

Nedělejme z Higgs vědu Aneb Jak se dělají částice



evropský
sociální
fond v ČR



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



YEARS / ANS CERN

Plán

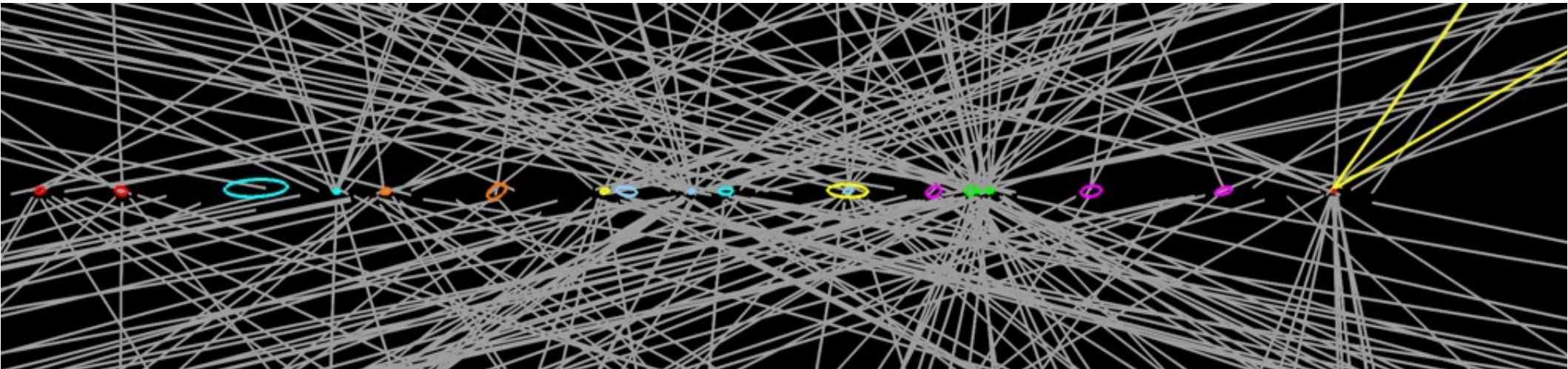
Interakce a částice

Cern

ATLAS

Higgs

(+Top Kvark)



Stavební kameny chemie

PRODUCED BY THE FOUNDATION FOR EDUCATION, SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR NATIONAL SET WEEK 2003

PERIODIC TABLE of the ELEMENTS

Proudly sponsored by the
**SHUTTLEWORTH
FOUNDATION**
[supporting social innovation]
Tel: +27 21 970 1280 | Fax: +27 21 970 1281 | www.shuttleworthfoundation.org

Alkali Metals	Alkali Earth Metals	Transition Metals	Other Metals	Other Nonmetals	Halogens	Noble Gases	Rare Earth Metals
Gas	Liquid	Natural solid	Man-made solid (synthetic)				

DMITRI MENDELEYEV (1834 - 1907)

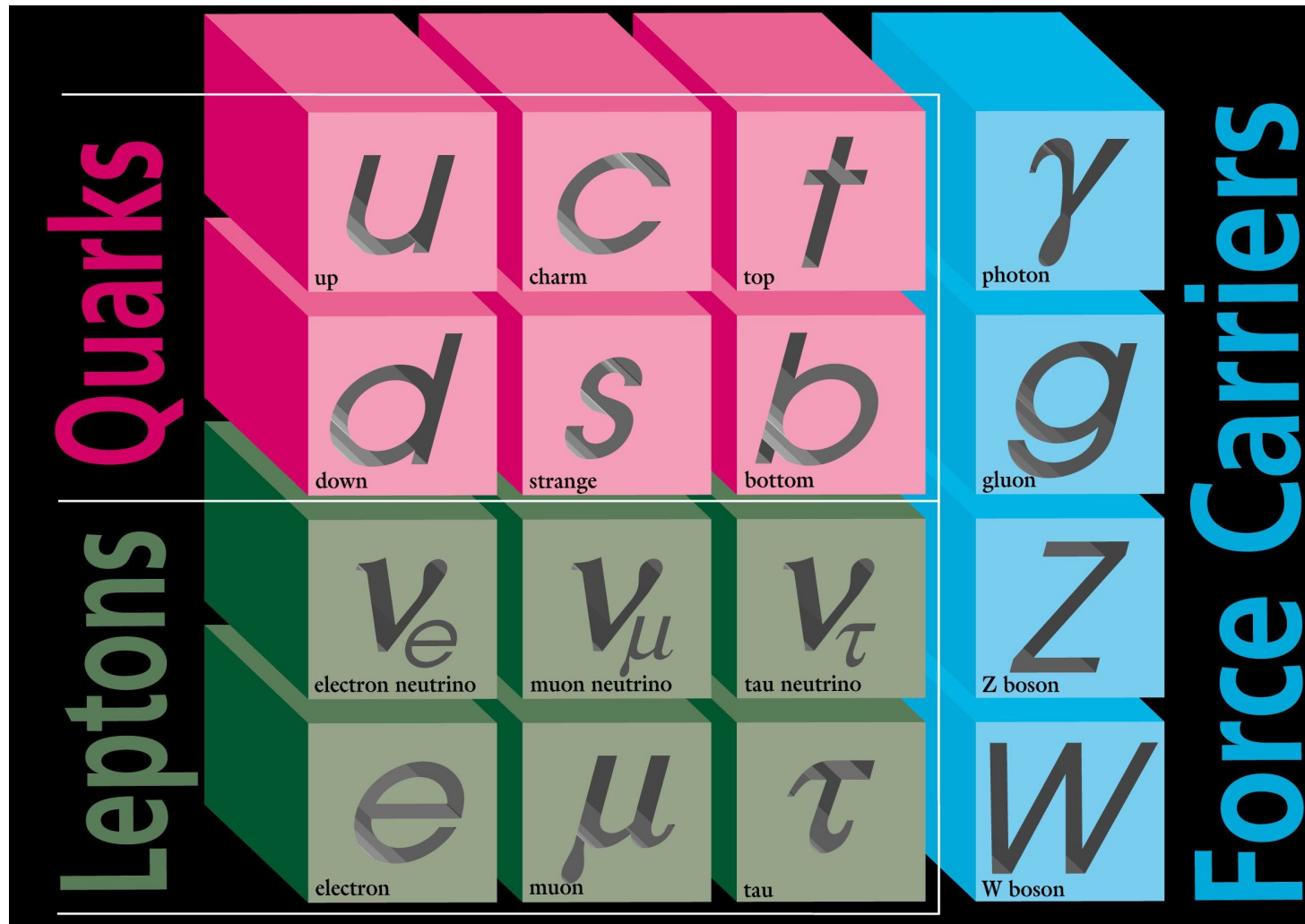
The Russian chemist, Dmitri Mendeleev, was the first to observe that if elements were listed in order of atomic mass, they showed regular (periodical) repeating properties. He formulated his discovery in a periodic table of elements, now regarded as the backbone of modern chemistry.

The crowning achievement of Mendeleev's periodic table lay in his prophecy of then, undiscovered elements. In 1869, the year he published his periodic classification, the elements gallium, germanium and scandium were unknown. Mendeleev left spaces for them in his table and even predicted their atomic masses and other chemical properties. Six years later, gallium was discovered and his predictions were found to be accurate. Other discoveries followed and their chemical behaviour matched that predicted by Mendeleev.

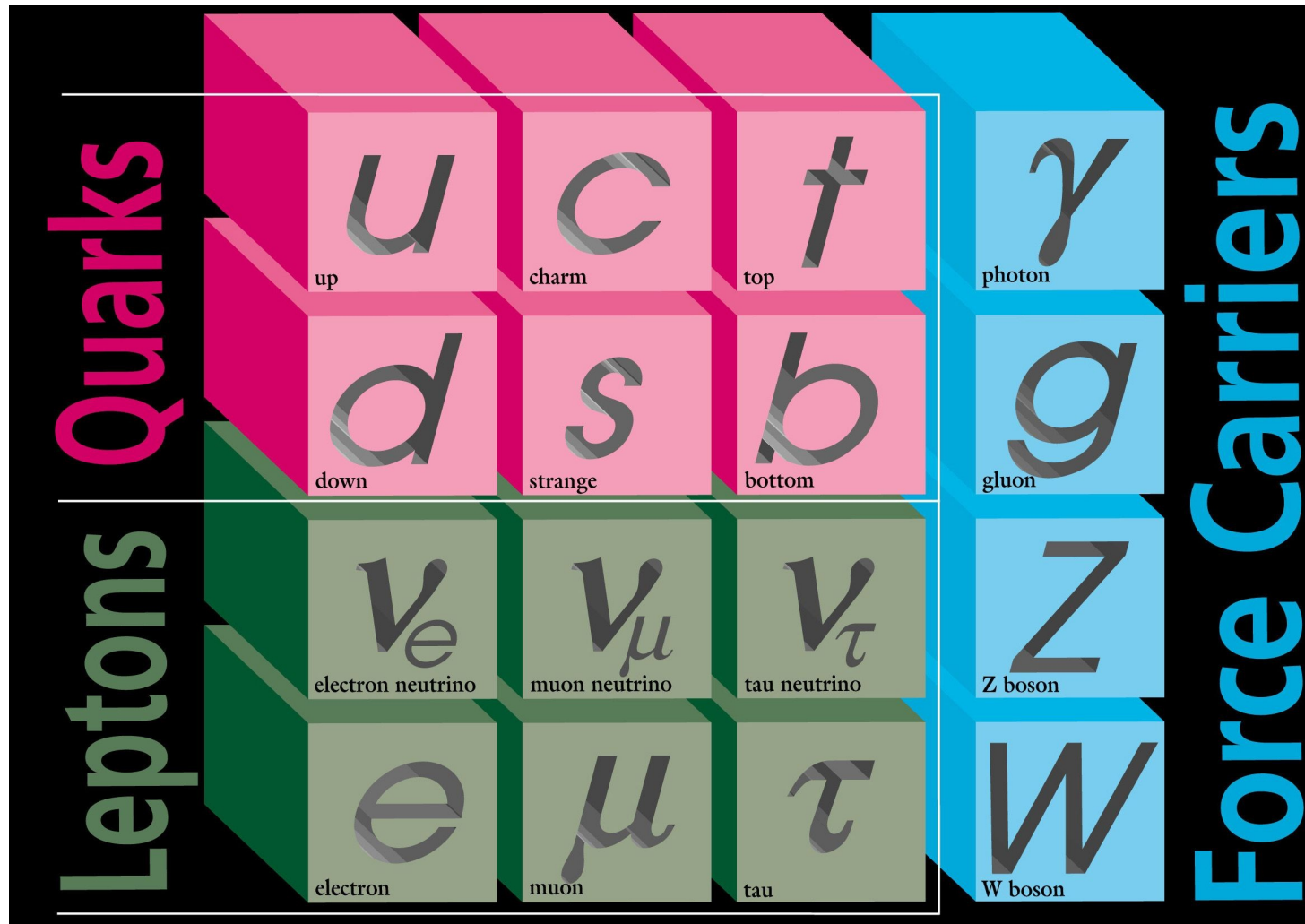
This remarkable man, the youngest in a family of 17 children, has left the scientific community with a classification system so powerful that it became the cornerstone in chemistry teaching and the prediction of new elements ever since. In 1955, element 101 was named after him: Md, Mendelevium.

FEST
Foundation for Education,
Science & Technology

Stavební kameny fyziky



Stavební kameny fyziky

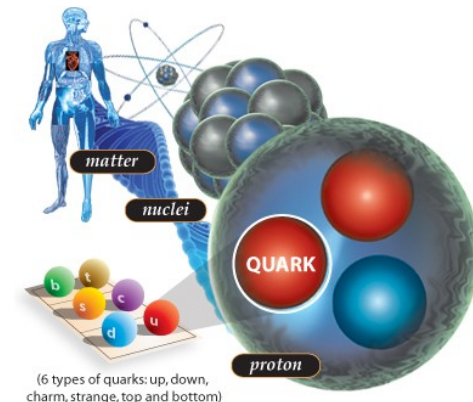
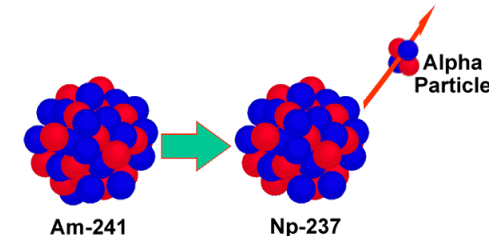
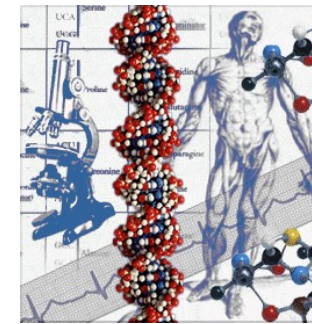


Stavební kameny fyziky

Family I	Family II	Family III
Quarks		
 up u	 charm c	 top t
 down d	 strange s	 bottom b
Leptons		
 electron neutrino ν_e	 muon neutrino ν_μ	 tau neutrino ν_τ
 electron e^-	 muon μ	 tau τ

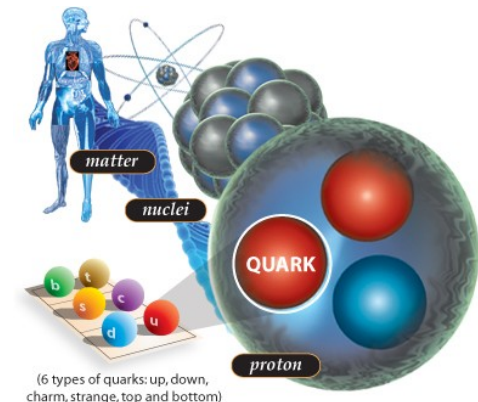
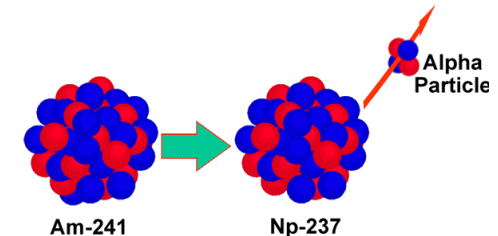
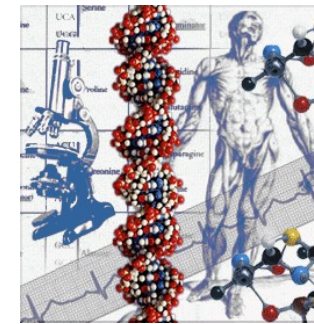
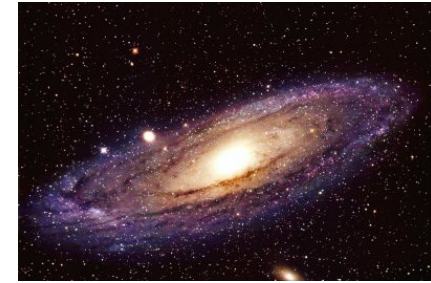
Síly (interakce) v přírodě

- **Gravitační** – makroskopická tělesa, Vesmír.
- **Elektromagnetická** – stavba atomu, chemie, život.
- **Slabá** – radioaktivita, procesy hoření ve Slunci.
- **Silná** – stavba atomového jádra, interakce mezi nukleony, hlouběji mezi kvarky.



Síly (interakce) v přírodě

- Síly působí mezi částicemi: zprostředkovávají jejich vzájemné působení.
- Díky silám také mohou vznikat **stabilní vázané systémy**, které síly drží pohromadě:
- Sluneční soustava, galaxie...(gravitace).
- Atom (jádro a elektronu, elektromagnetická interakce).
- Atomové jádro (vázaný systém nukleonů, silná síla)
- Nukleon (vázaný systém kvarků a gluonů, silná síla).
- Síly ale také způsobují rozpady částic: radioaktivita (slabá interakce), “hoření” ve Slunci.



Částice

- Pod pojmem **elementární částice** rozumíme objekty bez vnitřní struktury, tj. takové, které se v experimentu jeví jako bodové a zatím nevíme, že by se skládaly z dalších: například elektron, foton, neutrino...
- **Částicové ZOO je plné částic složených**: např. proton a neutron jsou tvořeny kvarky.
- Částice se mohou chovat jako kuličky, ale i jako vlny: umějí interferovat, ale také třeba z obalu atomu vyrazit elektron či způsobit zčernání zrna na fotopapíře.

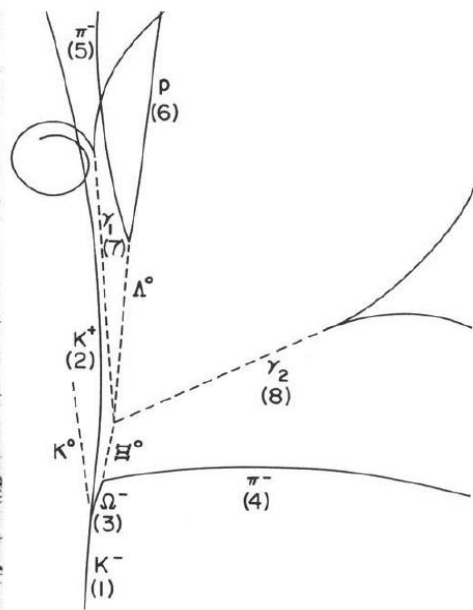
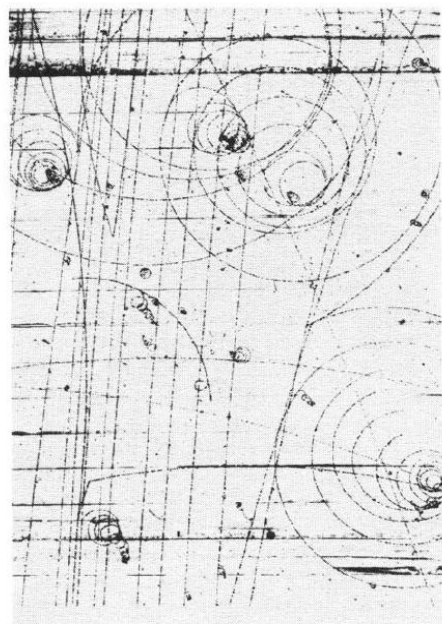
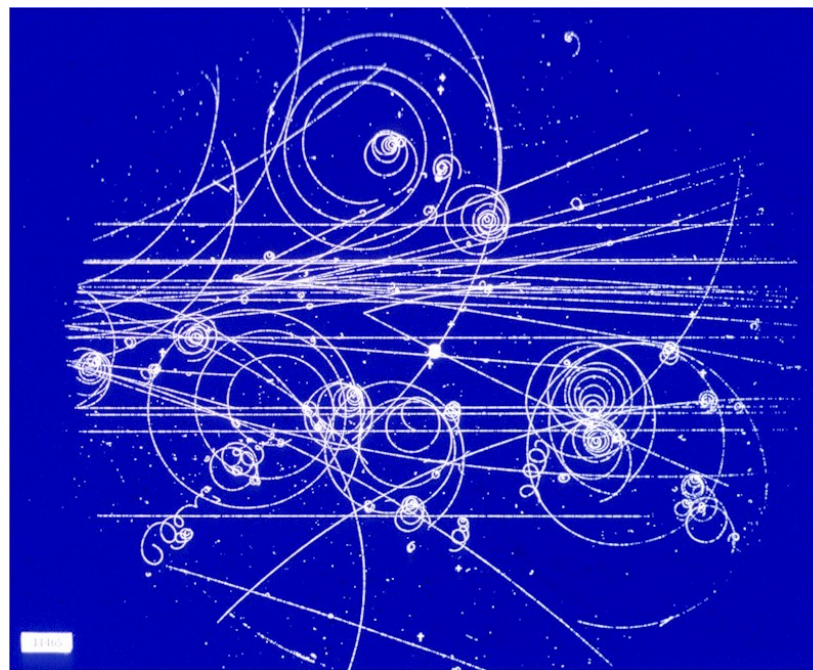
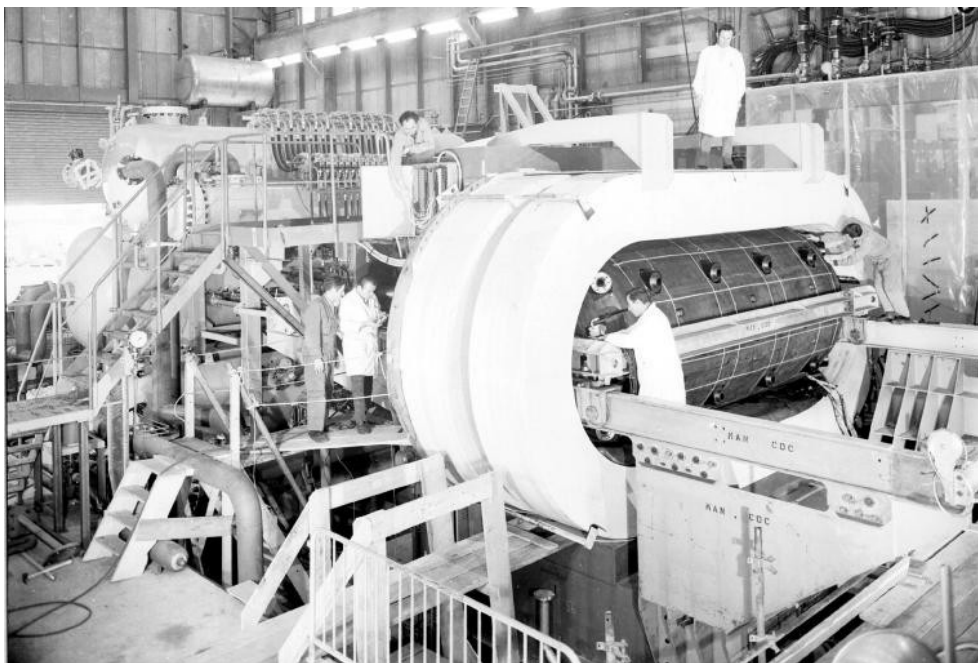
Mikrosvět je popsitelný kvantovou mechanikou, která s úspěchem předpovídá běžnému životu podivuhodné věci: elektron v atomu může mít jen určité hodnoty energie, nelze přesně současně říci, kde elektron je a jakou má hybnost (Heisenbergovy relace neurčitosti).

Jak částice vypadají?



Snímek z bublinové komory: v přehřáté kapalině dochází lokálně k varu podél prolétávajících částic (ionizace). Dráhy zakřiveny v magnetickém poli.

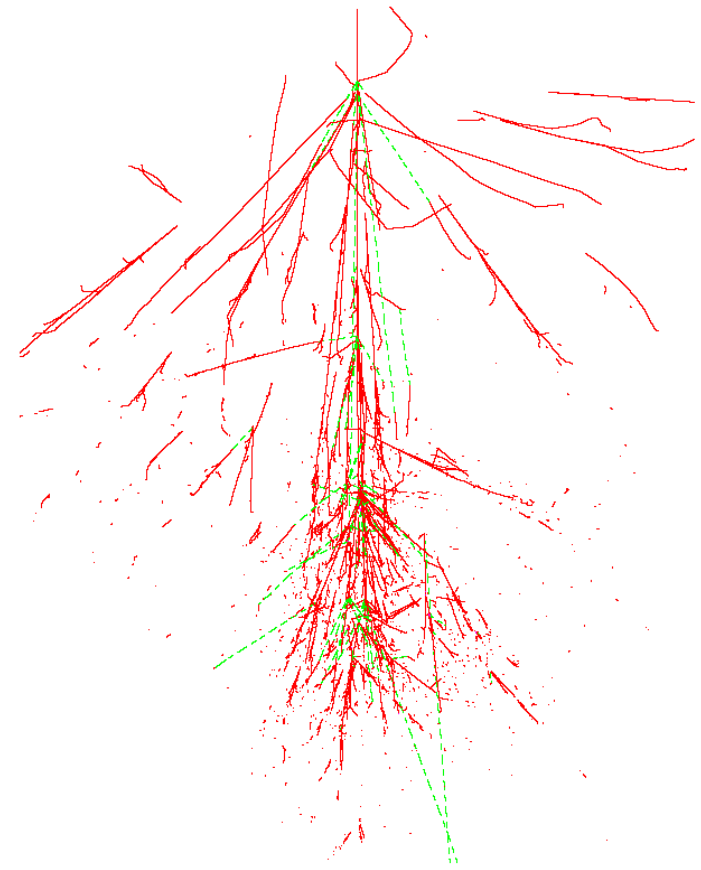
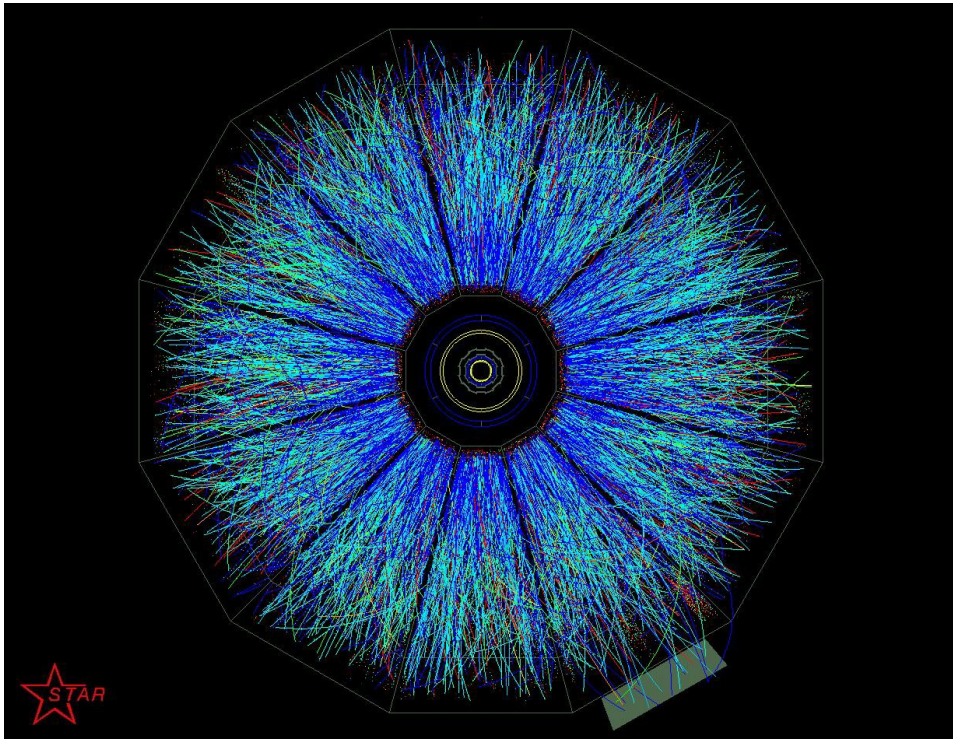
Bublinová komora



Takto by to ale dále dlouho nešlo...
(ruční prohlížení fotografií)

Spršky mnoha částic

- Srážky těžkých iontů – spousta částic.
 - „Messy“ heavy ion collisions:-)
 - Studium husté horké hmoty, termodynamiky fázových přechodů v QCD.
 - Kvark gluonové plasma?
- Simulace atmosférické spršky indukované kosmickým zářením.

