

Vysokofrekvenčné systémy urýchľovačov častíc



Radioelektronický seminár,
Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně,
9.10.2008

Daniel Valúch, CERN
daniel.valuch@cern.ch

Tieto materiály vyjadrujú súkromné názory, postoje a myšlienky autora, ktoré sa nemusia zhodovať s názormi, postojmi a myšlienkami Organizácie. Zverejnené materiály je možné používať len pre osobnú potrebu. Ich ďalšie šírenie je možné len v rozsahu autorského zákona a len s písomným súhlasom autora.

Vysokofrekvenčné systémy urýchľovačov častíc

- Vysokofrekvenčné systémy sú veľmi dôležitou súčasťou urýchľovača
- Riadia zväzkov v longitudálnej rovine
 - Urýchľovanie, udržiavanie obiehajúceho zväzku na konštantnej energii
 - Tlmenie pozdĺžnych oscilácií
 - Udržiavanie zväzku vo forme bunchov
- Riadia zväzkov v transverzálnej rovine
 - Utlmenie oscilácií po injekcii zväzku
 - Kompenzácia oscilácií spôsobených nedokonalým magnetickým poľom
 - Tlmenie oscilácií vznikajúcich vplyvom nestabilit od vysokých intenzít zväzku
- Generujú časovanie pre celý komplex
- Synchronizujú nadväzujúce urýchľovače
- Poskytujú diagnostiku obiehajúceho zväzku

VF systémy: urýchľovanie ₁

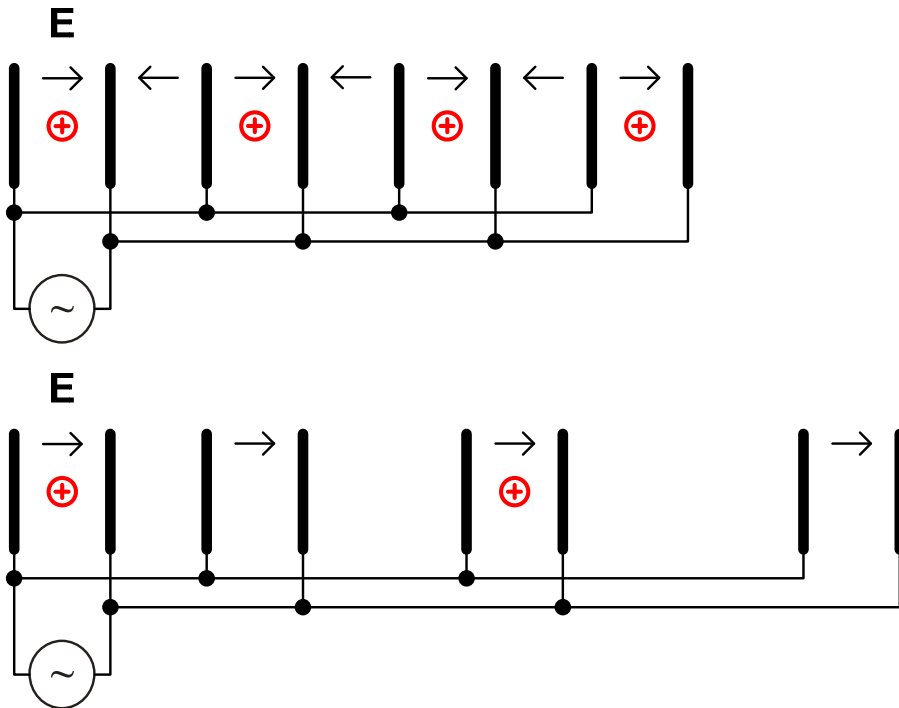
- Obiehajúci (prelietajúci) zväzok častíc musí „vidieť“ presne definované elektrické polia aby sme ho dokázali držať vo forme bunchov a na správnej trajektórii
- Najčastejšie používané štruktúry sú:
 - Rezonančné obvody so sústredenými parametrami
 - Rezonančné štruktúry s postupnou vlnou
 - Rezonančné štruktúry so stojatou vlnou
 - Dutinové rezonátory

VF systémy: urýchľovanie 2

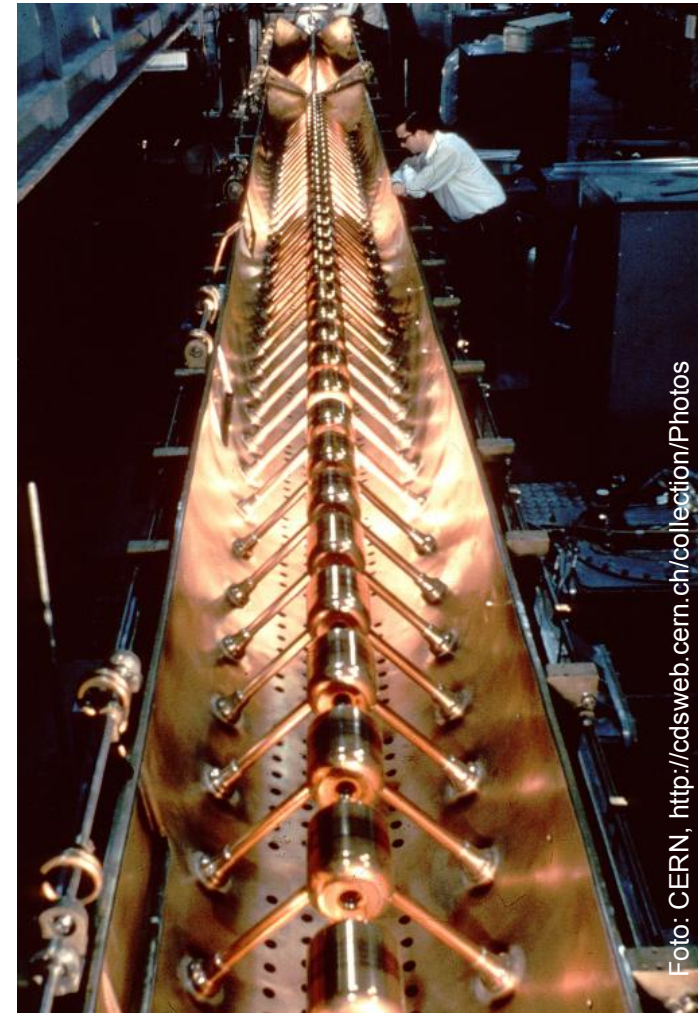
- Čím sú častice relativistickejšie tým je urýchľovanie jednoduchšie
- Zväzky pri nízkych energiách vyžadujú špeciálne štruktúry, široké pásmo a nižšie napätia
 - RF Quadrupole
 - Drift tubes
 - Ladené rezonančné štruktúry (š.p. niekoľko oktáv)
- Pri vyšších energiách obyčajne stačia rezonátory, úzke pásmo a veľmi vysoké napätia
 - Travelling wave cavity (š.p. $\sim 0.5\%$)
 - Standing wave cavity (š.p. $< 0.1\%$)

VF systémy: urýchľovanie ₃

- Frekvencia a fáza elektrického poľa v urýchľovacej štruktúre musí byť prísne synchronná s urýchľovaným zväzkom

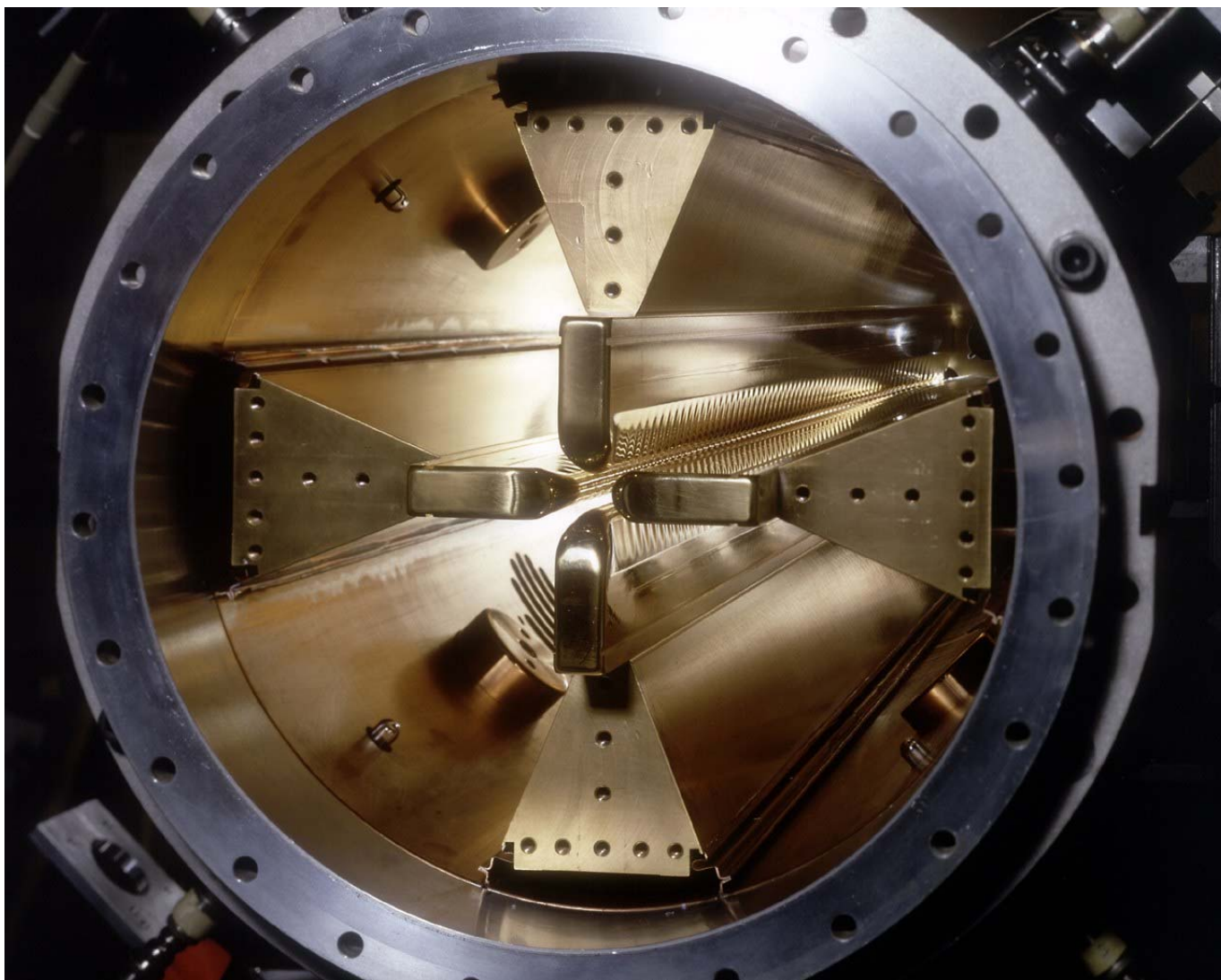


- Zväzok musí vidieť nulové napätie v čase keď polarita poľa nie je správna



VF systémy: urýchľovanie ₄

- RFQ (RF quadrupole)



VF systémy: urýchľovanie 5

- Frekvencia a fáza elektrického poľa v urýchľovacej štruktúre musí byť prísne synchronná s urýchľovaným zväzkom

Polomer obehu častice s nábojom q v magnetickom poli s intenzitou B , hmotnosťou m a rýchlosťou v

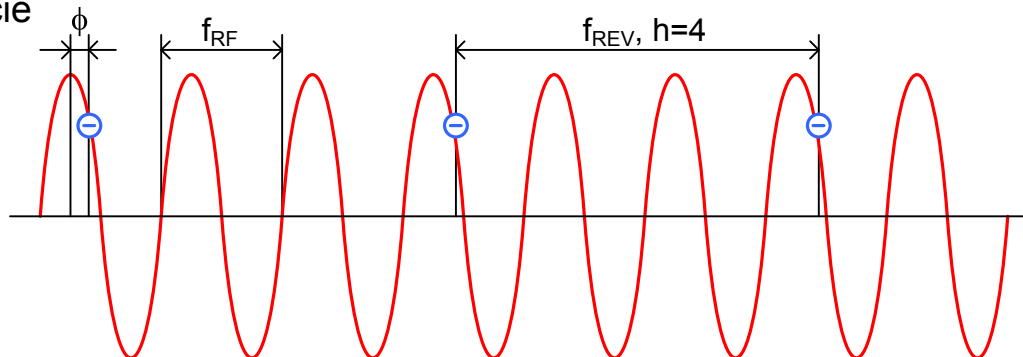
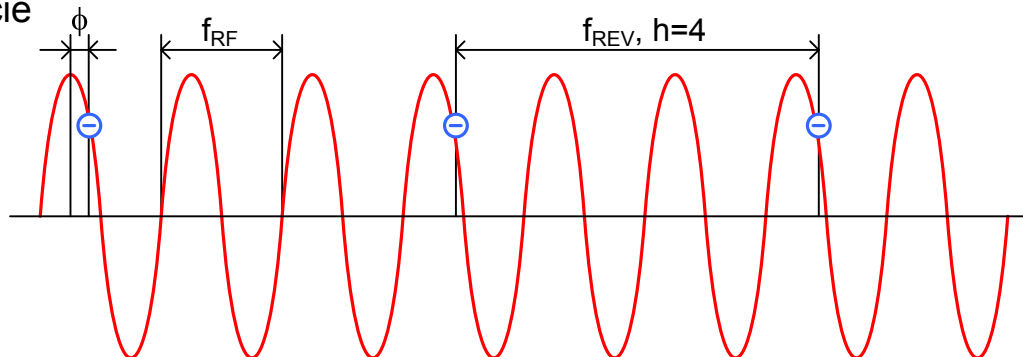
$$r = \frac{mv}{Bq}$$

