ლაზერულ-პლაზმური ამაჩქარებლით მიუონების მიღების შესაძლებლობა და მათი დეტექტირების პერსპექტივები

საქართველოს უნივერსიტეტის მაგისტრანტი **რუსუდან კვესიტაძე**

პრეზენტაციის გეგმა

- კვლევის მოტივაცია
- **Laser Wakefield Acceleration (LWFA)** მუშაობის პრინციპი.
- ლაზერით მიუონების წარმოქმნის მექანიზმი.
- მოდელირების შედეგად მიღებული მონაცემების მიმოხილვა.
- მიუონების ექსპერიმენტული კვლევები და დეტექტორის პროტოტიპის შექმნა:
  1. მიუონის სიცოცხლის ხანგრძლივობის გაზომვა
  2. უარყოფითი მიუონის ჩაჭერა ბირთვში.
- შეჯამება და სამომავლო პერსპექტივები.

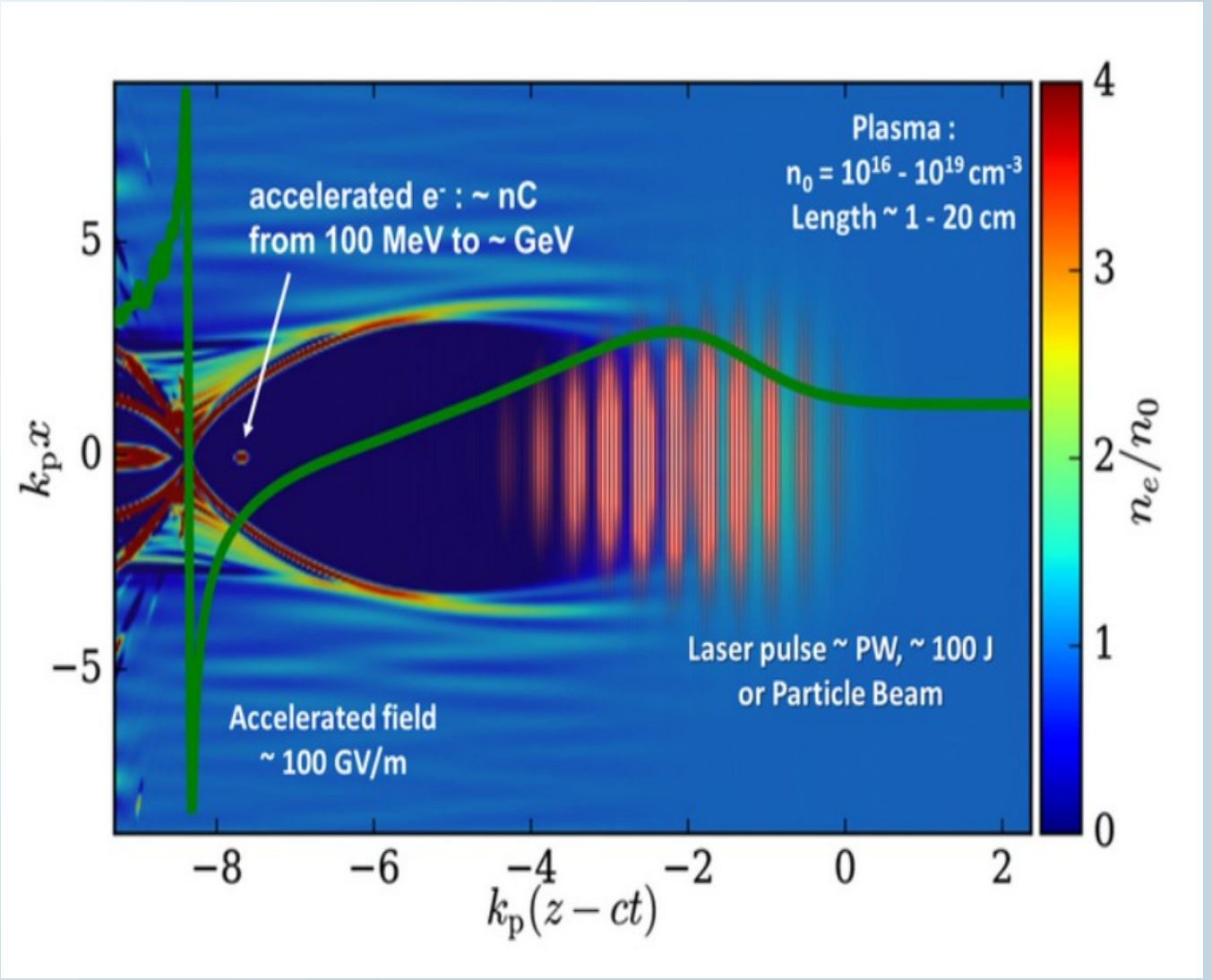
კვლევის მოტივაცია

- **კომპაქტური მიუონური წყაროს შექმნის შესაძლებლობა** (დღეს მიუონების ძირითად წყაროს ამაჩქარებელი და კოსმოსური სხივები წარმოადგენს).
- **მიუონური ტომოგრაფია** — სქელი და მაღალი სიმკვრივის ობიექტების არადესტრუქციული კვლევა.
- **მომავალი მიუონური ამაჩქარებლები** — საჭიროა ინტენსიური და კარგად კონტროლირებადი მიუონური კონები, რომელთა მიღებაც ახალი ტიპის წყაროებით შეიძლება გახდეს შესაძლებელი.

Laser Wakefield Acceleration (LWFA) –

მუშაობის პრინციპი

- **LWFA** იყენებს მაღალი ინტენსივობის, ფემტოწამიან ლაზერულ პულსს, რომელიც ახდენს გაზის იონიზაციას და წარმოქმნის პლაზმას.
- Wakefield-ის ელექტრული ველი: **10–100 GV/m**.
- ელექტრონები მცირე მანძილზე აჩქარდებიან **GeV** ენერგიებამდე.
- ტრადიციული **RF** ამაჩქარებლის კომპაქტური ალტერნატივა.



