

ČSFR @ CERN :: 1992 -- 2022

Urychlovače a detektory částic



Jiří Kvita



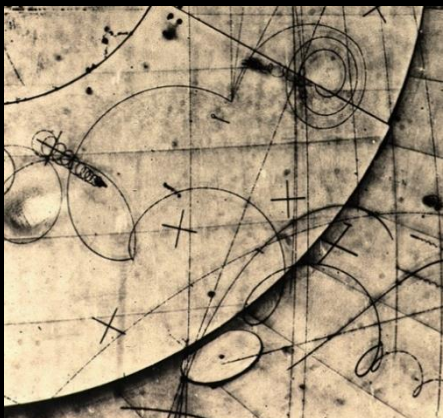
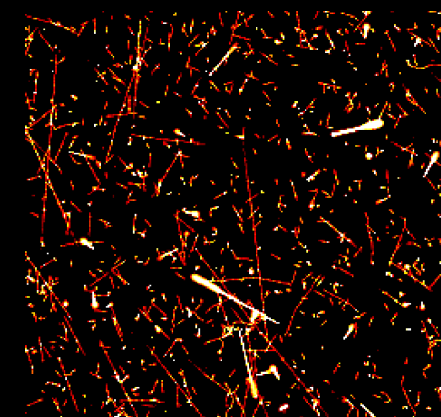
Přírodovědecká
fakulta

Společná laboratoř optiky

Přírodovědecká fakulta

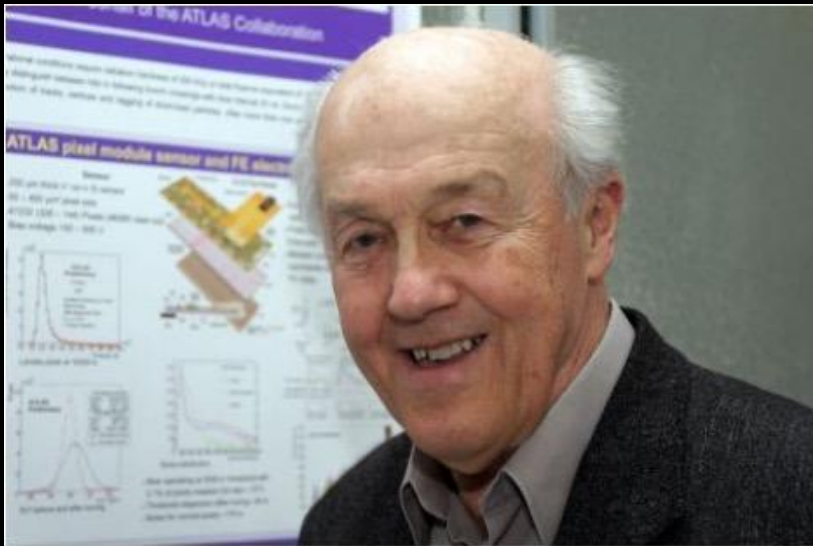
Univerzity Palackého

Olomouc



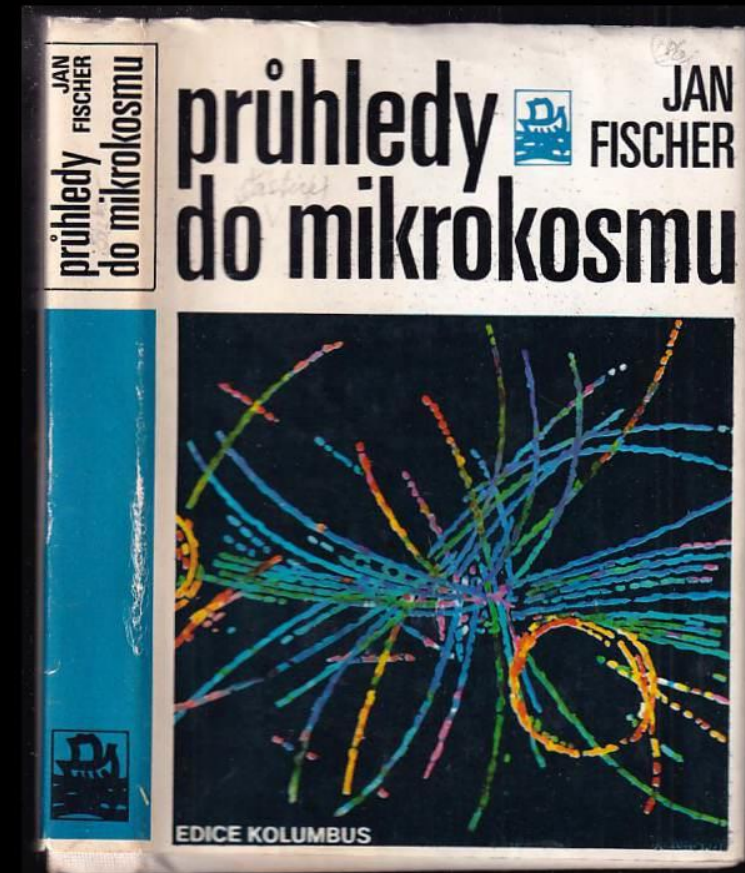
1992 -- 2022

prof. RNDr. Jan Fischer, DrSc
1932 -- 2022



<https://www.fzu.cz/aktuality/odesel-prof-rndr-jan-fischer-drsc>

1986



1992 -- 2022

<https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1996/cislo-8/posledni-z-nejmensich.html>

Poslední z nejmenších

1996

Objev top-kvarku neznamená konec fyziky elementárních částic

Vladislav Šimák | 5. 8. 1996 | Vesmír 75, 425, 1996/8

prof. RNDr. Vladislav Šimák, DrSc.
1934 -- 2019



<https://www.fzu.cz/aktuality/zemrel-prof-rndr-vladislav-simak-drsc>

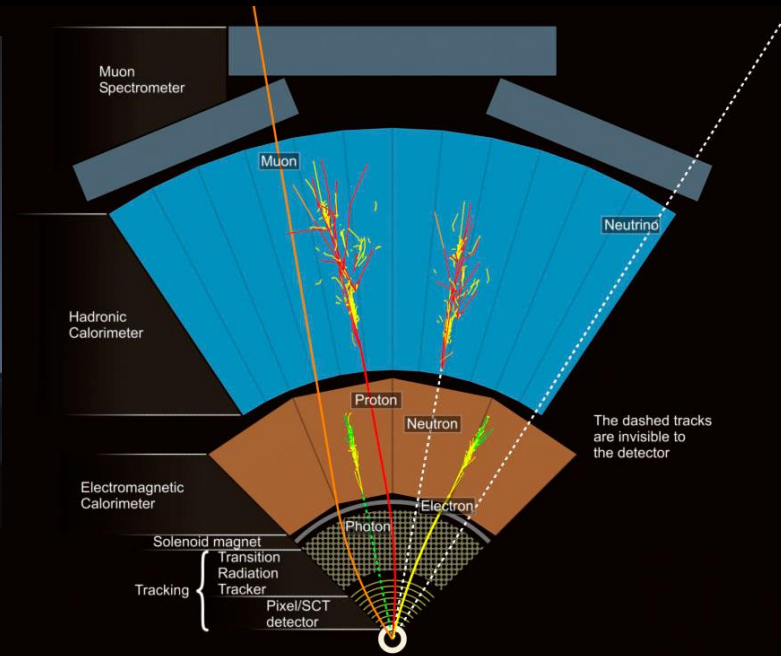
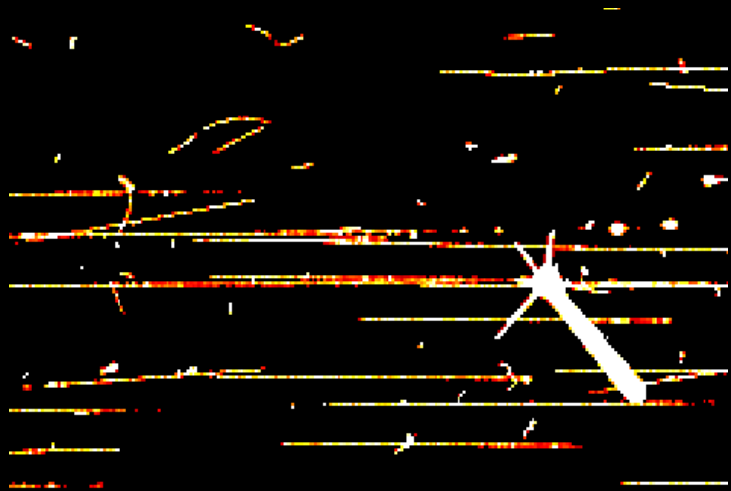
12.9.2022

Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN

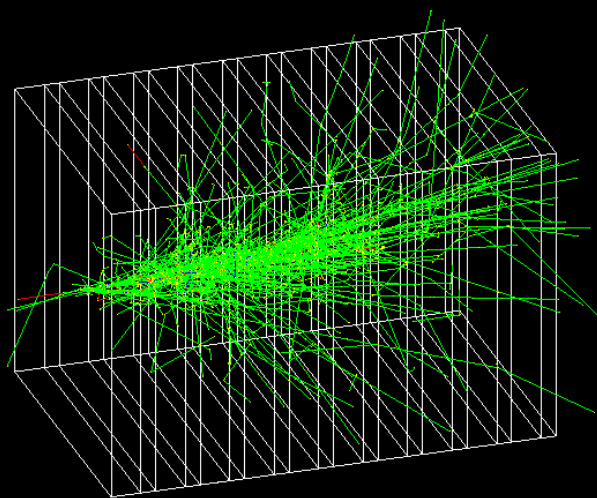
1981 -- 1991



Urychlovače a detektory částic

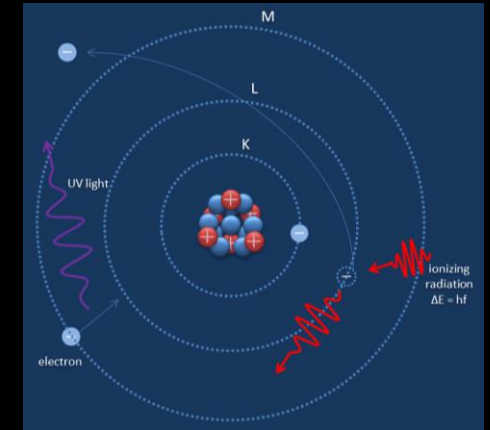
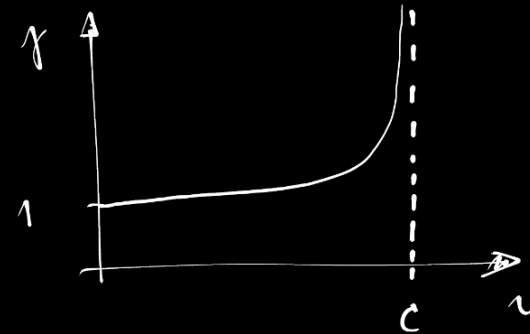


Průchod částic látkou

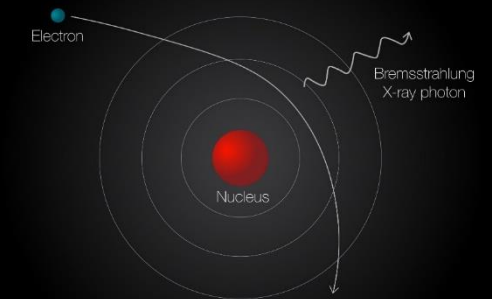
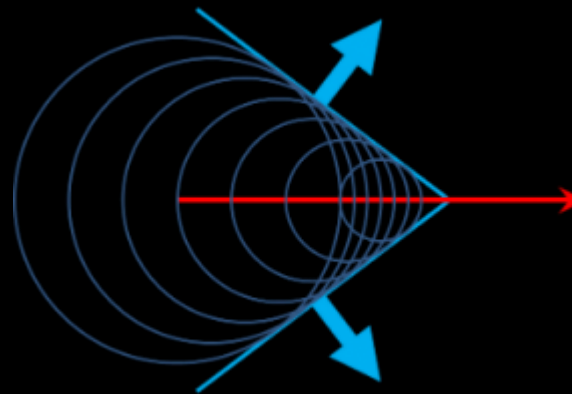


Interakce částic s látkou

- Ionizace $\sim 1/\beta^2 * \ln \beta\gamma$, $\beta = v / c$
- Brzdné záření $\sim \gamma = 1/ [1- \beta^2]^{1/2}$
- Přechodové záření $\sim \gamma$
- Čerenkovovo záření závisí na β .
 - Elmag. rázová vlna od částice, která se pohybuje rychlostí větší než rychlost světla v daném prostředí.



<https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-ionization-definition/>



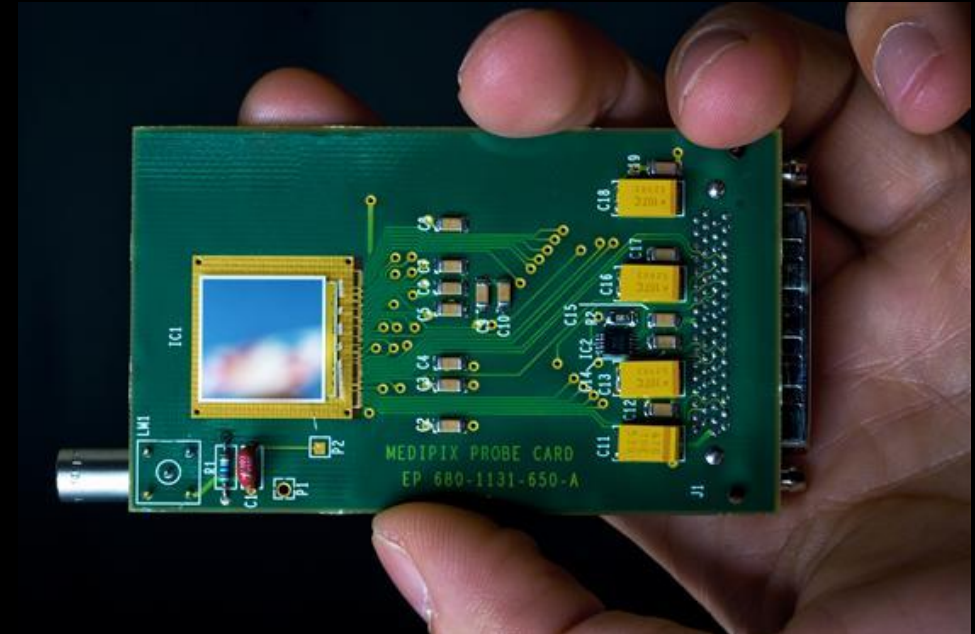
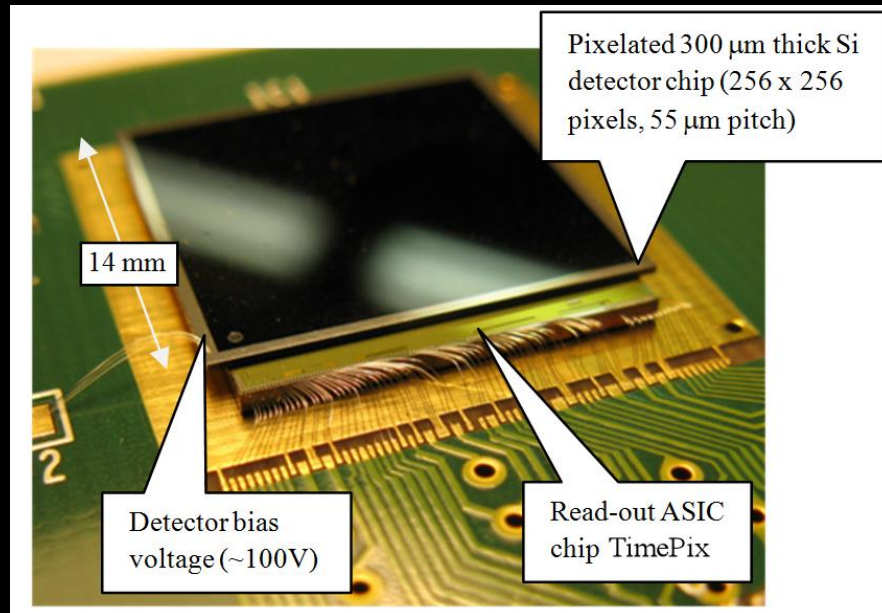
S. Hapugoda
IOC NO. 874 SA
H10@radiologykey.com

<https://radiologykey.com/interaction-of-radiation-with-matter/>

Case courtesy of Dr Sachintha Hapugoda,
Radiopaedia.org, rID: 51794

Částicová kamera MX-10

- Křemíkový čip 256 x 256 pixelů, 1,4 cm x 1,4 cm, tloušťky cca 0,3 mm.
- Digitální fotoaparát, který v reálném čase “vidí” stopy částic.
- Vyvinut v laboratoři CERN ve spolupráci s UTEF ČVUT.
- Edukační verzi prodávala firma Jablotron.
- Létá i na Mezinárodní kosmické stanici ISS 😊



Jaké částice vidí kamera MX-10

Alfa = ${}^4\text{He}^{++}$

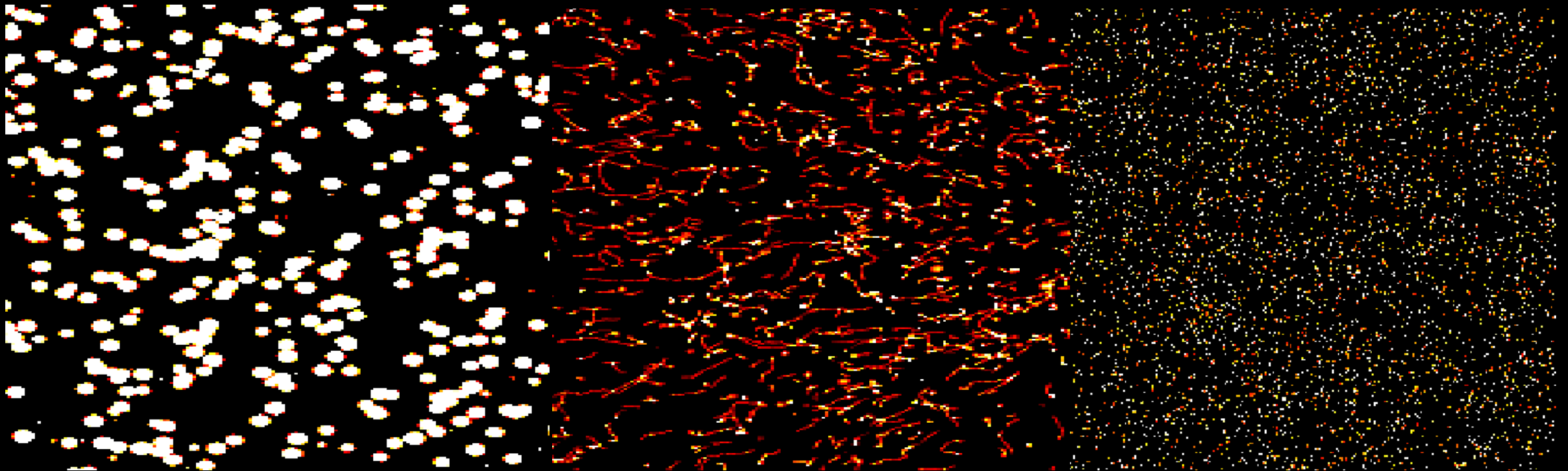
Silně ionizují záření

Beta = e^-

Brzdné ztráty, ionizace

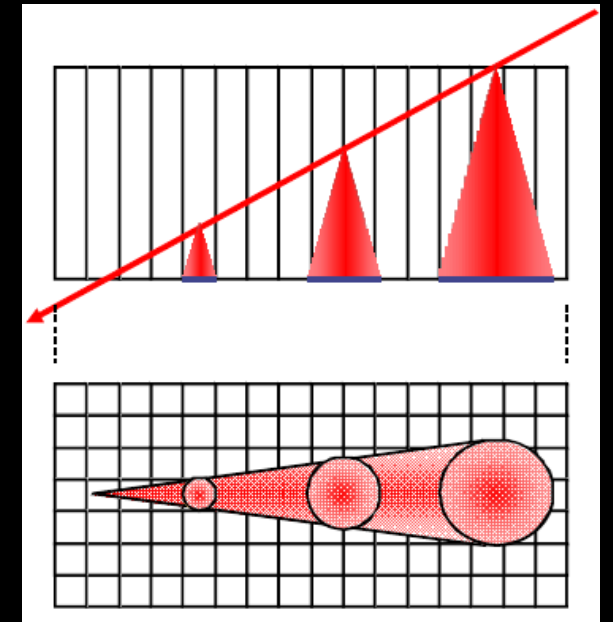
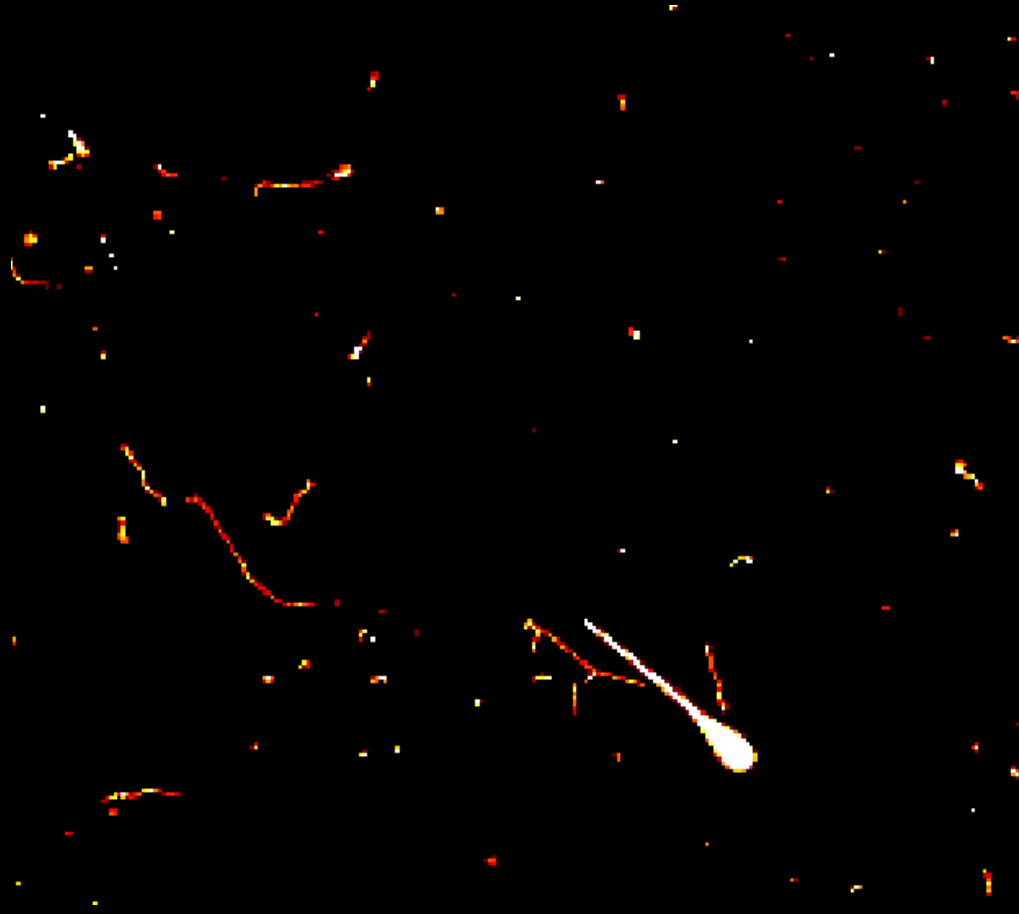
Gama = fotony
rentgenového či
tvrdšího záření

Comptonův jev,
fotoefekt



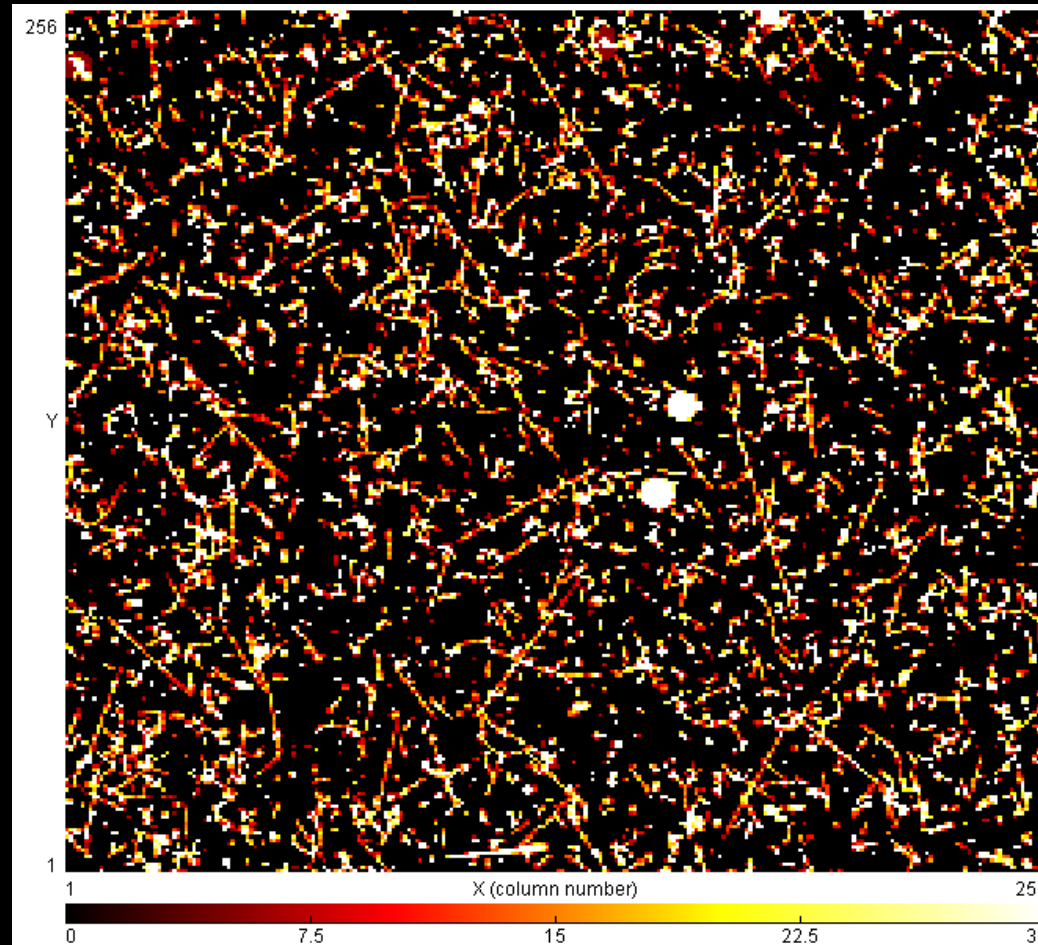
Jaké částice vidí kamera MX-10

- Vzácnější stopa silně energetické a ionizující částice
 - snad proton ve spršce kosmického záření.

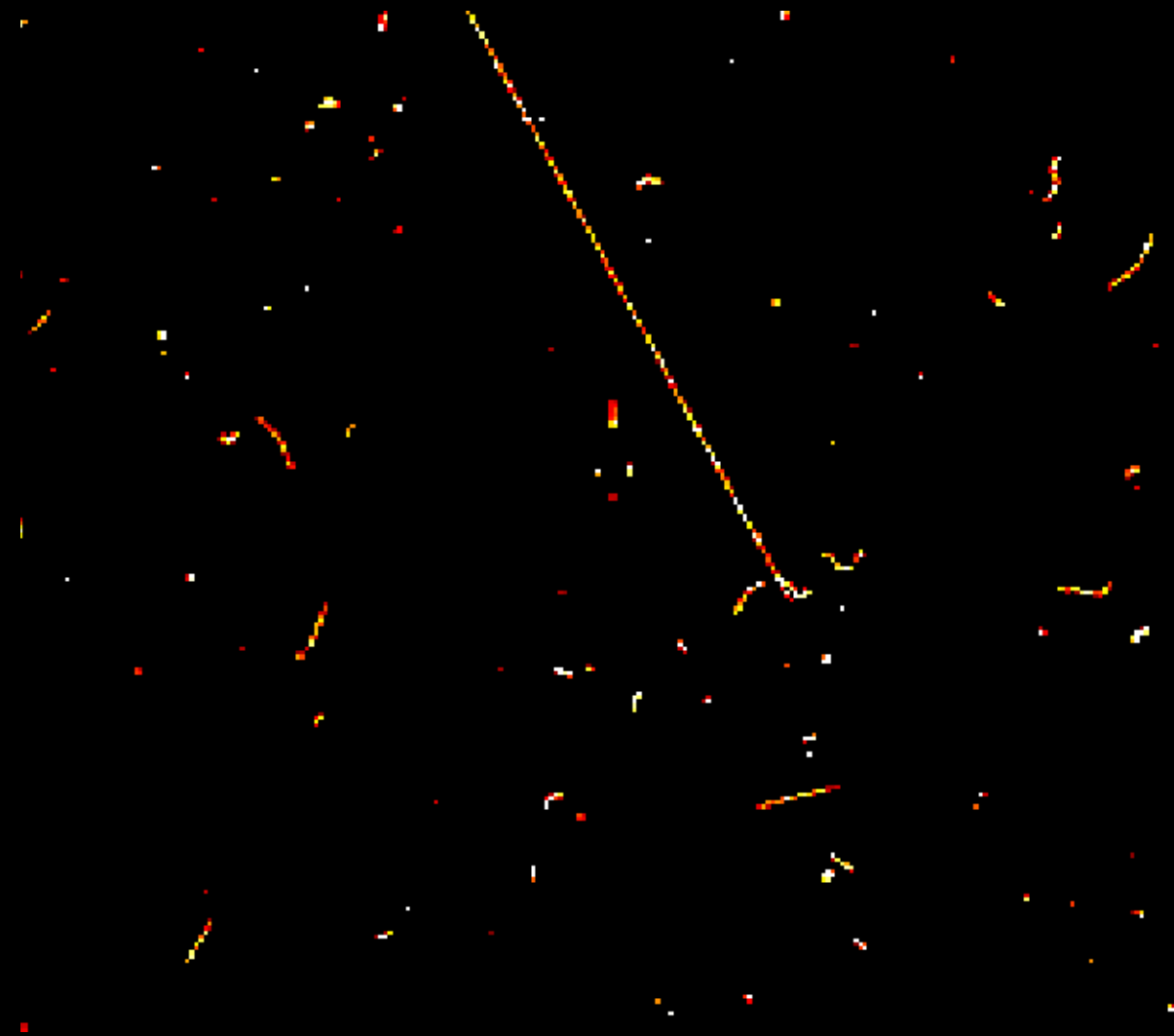


Jaké částice vidí kamera MX-10

Radiační pozadí

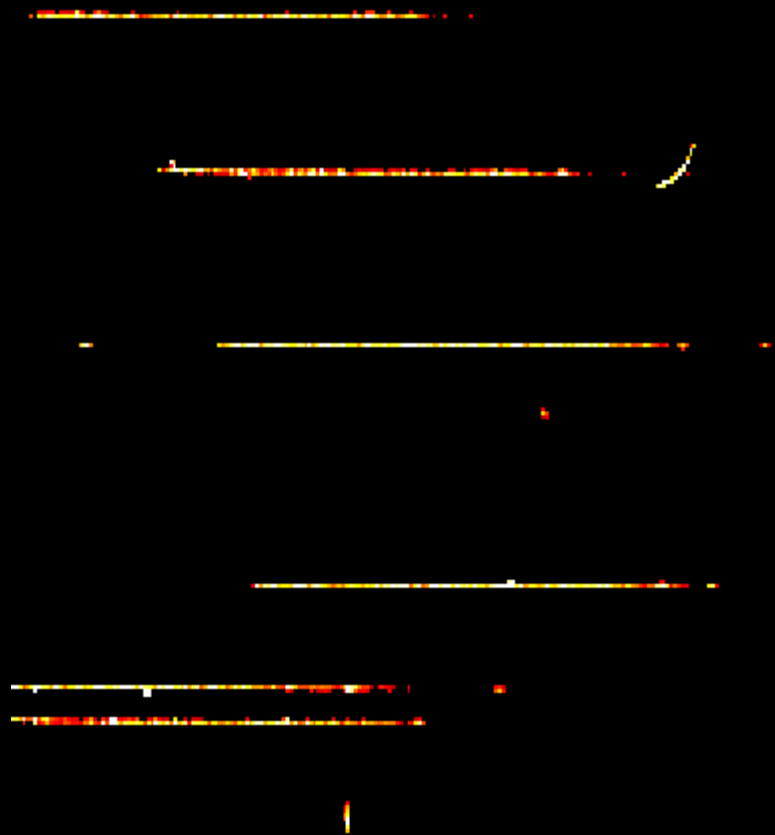


Mion z kosmického záření

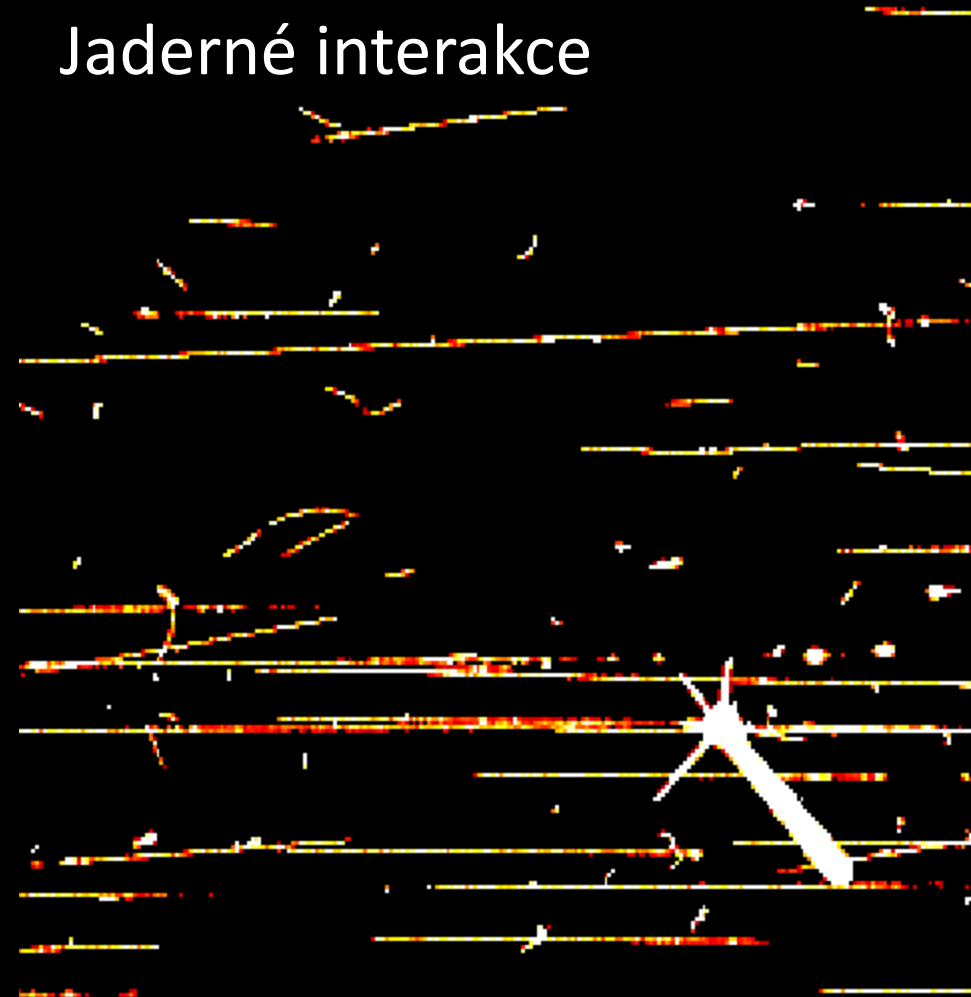


Ve svazku částic na urychlovači SPS v CERN

Miony
Ionizace

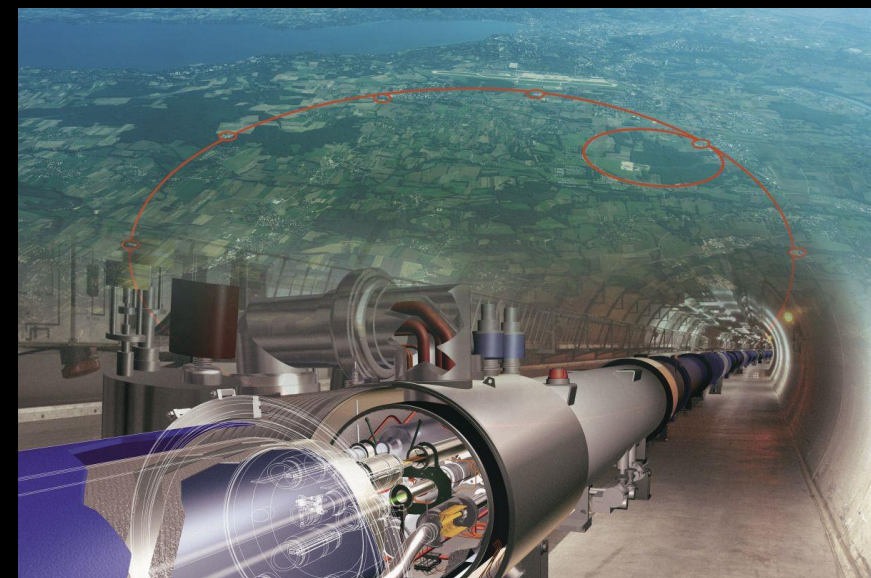
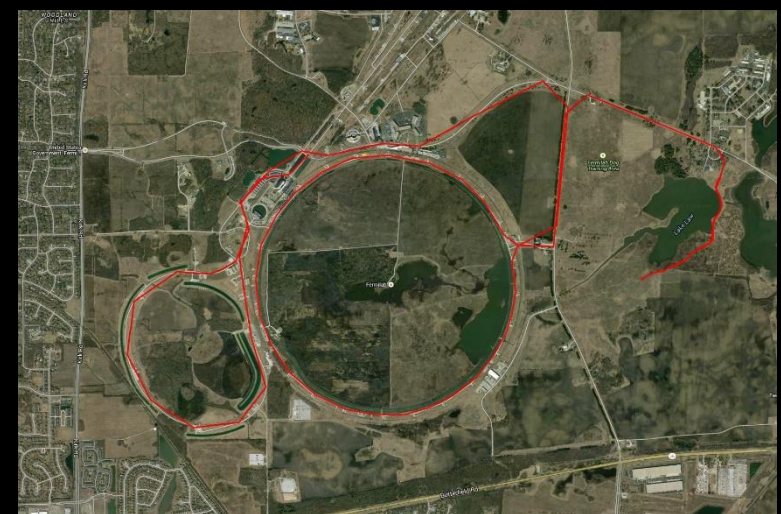


Piony
Jaderné interakce





Urychlovače částic



12.9.2022

Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN

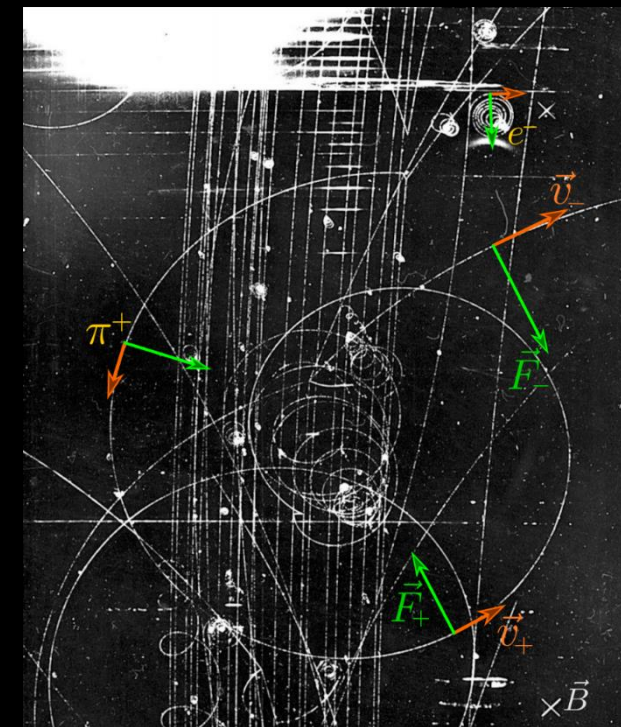
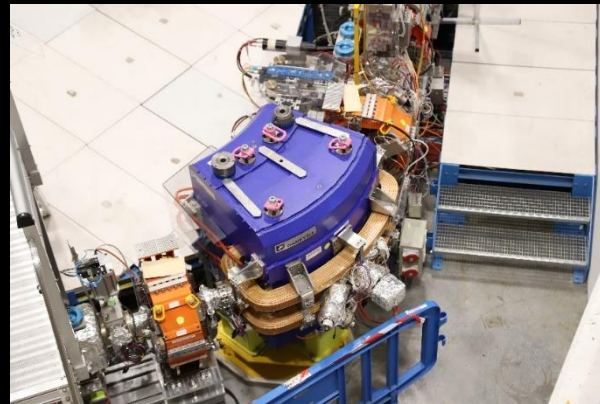
13

Interakce částic s elmag. polem

- Elektrické pole urychluje
 - Základ principu urychlování
- Magnetické pole mění směr
 - Základ cyklotronu, dipólových magnetů synchrotronů.
- Lorentzova síla
 - Dané magnetické pole zakřivuje opačně nabitě částice v opačných směrech.
 - Lze použít pro výběr částic ze svazku.