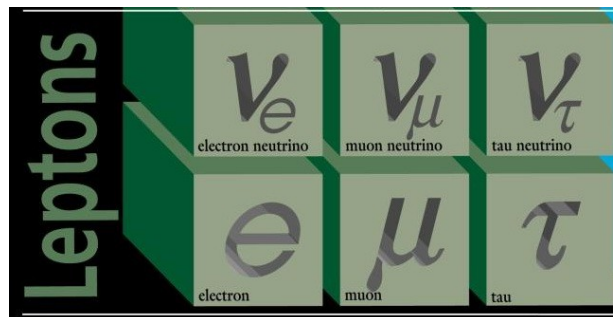


Vlastnosti částic

- **Stav v klasické fyzice** je dán polohou a hybností objektu.
- **V kvantové mechanice** jde o paprsek v abstraktním nekonečněrozměrném vektorovém prostoru :o)
- Částice je charakterizována svou hmotou, nábojem, spinem (vnitřním momentem hybnosti, jakýmsi malým setrvačnickem), typem interakcí, kterých se účastní...
- **Vnitřní moment hybnosti** částice je kvantován, může nabývat jen určitých násobků Planckovy konstanty. Celočíselné násobky nesou bosony (foton: 1), polocelé definují fermiony (elektron: 1/2). **Spin** určuje kolektivní chování částic a statistiku (Pauliho vylučovací princip) a má dalekosáhlé důsledky pro to, jak vypadá hmota kolem nás.
- Ke každé částici existuje **antičástice**, která má opačný náboj a další kvantová čísla. Například počet nukleonů se zachovává: proton má nukleonové číslo 1, antiproton -1. Lze např. $p^+ p^+ \rightarrow p^+ p^+ p^- p^+$, ale ne $p^+ p^+ \rightarrow p^+ p^+ p^-$ (nikdy nepozorováno).

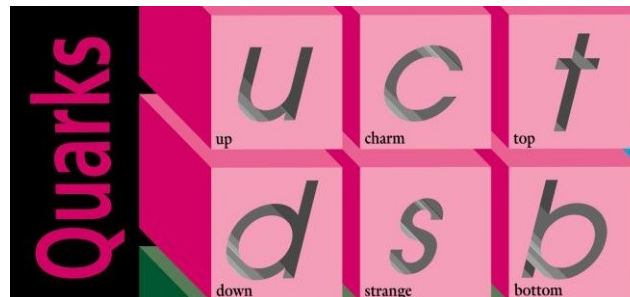
Leptony

- Mezi leptony (řecky $\lambda\epsilon\pi\tau\acute{o}\varsigma$ - drobný) patří například **elektron**. Všechny leptony jsou fermiony.
- Partnerem elektronu je **neutrino**, lehounká neutrální částice, která interaguje pouze slabě, a tak je velmi těžké ji spatřit.
- Neutrino doprovází elektron v interakcích, např. při radioaktivním β -rozpadu:
- Volný neutron se rozpadá, stabilní je jen v atomovém jádře:
- $n \rightarrow p + e + \nu_e$
- *Q: Proč se nerozpadá proton? A kdyby se rozpadal, nebyl by vodík, ani hvězdy, prvky, my...* Silná interakce nerozeznává rozdíl mezi protonem a neutronem, odlišuje je až elmag. a slabá síla.
- Elektron a neutrino tvoří první rodinu leptonů: příroda dosud z neznámého důvodu všechno zopakovala ještě dvakrát:
- **Tři rodiny leptonů**: elektron, mion, tau; a k nim příslušná neutrina.
- Mion a tauon jsou jakési těžší elektrony, a jsou nestabilní.



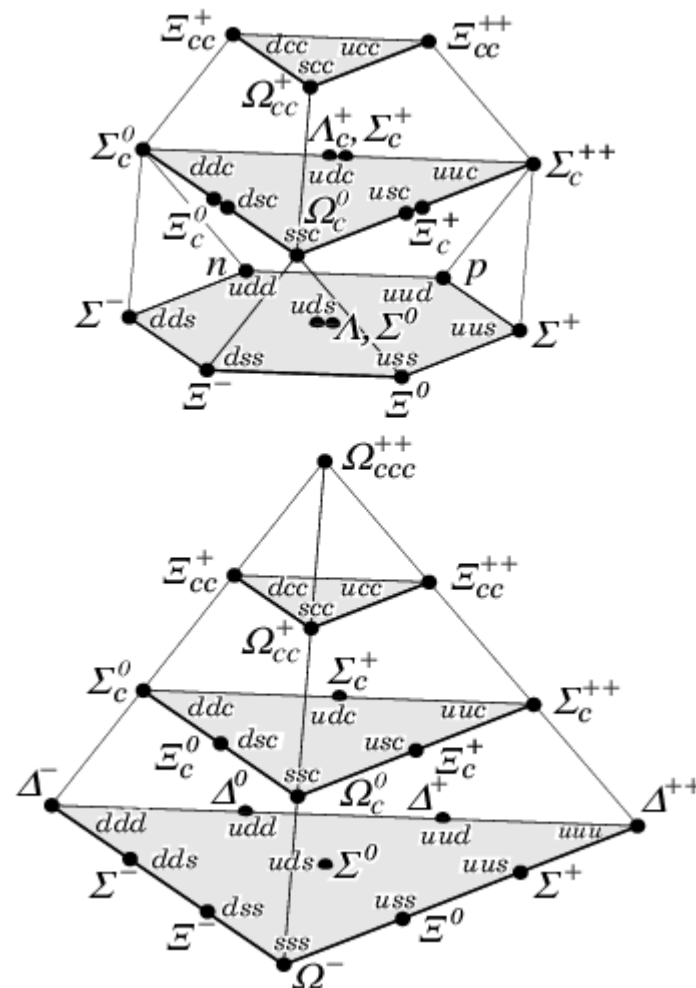
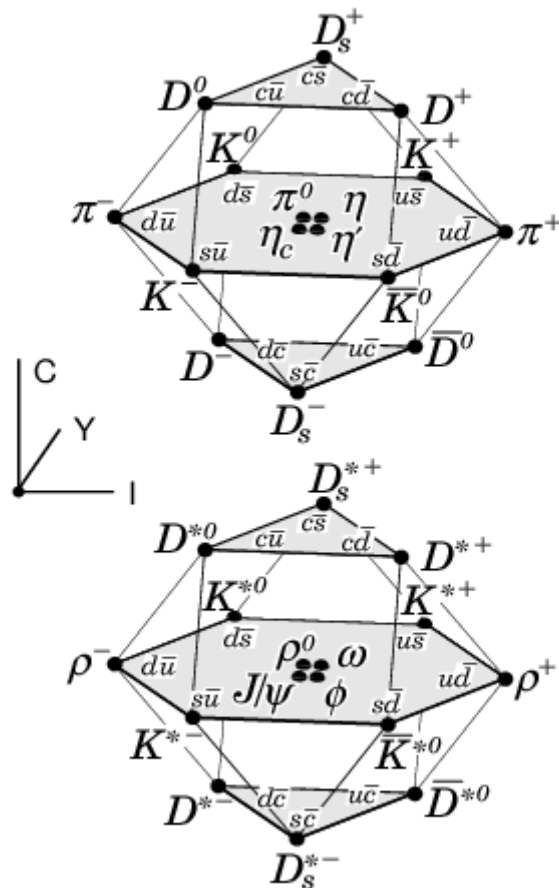
Hadrony z kvarků

- Hadrony jsou částice složené z kvarků, které jsou fermiony.
- Účastní se silné interakce.
- Kvarky u, c, t mají náboj $+2/3$, kvarky d, s, b $-1/3$.
- Běžné protony a neutrony tvoří atomové jádro, jehož stabilitu lze vysvětlit výměnou částic zvaných piony – pouze jiný pohled na silnou interakci.
- Proton či neutron jsou příkladem **baryonů** (řecky βαρύς - těžký), částic složených ze tří kvarků, které mají polocelý spin (fermiony).
- Piony patří mezi **mezony** (řecky μέσος - střední), skládající se z páru kvark-antikvark, které mají celočíselný spin (bosony).



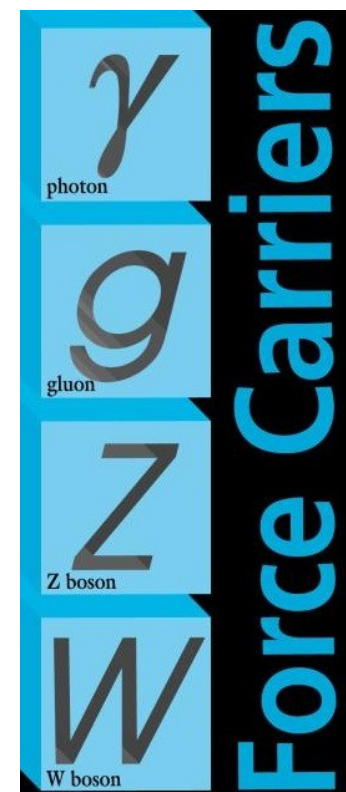
Hadrony z kvarků

- Kvarkové složení neurčuje částici jednoznačně.
- Pauliho vylučovací princip pro kvarky v hadronech!
- Exotické částice lze chápat jako **excitace základních stavů**
- (podobně jako vyšší stavy atomového obalu, jen jde o silnou namísto elektromagnetickou interakci)



Výměnné částice sil

- V současném popisu mikrosvěta částice interagují pomocí výměny kvant polí, které jsou bosony.
- Elektromagnetickou interakci zprostředkovávají **fotony**.
- Silnou interakci mezi kvarky **gluony**.
Gluony jsou podobně jako fotony nehmotné, ale nesou náboj vzhledem k silné interakci. Proto nejsou volně pozorovatelné, stejně jako kvarky jsou uvězněny uvnitř hadronů.
- Slabou interakci, rozpady a nových částic, způsobují jakési těžké varianty fotonu: tzv. **intermedialní bosony W a Z**.
- **Graviton** je teoreticky zodpovědný za gravitaci, ale konzistentní kvantová teorie gravitace zatím neexistuje.
- Pozn.: elmag. a slabou interakci lze společně popsat v rámci tzv. elektroslabé teorie (1970s).



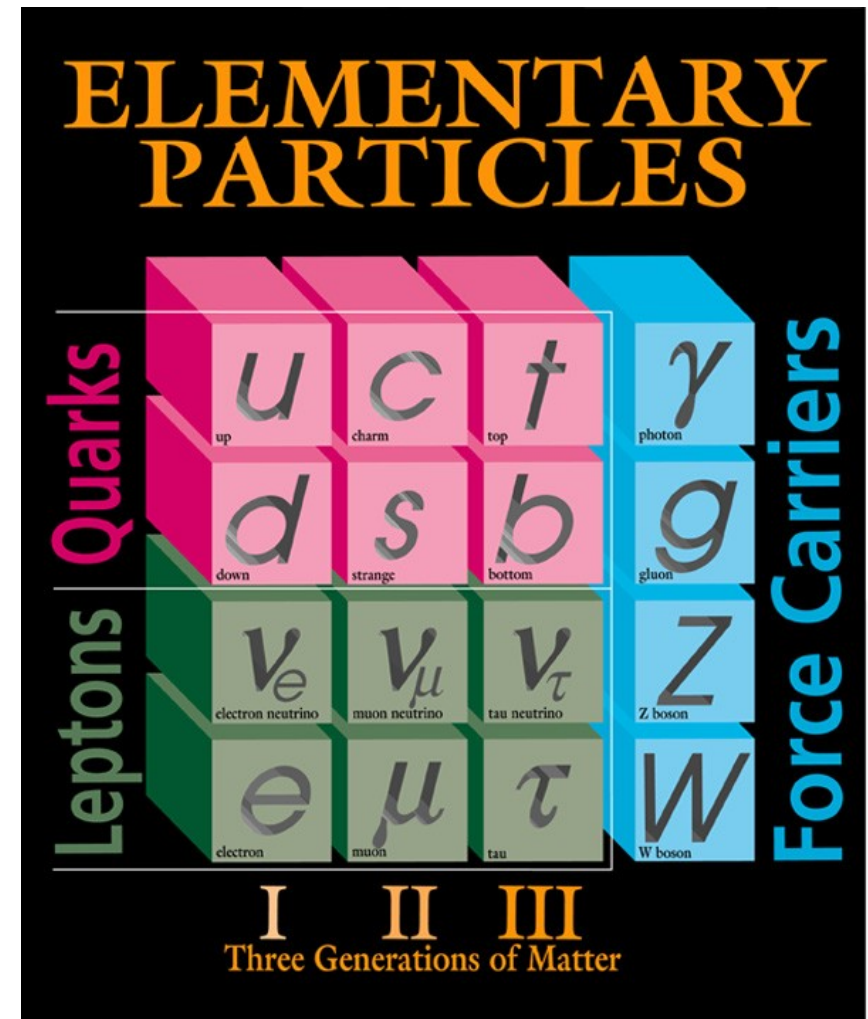
Leptony, Kvarky, Kvanta polí

Částice:

- **Leptony**: elektron a neutrino + dvě další rodiny
- **Kvarky**: tvoří hadrony
 - mezony: kvark+antikvark (piony)
 - baryony: 3 kvarky (proton, neutron)
- **Intermediální bosony** – $W^\pm$, Z , γ , 8 gluonů.
- Předpovězený ale neobjevený Higgsův boson, zodpovědný za hmotnosti částic.

Síly (interakce):

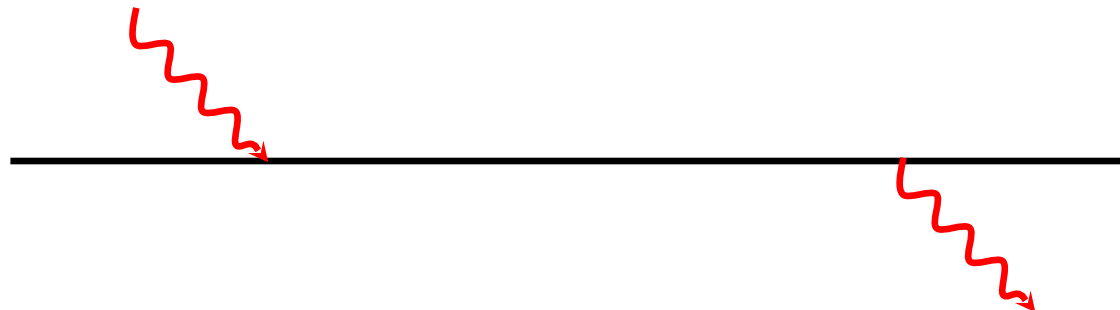
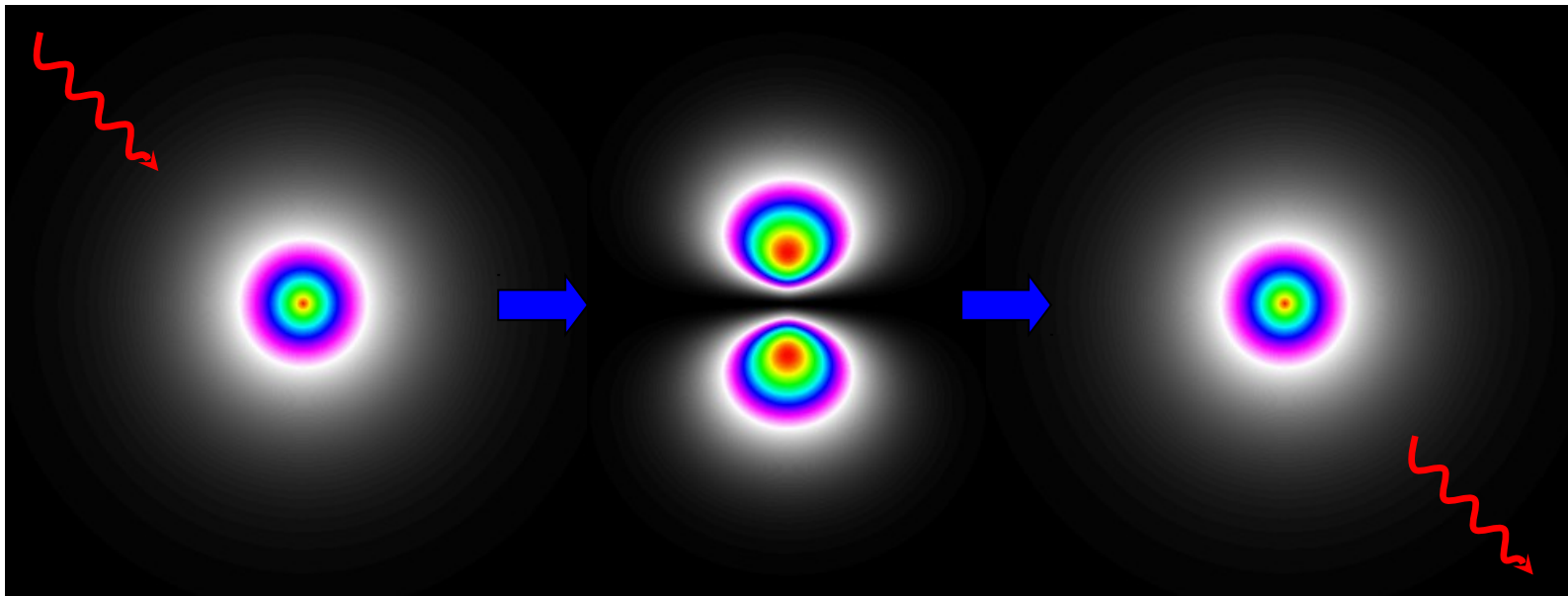
- Gravitační
- Slabá + Elektromagnetická = Elektroslabá
- Silná



Fermilab 95-759

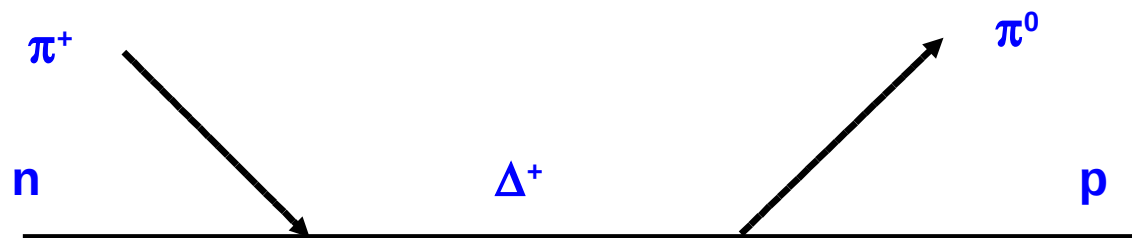
Interakce I

- Excitace atomu fotonem a opětovná emise.
- Částice vznikají a zase zanikají – na rozdíl od objektů v běžném světě!



Interakce II

- Zcela podobně se dějí i interakce složitější, způsobené např. silnou interakcí mezi nukleony.
- Částice zvané piony lze připravit jednoduše ostřelováním terče např. protony:
- $p + p \rightarrow p n \pi^+ \pi^-$
- Svazkem pionů pak můžeme zase střílet na další terč, může vzniknout krátce žijící částice (rezonance) zvaná Delta:
- $\pi^+ n \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ n$
- Ale Delta se může rozpadnout i na něco jiného!
- $\pi^+ n \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^0 p$
- Nukleony hrají stavební roli, piony interakční, vazebnou, analogicky atomu: jádro a elektrony si vyměňují fotony, a reálné fotony mohou atom excitovat.
- **Delta je vlastně jen excitovaný nukleon!**



Rezonance

- Svazkem pionů pak můžeme zase střílet na další terč, může vzniknou krátce žijící částice (rezonance) zvaná Delta:



Delta je vlastně jen excitovaný nukleon!

- Blízko rezonanční energie se Delta „ráda rodí“.
- Doba života: cca 10^{-23}s !
- Souvisí inverzně se šířkou rezonance:

$$|\tilde{\psi}(E)|^2 = \frac{|\psi(0)|^2}{2\pi} \frac{\hbar^2}{(E - E_0)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

(Breit—Wignerovo rozdělení)

(Fourierova transformace
rozpadového zákona a časového
vývoje v kvantové mechanice)

$$|\psi(t)|^2 = |\psi(x)e^{-i(E_0 - i\Gamma/2)t/\hbar}|^2 = |\psi(x)|^2 e^{-\Gamma t/\hbar}$$

4.11.2014

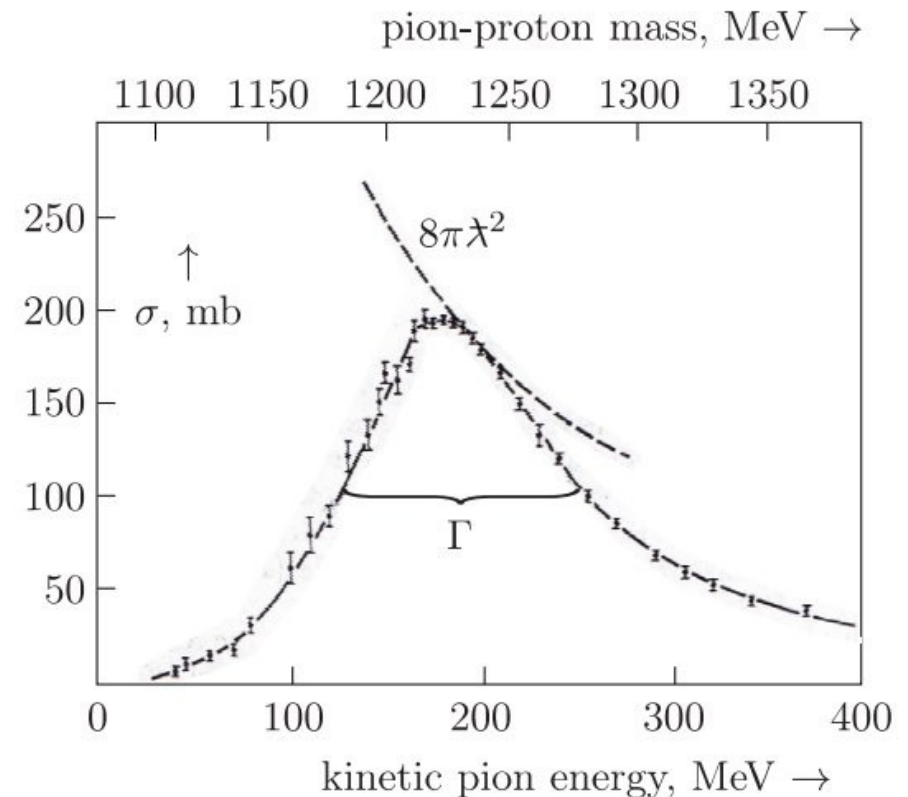
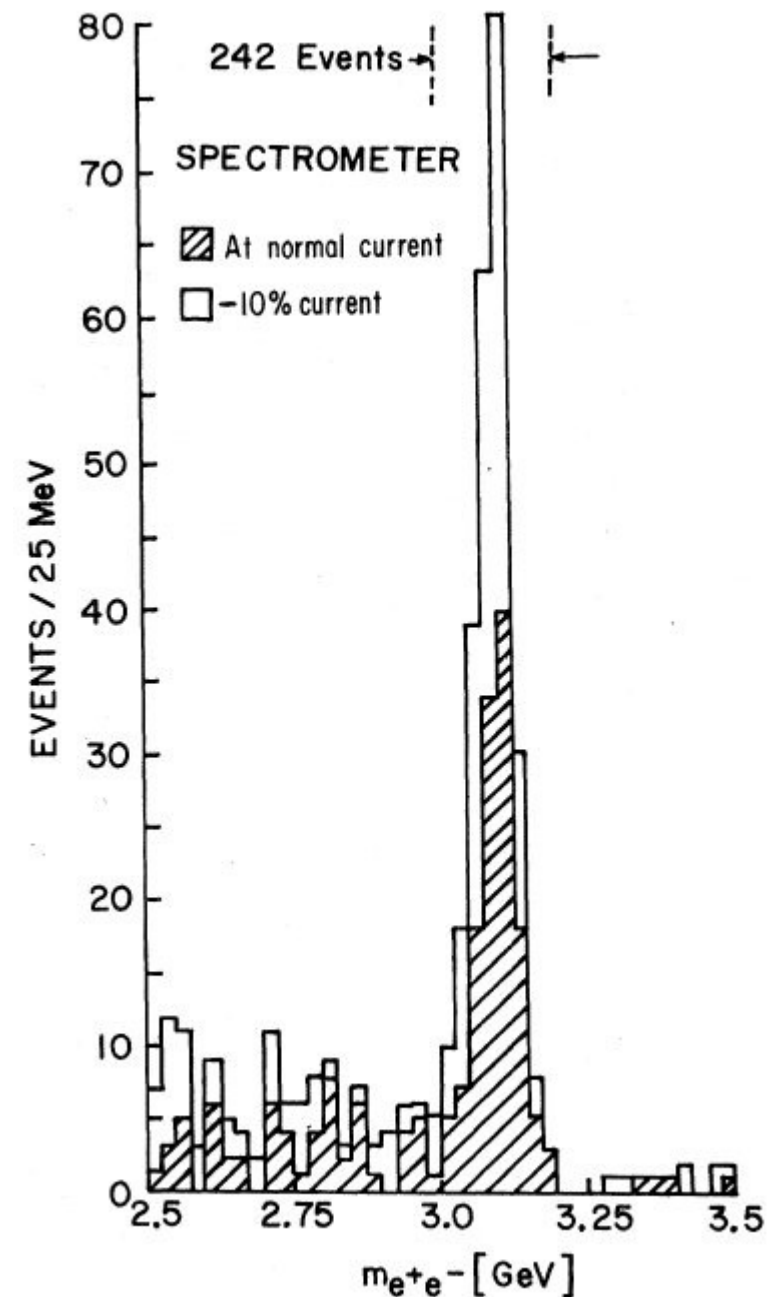


FIG. 1. The cross section of π^+p elastic scattering is shown in the vicinity of the $\Delta^{++}(1232)$ resonance, whose width is $\Gamma = 120 \text{ MeV}$. The maximum elastic cross section $8\pi\lambda^2$ is reached above the peak of the resonance, where $\lambda = \hbar/p$ is the reduced de-Broglie wavelength.