მიუონების წარმოშობის მექანიზმი

LWFA

- მიიღება აჩქარებული ელექტრონების ნაკადი (~1−10GeV)

დამუხრუჭებითი გამოსხივება

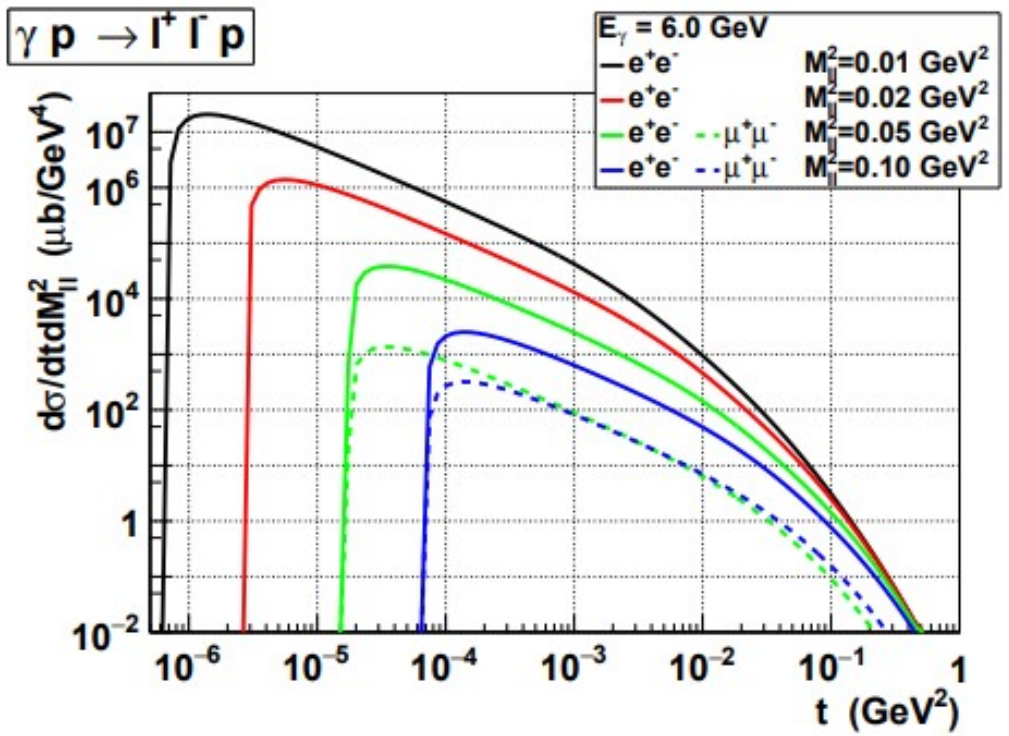
- მძიმე სამიზნე (**Pb** ან **W**)
- დამუხრუჭებითი გამოსხივებით ფოტონების წარმოქმნა,
- ელექტრომაგნიტური კასკადის დაწყება.
- $(e^-)+Z \rightarrow (e^-)+\gamma+Z$

Bethe-Heitler პროცესი

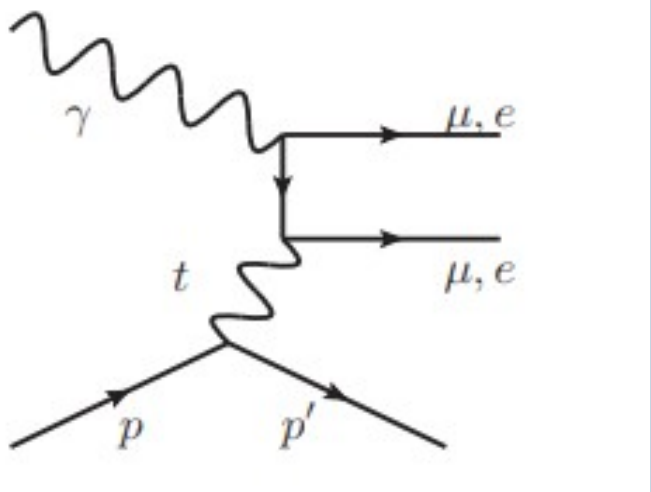
- მაღალი ენერგიის მქონე ფოტონი ბირთვის ელექტრომაგნიტურ ველში მოძრაობის დროს წარმოქმნის ელექტრონ-პოზიტრონის წყვილს.
- $\gamma+Z \rightarrow (e^-) + (e^+) +Z$

Bethe-Heitler პროცესი

- ამ გრაფიკზე შედარებულია **Bethe–Heitler**-ის პროცესით ელექტრონ-პოზიტრონული და მიუონური წყვილების წარმოქმნის ეფექტური კვეთები. მიუონური წყვილის წარმოქმნის ალბათობა გაცილებით მცირეა, რადგან მისი მასა ელექტრონის მასაზე დაახლოებით 207-ჯერ მეტია. ამიტომ $\mu^+\mu^-$ წყვილის მისაღებად საჭიროა უფრო მაღალი ენერგიის ფოტონები. **Bethe–Heitler**-ის პროცესით მიუონური წყვილების წარმოქმნა ელექტრონ-პოზიტრონულ წყვილებთან შედარებით დაახლოებით 40 000-ჯერ უფრო იშვიათად

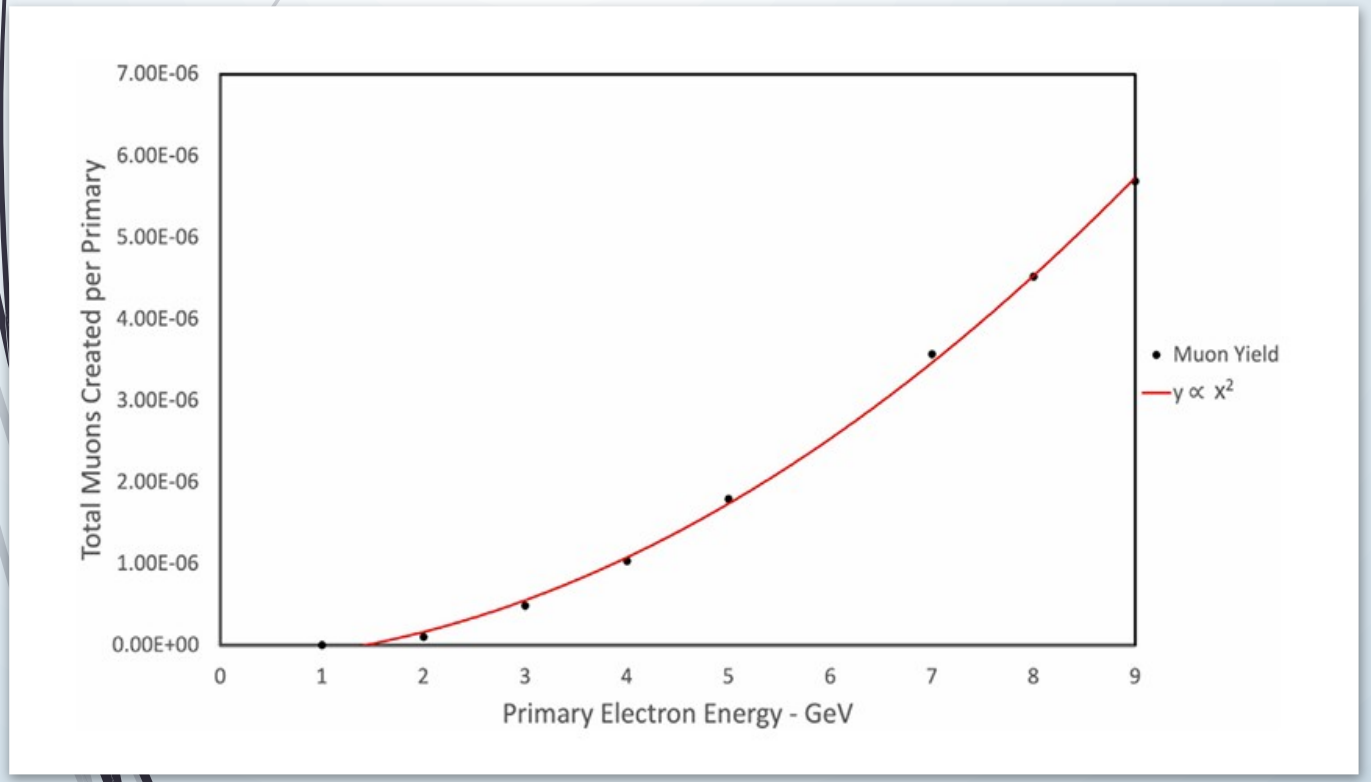


$$\sigma \propto \frac{Z^2\alpha^3}{m_l^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma_{\mu^+\mu^-}}{\sigma_{e^+e^-}} \approx \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 \approx 2.3 \times 10^{-5}$$



