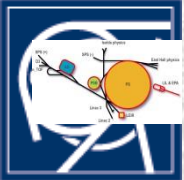
Korektory



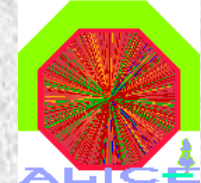
Beam Position Monitors (monitory polohy zväzku) merajú polohu zväzku v blízkosti kvadrupólu, zväzok má prechádzať v prostriedku...
Malé dipolové magnety sa používajú na korekcie možných chýb v pozícii zväzku.



Iné typy magnetov sa používajú na korekcie ďalších chýb, napríklad ne-ideálnosť magnetických polí



Možné chyby



Typy chýb, ktoré môžu ovplyvniť urýchlovací proces a musia sa korigovať:

Pohyb povrchu Zeme

Vlaky...

Mesiac

Ročné obdobie

Konštrukčné práce

...

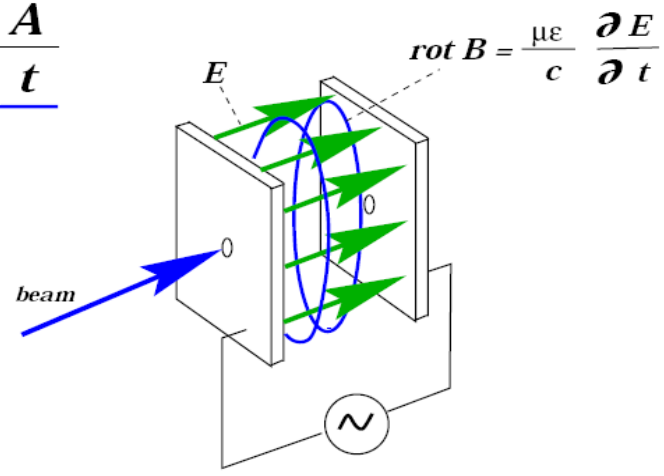
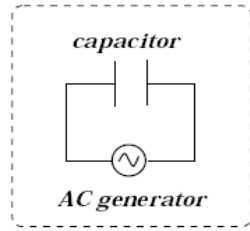
Kalibrácia magnetov je veľmi dôležitá

Regulácia prúdu v magnetoch

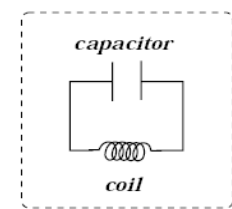
...

Energia častíc musí zodpovedať hodnote pol'a v magnetoch, aby častice zostali na svojej orbite. Kontrola urýchľovania!

●
$$\underline{E = - \frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}}$$

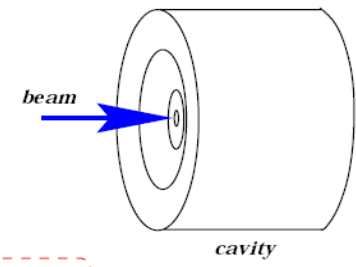
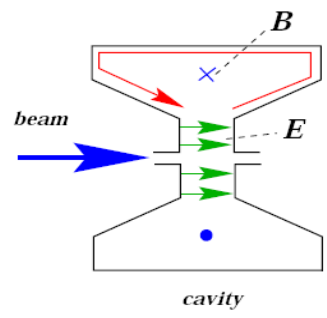


Rezonančný obvod Kavita pre urýchľovanie



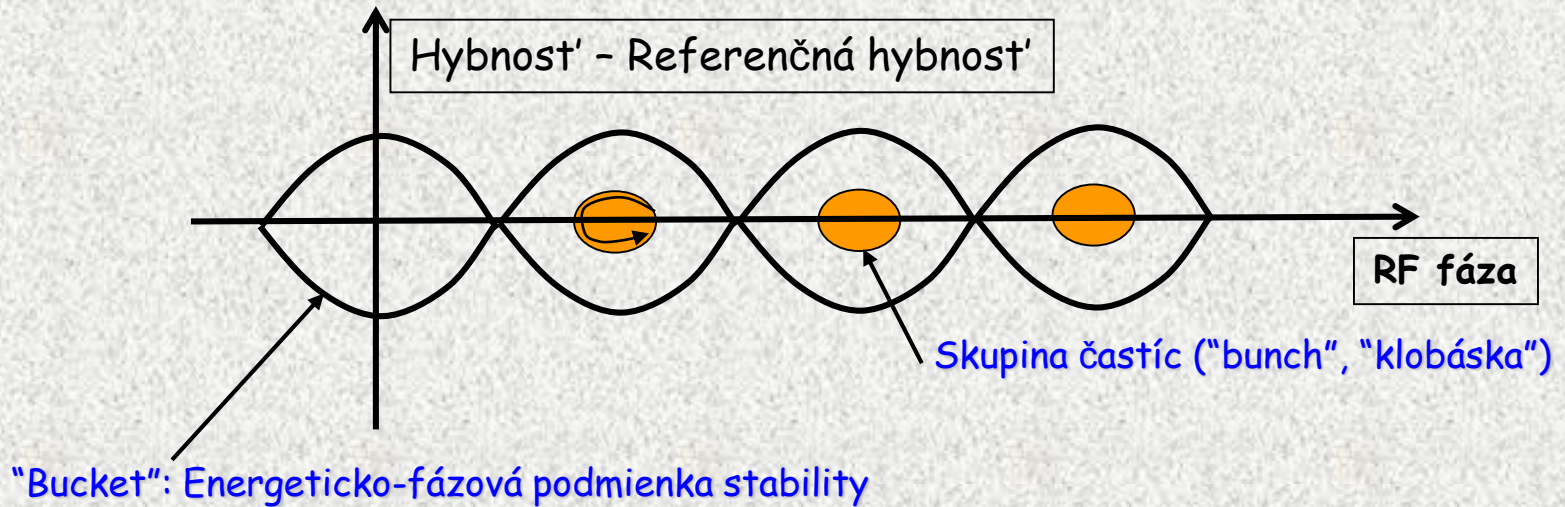
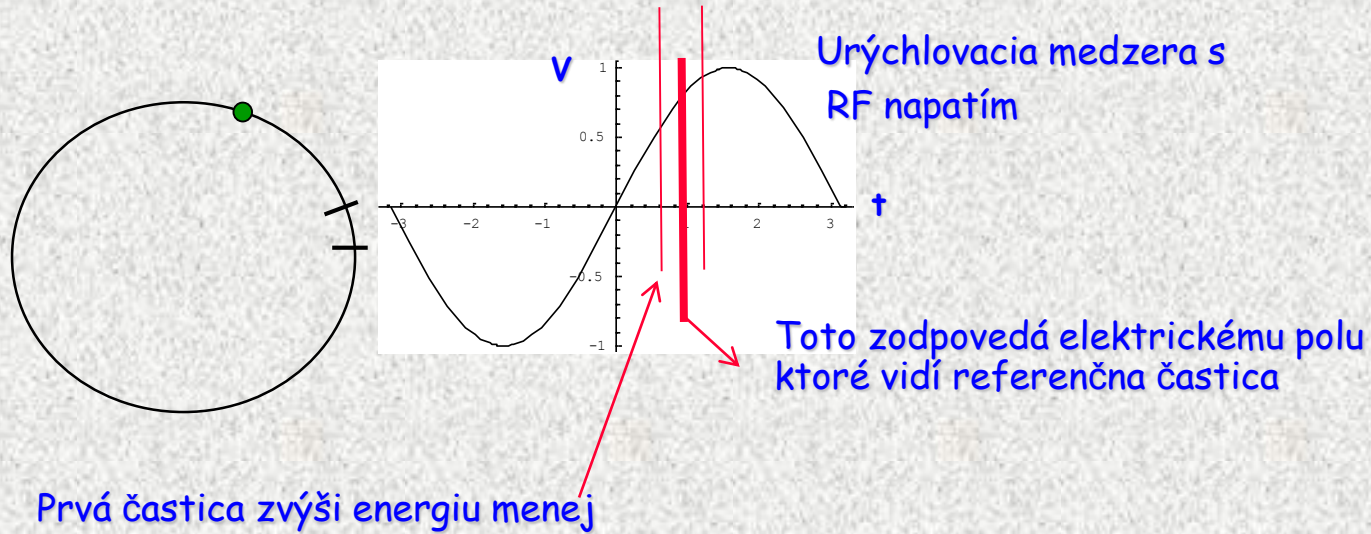
$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$



$f; Q; R$

Urýchľovanie v synchrotrone



Terčikové:

Bombardovanie materialu zväzkom vypusteným von z urýchlovača.