Obehová frekvencia takejto častice v urýchľovači

$$f_{REV} = \frac{v}{2\pi r_{mag}} = \frac{Bq}{2\pi m}$$

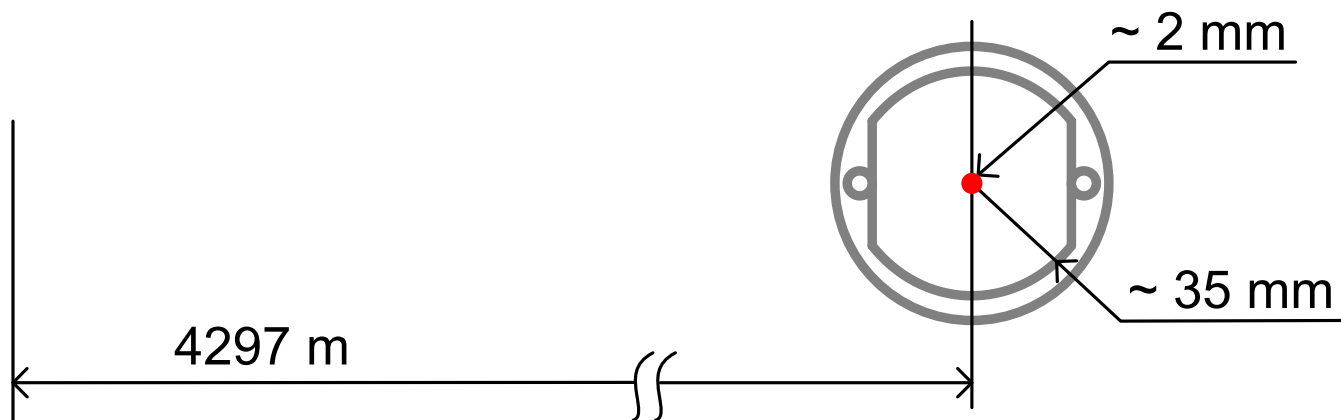
Aby bola splnená podmienka synchronizmu frekvencia VF poľa musí byť presnou harmonickou obehovej frekvencie

$$f_{RF} = hf_{REV}$$



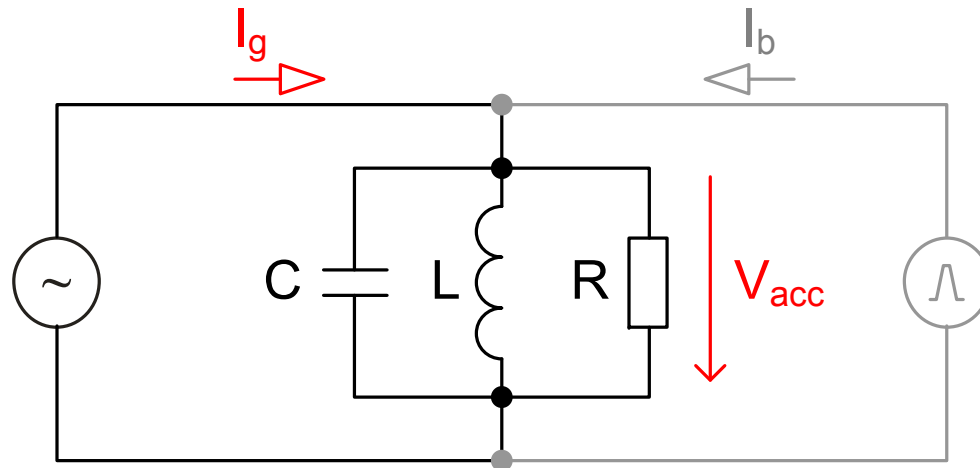
VF systémy: urýchľovanie ₆

- Fyzické rozmery urýchľovača sú fixné ($r = \text{konšt.}$)
- Aby zväzok ostal vo vákovej komore musíme s narastajúcou energiou zvyšovať intenzitu magnetického poľa a tomu prispôbovať frekvenciu, fázu a napätie urýchľovacieho elektrického poľa (synchrotrón)
- Požiadavky na absolútnu presnosť všetkých parametrov sú veľmi prísne



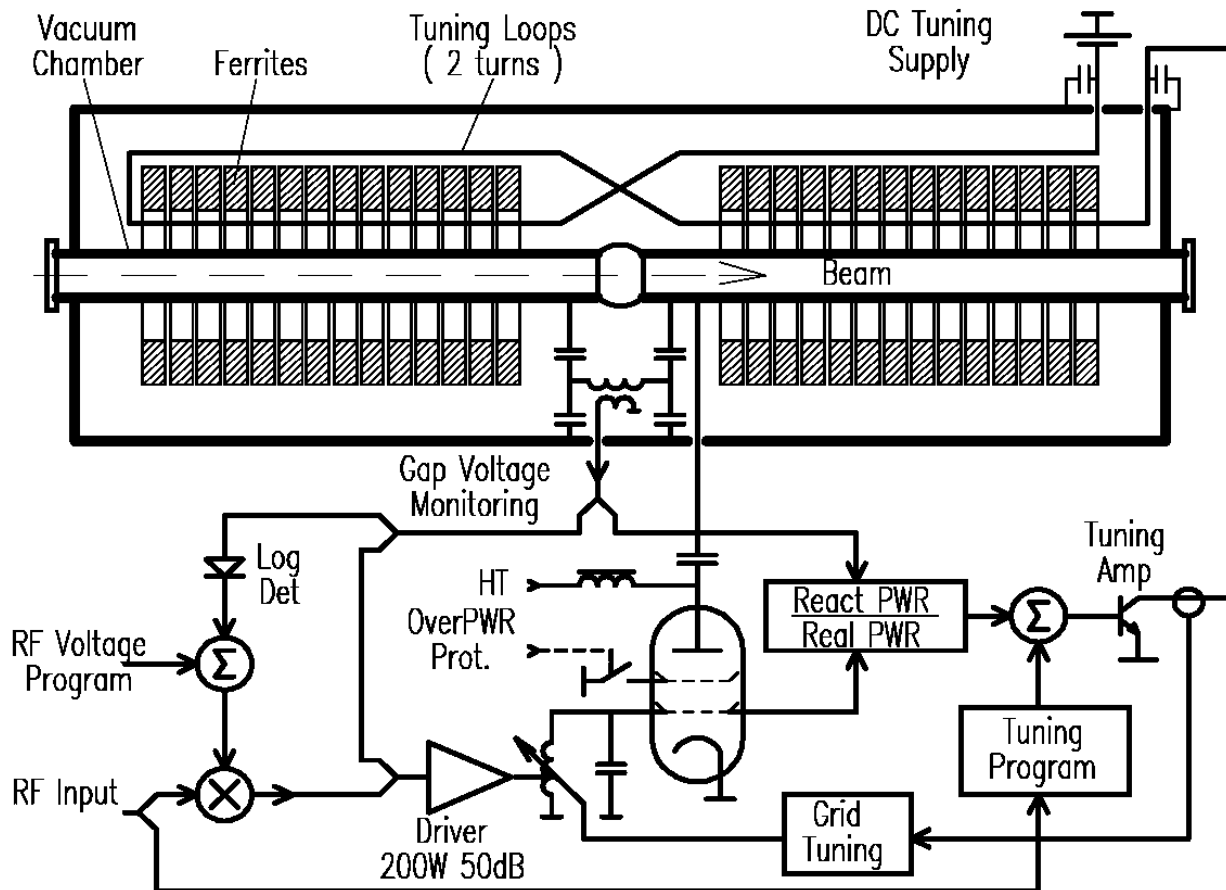
Rezonančné dutiny ₁

- Rezonancia pomáha zvýšiť napätie dodávané generátorom na hodnoty požadované zväzkom
- Bežné hodnoty napätí potrebných v urýchľovačoch
 - Malé lineárne 10-tky MV
 - Malé kruhové 10-tky kV
 - Veľké lineárne 100-vky MV až TV
 - Veľké kruhové 1-tky MV až GV



Rezonančné dutiny 2

- Rezonančné dutiny pre malé urýchľovače vyžadujú preladovanie cez niekoľko oktáv



Ladiaci prúd $\sim 3.5\text{kA}$
 $Q \sim 20-190$

Frekvencie
 $0.6-1.8\text{MHz}$,
 $1.2-3.9\text{MHz}$, $6-17\text{MHz}$,
 $3-10\text{MHz}$

VF príkon $\sim 20-50\text{kW}$
 Napätie na štrbine $5-25\text{kV}$

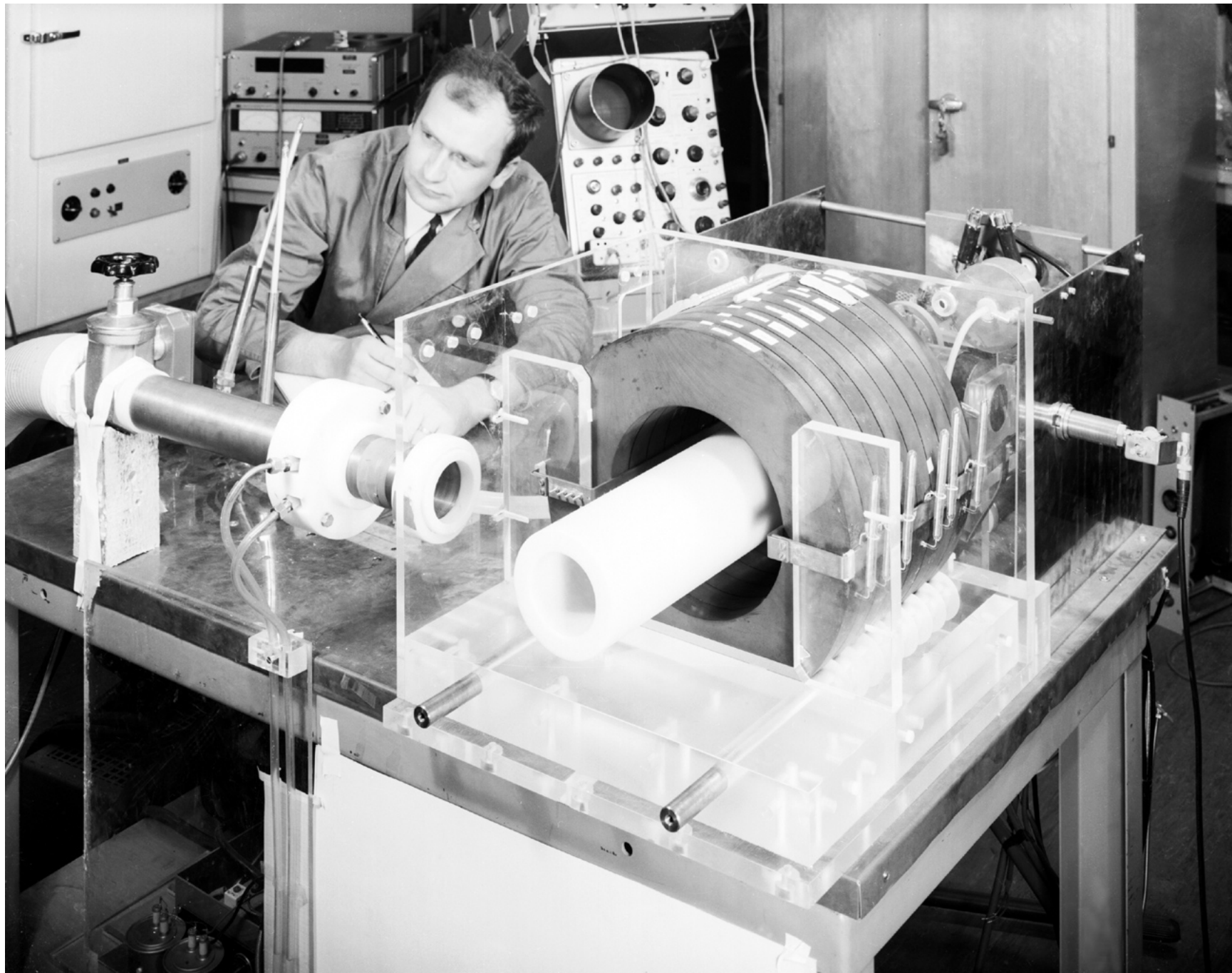
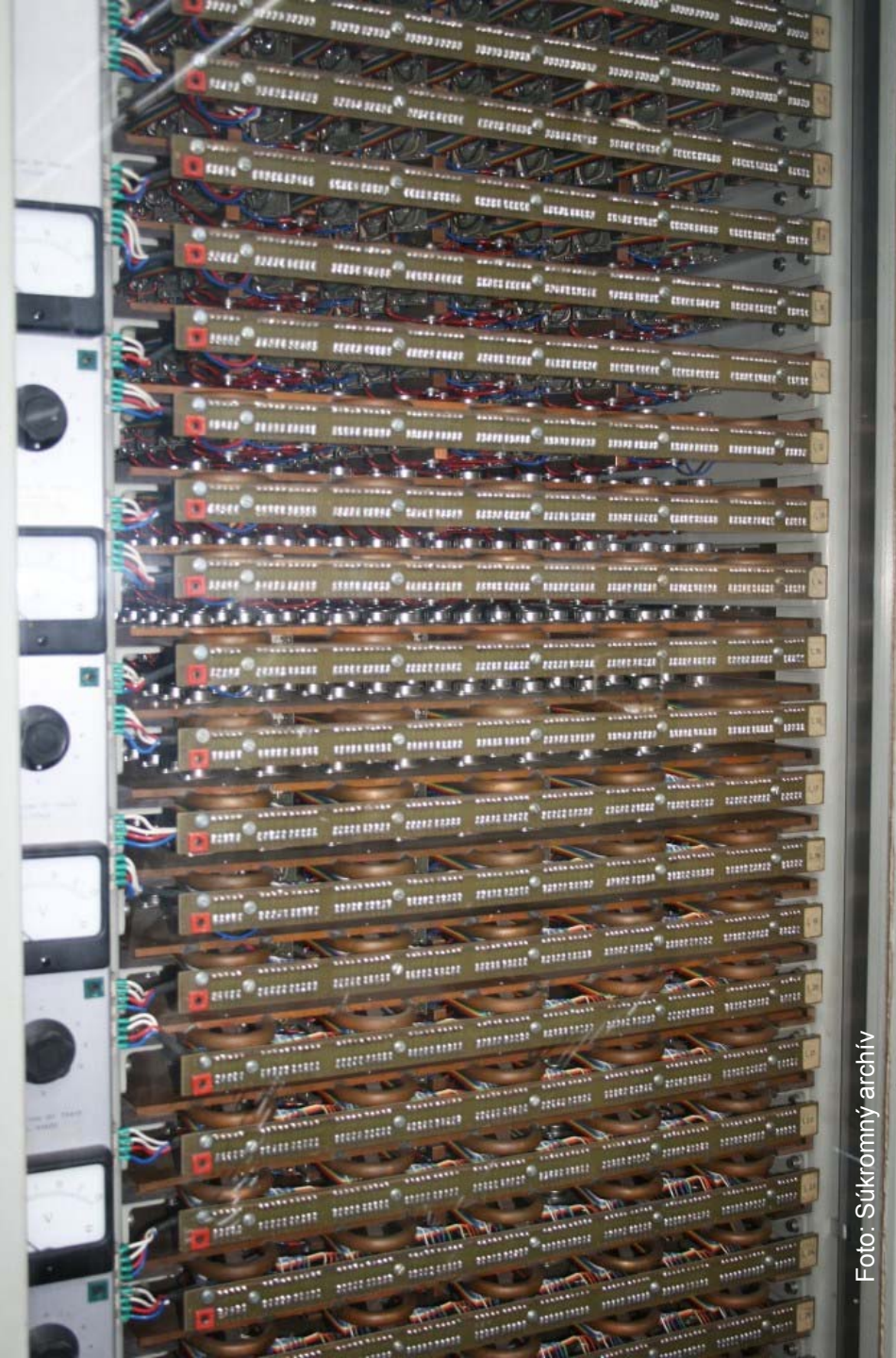


