

Прецизна спектроскопия на леки атоми и молекули

Семинар за зачисляване в свободна докторантура

Петър Данев

21.01.2016

Low-energy negative muon interaction with matter

Petar Danev^{a*}, Andrzej Adamczak^b, Dimitar Bakalov^a, Emiliano Mocchiutti^c, Mihail Stoilov^a, and Andrea Vacchi^{d,c}

*^aInstitute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences,
blvd. Tsarigradsko ch. 72, Sofia 1142, Bulgaria*

E-mail: petar_danev@abv.bg

*^bInstitute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences,
Radzikowskiego 152, PL31342 Kraków, Poland*

*^cIstituto Nazionale di Fisica Nucleare,
Padriciano 99, AREA Science Park, 34149 Trieste, Italy*

*^dMathematics and Informatics Department, Udine University
via delle Scienze 206, Udine*

План на изложението

Електромагнитен радиус на протона

Проектът FAMU

- Теоретична обосновка
- Експериментална постановка

Разпространение на отрицателно заредени мюони в материя

- Оптимизиране на мишената
- Преминаване на μ - през тънки пластини
- Спиране на мюони във водород

Сравнение на получените резултати с експериментални данни и други пресмятания

Обобщение на резултатите

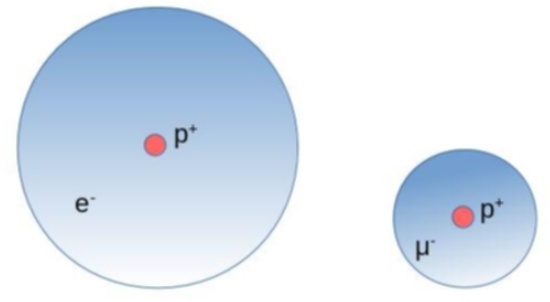
Планове за следващи изследвания

Електромагнитен радиус на протона

$$\langle R^2 \rangle_{ch/mag} = \int d^3r r^2 \rho_{ch/mag}(r) \quad \text{Средноквадратичен радиус на } p^+$$

$$R_Z = \int d^3r d^3r' \rho_{ch}(r) \rho_{mag}(r') |r - r'| \quad \text{Радиус на Земах на } p^+$$

- Разсейване на e^- от p^+
- Спектоскопия на e^-H^+
- Спектоскопия на μ^-H^+



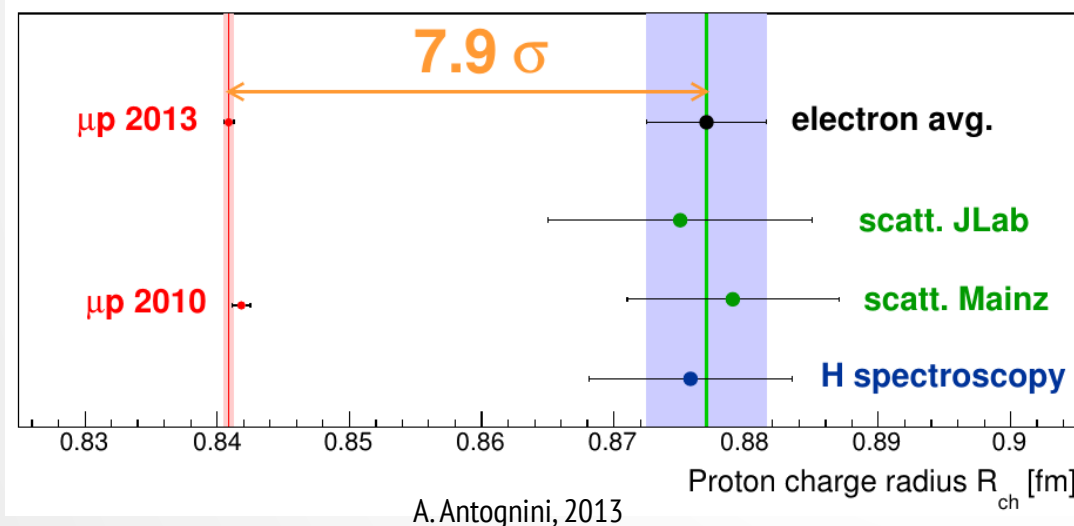
Електромагнитен радиус на протона

Радиус на протона

$$R_{\text{ch}} = 0.8768(69) \text{ fm (CODATA)}$$

R. Pohl, A. Antognini, F. Nez, F. Amaro, and
F. Biraben, Nature 466 (2010) 213. 2;

$$R_{\text{ch}} = 0.84184(67) \text{ fm}$$



Търсене на решение на загадката

- Неточност на експерименталните данни ?

