

# 30 let asymptotické volnosti

a

## 40 let kvarků

aneb

### pád a triumf kvantové teorie pole

(Od **barevných kvarků** ke **kvantové chromodynamice**)

O tom, jak měl jeden mladý doktorand správné vnuknutí, ale smutný osud, jak dva další zachránili kvantovou teorii pole a jak se z Šavla stal Pavel.

---

**D. Gross:** Pokrok ve vědě jde často daleko složitějšími cestami, než o jak se o tom dočítáme v knihách o historii vědy. To platí zvláště o teoretické fyzice, částečně proto, že dějiny píší vítězové. Historikové často ignorují různé cesty, jimiž se vývoj ubíral, mnohé falešné stopy po nichž se fyzikové ubírali a všechny chybné představy, jež měli. Četbou historie jen vzácně získáme správnou představu o skutečné podstatě vědeckého pokroku, do něhož patří fraška stejně jako triumf.

**Vznik a vývoj kvantové chromodynamiky je krásný příklad vývoje od frašky až k triumfu.**

---

Doporučuji:

**D. Gross:** Twenty five years of asymptotic freedom, hep-ph/9809060

**H. Lipkin:** Quark model and quark phenomenology, hep-ph/9301246

**O. Greenberg:** From Wigner's supermultiplet theory to quantum chromodynamics, hep-ph/0212174

**G. 't Hooft:** When was the asymptotic freedom discovered? or Rehabilitation of quantum field theory, hep-th/9808154

## Trocha prehistorie

**1927:** **P. Dirac**: formuloval **kvantovou elektrodynamiku**  
QED je abelovská **kalibrační teorie**

**1932:**

- **C. Anderson**: **pozitron**
- **J. Chadwick**: **neutron**
- **W. Heisenberg**: představa **výměnných sil** mezi protony a neutrony, proton a neutron **formálně** jako dva stavy nukleonu, ale je mezi nimi obrovský rozdíl:

$$\text{neutron} = \text{proton} + \text{elektron}$$

**1935:** **H. Yukawa**: formuloval **silnou interakci** mezi protony a neutrony, zprostředkovanou výměnou **nabitých pionů** s hmotnostmi cca **200 MeV**

**1936:** **G. Breit, C. Cassen, Condon**:  
**isotopický spin** jako vnitřní stupeň volnosti  
motivováni **experimentálními údaji** o **pp** a **np** rozptylu  
postulovali **isotopickou invariance** silných sil mezi n a p

**1937:** **C. Anderson, M. Neddermeyer**: první náznaky  
existence **mionu** (trvalo 10 let než se vše vyjasnilo)

**1938:** **N. Kemmer**: rozšířil isotopický spin **na piony**, postuloval  
isotopickou **invarianci sil mezi nukleony a piony**

**1948:** **F. Dyson, R. Feynman, J. Schwinger, S. Tomonaga**:  
Procedura **renormalizace**, tj **odstranění nekonečen**,  
které objevují při výpočtu **vyšších řádů** a pocházejí od  
příspěvků **kvantových efektů** na **malých vzdálenostech**

Renormalizace QED má dva aspekty:

- odstranění **nekonečen**
- zavedení „**efektivního elektrického náboje**“, závisějšího na vzdálenosti

---

**P. Dirac** (1974):

Většina fyziků je s touto situací velmi spokojena. Říkají: „kvantová elektrodynamika je dobrá teorie a my se o její základy nemusíme obávat.“ Musím říci, že **já jsem s touto situací velmi nespokojen**, protože tak zvaná „dobrá teorie“ zanedbává nekonečna, která se objevují v jejích rovnicích a to způsobem zcela libovolným. **Tohle prostě není rozumná matematika. Rozumná matematika zanedbává veličiny, které jsou malé a ne veličiny, které jsou nekonečně velké a vám se nehodí do krámu!**

Nesouhlasím tedy v tomto bodě s většinou dnešních fyziků. Já prostě nemohu tolerovat odklon od standardních pravidel matematiky. Z toho podle mého názoru plyne, že **základní rovnice nejsou správné. Musejí být nějakým drastickým způsobem změněny, tak aby se v nich nekonečna vůbec neobjevovala.....** Tento požadavek povede nutně ke skutečně drastické změně, malá změna nepostačí.

**Dirac** se v zásadě mýlil, neboť změna, kterou vývoj přinesl, **nebyla drastická, ale přesto z teorie nekonečna odstranila**. Tuto změnu přinesla vlastnost některých teorií, která se nazývá

**asymptotická volnost**

Tu má **kvantová chromodynamika**, ale nikoliv QED.

**1954:** **C. Yang a R. Mills:** neabelovské kalibrační teorie vycházející z **principu lokální kalibrační invariance** **klíčový okamžik** vývoje teorie sil mezi elementárními částicemi

**1955:** **L. Landau, Pomerančuk et al.:** **neúspěšná**, ale velmi důležitá snaha dát renormalizaci **názorný fyzikální a dobrý matematický obsah**,

Výsledky **Landaua** a **Pomerančuka** vedly řadu teoretiků k **odklonu od kvantové teorie pole** jako základního teoretického nástroje pro popis **silných interakcí**. Většina teoretiků se přiklonila k matematickému formalismu tzv. **analytické teorie S-matice** a **(ne)fyzikální myšlenky demokracie mezi hadrony (bootstrap)**.