Bublinové komory

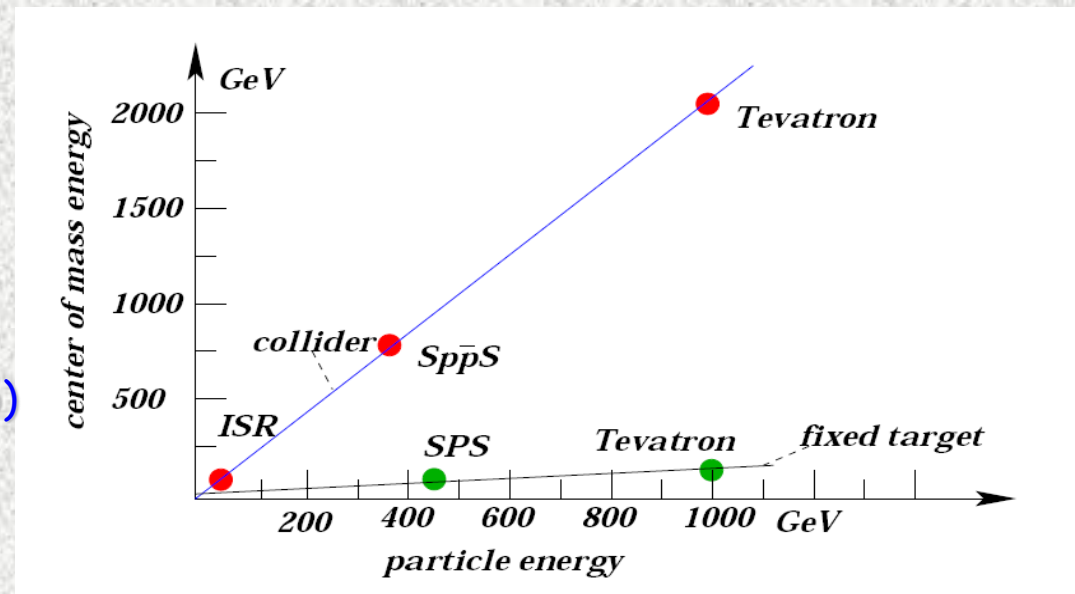
Použitelnú energiu treba počítat' v t'ážiskovom systéme (t.j. zrážajúce sa objekty)

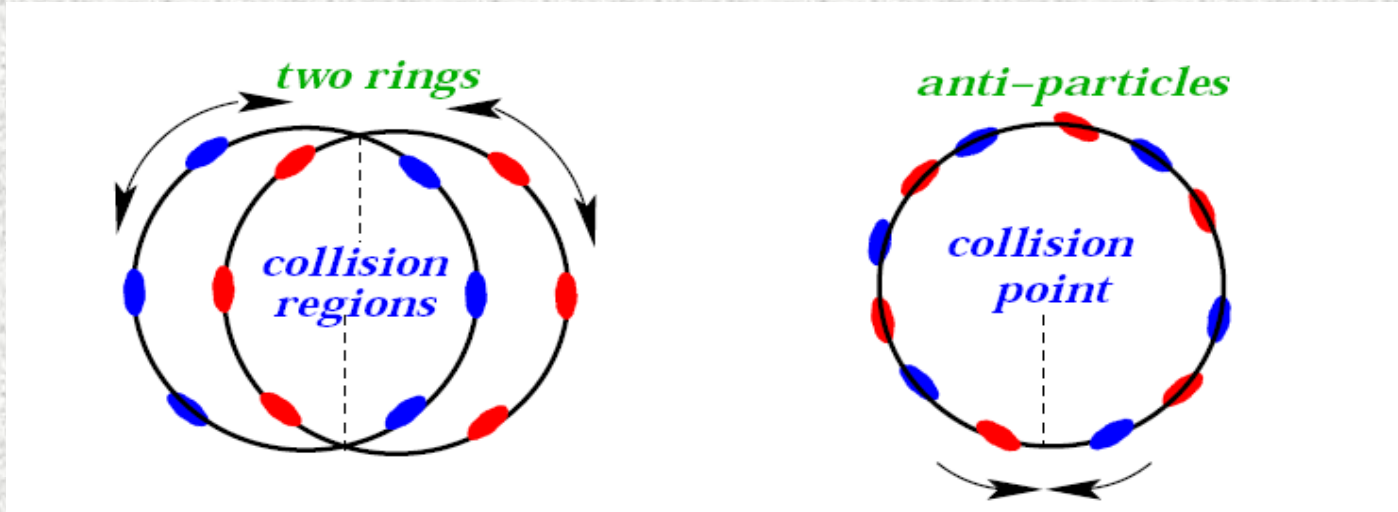
Zrážať častice je oveľa výhodnejšie

1960: elektrón/pozitrónový zrážač

1970: protón antiprotónový zrážač

2000: ionový zrážač, Au (zlato)

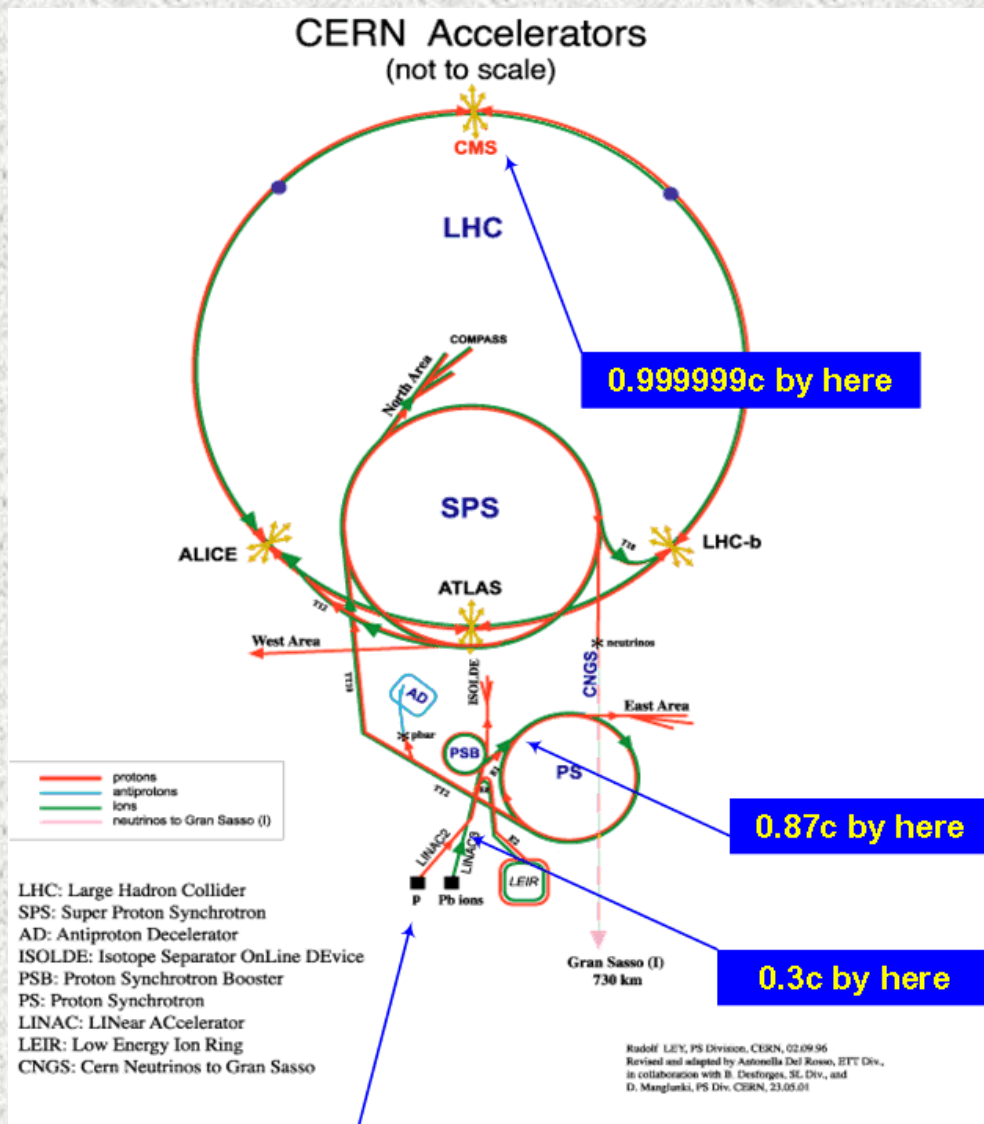
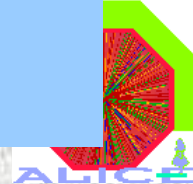




- ❑ Všetky častice sa nezrážajú v tom istom čase -> je potrebný dlhý čas
- ❑ Potrebujeme dva zväzky
- ❑ Antičastice sú odlišné (a drahé) na výrobu (~1 antiprotón potrebuje 10^6 protónov)
- ❑ Zväzky sa navzájom ovplyvňujú: zväzky musia byť separované keď sa nezrážajú



Urýchlovače v CERNe



Energie:

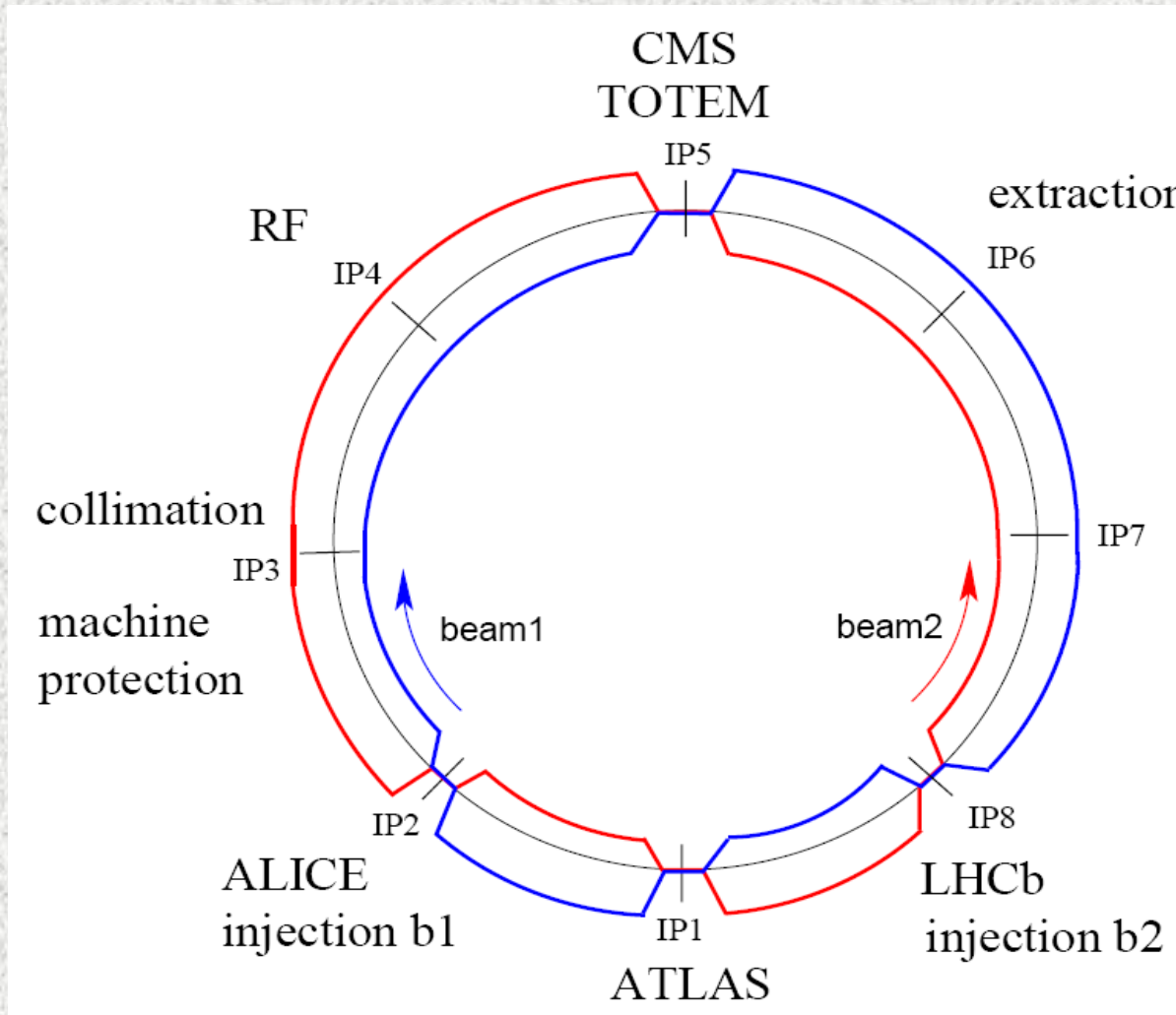
Linac 50 MeV

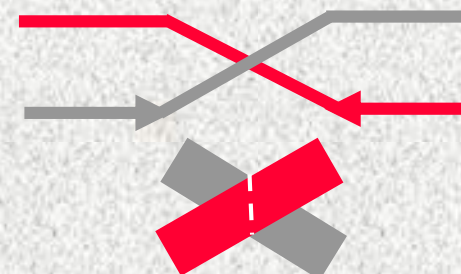
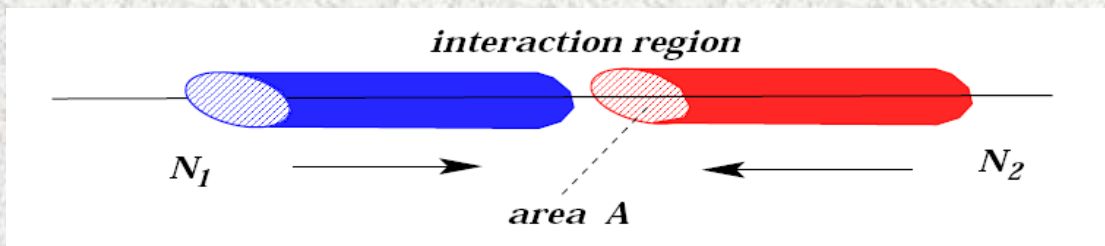
PSB 1.4 GeV

PS 28 GeV

SPS 450 GeV

LHC 7 TeV





$$N_{ev}/sec = \sigma \cdot L$$

$$A = \pi \epsilon \beta^*$$

$$x(s) = \sqrt{\epsilon \beta_x(s)} \cos\left(\frac{2\pi}{L} Q \cdot s + \delta\right)$$

Počet častíc v bunchi (klobáske) (dva zväzky) → N_b^2

Počet bunchov (klobások) vo zväzku → n_b

Frekvencia otáčania → f_{rev}

Formfactor z uhla zväzkov → F

Emitancia → $4\pi\epsilon\beta^*$

Optická beta funkcia → $4\pi\epsilon\beta^*$

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{rev} F}{4\pi\epsilon\beta^*}$$

Synchrotrónny svetelný kužel

Synchrotron light cone

Dráha častice

opening angle $\propto \frac{1}{\gamma}$

Elektromagnetické vlny

Urýchľované nabité častice vyžarujú fotóny

Radio signály and Röntgenové lúče

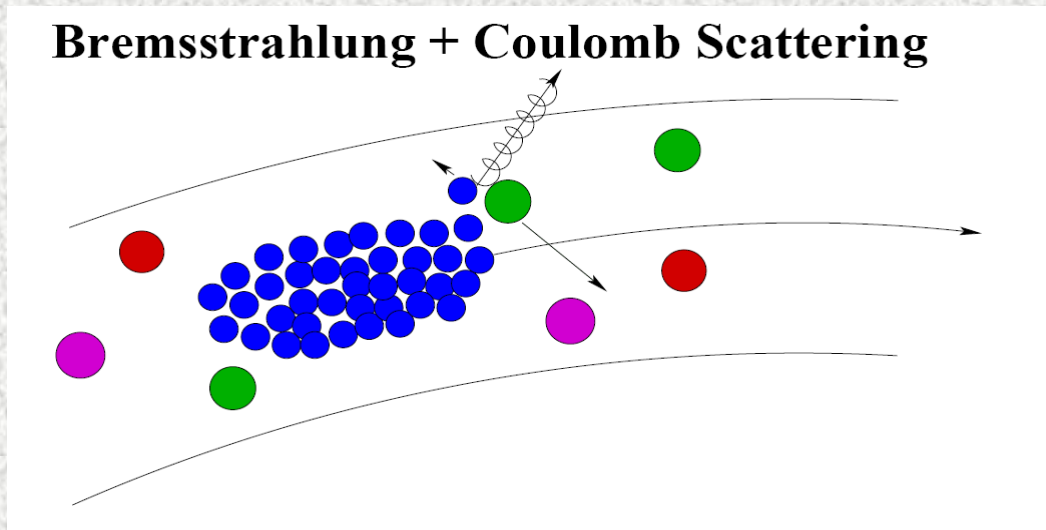
$$P \propto \frac{\gamma^4}{\rho^2}$$

$$E \propto \frac{\gamma^3}{\rho}$$

LEP: $\gamma = 200000$

LHC: $\gamma = 7000$

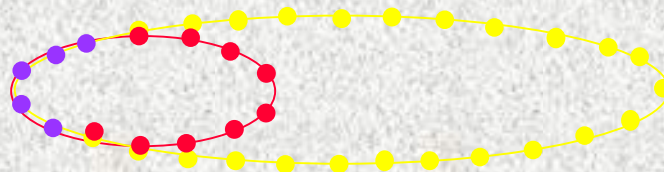
Bremsstrahlung + Coulomb Scattering



- ❑ "Nabuptnanie" zväzku
- ❑ Straty častíc
- ❑ Nežiadúce zrážky v experimentoch
- ❑ Limituje luminozitu

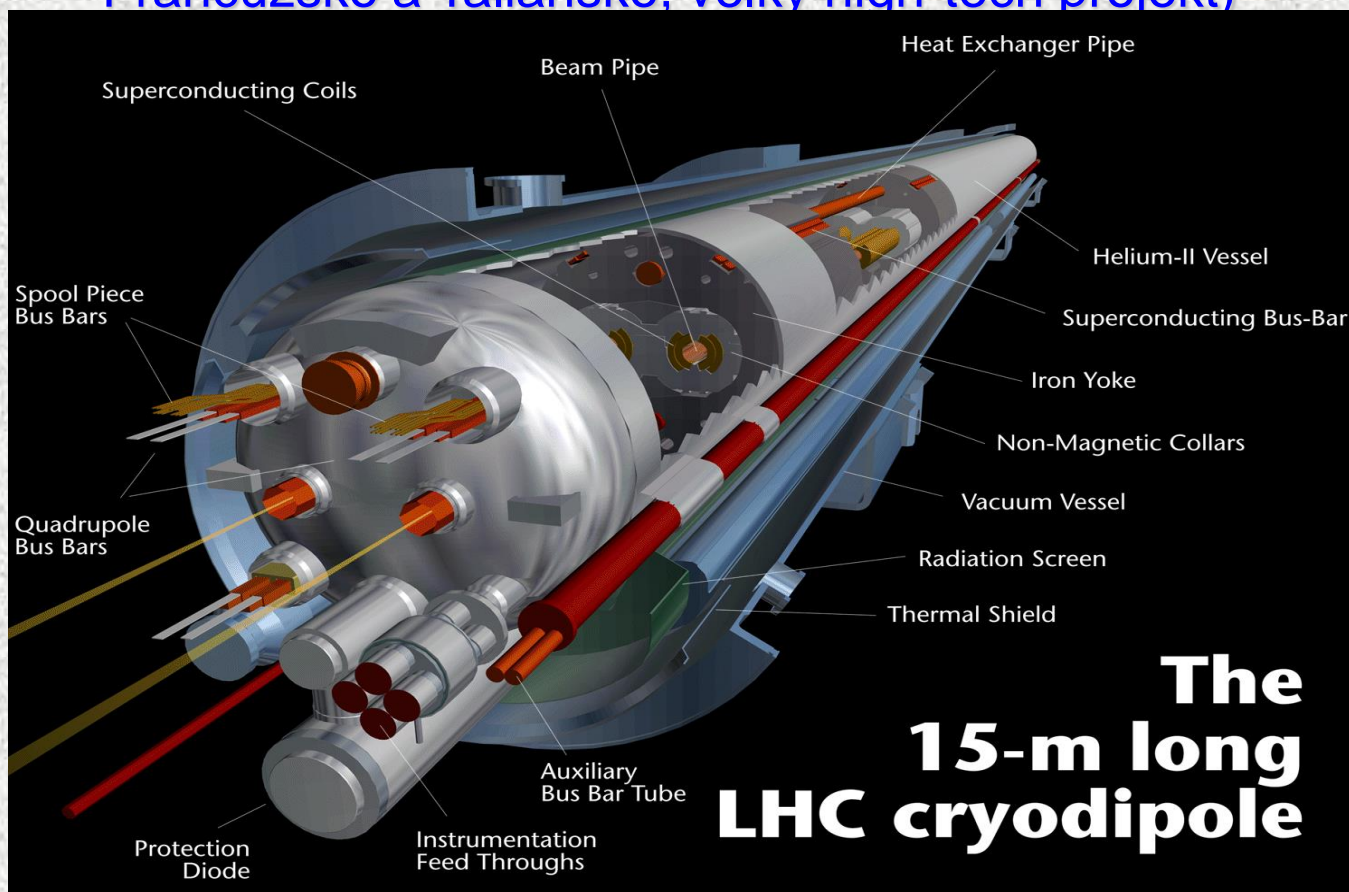
Prečo supravodivé magnety?