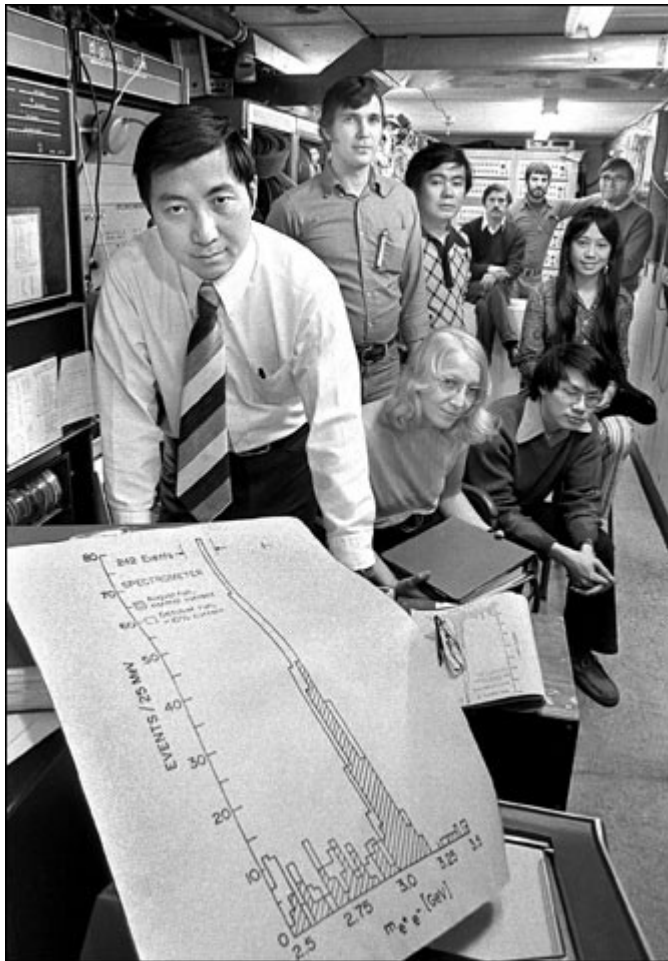
Mezonová resonance J/ψ

- Listopadová revoluce v částicové fyzice – 1974
- Objev čtvrtého kvarku – c-kvark, charm (půvabný)
- Dva nezávislé týmy, v komplementárních procesech (srážky hadronů vs. srážky elektronů s pozitrony)
- J/ψ “překvapila” dlouhou dobou života, z kinematických důvodů se totiž nemůže rozpadat nejjednodušeji na D-mezony obsahující c-kvark, a tak silné rozpady probíhají déle “zakázaným” způsobem, a konkurují jim elektromagnetické rozpady např.
 $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$



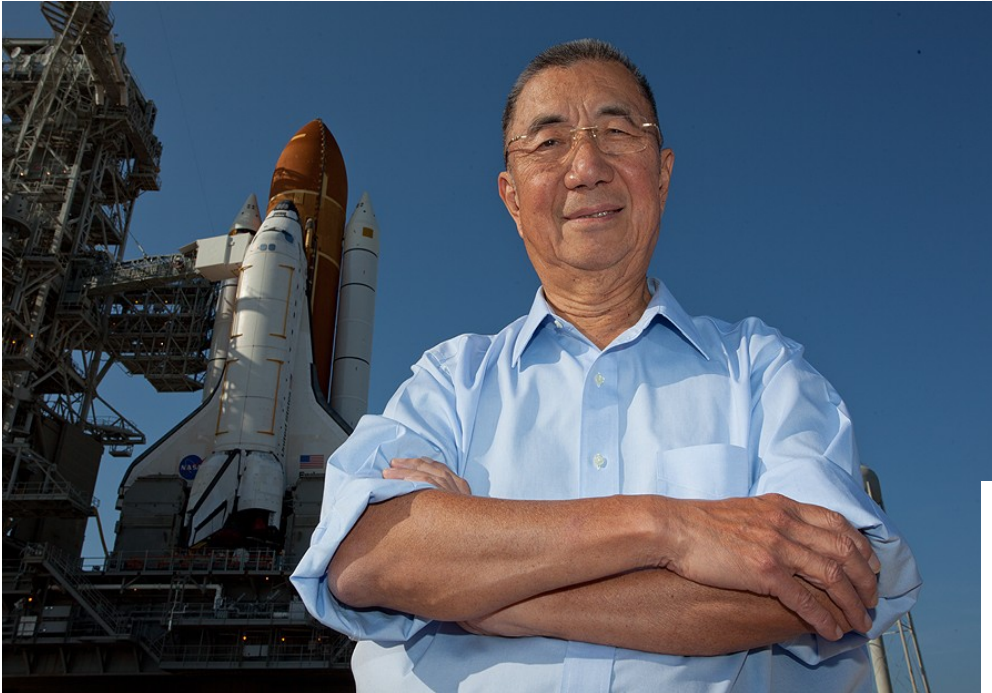
Mezonová resonance J/ψ

- Listopadová revoluce v částicové fyzice – 1974.
- Samuel Ting (Brookhaven), Burton Richter (SLAC)



Mezonová resonance J/ψ

- Listopadová revoluce v částicové fyzice – 1974

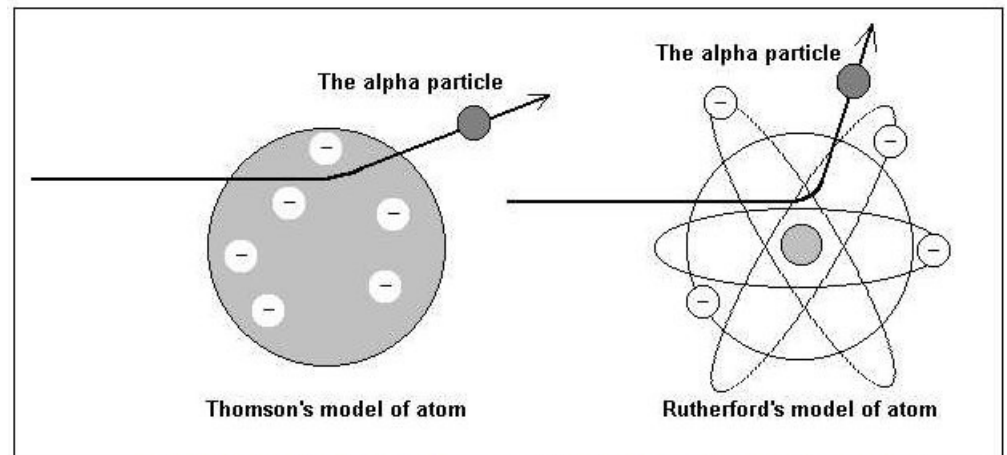
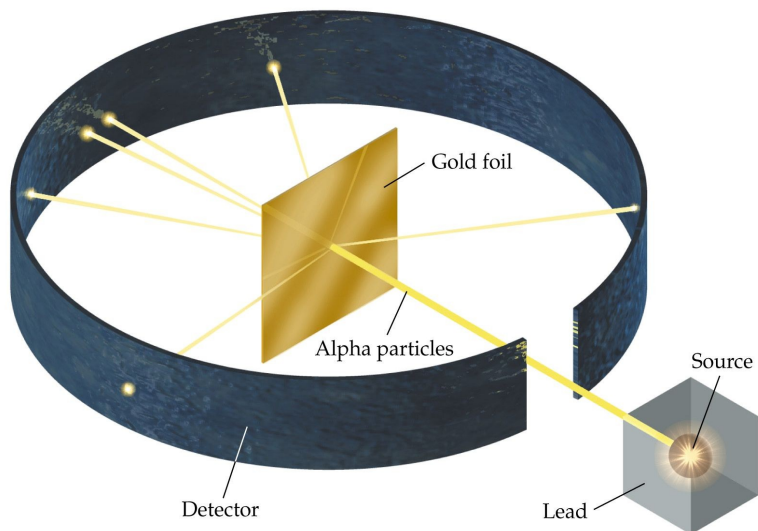


Rozptylový experiment

- Rozhodujícím momentem byl **objev atomového jádra**, a to nejen výsledkem (většina hmoty v atomu koncentrována v nepatrném objemu), ale i konceptem.
- **„Ostřelování“ atomů zlaté fólie alfa částicemi**: jeden z prvních rozptylových experimentů!
- Mikroskop bombarduje vzorek fotony o určité vlnové délce, která určuje naši rozlišovací schopnost. Chceme-li vidět ještě menší věci, potřebujeme elektronový mikroskop.
- **Chceme-li se podívat na stále jemnější struktury, musíme pro zkrácení vlnové délky zvyšovat energii.** Podle de Broglieovy hypotézy a Einsteina:

$$p = h / \lambda$$

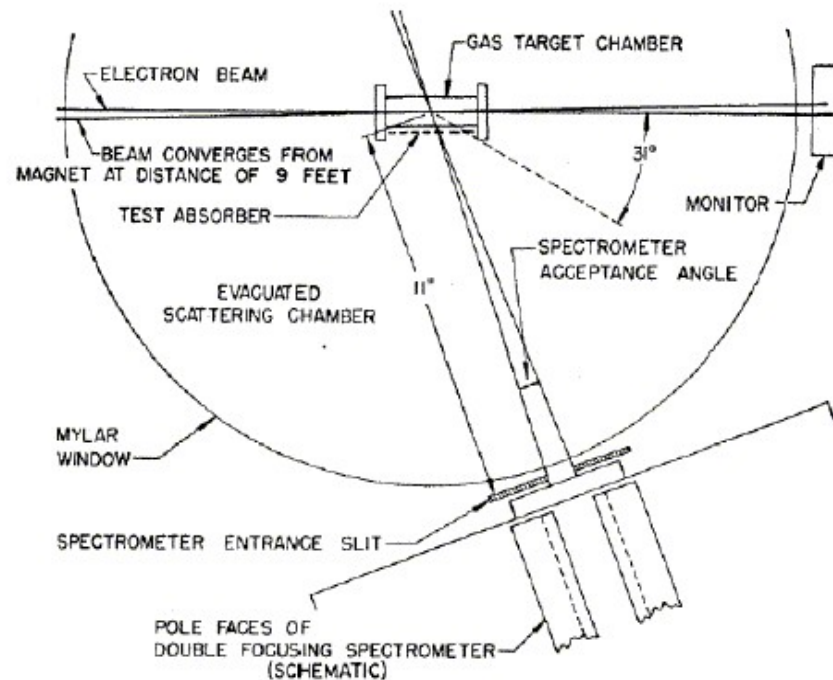
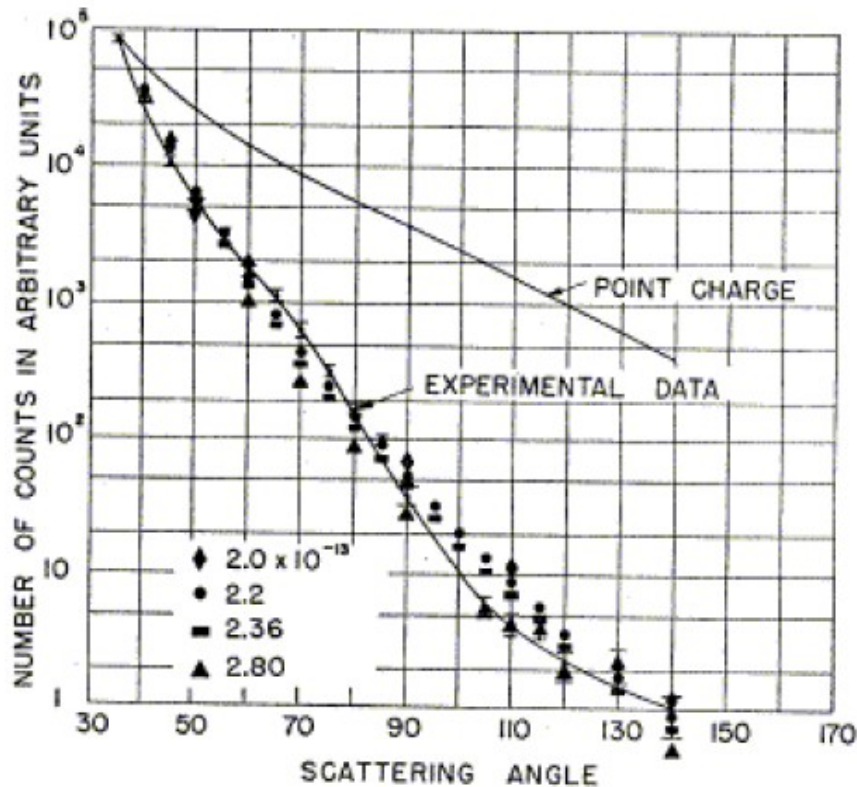
$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4.$$



The models of the Thomson's atom and Rutherford's atom; and the expected aberrations of alpha particle in both cases.

Rozptylový experiment

- **Objev struktury protonu:**
- ostřelování protonu jednoduchým bodovým objektem (elektron).
- Experimentální data nesouhlasí s teorií bodového protonu.
- Větší aparatura, ale jinak stále stejný princip rozptylového experimentu.



Částice a jejich svazky

- **Přírozená radioaktivita**: limitovaná hustota svazku a energie, jen první objevy. Stále se však používá pro zdroje neutronů (alfa zářič štěpí příměs, např. Am+Be).

- **Kosmické záření**: doposud nejvyšší známé energie, ale těžko opakovatelné a vzácné události. Významné do cca 50. let při objevech pozitronu, pionů, kaonů...

V současnosti už ne jako zdroj individuálních částic, ale jako fenomén ke studiu jako takový (odkud přichází, jak vzniká, jaké má spektrum...).

- **Reaktory** (neutrony a neutrina).

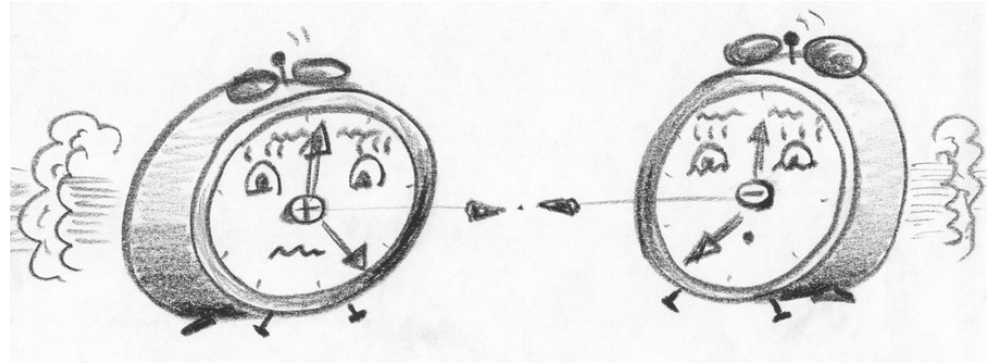
- **Urychlovače**: svazky s vlastnostmi, jaké chceme: typ, množství, hustota, energie, divergence svazku...

Co vlastně chceme měřit?

- Pravděpodobnost, že se něco zajímavé stane: lze srovnat s teoretickou předpovědí.
 - Chceme znát hmotnosti a doby života částic – teorie dokáže předpovědět hmotu složených částic (mezonů), ale ne elektronu!
 - S jakou energií a hybností se částice rodí – spektra.
 - Způsoby rozpadů nestabilních částic (rozpadové kanály).
 - Hledání nových částic, jevů, které současná teorie neumí popsat.
-
- Kvantová mechanika je pravděpodobnostní: nikdy nelze přesně předpovědět, co se stane, a ze snímku dané události nelze s jistotou identifikovat vzniklé produkty: spousta zajímavých událostí má i velmi podobné (nezajímavé) pozadí.
-
- Detailním studiem srážkových procesů získáváme hluboké znalosti o struktuře Mikrosvěta, ale také podmínek krátce po vzniku Vesmíru: propojení částicové fyziky a astrofyziky.

Urychlovače I

- Co můžeme srážet?
- Co lze urychlovat?
- Proč srážet? Proč urychlovat?
- Co měříme?



„Proton-proton collisions are like smashing two pocket watches together to see what they are made of...”

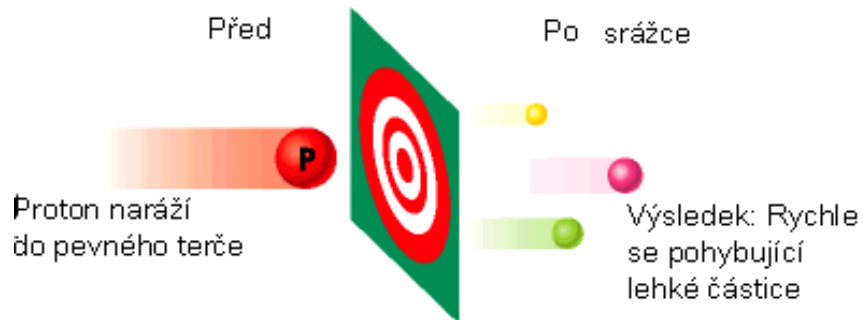
...aneb **Co se stane při srážce dvou protonů?**

Z každého protonu se srazí jeden kvark nebo gluon (parton), každý nese část energie původního protonu. Energie srážejících se částic se tak mění: výhodné pro hledání nové částice s neznámou hmotou, nevýhodné pro rekonstrukci dané srážky: neznáme podélnou hybnost. Alespoň součet příčných hybností však musí být nula (zákon zachování příčného impulsu:-)

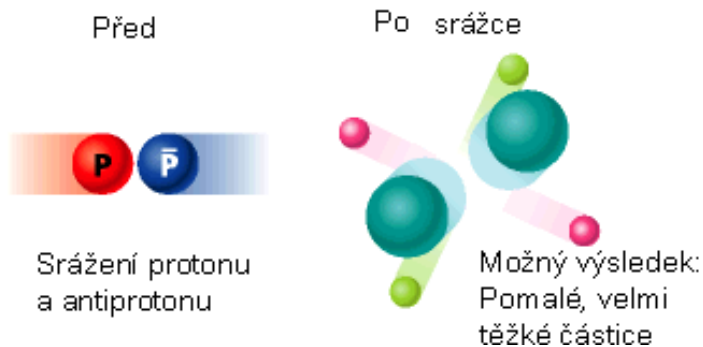
Typické typy kolizí: e^+e^- , ep , pp , proton-antiproton.
(Q: proč proton-proton nebo proton-antiproton?)

Urychlovače II

Ostřelování pevného terče



Srážení svazků



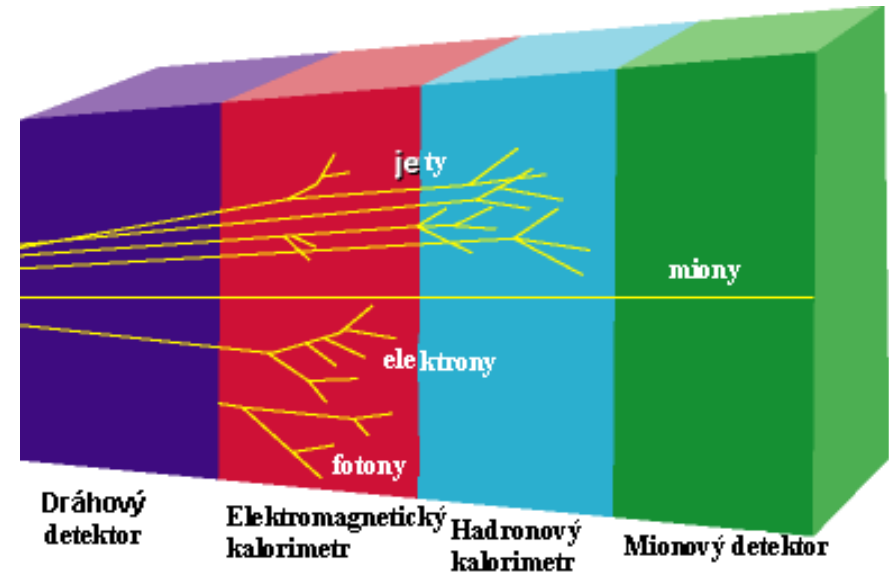
- **Experimenty s pevným terčem:**
- svazek a terč (kapalný vodík pro experiment, nikl pro produkci sekundárních svazků).
- Nevýhoda: malá energie v těžišťovém systému.
- **Vstřícné svazky:**
technicky náročné srážet, ale výhody: vysoká energie srážek.
Částice+antičástice: opačný náboj, možno urychlovat v jedné trubici, jde o jeden urychlovač, jedno magnetické pole.

CERN, Fermilab, Brookhaven, DESY



Společné rysy experimentů

- Dráhové detektory: hledání „tracků“, měření hybnosti.
- Elektromagnetický kalorimetr: elektrony, fotony, částečně hadronové spršky („jety“).
- Hadronový kalorimetr: jety (hadronová sprška, jaderné interakce).
- Mionové komory (miony málo ionizují, neinteragují silně: pronikají daleko).



Podle tohoto schématu navržena většina „víceúčelových“ detektorů:

CDF, D0 (Fermilab)

H1, Zeus (Desy)

OPAL, Delphi, Aleph, L2 (byly na urychlovači LEP, CERN)

ATLAS, CMS (budují se v Cernu)

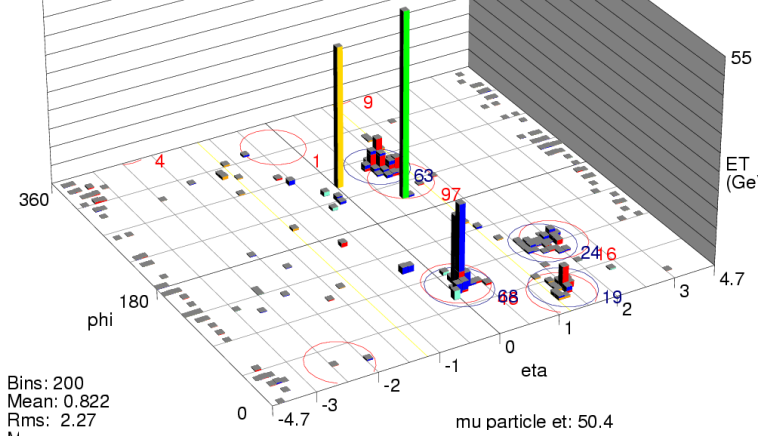
Star, Phenix...(RHIC, Brookhaven)

„Event Display“

Run 188298 Evt 58551412

Triggers:

- 1 MET
- 1 mu particle
- EM
- ICD
- MG
- HAD
- CH

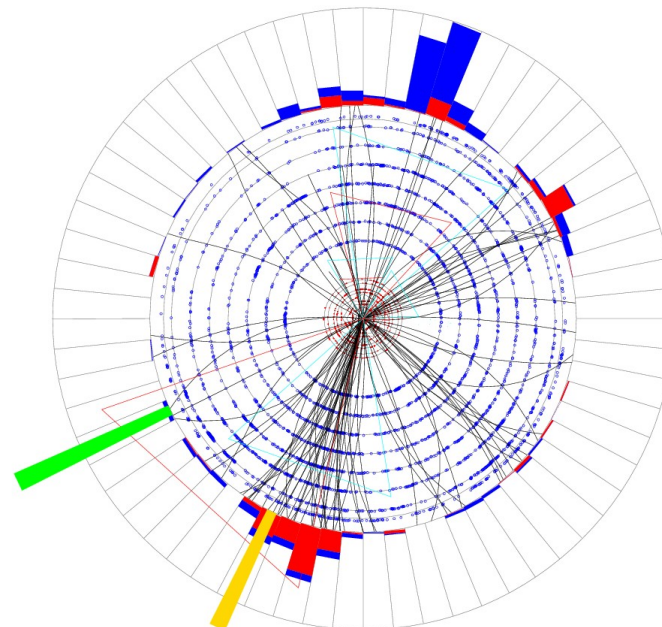
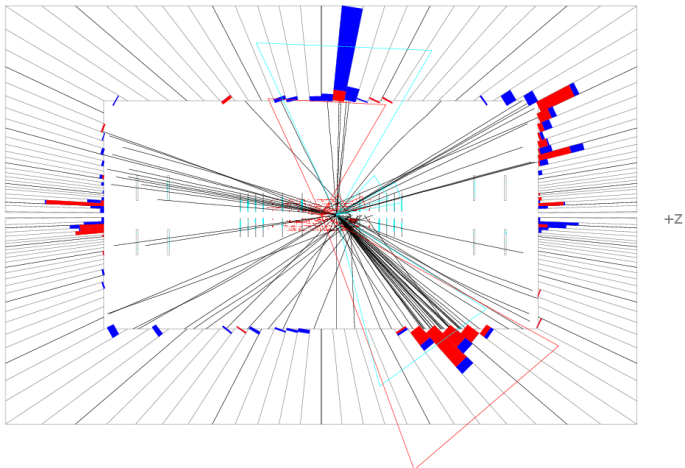


Bins: 200
Mean: 0.822
Rms: 2.27
M
Run 188298 Evt 58551412

ET scale: 29 GeV

Run 188298 Evt 58551412

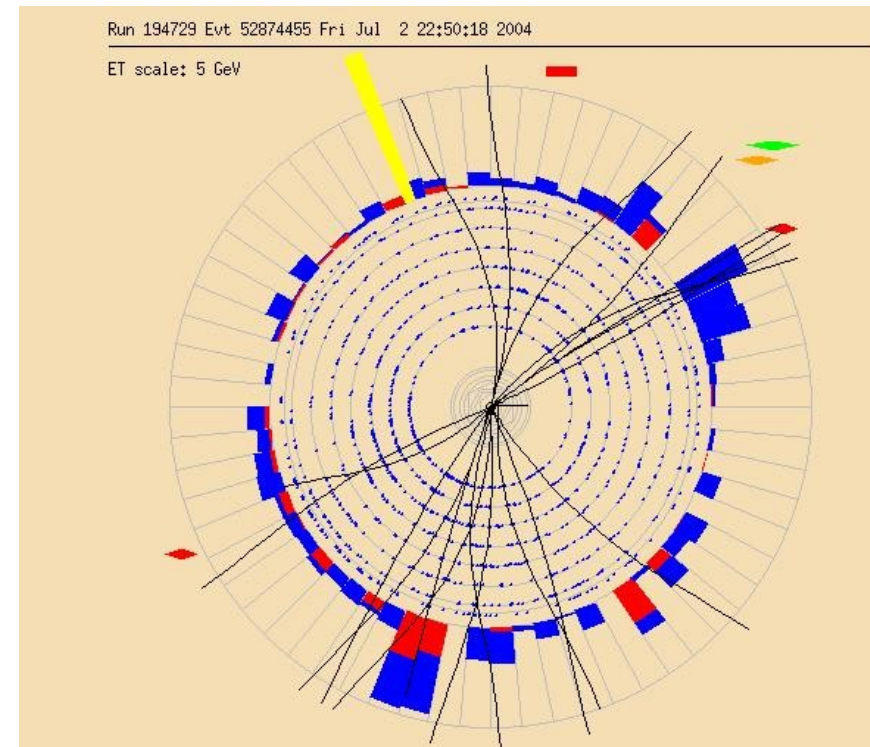
E scale: 47 GeV



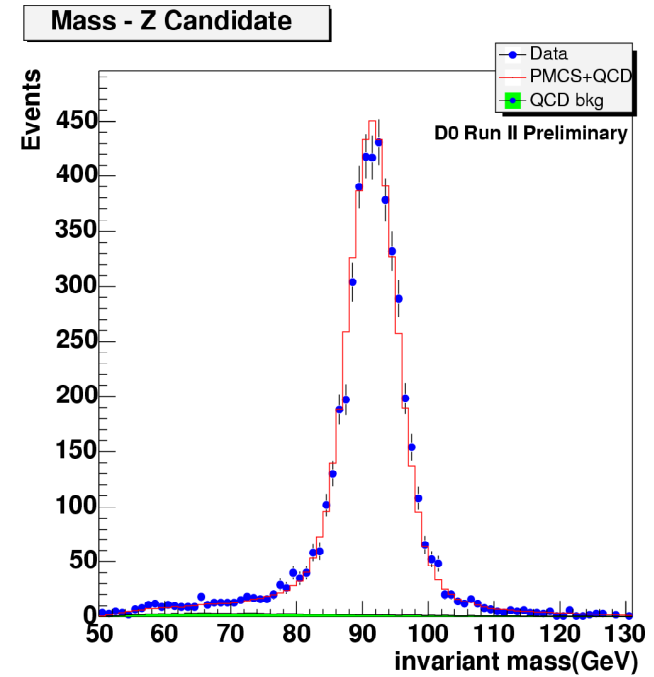
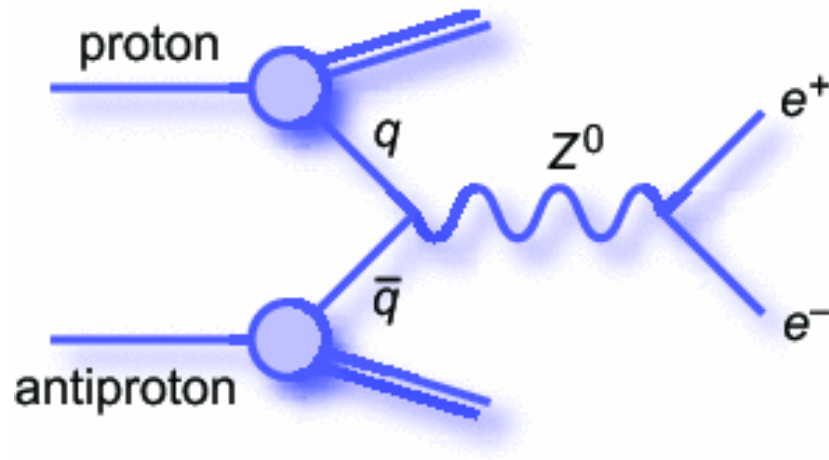
Společné rysy experimentů

- **Stále jde v principu o rozptylový experiment:** srážíme částice nebo bombardujeme terčíky a sledujeme vzniklé produkty, jejich energie, změny úhlu...a usuzujeme tak vnitřní strukturu, nové objekty...
- Pro velkou statistiku často vysoká četnost srážek: nutnost rychle se rozhodnout, zda událost je zajímavá a chceme ji zaznamenat, všechny zapsat nemůžeme („trigger“ - spoušť).
- Frekvence zápisu dat limitována možnostmi zápisu na magnetické pásky (kolem 100 Hz). Harddisk dlouhodobě nespolehlivý:)
- Rekonstrukce události ze signálů v elektronice: od světelných impulsů či „zásahů“ v křemíku a sesbíraného náboje až k měřené energii či zrekonstruované dráze.
- **Detektor je pouze složitý fotoaparát!**
- Zákon zachování příčné hybnosti.

