

Cesta do tajů mikrosvěta

Science Café

Coffee Library, Olomouc

10.4.2018

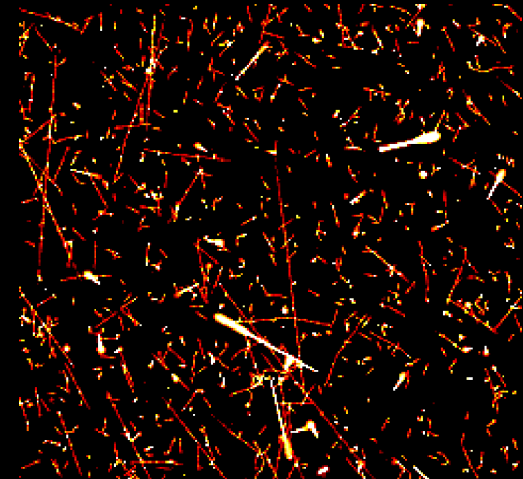
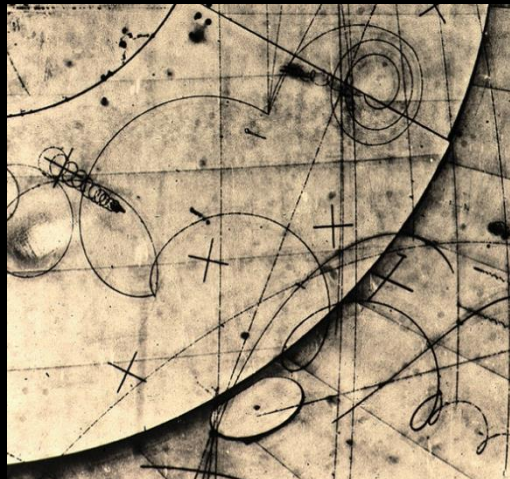
Jiří Kvita

Společná laboratoř optiky

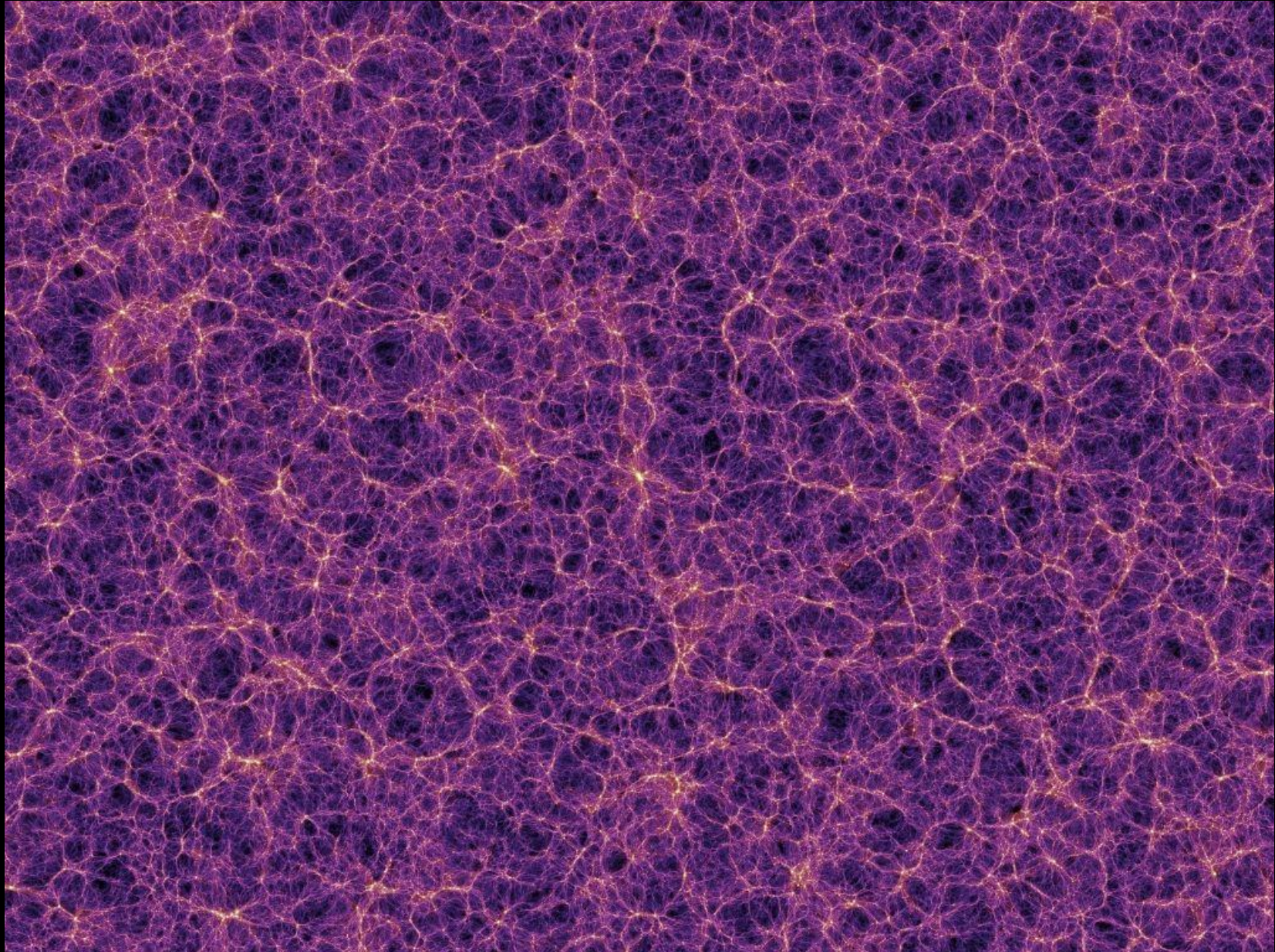
Přírodovědecká fakulta

Univerzity Palackého

Olomouc



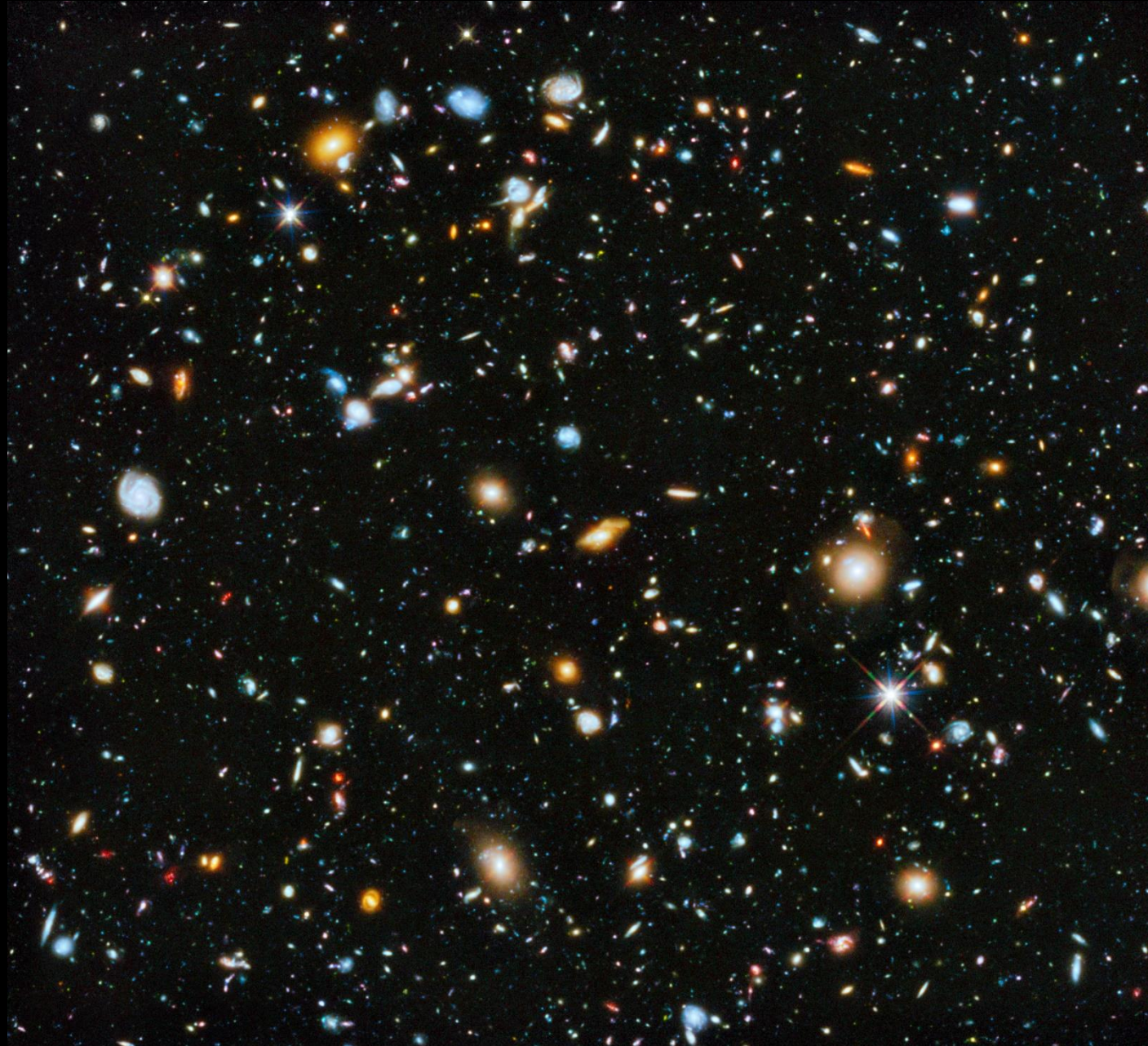
Vesmír



10^{26} m, 10 Gly

Millennium Simulation

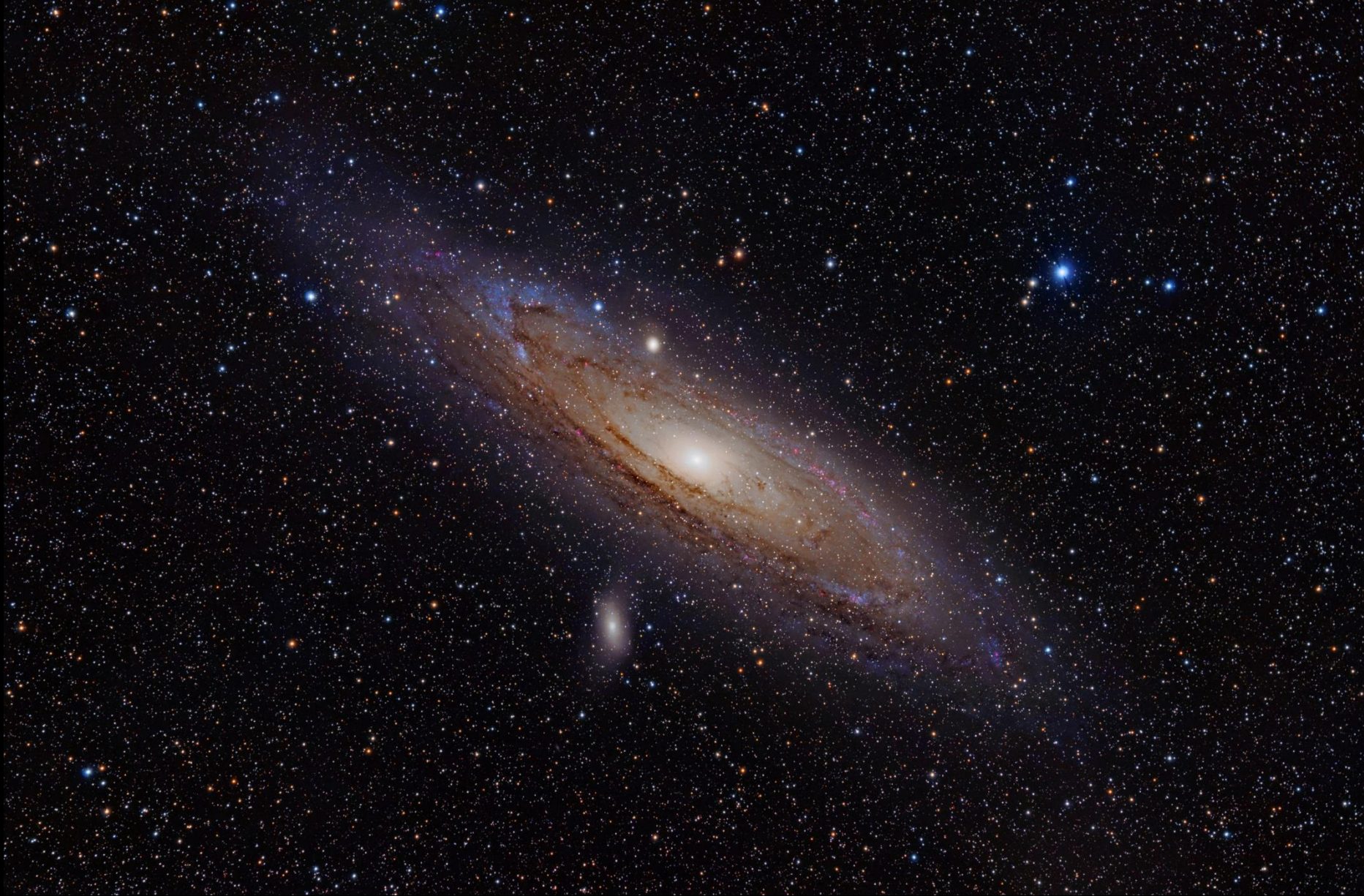
Kupy galaxií



10^{23} m, 10 Mly

Hubble Space Telescope

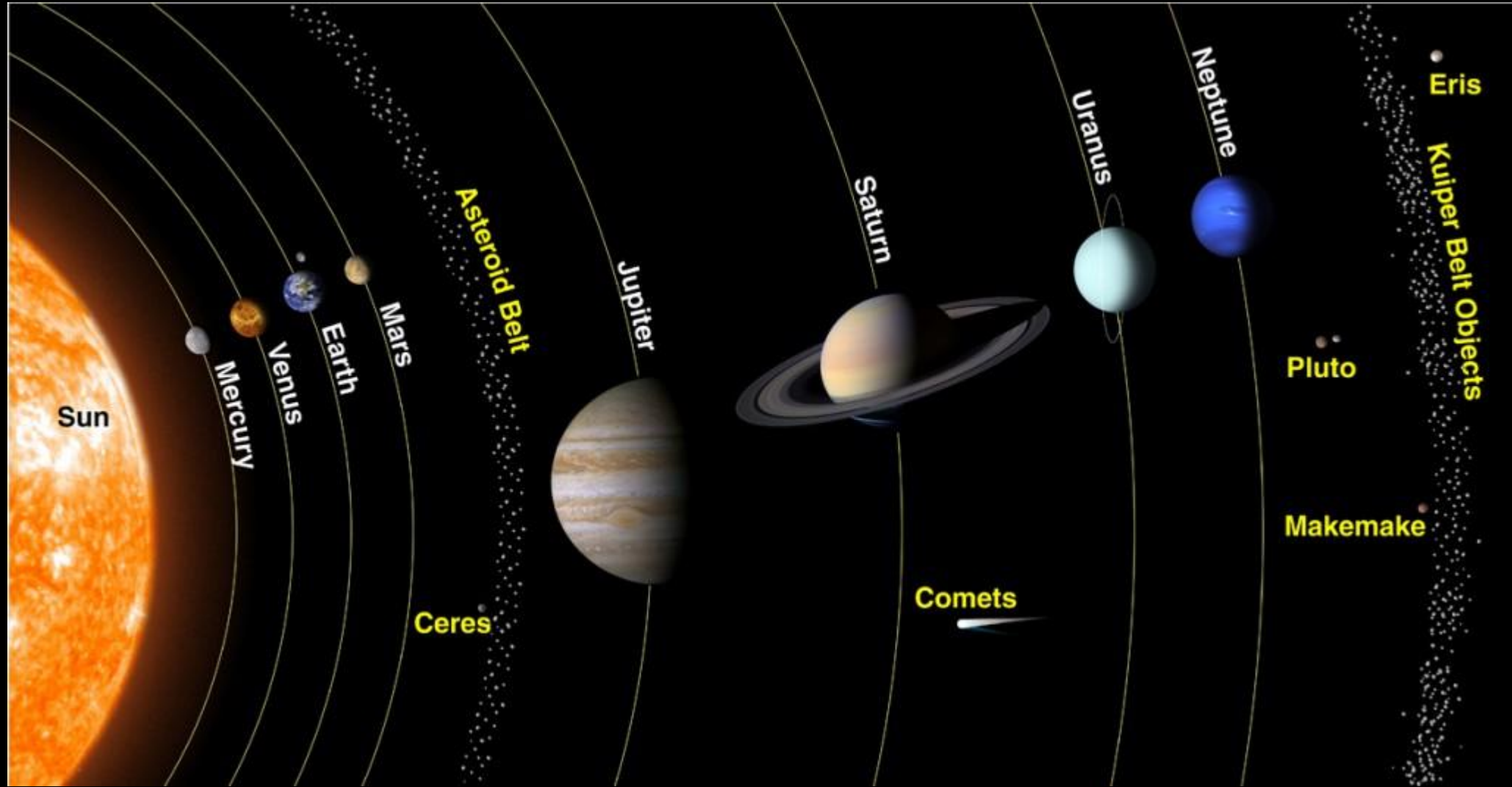
Galaxie



10^{21} m, 100 kly

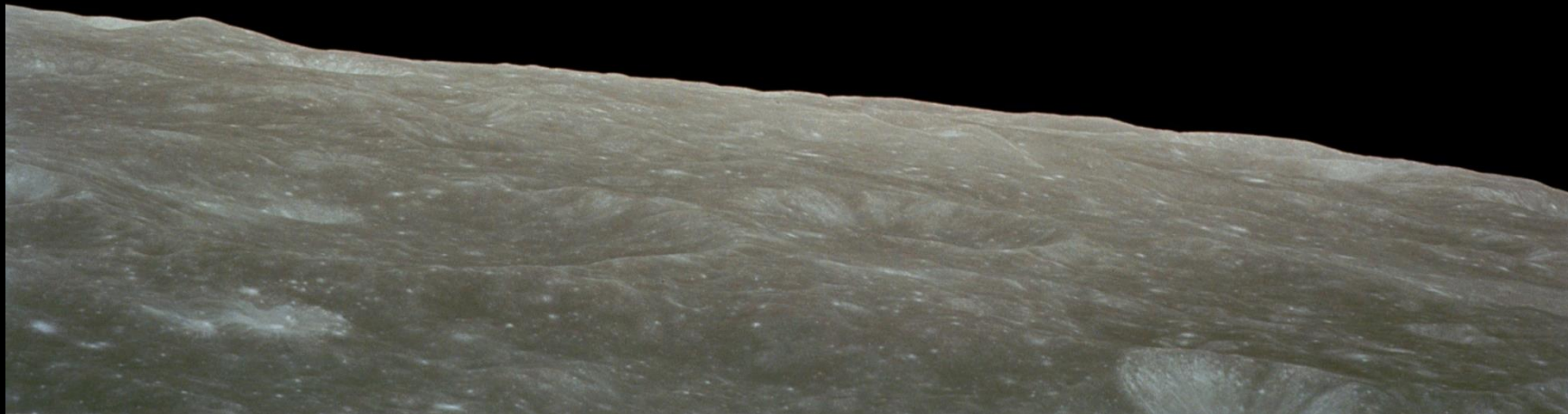
Adam Evans

Sluneční soustava



10^{11} m, 10 lh

Ze Země na Měsíc



10^8 m, 1 ls

Země



10^7 m

by Apollo 17

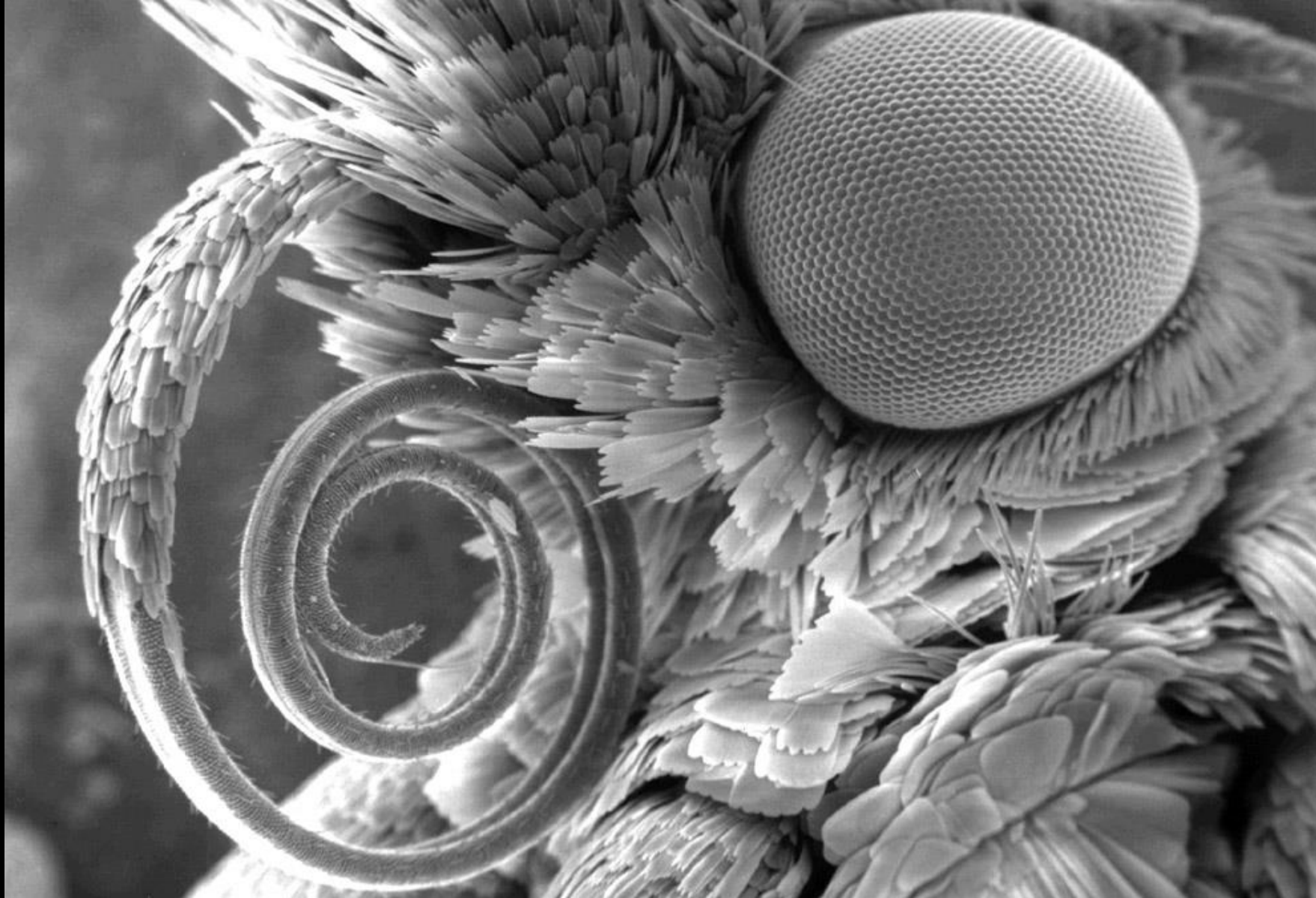
Tvor



10^{-2} m

Optická fotografie listovnice nádherné, ifauna.cz

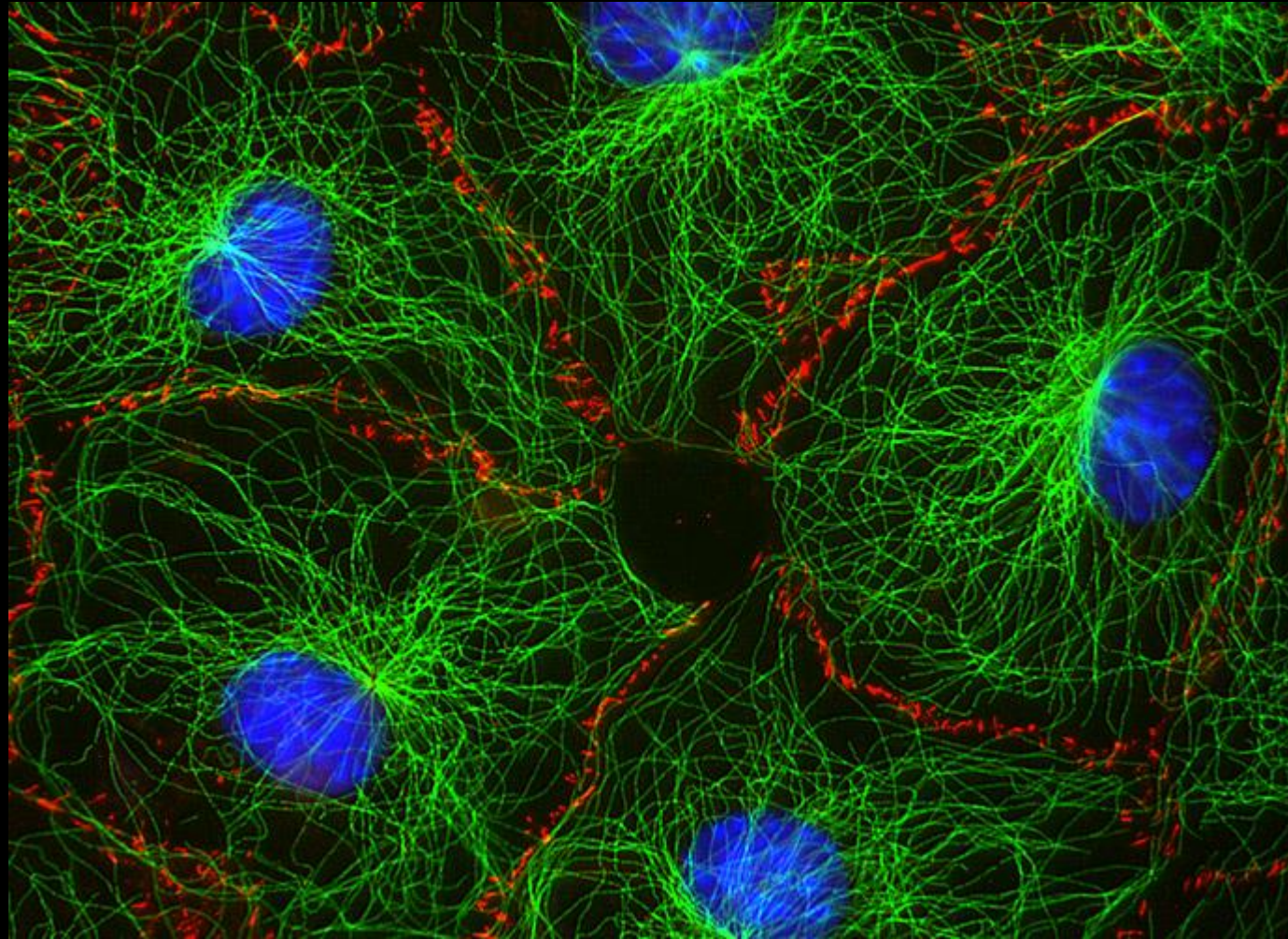
Tvor II



10^{-3} m

Motýl elektronovým mikroskopem na Dartmouth College

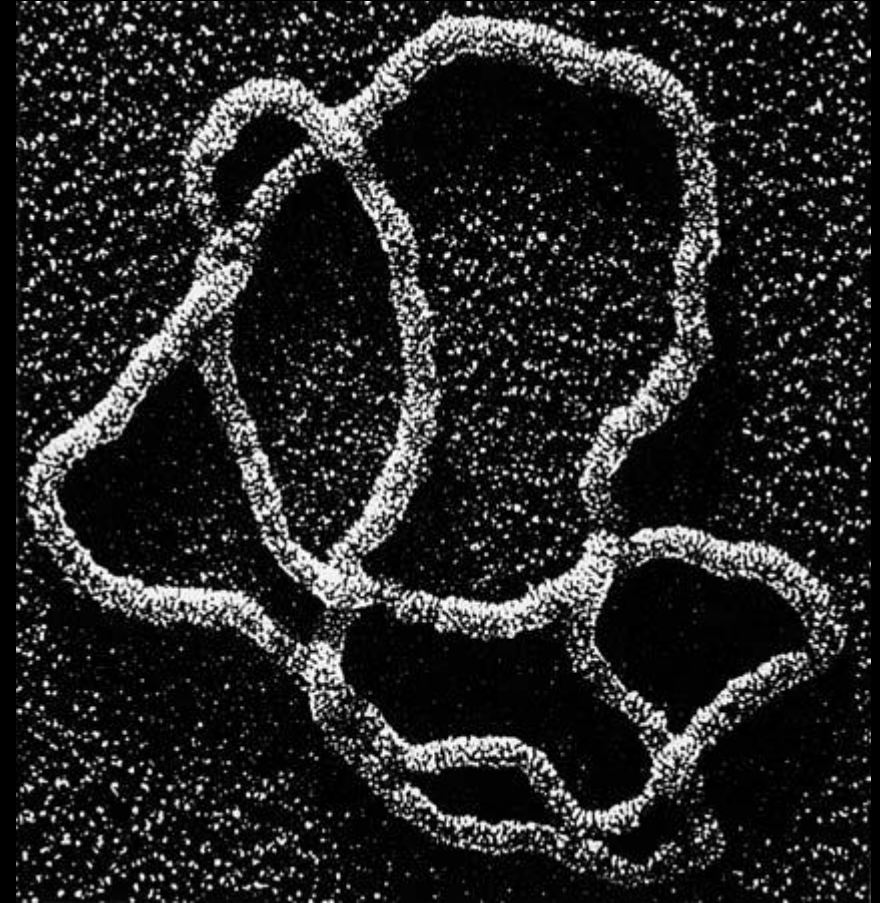
Buňka



10^{-5} m

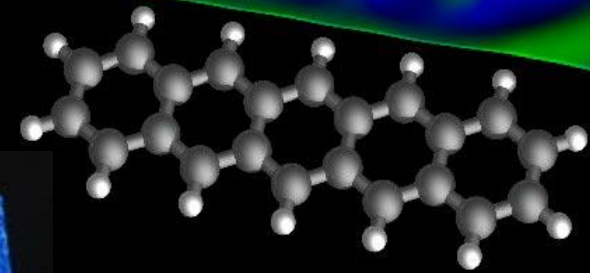
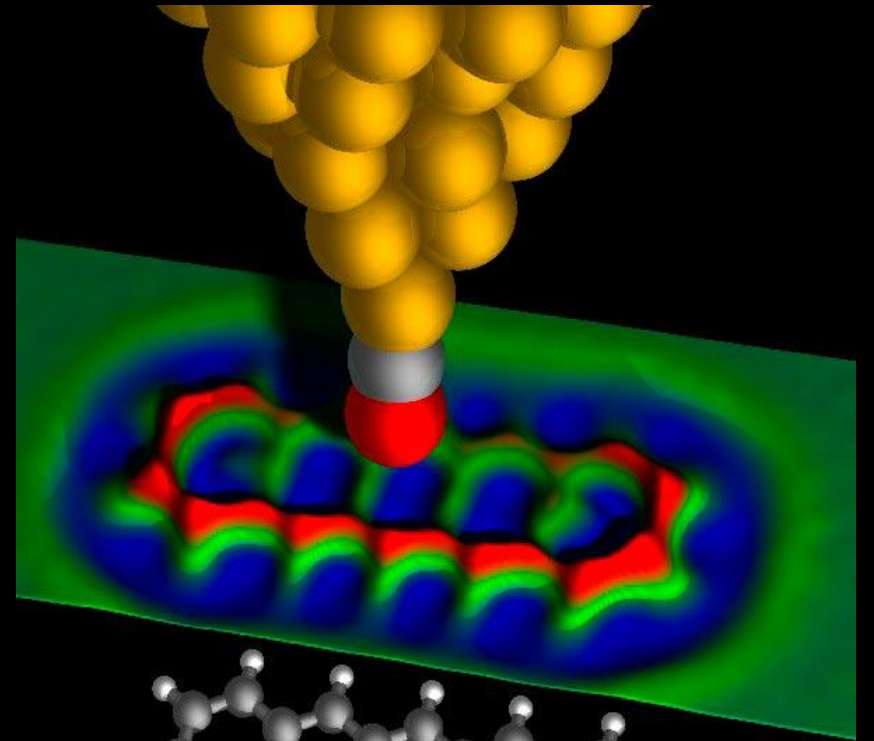
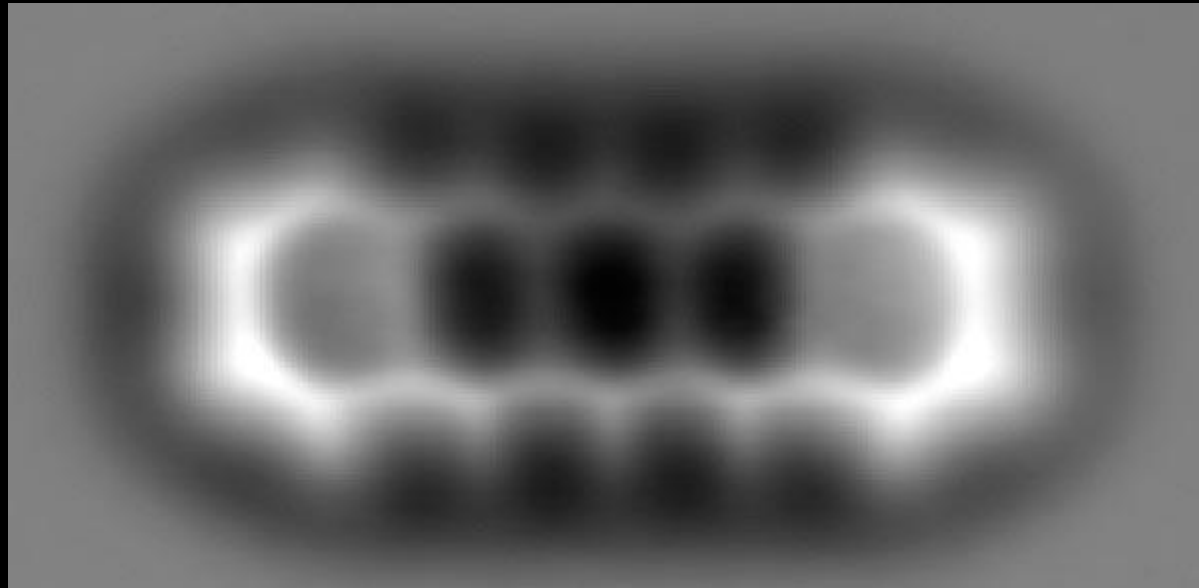
myší vazivová buňka, Jan Schmoranzner

Molekula DNA – model vs. fotografie

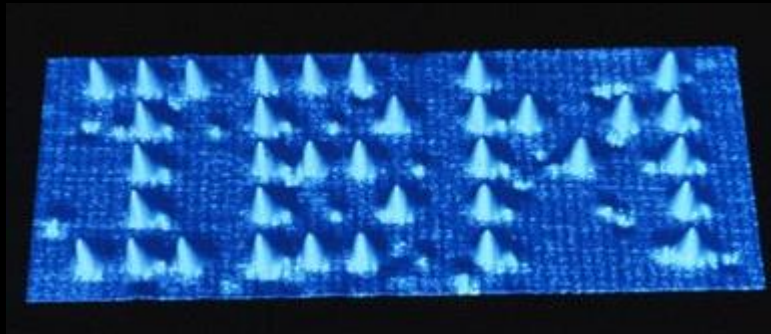


10^{-8} m

Molekula pentacenu – obláčky elektronů

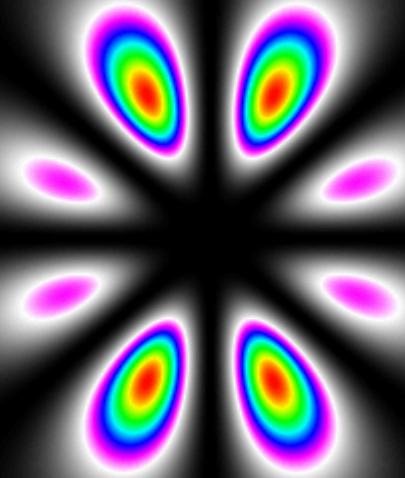
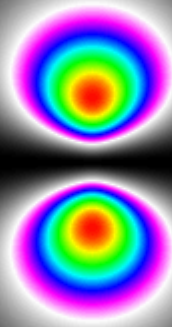
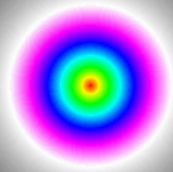


10^{-9} m



IBM, Zurich

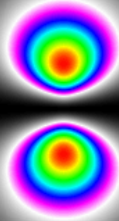
Atom – stojaté vlny elektronů kolem jádra



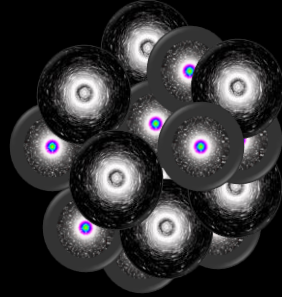
10^{-10} m

Škály délek a energií

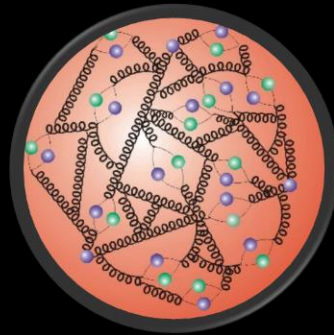
- Atomový obal
 - 10 nm, 10 eV – keV



- Atomové jádro
 - 100 fm, 10 keV – 1 MeV



- Struktura protonu
 - 1 fm, GeV



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

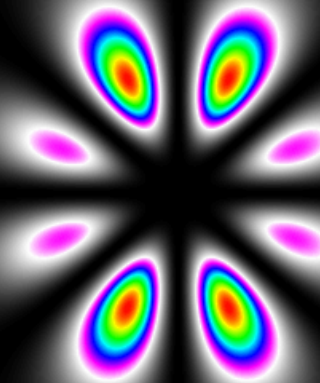
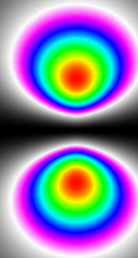
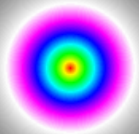
$$1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Elektron

• „A povedzte mi, Kefalín, čo vy si predstavujete pod takým slovom? “

• Elektron: 

- Náboj -1 v jednotkách elementárneho náboje.
- Klidová energie 0,511 MeV.
- Bodová častice bez vnútornej štruktúry!
- „Necíti“ silnou (jadernou) interakci.
- Spin $\frac{1}{2}$.



Spin!

- Elektron je spinner! (má vnitřní moment hybnosti)
- V reakcích a rozpadech se zachovává. Nelze zastavit, jen překlápět (magnetická rezonance).

Wolfgang Pauli

Niels Bohr

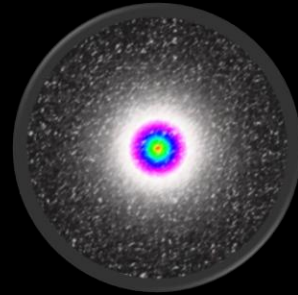


Proton a neutron

• „A povedzte mi, Kefalín, čo vy si predstavujete pod takým slovom?“

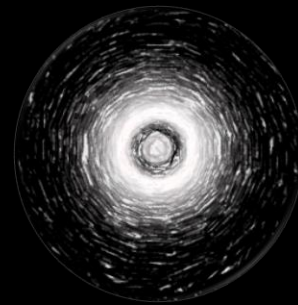
• Proton:

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



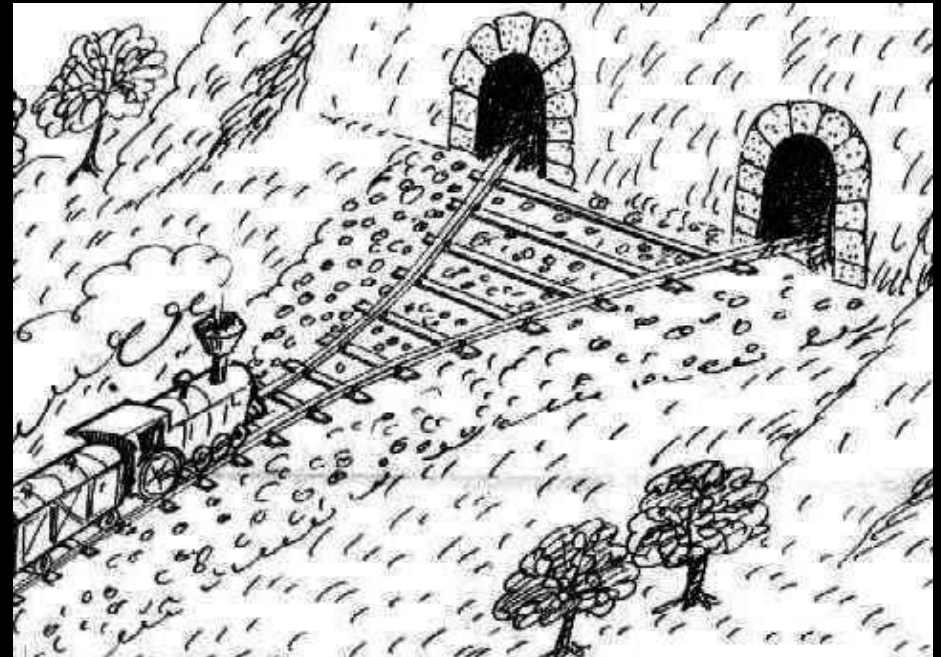
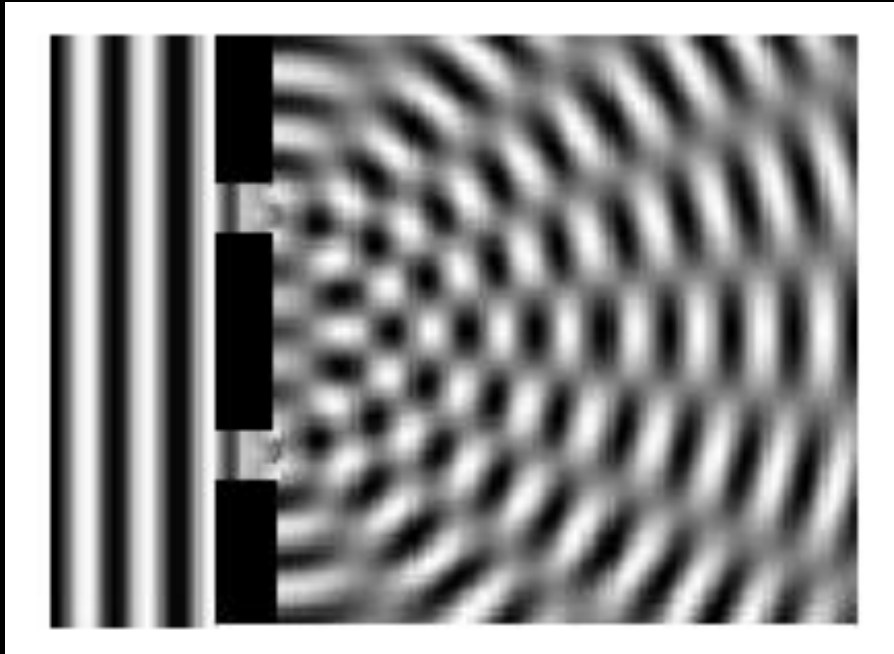
• Neutron:

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

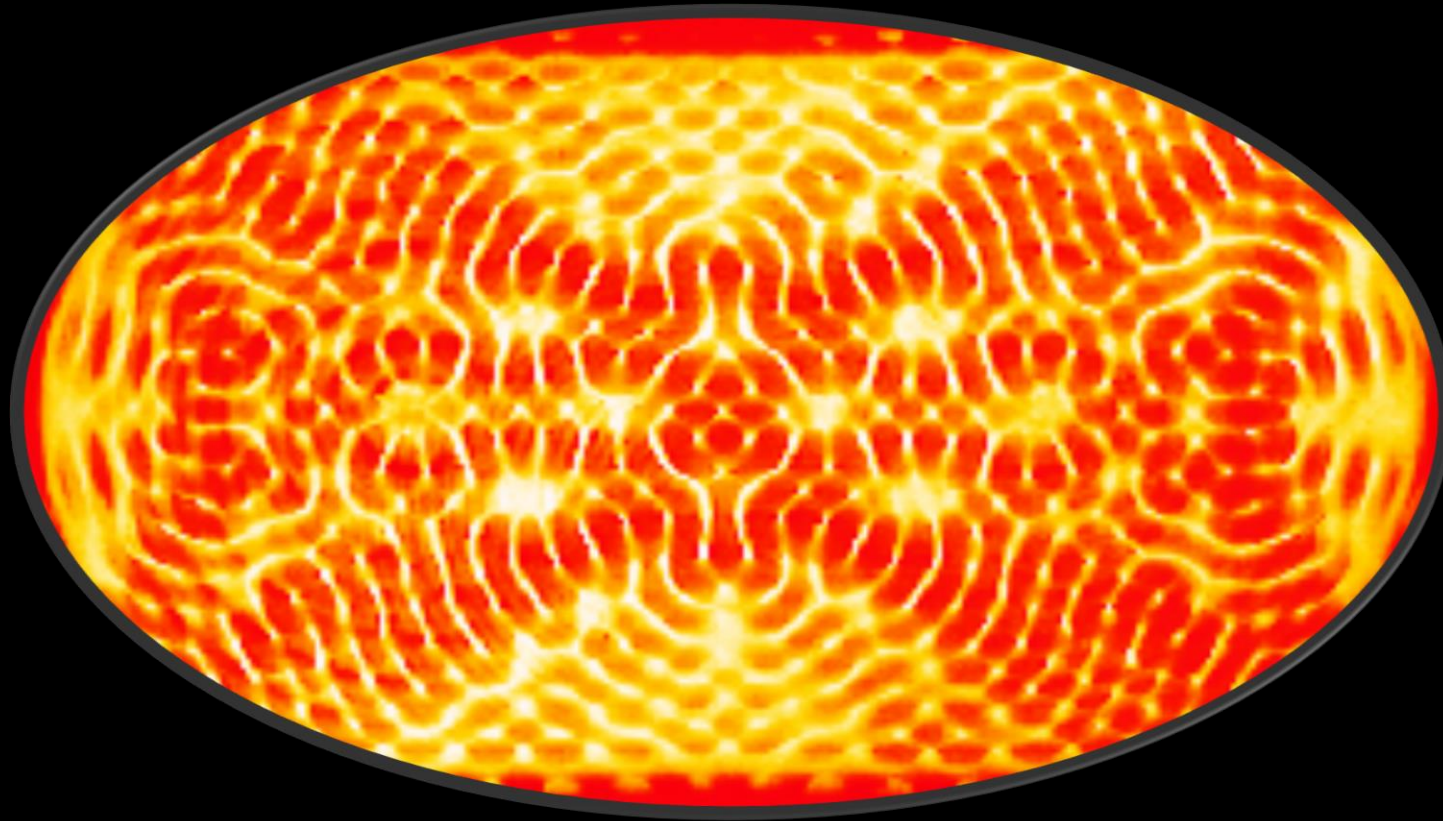


Vlna nebo částice?

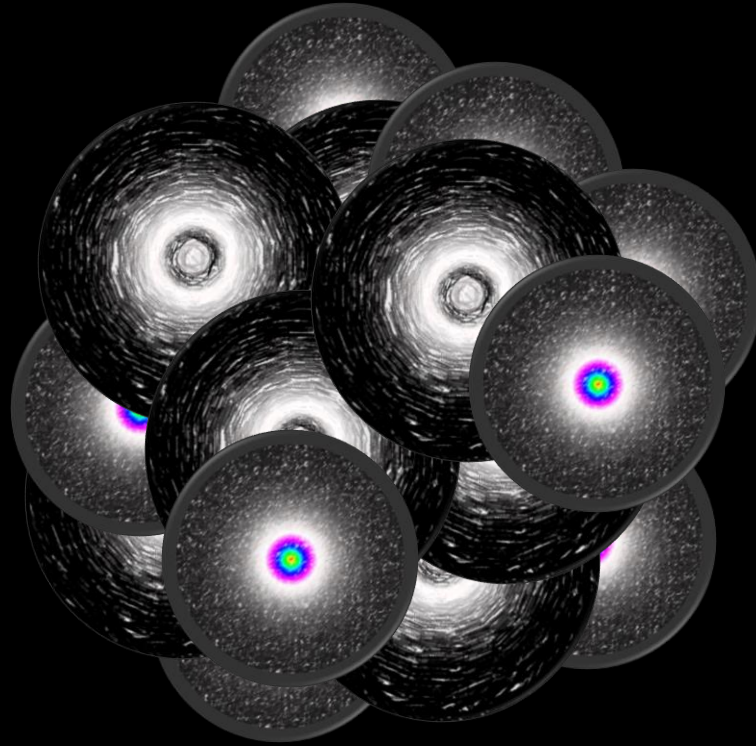
- Obojí současně! Elektronový mikroskop, difrakce (ohyb) světla i „částic“.
- Částice jako vlnění pronikají za překážku, vlny se skládají, interferují.
- Současně dopadem částice na film / stínítko dojde k její lokalizaci a zčernání jednoho fotocitlivého zrna, scintilaci v dané části detektoru.
- V makrosvětě ale nepozorujeme difrakci baseballového míčku na pálce.
- Makro objekty mají příliš krátkou vlnovou délku.



