

O niektorých problémoch kalorimerie častíc vysokých energií

Základné otázky:

- Elementárne častice – progres v teórii a experimente
- Precízny experiment vo fyzike častíc
- Kalorimetria častíc vysokých energií
- Niektoré problémy fyziky detektorov

Posledná tretina 20. storočia - **veľký progres v teórii aj experimente!**

Teória

1. Vytvorenie Štandardného modelu (SM) – elektroslabé zjednotenie,

QCD. SM so svojou kategorizáciou častíc a síl umožnil:

- kvalitatívne nový pohľad na fyzikálne procesy na úrovni mikrosveta aj megasveta (horúca fáza vesmíru).
- predokladal existenciu celého radu častíc ($W^\pm$, Z^0 , gluóny,...)
- dosiahol výborná zhoda medzi experimentom a teóriou

2. Nespokojnosť s SM – vytvorenie nových fyzikálnych koncepcií

iducích za SM (GUT -teórie, SuSy, Teória superstrún).

- Veľký počet voľných parametrov – SM má v minimálnej verzii 18 voľných parametrov.
- SM nevysvetľuje hierarchiu hmotností častíc.
- Otázka pôvodu narušenia CP -symetrie nie je uspokojivo zodpovedaná.
- Nedáva odpoveď na otázku počtu generácií.
- Nezahrnuje gravitáciu.

Čo obsahuje SM ?

- **Teóriu elektroslabých interakcií**

(Symetria Lagranžiánu: $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ vysvetľuje elektromagnetické javy a javy slabých interakcií (β -rozpady))

- **Teóriu silných interakcií (QCD)**

(Symetria Lagranžiánu: $SU(3)_c$ vysvetľuje sily pôsobiace medzi kvarkami (komponenty nukleónov), nukleónmi a tc.)

Uvedené teórie sú kvantovými teóriami a veľa mi dobre vysvetľujú všetky javy obklopujúceho nášho sveta s výnimkou procesov súvisiacich s gravitáciou.

Gravitácia nie sú časťou SM !

Základné častice SM .

- **Fundamentálne fermióny**

(Základné stavebné častice fyzického sveta – vytvárajú štruktúry: nukleón, atómové jadro, atóm, etc.; sú to fermióny – platí pre nich Pauliho princíp)

- **Kvantá silových polí (intermediálne častice)**

(Bozóny (neplatí pre nich Pauliho princíp) sprostredkujúce interakcie medzi časticami)

- **Higsove častice (Interakcia častíc s Higgovým poľom dáva časticiam hmotnosť)**

Všetky fundamentálne častice, až na **Higgovu časticu**, boli experimentálne potvrdené.

Hľadanie Higsovej častice a procesov s ňou súvisiacich je **hlavnou úlohou** súčasnej experimentálnej fyziky elementárnych častíc.

Fundamentálne fermióny

QUARKS				LEPTONS			ELECTRIC CHARGE
ELECTRIC CHARGE							
+ 2/3							-1
	UP	CHARM	TOP	ELECTRON	MUON	TAU	
-1/3							0
	DOWN	STRANGE	BEAUTY	ELECTRON NEUTRINO	MUON NEUTRINO	TAU NEUTRINO	

3 colours

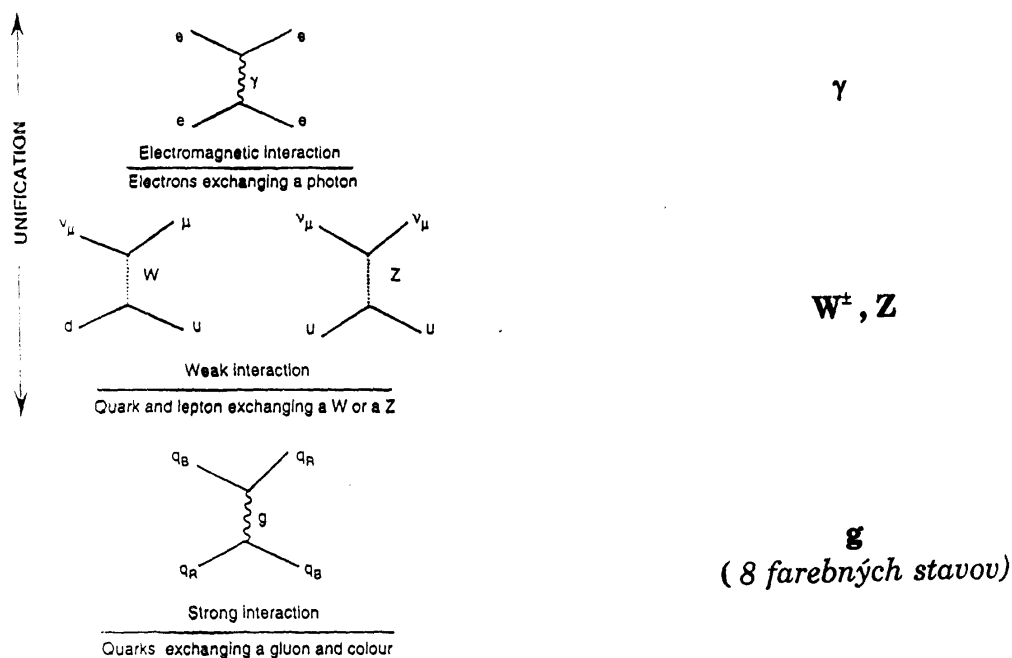
Typické kvarkové štruktúry: **mezóny** ($q\bar{q}$) a **baryóny** (qqq)

Atóm: **atómové jadro** + **elektrónový obal** ($\Rightarrow$ elektróny)

$\Downarrow$

nukleóny $\Rightarrow$ **kvarky** (protón $p \equiv uud$, neutrón $n \equiv udd$)

Kvantá silových polí



Higgsove častice

H (*Higgsov bozón*). Vákuum je Higgsov kondenzát a interakcia častíc s ním dáva časticiam hmotnosť !

O úlohe kalibračných symetrií

V základe teórií vchádzajúcich do SM sú kalibračné symetrie.

Prípad *symetrie* $U(1)$.

Uvažujme elektrón-pozitrónové pole – jeho kvantá sú **elektróny a pozitróny**.

Popis poľa $\rightarrow$ funkcia poľa $\psi(x)$

Fyzikálny systém tvorený poľom $\rightarrow L(\psi, \partial_\mu \psi)$

$U(1)$: $\psi' = e^{i\alpha} \psi$ $\alpha = \begin{cases} \text{const} & \rightarrow \text{globálna transformácia} \\ \alpha(x) & \rightarrow \text{lokálna transformácia} \end{cases}$

Invariantnosť $L(\psi, \partial_\mu \psi)$ voči globálnej $U(1)$ transformácii

$$\partial_\mu J^\mu(x) = 0 \quad J^\mu(x) = \bar{\psi}(x) \gamma^\mu \psi(x)$$

Požiadavka lokálnej $U(1)$ -invariantnosti $L(\psi, \partial_\mu \psi)$ vedie k:

$$L(\psi, \partial_\mu \psi) \rightarrow L(\psi, \partial_\mu \psi) - g J^\mu(x) \cdot A_\mu(x)$$

kde g je väzbová konštanta (= **elektrický náboj** v prípade e^+e^- -poľa)

Prípad *symetrie* $SU(2)$.