**1948:** **C. Powell:** objev **nabitého pionu** v kosmickém záření pomocí jaderných emulzí

**1948-1964:** v kosmickém záření a od roku 1953 převážně na urychlovačích byly objeveny **desítky nových částic** podobných nukleonům a pionům  
Klíčovou roli sehrály objevy

- **baryonu  $\Omega$**  v roce 1964
- **nukleonové resonance  $\Delta$**  v roce 1952-1955

**1955:** **R. Hofstadter:** experimenty s rozptylem elektronů na protonech ukázali, že elektrický náboj je v protonu rozložen spojitě a **proton se chová zhruba jako kulička o poloměru cca 1 femtometr**

Snahy pochopit systematiku pozorovaných částic

**1949: Fermi-Yang: pion=nukleon+antinukleon**

**1956: Sakata: tři základní částice: N,P, $\Lambda$**

Name	Model	Isotopic Spin	Strangeness	Ordinary Spin
$\mathcal{N}$		1/2	0	1/2
$\bar{\mathcal{N}}$		1/2	0	1/2
$\Lambda$		0	-1	1/2?
$\bar{\Lambda}$		0	1	1/2?
$\pi$	$\mathcal{N} + \bar{\mathcal{N}}$	1	0	0
$\theta(\tau)$	$\mathcal{N} + \bar{\Lambda}$	1/2	1	0?
$\bar{\theta}(\bar{\tau})$	$\bar{\mathcal{N}} + \Lambda$	1/2	-1	0?
$\Sigma$	$\mathcal{N} + \bar{\mathcal{N}} + \Lambda$	1	-1	1/2?
$\Xi$	$\bar{\mathcal{N}} + \Lambda + \Lambda$	1/2	-2	1/2?

Here  $\mathcal{N}$  and  $\bar{\mathcal{N}}$  denote nucleon and antinucleon respectively, whereas  $\Lambda$  and  $\bar{\Lambda}$  denote  $\Lambda^0$  and anti- $\Lambda^0$  respectively<sup>3)</sup>.

$$\text{baryony: } 3 \otimes 3 \otimes 3 = 15 \oplus 6 \oplus 3 \oplus 3$$

$$\text{mezony: } 3 \otimes 3 = 8 \oplus 1$$

**1961: Y. Neeman a M. Gell-Mann: „eightfold way“**  
symetrie mezi hadrony, založená na **grupě SU(3)**

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

$$3 \otimes 3 = 6 \oplus 3$$

**1964-1965: G. Zweig, M. Gell-Mann, Y. Nambu a další**  
(Greenberg, Lipkin, Tavchelidze, Gursej, Radicati, Lee)

**kvarkový model jako podstata unitární symetrie**

- spektroskopie hadronů
- magnetické momenty baryonů ( )

**Problémy:** - **statistika** kvarků (Pauliho princip)

- **neexistence volných** kvarků
- proč jen **některé** multiplety

**Kvarky** jako - **fyzikální objekty** (**Zweig**) nebo jen jako

- **matematický pojem** (**Gell-Mann**)?

Sám **M. Gell-Mann** charakterizoval použití kvarků takto:

Konstruujeme matematickou teorii silně interagujících částic, která **může, ale nemusí** mít něco společného s realitou. Nalezneme vhodné algebraické vztahy, které v modelu platí, **postulujeme jejich platnost a pak model zahodíme**. Tento proces připomíná způsob, jak se ve francouzské kuchyni peče bažant: kousek bažanta se vloží mezi plátky telecího, peče se a **pak se telecí vyhodí**.

**O. Greenberg:** kvarky jako **parafermiony**

ekvivalentní zavedení **dalšího vnitřního kvantového čísla, které má tři hodnoty**

**Y. Nambu:**

- **každý kvark existuje ve třech vnitřních stavech, které Pais nazval barva.**
- **kvazijaderný model barevných kvarků:** interakce barevných kvarků zprostředkována výměnou **8 barevných gluonů** tj. barva hrála **dynamickou roli!**
- dynamické vysvětlení **proč v přírodě neexistují jen barevné stavy**
- tyto **gluony spolu interagovaly!**

Tento model měl základní rysy **kvantové chromodynamiky**, ale také **mnoho odpůrců**, především **Zweigova** interpretace.

**M. Gell-mann** (konference v Berkeley, léto 1967):

Uvažujeme tři **hypotetické a pravděpodobně fiktivní** kvarky se spinem  $\frac{1}{2}$  ....Známé mesony vytváříme formálně z páru kvarku a antikvarku a známé baryony ze tří kvarků....

Co to však znamená? Co jsou ty kvarky? Myšlenka, že mezony a baryony jsou složeny primárně z kvarků **je těžko přijatelná**, protože my přece víme, že v rámci disperzních relací jsou převážně, když ne zcela, **složeny jeden z druhého**.

