



Přírodovědecká
fakulta

Univerzita Palackého
v Olomouci



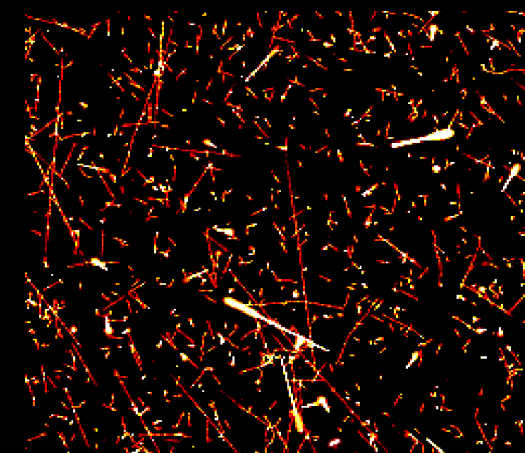
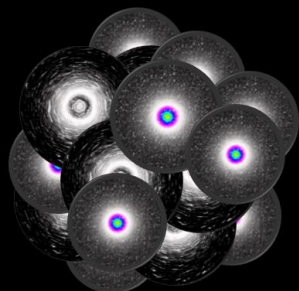
Institute of Physics of the
Czech Academy of Sciences

Ionizující záření a Částicová kamera

Jiří Kvita, jiri.kvita@upol.cz

Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR

PřF UP, Olomouc



Earth and Moon, 2025



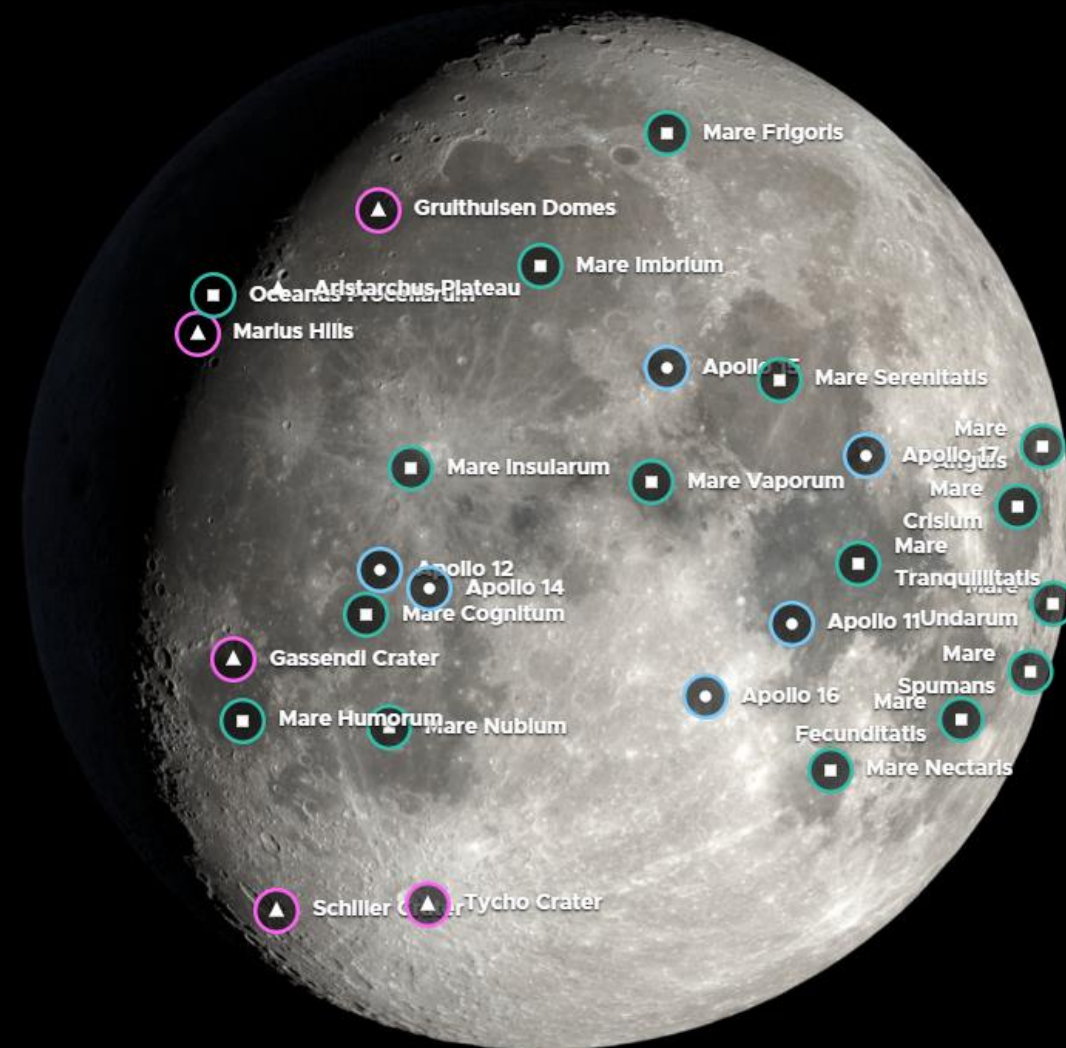
Earth and Moon, 2025



Earth and Moon, 2025

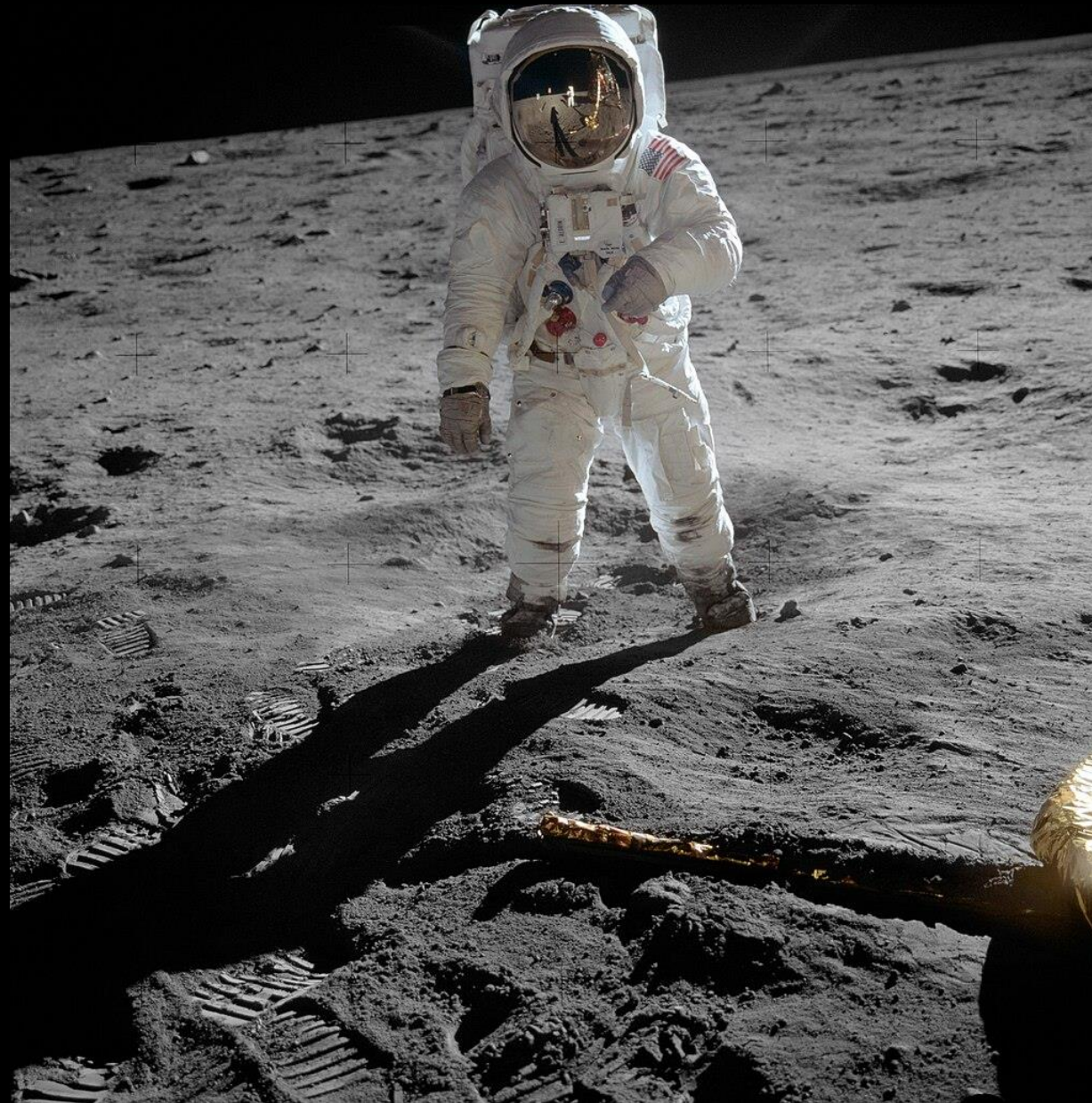


Earth and Moon



<https://moon.nasa.gov/observe-the-moon-night/resources/moon-map/>

Space: on the Moon, 1969



https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_11#/media/File:Aldrin_Apollo_11_original.jpg

Over the Moon 2025



[https://www.facebook.com/
fireflyspace/videos/2043876
426081325/](https://www.facebook.com/fireflyspace/videos/2043876426081325/)

Blue Ghost by Firefly

Space weather (polární záře, Libavá, 2024)

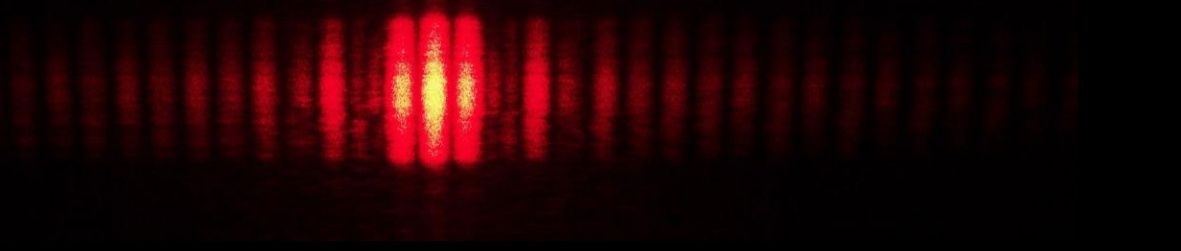


<https://flic.kr/s/aHBqjBpRT7>

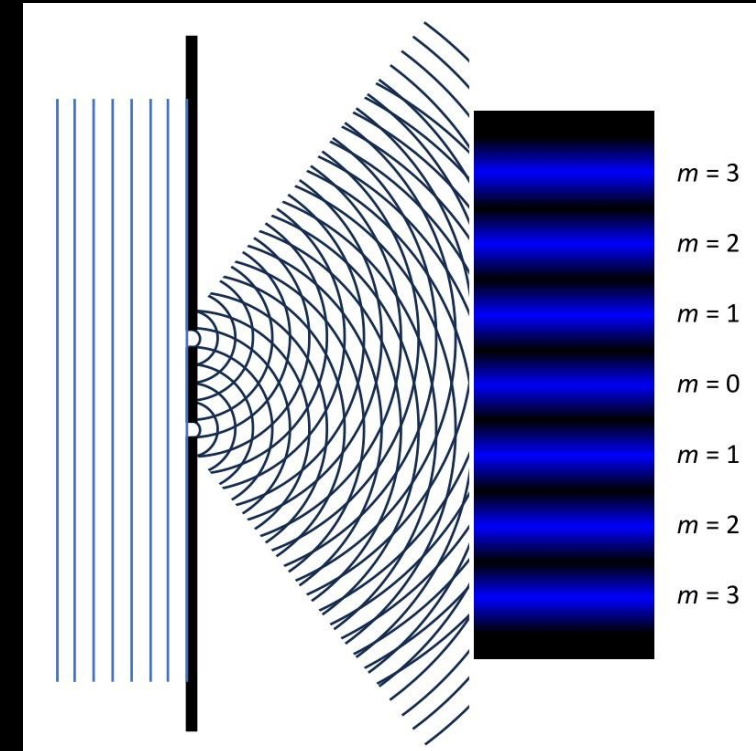
Částice a ionizující záření

Částice nejsou kuličky!

- Objekty mikrosvěta
 - Náhodnost měření
 - Pravděpodobnostní předpovědi
- Kvantová mechanika
 - Kvantování možných hodnot fyzikálních veličin (energie, moment hybnosti...)
 - Dualizmus: částice i vlna
 - Neurčitost v rozptylu, Heisenbergovy relace neurčitosti



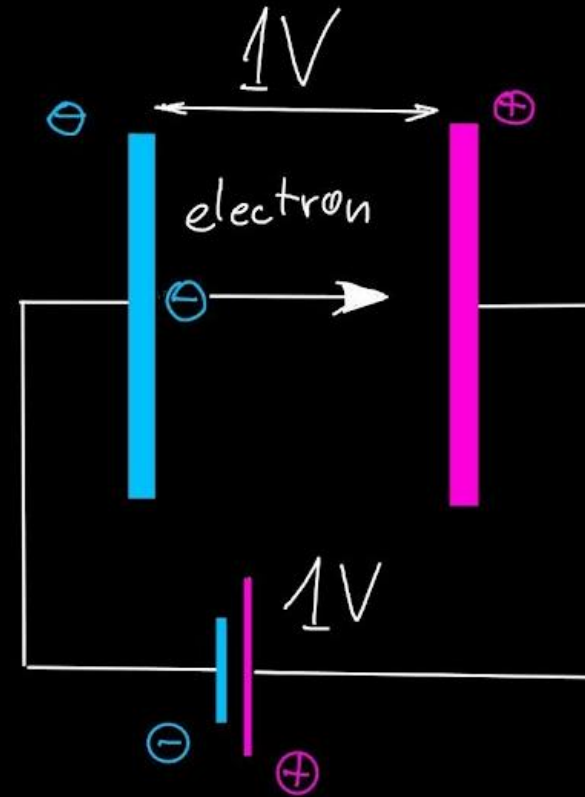
<https://www.popularmechanics.com/science/a23710/double-slit-theory-everything/>



https://lipa.physics.oregonstate.edu/sec_two-slit-interference.html

Jednotky energie

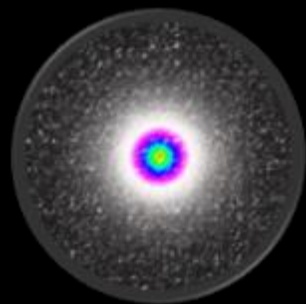
- 1 elektronvolt = 1.602×10^{-19} Joulů
- Hmotnosti částic lze vyjádřit pomocí:
- Klidová energie: $E = mc^2$



$$\begin{aligned} E_e &= U \cdot Q = 1V \cdot 1e \\ &= \underline{1eV} = \underline{1,602 \cdot 10^{-19} J} \end{aligned}$$

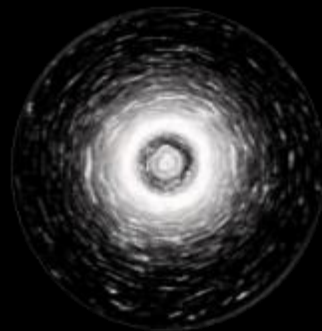
Částice

Proton



$$m_p c^2 = 938.3 \text{ MeV}$$

Neutron



$$m_n c^2 = 937.6 \text{ MeV}$$

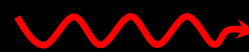
$$m_n c^2 - m_p c^2 = 1.3 \text{ MeV} > m_e c^2$$

Elektron



$$m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

Foton



$$m_\gamma c^2 = 0$$

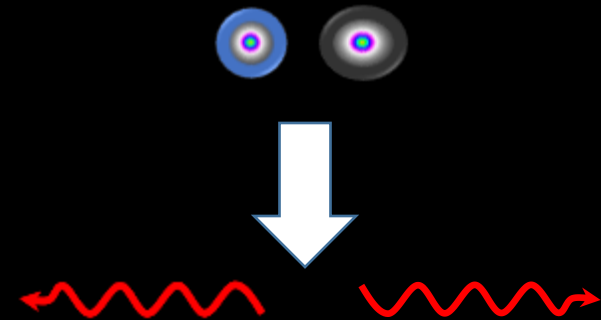
Elektronové
antineutrino



$$m_\nu c^2 < 1 \text{ eV}$$

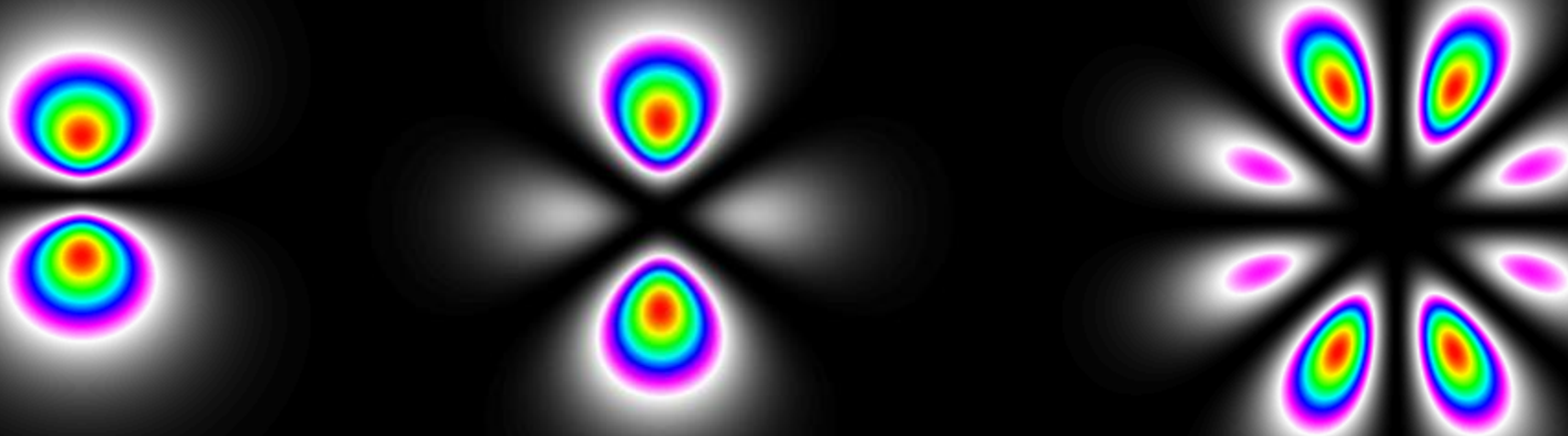
Jednotky energie

- 1 elektronvolt = 1.602×10^{-19} Joulů
- Antihmota
- $E = mc^2$
- Anihilace elektronu s pozitronem
 - Energie každého z fotonů je 0,511 MeV!



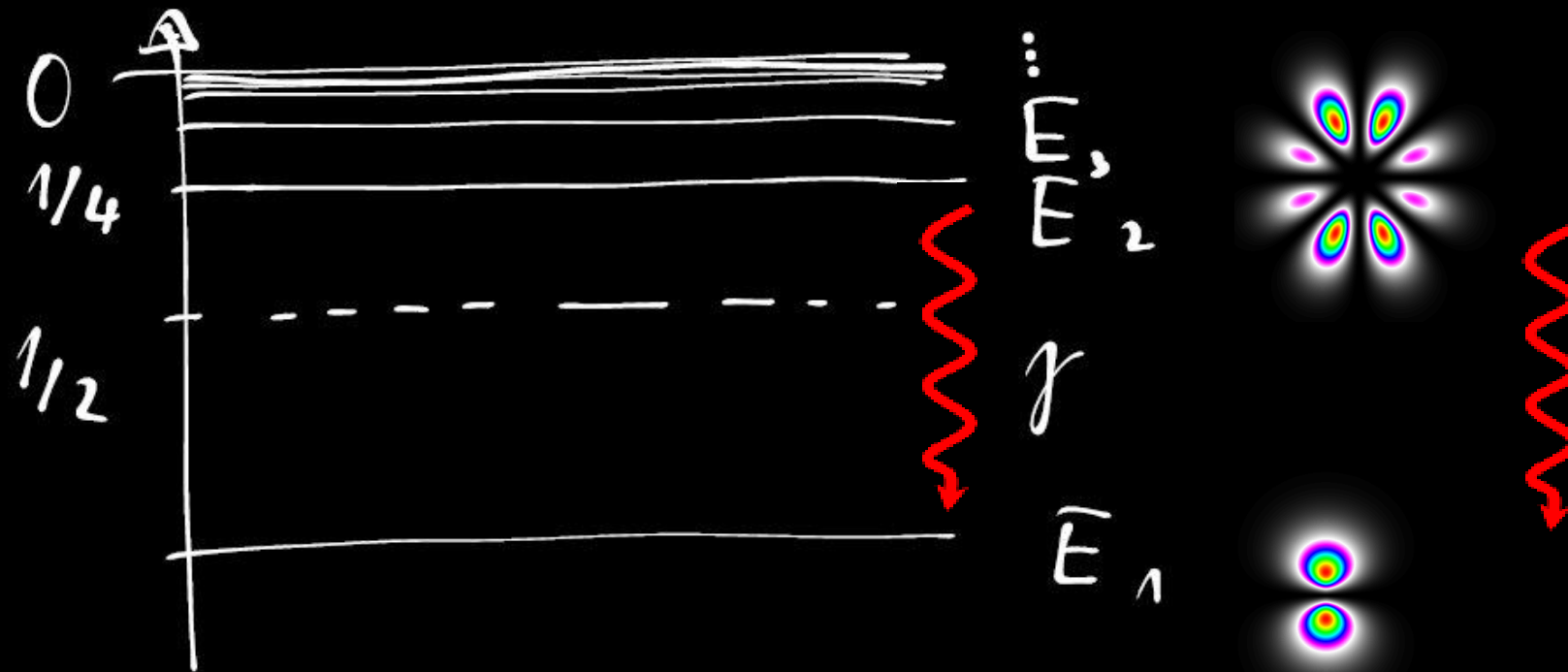
Atom vodíku – stojaté vlny elektronů kolem jádra

Vizualizace -- model podle kvantové mechaniky



- Energie přechodů mezi hladinami: řádově 10 – 100 eV

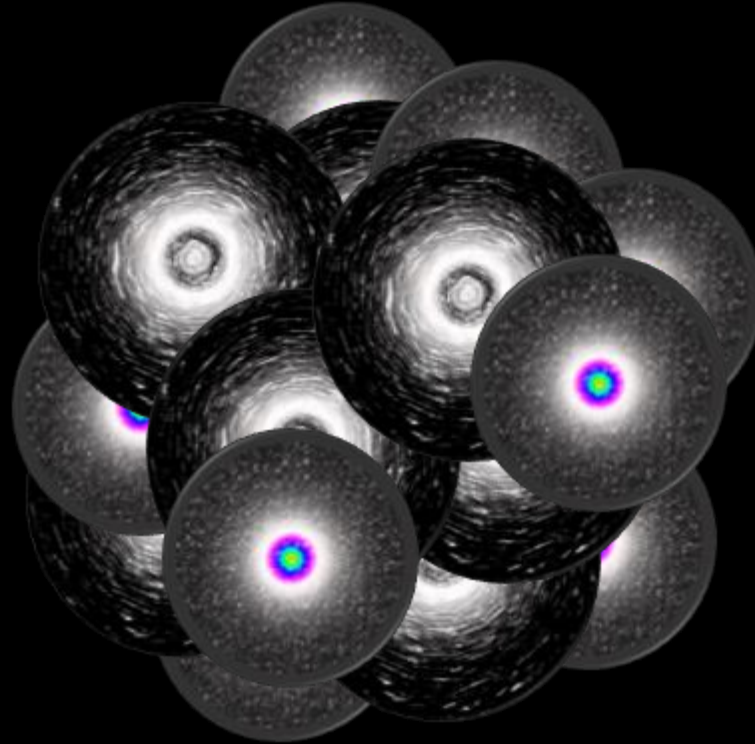
Atom vodíku – stojaté vlny elektronů kolem jádra