4.11.2014

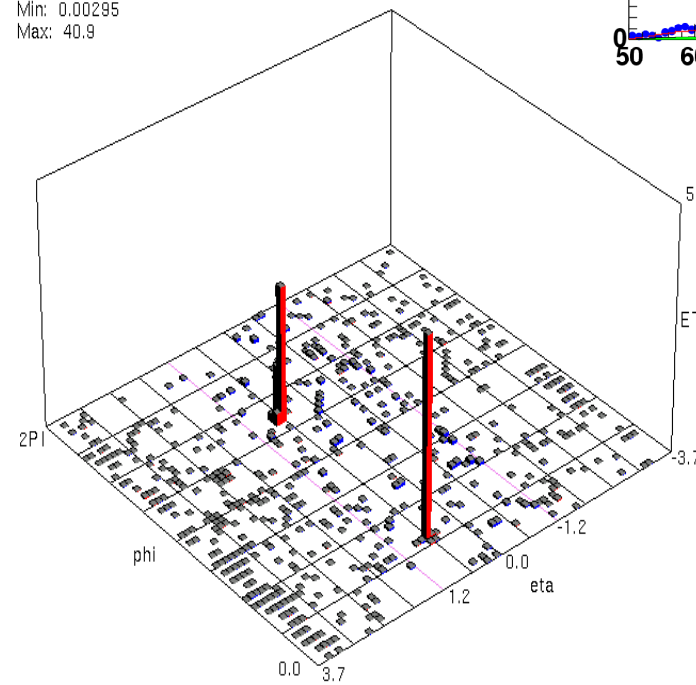
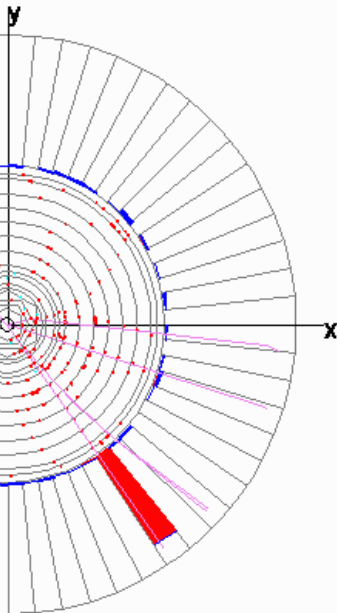


Interakce I: $qq \rightarrow Z \rightarrow e^+e^-$



Min: 0.00295
Max: 40.9

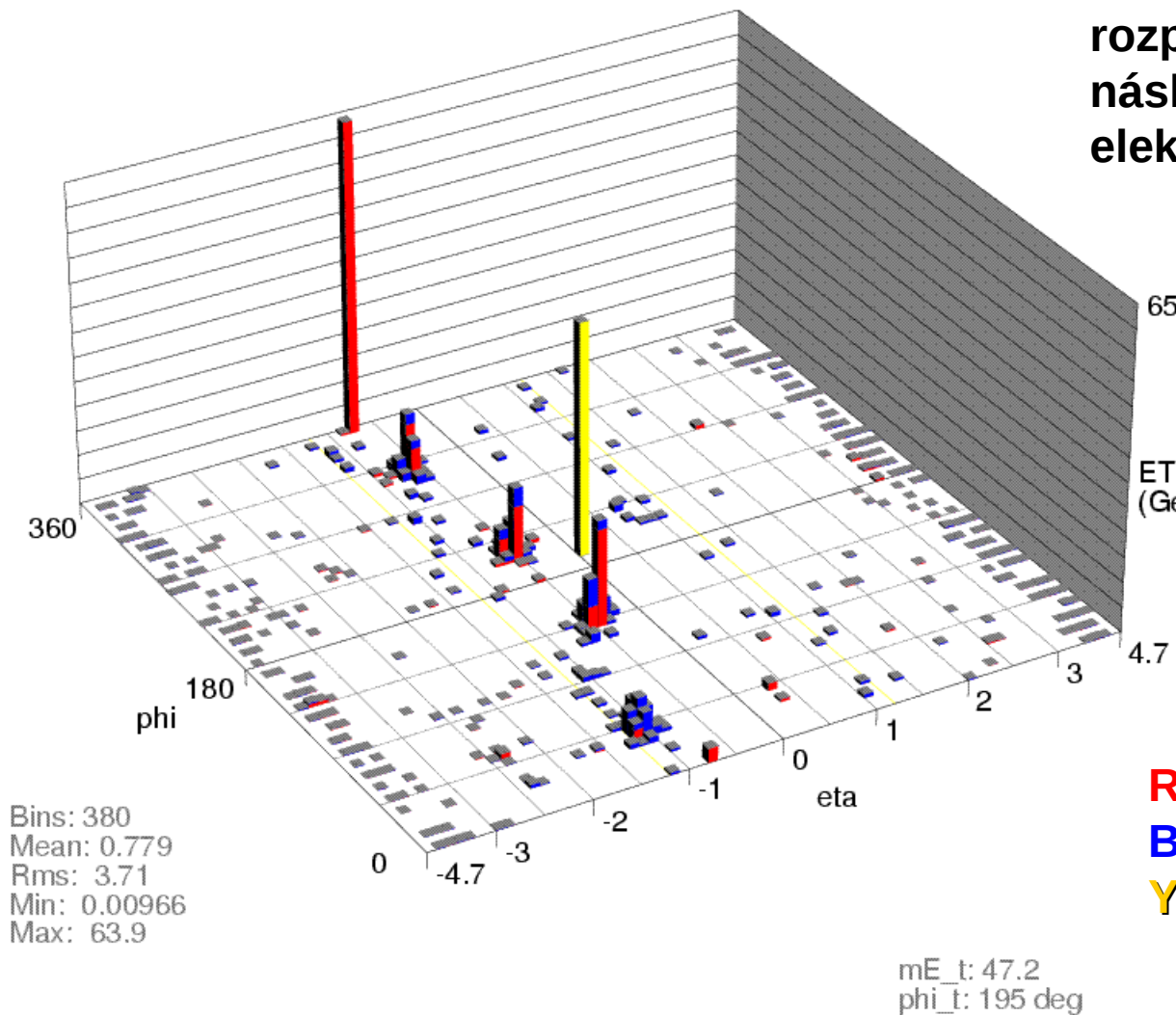
ET scale: 41 GeV



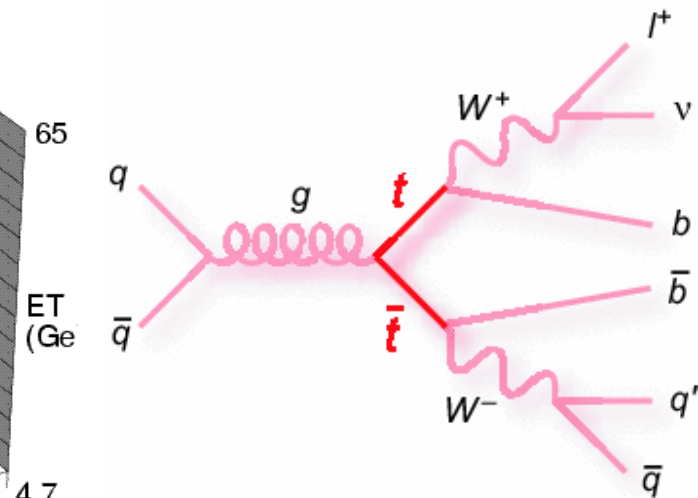
4.11.2014

Interakce II

Top-antitop pár, jak viděno DØ Detektorem

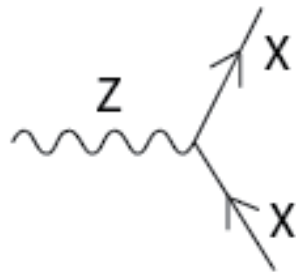


Pár top-anti top
 rozpadající se na $WbWb$ a
 následně na 4 jety,
 elektron a neutrino.

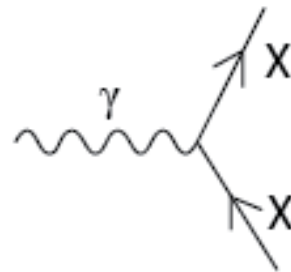


Red: EM Calorimeter
Blue: Hadronic Calorimeter
Yellow: Missing Energy
 (neutrino signature)

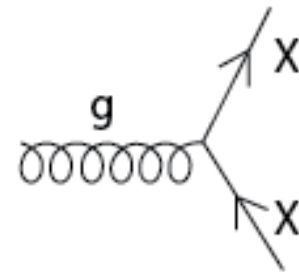
Standard Model Interactions (Forces Mediated by Gauge Bosons)



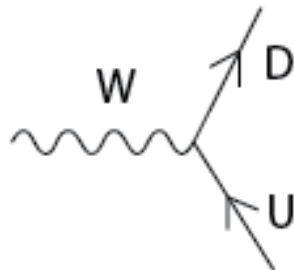
X is any fermion in the Standard Model.



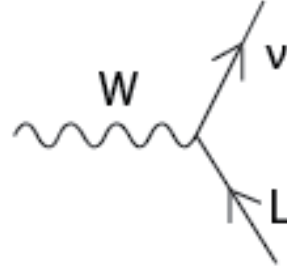
X is electrically charged.



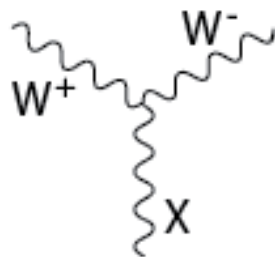
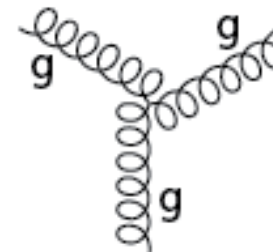
X is any quark.



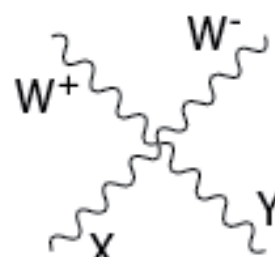
U is a up-type quark;
D is a down-type quark.



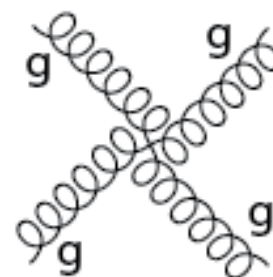
L is a lepton and ν is the corresponding neutrino.



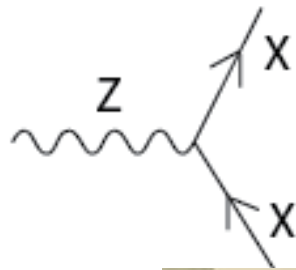
X is a photon or Z-boson.



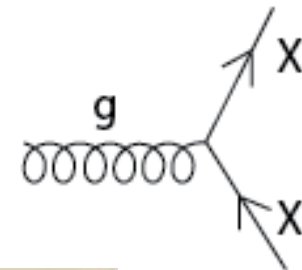
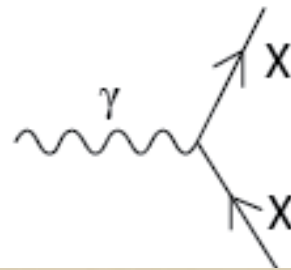
X and Y are any two electroweak bosons such that charge is conserved.



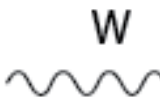
Standard Model Interactions (Forces Mediated by Gauge Bosons)



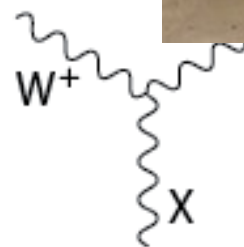
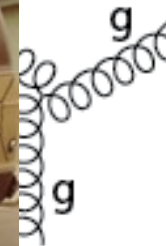
X is any fe
the Stand



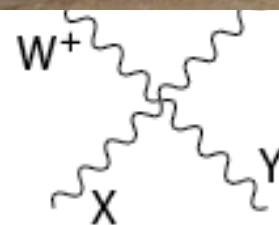
ny quark.



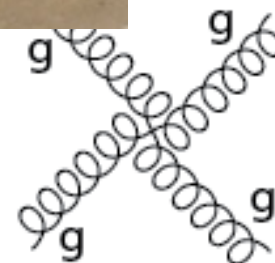
U is a up-ty
D is a down



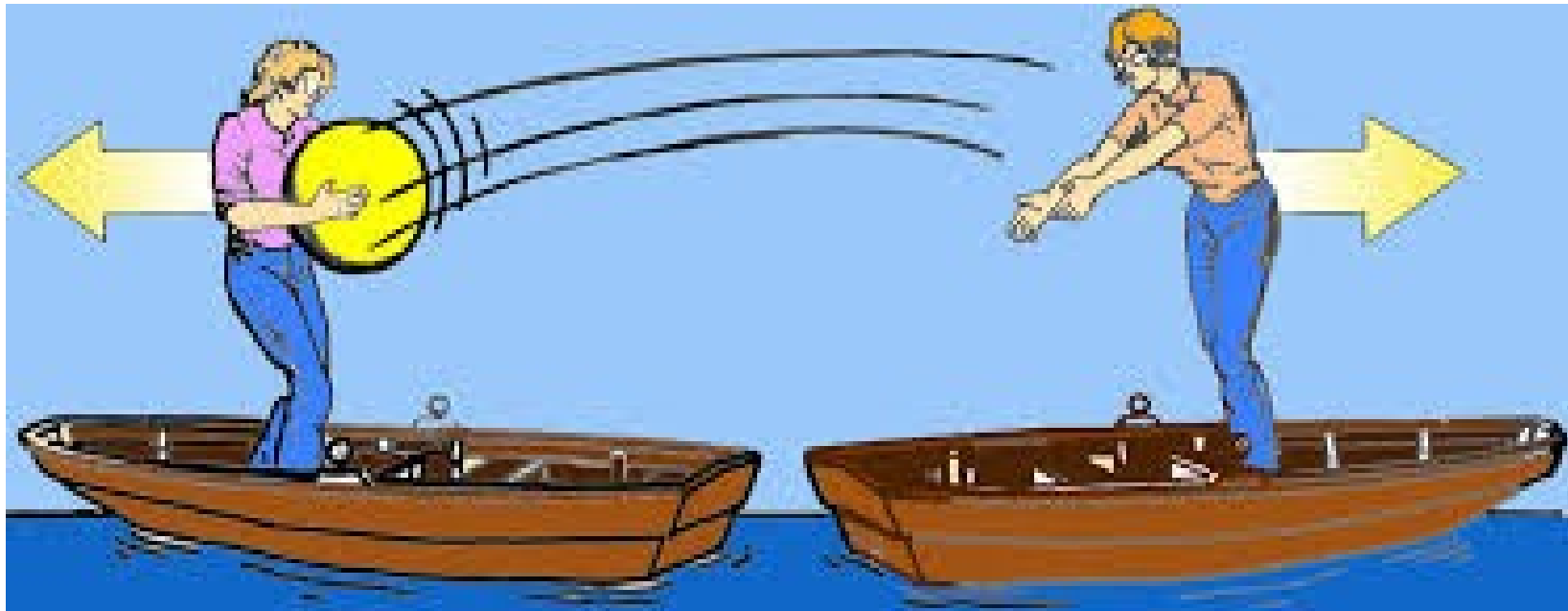
X is a photon or Z-boson.



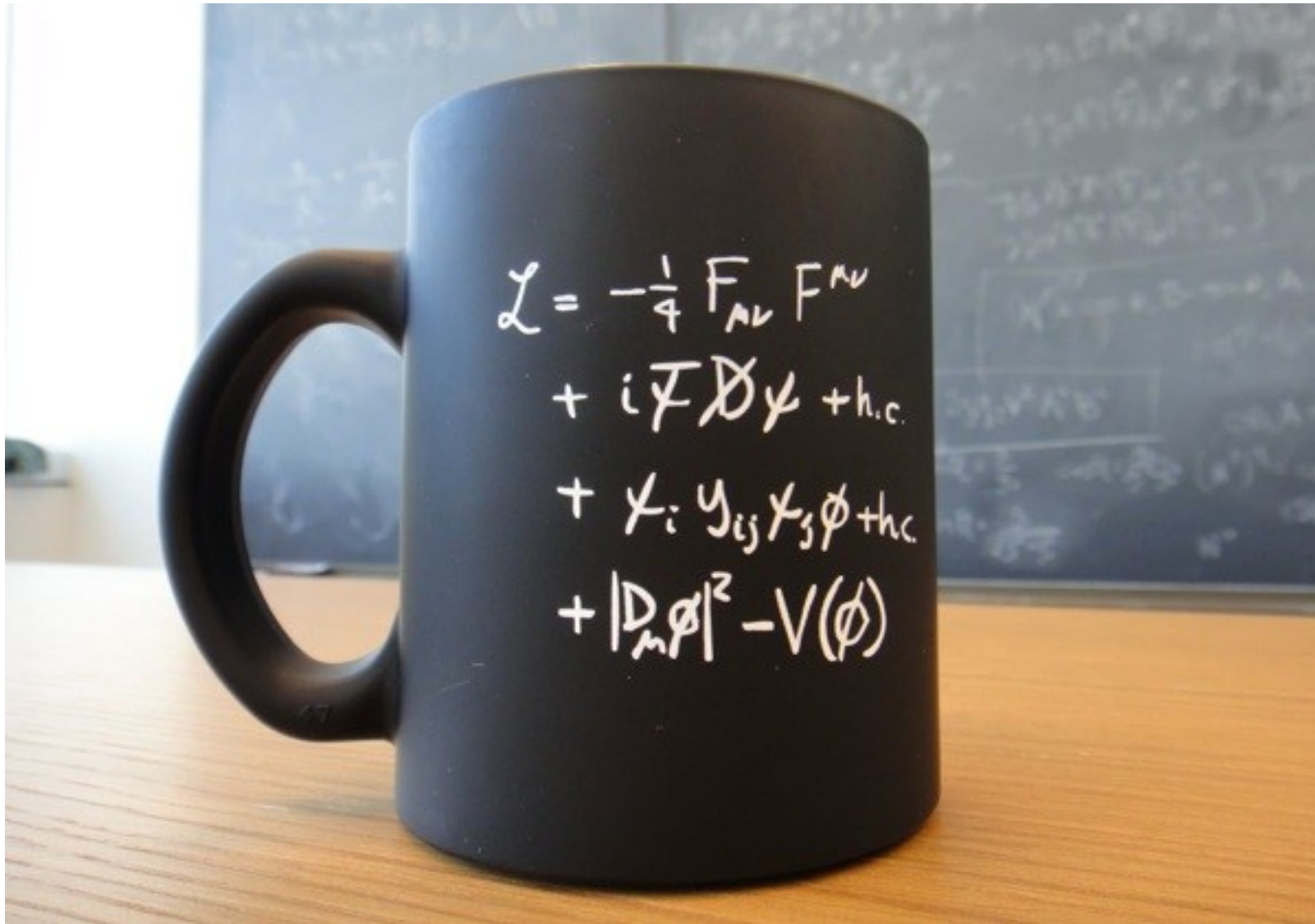
X and Y are any two
electroweak bosons such
that charge is conserved.



Particles Interactions



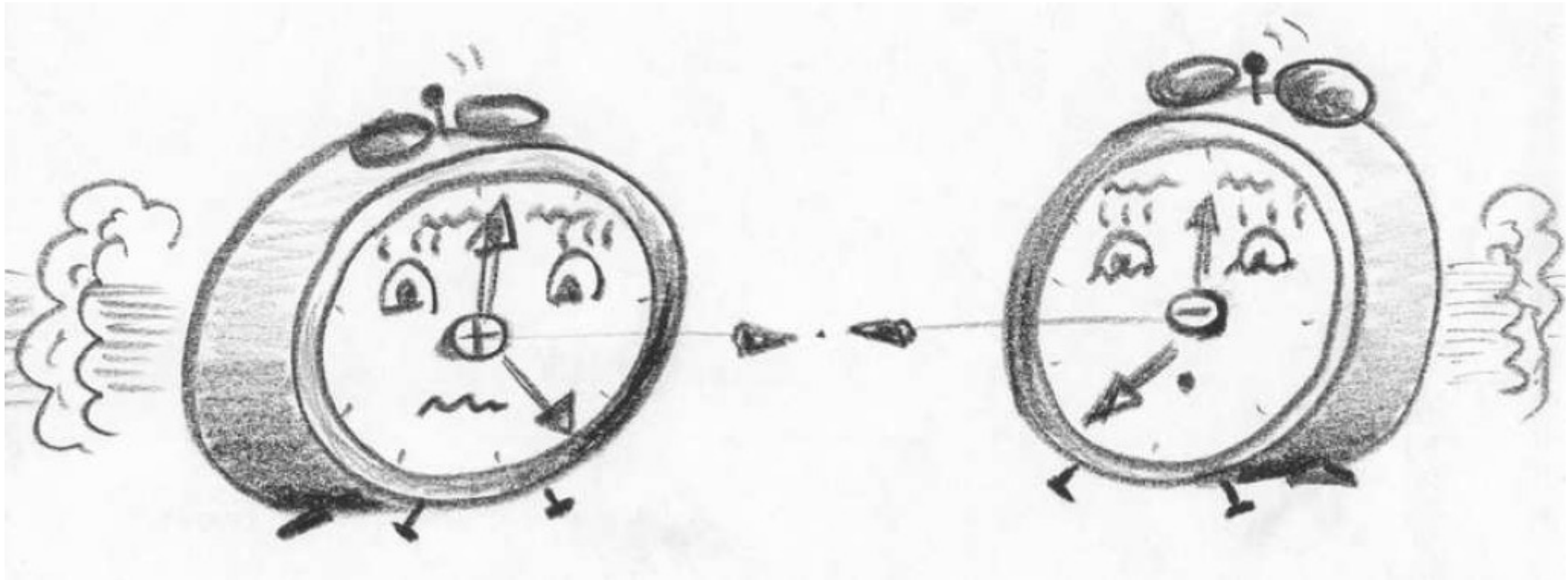
Particles Interactions



$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
& \frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma)g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2}M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
& \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2}M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
& \left. \frac{2M}{g}H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2}\alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
& \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
& g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
& gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w^2}Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
& W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g[W_\mu^+ (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H\partial_\mu \phi^+ - \\
& \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g\frac{1}{c_w}(Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig\frac{s_w^2}{c_w}MZ_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
& ig s_w MA_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w}Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
& ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2}Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w}Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w}Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
& \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
& \frac{ig}{4c_w}Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
& 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + \\
& (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
& \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}\frac{m_e^\lambda}{M}[-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
& \frac{g}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
& m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
& \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}H(\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}H(\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}\phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
& \frac{ig}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}\phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
& \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
& \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^+) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2}\bar{X}^0 X^0 H] + \\
& \frac{1-2c_w^2}{2c_w}igM[\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w}igM[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
& igMs_w[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
\end{aligned}$$

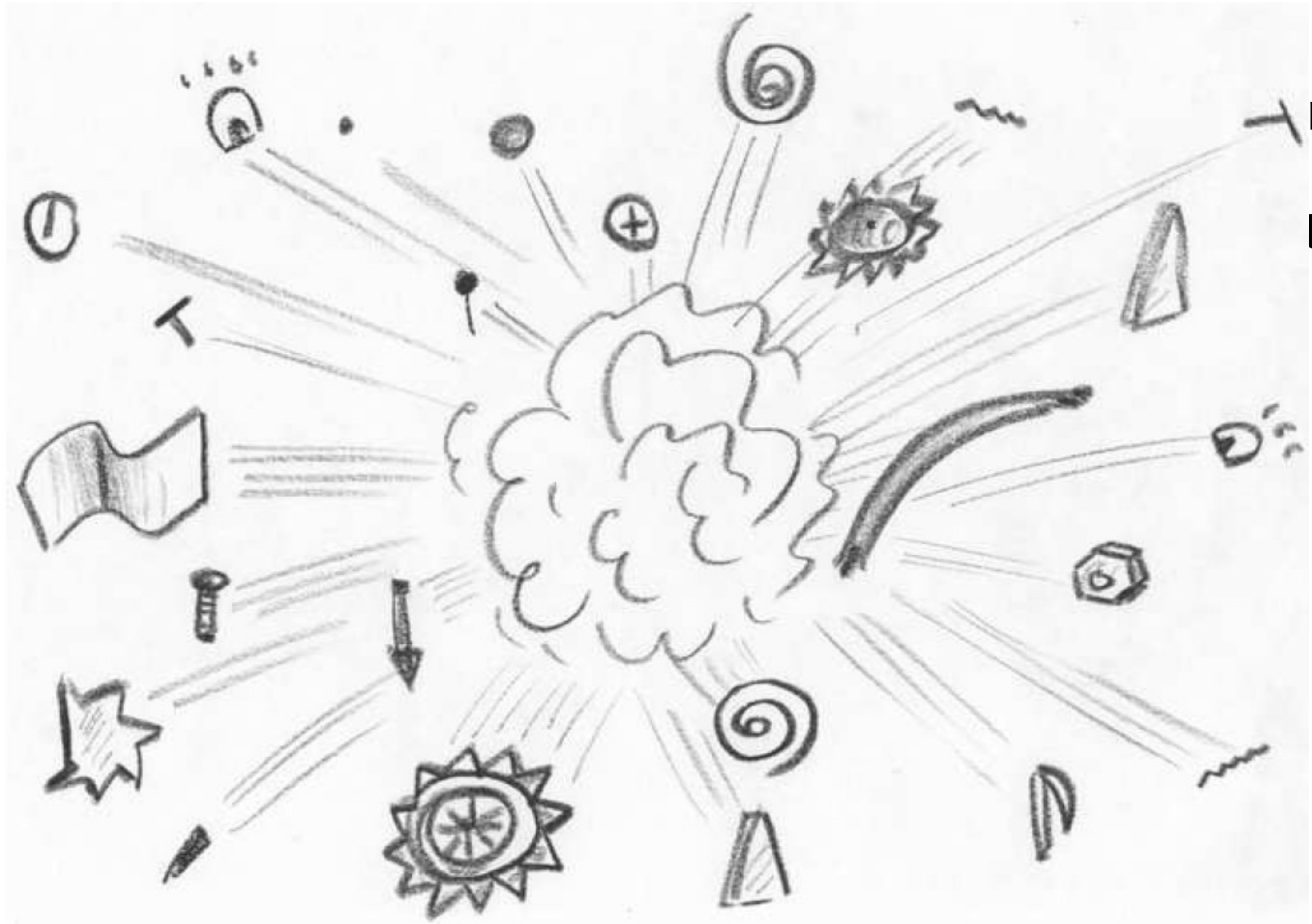
Particle Physics

- The key probe to understand the subnuclear world is the scattering experiment: colliding proton on protons, electrons on positrons, electrons on protons, heavy ion collisions...
- “Scattering protons on protons is like colliding Swiss watches to find out how they are built” (R.P.Feynman)

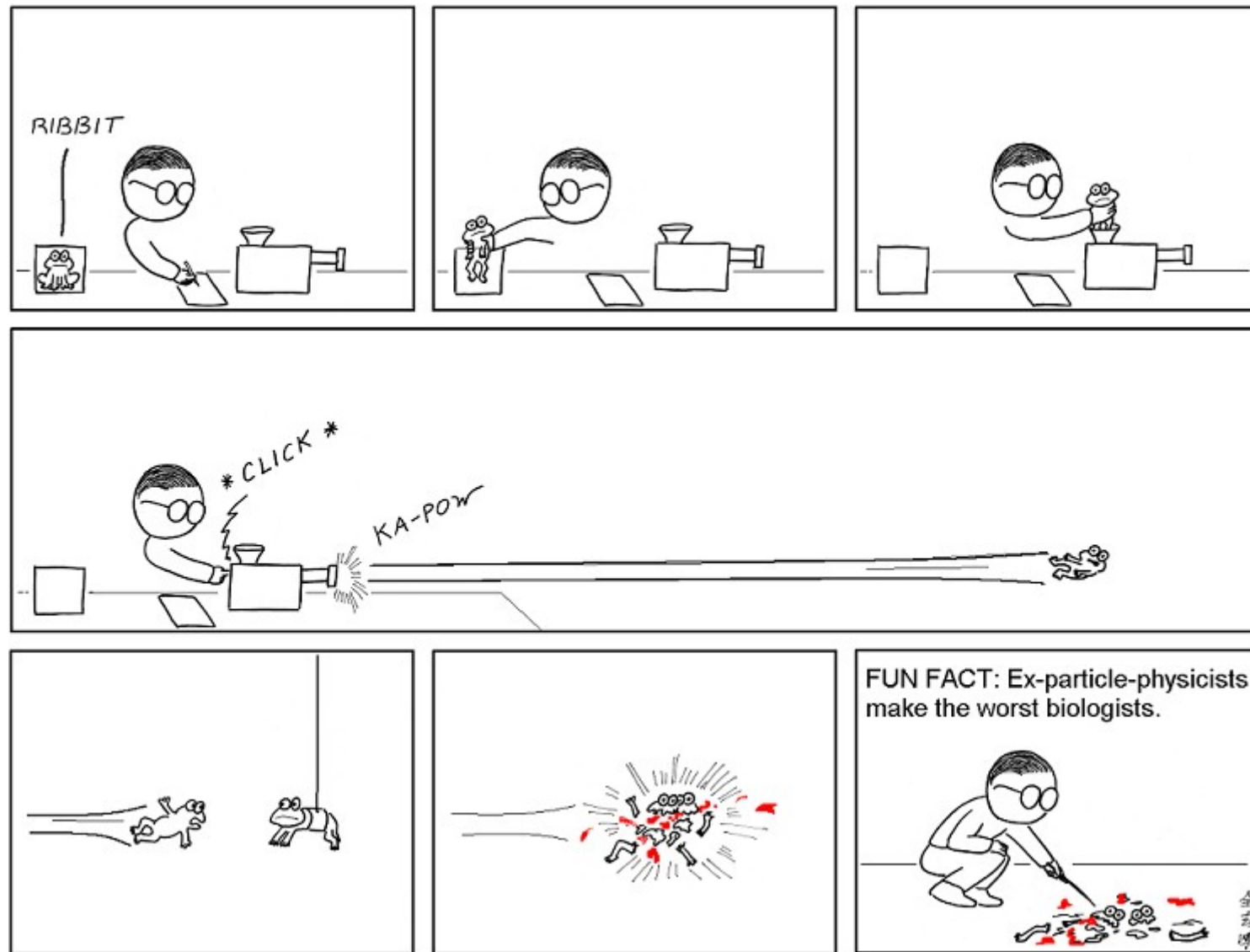


Particle Physics

- The scat posi
- “Scat find



Ex-particle-physicists make the worst biologists....