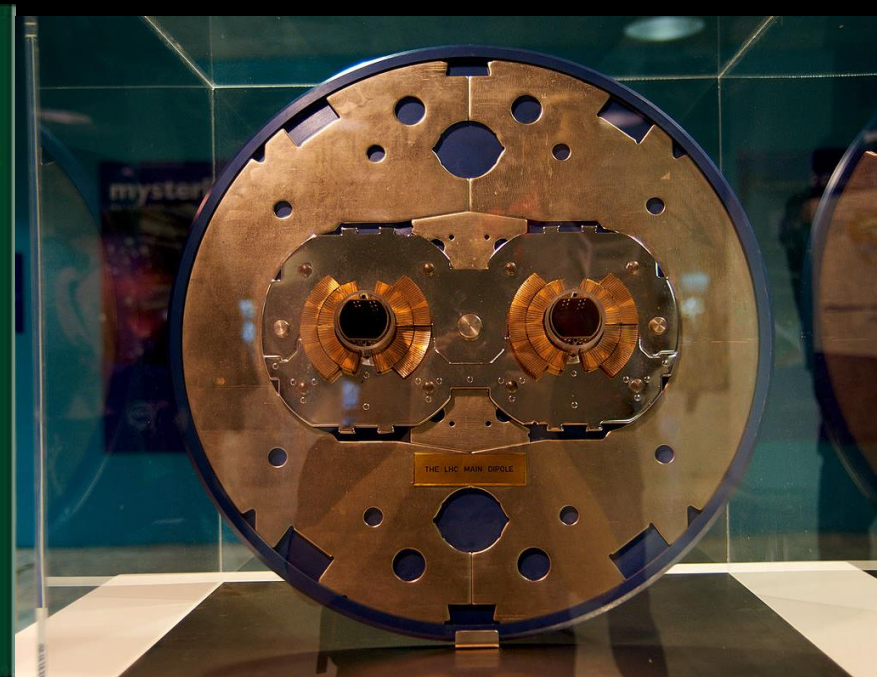
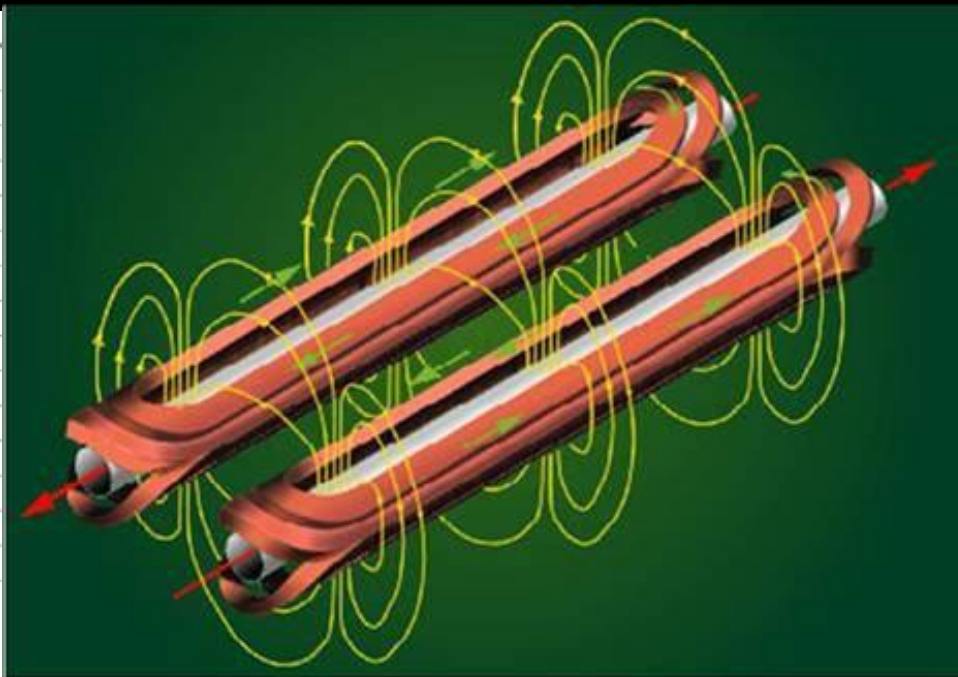
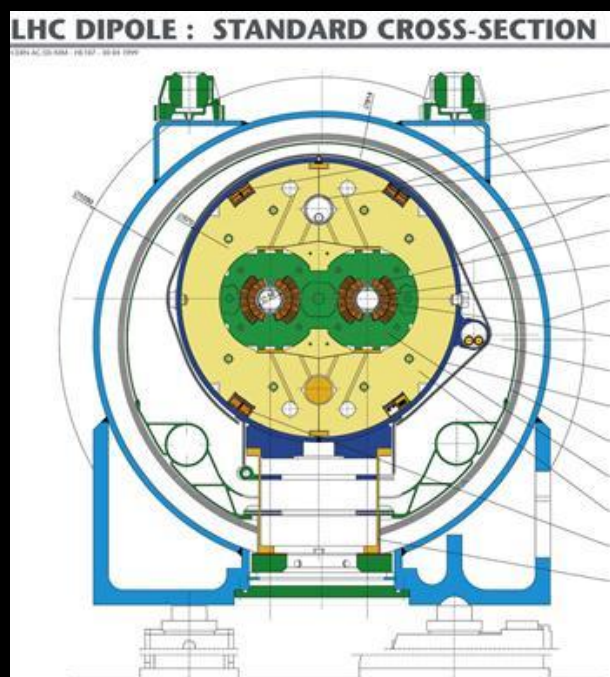
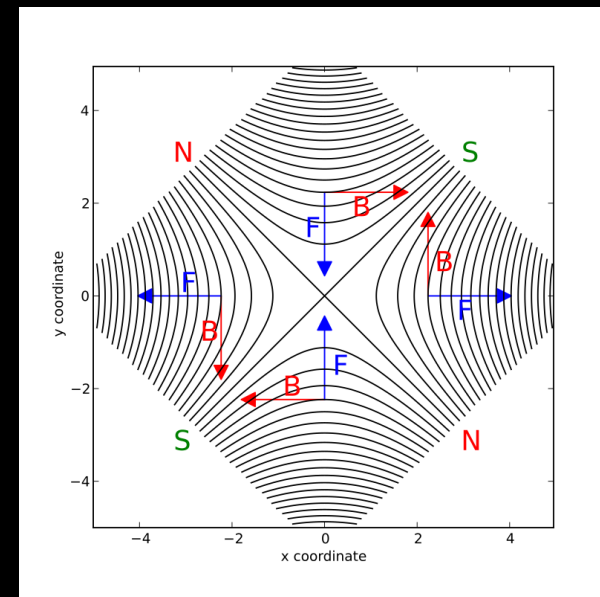
$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Electric force *Magnetic force*



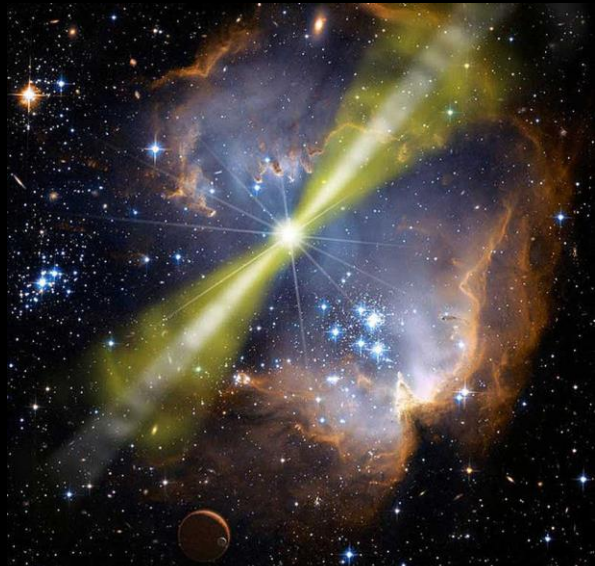
Magnety

- Síla působící na nabitou částici je kolmá na rychlost a magnetické pole.
- Kvadrupólové zaostřují svazek
- Dipólové udržují částice na kruhové orbitě



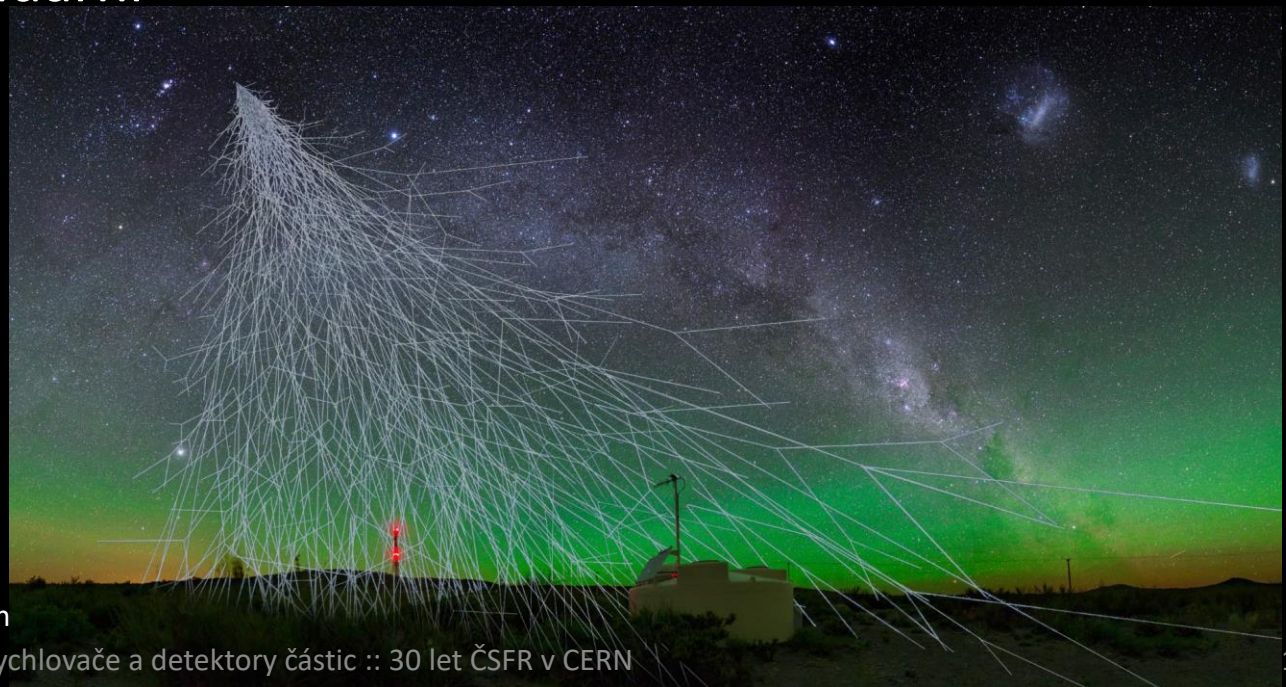
Přírodní urychlovače

- Záření beta a alfa z přírodních radioizotopů
 - Radon, uran, rádium, polonium
 - Uhlík ^{14}C , draslík ^{40}K
 - Americium ^{241}Am (umělý prvek)
 - Alfa částice mají okolo 5% rychlosti světla!
- Astrofyzikální procesy (hvězdy, supernovy, procesy okolo černých děr...)
 - Kosmické záření primární, sekundární



<https://kipac.stanford.edu/research/topics/particle-acceleration>

12.9.2022

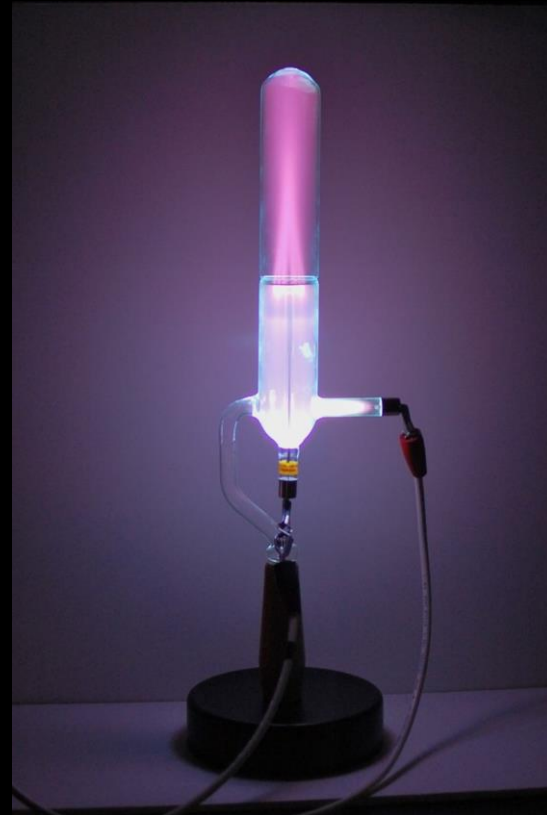
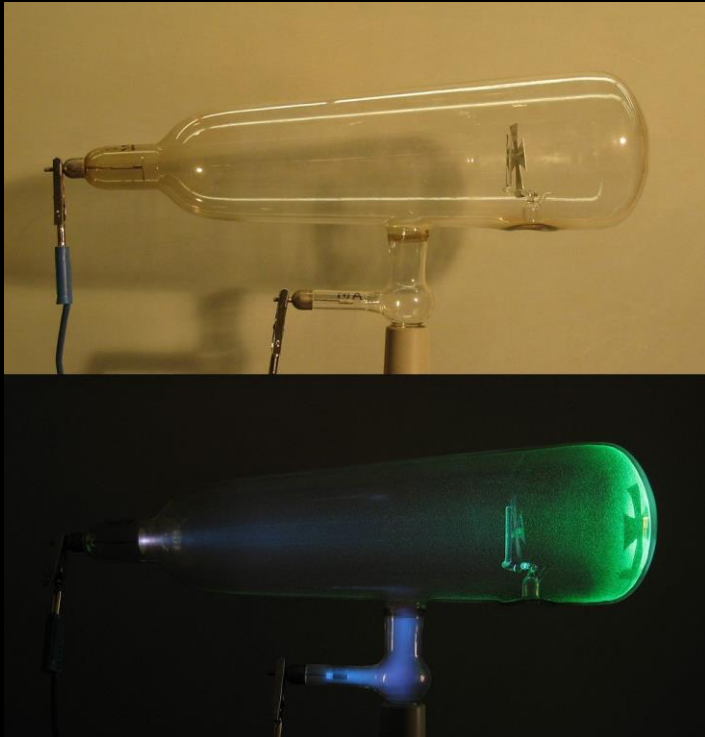


Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN

16

Umělé urychlovače

- Crookesova trubice
 - Žhavená katoda emituje elektrony
- Röntgenovo záření vyvolané dopadem elektronů na anodu
 - Brzdné záření + charakteristické rtg. záření (přechody elektronů v obalu atomu)

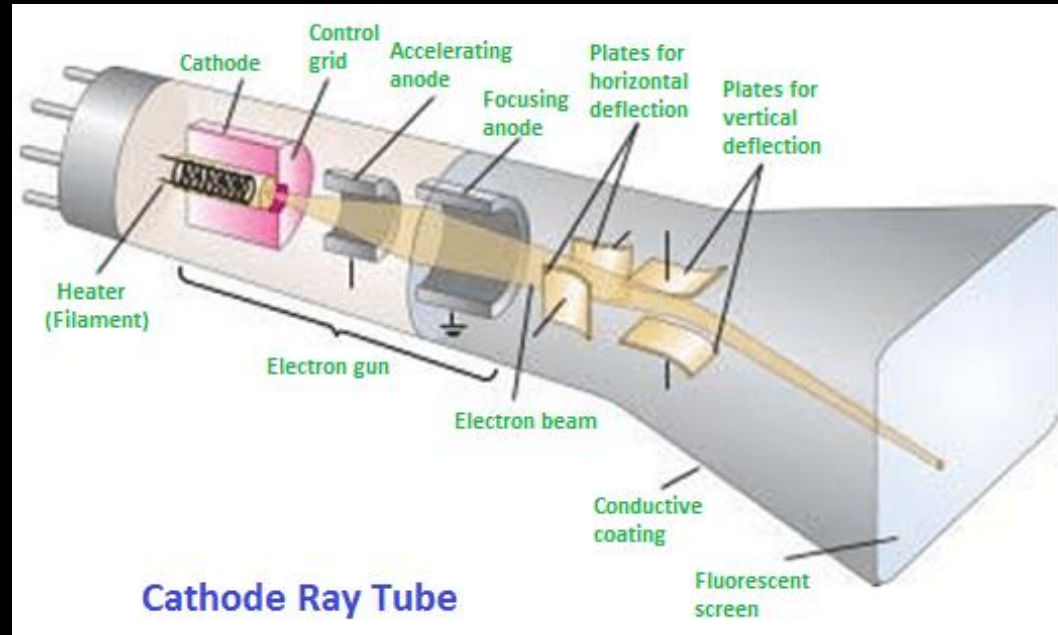


Umělé urychlovače

- CRT (Cathode Ray Tube) monitory
- Potřeba vakua a vysokého napětí.
- Urychlovací elektrody
- Vychylovací elektrody (řádkování svazkem elektronů).



Tesla Orava 219 - typ 4219U



<https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/cathode-ray-tube-crt/>

Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN

Zdroj: Aukro.cz

Zdroj: Wikipedia

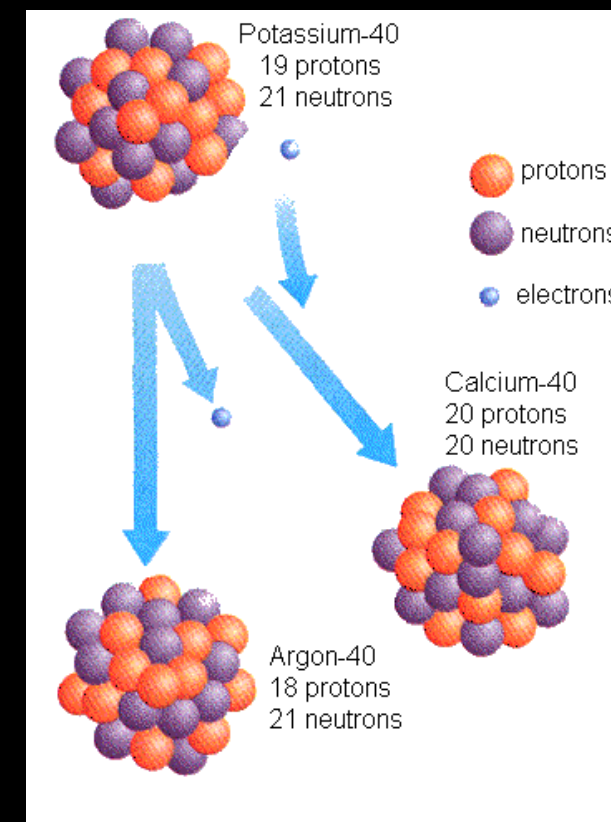
Vám nejbližší zdroj záření :: lidské tělo

- Radioaktivní draslík ^{40}K (0,012% přírodního draslíku) se rozpadá beta rozpadem na vápník, popř. záchytem elektronu na argon.
- Člověk hmotnosti 70 kg obsahuje asi 140 gramů draslíku, z toho 0.0164 gramů ^{40}K .
- 4300 těchto jader se v těle rozpadne každou sekundu.
- Banán (vyšší obsah draslíku) jako jednotka radioaktivity:)

EATING 1 BANANA



$$0.1 \text{ microsieverts} = \frac{1}{10,000,000} \text{ sieverts}$$

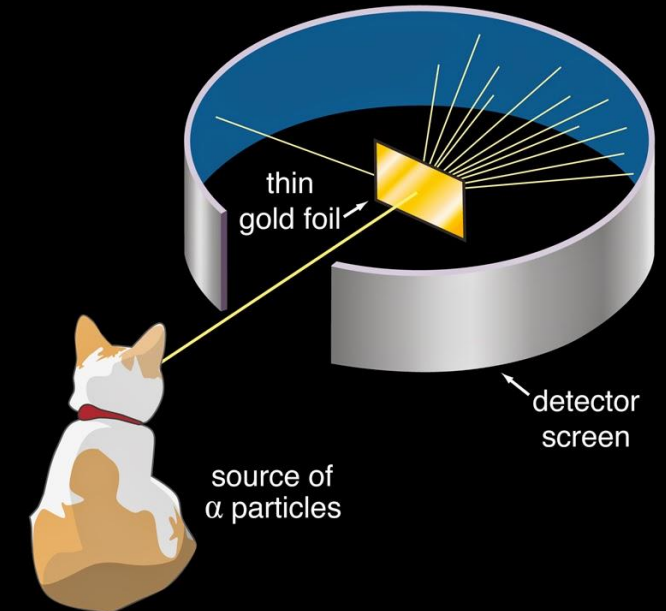
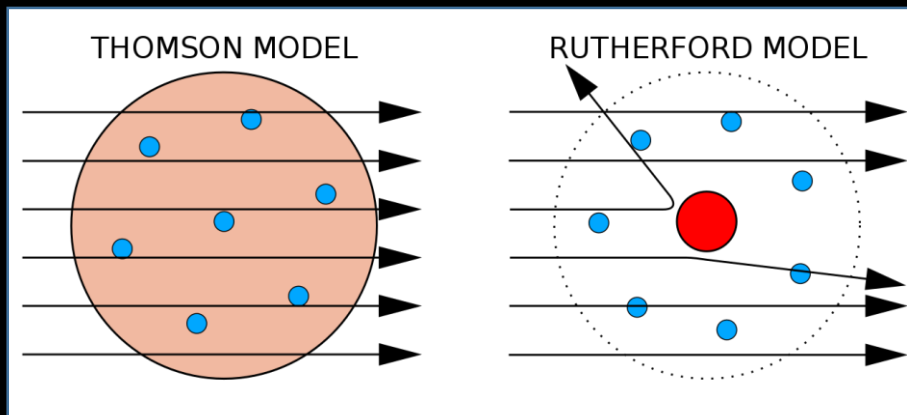
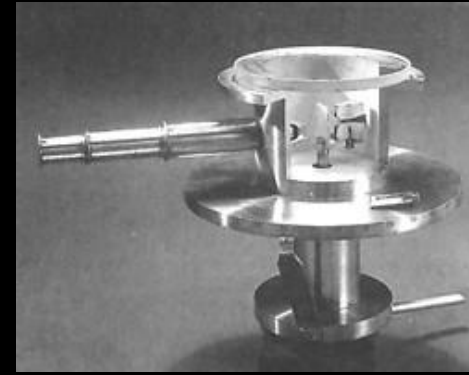


The Most Radioactive Places on Earth :: <https://youtu.be/TRL7o2kPqw0>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Potassium-40>

Rutherfordův experiment 1909

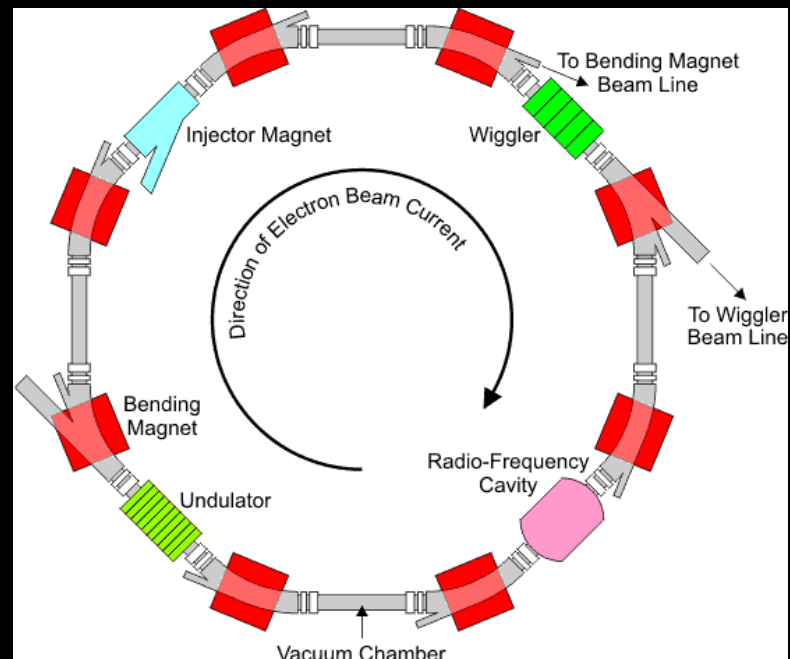
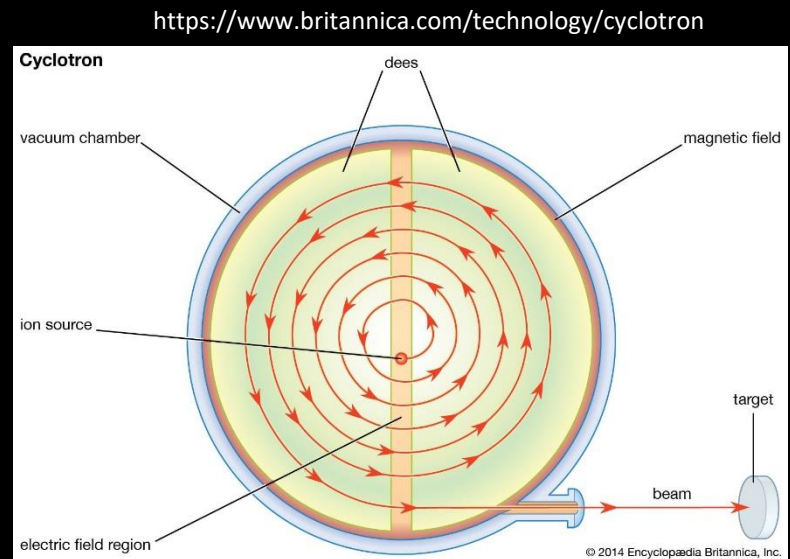
- **Alfa částice:** jádra hélia, která vyletují z jiných těžkých jader, čímž vznikají stabilnější jádra.
- Alfa částice ve vzduchu uletí jen několik cm.
- Zdroje: uran, radon, polonium, rádium...
- **Bombardováním zlaté fólie alfa částicemi objevil Ernest Rutherford atomové jádro.**
 - Alfa částice se občas odrazily zpět, což nešlo vysvětlit jinak, než že většina hmotnosti atomu je v nějakém velmi malém hmotném centru.



<http://spalenkaletters.blogspot.cz/2014/04/science-cats-volume-2.html>

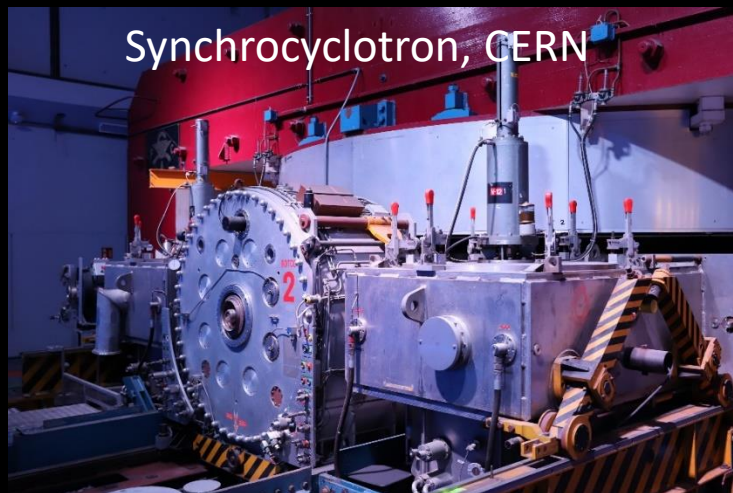
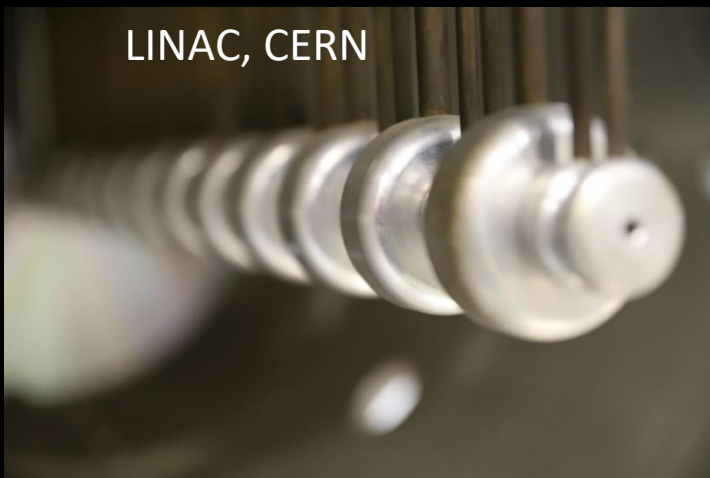
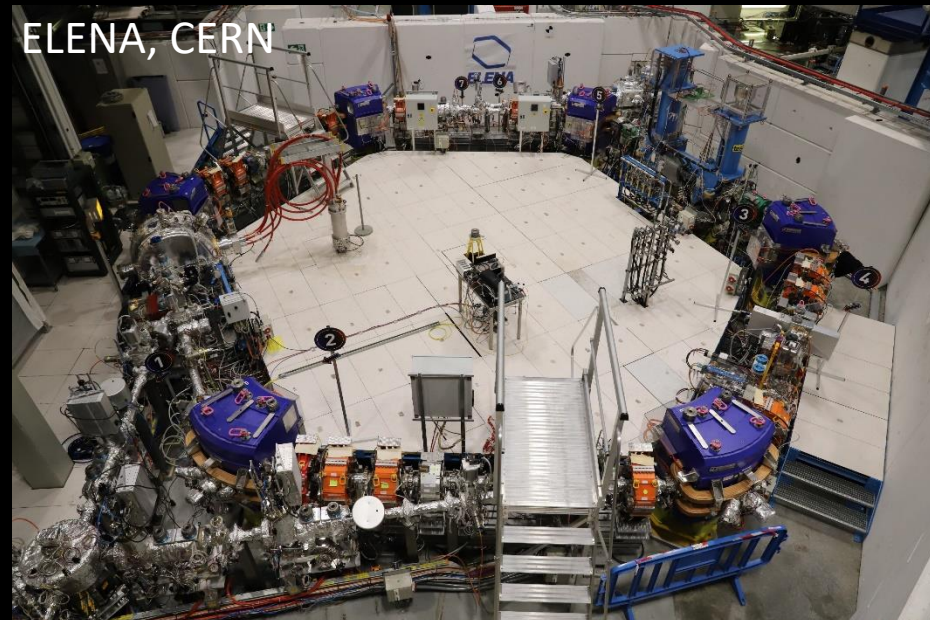
Jaké částice urychlujeme uměle?

- Pouze nabité:-)
 - elektrony pozitrony
 - protony, antiprotony
 - ionty lehké, těžké, radioaktivní
 - koncepty: urychlovač mionů
- Následně je možná příprava sekundárních svazků
 - Piony, miony, pozitrony, antiprotony, neutrina...
 - Pro testování a kalibrace detektorů



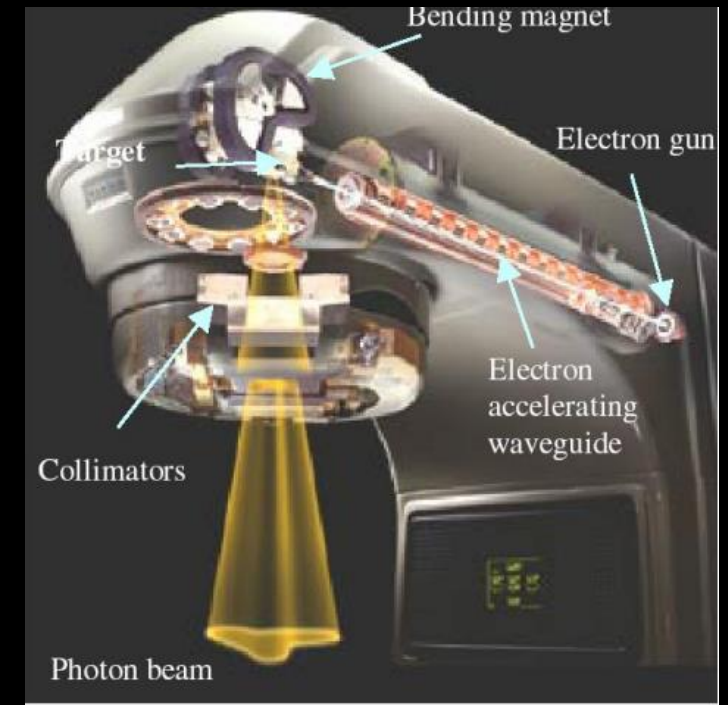
Typy urychlovačů

- Lineární
- Kruhové
 - Cyklotrony
 - Synchrotrony
- Dle použitých magnetů
 - Nesupravodivé
 - Supravodivé



Urychlovače podle využití

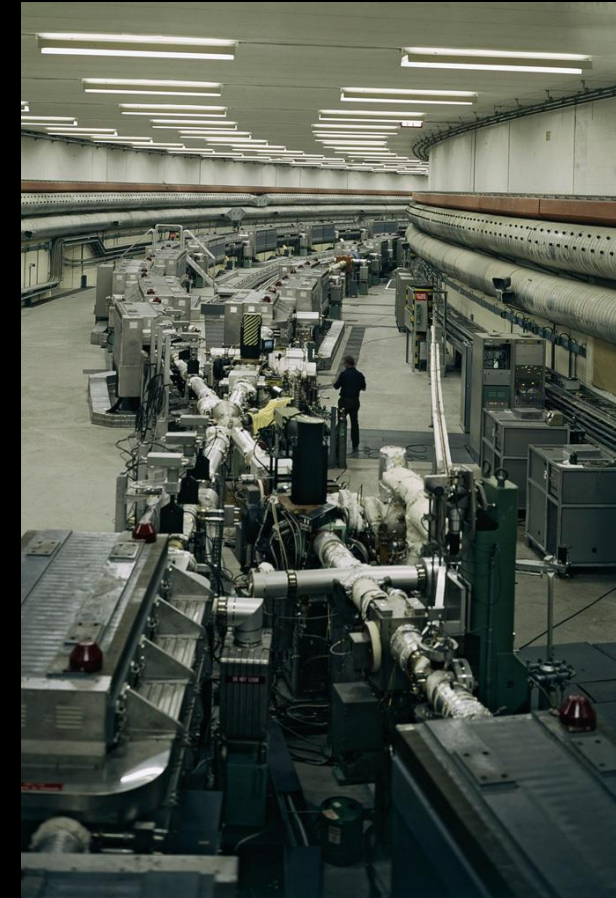
- Výzkumné
 - Základní či aplikovaný výzkum
 - Zdroj částic či synchrotronového záření
- Medínské
 - Zobrazovací
 - rentgenka
 - Terapie
 - Lineární, elektronové (levné)
 - https://www.radccore.org/files/documents/Linac_HSong.pdf
 - <https://indico.ictp.it/event/7955/session/2/contribution/18/material/slides/0.pdf>
 - <http://www.cayugamed.org/cayuga-health-introduces-transformative-radiation-machine/>
 - Hadronová terapie: synchrotrony (nákladné)
 - Produkce radiofarmak
 - Beta+ zářiče pro pozitronovou emisní tomografii
 - Cyklotrony



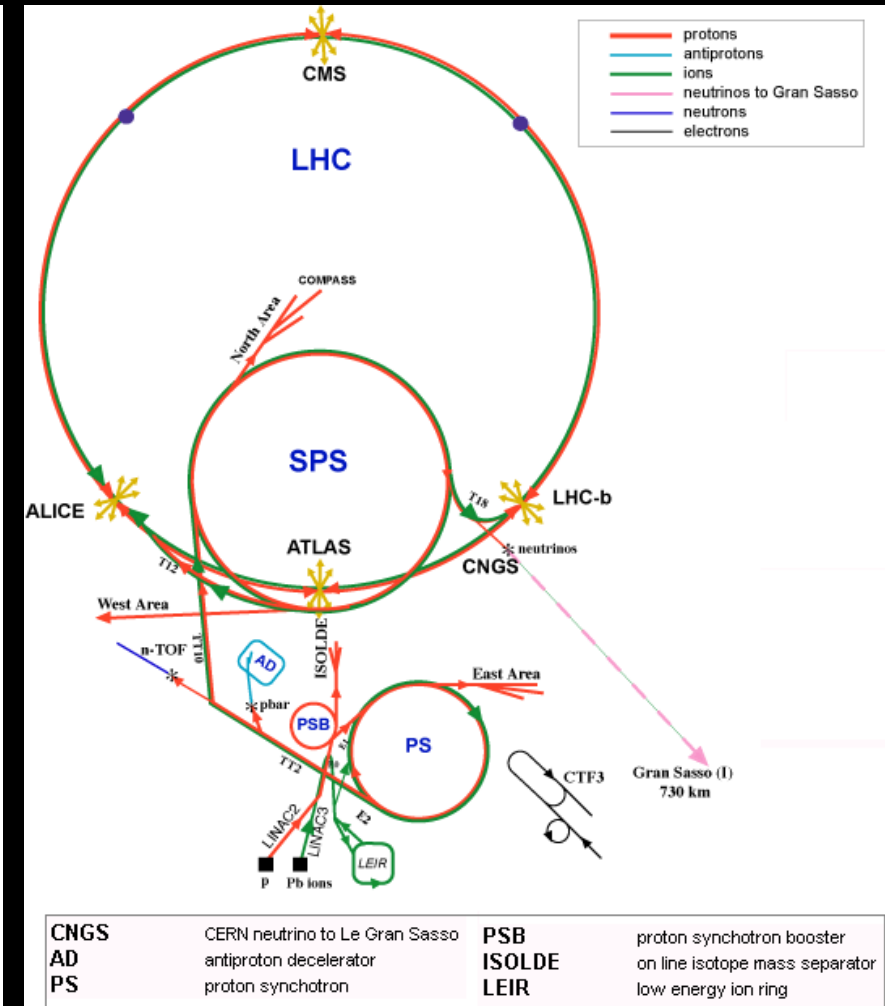
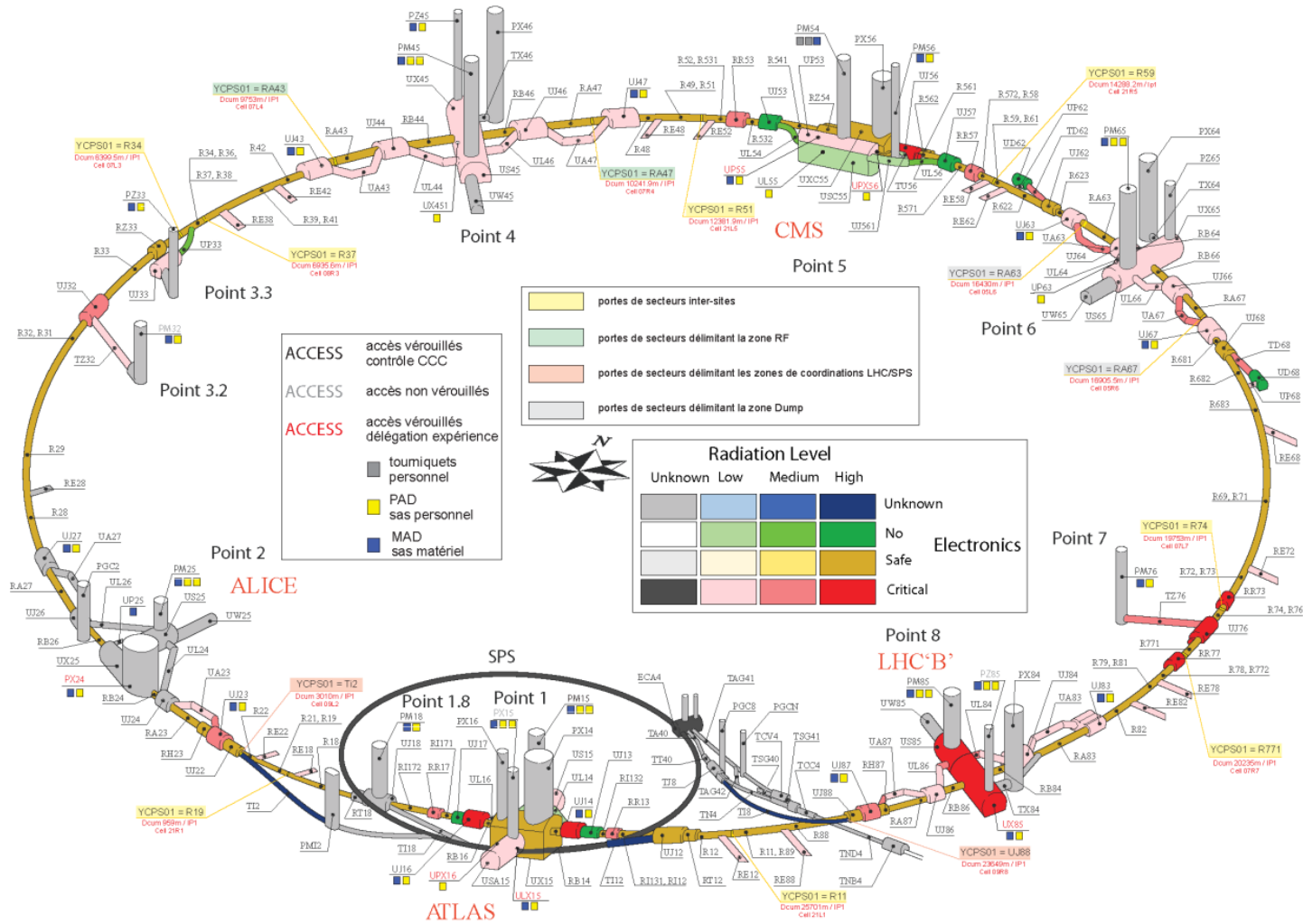
Moderní výzkumné urychlovače

<https://cerncourier.com/a/discovery-machines/>

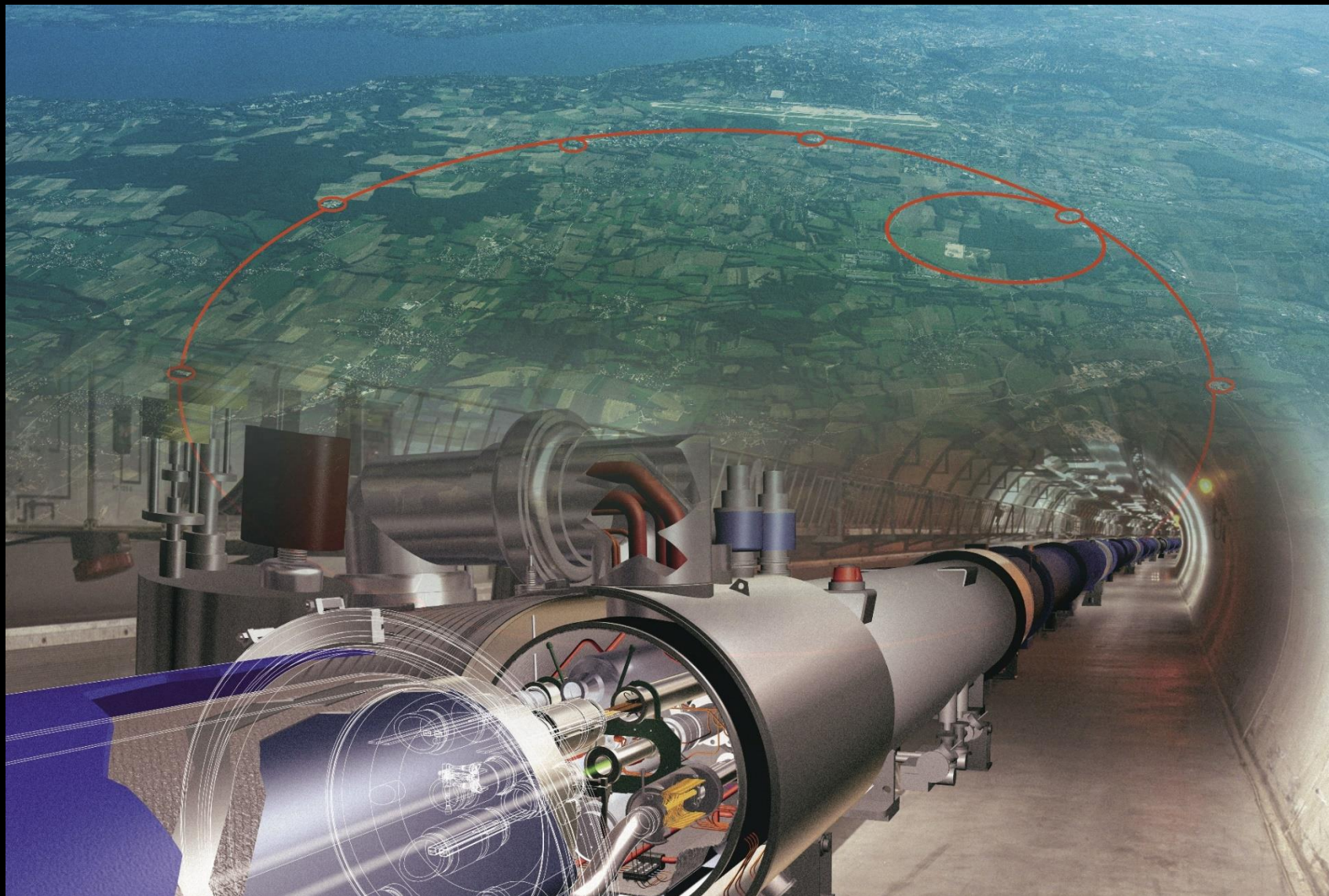
- Spojeny s objevy ve fyzice částic.
- Urychlování protonů a antiprotonů:
 - ve společném magnetickém poli a v jedné urychlovací trubici.
 - Carlu Rubbia, Petr McIntyre, David Cline
 - CERN: Super Proton Synchrotron --> Super proton antiproton Synchrotron (SppS)
 - Fermilab, USA: Tevatron
 - Antiproton accumulator
 - Problém s neuspořádaností antiprotonů ve svazku
 - Linkou napříč kruhem urychlovače, zpětná vazba, „chlazení“ svazku.
 - Simon van der Meer



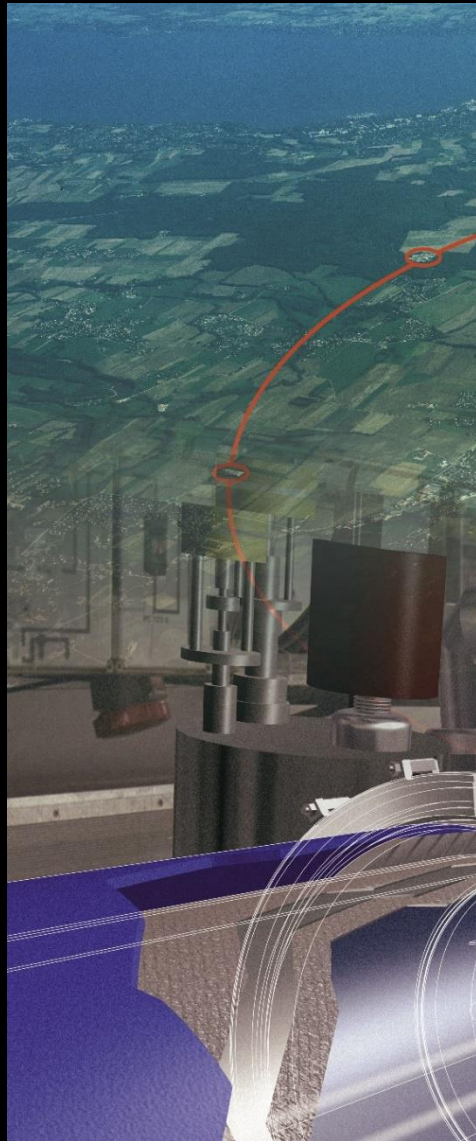
Urychlovací komplex v CERN



Urychlovače SPS a LHC



Urychlovač LHC



**HÄDRÖNN
CJÖLIDDER**

60,000x
80,000x
1x
9,000,000x

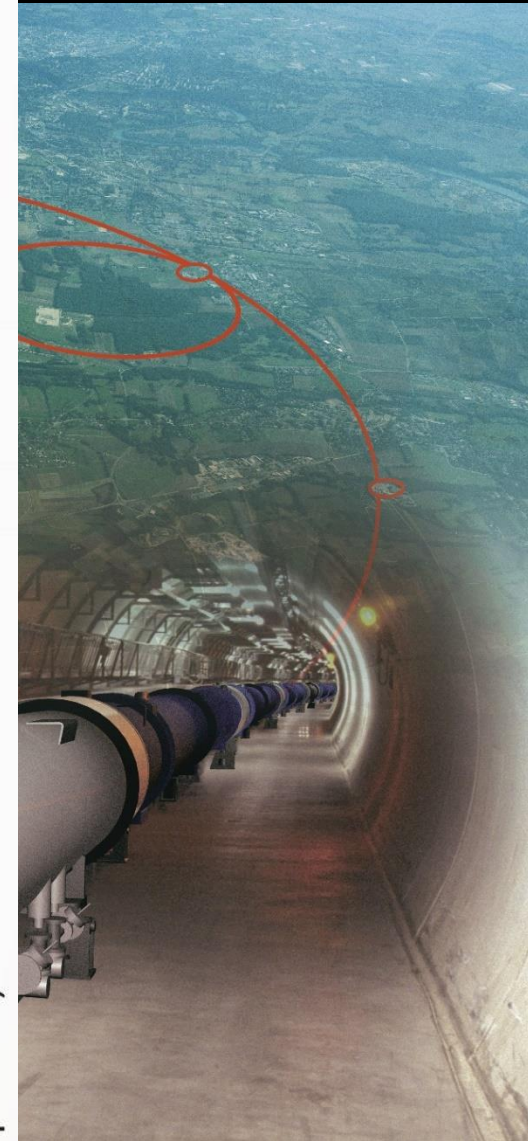
1.