$$E_n = - \frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

- Energie přechodů mezi hladinami: řádově 10 – 100 eV

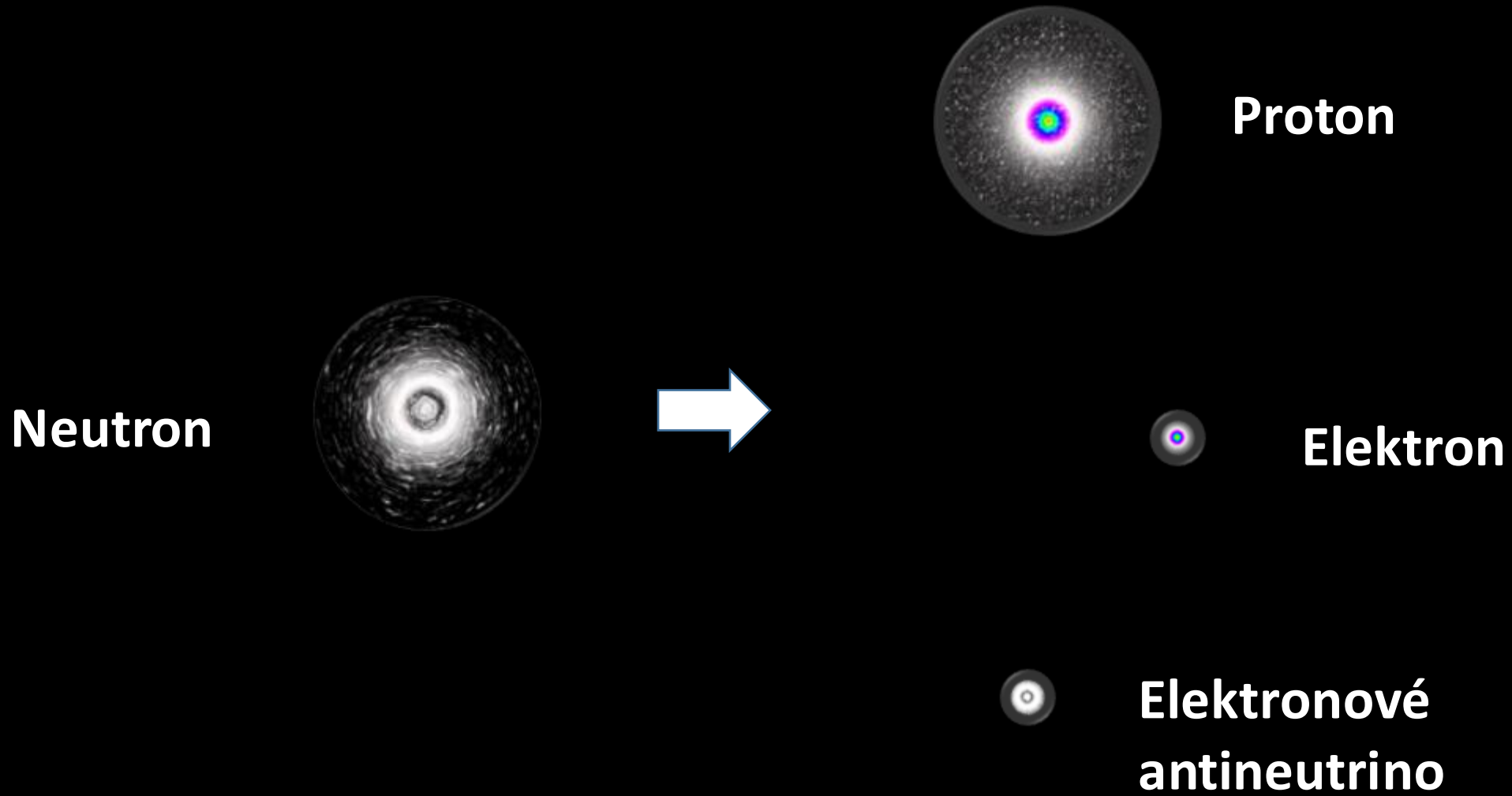
Jádro – protony a neutrony



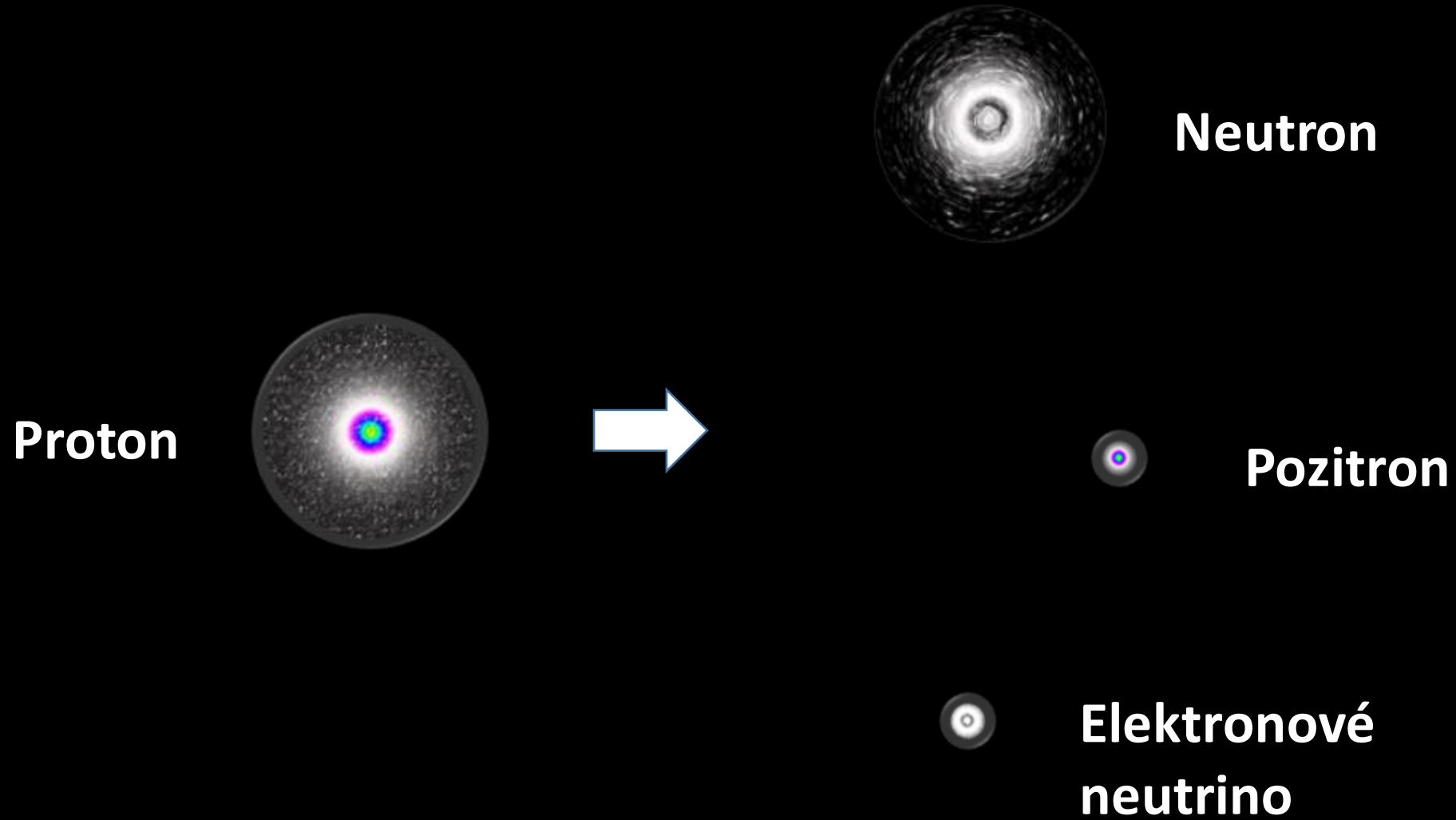
- Jádro je vázaný stav neutronů a protonů.
- Panuje zde silná, jaderná, interakce, která má jen krátký dosah.
- Proto je jádro vázáno do malého objemu (stotisíckrát menší než atom).
- Typické energie 1 – 10 MeV!

10^{-14} m

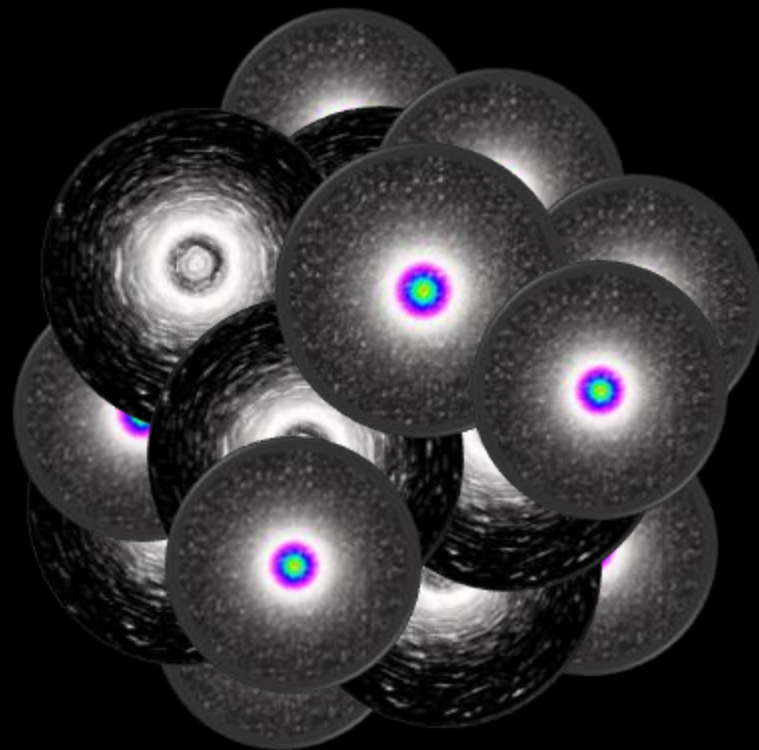
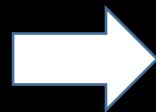
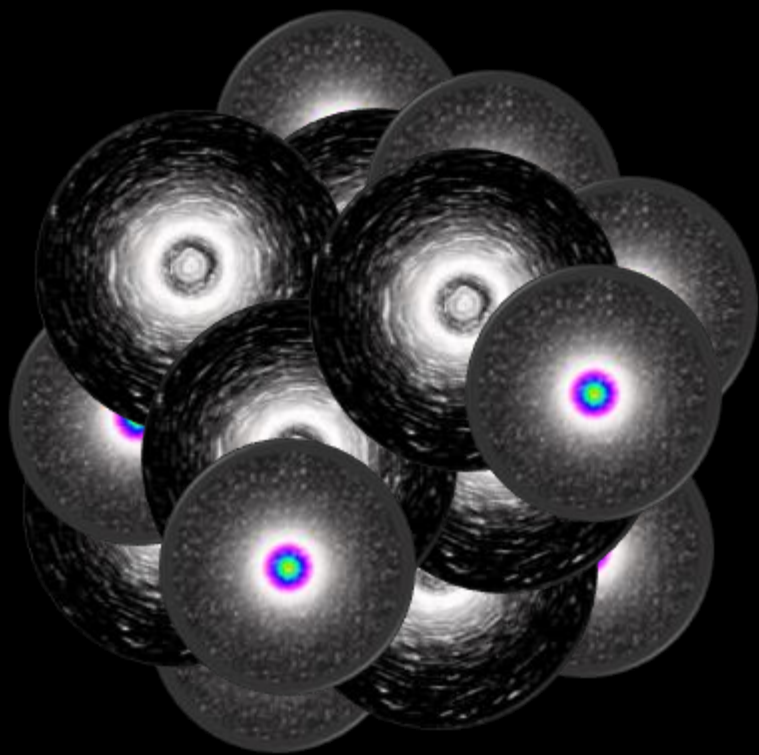
Rozpad volného neutronu



Rozpad protonu (energeticky lze v jádře)



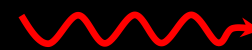
Rozpad atomu



Elektron



Gama



Foton



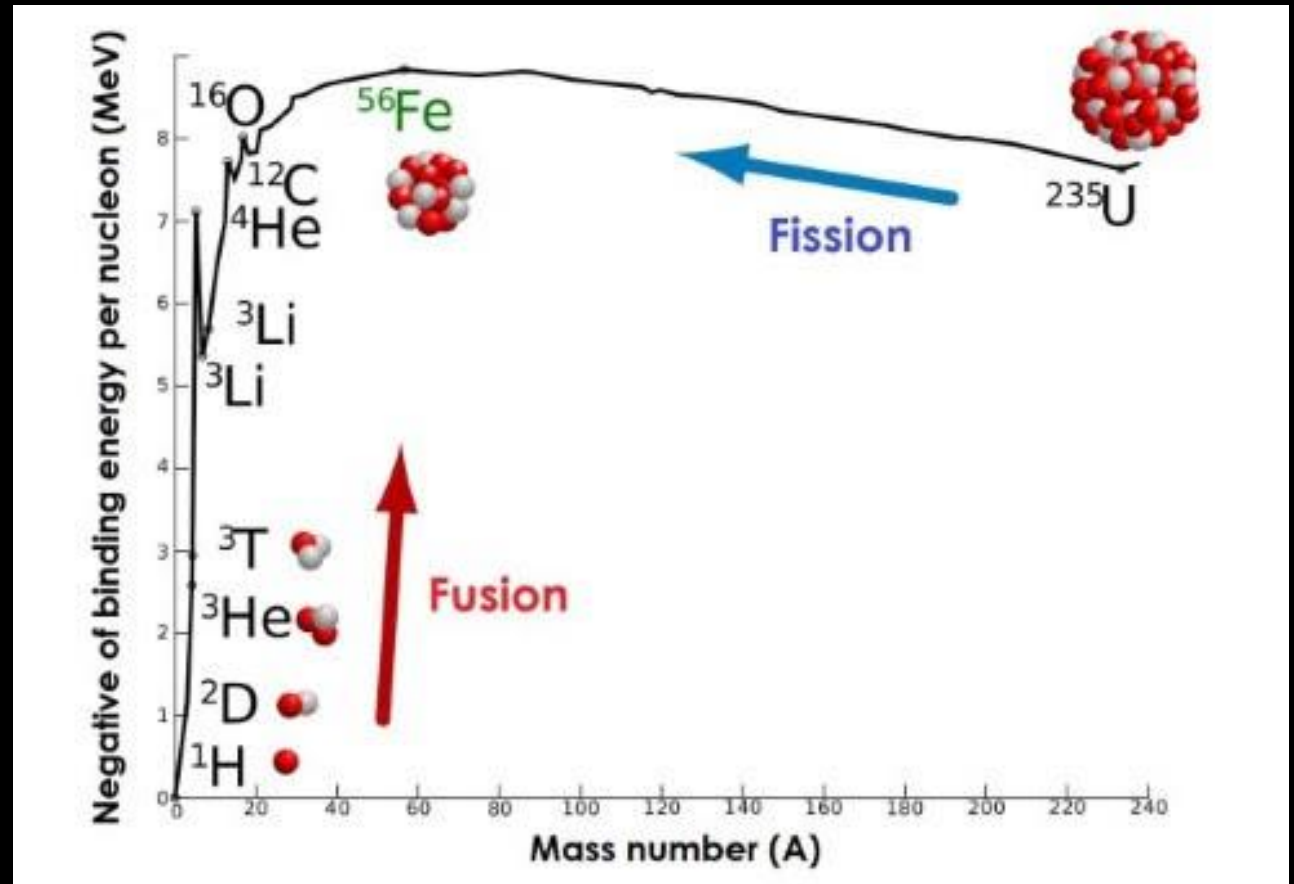
**Elektronové
antineutrino**

10^{-14} m

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

Radioaktivita

- Fúze vs. štěpení

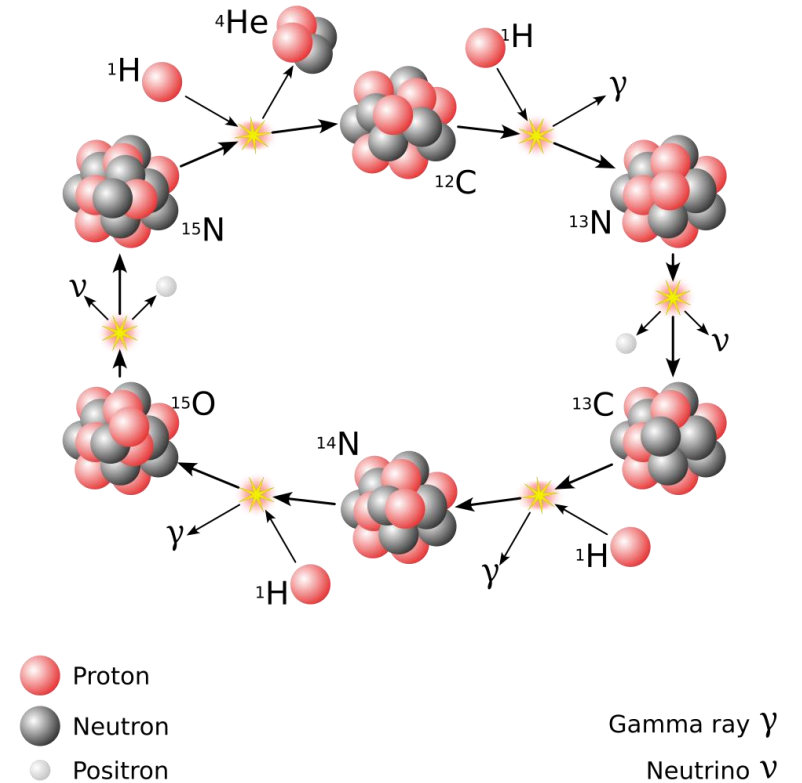
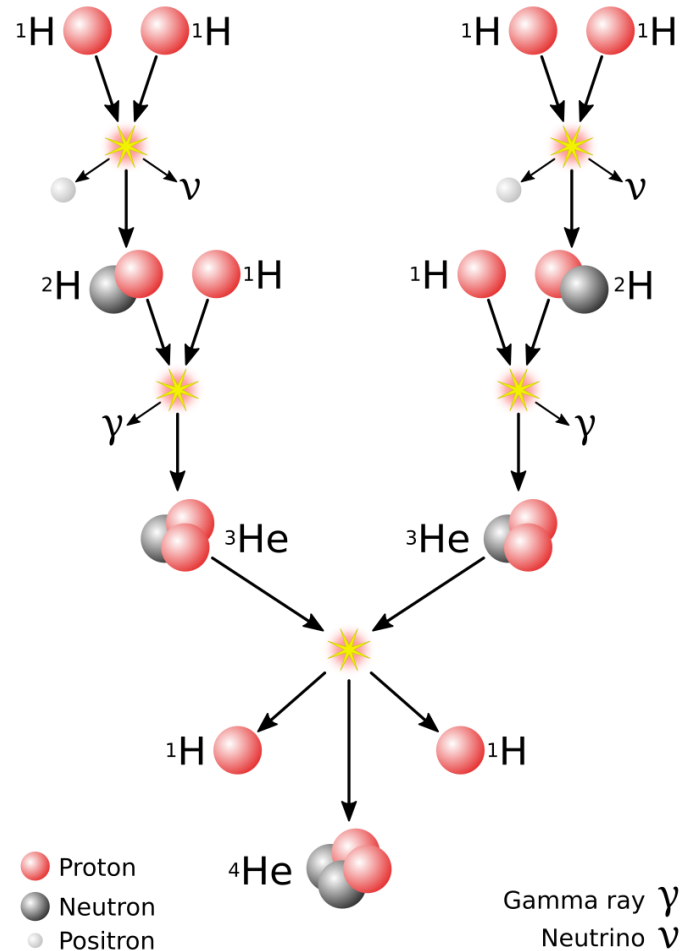


Syntéza prvků ve hvězdách

- pp řetězec
- CNO cyklus

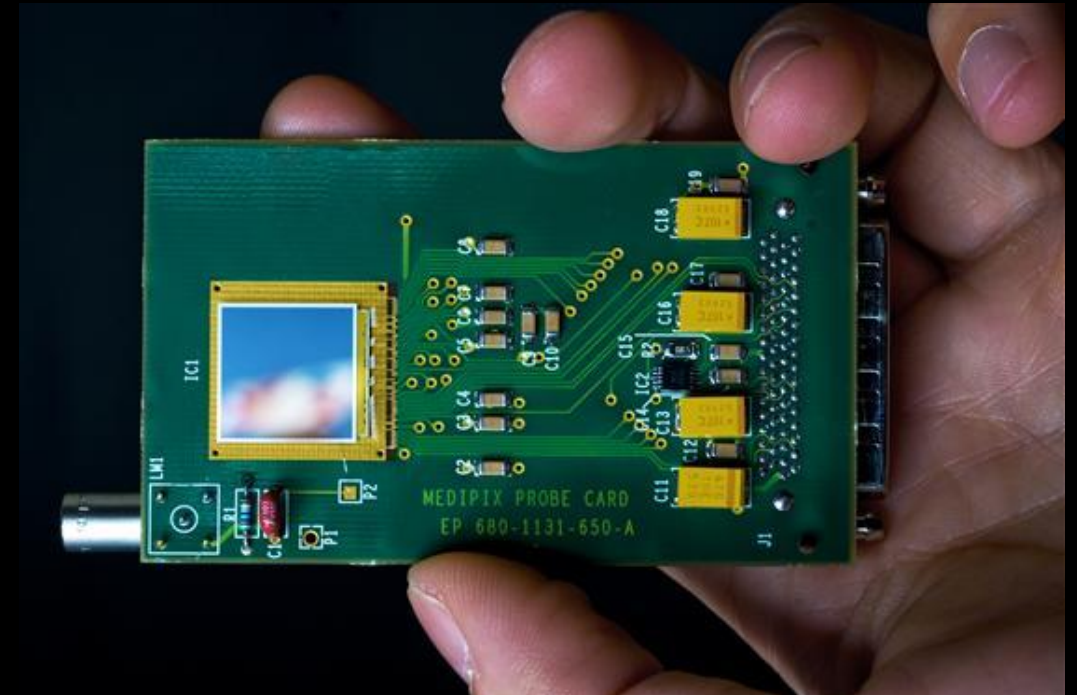
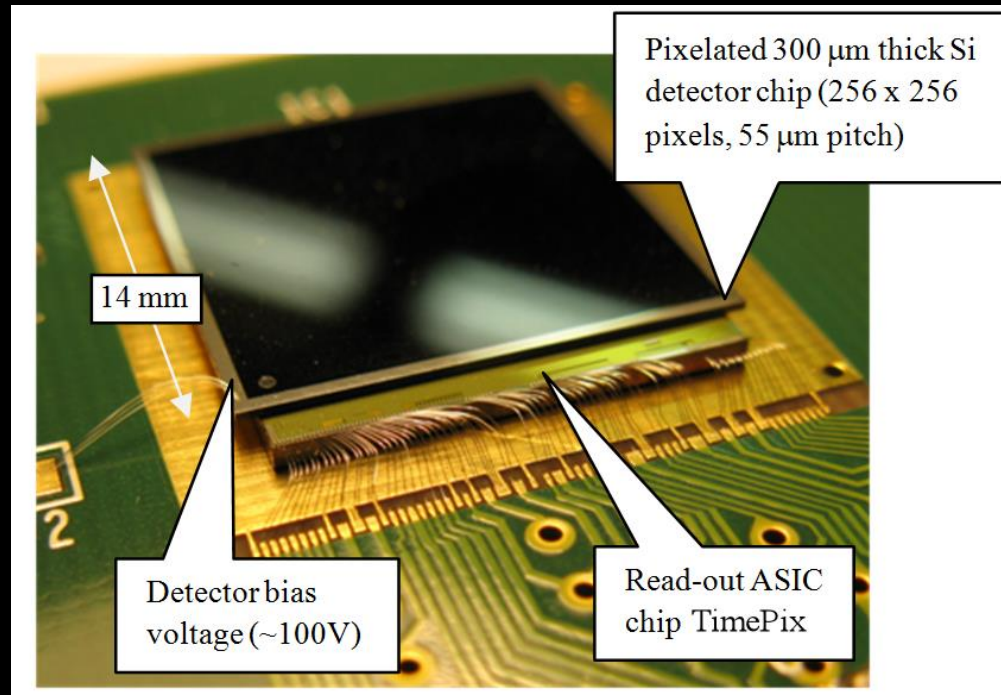
https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain

https://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle



Částicová kamera MX-10

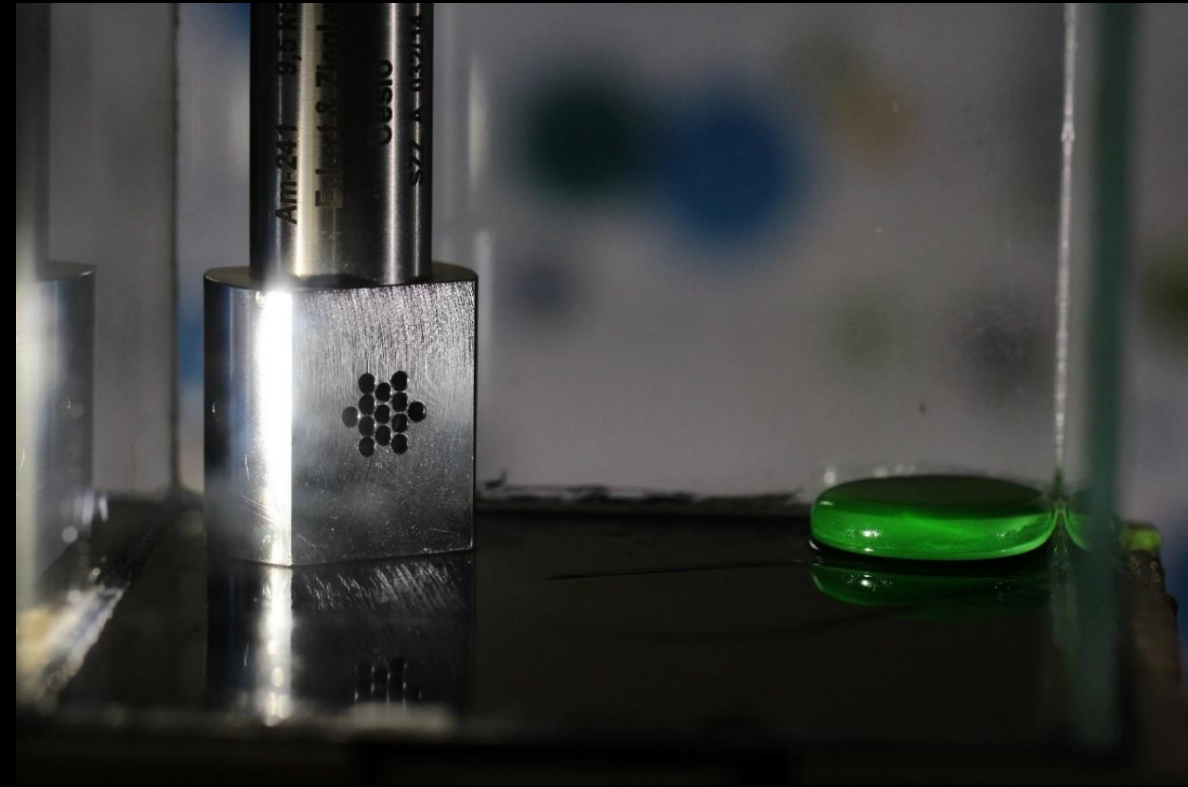
- Křemíkový čip 256 x 256 pixelů, 1,4 cm x 1,4 cm, tloušťky cca 0,3 mm.
- Digitální fotoaparát, který v reálném čase “vidí” stopy částic.
- Vyvinut v laboratoři CERN ve spolupráci s UTEF ČVUT.
- Edukační verzi prodávala firma JABLOTRON. Nyní ADVACAM.
- Profesionální verze létá i na ISS:)