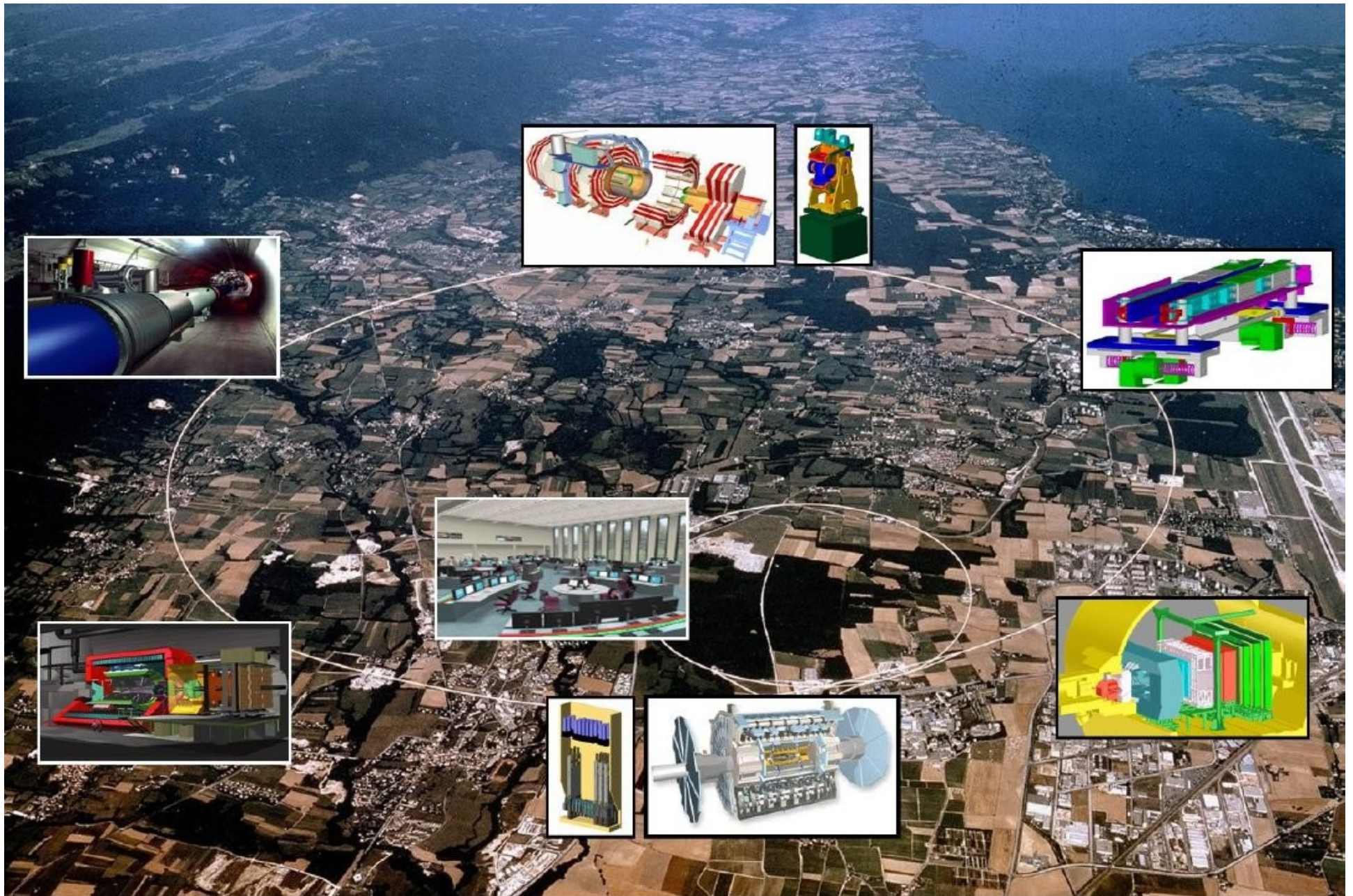


CERN

- European Organization for Nuclear Research
- Celebrating 60 years of peaceful research.
- Home of the accelerator complex topped by the Large Hadron Collider (LHC).
- Place where students meet experts, where ideas are shared.
- Melting pot of engineers, physicists, IT experts, mathematicians, technicians, professors, students, teachers, science and outreach.
- Privileged to participate to Czech contributions to research at CERN.



CERN



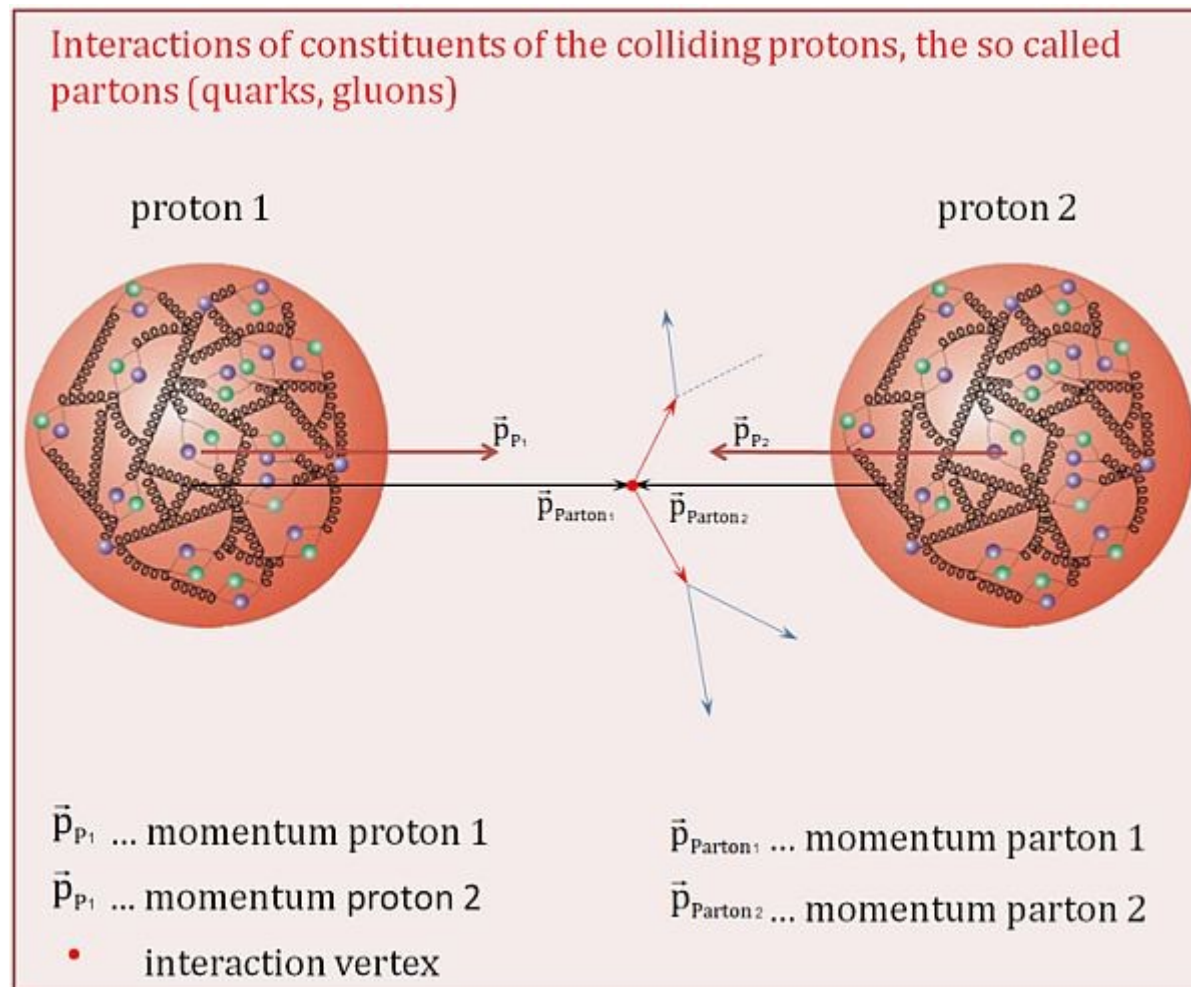
LHC

- Colliding protons at high energy at 40MHz rate to search for rare processes, yet unseen particles, measure precisely properties of matter at conditions close to Big Bang densities.
- $m_p/c^2 = 1\text{GeV}$ while beam energy up to 7TeV!



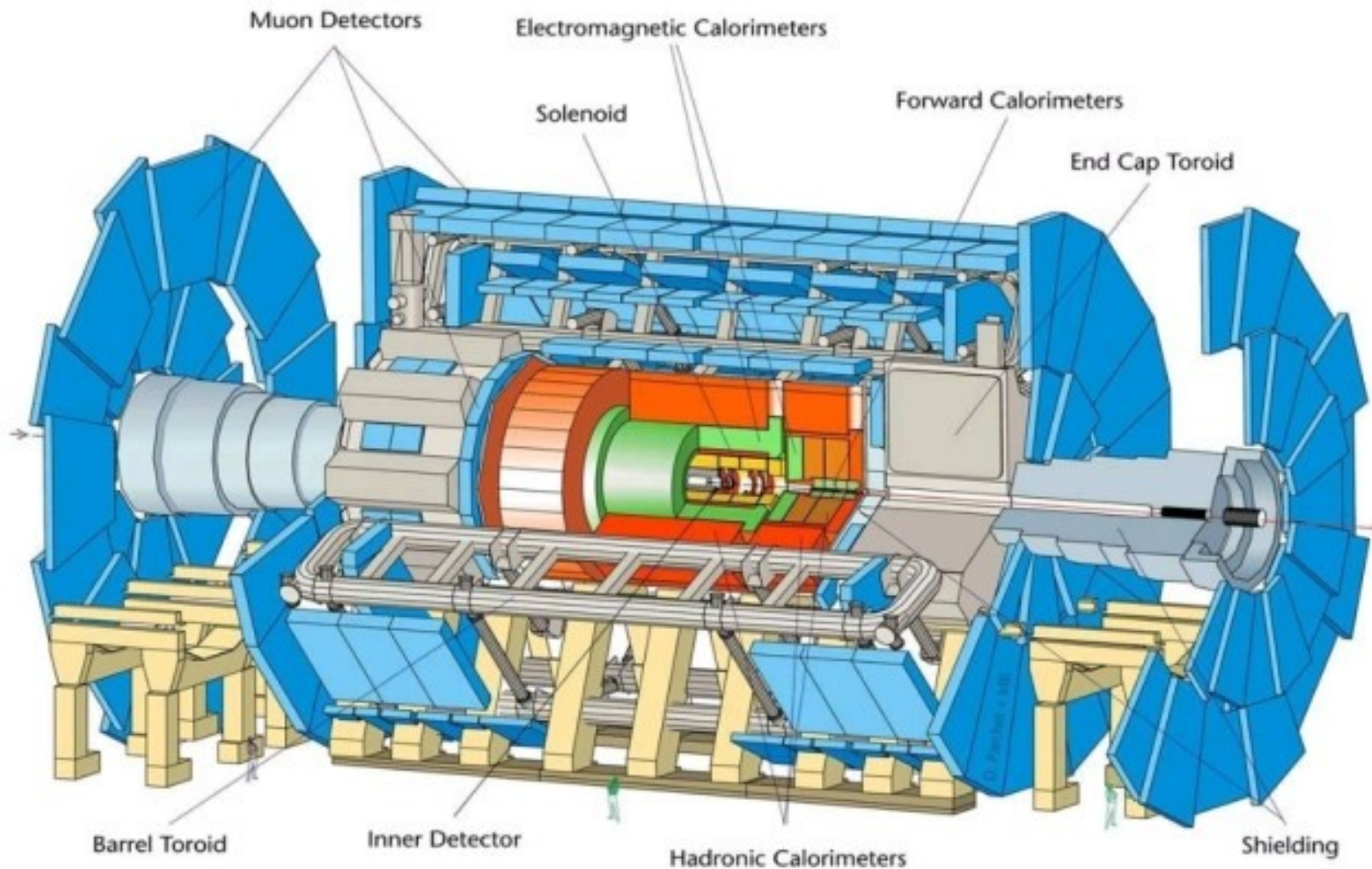
LHC

- Colliding protons at high energy at 40MHz rate to search for rare processes, yet unseen particles, measure precisely properties of matter at conditions close to Big Bang densities.
- $m_p/c^2 = 1\text{GeV}$ while beam energy up to 7TeV!

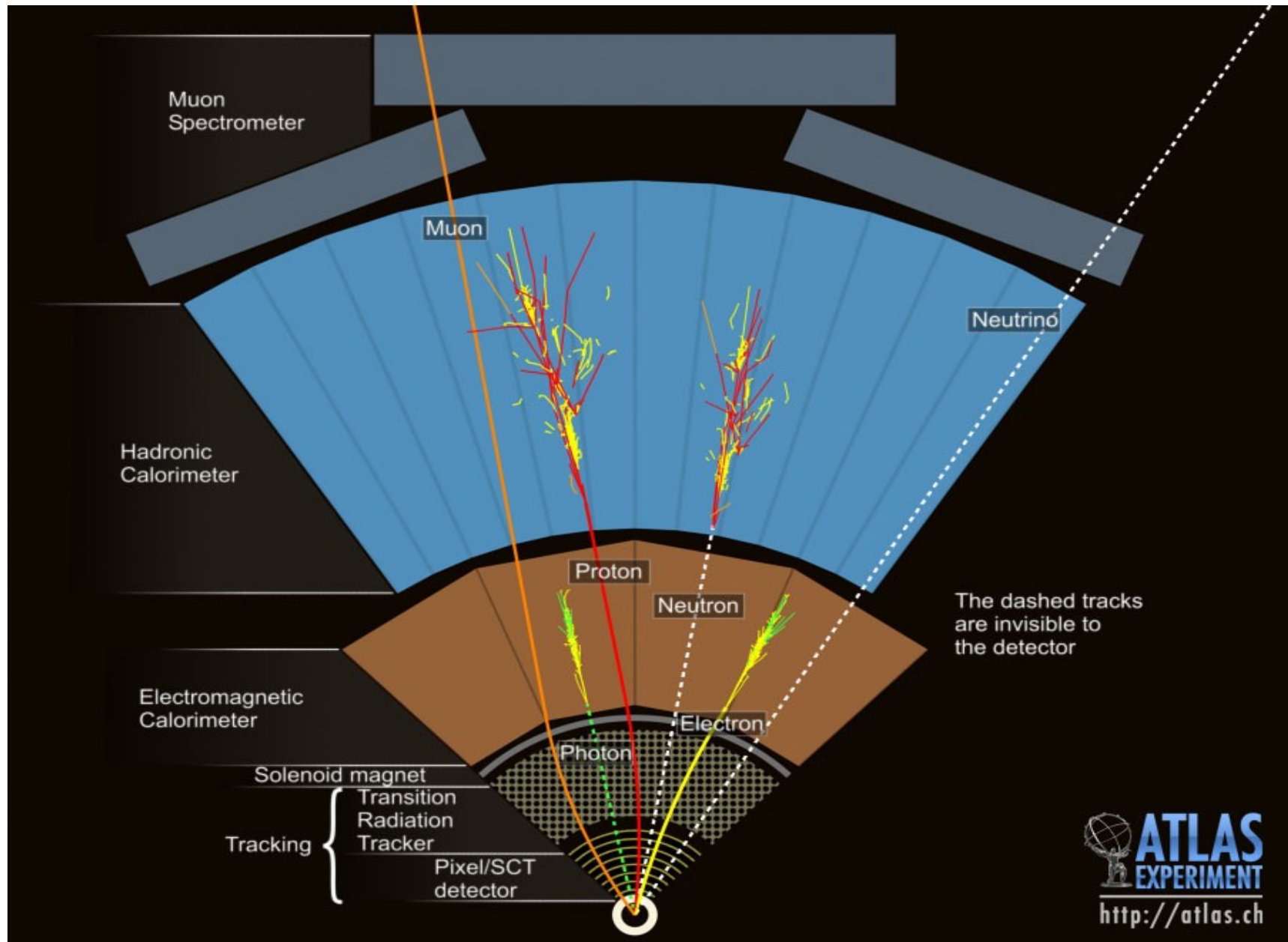


ATLAS Experiment

- One of the two multipurpose experiments at CERN's LHC.



Passage of Particles through ATLAS



Data Flow

LHC provides proton-proton collisions;

ATLAS does/deals with:

- Fast decision whether to write to tape/disk (trigger)
- Event digitization
- Detector calibration
- Event reconstruction
- Objects selection
- Objects calibration
- Physics analysis: GRID
- Effect of additional events
- Physics background: signal separation
- Detector resolution
- Comparison to full detector simulation
- Measure/Discover/Set limits

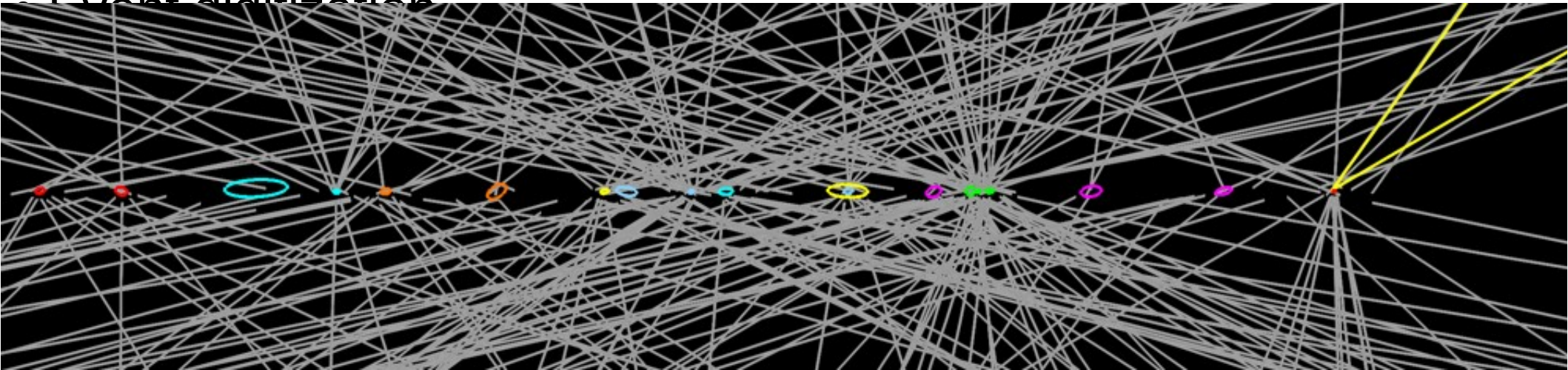
Data Flow

LHC provides proton-proton collisions;

ATLAS does/deals with:

- Fast decision whether to write to tape/disk (trigger)

Event digitization



- Physics background: signal separation
- Detector resolution
- Comparison to full detector simulation
- Measure/Discover/Set limits

Physicist does...

```
x_A[6]=x_LHC_Corr[BestTrackCand[6]][6],y_A[6]=y_LHC_Corr[BestTrackCand[6]][6];
}

// Now event selection cuts
// first cuts on xA - xC
    if(tr_rec[0] && axo(x_A[0],x_A[7]) && axi(x_A[2],x_A[5])) x_accept[0]=true, nx[0]++;
    if(tr_rec[1] && axo(x_A[1],x_A[6]) && axi(x_A[3],x_A[4])) x_accept[1]=true, nx[1]++;
// second cuts on yA - yC
if(x_accept[0] && ayy(y_A[0],y_A[7]) && ayy(y_A[2],y_A[5])) y_accept[0]=true, ny[0]++;
if(x_accept[1] && ayy(y_A[1],y_A[6]) && ayy(y_A[3],y_A[4])) y_accept[1]=true, ny[1]++;
// rejection of x - theta_x background
    if(y_accept[0] && axx(x_A[2],1.E6*(x_A[0]-x_A[2])/dz1) && axx(x_A[5],1.E6*(x_A[7]-x_A[5])/dz2)) t_accept[0]=true, nt[0]++;
if(y_accept[1] && axx(x_A[3],1.E6*(x_A[1]-x_A[3])/dz1) && axx(x_A[4],1.E6*(x_A[6]-x_A[4])/dz2)) t_accept[1]=true, nt[1]++;
// large y beam screen rejection
    if(t_accept[0] && (y_A[0]<ybs[0] && y_A[2]<ybs[2] && y_A[5]>ybs[5] && y_A[7]>ybs[7])) ybs_accept[0]=true, nybs[0]++;
    if(t_accept[1] && (y_A[1]>ybs[1] && y_A[3]>ybs[3] && y_A[4]<ybs[4] && y_A[6]<ybs[6])) ybs_accept[1]=true, nybs[1]++;
// verify events are above y-edge
/*if(tr_rec[0]) {
cout << "y positions of an event in arm 1368: " << y_A[0] << ", " << y_A[2] << ", " << y_A[5] << ", " << y_A[7] << endl;
cout << "corresponding y_LHC_Corr values are: " << y_LHC_Corr[0][0] << ", " << y_LHC_Corr[0][2] << ", " << y_LHC_Corr[0][5] << "
cout << "corresponding y edge values are      : " << ye[0] << ", " << ye[2] << ", " << ye[5] << ", " << ye[7] << endl;
cout << "ybs_accept[0]: " << ybs_accept[0] << endl;
}*/
if(ybs_accept[0] && (y_A[0]>ye[0] && y_A[2]>ye[2] && y_A[5]<ye[5] && y_A[7]<ye[7])) yed_accept[0]=true, nyed[0]++/*, cout << "Ye
if(ybs_accept[1] && (y_A[1]<ye[1] && y_A[3]<ye[3] && y_A[4]>ye[4] && y_A[6]>ye[6])) yed_accept[1]=true, nyed[1]++;

// total selection condition
if(tr_rec[0] && x_accept[0] && y_accept[0] && t_accept[0] && ybs_accept[0] && yed_accept[0]) f_accept[0]=true;
if(tr_rec[1] && x_accept[1] && y_accept[1] && t_accept[1] && ybs_accept[1] && yed_accept[1]) f_accept[1]=true;

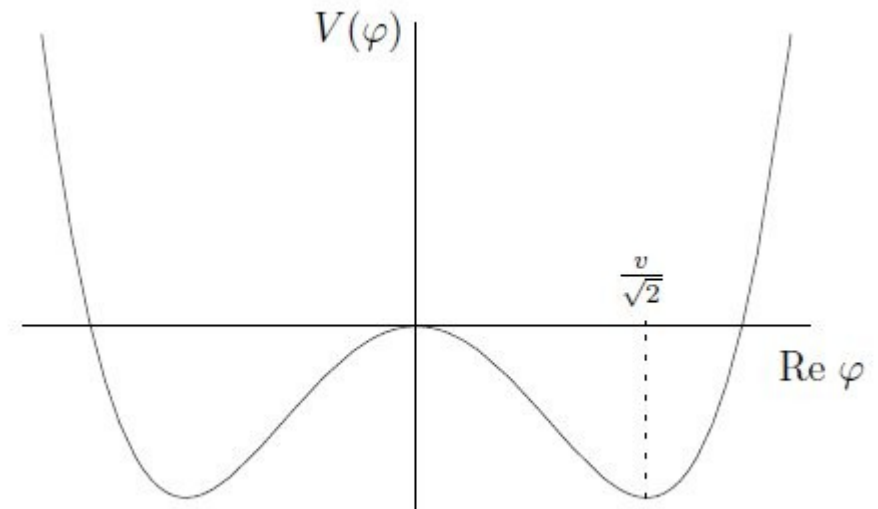
//std::cout << "## yed_accept[1] = " << yed_accept[1] << "## y_A[1] = " << y_A[1] << "## ye[1] = " << ye[1] << "## y_A[3] = " <<
// test*test*test take all elastic 'candidates' to show impact of event selection-cuts
// if(tr_rec[0]) f_accept[0]=true;
```

Higgs – Proč?

- Standardní model matematicky funguje pro nehmotné částice.
- Bylo třeba najít mechanismus, který “dodá” částicím hmotu, a přitom nerozbije dosavadní teorii a interakce (transformace vůči speciální grupě symetrií).
- Higgsův boson byl dokonce nutný i pro “záchranu” předpovědí teorii na vysokých energiích.
- Trik: potenciál, který nemá minimum v nule, nemá přímočarou částicovou interpretaci:

$$\mathcal{L} = \partial_\mu \varphi \partial^\mu \varphi^* - V(\varphi)$$

$$V(\varphi) = -\mu^2 \varphi \varphi^* + \lambda (\varphi \varphi^*)^2$$

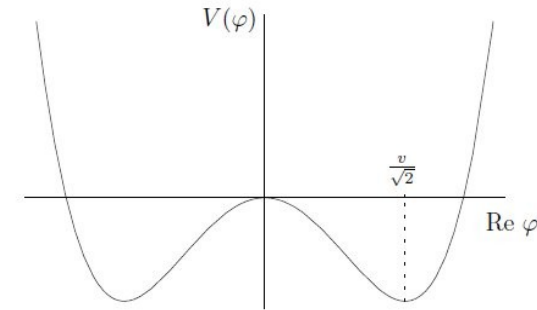


Higgs – Jak?