Fyzikálny systém:

$$\text{izodublet voľných spinorových polí} \rightarrow \Psi = \begin{pmatrix} \psi_\nu \\ \psi_e \end{pmatrix} \quad L = L(\Psi, \bar{\Psi}, \partial_\mu \Psi, \partial_\mu \bar{\Psi})$$

$$SU(2): \Psi \rightarrow \Psi' = \exp(it_a \epsilon^a) \Psi \quad t_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad t_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad t_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Požiadavka lokálnej $SU(2)$ symetrie $L(\psi, \partial_\mu \psi)$ vedie k:

$$L(\psi, \partial_\mu \psi) \rightarrow L(\psi, \partial_\mu \psi) - g' J_a^\mu(x) \cdot W_\mu^a(x)$$

Teória elektroslabých interakcií.

- **Lokálna $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ –symetria Lagranžiánu** $\rightarrow W^+, W^-, Z$ a γ
(index L : len ľavé komponenty polí , Y: náboj je $Y=2(Q -T_3)$).
- **Spontánne narušenie lokálnej symetrie** : vákuum nie je lokálne $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ -symetrické $\rightarrow$ Higgsov kondenzát + hmotnosti častíc.
- **Univerzálnosť interakcií** : väzbové konštanty interakcií sú rovnaké pre všetky 3 pokolenia častíc.

Kvantová chromodynamika.

Kalibračná symetria je $SU(3) \rightarrow$ **8 kalibračných bozónov (gluóny)**
sprostredkujúcich silné interakcie medzi kvarkami.

SM je vo **vel'mi dobrej zhode s experimentom** a umožňuje popísať javy nás obklopujúceho sveta od jeho horúcej fázy ($\sim 10^{-12}$ s po počiatočnej singularite) až po súčasnosť!

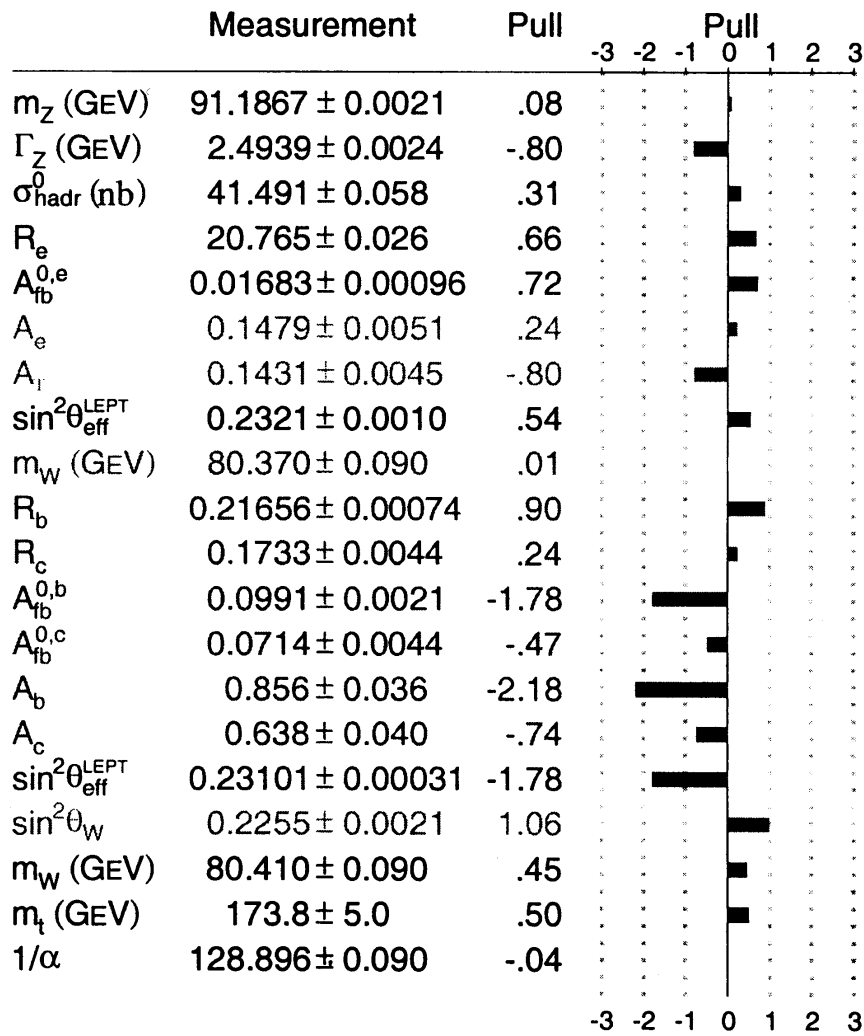
Z hľadiska horúcej fázy :

- Súčasný experiment skúma fázu $\sim 10^{-11}$ s
- LHC experimenty:
 1. fáza $\sim 10^{-12}$ s (vytvorenie Higgsovho kondenzátu, asymetria medzi látkou a anti látkou) ATLAS, CMS, LHCb
 2. fáza $\sim 10^{-6}$ s (uväznenie kvarkov a formovanie hadrónov) ALICE

SM - porovnanie s experimentom

Základné zdroje : LEP, SLC a Tevatron

Pulls from SM fit to all data



$$\chi^2 / \text{dof} = 16.4 / 15$$

Ranný Vesmír

čas (sec)

0 $\Rightarrow$ **Big Bang** - nekonečne horúci a hustý vesmír (?) ($T \sim 10^{32}$)

$\Rightarrow$ **Epocha kvantovej gravitácie** (?)

10^{-43} Vesmír vzniká z kvantovej gravitačnej fluktuácie.

$\Rightarrow$ **Epocha GUT**

10^{-34} $\Rightarrow$ **Kozmická inflácia** (?) (každých 10^{-34} sec sa vesmír zdvojnásobil)
Obrovská energia inflatonovho poľa falošného vákua sa konvertovala na častice