2.

3.

4.

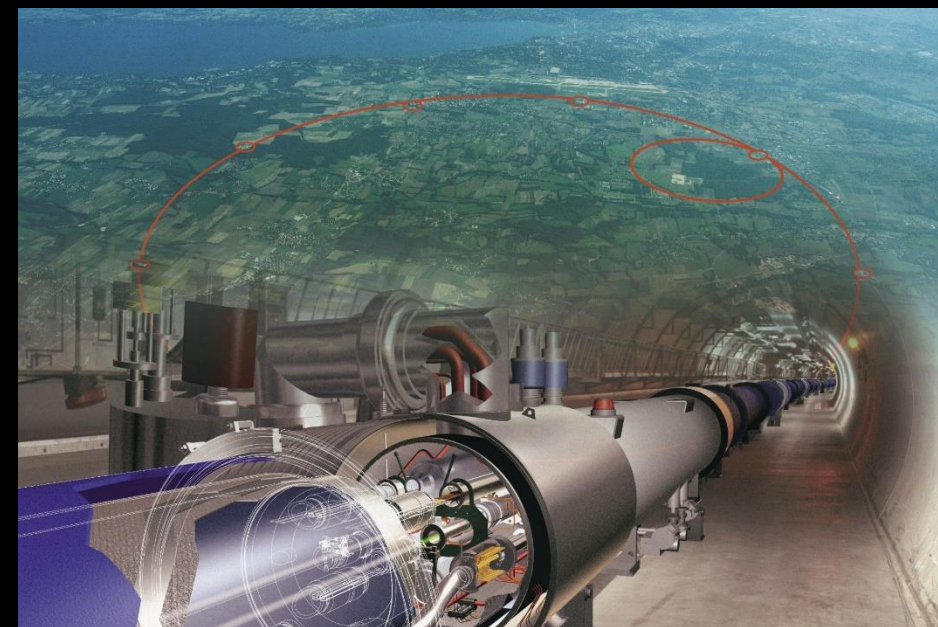
CollegeHumor



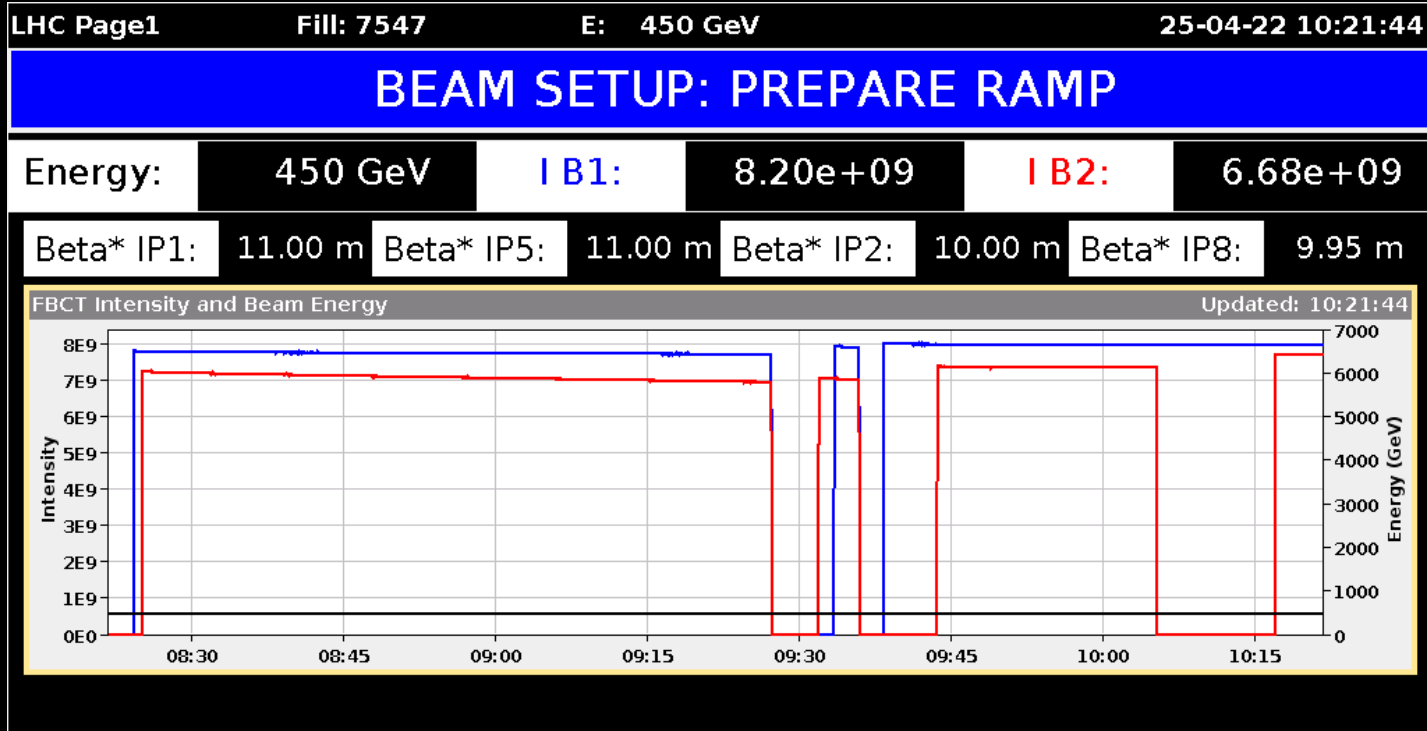
Urychlovač LHC

- Large Hadron Collider, obvod 27km.
- ~1200 supravodivých dipólových magnetů
 - chlazeny na 1,9 K.
 - studenější než Vesmír.
 - elektrický proud v supravodiči je 13 kA.
- „Mikroskop“ s rozlišením 0,01 fm.
- Srážky protonů: lokální teplota 10^{16} Kelvinů.
 - Místo s nejvyšší teplotou ve Sluneční soustavě.
- Protony o energii 6,5 TeV oběhnou za 90 μ s.
- Protony jsou ve shlucích po 10^{10} částic.
- Shluků je ≈ 2000 .
- Frekvence srážek je 40 MHz, tj. každých 25 ns.
- Spotřeba energie jako kanton Ženeva.
- Energie částic ve svazku postupně až 6.8 TeV.

<https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>



Urychlovač LHC



Comments (25-Apr-2022 10:13:34)
 Beam commissioning
 First ramp to 6.8 TeV with pilots

AFS: MD_MKI_13inj_both

BIS status and SMP flags		B1	B2
Link Status of Beam Permits		false	false
Global Beam Permit		true	true
Setup Beam		true	true
Beam Presence		true	true
Moveable Devices Allowed In		false	false
Stable Beams		false	false
PM Status B1	ENABLED		
PM Status B2	ENABLED		

<https://jointlab.upol.cz/kvita/LHC.html>

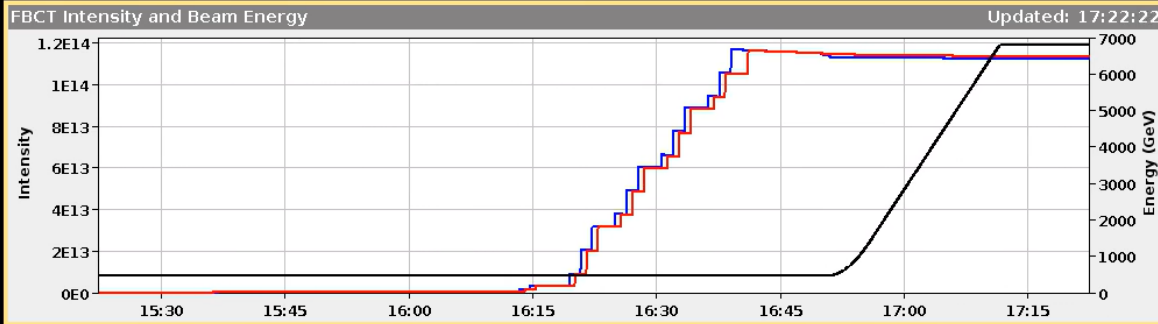
Urychlovač LHC

LHC Page1 Fill: 8056 E: 6800 GeV 27-07-22 17:22:22

PROTON PHYSICS: SQUEEZE

Energy: 6800 GeV I B1: 1.10e+14 I B2: 1.12e+14

Beta* IP1: 0.60 m Beta* IP2: 10.00 m Beta* IP5: 0.60 m Beta* IP8: 2.00 m



Comments (27-Jul-2022 16:41:57)

fill for stable beams with 96bpi and 900b level at initial pileup (~35-40)

▶ 0:14 / 3:54

BIS status and SMP flags

	B1	B2
Link Status of Beam Permits	true	true
Global Beam Permit	true	true
Setup Beam	false	false
Beam Presence	true	true
Moveable Devices Allowed In	false	false
Stable Beams	false	false

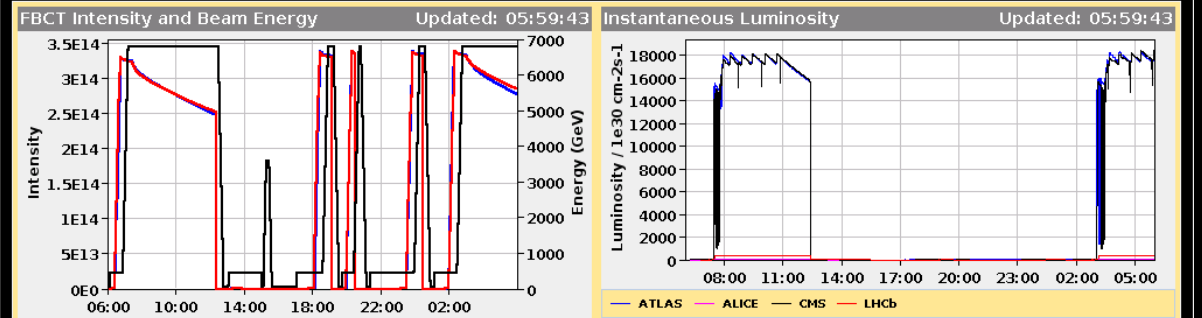
LHC Page1 Fill: 8253 E: 6800 GeV t(SB): 02:51:41 12-10-22 05:59:44

PROTON PHYSICS: STABLE BEAMS

Energy: 6800 GeV I B1: 2.73e+14 I B2: 2.80e+14

Beta* IP1: 0.33 m Beta* IP2: 10.00 m Beta* IP5: 0.33 m Beta* IP8: 2.00 m

Inst. Lumi [(ub.s)^-1] IP1: 18365.45 IP2: 8.71 IP5: 18479.03 IP8: 336.49



Comments (12-Oct-2022 03:41:12)

beta* levelling in ATLAS and CMS at mu ~ 52
Separation levelling in ALICE and LHCb
XRP - IN

Dump planned at 6:45

BIS status and SMP flags

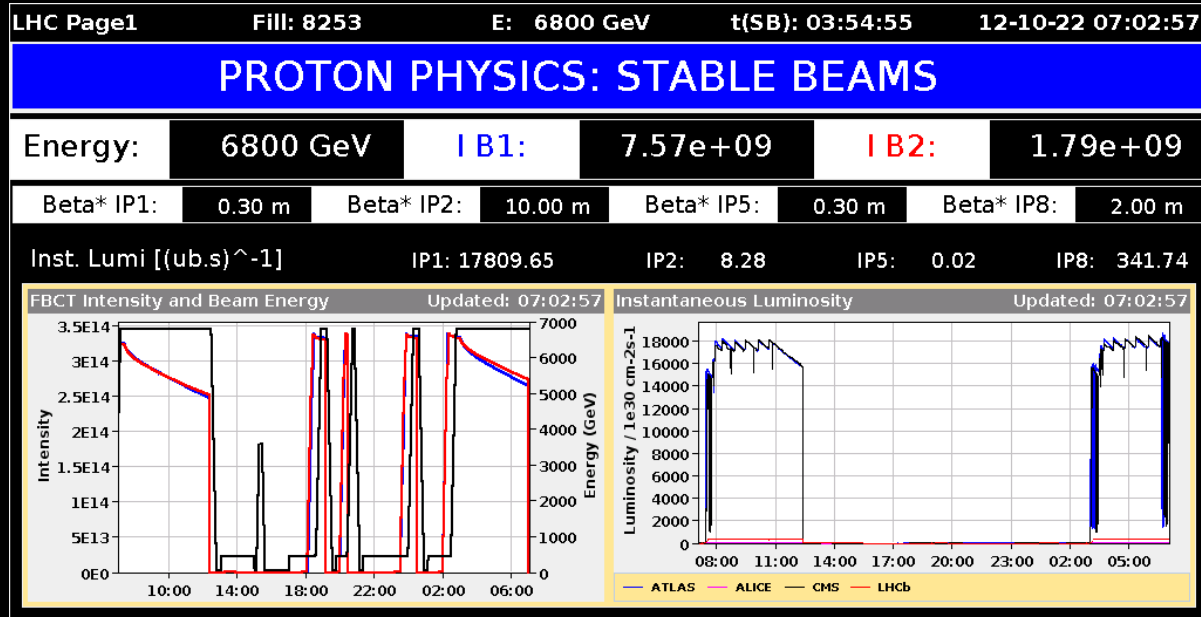
	B1	B2
Link Status of Beam Permits	true	true
Global Beam Permit	true	true
Setup Beam	false	false
Beam Presence	true	true
Moveable Devices Allowed In	true	true
Stable Beams	true	true

AFS: 25ns_2461b_2448_1737_1733_180bpi_16inj_1INDIV PM Status B1 **ENABLED** PM Status B2 **ENABLED**

<https://op-webtools.web.cern.ch/vistar/vistars.php?usr=LHC1>

Urychlovač LHC

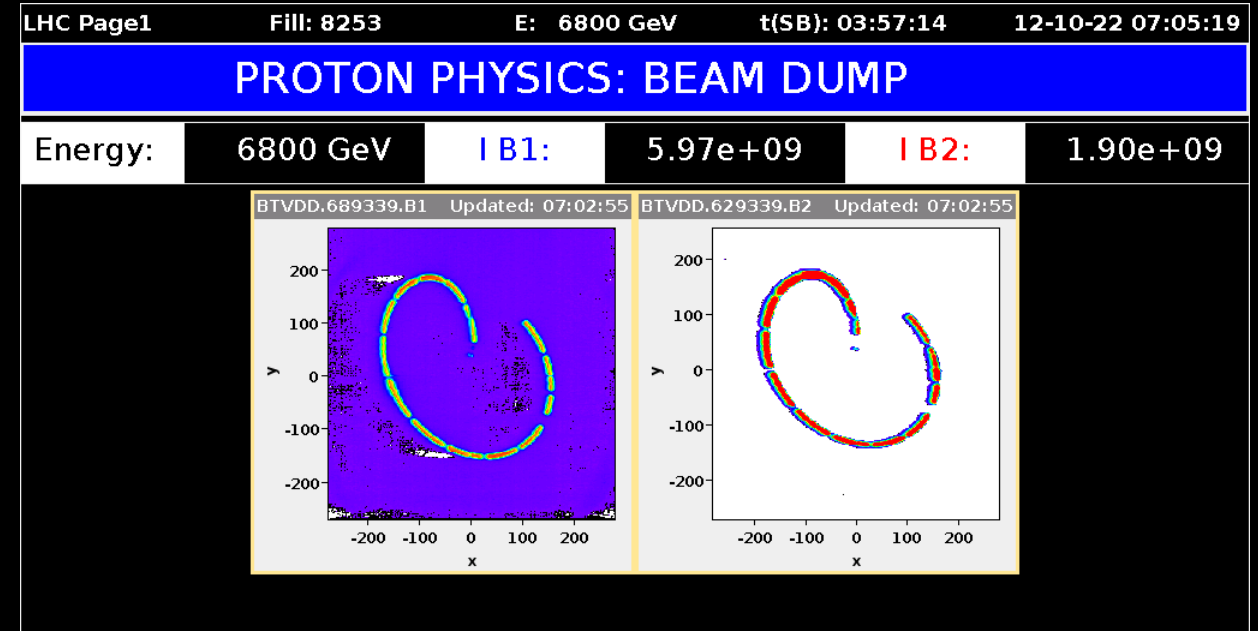
<https://op-webtools.web.cern.ch/vistar/vistars.php?usr=LHC1>



Comments (12-Oct-2022 07:01:16)

Prepating to dump

BIS status and SMP flags		B1	B2	
Link Status of Beam Permits		true	true	
Global Beam Permit		false	false	
Setup Beam		false	false	
Beam Presence		false	false	
Moveable Devices Allowed In		true	true	
Stable Beams		true	true	
AFS: 25ns_2461b_2448_1737_1733_180bpi_16inj_1INDIV	PM Status B1	ENABLED	PM Status B2	ENABLED



Comments (12-Oct-2022 07:01:16)

Prepating to dump

BIS status and SMP flags		B1	B2	
Link Status of Beam Permits		true	true	
Global Beam Permit		false	false	
Setup Beam		false	false	
Beam Presence		false	false	
Moveable Devices Allowed In		true	true	
Stable Beams		false	false	
AFS: 25ns_2461b_2448_1737_1733_180bpi_16inj_1INDIV	PM Status B1	ENABLED	PM Status B2	ENABLED

<https://home.cern/news/news/accelerators/autopsy-lhc-beam-dump>
<https://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/components/beam-dump.htm>

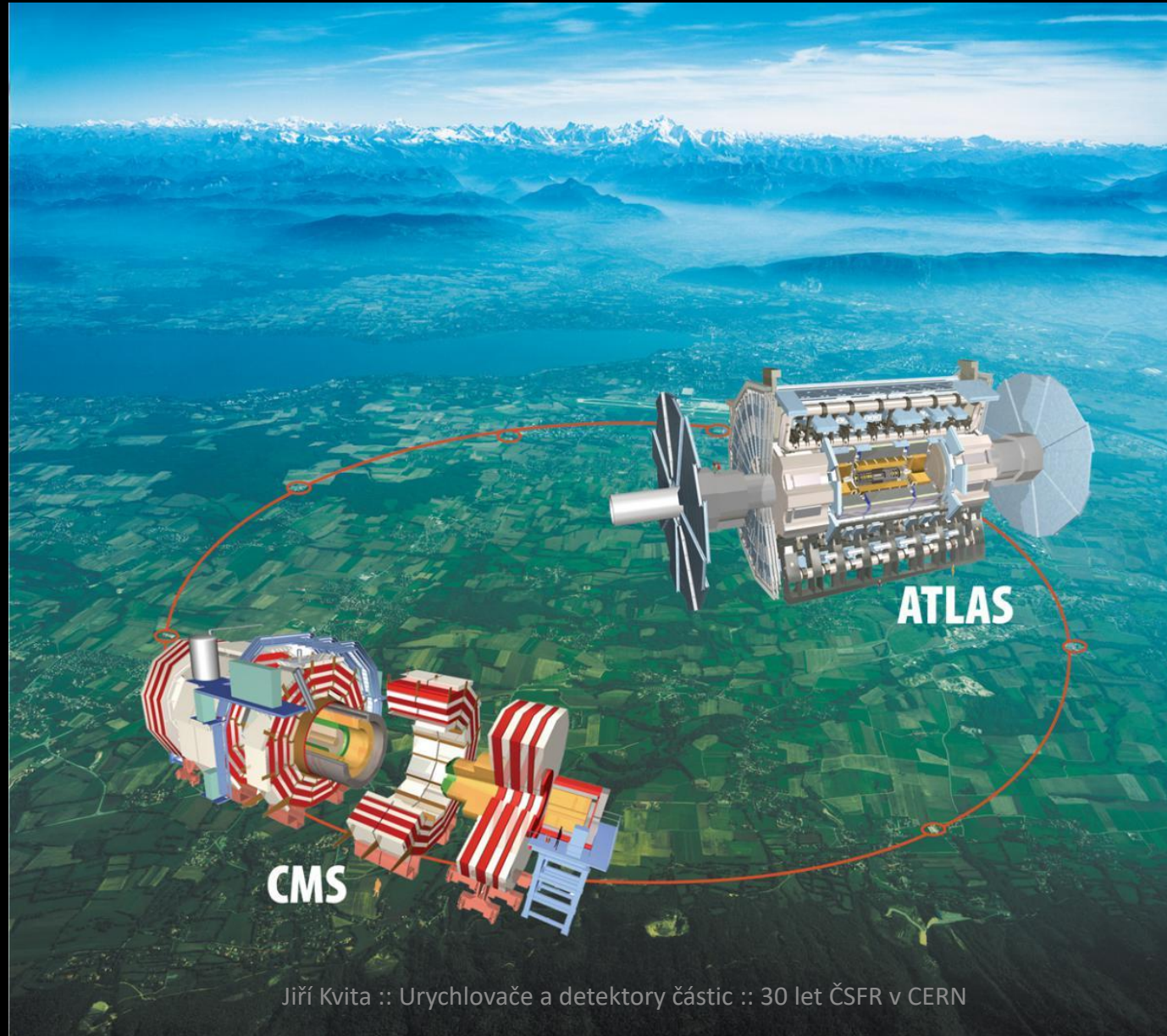
CERN Control Centre

- Hlavní kontrolní místnost všech urychlovačů v CERN
- 24/7

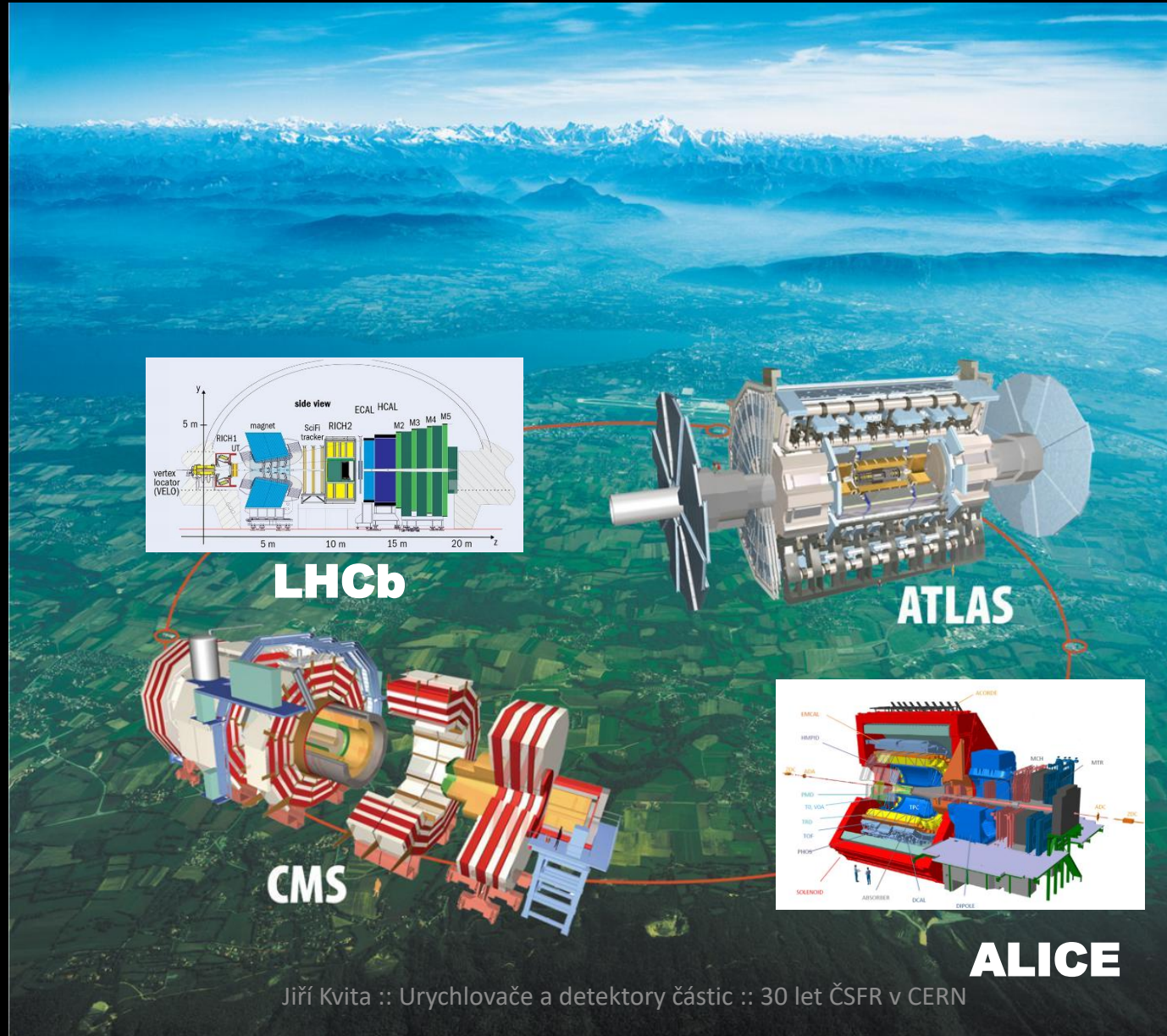


<https://home.cern/resources/image/accelerators/cern-control-centre-images-gallery>

CERN – Evropské centrum (sub)jaderného výzkumu

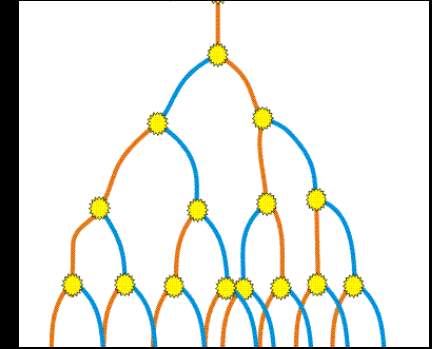


CERN – Evropské centrum (sub)jaderného výzkumu

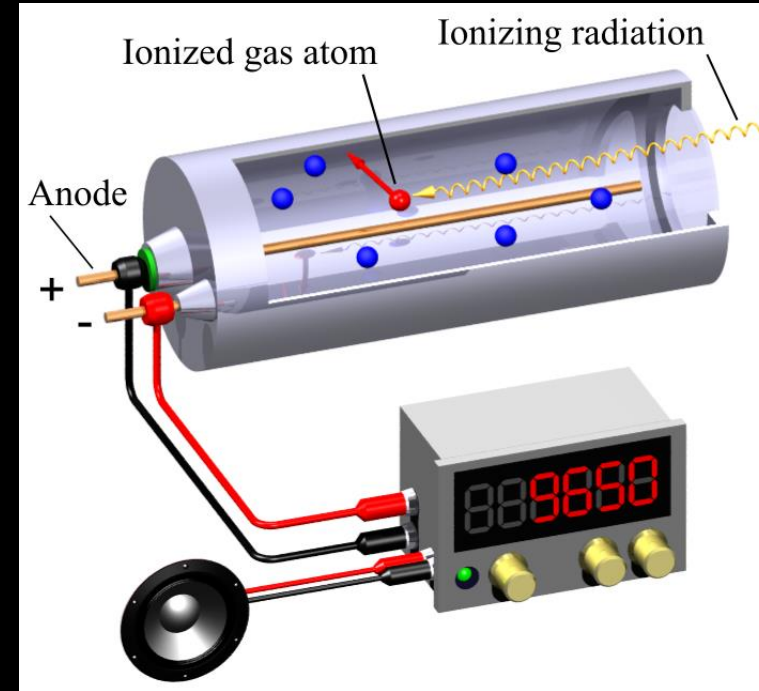


Geigerův-Müllerův čítač

- Lavinovitá ionizace v plynu mezi elektrodami.
- Proudový impulz.
- Problém s citlivostí na alfa částice.



<https://en.wikipedia.org/wiki/Ionization>



https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger%E2%80%93M%C3%BCller_tube

<https://www.nsta.org/blog/vernier-go-direct-radiation-monitor-well-worth-90-year-wait>

Jak vidíme částice

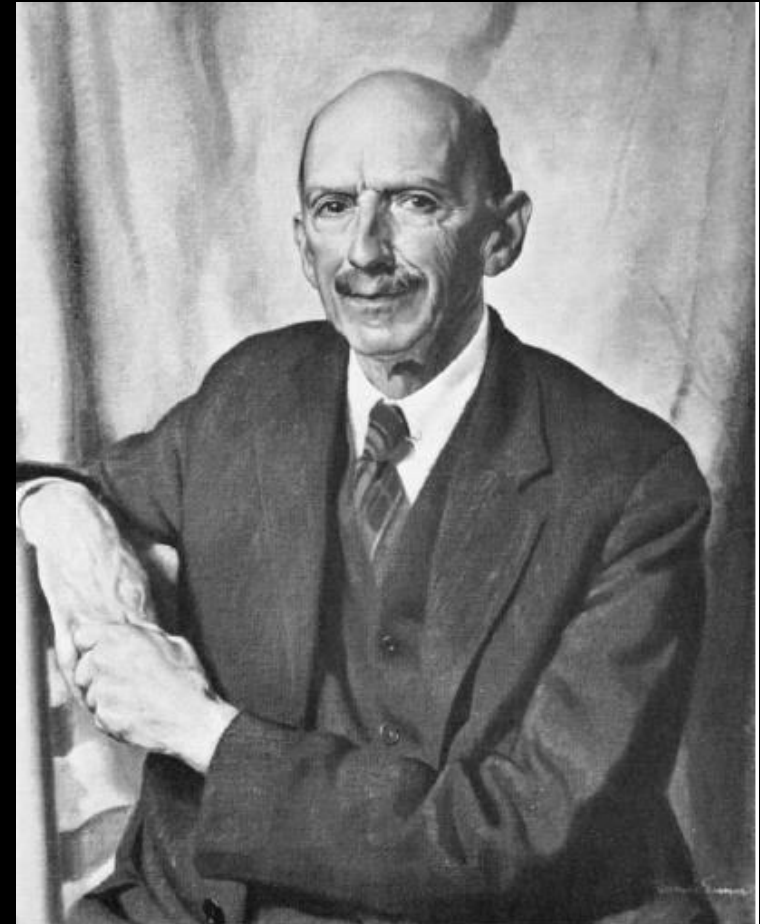
- Wilsonova mlžná komora. Workshop později 😊



https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_928.html

12.9.2022

Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN



C. T. R. Wilson

CHARLES T. R. WILSON

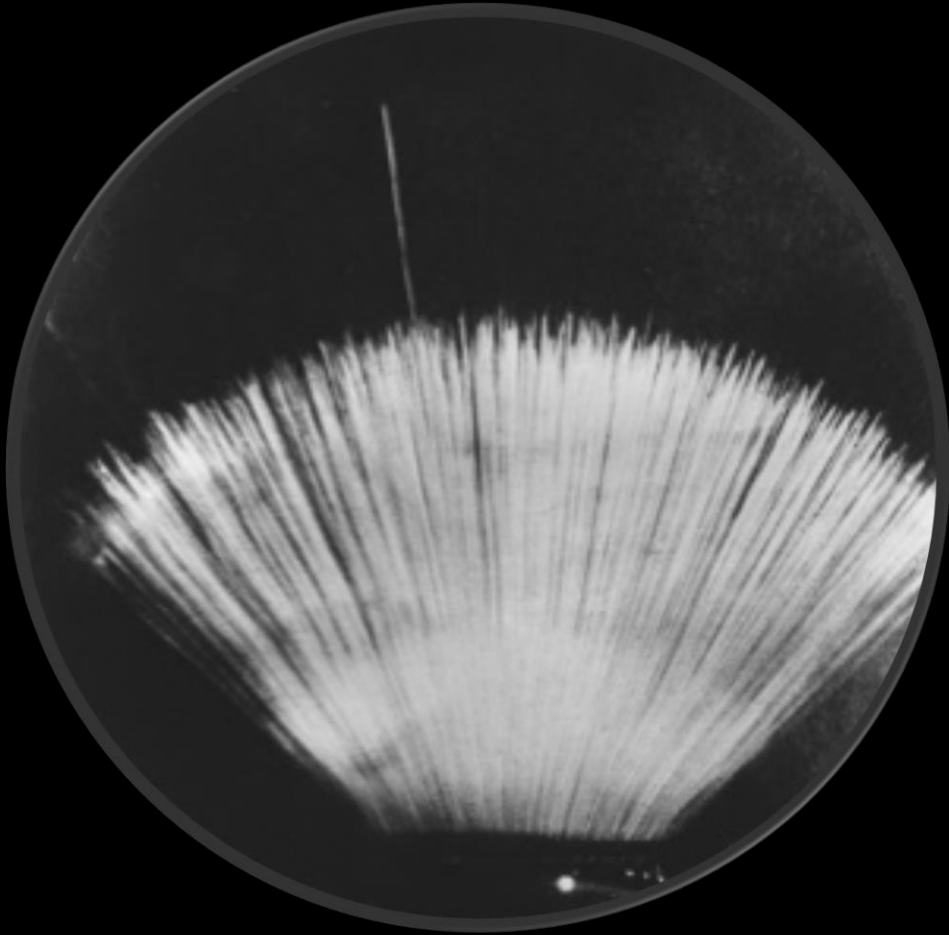
On the cloud method of making visible ions and the tracks of ionizing particles

Nobel Lecture, December 12, 1927

37

Jak měřit dráhy částic

- Mlžná komora.
- Podchlazená mlha, kondenzace kapek.



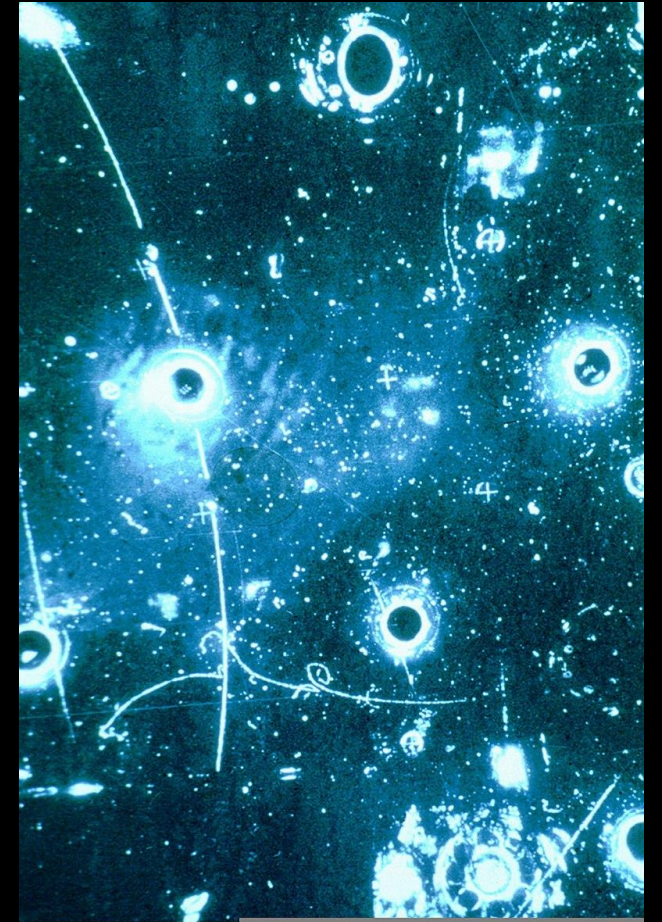
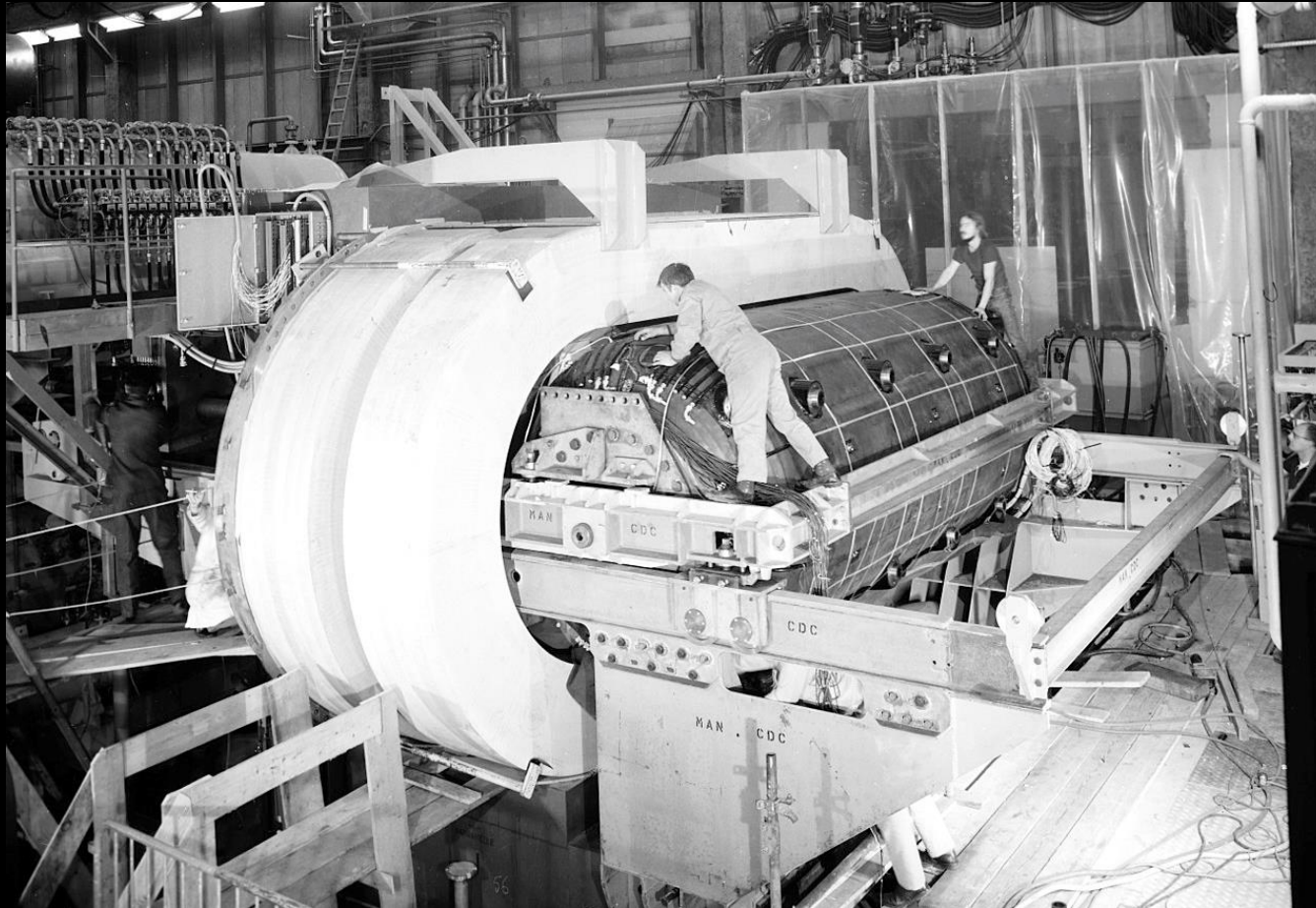
Alfa částice



<https://physicsopenlab.org/2017/05/18/particles-in-the-mist/>

Jak měřit dráhy částic

- Bublinová komora Gargamelle 1970-1979.
- Kapalina blízko bodu varu, bublinky podél dráhy částic.