რიცხვითი სიმულაციის შედეგები (FB-PIC + FLUKA)

- 2 სმ ტყვიის(Pb) სამიზნე.
- ერთი პირველადი ელექტრონისგან წარმოქმნილი მიუონების საშუალო რაოდენობა.



Pb სამიზნეში წარმოქმნილი ელექტრონების, პოზიტრონებისა და γ კვანტების ენერგეტიკული სპექტრი.

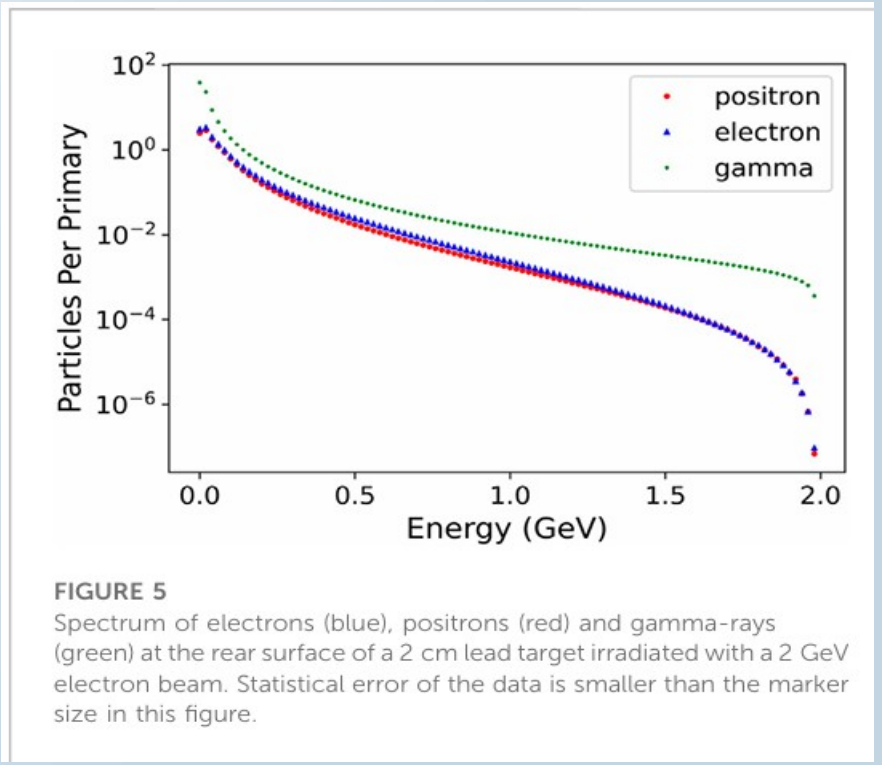


FIGURE 5
Spectrum of electrons (blue), positrons (red) and gamma-rays (green) at the rear surface of a 2 cm lead target irradiated with a 2 GeV electron beam. Statistical error of the data is smaller than the marker size in this figure.

რიცხვითი სიმულაციის შედეგები (FB-PIC + FLUKA)

- მიუონის ენერგეტიკული სპექტრი 2, 5, 10 GeV ელექტრონული კონისთვის. ლურჯი წყვეტილი ხაზი წარმოადგენს რელატივისტური მაქსველის განაწილებით მიღებულ ფიტს, ხოლო მითითებული “ტემპერატურა” ამ ფიტის ეფექტური პარამეტრია.

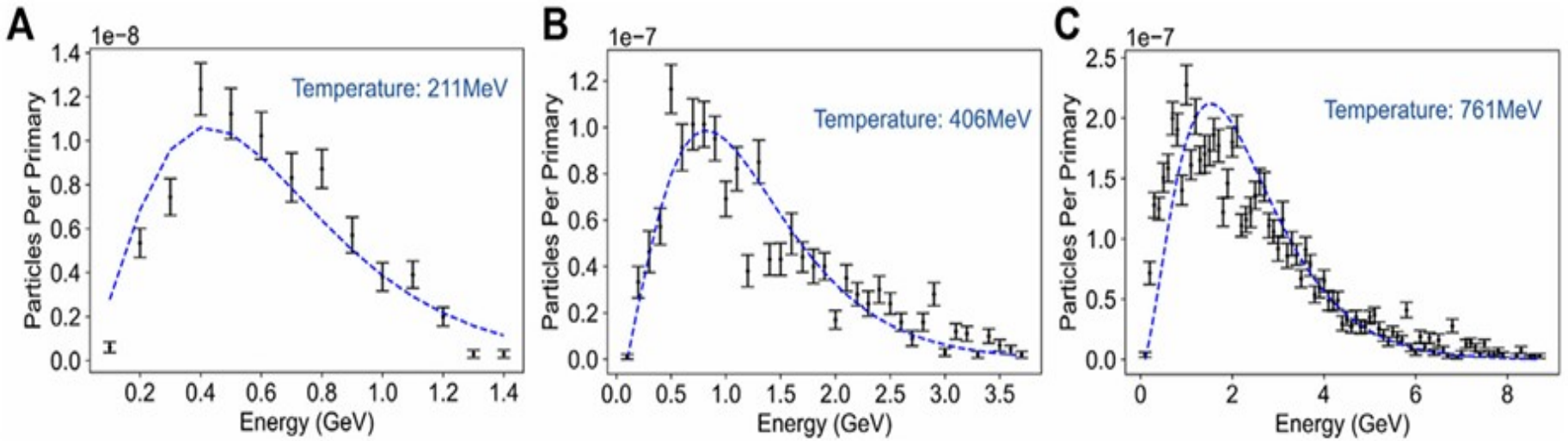


FIGURE 3
Muon energy spectra for **(A)** 2GeV **(B)** 5GeV **(C)** 10GeV primary electron energies incident on 2 cm of lead. All simulated data are well fitted by a relativistic Maxwellian distribution (dashed blue lines). Both positive and negative muons are considered.