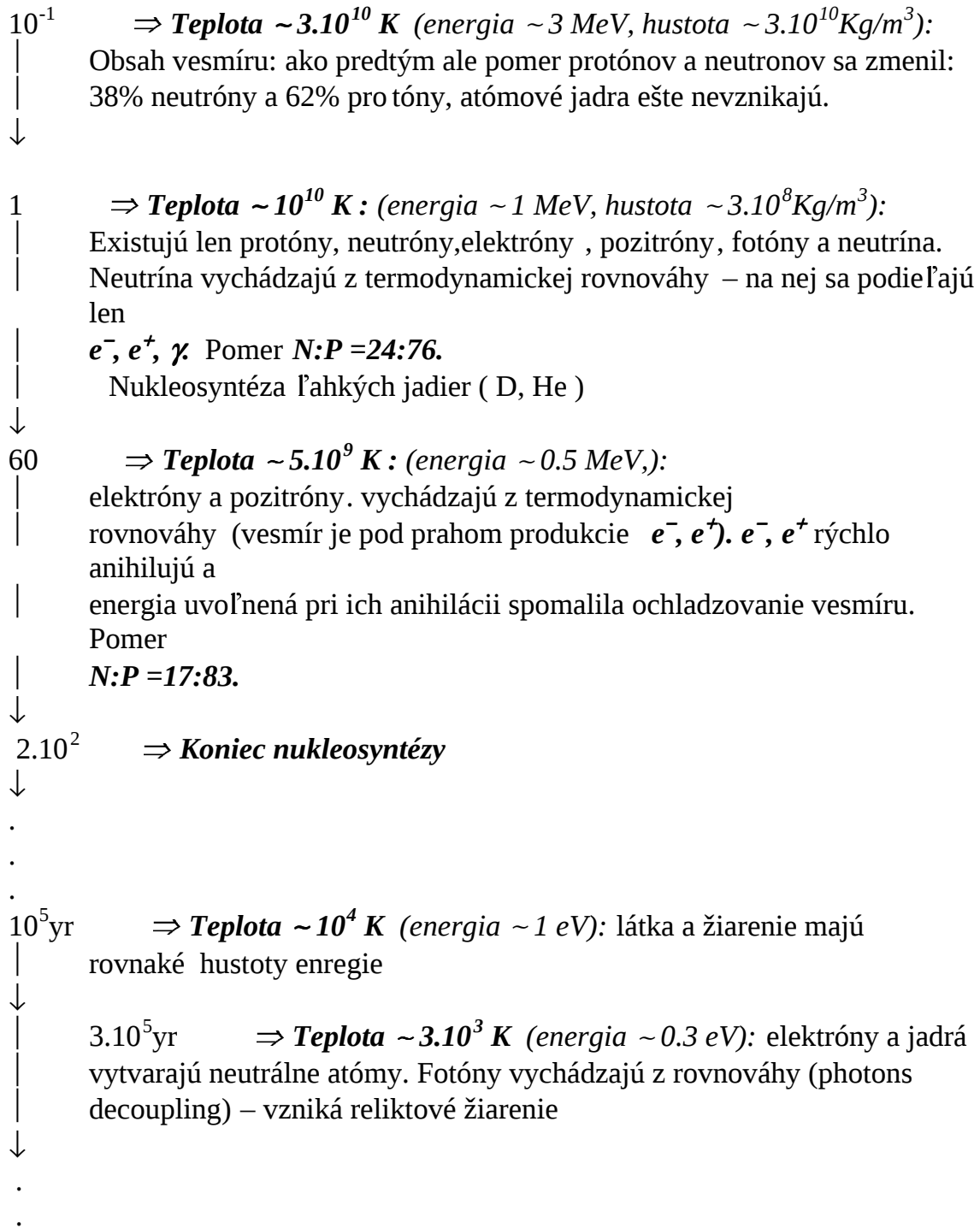
10^{-32} $\Rightarrow$ **Kvarková epocha** (farebný svet)

$\Rightarrow$ **Teplota $\sim 3 \cdot 10^{15}$ K** (energia ~ 200 GeV):
• Fázový prechod $\rightarrow$ Vznik Higgsovho kondenzátu $\rightarrow$ leptóny, kvarky, $W^{\pm}$, Z-bozóny nadobúdajú hmotnosť
• Vznik prebytku látky nad antilátkou ($\sim 1:10^{10}$)

10^{-11} $\Rightarrow$ **Teplota $\sim 10^{15}$ K** (energia ~ 100 GeV): $\leftarrow$ Súčasný experiment
Obsah vesmíru: leptóny, kvarky, gluóny, $W^{\pm}$, Z-bozóny, fotóny

10^{-5} $\Rightarrow$ **Teplota $\sim 10^{12}$ K** (energia ~ 200 MeV):
“Confinement” kvarkov $\rightarrow$ formovanie hadrónov (protóny, neutróny, iné baryóny, mezóny $\rightarrow$ existujú len “biele” objekty .

10^{-2} $\Rightarrow$ **Teplota $\sim 10^{11}$ K** (energia ~ 10 MeV):
Termodynamickú rovnováhu tvoria : elektróny (e^{-}), pozitróny (e^{+}), neutrína (ν) a fotóny (γ);
Počet nukleónov je malý ($n/p = 10^9$) protóny a neutróny sú v rovnováhe (50% : 50%)



Experiment

- Významný progres (revolúcia) v technológii experimentu:
 1. Vznik **elektronického experimentu** – možnosť študovať procesy s veľmi nízkymi účinnými prierezmi.
 2. Nástup **kolajderov** (ISR, SPS, Tevatron, LEP,...) –prechod k štúdiu interakcií pri veľmi vysokých energiách.
- Experimentálny **objav kvarkovej štruktúry hadrónov** - objav c -, b - a t -kvarkov, experimentálne **potvrdenie existencie $W^\pm$, Z^0 bozónov**.

Požiadavky na súčasný experiment:

- Precízna EW-fyzika a QCD (štúdium EW - a QCD-procesov vyšších rádov)
- Štúdium neperturbatívnych QCD procesov
- Potenciál pre objav novej fyziky

Tendencie v experimente:

- Všeobecne zamerané kolajderové experimenty s 4π geometriou (CDF,D0 (Tevatron), ATLAS, CMS (LHC)).
- Dedikované experimenty: B-fabriky (KEKB, PEP -II, HERA-B, LHCb), K-fabriky (KLOE).
- Neurýchľovačové experimenty : neutrínové experimenty, rozpad protónu (Soudan II, Kamiokande, IMB,...)

Súčasná fyzika častíc: Komplementarita experimentov

Precízna elektroslabá fyzika

Rozpad miónu $\mu^- \rightarrow e^- \tilde{\nu}_e \nu_\mu$ - Fermiho konštanta G_F je daná dobou života miónu.



$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{e^2}{8s_W^2 M_W^2} (1 + \Delta r)$$

Δr je veličina závislá na e , M_W , M_Z , M_H , m_t - výsledok zahrnutia vyšších rádov:

$$\Delta r = \Delta\alpha - \frac{c_W^2}{s_W^2} \Delta\rho + (\Delta r)_{rem}$$

$\Delta\alpha$ a $\Delta\rho$ sú korekcie 2. rádu k propagátoru fotónu a W-bozónu

$$\Delta\alpha = \sum_f Q_f^2 \frac{\alpha}{3\pi} \left(\frac{5}{3} - \log \frac{M_Z^2}{m_f^2} \right) \quad \Delta\rho = N_C \frac{\alpha}{16\pi s_W^2 c_W^2} \frac{m_t^2}{M_Z^2}$$

$(\Delta r)_{rem} \equiv$ ostatné korekcie – kde je aj logaritmická závislosť od M_H :

$$(\Delta r)_{rem}^{Higgs} = \frac{\alpha}{16\pi s_W^2} \frac{11}{3} \left(\log \frac{M_H^2}{M_W^2} - \frac{5}{6} \right)$$

Určenie *hmotnosti t-kvarku* via Δr : $m_t = 168.2 \pm 7.4$ GeV (LEP).