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



Ionizační ztráty těžkých částic

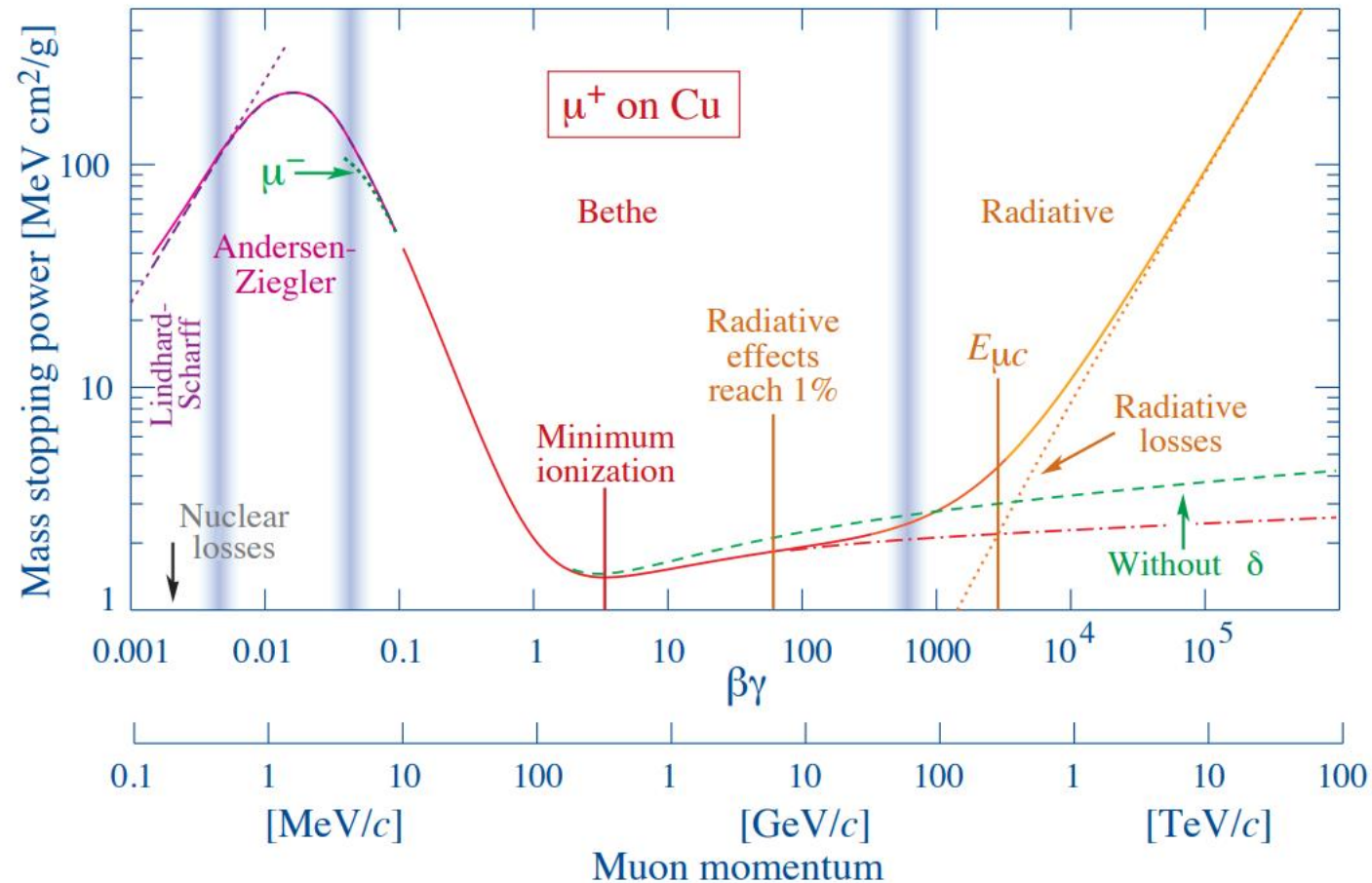
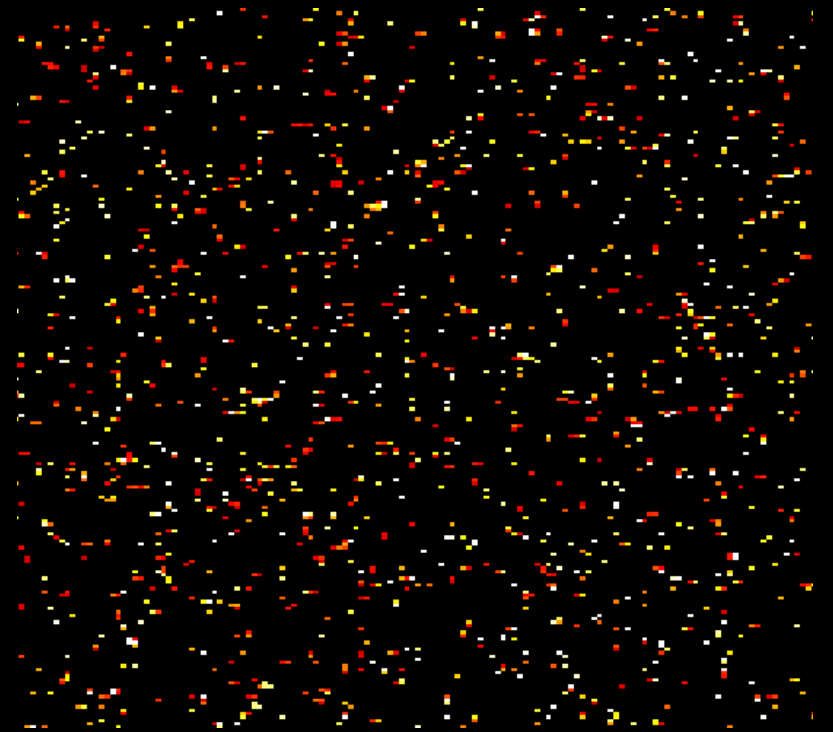


Figure 34.1: Mass stopping power (dE/dx) for positive muons in copper as a function of $\beta\gamma = p/Mc$ over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy). Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at $\beta\gamma \approx 0.1$ are taken from ICRU 49 [6] assuming only β dependence, and data at higher energies are from [7]. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled “ μ^- ” illustrate the “Barkas effect,” the dependence of stopping power on projectile charge at very low energies [8]. dE/dx in the radiative region is not simply a function of β .

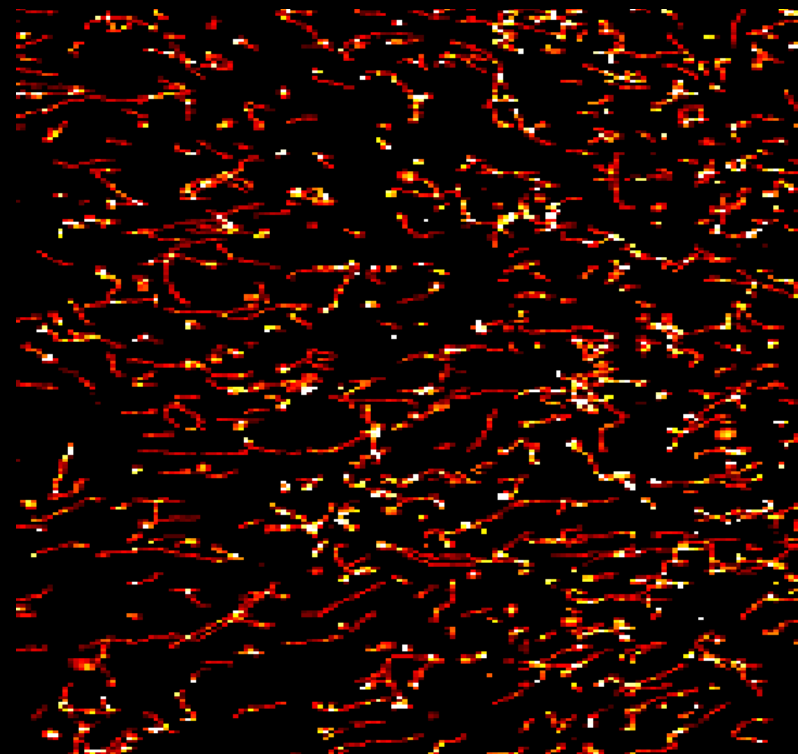
Gama

- **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.



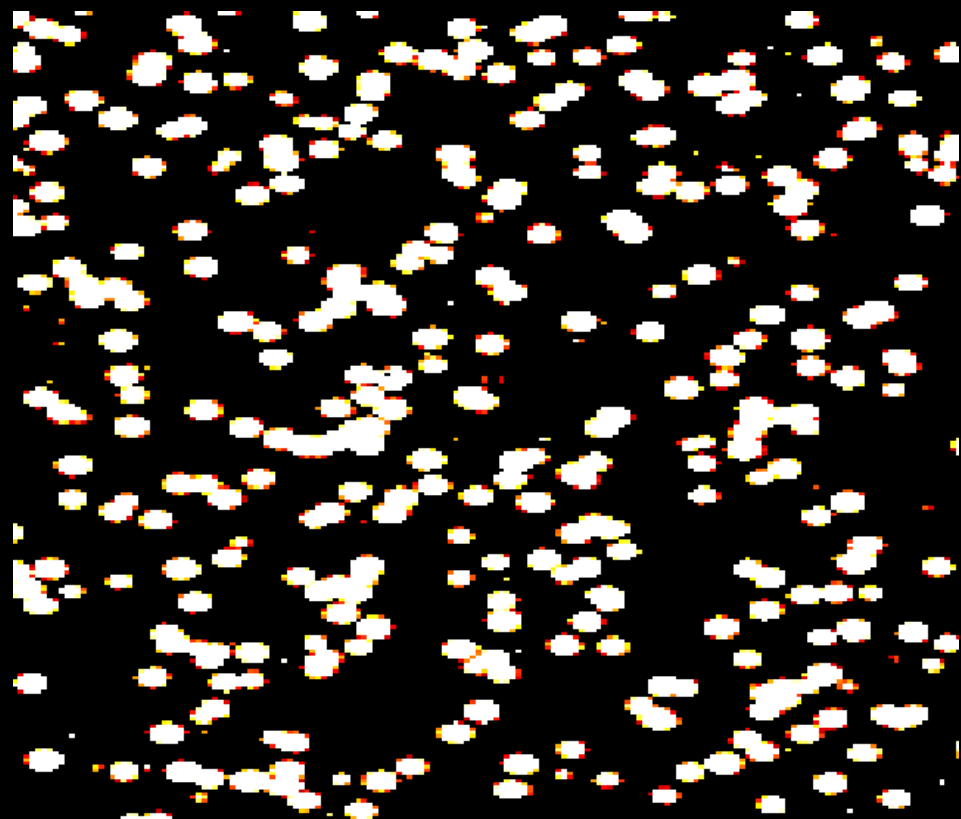
Beta

- **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!



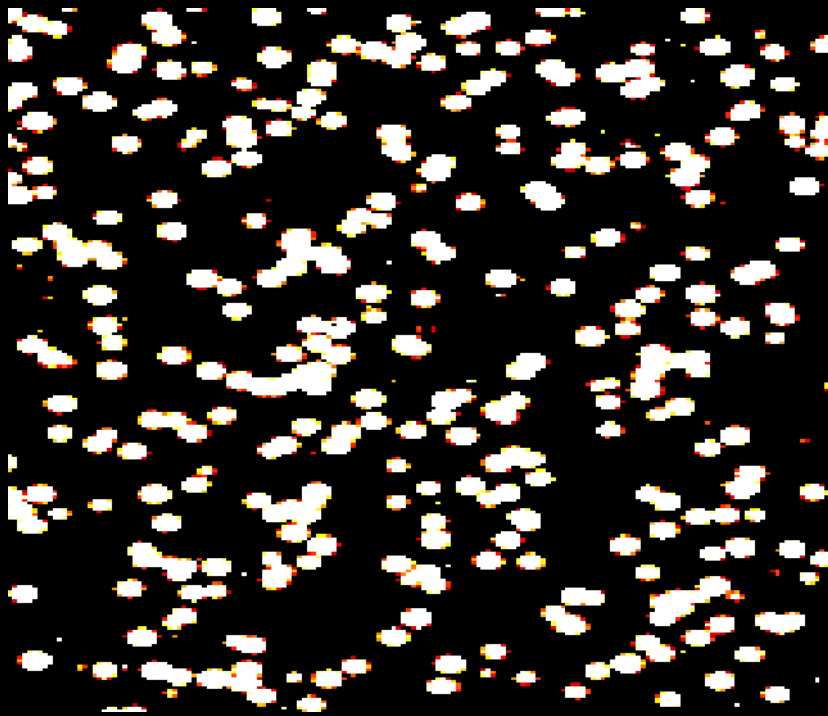
Alfa

- **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.

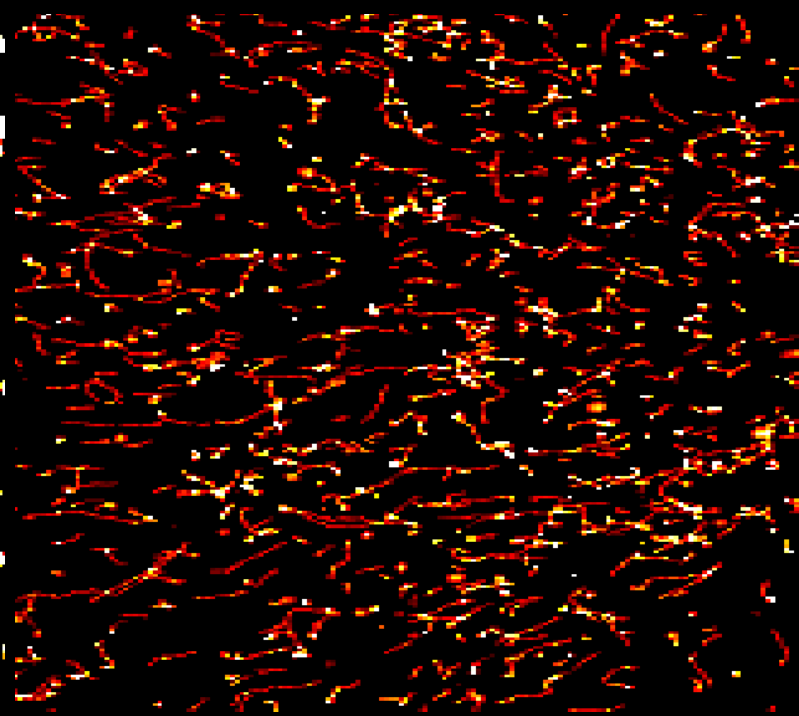


Jak částice vidí kamera MX-10

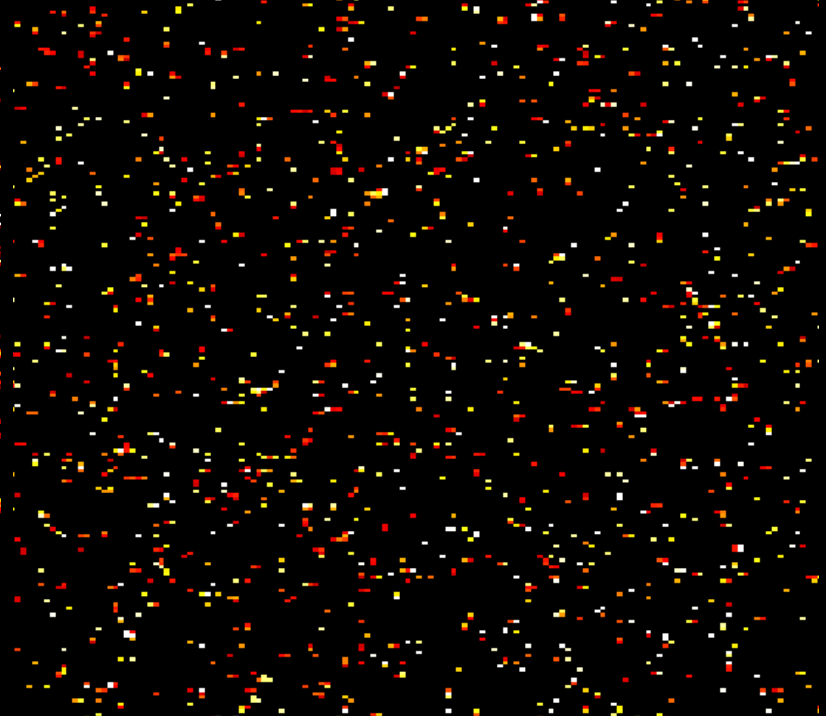
Alfa



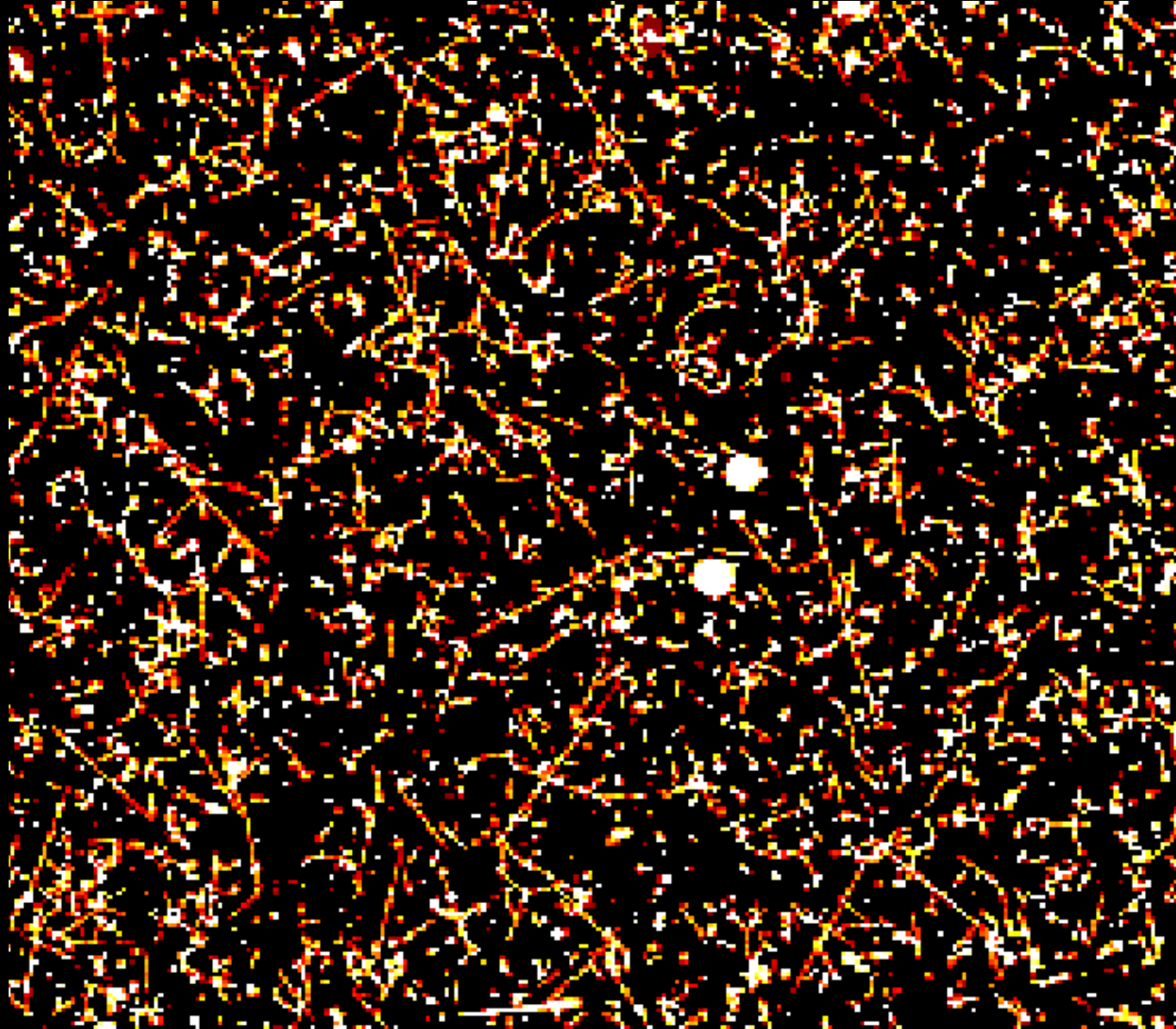
Beta



Gama

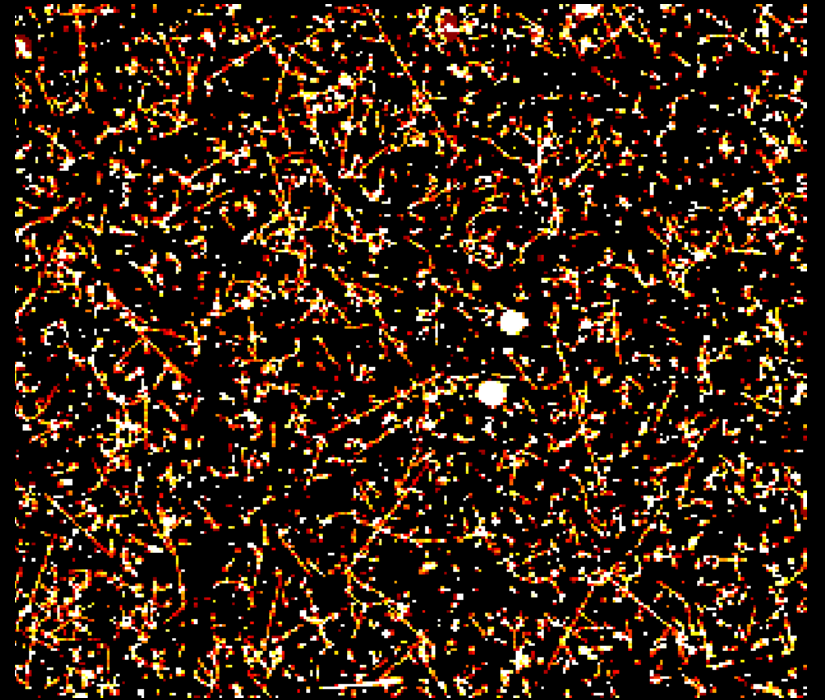


Radiační pozadí – „nic“ po 6 hodinách

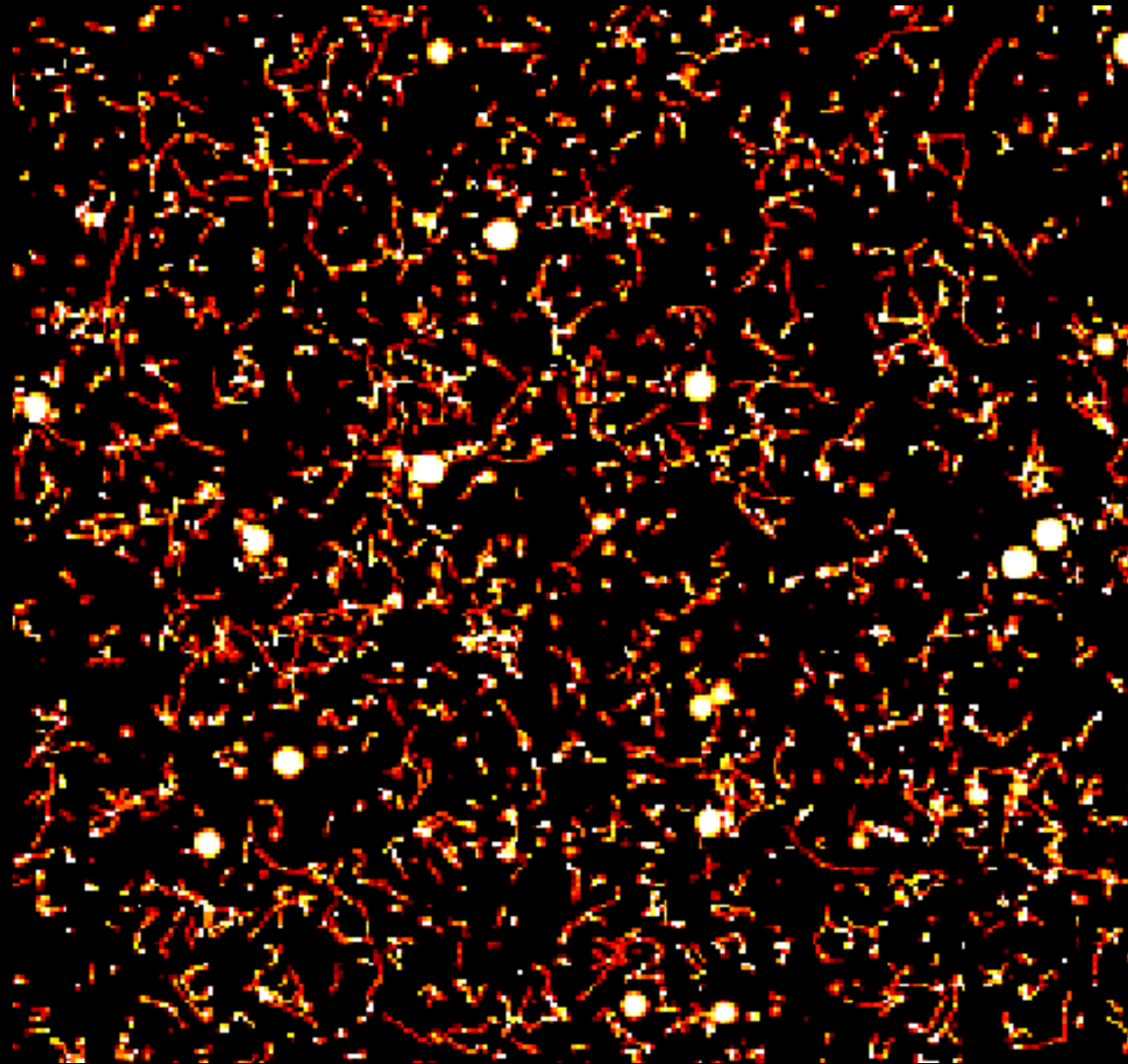


Radiační pozadí – „nic“ po 6 hodinách

- 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
 - Radiobiologický paradox: malá energie, v nebezpečné formě.
 - Pracovníci s radiačními zdroji mají povoleno 50 mSv/rok.
- To odpovídá okolo 0,2 μ Sv/hodinu.
- Více trpí plíce kuřáků, neboť v tabáku jsou obsaženy radioaktivní izotopy polonia a olova, původně z hnojiv.



Sklenička z uranového skla, 5 minut



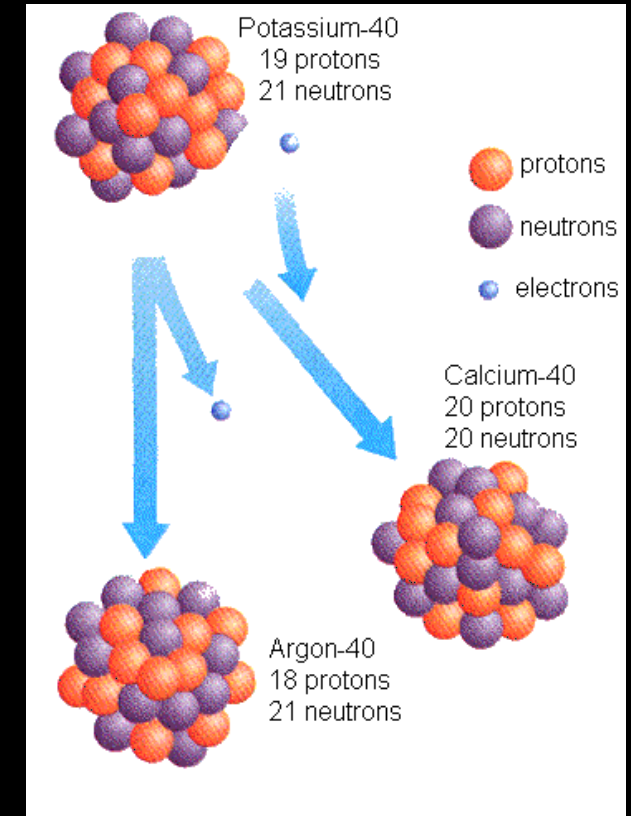
Aktivita lidského těla

- 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
könnte 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.