Kvantový billiard

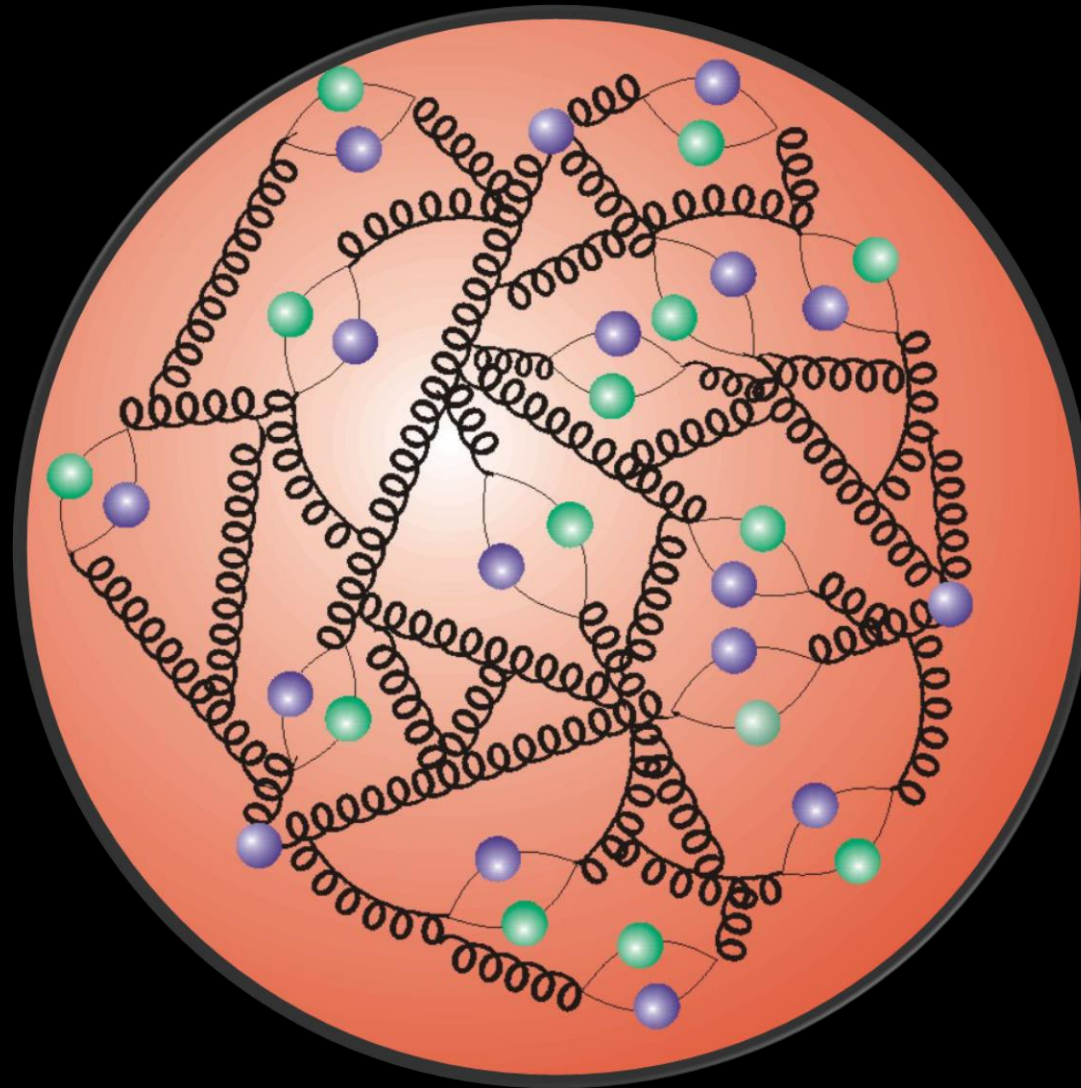


Jádro – protony a neutrony



10^{-14} m

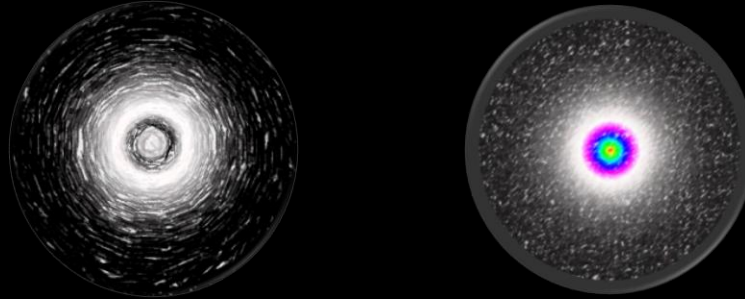
Proton – silná „polévka“ kvarků a gluonů



10^{-15} m

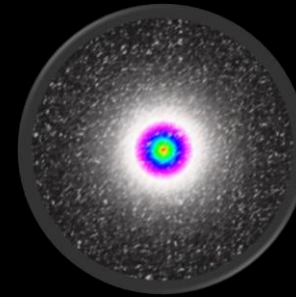
Nukleony

- V jádře jsou si protony a neutrony téměř rovnocenné: nukleony.
- Jádro drží pohromadě silnou interakcí, která má krátký dosah, a z našeho běžného makroskopického života ji neznáme.
- Rozdíl mezi protony a neutrony je dán až elektromagnetickou interakcí (proton je kladný, neutron neutrální).

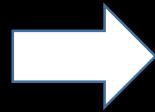
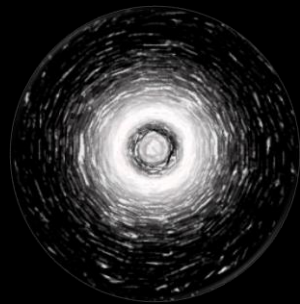


Rozpad volného neutronu

- 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).

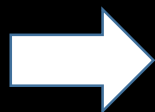
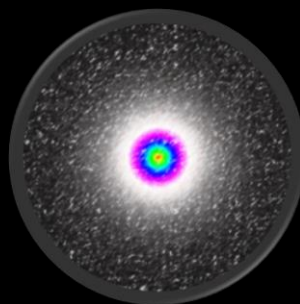


**Elektronové
antineutrino**

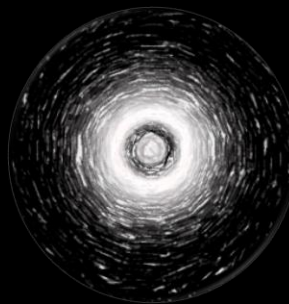
Rozpad protonu (v jádře)

- Podobně proton v nestabilním atomovém jádře se může rozpadnout na neutron, pozitron, a elektricky neutrální elektronové neutrino.
- Musí si na to vypůjčit energii z jádra.

Proton



Neutron



Pozitron

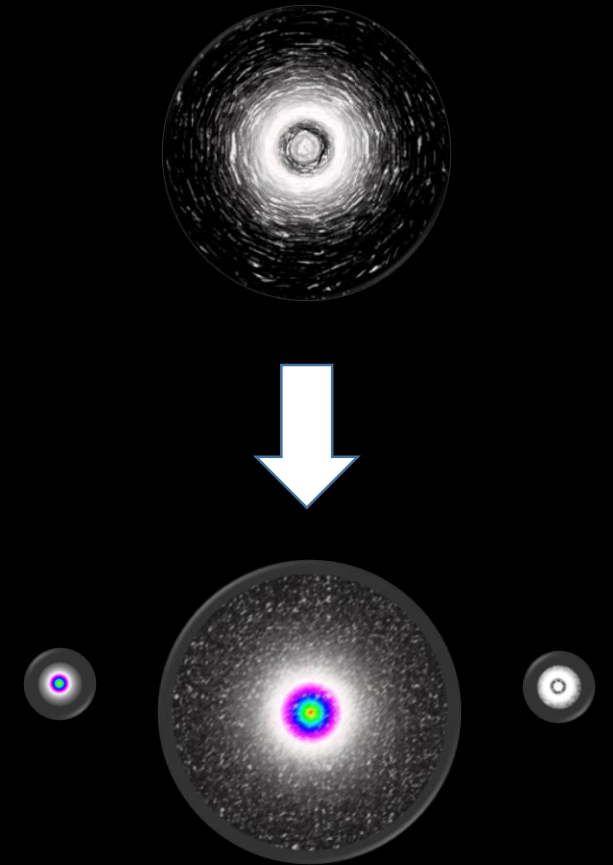
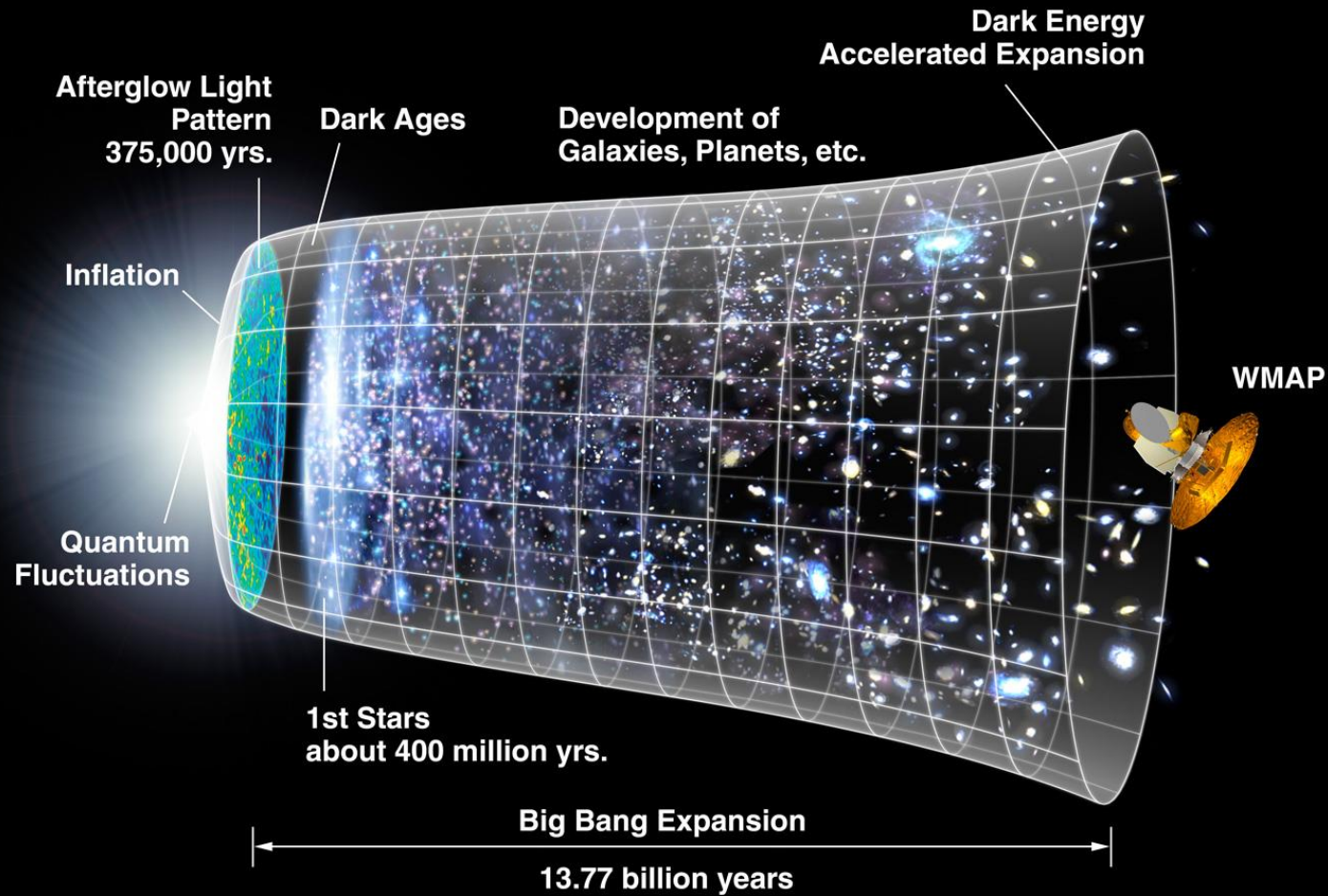


**Elektronové
neutrino**

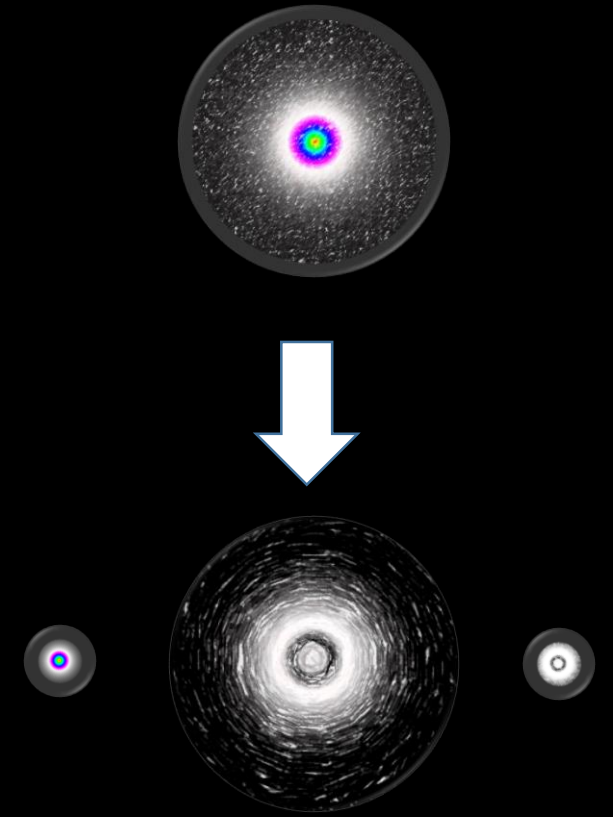
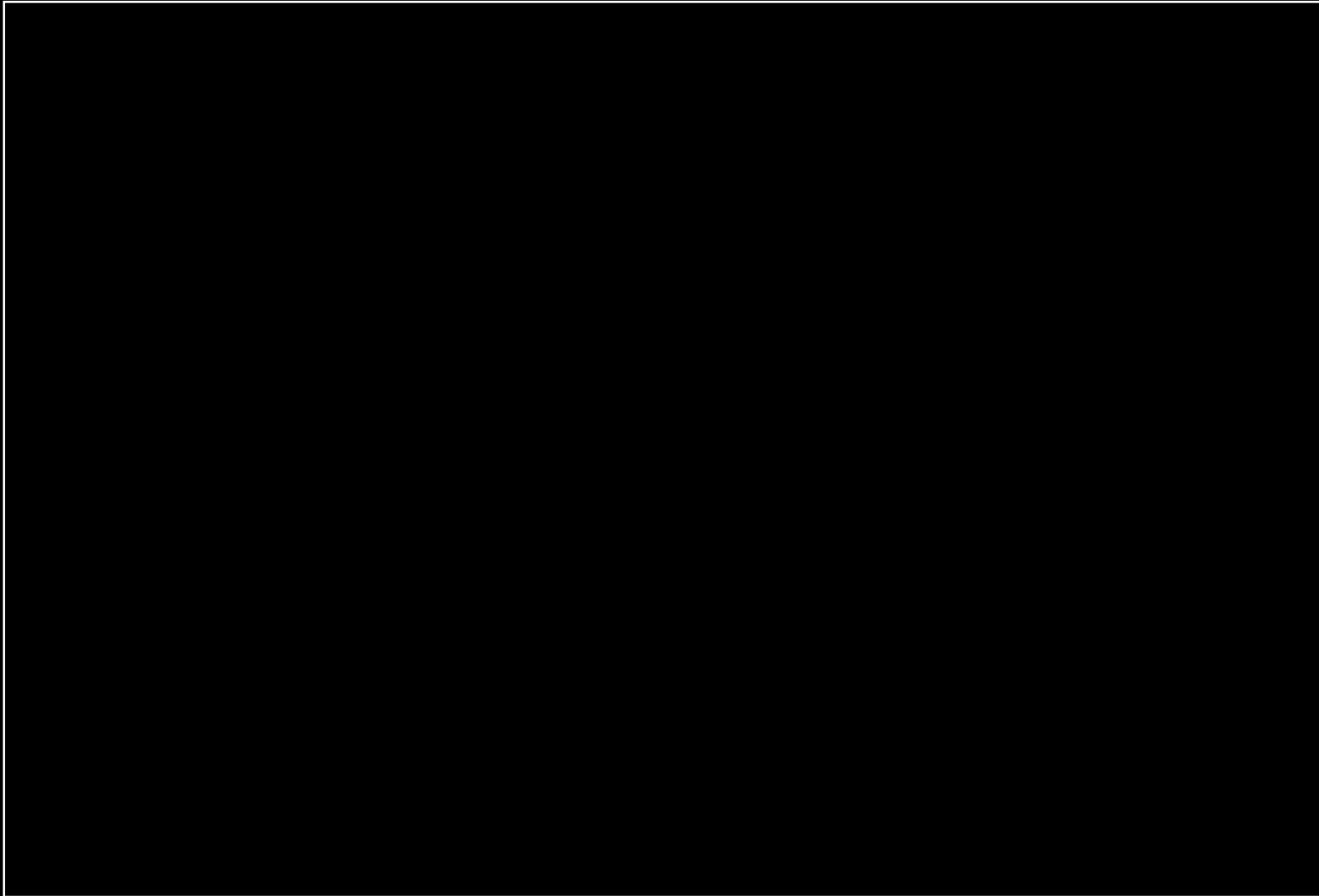


- Pozitron se v látce zastaví, potká se s elektronem a anihilují na dva fotony, které mají charakteristickou energii a letí proti sobě: využití v Pozitronové Emisní Tomografii.

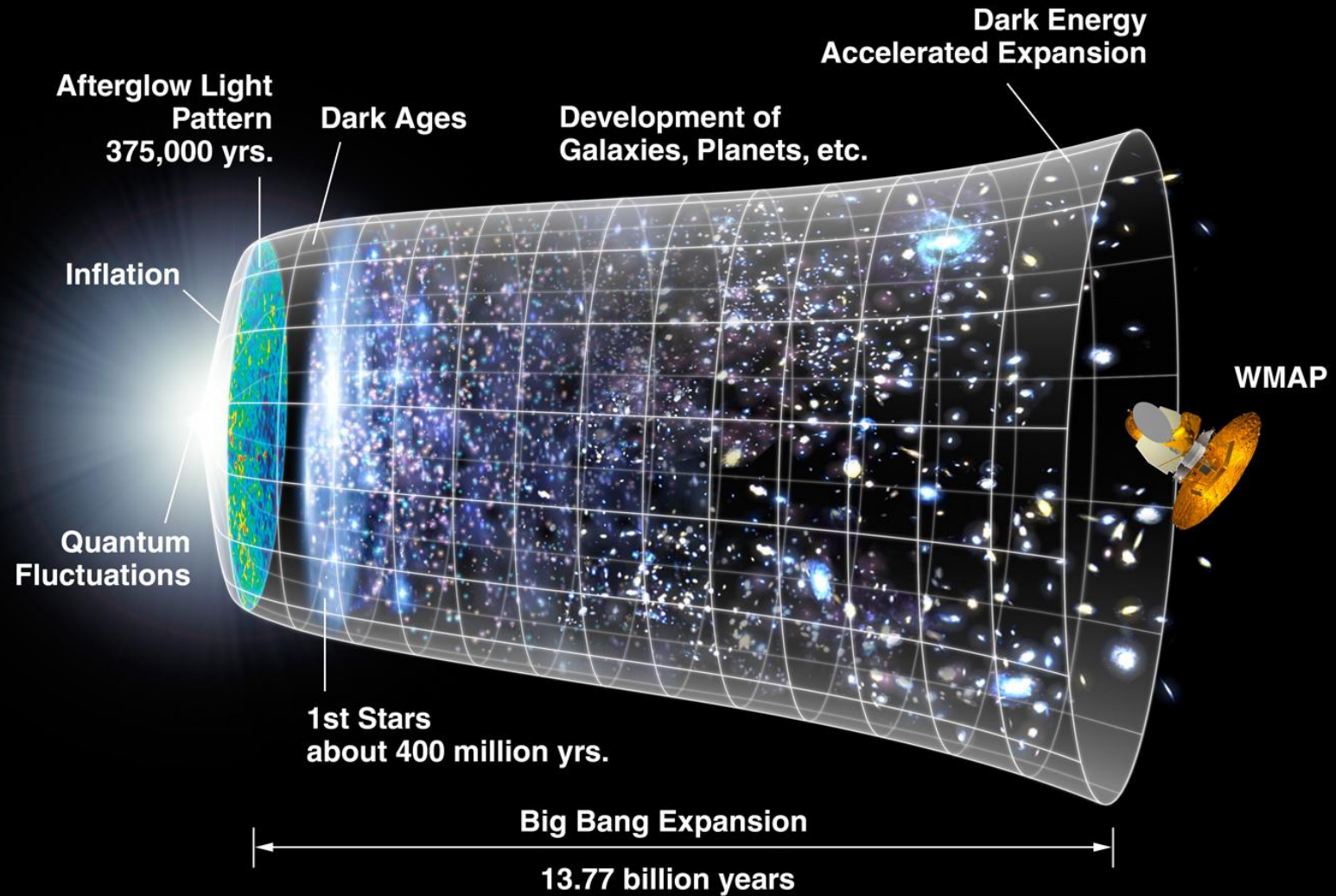
Vesmír, kde neutron je těžší než proton



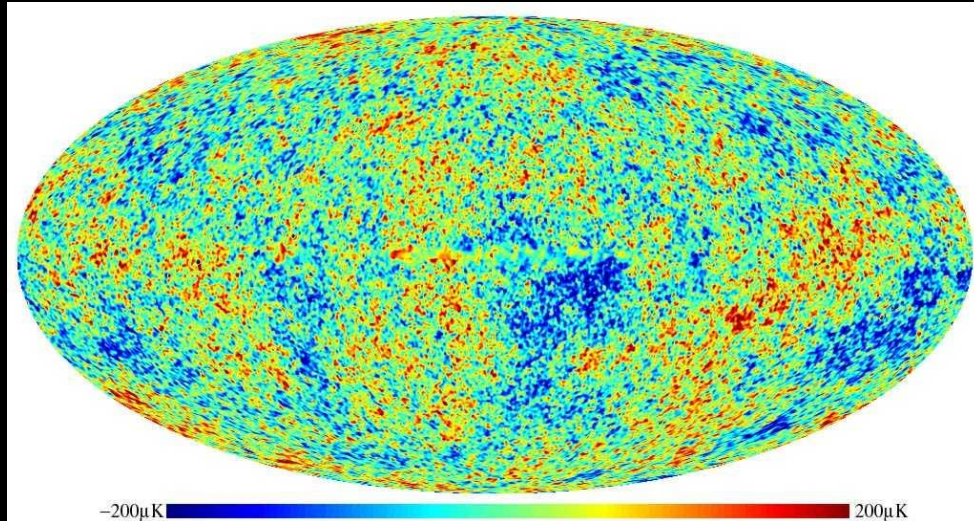
Vesmír, kde proton je těžší než neutron



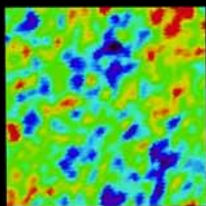
Od Velkého třesku po současnost



Fluktuace záření kosmického pozadí

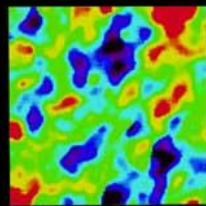


GEOMETRY OF THE UNIVERSE



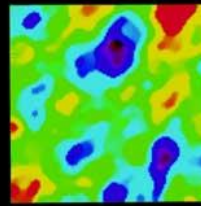
OPEN

Fluctuations largest on half-degree scale



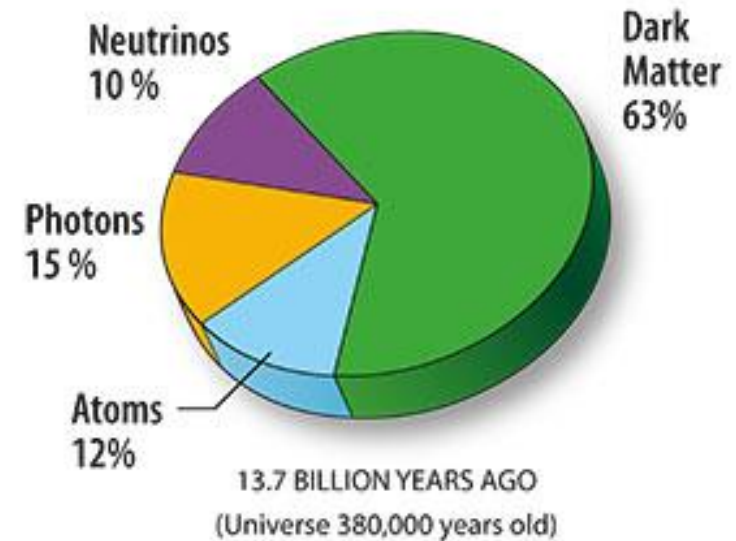
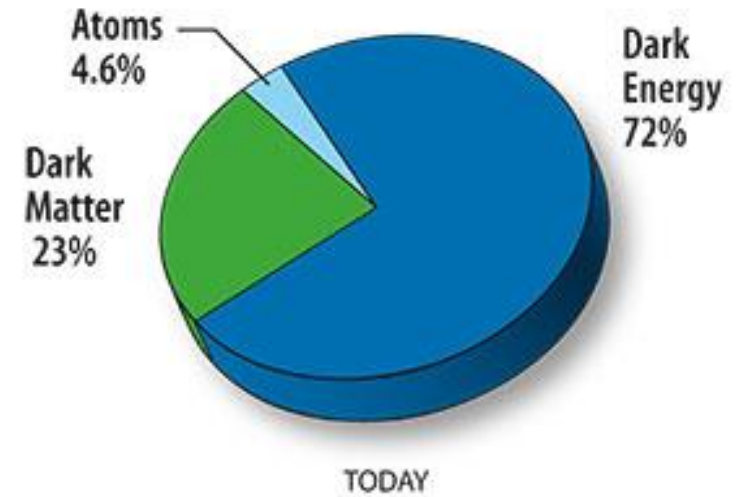
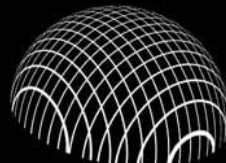
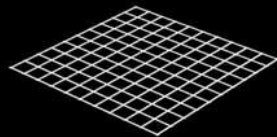
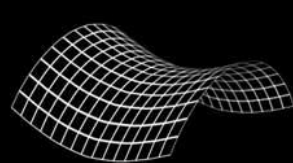
FLAT

Fluctuations largest on 1-degree scale

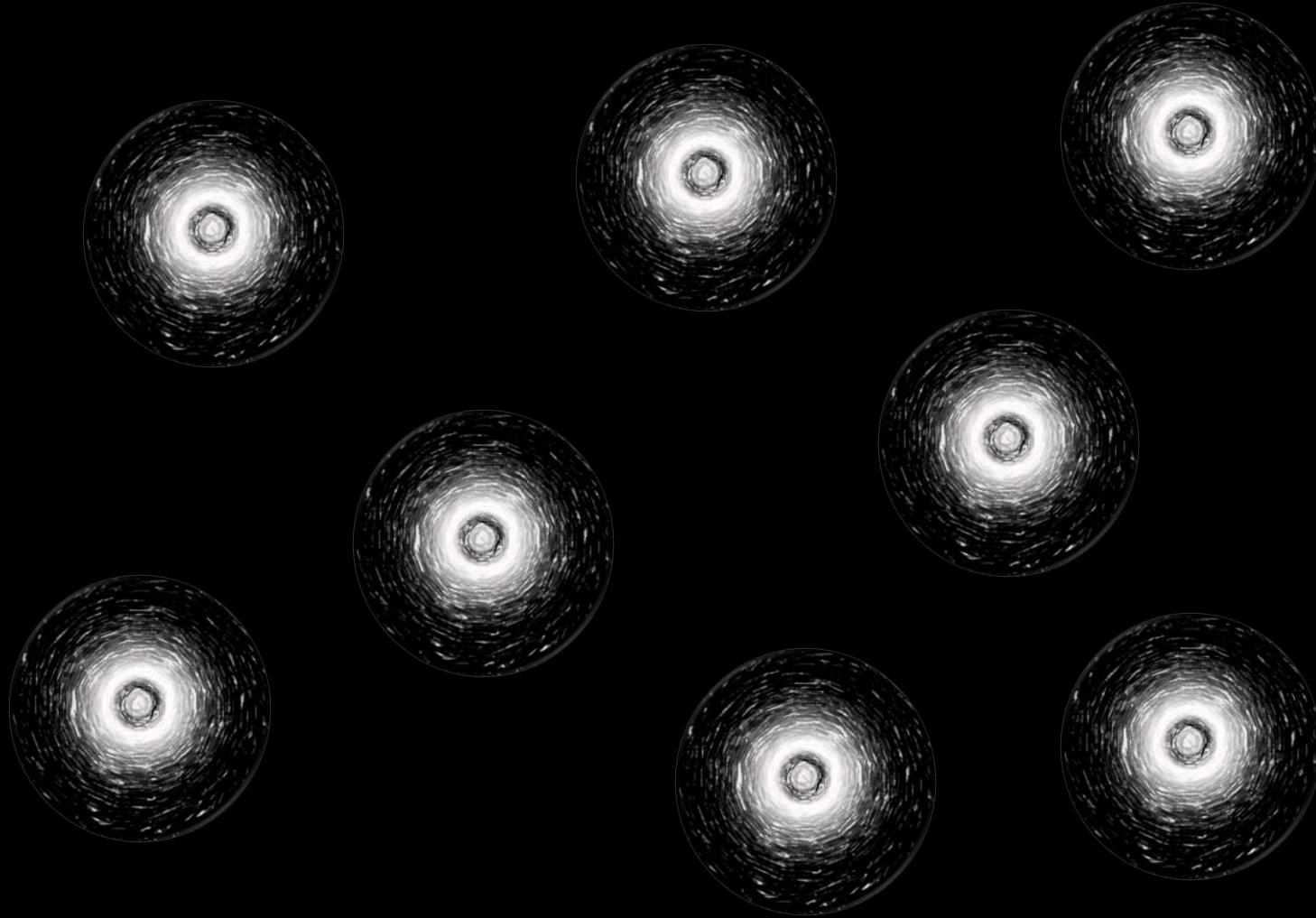


CLOSED

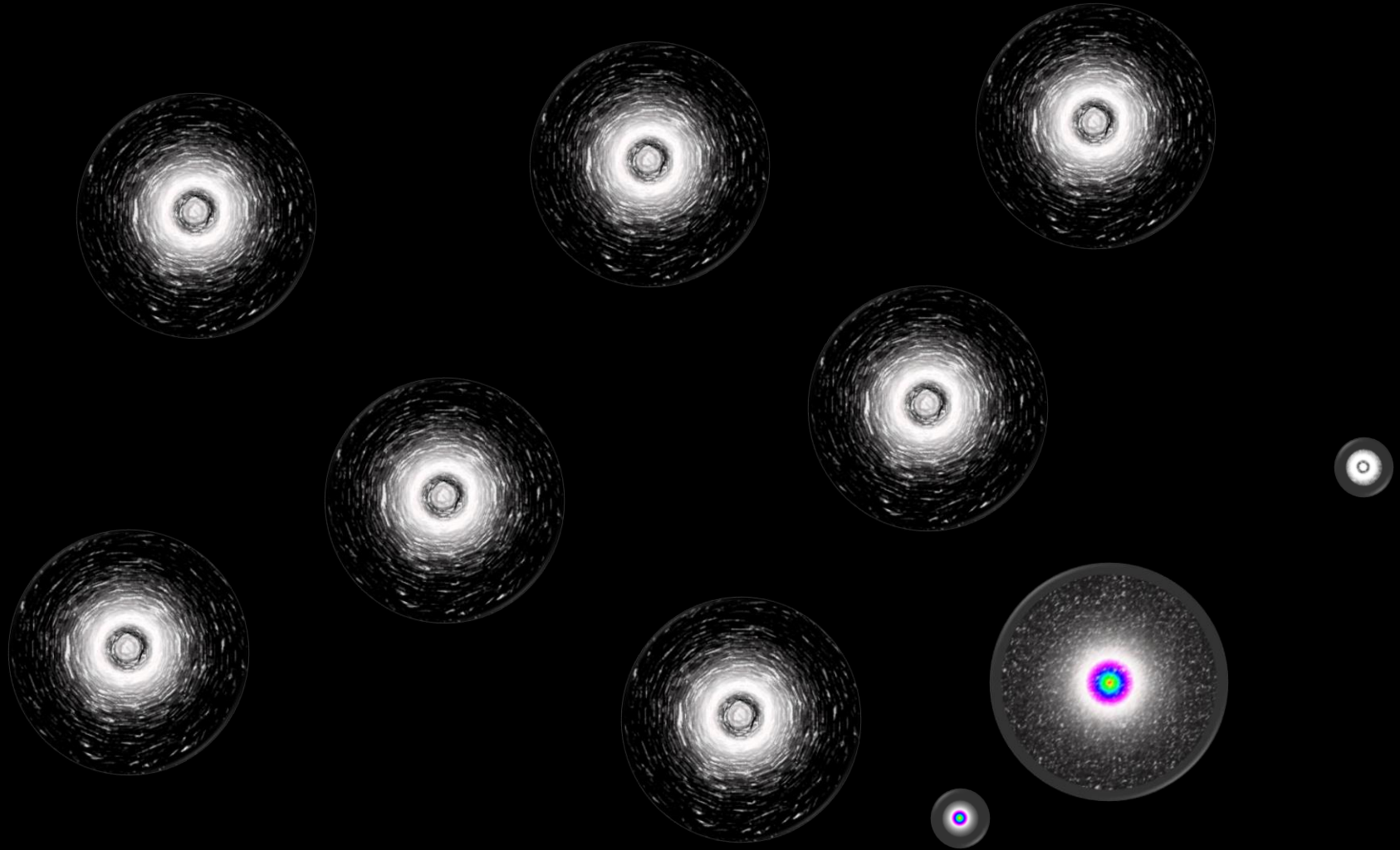
Fluctuations largest on greater than 1-degree scale



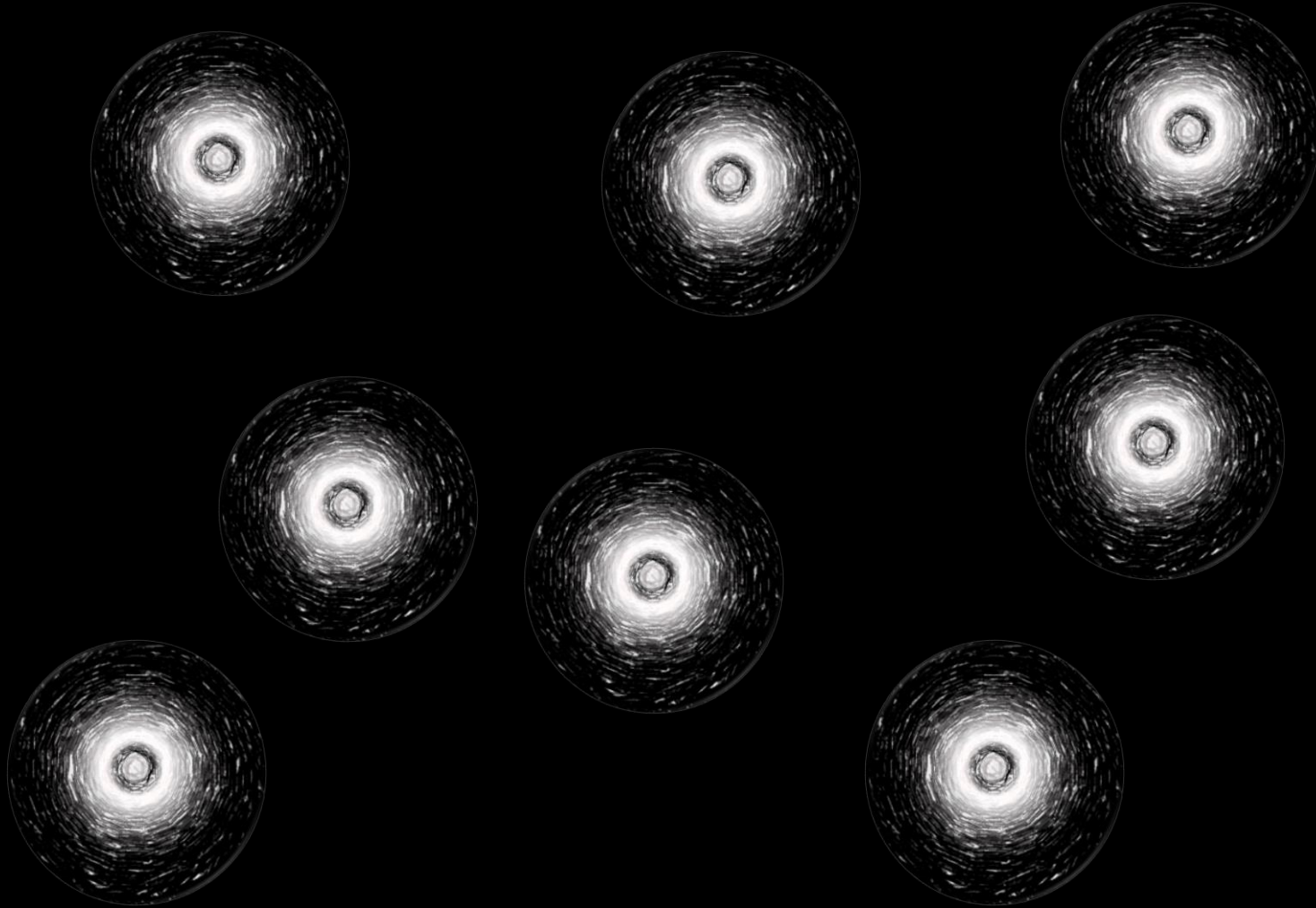
Neutrony se rozpadají náhodně



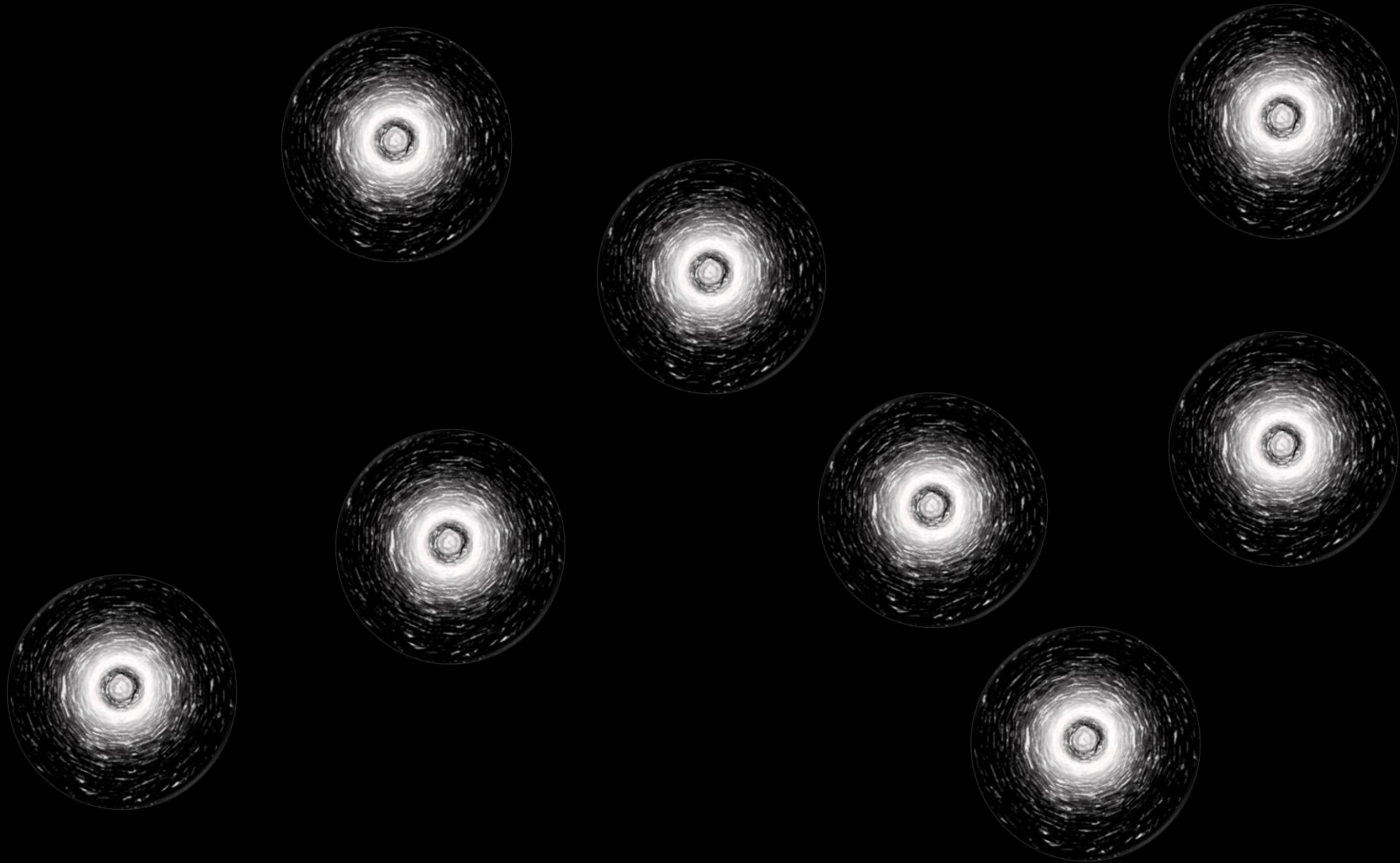
Neutrony se rozpadají náhodně



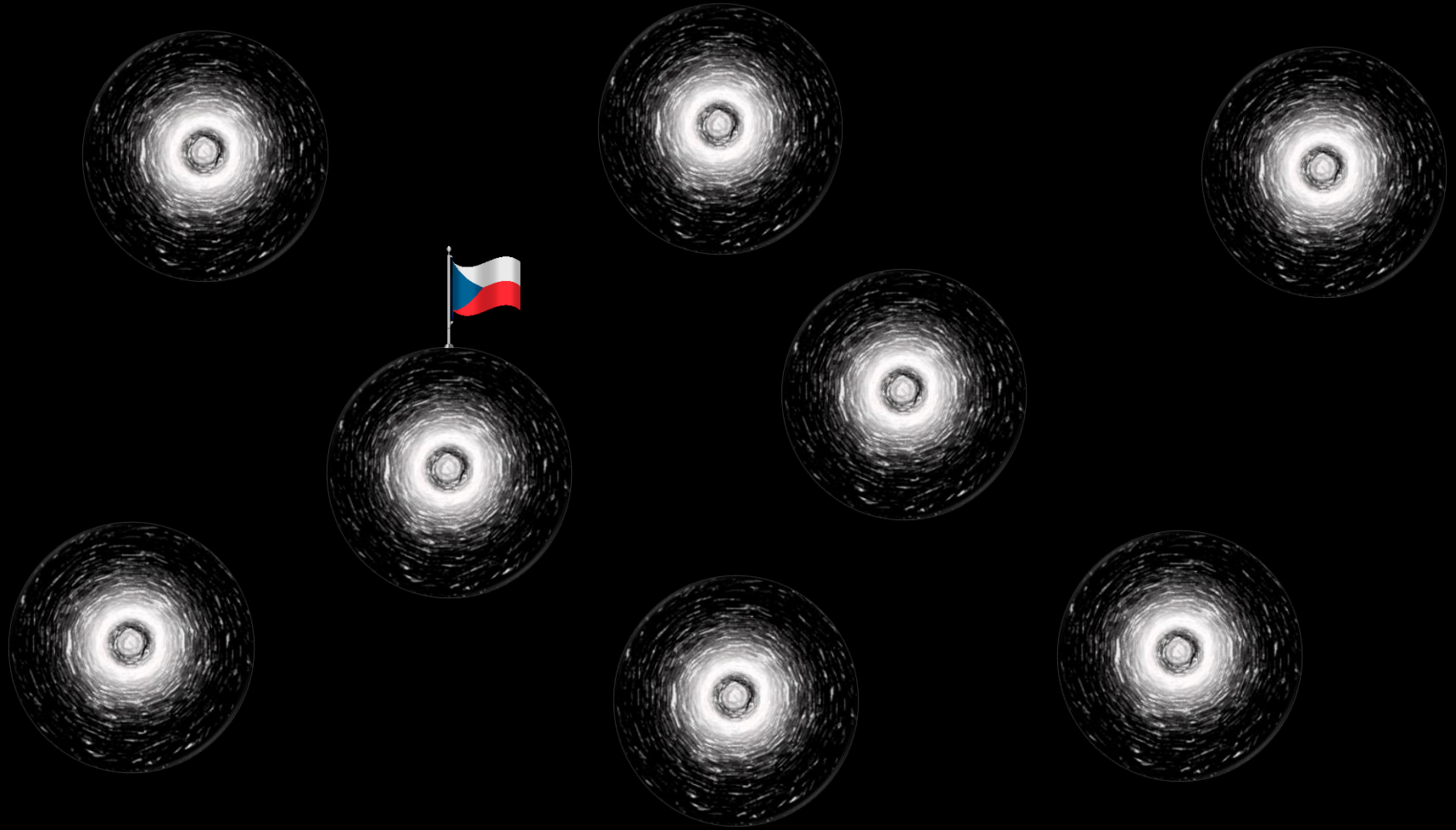
Můj neutron?



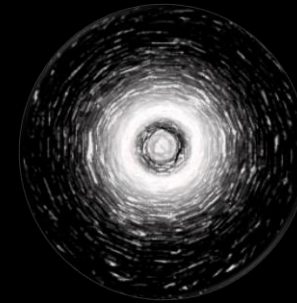
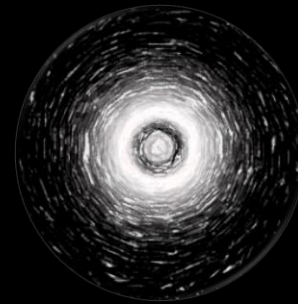
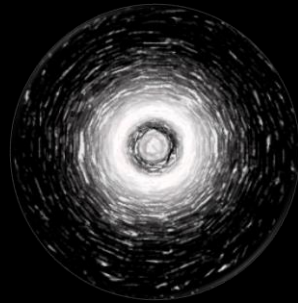
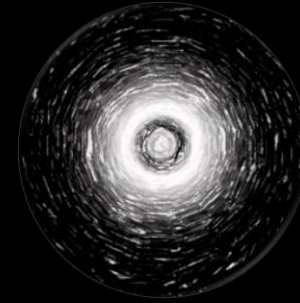
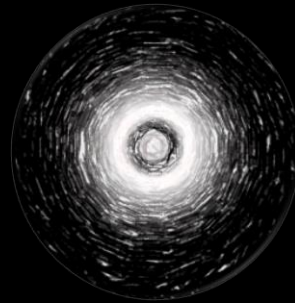
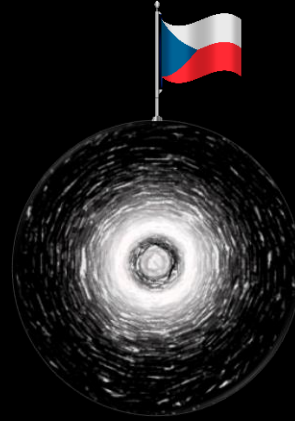
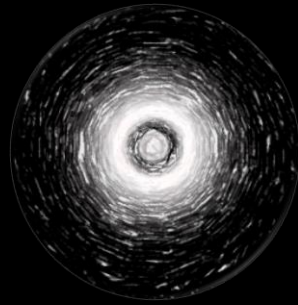
Můj neutron?