Ohraničenie na *hmotnosť Higgsovho bozónu* via Δr (ATLAS)

	2000	At LHC start	LHC
ΔM_W [MeV]	56	30	15
Δm_t [GeV]	5.1	3.5	2

Eqivalentný chybový vklad: $\Delta M_W = 0.7 \cdot 10^{-2} \Delta m_t \rightarrow 30\%$ ohraničenie M_H

Precízna elektroslabá fyzika

Rozpad $\mu^- \rightarrow e^- \tilde{\nu}_e \nu_\mu$ - Fermiho konštanta G_F je daná dobou života miónu.

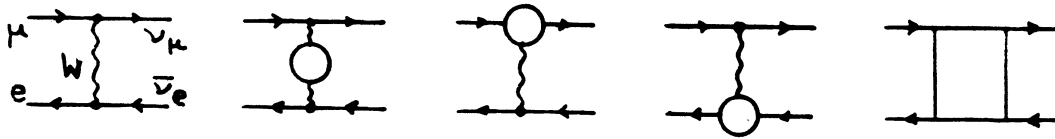
Teória: amplitúdu procesu T

Experiment : účinný prierez σ

Vzťah medzi T a σ : $\sigma \sim |T|^2$

1. rád ($\sim g^2$)

2. rád ($\sim g^4$ $g = e/s_W$)



$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{e^2}{8s_W^2 M_W^2} (1 + \Delta r)$$

Δr je veličina závislá na e , M_W , M_Z , M_H , m_t -

prítom závislosť od m_t je kvadratická zatiaľ čo od M_H je logaritmická.

Známe Δr je možné použiť na určenie m_t poprípade M_H

LEP – experimenty:

Určenie **hmotnosti t-kvarku** via Δr : $m_t = 168.2 \pm 7.4 \text{ GeV}$

$$M_H \leq 280 \text{ GeV}$$

Ohraničenie na **hmotnosť Higgsovho bozónu** via Δr (ATLAS)

	2000	At LHC start	LHC
ΔM_W [MeV]	56	30	15
Δm_t [GeV]	5.1	3.5	2

Eqivalentný chybový vklad: $\Delta M_W = 0.7 \cdot 10^{-2} \Delta m_t \rightarrow 30\%$ ohraničenie M_H

Výzva pre súčasný experiment: Hľadanie Higgsovho bozónu

V rámci SM (ATLAS, CMS):

<i>Hmotnostný interval (GeV)</i>	<i>rozpad</i>
$90 < m_H < 100$	$H \rightarrow b\bar{b}$
$90 < m_H < 150$	$H \rightarrow \gamma\gamma$
$130 < m_H < 2m_Z$	$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l^\pm$
$m_H > 2m_Z$	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l^\pm, 2l^\pm 2\nu$
	$H \rightarrow WW, ZZ \rightarrow l^\pm \nu$ 2 jets,
$m_H \leq 2m_Z$	$2l^\pm$ 2 jets

MSSM Higgs

$$A \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow e\mu+2\nu+2 \text{ jets}$$

$$H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu \rightarrow 2 \text{ jets} +l\text{-tag} +b\text{-tag}$$

Štruktúra experimentu je 3-úrovňová

- Trekovací systém (treky častíc, primárny vertex, sekundárne vertexy).
- Kalorimetrický systém (energie a miesta dopadov elektrónov, fotónov a jetov, missing P_T).
- Miónový systém (trekovanie miónov).

Fyzikálne požiadavky kalorimetrický systém:

- Presné meranie energie a polohy elektrónov a fotónov
- Meranie energie a smeru jetov
- Meranie chybajúcej pričnej hybnosti v evente
- Časticová identifikácia (odlíšenie elektrónov a fotónov od hadrónov a jetov, odlíšenie hadronových rozpadov τ -leptónov od jetov).
- Výber eventov na triggerovej úrovni.

Požiadavky diktované luminozitou:

Luminozita $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \rightarrow 20$ mäkkých zrážok / bunch crossing (každých 25 ns)

$\Rightarrow$

- Rýchlu odozvu detektora (< 50 ns),
- Vysoká granularita,
- Vysoká radiačná odolnosť (resistivity).

Požiadavky na hadronový kalorimeter

- **Pokrytie intervalu rapidít:** $|\eta| \leq 5$, $\eta = -\ln(\tan \theta/2)$, pre rekonštrukciu jetov a pre rozpady ťažkých Higgsových bozónov.
- **Granularita.** Najprísnejšie požiadavky: rekonštrukcia jetov z rozpadu $W \rightarrow \text{jet-jet}$ pri veľkých p_T : $\Rightarrow$ granularita : $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ pri $|\eta| < 3$
- **Energetické rozlíšenie.** Je dané požiadavkami rozlíšenia energie jetov:

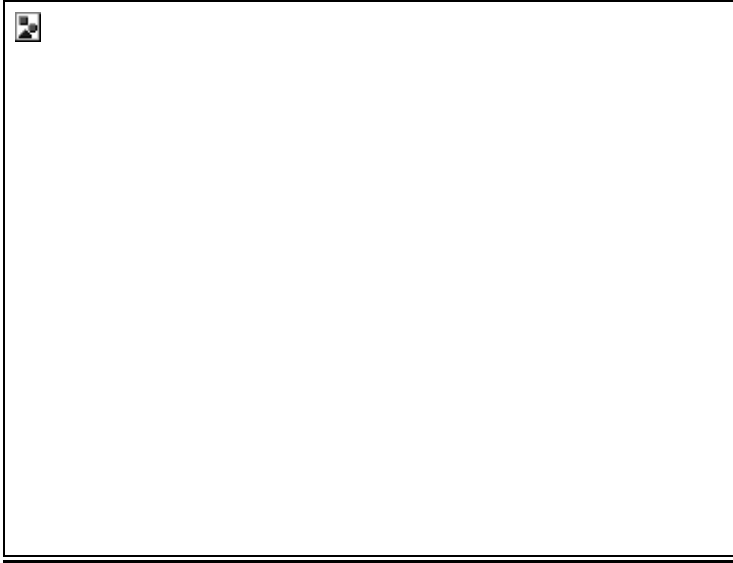
$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\% \quad \text{pre } |\eta| < 3 \quad \frac{\Delta E_T}{E_T} = \frac{100\%}{\sqrt{E}} \oplus 10\% \quad \text{pre } 3 < |\eta| < 5$$