Calcium-40
20 protons
20 neutrons



/Potassium-40

Dávka a dávková rychlost

- Dávka

- $D = E / m$
- $[D] = \text{J/kg}$
- Dávka pro neživou hmotu: Gray
- Dávka pro člověka: Sievert

- Dávková rychlost

- $d = E / (m \Delta t)$
- $[d] = \text{J/kg/s}$

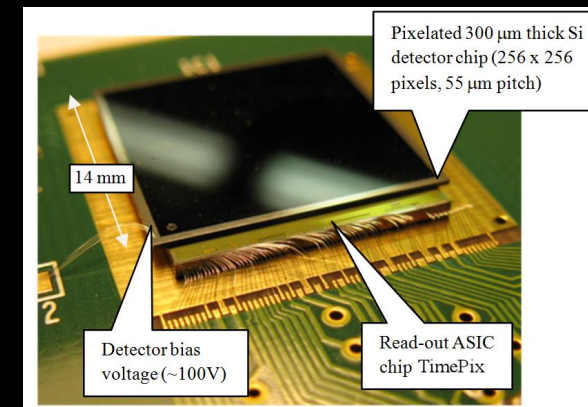
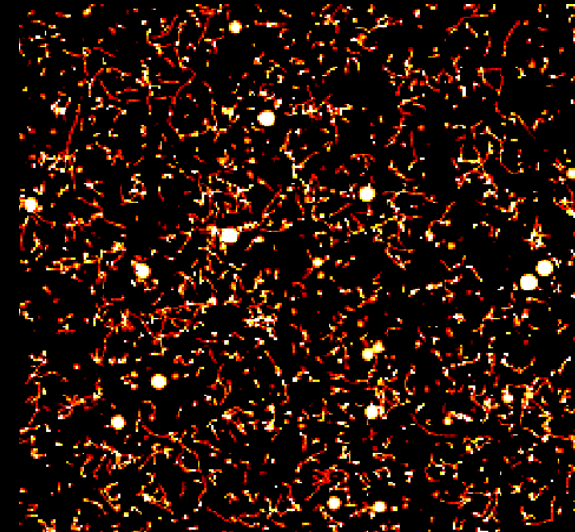
- Detektor musí umět měřit energii, kterou mu předají částice ionizujícího záření

- Musím znát hmotnost detektoru:)

- Gama a neutrony?

- Radiační dávka člověka za rok

- Cca 2mSv



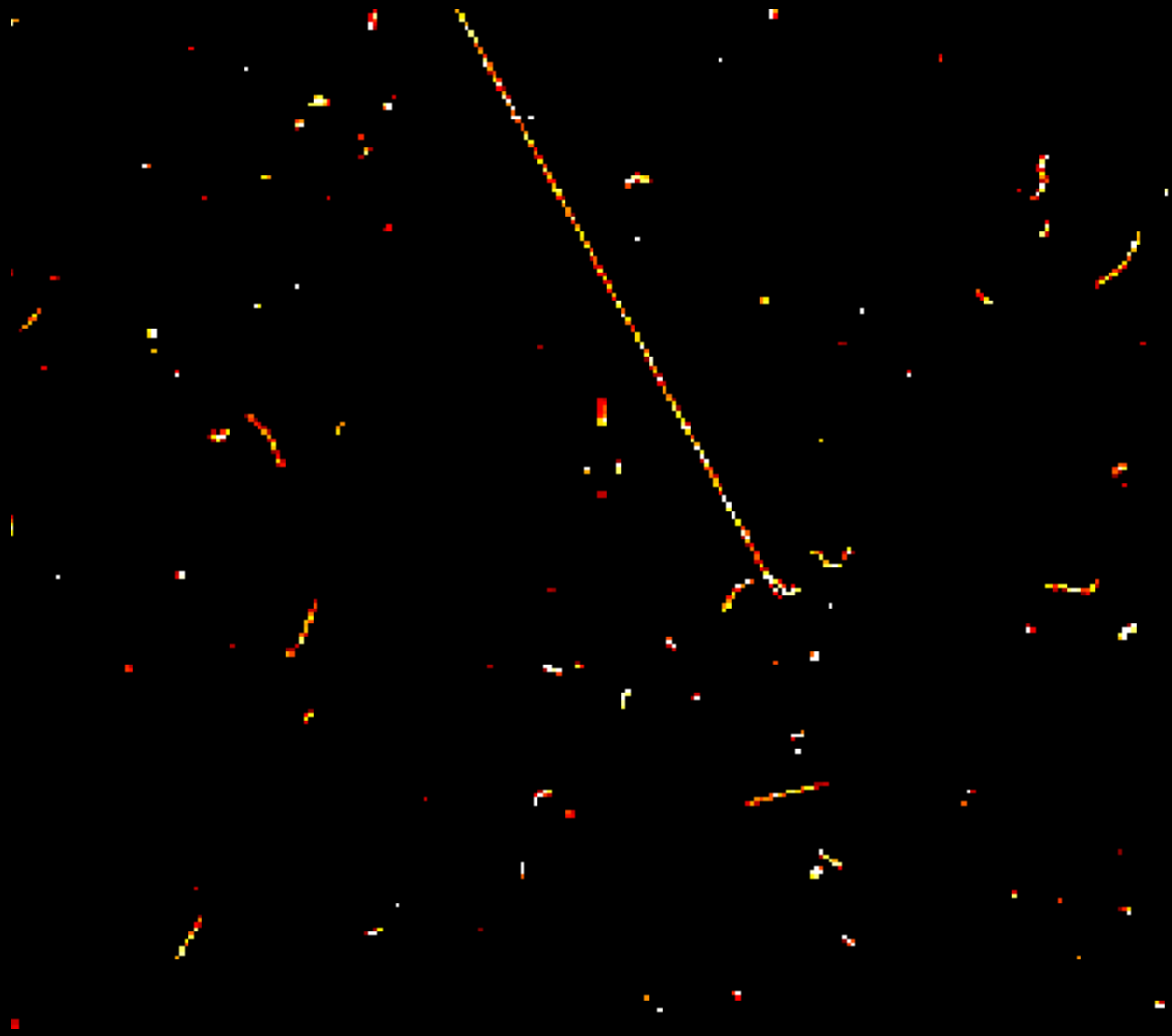
Radiobiologické účinky ionizujícího záření

- Různé typy záření, částice o různých energiích
- Různý LET = Linear energy transfer, dE/dx
 - keV / μm , MeV / cm
- Relative Biological Effectiveness (RBE)
 - (RBE is a measure of the damage done to living tissue, relative to gamma rays)
 - Empirická tabulka koeficientů "kvality"
 - Různých druhů záření

Radiation	Energy W_R (formerly Q)
x-rays, gamma rays, beta particles, muons	1
neutrons (< 1 MeV)	$2.5 + 18.2e^{-[\ln(E)]^2/6}$
neutrons (1 - 50 MeV)	$5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E)]^2/6}$
neutrons (> 50 MeV)	$2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E)]^2/6}$
protons, charged pions	2
alpha particles, nuclear fission products, heavy nuclei	20

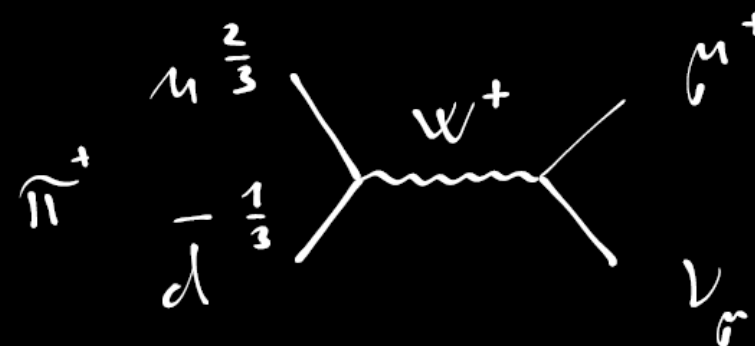
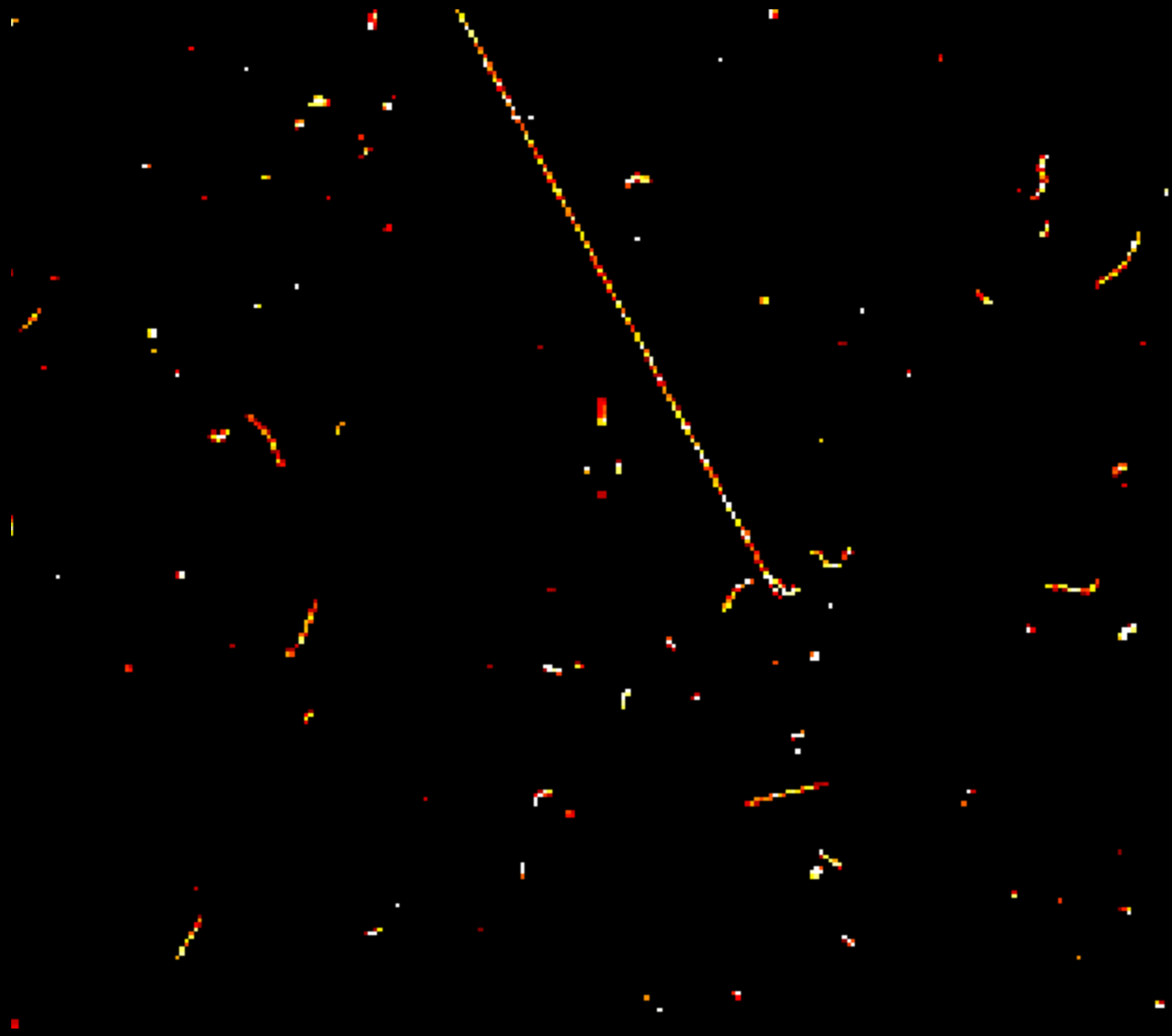
Jak částice vidí kamera MX-10

???



Jak částice vidí kamera MX-10

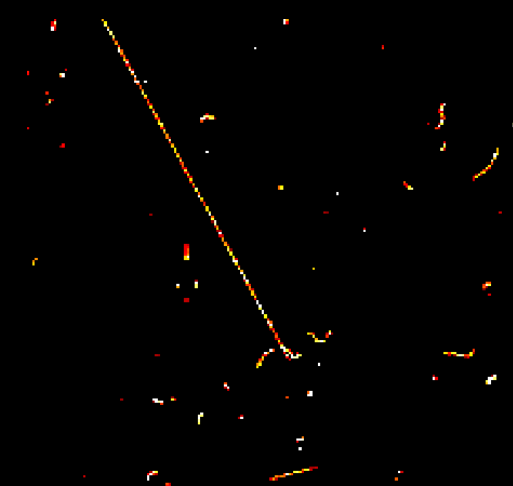
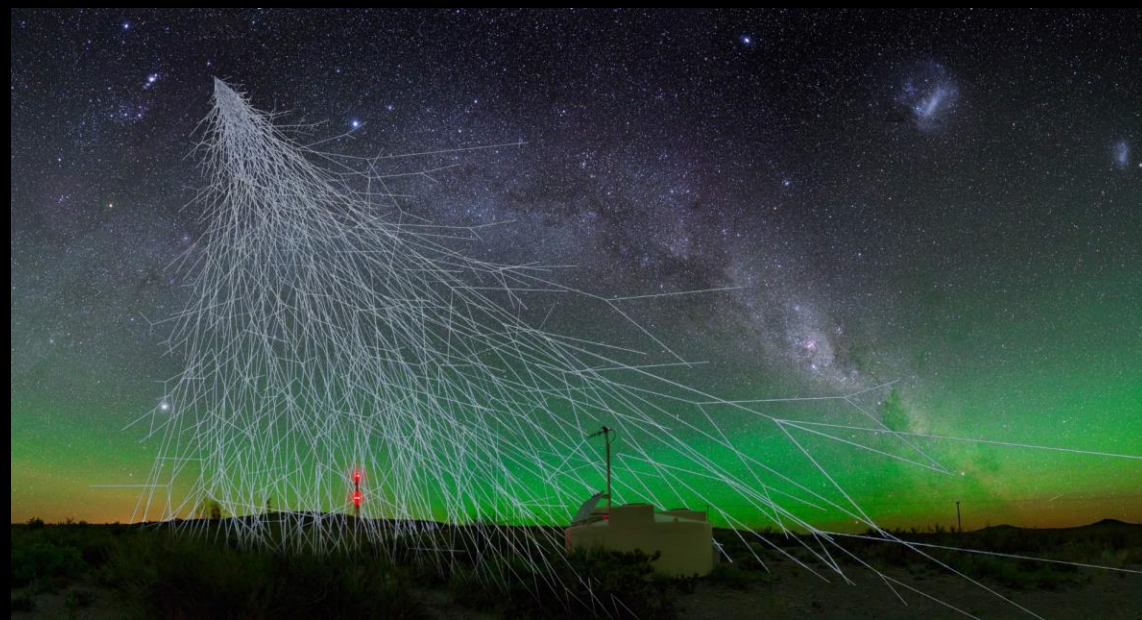
Jde o částici z kosmického záření zvanou mion



Miony

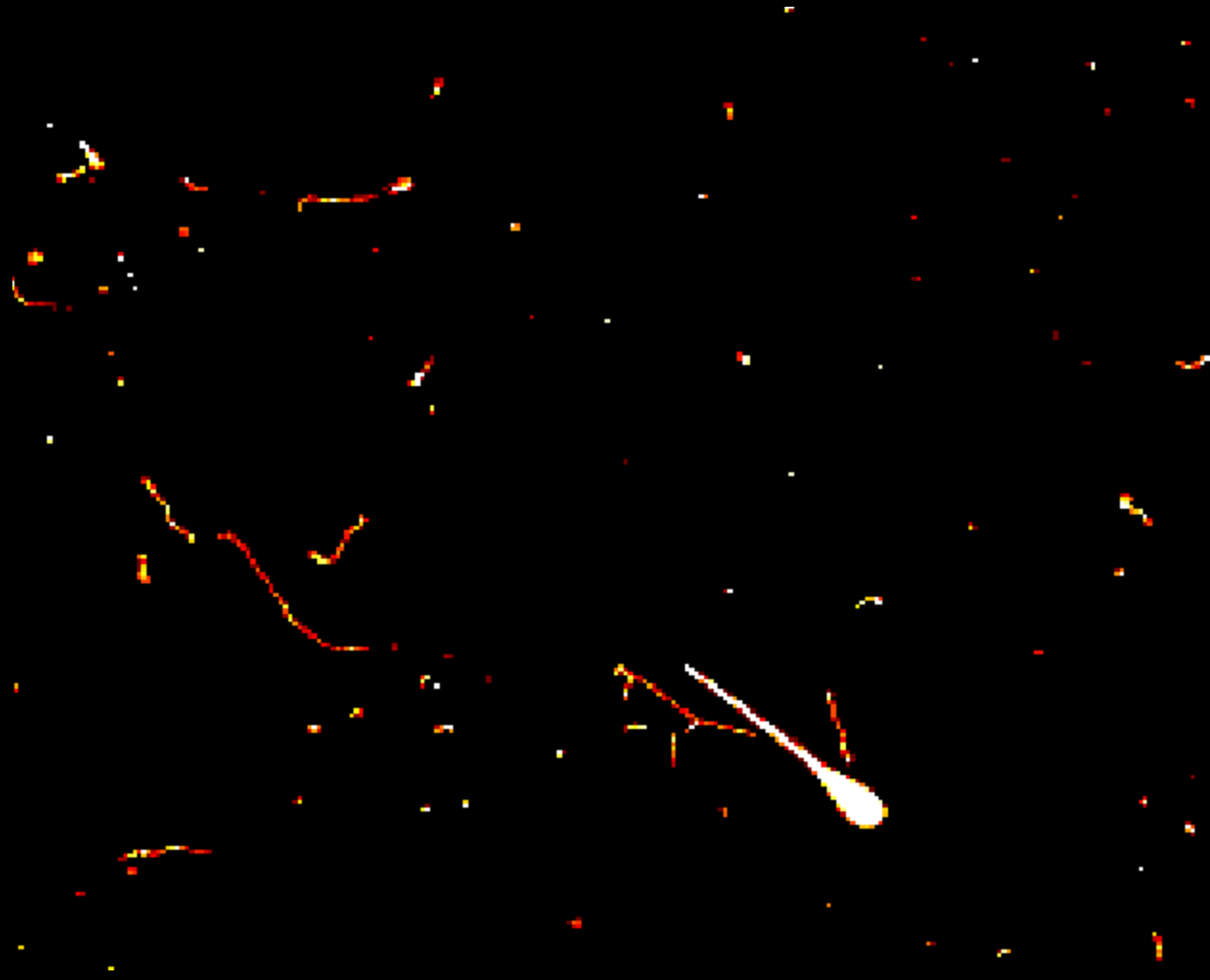
- Miony jsou podobné elektronům, jen jsou asi 200x těžší a rozpadají se na elektron a neutrino.
- Vznikají ve výškách kolem 20 km ve srážkách primárního kosmického záření s atmosférou.
- Doba života mionu je asi 2 mikrosekundy.
- Za tu dobu by i rychlostí světla uletěly jen 600m...
- Přesto je pozorujeme 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



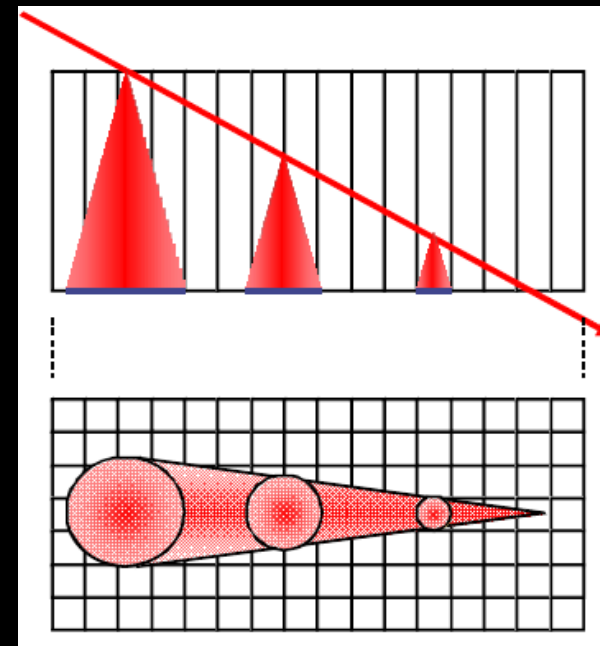
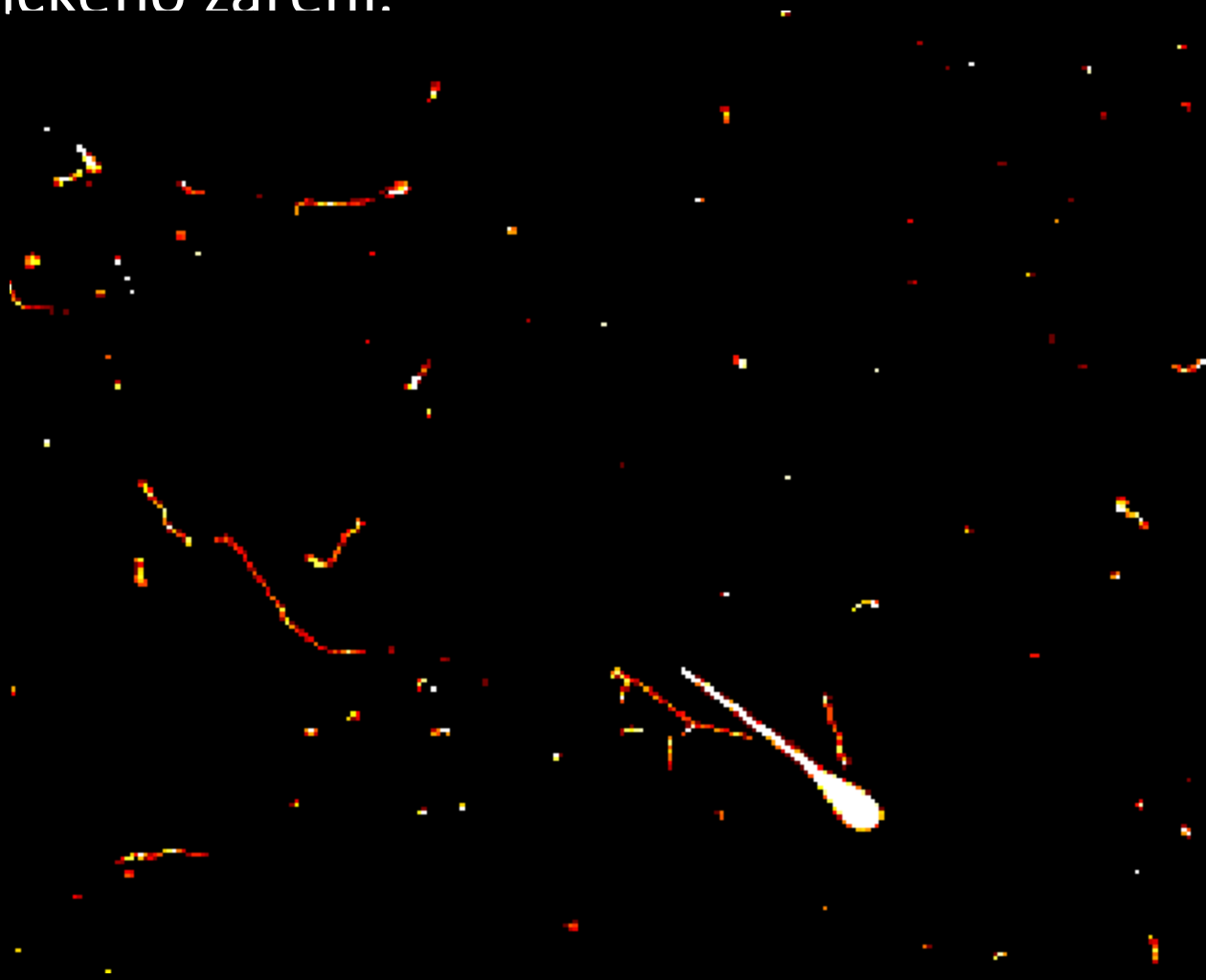
Jak částice vidí kamera MX-10

???