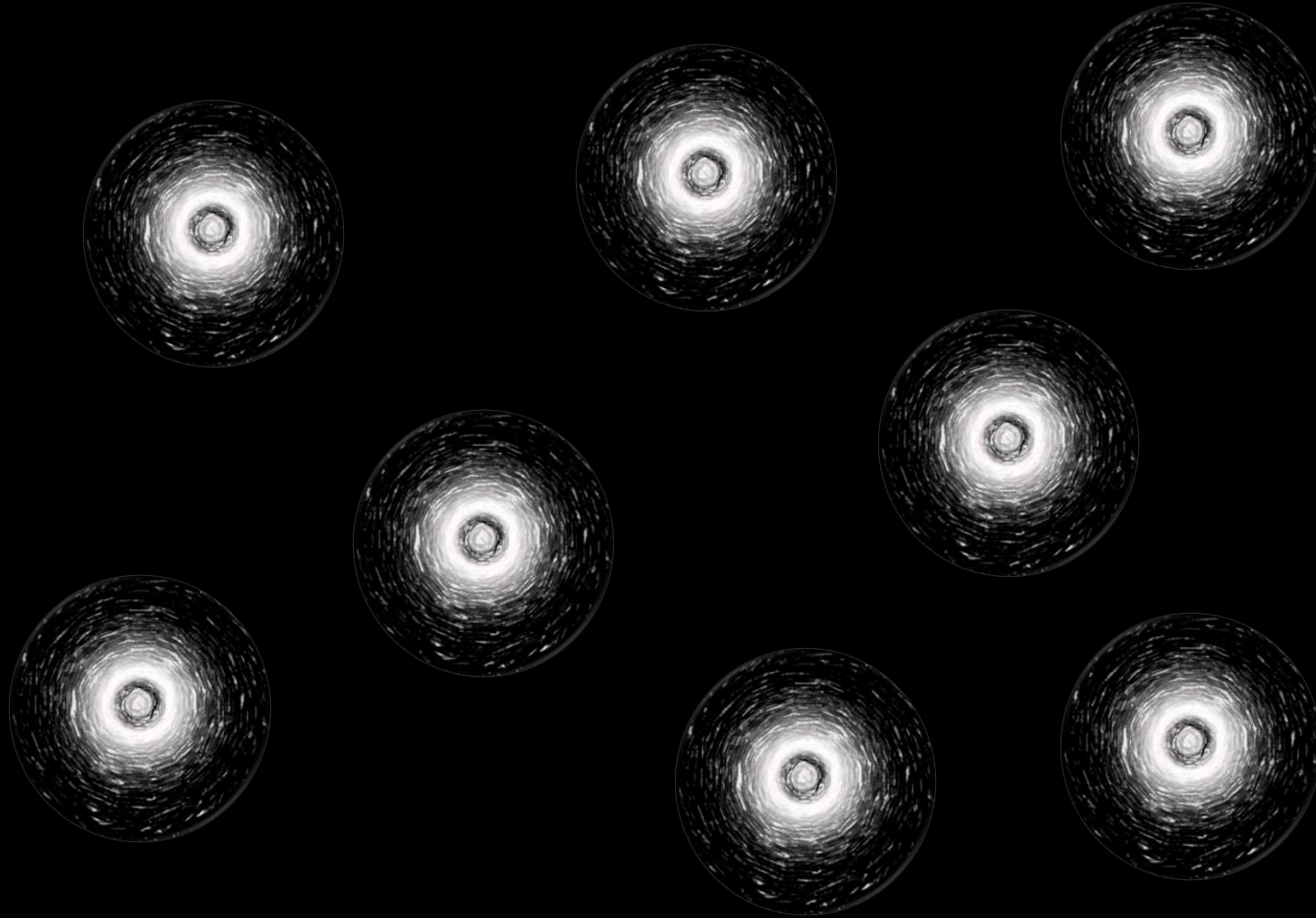
Můj neutron?



Můj neutron?

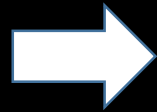
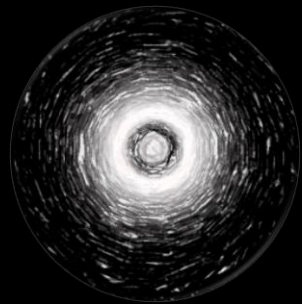


Neutrony jsou nerozlišitelné

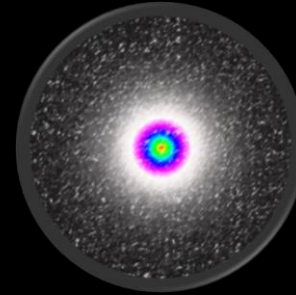


Rozpad volného neutronu

Neutron



Proton



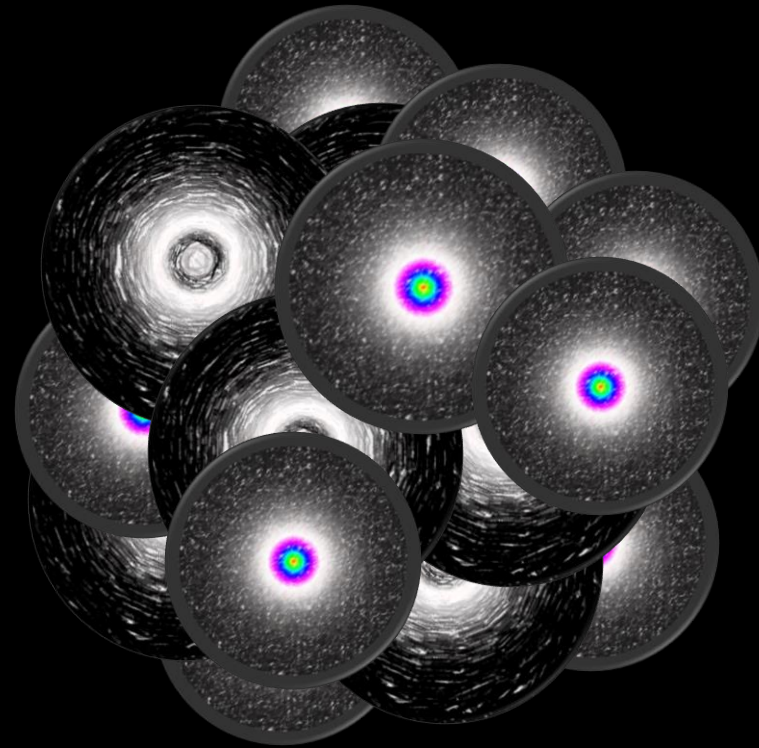
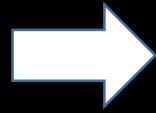
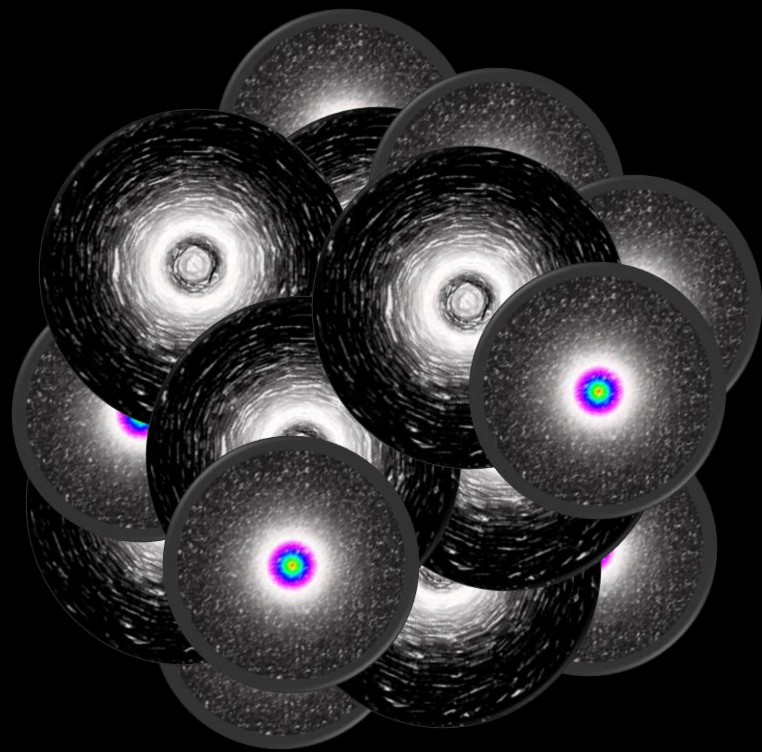
Elektron



Elektronové
antineutrino



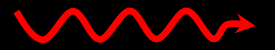
Rozpad atomu



Elektron



Gama



Foton



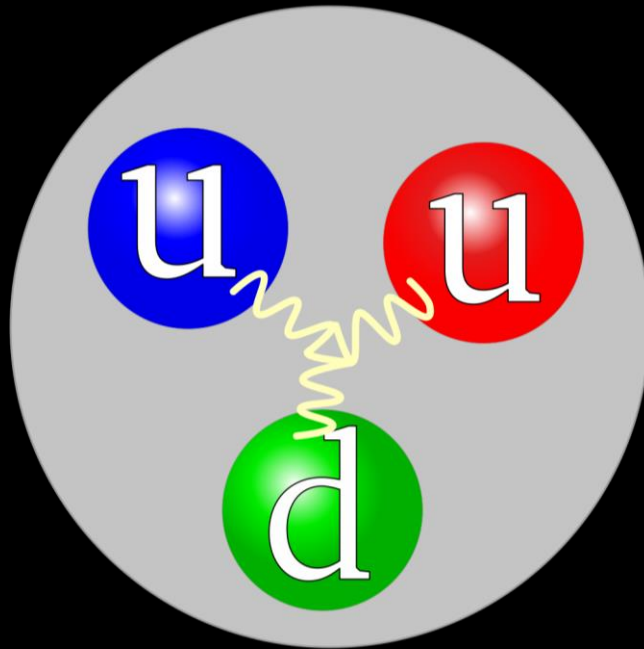
**Elektronové
antineutrino**

10^{-14} m

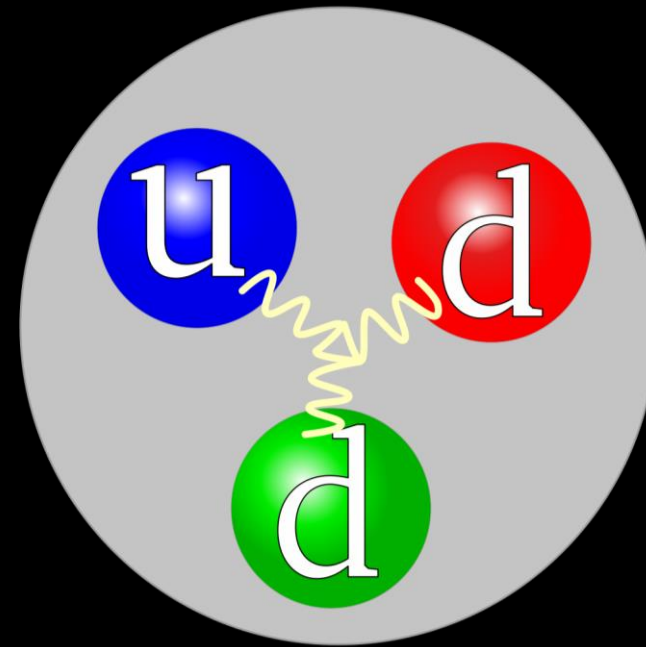
Elektron v jádře předtím nebyl. Prostě vznikl. Částice vznikají a zanikají.

Proton a neutron

Proton



Neutron



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

Elementární částice

Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

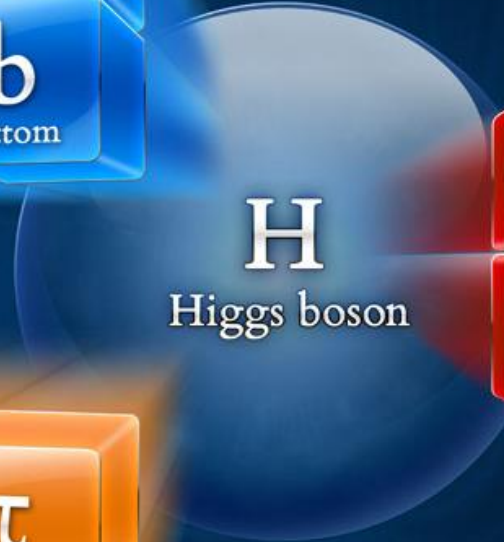
Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Force Carriers

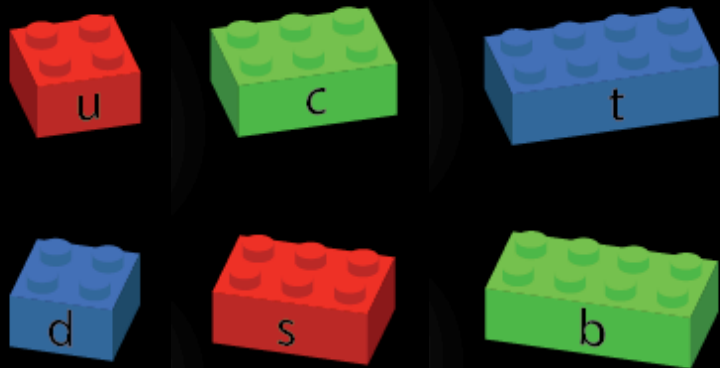
Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

H
Higgs boson



Částice složené z kvarků -- baryony

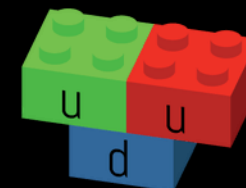
Kvarky



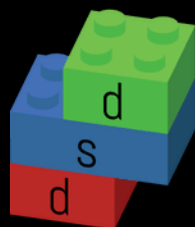
Neutron



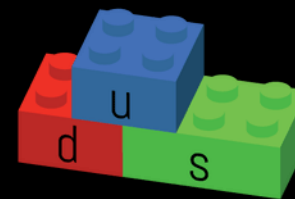
Proton



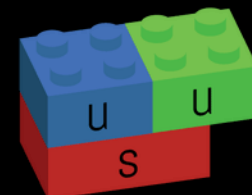
Σ^-



Λ^0

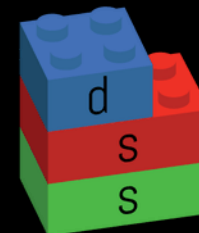


Σ^0

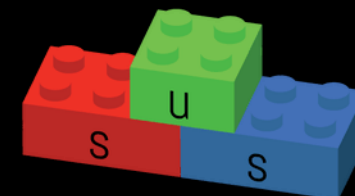


Σ^+

Ξ^-



Ξ^0

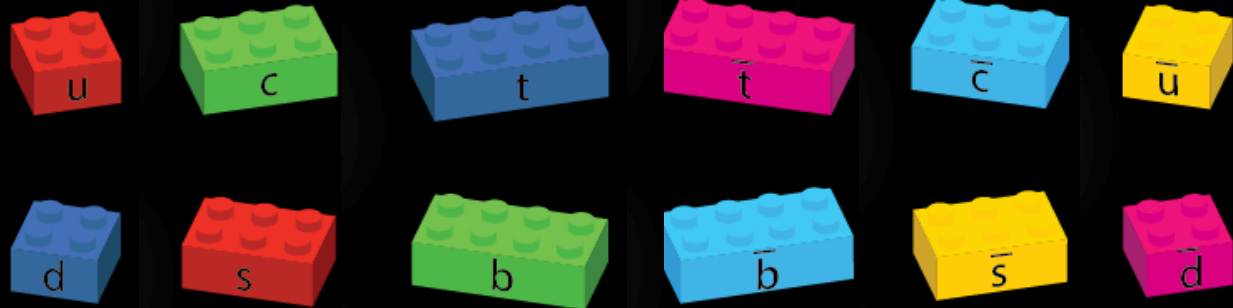


Z antikvarků jsou složeny antibaryony (antiproton, antineutron).

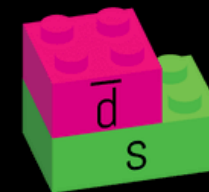
Částice složené z kvarku a antikvarku -- mezony

Kvarky

Antikvarky



K^0



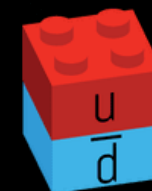
K^+



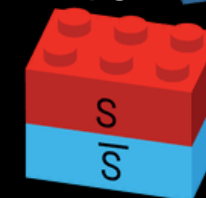
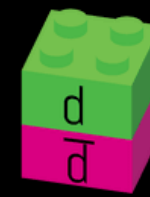
π^-



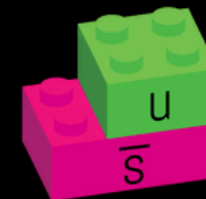
π^+



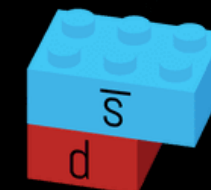
π^0



K^-



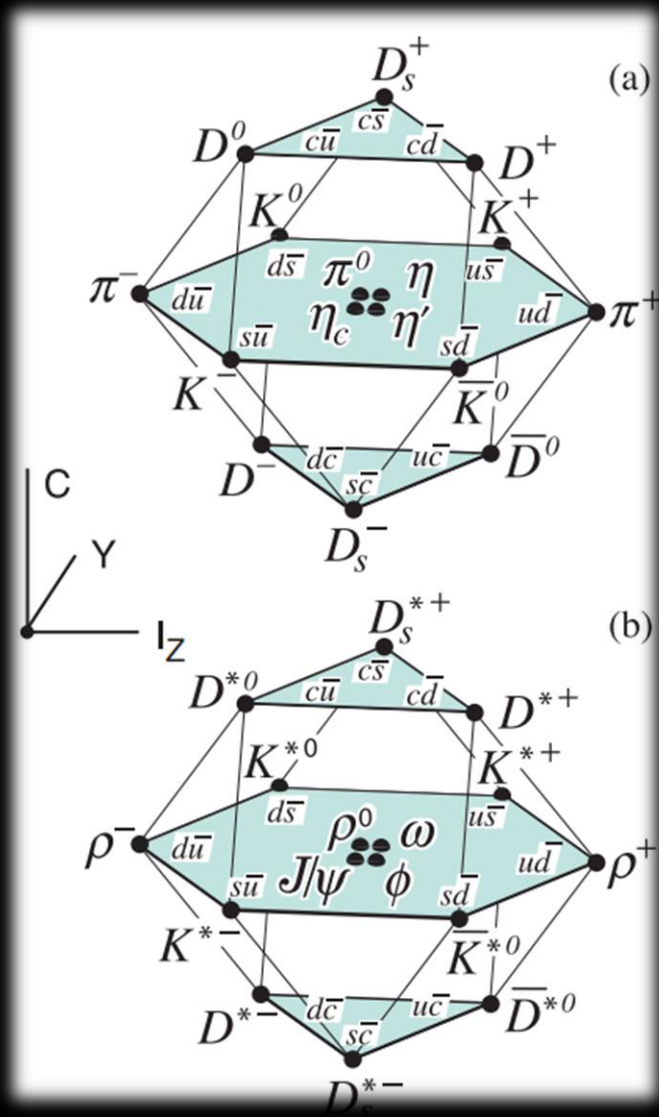
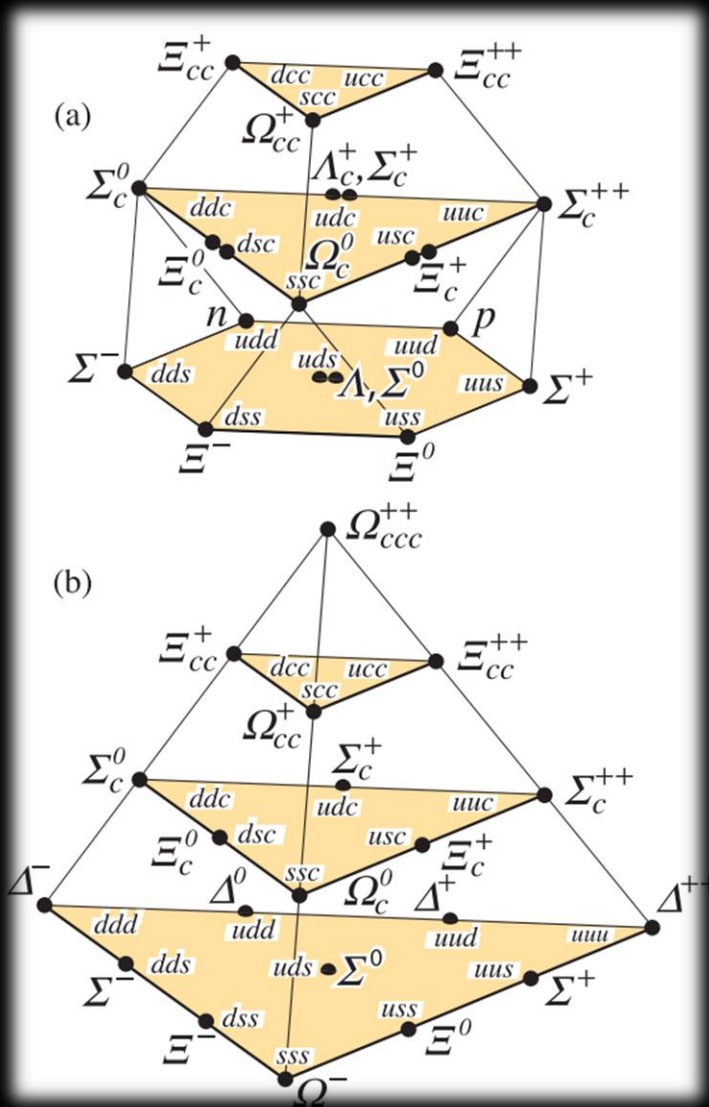
\bar{K}^0



Mezony zahrnují částice i antičástice

K^- je antičástice ke K^+

Částice složené

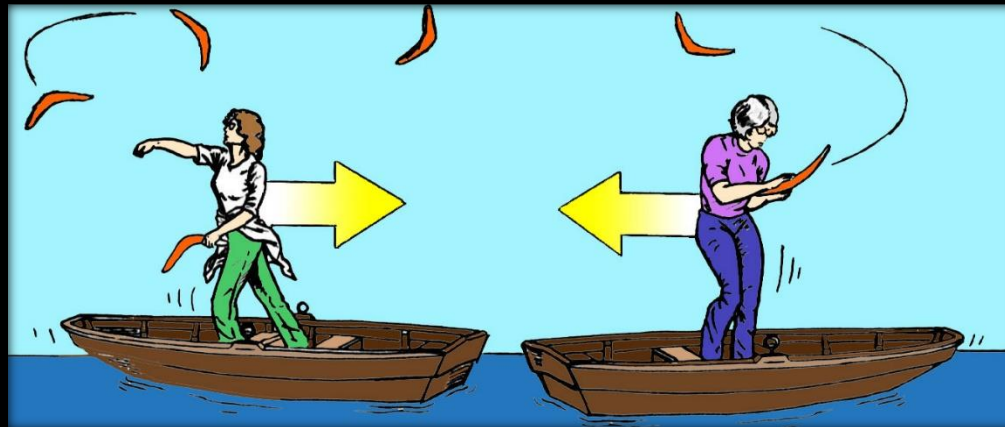


Interakce jako výměna částic

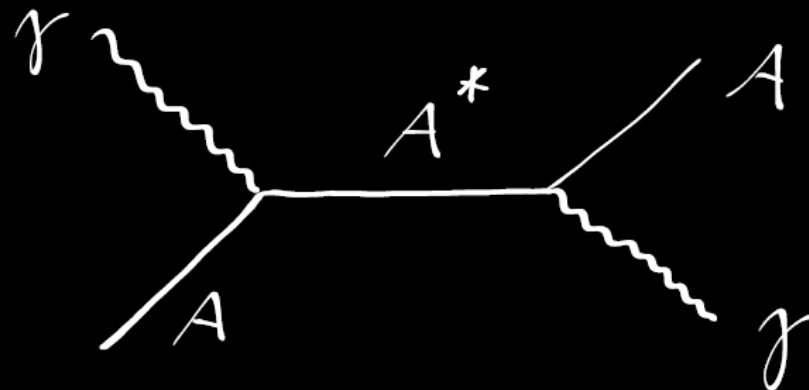
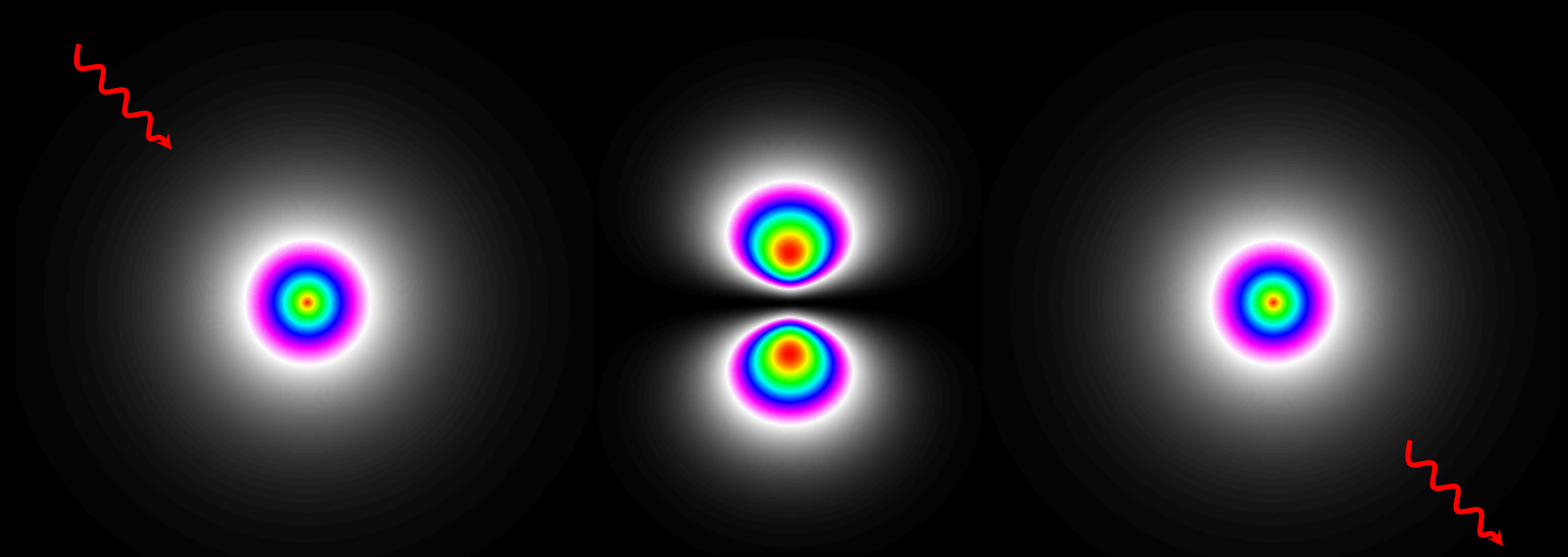
- Odpuzování



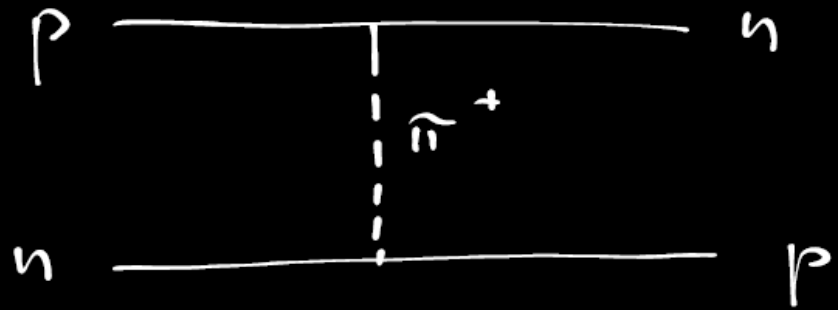
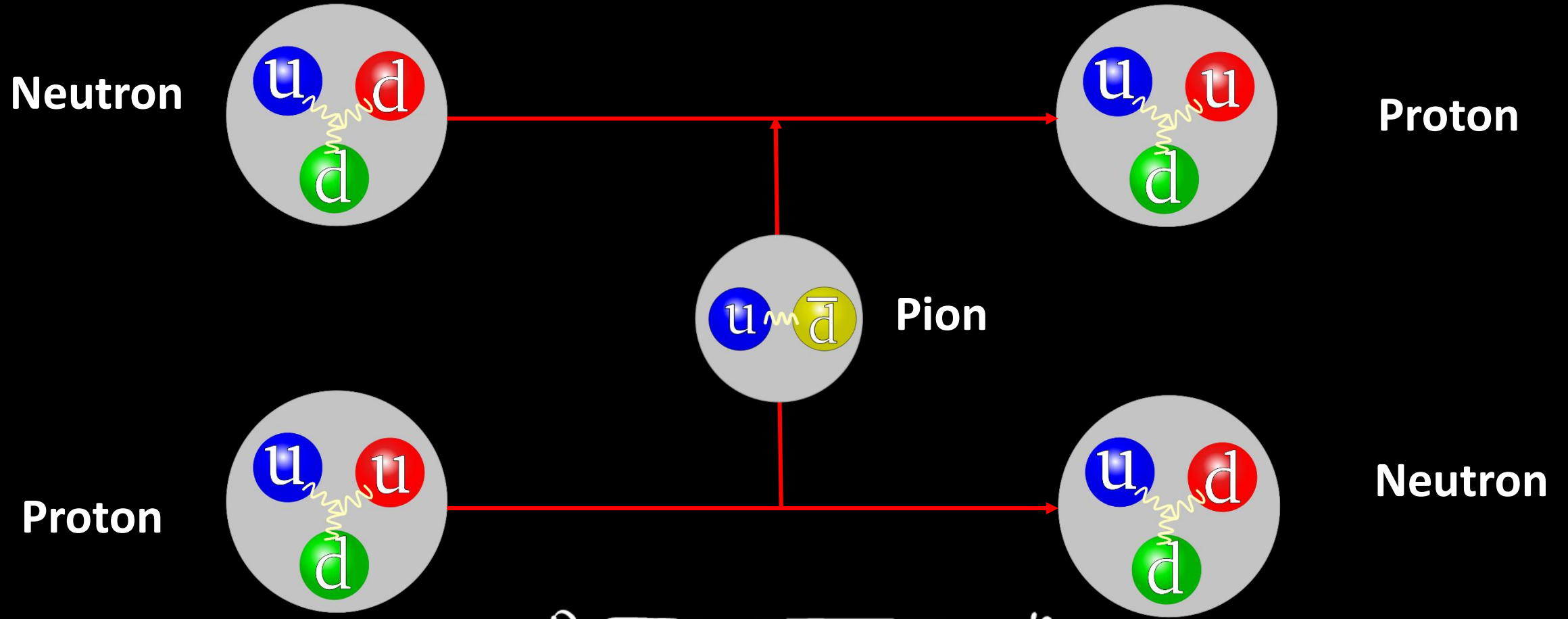
- Přitahování



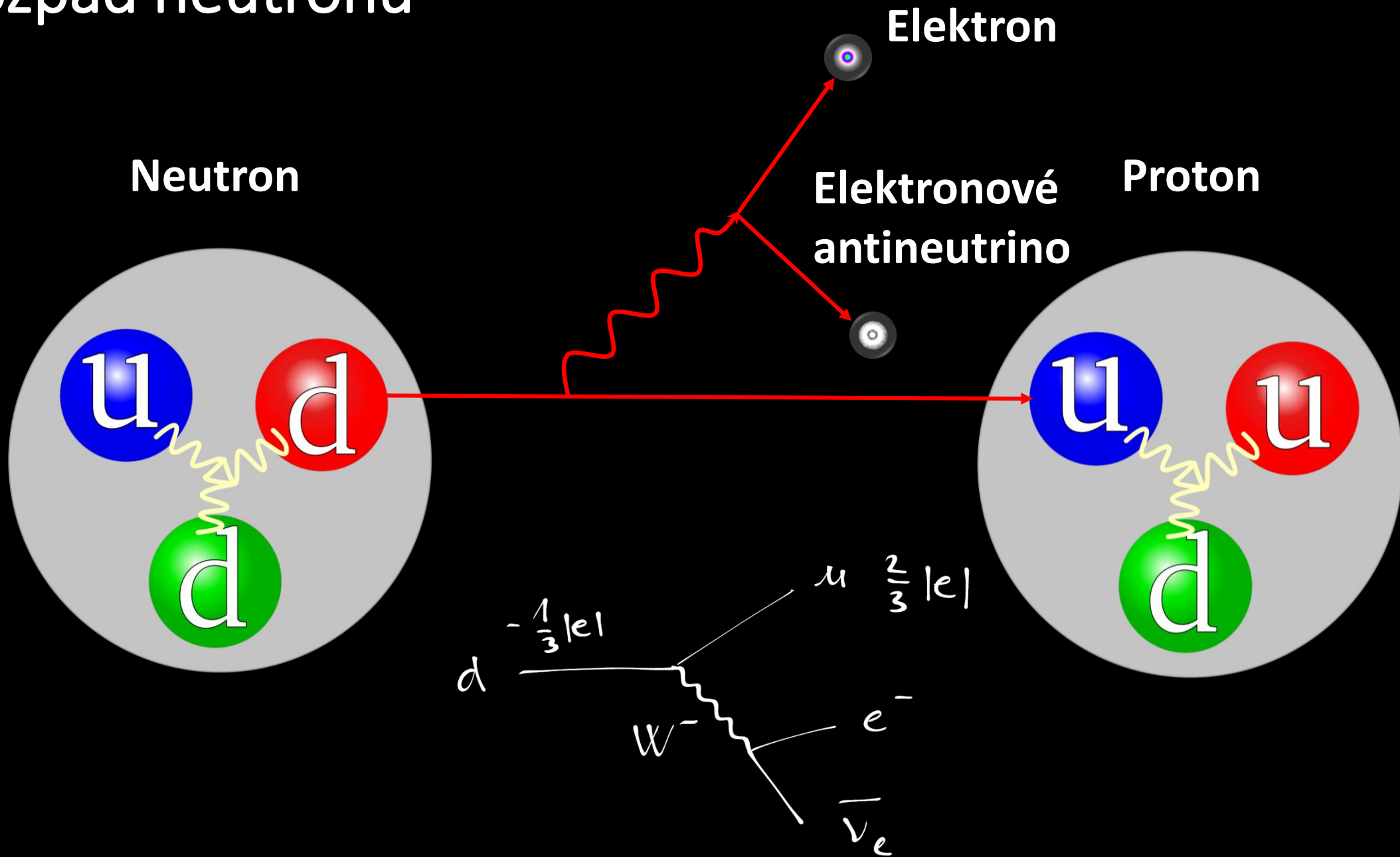
Posviťme si na atom!



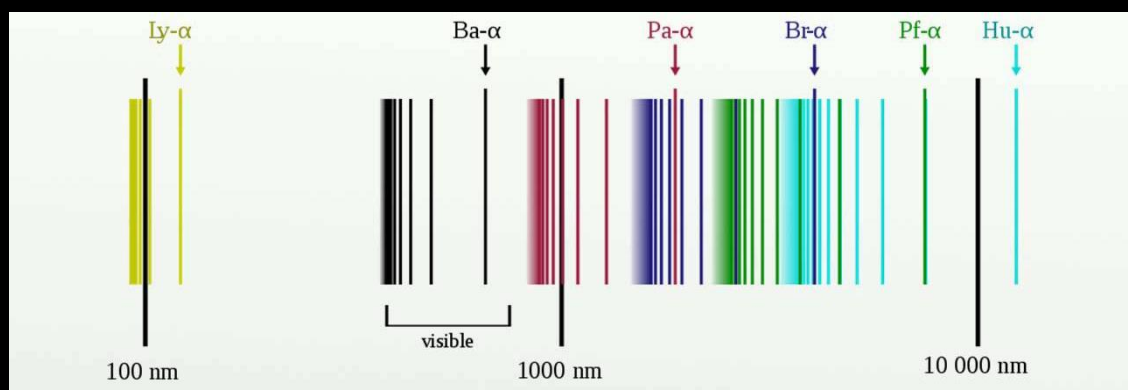
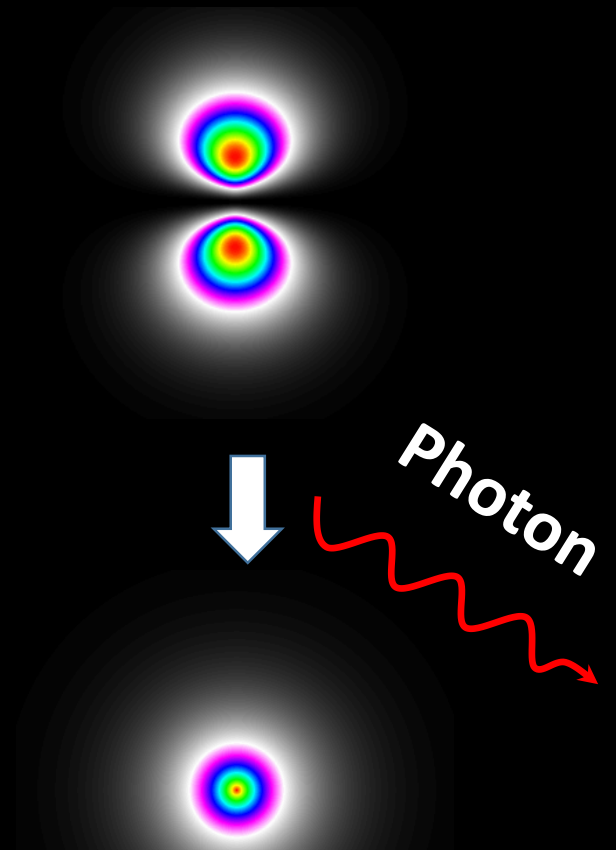
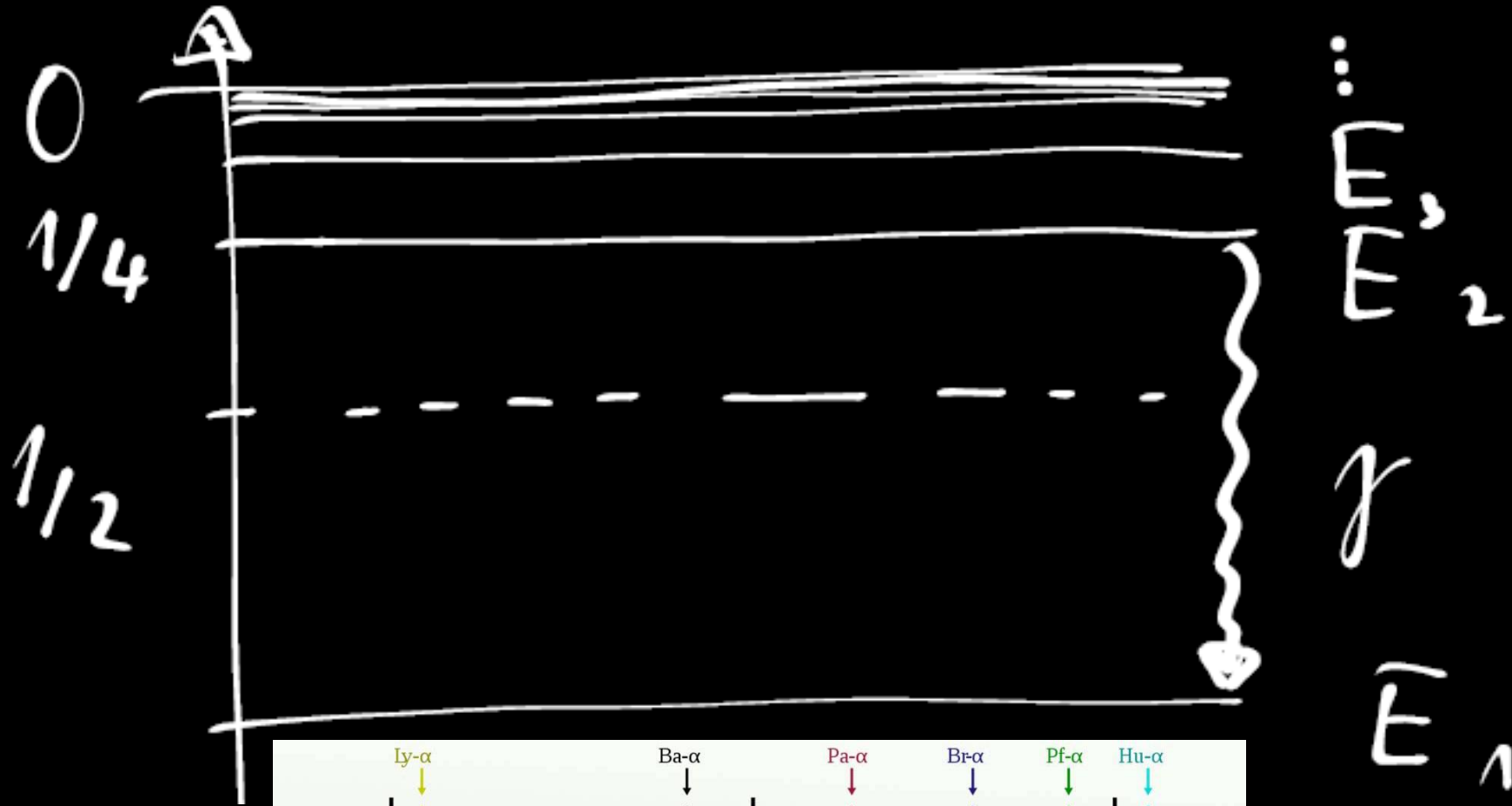
Proton a neutron



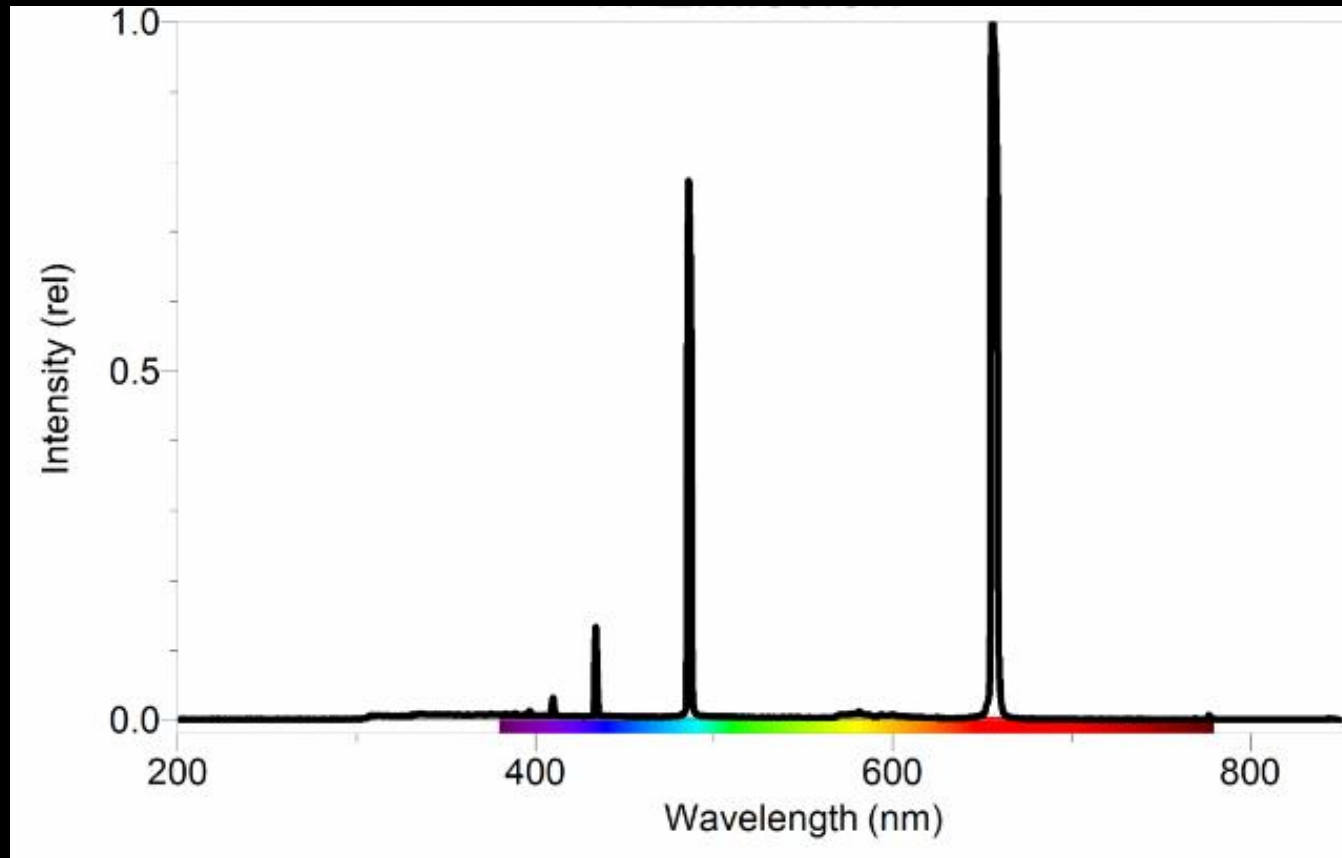
Rozpad neutronu



Přechody mezi hladinami atomu



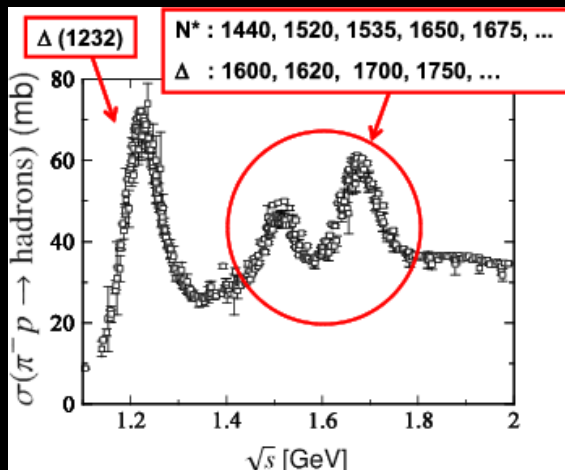
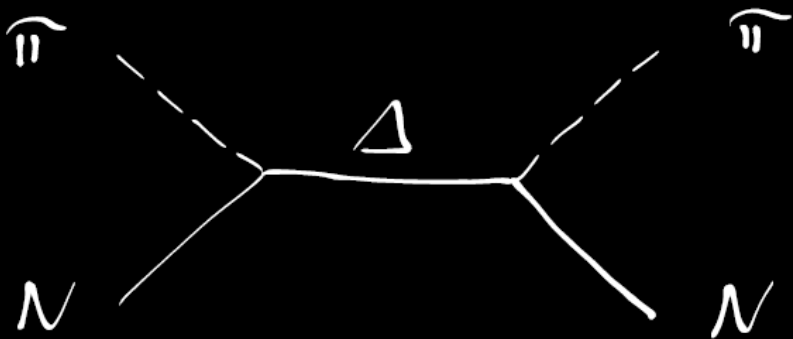
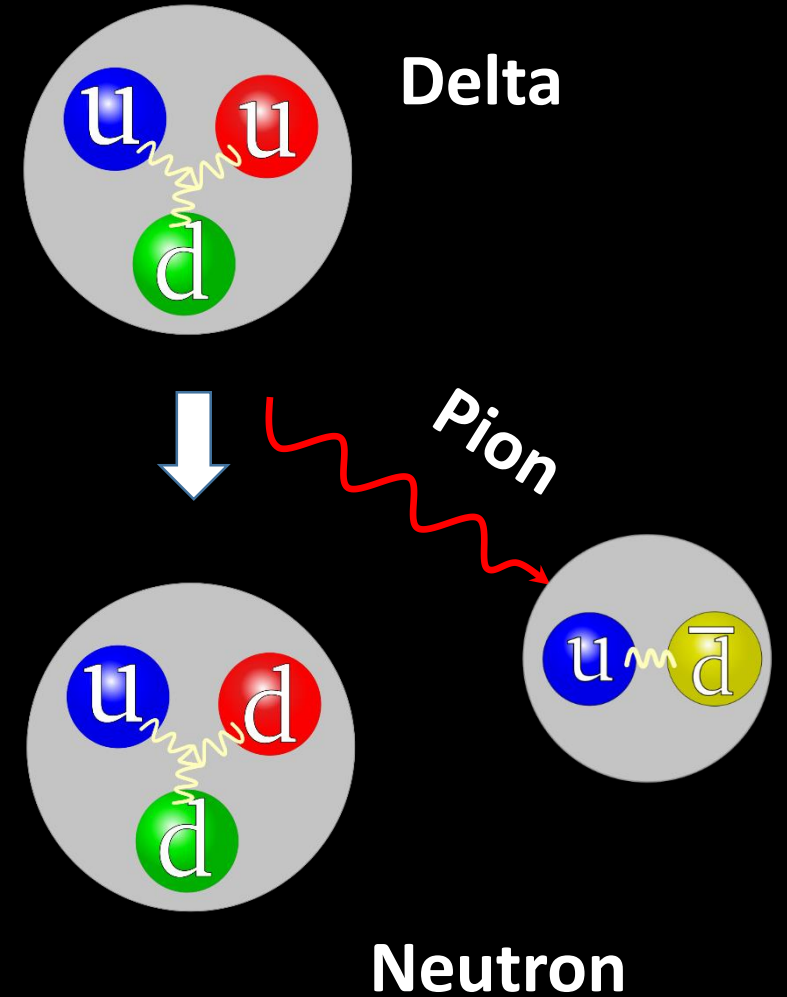
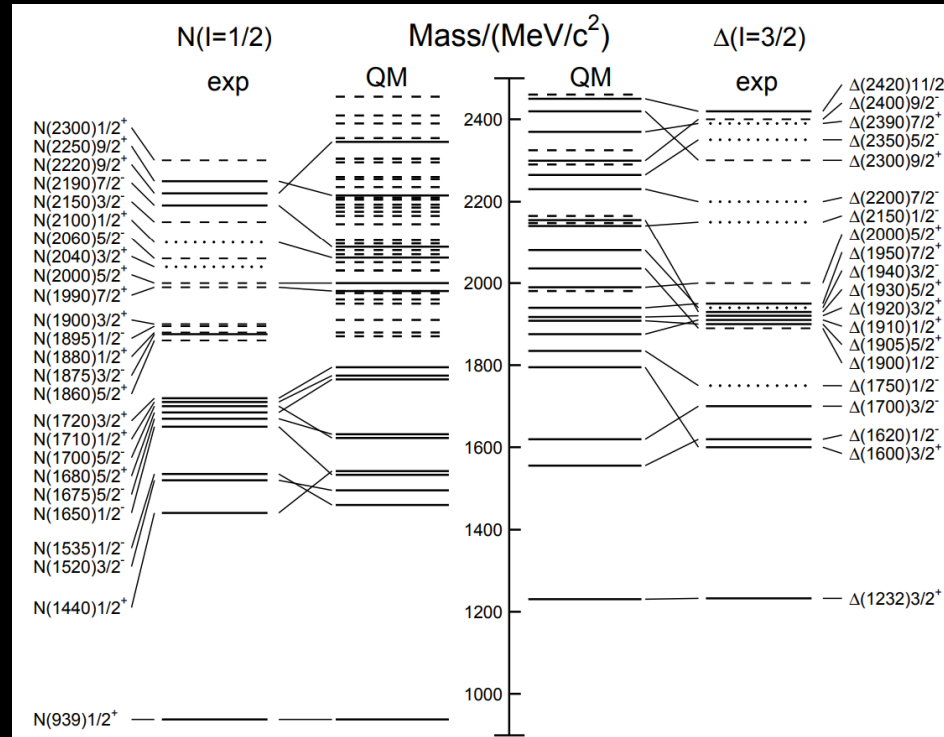
Přechody mezi hladinami atomu



Intenzita čáry:
pravděpodobnost
procesu.