Požiadavky na EM calorimeter

- **Pokrytie intervalu rapidít:** $|\eta| \leq 5$, $\eta = -\ln(\tan \theta/2)$,
pozorovanie procesov $H \rightarrow \gamma\gamma$ a $H \rightarrow 4e$: $|\eta| \leq 2.5$
veľké rapidity ($2.5 \leq |\eta| \leq 5$): rekonštrukcia jetov a meranie E_T^{miss}
- **Rekonštrukcia elektrónov od 1 -2 GeV do 5 TeV** : dolná hranica je daná semileptónovými rozpadmi b, horná hranica: rozpady W' a Z' .
- **Excelentné energetické rozlíšenie v oblasti 10-300 GeV**: žiada sa 1%-rozlíšenie v invariantnej hmotnosti pre $H \rightarrow \gamma\gamma$ a $H \rightarrow 4e \Rightarrow$ Samplingový člen $\leq 10\%/\sqrt{E}$ a konštantný člen $\leq 1\%$.
- **Totálna hĺbka kalorimetra ≥ 24 radiačných dĺžok pri $\eta=0$.**
- **Dynamický rozsah 50 MeV až 3 TeV.** 50 MeV zodpovedá šumu v 1 kanále a horná hranica maximalnej energii uloženej v 1 bunke.
- **Linearita odozvy lepšia než 0.5 % v energetickom rozsahu do 300 GeV.** Je to dané potrebou optimálneho hmotnostného rozlíšenia pre $H \rightarrow \gamma\gamma$ a $H \rightarrow 4e$.
- **Meranie smeru spŕšky v θ s rozlíšením $\sim 50 \text{ mrad} / \sqrt{E(\text{GeV})}$.** Uhlový príspevok k šírke rekonštruovanej invariantnej hmotnosti $\gamma\gamma$ (rozpad $H \rightarrow \gamma\gamma$) musí byť zanedbateľný.
- **Excelentné fotón/jet odlíšenie.** Je potrebné, aby faktor potlačenia jetov bol 5000 (pri fotónovej efekt. 80%) v intervale $25 \text{ GeV} < p_T < 100 \text{ GeV}$ - len tak je možné potlačiť pozadie γ -jet a jet-jet pre $H \rightarrow \gamma\gamma$.
- **Excelentné elektrón/jet odlíšenie** . Zastúpenie izolovaných elektrónov ($p_T > 20 \text{ GeV}$), od rozpadov W, Z a ťažkých kvarkov, je o 5 rádov menšie ako zastúpenie QCD-jetov (e-jet $\sim 10^{-5}$) pri tých istých p_T
- **Excelentné τ /jet odlíšenie** . Hlavne pre potreby rozpadov $A, H \rightarrow \tau\tau$, $H^\pm \rightarrow \tau\nu$.

Analýza energetického rozlíšenia samplingového kalorimetra.

Analýza pre : **SciFi kalorimetre** (kalorimetre na báze scintilačných vlákien).



Obr. 1: Schéma modelovaného kalorimetrického bloku

Energetické rozlíšenie sme analyzovali na základe vzťahu :

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E} = \sqrt{\frac{a^2}{E} + b^2 + \frac{c^2}{E^2}} \quad [E] = GeV \quad (ER)$$

Uvedená formula odráža 3 základné zdroje fluktuácií:

1. Samplingové fluktuácie – spôsobené tým, že len časť energie incidentnej častice sa uloží v aktívnom médiu – 1. člen(**samplingový**) v (ER).
2. Fluktuácie spôsobené nehomogenitami kalorimetra (včítane zberu signálu), unikom časti energie a pod. – 2. člen (**konštantný**) v (ER).
3. Fluktuácie spôsobené šumom elektroniky – 3. člen (**elektronický**) v (ER).

Štruktúra stochastického člena energetického rozlíšenia.

Závislosť energetického rozlíšenia kalorimetra od parametrov jeho štruktúry.

- Priemer scintilačného vlákna: **0.5 mm, 0.75 mm, 1.0 mm a 1.5 mm**
- Pomer pasívneho a aktívneho média (olovo:lepidlo:vlákno): **1 : 0.17 : 1, 1.8 : 0.085 : 1 a 4 : 0.0425 : 1;**
- Zoslabovacia dĺžka scintilačného vlákna: **50 cm, 75 cm, 150 cm a ∞ ;**
- Reflektivita na konci vlákna (**0%, 40%, 70% a 100%**).

Výsledky simulácií sme analyzovali pomocou **modelu** založeného na:

- Energia **E** pohltaná kalorimetrom je rozdelená na „kvantá“ veľkosti **q_{eff}** .
- Pravdepodobnosť pohltania „kvanta“ v aktívnom médiu je **S_f** (sampling fraction).
- Celkový počet kvánt v sprške je **$N = E / q_{eff}$** a stredný počet „kvánt“ pohltaných v aktívnom médiu je: **$N_a = S_f \frac{E}{q_{eff}}$** .
- Počet kvánt pohltaných v aktívnom médiu je náhodná veličina s Poissonovým rozdelením: **$\delta N_a = \sqrt{N_a}$**

Pre **rozlíšenie** ideálneho samplingového kalorimetra (bez nehomogenít):

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\delta N_a}{N_a} = \sqrt{\frac{q_{eff} / S_f}{E}} \quad (2)$$

Závislosť od uhla dopadu (**θ**) a priemeru vlákna (**d**) je skrytá v **q_{eff}** .

Interpretácia:

q_{eff} je stredná energetická strata sprškovej častice pri jednom prechode vlákna:

$$q_{eff} = const \cdot \frac{d}{\sin \theta_{eff}} \quad (3)$$

$\theta_{eff} \equiv$ efektívny uhol medzi smerovým vektorom častice a osou vlákna.

Súvislosť medzi uhlom θ_{eff} a uhlom dopadu θ .

Predpoklad: sprška pozostáva z dvoch druhov častíc:

- 1) častíc jadra spršky charakterizovaných efektívnym uhlom $\theta_c \approx \theta$,
- 2) častíc sprškového „hala“ - ich smery sú izotropne rozdelené (nezávislosť na smere incidentnej častice) - stredný efektívny uhol $\theta_h \approx \pi/2$.

Štruktúra stochastického koeficientu a :

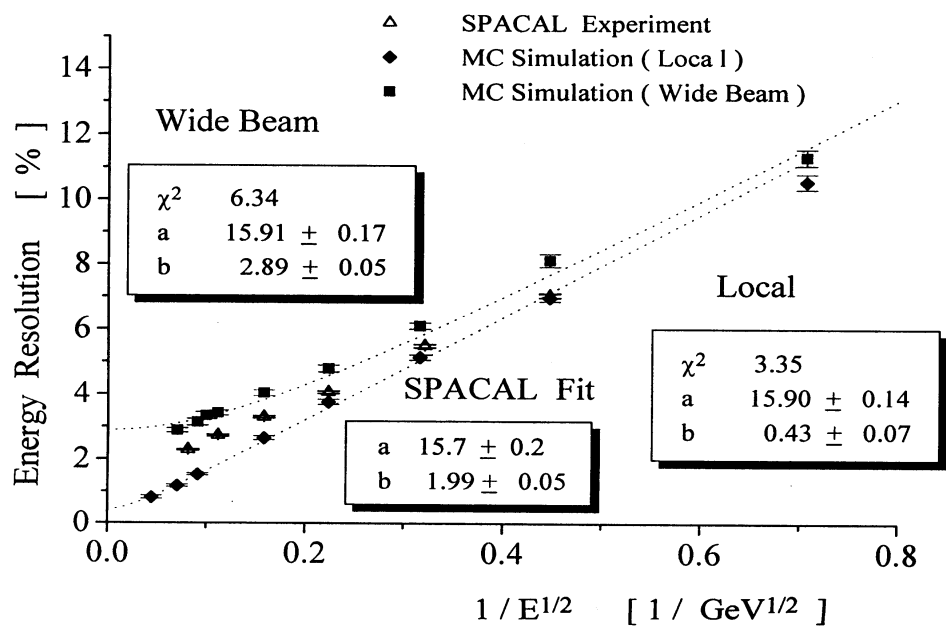
$$a = c \sqrt{\frac{d}{S_f}} \sqrt{w \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) + 1} \quad (4)$$

c a w sú kalorimetrické parametre, ktoré je treba nájsť.