Jak částice vidí kamera MX-10

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

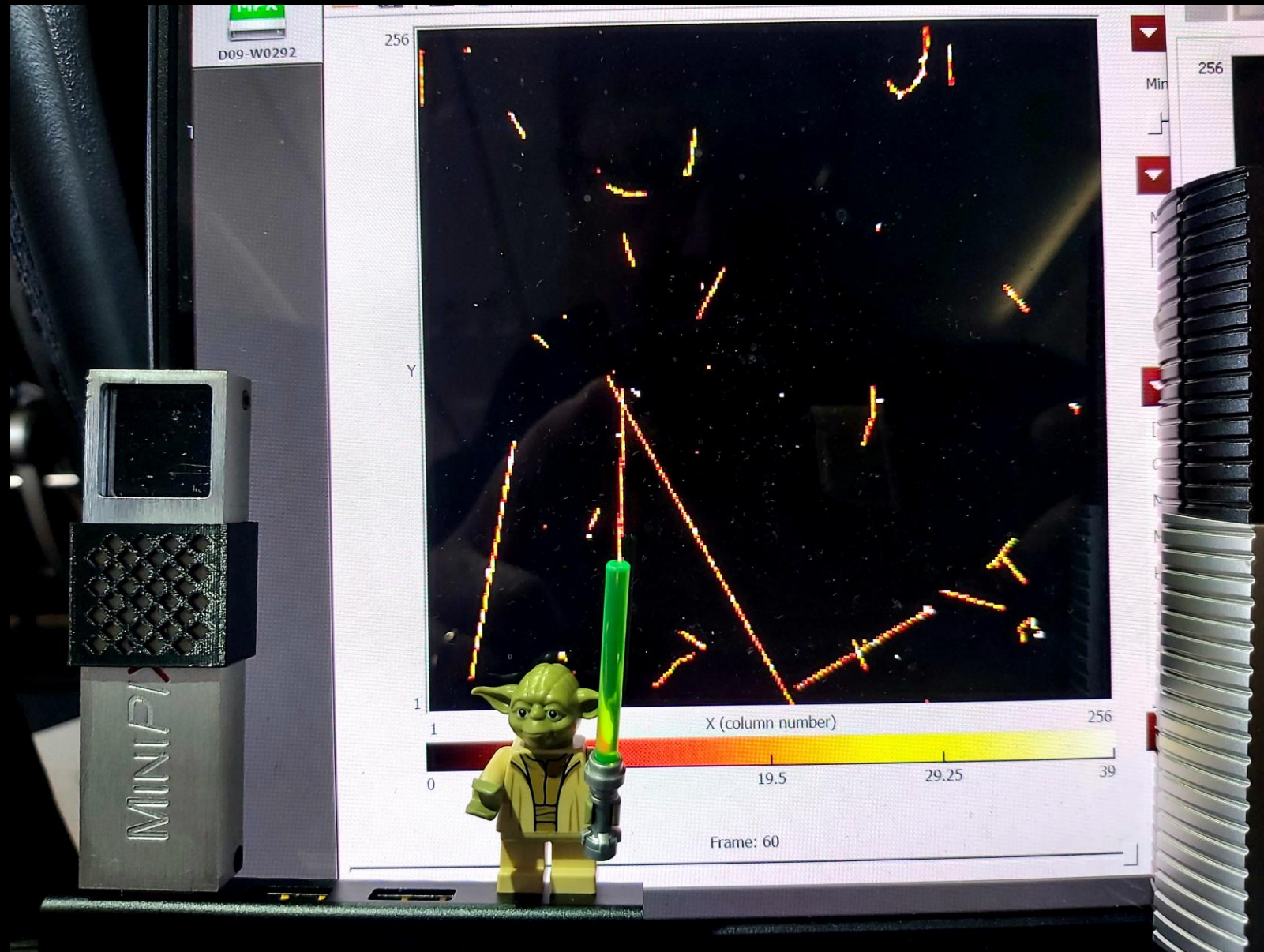


S detektory v letadle

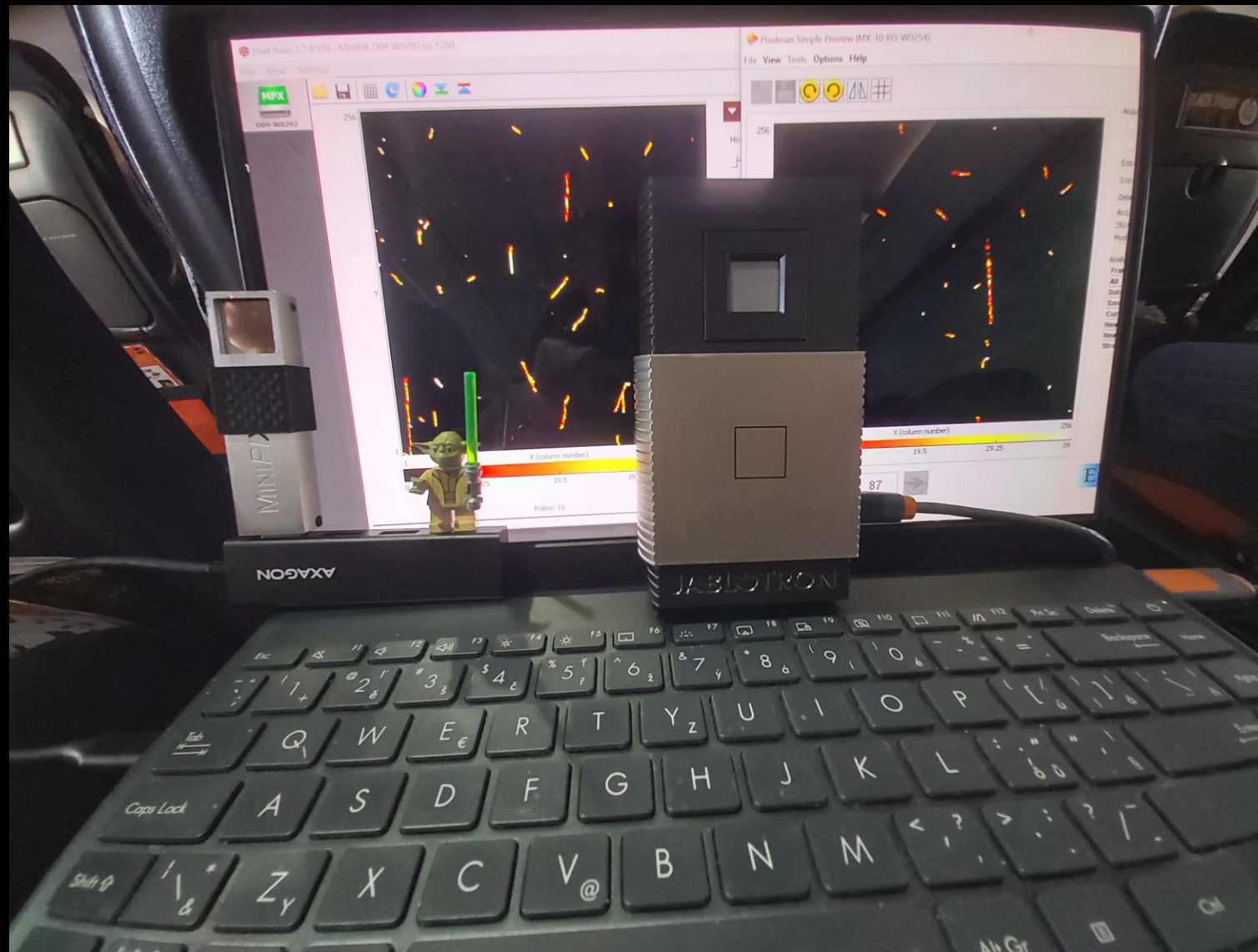
- TimePix, Geiger, DSLR+GPS, mobile phone (not pictured)



S detektory v letadle



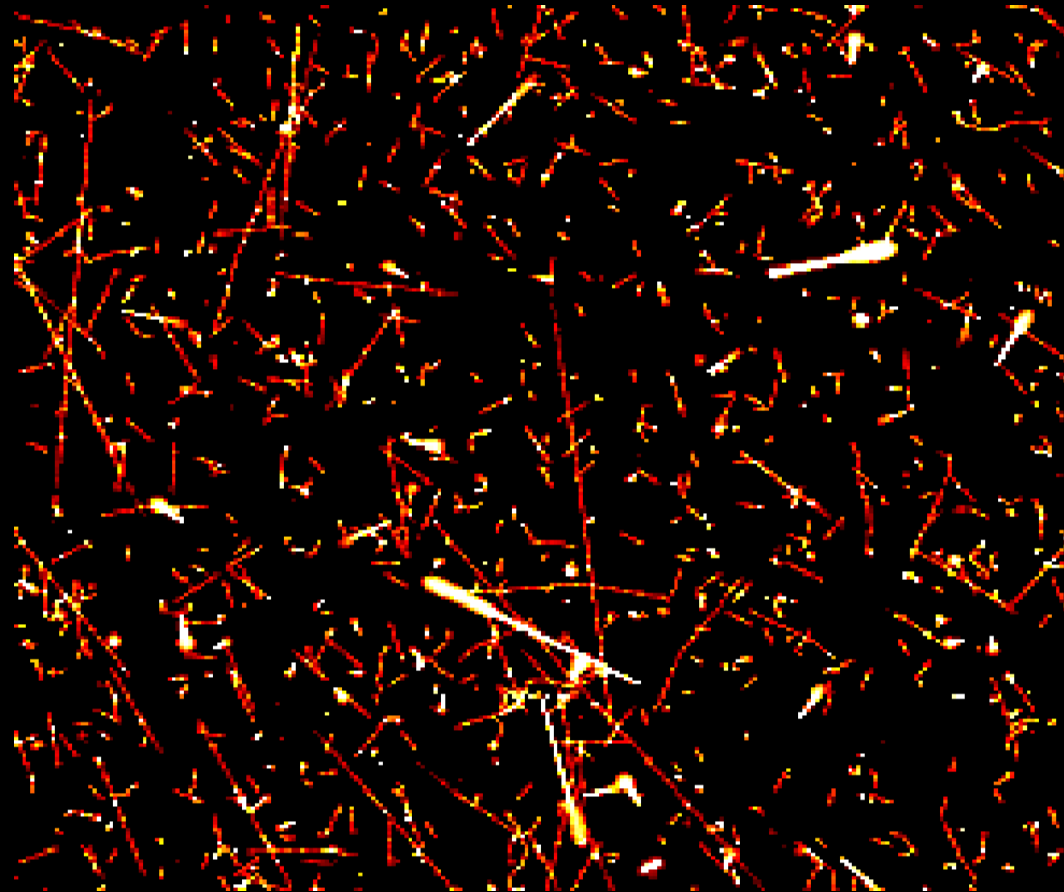
S detektory v letadle



V letadle, cca 10min

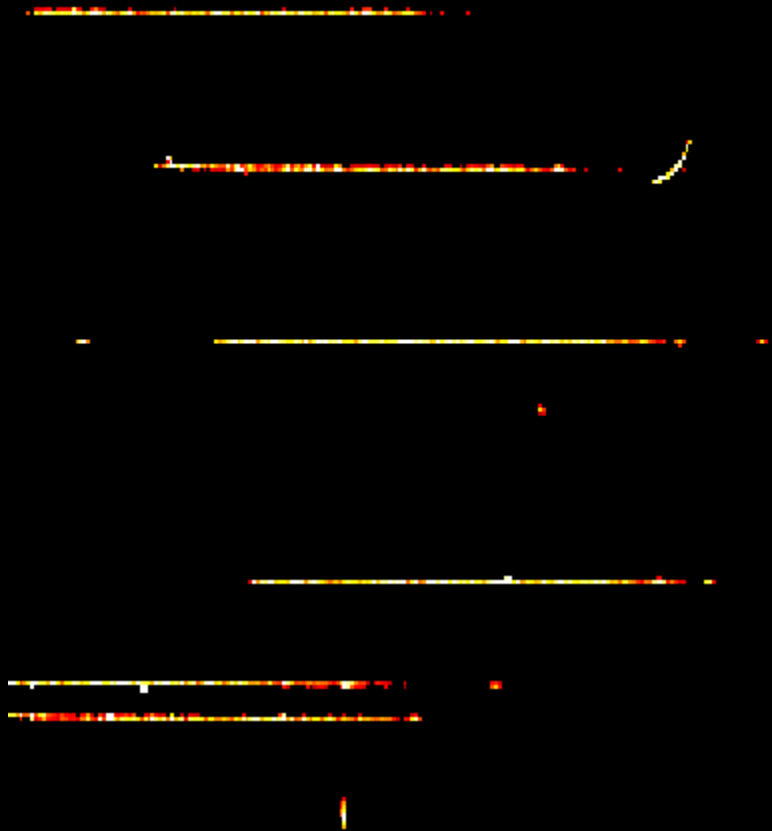
Miony a i silně ionizující částice: piony, protony...

Let přes Atlantik ~ rentgen plic.

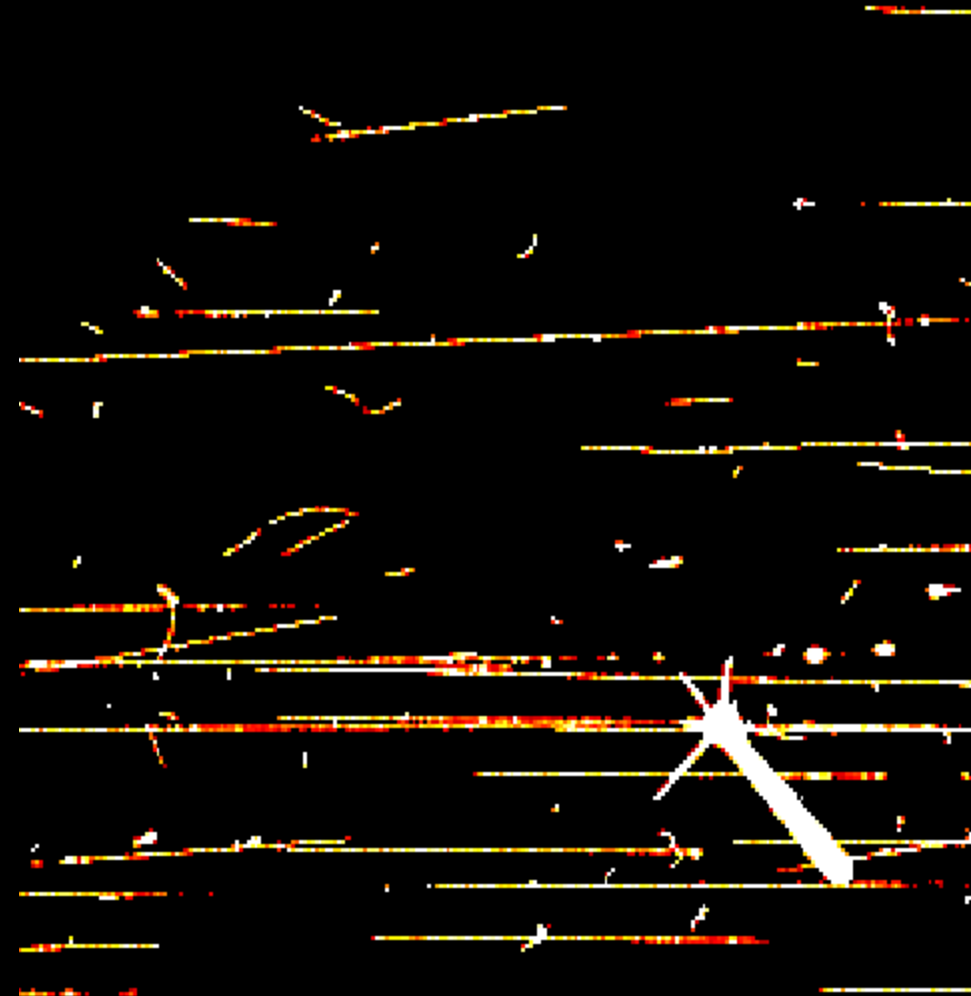


Ve svazku částic na urychlovači SPS v CERN

Miony

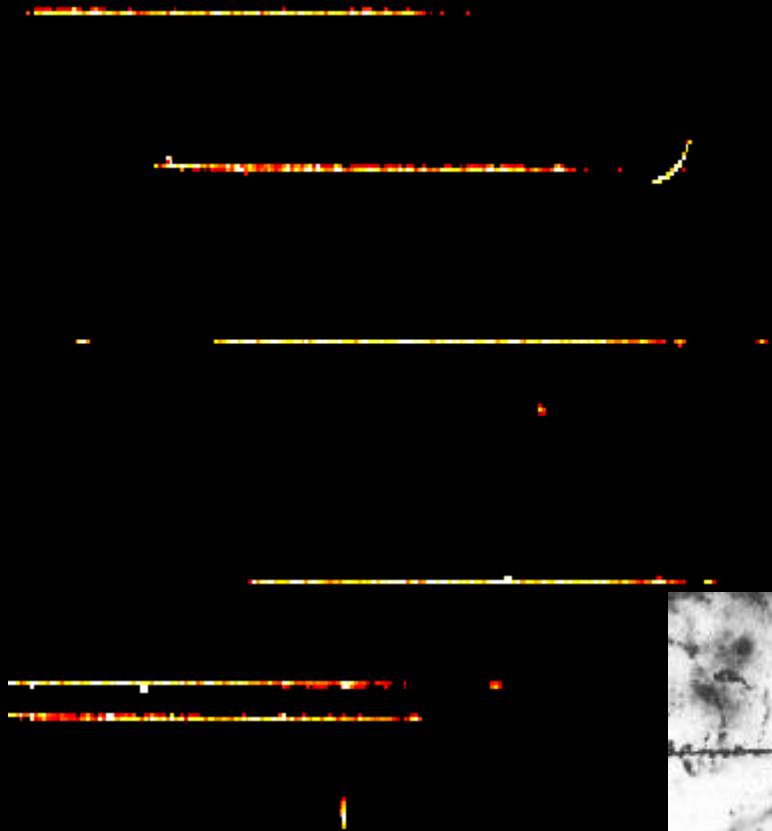


Piony



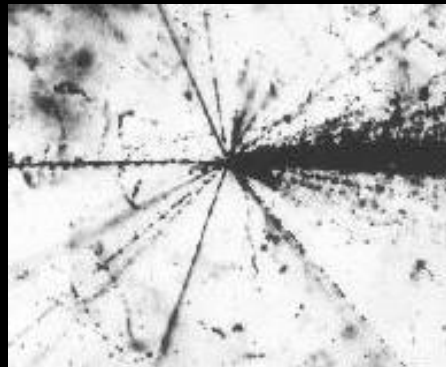
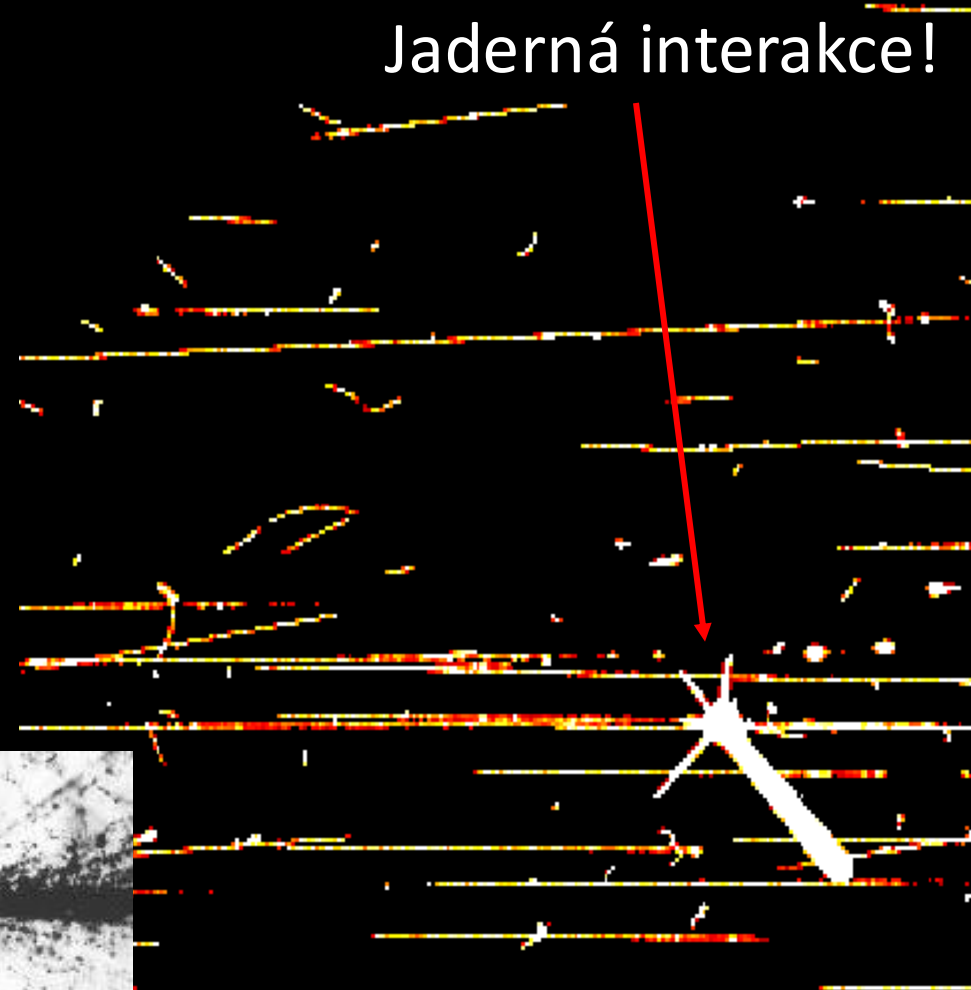
Ve svazku částic na urychlovači SPS v CERN

Miony



Piony

Jaderná interakce!



Mezinárodní kosmická stanice

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

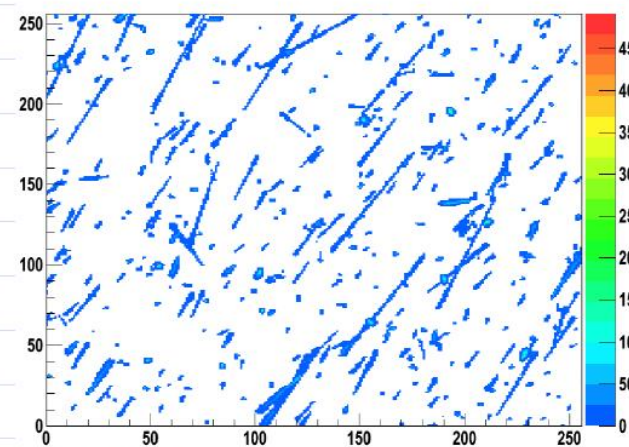
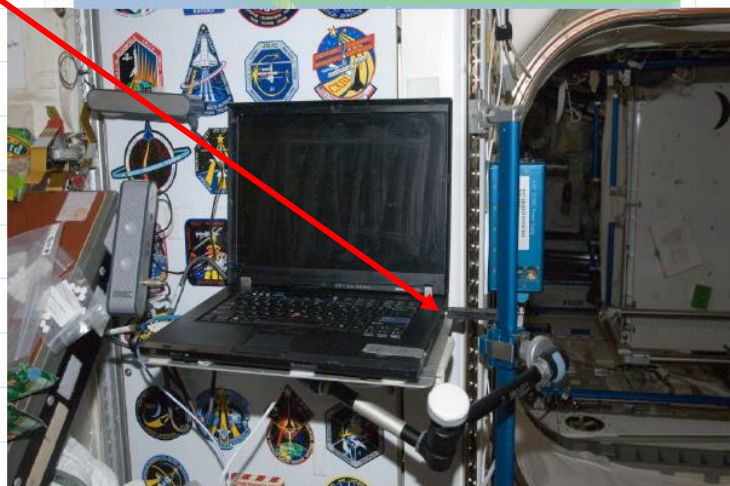
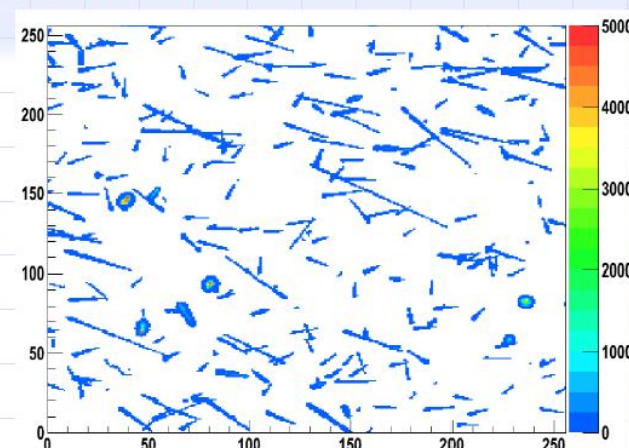
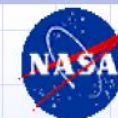
- South Atlantic Anomaly
- MiniPix



Institute of Experimental and Applied Physics
Czech Technical University in Prague

Dosimetry in space on ISS

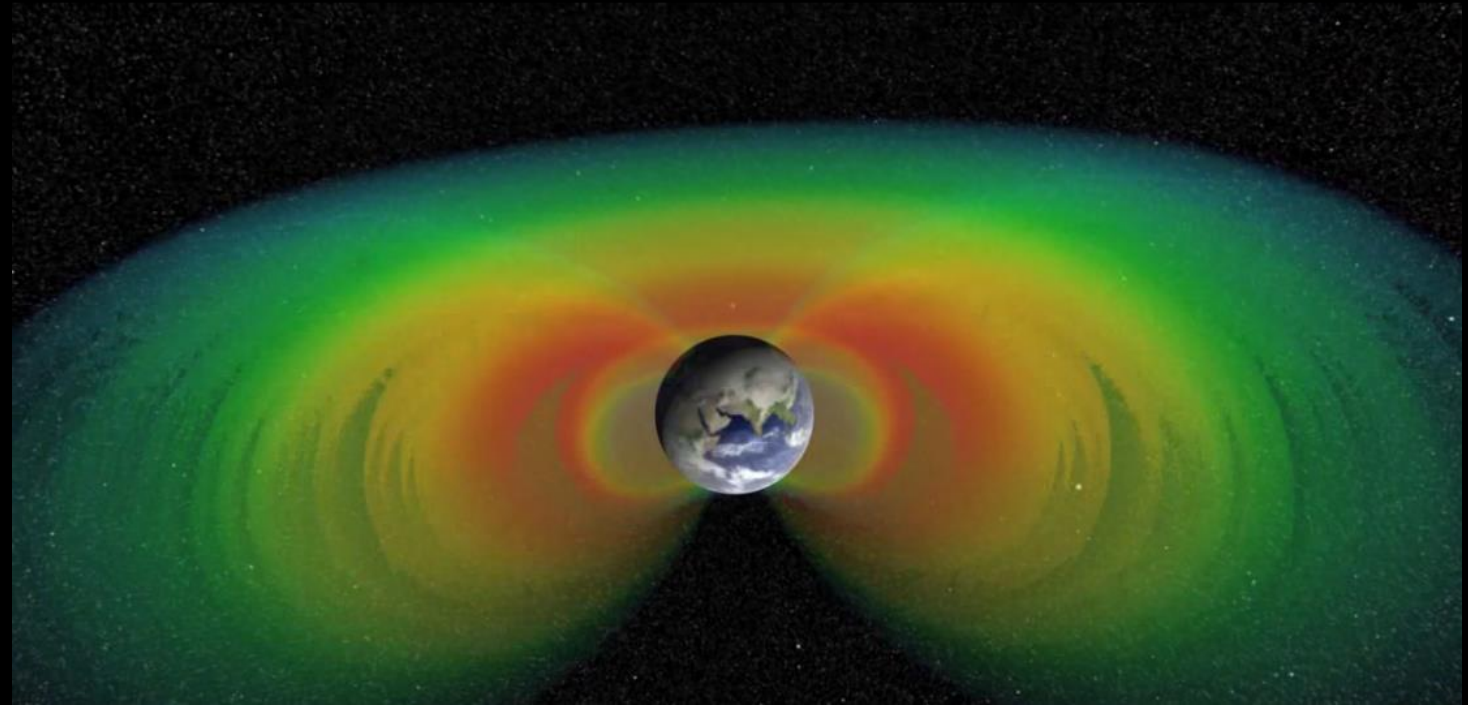
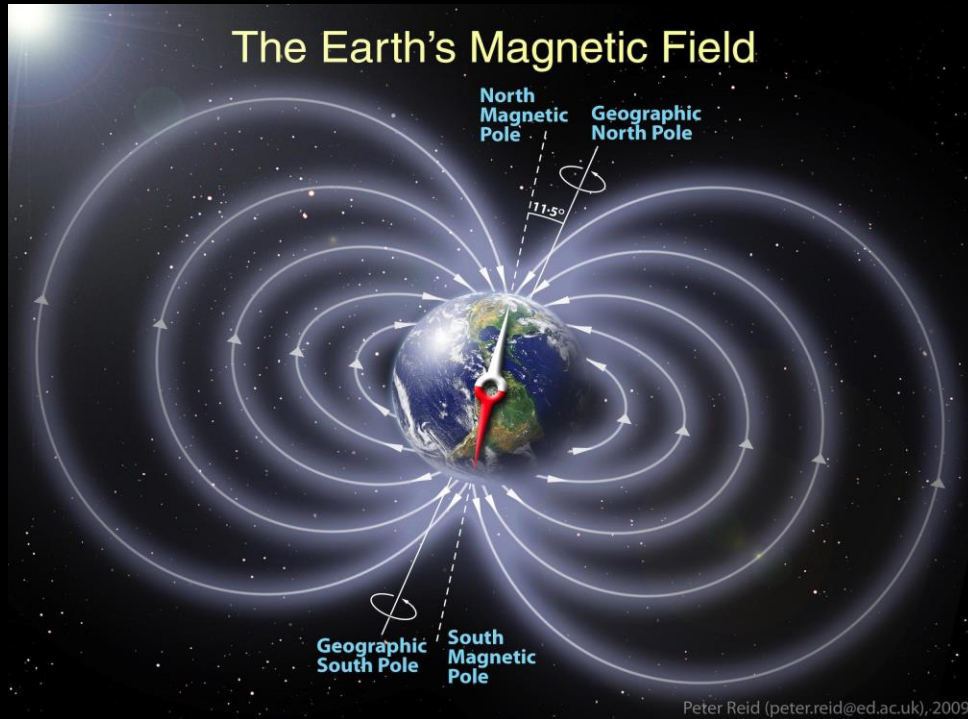
- Timepix for the first time in the space on the altitude $\sim 400\text{km}$
- 5 detectors deployed on ISS from October 2012