Antognini, A, et al., (2013). "Proton Structure from the Measurement of 2S-2P Transition Frequencies of Muonic Hydrogen". Science 339 (6118): 417–420 – 7 σ , в момента несъгласието в експерименталните данни достига 9 σ .

- Нужда от допълнителни QED поправки ?

- Физика извън стандартния модел ?

Proton size puzzle – Един от нерешените проблеми във физиката

Ginzburg, Vitaly L. (2001). The physics of a lifetime : reflections on the problems and personalities of 20th century physics. Berlin: Springer. pp. 3–200



Проектът FAMU

FAMU (Fisica con Atomii MUonici)

Цел – намиране радиуса на Земах на протона

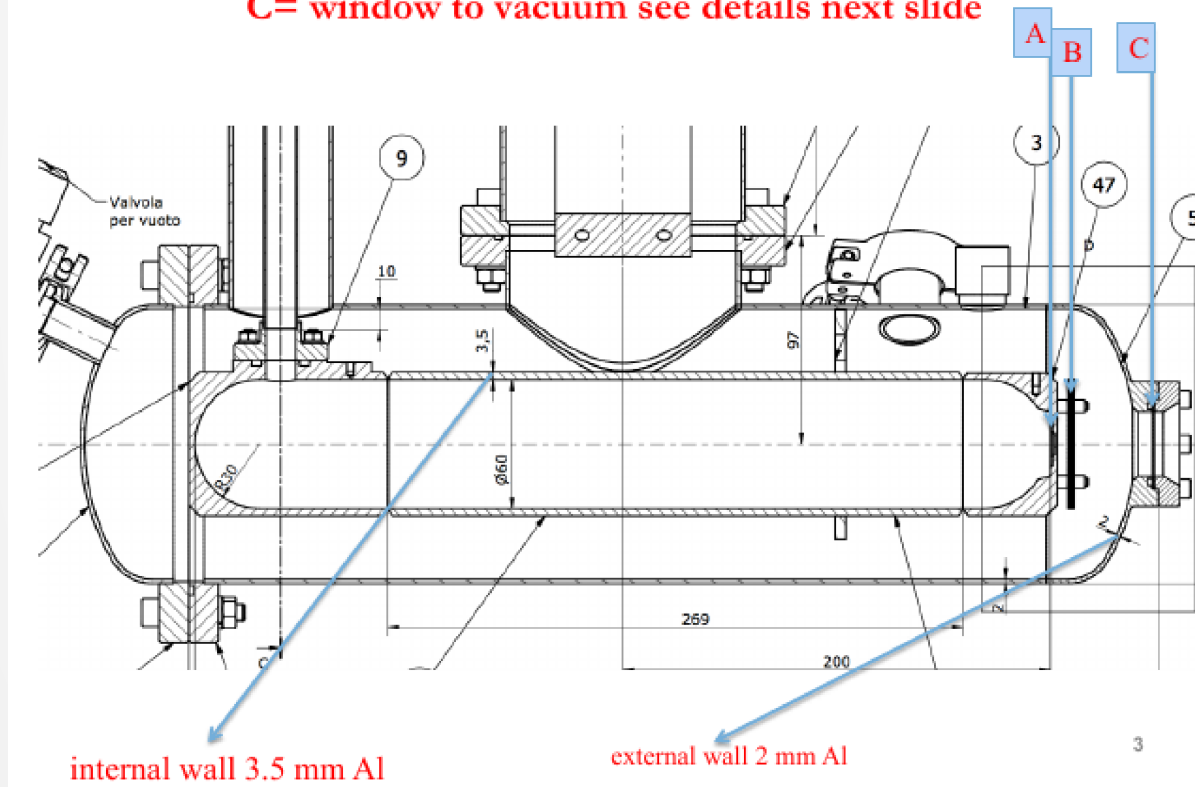
1. $\mu^-H^+(\text{para}) + \gamma(E_{hfs} 0.182\text{eV}) \rightarrow \mu^-H^+(\text{orto});$
2. $\mu^-H^+(\text{orto}) + H_2 \rightarrow \mu^-H^+(\text{para}) + H_2 + T;$
3. Скоростта на реакцията $\mu^-H^+ + X \rightarrow \mu^-X^+ + H^+ + e^-$ е функция на T ;
4. Измерва се характеристикното излъчване μ^-x^+ , съпътстващо релексацията на възбудените състояния;
5. Данни за свръхфината структура на $\mu^-H^+;$