Analýza výsledkov modelovania odozvy kalorimetra pre vyššie uvedené podmienky viedla k:

$$c = 17.2 \pm 1.0 \quad \text{a} \quad w = 0.04 \pm 0.01$$

pre *SciFi kalorimeter*.



Obr. 2: Rozlíšenie SPACAL kalorimetra vs výsledky modelovania

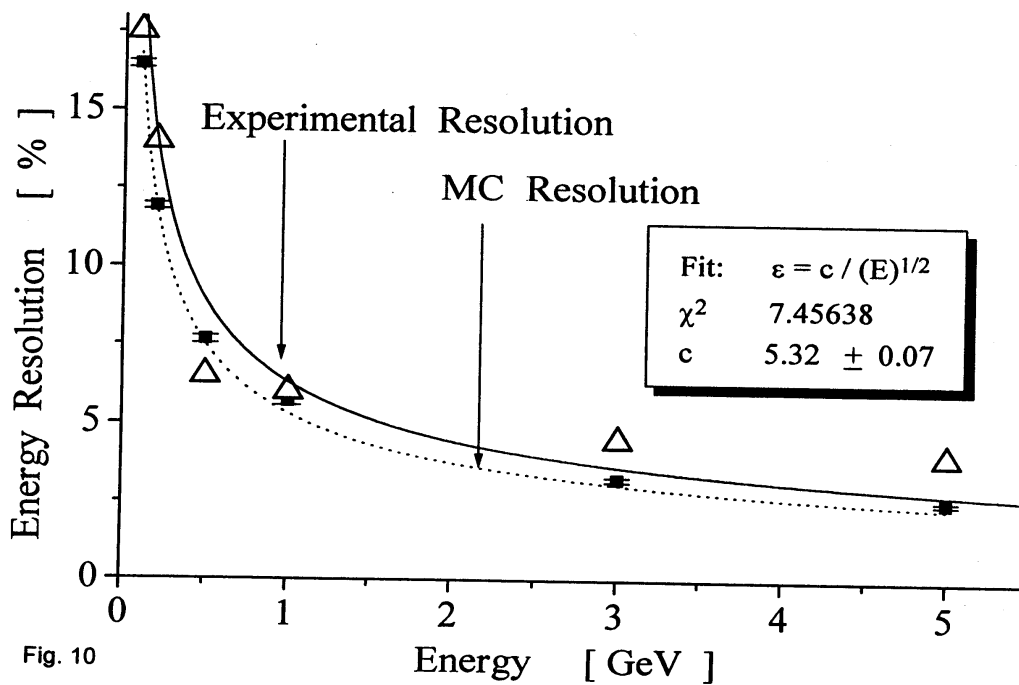


Fig. 10

Obr. 3: Energetické rozlíšenie SciFi kalorimetra (Hertzog et al.) vs výsledky modelovania.

Porovnanie samplí ngového koeficientu určeného z modelu (4) a z výsledkov simulácií.

a_{MC} [% $\sqrt{GeV}$]	a_{model} [% $\sqrt{GeV}$]	Tilt Angle [deg]	Sampling Fraction [%]	Fibre Diameter [mm]
4.25	3.99 ± 0.20	15°	9.09	0.50
5.59	5.30 ± 0.27	15°	5.25	0.50
6.54	6.13 ± 0.31	15°	3.83	0.50
7.15	6.79 ± 0.34	15°	3.21	0.50
7.71	7.71 ± 0.39	15°	2.76	0.50
8.21	8.32 ± 0.42	15°	2.43	0.50
5.20	4.56 ± 0.23	15°	9.09	0.75
6.84	6.36 ± 0.32	15°	5.25	0.75
8.01	7.66 ± 0.39	15°	3.83	0.75
8.75	8.54 ± 0.43	15°	3.21	0.75
9.44	9.15 ± 0.46	15°	2.76	0.75
10.06	10.17 ± 0.51	15°	2.43	0.75
6.01	5.25 ± 0.26	15°	9.09	1.00
7.90	7.77 ± 0.39	15°	5.25	1.00
9.25	8.82 ± 0.44	15°	3.83	1.00
10.11	10.32 ± 0.52	15°	3.21	1.00
10.90	11.33 ± 0.57	15°	2.76	1.00
11.61	12.01 ± 0.60	15°	2.43	1.00
14.85	15.80 ± 0.58	3°	2.30	1.00
10.06	10.02 ± 0.15	3°	5.01	1.00
7.72	7.06 ± 0.10	3°	8.50	1.00
11.60	10.98 ± 0.41	2°	2.30	0.50
16.41	16.70 ± 0.13	2°	2.30	1.00
13.47	15.11 ± 0.27	5°	2.30	1.00
12.34	13.42 ± 0.21	10°	2.30	1.00
26.63	27.40 ± 0.43	0.5°	2.30	1.00

Štruktúra konštantného člena energetického rozlíšenia.

Konštantný člen reprezentuje fluktuácie spojené s nehomogenitami štruktúry kalorimetra.

Metóda štúdia: porovnanie lokálnej a globálnej odozvy kalorimetra.

Vstupné podmienky:

- pomer pasívneho a aktívneho média bol **4.17 : 1**
- pasívny materiál : zmes olova (99%) a lepidla (1%)
- aktívny materiál: scintilačné vlákna priemeru **1 mm**.

Simulácie lokálnej odozvy boli realizované:

- pre 100 rôznych bodov dopadu na ploche $1 \times 1 \text{ cm}^2$.
- incidentné energie: **5, 40 a 120 GeV** a uhol dopadu častíc **3°** pre energiu **10 GeV** a uhol dopadu **1°**.
- Pre rovnaké energie bola modelovaná aj globálna odozva (široký zväzok).

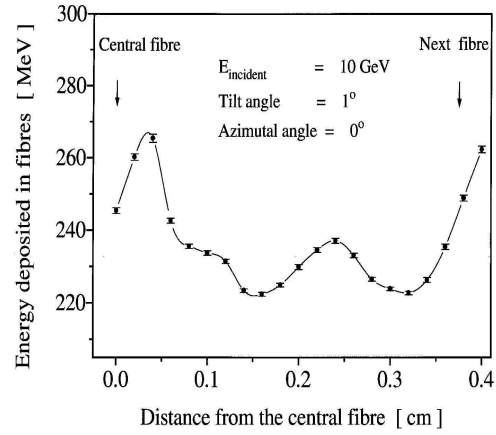
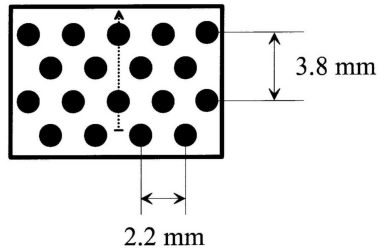
Výsledok analýzy: konštantný člen javí logaritmickú závislosť na incidentnej energii:

$$b = \frac{\tilde{b}}{\left(\ln \frac{E}{E_{thr}} \right)^{3/2}} \quad (5)$$

Kde E_{thr} je určitá prahová energia, pri ktorej začína produkcia párov ($\approx 1 \text{ MeV}$).