კოსმოსური მიუონები და მათი წარმოქმნის მექანიზმი

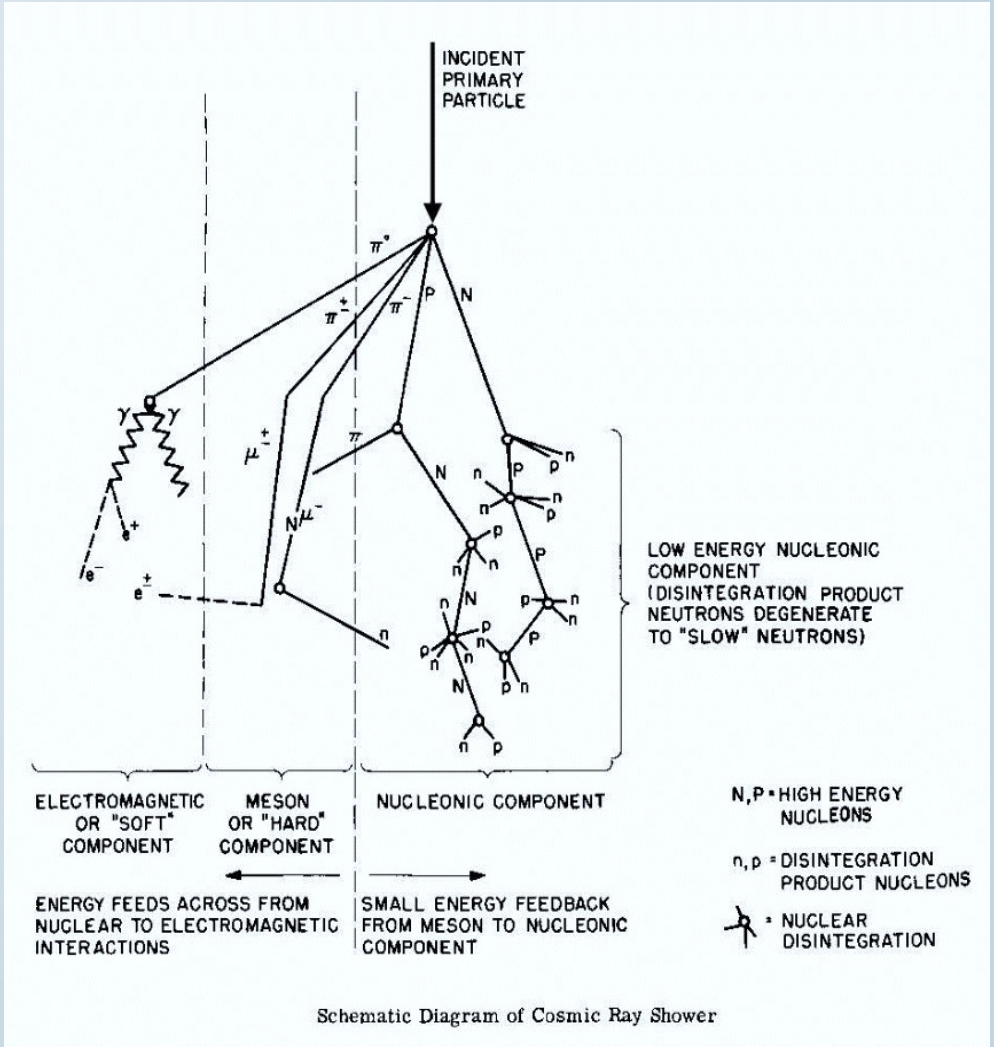
- პირველადი კოსმოსური სხივები, რომელთა 90% წარმოადგენს მაღალ ენერგეტიკული პროტონები (10^8 - 10^{20} eV) ურთიერთქმედებენ ატმოსფეროს ზედა ფენებში არსებულ აზოტისა და ჟანგბადის ბირთვებთან, ეს შეჯახება იწვევს მეორადი ნაწილაკების კასკადის წარმოქმნას. ამ პროცესის შედეგად წარმოიქმნება დიდი რაოდენობით პიონები და კაონები. მიუონები უპირატესად წარმოიქმნება მეორადი დამუხტული პიონებისა და კაონების დაშლის შედეგად. ყველაზე მნიშვნელოვანი დაშლის არხები და მათი შესაბამისი დაშლის ალბათობა იქნება:

$$\pi^{\pm} \to \mu^{\pm} \overset{(-)}{\nu_\mu} \quad (\sim 100\%)$$

$$K^{\pm} \to \mu^{\pm} \overset{(-)}{\nu_\mu} \quad (\sim 63.5\%)$$

$$\mu^- \to e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$



Schematic Diagram of Cosmic Ray Shower

კოსმოსური მიუონები და მათი წარმოქმნის მექანიზმი

- მიუხედავად იმისა, რომ მიუონების საკუთარი საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობა მხოლოდ 2.2μs-ია, დროის შენელების (time dilation) ეფექტის გამო მათი სიცოცხლის ხანგრძლივობა ლაბორატორიულ სისტემაში იზრდება, რის გამოც მიუონები აღწევენ დედამიწის ზედაპირზე და შესაძლებელი ხდება მათი დეტექტირება.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\gamma = \frac{E}{m}$$

ლორენცის ფაქტორი - γ დამოკიდებულია ნაწილაკის სიჩქარეზე და გვიჩვენებს
რამდენად ძლიერია ფარდობითობის ეფექტი მოცემული სიჩქარისთვის.