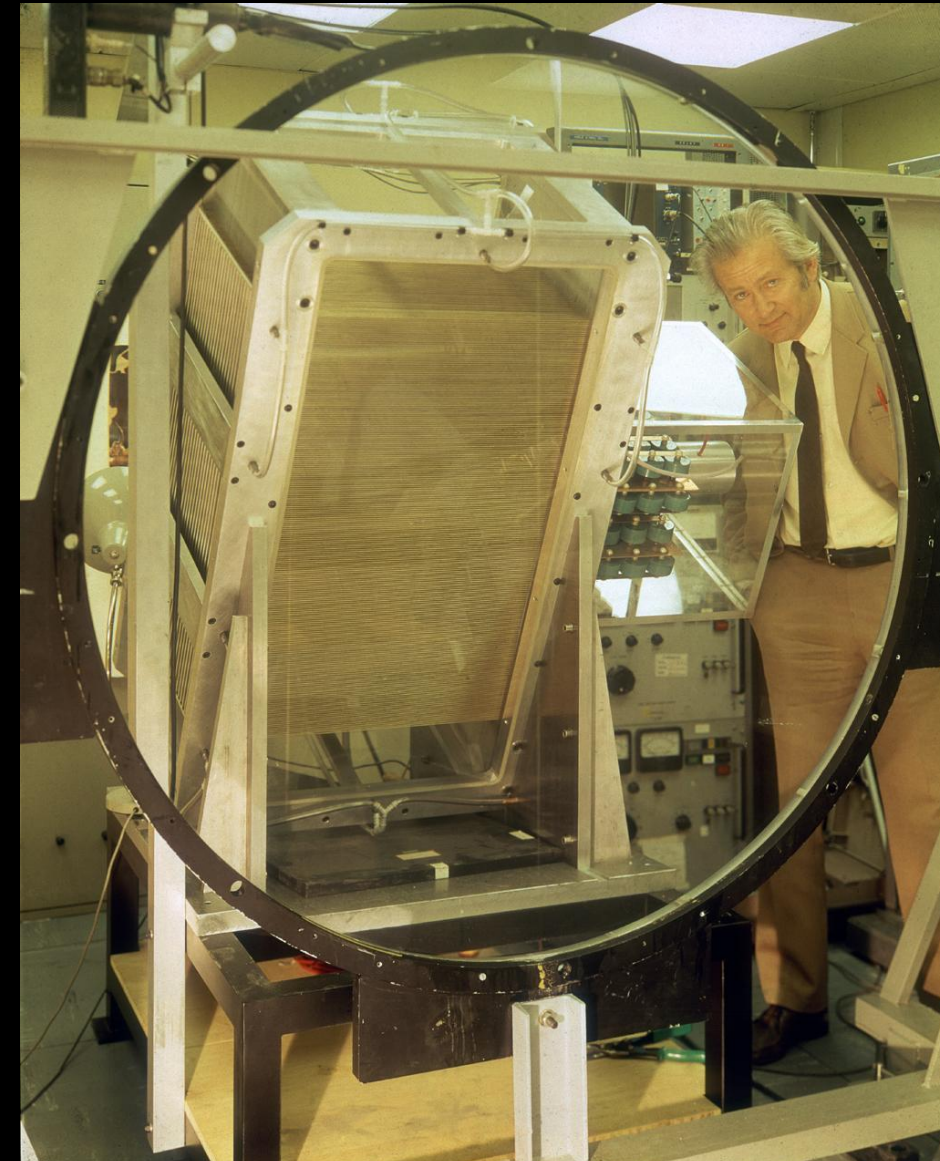
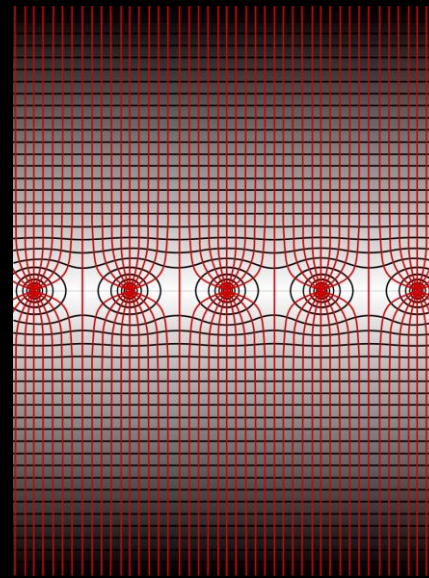
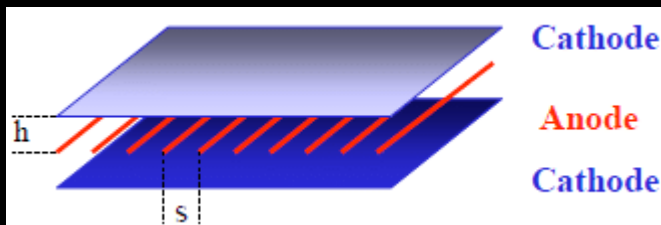
Jak měřit dráhy částic

- Bublinová komora Gargamelle 1970-1979.
- Fotografie a jejich analýza.



(Mnoho)drátové komory

- Plyn, dráty, elektrody.
 - Dle signálu z daného drátu: informace o poloze.
 - Dráhový detektor.
 - George Charpak, NC 1992
- Tehdy nové revoluční možnosti
 - elektronického sběru dat
 - velká vyčítací rychlost, mnoho srážek, šance vidět vzácné procesy.



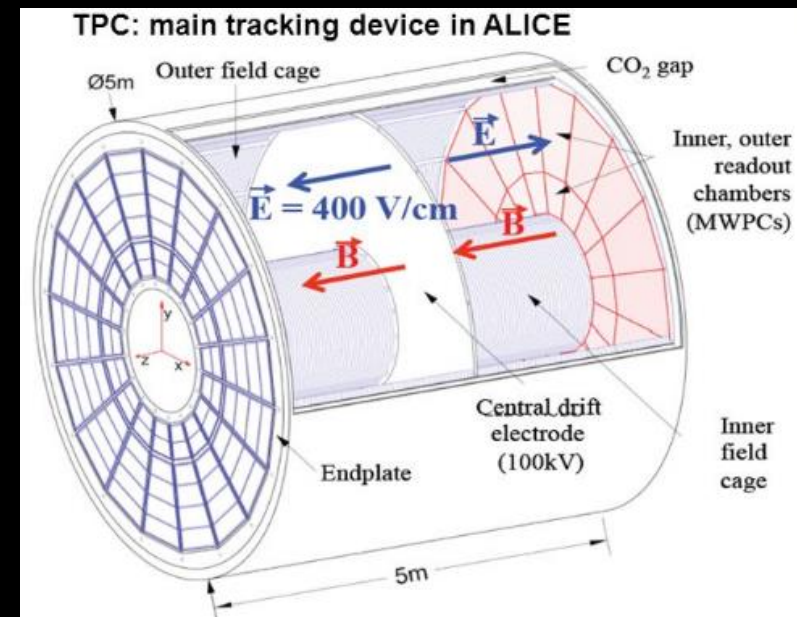
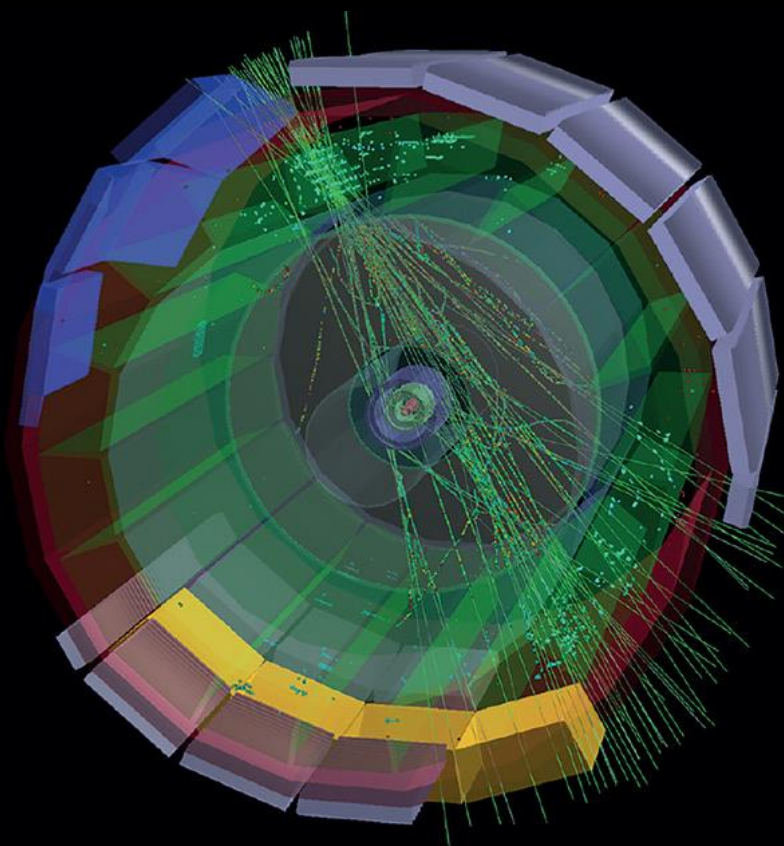
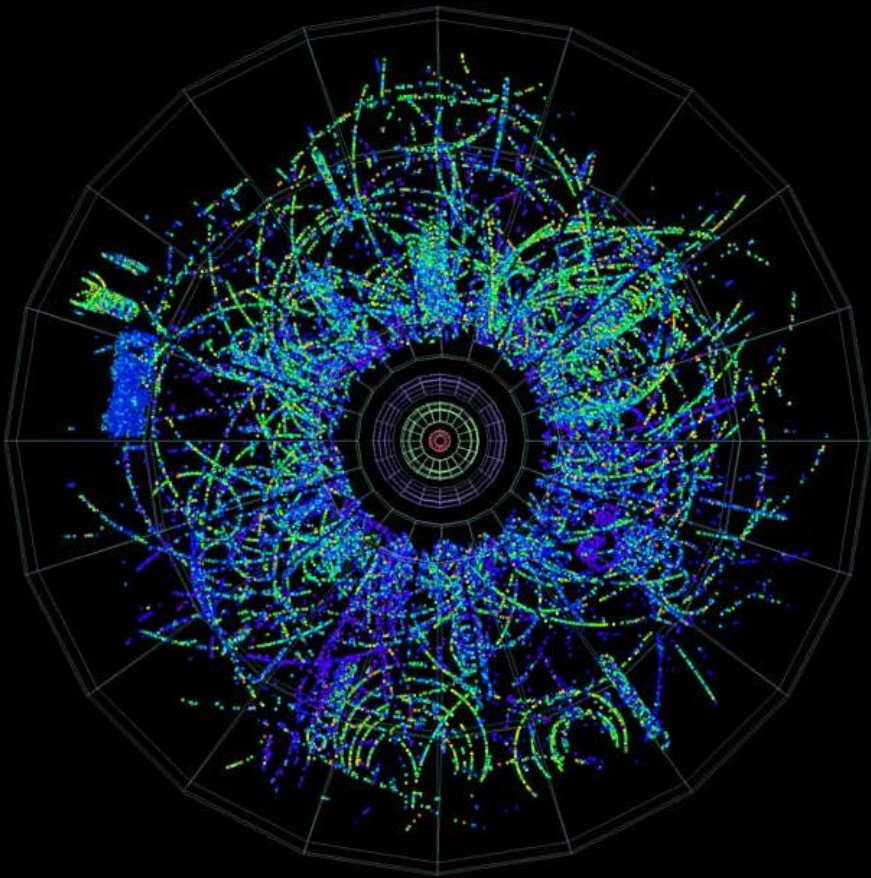
Driftová komora

- Měřením času příchodu signálu v drátech lze dopočítat pozici přesně i s menším počtem drátů.
- Méně vyčítaných kanálů, náročnější elektronika.



<https://www.sciencephoto.com/media/1063/view/drift-chamber-wires-of-mark-ii-detector-slab>

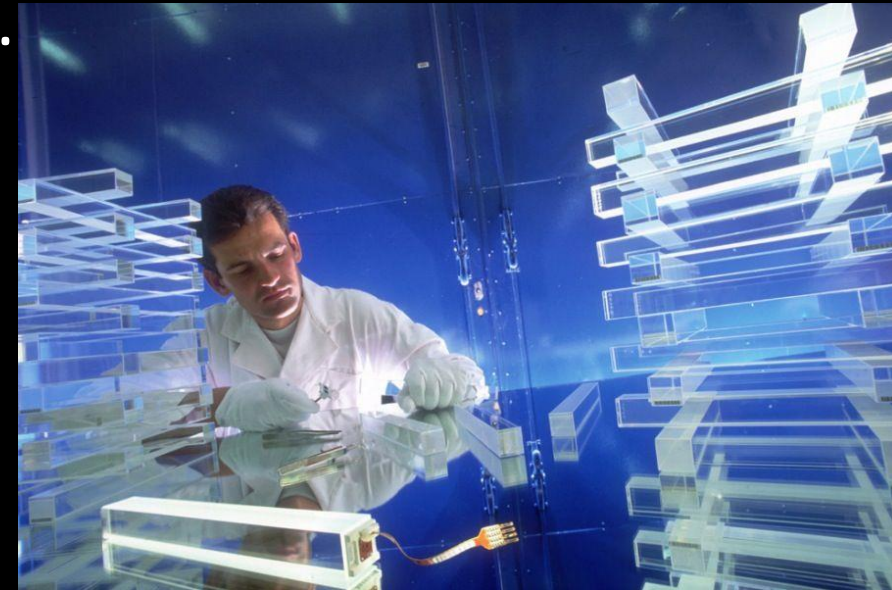
Časové projekční driftové komory



Experiment ALICE, CERN

Scintilační detektory

- Průchod částic organickým či anorganickým scintilátorem excituje molekuly, které v řádu nanosekund vyzáří scintilační světlo.
- Plastové, kapalné, NaI, PbWO_4 .
- Rychlé, ne vždy radiačně odolné.
- Signál získávají fotonásobiče, PhotoMultiplier Tubes.

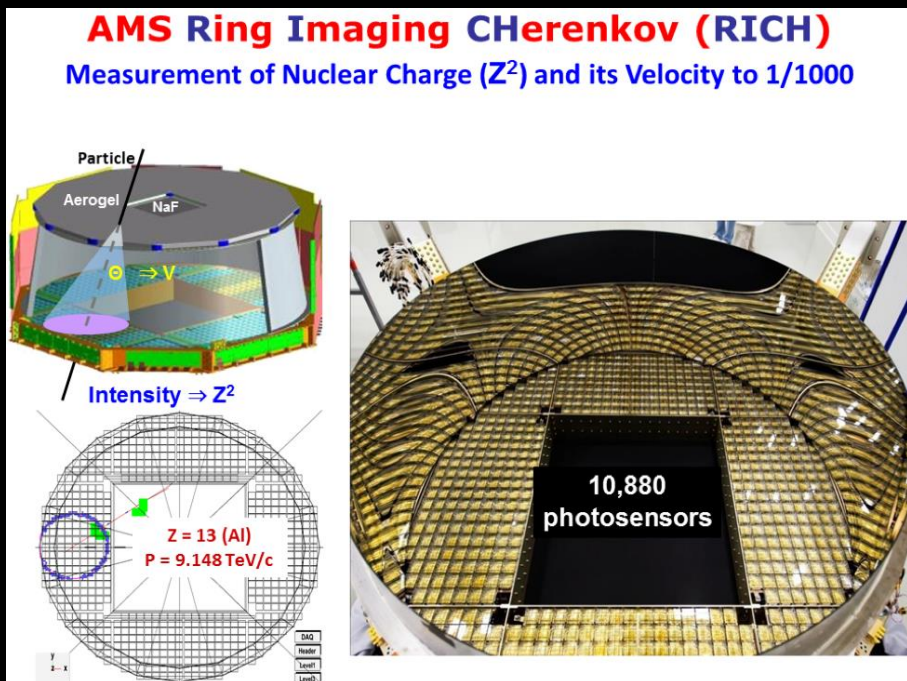
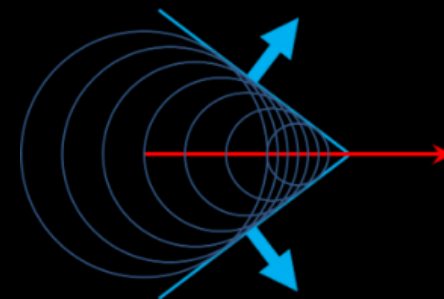


<https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators>

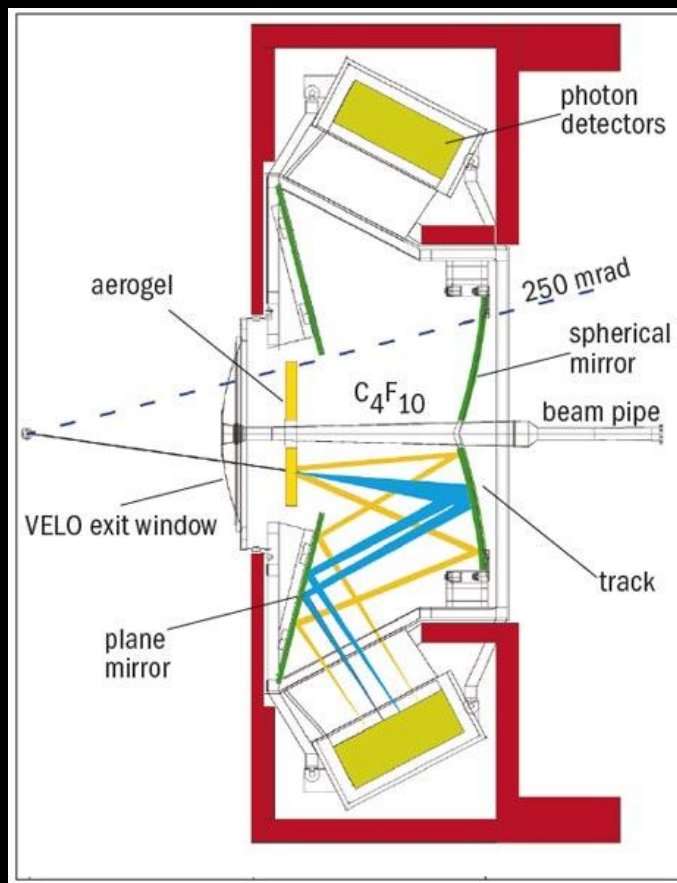
Elektromagnetický kalorimetr experimentu CMS

Čerenkovské detektory

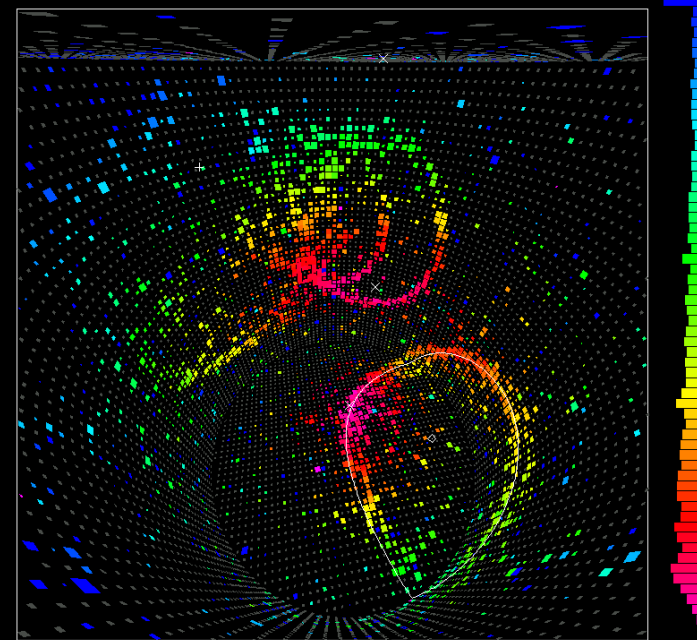
- Charakteristické kroužky světla
- Prahovost v závislosti na rychlosti
- Identifikace částic



Experiment AMS-II @ ISS



Experiment LHCb



Experiment Super Kamiokande

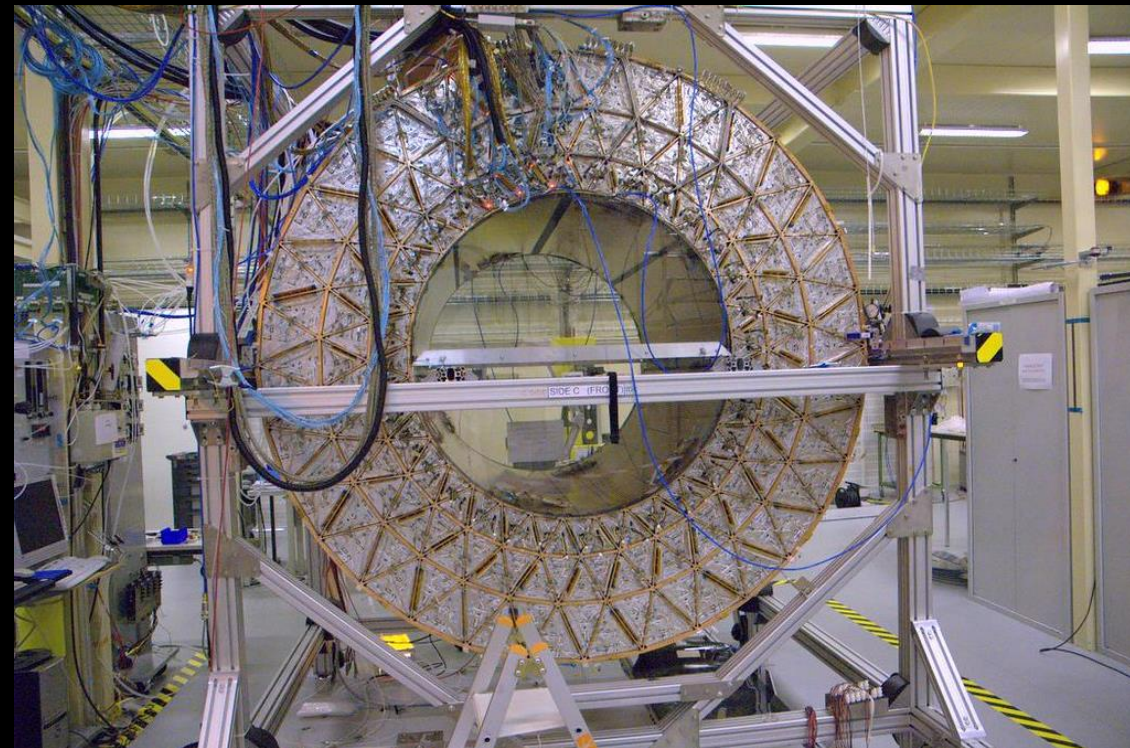
Přechodové záření

- ATLAS transition radiation tracker.
- Intenzita záření na rozhraní dielektrik, úměrná relativistickému faktoru.
- Možnost odlišení / identifikace částic, měření drah.



<https://atlas.cern/updates/news/sct-barrel-inserted-trt>

12.9.2022



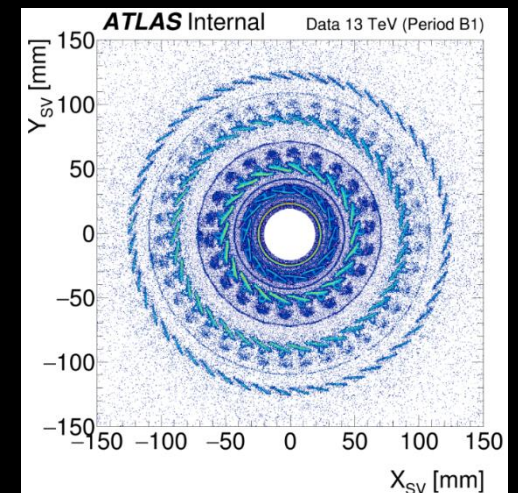
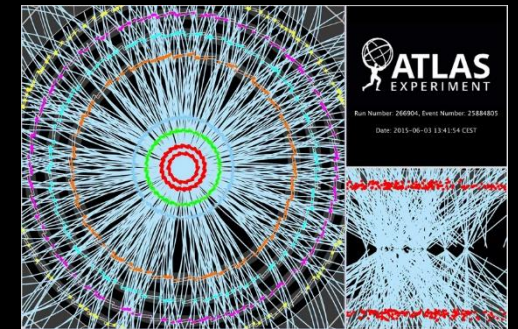
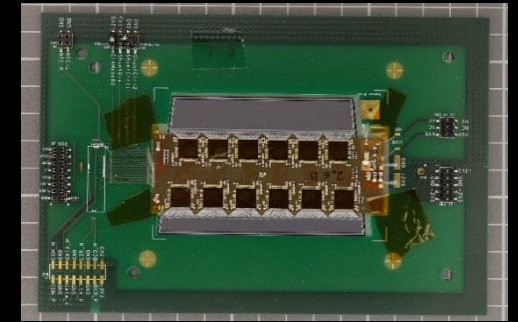
<https://www.flickr.com/photos/solarnu/56817514>

Polovodičové dráhové detektory

- Měření polohy a hybnosti částic
- Smysl zakřivení drah v magnetickém poli: náboj.

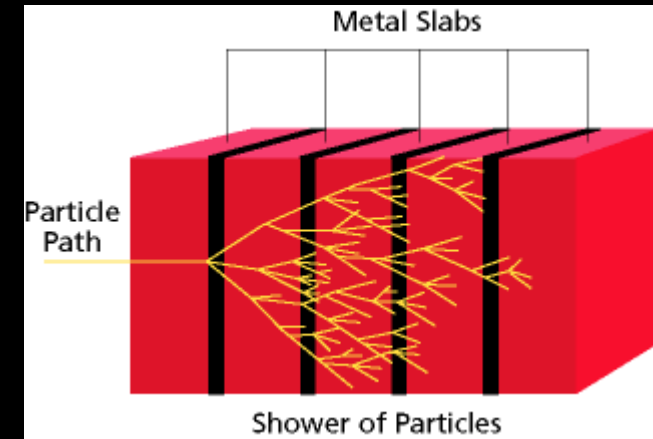
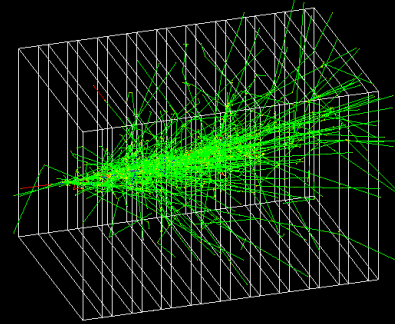


<https://atlas.cern/Discover/Detector/Inner-Detector>

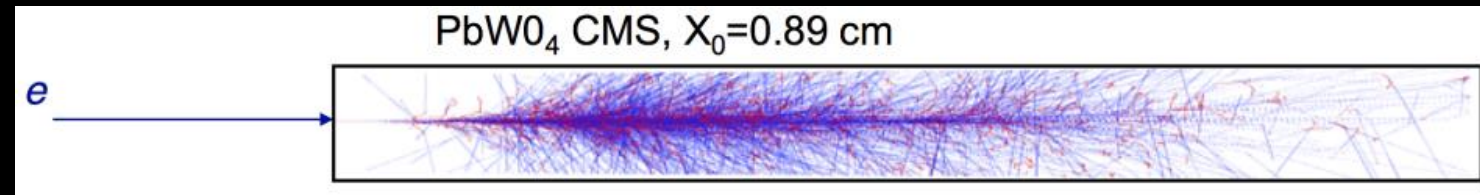


Kalorimetry

- Destruktivní měření energie částic.
- Různé typy dle detekční techniky
 - Krystaly, scintilátory, kapalný argon
 - S pláty absorberu (železo, olovo, měď, uran...)
- Kalorimetry pro elektrony vs. hadrony.
- Atmosféra jako kalorimetr.
- Rozvoj spršek částic.



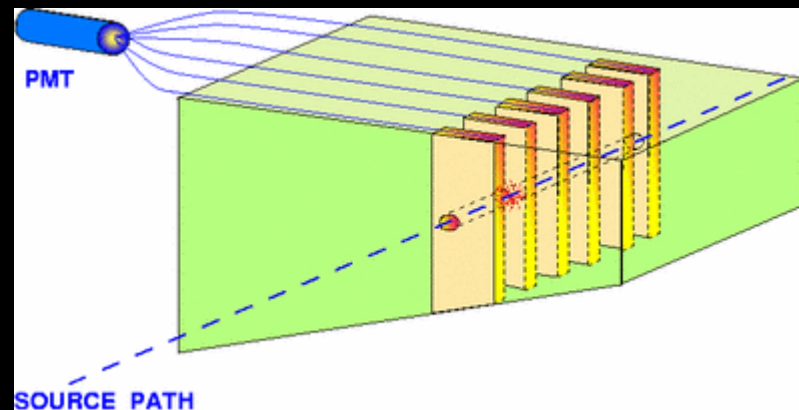
<https://ed.fnal.gov/projects/labyrinth/games/ghostbustin/calorimeter/intro4.html?name=Marilyn+Fox>



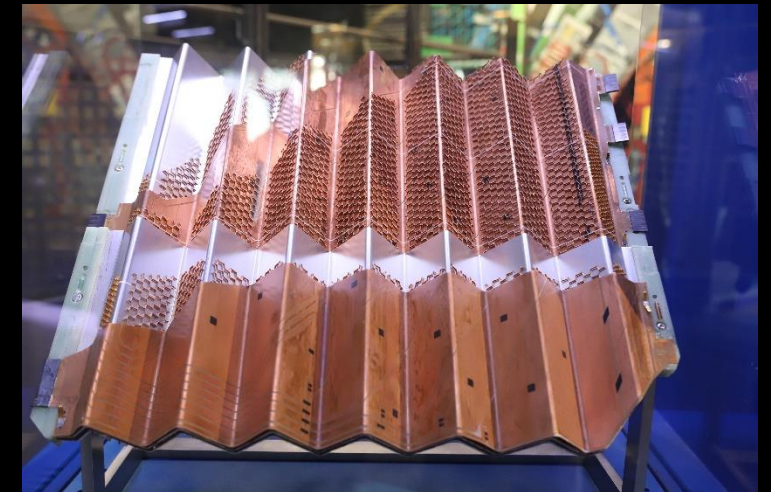
https://www.physi.uni-heidelberg.de/~sma/teaching/GraduateDays2017/sma_Detectors_4_Calorimeters.pdf



12.9.2022



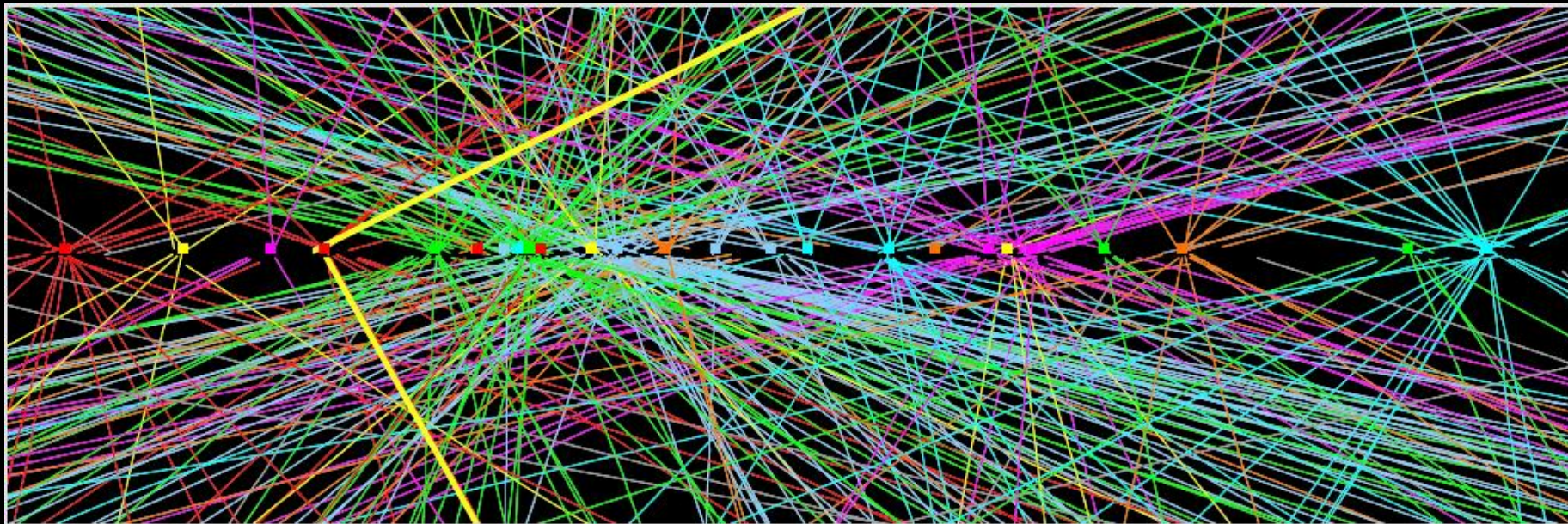
Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN



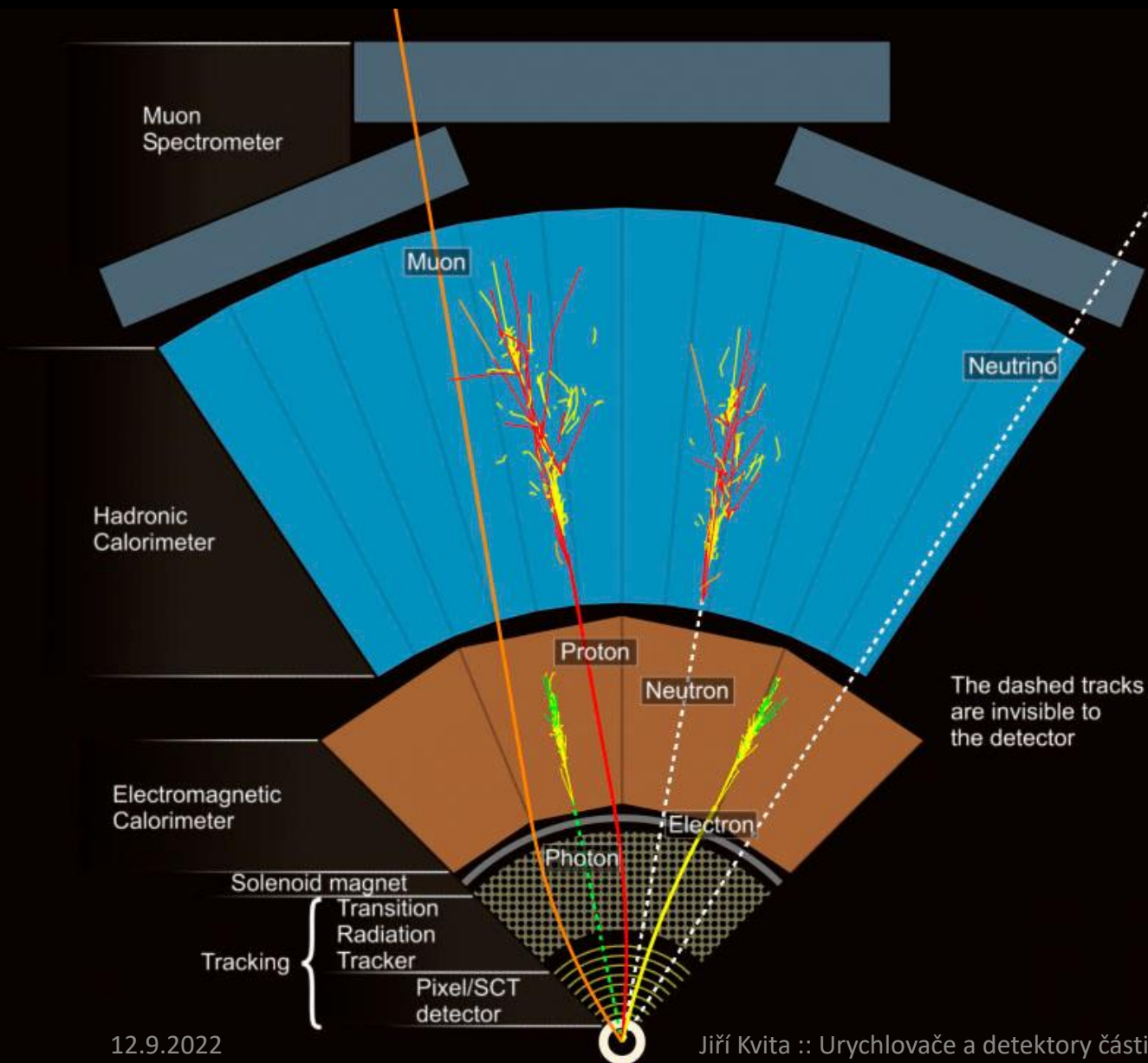
48

Interakce v srdci experimentu ATLAS

- Až 100 interakcí na jednom snímku z detektoru při jednom průchodu shluků částic (tzv. pile-up).
- Higgsův boson produkován cca v jedné srážce z 10 miliard, tj cca každých 5 min.
 - (někde v atmosféře každých 8s:)

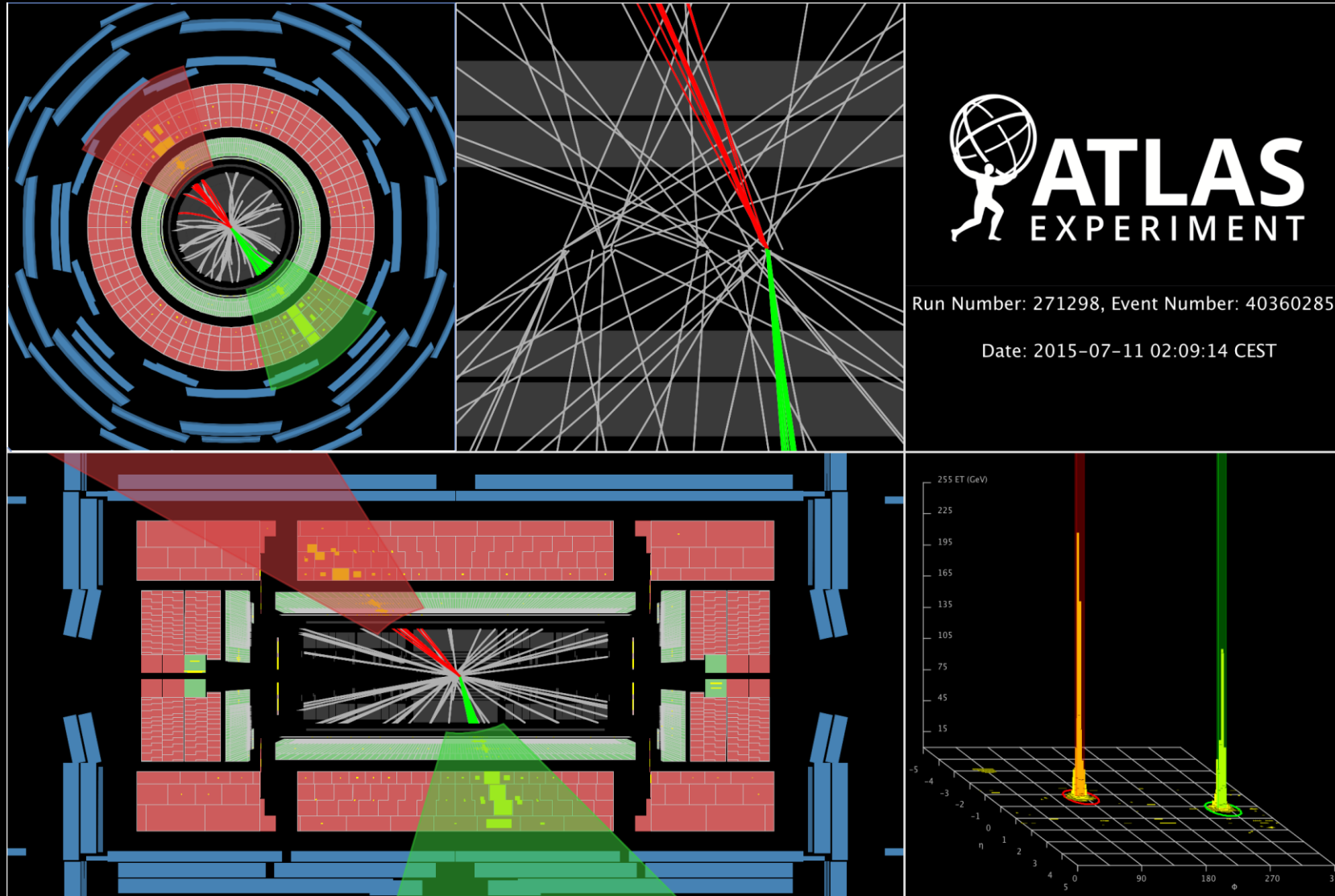


Jak identifikujeme částice

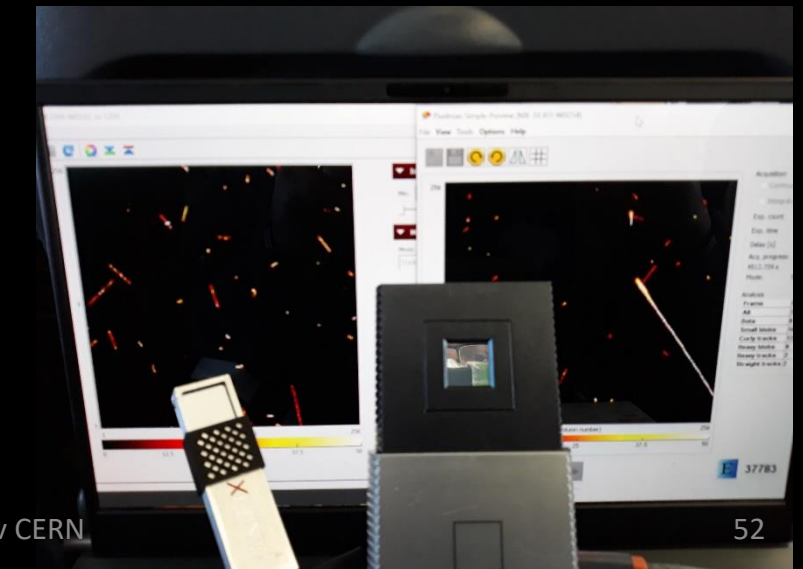


- Částice většinou nejsou takto ideálně izolované.
- V praxi se definuje jejich „ID“ či kvalita např. na základě toho, jak moc dalších drah či energie je okolo mionu či elektronu.