Foto: CERN, <http://cdsweb.cern.ch/collection/Photos>



Lineárny regulátor prúdu 15 kA pre ferity



Rezonančné dutiny ₃

- U väčších urýchľovačov (napr SPS) je potrebná šírka pásma zlomok percenta
- Stále veľa pre klasické dutinové rezonátory
- Vyhovuje tzv. travelling wave structure
 - VF výkon vo vnútri štruktúry vybudí elektromagnetickú vlnu, ktorá sa pohybuje cez sústavu rezonančných elementov a vytvára urýchľovacie elektrické pole



Urýchľovacia štruktúra s postupnou
vlnou pre SPS, $f = 200\text{MHz}$

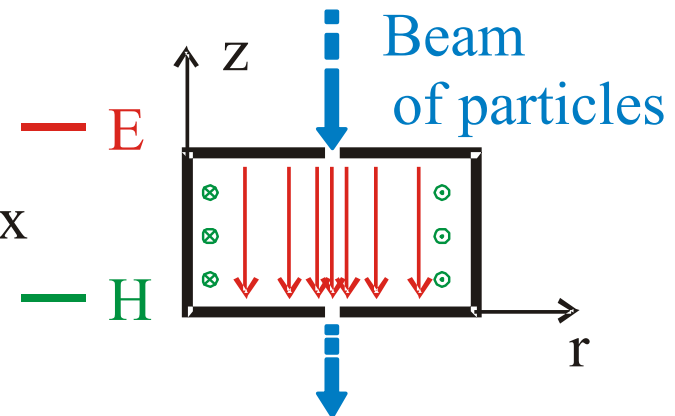
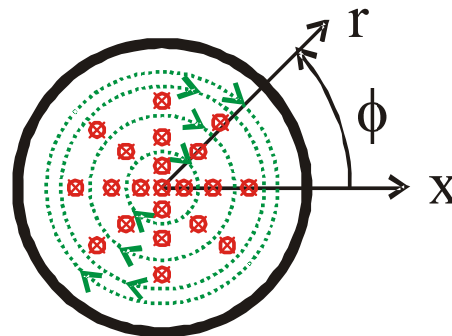
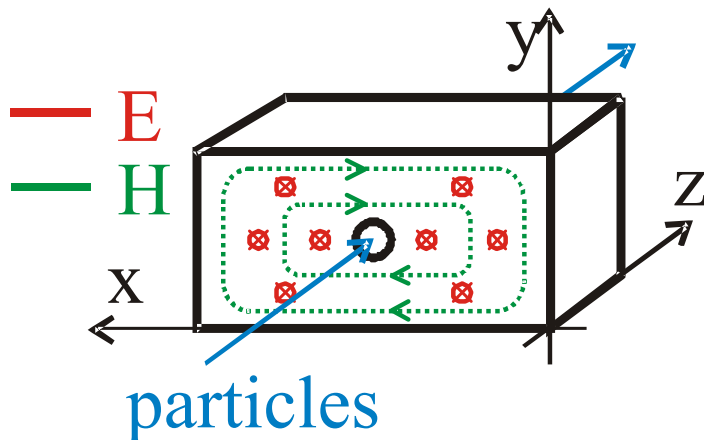
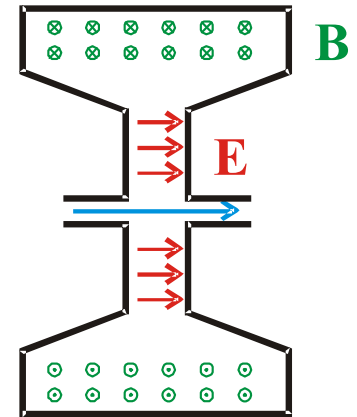


Foto: Súkromný archív

Urýchľovacia štruktúra s postupnou
vlnou pre SPS, $f = 200\text{MHz}$

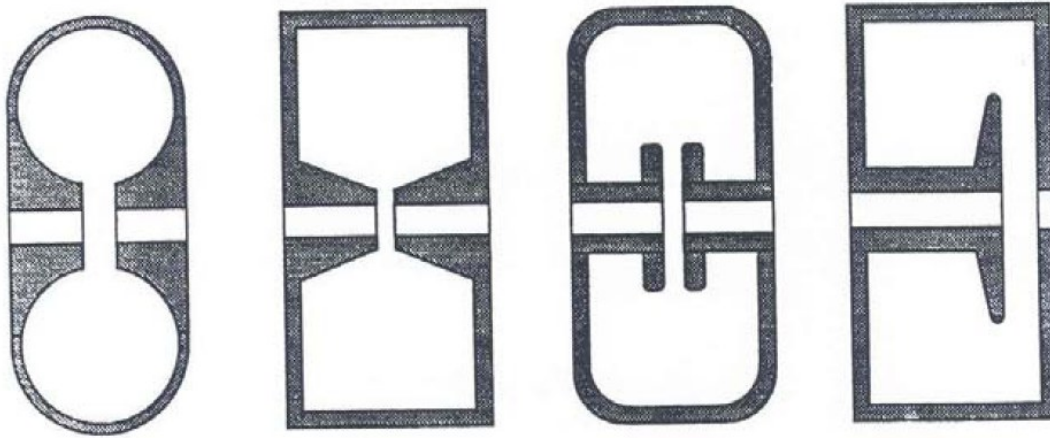
Rezonančné dutiny 4

- Pre relativistické zväzky sa takmer výhradne používajú dutinové rezonátory
 - Normálne vodivé
 - Supravodivé
- Vysoké hodnoty faktora Q 10-tky až 100-vky tisíc
- Pomerne malá šírka pásma $\ll 0.1\%$
- Nevýhoda – problematické pre nízke frekvencie

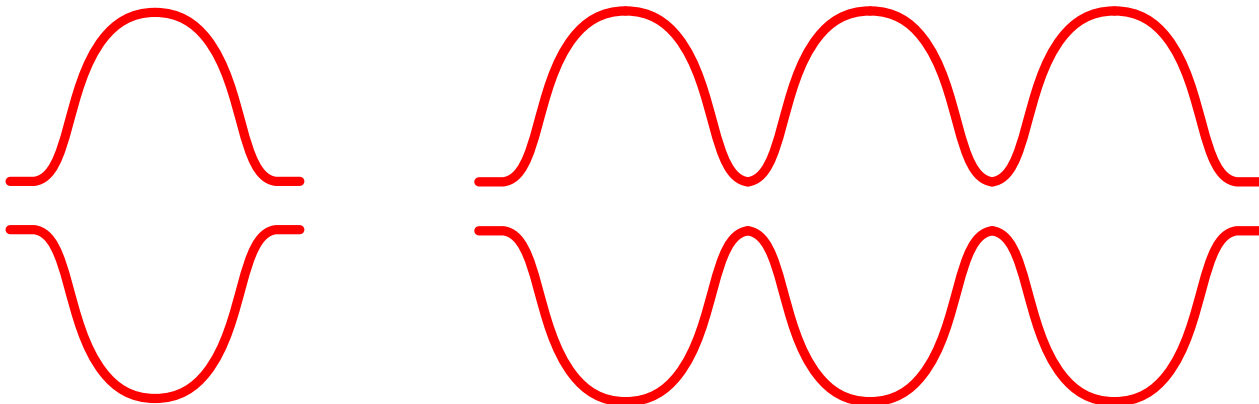


Rezonančné dutiny 5

- Typické tvary normálne vodivých rezonančných dutín

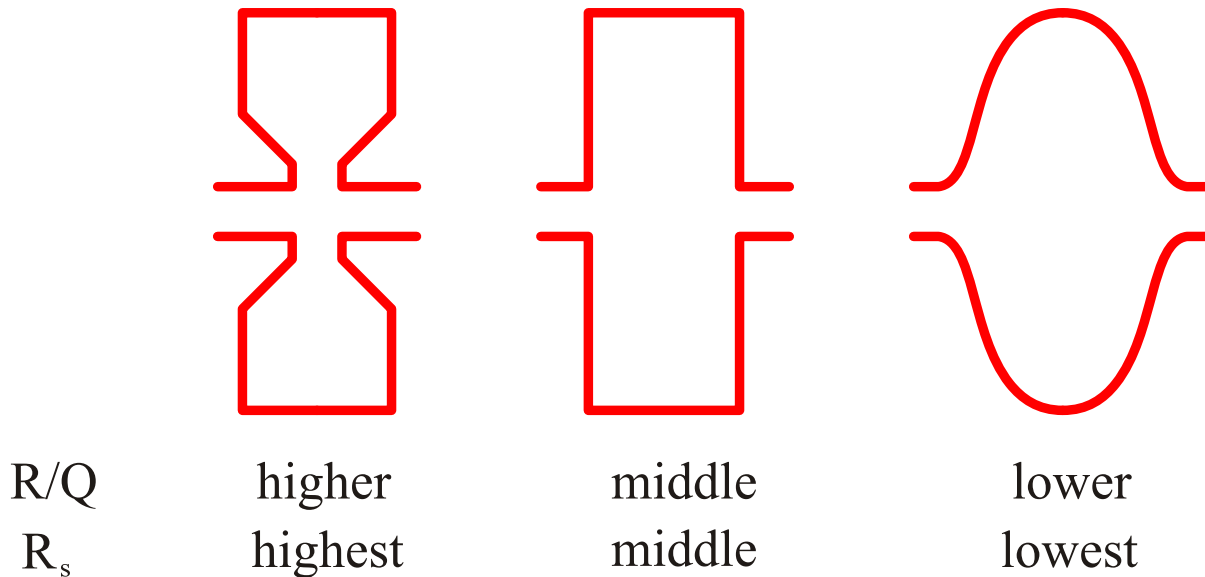


- Typický tvar supravodivých rezonančných dutín



Rezonančné dutiny 6

- Porovnanie parametrov rezonančných dutín



- R/Q parameter ktorý charakterizuje tvar rezonátora a je nezávislý od materiálu z ktorého je vyrobený
- R_s shunt impedance

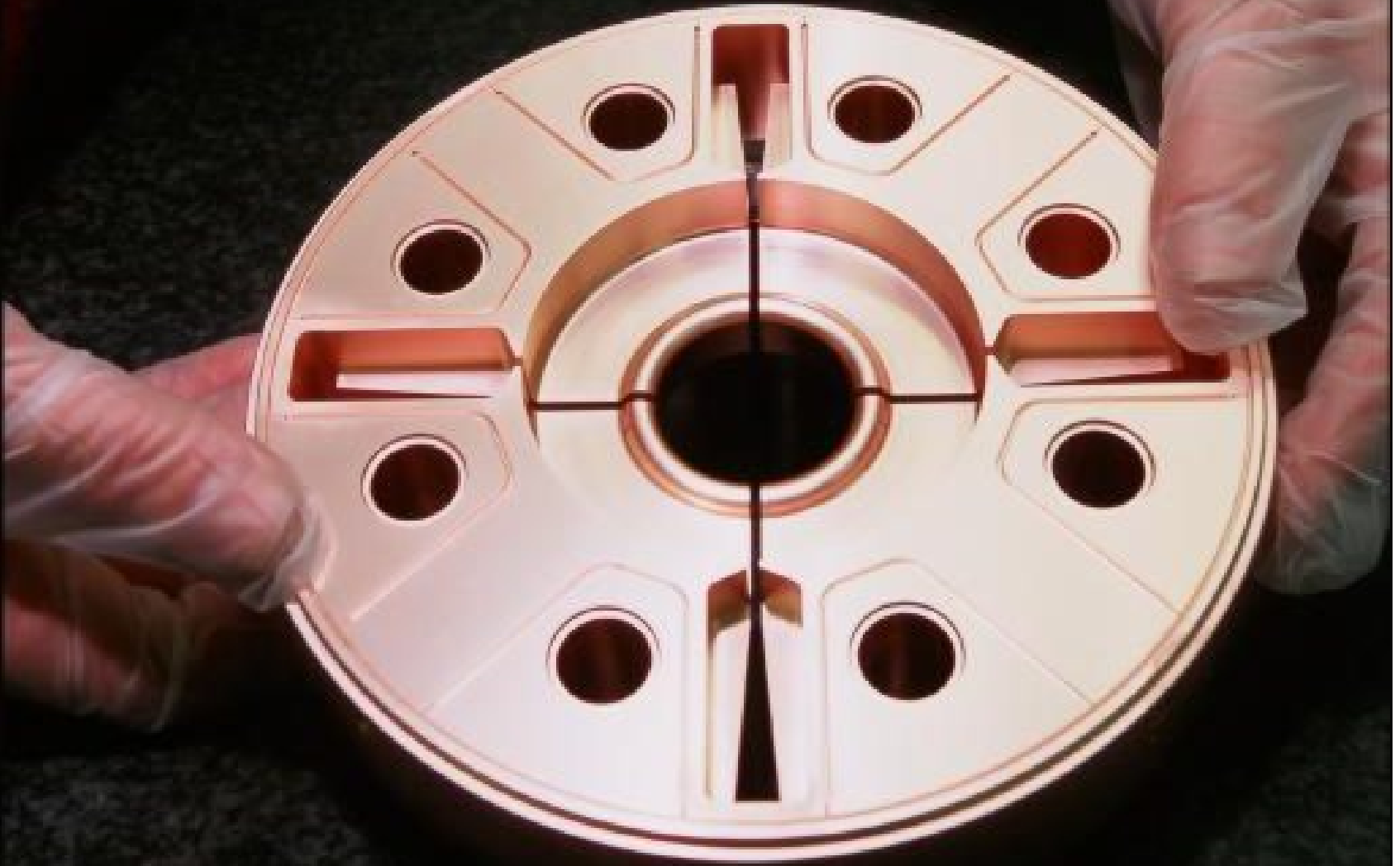
Rezonančné dutiny 7

- Normálne vodivé dutinové rezonátory
 - Parameter Q rádovo 10-ty tisíc
 - Nižšia uložená energia
 - Širšie pásmo
 - Umožňuje dosiahnuť zatiaľ rekordné intenzity polí ~150 MV/m
 - Väčšinou veľmi masívna medenná konštrukcia
 - Ťažko laditeľná frekvencia