Interpretácia: relatívna veľkosť nehomogenít klesá s logaritmom energie.

Skúmanie nerovnorodosti odozvy kalorimetra.



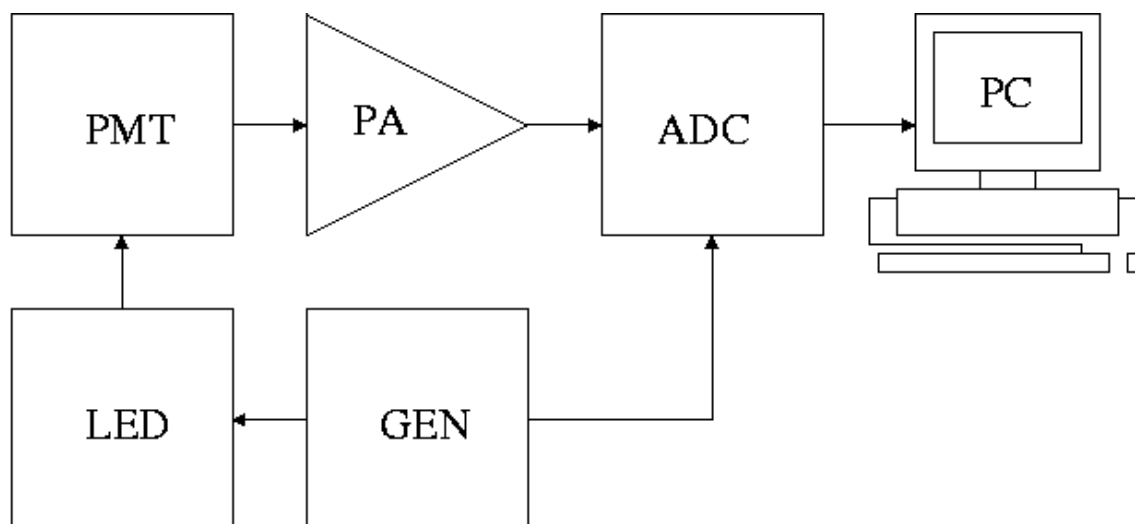
Obr.4: Štruktúra SciFi-kalorimetra, bodkovaná čiara vyznačuje trasu skanovania lokálnej odozvy.

Obr. 5: Stredná lokálna odozva častice s energiou 10 GeV a uhlom dopadu 1 ako funkcia bodu dopadu.

E_{inc}	[GeV]	5	40	120
σ_{non}	[MeV]	4.53 ± 0.32	31.80 ± 2.27	78.9 ± 3.9
$\sigma_{non}^{th} = \tilde{b} / \left(\ln \frac{E}{E_{thr}} \right)^{\frac{3}{2}}$	[MeV]	5.30 ± 0.14	30.59 ± 0.80	80.4 ± 2.1
σ_0	[MeV]	8.24 ± 0.10	25.59 ± 0.40	46.83 ± 0.67
$\sigma_{non} / \bar{E}$	[%]	3.88 ± 0.28	3.39 ± 0.25	2.81 ± 0.14
$\sqrt{(\sigma_{non}^2 + \sigma_0^2)} / \bar{E}$	[%]	8.15 ± 0.58	4.42 ± 0.32	3.26 ± 0.12

Tab.1: Nerovnorodosť odozvy kalorimetra pre 3 incidentné energie, σ_{non} resp. σ_{non}^{th} je štandardná odchýlka nerovnorodosti lokálnej strednej odozvy určená priamo z modelovania resp. nájdená na základe (5), σ_0 je štandardná odchýlka odozvy v bode so strednou lokálnou odozvou.

Metóda jednofotoelektrónovej analýzy



Obr. 6: Experimentálne zariadenie pre snímanie jedno-fotelektrónových spektier.

Komponenty experimentálneho zariadenia:

- GEN - nanosekundový generátor,
- LED -svetelná dioda, PA -predzosilňovač,
- FN - fotonásobič ,
- ADC – nábojovo-citlivý amplitúdový analyzátor,
- PC – riadiaci počítač

Odozva fotonásobiča

$$S_{real}(x) = \sum_{n,k=0}^{\infty} \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \cdot \frac{\mu_1^k e^{-\mu_1}}{k!} \cdot \int S_n^{(1)}(x') \cdot S_k^{(2)}(x-x') dx' \quad (1)$$

Pritom

$$S_n^{(1)}(x) = \begin{cases} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(nK_1)^m \cdot e^{-nK_1}}{m!} \cdot S_m^{(2)}(x) & n=1, 2, 3 \\ G(x, Q_0 + nQ_1, \sigma_0^2 + n\sigma_1^2) & n=0, n>3 \end{cases} \quad (2)$$

- Q_0, σ_0 sú piedestál a zodpovedajúca štandardná odc hýlka;
- Q_1, σ_1 – výstupný náboj iniciovaný 1 f.e. z fotokatódy (FK) a zodpovedajúca štandardná odchýlka;
- μ, μ_1 – počet f.e. zachytených 1. dynódou resp. 2. dynódou FN;
- K_1 – koeficient sekundárnej emisie na prvej dynóde;
- $G(x, Q, \sigma^2)$ je Gaussova funkcia.

Limitné spektrum

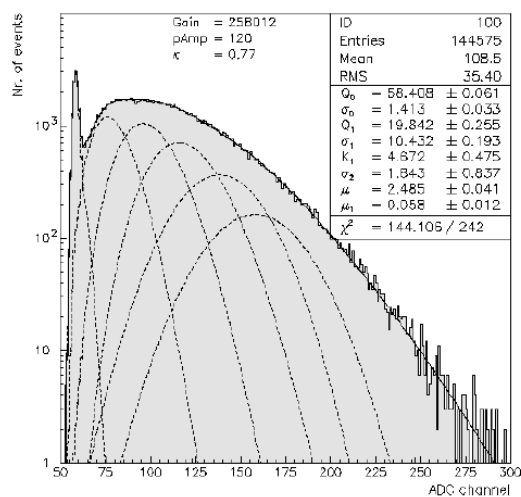
$$S_{real}(x) \xrightarrow{\mu \rightarrow \infty} S_{\infty}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\infty}^2}} \exp\left(-\frac{(x-Q_0-Q_{\infty})^2}{2\sigma_{\infty}^2}\right) \quad (3)$$

Parametre limitného spektra ($Q_{\infty}, \sigma_{\infty}$) vyjadrené cez (Q_1, σ_1, μ):

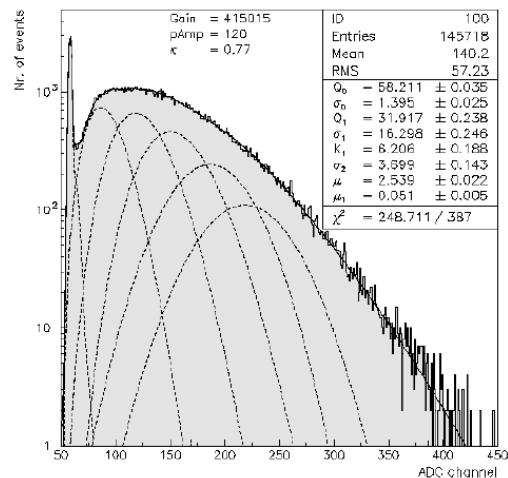
$$Q_{\infty} \approx \mu Q_1 \quad \text{a} \quad \sigma_{\infty} \approx \mu \sqrt{\sigma_1^2 + Q_1^2} \quad (4)$$

$$\text{Excess faktor fotonásobiča:} \quad \mu = f_{PMT} \cdot \frac{Q_{\infty}^2}{\sigma_{\infty}^2} \quad f_{PMT} = 1 + \frac{\sigma_1^2}{Q_1^2} \quad (5)$$