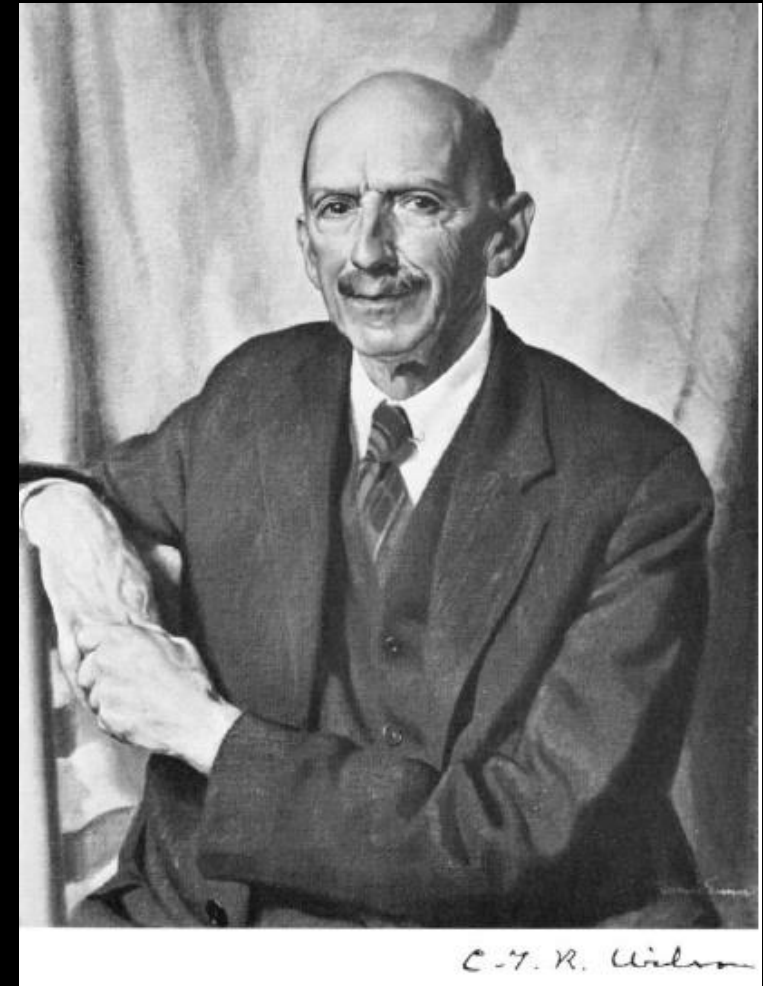
Šířka čáry: doba života
excitovaného stavu.

Přechody mezi excitovanými stavy nukleonu



Jak vidíme částice

- Mlžná komora



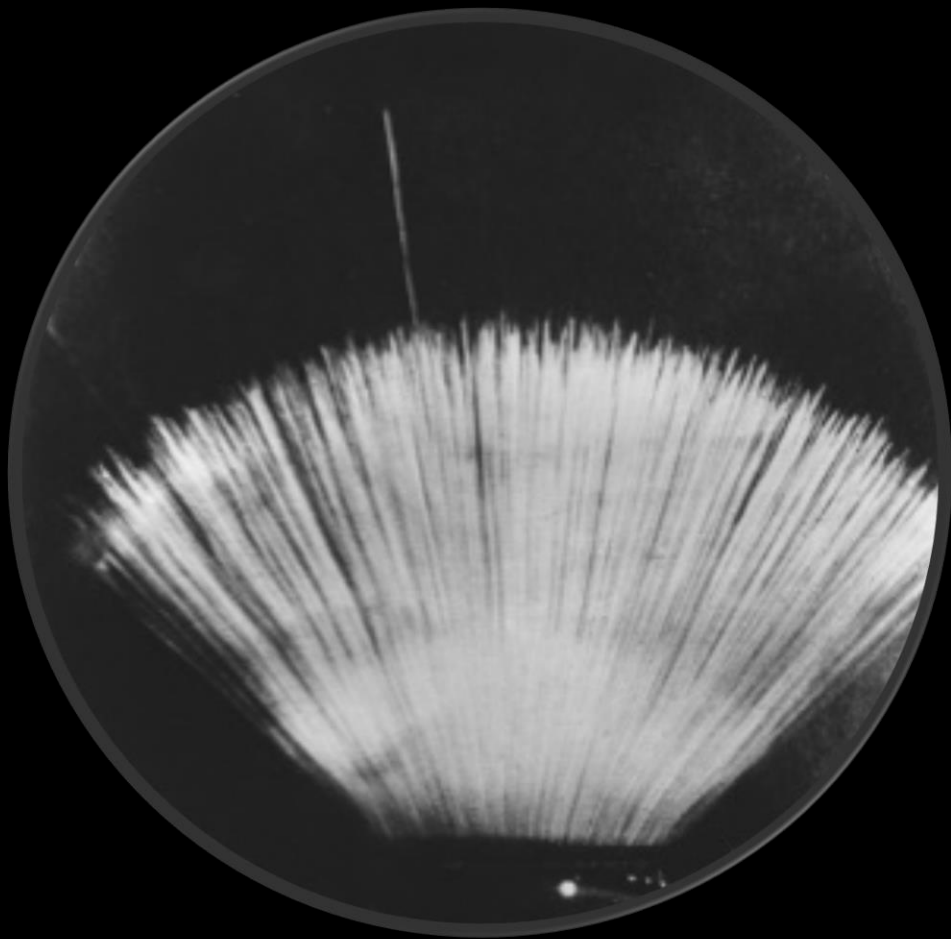
CHARLES T. R. WILSON

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

Nobel Lecture, December 12, 1927

Jak vidíme částice

- Mlžná komora




Alfa částice




Jak vidíme částice

- Mlžná komora: objev pozitronu (první antičástice).
 - C.D. Anderson, 1932
 - 6 mm olověná destička zpomalila pozitron jdoucí zdola, náboj dle zakřivení v magnetickém poli.

**The Nobel Prize in Physics
1936**

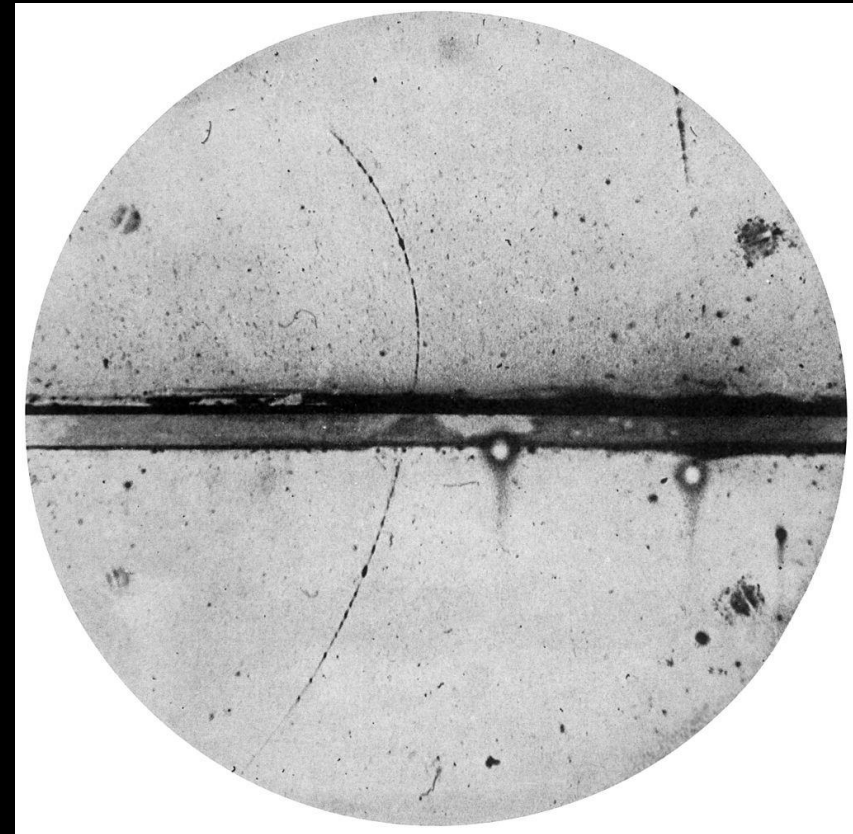


Victor Franz Hess
Prize share: 1/2



Carl David
Anderson
Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 1936 was divided equally between Victor Franz Hess "for his discovery of cosmic radiation" and Carl David Anderson "for his discovery of the positron".



Fotografické emulze

- Objev mionu (1936), C. Andersson, Seth Neddermeyer.
- Objev nabitých pionů (1947).
- Fotocitlivé „želé“ AgBr, fotografický proces, mikroskop.

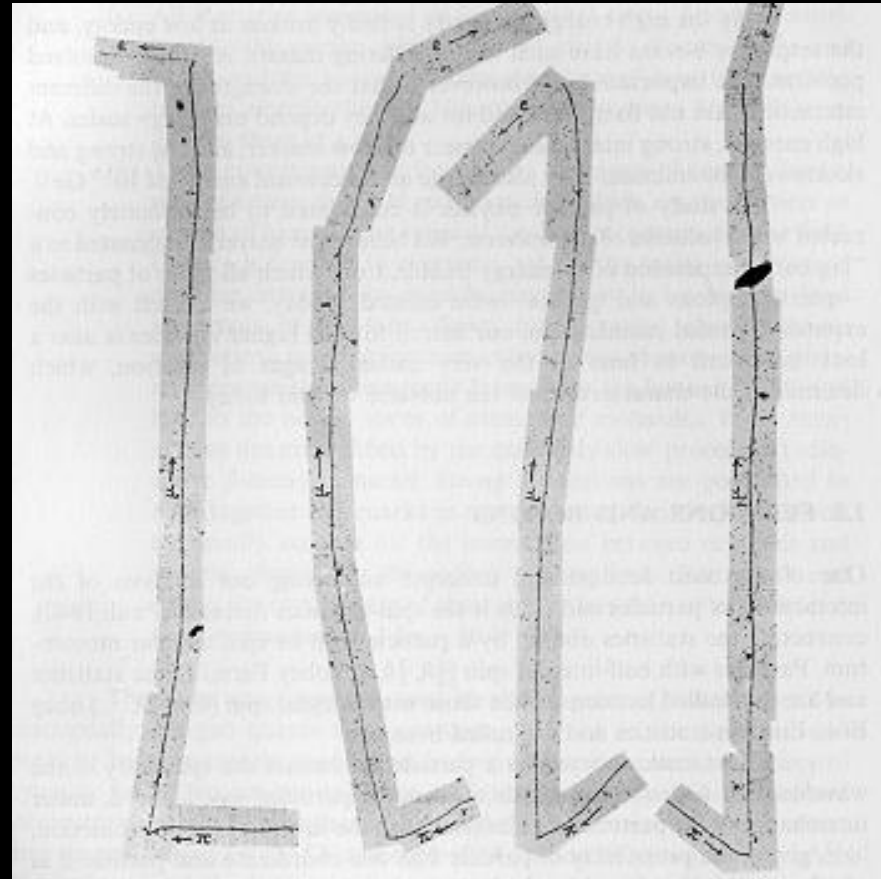
The Nobel Prize in Physics 1950



Cecil Frank Powell

Prize share: 1/1

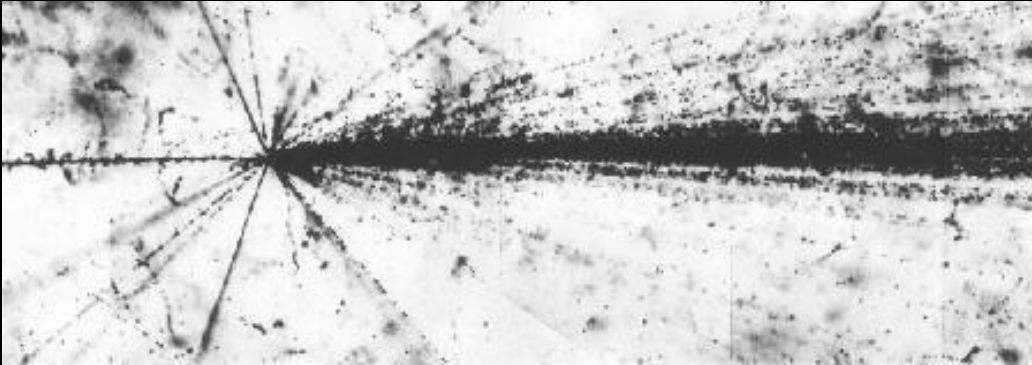
The Nobel Prize in Physics 1950 was awarded to Cecil Powell "*for his development of the photographic method of studying nuclear processes and his discoveries regarding mesons made with this method*".



Fotografické emulze

- Fotografické emulze reloaded!
- CERN: Guess what this is?

Jaderná interakce!



<https://www.facebook.com/cern/>

CERN
9 března v 15:13 · 🌐

This video displays a 3D reconstruction of a collision event resulting from antiprotons annihilating with ordinary matter, and subsequently transforming into other particles.

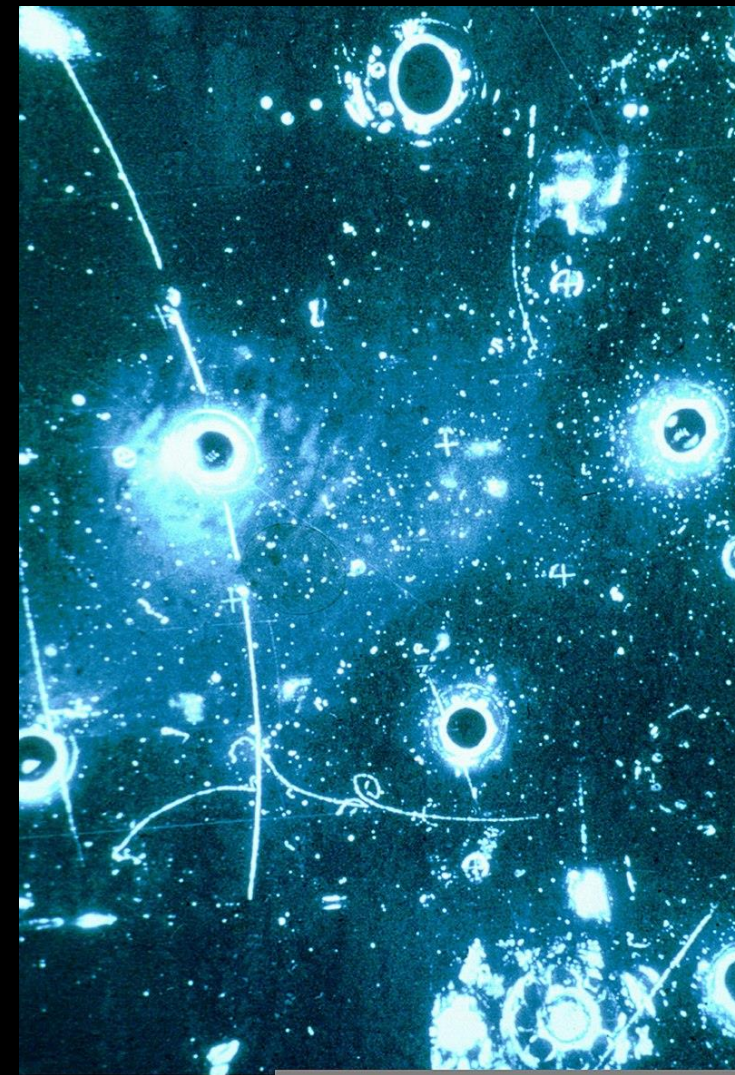
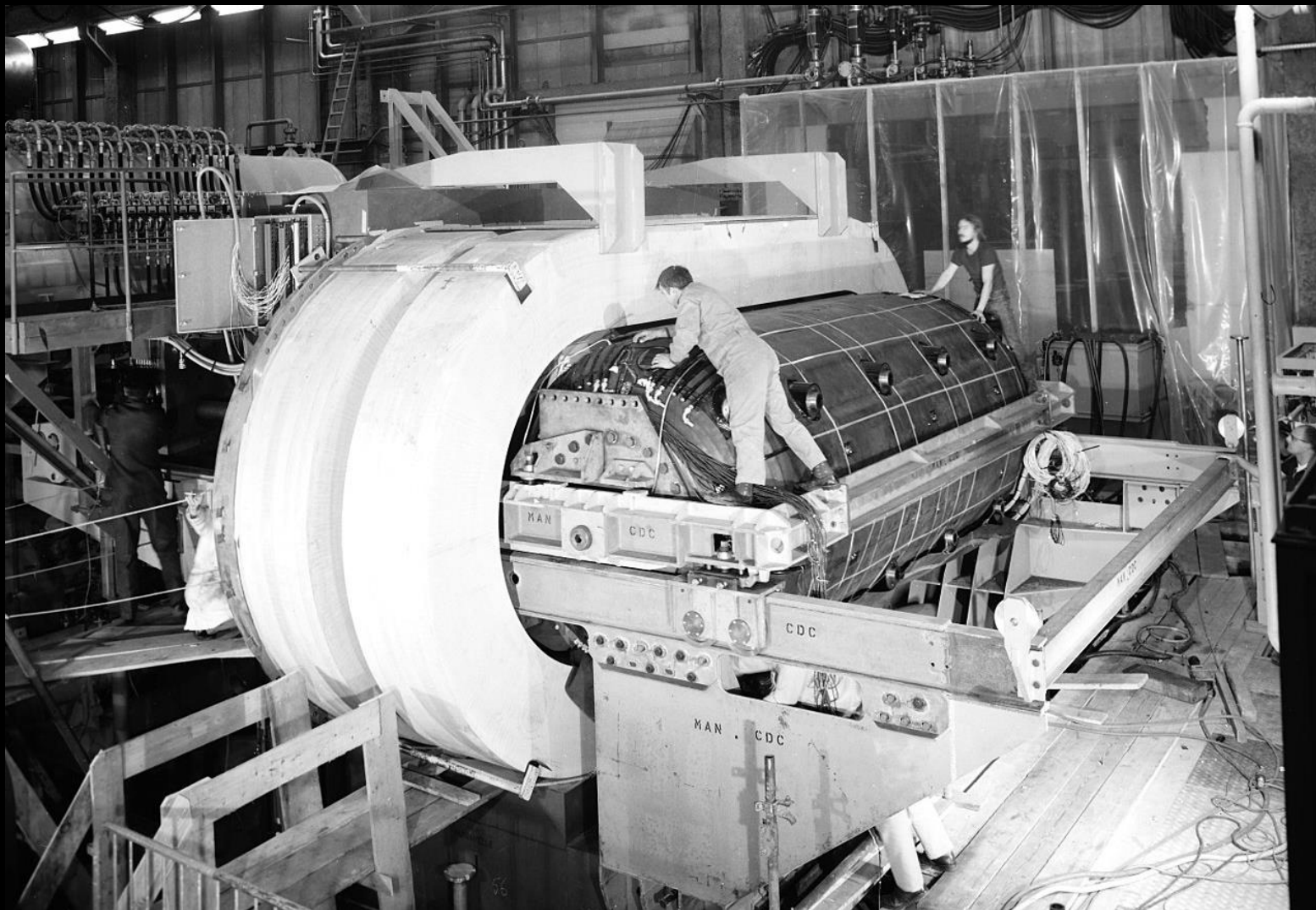
The event was called an “annihilation star”, and has been recorded at the CERN’s AEGIS experiment with an emulsion detector that, like a photographic film, takes snap-shots of the antiprotons’ annihilation. The developed emulsion was scanned with a microscope with the depth field of a few microns.

Read more... [Zobrazit další](#)

Video player controls: play, progress bar, -0:09, settings, share, and volume icons.

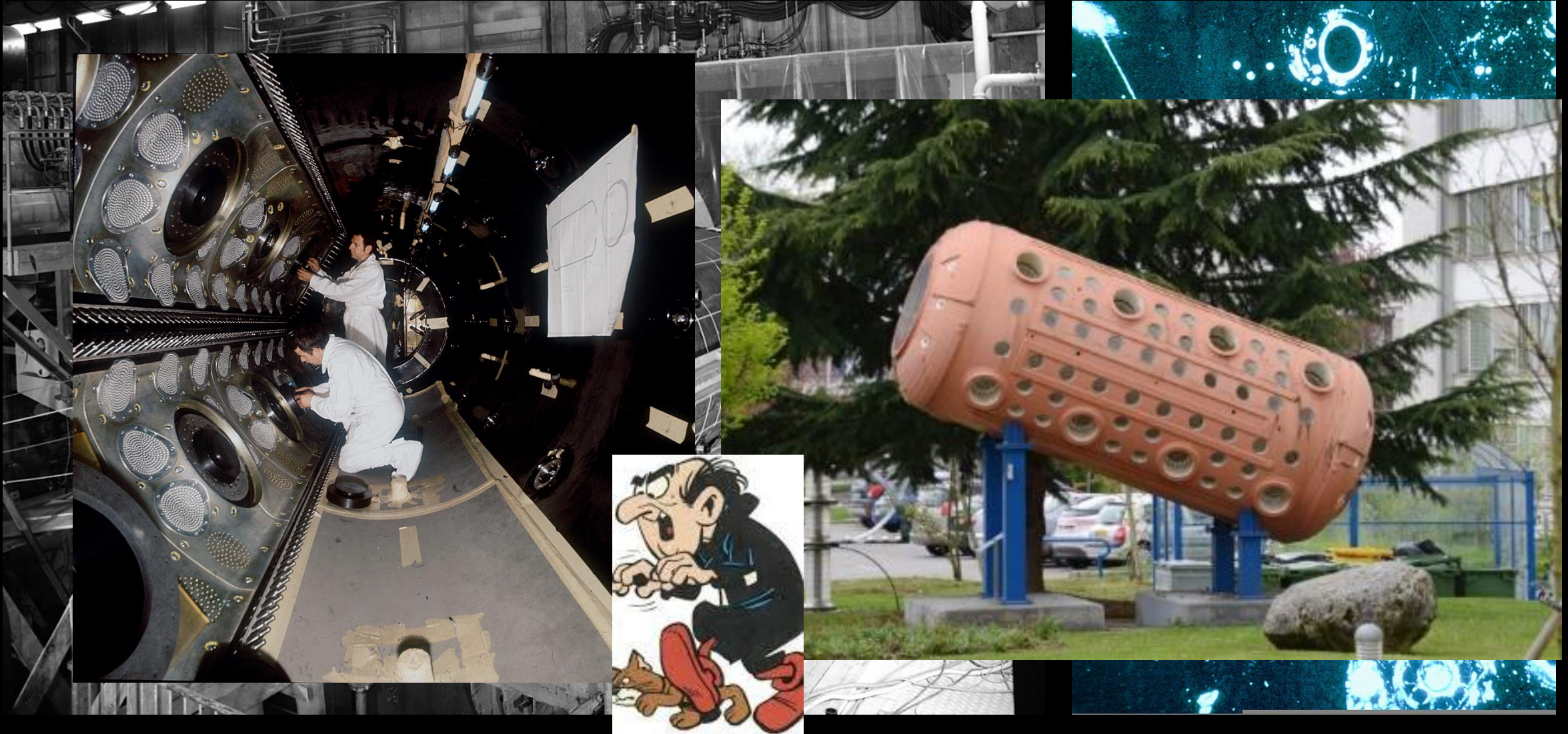
Jak vidíme částice

- Bublinová komora Gargamelle 1970-1979



Jak vidíme částice

- Bublinová komora Gargamelle 1970-1979



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

Jak vidíme částice

- Bublinová komora Big European Bubble Chamber BEBC (1973-1984)

The Nobel Prize in Physics 1960



Donald Arthur
Glaser

Prize share: 1/1

The Nobel Prize in Physics 1960 was awarded to Donald A. Glaser
"for the invention of the bubble chamber".

The Nobel Prize in Physics 1968



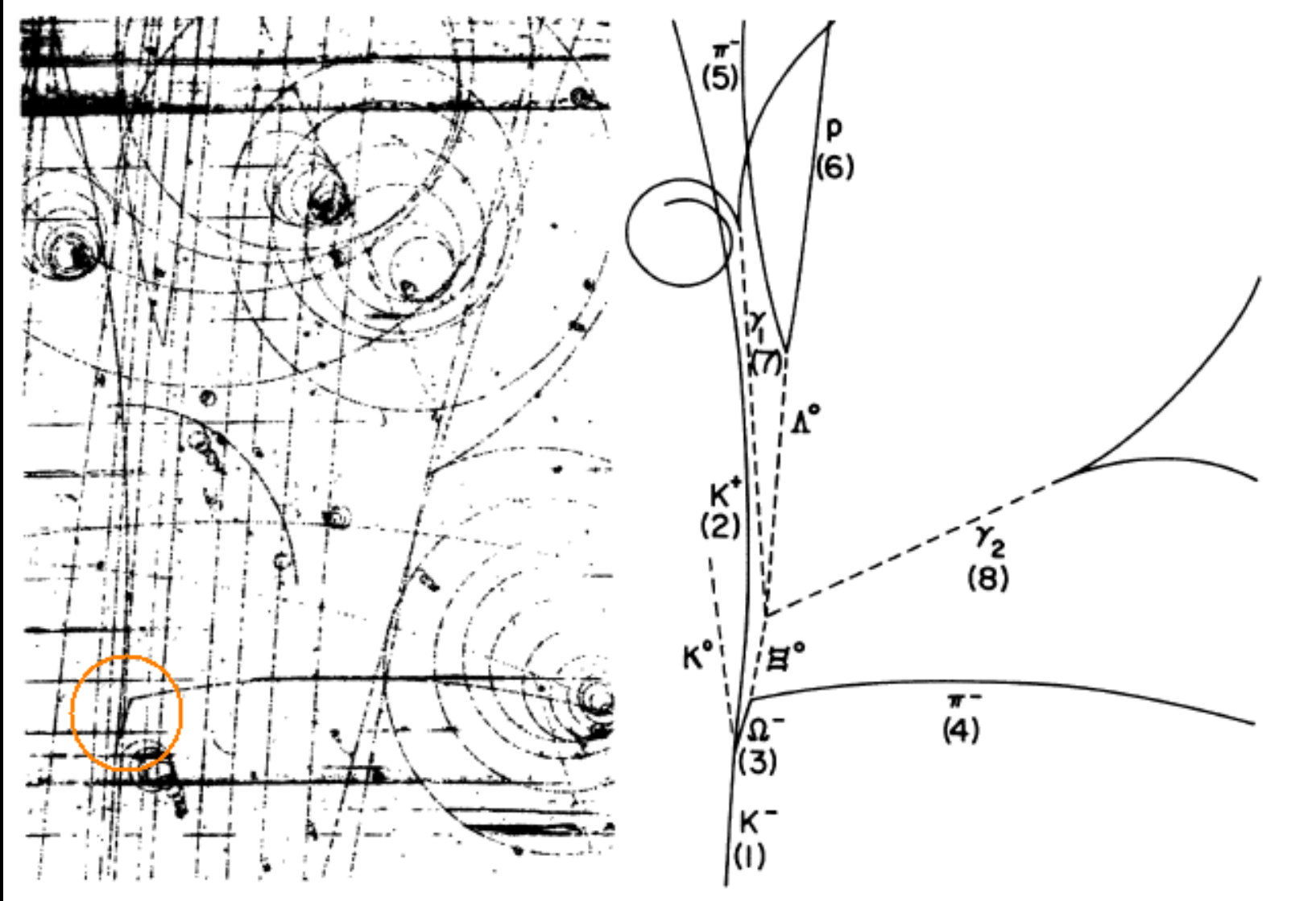
Luis Walter Alvarez

Prize share: 1/1

The Nobel Prize in Physics 1968 was awarded to Luis Alvarez "for
his decisive contributions to elementary particle physics, in
particular the discovery of a large number of resonance states,
made possible through his development of the technique of using
hydrogen bubble chamber and data analysis".

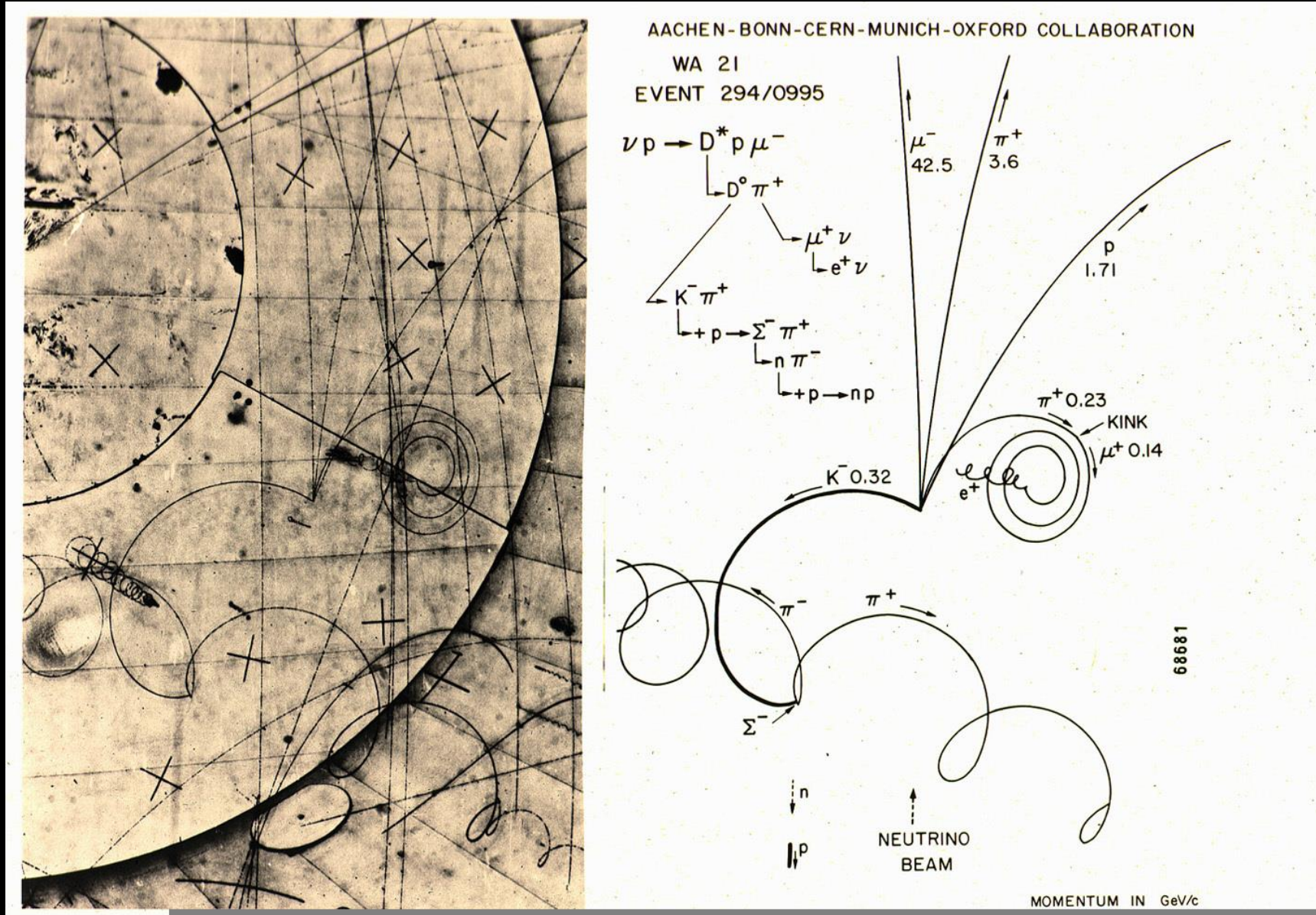


Objev částice Ω^- , 1964



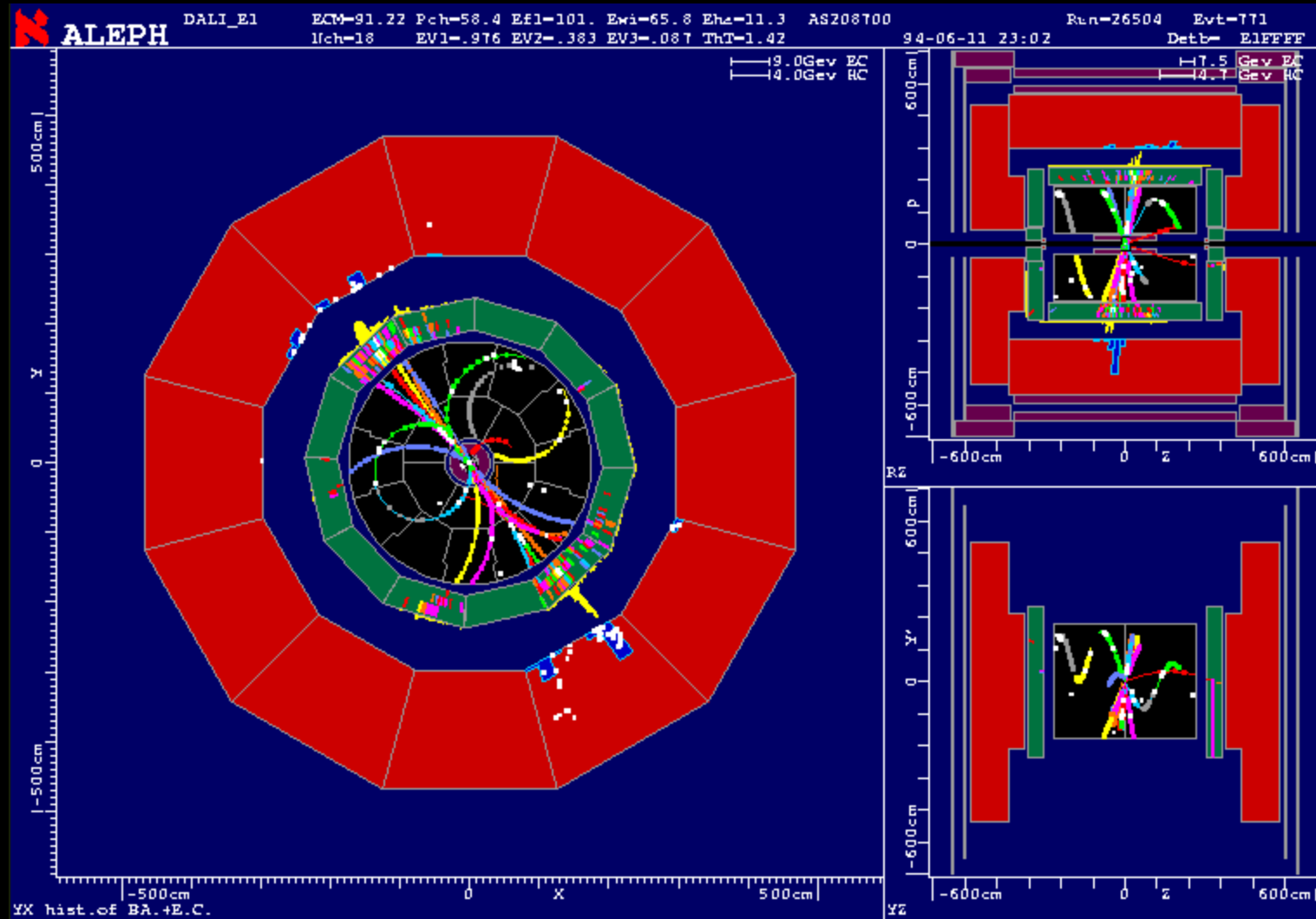
Jak vidíme částice

- 1970s



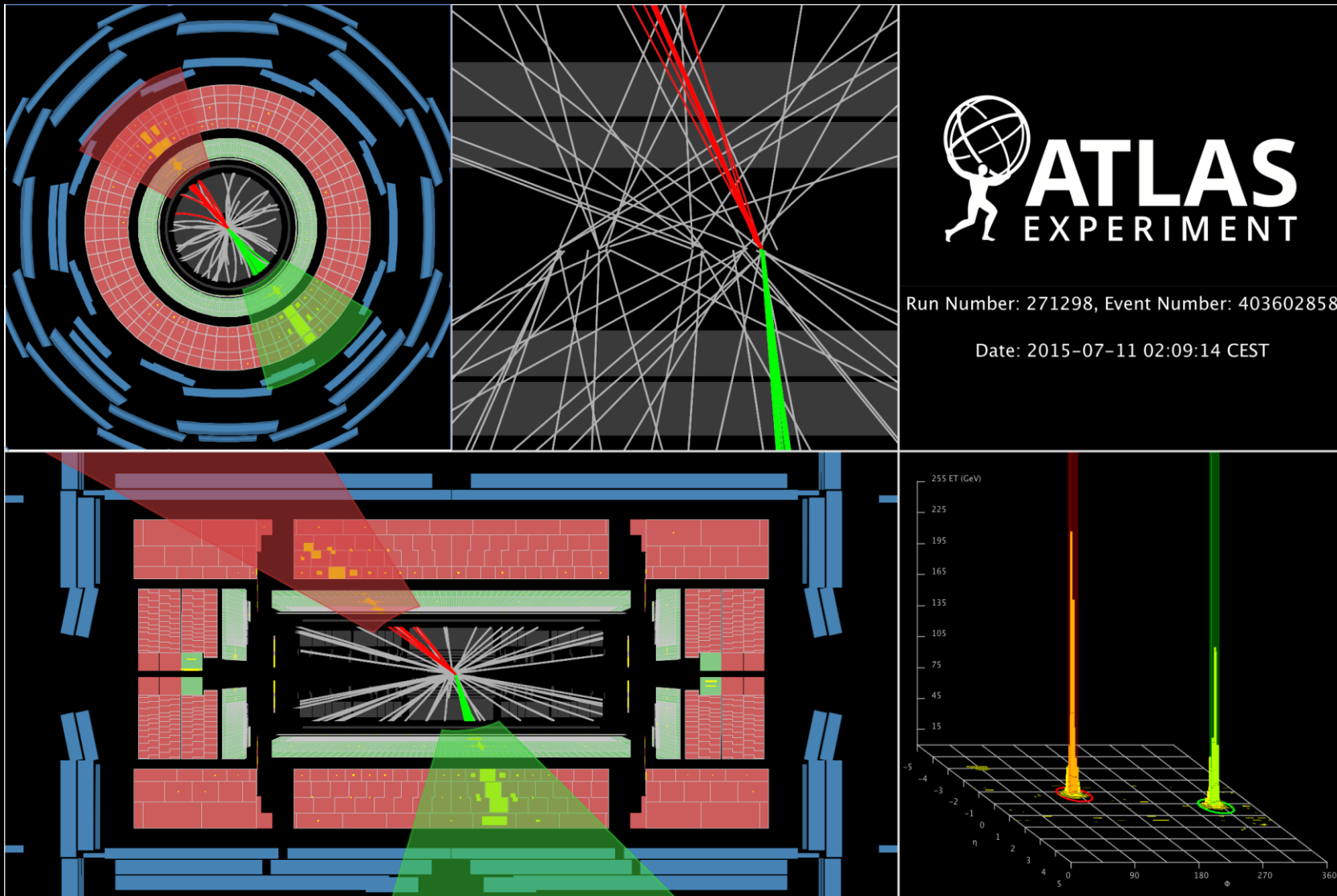
Jak vidíme částice

- 1990s



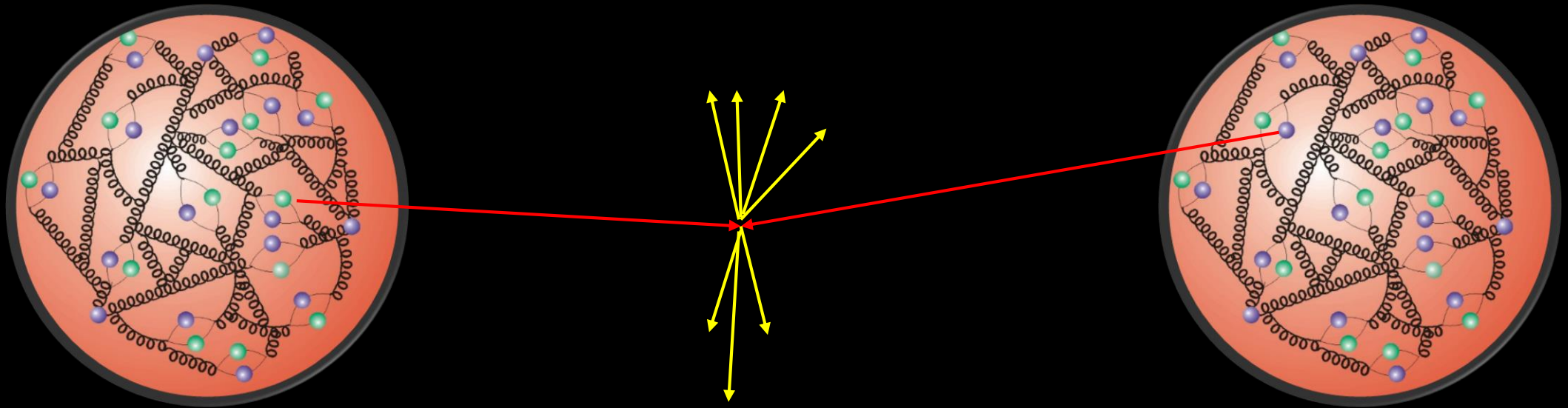
Jak vidíme částice

- současnost



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.

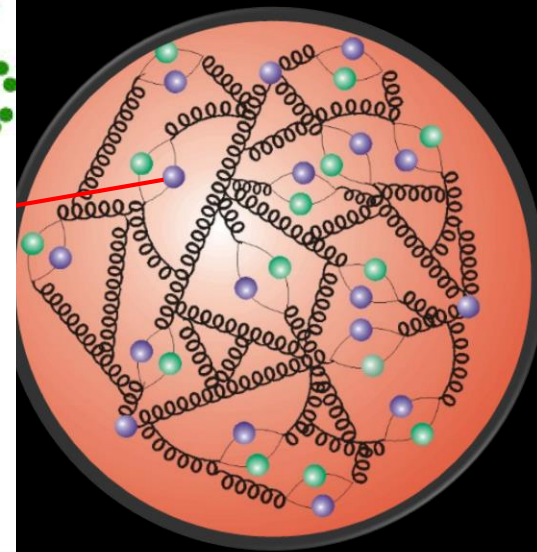
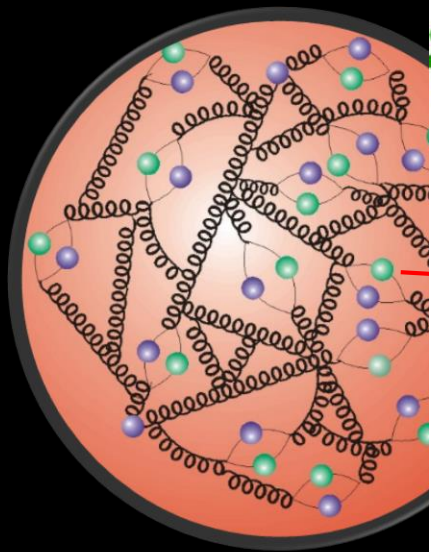
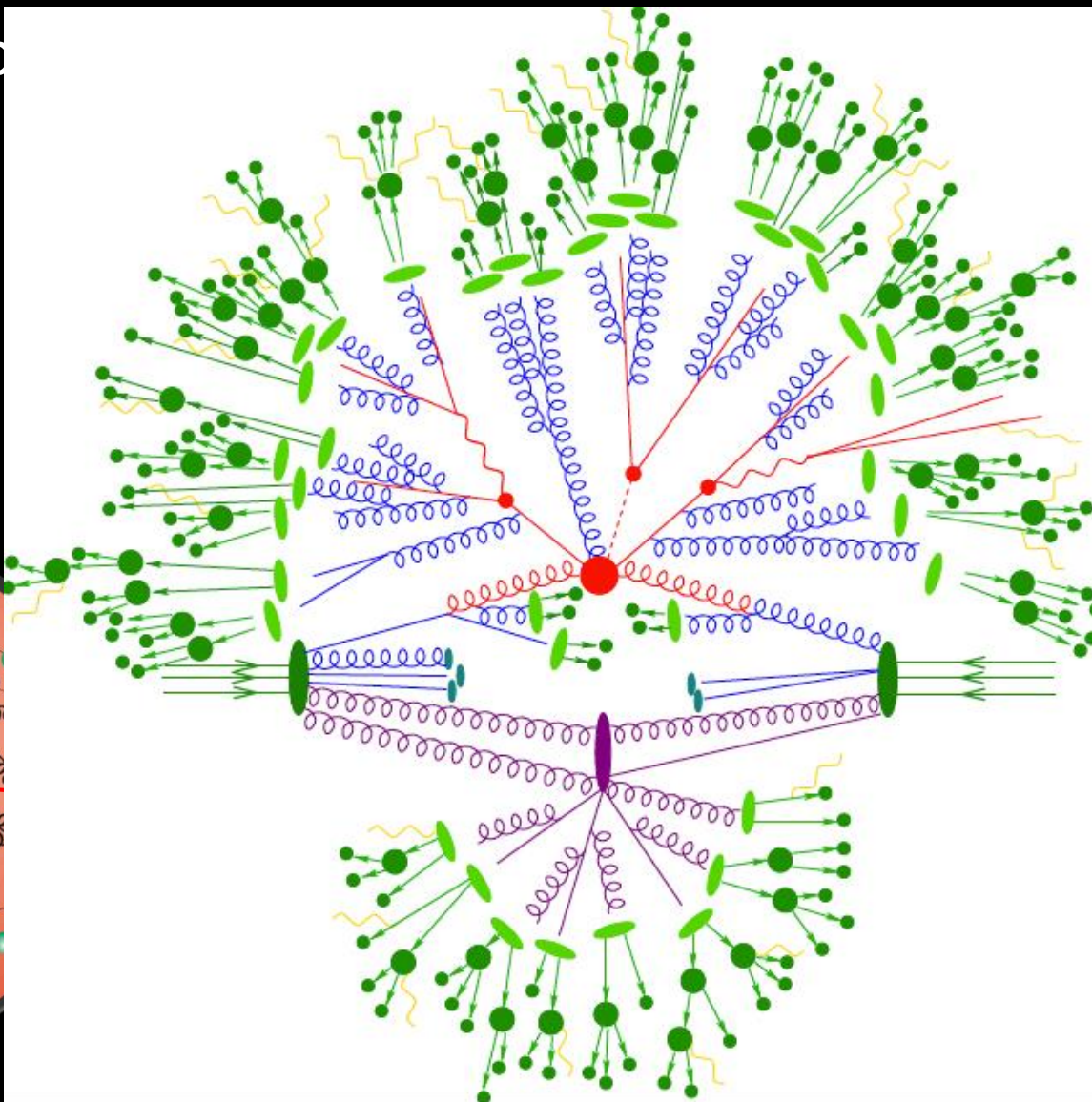


Srážky částic

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

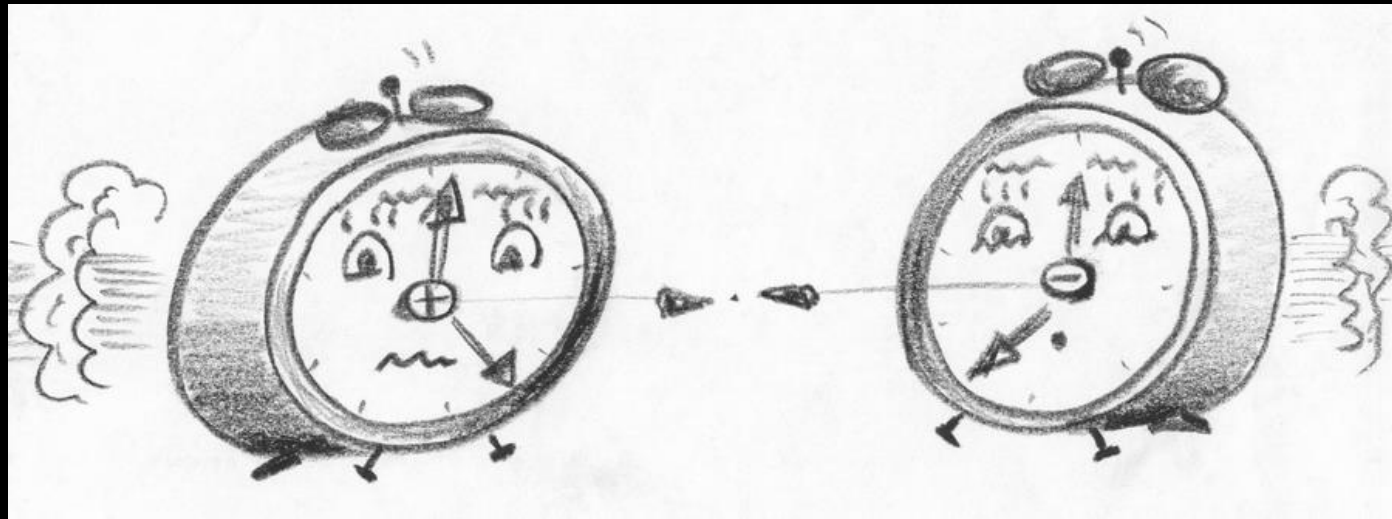
rozbit ☺

Srážka dvou částic
se rozbijí.