$$\tau = \gamma \tau_0$$

მიუონის სიცოცხლის ხანგრძლივობა ლაბორატორიულ სისტემაში

$$\gamma = \frac{2106}{105.7} \approx 20$$

$$\tau = \gamma \tau_0$$

$$\tau = 20 \times 2.2\,\mu s$$

$$\tau \approx 44\,\mu s$$

$$\gamma = \frac{2105.7}{105.7} \approx 20$$

$$\tau \approx 44\,\mu s$$

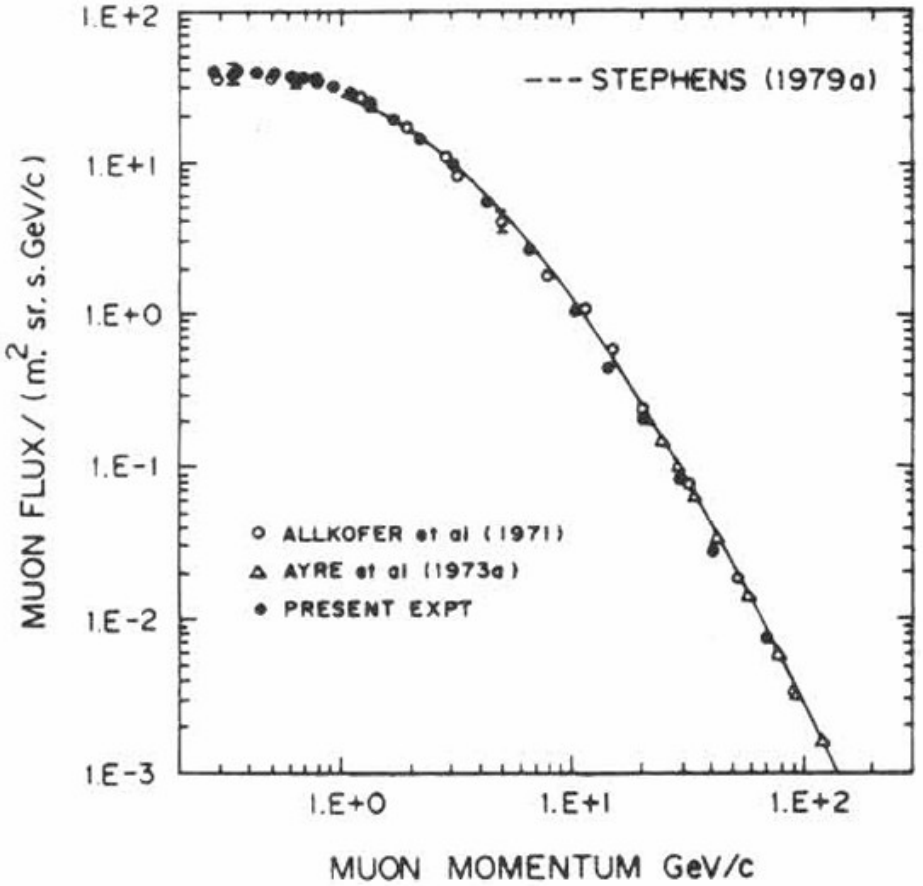
$$d \approx 13.2\,km$$

ხანგრძლივობის გაზომვა და დეტექტორის პროტოტიპი

- **დაბალენერგეტიკული** კოსმოსური მიუონების საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობის გაზომვა.
- მიუონის დაშლა შემთხვევითი პროცესია, მაგრამ მისი დაშლის ალბათობა ერთეულ დროში მუდმივია. სწორედ ამ თვისების გამო მრავალი მიუონის დაშლის დროების განაწილება ექსპონენციალურ კანონზომიერებას ემორჩილება.

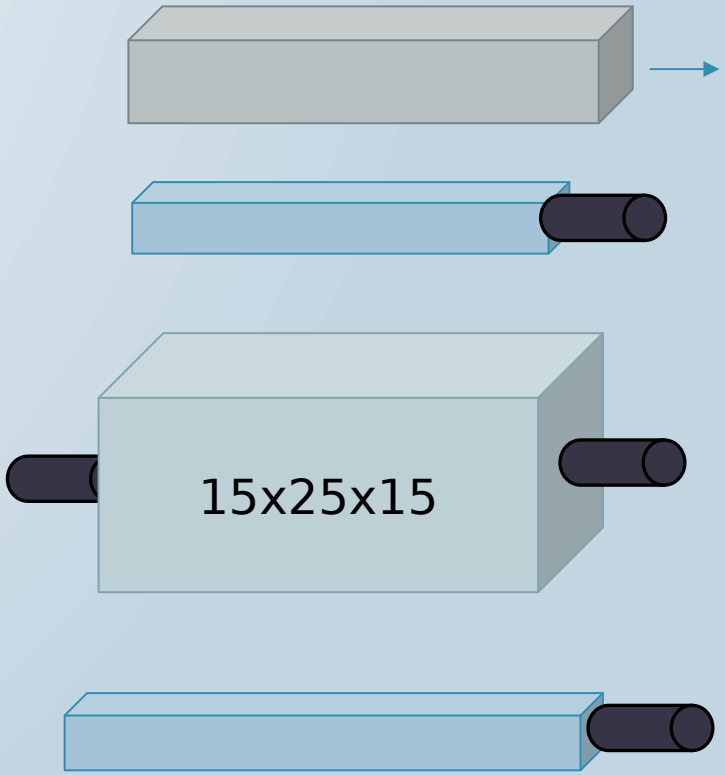
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} + B.$$

- $\mathbf{N_0}$ - საწყისი ამპლიტუდა, **B** - შემთხვევითი ფონი, **τ** - მიუონის საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობა.