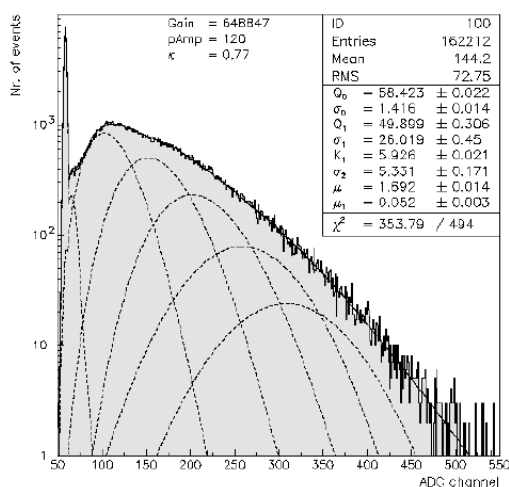
Analyzované spektrá - fotonásobič R5900



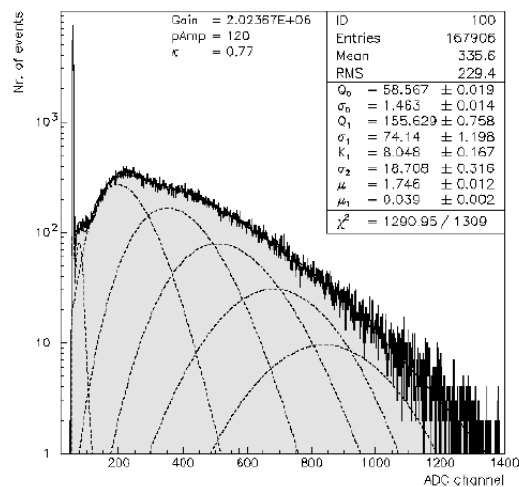
obr. 4a: 650 V



obr. 4b: 700 V



obr. 4c: 750 V

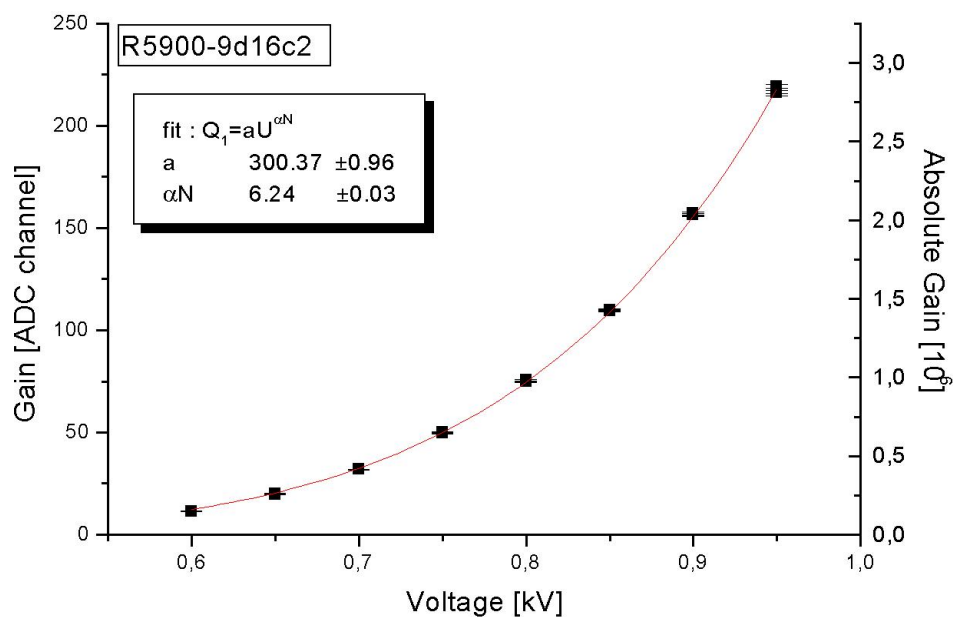


obr. 4d: 900 V

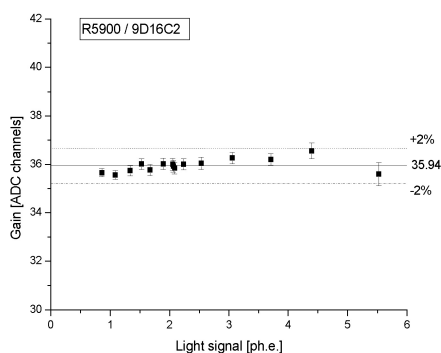
Obr. 4: Dekonvoluované LED spektrum pri 650V, 700 V, 750 V a 900 V (fotonásobič R5900 / 9D16C1).

Parameter Q_1 (koeficient zosilnenia) je určovaný s chybou $< 1\%$, $\rightarrow$ môže byť použitý ako kalibračný parameter spektrometrického kanála založeného na fotonásobiči.

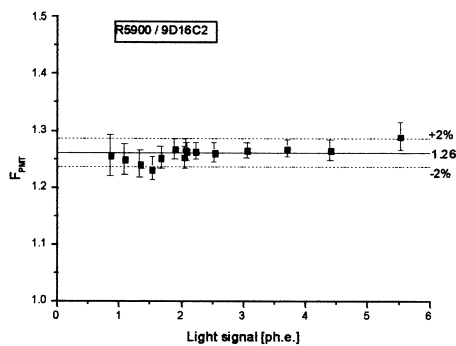
Koeficient zosilnenia Q_1 a šumový faktor f_{PMT} (excess faktor)



Obr. 5: Závislosť parametra Q_1 (koeficient zosilnenia) od napätia.



Obr. 6a: Závislosť parametra Q_1 na vstupnom svetelnom signále



Obr. 6b: Závislosť šumového faktora f_{pmt} na vstupnom svetelnom signále

Pre svetelné signály od 1.5 po 4 $f.e.$ sa Q_1 stanovuje s presnosťou $<1\%$.

Záver

A) Štúdium energetického rozlíšenia samplingového EM kalorimetra:

- nájdenie štruktúry samplingového člena energetického rozlíšenia, t.j. jeho závislosti od parametrov štruktúry kalorimetra a incidentnej častice,
- nájdenie prejavu nerovnorodosti kalorimetra na jeho energetické rozlíšenie (štruktúra konštantného člena rozlíšenia).

B) Vytvorenie metódy jedno-fotoelektrónovej analýzy, ktorá umožňuje:

- nájsť „excess“ faktor a iné parametre fotonásobiča,
- môže byť použitá na kalibráciu spektrometrického kanálu založeného na fotonásobiči (presné určenie koeficientu zosilnenia).