- Přeparametrizování pole na úhlovou a radiální část:

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + (\partial_\mu - igA_\mu)\varphi(\partial^\mu + igA^\mu)\varphi^* - \lambda(\varphi\varphi^* - \frac{v^2}{2})^2$$

$$\varphi(x) = \rho(x) \exp\left(i\frac{\pi(x)}{v}\right) \quad \rho = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma + v)$$



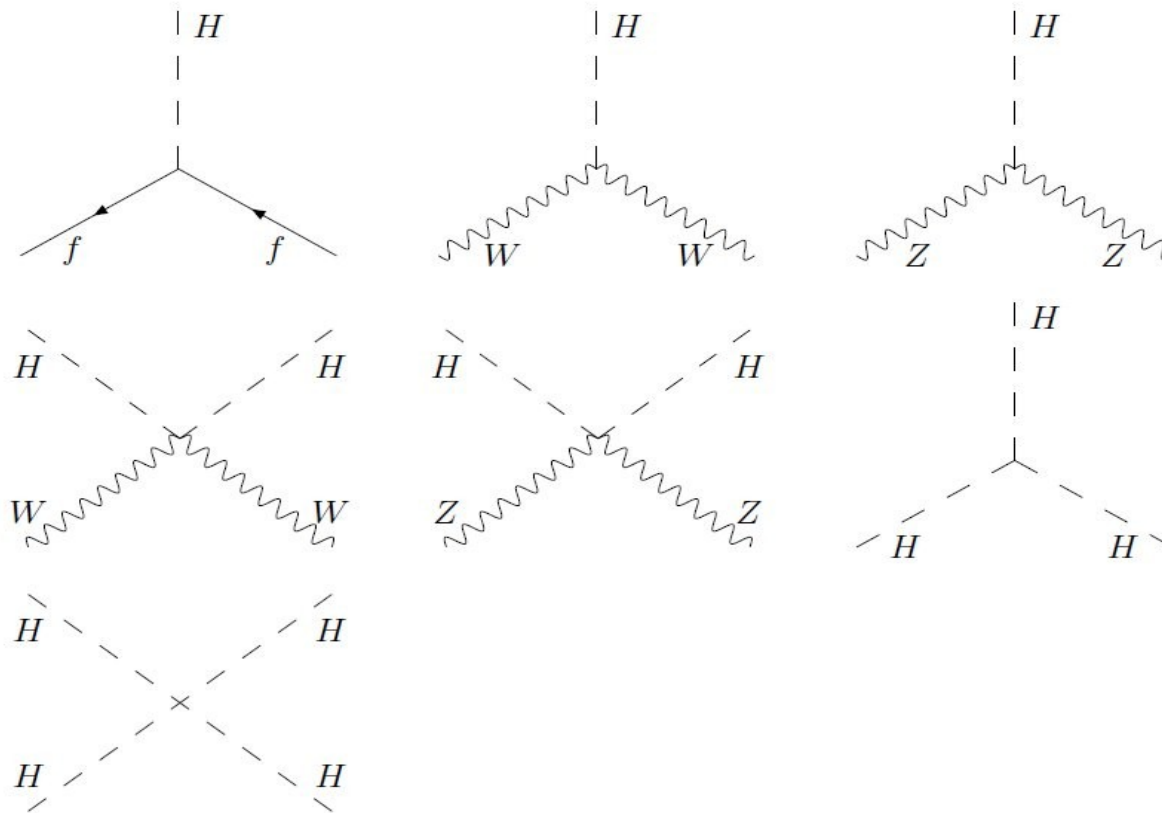
- Lagrangián popisující interakci skalárního a vektorového pole:

$$\mathcal{L}_{Higgs}^{(U)} = \frac{1}{2}\partial_\mu\sigma\partial^\mu\sigma - \lambda v^2\sigma^2 - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \frac{1}{2}g^2v^2B_\mu B^\mu + g^2v\sigma B_\mu B^\mu + \frac{1}{2}g^2\sigma^2 B_\mu B^\mu - \lambda v\sigma^3 - \frac{1}{4}\lambda\sigma^4$$

Hmotový člen pro pole B

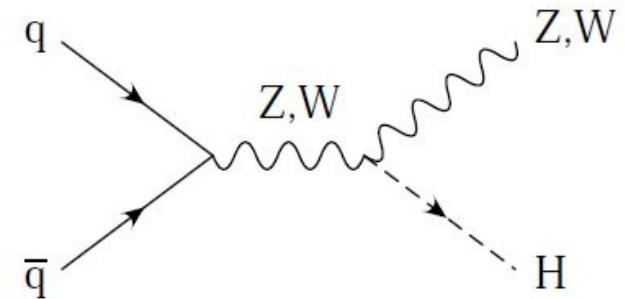
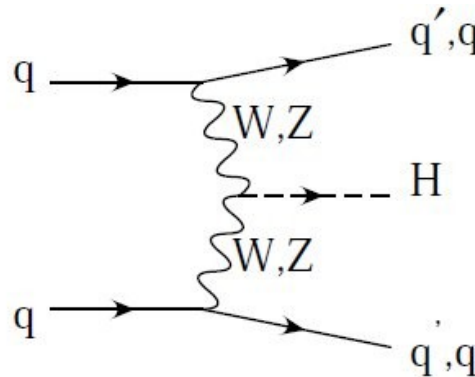
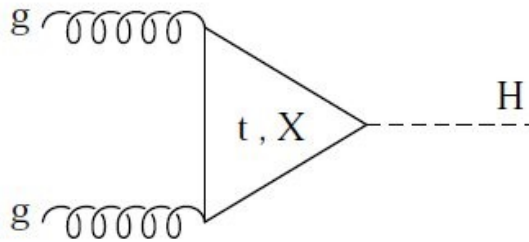
Higgs – Jak objevit?

- Srážet a čekat:)
- A hledat všude – teorie nepředpovídá jeho hmotnost.
- Higgs interaguje s částicemi “silou” úměrnou jejich hmotnosti.
- Neváže se tedy přímo na foton ani gluon.
- BUT: LHC is a gluon collider!
- “Rád” se rozpadá na těžké částice.
- Higgs může interagovat sám se sebou.



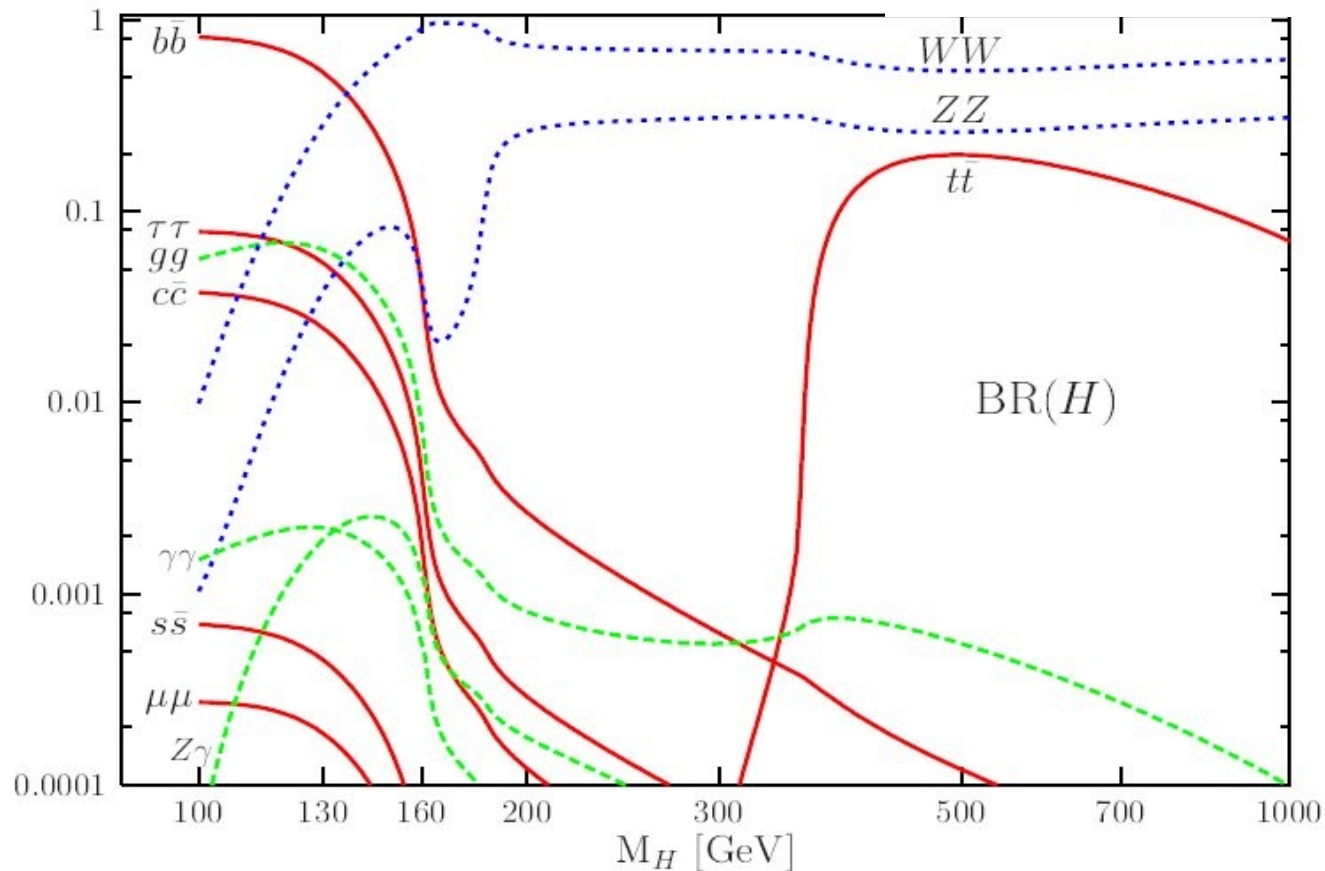
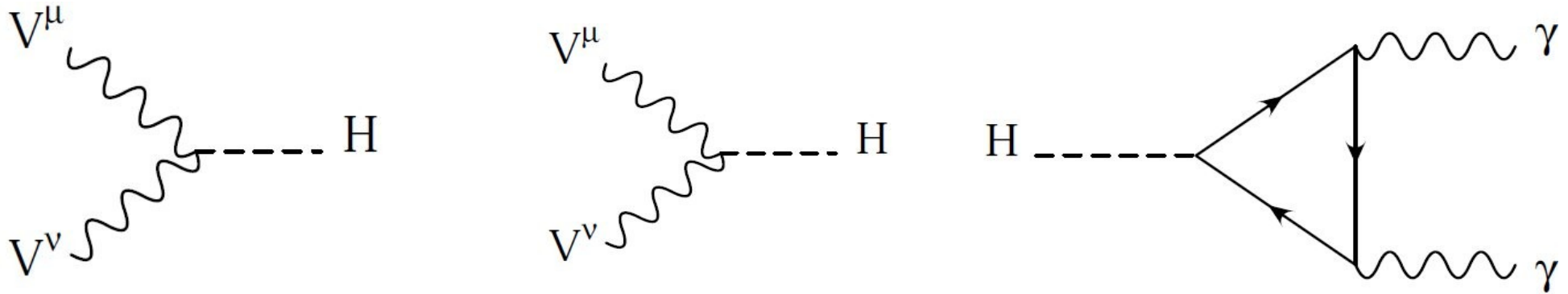
Higgs – Jak vytvořit?

- Srážet – elektrony a pozitrony? (LEP, CERN, do r. 2000)
- Protóny a antiprotóny? (Tevatron, Fermilab, USA, do r. 2011)
- Protóny s protóny (LHC)

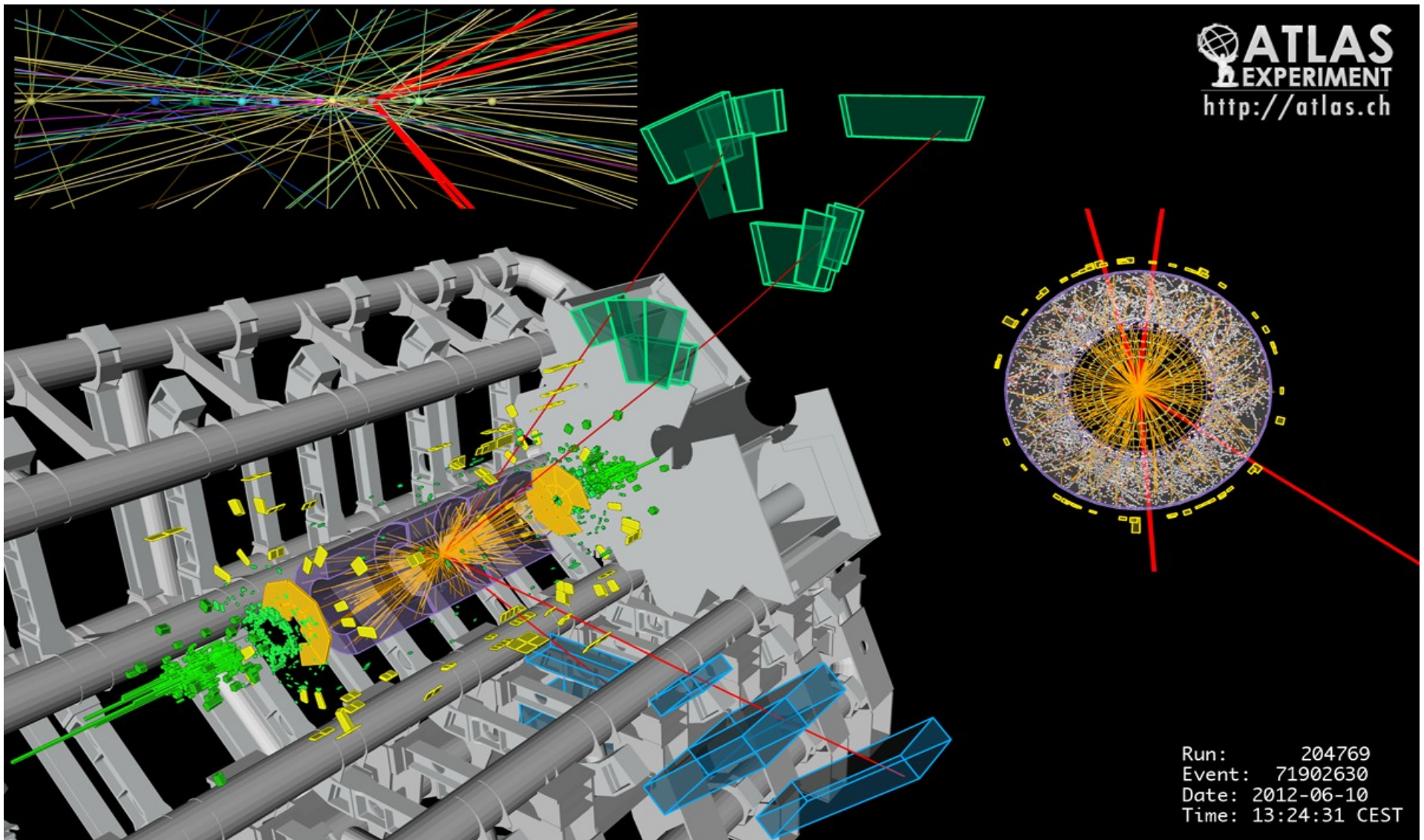


Higgs – Jak vidět?

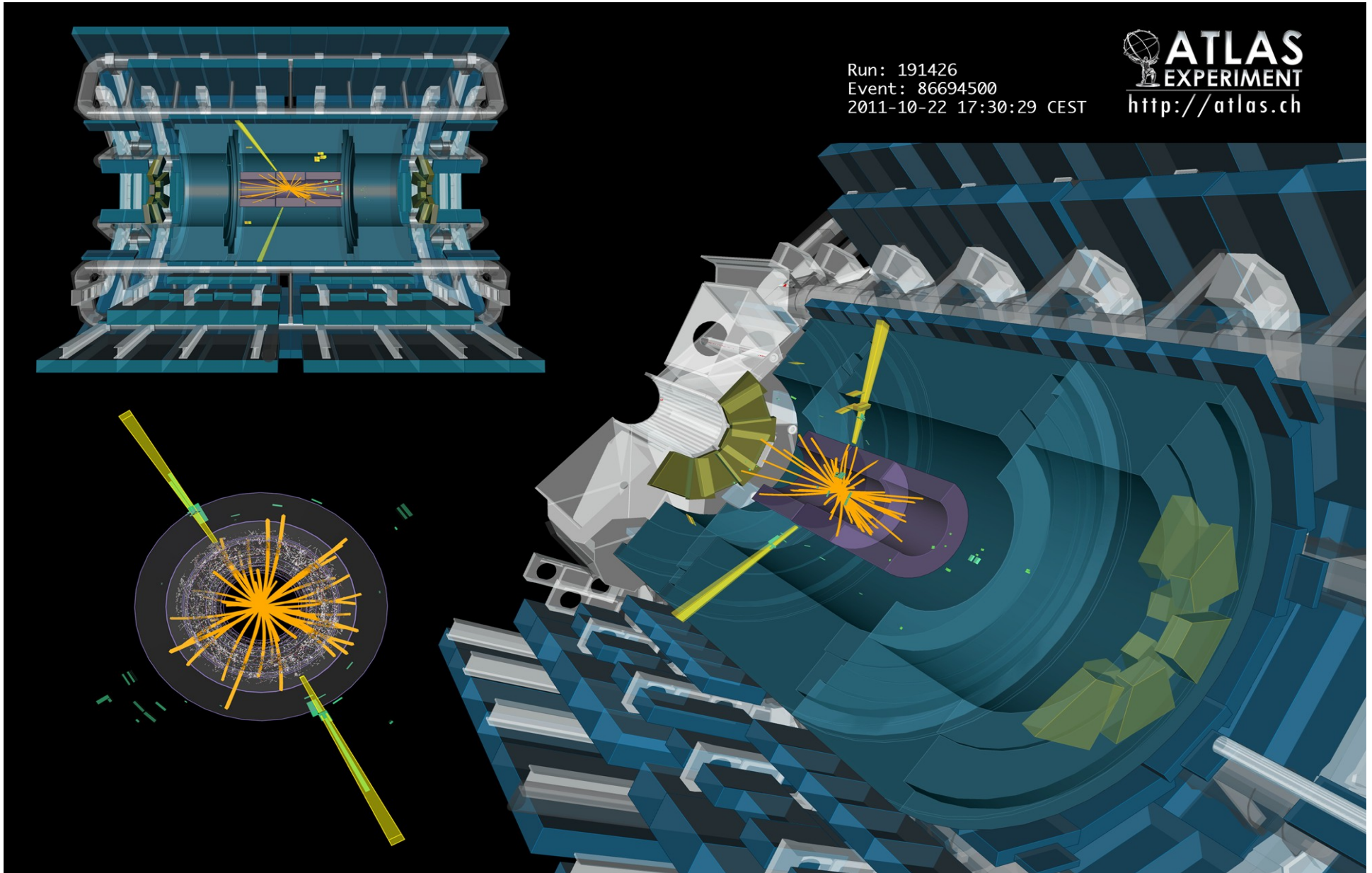
- Dle toho, na co se rozpadá:



Higgs – Jak vypadá?



Higgs – Jak vypadá?



Higgs – objev

- Oznámen 4.7. 2012 (ale náznaky již prosinec 2011)
- Poslední chybějící kousek Standardního modelu.
- Triumf teorie staré 50 let.
- <http://www.atlas.ch/HiggsResources/>

The Nobel Prize in Physics 2013

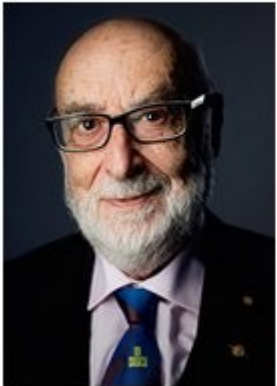


Photo: A. Mahmoud
François Englert
Prize share: 1/2



Photo: A. Mahmoud
Peter W. Higgs
Prize share: 1/2

4.11.2014



Higgs – objev

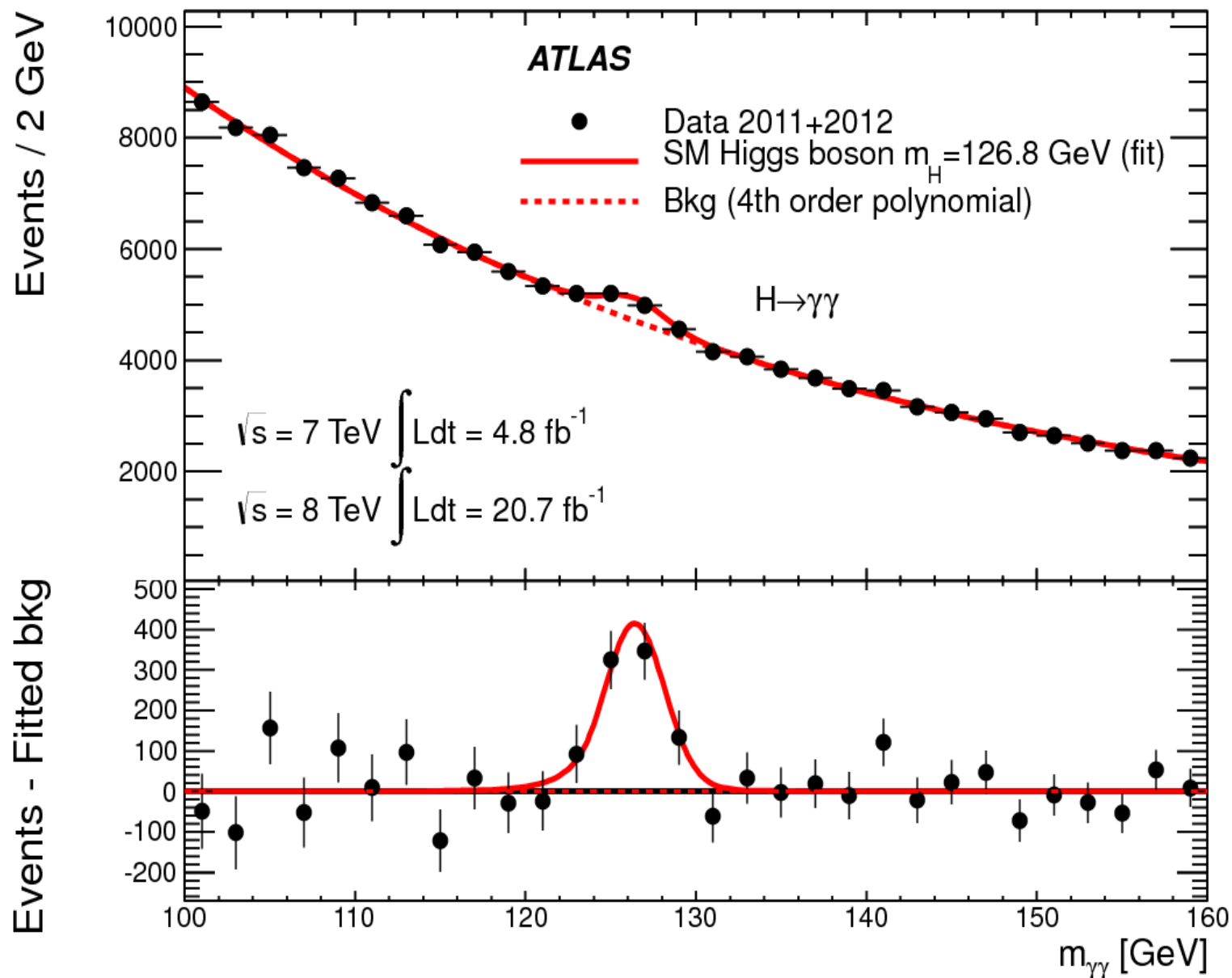


4.11.2014



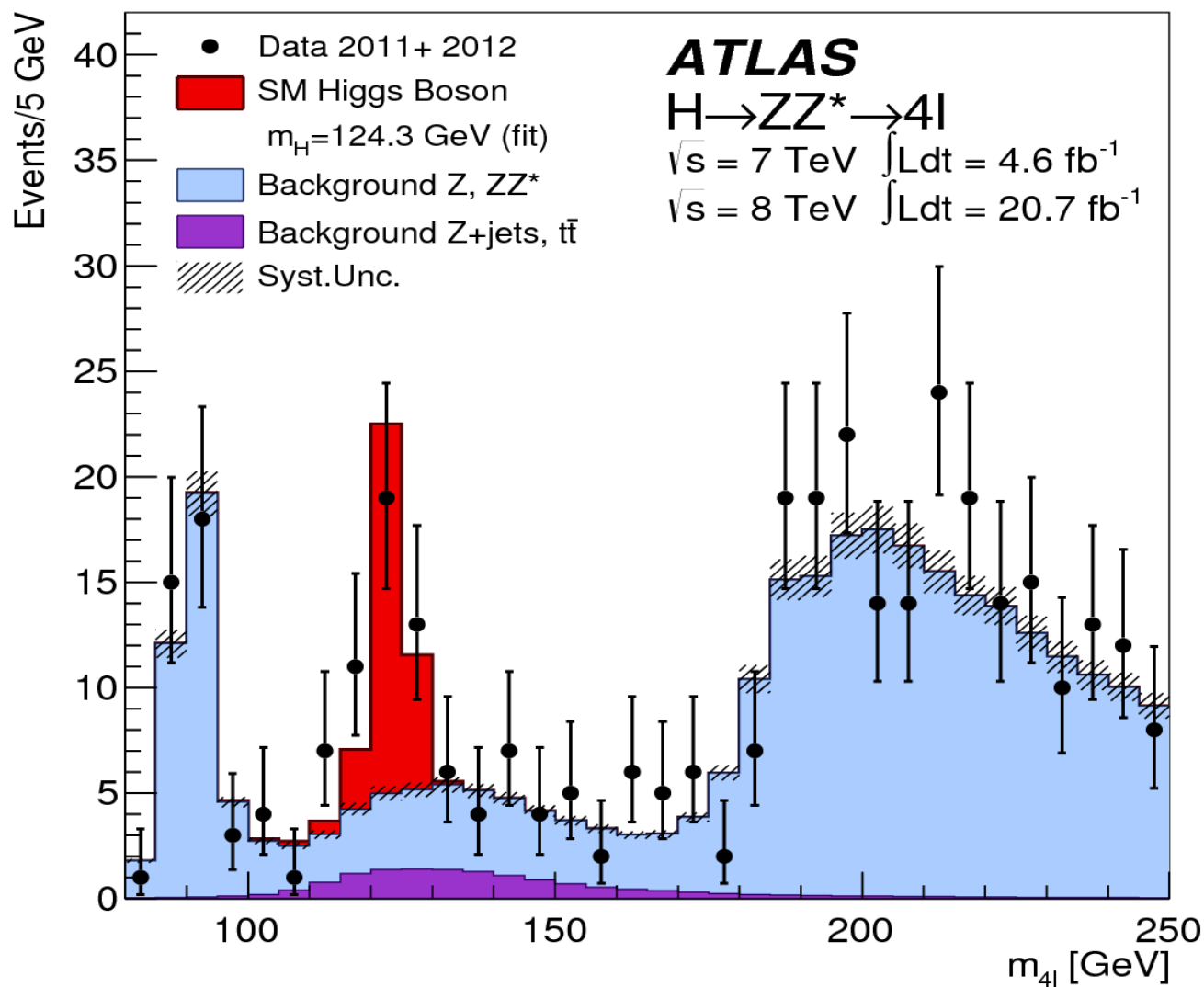
Higgs – Jak byl objeven?

- Kvalitní data z roku 2011 (energie srážek 7TeV) a 2012 (8TeV).



Higgs – Jak byl objeven?

- Kvalitní data z roku 2011 (energie srážek 7TeV) a 2012 (8TeV).