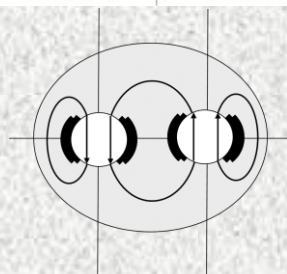
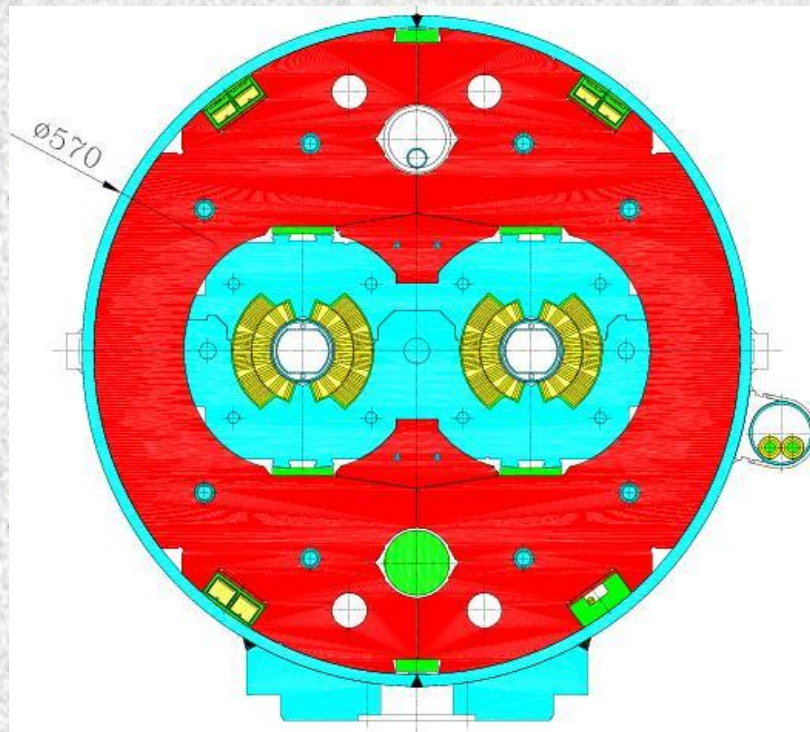
Menší polomer, menší počet častíc v urýchlovači, menší urýchlovač



Šetrenie energiou, ALE veľmi komplexná infraštruktúra

LHC dipóly (1232 + rezerva) vyrobené in 3 firmami (Nemecko, Francúzsko a Taliansko, veľky high-tech projekt)





“Dva v jednom” konštrukcia

Pracovná teplota 1.9 K!
Najchladnejšie miesto vo vesmíre...



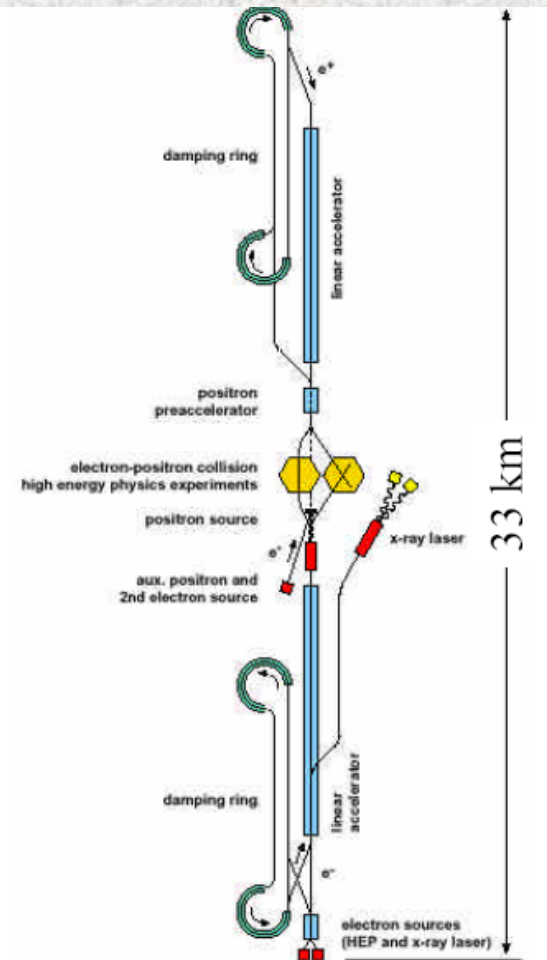
Table 2.1: LHC beam parameters relevant for the peak luminosity

		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}

Table 2.2: LHC beam parameters relevant for the luminosity lifetime

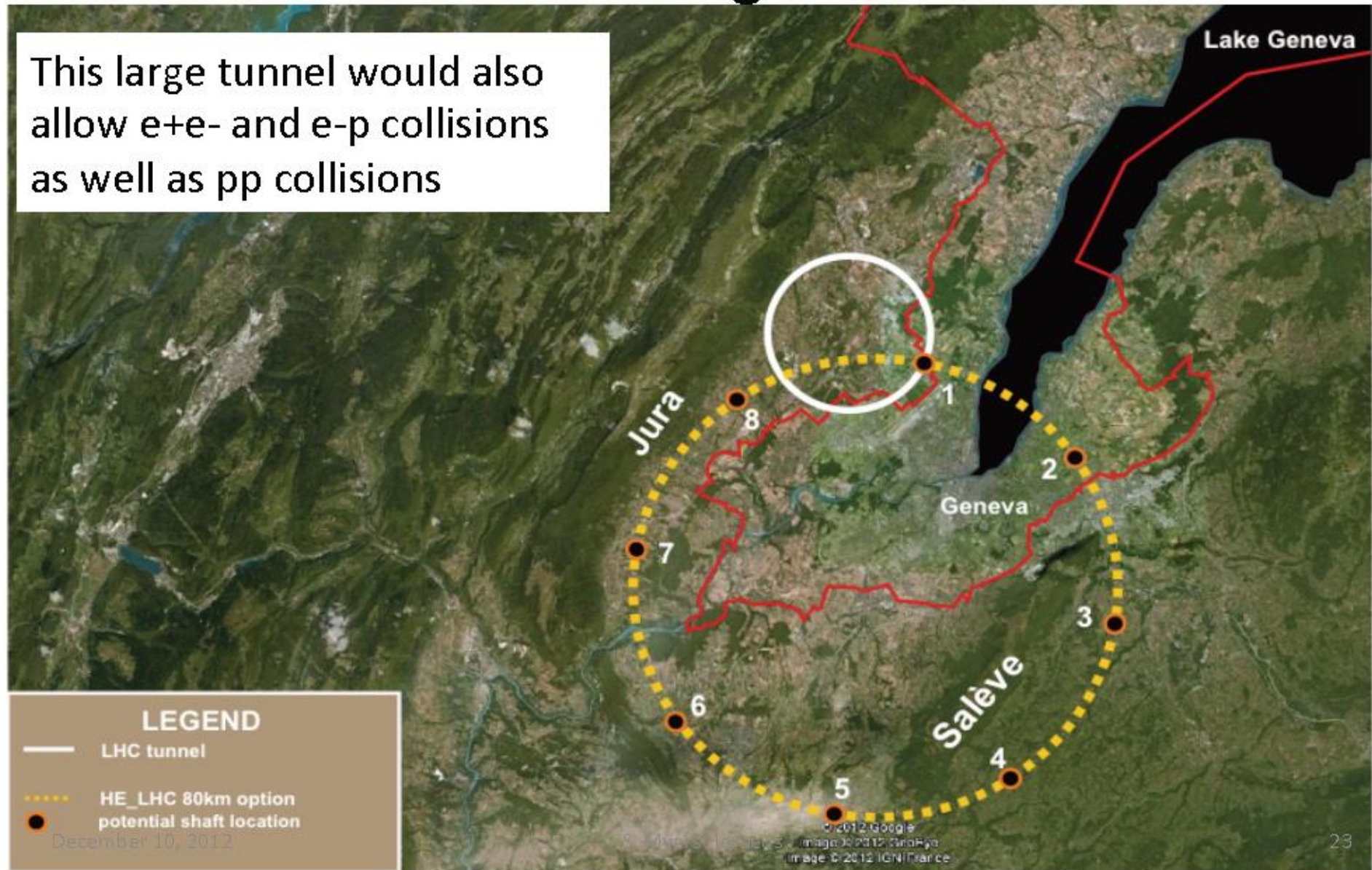
		Injection	Collision
Interaction data			
Inelastic cross section	[mb]	60.0	
Total cross section	[mb]	100.0	
Events per bunch crossing		-	19.02
Beam current lifetime (due to beam-beam)	[h]	-	44.86
Intra Beam Scattering			
RMS beam size in arc	[mm]	1.19	0.3
RMS energy spread $\delta E/E_0$	$[10^{-4}]$	3.06	1.129
RMS bunch length	[cm]	11.24	7.55
Longitudinal emittance growth time	[hours]	30 ^a	61
Horizontal emittance growth time	[hours]	38 ^a	80
Total beam and luminosity lifetimes^b			
Luminosity lifetime (due to beam-beam)	[hours]	-	29.1
Beam lifetime (due to rest-gas scattering) ^c	[hours]	100	100
Beam current lifetime (beam-beam, rest-gas)	[hours]	-	18.4
Luminosity lifetime (beam-beam, rest-gas, IBS)	[hours]	-	14.9
Synchrotron Radiation			
Instantaneous power loss per proton	[W]	3.15×10^{-16}	1.84×10^{-11}
Power loss per m in main bends	$[Wm^{-1}]$	0.0	0.206
Synchrotron radiation power per ring	[W]	6.15×10^{-2}	3.6×10^3
Energy loss per turn	[eV]	1.15×10^{-1}	6.71×10^3
Critical photon energy	[eV]	0.01	44.14
Longitudinal emittance damping time	[hours]	48489.1	13
Transverse emittance damping time	[hours]	48489.1	26