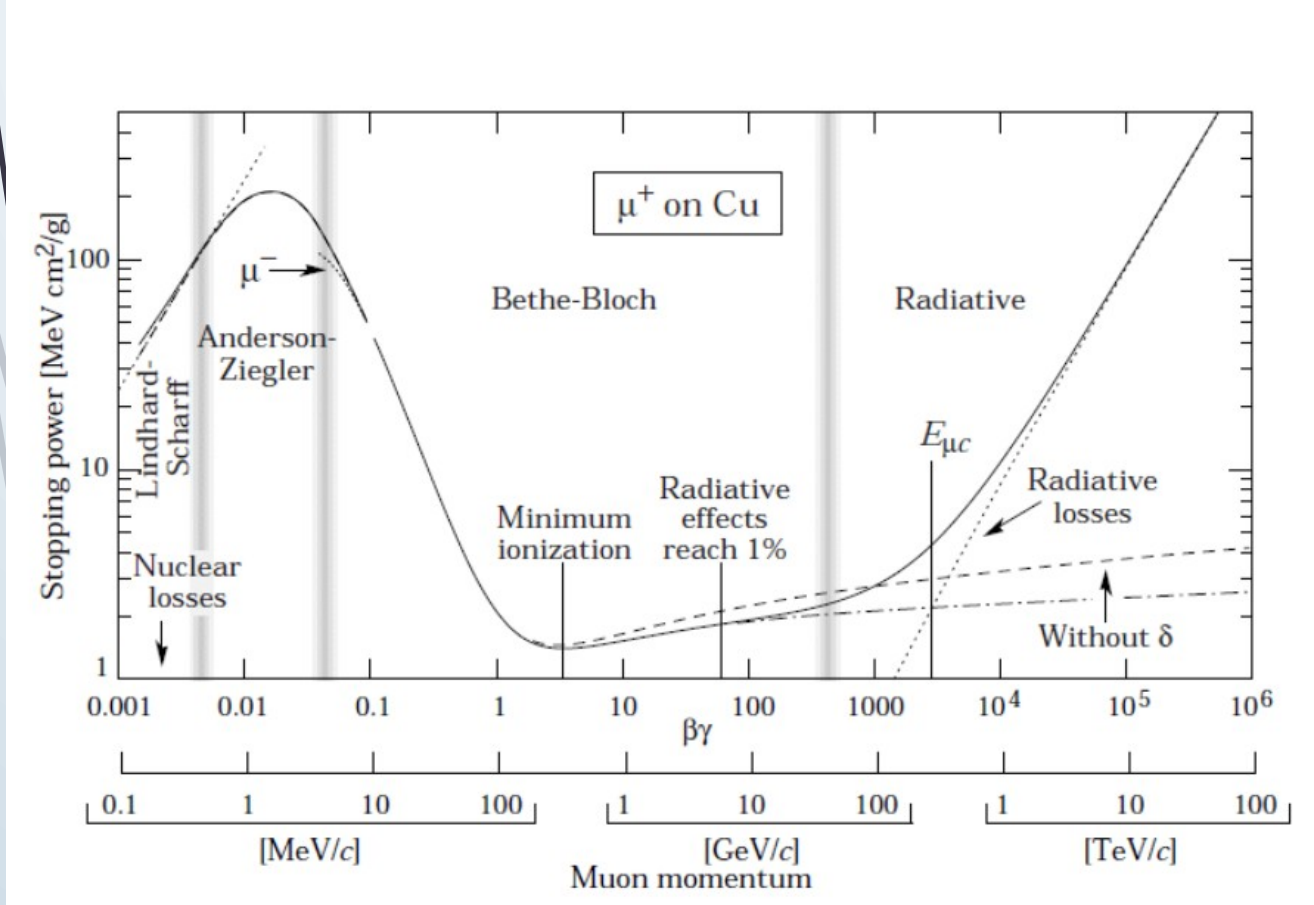


კოსმოსური მიუონების სიცოცხლის ხანგრძლივობის გაზომვა და დეტექტორის პროტოტიპი

- 15 სმ სისქის **ტყვიის შთანმთქმელი (Pb)**
- ზედა სცილტილატორული მთვლელი
- 15 × 25 × 15 სმ კუბის ფორმის სცინტილატორული მთვლელი.
- ქვედა სცილტილატორული მთვლელი
- 3 ცალი ფოტოგამამრავლებელი.



კოსმოსური მიუონების სიცოცხლის ხანგრძლივობის გაზომვა და დეტექტორის პროტოტიპი



Muons in polystyrene $[(C_6H_5CHCH_2)_n]$

$\langle Z/A \rangle$	ρ [g/cm^3]	I [eV]	a	$k = m_s$	x_0	x_1	$\overline{C}$	δ_0
0.53768	1.060	68.7	0.16454	3.2224	0.1647	2.5031	3.2999	0.00

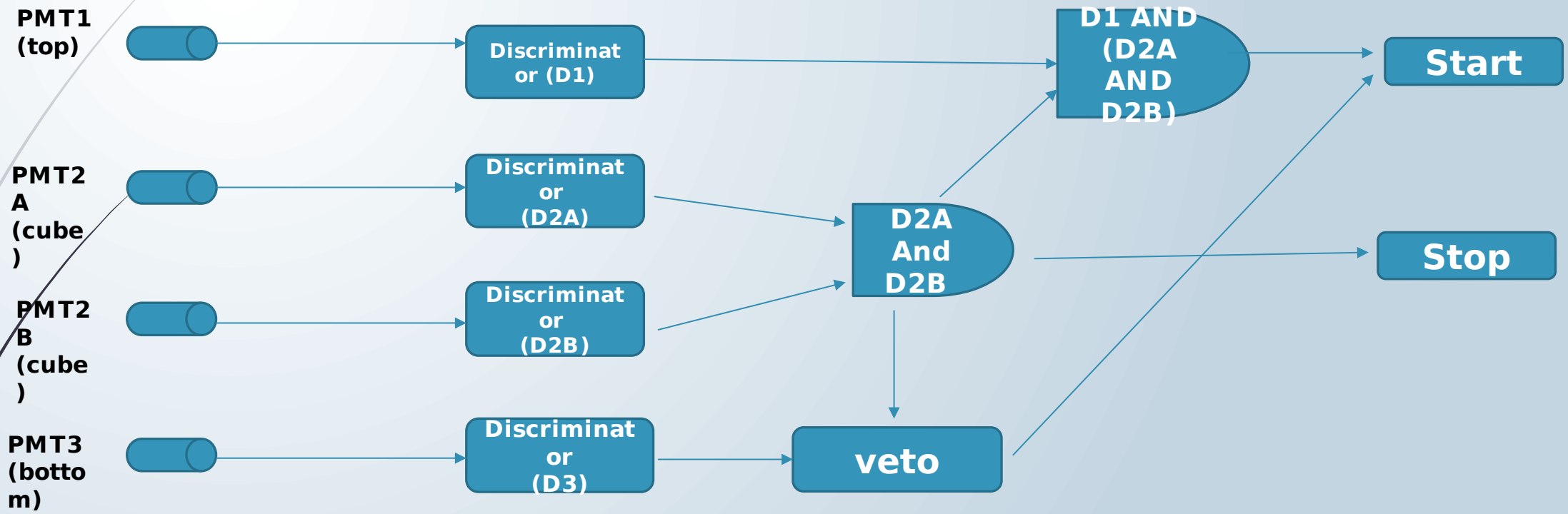
T	p [MeV/c]	Ionization	Brems	Pair prod	Photonucl	Total	CSDA range [g/cm^2]
		[MeV cm^2/g]					
10.0 MeV	4.704×10^1	7.803				7.803	7.077×10^{-1}
14.0 MeV	5.616×10^1	6.084				6.084	1.294×10^0
20.0 MeV	6.802×10^1	4.749				4.749	2.424×10^0
30.0 MeV	8.509×10^1	3.683				3.683	4.848×10^0
40.0 MeV	1.003×10^2	3.144				3.144	7.806×10^0
80.0 MeV	1.527×10^2	2.359				2.359	2.296×10^1
100. MeV	1.764×10^2	2.210				2.211	3.174×10^1
140. MeV	2.218×10^2	2.058				2.058	5.059×10^1
200. MeV	2.868×10^2	1.970				1.971	8.049×10^1
300. MeV	3.917×10^2	1.937			0.000	1.937	1.318×10^2
318. MeV	4.105×10^2	1.936			0.000	1.936	*Minimum ionization*
400. MeV	4.945×10^2	1.942			0.000	1.943	1.834×10^2

Muons in lead (Pb)

Z	A [g/mol]	ρ [g/cm^3]	I [eV]	a	$k = m_s$	x_0	x_1	$\overline{C}$	δ_0
82 (Pb)	207.2(1)	11.350	823.0	0.09359	3.1608	0.3776	3.8073	6.2018	0.14

T	p [MeV/c]	Ionization	Brems	Pair prod	Photonucl	Total	CSDA range [g/cm^2]
		[MeV cm^2/g]					
10.0 MeV	4.704×10^1	3.823				3.823	1.524×10^0
14.0 MeV	5.616×10^1	3.054				3.054	2.705×10^0
20.0 MeV	6.802×10^1	2.436				2.436	4.927×10^0
30.0 MeV	8.509×10^1	1.928				1.928	9.600×10^0
40.0 MeV	1.003×10^2	1.666				1.666	1.521×10^1
80.0 MeV	1.527×10^2	1.283				1.283	4.338×10^1
100. MeV	1.764×10^2	1.215				1.215	5.943×10^1
140. MeV	2.218×10^2	1.151				1.152	9.339×10^1
200. MeV	2.868×10^2	1.124				1.124	1.463×10^2
226. MeV	3.145×10^2	1.122	0.000			1.123	*Minimum ionization*
300. MeV	3.917×10^2	1.130	0.000		0.000	1.131	2.352×10^2
400. MeV	4.945×10^2	1.151	0.000		0.000	1.152	3.228×10^2