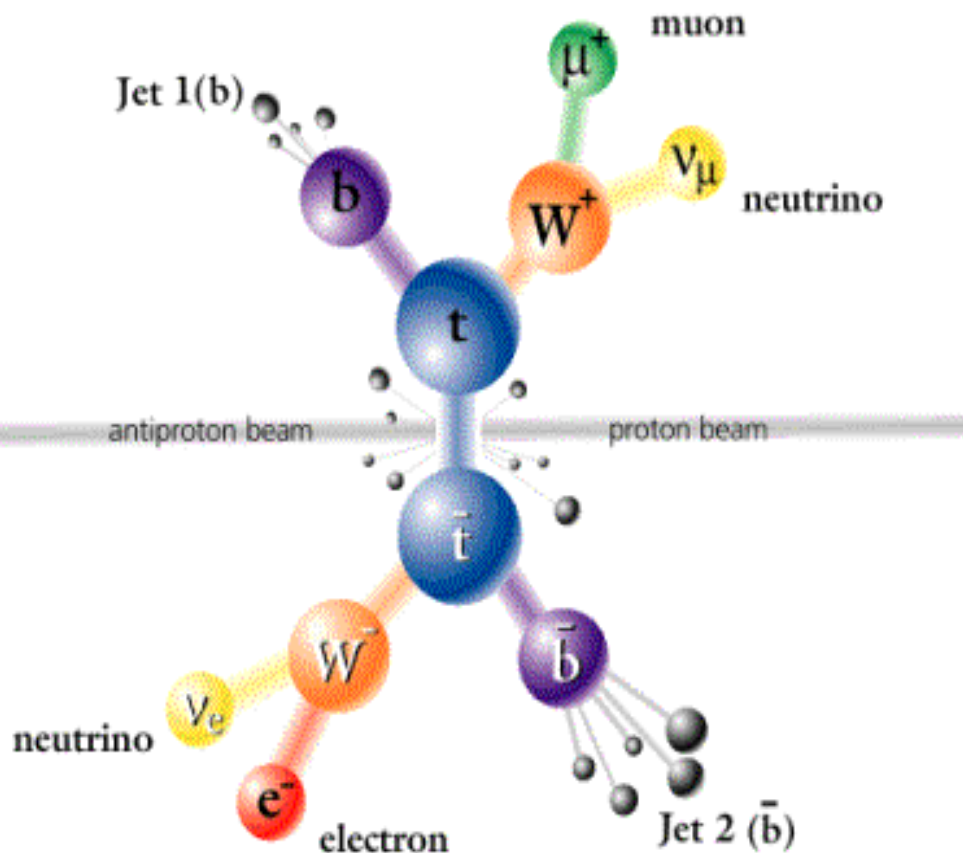
Higgs

- <http://www.atlas.ch/HiggsResources/>

Top Quark

- Discovered in 1995 at the Tevatron Collider in the USA.

“Yesterday's sensation is today's calibration and tomorrow's background”, R.P.Feynman.



TOP QUARK



Discovered at Fermilab in 1995, the **TOP QUARK** is as short-lived as it is massive. Weighing in at a hefty 175 GeV, its lifetime, a mere 10^{-24} second, is the briefest of the six quarks. Top Quarks are an enigmatic particle whose personal life is sought after by thousands of physicists.

Acrylic felt with gravel fill for maximum mass.

\$10.49
PLUS SHIPPING

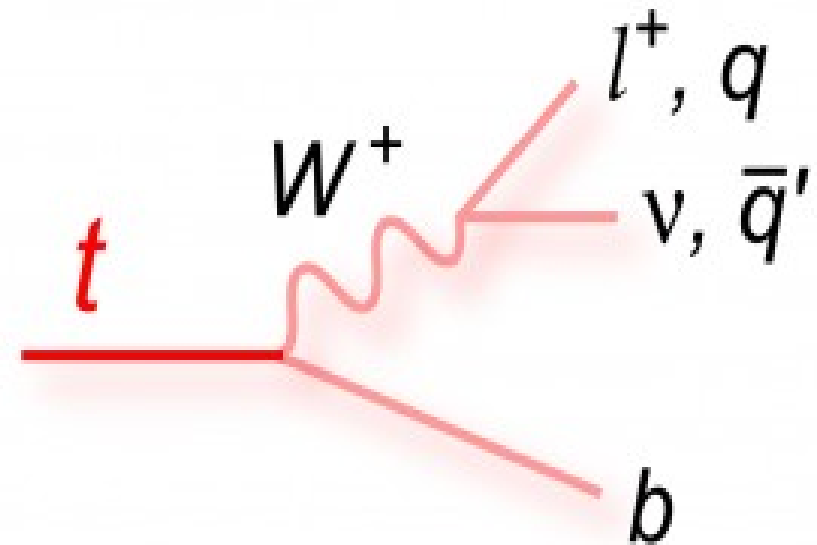
LIGHT HEAVY

GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK TAU NEUTRINO MUON UP QUARK
NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON TOP QUARK NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK
NEUTRINO MUON UP QUARK PROTON NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON
UP QUARK DOWN QUARK TAU GLUON TOP QUARK NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK
NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON TOP QUARK NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK
DOWN QUARK TAU GLUON TOP QUARK NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK TAU
UP QUARK PROTON NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP

The **PARTICLE ZOO**

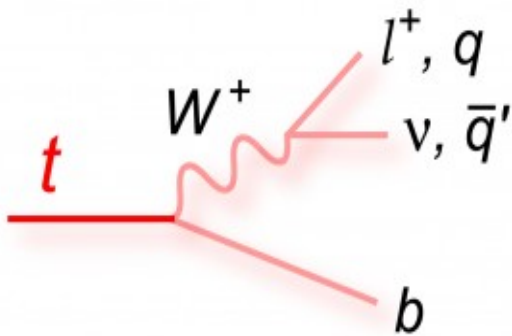
Why Top Quark?

- Heaviest elementary particle (yes, heavier than the Higgs!)
 $m_t = 172 \text{ GeV}$ $m_H = 126 \text{ GeV}$
- Weights as a gold atom, yet without inner structure!
- The only elementary fermion heavy as expected.
- Possible connection to new physic?

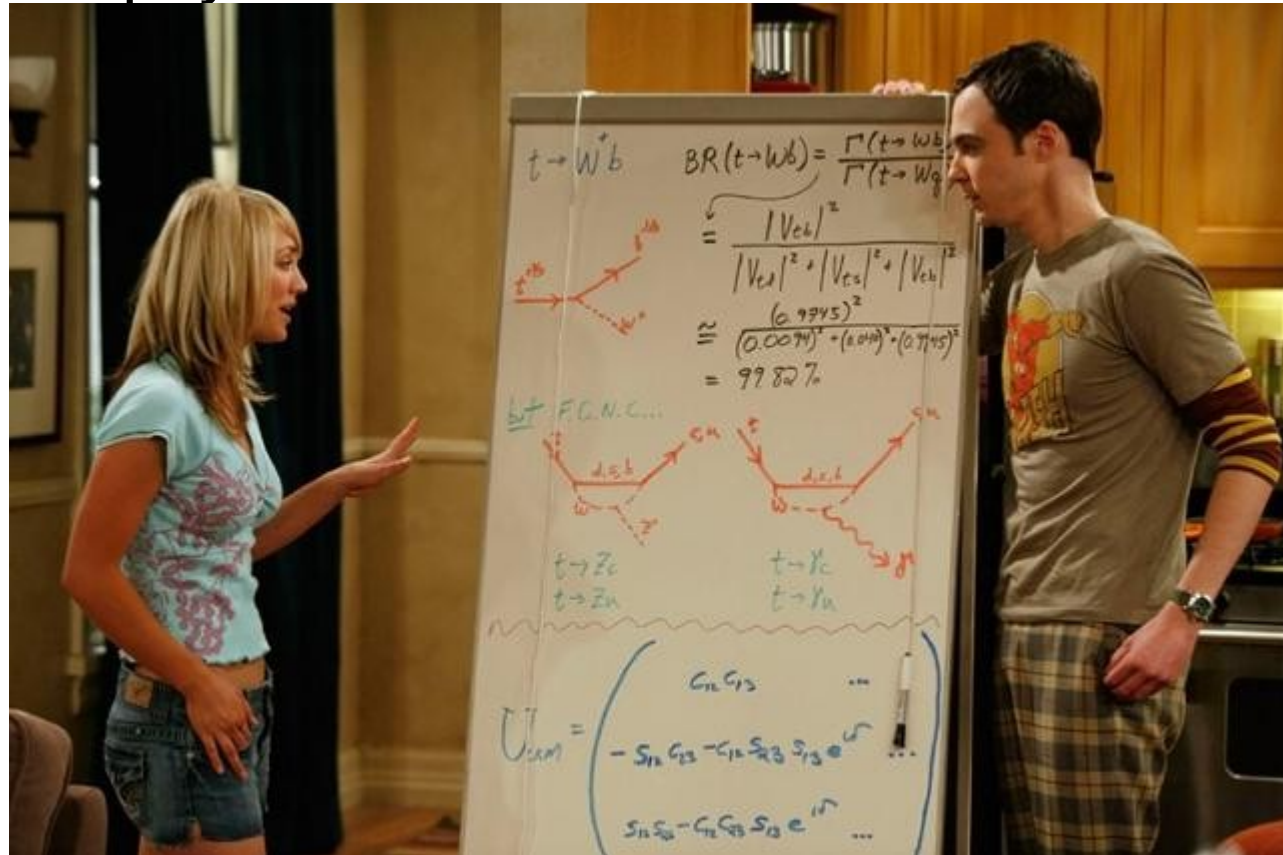


Why Top Quark?

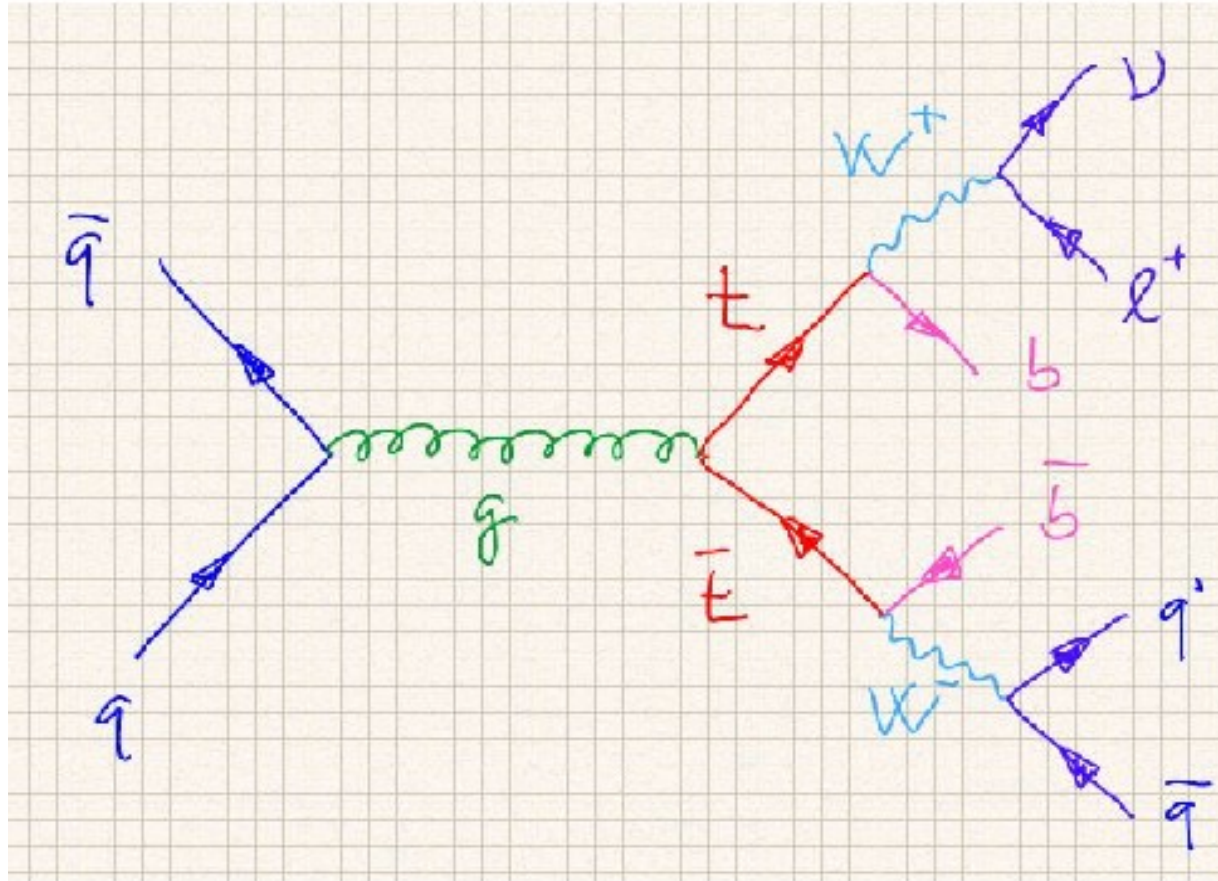
- Heaviest elementary particle (yes, heavier than the Higgs!)
 $m_t = 172 \text{ GeV}$ $m_H = 126 \text{ GeV}$
- Weights as a gold atom, yet without inner structure!
- The only elementary fermion heavy as expected.
- Possible connection to new physic?



4.11.2014



Top Quark Produced in Pairs



How does one ``see" the top quark?

Tevatron, 1995

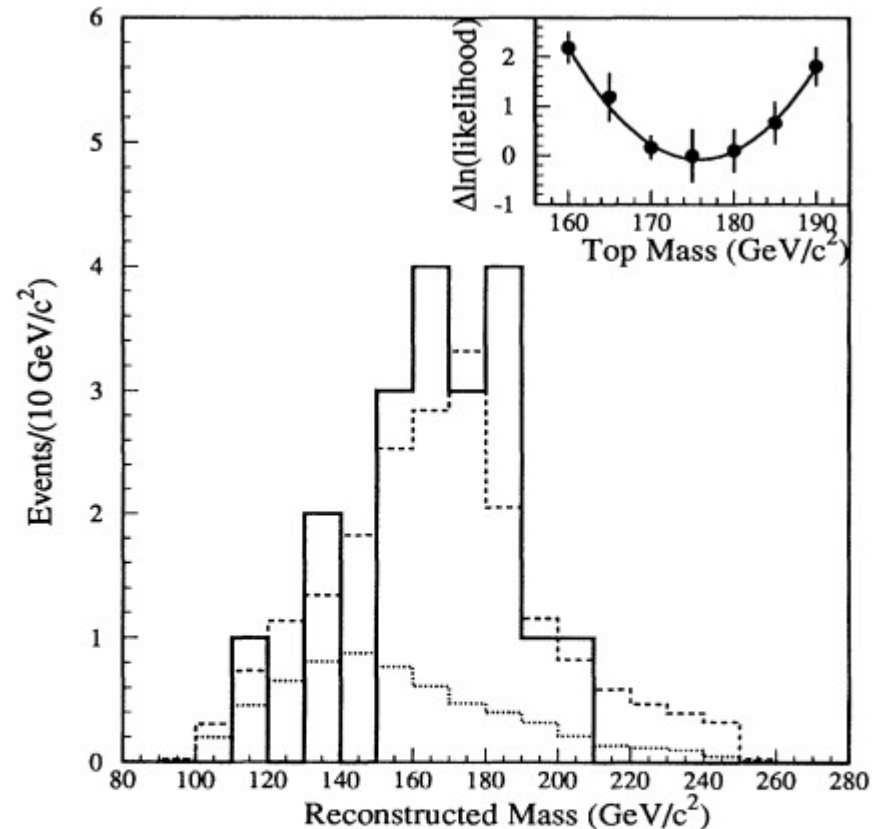
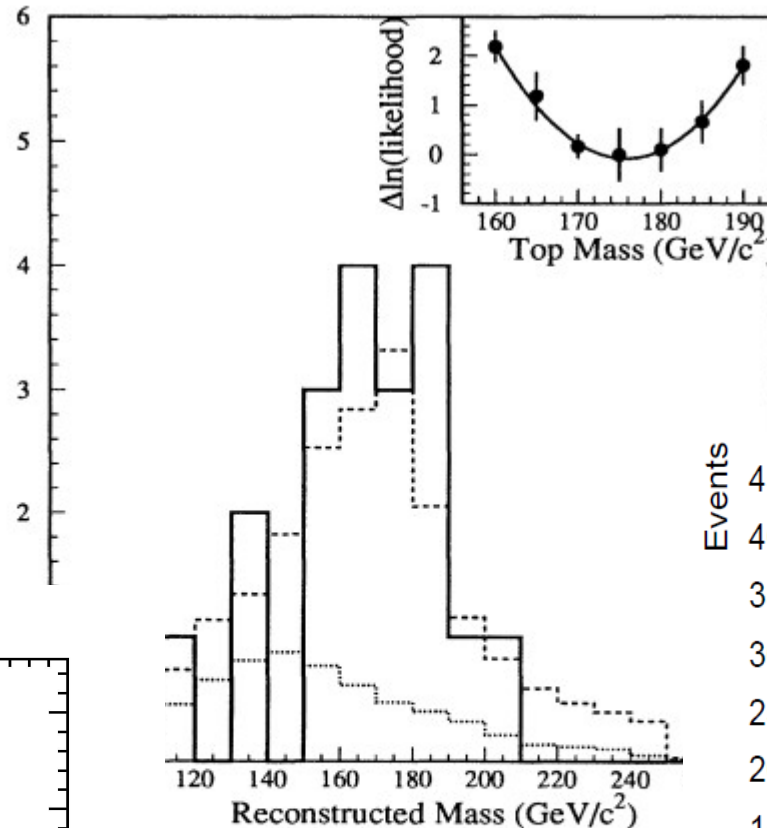


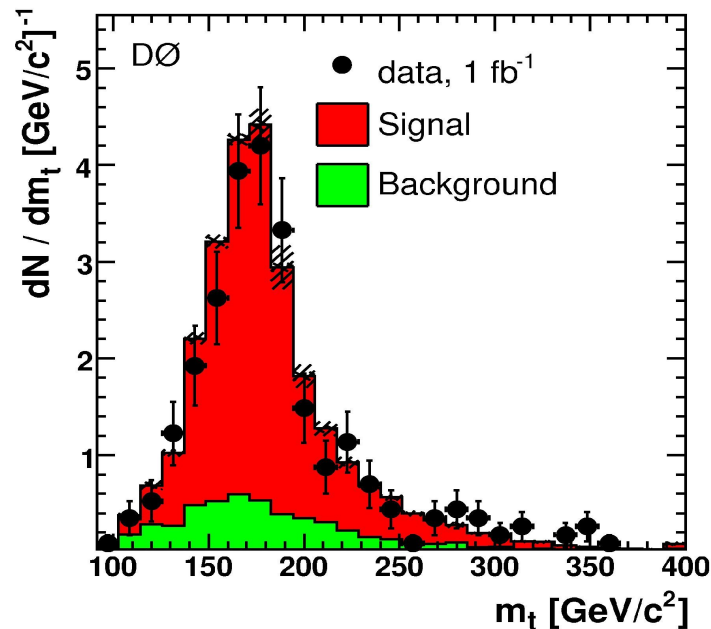
FIG. 3. Reconstructed mass distribution for the b -tagged $W + \geq 4$ -jet events (solid). Also shown are the background shape (dotted) and the sum of background plus $t\bar{t}$ Monte Carlo simulations for $M_{\text{top}} = 175 \text{ GeV}/c^2$ (dashed), with the background constrained to the calculated value, $6.9^{+2.5}_{-1.9}$ events. The inset shows the likelihood fit used to determine the top mass.

How does one "see" the top quark?

Tevatron, 1995

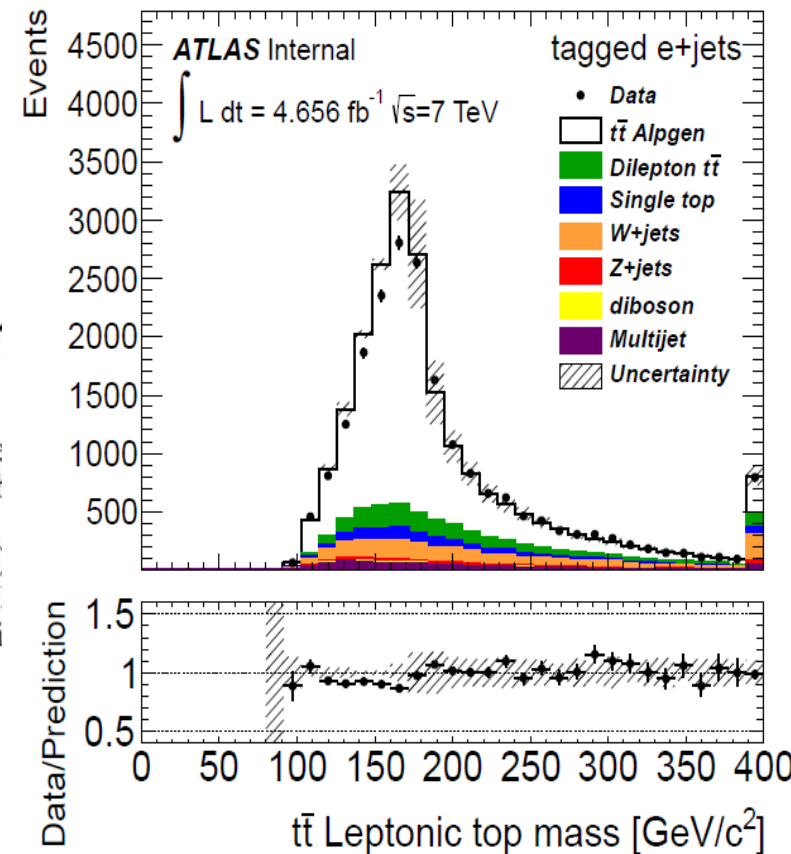


Tevatron, 2003

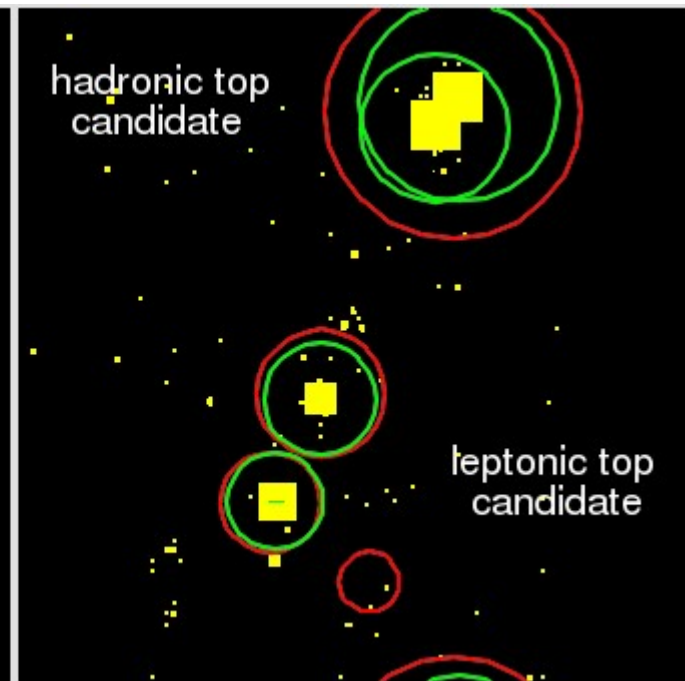
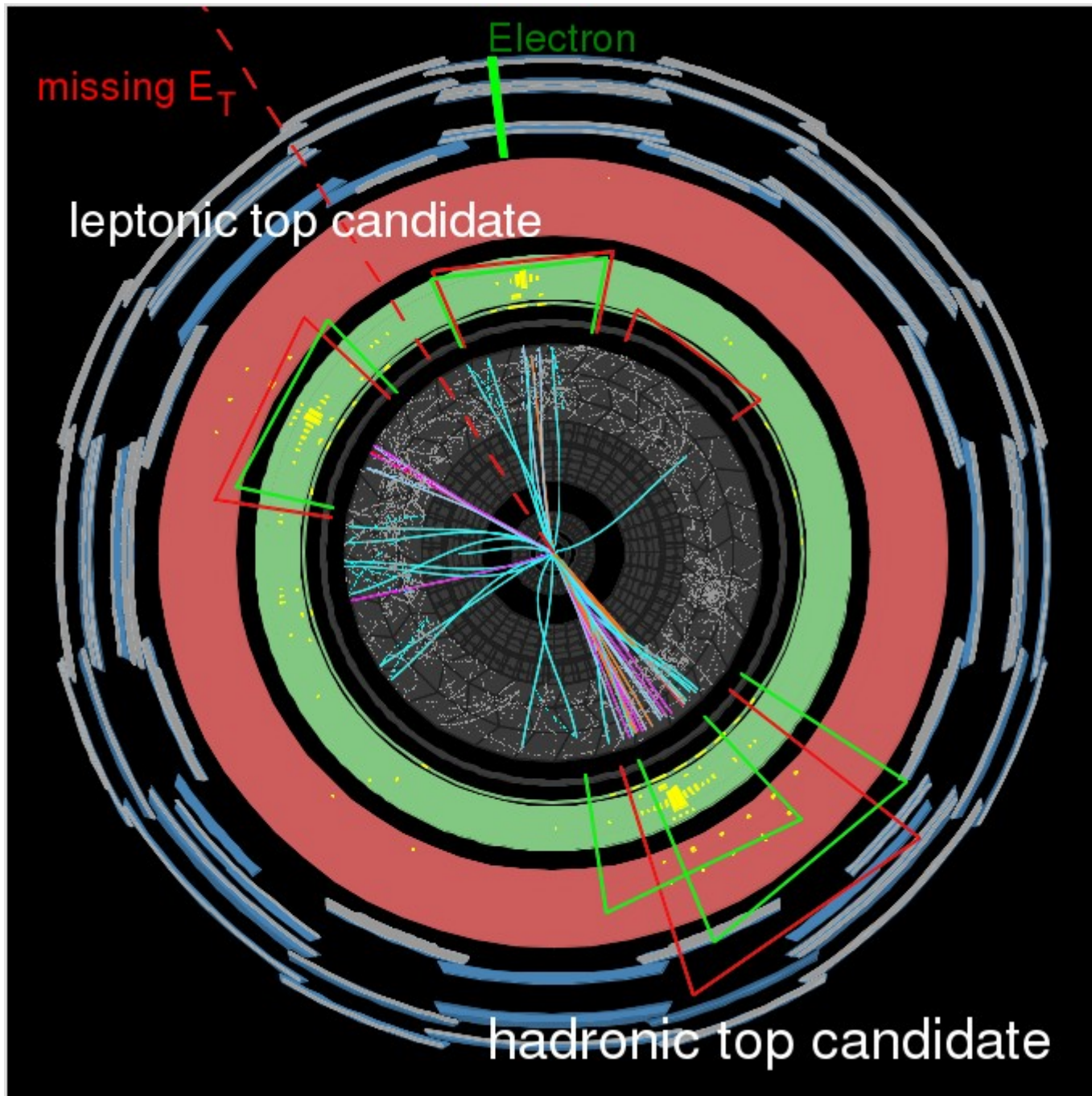


reconstructed mass distribution for the top quark (solid). Also shown are the background (dashed) and the sum of background plus signal for $M_{\text{top}} = 175 \text{ GeV}/c^2$ (dotted). The likelihood fit used to determine the top quark mass is shown in the inset.

LHC, 2011



How does one ``see" the top quark?