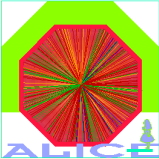
- two projects presently under study:
- **ILC (International Linear Collider)**
 - Technology decision Aug 2004
 - **Superconducting** technology
 - 1.3 GHz RF frequency
 - ~31 MV/m accelerating gradient
 - **500 GeV** centre-of-mass energy
 - upgrade to **1 TeV** possible
- **CLIC (Compact Linear Collider)**
 - **normalconducting** technology
 - **multi-TeV** energy range (1-5 TeV)



Thinking BIG

This large tunnel would also allow e^+e^- and $e-p$ collisions as well as pp collisions

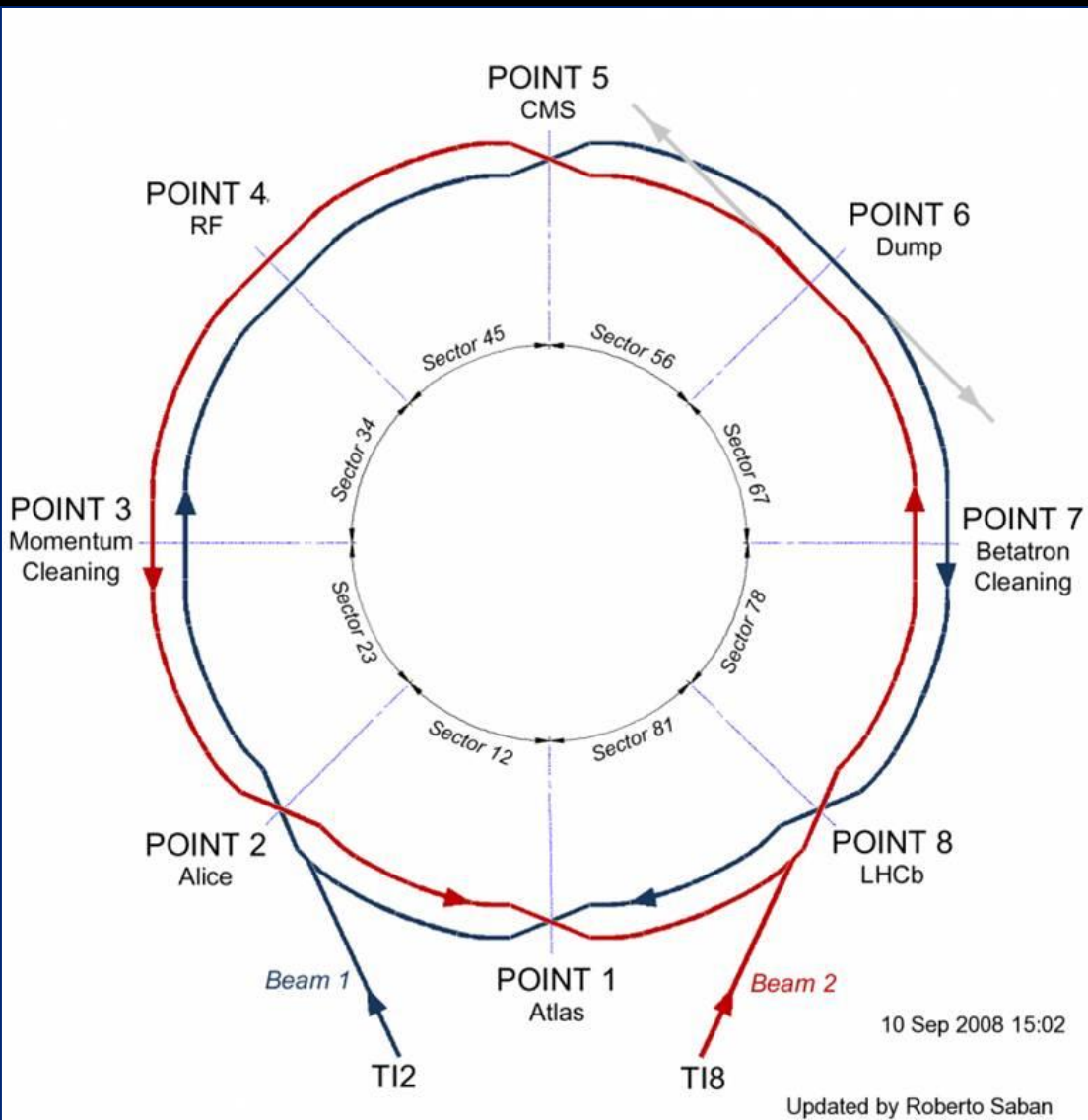




Čo sa stalo s LHC?



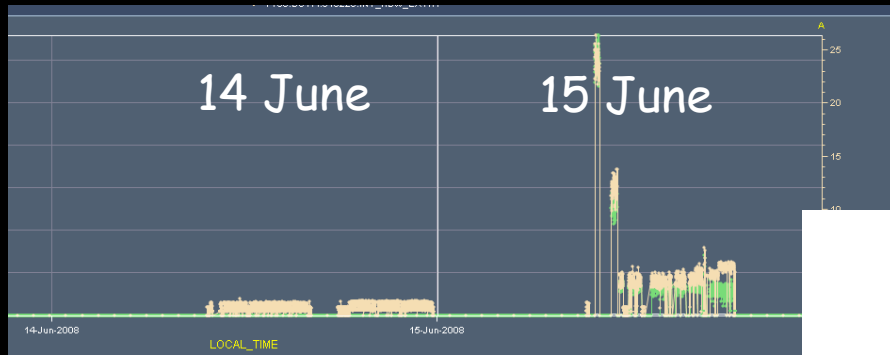
Častice v LHC



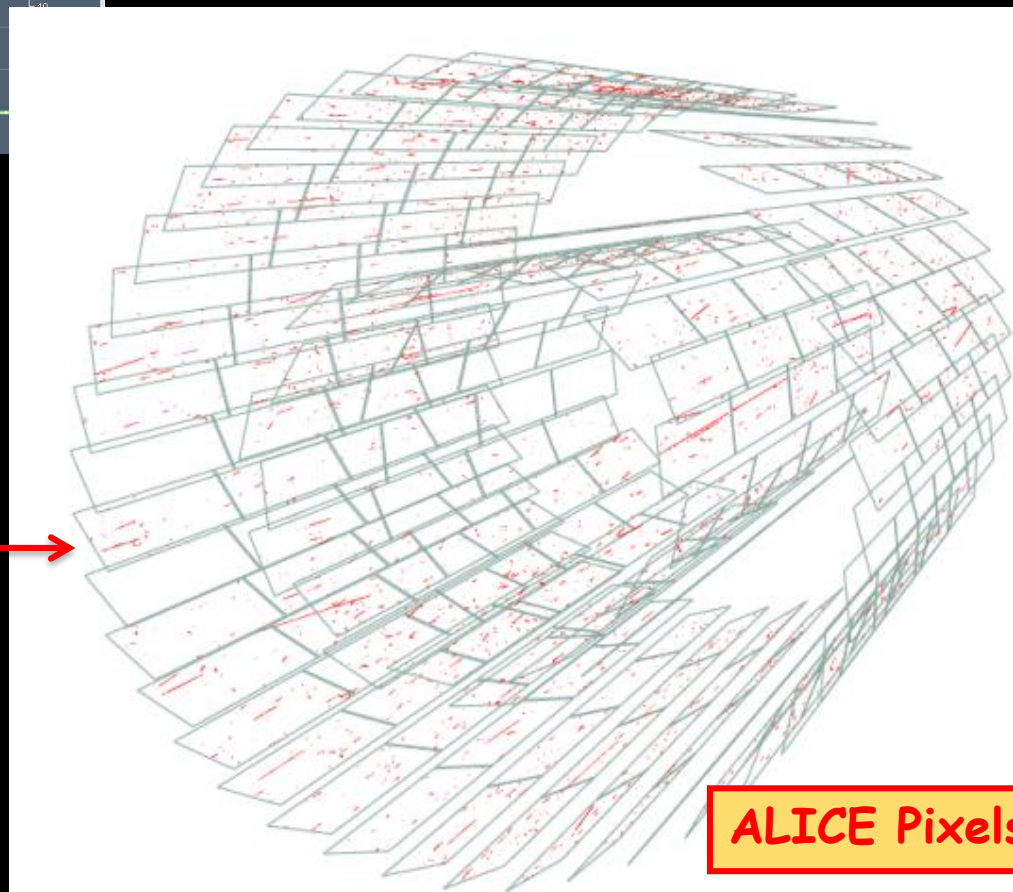
- first signs of life...
 - 14-15 June
 - extraction in TI2 and dump
- injection tests
 - 1) 8-11 August
 - first injection in LHC (beam 1)
 - 2) 22-24 August
 - first injection of beam 2
 - 3) 5-7 September
- circulating beams
 - 10 September