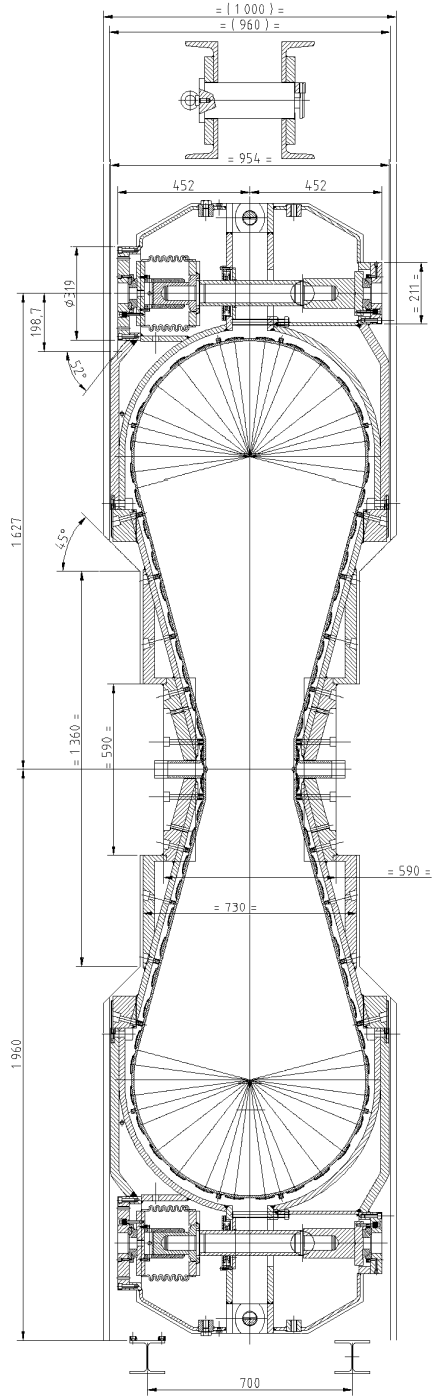
LEP: Normálne vodivá 4-bunková
rezonančná dutina (dole) s
akumulačným rezonátorom
(hore), $f = 352\text{MHz}$

CLIC: Jeden segment normálne
vodivej mnohobunkovej
rezonančnej štruktúry, $f = 3\text{GHz}$



PSI Switzerland:

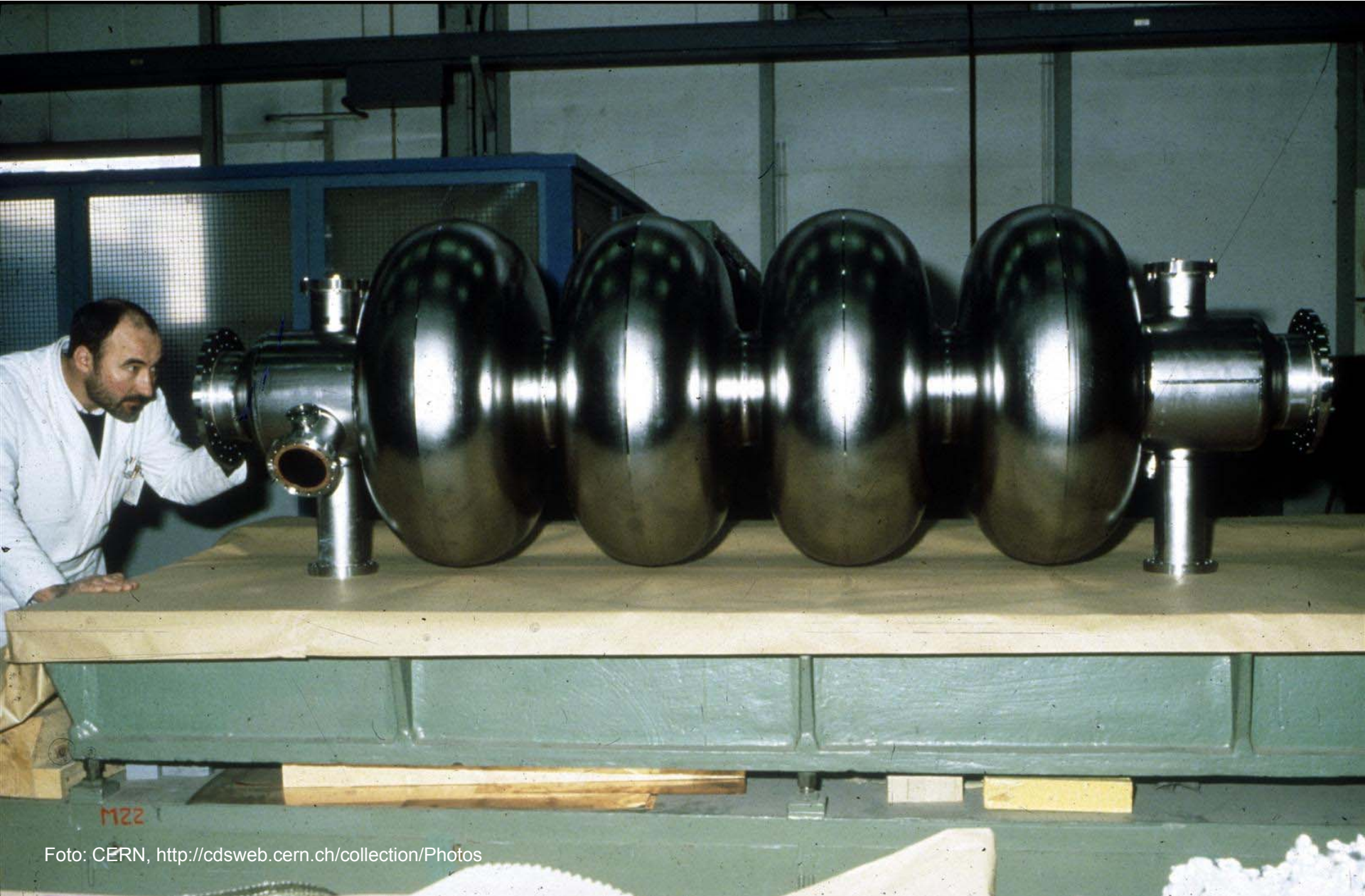
Normálne vodivý dutinový rezonátor, $f = 50\text{MHz}$



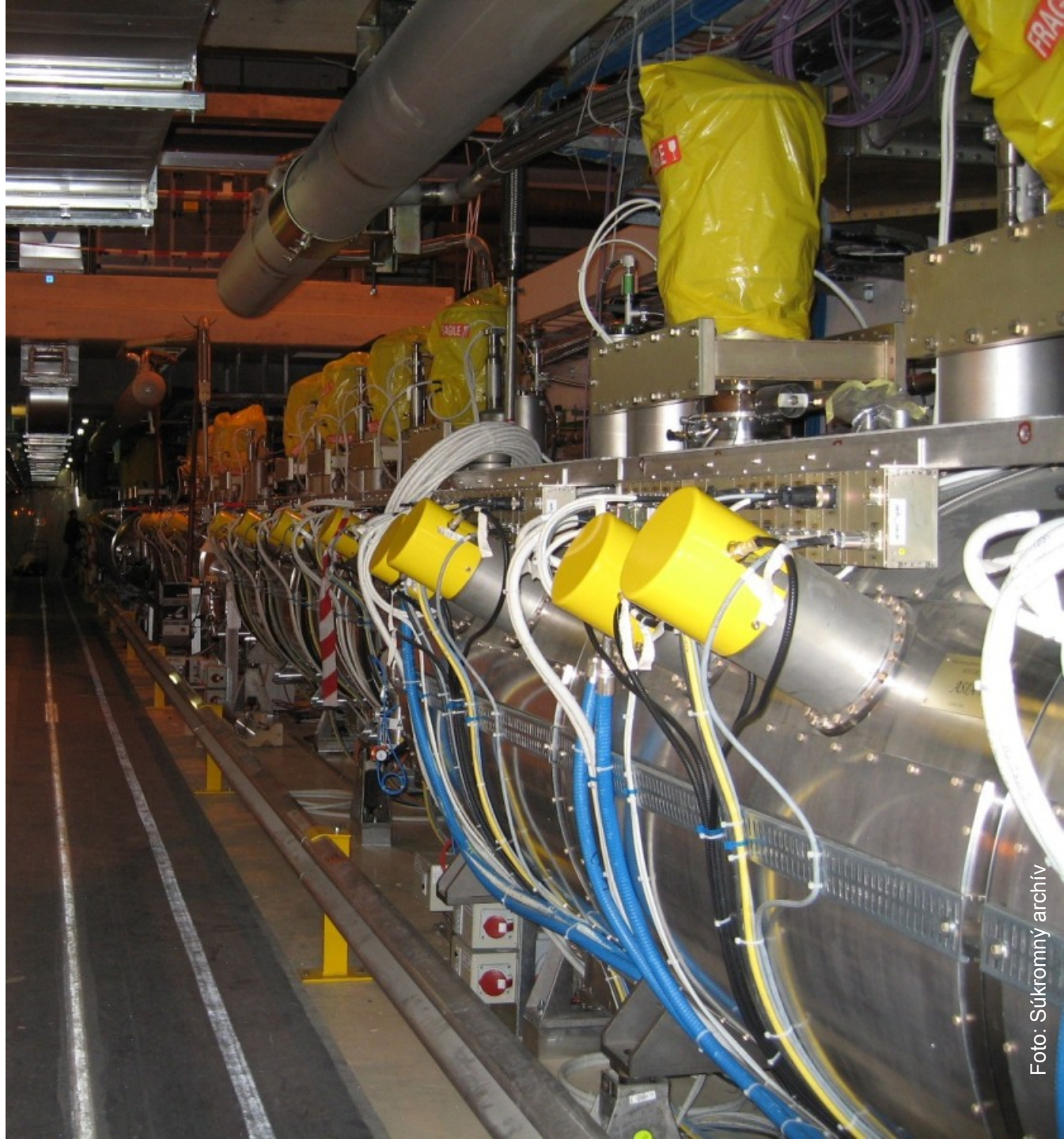
Rezonančné dutiny 7

- Supravodivé dutinové rezonátory
 - Parameter Q rádovo 10^9 (nezaťažené)
 - Q_{EXT} v praxi rádovo 20 000 – 500 000
 - Vysoká uložená energia
 - Úzke pásmo
 - Bežné intenzity polí ~5 - 20 MV/m, rekord ~50 MV/m
 - Väčšinou relatívne tenká a krehká konštrukcia
 - Frekvencia laditeľná mechanickým deformovaním rezonátora

LEP: 4-bunkový supravodivý rezonátor, $f = 352\text{MHz}$



LHC:
4 kryostaty, každý
obsahuje 4
supravodivé
rezonátory
 $f = 400,8 \text{ MHz}$



Výkonové zosilňovače ₁

- Urýchľovacie štruktúry vyžadujú pomerne vysoké budiace výkony
- Menšie urýchľovače (napr. PS, 628 m, 26 GeV)
 - Nižšie frekvencie (~ 1 MHz), široké pásmo, výkony ~ 10 -tky kW, takmer CW
- Väčšie urýchľovače (napr. SPS, LEP, LHC, 27 km, TeV)
 - Vyššie frekvencie (~ 100 -vky MHz), úzke pásmo, výkony 1-tky až 10-tky MW, CW
- Väčšie lineárne urýchľovače (napr. CLIC, 40 km, TeV)
 - Vysoké frekvencie (~ 10 -tky GHz), výkony 10-tky až 100-vky MW na meter dĺžky, impulzné

Výkonové zosilňovače 2

- V súčasnosti používané aktívne prvky

- Tetródy
 - Pokrývajú široký rozsah frekvencií (rádovo 500MHz)
 - Univerzálne, širokopásmové
 - Výkony 10-tky kW až 100-vky kW

- Klystróny
 - Pokrývajú široký rozsah frekvencií (od 100-viek MHz až do 10-tok GHz)
 - Úzkopásmové, na každú frekvenciu treba iný model
 - Výkony 10-tky kW až 1-tky MW kontinuálne, 100-vky MW impulzné
 - Množstvo nových modelov pre ešte vyššie výkony (sheet-beam, multi beam...)

Výkonové zosilňovače 3

- Polovodiče
 - Pokrývajú široký rozsah frekvencií (rádovo 100-vky MHz)
 - Univerzálne, s obmedzeniami relatívne širokopásmové
 - Výkony 100-vky W jednotlivý tranzistor
 - V súčasnosti zrealizovaný polovodičový zosilňovač 250 kW@352 MHz CW
- IOT (Inductive Output Tube)
 - „Hybrid“ medzi klystrónom a triódou (klystrode)
 - Podobné vlastnosti ako klystróny
 - Maximálne frekvencie ~1500 MHz
- Diacrode (double ended tetrode configuration)
 - Modifikovaná tetróda, posúva výkonový limit tetród z ca. 300 kW CW na MW
 - V praxi aplikované jednotky s výkonom 1 MW CW - 3 MW imp.