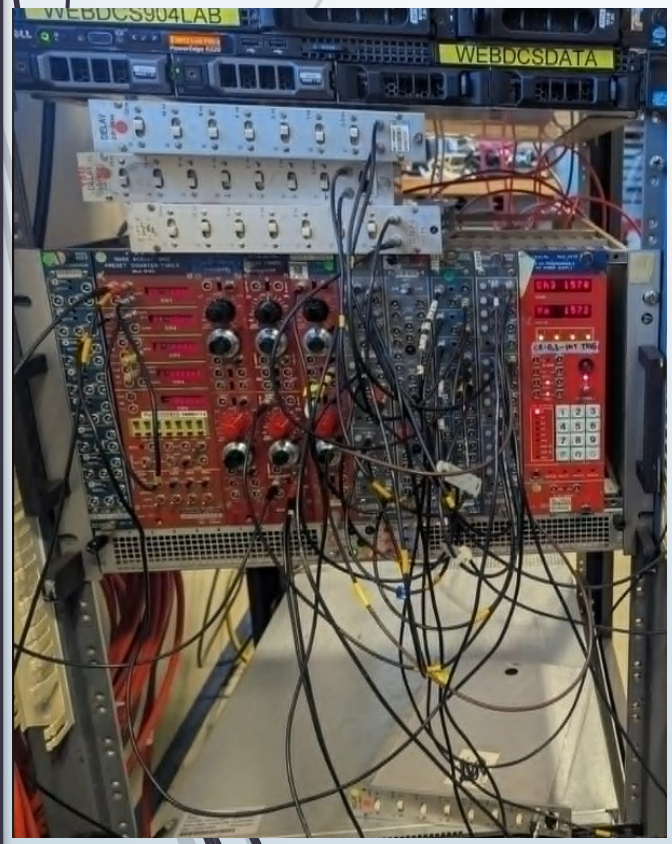
ლოგიკური სქემა



ვეტოს დადების შემდეგ სიგნალების სიხშირე შემცირდა 0.66 ჰც-დან 0.04 ჰც-მდე.

კოსმოსური მიუონების სიცოცხლის ხანგრძლივობის გაზომვა და დეტექტორის პროტოტიპი

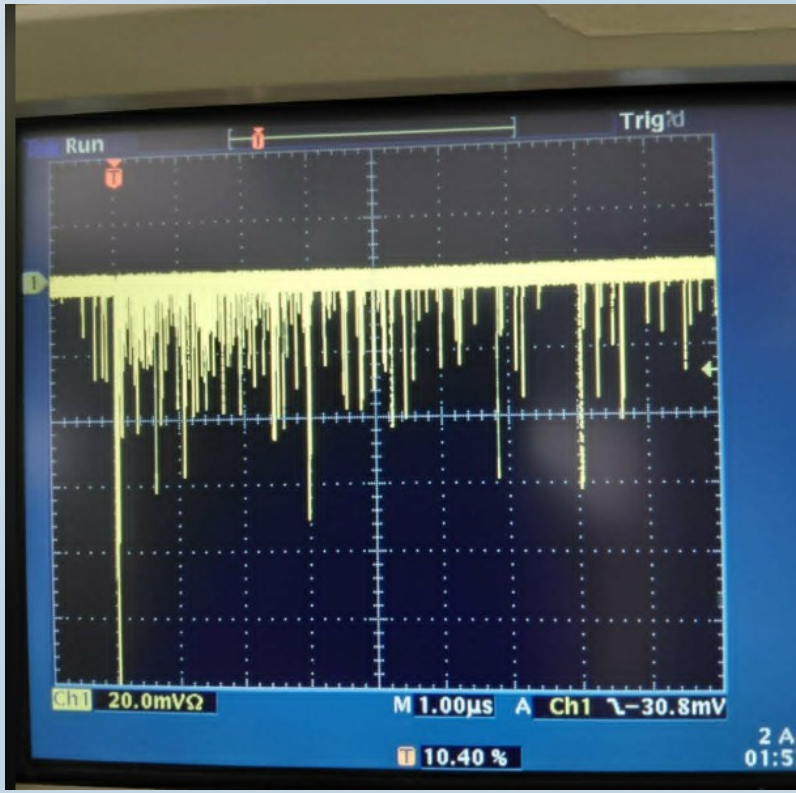
გამოყენებული ბირთვული ელექტრონიკის ბლოკები