Extraction tests: 14-15 June

Federico Antinori, SQM2008

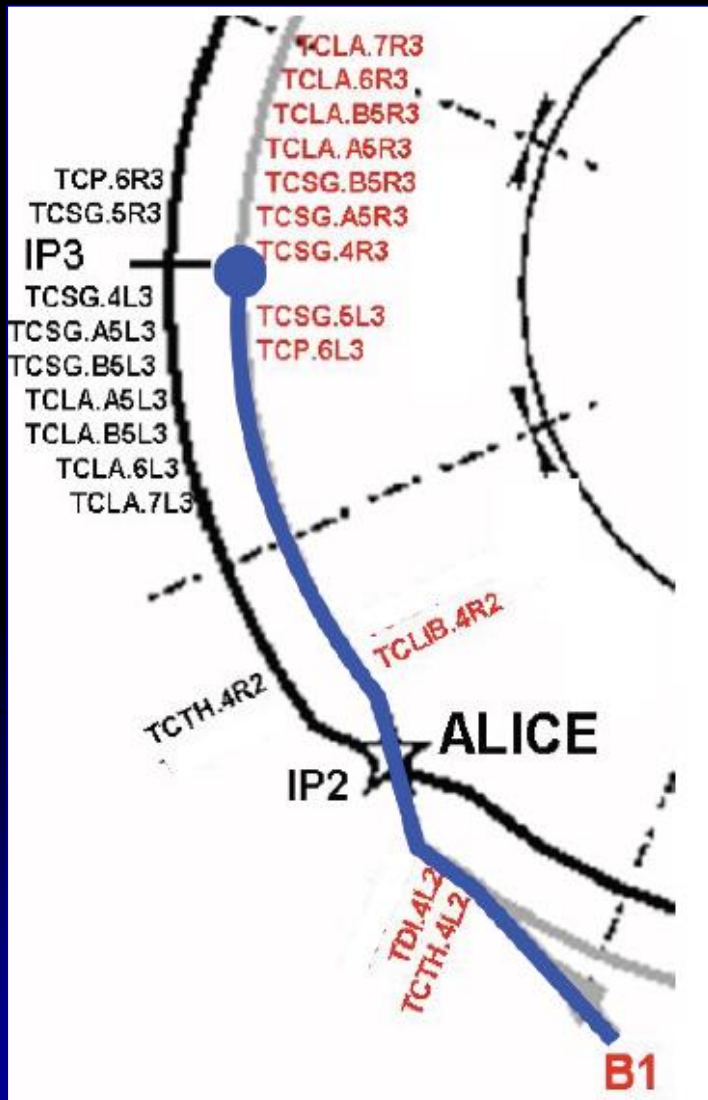


- beam extracted from the SPS and dumped in the transfer line
- muons make it all the way to ALICE →



ALICE Pixels

08.08.08: First Injection in LHC!

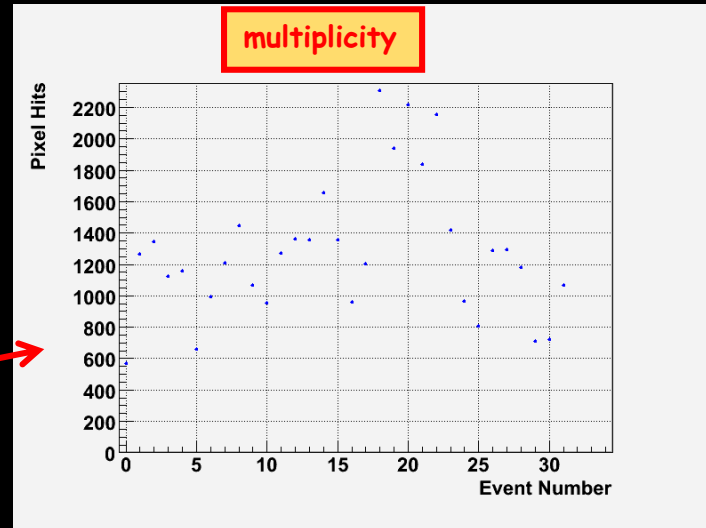


同一个世界 同一个梦想
One World One Dream

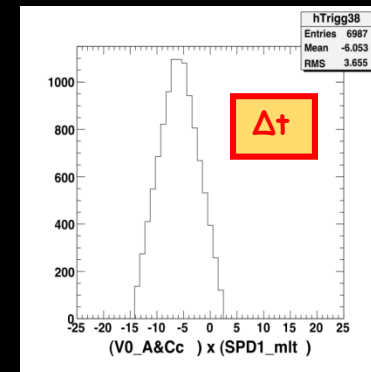
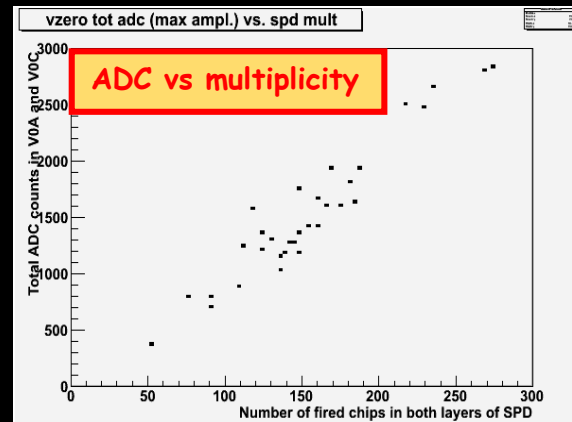
First injection in the LHC!

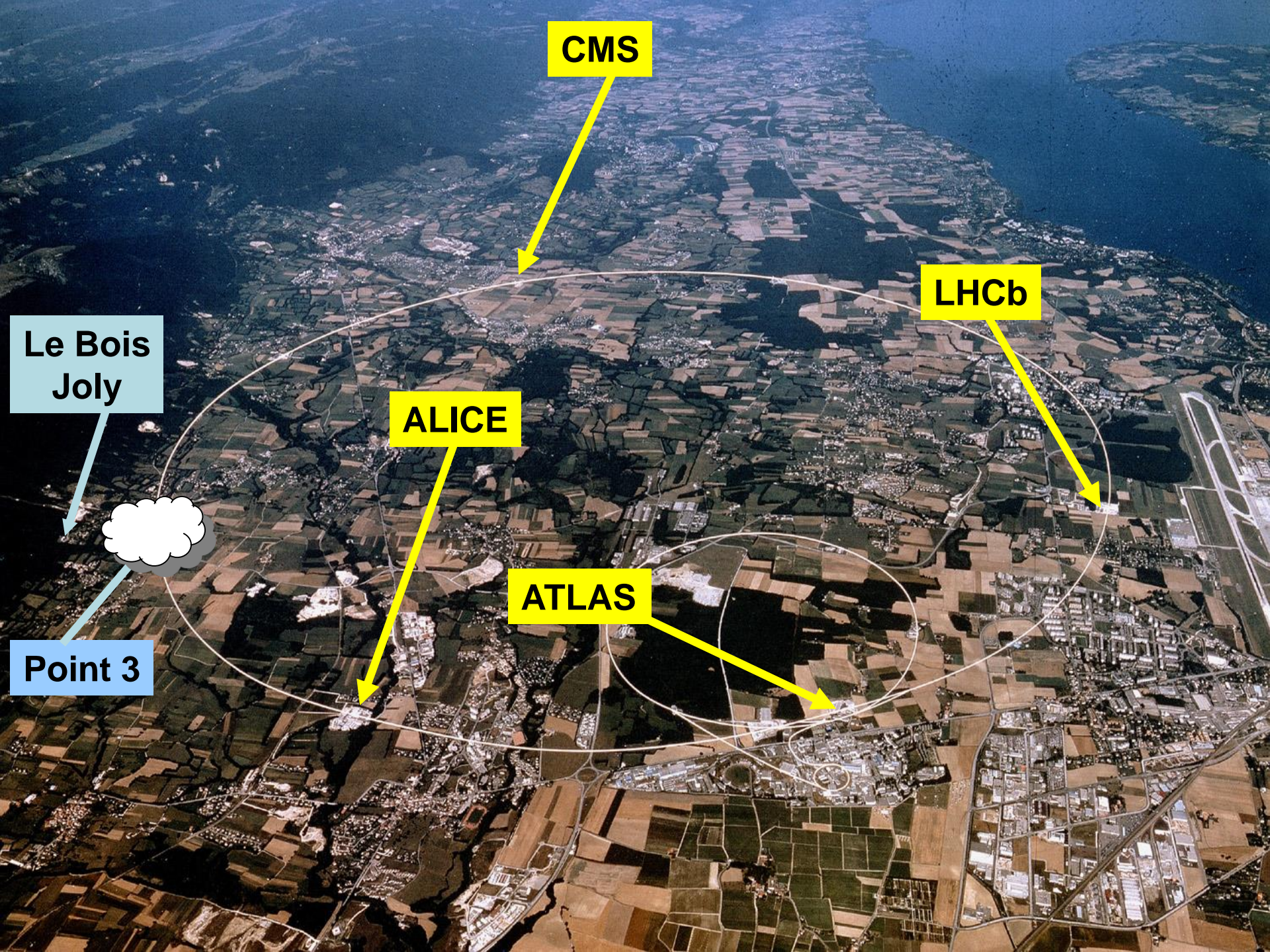
- 8 August 2008
- ALICE SPD (pixel) and V0 (scintillator) switched on during first phase (upstream dump)
 - pilot bunches: $\sim 5 \cdot 10^9$ protons
- Trigger: ≥ 10 hits on layer 2
- 32 events triggered
 - Run 51403 (16:53 to 18:05)