Van Allenovy pásy

- Nabité částice (protony, elektrony) zachycené zemským magnetickým polem
- Spirálovitý pohyb k pólům
 - Polární záře
 - Radiační pásy kolem Země
 - ISS pod prvním pásem

<https://scitechdaily.com/earths-magnetosphere-protecting-our-planet-from-harmful-space-radiation/>

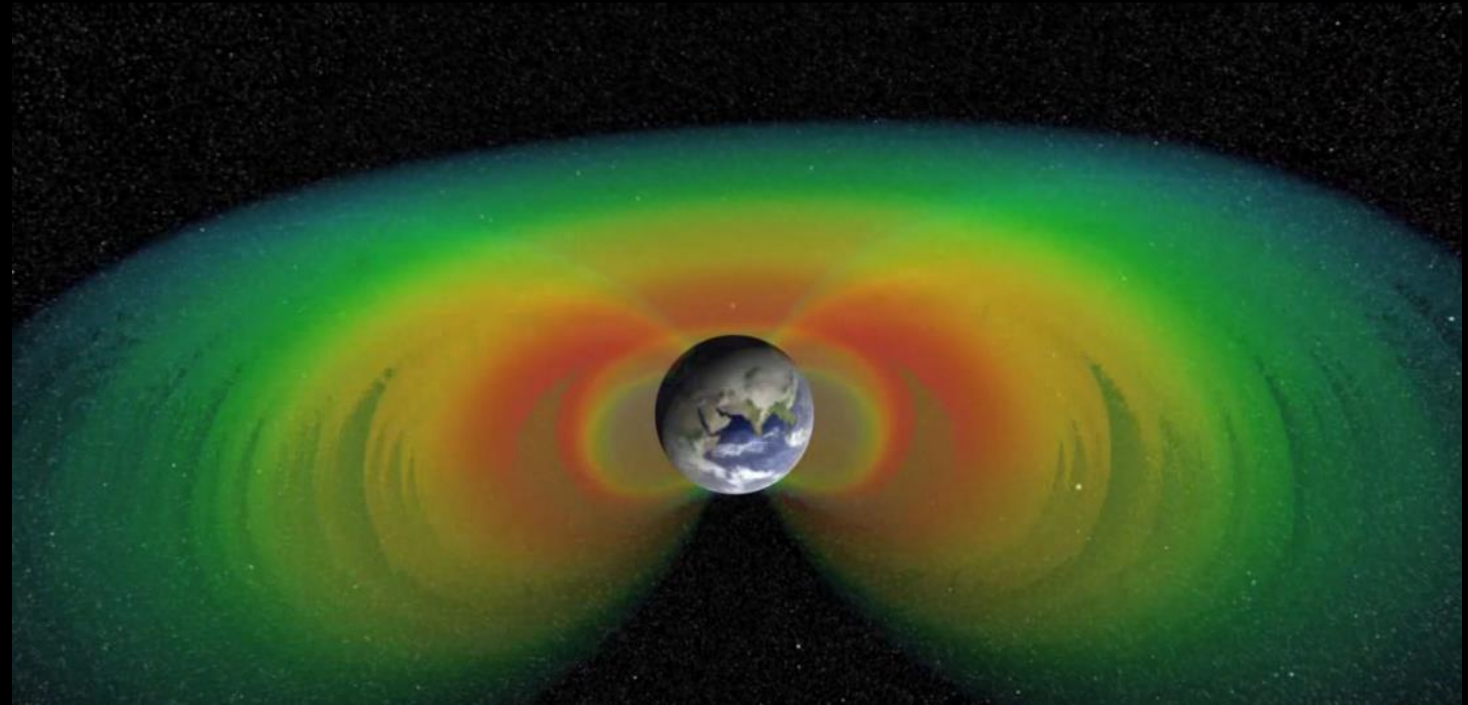
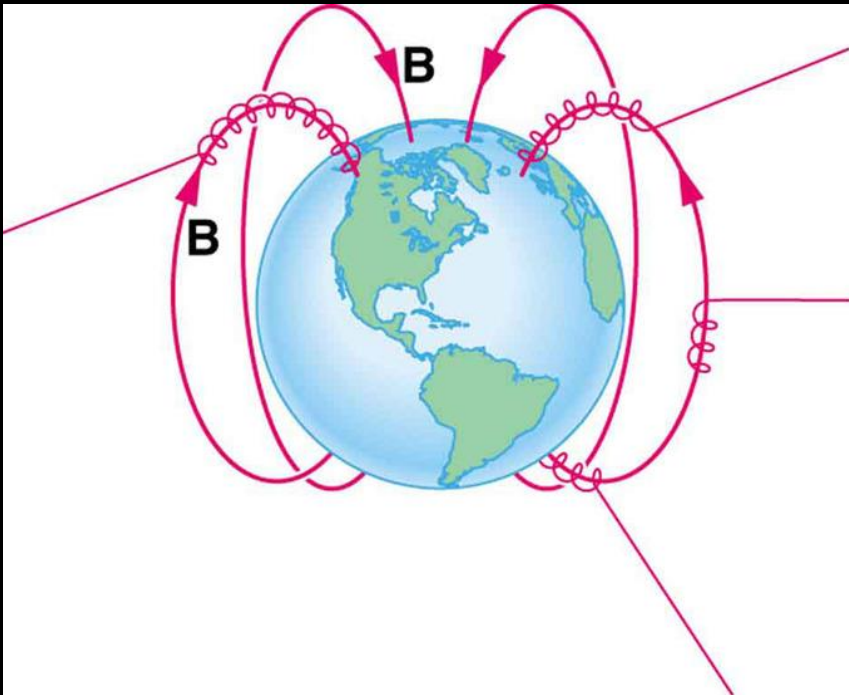


https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt

Van Allenovy pásy

- Nabité částice (protony, elektrony) zachycené zemským magnetickým polem
- Spirálovitý pohyb k pólům
 - Polární záře
 - Radiační pásy kolem Země
 - ISS pod prvním pásem

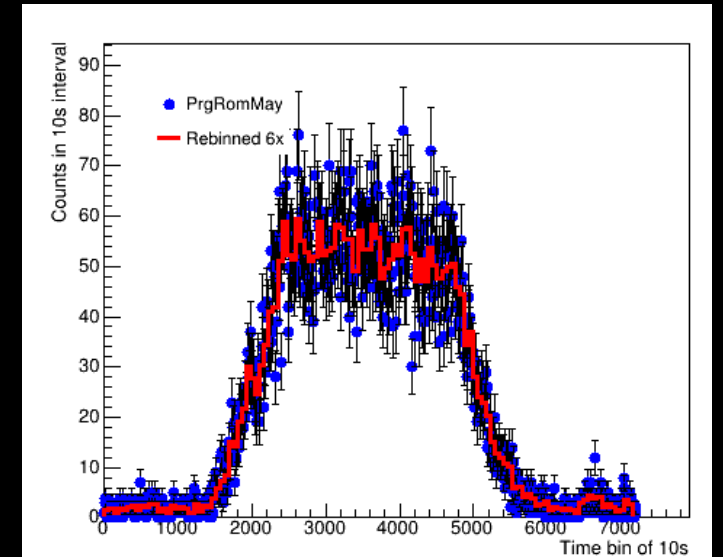
<https://scitechdaily.com/earths-magnetosphere-protecting-our-planet-from-harmful-space-radiation/>



<https://www.collegesidekick.com/study-guides/boundless-physics/motion-of-a-charged-particle-in-a-magnetic-field> https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt

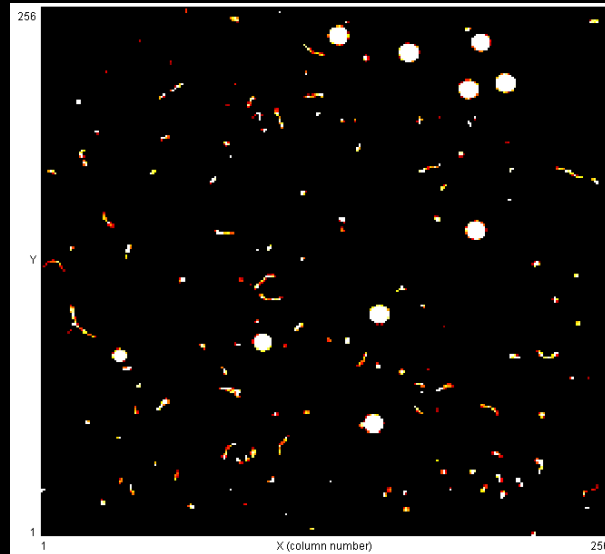
Letadlo

- Let nad Evropou
- 30s expozice



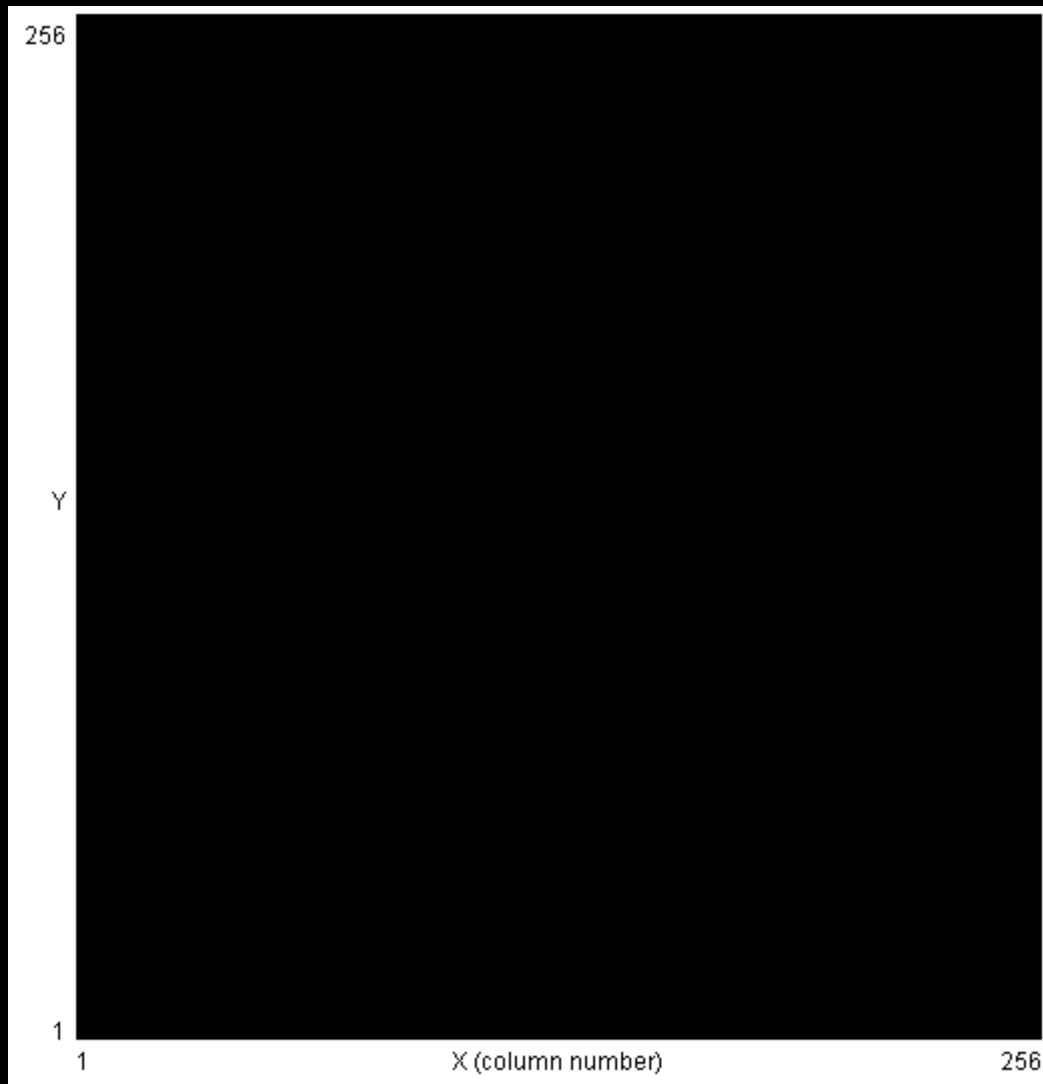
Jeskyně

- Zbrašov/Teplice n/B
- 10min expozice



Svazek pionů

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



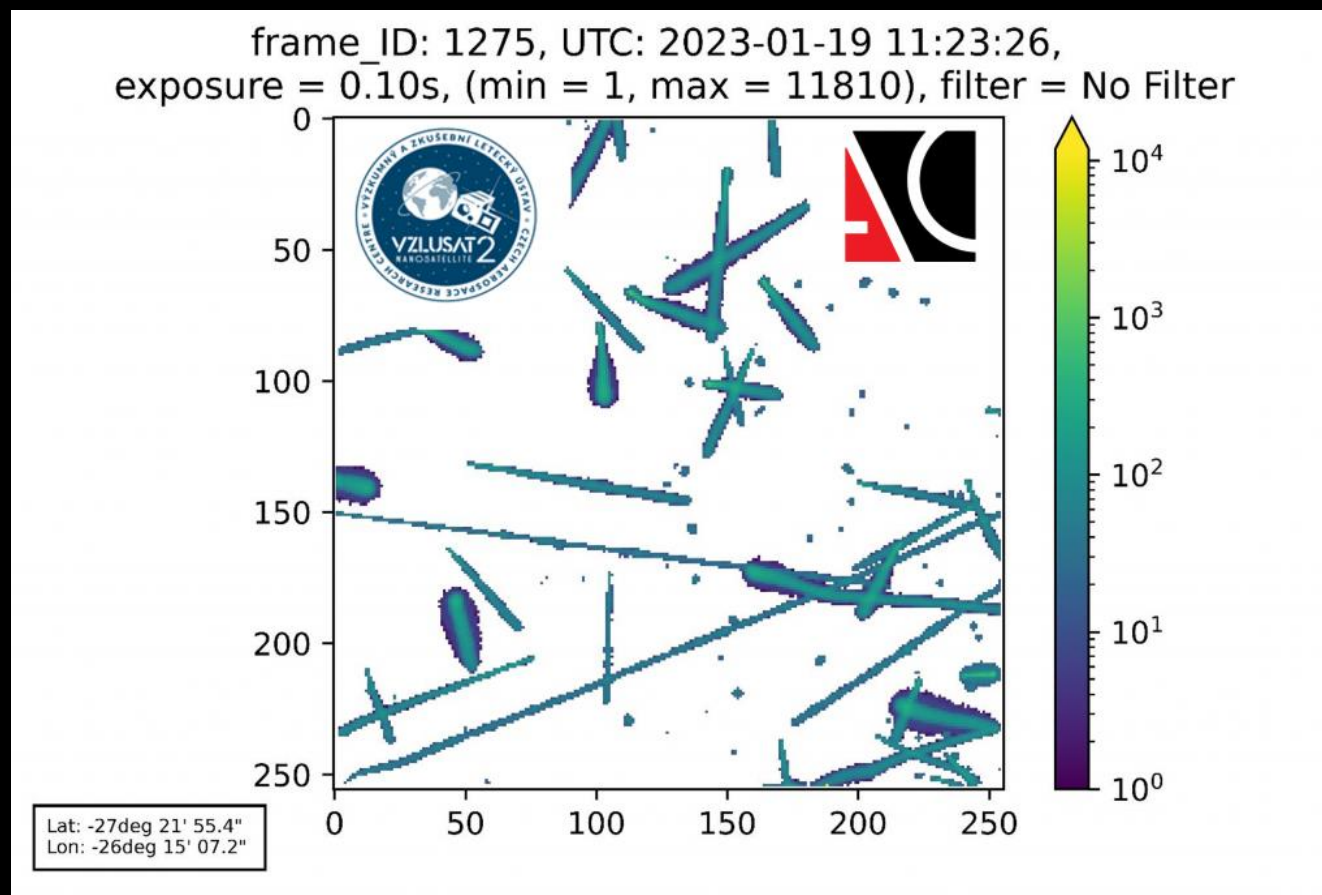
Vesmír

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



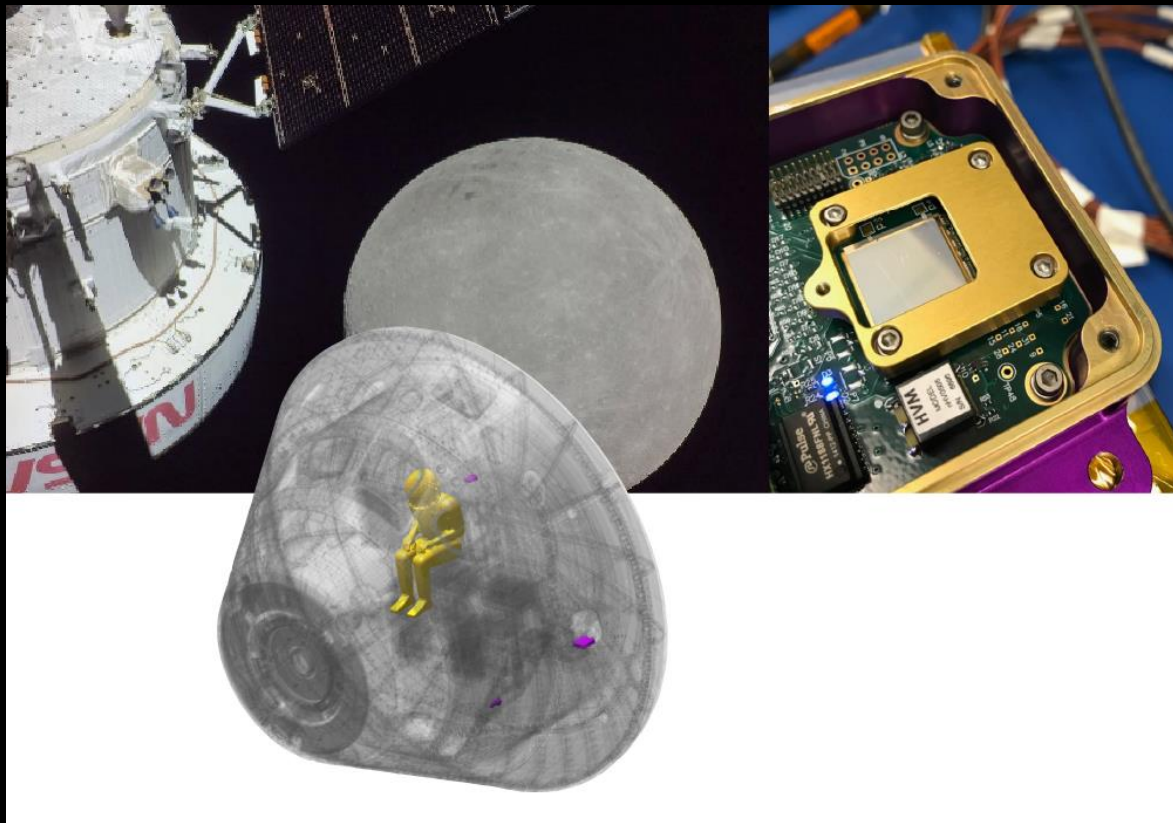
Vesmír

- VZLUSAT-2, 500km



<https://advacam.com/subapp/quantum-imaging-detection/>
<https://advacam.com/application/space/>

Aplikace



<https://advacam.com/application/space/>

Vesmír

- Polaris Dawn I, 12.9.2024, 737km.

0:40:12
EVA ELAPSED TIME



JARED ISAACMAN

SCOTT POTEET

SARAH GILLIS

ANNA MENON



HATCH OPEN



EV1 EGRESS

EVA 1 IN PROGRESS



LIVE 1.7M views

https://www.youtube.com/watch?v=Jd2ZcpirFew&ab_channel=VideoFromSpace

e

Firefly's Blue Ghost, 2025

- Firefly Blue Ghost



Radiace na Měsíci

- Kosmické záření (Galactic Cosmic Rays, GCR)
- Solar Particle Events (SPE)
- Radioaktivní pozadí Měsíce
- Neutrální částice (neutrony, gama) z interakcí GRC/SPE s regolitem.
 - Q: Miony?
- Mise Apollo: dozimetry, celková dávka za cestu, bez časového rozlišení.
- "Deadly Solar Storm"
 - Sci-fi series For All Mankind



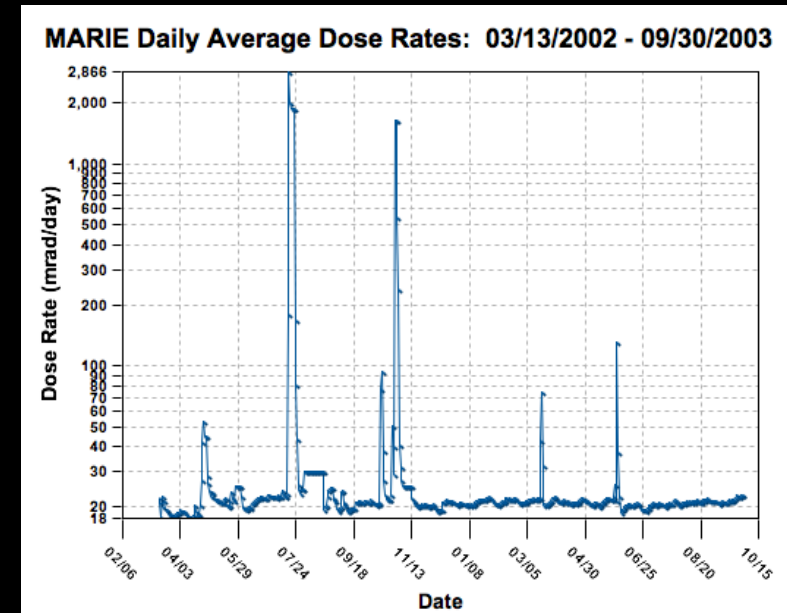
- https://www.youtube.com/watch?v=WLLoe4M6skY&ab_channel=SonyPicturesTelevision

Radiace na Měsíci

- Kosmické záření (Galactic Cosmic Rays, GCR)
- Solar Particle Events (SPE)
- Radioaktivní pozadí Měsíce
- Neutrální částice (neutrony, gama) z interakcí GRC/SPE s regolitem.
 - Q: Miony?
- Mise Apollo: dozimetry, celková dávka za cestu, bez časového rozlišení.
- Real Solar Proton Events
 - by Mars Odyssey space craft during travel from the Earth