Výkonová tetróda
150kW, 200MHz





Tetródový zosilňovač pre
SPS. 4x1 MW, 200MHz



Foto: Súkromný archív

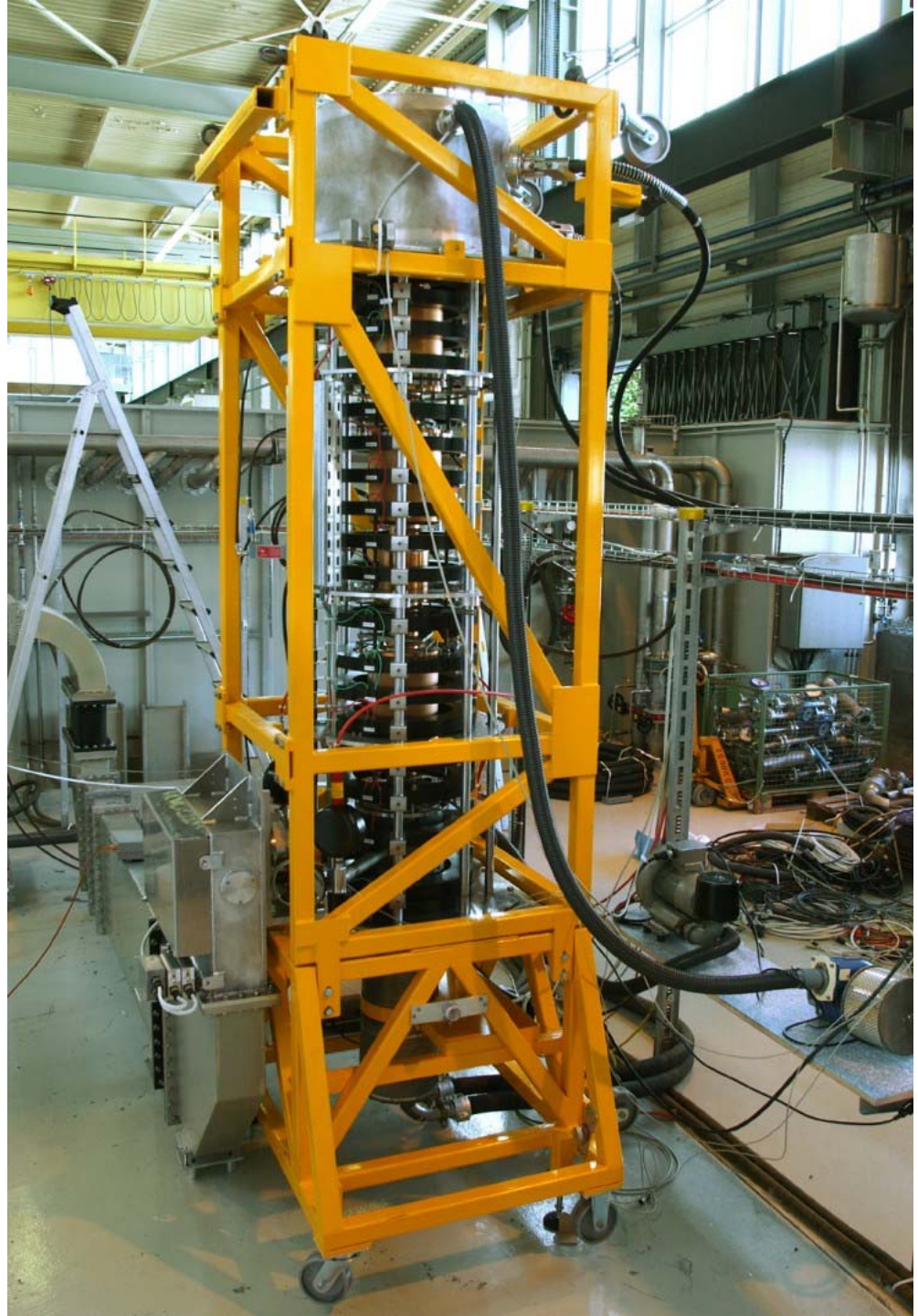
Tetrodový zosilňovač pre
SPS. 4x1 MW, 200MHz

Prierez vodou chladenou
výkonovou tetródou

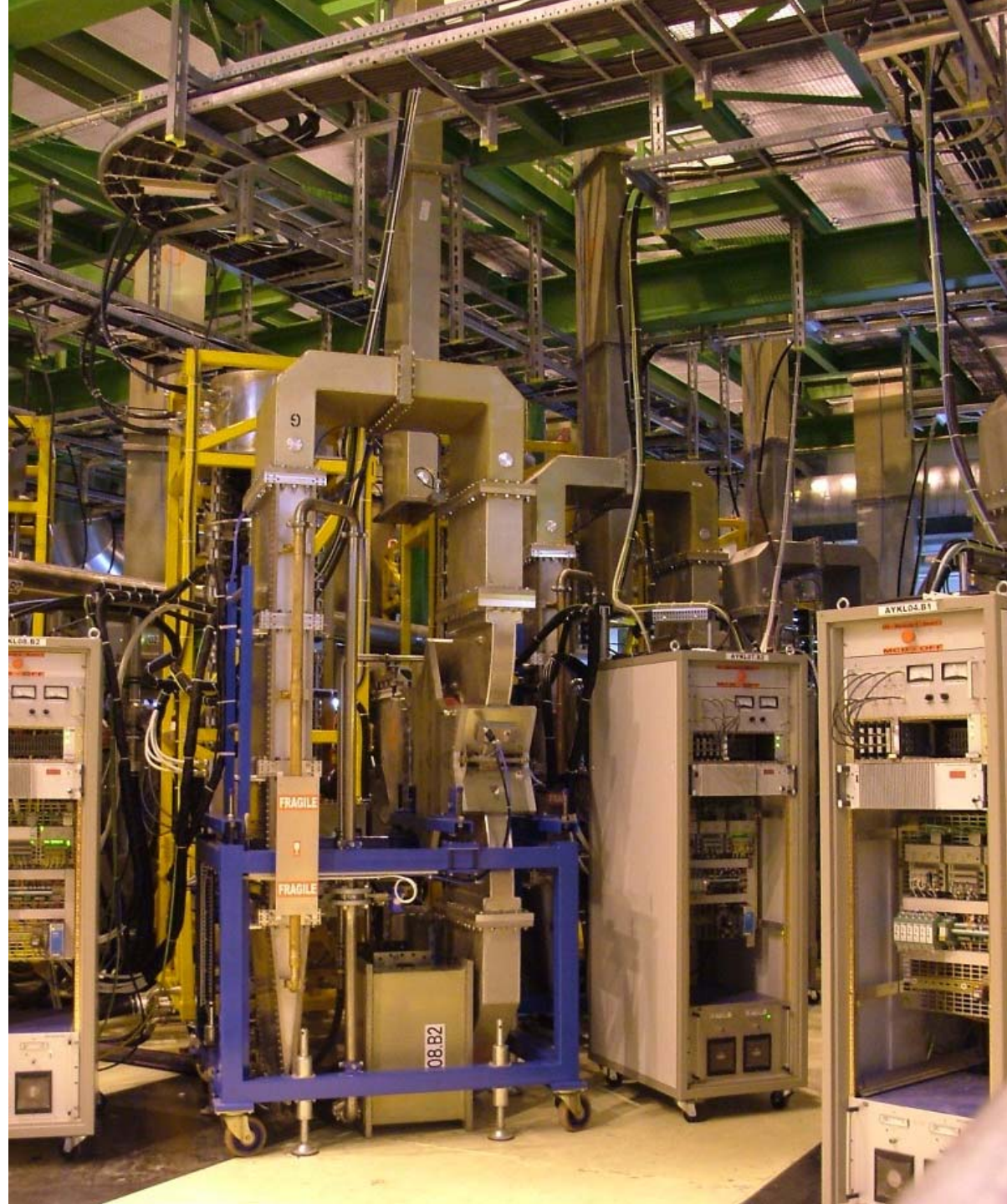


Klystrón pre LHC

- $f_c = 400,8 \text{ MHz}$
- Budenie 65W
- Výst. výkon 300 kW CW
- Napájanie 57 kV/8,5 A
- Výstup vlnovod WR2300



Zosilňovacia jednotka
pre LHC: 300 kW
klystrón + feritový
trojportový cirkulátor +
feritová záťaž 300 kW
(nainštalovaných 16
jednotiek)

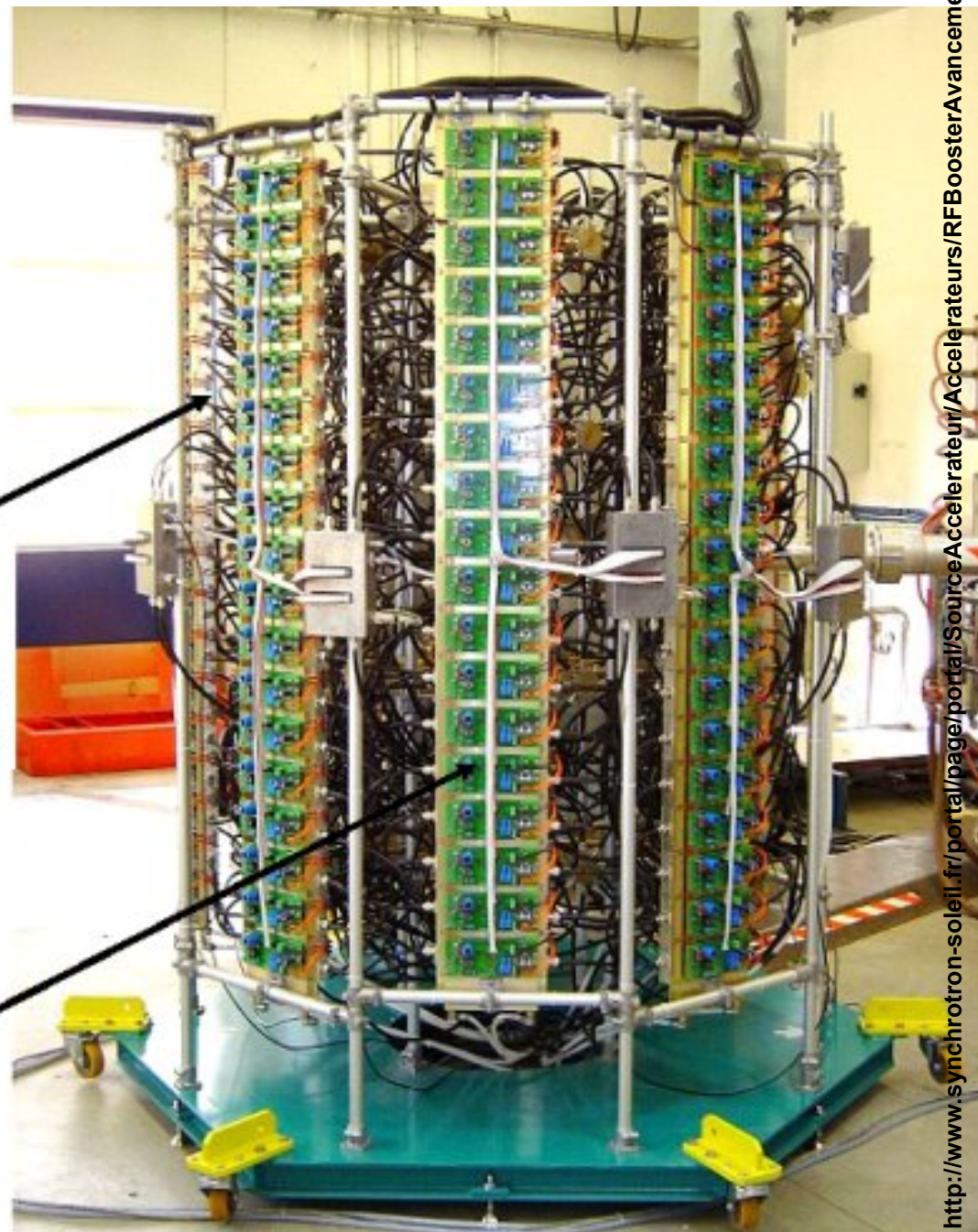


Jeden 50 kW modul
polovodičového zosilňovača
250 kW/352MHz
(Soleil, Francúzsko)