Jak ATLAS „vidí“ události



Cesta do laboratoře CERN



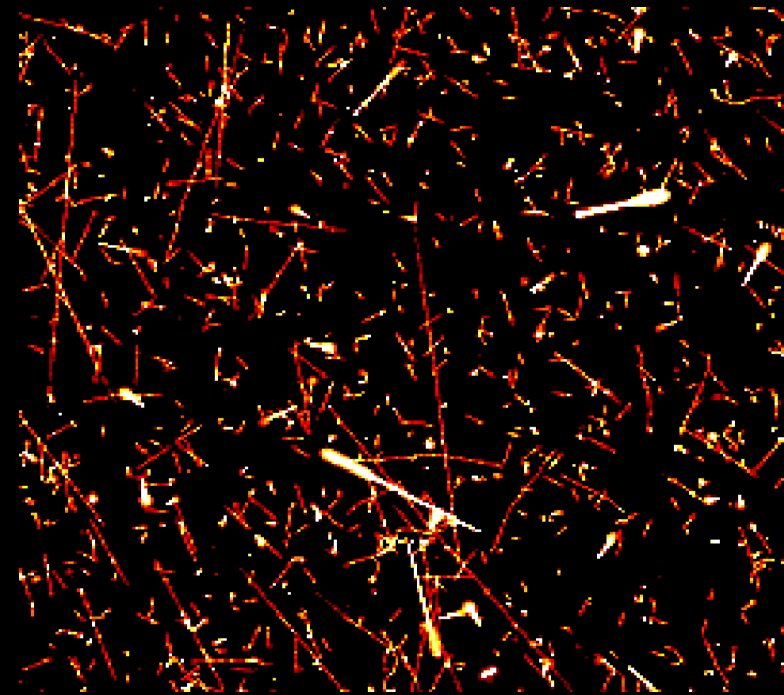
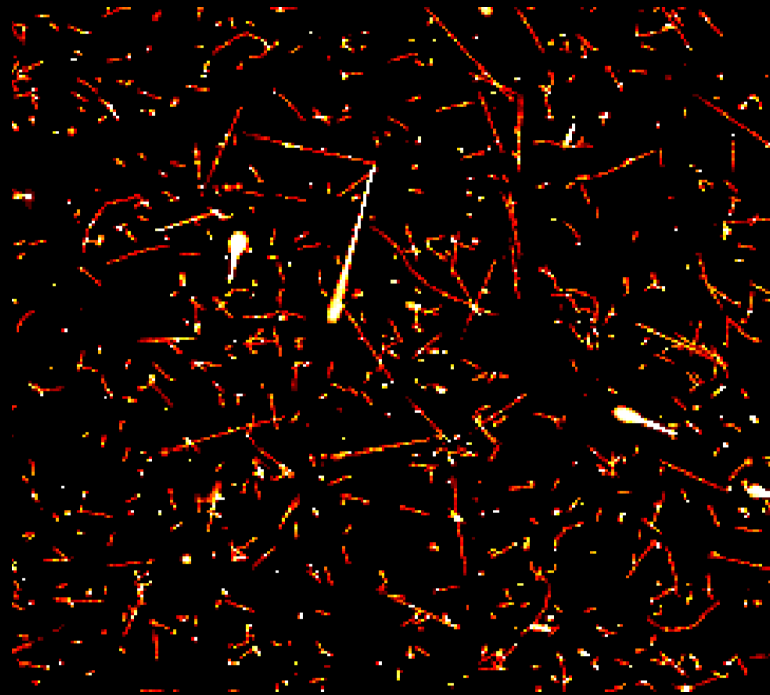
V letadle

Miony i silně ionizující částice

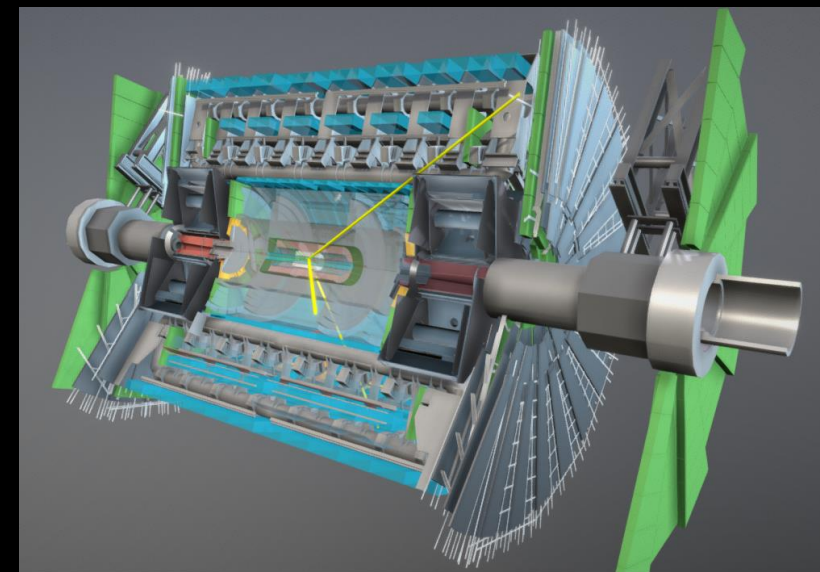
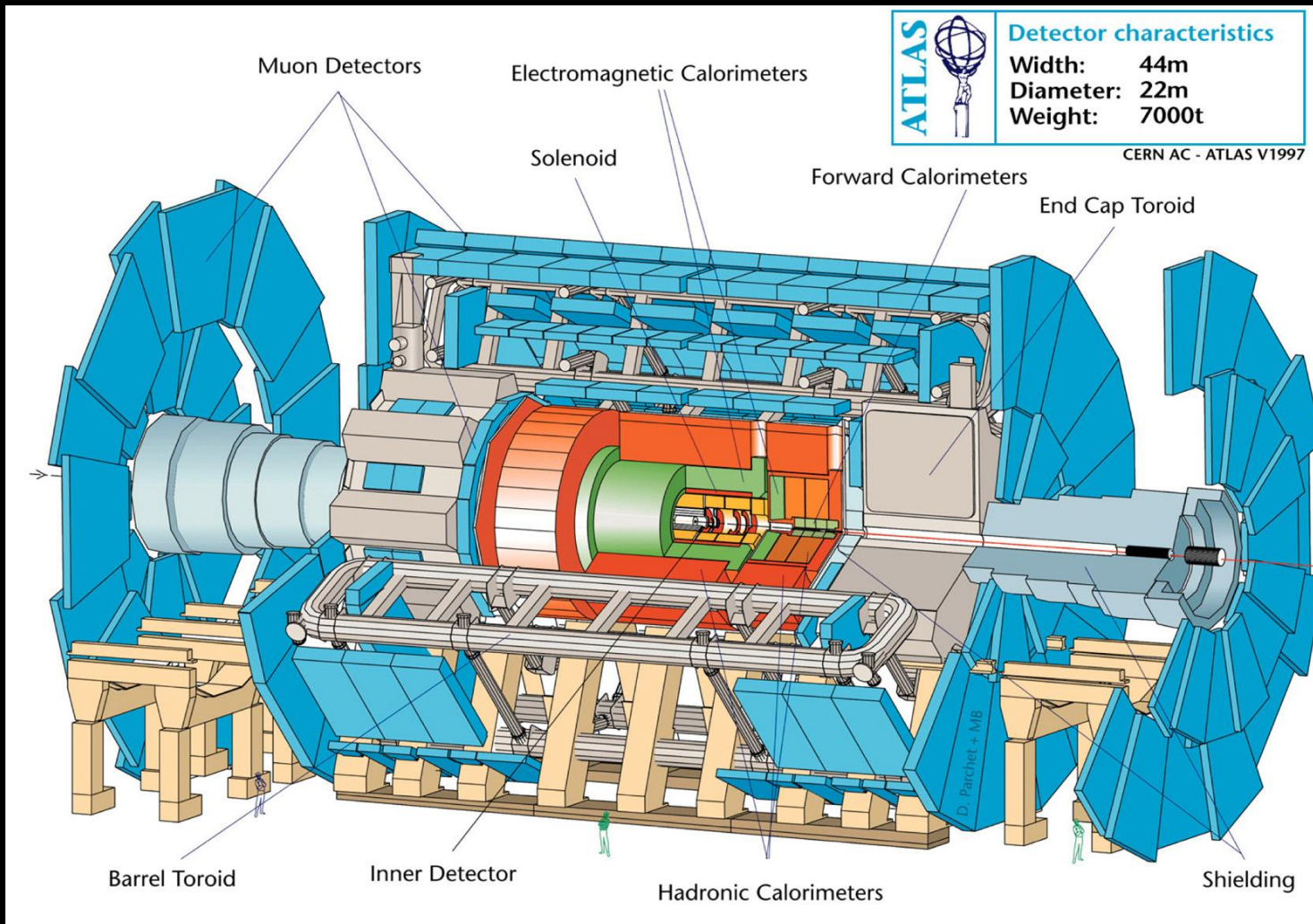
Let přes Atlantik ~ jeden rentgen plic

Pozadí: 0,14 $\mu\text{Sv/h}$

V letadle: 1,7 $\mu\text{Sv/h}$

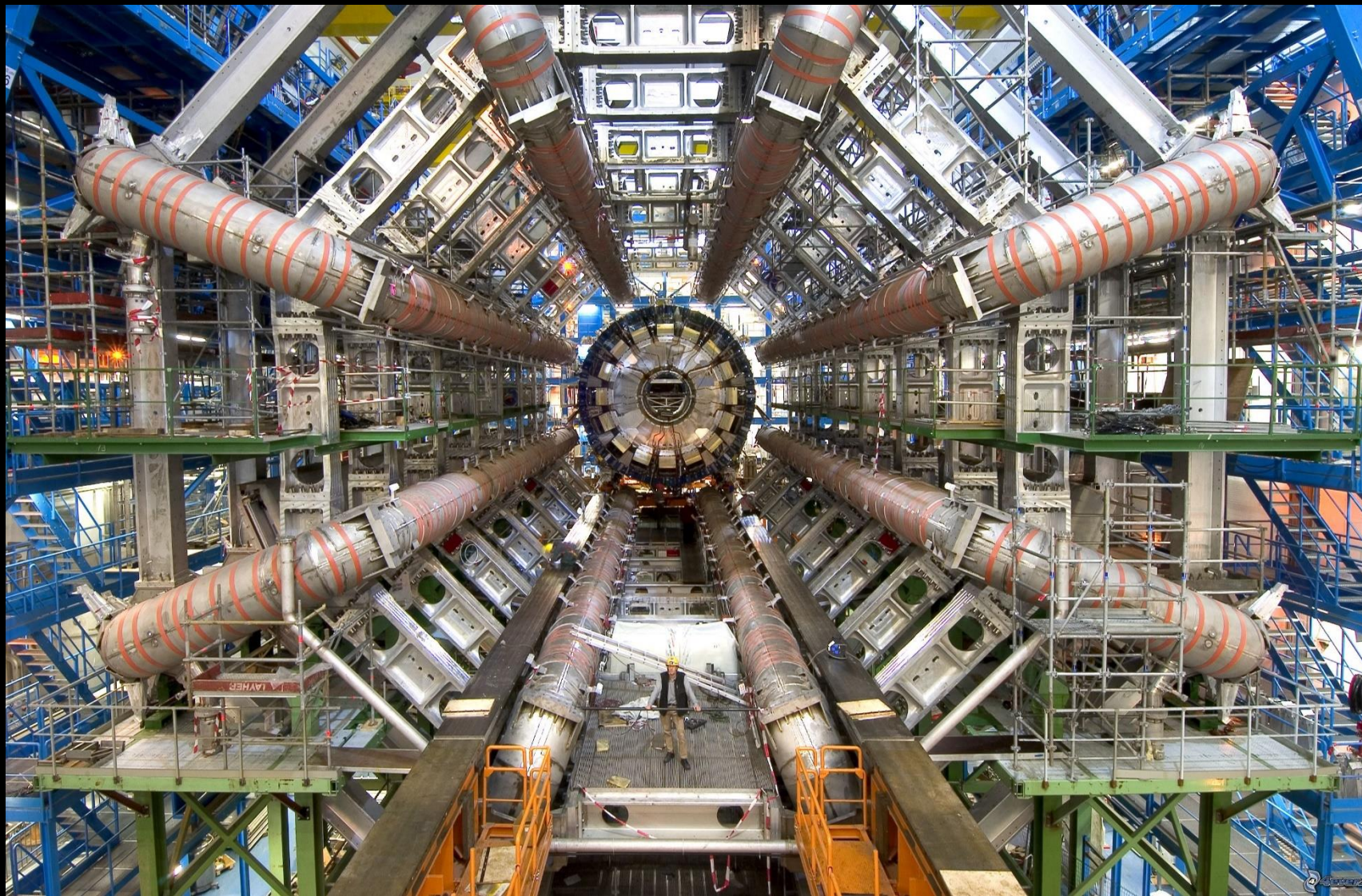


Experiment ATLAS

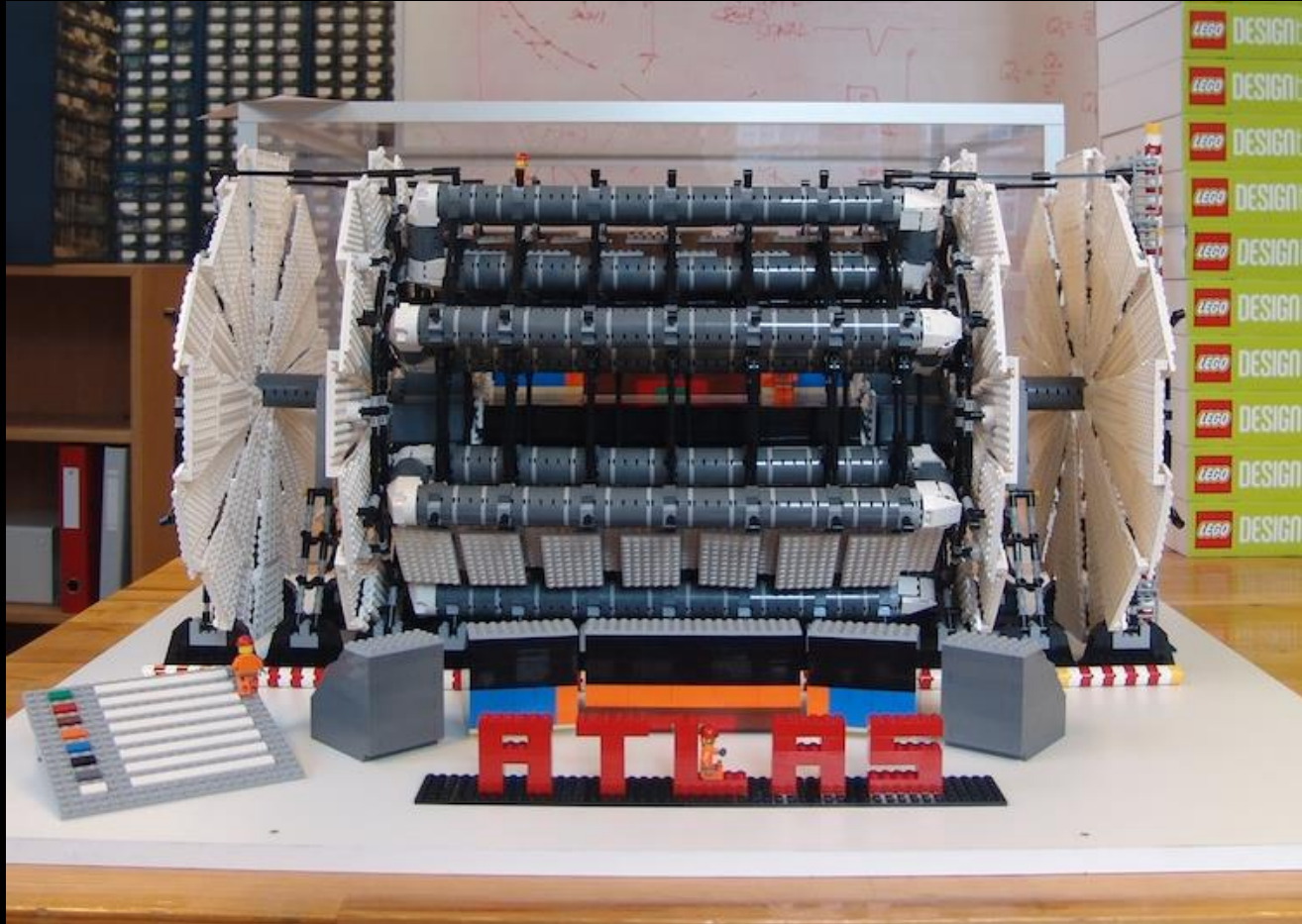


<https://sketchfab.com/3d-models/cern-atlas-detector-e3c13e9a777c4c1db14cd75cf61855fb>

Experiment ATLAS

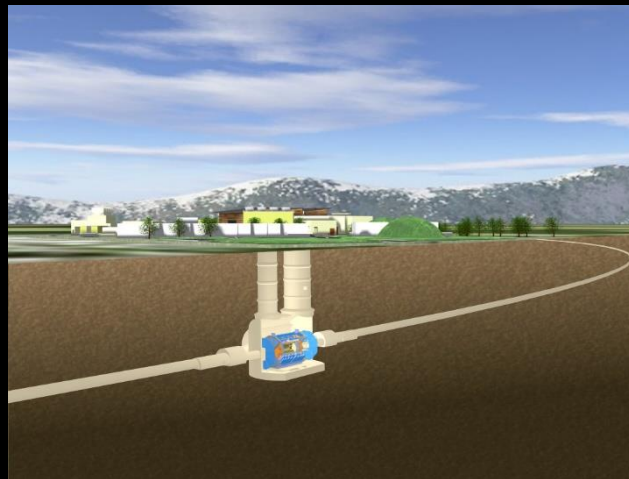


Experiment ATLAS



<https://build-your-own-particle-detector.org/models/atlas-lego-model/>

Experiment ATLAS



Begin of Run 3 13.6 TeV collisions on 5 July 2022



12.9.2022

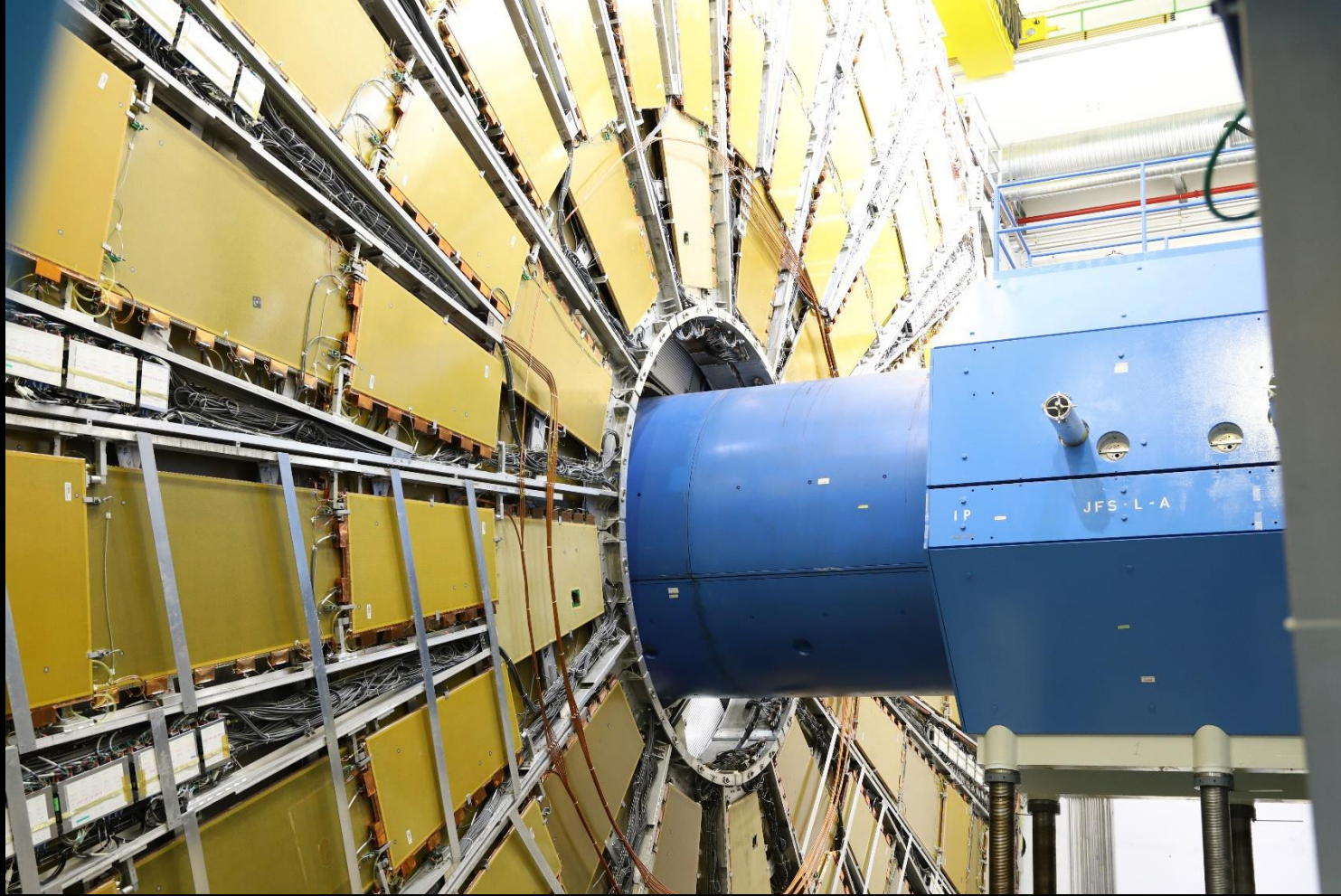
Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN

57

Experiment ATLAS

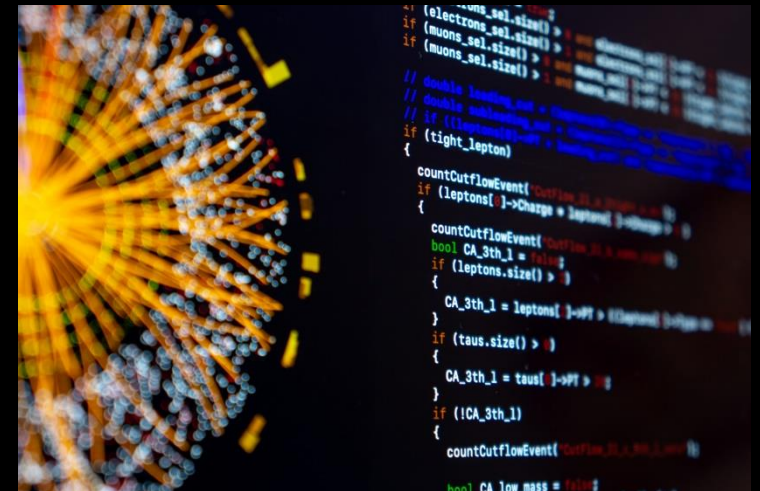


Experiment ATLAS



Sběr dat, rekonstrukce

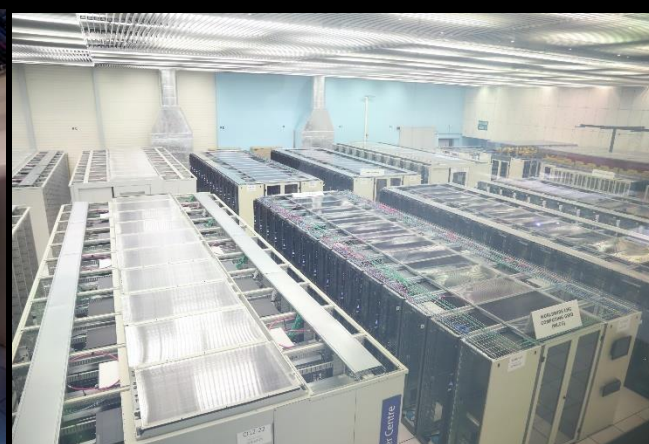
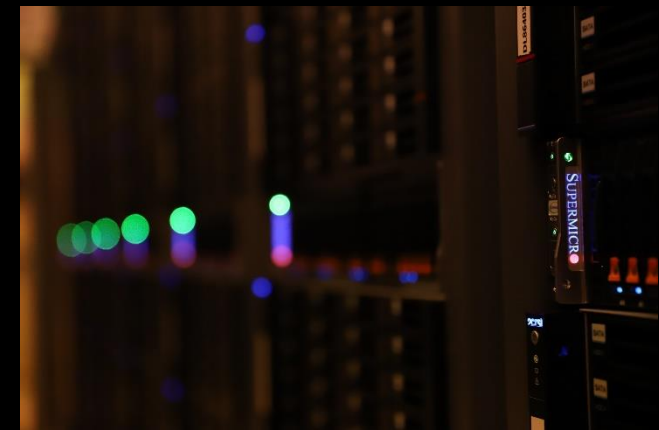
- 40M srážek za sekundu nelze všechny zaznamenat
- Online: Nutnost rychlého výběru zajímavých událostí
- = Trigger
 - Dedikovaný HW, 2.5 mikrosekundy na rozhodnutí
 - SW: 40k CPUs, redukuje záznam na 1000 Hz
- Offline: Rekonstrukce drah a fyzikálních objektů ze zásahů v dráhovém detektoru, mionových komorách, zaznamenané energii v celách v kalorimetru.



<https://atlas.cern/Discover/Detector/Trigger-DAQ>

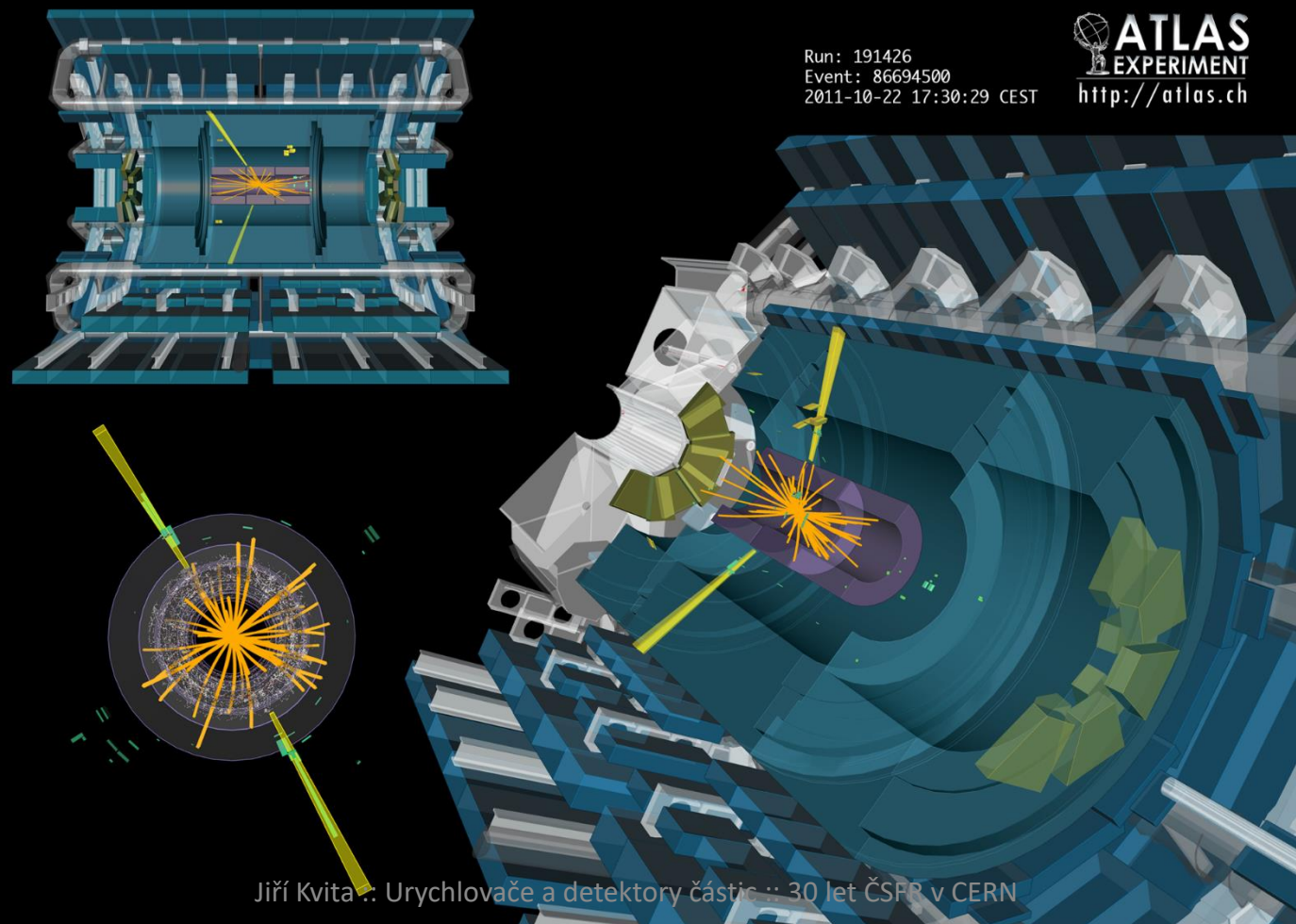
Výpočetní centra

- Detailní simulace celého detektoru
- Paralelní výpočty po celém světě: GRID
- Desítky PB disků, data dlouhodobě uchovávána na magnetických páscích.
 - Speciální robot vyzvedne požadovanou kazetu
 - Většina dat přístupných na discích a GRIDu

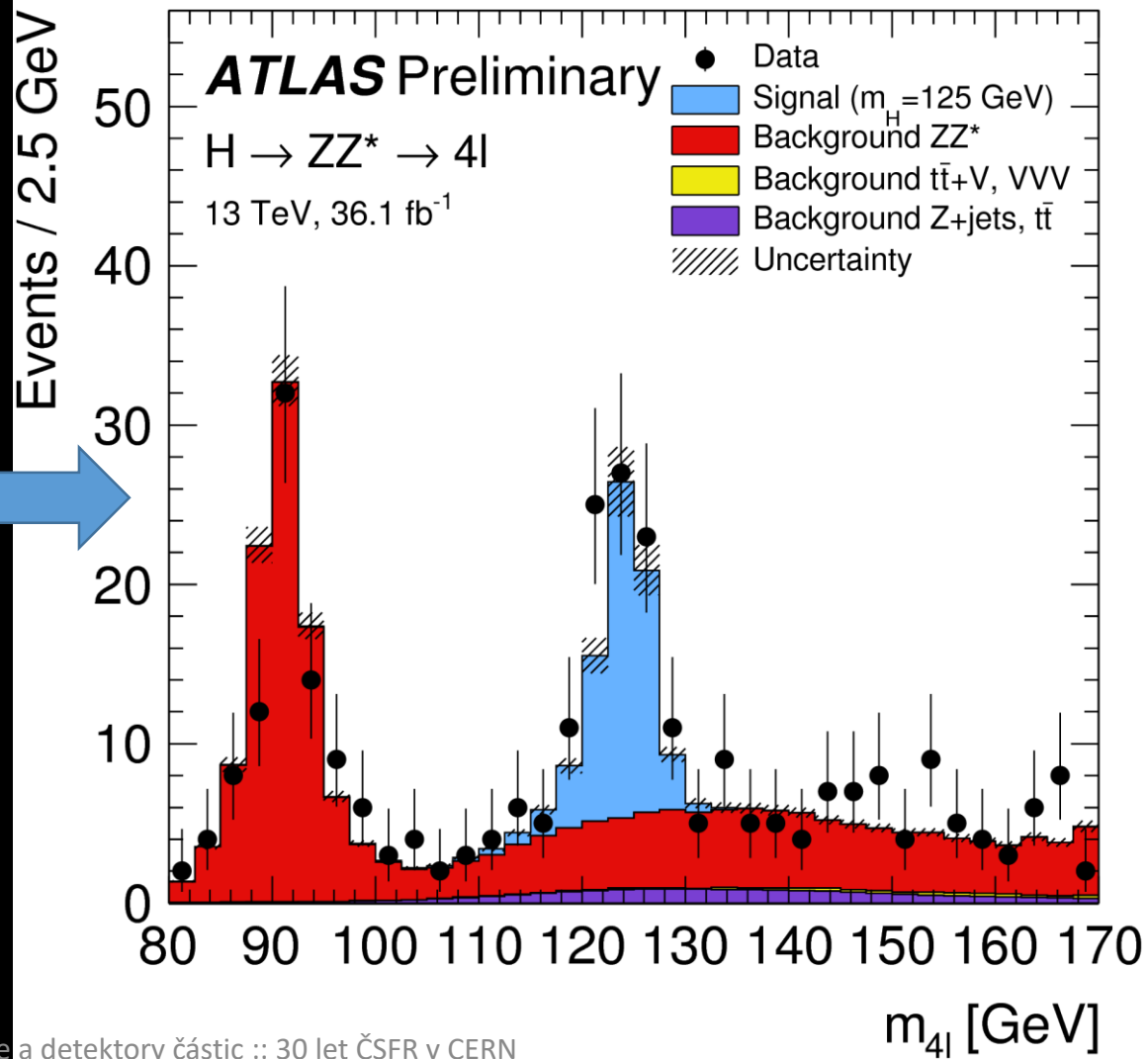
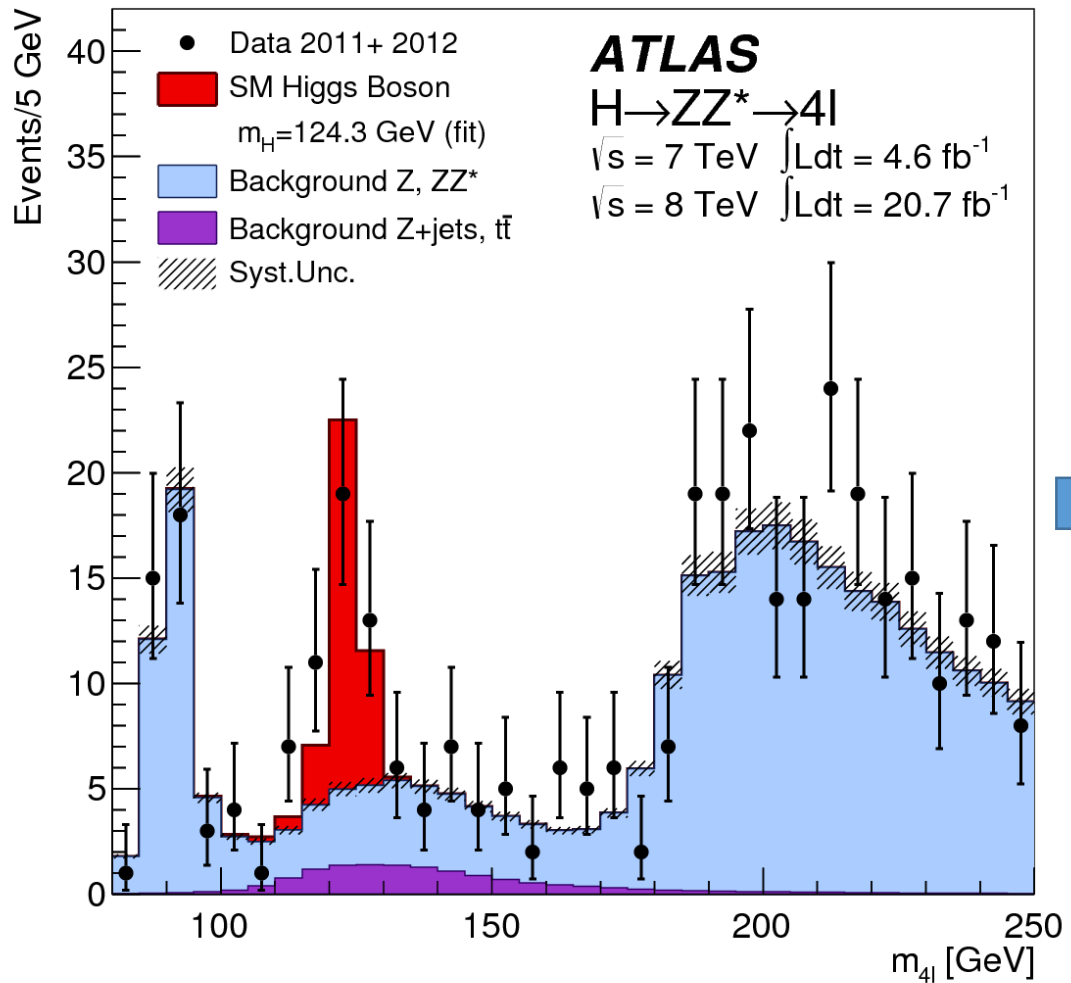


Higgsův boson

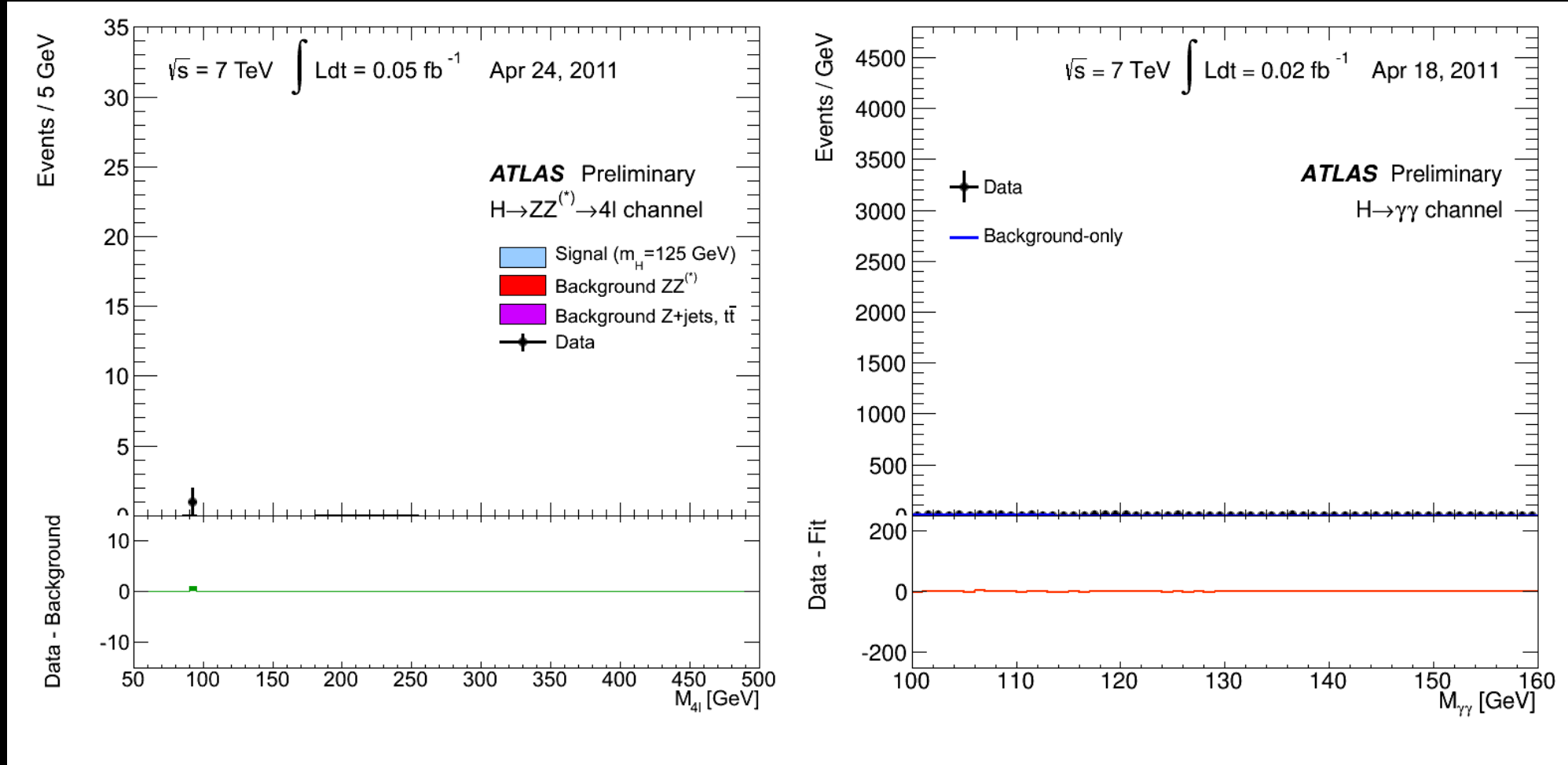
- Rozpad Higgsova bosonu na dva fotony.