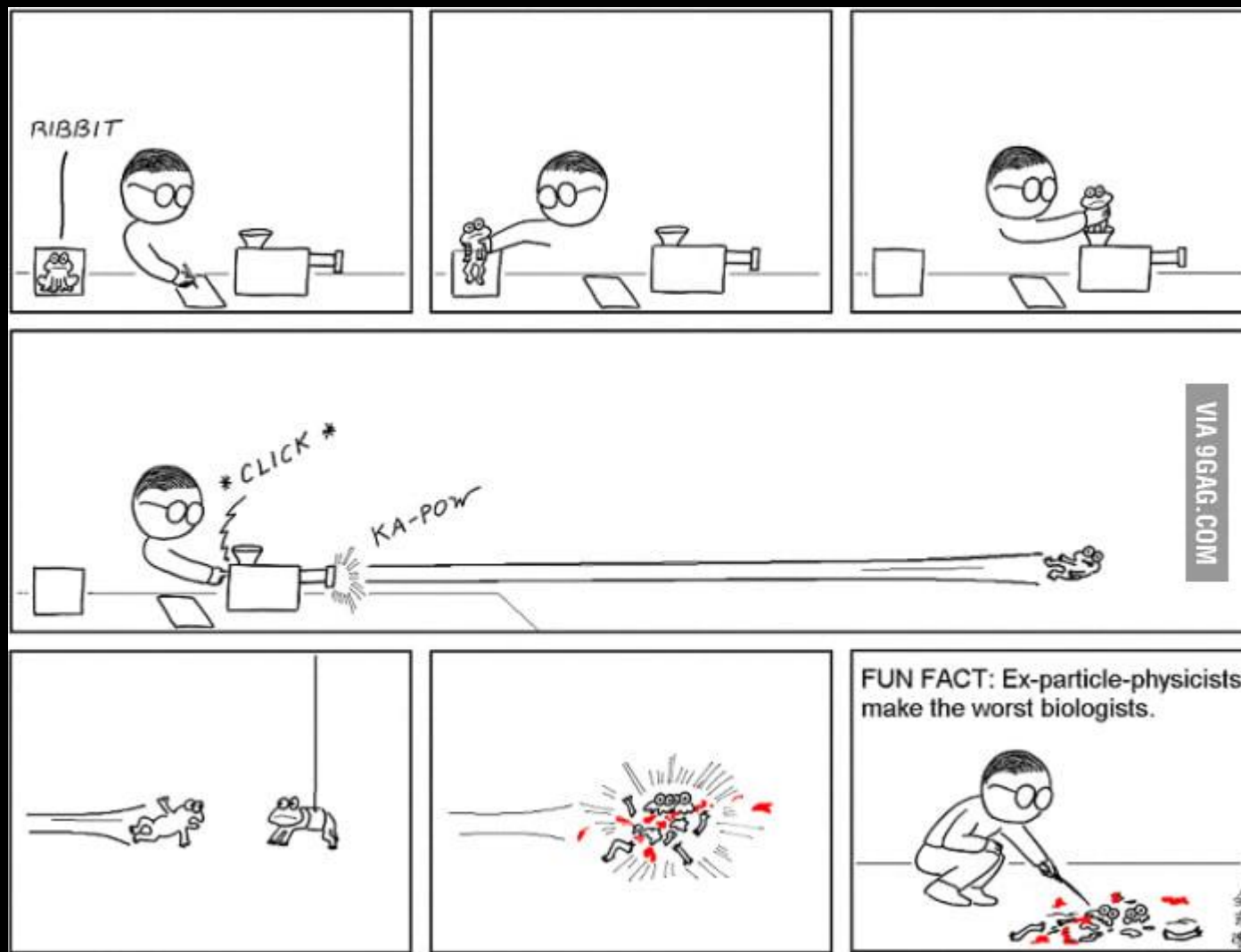
Srážky částic

- Aneb je to jako srážet dva budíky...



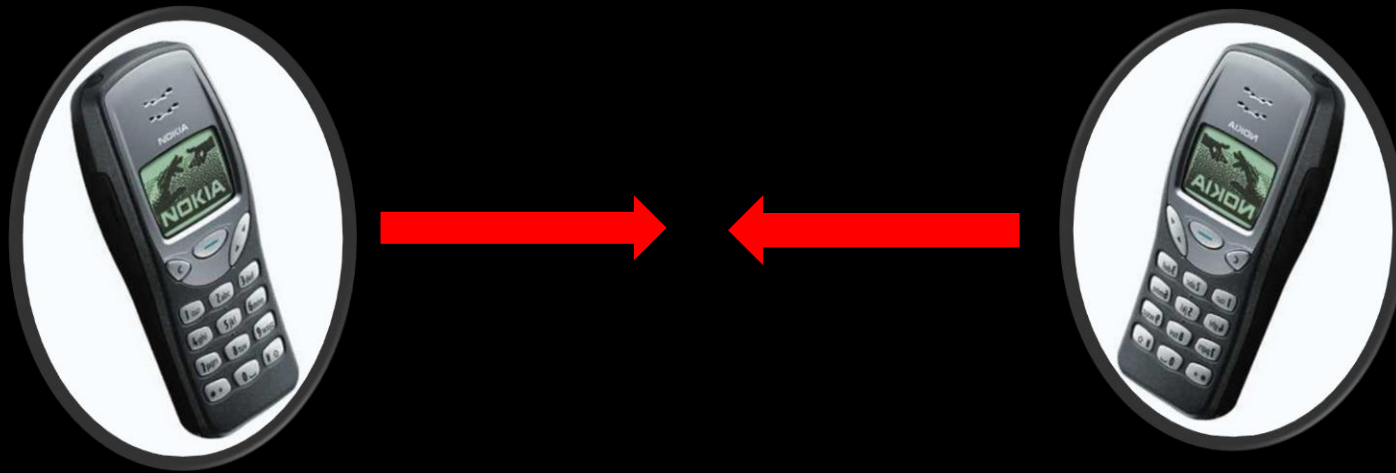
Srážky částic

- Naplikovat v biologii.



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...



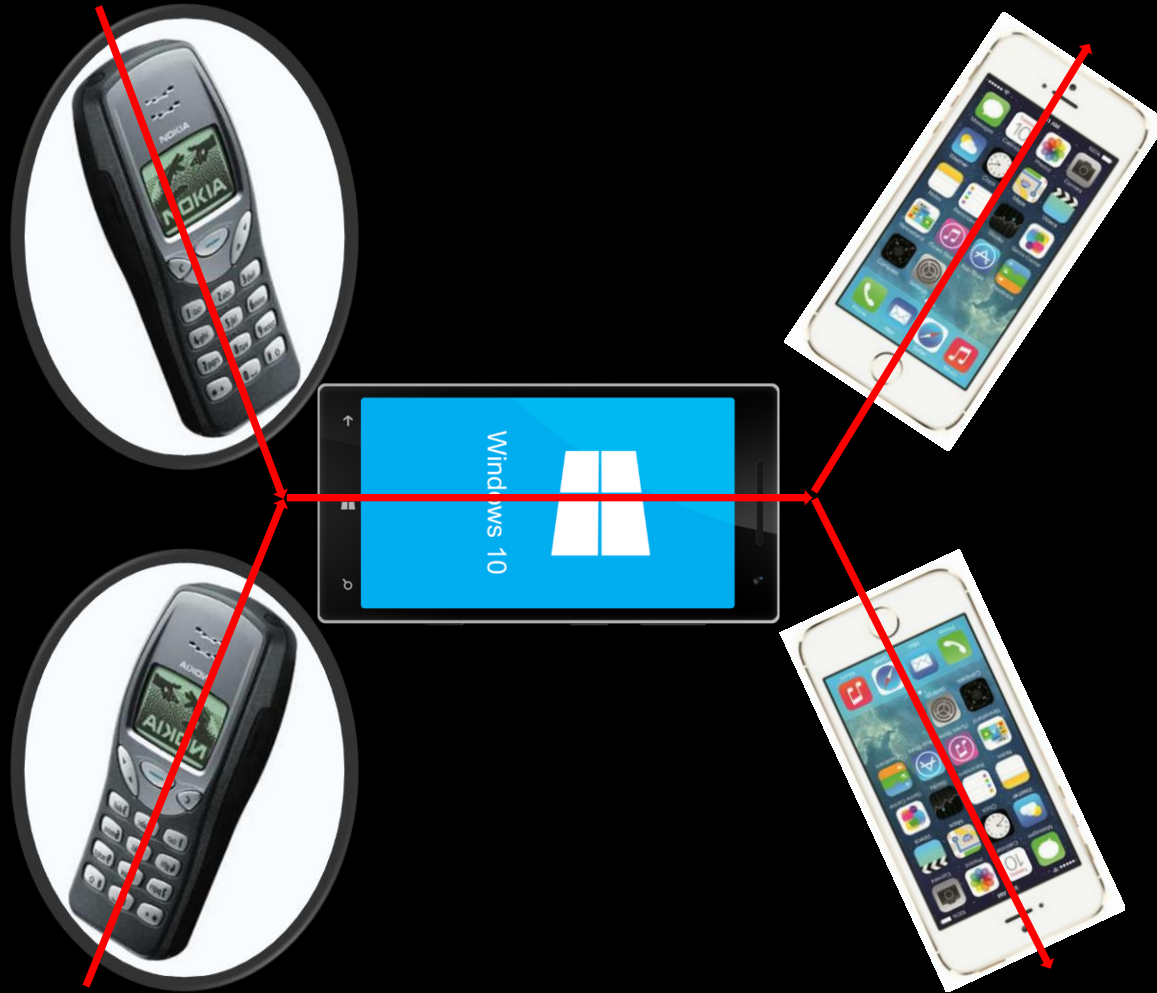
Srážky částic

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



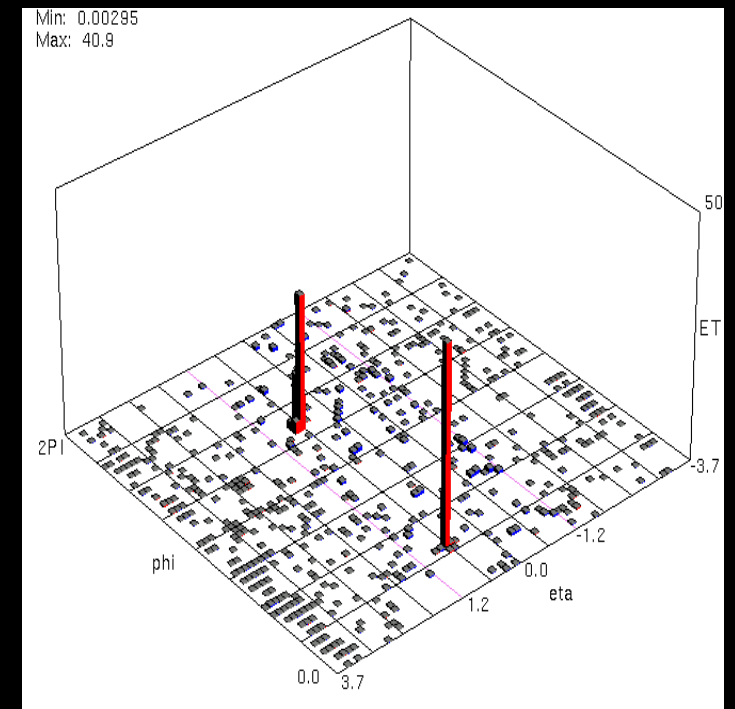
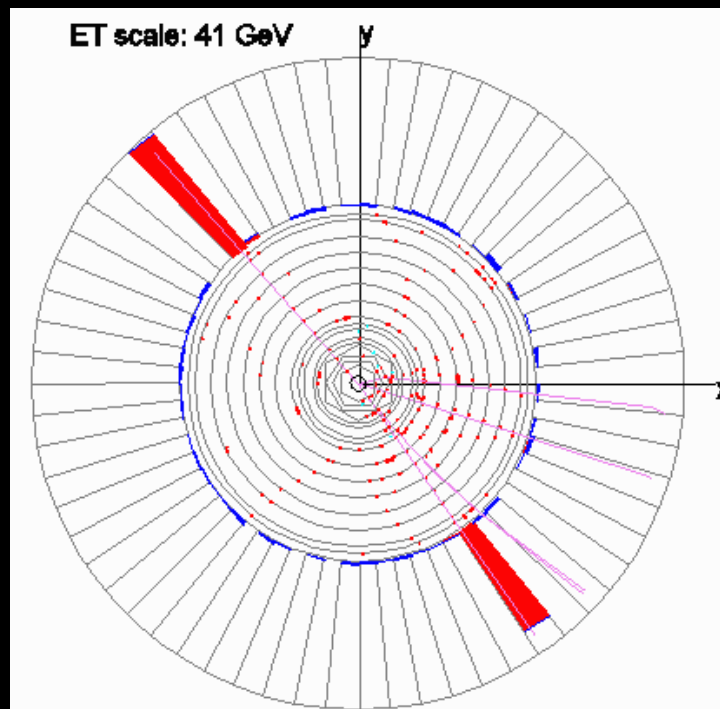
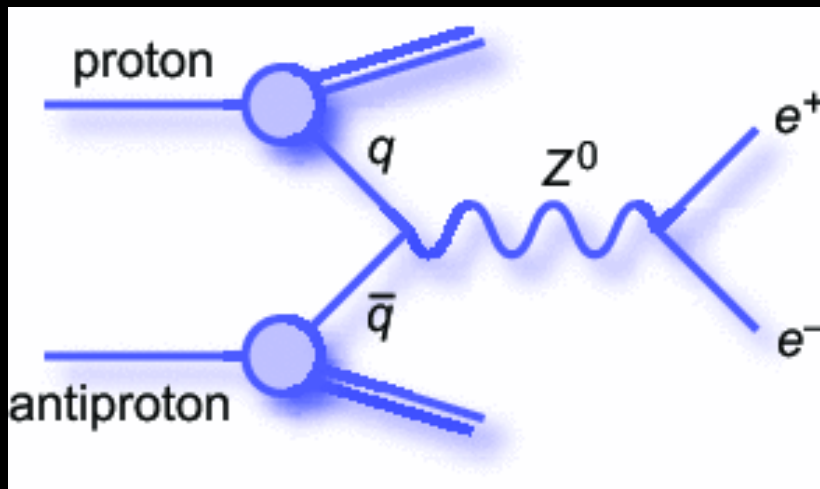
Srážky částic

- 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?



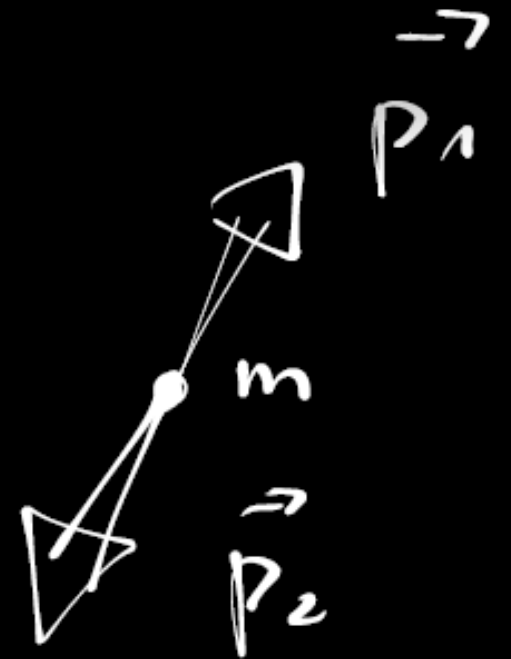
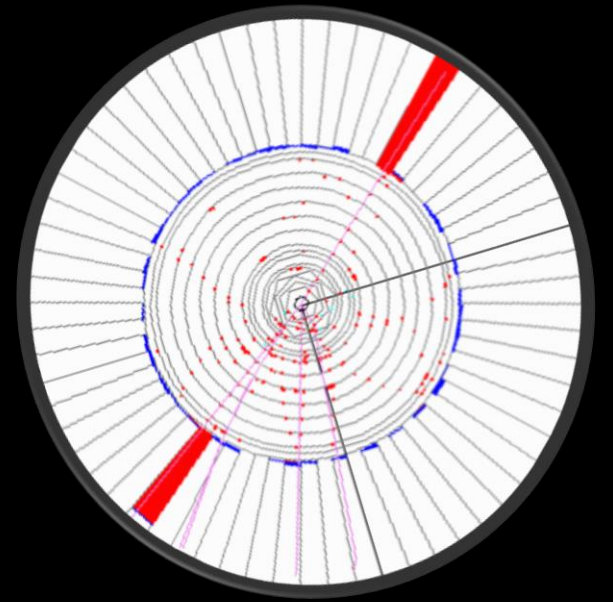
$$E = mc^2 \quad \text{Invariantní hmota}$$

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

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

$$m^2 = E^2 - p^2 \quad \begin{array}{l} \text{v jednotkách} \\ c=1 \end{array}$$

$$m^2 = \left(\sum_i E_i \right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i \right)^2$$

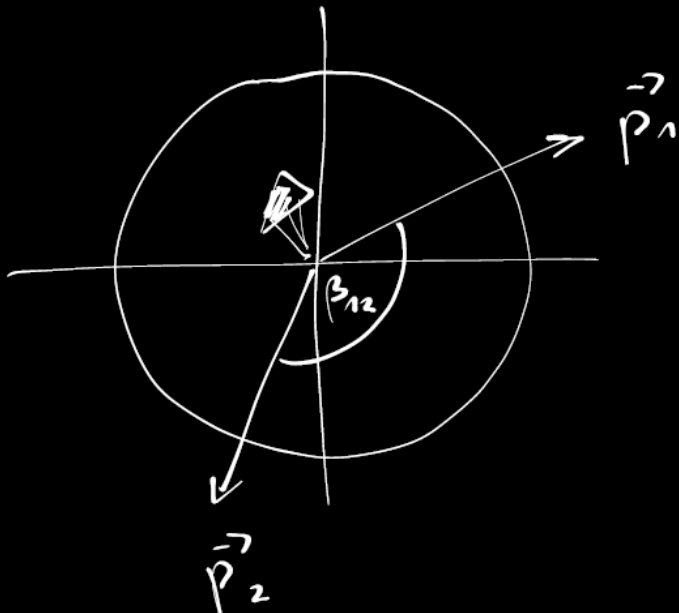


Invariantní hmota

$$m^2 = \left(\sum_i E_i \right)^2 - \left(\sum \vec{p}_i \right)^2$$

$$E = E_1 + E_2$$

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$



$$\vec{p}^2 \equiv \vec{p} \cdot \vec{p} = \vec{p}_1^2 + 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 + \vec{p}_2^2$$

$$m_1 \approx m_2 \approx 0 \Rightarrow$$

$$\doteq E_1^2 + 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 + E_2^2$$

$$= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \beta_{12}$$

$$m^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

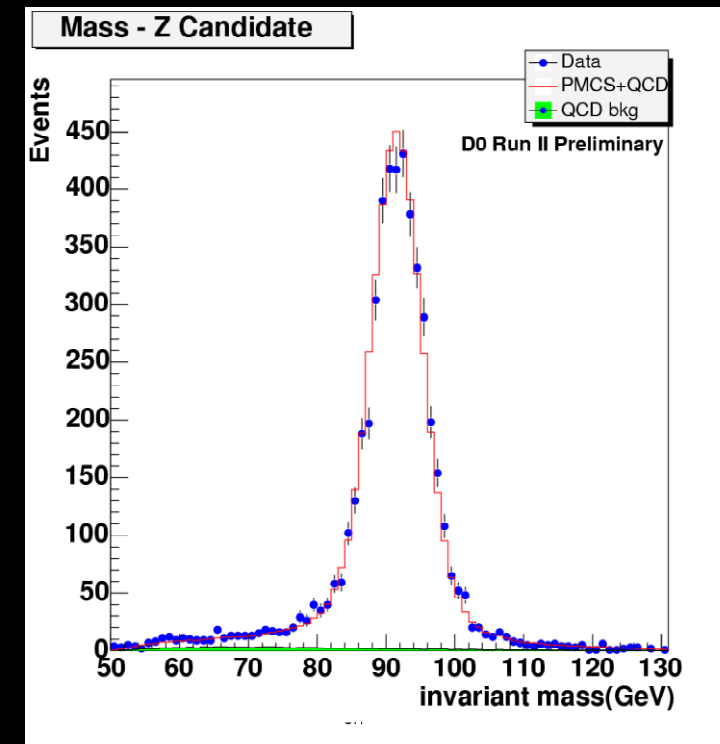
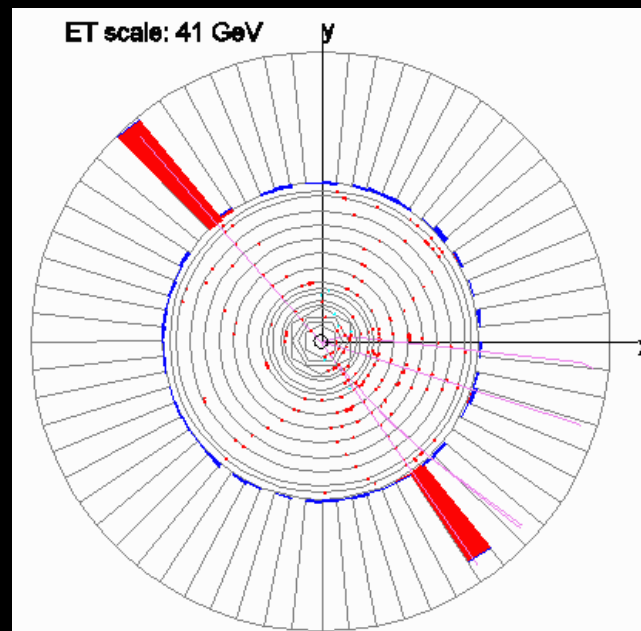
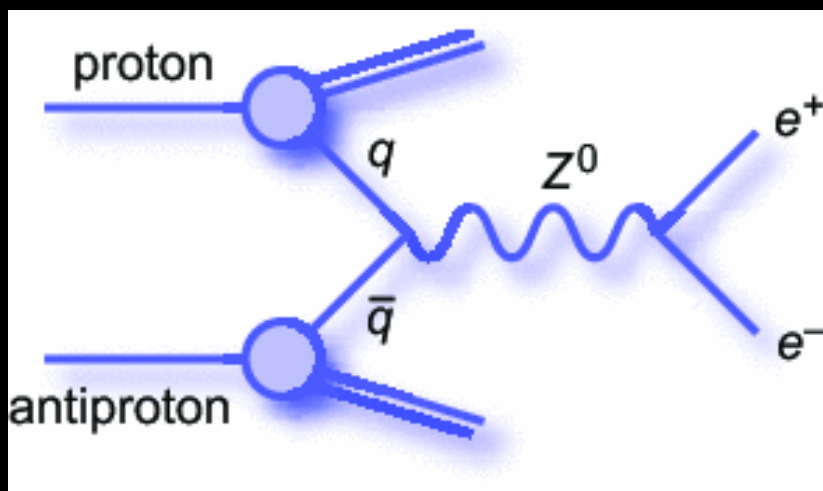
$$= \cancel{E_1^2} + 2E_1E_2 + \cancel{E_2^2}$$

$$- \cancel{E_1^2} - \cancel{E_2^2} - 2E_1E_2 \cos \beta_{12}$$

$$\simeq 2E_1E_2 (1 - \cos \beta_{12})$$

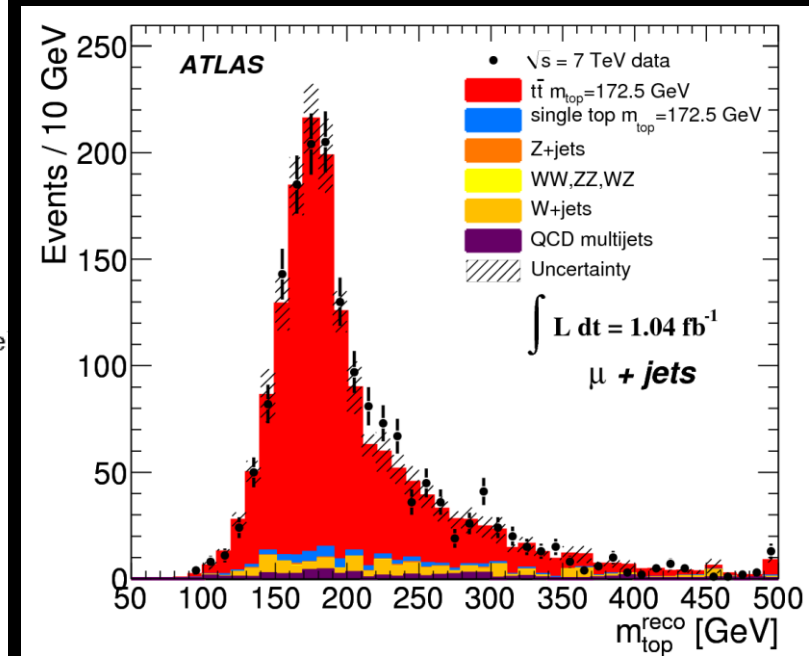
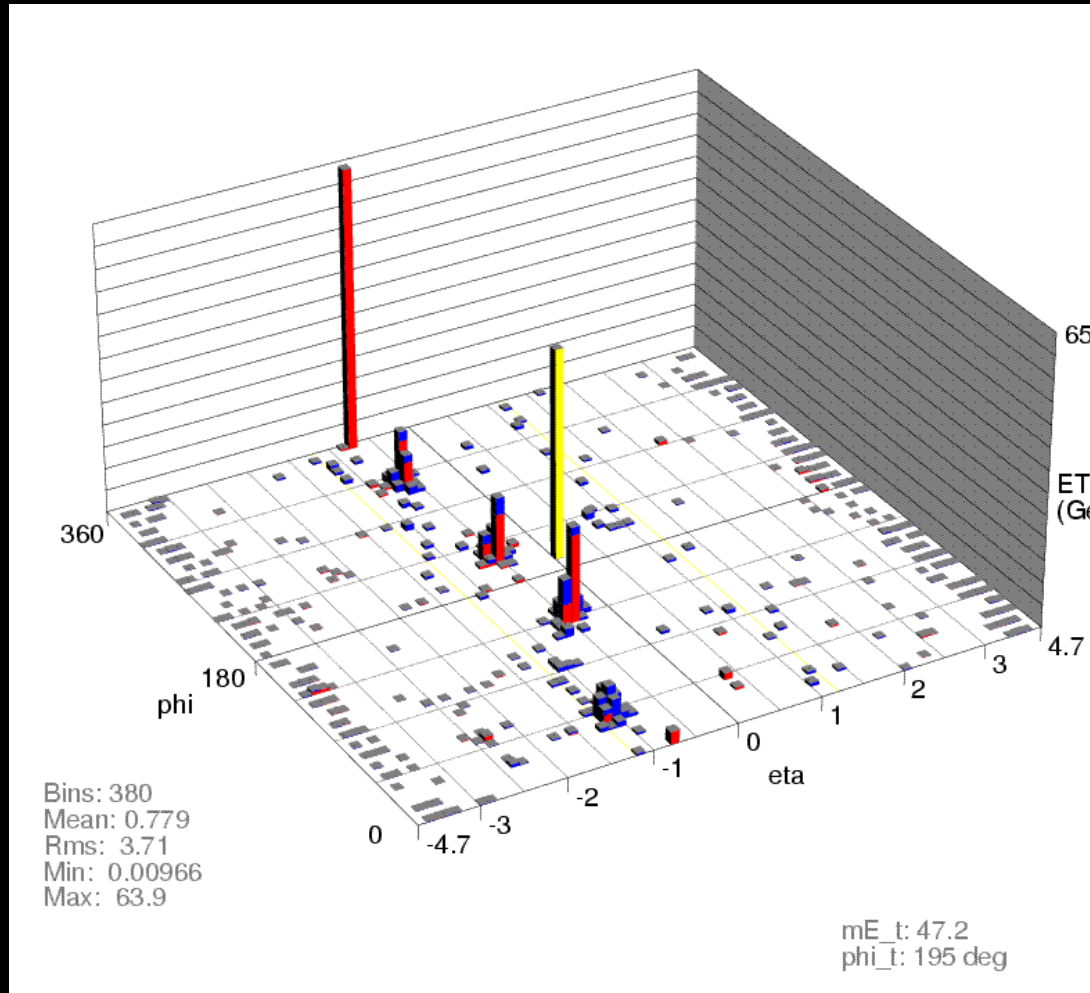
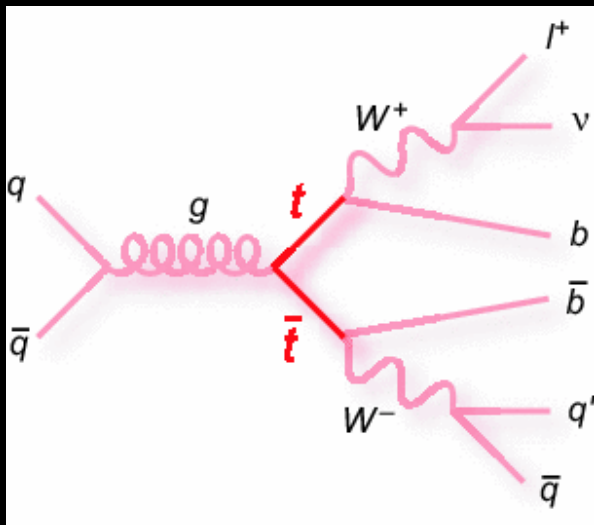
Interakce

- Energie se může přeměnit v hmotu nové těžké částice.
- Z boson jako „spektrální čára“:
 - Intenzita: pravděpodobnost procesu.
 - Šířka: doba života nestabilní částice.



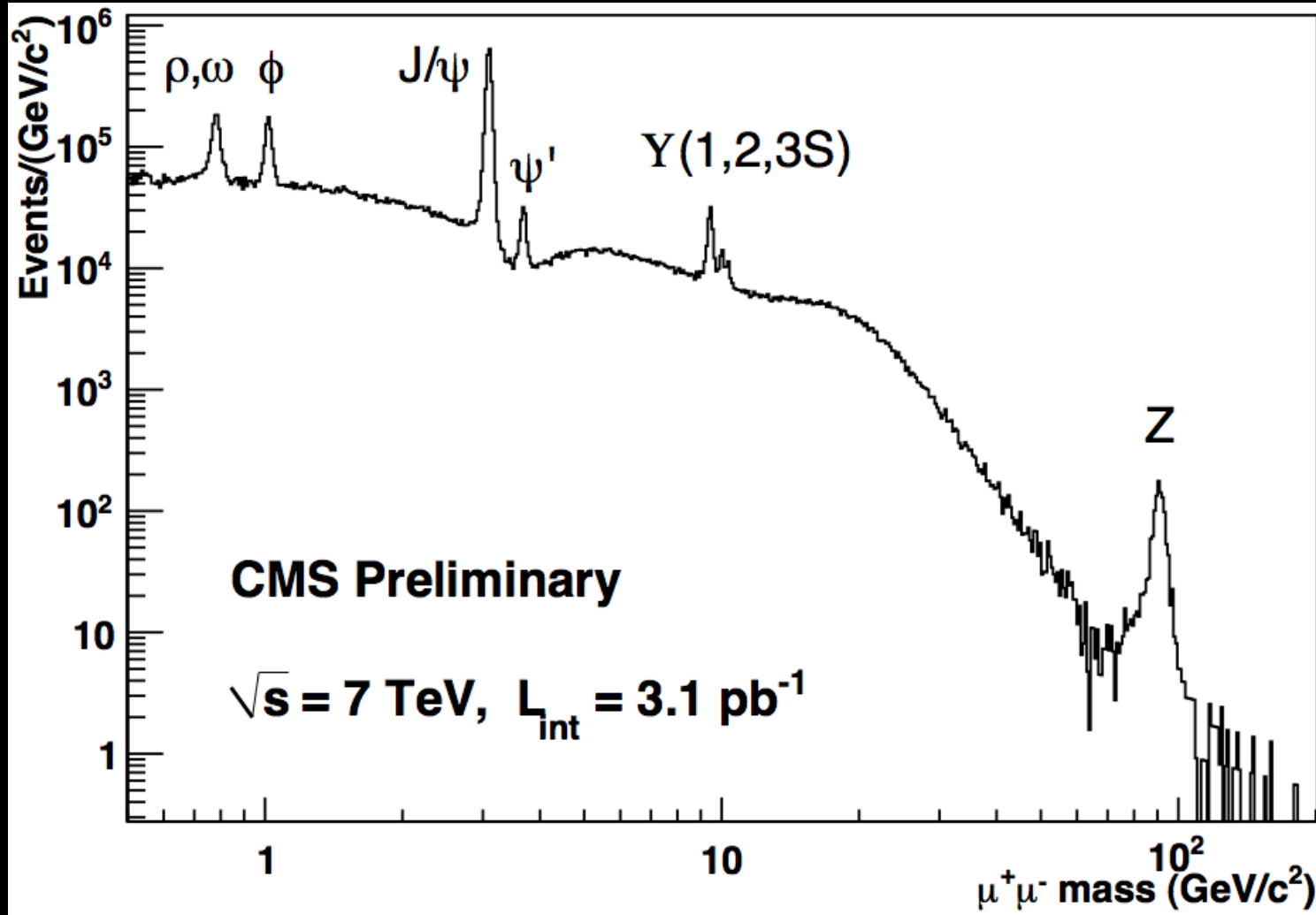
Interakce

- Složitější případ vzniku párů top kvarků.

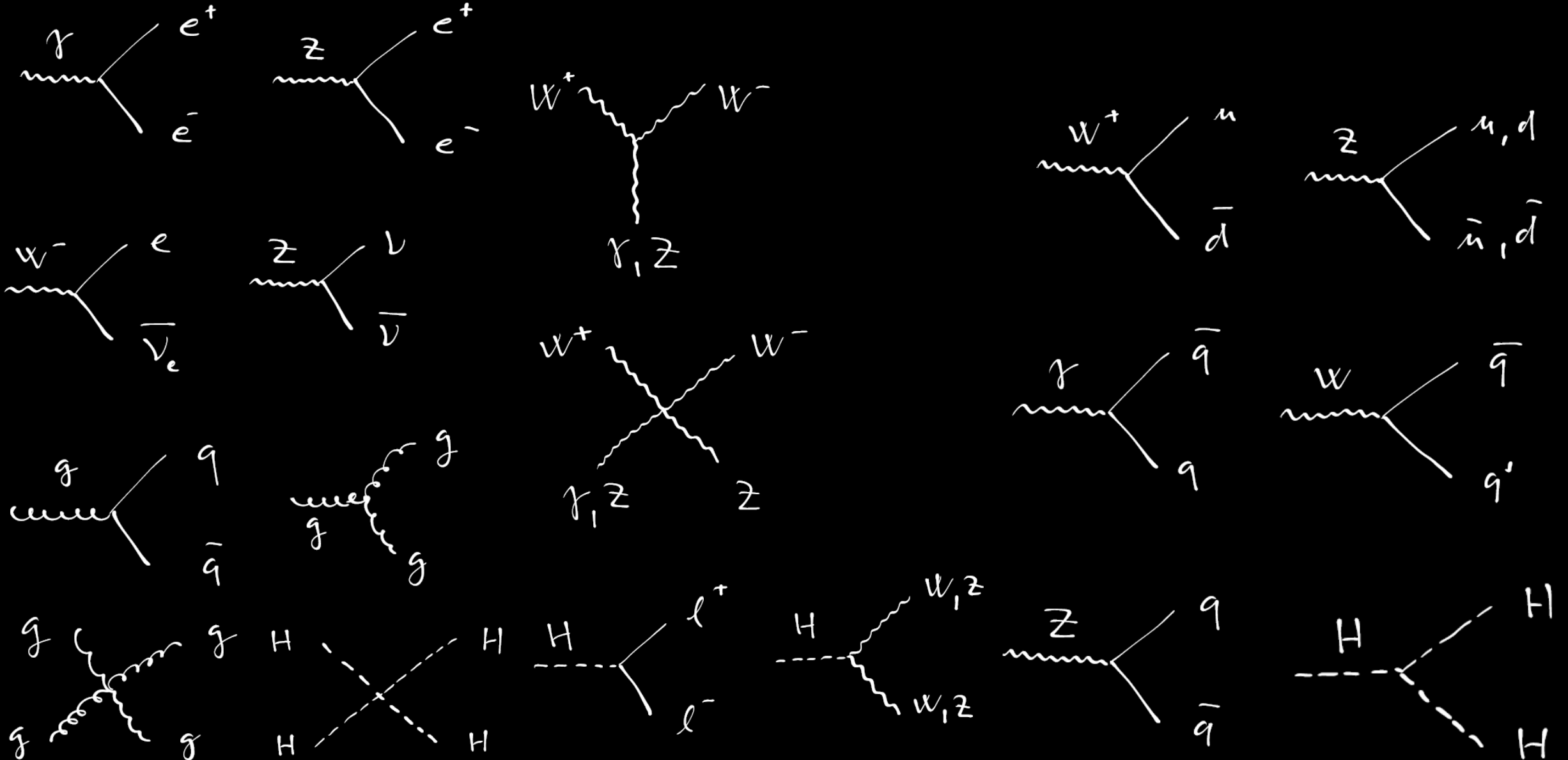


„Částice je kopeček!“

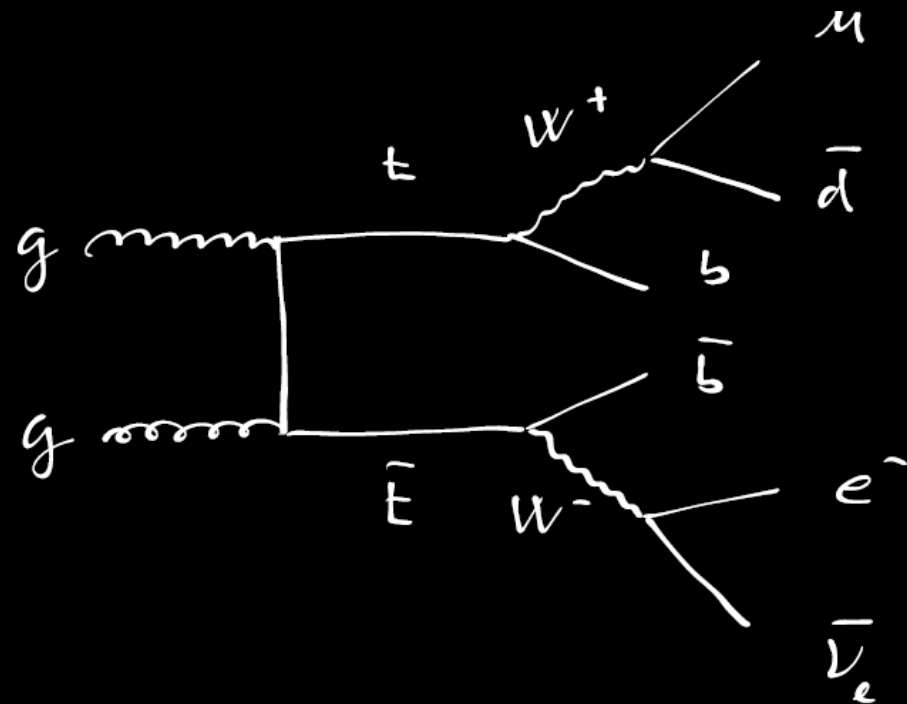
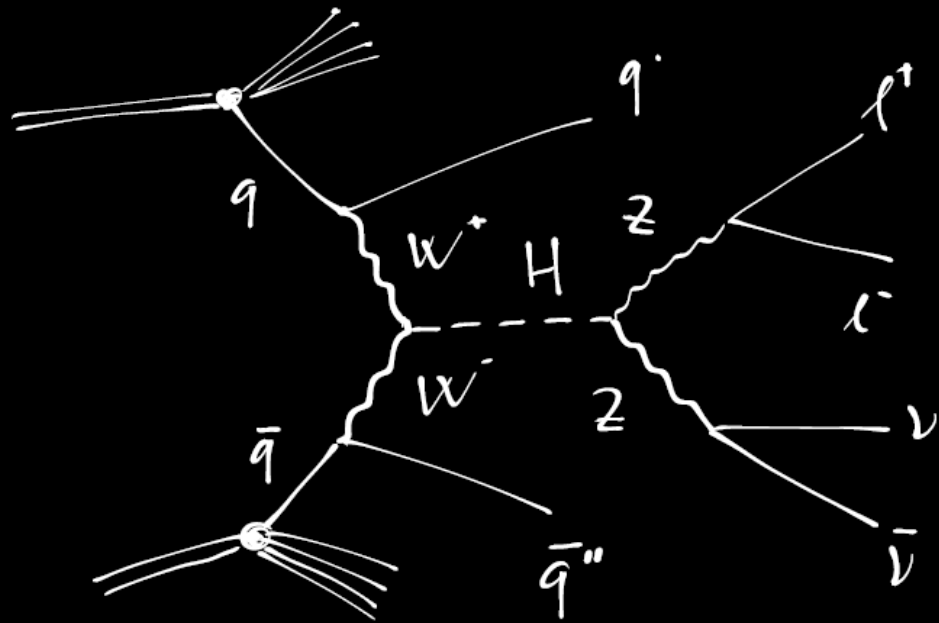
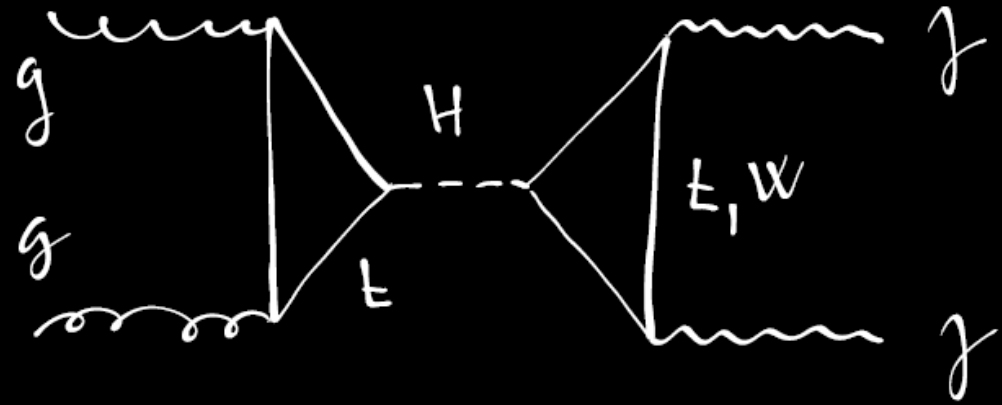
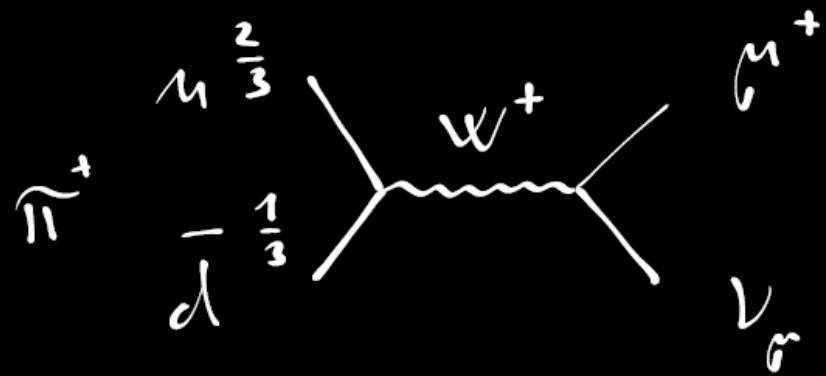
- ...když zkoumáme, jak často se něco děje při různé energii.



Všecky interakce světa

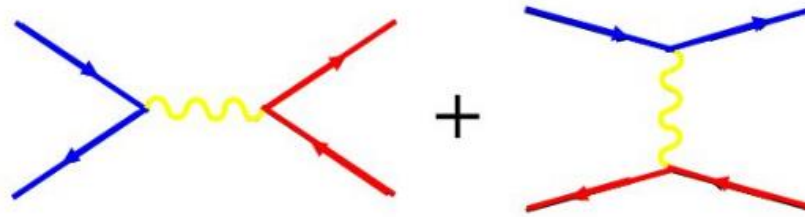


Stavební kamínky všech interakcí a rozpadů



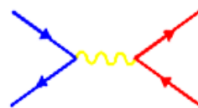
Šílený? Automatizováno!