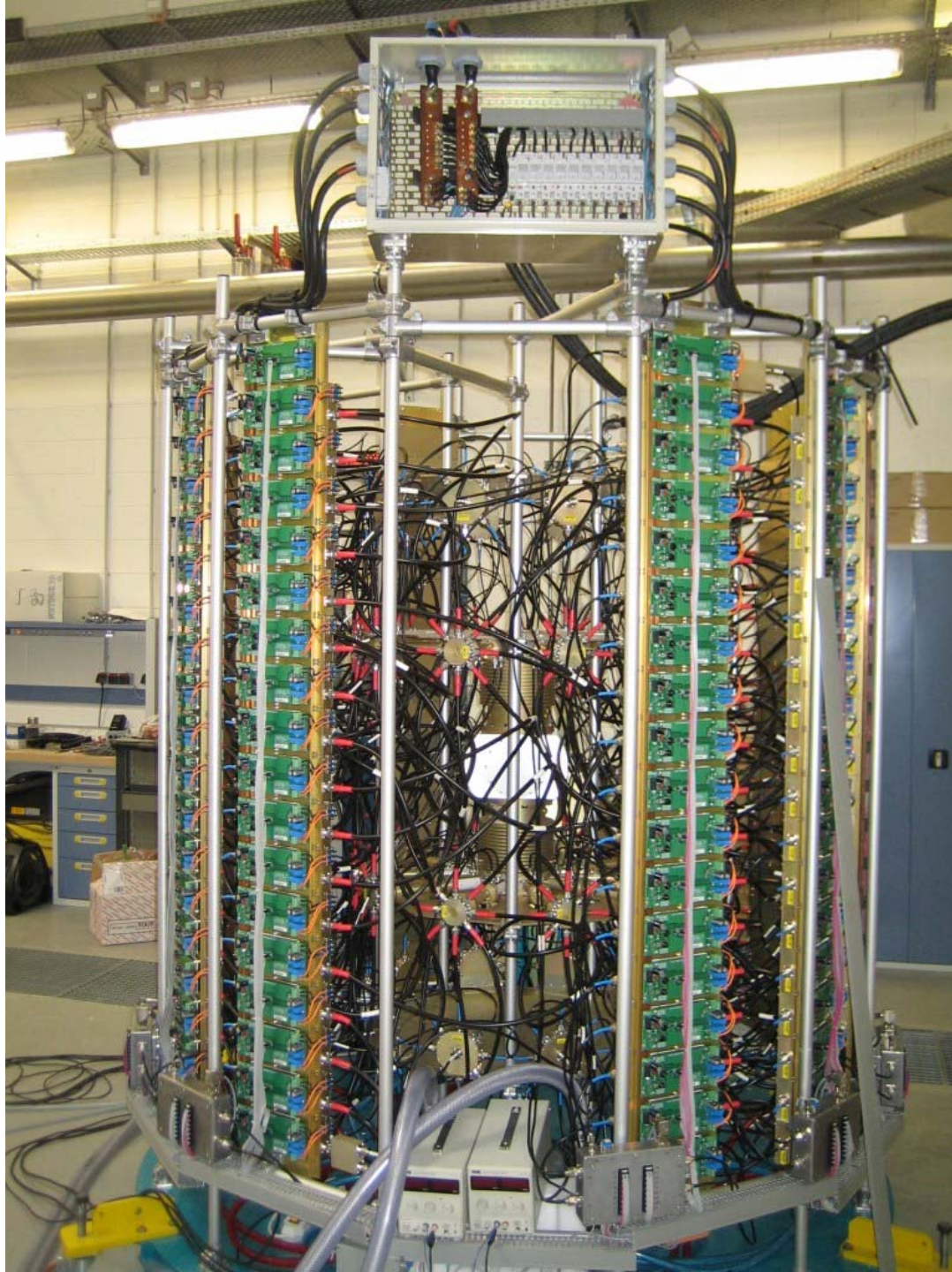
330 W amplifier module

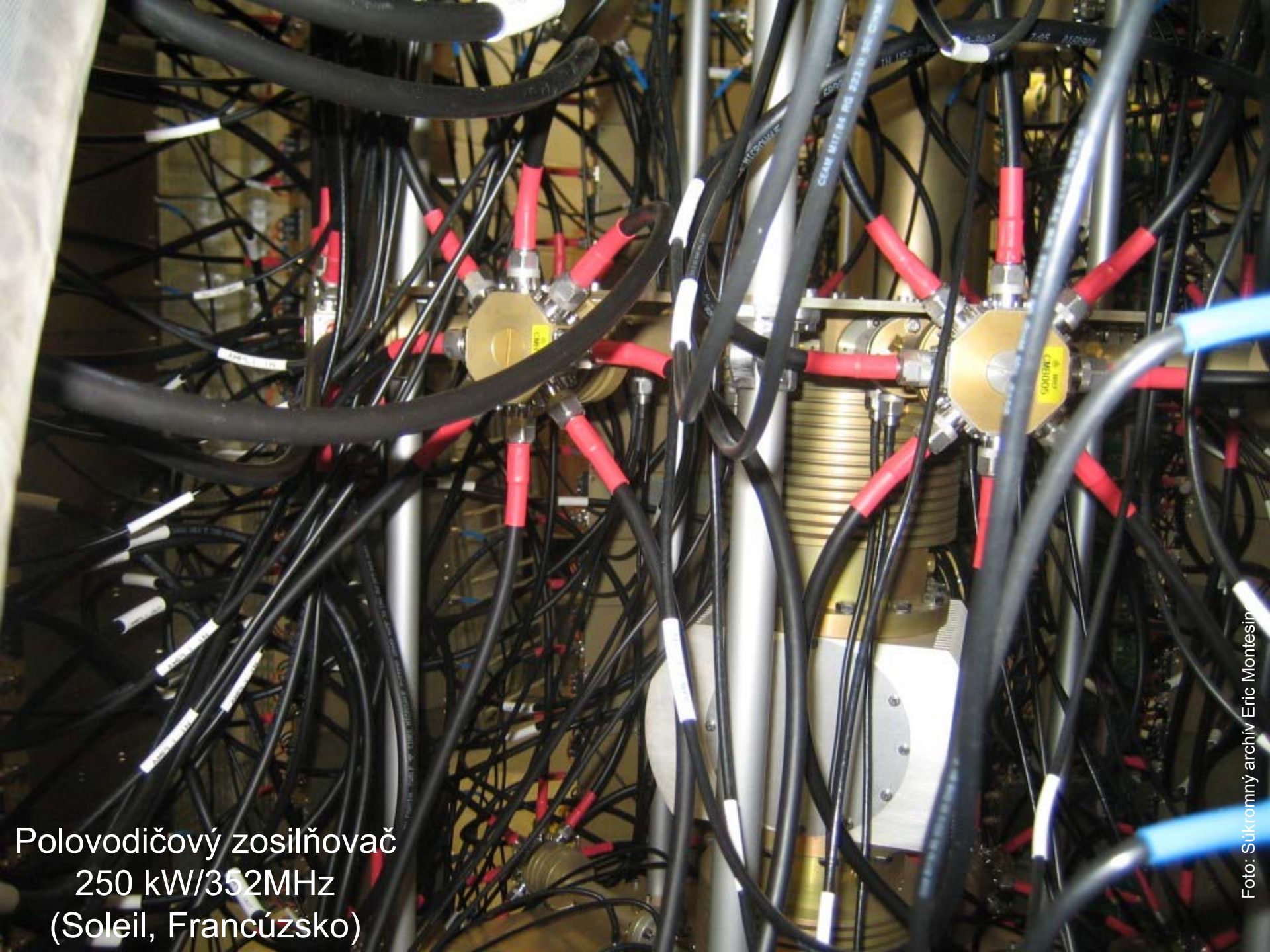


600 W, 300 Vdc / 30 Vdc converter



Jeden 50 kW modul
polovodičového zosilňovača
250 kW/352MHz
(Soleil, Francúzsko)





Polovodičový zosilňovač
250 kW/352MHz
(Soleil, Francúzsko)

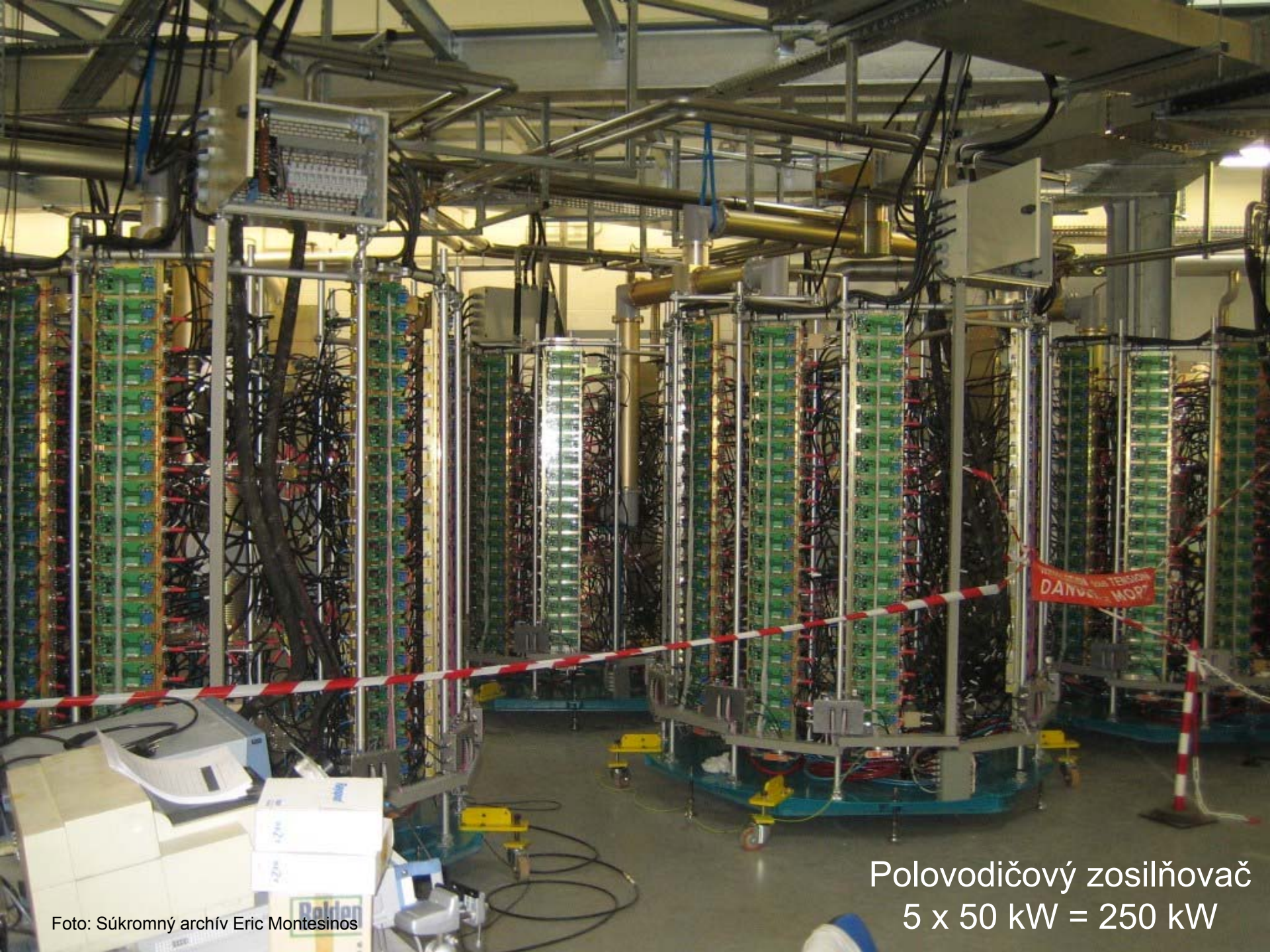


Foto: Súkromný archív Eric Montesinos

Polovodičový zosilňovač
 $5 \times 50 \text{ kW} = 250 \text{ kW}$

IOT, 50-100kW, 470-850MHz



Foto: internet

Diacrode Thales TH628

Successfully tested
1 000 hours* at 1 MW CW

**At 200 MHz, 1 MW – CW
up to 4.5 MW, in short pulses**

- Anode dissipation: 800 kW
- High gain and linearity
- High stability due to Pyrobloc® grids
- Hypervapotron™ cooling



Foto: katalógové listy Thales

Prenosové vedenia

- Používané výkony kladú vysoké nároky na prenosové vedenia
 - Výkony 1 MW CW až 100-vky MW impulzné
- Nízke frekvencie koaxiálne vedenia
- Od 256MHz už dostupný štandardný model vlnovodu
- Problémy
 - Vysoké výkonové hustoty, tepelné straty
 - Elektrický prieraz
 - Elektromagnetická tesnosť
 - Stabilita elektrickej dĺžky



Foto: Súkromný archív

Výkonové koaxiálne
vedenia v SPS

Výkonové koaxiálne vedenia v SPS





Koaxiálny „jumper“ (SPS)



Výkonový koaxiálny
„transfer switch“

Združovače výkonu v
SPS (1MW z 32
zosilňovačov)



Low level ₁

- VF signály pre urýchľovacie dutiny generujú riadiace slučky (low-level loops)
- U „výskumných“ urýchľovačov ide o veľmi sofistikované obvody
 - Extrémne požiadavky na presnosť signálov
 - Nízky šum, v niektorých aplikáciách až na hranici fyzikálnych možností
 - Doba odozvy
 - Dlhodobá/krátkodobá stabilita
 - Často len jednoduchá spätná väzba nestačí – 1-T feed back, feed forward, AI
 - Spolupráca množstva systémov
 - Systémy často geograficky distribuované na veľkých plochách/vzdialenostiach

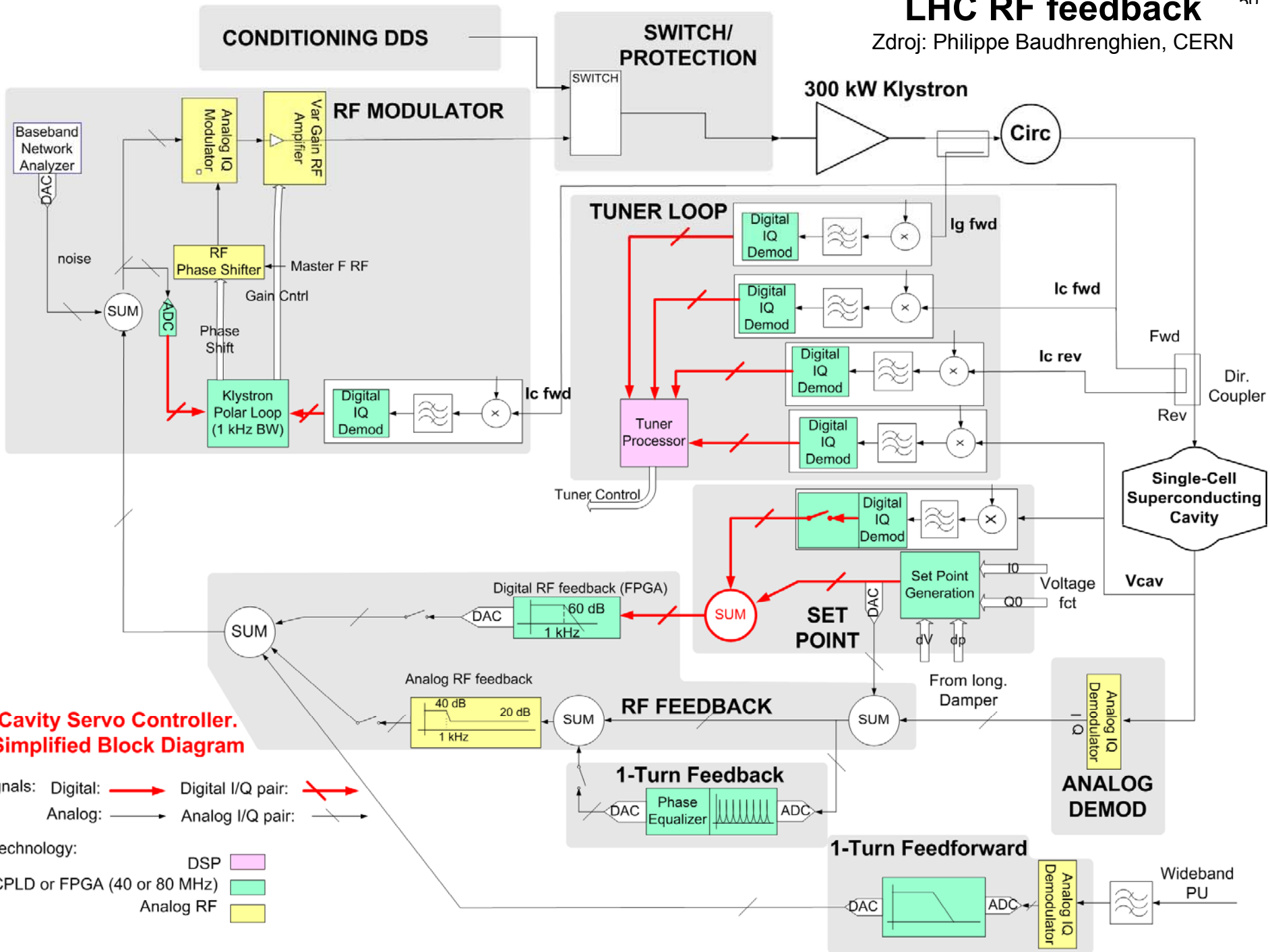
Low level ₂

Typické komponenty low-level systému urýchľovača častíc:

- RF feedback
 - Udržiava v urýchľovacej dutine požadované pole
 - Kompenzuje indukované napätia od zväzku, zvlnenie a nelinearity zosilňovačov
 - Znižuje impedanciu rezonančnej dutiny okolo rezonančnej frekvencie
 - One turn feedback ďalej znižuje impedanciu na násobkoch obehovej frekvencie