• SPD



• V0 vs SPD





CMS

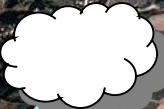
LHCb

ALICE

ATLAS

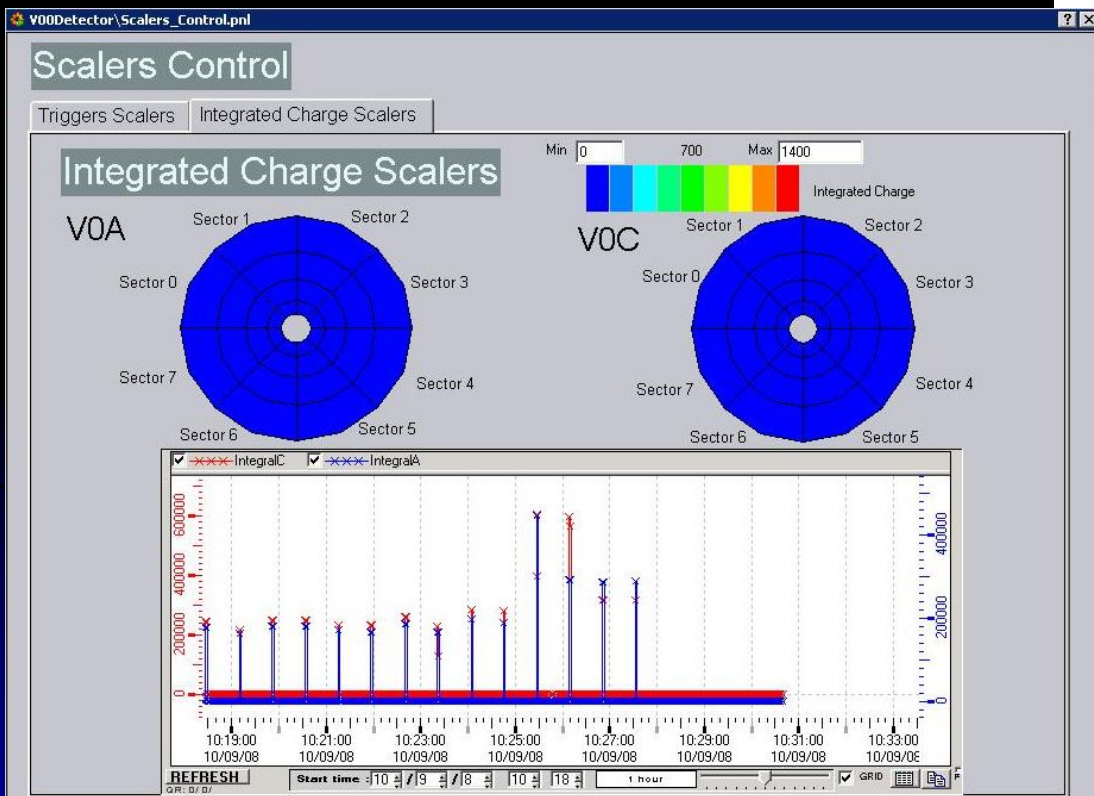
**Le Bois
Joly**

Point 3

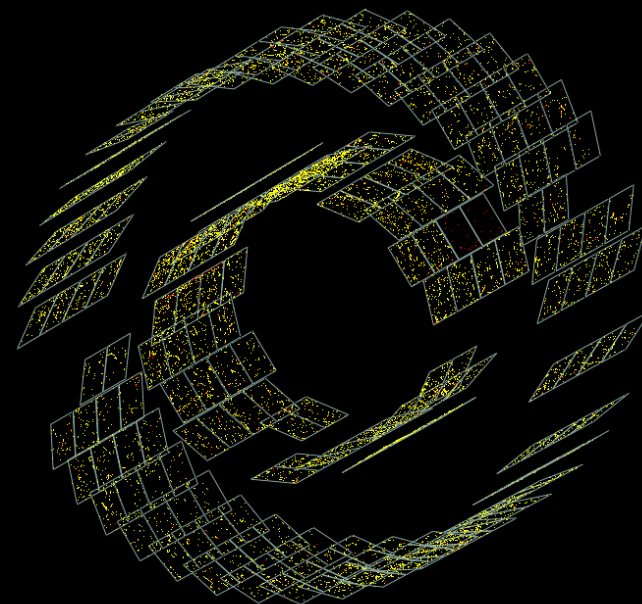


10 September: circulating beams!

- beam 1: 1st complete orbit ~ 10:30



- first signals from ALICE

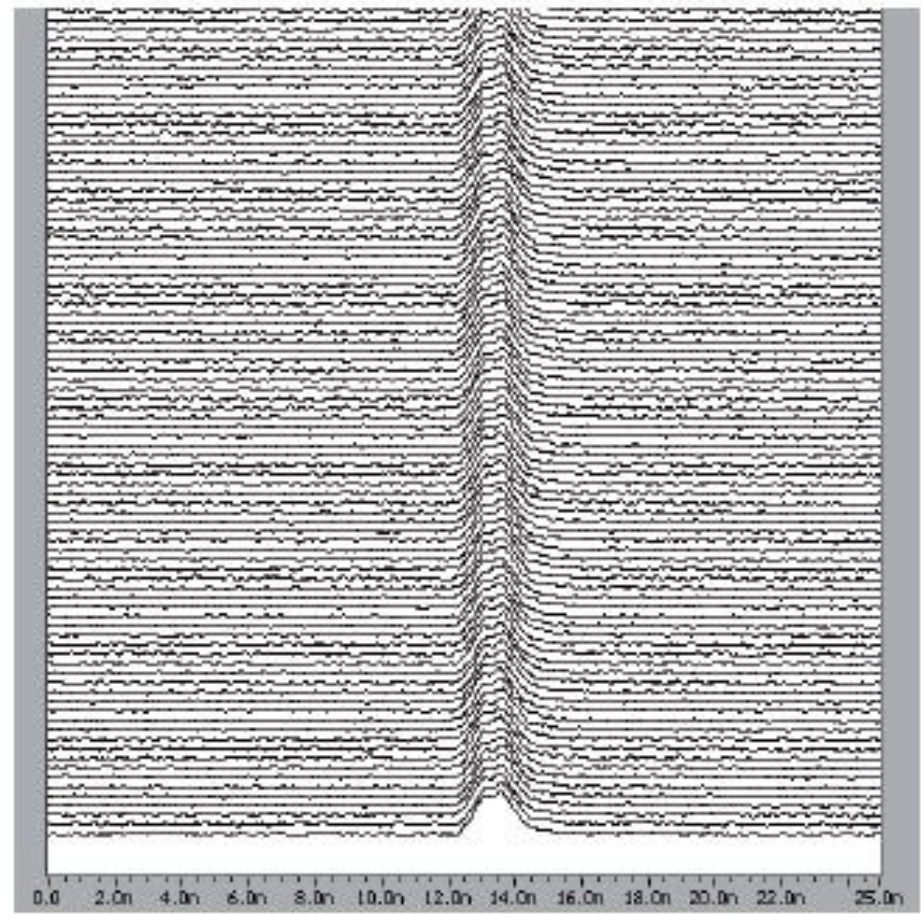
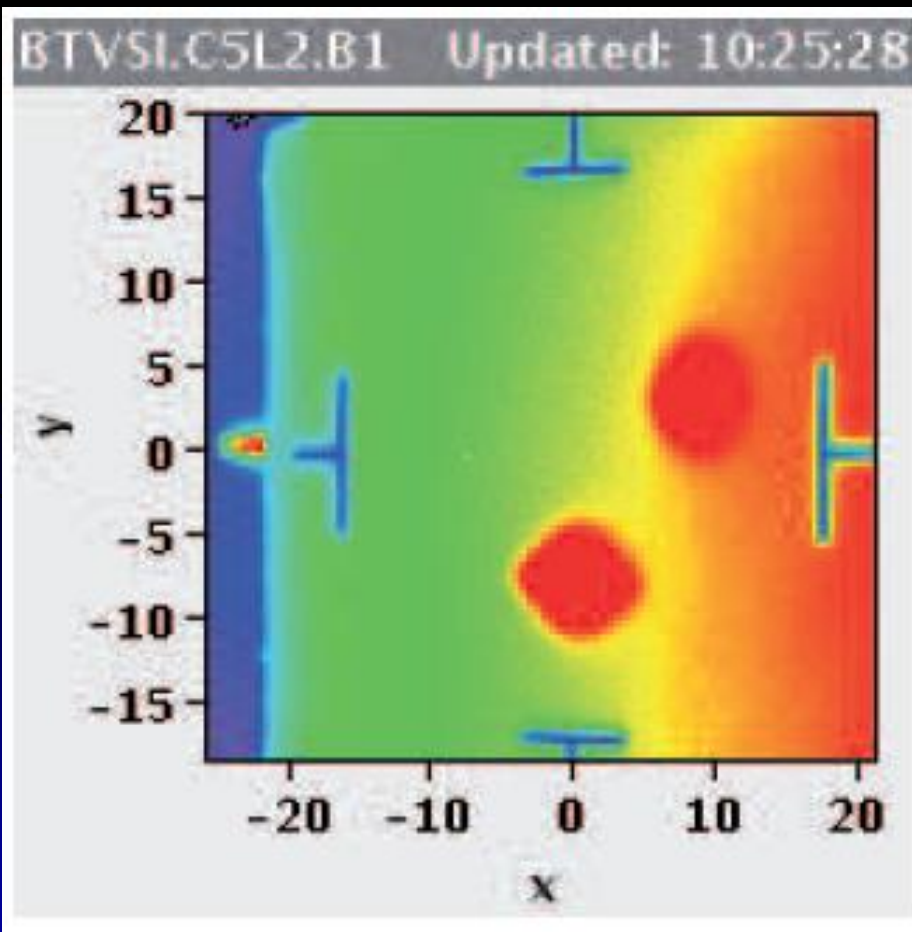