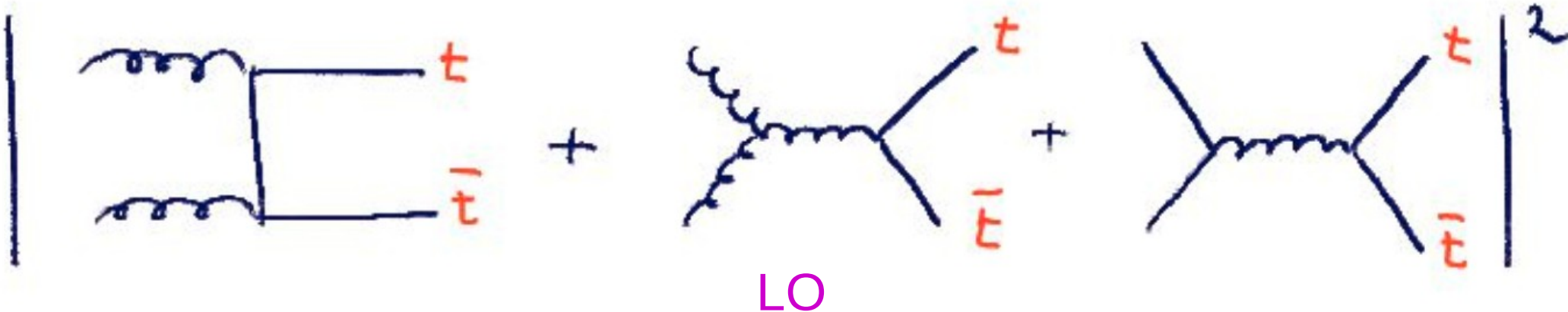


ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 180144, Event Number: 43671503

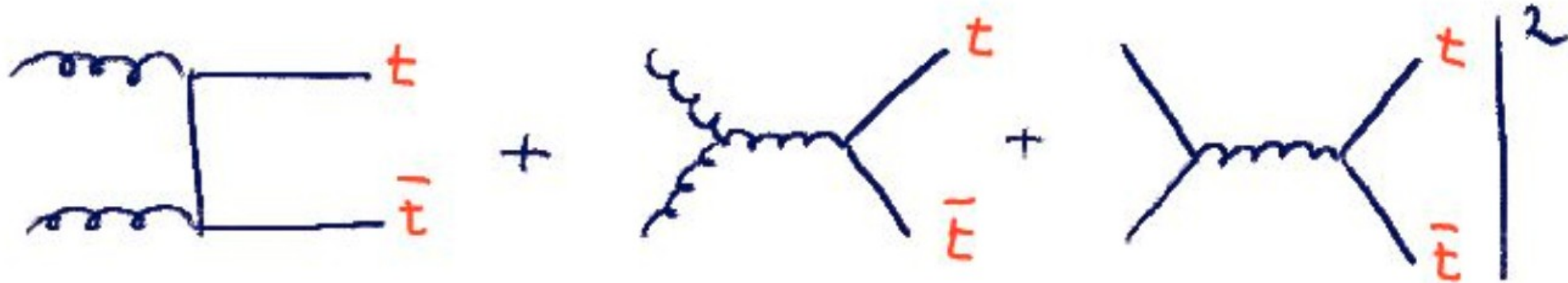
Date: 2011-04-22 09:46:15 EDT

Top Quarks Production at LHC

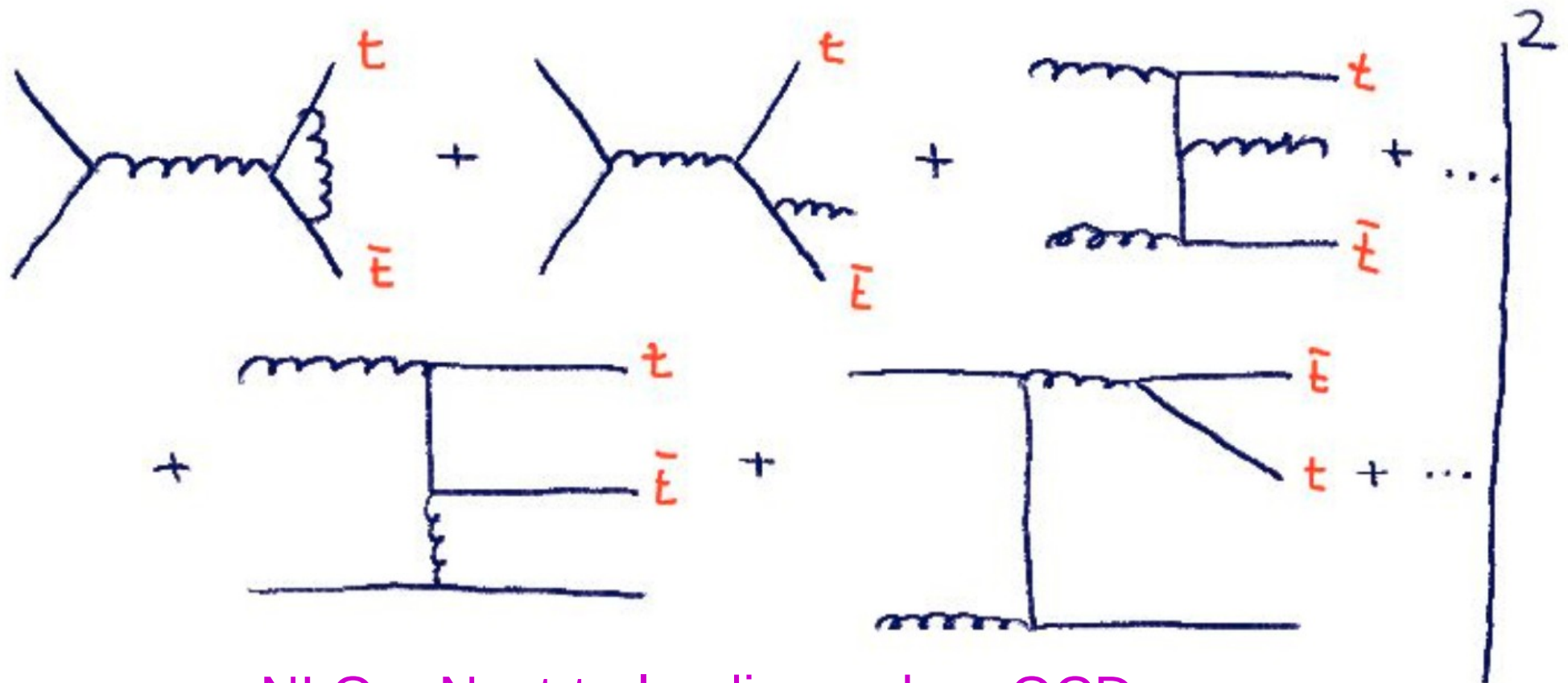


- At the Leading-order (LO) of the **p**erturbation theory of the **Q**uantum **C**hromodynamic (**pQCD**:)
- Dominant mechanism of the top quarks pair production is the **gluon-gluon fusion** (LHC = gluon collider:)
- Second-dominant is **quark-antiquark annihilation**.
- LO level of precision is totally insufficient to predict the rate of the $t\bar{t}$ production nor the shape of spectra.

Top Quarks Production at LHC

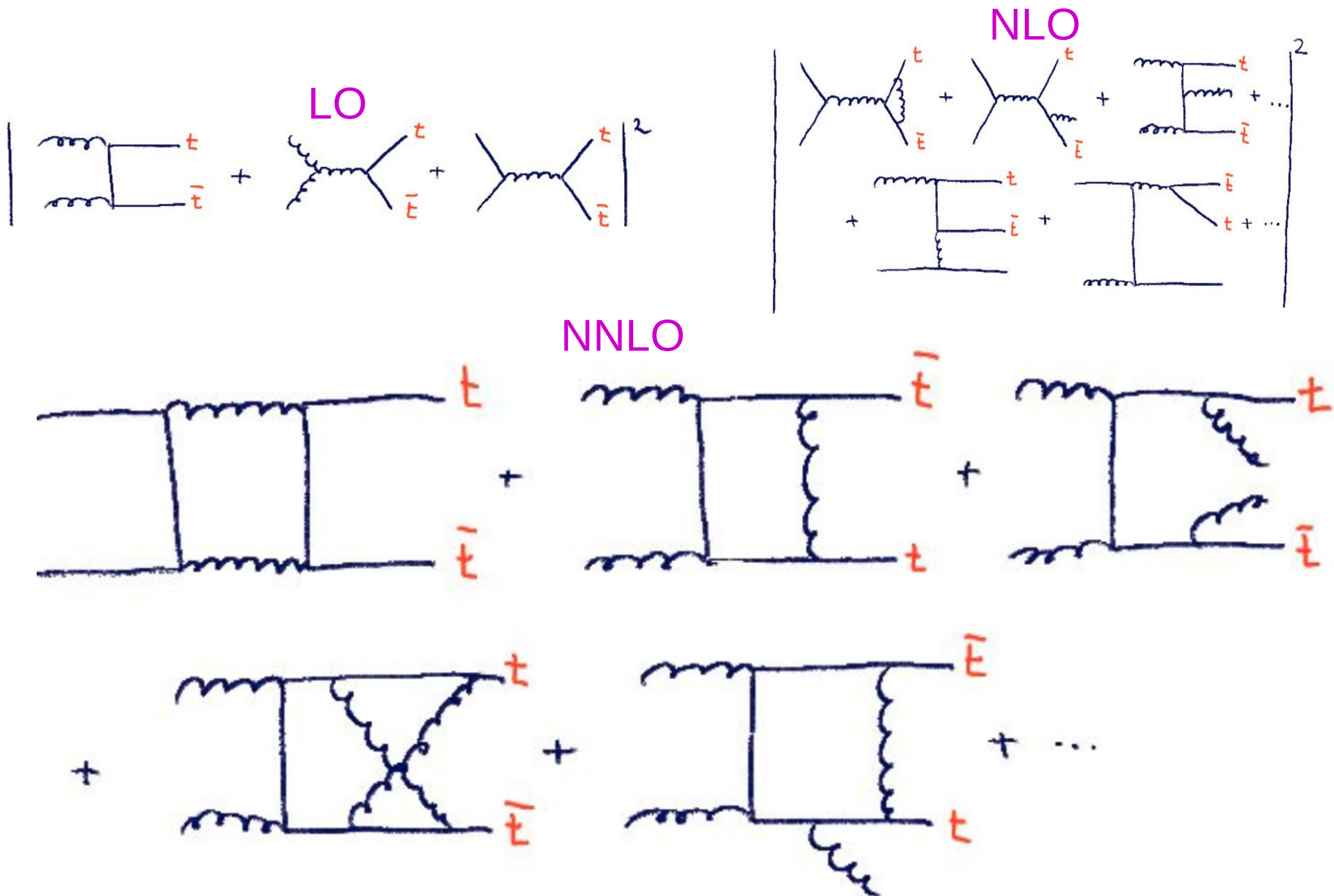


LO



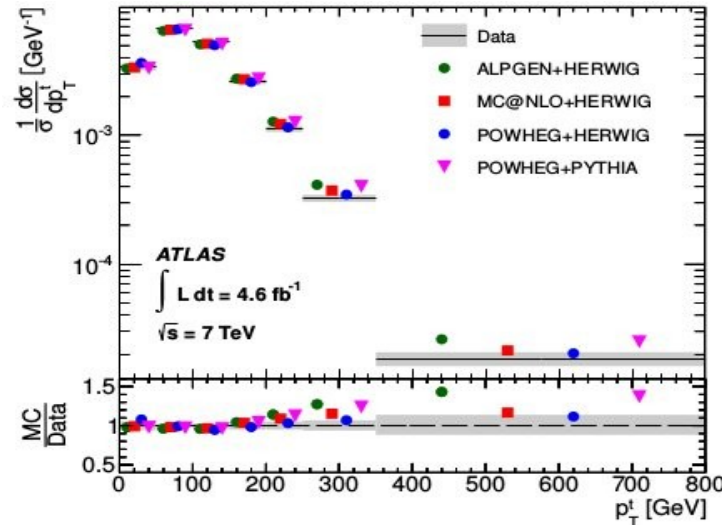
NLO = Next-to-leading order pQCD

Top Quarks Production at LHC

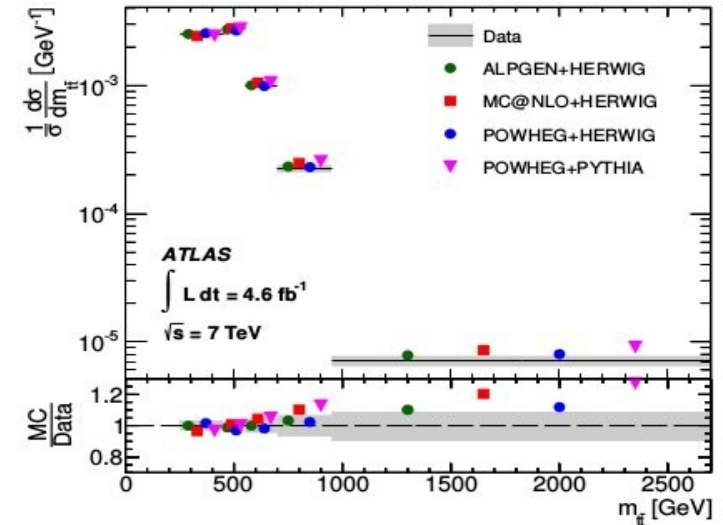


Measuring Top Spectra

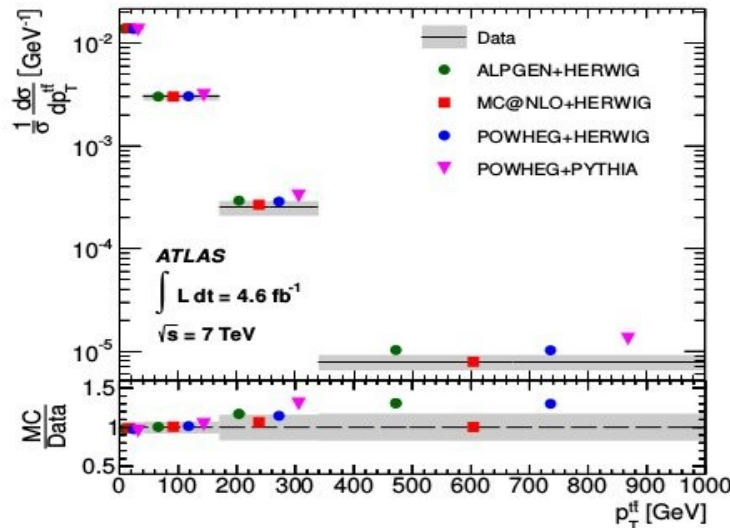
- Detailed spectra of the kinematics in the top-enriched final state
- Potential to see new physics or constrain current theory and modelling.



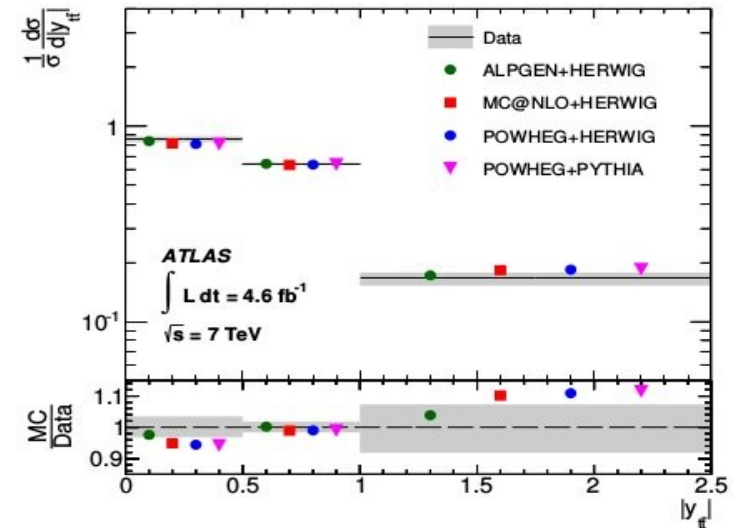
(a)



(b)

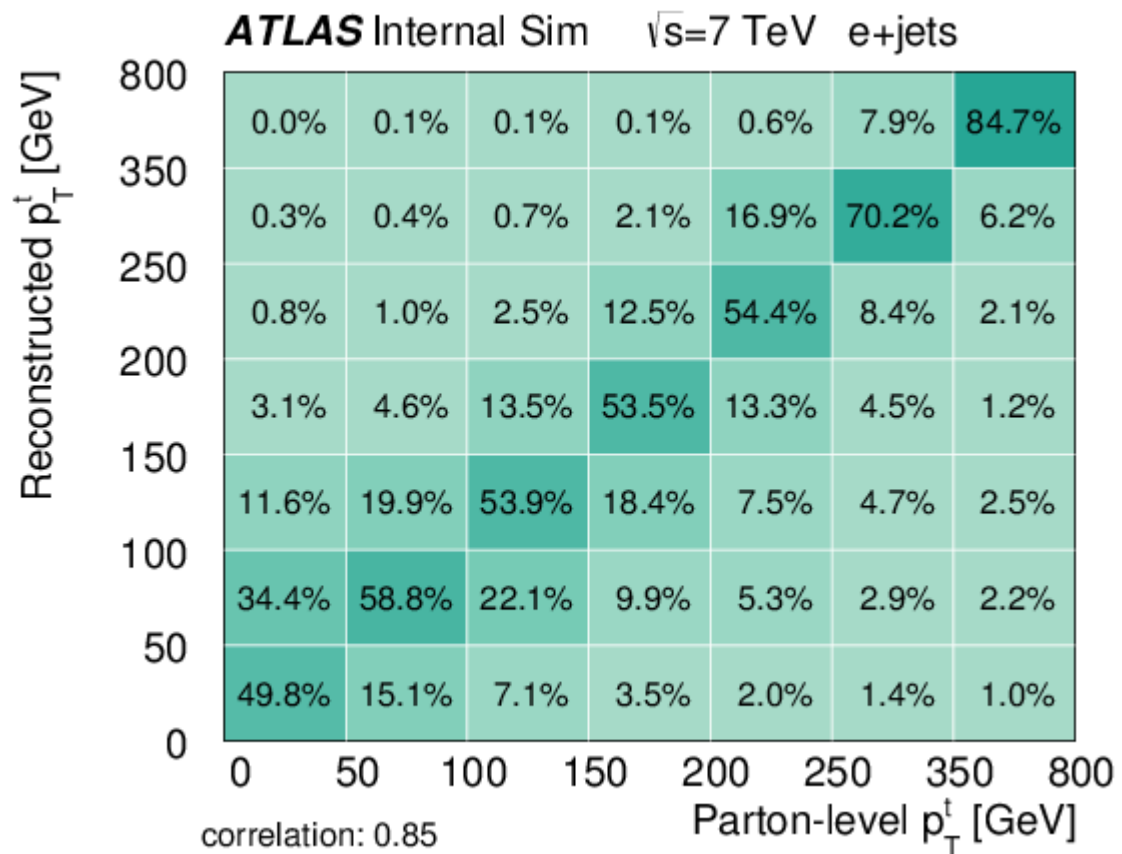
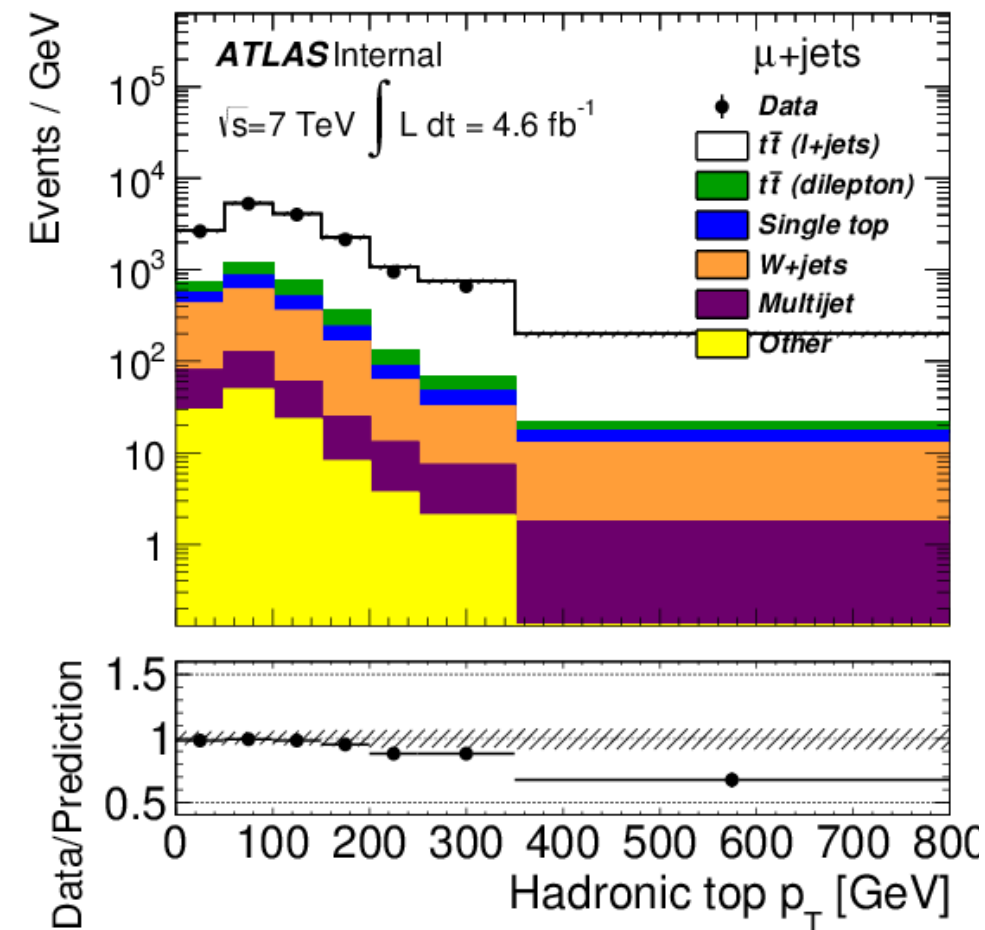


(c)



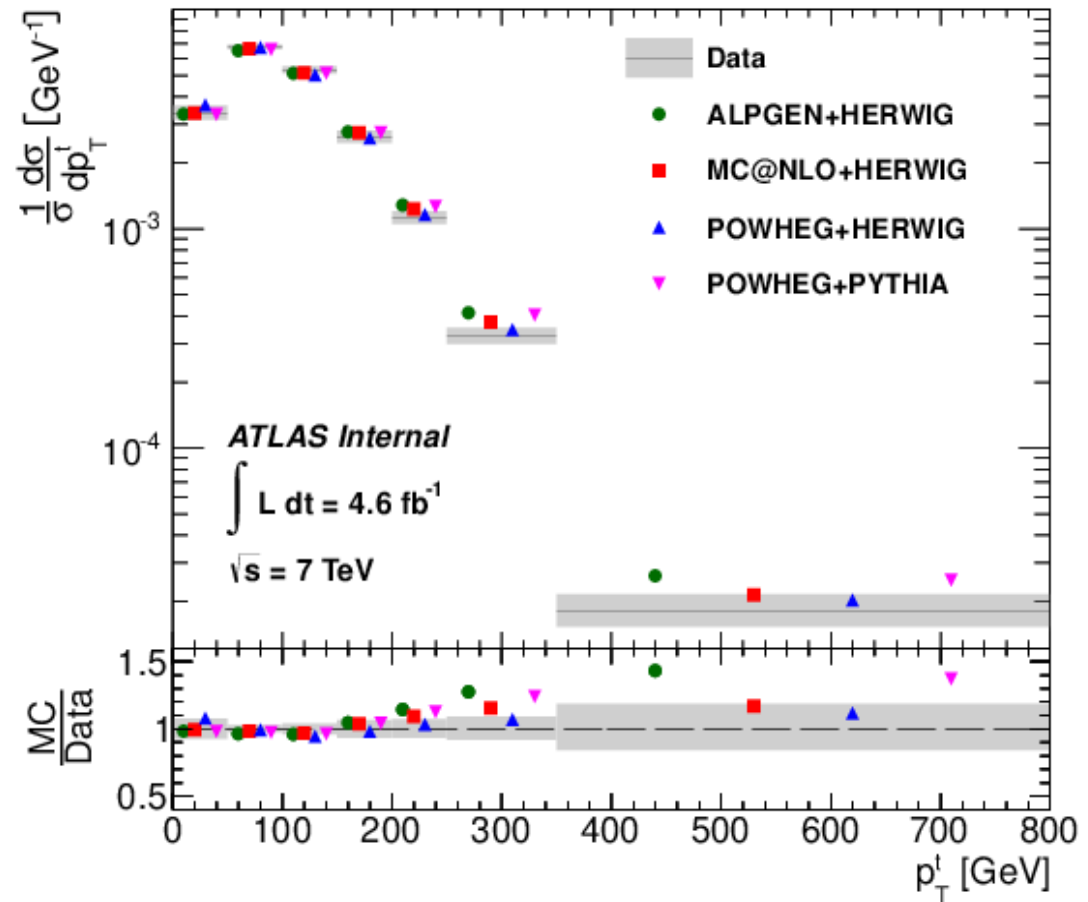
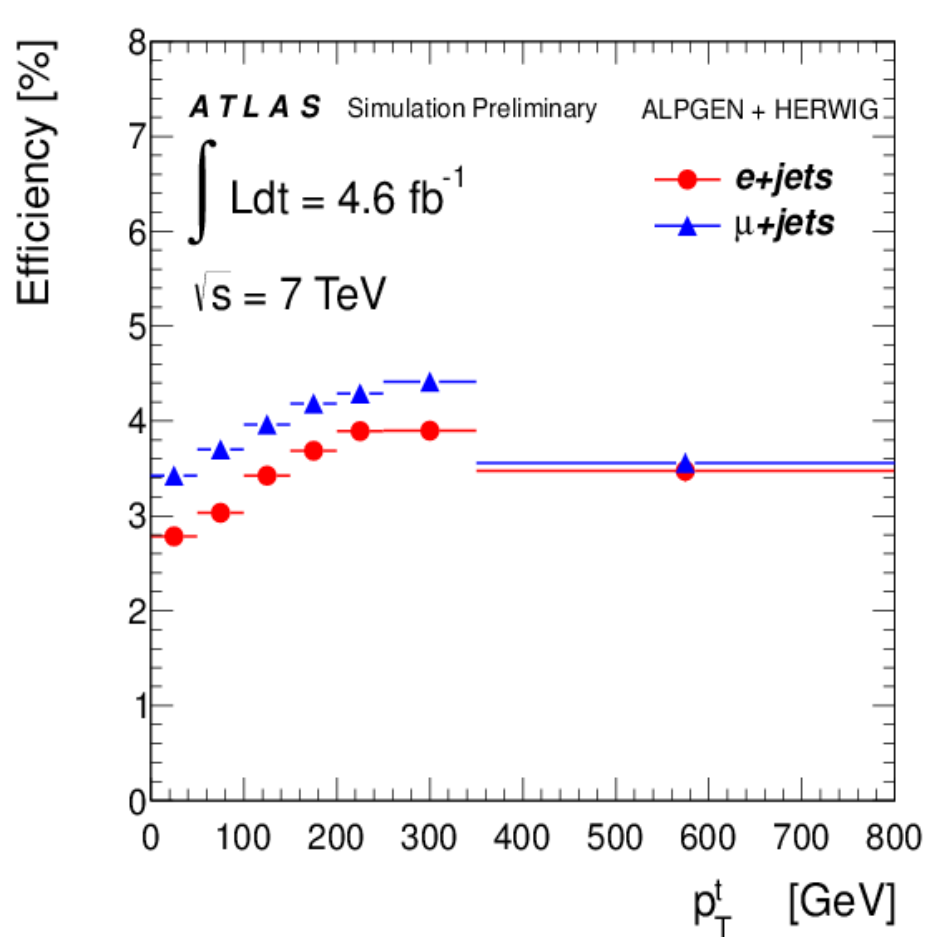
(d)

Correcting for Detector Effects



Correcting for Detector Effects

$$\frac{d\sigma}{dX_j} \equiv \frac{1}{\Delta X_j} \cdot \frac{\sum_i \mathcal{M}_{ji}^{-1} [D_i - B_i]}{\text{BR} \cdot \mathcal{L} \cdot \epsilon_j}$$



Závěr

- <http://jointlab.upol.cz/particle/>
- <https://www.facebook.com/ParticleOlomouc>

*prof. M. Hrabovský
Petr Hamal, Ladislav Chytka,
Kateřina Jiráková, Libor Nožka,
Tomáš Komárek, Jiří Kvita,
Josef Pácalt, Tomáš Sýkora*