დეტექტორის პროტოტიპი

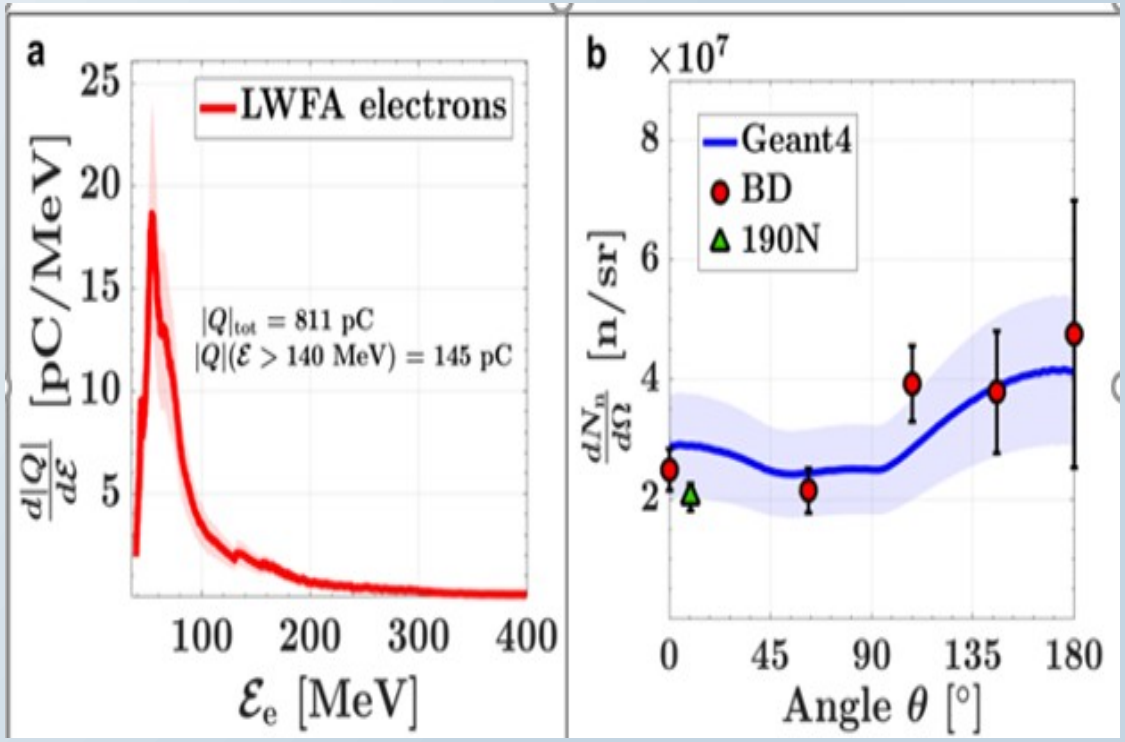


მიუონების დაშლის სიგნალები ოსცილოსკოპზე



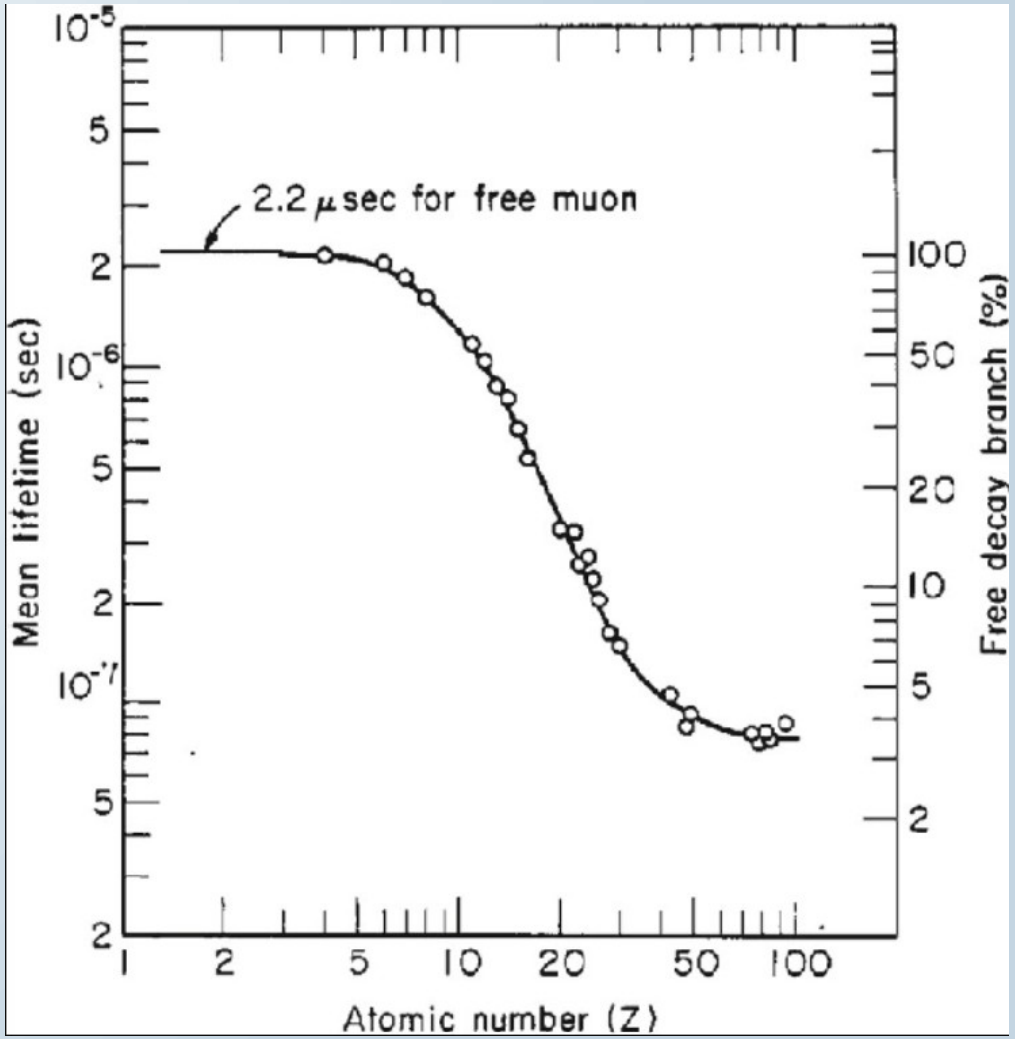
ნეიტრონების წარმოქმნა ფოტობირთვული რეაქციით

- დამუხრუჭებითი გამოსხივებით მიღებული ფოტონების უწყვეტი სპექტრი.
- **GDR - Giant Dipole Resonance** (13–15 MeV)
- ბირთვის კოლექტიური აღგზნება.
- აღგზნებული ბირთვი ძალიან ხანმოკლე დროში ($\sim 10^{-22}$ წმ) კარგავს ენერგიას. ტყვიის შემთხვევაში ნეიტრონის ბმის ენერგია დაახლოებით 7–8 MeV-ია, ამიტომ GDR-ის ენერგია საკმარისია ბირთვიდან ერთი ან რამდენიმე ნეიტრონის გამოსაყოფად.



μ^- -ის ჩაჭერით ნეიტრონების შესაძლო წარმოქმნა

- μ^- იონიზაციით კარგავს ენერგიას და ჩერდება ტყვიაში.
- ხდება მიუონური ატომის წარმოქმნა.
- მიუონი იწყებს კასკადურ გადასვლას დაბალ ენერგეტიკულ დონეებზე (საბოლოო მდგომარეობა - 1S)
- 1S ორბიტალზე მიუონი ან იშლება ან ბირთვის მიერ ჩაიჭირება.
- ჩაჭერის შემთხვევ $\mu^- + p \to n + \nu_\mu$
- მიუონის ჩაჭერისას მისი ენერგიის ნაწილი გადაეცემა ბირთვს, რის შედეგადაც ბირთვი აღიგზნება და შესაძლებელია ერთი ან რამდენიმე ნეიტრონი გამოასხივოს.



სამომავლო გაზომვები

- კოსმოსურ მიუონებზე მომუშავე დეტექტორის ექსპერიმენტული ვალიდაცია.
- TDC-ის გამოყენებით ხანგრძლივი გაზომვების ჩატარება და ექსპონენციური დაშლის სპექტრის მიღება.
- დეტექტორის გამოყენება LWFA-ზე წარმოქმნილი მიუონების დასაფიქსირებლად.
- ლაზერული წყაროდან მიღებული მიუონების ენერგიის და რაოდენობის შეფასება.

ბიბლიოგრაფია

- Calvin, L., Tomassini, P., Doria, D., Martello, D., Deas, R. M., & Sarri, G. (2023). *Laser-driven muon production for material inspection and imaging*. **Frontiers in Physics, 11**, 1177486. https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1177486
- Suzuki, T., Measday, D. F., & Roalsvig, J. P. (1987). *Total nuclear capture rates for negative muons*. **Physical Review C, 35**, 2212–2224.
- Schumacher, R. *et al.*, *An Experimental Test of Lepton Universality through Bethe–Heitler Production of Lepton Pairs in Hall D at Jefferson Lab*, **Jefferson Lab, 2016**.
- Particle Data Group. (2024). ***Review of Particle Physics***.