Higgsův boson



Higgsův boson



Higgsův boson

- BEH boson (Brout, Englert, Higgs).
(a také Gerald Guralnik, C. R. Hagen, a Tom Kibble)

Fabiola Gianotti a Peter Higgs, 2012



12.9.2022

The Nobel Prize in Physics 2013
François Englert, Peter Higgs

Share this: [f](#) [G+](#) [t](#) [+](#) [e](#) 2K

The Nobel Prize in Physics 2013




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




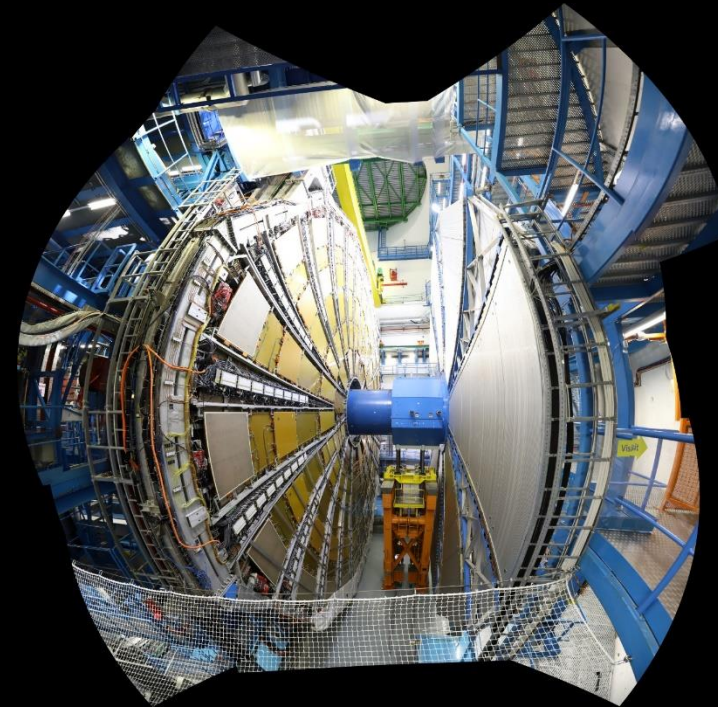
Photo: A. Mahmoud
Peter W. Higgs
Prize share: 1/2

Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN

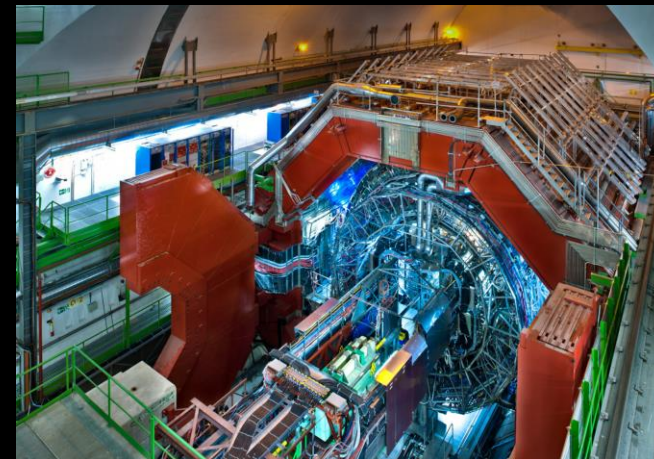
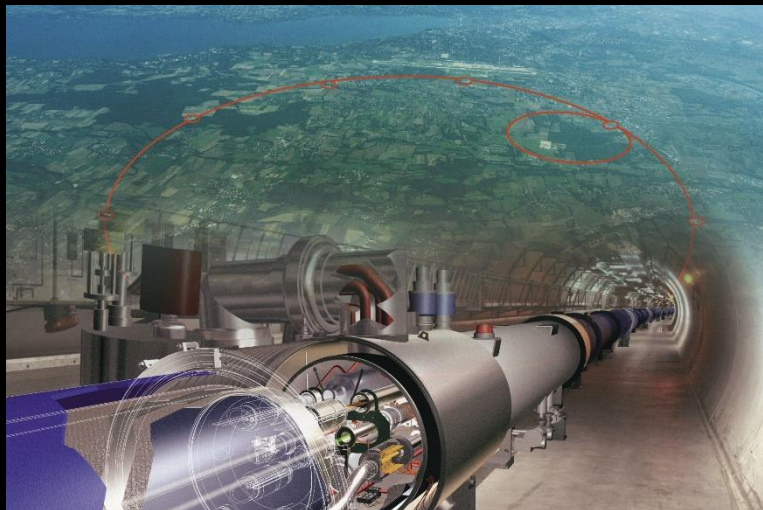


Robert Brout
(1928 -- 2011)

65

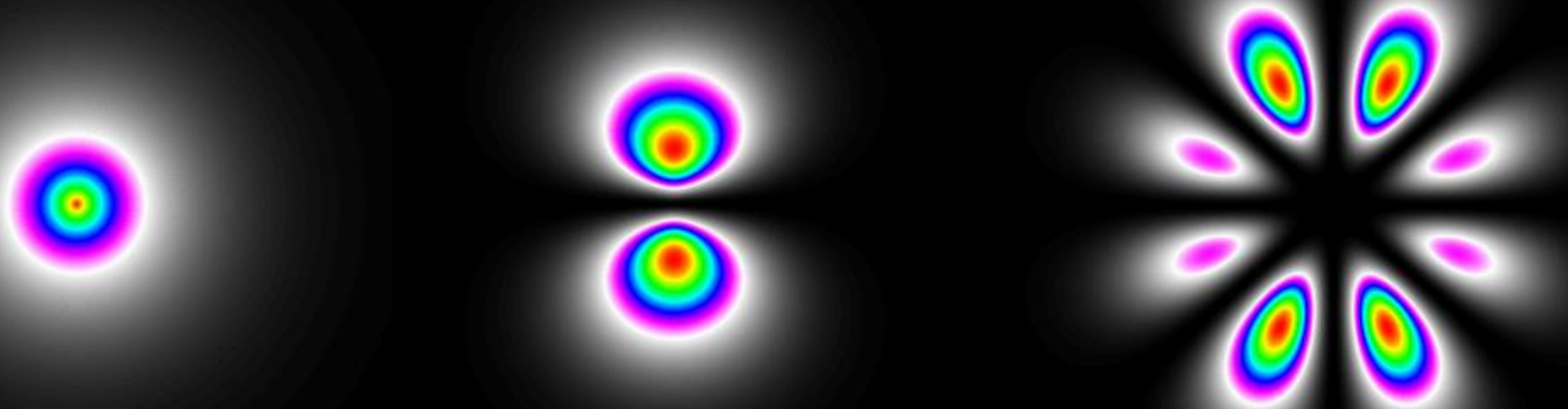


Děkuji za pozornost!
ČSFR @ CERN :: 1992 -- 2022



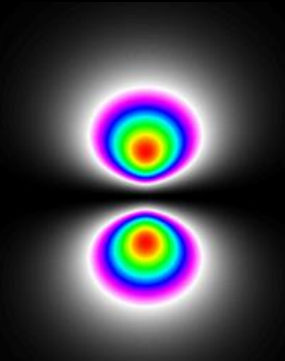
Backup slides

Atom – stojaté vlny elektronů kolem jádra

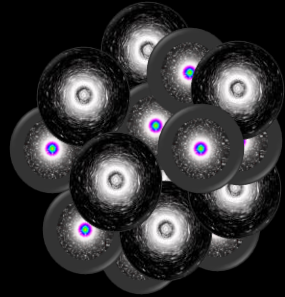


Škály délek a energií

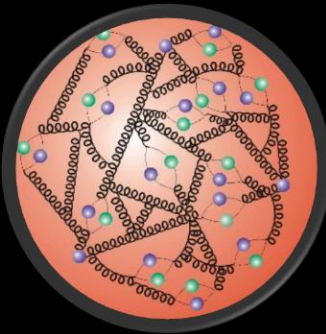
- Atomový obal
 - 10 nm = 10^{-8} m
 - 10 eV – keV



- Atomové jádro
 - 100 fm = 10^{-13} m
 - 10 keV – 1 MeV



- Struktura protonu
 - 1 fm = 10^{-15} m
 - 1 GeV

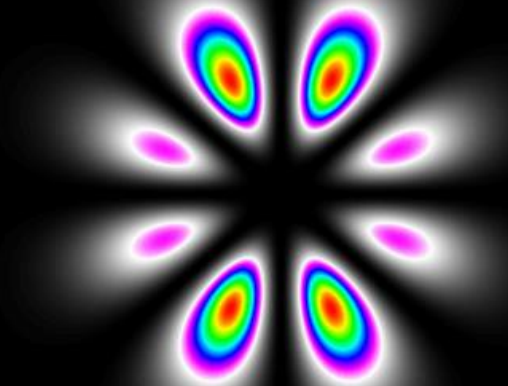
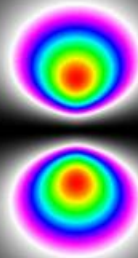
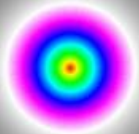


1 elektronvolt: kinetická energie, kterou získá částice s náboje elektronu po urychlení napětím 1 V.

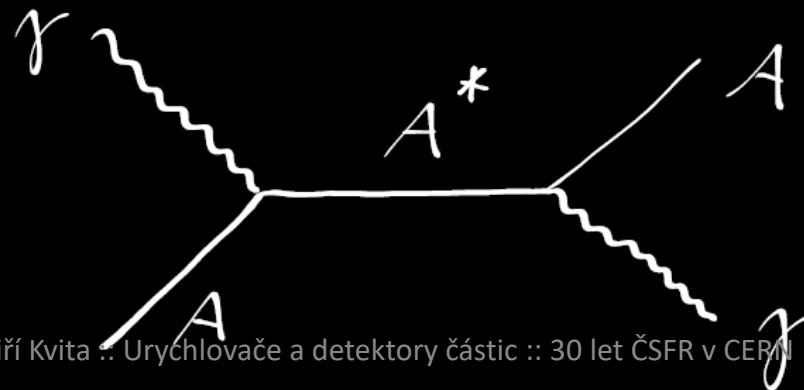
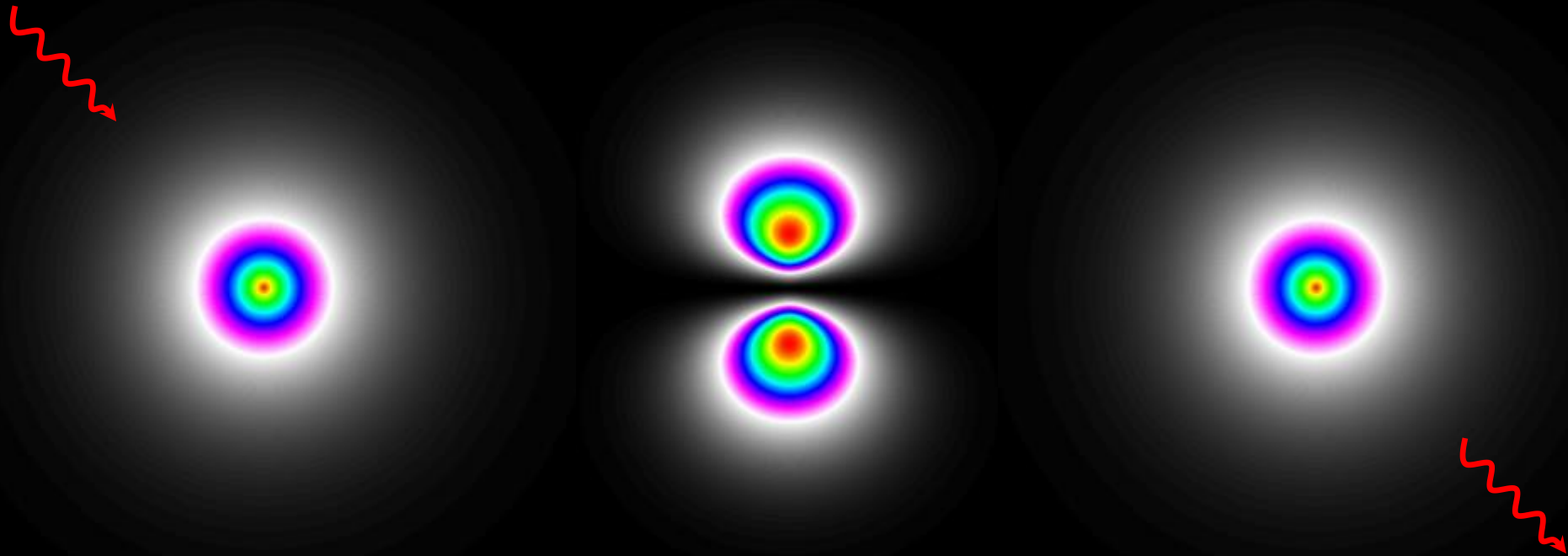
$$1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Elektron

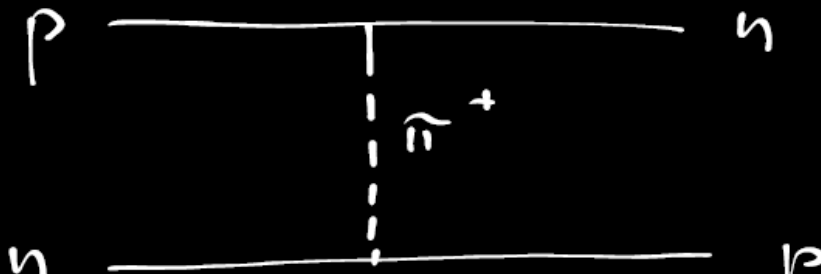
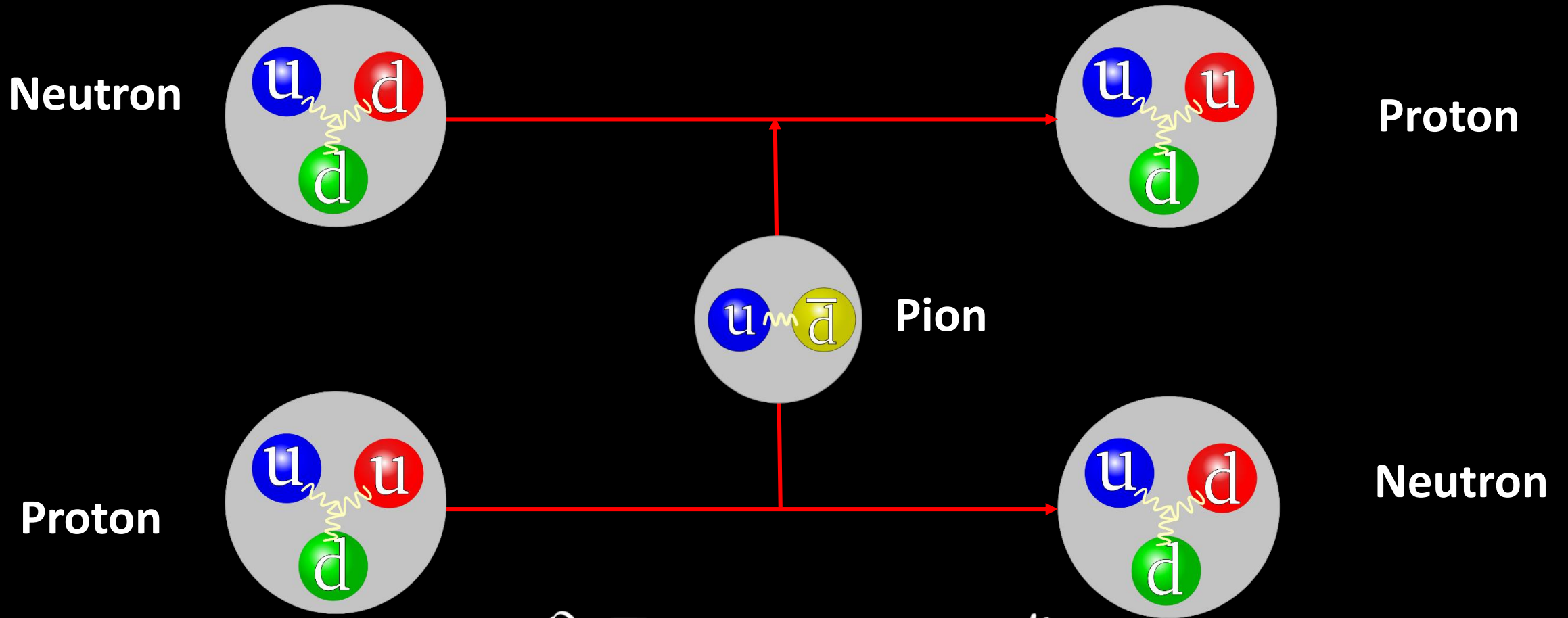
- Elektron:
 - Náboj -1 jednotkách elementárního náboje.
 - Klidová energie 0,511 MeV.
 - Bodová částice bez vnitřní struktury!
 - „Necítí“ silnou (jadernou) interakci.
 - Spin $\frac{1}{2}$.



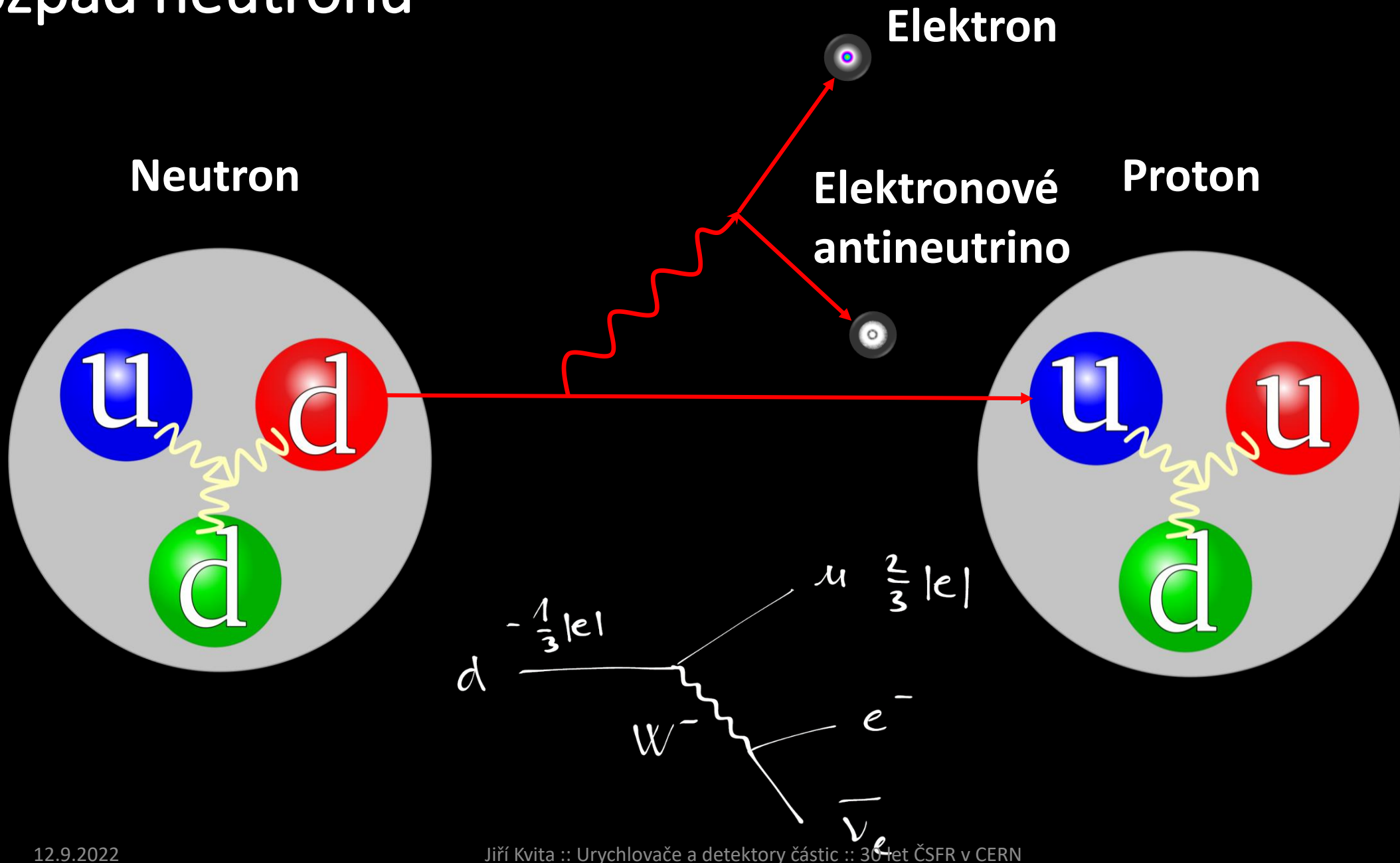
Posviťme si na atom!



Proton a neutron

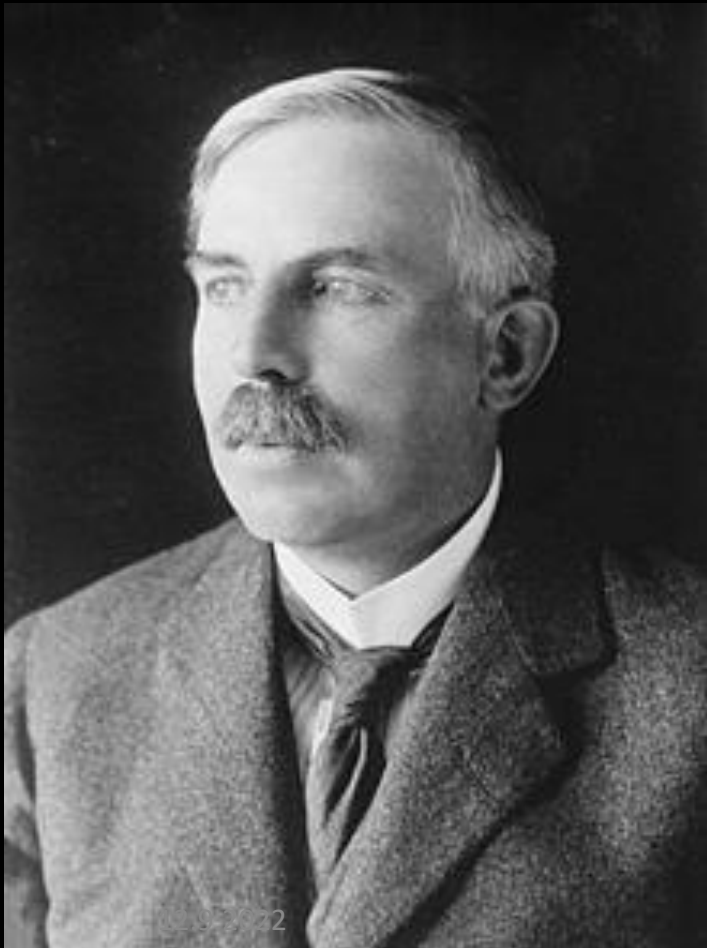


Rozpad neutronu

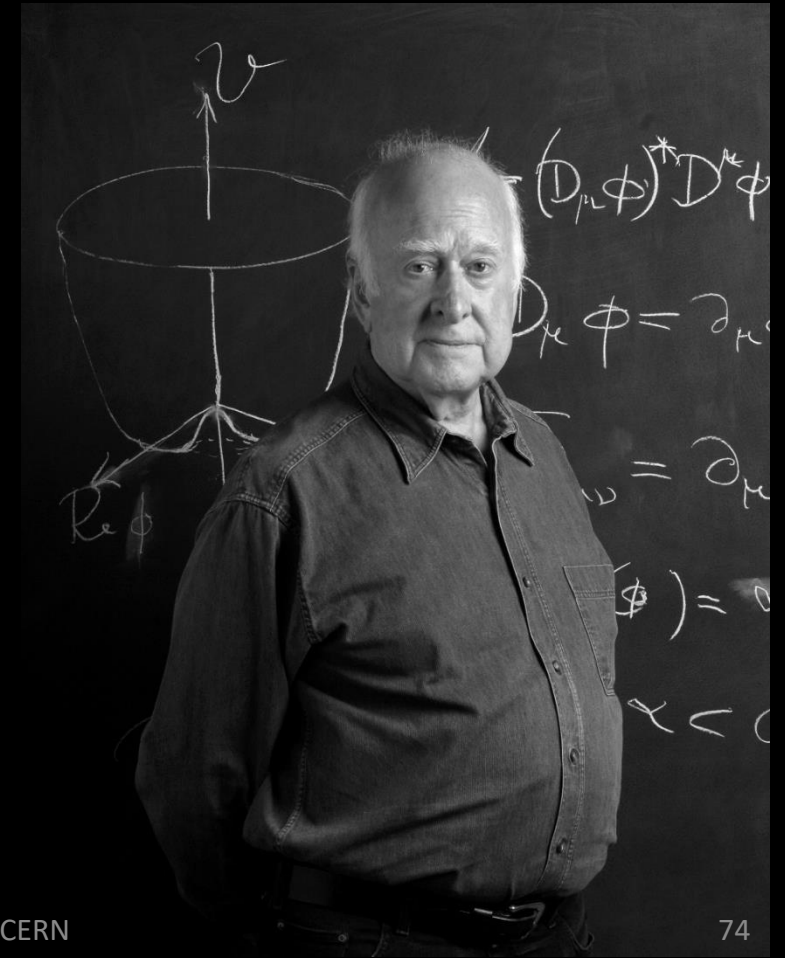


Rozptylový experiment

- Aneb od E. Rutherforda k R. Hofstadterovi a P. Higgsovi.
- Od alfa částic a elektronů ke srážkám protonů na urychlovači LHC.



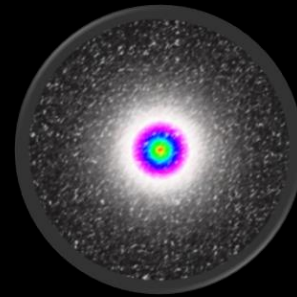
Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN



Proton a neutron

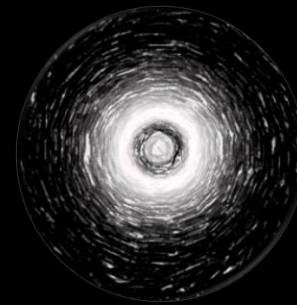
- Proton:

- Náboj +1 v jednotkách elementárního náboje.
- Střední poloměr okolo 1 fm.
- Klidová energie 938 MeV.
- Spin $\frac{1}{2}$.
- Kvarkový obsah *uud*.



- Neutron:

- Nulový náboj.
- Střední poloměr okolo 1 fm.
- Klidová energie 939 MeV.
- Spin $\frac{1}{2}$.
- Kvarkový obsah *udd*.



Velikost protonu

- Jak si posvítit na proton? – elektrony z urychlovače! 😊
- Robert Hofstadter, 1956, laboratoř SLAC, USA.

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 102, NUMBER 3

MAY 1, 1956

Elastic Scattering of 188-Mev Electrons from the Proton and the Alpha Particle*†‡§||¶

R. W. McALLISTER AND R. HOFSTADTER

Department of Physics and High-Energy Physics Laboratory, Stanford University, Stanford, California

(Received January 25, 1956)

The elastic scattering of 188-Mev electrons from gaseous targets of hydrogen and helium has been studied. Elastic profiles have been obtained at laboratory angles between 35° and 138° . The areas under such curves, within energy limits of ± 1.5 Mev of the peak, have been measured and the results plotted against angle. In the case of hydrogen, a comparison has been made with the theoretical predictions of the Mott formula for elastic scattering and also with a modified Mott formula (due to Rosenbluth) taking into account both the anomalous magnetic moment of the proton and a finite size effect. The comparison shows that a finite size of the proton will account for the results and the present experiment fixes this size. The root-mean-square radii of charge and magnetic moment are each $(0.74 \pm 0.24) \times 10^{-13}$ cm. In obtaining these results it is assumed that the usual laws of electromagnetic interaction and the Coulomb law are valid at distances less than 10^{-13} cm and that the charge and moment radii are equal. In helium, large effects of the finite size of the alpha-particle are observed and the rms radius of the alpha particle is found to be $(1.6 \pm 0.1) \times 10^{-13}$ cm.

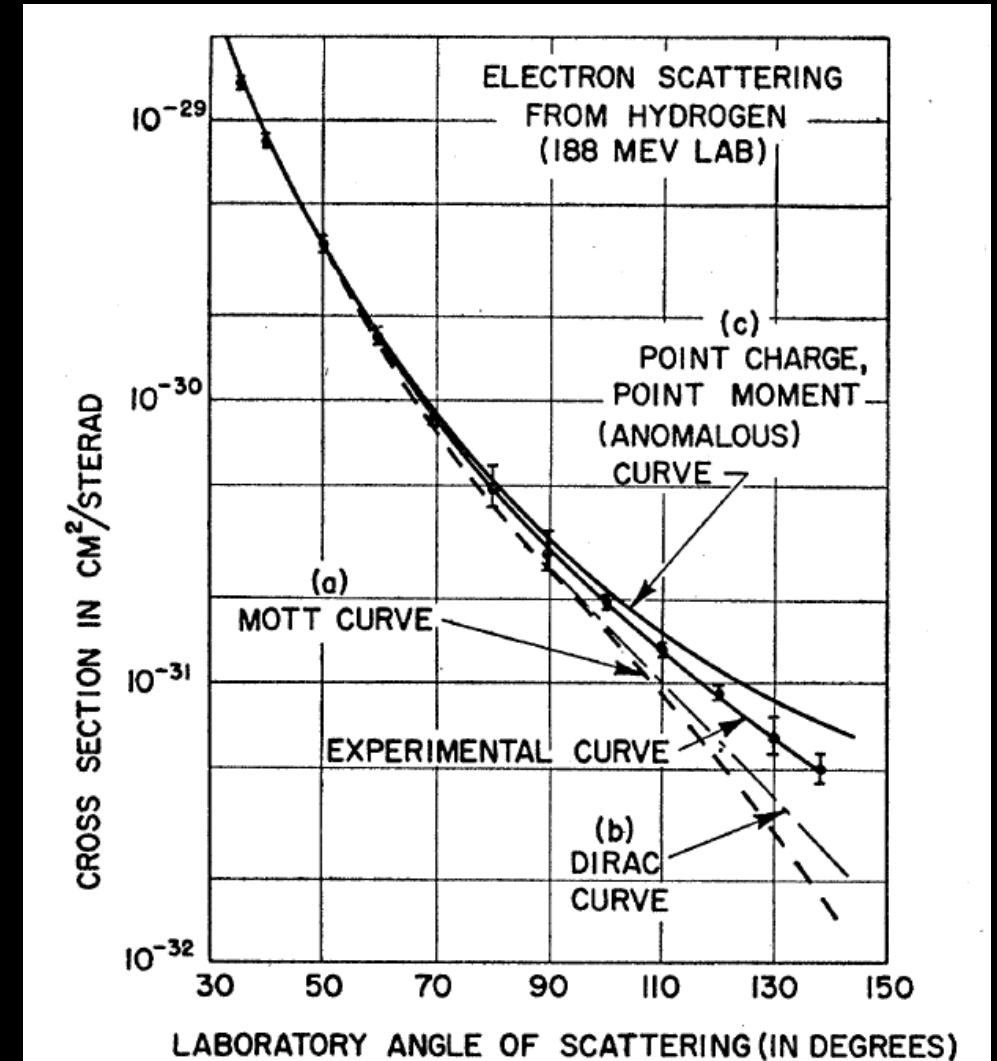
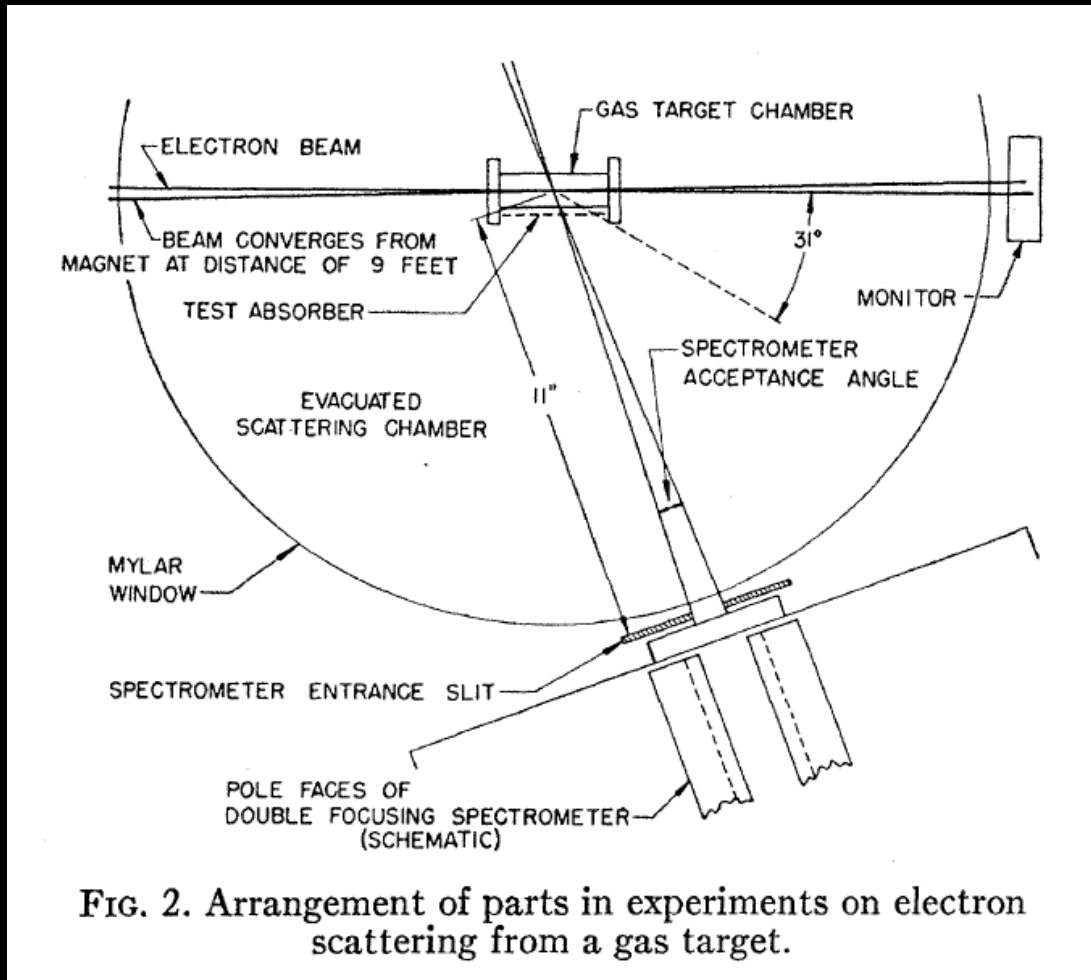
I. INTRODUCTION

II. EXPERIMENTAL METHODS



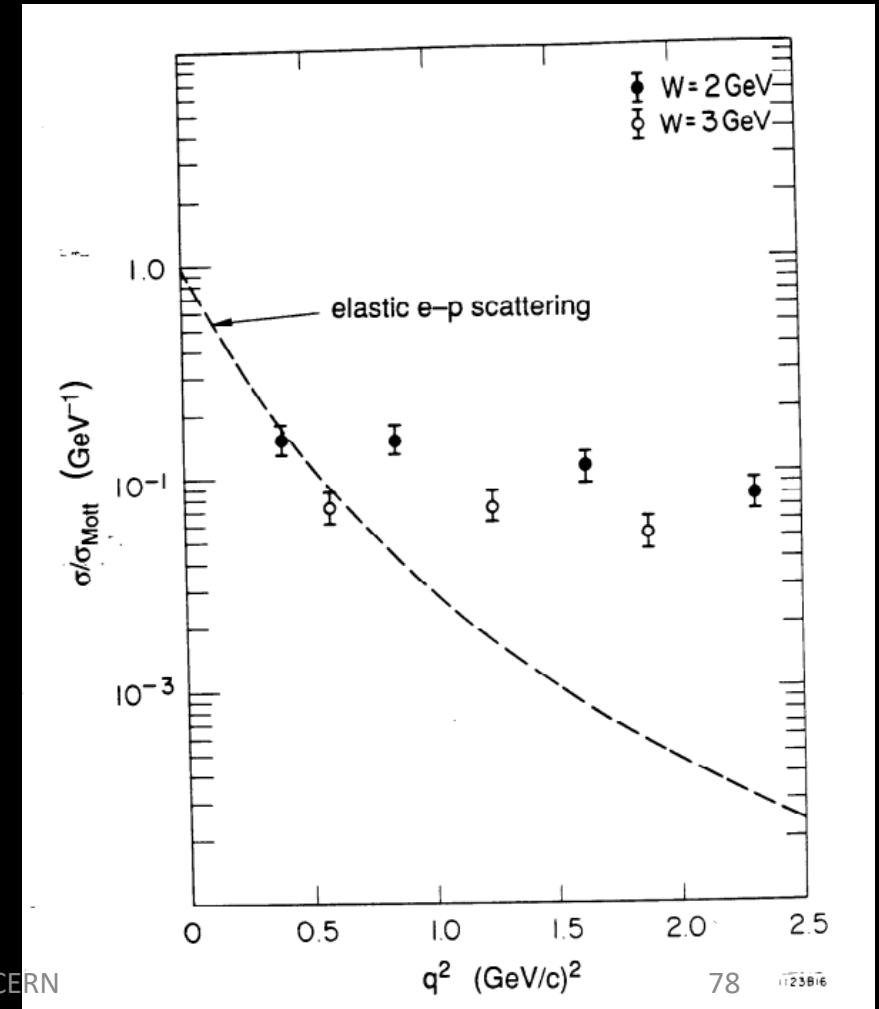
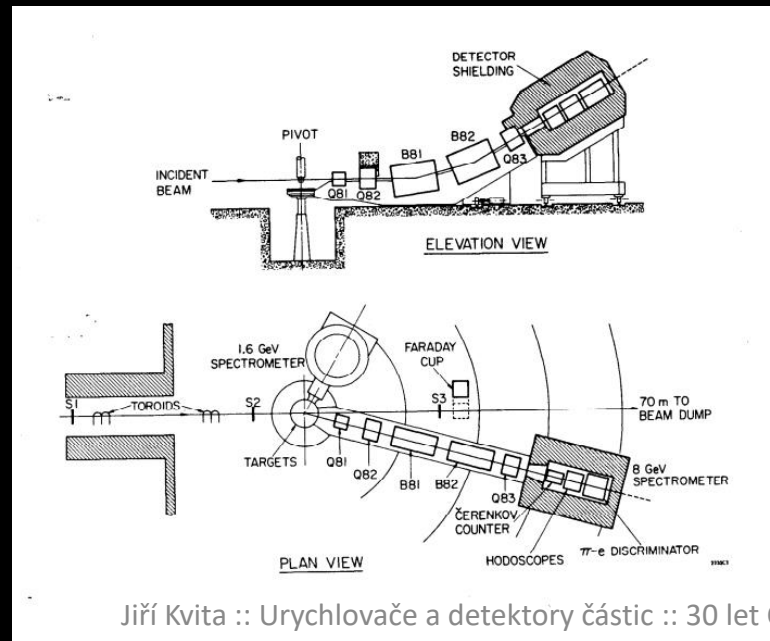
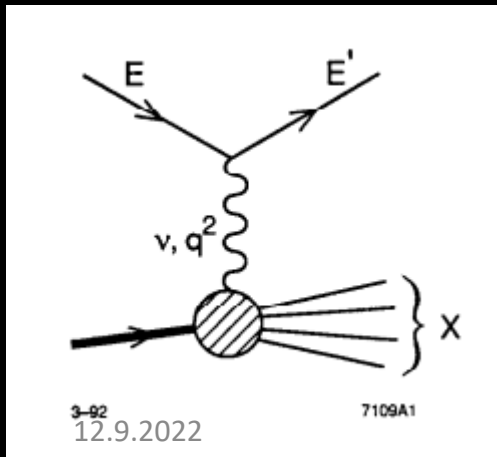
Velikost protonu, 1956

- Robert Hofstadter, 1956, laboratoř SLAC, USA.

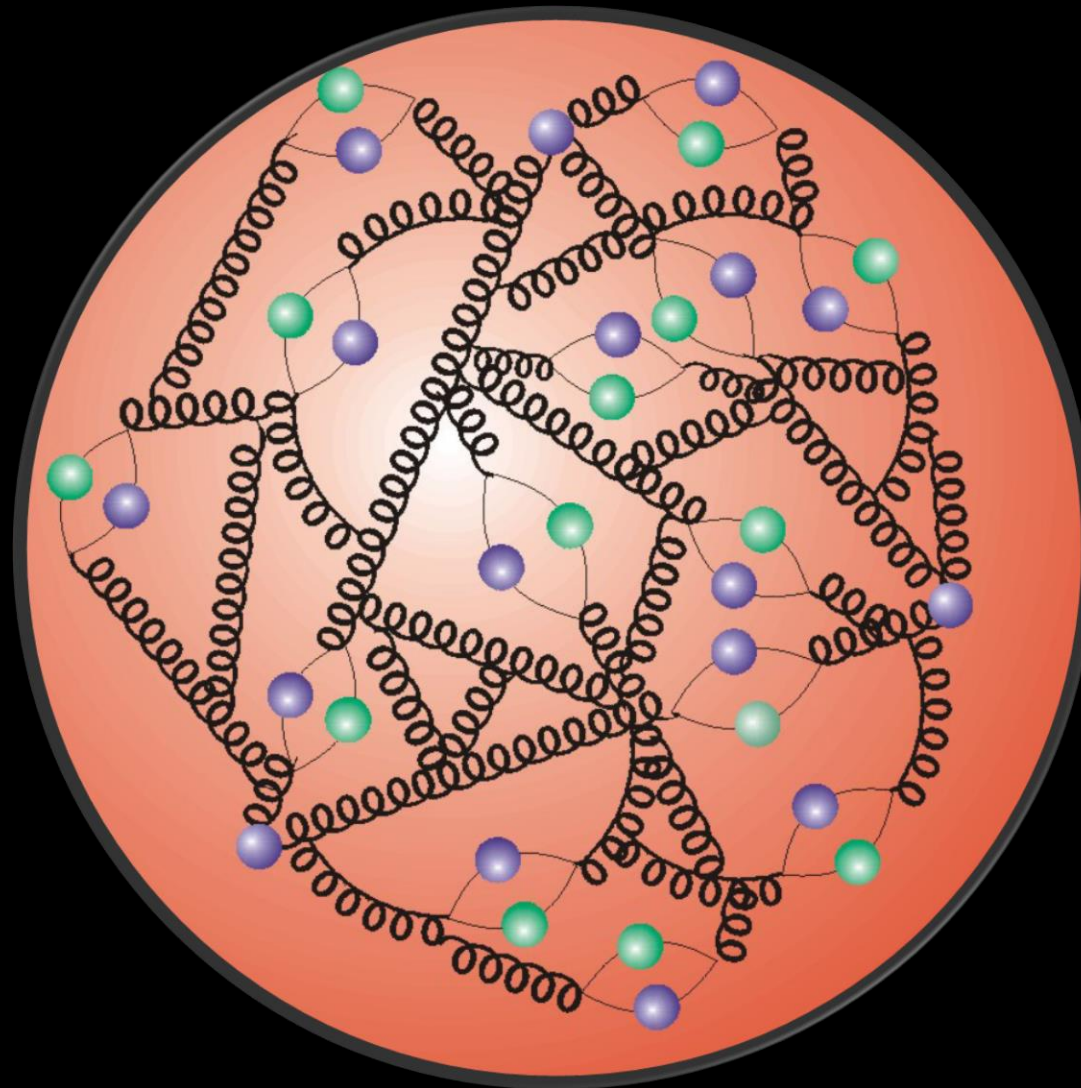


Struktura protonu

- Friedman, Kendall, Taylor, Bjorken, Feynman, SLAC, 1967 -- 1973.
- Elektrony o vyšší energii (20 GeV) už proton rozbijeme.
- Neelastické srážky, Deep inelastic scattering.
- Feynman nazval částičky v protonu partony.

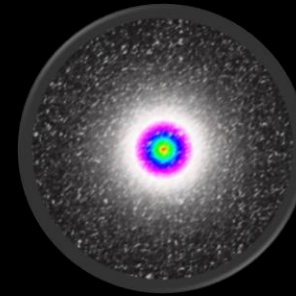


Proton – silná „polévka“ kvarků a gluonů



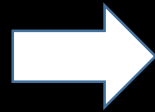
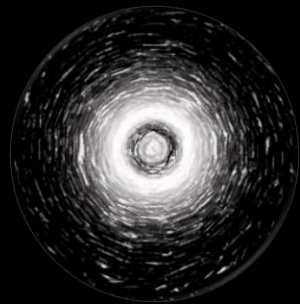
Rozpad volného neutronu

- Neutron je trochu těžší než proton.
- S poločasem rozpadu asi 15min se volný neutron rozpadá na proton, elektron a elektricky neutrální elektronové antineutrino.