MadGraph + MadEvent



Automated Tree-Level
Feynman Diagram, Helicity Amplitude,
and Event Generation

I High Energy Physics
Illinois



[The MadGraph5_aMC@NLO homepage](#)

UCL UIUC Launchpad
by the [MG/ME Development team](#)

[Generate Process](#)

[Register](#)

[Tools](#)

[My Database](#)

[Cluster Status](#)

[Downloads \(needs account\)](#)

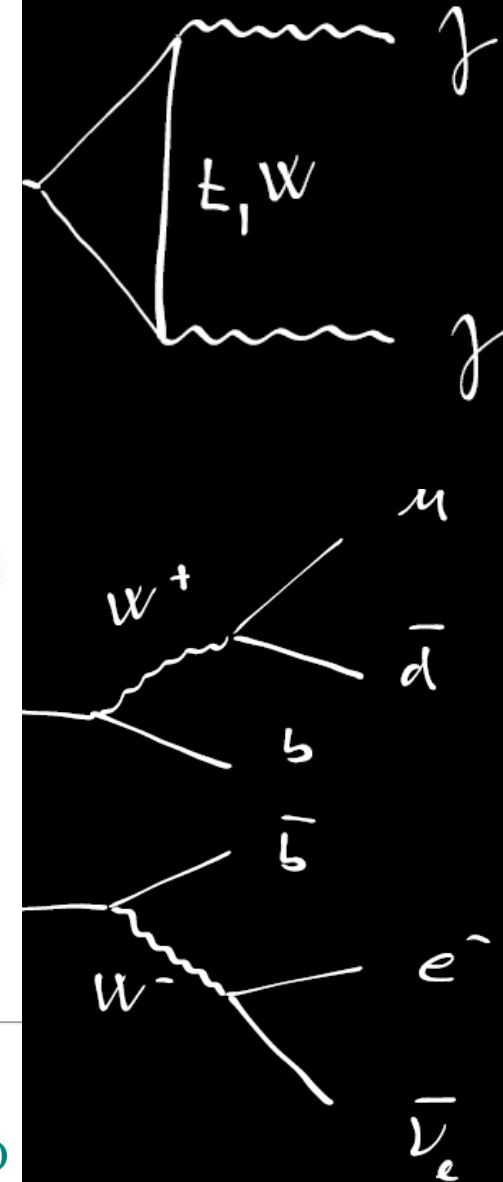
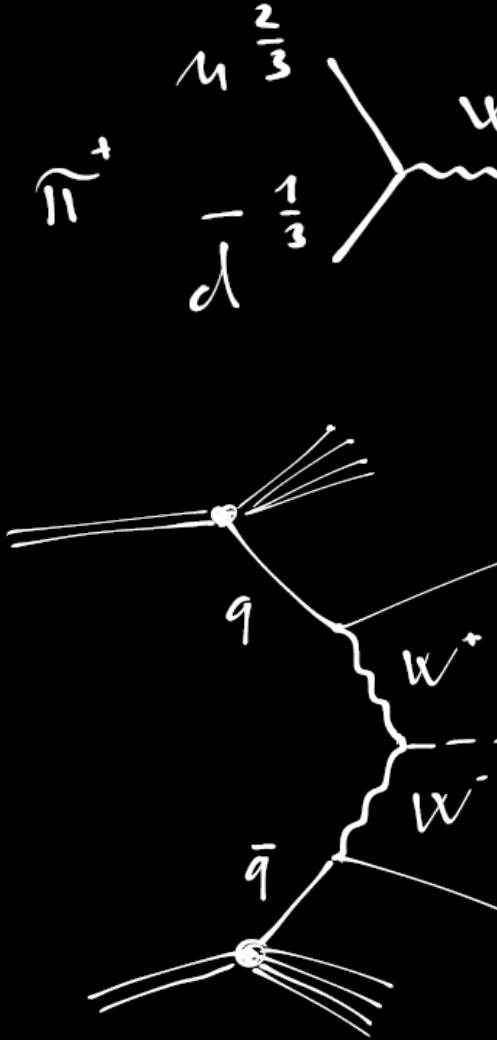
[Wiki](#)

[Answers](#)

[Bug reports](#)



Generate processes online using [MadGraph5_aMC@NLO](#)



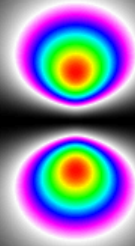
Všecky interakce světa

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

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

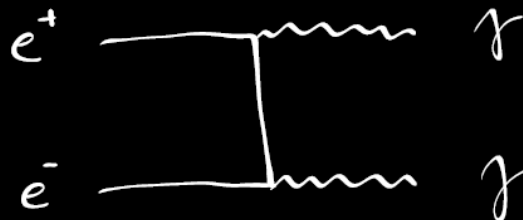
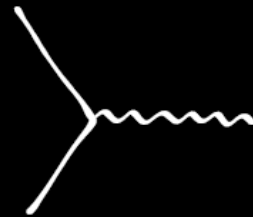
Elektromagnetická interakce

- Elektromagnetismus: výměna fotonu, stabilita atomového obalu, chemie..
- Má-li být elektronu kdekoli v prostoru „jedno“, jak moc komplexní má vlnovou funkci \Rightarrow interakce s fotony!
- Ze základního interakčního vrcholu kvantové elektrodynamiky (QED) lze poskládat např. anihilaci elektron pozitronového páru na dva fotony.



$$\psi(x) \mapsto e^{i\omega(x)} \psi(x)$$

$$-ieA_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$



The Nobel Prize in Physics 1965



Sin-Itiro Tomonaga
Prize share: 1/3



Julian Schwinger
Prize share: 1/3

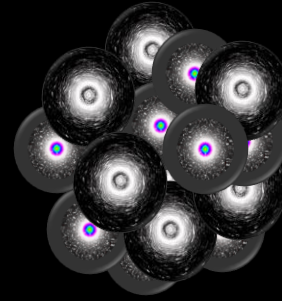


Richard P. Feynman
Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 1965 was awarded jointly to Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger and Richard P. Feynman "for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles".

Silné interakce I.

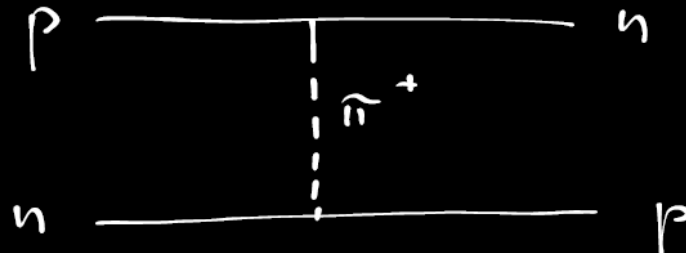
- Z hlediska silných interakcí na sebe stejně působí proton a neutron.
- Má-li být nukleonu kdekoli „jedno“, jestli „vypadá“ jako proton či neutron \Rightarrow interakce s piony!
- Prohozením pionu si proton a neutron mohou vyměnit úlohu.
- Dobrý model jaderných sil do určité energie.



$$N = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$$

$$N \rightarrow e^{i \frac{\sigma}{2} \cdot \vec{\omega}(x)} N$$

$$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \rightarrow e^{i \frac{\sigma}{2} \cdot \vec{\omega}(x)} \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$$



The Nobel Prize in Physics 1949



Hideki Yukawa
Prize share: 1/1

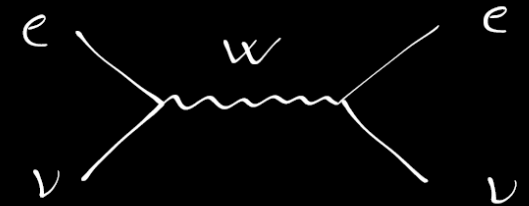
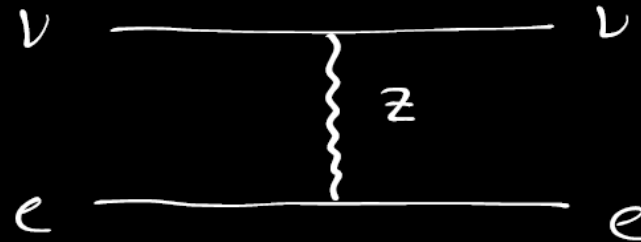
The Nobel Prize in Physics 1949 was awarded to Hideki Yukawa "for his prediction of the existence of mesons on the basis of theoretical work on nuclear forces".

Slabé interakce

- Má-li být kdekoli v prostu jedno, zda má lepton náboj či ne (elektron vs. neutrino) \Rightarrow interakce s W bosony.
- Obdobně interakce se Z bosonem.
- Radioaktivita, rozpady částic.
- Sjednocení elektromagnetických a slabých interakcí.
- Předpověď Z bosonu a interakcí neutrin.

$$\begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix} \mapsto e^{\frac{i}{2} \vec{\sigma} \cdot \vec{w}(x)} \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}$$

$$\frac{g}{2\sqrt{2}} W^{\mu} \bar{\nu} \gamma_{\mu} e$$



The Nobel Prize in Physics 1999



Gerardus 't Hooft
Prize share: 1/2



Martinus J.G. Veltman
Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 1999 was awarded jointly to Gerardus 't Hooft and Martinus J.G. Veltman "for elucidating the quantum structure of electroweak interactions in physics"

The Nobel Prize in Physics 1979



Sheldon Lee Glashow
Prize share: 1/3



Abdus Salam
Prize share: 1/3

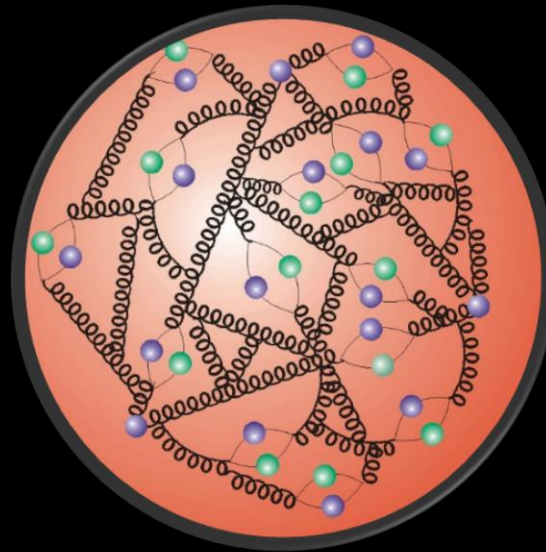
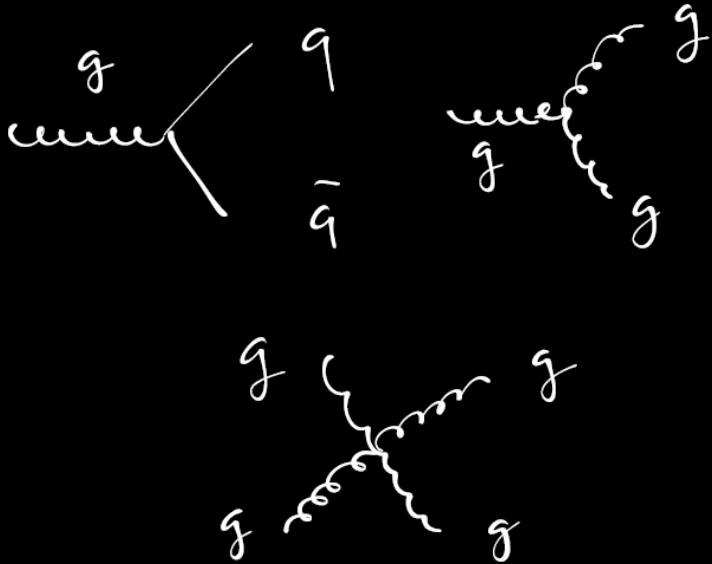


Steven Weinberg
Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 1979 was awarded jointly to Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam and Steven Weinberg "for their contributions to the theory of the unified weak and electromagnetic interaction between elementary particles, including, inter alia, the prediction of the weak neutral current".

Silné interakce II.

- Obdobně silné interakce: míchání kvarků s různou „barvou“ (náboj vůči silné interakci) \Rightarrow interakce s gluony.
- Kvarky si prohazují gluony a drží tak pohromadě proton.



The Nobel Prize in Physics 2004



David J. Gross
Prize share: 1/3



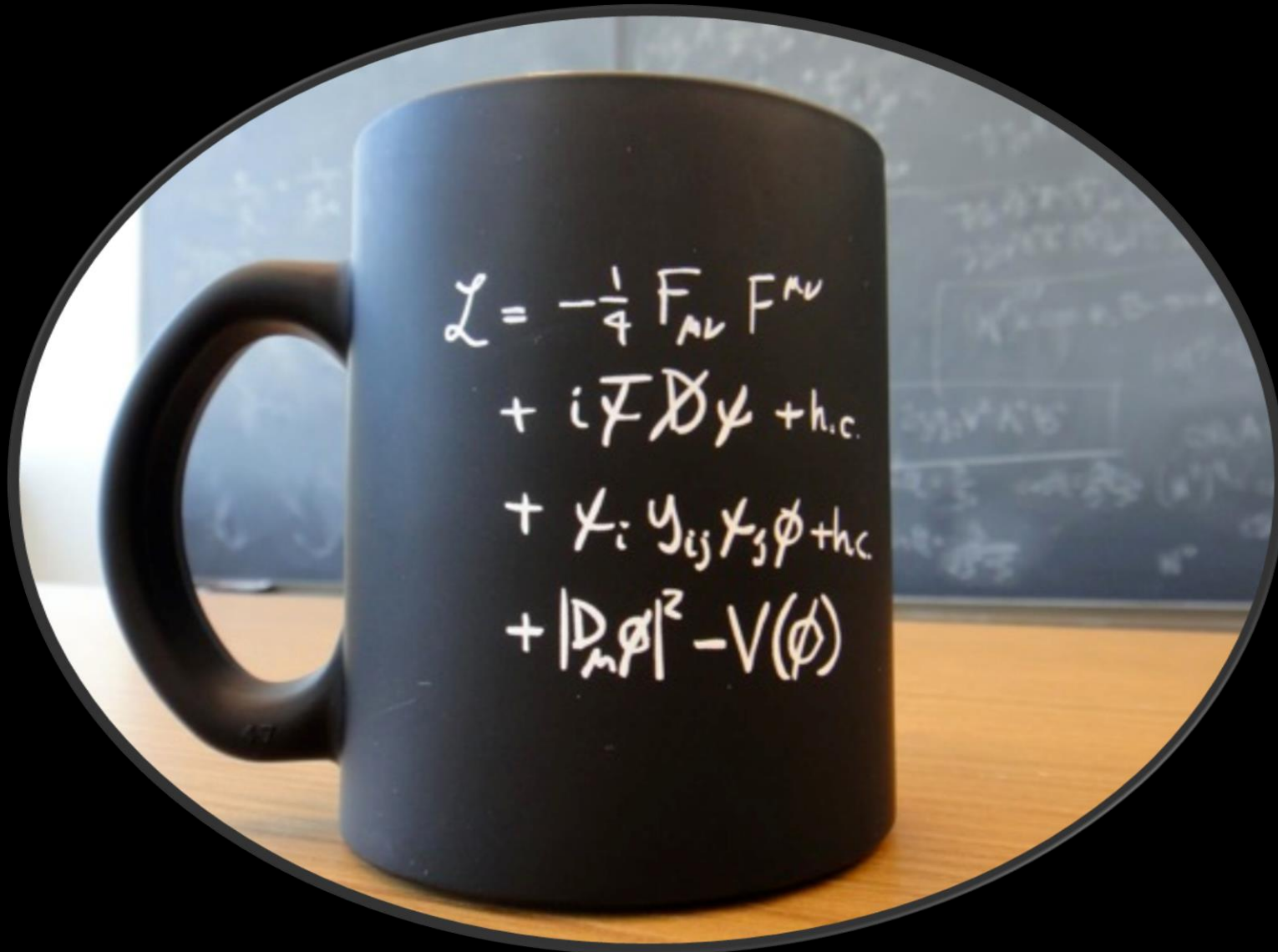
H. David Politzer
Prize share: 1/3



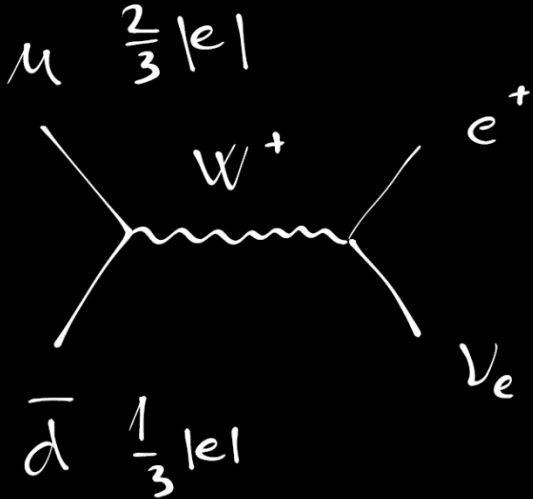
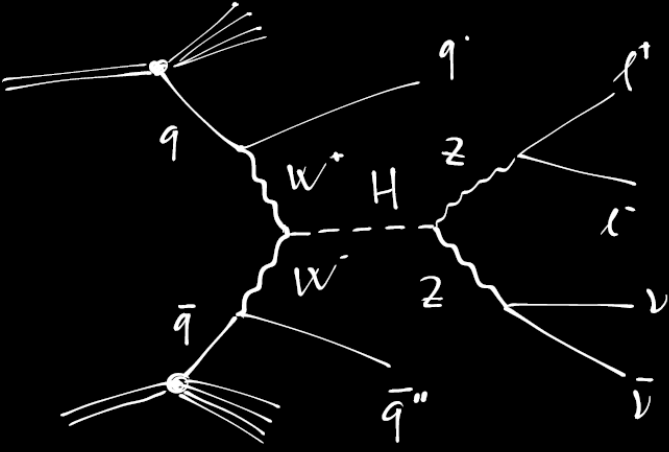
Frank Wilczek
Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 2004 was awarded jointly to David J. Gross, H. David Politzer and Frank Wilczek "for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction".

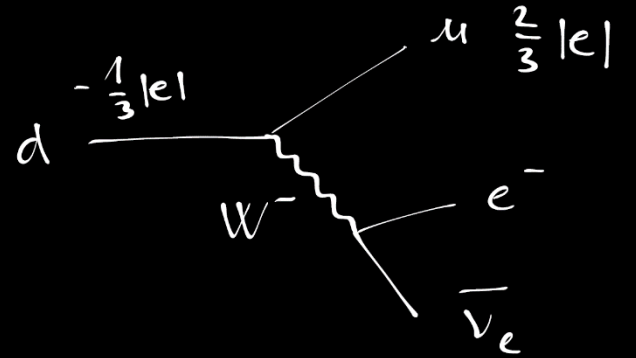
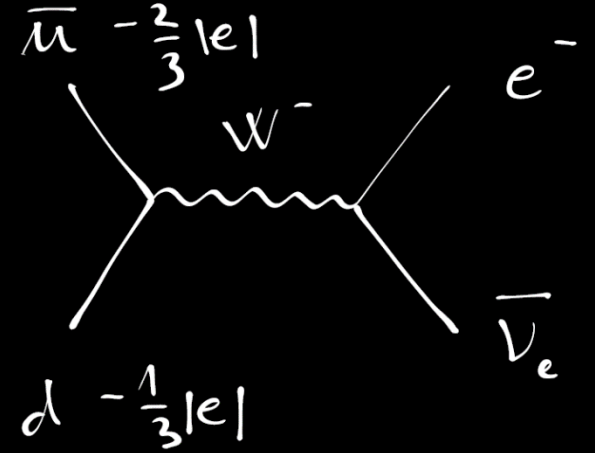
Všecky interakce světa kompaktně



WHAT PART OF



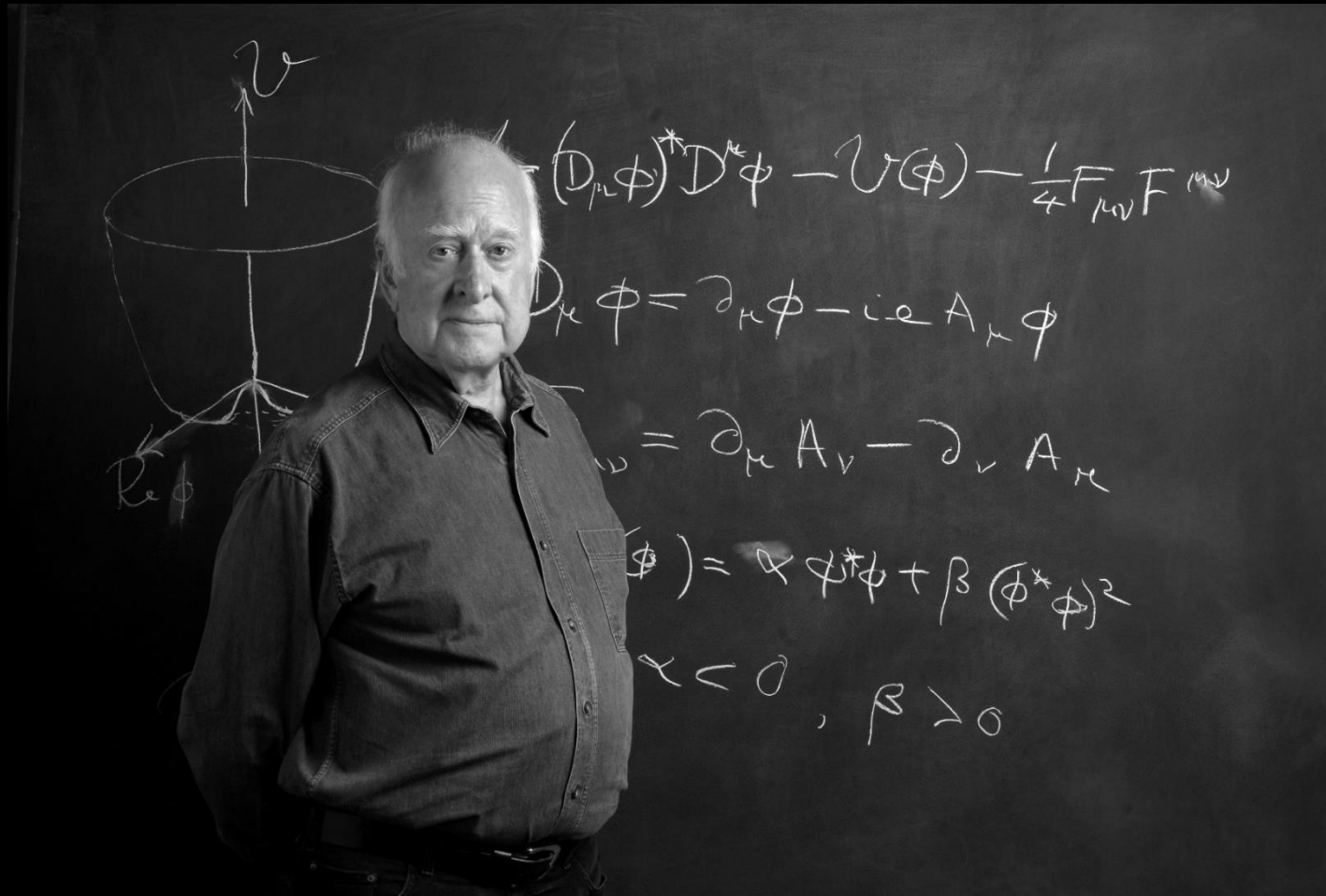
$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i \gamma^\mu q^i) g_\mu \\
 & \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu 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_\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}{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{M}{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_\mu \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_k^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu C_{\lambda k} u_k^\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_k^\lambda) + m_e^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_k^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) u_k^\lambda) - m_u^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 - \\
 & \gamma^5) u_k^\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_e^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

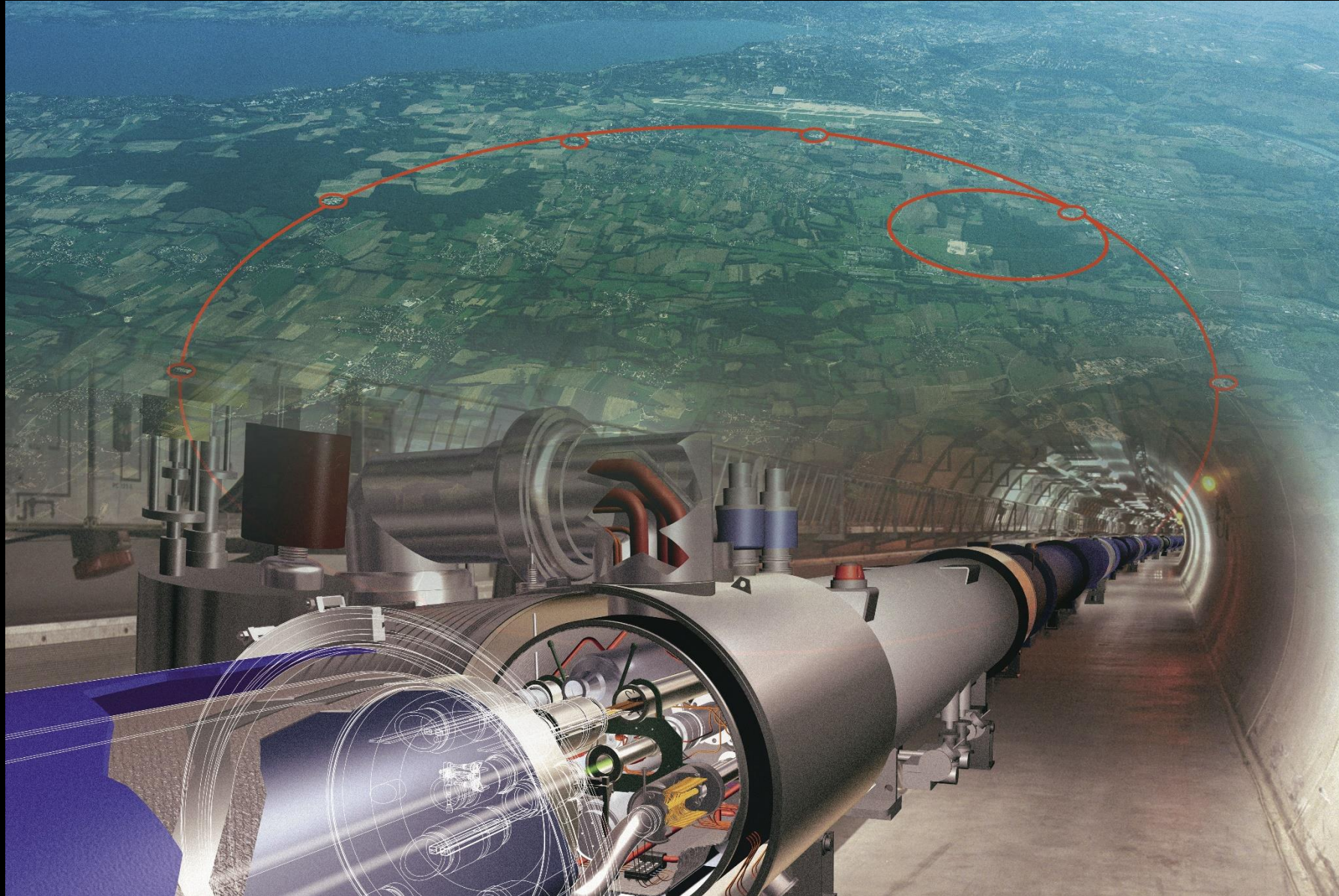
- Problém: interakce zavedené kalibračním principem fungují jen pro nehmotné částice...
- Jak částicím v teorii dodat hmotnost, a zachovat symetrii teorie?



1964

We'll be back soon...

Mezitím v laboratoři CERN, kde „ $E = mc^2$ “



CERN: laboratoř „ $E = mc^2$ “

- Urychlovač LHC (Large Hadron Collider): 27 km obvod.
- Supravodivé dipólové magnety 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.

CERN: laboratoř „ $E = mc^2$ “

- Urychlovač LHC (Large Hadron Collider): 27 km obvod.
- Supravodivé dipólové magnety chlazeny na 1,9
 - 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 shlcích po 10^{10} částic.
- Shluků je ≈ 2000 .
- Frekvence srážek je 40 MHz, tj. každých 25 ns.
- Spotřeba energie jako kanton Ženeva.

HEY LADIES



TAKE MY NUMBER

6.0221415
x 10^{23}

6.0221415
x 10^{23}

6.0221415
x 10^{23}

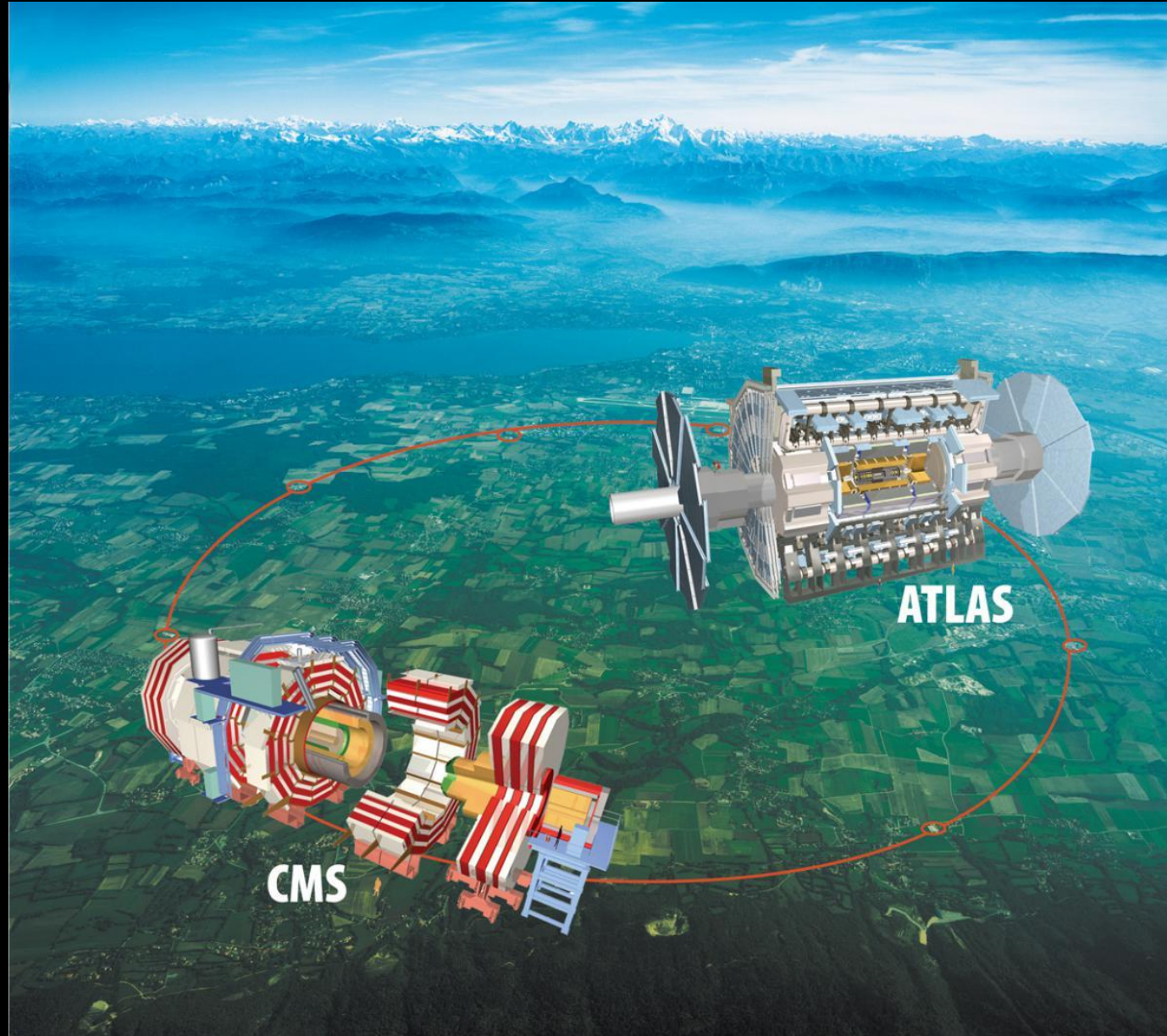
6.0221415
x 10^{23}

6.0221415
x 10^{23}

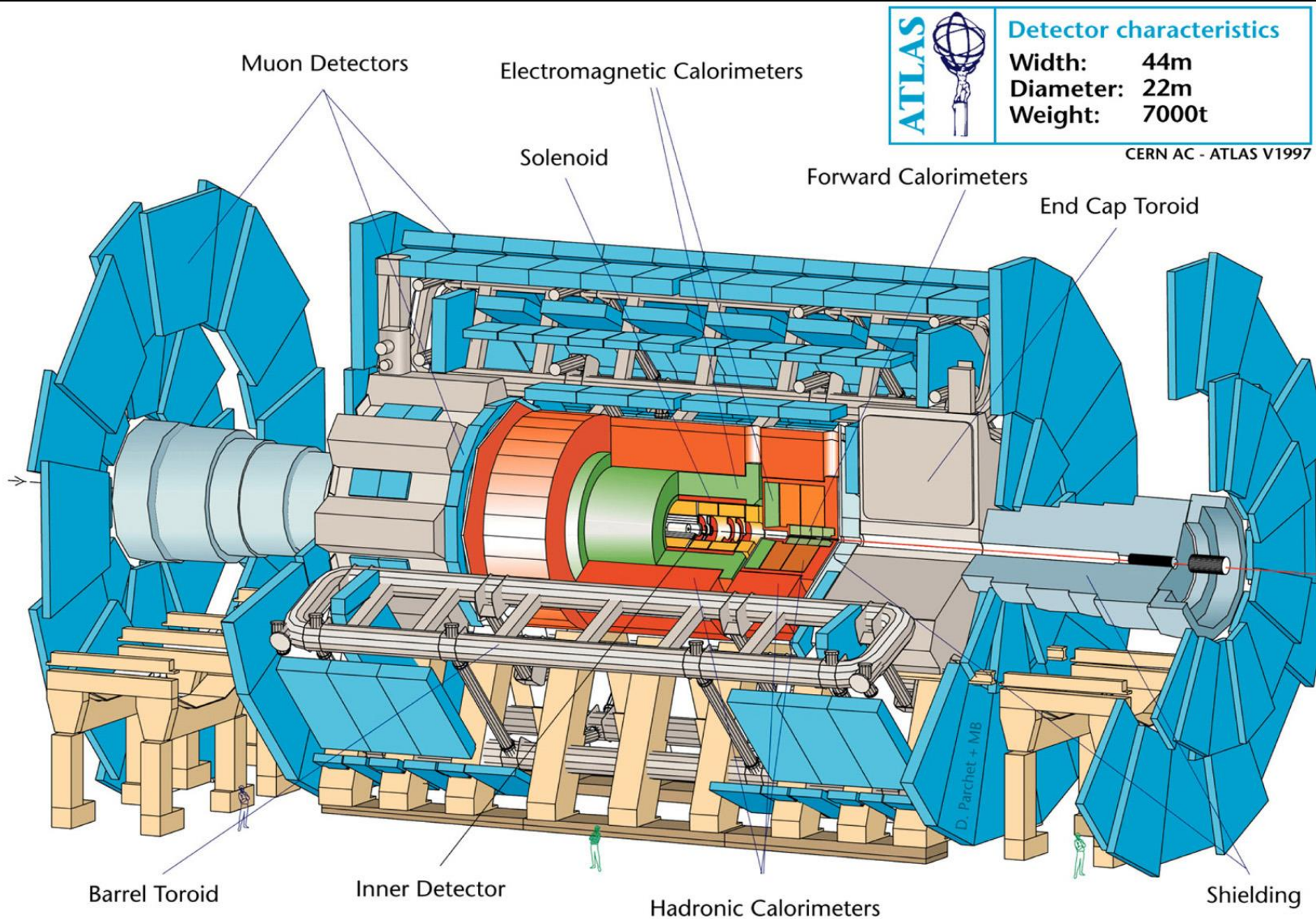
6.0221415
x 10^{23}

6.0221415
x 10^{23}

CERN – Evropské centrum (sub)jaderného výzkumu



Experiment ATLAS



Experiment ATLAS



Detector characteristics

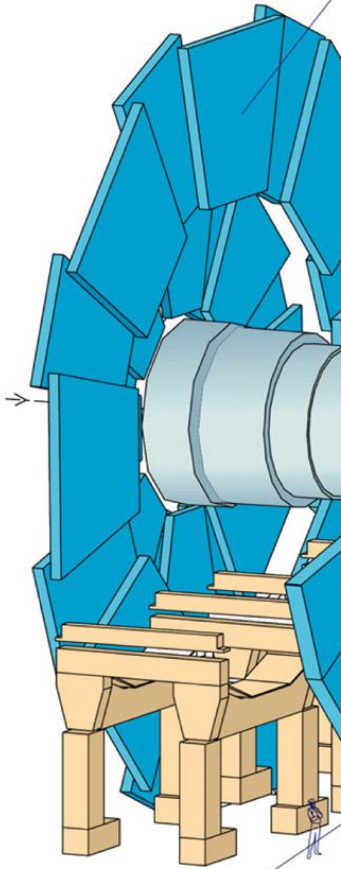
Width: 44m
Diameter: 22m
Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997

Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

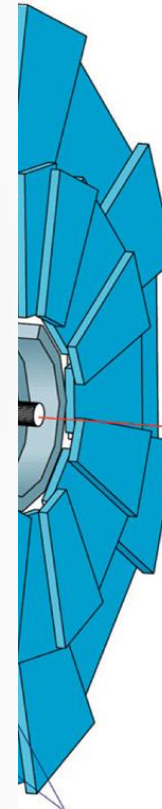


Barrel Toroid



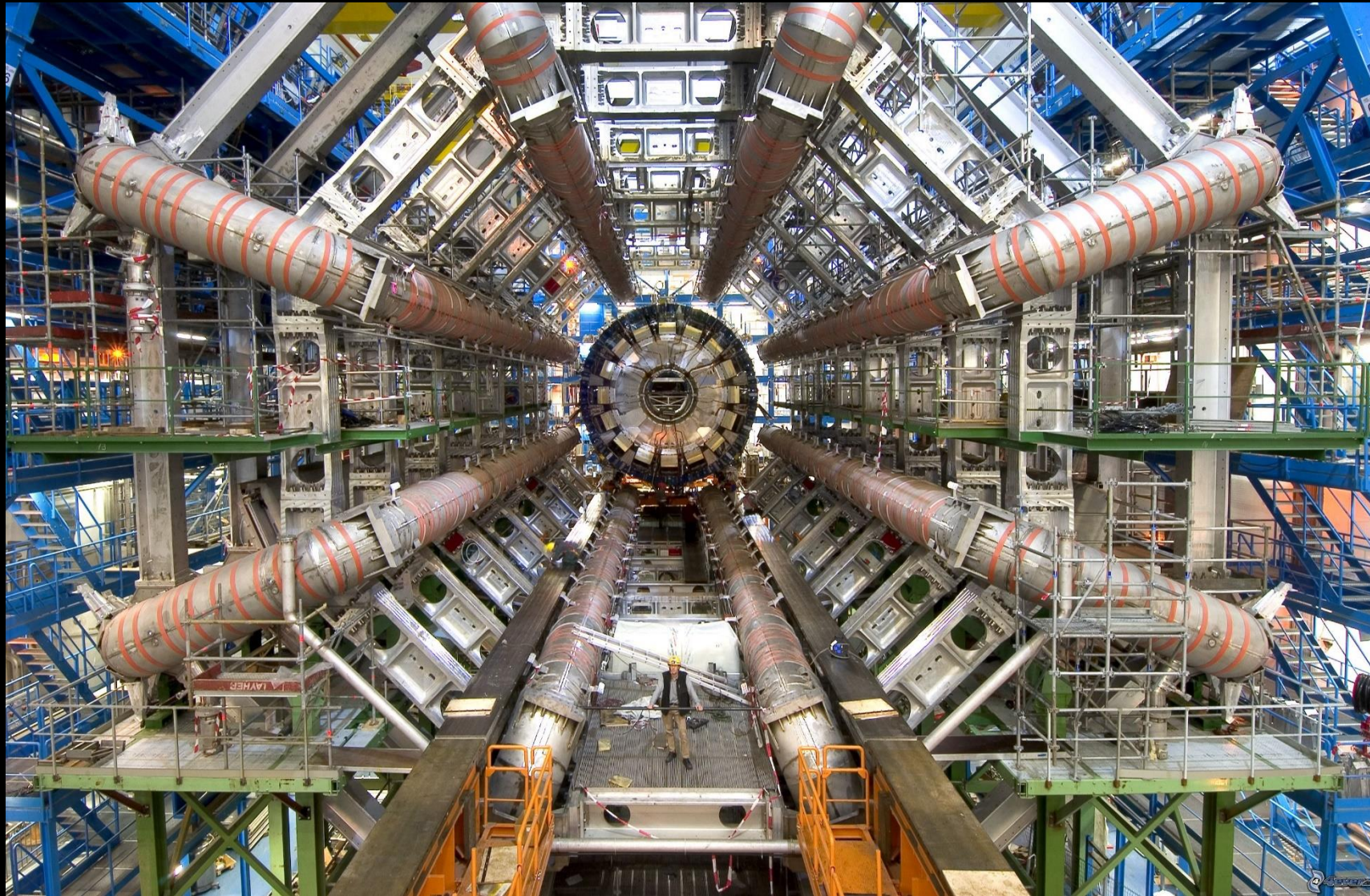
Inner Detector

Hadronic Calorimeters

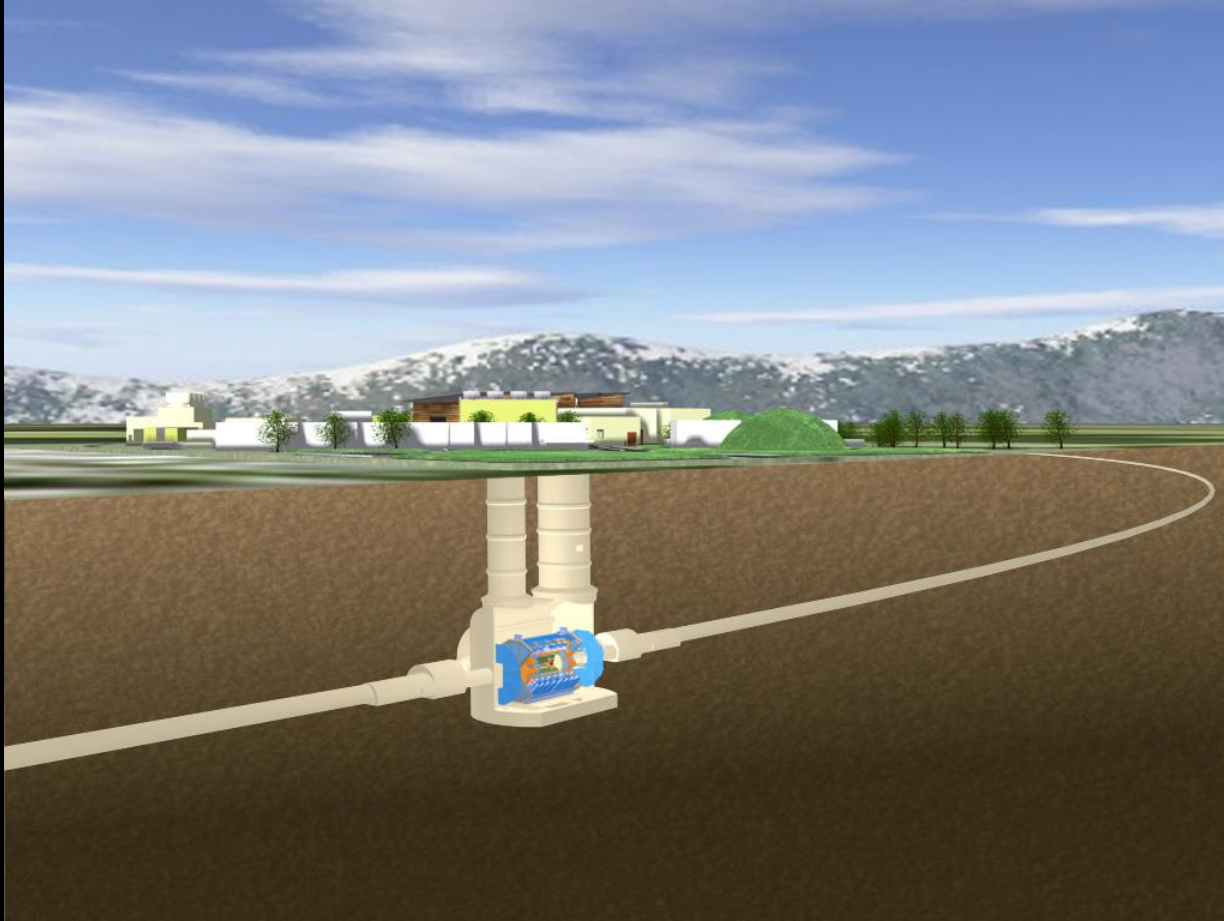


Shielding

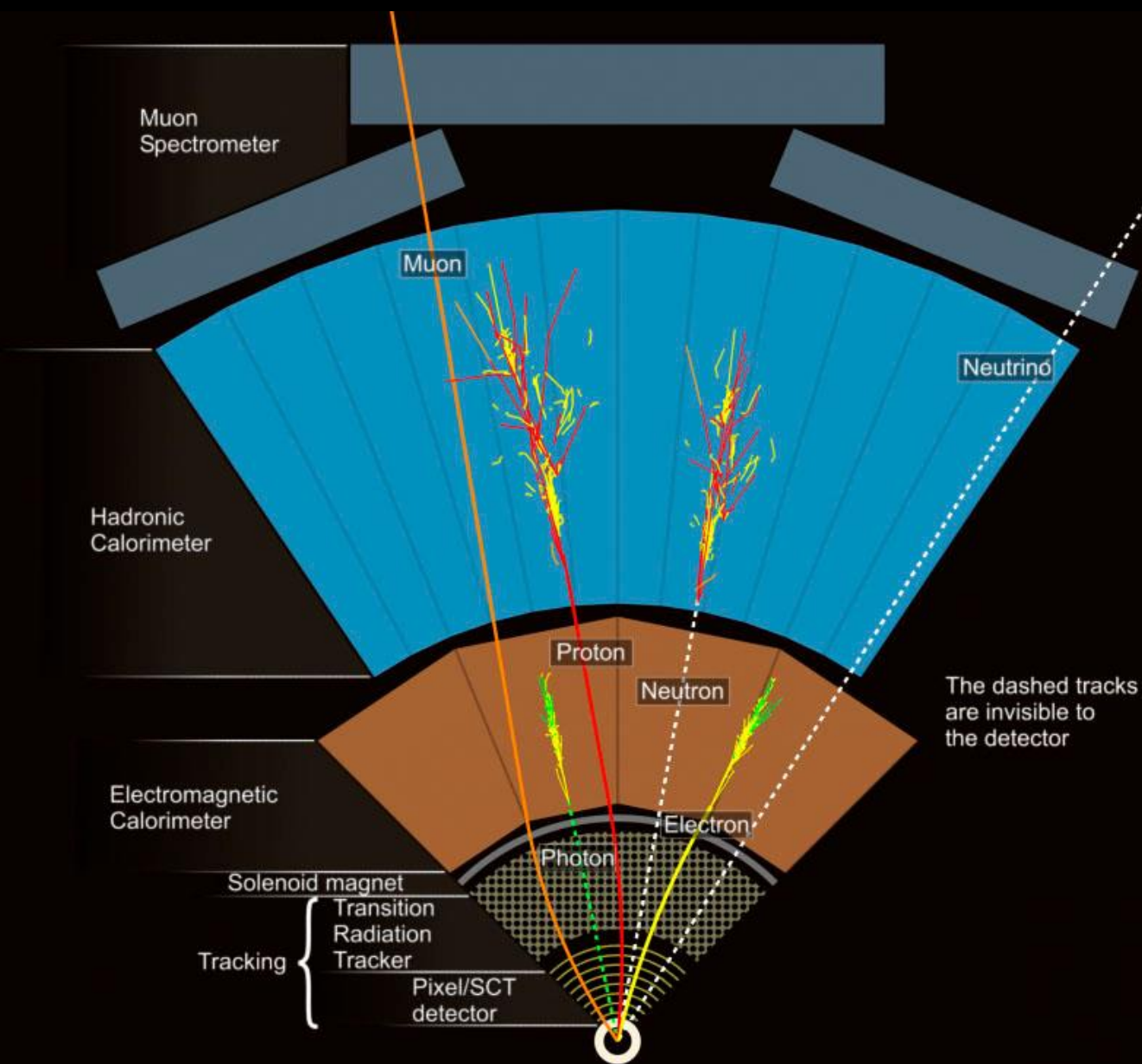
Experiment ATLAS



Experiment ATLAS



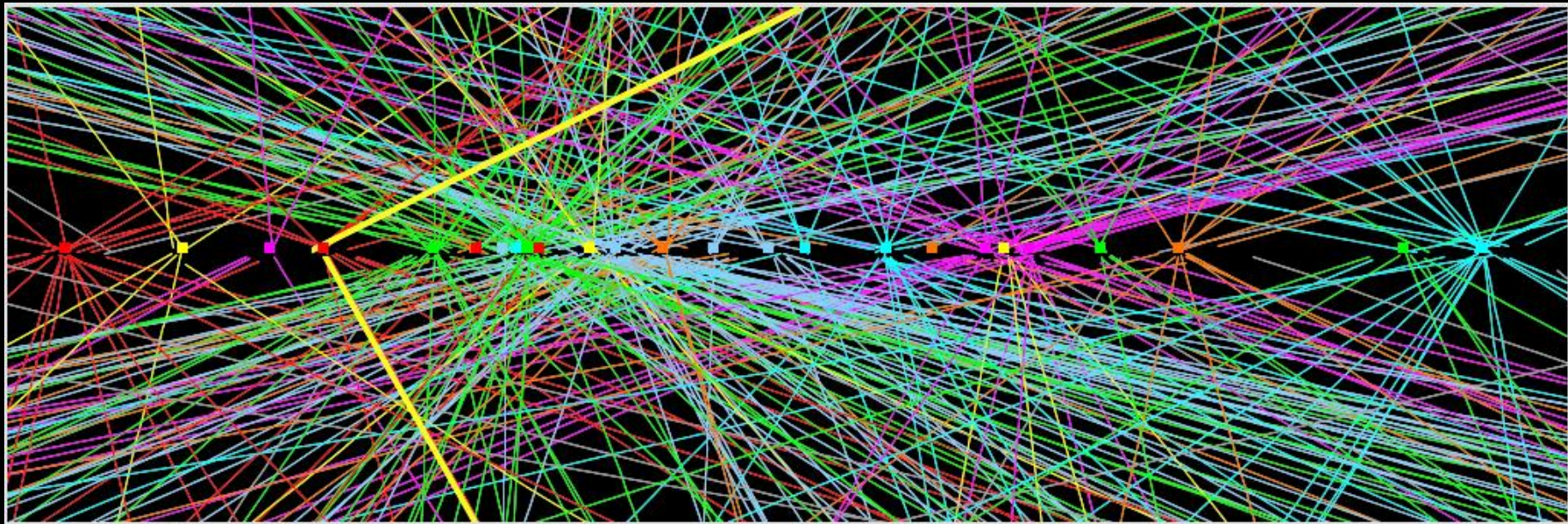
Jak ATLAS vidí částice



- 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.