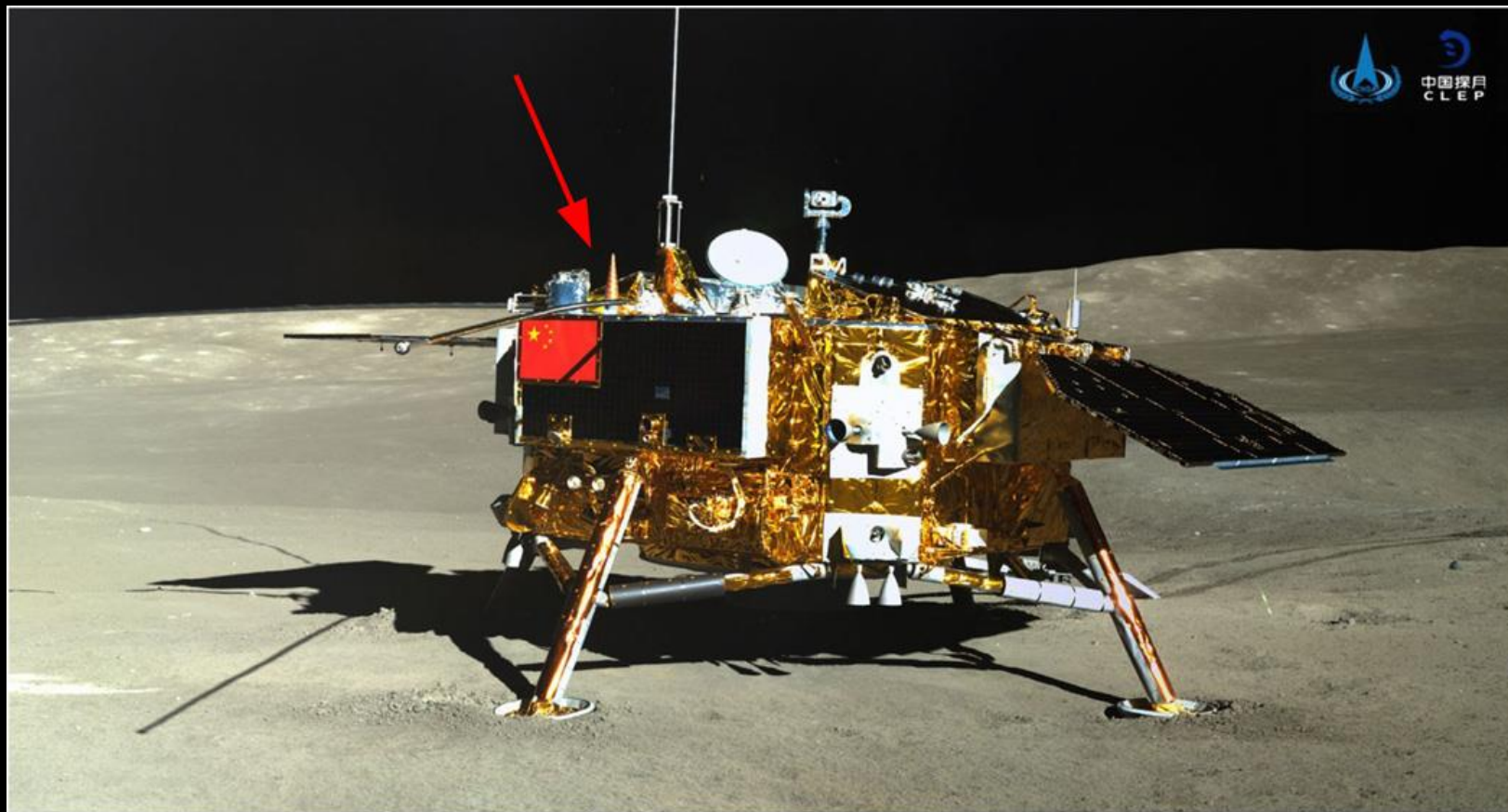
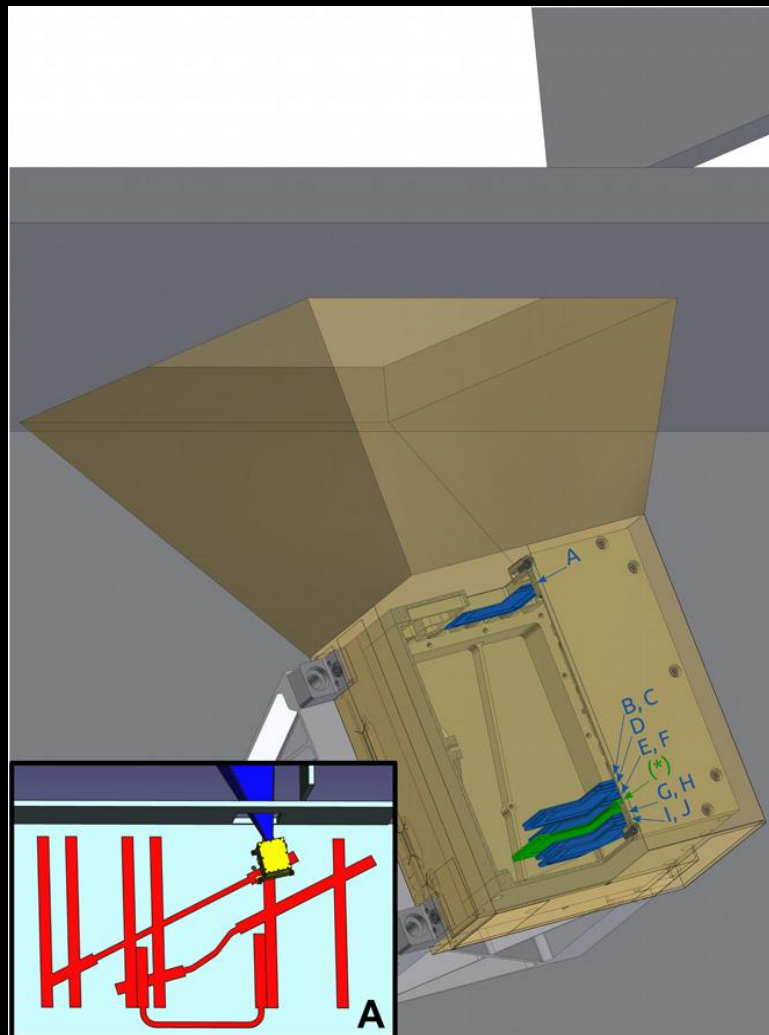
https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_Radiation_Environment_Experiment

https://en.wikipedia.org/wiki/2001_Mars_Odyssey



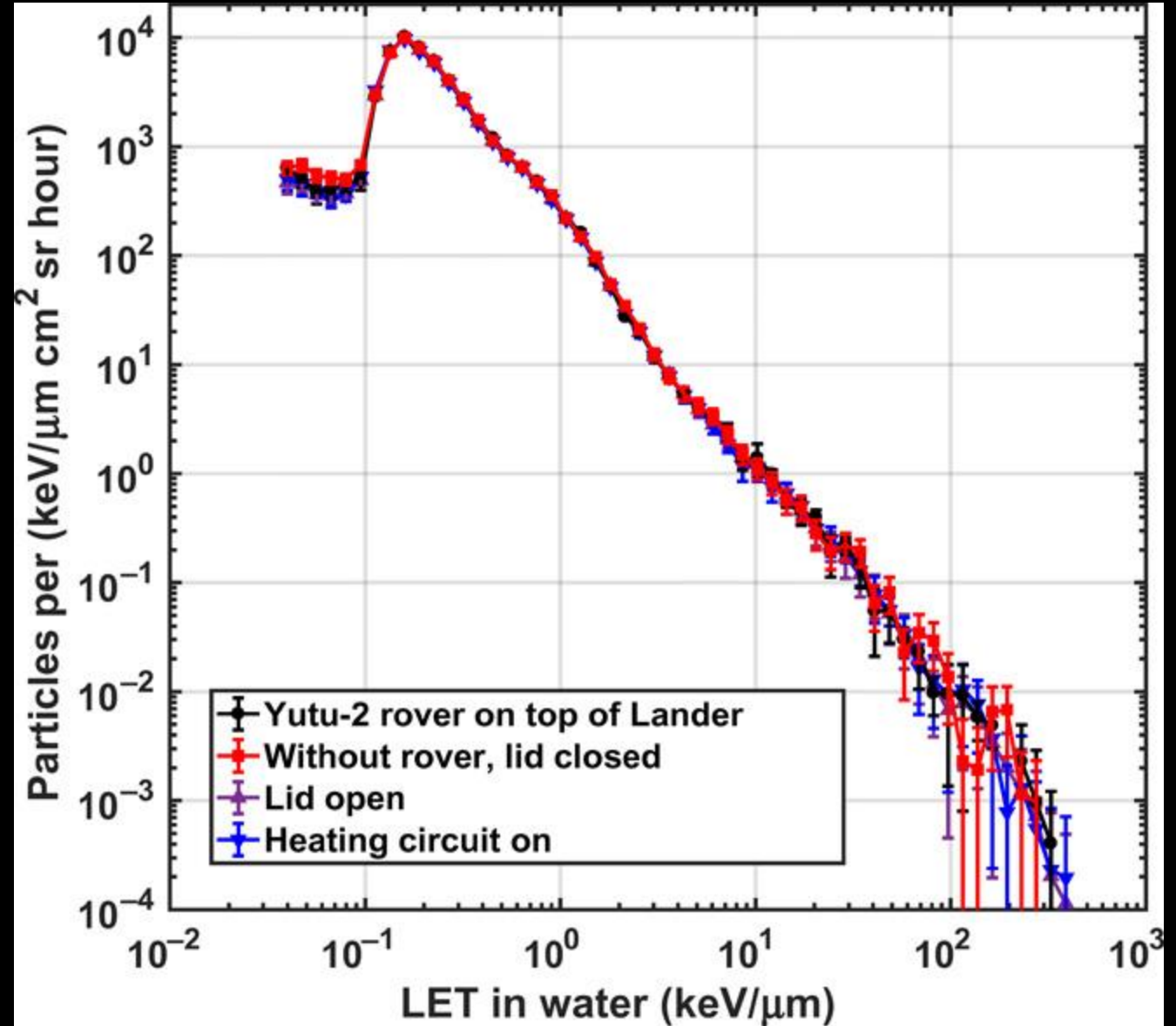
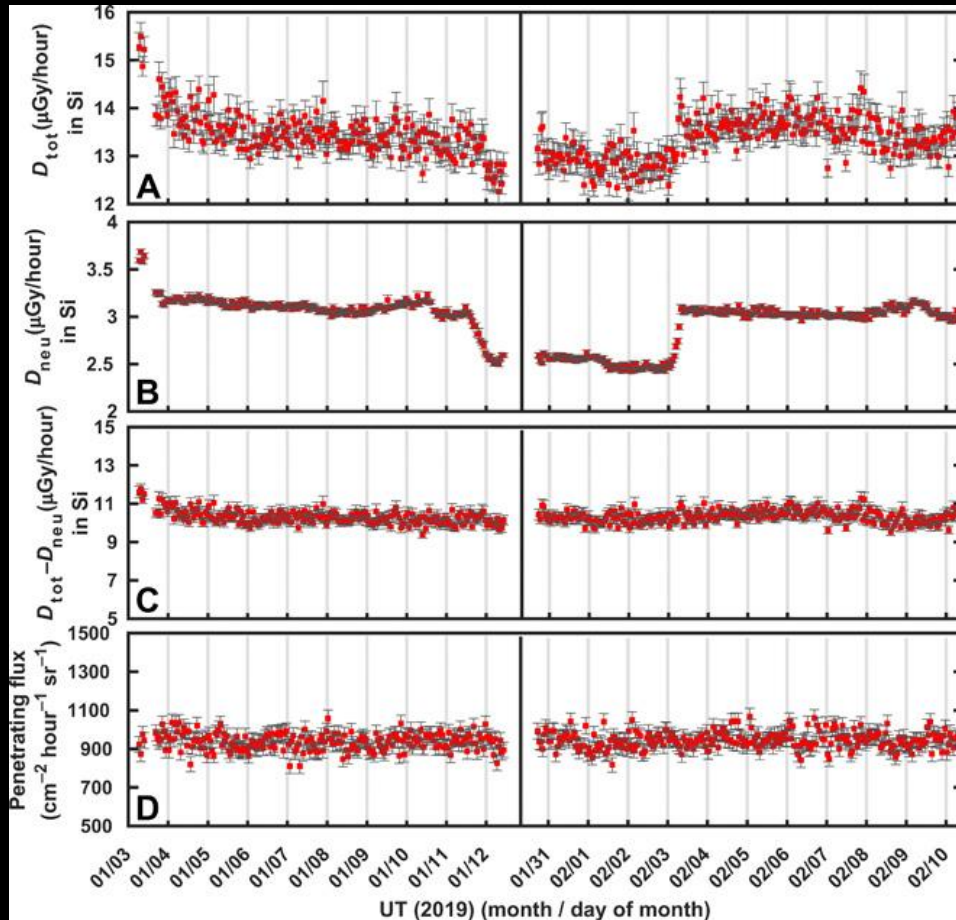
Radiace na Měsíci

- Modul Change, 2019
 - Lunar Lander Neutrons and Dosimetry experiment



Radiace na Měsíci

- LND -- výsledky
- Dávka, tok částic
- LET



Radiace na Měsíci

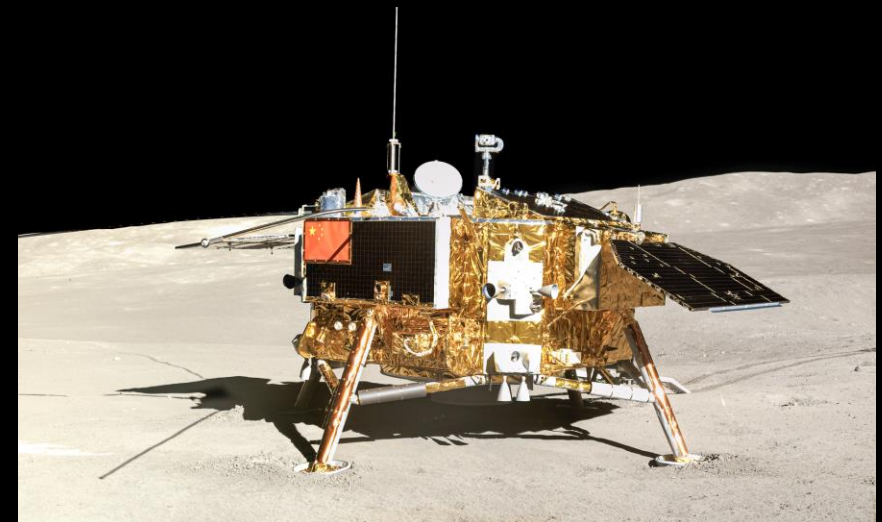
- Lunar Lander Neutrons and Dosimetry experiment
 - Naměřil cca 1400 μSv / den (0.51 Sv/rok)
 - #onthesameday:
 - ISS: 730 μSv / den (z toho 200 μSv /den z protonů in South Atlantic Anomaly)
 - 0.27 Sv/rok, 0.2 Sv/rok bez SAA
 - 0.072 Sv/6 měsíc dle
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Effects_of_ionizing_radiation_in_spaceflight
 - Tj. radiace na Měsíci cca 2.5x vyšší než na ISS (z GCR)
 - Pozadí pro měření: RTG generátor, plutonium



Acknowledgments

We thank the following facilities and personnel for supporting the calibration of LND: CERN/CERF in Geneva, Switzerland; NIRS, HIMAC in Chiba, Japan; ATI in Vienna, Austria; SFE at NSSC China. We thank the Lunar Exploration and Space Engineering Center and O. Angerer from DLR, Germany, for their unwavering support of Chang'E 4 and the China National Space Administration (CNSA) for data acquisition and dissemination. **Funding:** The work reported in

https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator



https://en.wikipedia.org/wiki/Chang'e_4

Radiace na Měsíci

- Modul Change, 2019
 - Lunar Lander Neutrons and Dosimetry experiment

The measured dose is about five to 10 times what passengers on an intercontinental flight from New York City to Frankfurt, Germany, receive when the plane is above parts of the protective atmosphere, Wimmer-Schweingruber says. Though high for Earth-based standards, radiation is one of the known dangers of spaceflight. NASA is legally prohibited from increasing the risk of its astronauts dying from cancer by more than 3%, and these levels remain below that.

Radiace na Měsíci

- Modul Change, 2019
 - Lunar Lander Neutrons and Dosimetry experiment

What's more, the researchers calculated that Moon bases covered with at least 50 centimeters of lunar soil would be sufficient to protect them. A deeper chamber shielded with about 10 meters of water would be enough to protect against occasional solar storms, which can cause radiation levels to spike dramatically. (Between the Apollo 16 and 17 missions, the Sun flared up in a way that could have caused radiation sickness, vomiting, and possibly death had astronauts been unprotected in space at the time.) Such a chamber would need to be reachable within 30 minutes, the amount of advanced warning time that is now possible with monitoring satellites.

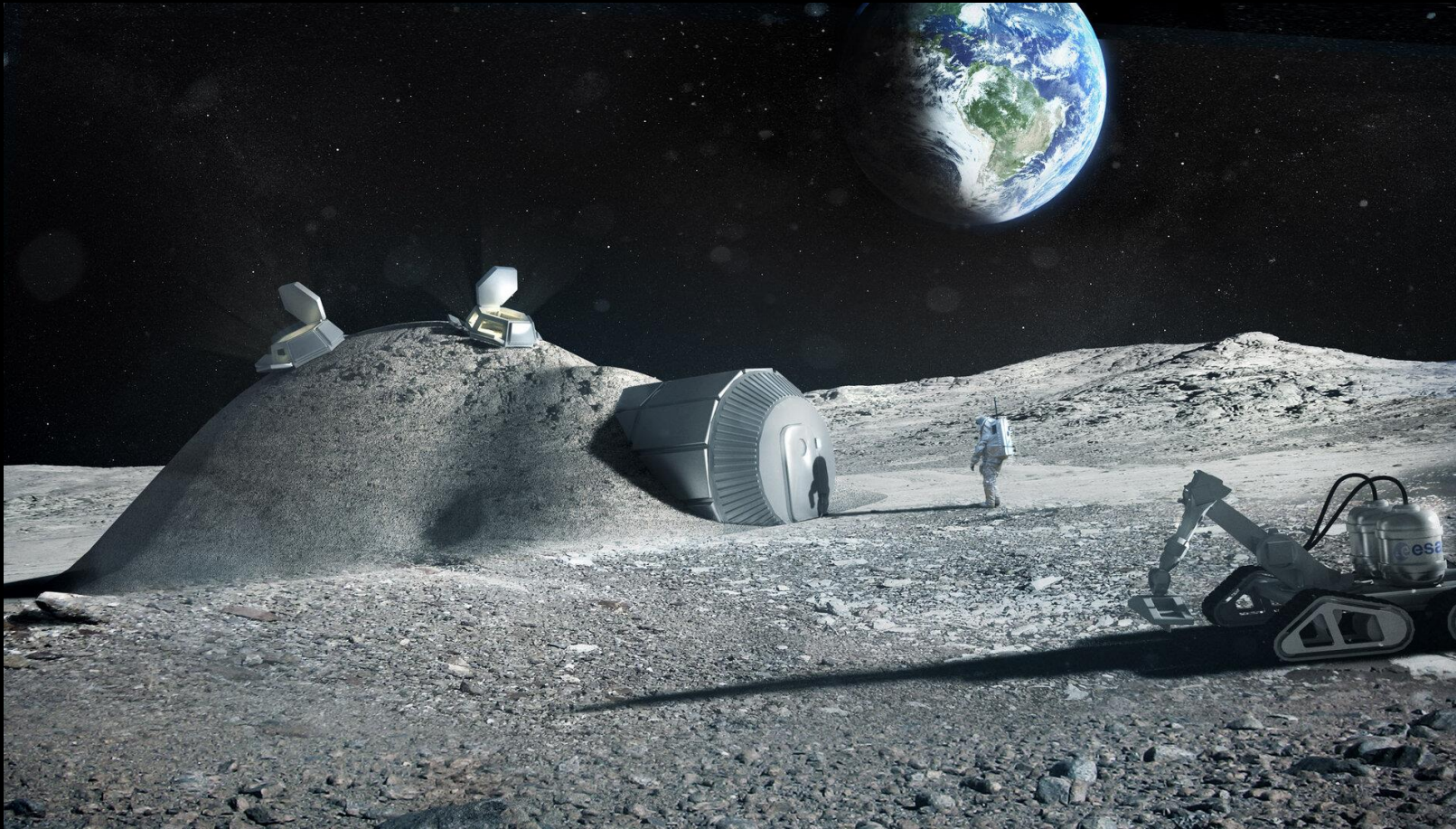
<https://www.science.org/content/article/moon-safe-long-term-human-exploration-first-surface-radiation-measurements-show>

Radiace na Měsíci

- Modul Change, 2019
 - Lunar Lander Neutrons and Dosimetry experiment

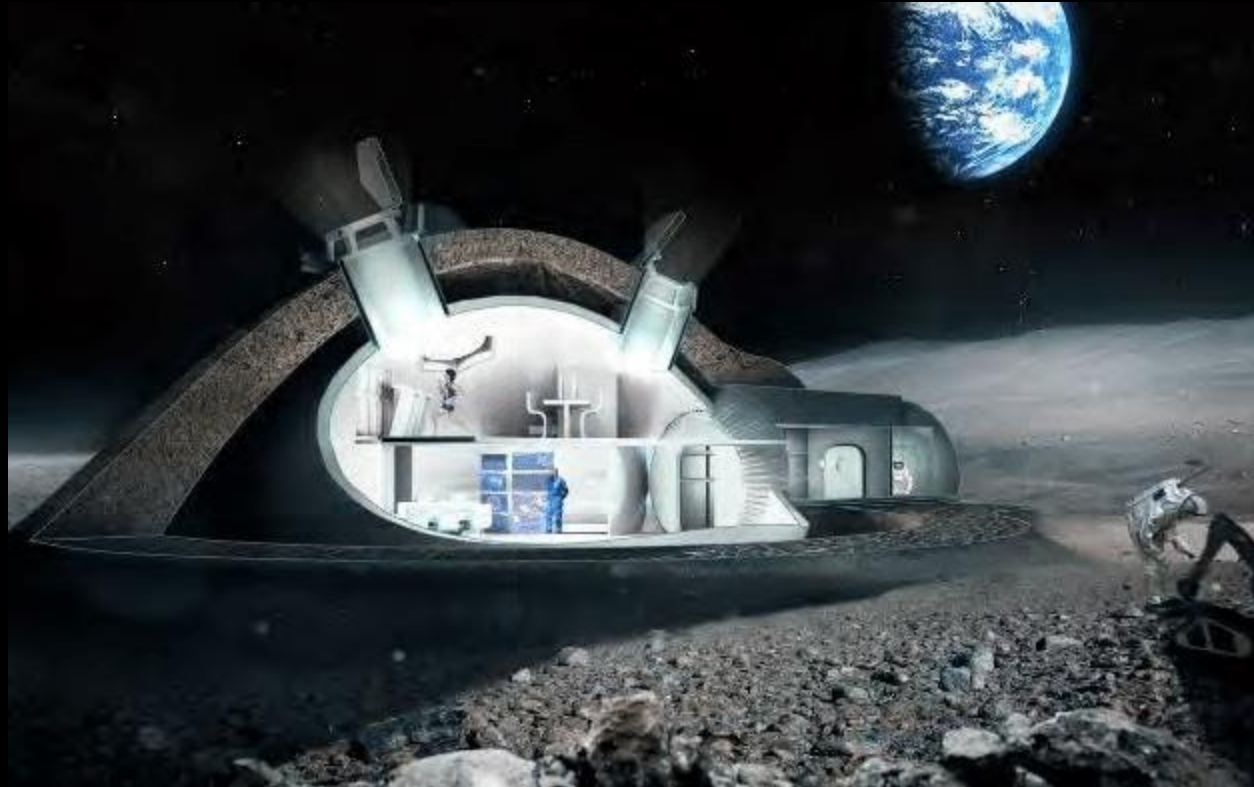
The results are nothing that scientists didn't already suspect, says Francis Cucinotta, who studies the health effects of space radiation at the University of Nevada, Las Vegas, and who wasn't involved in the work. But it's good to have the specific measurements, which verify that if astronauts live in shielded bases, they can spend up to 6 months on the Moon without exceeding NASA's legally mandated limits, he adds.

Život na Měsíci?



https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing

Život na Měsíci?



https://www.researchgate.net/publication/348388603_Regolith-based_additive_manufacturing_for_sustainable_development_of_lunar_infrastructure_-_An_overview

Život na Měsíci?

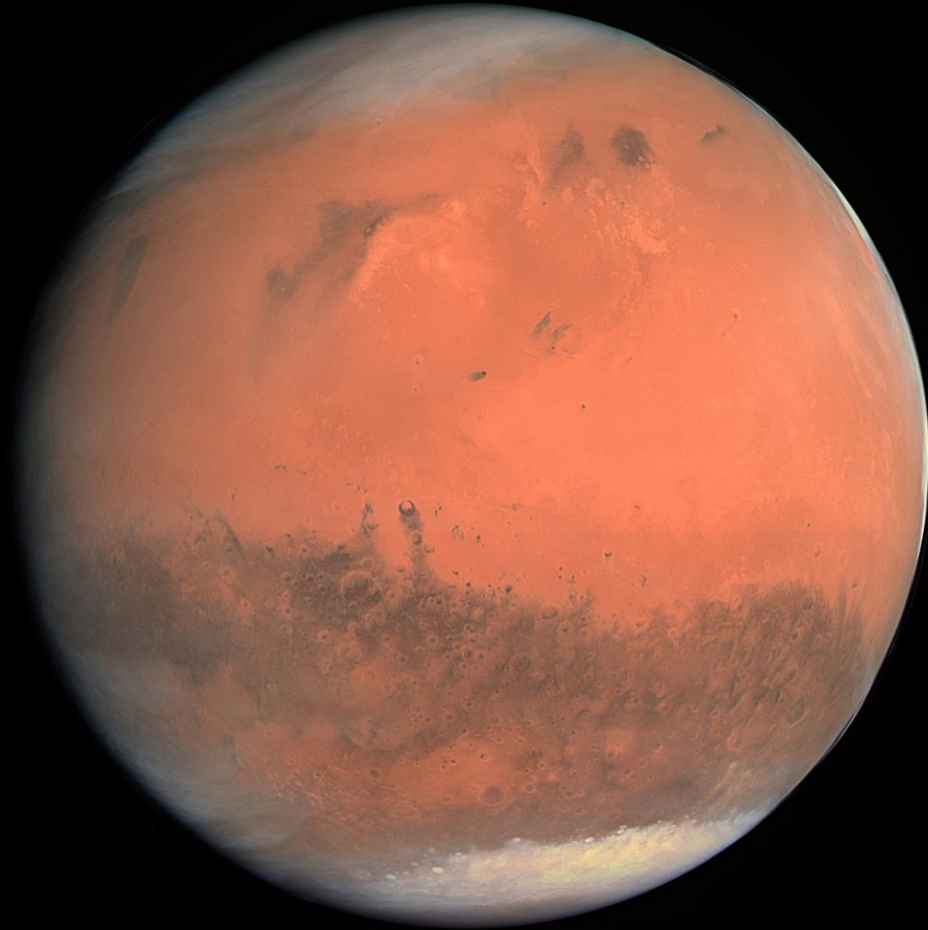


<https://for-all-mankind.fandom.com/wiki/Jamestown>

Moon and Mars



Mars



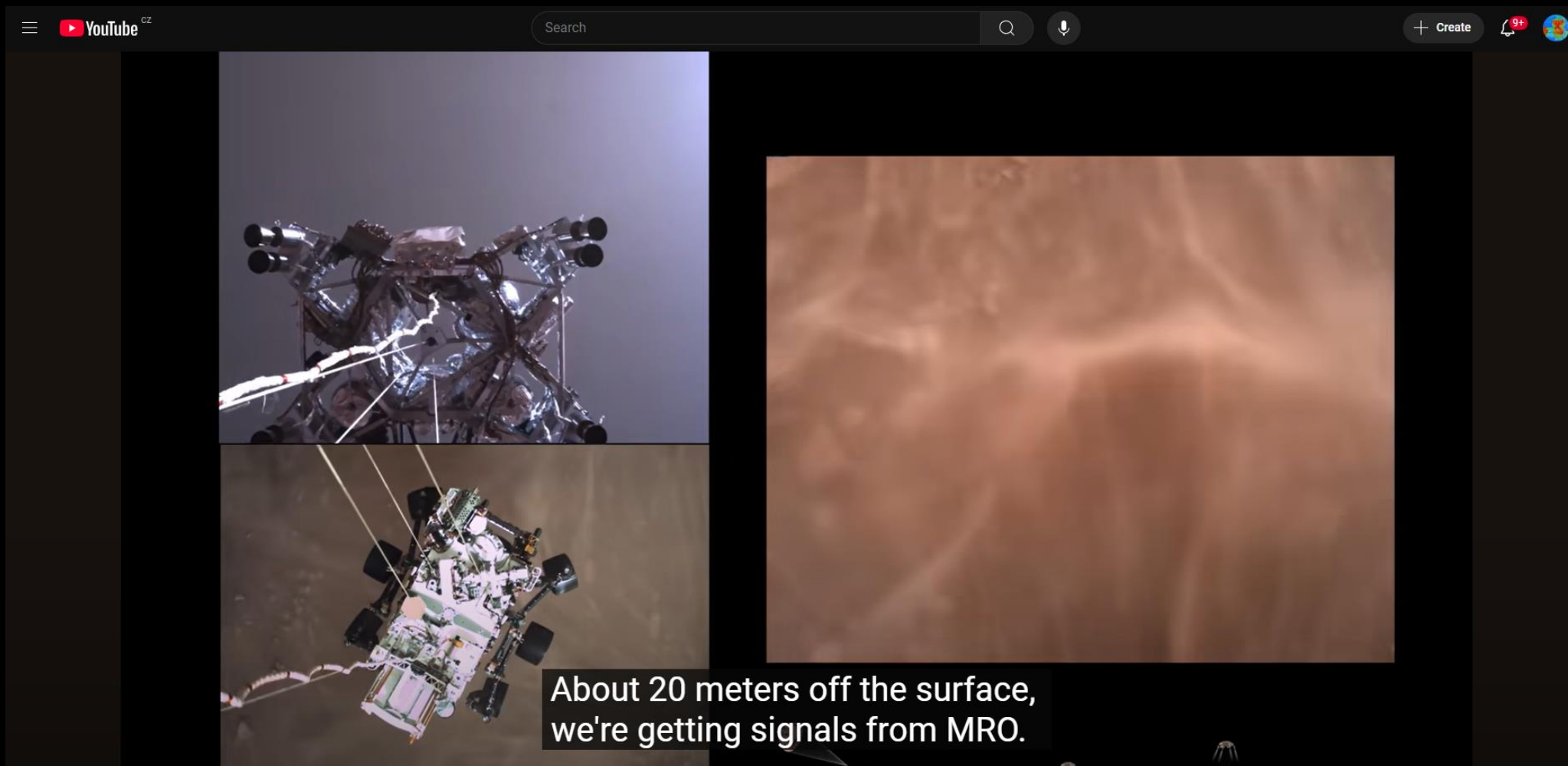
https://cs.wikipedia.org/wiki/Mars_%28planeta%29

Mars :: Perseverance 2021



<https://www.youtube.com/watch?v=4czjS9h4Fpg>

Mars :: Perseverance 2021



The image shows a YouTube video player interface. The top bar includes the YouTube logo, a search bar, and navigation icons. The video content is split into three panels. The top-left panel shows a close-up of the rover's descent stage with its airbags and parachutes. The bottom-left panel shows the rover being lowered by a crane from the lander. The right panel shows a wide, blurry view of the reddish-brown Martian surface. A white text box is overlaid on the bottom-right of the video frame.