Proton

Neutron



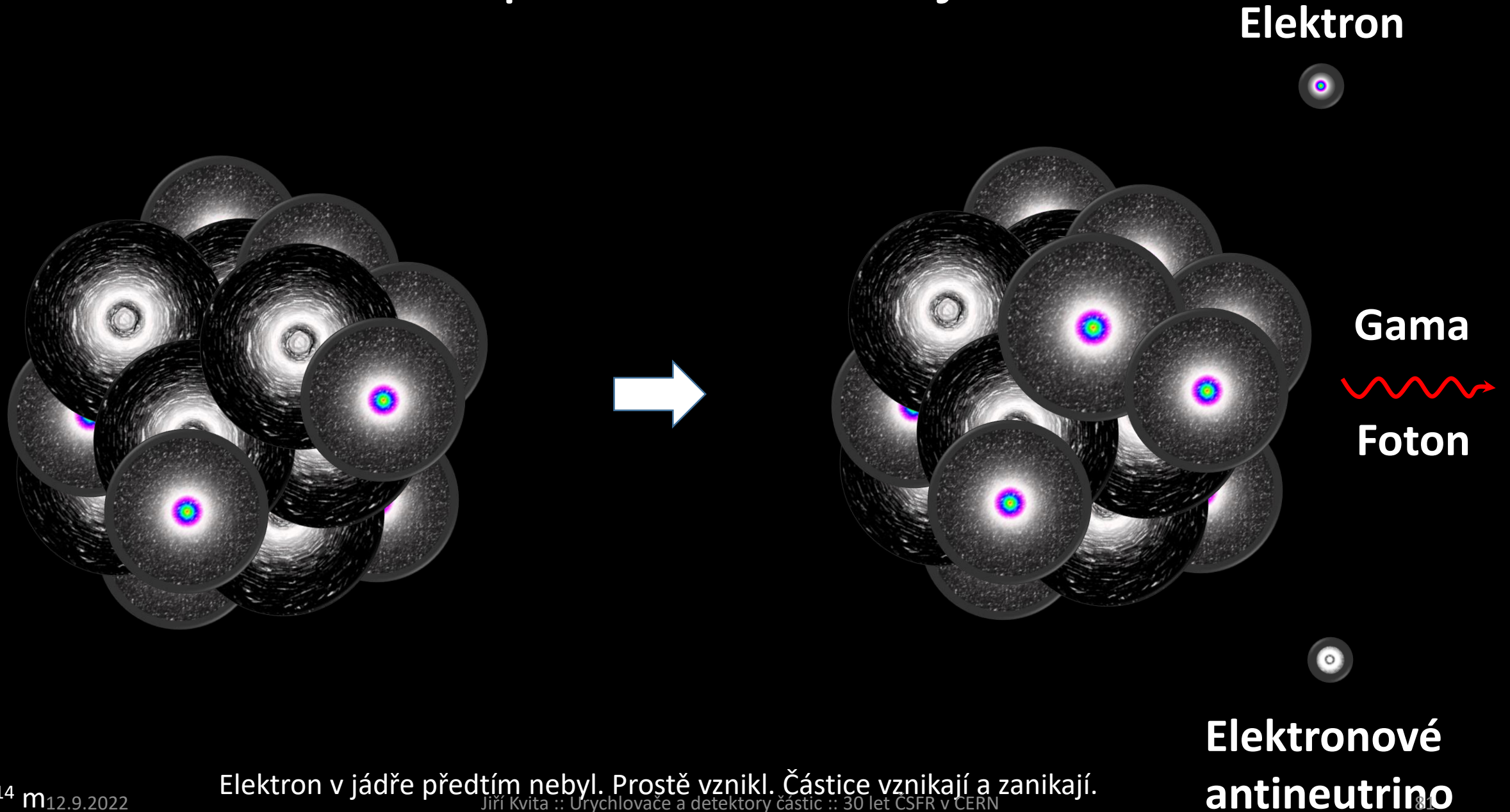
Elektron

- Průměrně žije volný neutron ~15min.
- Ale pro jeden konkrétní neutron nemůžeme čas, kdy se rozpadne, předpovědět (náhodnost kvantové mechaniky).



**Elektronové
antineutrino**

Rozpad atomového jádra



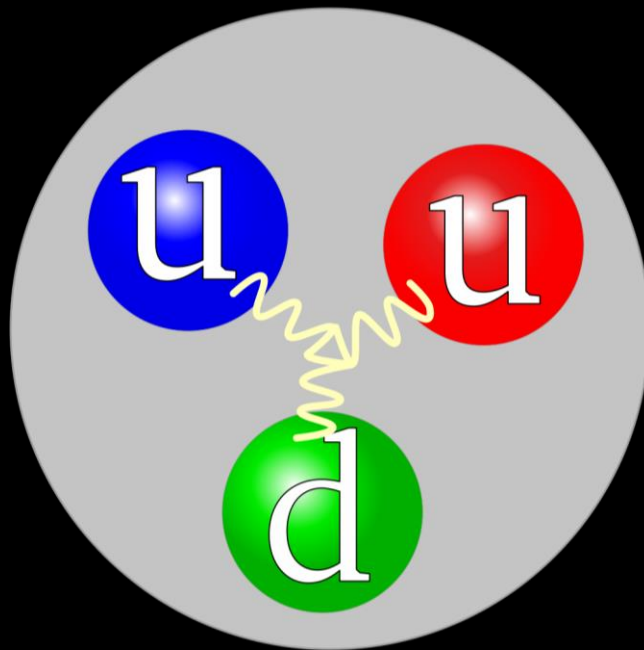
10^{-14} m_{12.9.2022}

Elektron v jádře předtím nebyl. Prostě vznikl. Částice vznikají a zanikají.

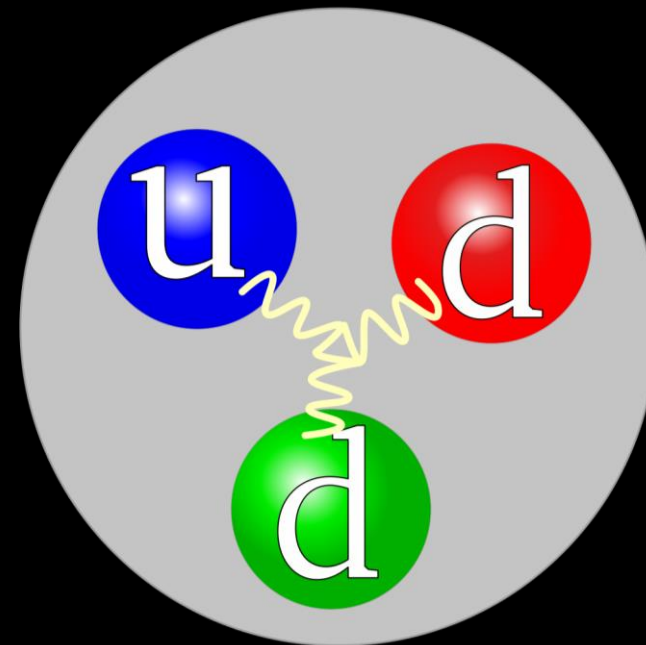
Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let CSFR v CERN

Proton a neutron

Proton



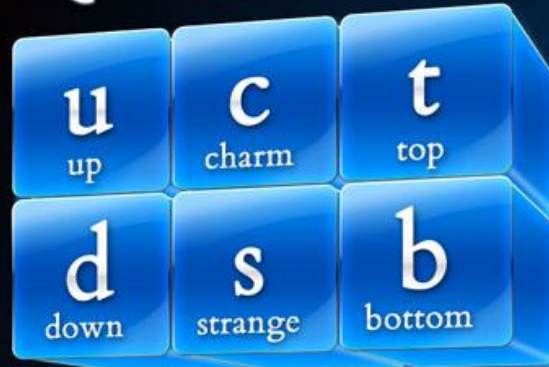
Neutron



- Kvark u (up, nahoru): náboj $+2/3 |e|$
- Kvark d (down, dolů): náboj $-1/3 |e|$

Elementární částice

Quarks



Leptons



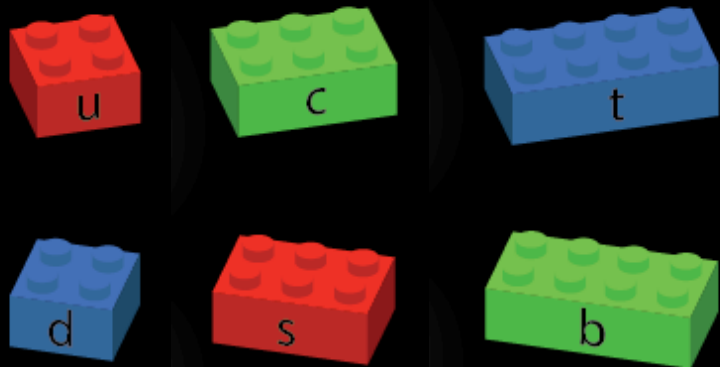
Force Carriers



H
Higgs boson

Částice složené z kvarků -- baryony

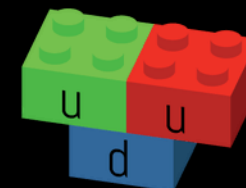
Kvarky



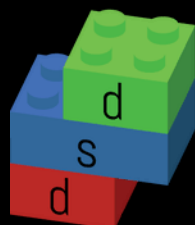
Neutron



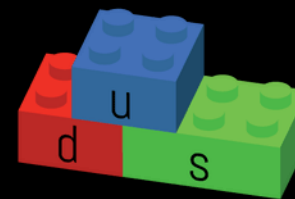
Proton



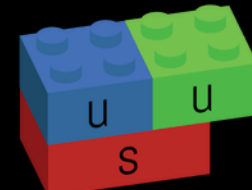
Σ^-



Λ^0

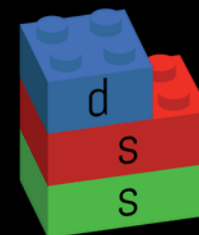


Σ^0

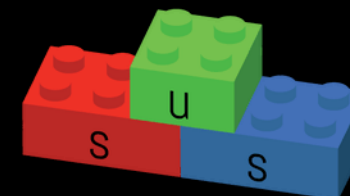


Σ^+

Ξ^-



Ξ^0

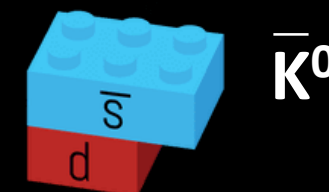
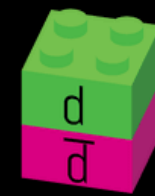
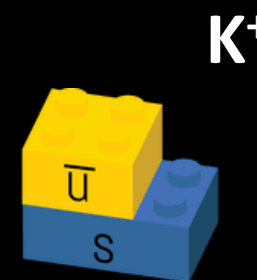
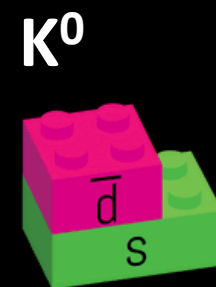
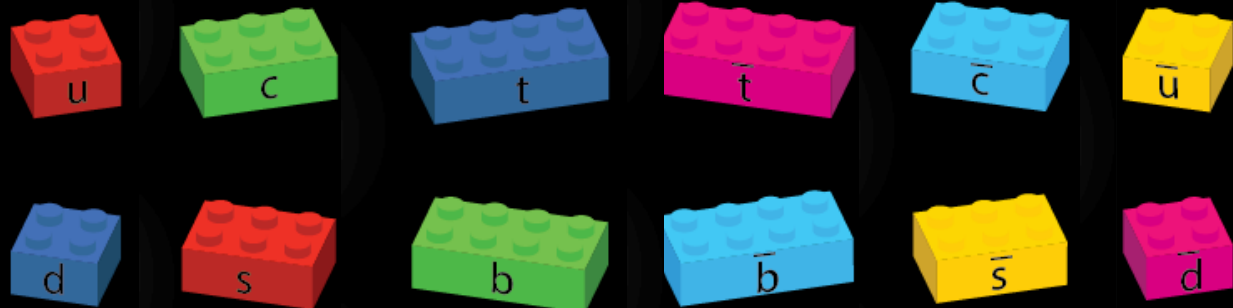


Z antikvarků jsou složeny antibaryony
(antiproton, antineutron).

Částice složené z kvarku a antikvarku -- mezony

Kvarky

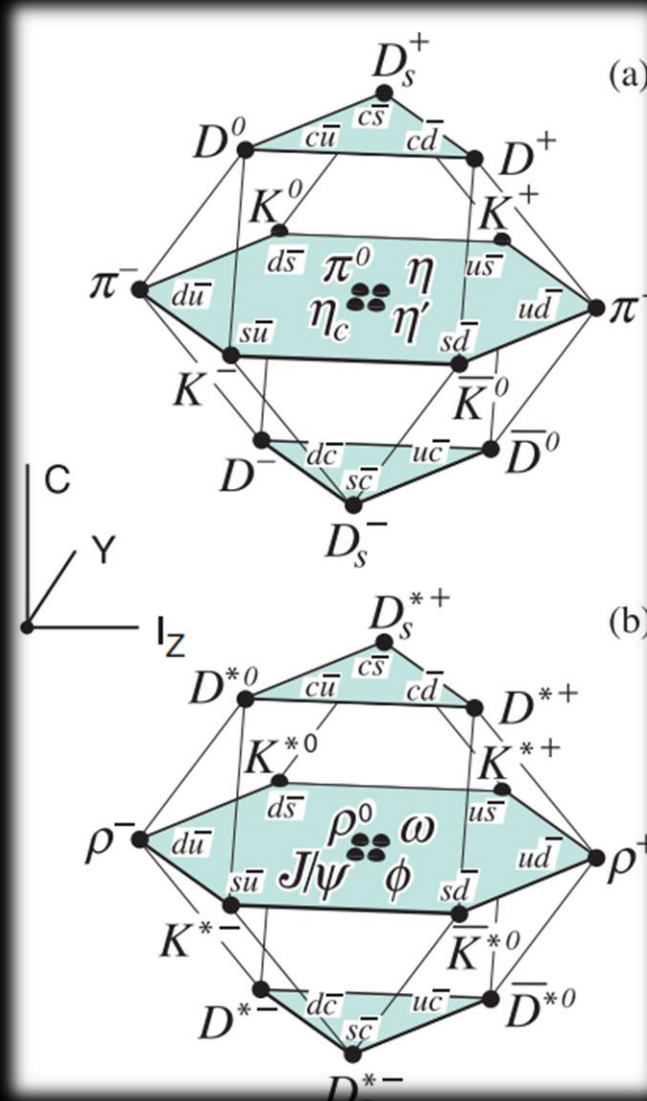
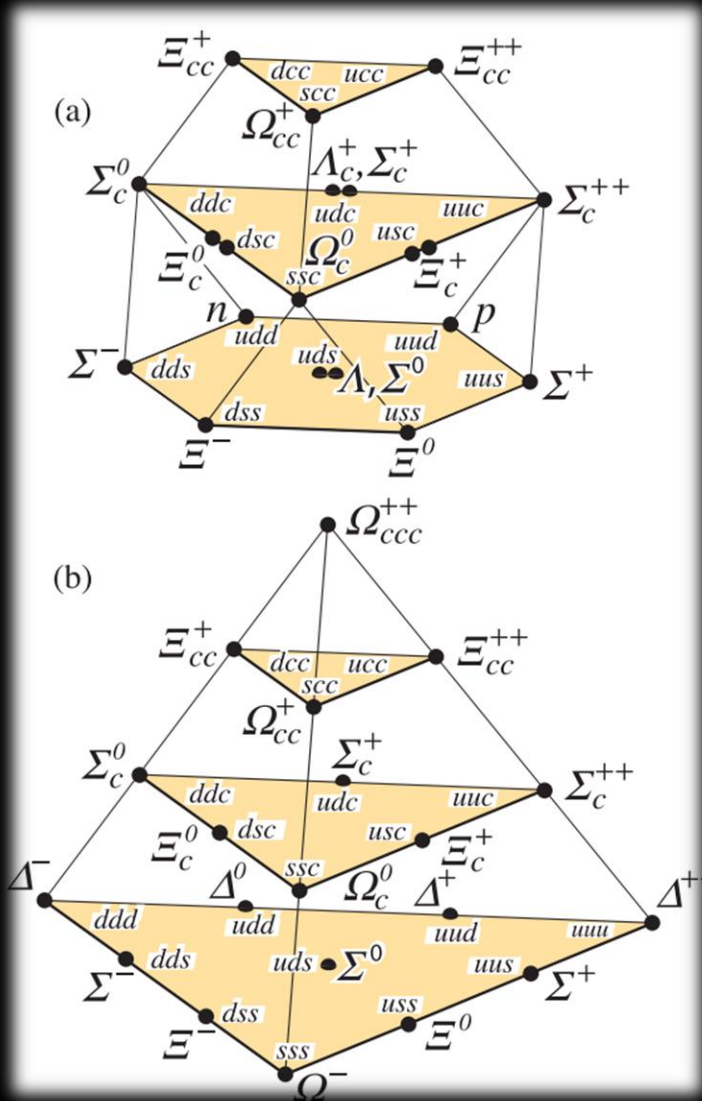
Antikvarky



Mezony zahrnují částice i antičástice

K^- je antičástice ke K^+

Částice složené

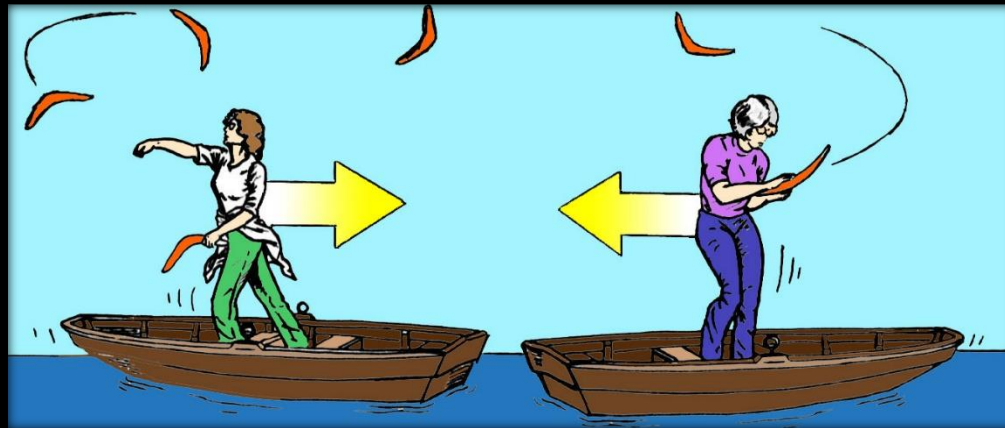


Interakce jako výměna částic

- Odpuzování



- Přitahování



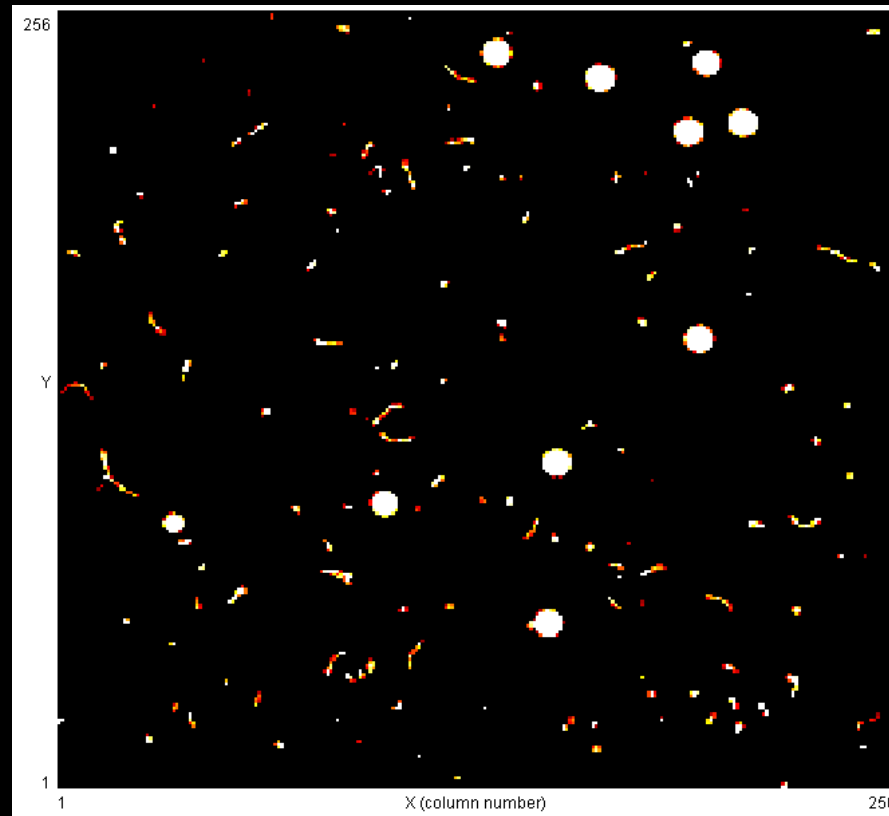
Letadlo

- Let nad Evropou
- 30s expozice



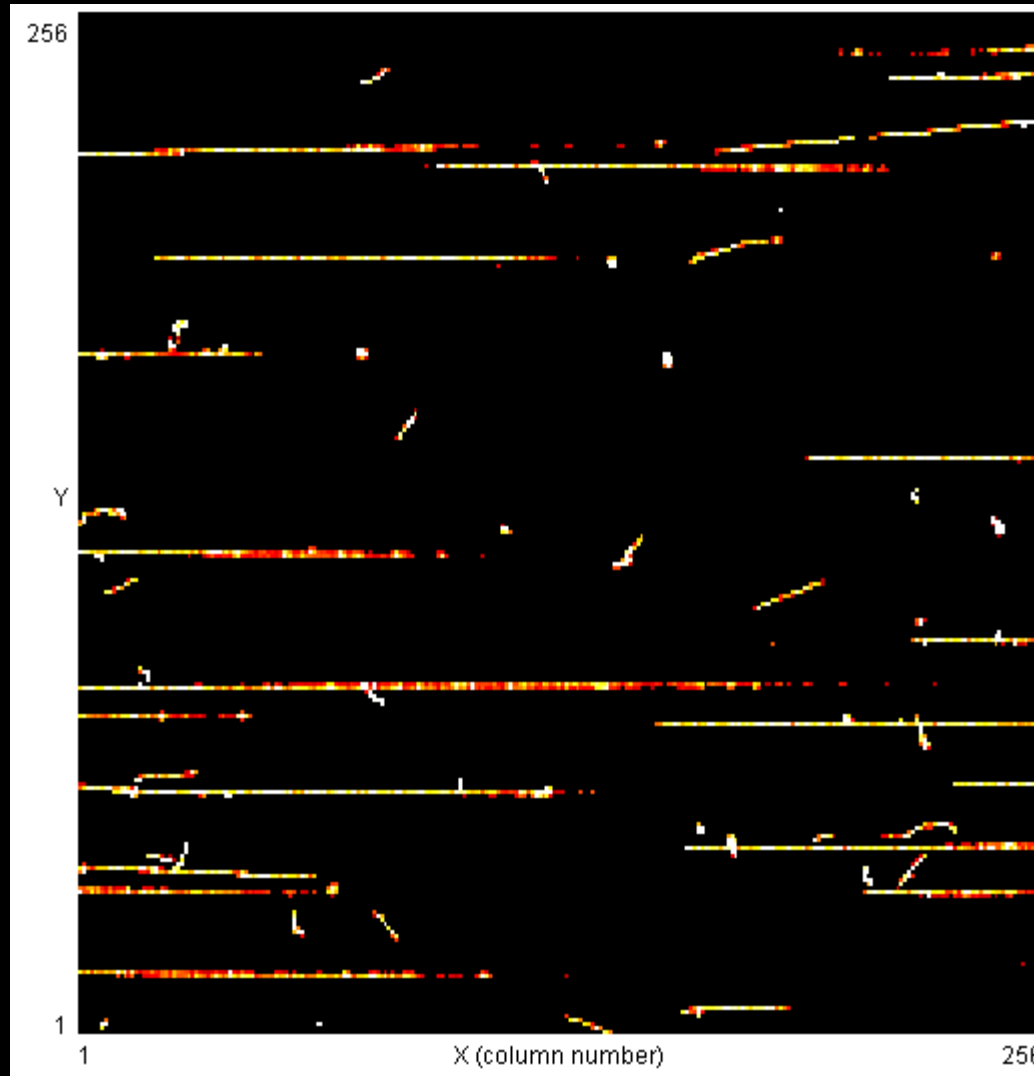
Jeskyně

- Zbrašov/Teplice n/B
- 10min expozice



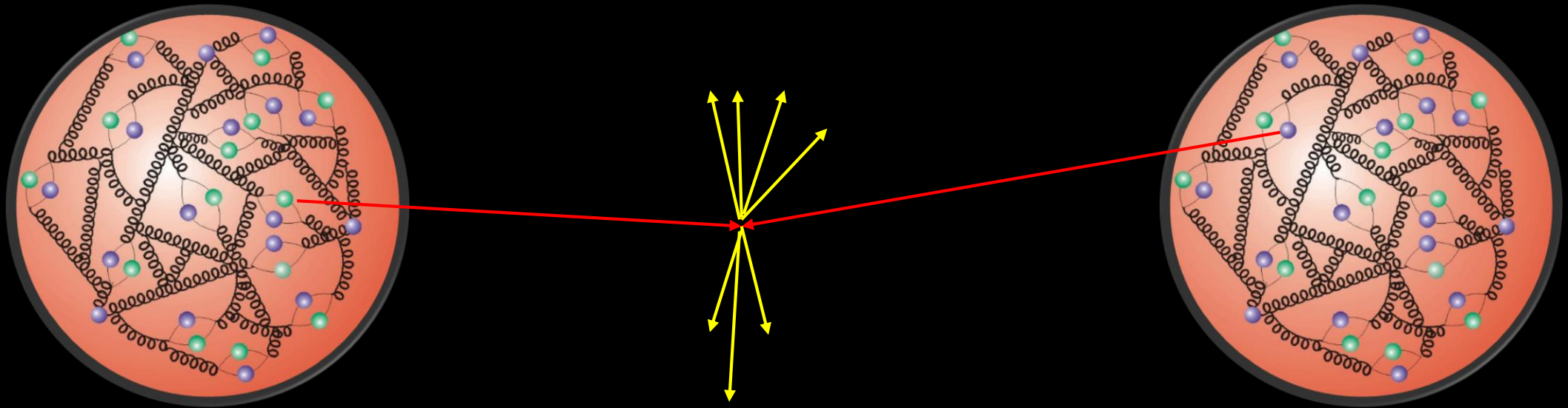
Svazek pionů

- Urychlovač SPS, CERN
- < 1s expozice :-)



Srážky částic

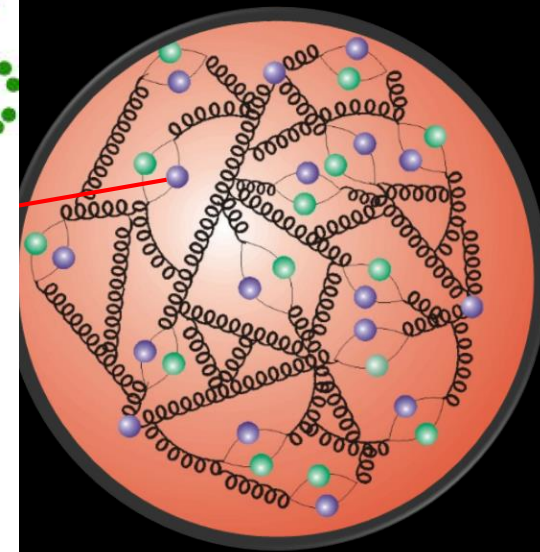
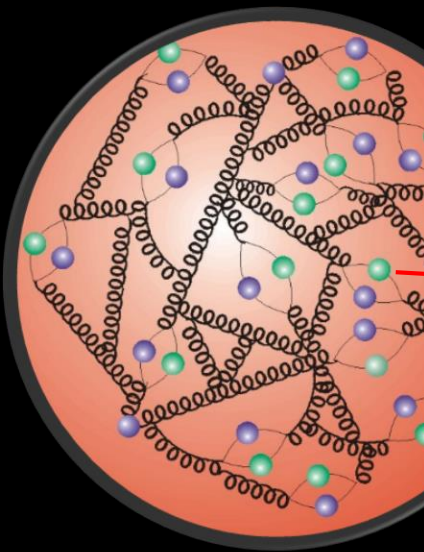
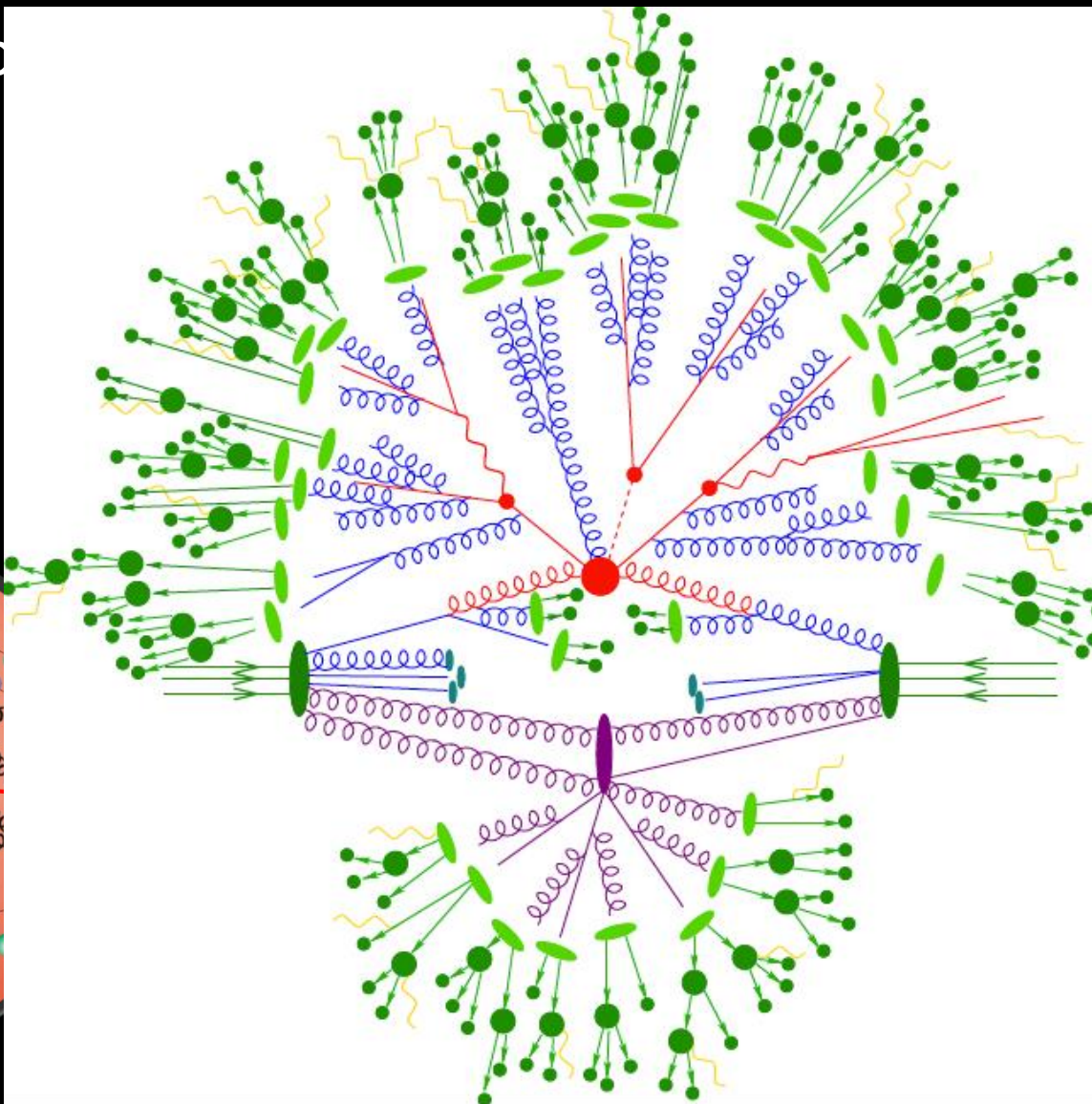
- Chceme-li něco nového vytvořit, musíme nejprve něco rozbít ☺
- Srážka dvou protonů: při velkých energiích nejčastěji srážka dvou částiček protonu (partonů: kvarků a gluonů), protony se sebe rozbijí.



Srážky částic

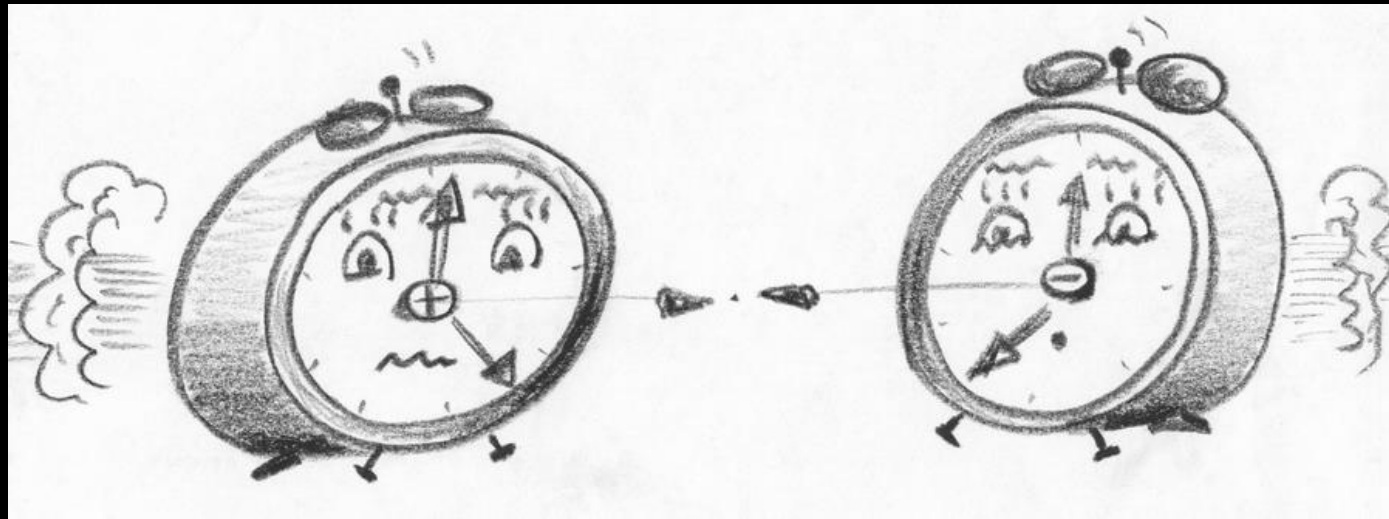
- Chceme-li něco nového objevit ☺
- Srážka dvou protonů (partonů: kvarků a leptonů)

• Chceme-li něco nového objevit ☺
• Srážka dvou částic
• Částice se zbijí.



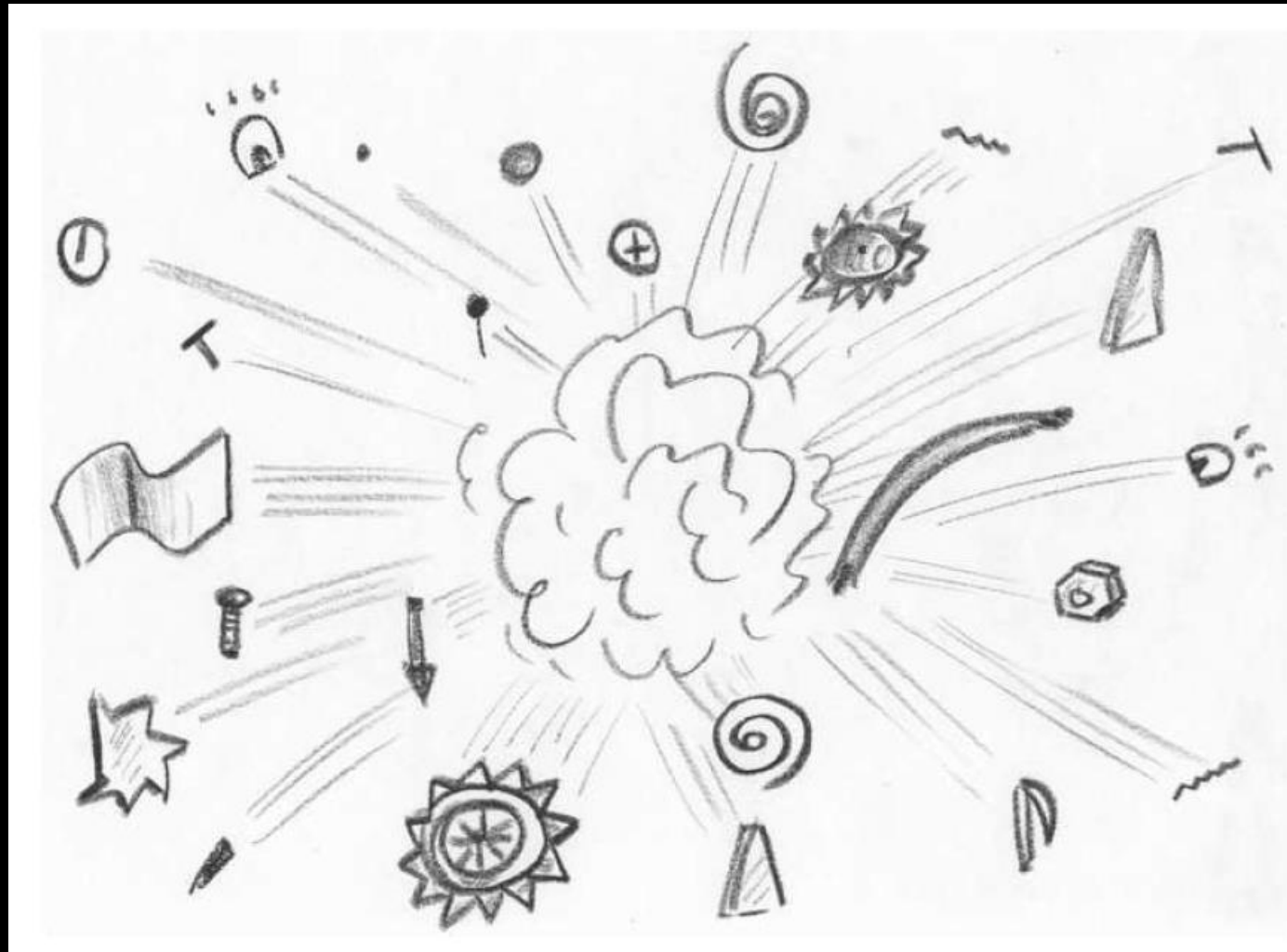
Srážky částic

- Aneb je to jako srážet dva budíky...



Srážky částic

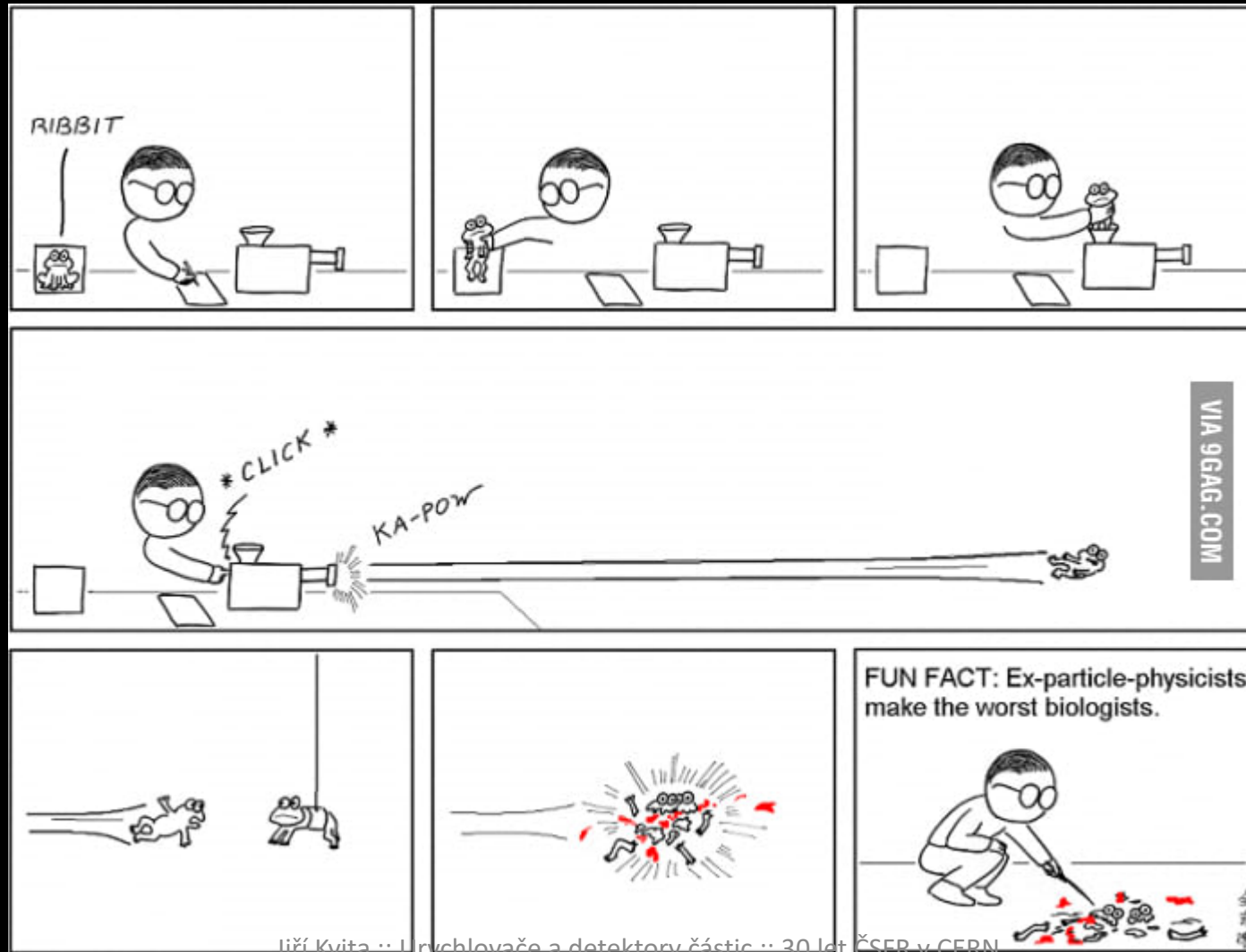
- ...abychom zjistili, z čeho se skládají.



Srážky částic

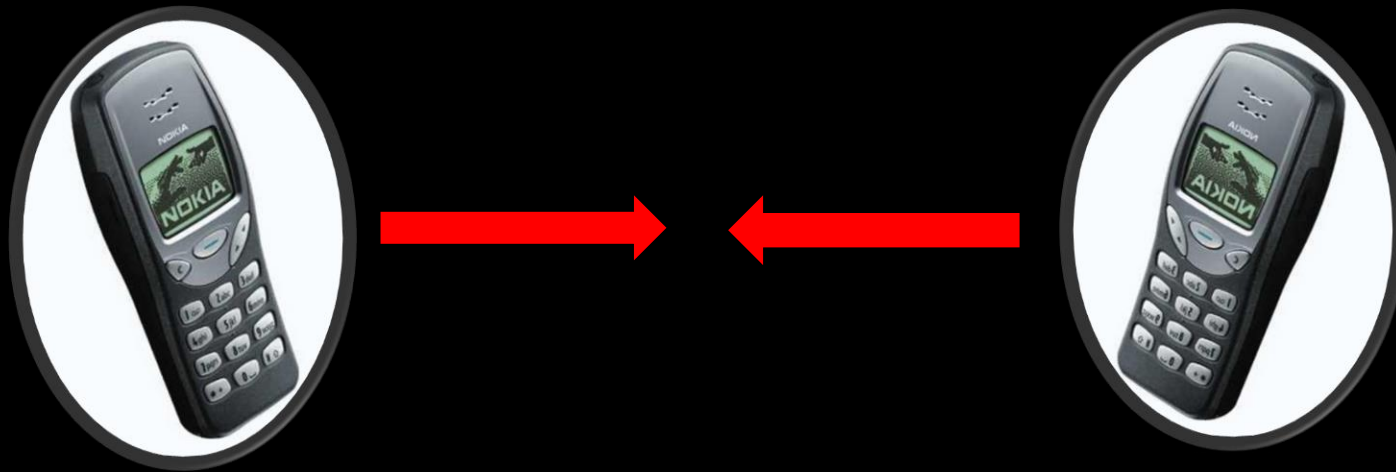
- Neaplikovat v biologii...