- beam 2: 1st complete orbit ~ 15:00

LHC operation 10 - 11 September

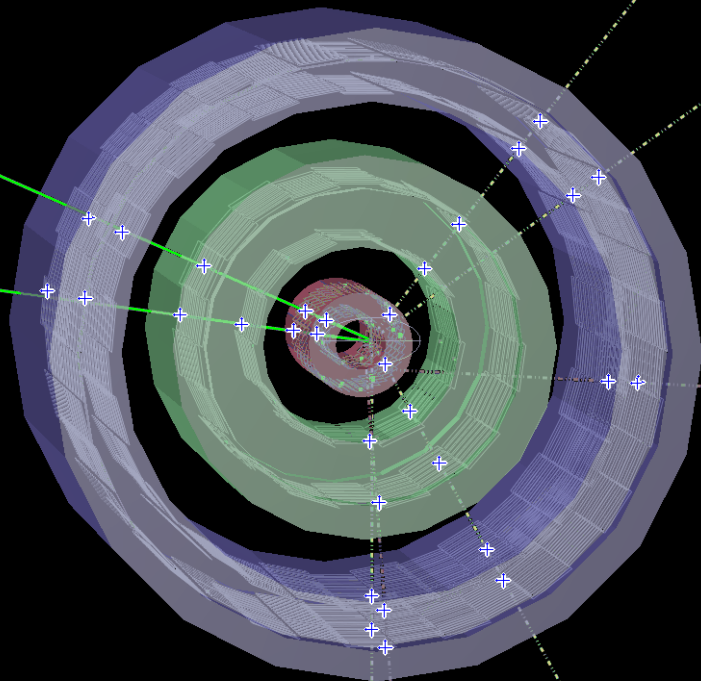
First orbit

RF capture

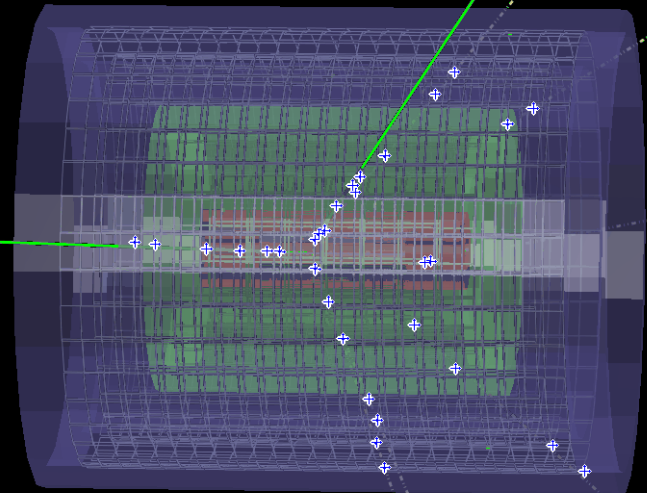


11 September: RF capture (Physics data!)

- 11 September, ~ 22:35 first capture
 - beam 2 kept in orbit for over 10 minutes!
- series of injections with tens of mins RF capture during night
 - in ALICE: 673 events in total
- → first data for Physics (beam 2 background)



run 58338
event 27



First circulating beam: background rates

Sept 11th beam had circulated more than 6 million times !!!

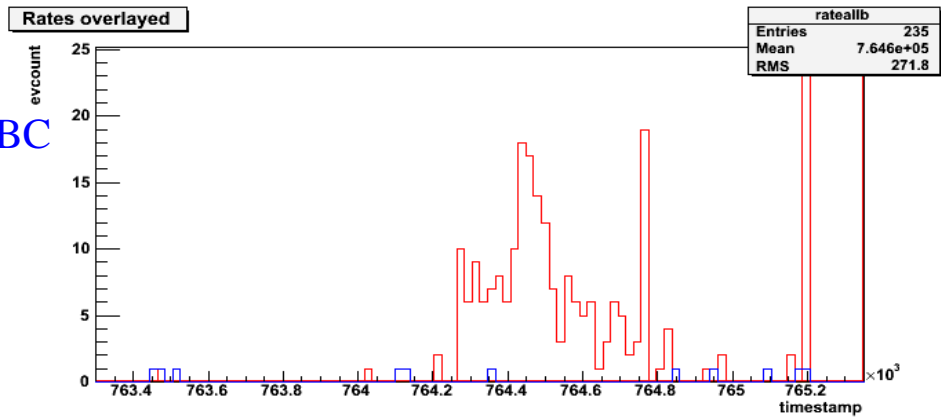
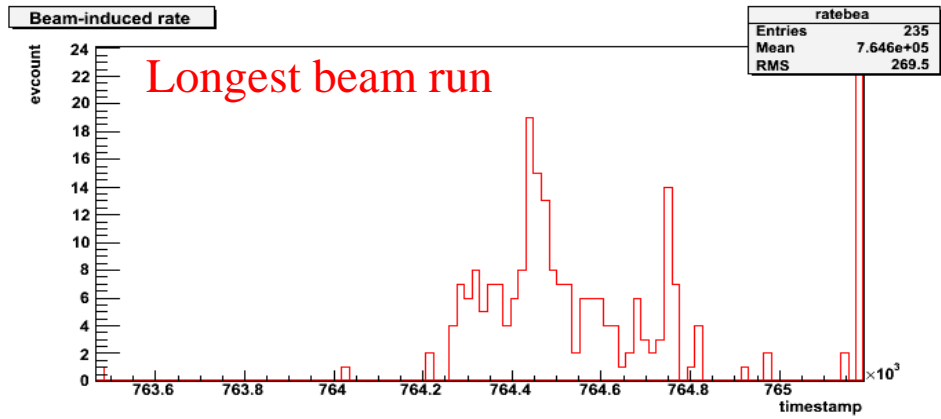
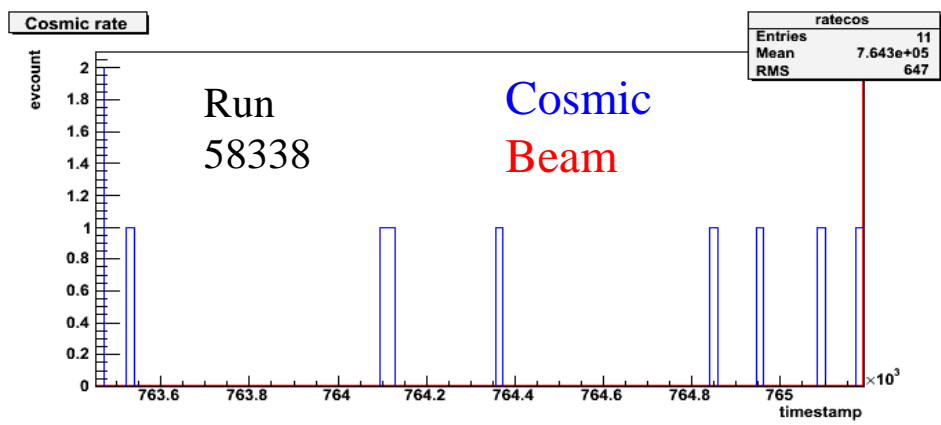
A.Kisiel

Background rate

Run 58338: First event: 21:47:39,
 last event: 21:53:09 – total 920 sec.
 Total 235 events. Rate: 0.2554 Hz
 $11 \cdot 10^{-3}$ orbits/sec. Rate: $2.3 \cdot 10^{-5}$ /orbit
 Intensity: $2 \cdot 10^9$ p. Rate: $1.15 \cdot 10^{-4}$ /orbit 10^9 p
 Estimate for 10^{10} p intensity
 and two beams: $2.3 \cdot 10^{-4}$ /orbit

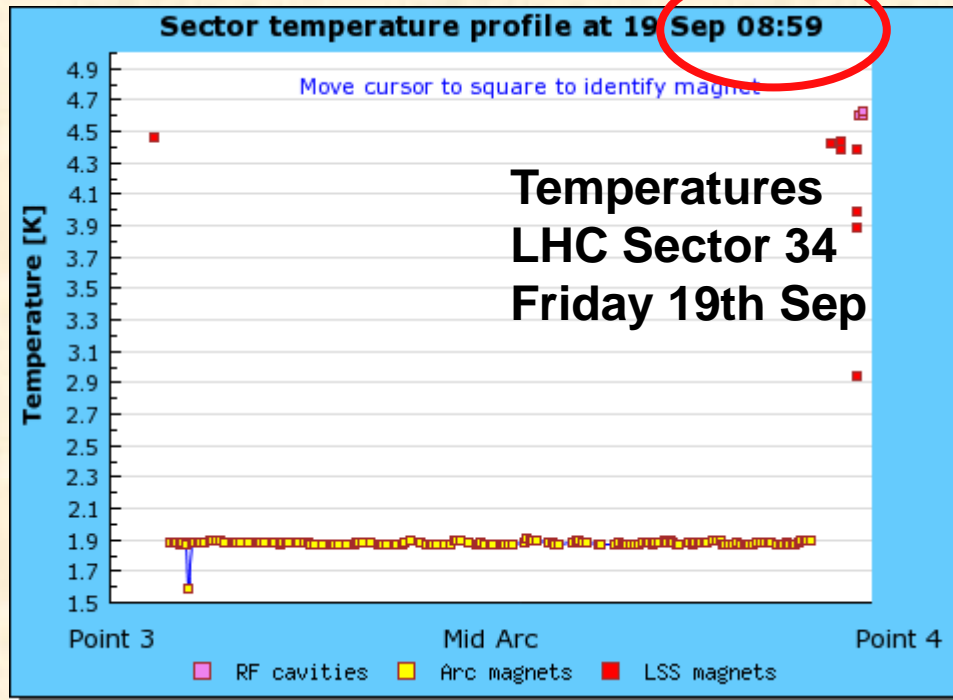
Event rate

At 450 GeV $\beta^*=10$ m, transverse size $270 \mu\text{m}$
 At beam intensity $N_p=2 \cdot 10^9$, luminosity is
 $L_b=5 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, interaction probability: $I_b=3 \cdot 10^{-5}/\text{BC}$
 At $N_p=5 \cdot 10^{10}$ probability is $I_b=1.875 \cdot 10^{-2}/\text{BC}$
 compared to the background rate
 estimate of $0.115 \cdot 10^{-2}/\text{orbit}$.



Fate of Physics at LHC

● ...and we were 5' from it...



Jan Fiete Grosse-Oetringhaus

So: what happened on 19 Sept?

- 19 September, ~ 11:30: large helium leak in sector 34
 - helium escaped in the tunnel
 - insulation vacuum broken
 - beam vacuum broken (up to sector valves)
- confirmed: due to electrical fault
 - resistive splice in interconnect
- magnets in sector 34 were being commissioned to 5 TeV (10kA)
 - at 450 GeV (1kA) worked well
 - incident occurred at ~9kA
 - all other (7) sectors had been commissioned to 5 TeV (and above) without problems

When will beam resume?

- clear that recovery of sector 34 will take during the winter shutdown
- LHC operations are planned to restart in fall of 2009
 - precise planning being worked out
- "Chamonix meeting"
 - looking into different scenarios
 - one possibility is running over winter, till autumn 2010, and at the end a "standard HI run"
- ALICE now in shutdown mode
 - repairs
 - improvements
 - additional installations
 - ...