About 20 meters off the surface, we're getting signals from MRO.

<https://www.youtube.com/watch?v=4czjS9h4Fpg>

Život na Marsu?



<https://www.humanmars.net/2024/01/mars-base-for-200-people-in-for-all.html>

Život na Marsu?



<https://www.humanmars.net/2024/01/mars-base-for-200-people-in-for-all.html>

Links

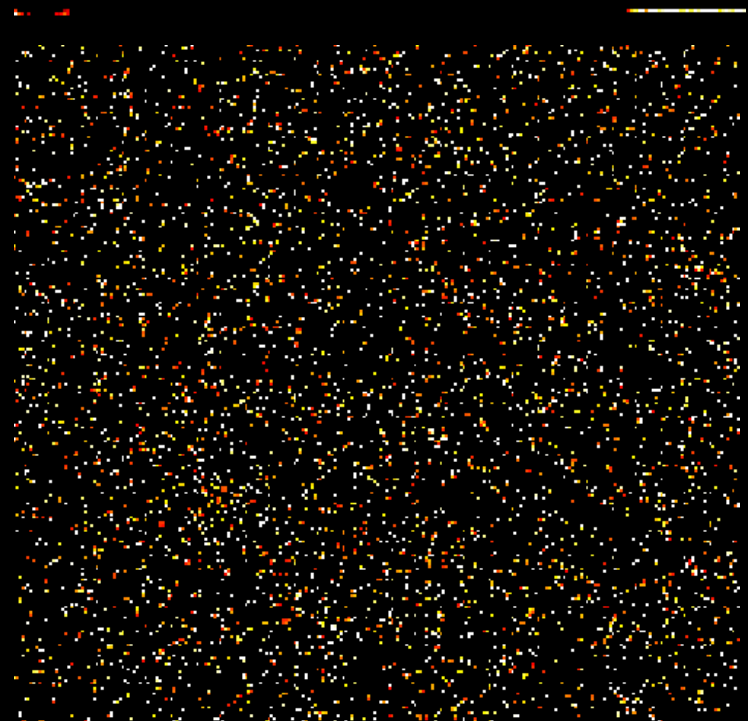
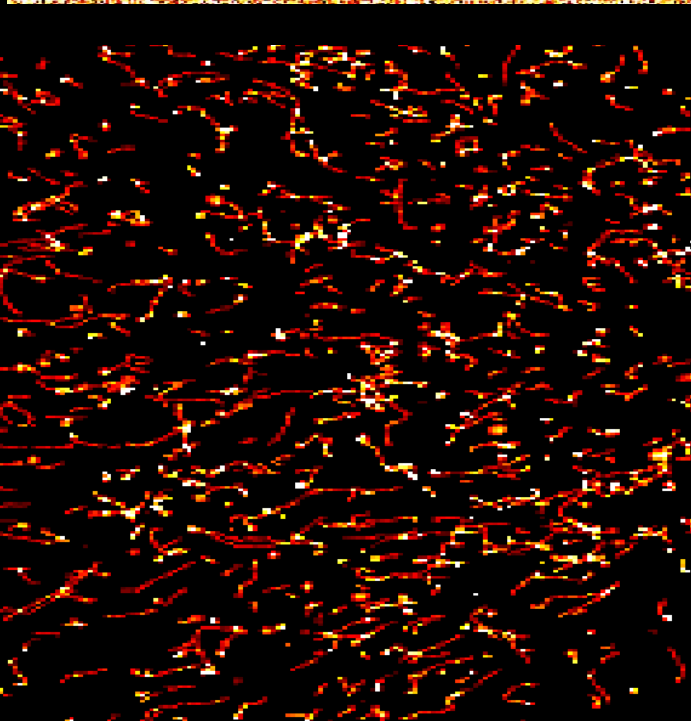
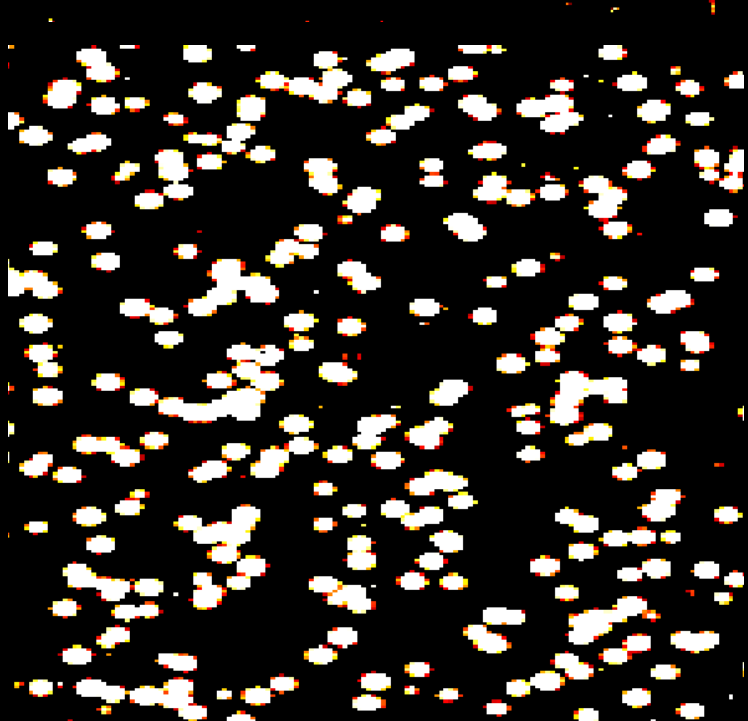
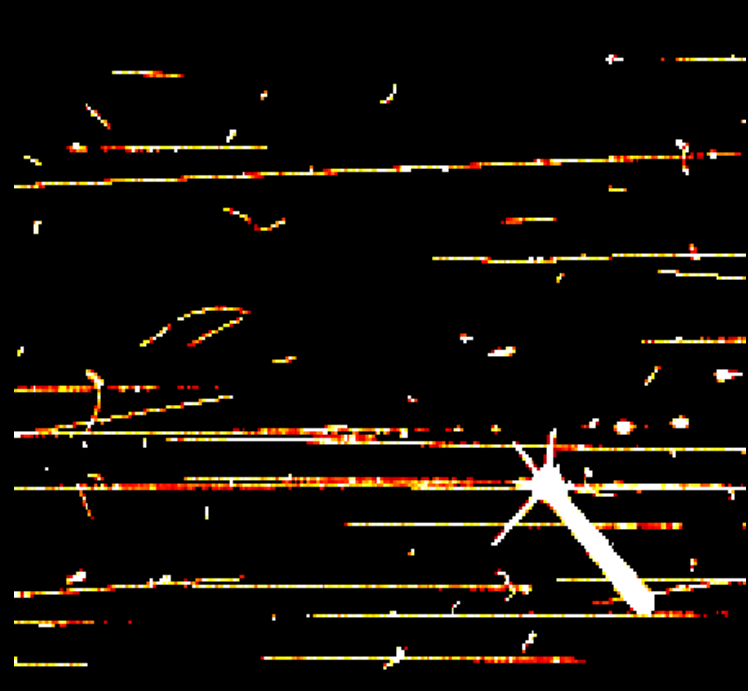
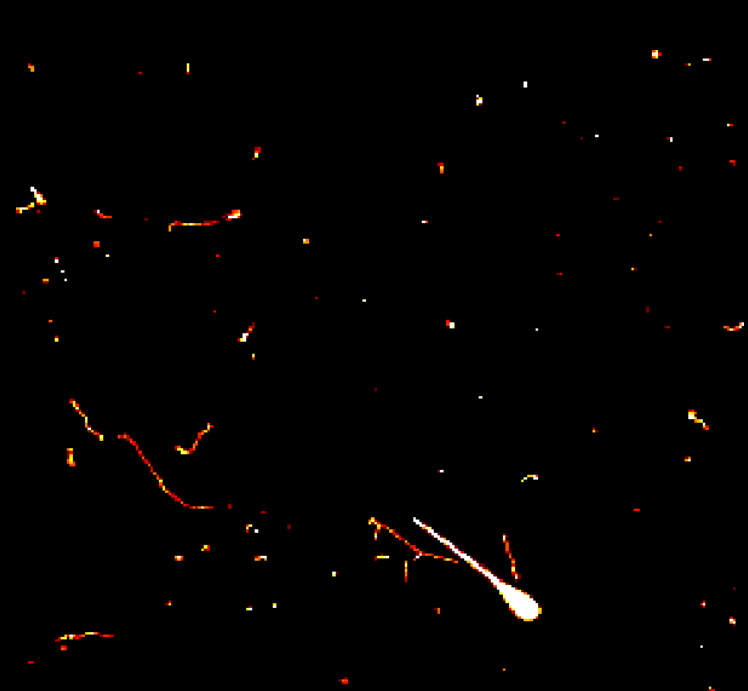
- <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/radiation/radiation-doses/>
- <https://www.spaceweather.com/>
- <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaz1334>
- <https://www.science.org/content/article/moon-safe-long-term-human-exploration-first-surface-radiation-measurements-show>
- <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaz1334>
- ==> PDF: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.aaz1334>
- <https://www.space.com/moon-radiation-dose-for-astronauts-measured>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063312002085>
- <https://www.nature.com/articles/s41598-023-40405-0>
- <https://www.spaceweather.com/>
- <https://marspedia.org/Radiation>

Backup

Aplikace Medipix/Timepix



<https://cerncourier.com/a/first-human-3d-x-ray-in-colour/>
<https://advacam.com/application/biomedical/>



What has CERN/basic research ever done for us?



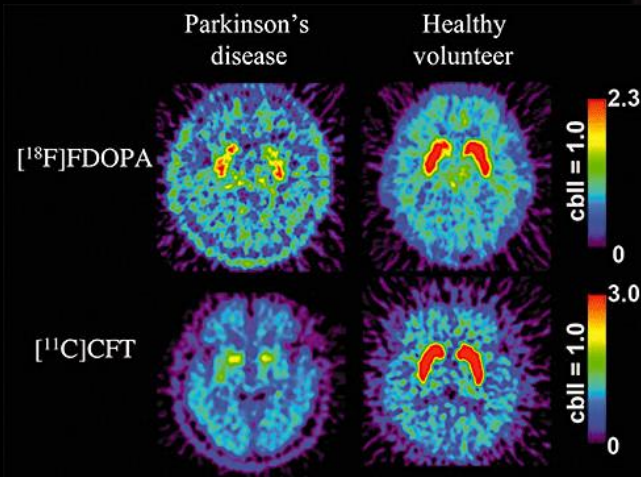
Touch screen



WWW



Monty Python's Life of Brian



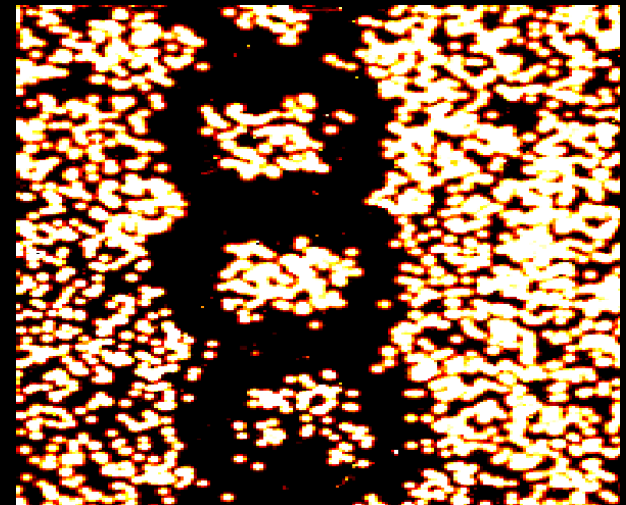
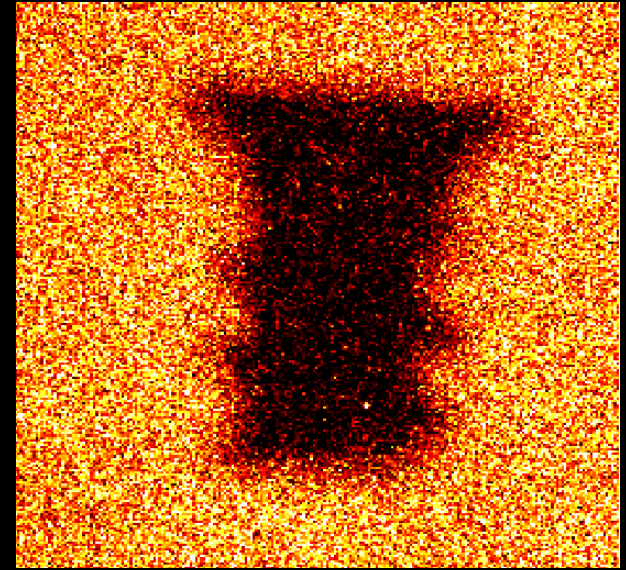
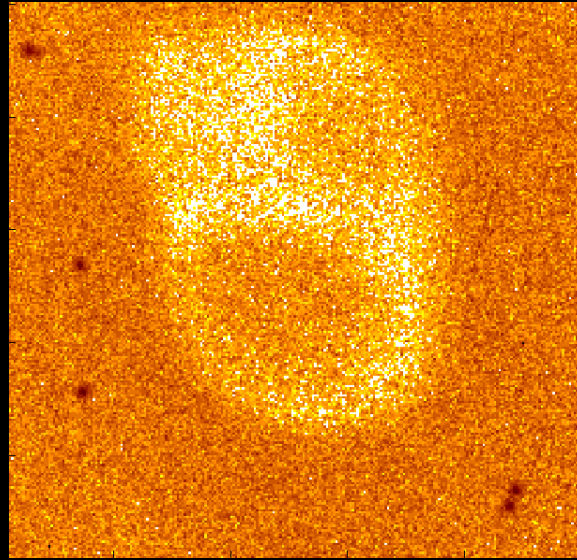
Positron Emission Tomography



Hadron therapy

Princip rentgenu, defektoskopie

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



Interakce fotonů

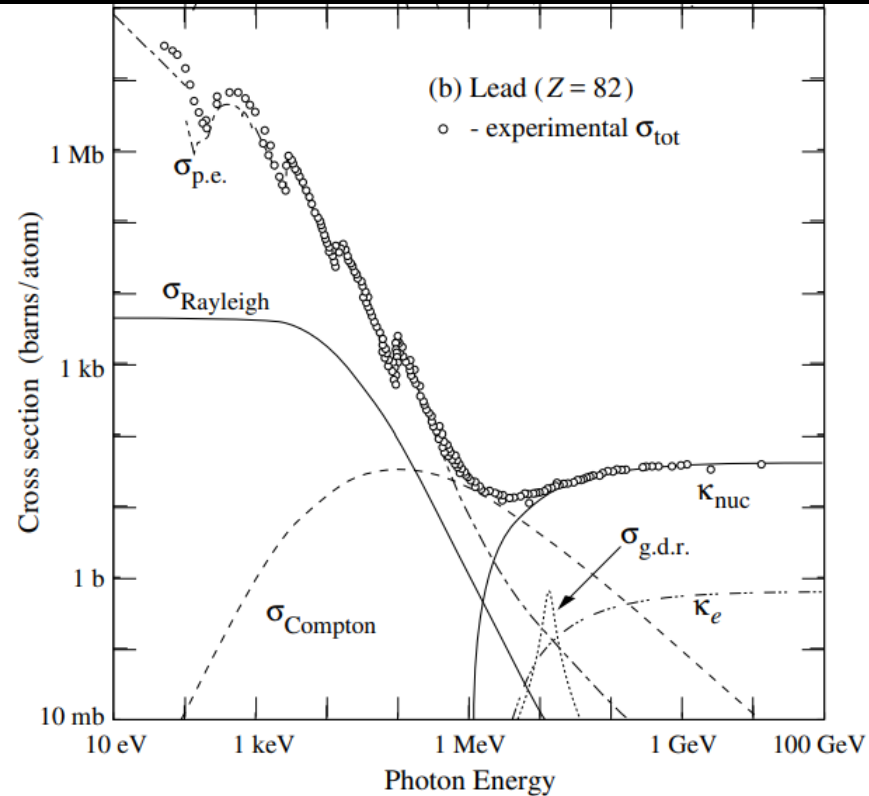


Figure 34.15: Photon total cross sections as a function of energy in carbon and lead, showing the contributions of different processes [50]:

$\sigma_{\text{p.e.}}$ = Atomic photoelectric effect (electron ejection, photon absorption)

σ_{Rayleigh} = Rayleigh (coherent) scattering—atom neither ionized nor excited

σ_{Compton} = Incoherent scattering (Compton scattering off an electron)

κ_{nuc} = Pair production, nuclear field

κ_e = Pair production, electron field

$\sigma_{\text{g.d.r.}}$ = Photonuclear interactions, most notably the Giant Dipole Resonance [51]. In these interactions, the target nucleus is usually broken up.

Ionizační ztráty elektronů

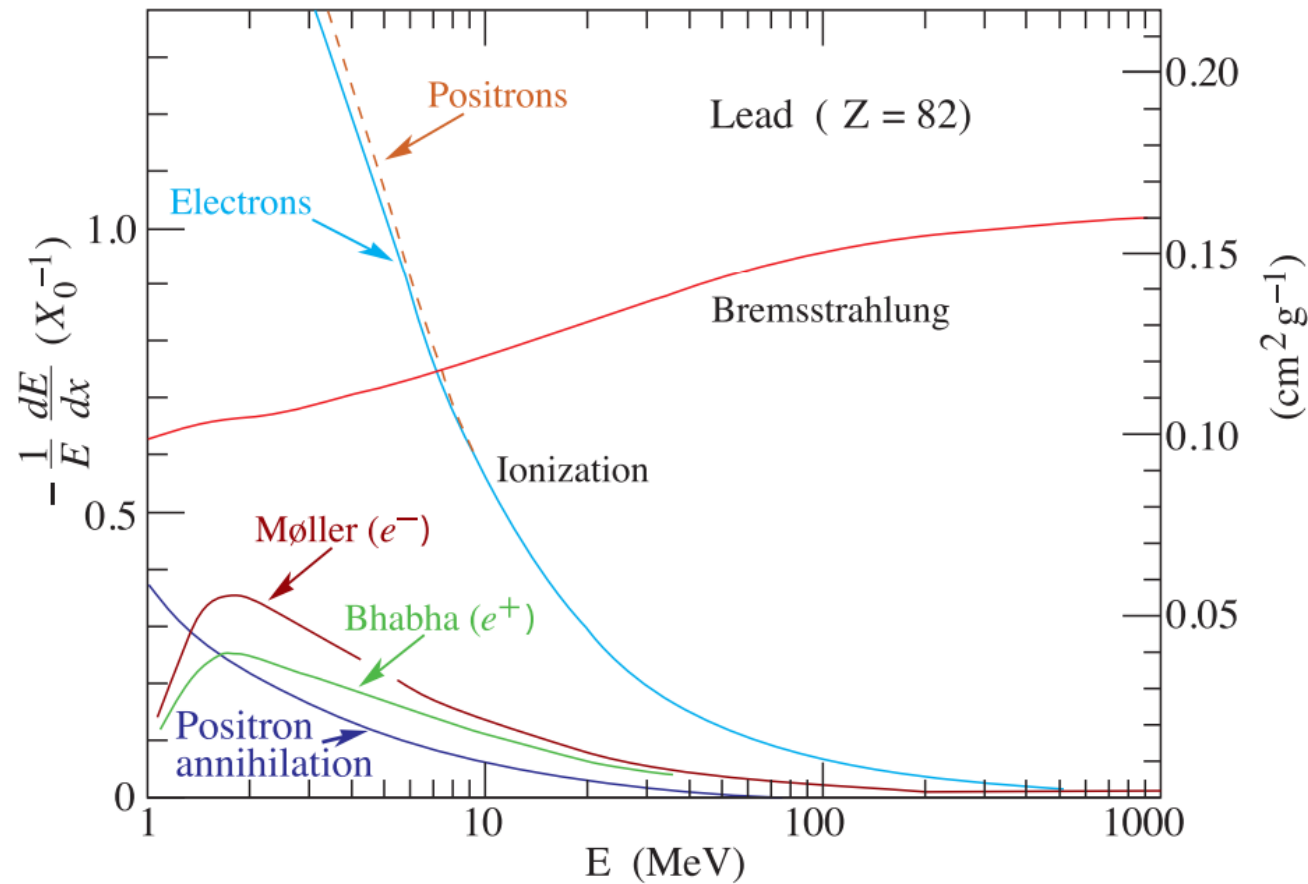
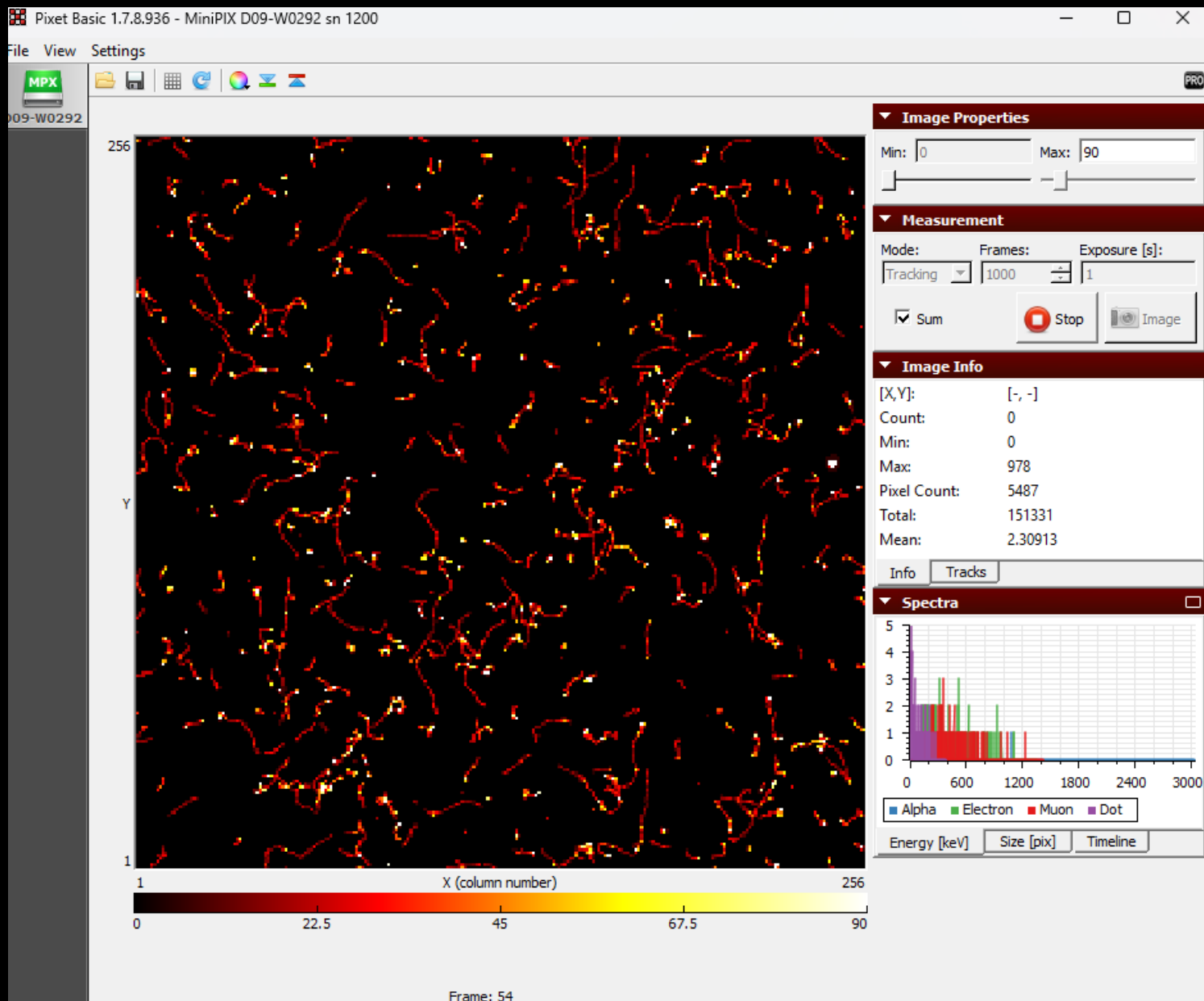


Figure 34.11: Fractional energy loss per radiation length in lead as a function of electron or positron energy. Electron (positron) scattering is considered as ionization when the energy loss per collision is below 0.255 MeV, and as Møller (Bhabha) scattering when it is above. Adapted from Fig. 3.2 from Messel and Crawford, *Electron-Photon Shower Distribution Function Tables for Lead, Copper, and Air Absorbers*, Pergamon Press, 1970. Messel and Crawford use $X_0(\text{Pb}) = 5.82 \text{ g/cm}^2$, but we have modified the figures to reflect the value given in the Table of Atomic and Nuclear Properties of Materials ($X_0(\text{Pb}) = 6.37 \text{ g/cm}^2$).

U glass



U glass, longer