<https://abstrusegoose.com/156>



Srážky částic

- Chceme-li něco nového vytvořit, musíme nejprve něco rozbít.



Srážky částic

- Chceme-li něco nového vytvořit, musíme nejprve něco rozbít.
- Často se ale nestane skoro nic...



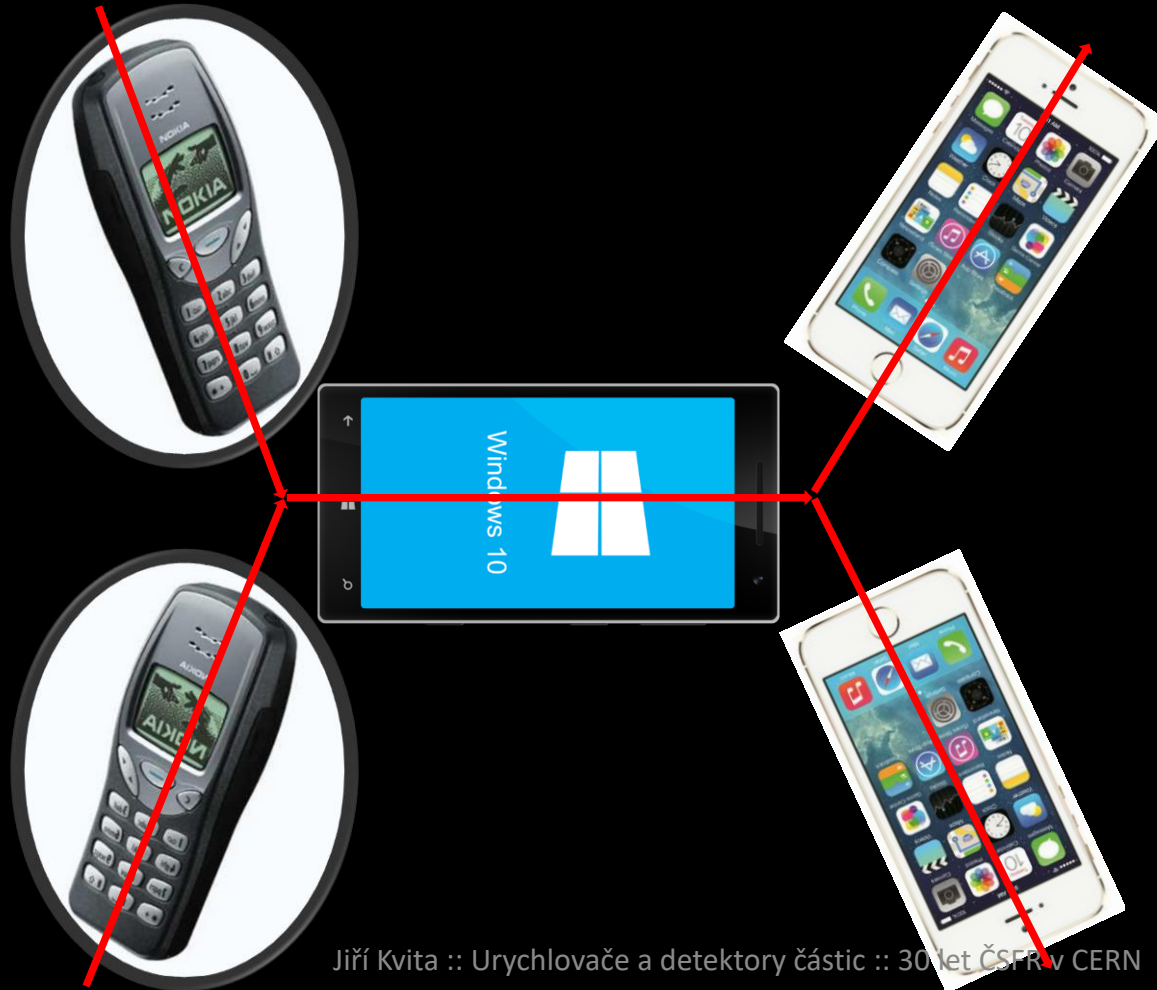
Srážky částic

- Chceme-li něco nového vytvořit, musíme nejprve něco rozbít.
- Ve srážkách ale mohou vznikat částice nové!
- $E = mc^2$



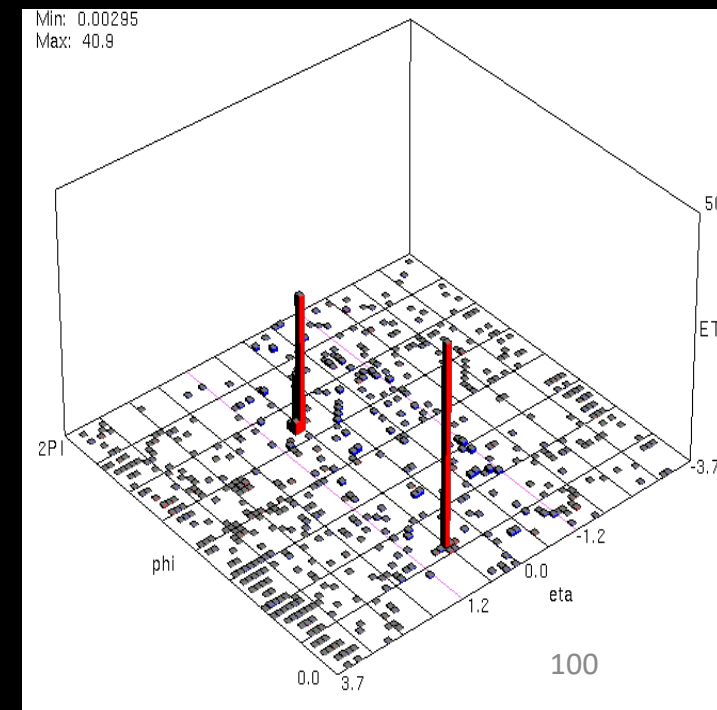
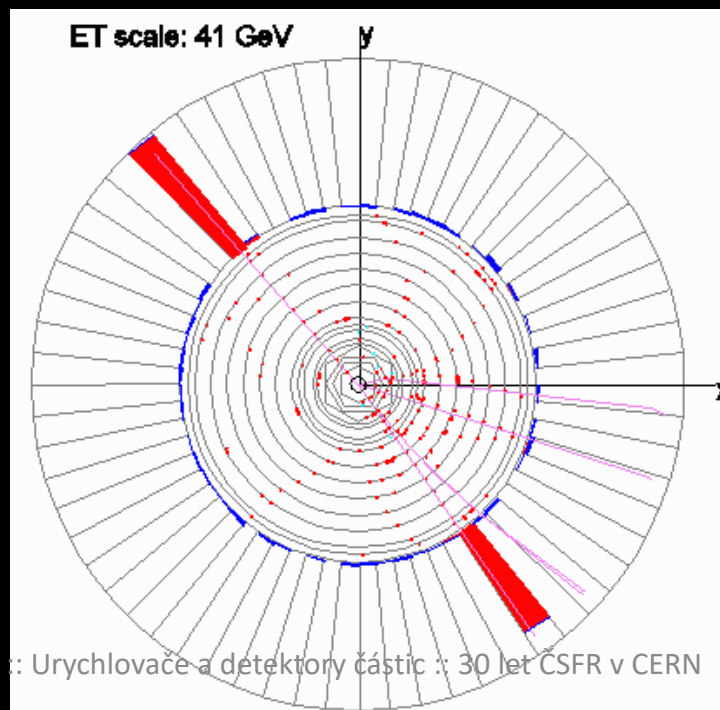
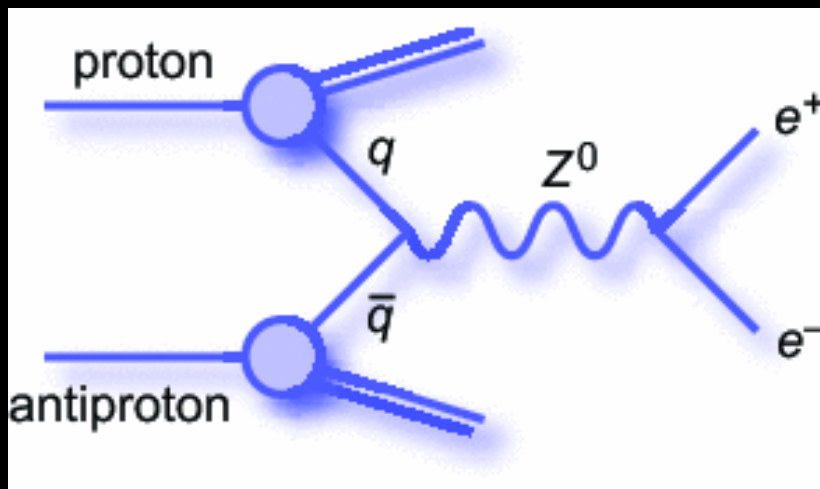
Srážky částic

- Chceme-li něco nového vytvořit, musíme nejprve něco rozbít.
- Ve srážkách ale mohou vznikat částice nové!
- $E = mc^2$



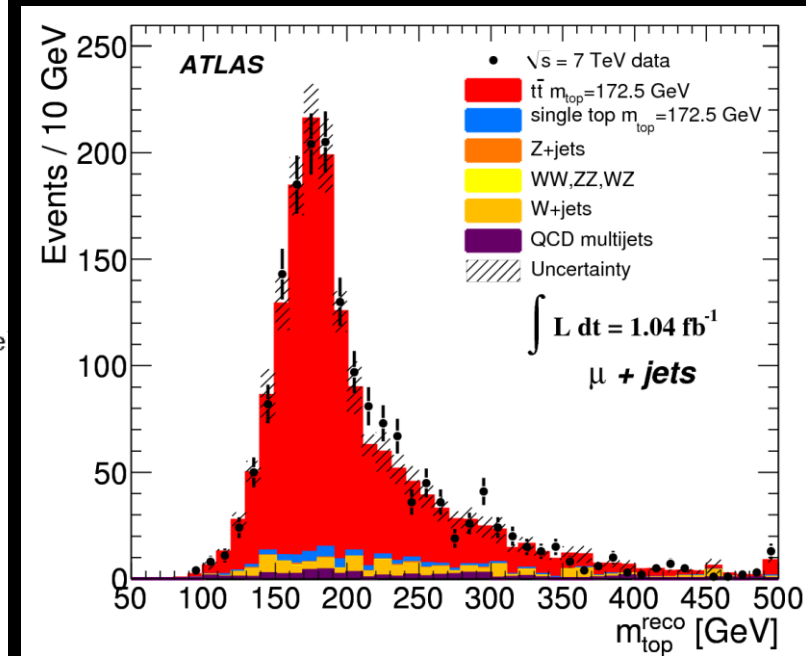
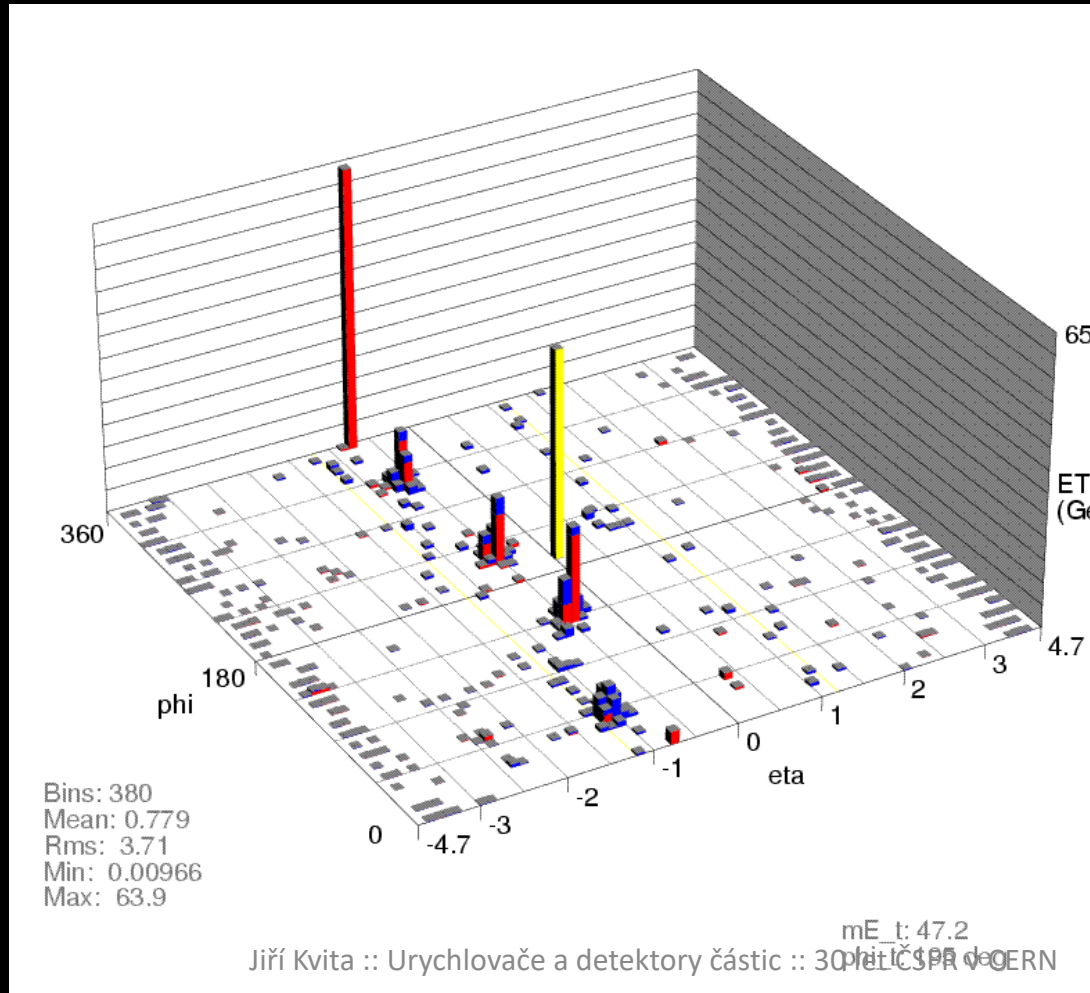
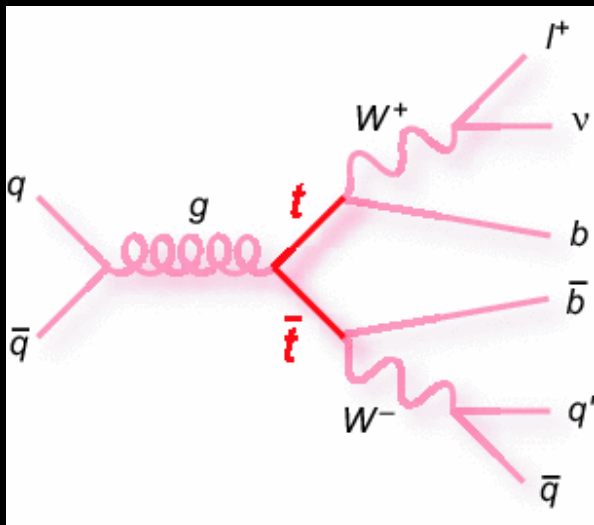
Interakce

- Energie se může přeměnit v hmotu nové těžké částice.
- Zde Z boson \sim těžký foton, nestabilní a rychle se rozpadá.
- Jak změřit hmotnost Z bosonu? Jak vlastně víme, že existuje?



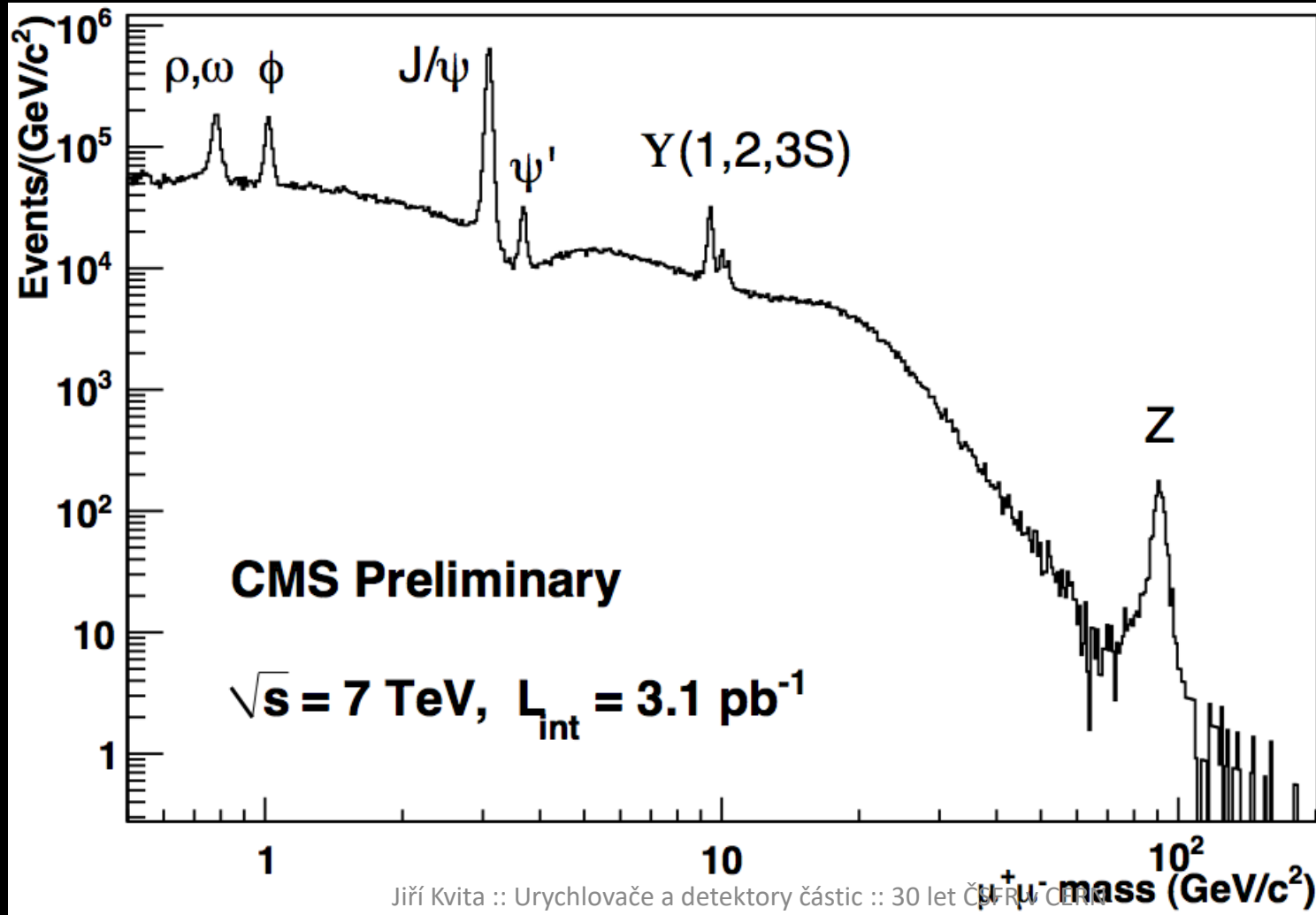
Interakce

- Složitější případ vzniku párů top kvarků.

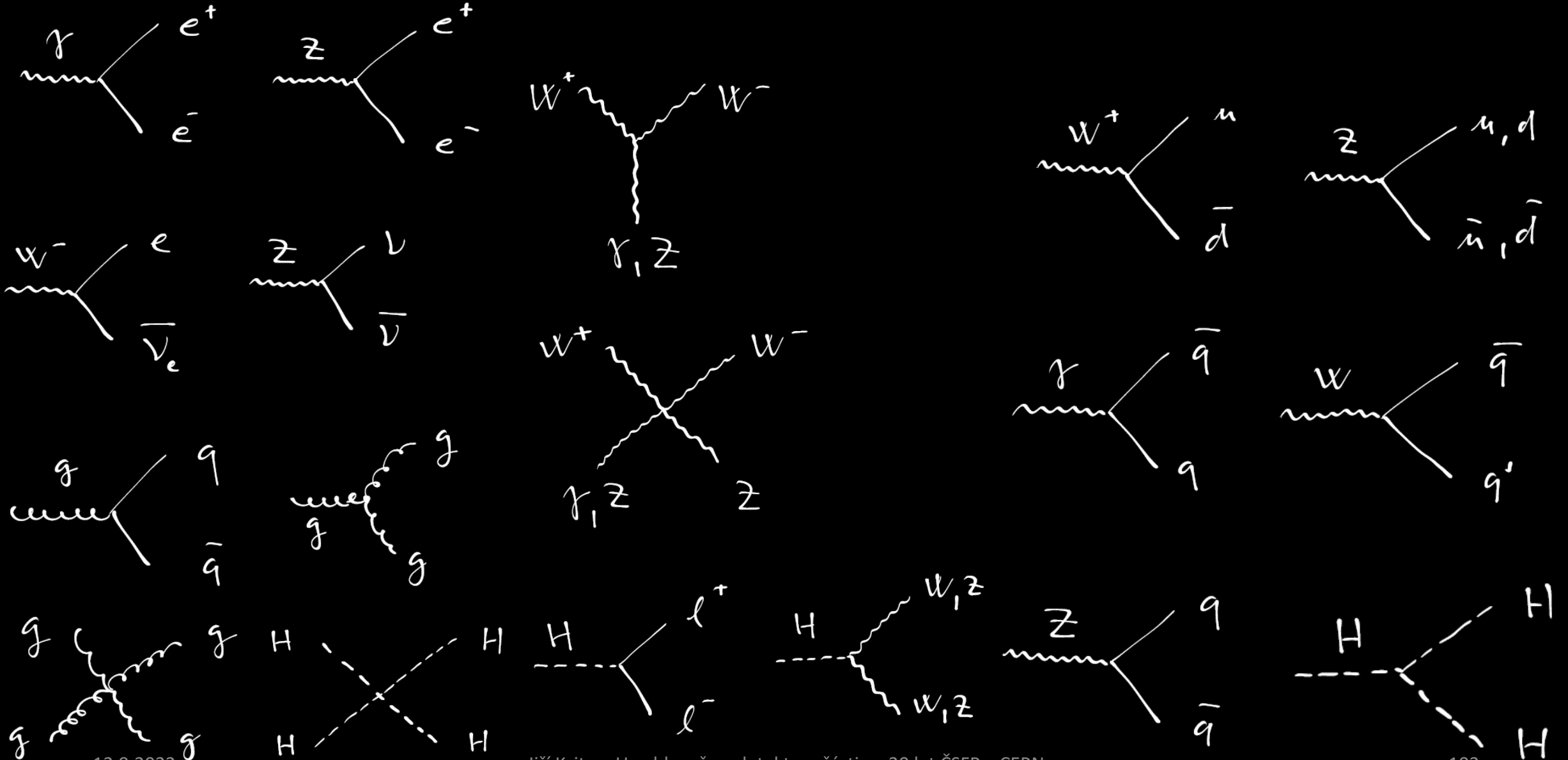


„Částice je kopeček!“

- ...když zkoumáme, jak často se něco děje při různé energii.



Všecky interakce světa

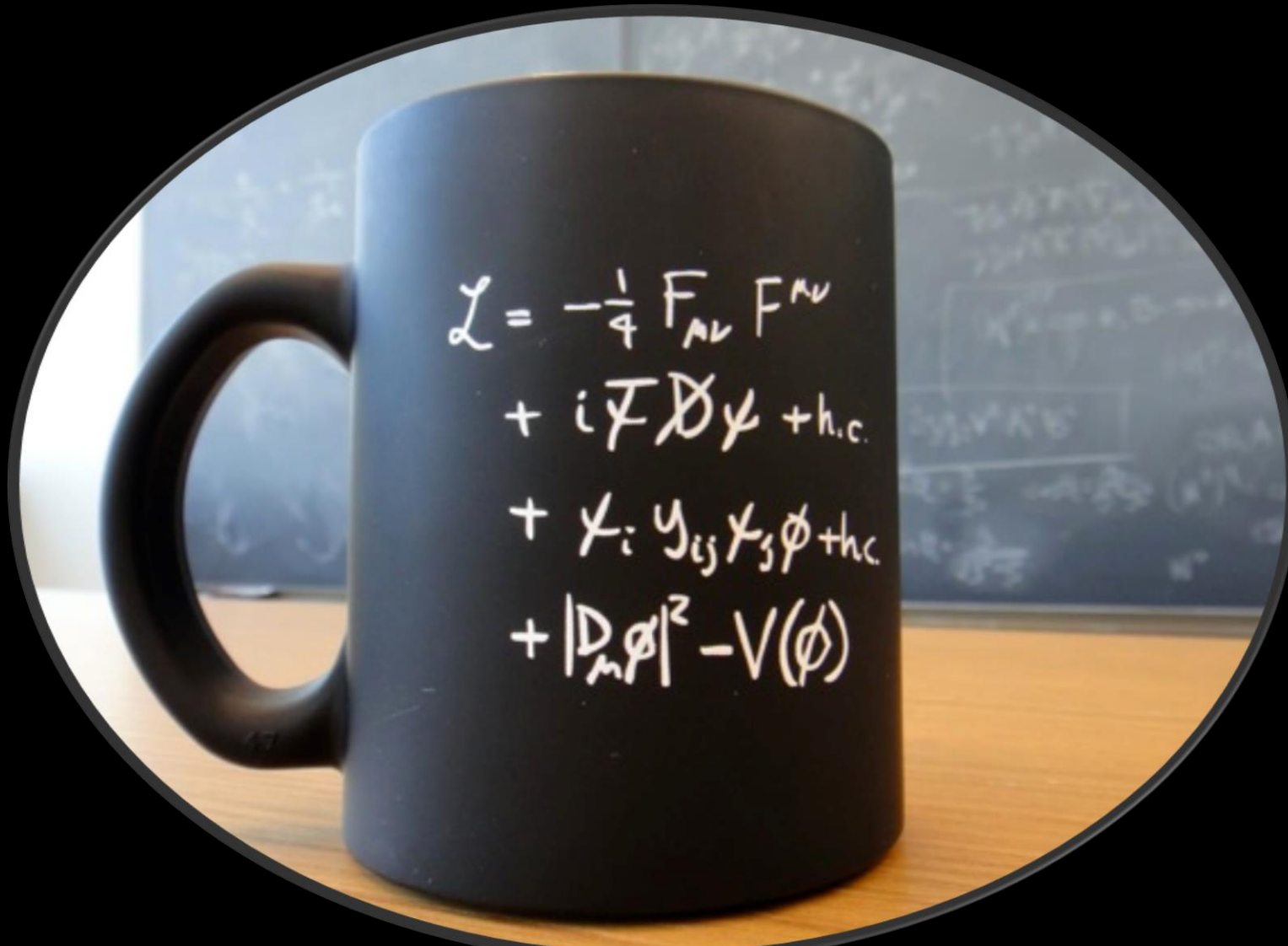


Všecky interakce světa

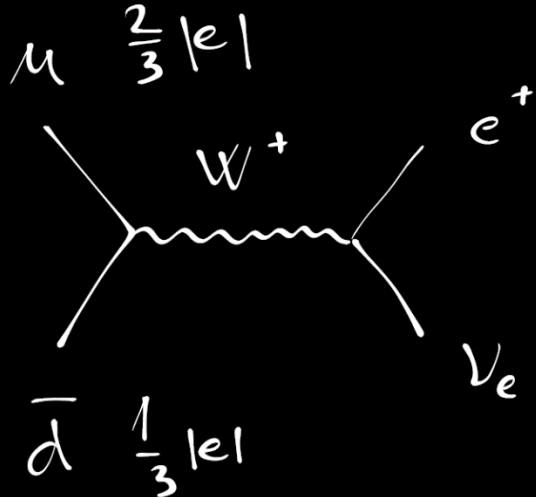
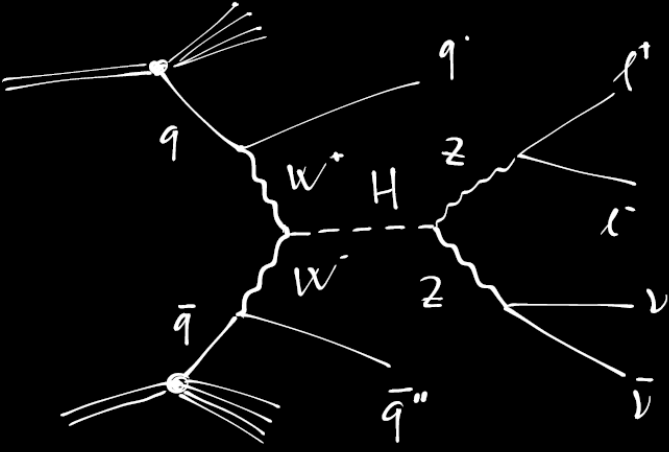
$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. \\ & + \bar{\Psi}_i \gamma_{ij} \Psi_j \phi + h.c. \\ & + D_\mu \phi D^\mu \phi - V(\phi)\end{aligned}$$

- Významnou roli hrají symetrie.
- Má-li být teorie neměnná vůči nějaká symetrii/změně, vede to na interakci.
- Analogie kalibrace potenciálů elmag. pole: „Kalibrační interakce, kalibrační bosony.“

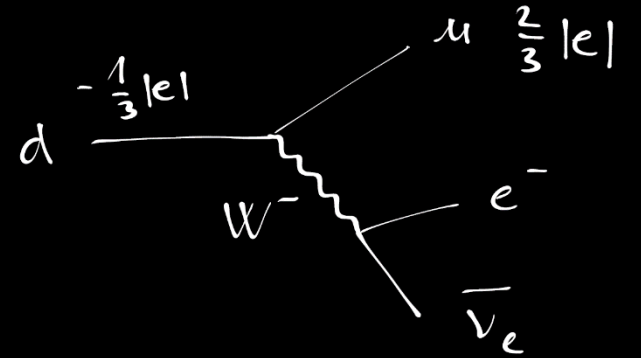
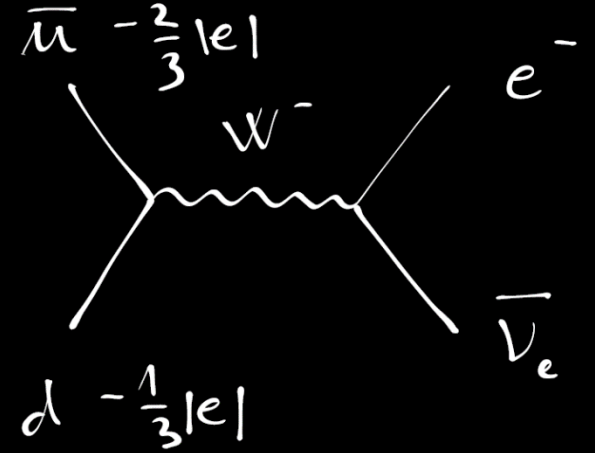
Všecky interakce světa kompaktně



WHAT PART OF



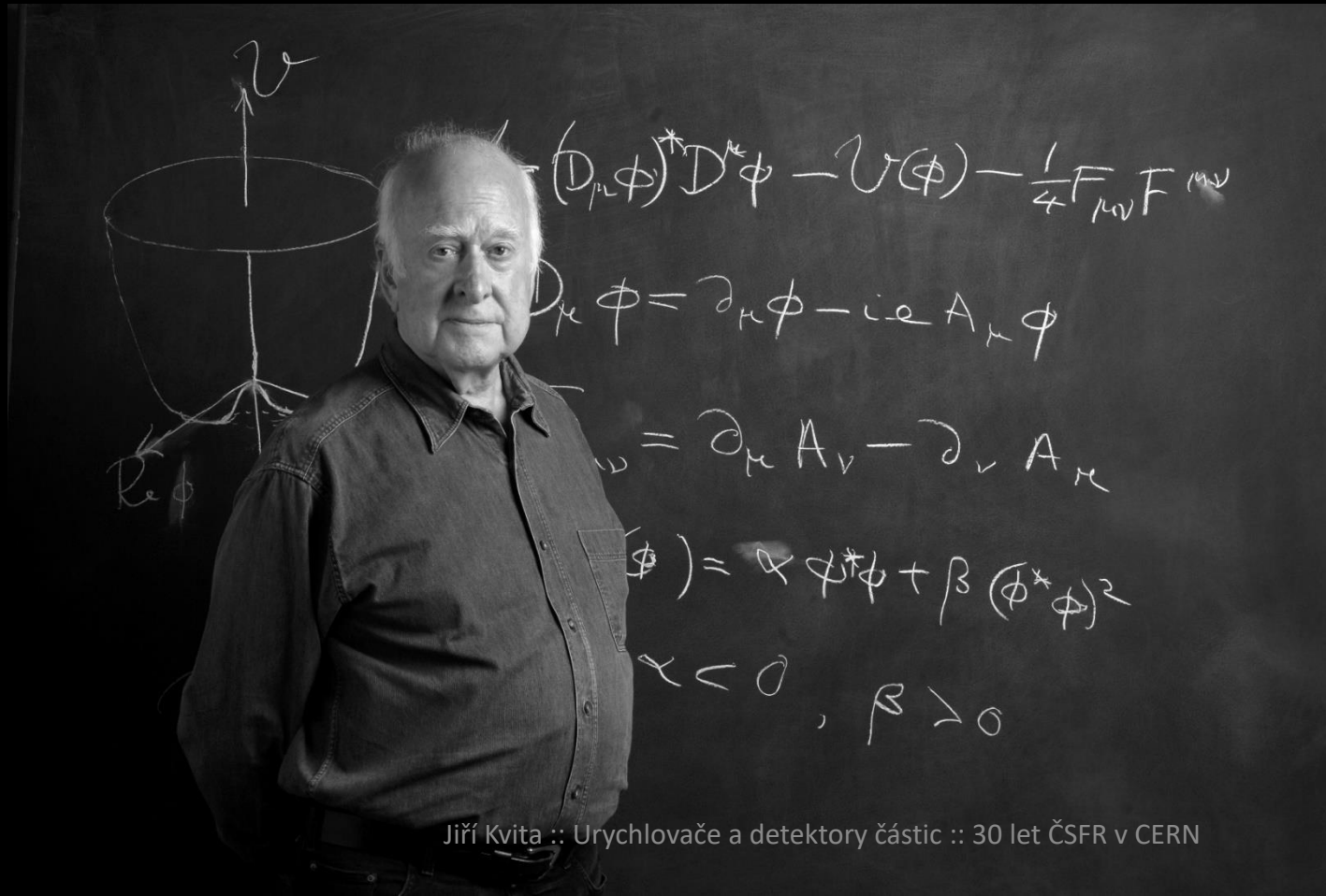
$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i \gamma^\mu q^i) g_\mu \\
 & \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu 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 [\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M}{g^2} \alpha_h - ig_{c_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_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + 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}{2}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] - g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^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{2M}{c_w} Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig_{s_w} M A_\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}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2c_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \\
 & \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w}{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^4 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma^\theta + m_e^2) e^\lambda - \\
 & \bar{\nu}^\lambda \gamma^\theta \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\theta + m_u^2) u_j^\lambda - d_j^\lambda (\gamma^\theta + m_d^2) 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) e^\lambda) - (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) C_{\lambda k} d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} M [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \\
 & \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_e^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_e^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 - \\
 & \gamma^5) d_j^\lambda) + m_e^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_e^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^1 (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_e^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^1 (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_u^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
 & X^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + X^- (\partial^2 - M^2) X^- + X^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + Y \partial^2 Y + ig_{c_w} W_\mu^+ (\partial_\mu X^0 X^- - \\
 & \partial_\nu X^+ X^0) + ig_{s_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\nu X^+ \bar{Y}) + ig_{c_w} W_\mu^- (\partial_\mu X^- X^0 - \partial_\nu \bar{X}^0 X^+) + \\
 & ig_{s_w} W_\mu^- (\partial_\mu X^- Y - \partial_\nu \bar{Y} X^+) + ig_{c_w} Z_\mu^0 (\partial_\mu X^+ X^+ - \partial_\nu X^- X^-) + ig_{s_w} A_\mu (\partial_\mu X^+ X^+ - \\
 & \partial_\nu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\
 & X^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} ig M [X^0 X^- \phi^+ - X^0 X^+ \phi^-] + ig M s_w [X^0 X^- \phi^+ - X^0 X^+ \phi^-] + \\
 & \frac{1}{2}ig M \bar{X}^+ X^+ \phi^0 - X^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$



DO YOU NOT UNDERSTAND?

Higgs :: Peter Higgs

- Problém: interakce zavedené kalibračním principem fungují jen pro nehmotné částice...
- Jak částicím v teorii dodat hmotnost, a zachovat symetrii teorie?



1964

We'll be back soon...

Rutherfordův experiment 1909

- Bombardování zlaté fólie částicemi alfa.
- Pravděpodobnost rozptylu alfa částice bodovým těžkým objektem do úhlu vzhledem k původnímu směru je úměrná
- Rutherfordův vztah

$$\frac{1}{\sin^4 \phi/2}$$

$$y = \frac{Qdm}{2\pi r^2 \sin \phi \cdot d\phi} = \frac{ntb^2 \cdot Q \cdot \operatorname{cosec}^4 \phi/2}{16r^2}$$

- **Důkaz existence velmi hmotného a malého atomového jádra!**

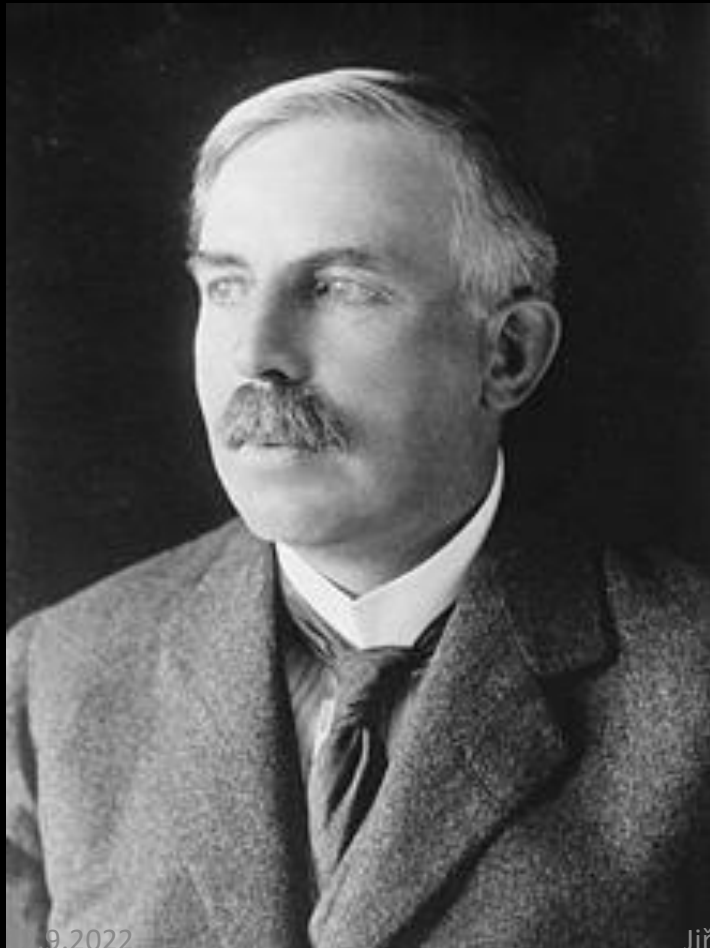
Table II.
Variation of Scattering with Angle. (Collected results)

I. Angle of deflexion, ϕ	II. $\frac{1}{\sin^4 \phi/2}$	III. IV. SILVER		V. VI. GOLD	
		Number of scintillations, N	$\frac{N}{\sin^4 \phi/2}$	Number of scintillations, N	$\frac{N}{\sin^4 \phi/2}$
150	1.15	22.2	19.3	33.1	28.8
135	1.38	27.4	19.8	43.0	31.2
120	1.79	33.0	18.4	51.9	29.0
105	2.53	47.3	18.7	69.5	27.5
75	7.25	136	18.8	211	29.1
60	16.0	320	20.0	477	29.8
45	46.6	989	21.2	1435	30.8
37.5	93.7	1760	18.8	3300	35.3
30	223	5260	23.6	7800	35.0
22.5	690	20300	29.4	27300	39.6
15	3445	105400	30.6	13200	38.4
30	223	5.3	0.024	3.1	0.014
22.5	690	16.6	0.024	8.4	0.012
15	3445	93.0	0.027	48.2	0.014
10	17330	508	0.029	200	0.0115
7.5	54650	1710	0.031	607	0.011
5	276300			3320	0.012

Rutherfordův experiment 1909

αβγεδμν

- Ernest Rutherford vedl, navrhoval a interpretoval experimenty.
- Měřili Hans Geiger a Ernest Marsden



9.2022



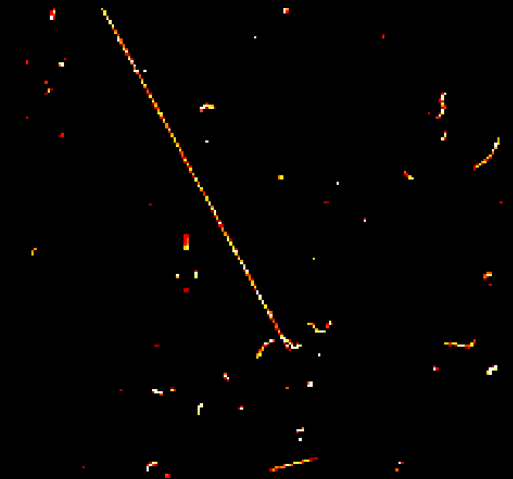
Jiří Kvita :: Urychlovače a detektory částic :: 30 let ČSFR v CERN



1909

Miony

- Miony jsou podobné elektronům, jen jsou asi 200x těžší a rozpadají se na elektron a neutrino.
- Vznikají ve výškách kolem 20 km ve srážkách primárního kosmického záření s atmosférou.
- Doba života mionu je asi 2 mikrosekundy.
- Za tu dobu by i rychlostí světla uletěly jen 600m...
- Přesto je pozorujeme při povrchu Země díky dilataci času – Einsteinova teorie relativity!
- Každou sekundu jich asi 100 proletí Vaším tělem (jeden za minutu na čtvereční centimetr/sr).



http://cosmic.lbl.gov/SKliewer/Cosmic_Rays/Muons.htm