Pravděpodobnost, že mezon se skládá z reálného kvarku a antikvarku místo dvou mezonů či baryonu a antibaryonu **musí být malá**. Kvarky o nichž mluvíme jsou **matematické entity**.

**Jsou-li mezony a baryony složeny s matematických kvarků, může být kvarkový model perfektně slučitelný s hypotézou bootstrapu.**

**od podzima 1967: experimenty ve SLAC:**

při **tvrdých nepružných** srážkách s elektronem se proton chová jako **svazek (skoro) neinteragujících bodových částic** se spinem  $\frac{1}{2}$ , **Feynmanem** nazvaných **partony**.

Úporná snaha **pochopit škálování** v rámci analytické teorie S-matic, **další útok na kvarkový model:**

**J. Bjorken** (Symposium ve SLAC, září 1967):

Zdá se, že dosavadní data neukazují na velké hodnoty účinného průřezu, které tento model bodových konstituentů předpovídá. Další data jsou nutná k tomu, **aby byl model elementárních konstituentů úplně vyvrácen**.

**K. Gottfried**: Myslím, že profesor Bjorken i já jsme zkonstruovali součtová pravidla **v naději, že tím vyvrátíme kvarkový model**.

**1968:** **Feynman** pro vysvětlení této skutečnosti formuloval  
**partonový model,**  
**v němž jsou nabité partony=kvarky**

**Zásadní problém** (pro mnohé, ale ne všechny):

**jak smířit partonový model s experimentálním faktem, že kvarky jako volné neexistují?**

Koncem 60. let podnikli **D. Gross, C. Callan** a další teoretikové promyšlený pokus

**zničit jednou pro vždy kvantovou teorii pole**

jako základní nástroj pro popis mikrosvětla.

**D. Gross** ve vzpomínkách v roce 1992:

Rozhodl jsem se, a to zcela vědomě, dokázat, že lokální **kvantová teorie pole nemůže vysvětlit experimentální fakt škálování a neposkytuje tedy vhodný rámec pro popis silných interakcí**. Výsledky experimentů o hlubokém nepružném rozptylu měly tedy definitivně rozhodnout otázku platnosti kvantové teorie pole.

Plán útoku měl dvě části. Za prvé, chtěl jsem dokázat, že ultrafialová stabilita, tj. **vymizení efektivní vazbové konstanty silných interakcí na malých vzdálenostech**, později nazvaná „**asymptotická volnost**“ byla nutné pro vysvětlení škálování. Za druhé jsem si vzal za cíl **ukázat, že asymptoticky volné teorie neexistují**.

Práce na zničení Kartága postupovaly zdárně a **první část plánu byla do konce roku 1972 úspěšně provedena**.



Druhou část zadal **Gross** svému 22-ti letému doktorandovi

**Franku Wilczekovi**

Shodou okolností stejný úkol a prakticky ve stejnou dobu zadal i **Sidney Coleman** svému doktorandovi

**Davidu Politzerovi**

Ti během půl roku ukázali, že **neabelovské kalibrační teorie**

**jsou** (za určitých okolností) **asymptoticky volné!!!**

**D. Gross** pokračuje:

Pro mne byl objev asymptotické volnosti **zcela neočekávaný**. Tak jako ateista, jenž právě přijal vzkaz z hořícího křoví, se ze mne stal okamžitě věřící. **Teorie pole nebyla chybná**, ale **škálování musí být vysvětleno v rámci asymptoticky volné teorie silných interakcí**.

**Gross s Wilczekem** (a **Georgi a Politzerem**) v brzy nato následujících pracích formulovali

**kvantovou chromodynamiku,**

a ukázali jak **přibližné škálování** z QCD plyne.

- **fyzikální význam asymptotické volnosti**: silné interakce kvarků a gluonů **jsou na malých vzdálenostech slabé** a pro jejich popis lze použít poruchovou teorii.
- **příčina asymptotické volnosti**: Vakuum QCD se chová jako **barevné paramagnetikum**, což v kvantové teorii pole automaticky implikuje **antistínění barevných nábojů!**
- **důsledky**: **v QCD nejsou (ultrafialová) nekonečna !!!**

## Závěrečné poznámky:

- Správnost základní myšlenky kvarkového modelu obecně a **Zweigova přístupu** speciálně byla definitivně potvrzena objevy
  - **c-kvarku** v roce 1974
  - **b-kvarku v roce** 1977
  - **t-kvarku** v roce 1994
- **QCD** se zrodila z **konfrontace experimentu a teorie**, nikoliv jen v hlavách teoretiků
- **Úspěch má vždy hodně rodičů**: musíte **nejenom vědět**, ale hlavně **chápat**, co jste objevili, jinak dopadnete jako
  - **M. Terentev a M. Vanjašin** a
  - **G. 't Hooft**
- Setrvačnost myšlení **zbrzdila přijetí řady nových myšlenek** a zhatila kariéru několika mladých fyziků, zvláště **G. Zweiga**.
- **QCD neformulovali Gell-Mann, Fritsch a Leutwyler** (jak se často tvrdí), ale **Nambu, Gross, Wilczek a Politzer**.