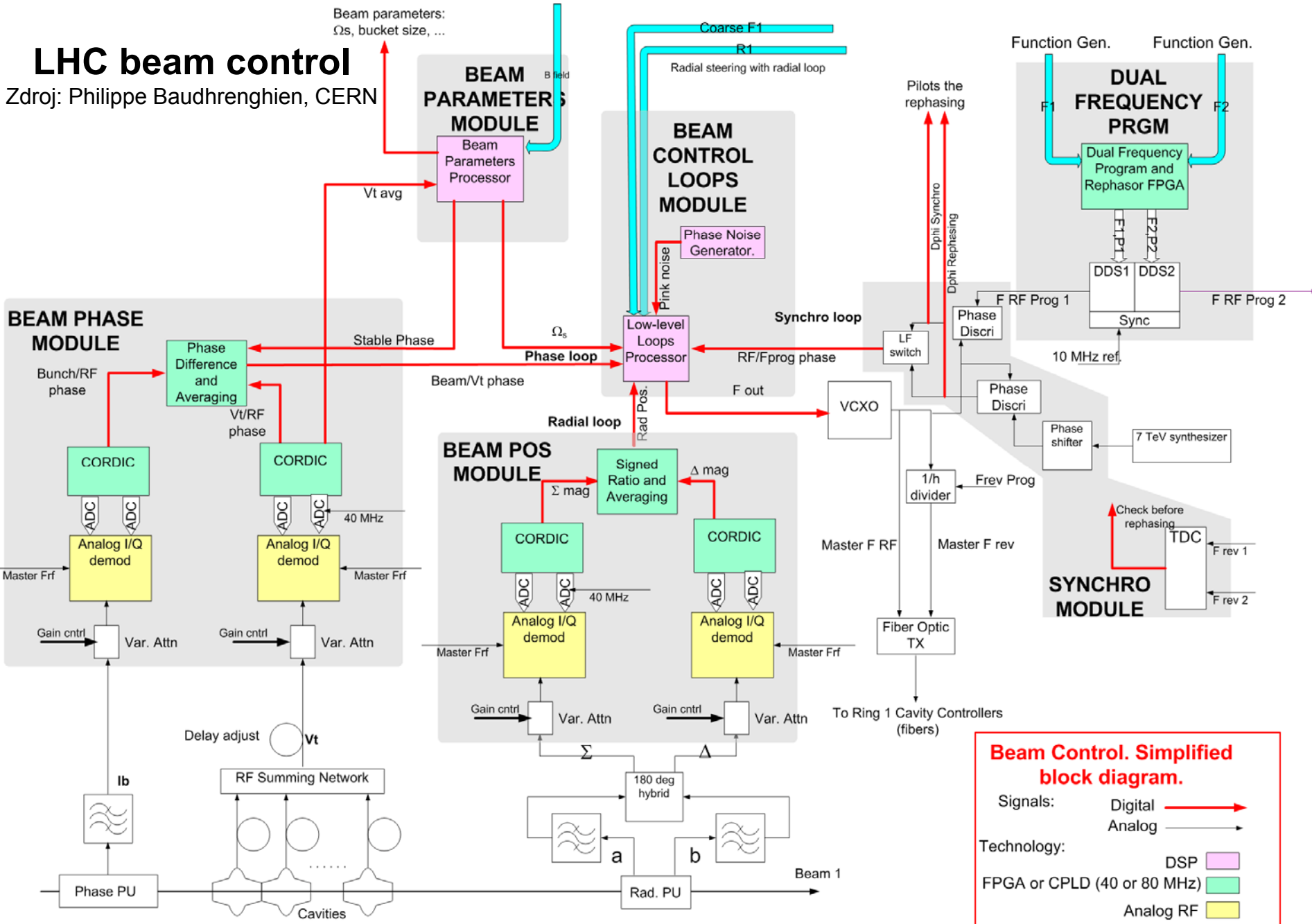
- Beam control
 - Generuje referenčné signály pre celý komplex
 - Udržiava obiehajúci zväzok v synchronizme s VF systémom
 - Udržiava zväzok v strede vákuovej komory
 - Riadi injekciu/extrakciu zväzku

Zdroj: Philippe Baudhrehien, CERN



LHC beam control

Zdroj: Philippe Baudhrehngien, CERN



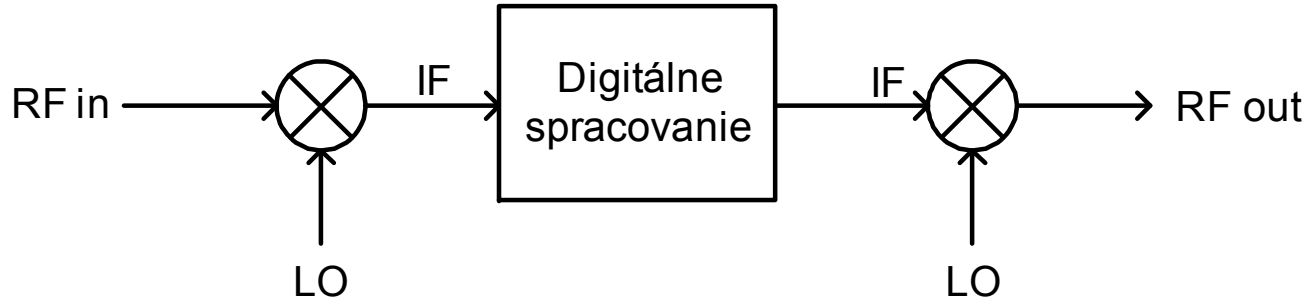
Beam Control. Simplified block diagram.

Signals: Digital → Analog →

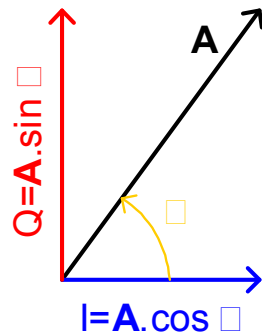
Technology: DSP FPGA or CPLD (40 or 80 MHz) Analog RF

Low level ₃

- V súčasnosti je takmer všetko spracovanie signálov digitálne...



- Prijímače obyčajne potrebujú informáciu o okamžitej amplitúde a fáze spracovávaného signálu – rozloženie na dva ortogonálne komponenty
- Najjednoduchšie sin a cos – IQ modulátory/demodulátory

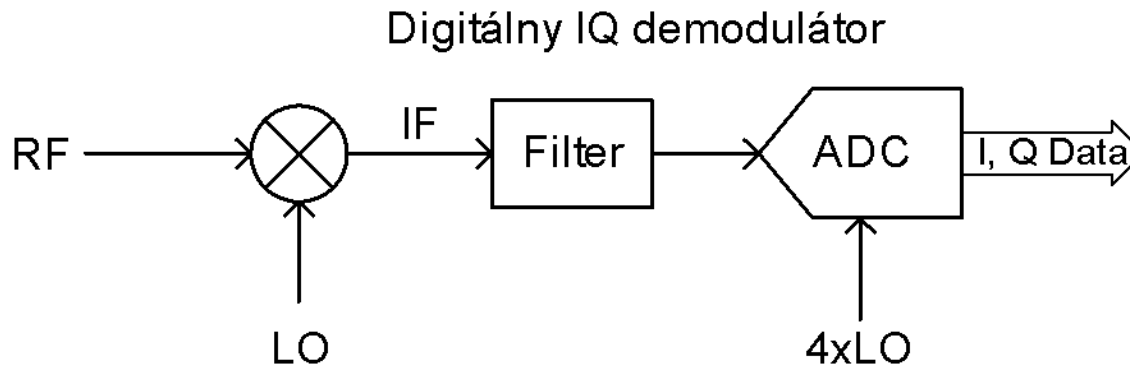


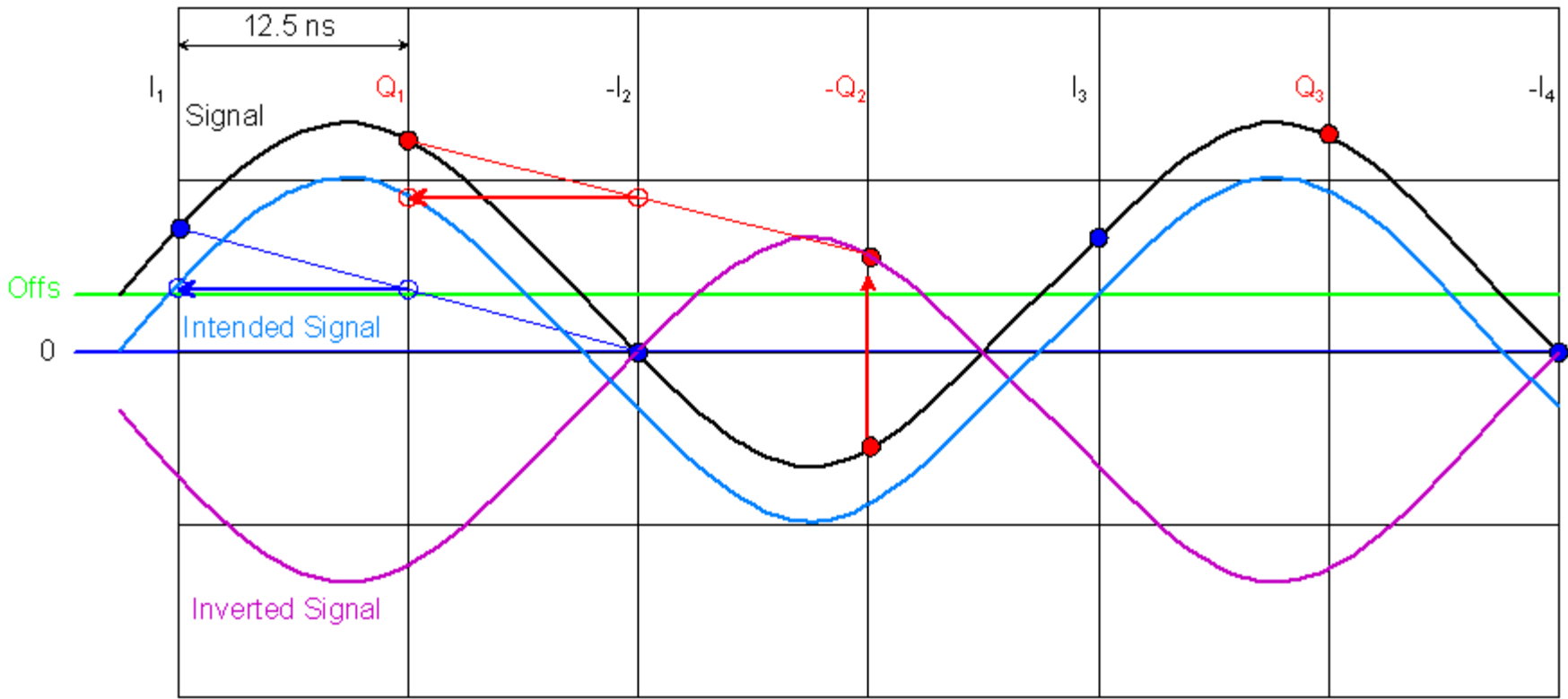
$$\text{Amplitúda} = \text{Sqrt}(I^2 + Q^2)$$

$$\text{Fáza} = \text{Arctg}(I/Q)$$

Low level 4

- Digitálny IQ demodulátor
 - Samplovanie jedným AD prevodníkom vo vhodných okamihoch (napr. $f_{\text{sample}} = 4 f_{\text{signal}}$)
 - Vysoká presnosť a opakovateľnosť
 - Presnosť veľmi rýchlo degraduje ak dve frekvencie nie sú v definovanom pomere
 - Úzka šírka pásma





Moving Average over 1 cycle
for PM & Observation Memory
Full 40MSPS rate & Offset compensation!

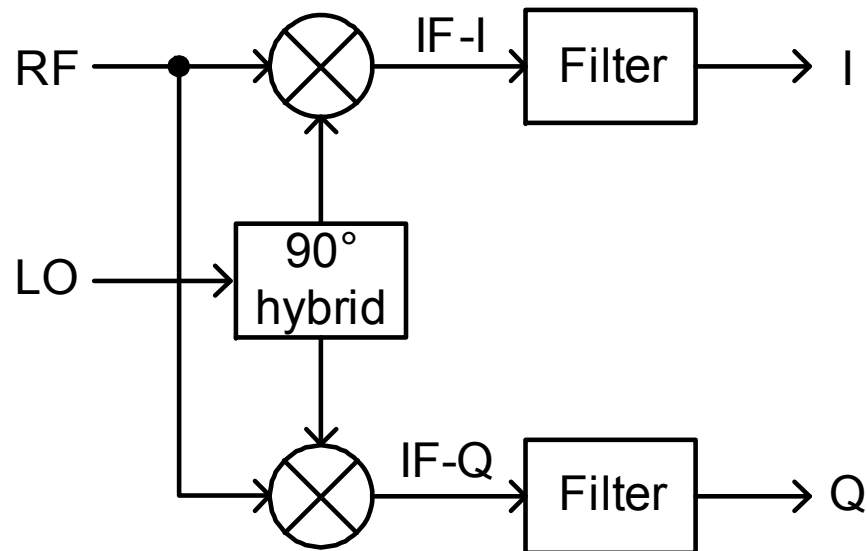
$$\begin{cases}
 I'_i = \frac{(I_i + \text{Offs}) - (-I_{i+1} + \text{Offs})}{2} \\
 Q'_i = \frac{(Q_i + \text{Offs}) - (-Q_{i+1} + \text{Offs})}{2}
 \end{cases}$$

TunerCtrl applies 2 stage CIC with R=16 => Average over I/Q 16 (even) samples => Offset Cancelled.