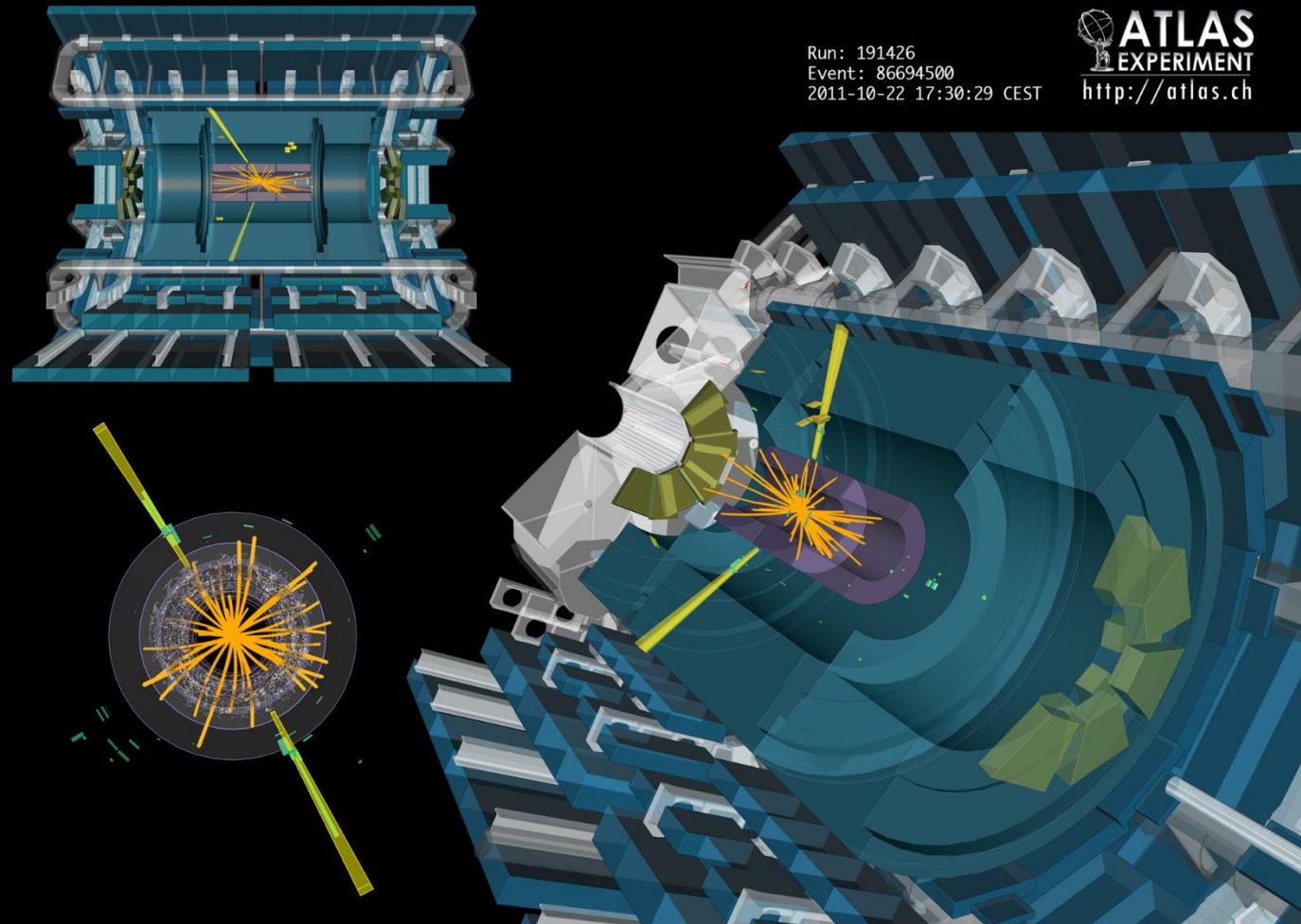
Jak ATLAS vidí částice

- 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:)

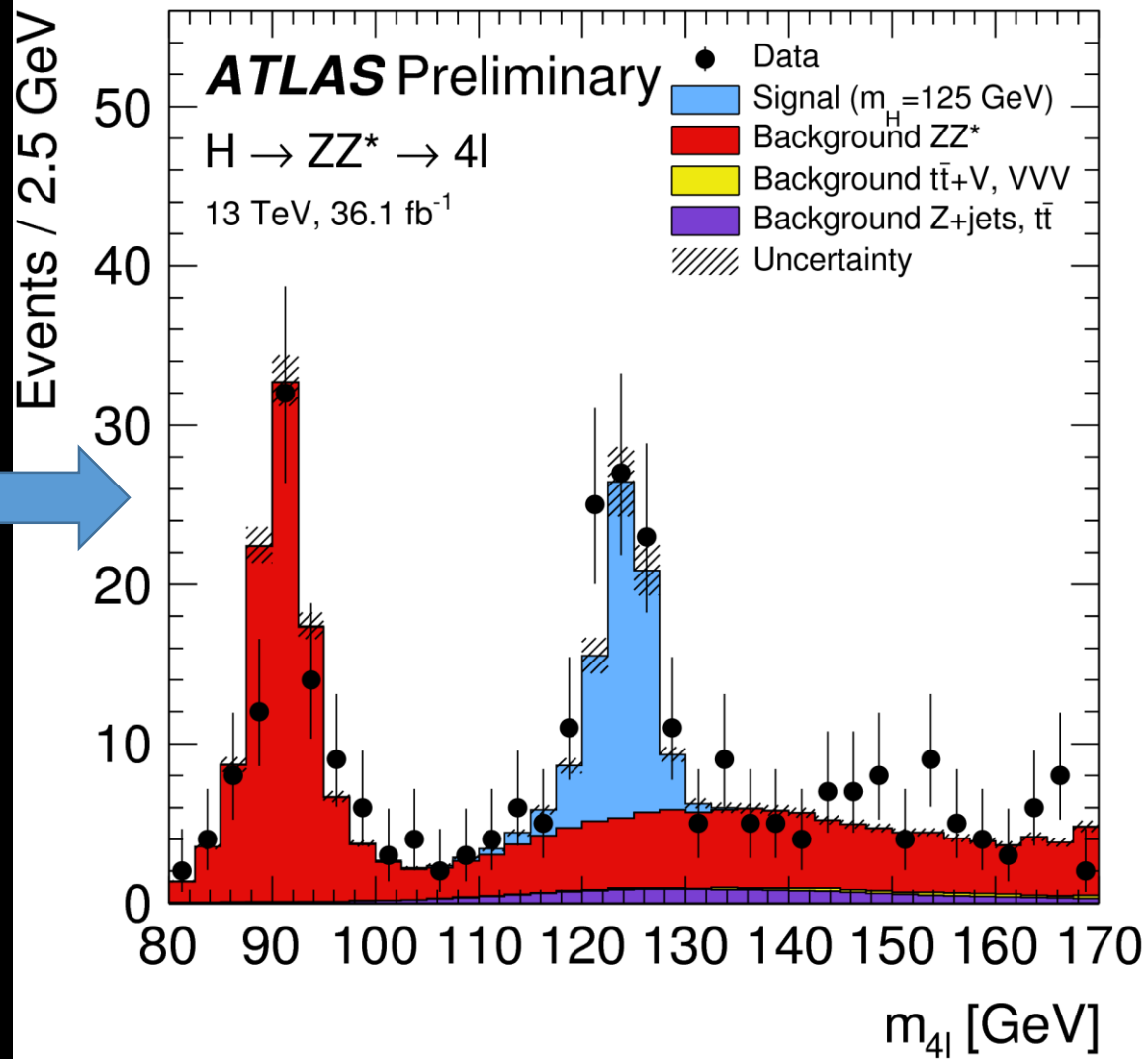
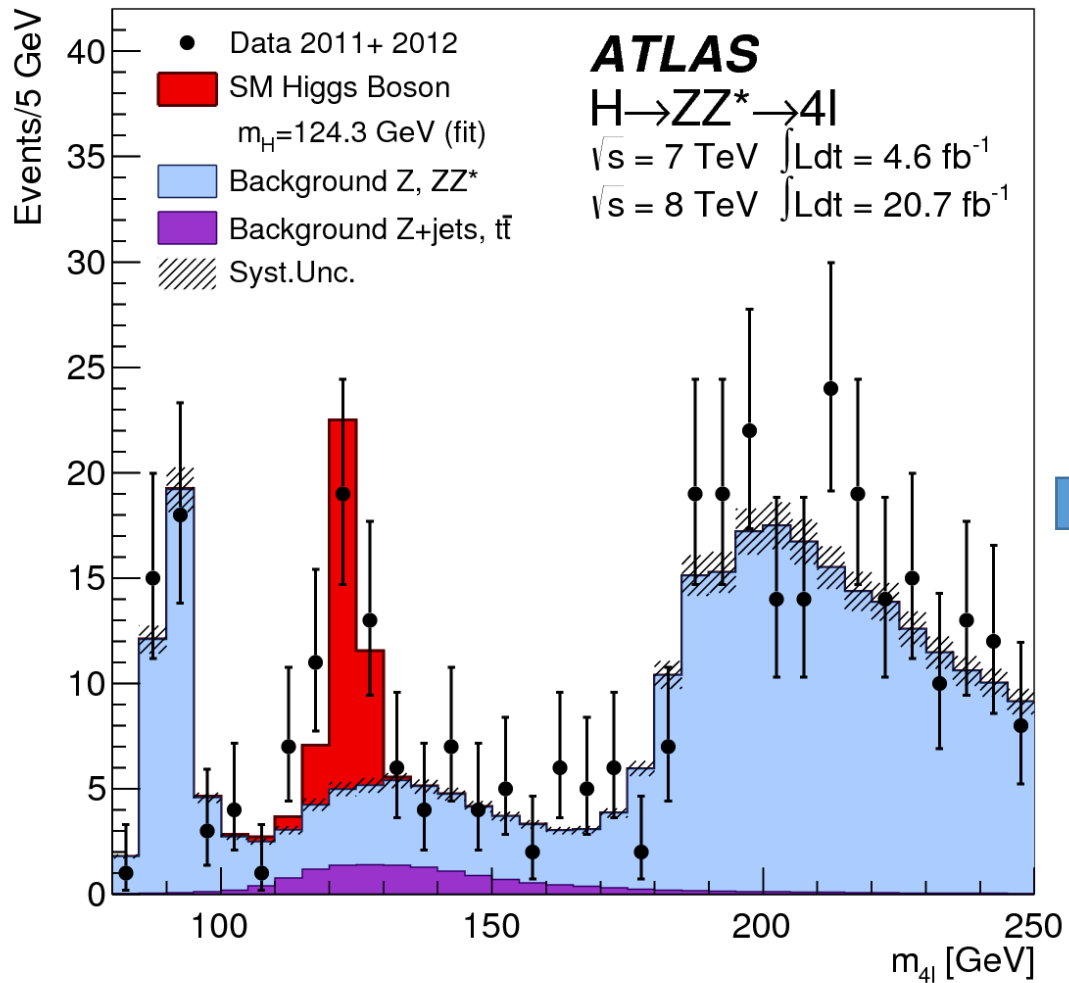


Higgsův boson

- Rozpad Higgsova bosonu na dva fotony.

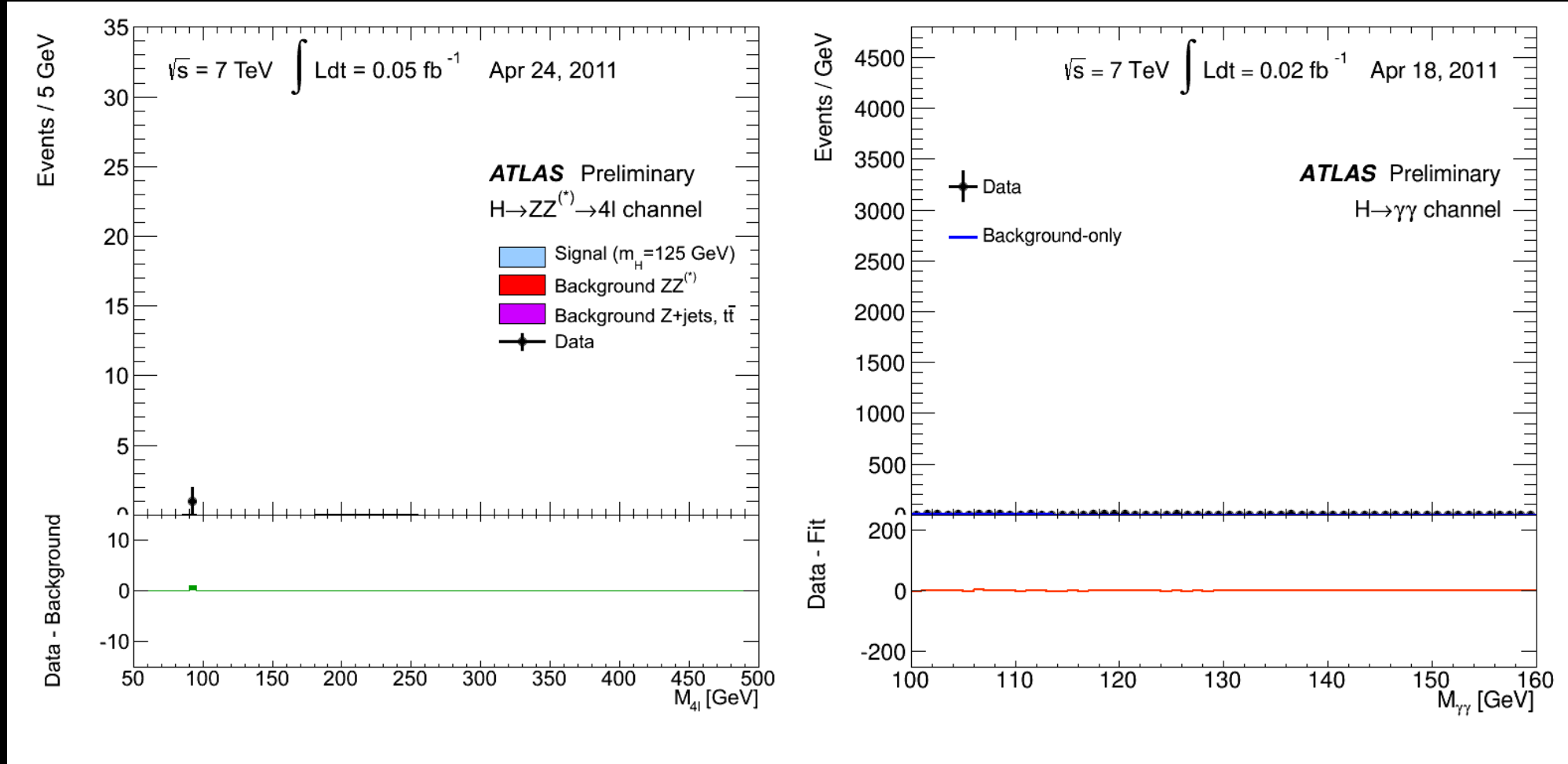


Higgs \rightarrow ZZ^* boson



Higgsův boson

- Čekání na Higgse.



Higgsův boson

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

Fabiola Gianotti a Peter Higgs, 2012



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




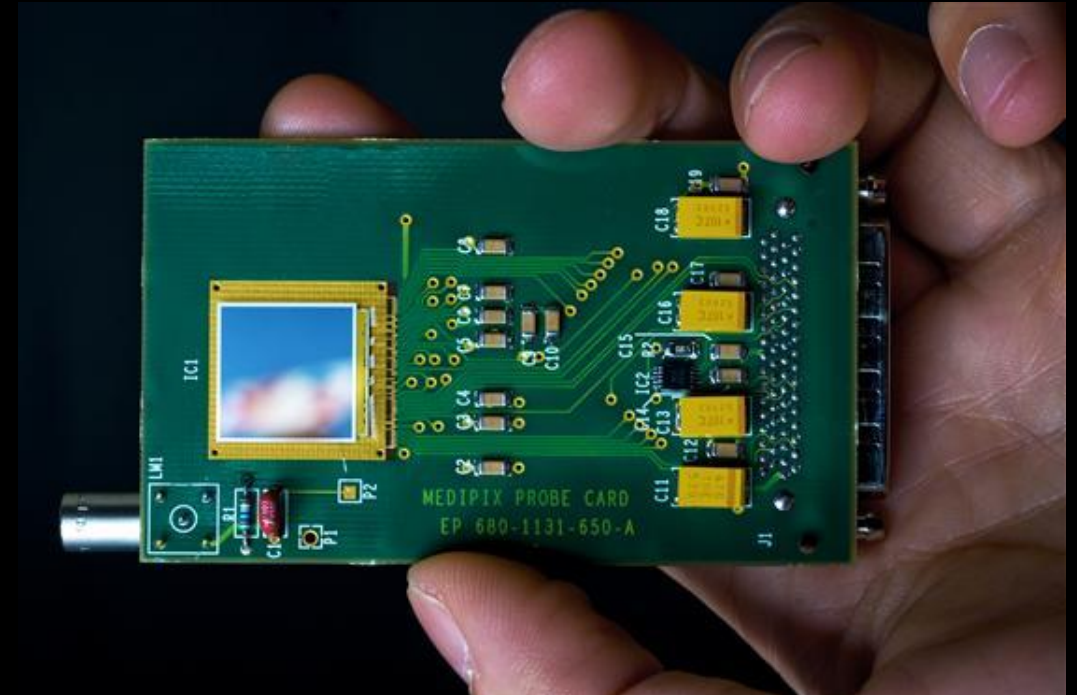
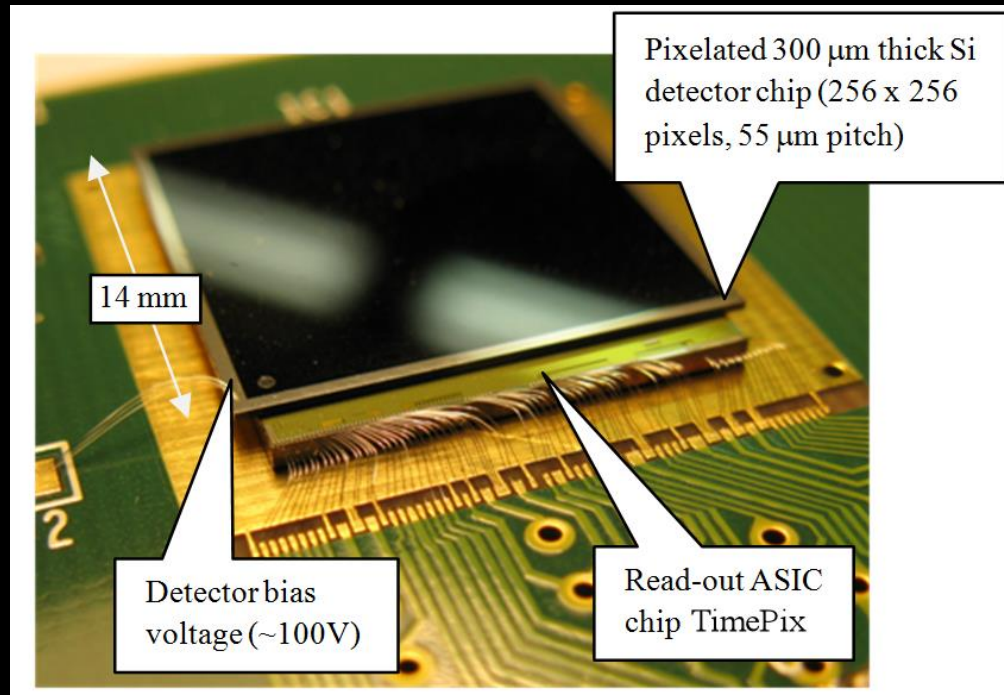
Photo: A. Mahmoud
Peter W. Higgs
Prize share: 1/2



Robert Brout
(1928 -- 2011)

Částicová kamera MX-10

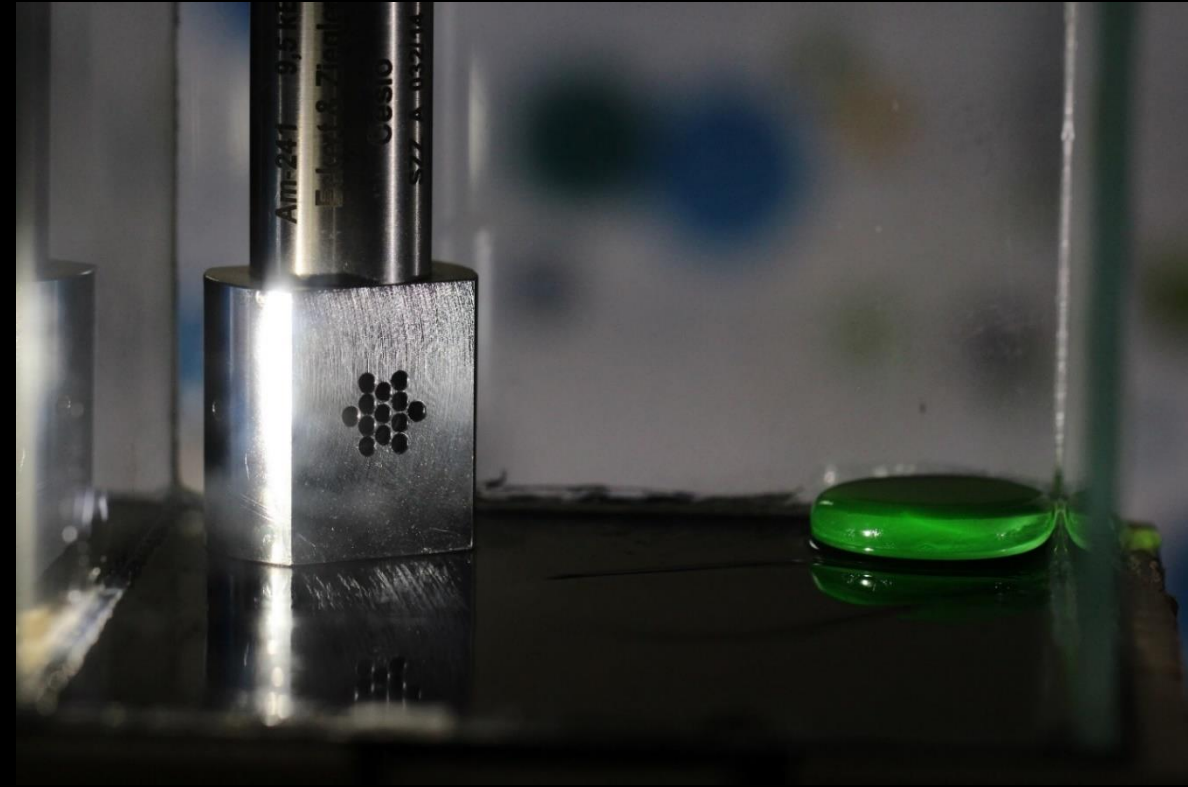
- Křemíkový čip 256 x 256 pixelů, 1,4 cm x 1,4 cm, tloušťky cca 0,3 mm.
- Digitální fotoaparát, který v reálném čase “vidí” stopy částic.
- Vyvinut v laboratoři CERN ve spolupráci s UTEF ČVUT.
- Edukační verzi prodává firma JABLOTRON.
- Profesionální verze létá i na ISS:)



Umělé zdroje záření

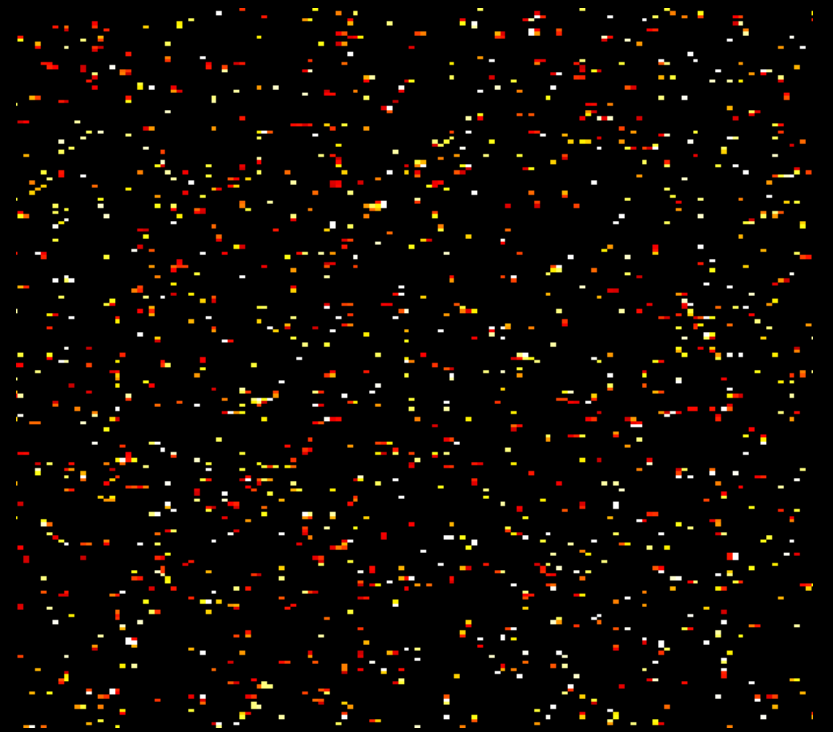
- Americium ^{241}Am , poločas rozpadu $T_{1/2} = 433$ let.
 - Školní zdroj alfa a gama záření.
 - Aktivita:
 - 10 tisíc rozpadů za sekundu (alfa verze).
 - 300 tisíc rozpadů za sekundu (gama verze).
- $^{241}\text{Am} \rightarrow ^{237}\text{Np} + ^4\text{alfa}$
- Extrahuje se z jaderných reaktorů.
- Používá se v detektorech kouře.

- Uranové sklíčko (příměs oxidu uraničitého).
 - ^{238}U : $T_{1/2} = 4,5$ mld. let
 - Zdroj alfa, beta, gama záření



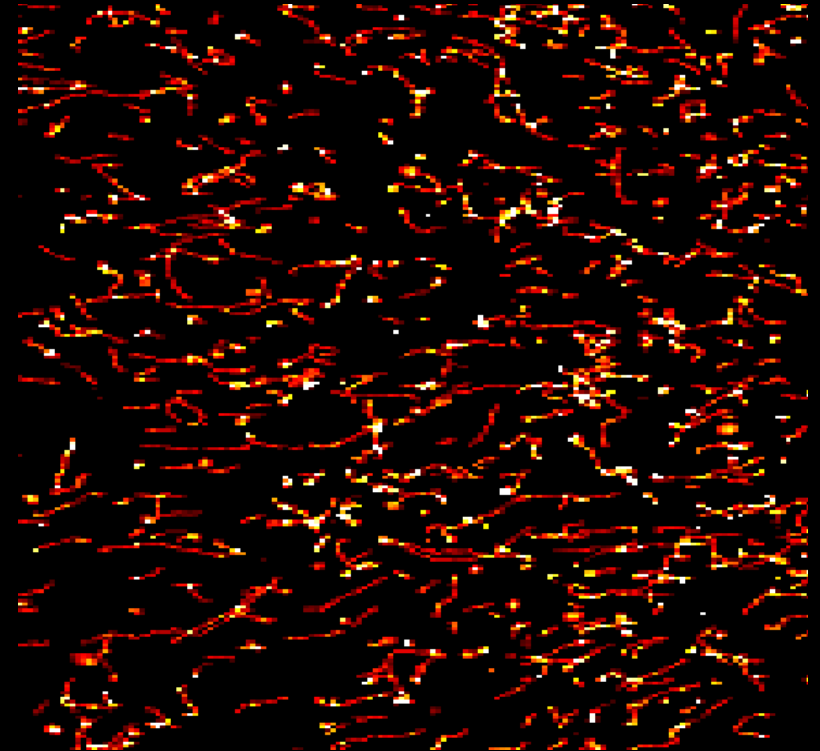
Gama

- **Záření gama:** velmi energetické fotony (rentgenové záření a tvrdší záření).
- Jde o doprovodné záření, které doprovází většinu beta a alfa rozpadů.
- Gama foton může být pohlcen v jednom pixelu.



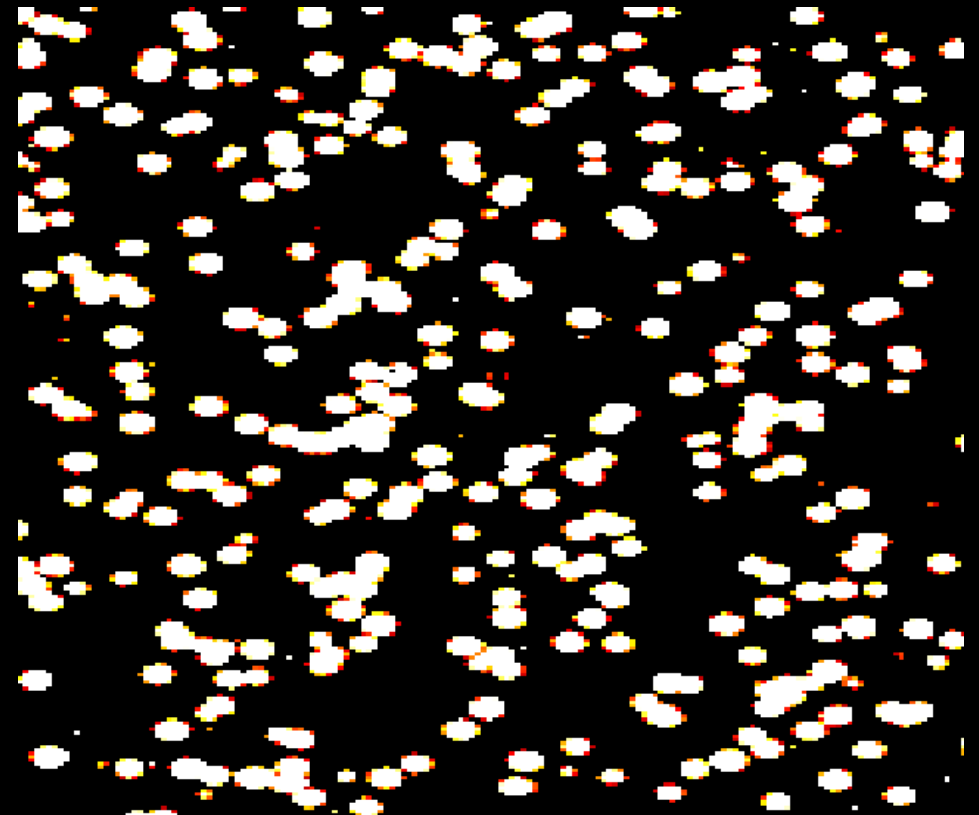
Beta

- **Záření beta:** elektrony, které vyletují z jádra po jeho přeměně v jiné jádro.
- Beta mínus: elektrony, z jader s přebytkem neutronů (uran).
- Beta plus: pozitrony, z jader s přebytkem protonů, většinou umělé izotopy (vyrábějí se např. v cyklotronech v nemocnicích pro výrobu radiofarmak pro zobrazovací metody typu PET, Positron Emission Tomography)
- Alchymisté by se divili: prvky se radioaktivní přeměnou mění na jiné zcela běžně, a to i v našich tělech!



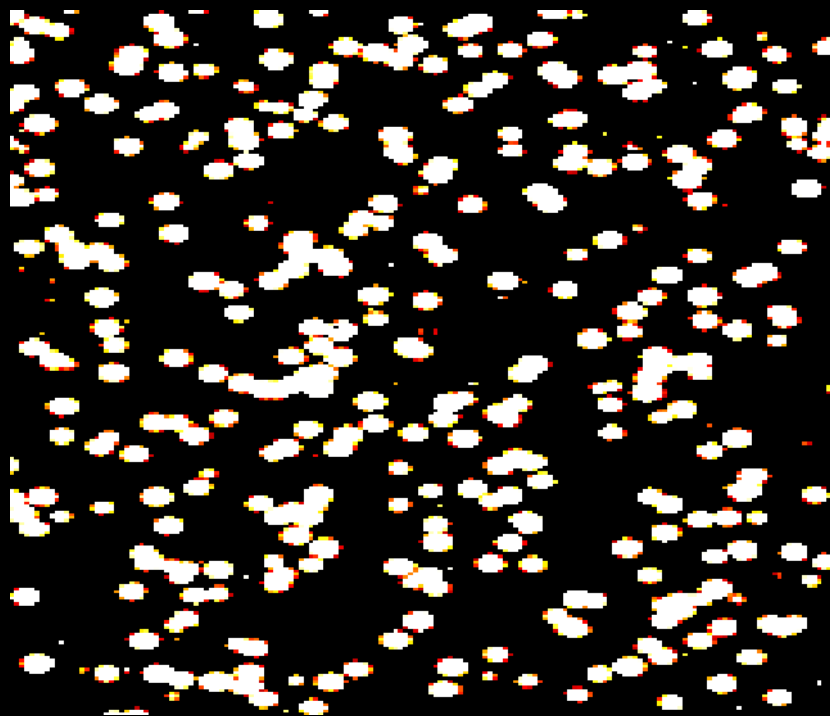
Alfa

- **Alfa částice:** jádra hélia, která vyletují z jiných těžkých jader, čímž vznikají stabilnější jádra.
- Alfa částice se v křemíku zastaví (i ve vzduchu uletí jen několik cm)
- Vyražené ionizované elektrony v křemíku se „rozlijí“ do sousedních pixelů a způsobí širokou kruhovou stopu.
- Alfa rozpadem se přeměňují velmi těžké prvky, např. 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.

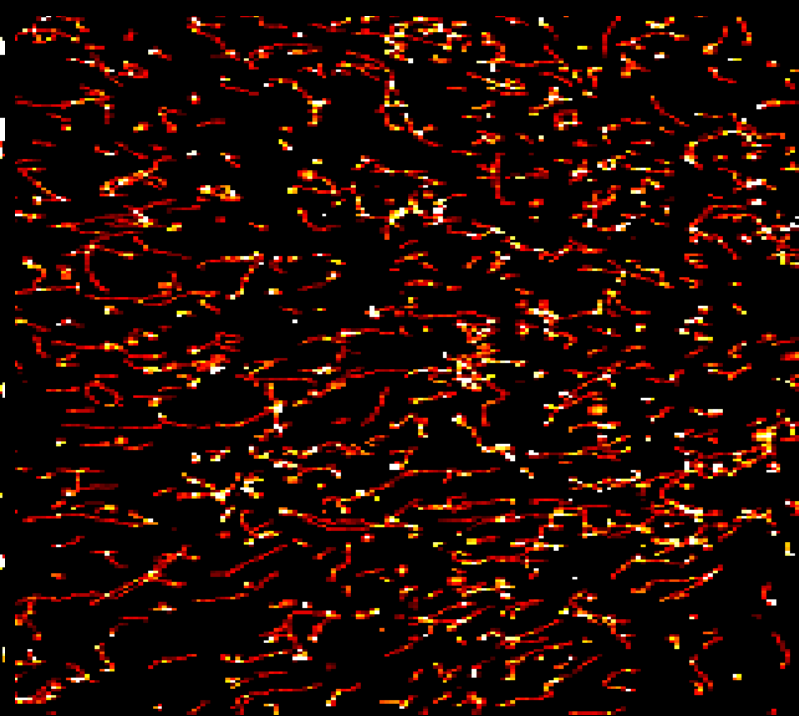


Jak částice vidí kamera MX-10

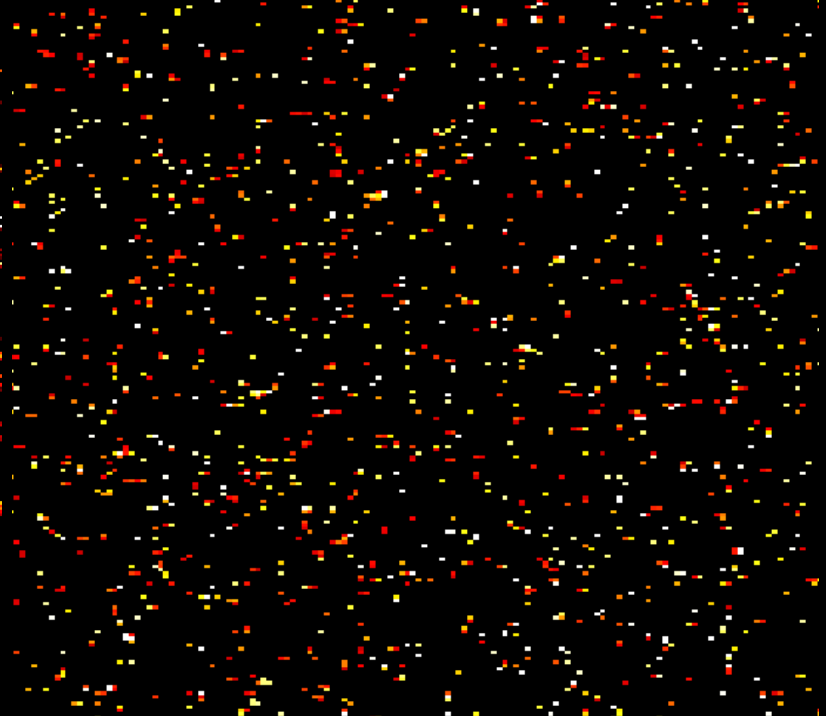
Alfa



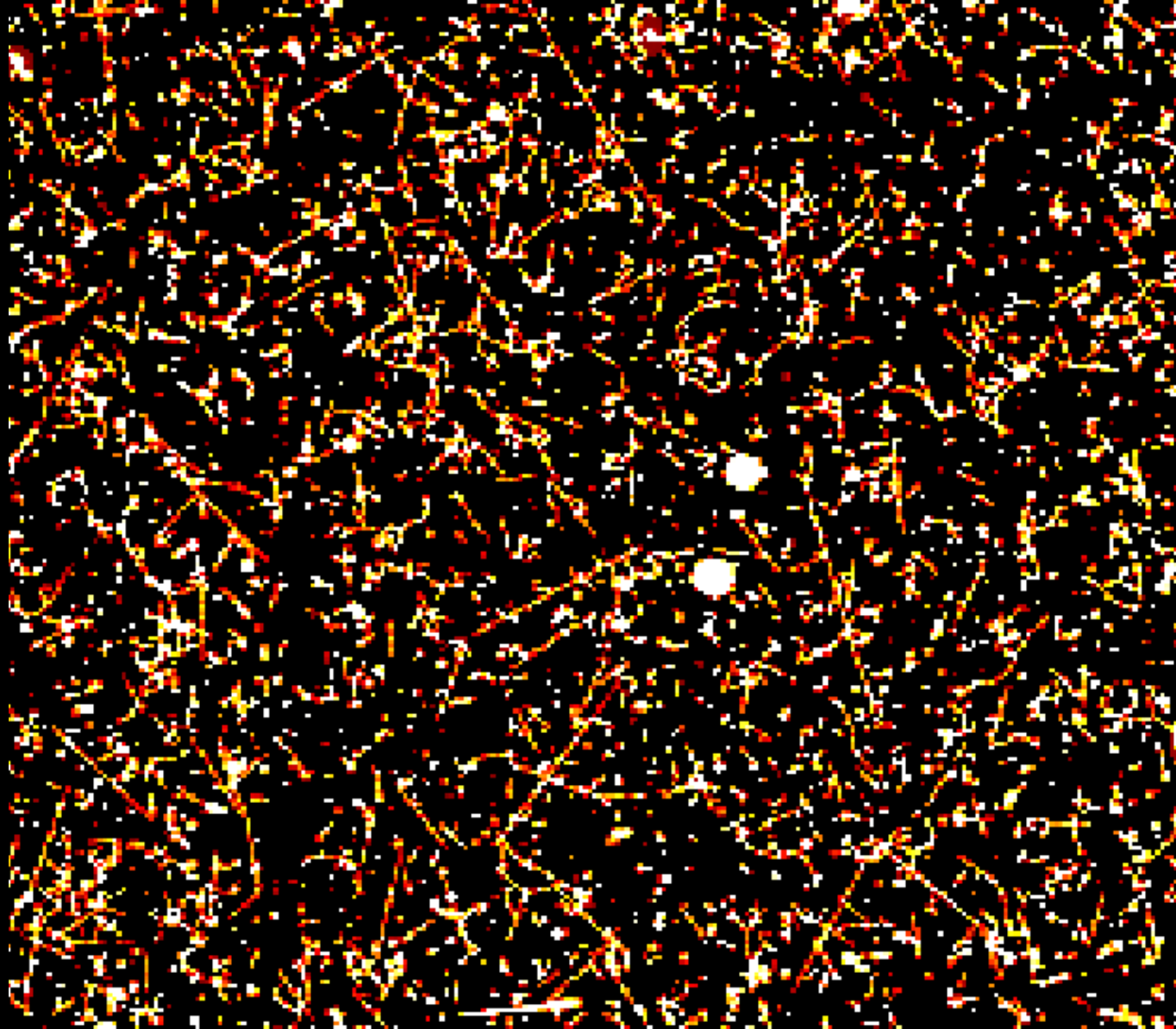
Beta



Gama

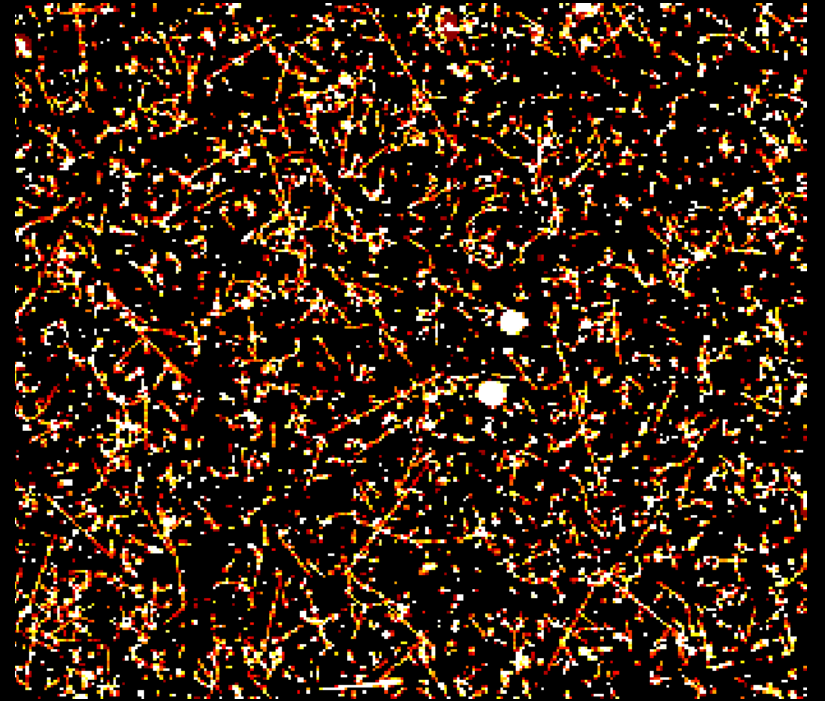


Radiační pozadí – „nic“ po 6 hodinách

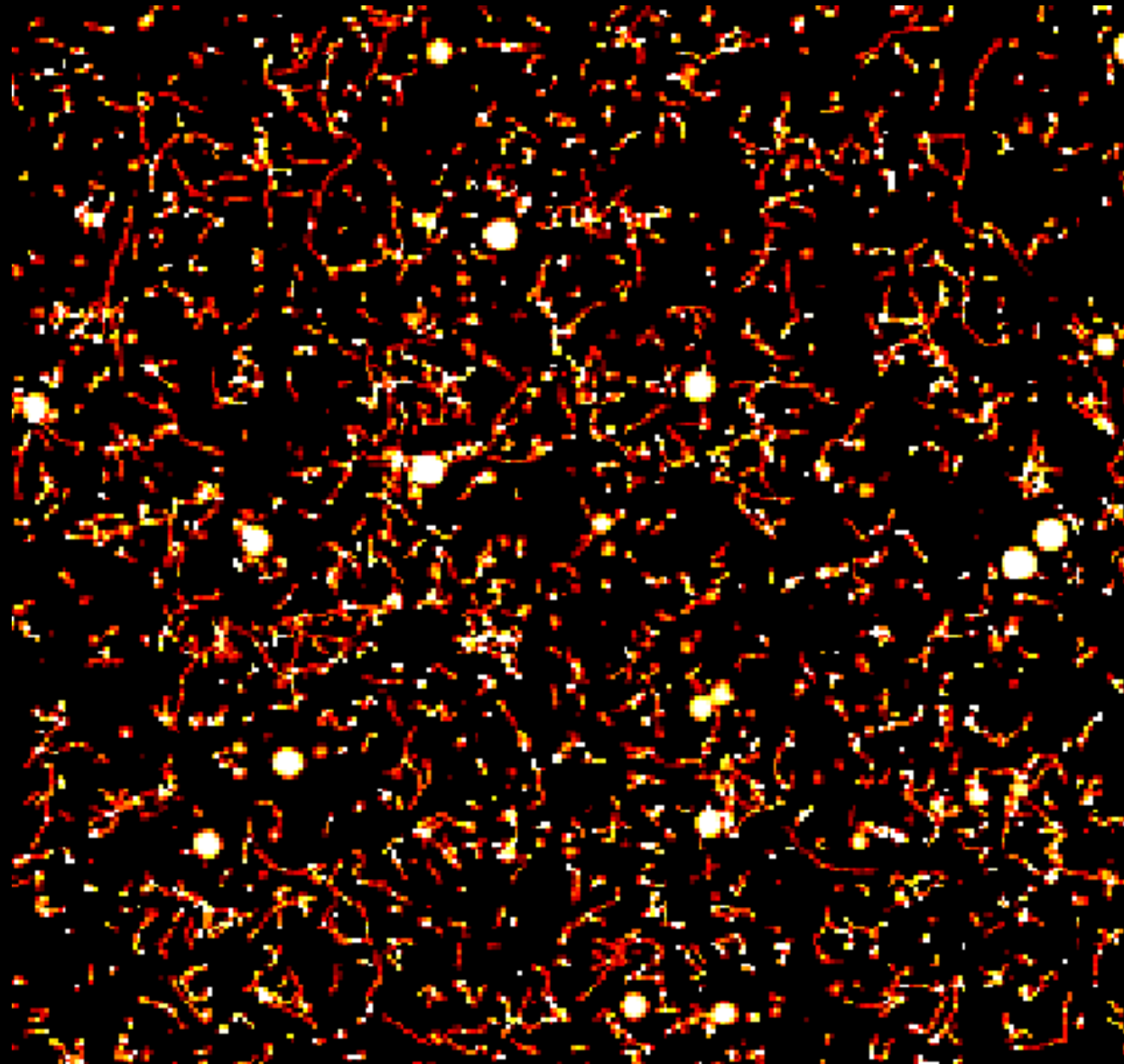


Radiační pozadí – „nic“ po 6 hodinách

- Alfa částice pocházejí z přírodního radonu a jeho produktů rozpadu (polonium).
- Roční dávka člověka je po zahrnutí zdrojů z jídla, rtg. vyšetření, vnitřních a pozemských a kosmických zdrojů okolo 2mSv.
 - Tj. 2 mili Sieverty za rok; 1 Sievert je 1 Joule /kg
 - Pracovníci s radiačními zdroji mají povoleno 50 mSv/rok.
- To odpovídá okolo 0,2 mikro Sv/hodinu.
- Mnohem více trpí plíce kuřáků, neboť v tabáku jsou obsaženy radioaktivní izotopy polonia a olova, původně z hnojiv.



Sklenička z uranového skla, 5 minut



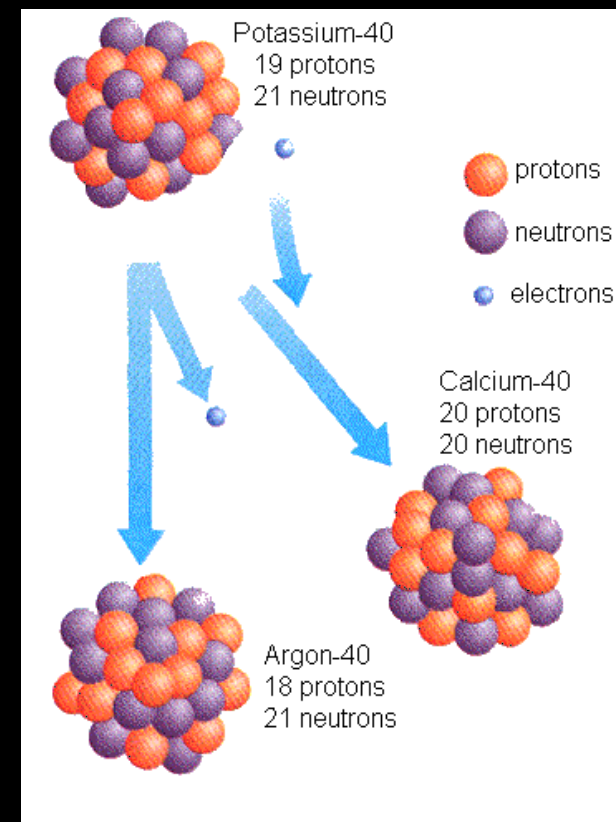
Aktivita lidského těla

- 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 (má hodně draslíku) jako jednotka radioaktivity:)

EATING 1 BANANA



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



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

Dopis Wolfganga Pauliho

original - Photocopy of PLC 0393

Abschrift/15.12.56 FM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.



Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Grossenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse.- Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

 protons
 neutrons
 electrons

Calcium-40
20 protons
20 neutrons

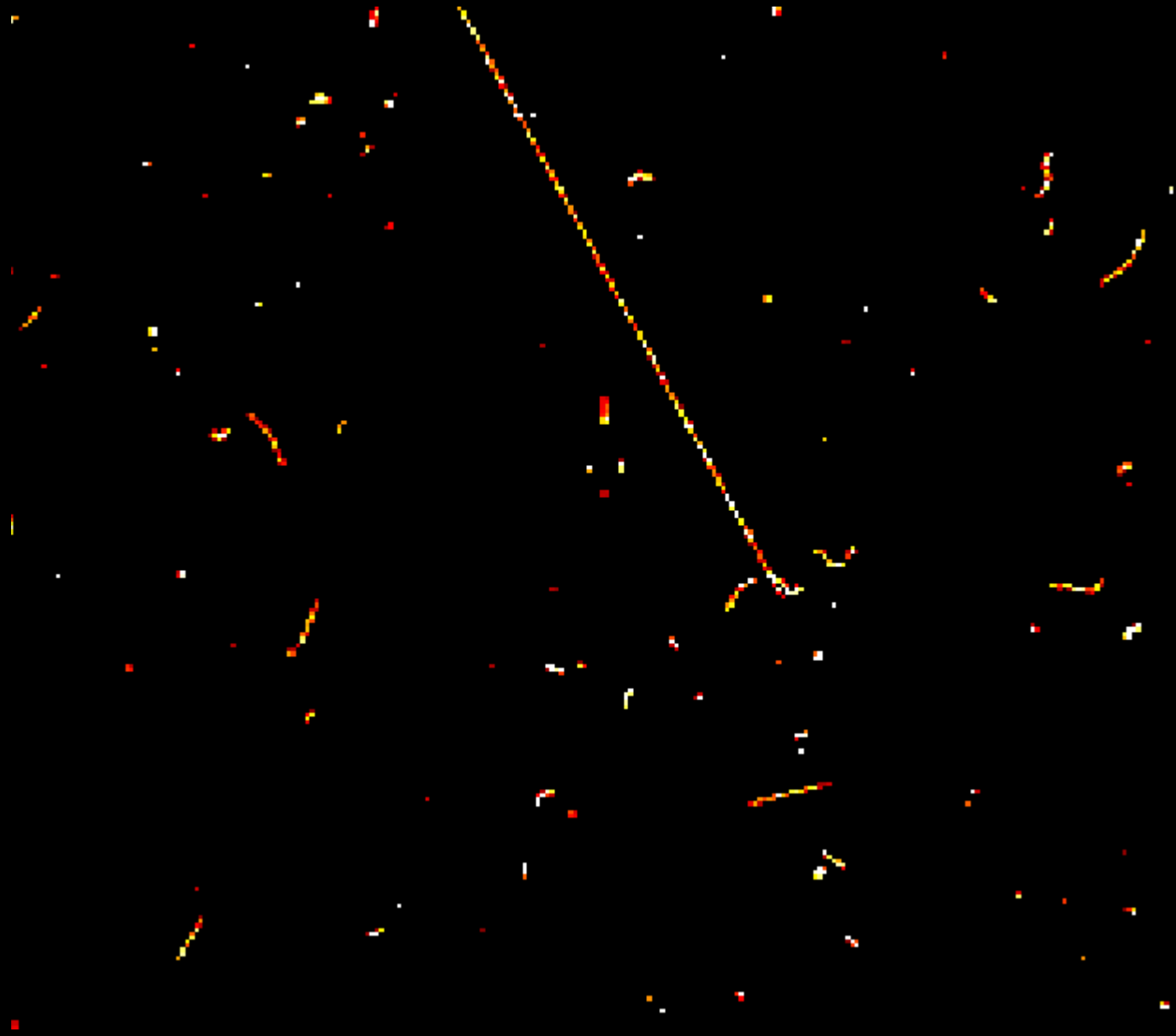


/Potassium-40

- Radioaktive
se rozpa
elektron
- Člověk h
draslíku,
- 4300 tč
- Banán (n
radioakt

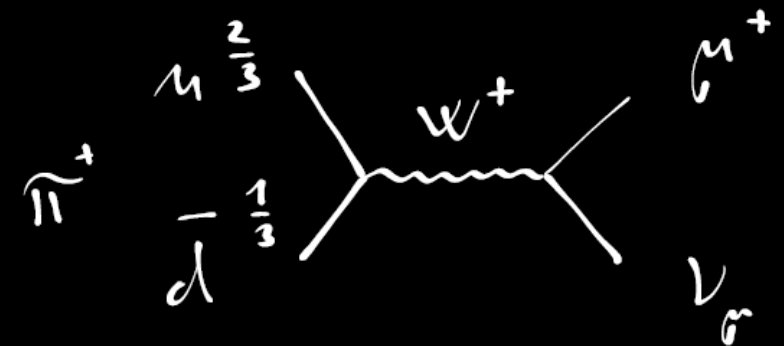
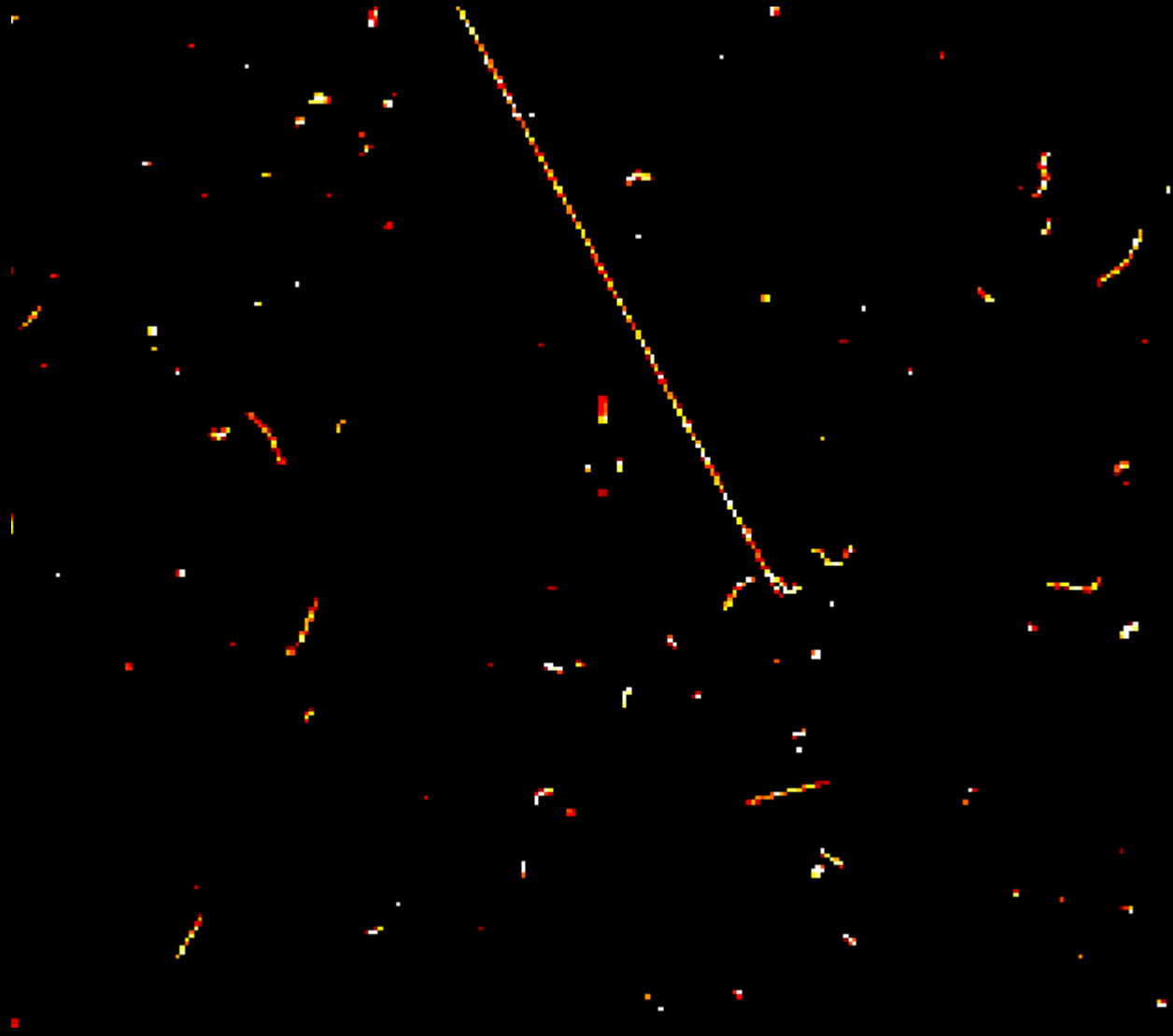
Jak částice vidí kamera MX-10

???



Jak částice vidí kamera MX-10

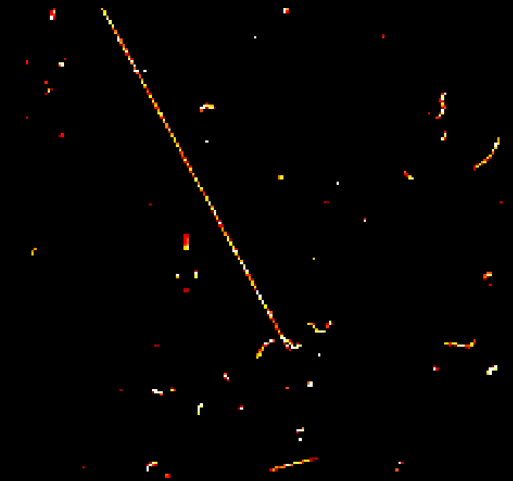
Jde o částici z kosmického záření zvanou mion



Miony

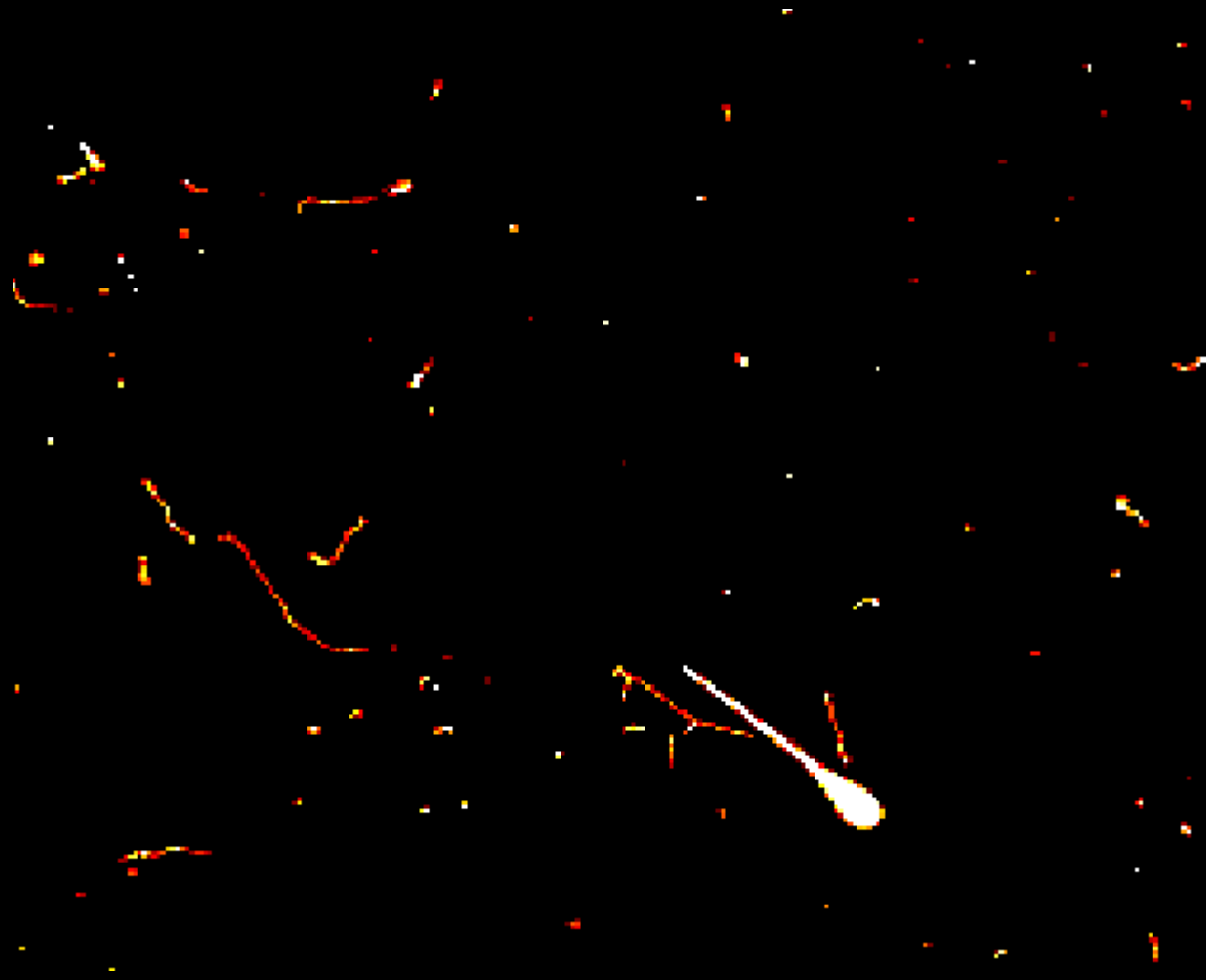
- Miony jsou podobné elektronům, jen jsou asi 200x těžší a rozpadají se na elektron a neutrino.
- Vznikají ve výškách kolem 20 km ve srážkách primárního kosmického záření s atmosférou.
- Doba života mionu je asi 2 mikrosekundy.
- Za tu dobu by i rychlostí světla uletěly jen 600m...
- Přesto je pozorujeme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

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



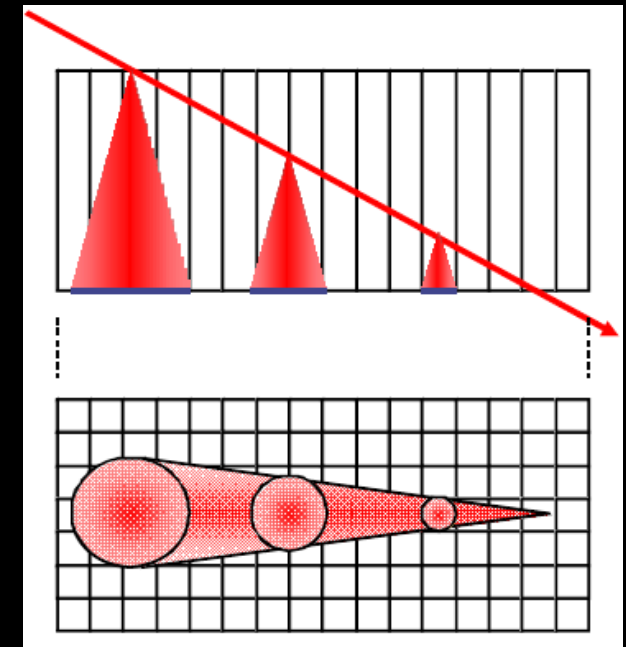
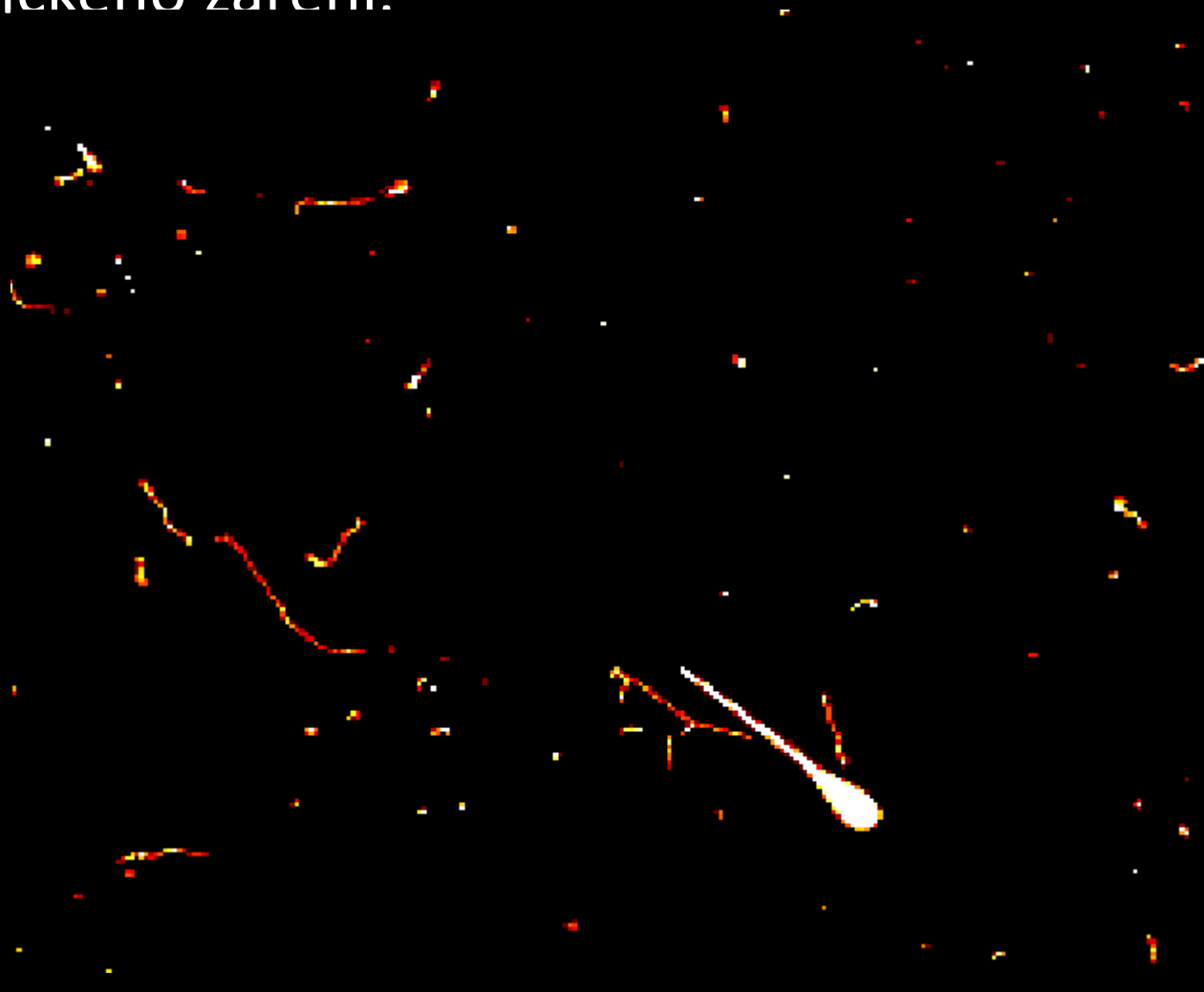
Jak částice vidí kamera MX-10

???



Jak částice vidí kamera MX-10

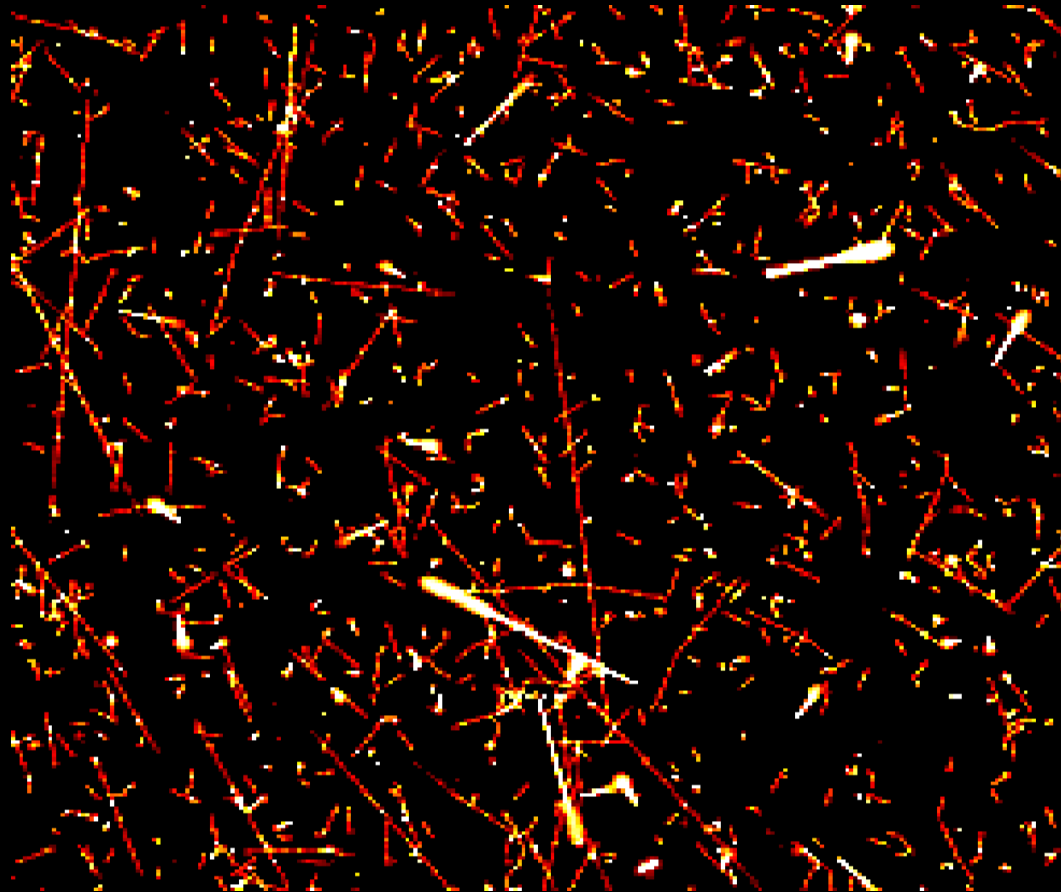
Vzácnější stopa silně energetické a ionizující částice, snad protonu, z kosmického záření.



V letadle

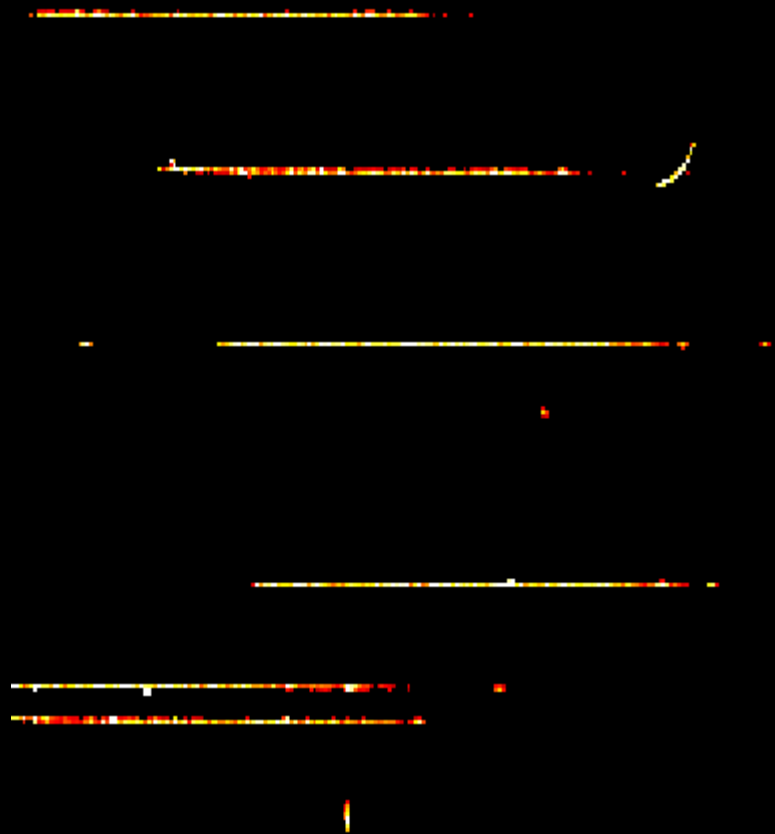
Miony a i silně ionizující částice.

Nicméně let přes Atlantik se u člověka rovná rentgenu plic.

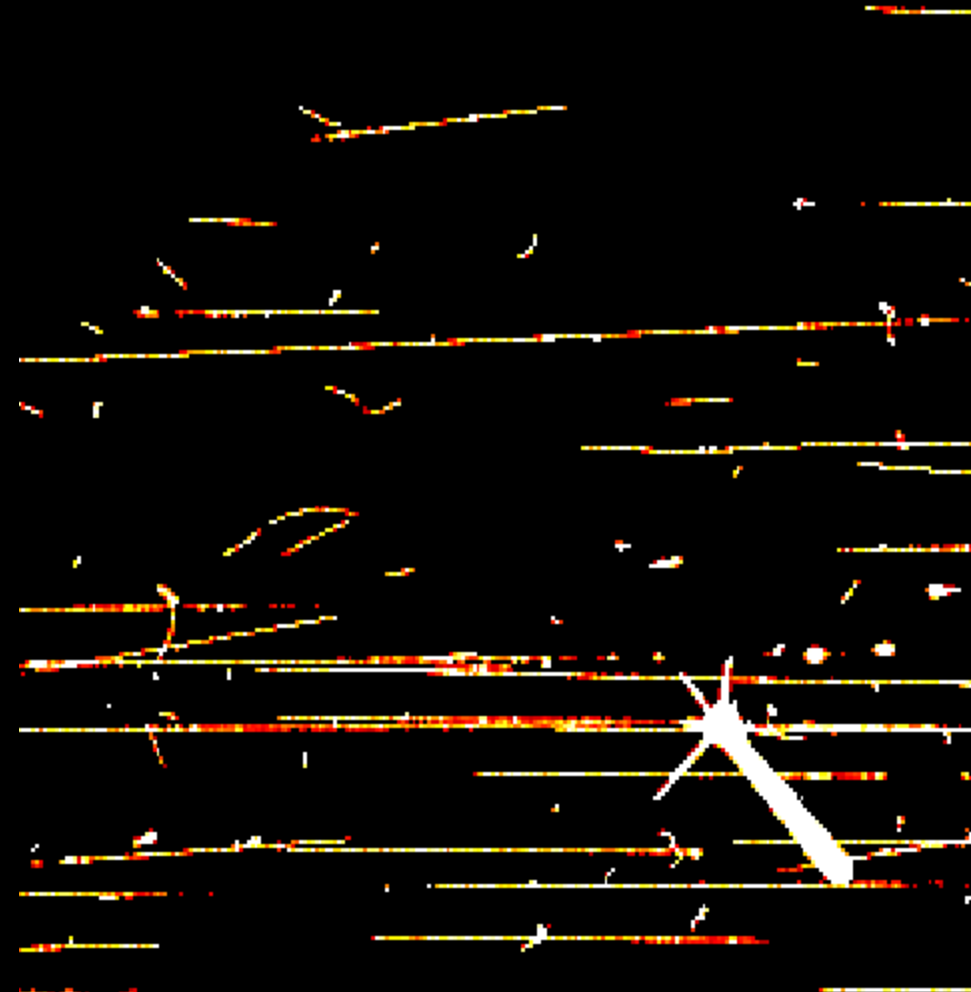


Ve svazku částic na urychlovači SPS v CERN

Miony

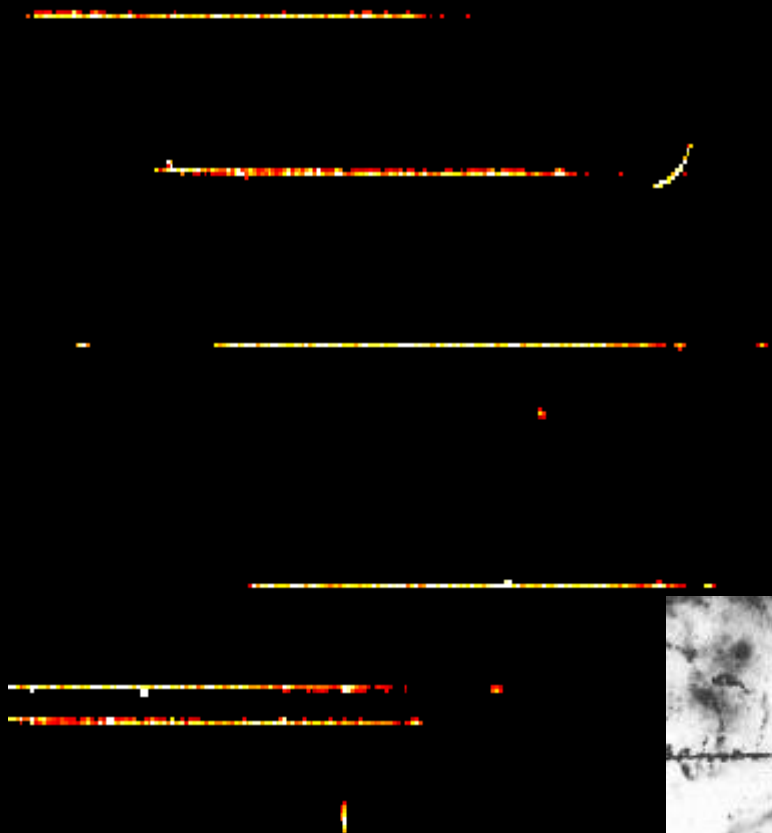


Piony



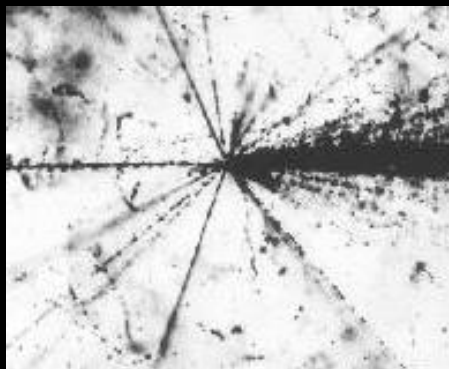
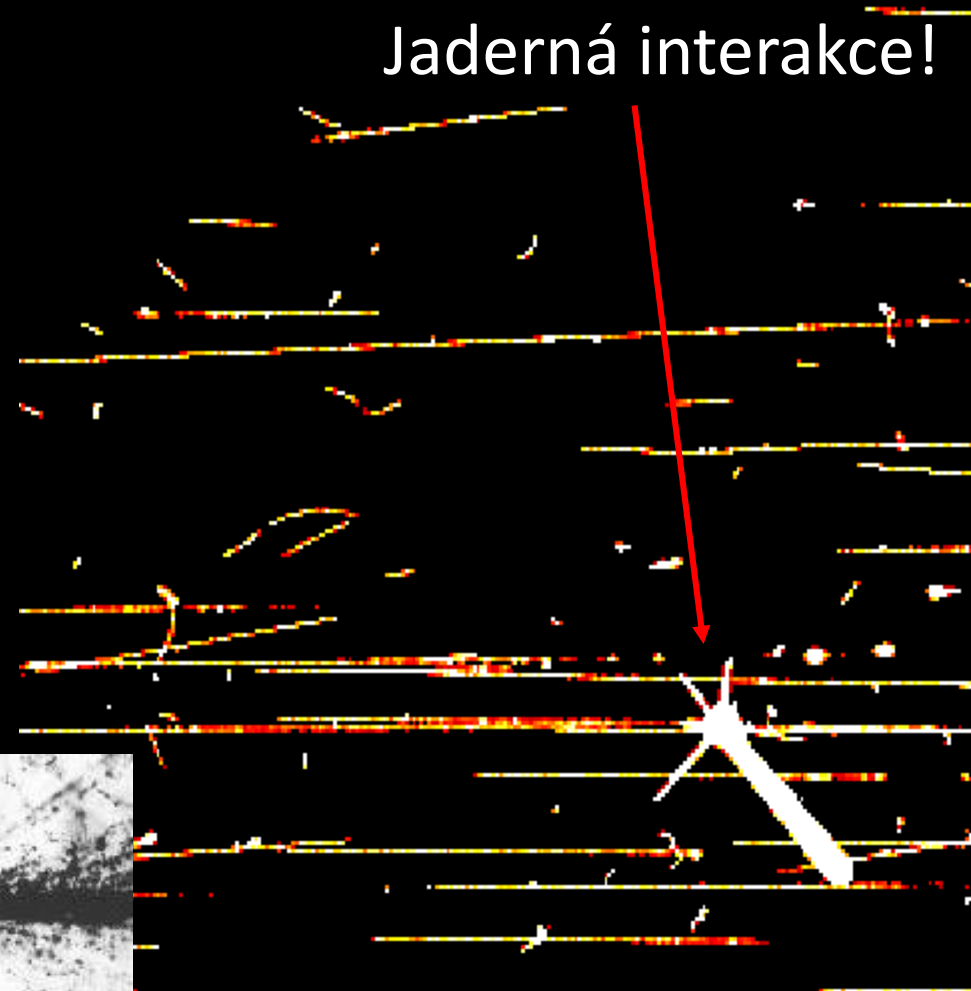
Ve svazku částic na urychlovači SPS v CERN

Miony



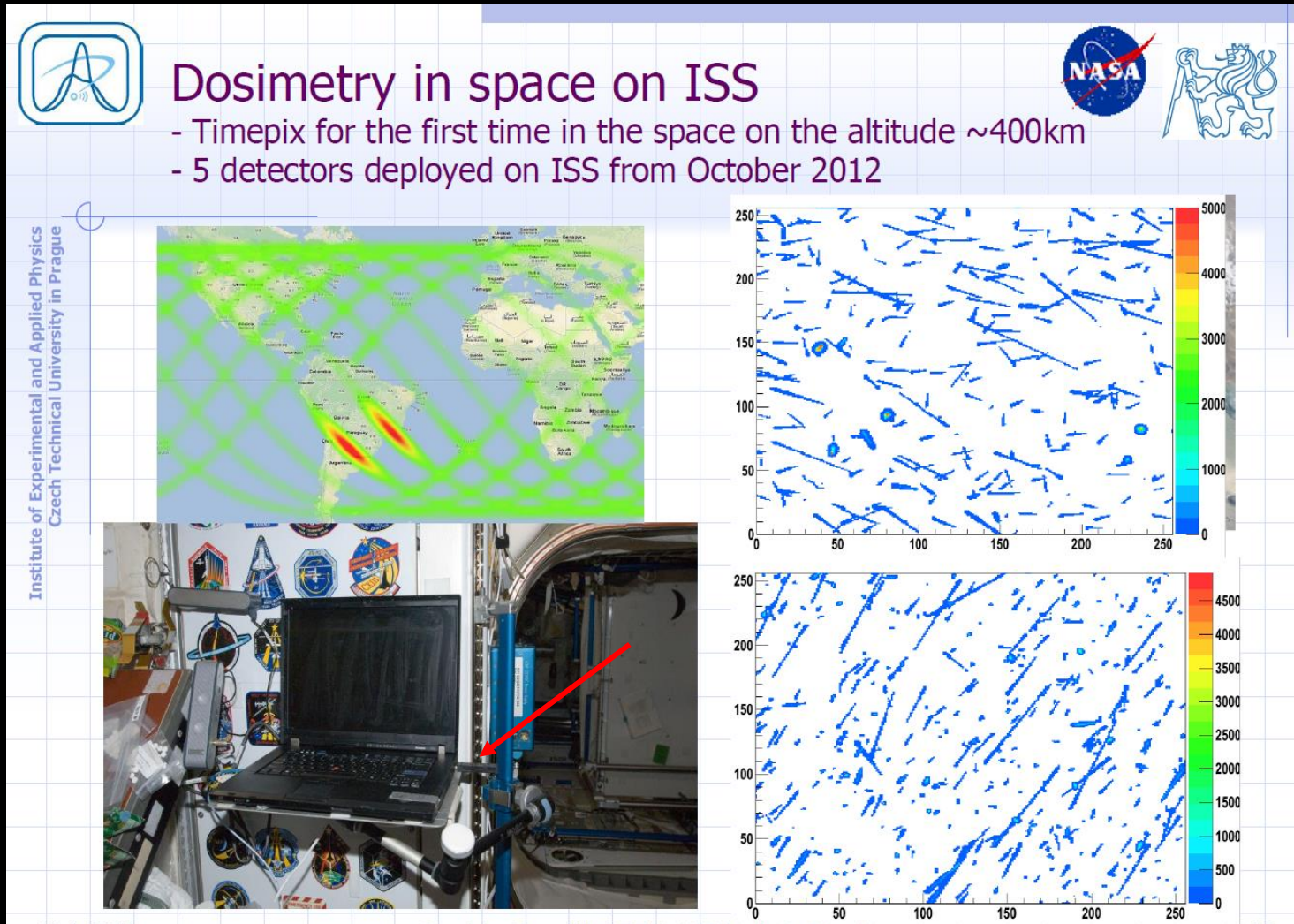
Piony

Jaderná interakce!



Mezinárodní kosmická stanice

- ISS, 400km, Kredit: NASA, Ing. Stanislav Pospíšil, DrSc., UTEF, ČVUT.



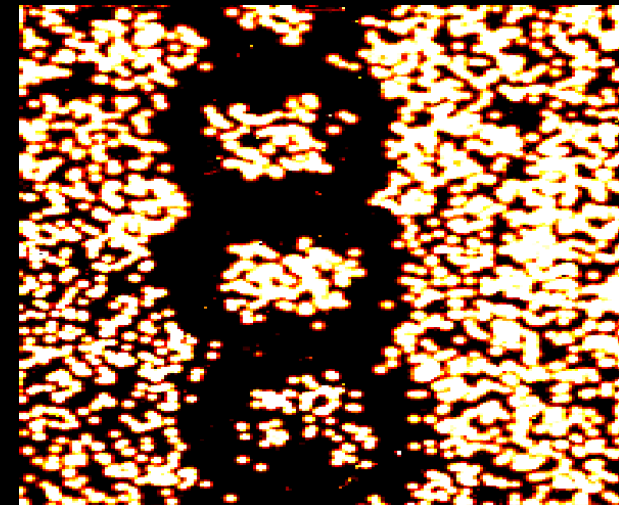
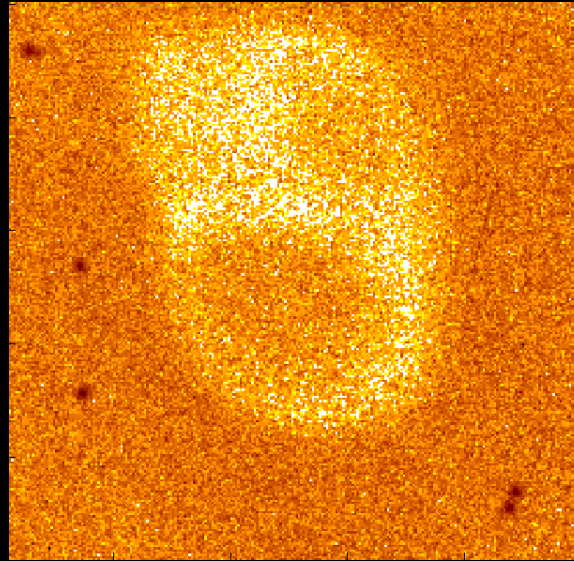
Vesmír

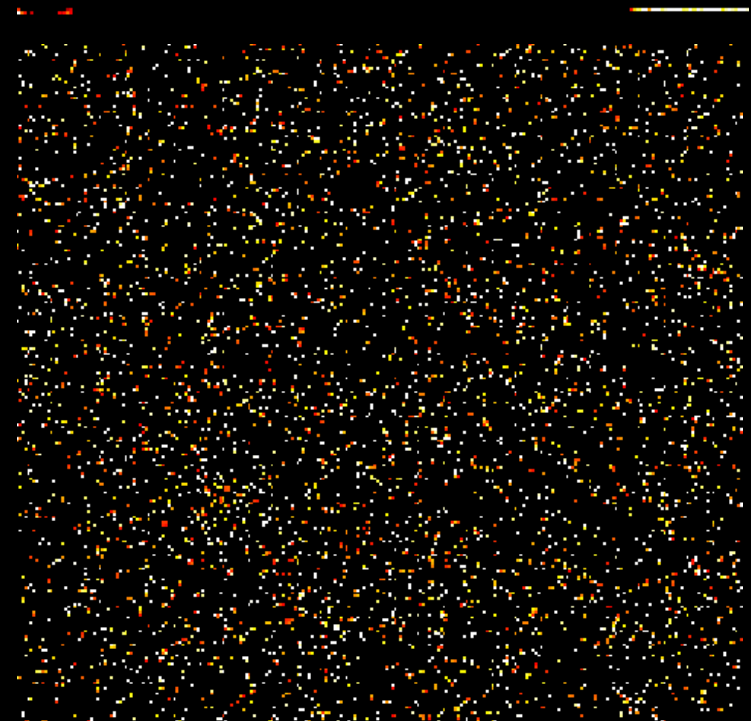
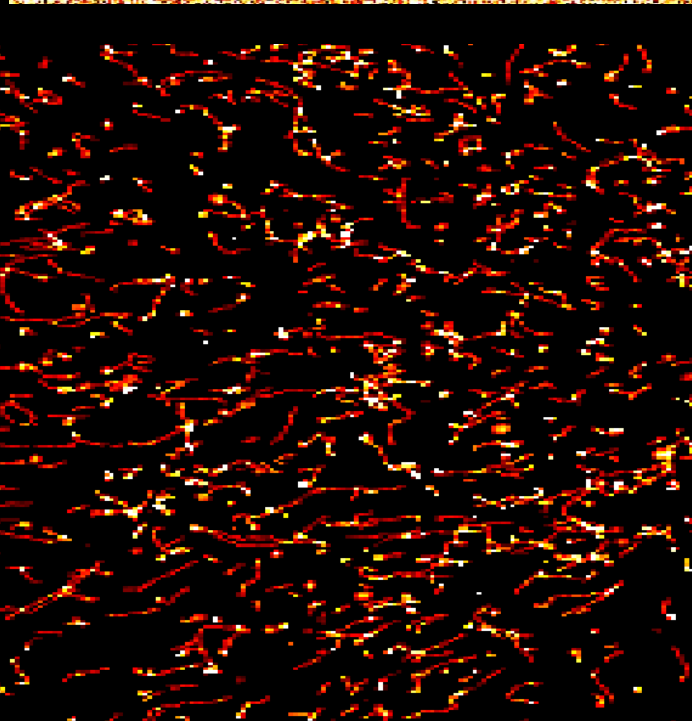
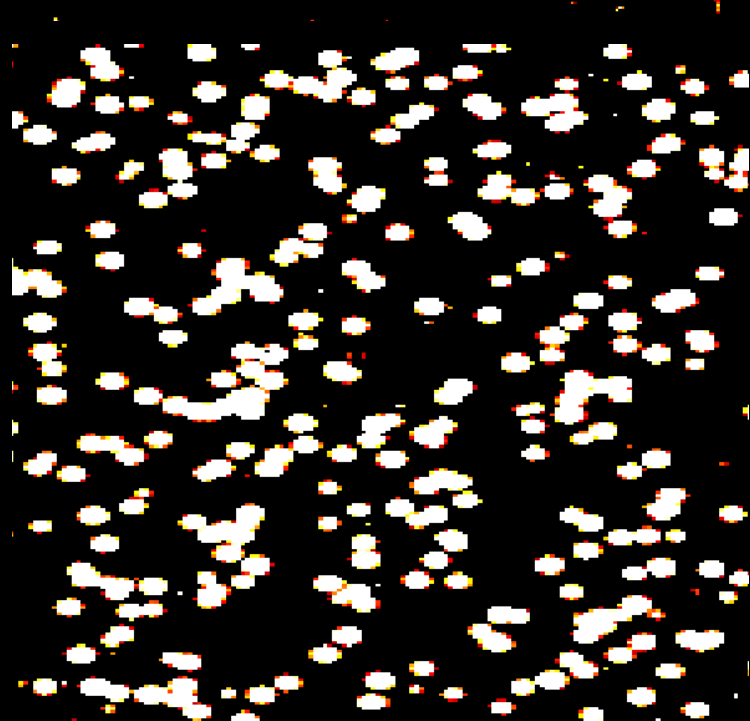
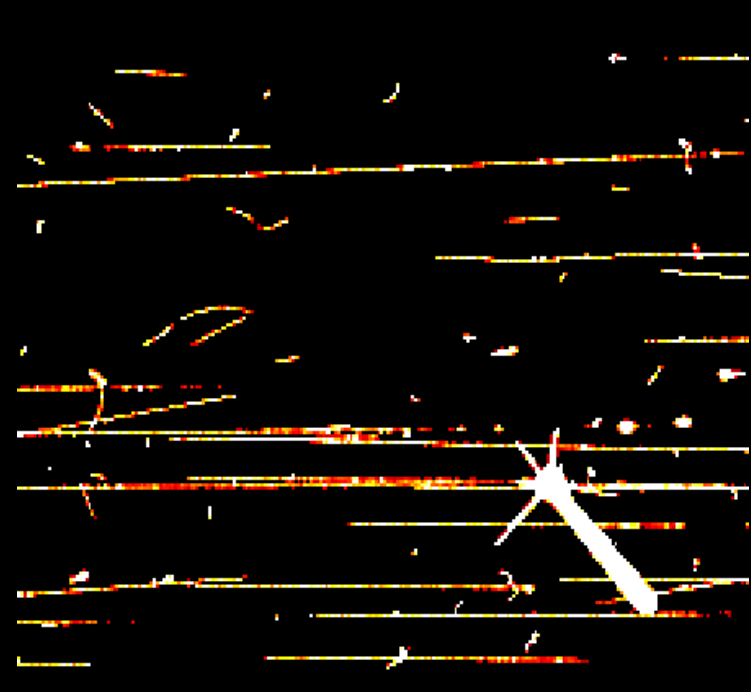
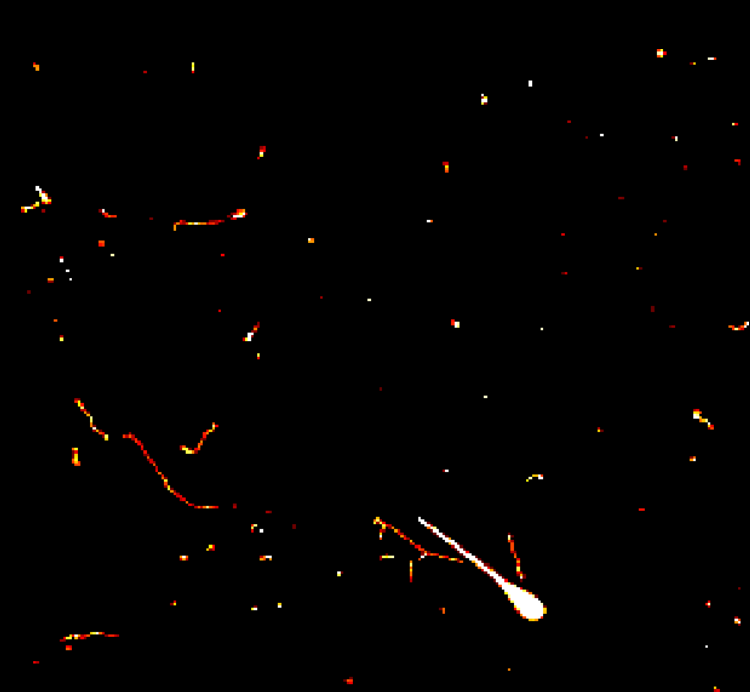
- Sonda Proba-V, 800km, Kredit: ESA, Ing. Stanislav Pospíšil, DrSc., UTEF, ČVUT.



Princip rentgenu, defektoskopie

Průchod záření různou
tloušťkou různých materiálů:
ulita, šroubek, lastura, řetízek.





What has CERN/basic research ever done for us?



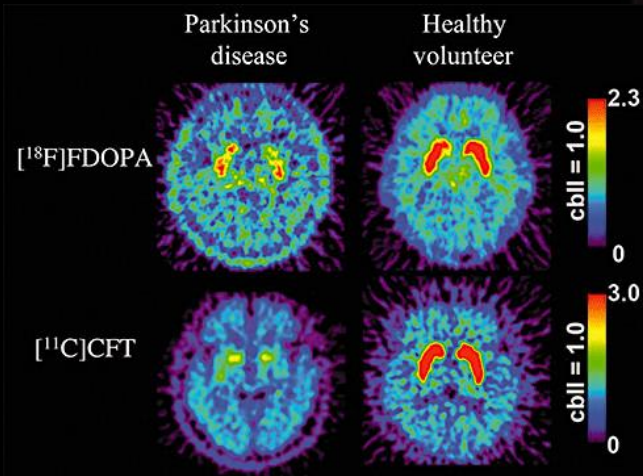
Touch screen



WWW



Monty Python's Life of Brian



Positron Emission Tomography



Hadron therapy