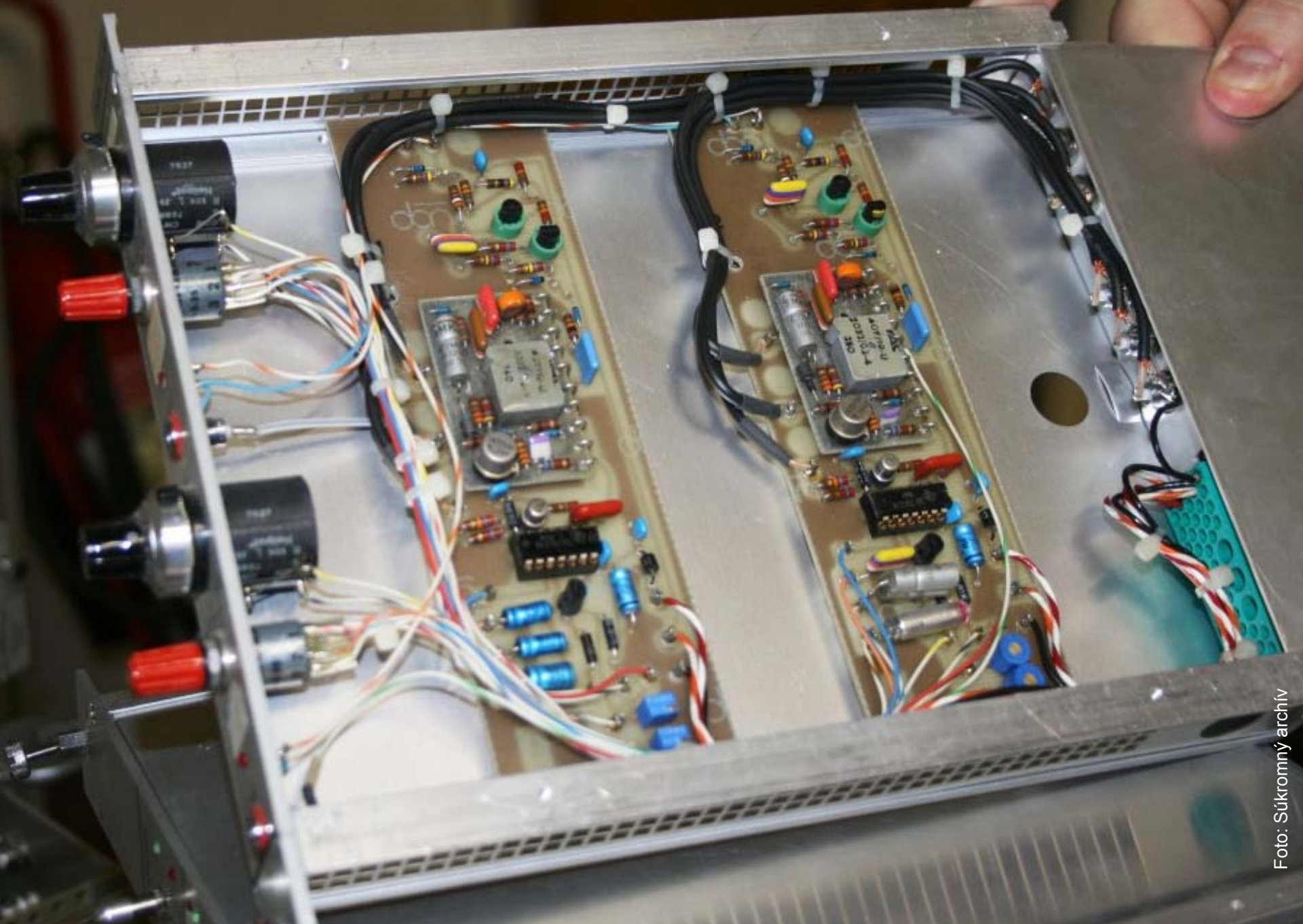
Low level ₅

- Analógový IQ demodulátor
 - Dva zmiešavače, 90° hybrid
 - Nižšia absolútna presnosť a opakovateľnosť – analógové komponenty
 - Veľká šírka pásma

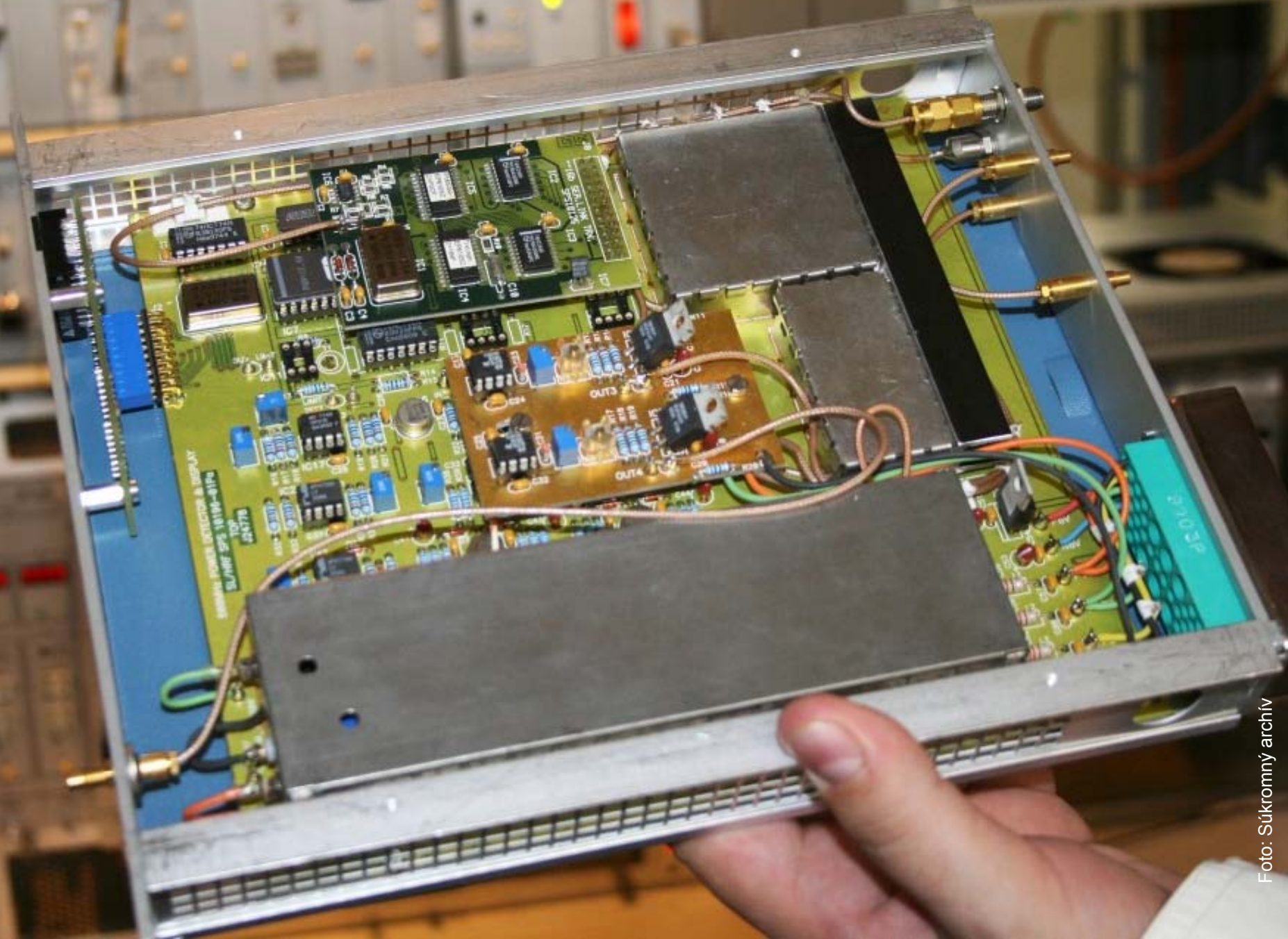
Analógový IQ demodulátor



Typický LLRF modul v PS (50-80-te roky)



Typický LLRF modul v SPS (90-te roky)



Typický LLRF modul pre LHC (2006)

Ľavá doska: RF front-end

Pravá doska: digitálna VME karta s AD prevodníkmi, FPGA, DA prevodníkmi a rýchlymi sériovými komunikačnými linkami

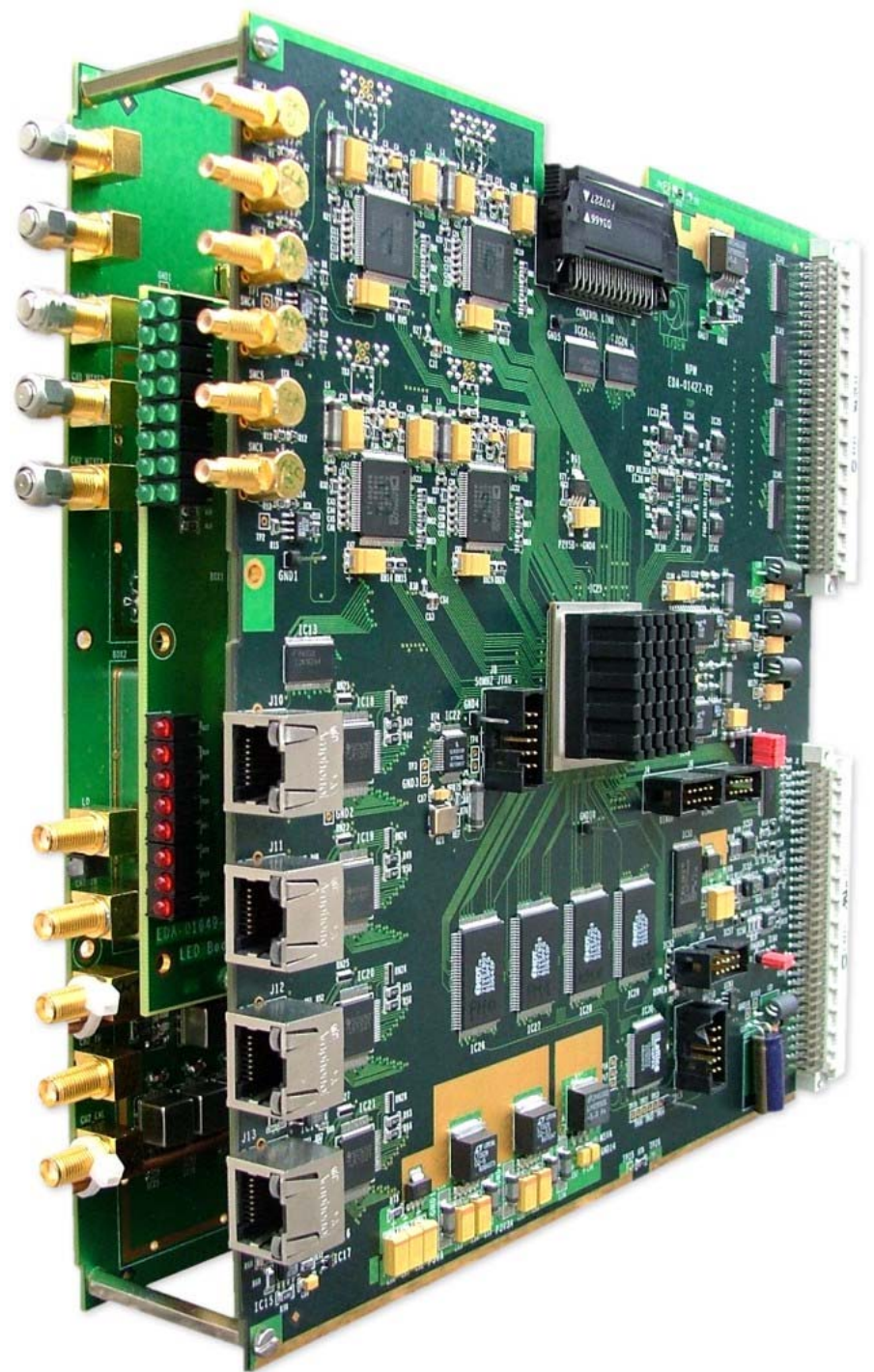




Foto: Súkromný archív

Miestnosť s LLRF riadením pre PS



Elektronika pre tetródové zosilňovače v PS

Foto: Súkromný archív



Faradayova kletka SPS

Foto: Súkromný archív

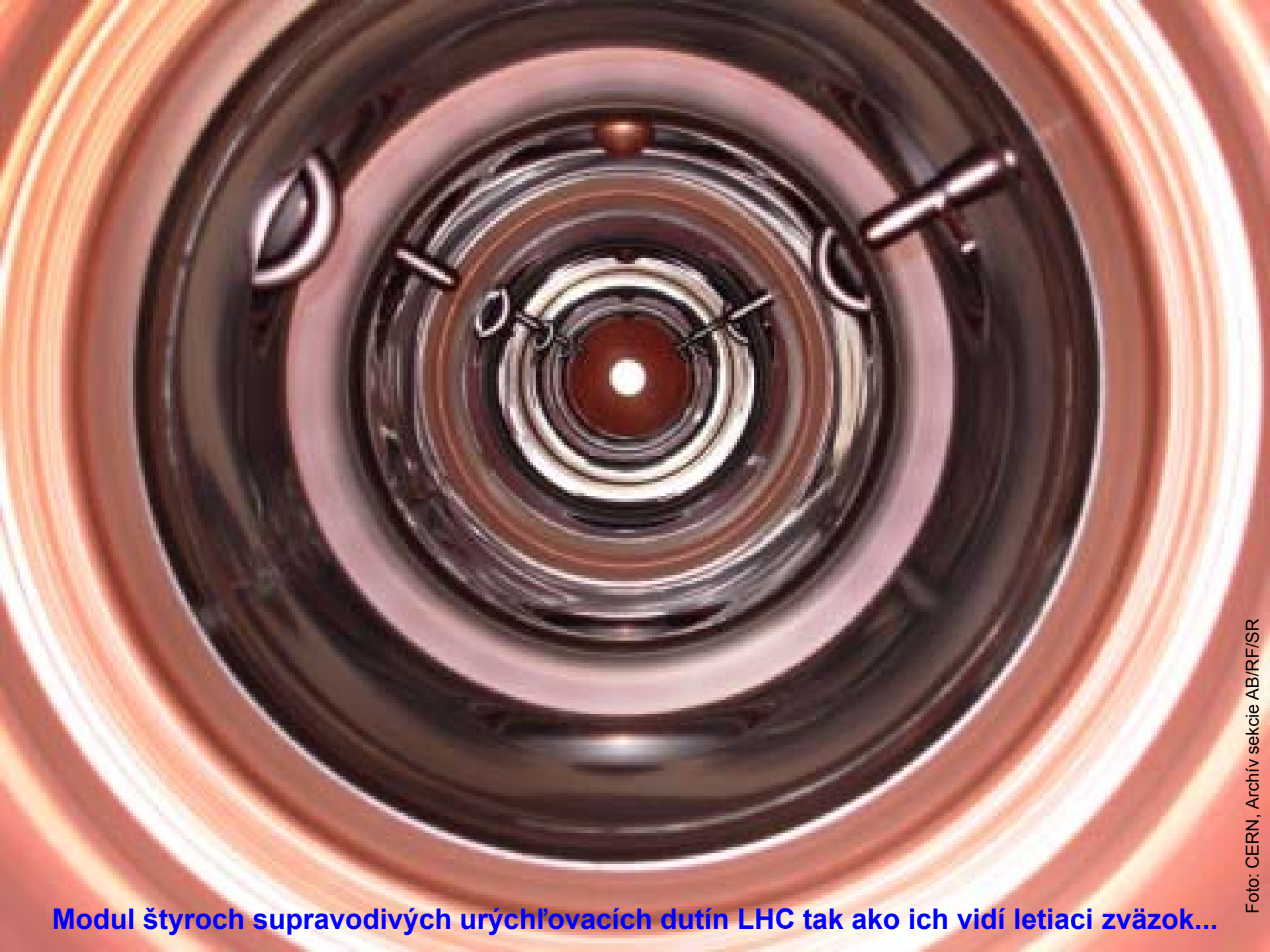


Faradayova kletka SPS

Foto: Súkromný archív

Faradayova klietka LHC





Modul štyroch supravodivých urýchľovacích dutín LHC tak ako ich vidí letiaci zväzok...