Експериментална реализация

Мишена на FAMU – етап II

Мюонен източник Ral Riken

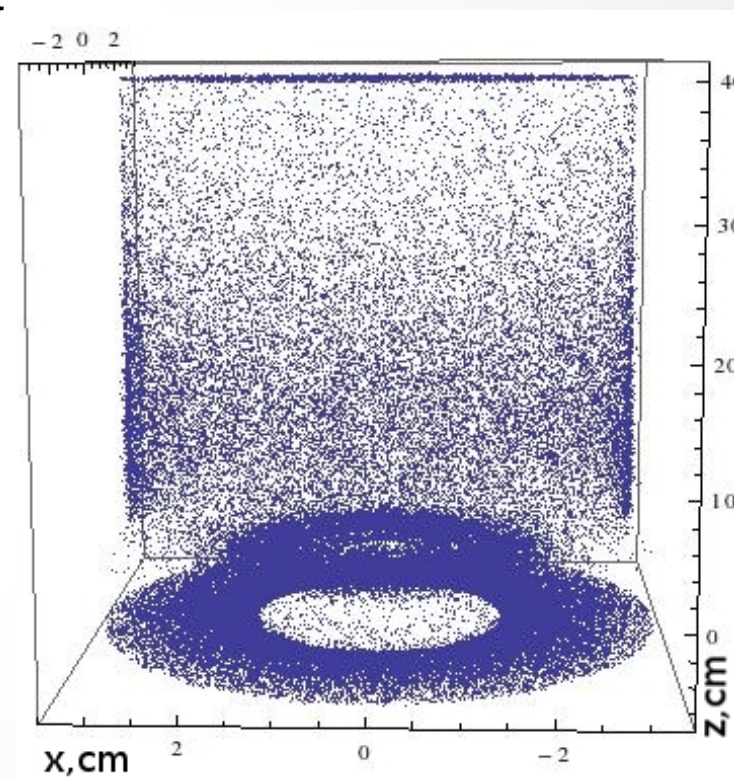
A=window to gas
B= thermal screen
C= window to vacuum see details next slide



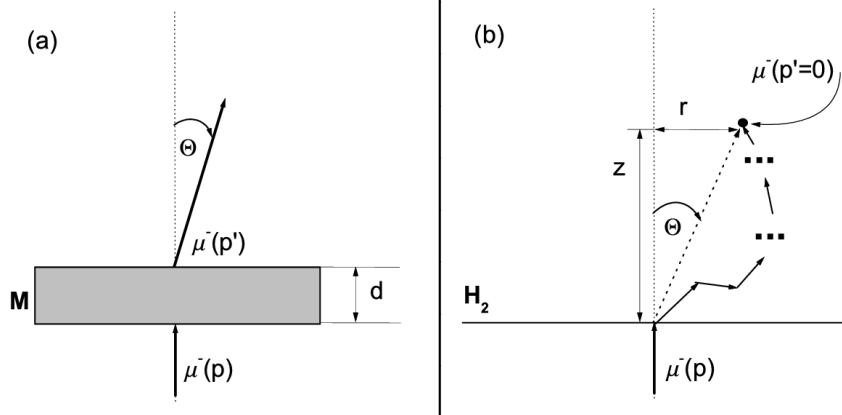
- Импулсен режим
70 ns, 50 Hz
- $p(\mu^-) < 75 \text{ MeV/c}$

Изисквания към мишената

1. Намаляване на загубите в стените на газовия контейнер
2. Позициониране на спрелите в газа мюони в малък обем в центъра на мишената
3. Намаляване на фоновия шум
4. Инженерни ограничения



Оптимизиране на мишената



(a) Мюони с начален импулс p , пресичащи нормално повърхност на материал M с дебелина d .

(b) Мюони с начален импулс p разпространяващи се в H_2 среда с налягане H .

Комплексна задача

Цел: Изучаване

взаимодействието на μ^- с

Полистирен, Al, Стомана,

Au и H_2

$0.01 < d, \text{ mm} < 10$

$H < 40 \text{ atm}$

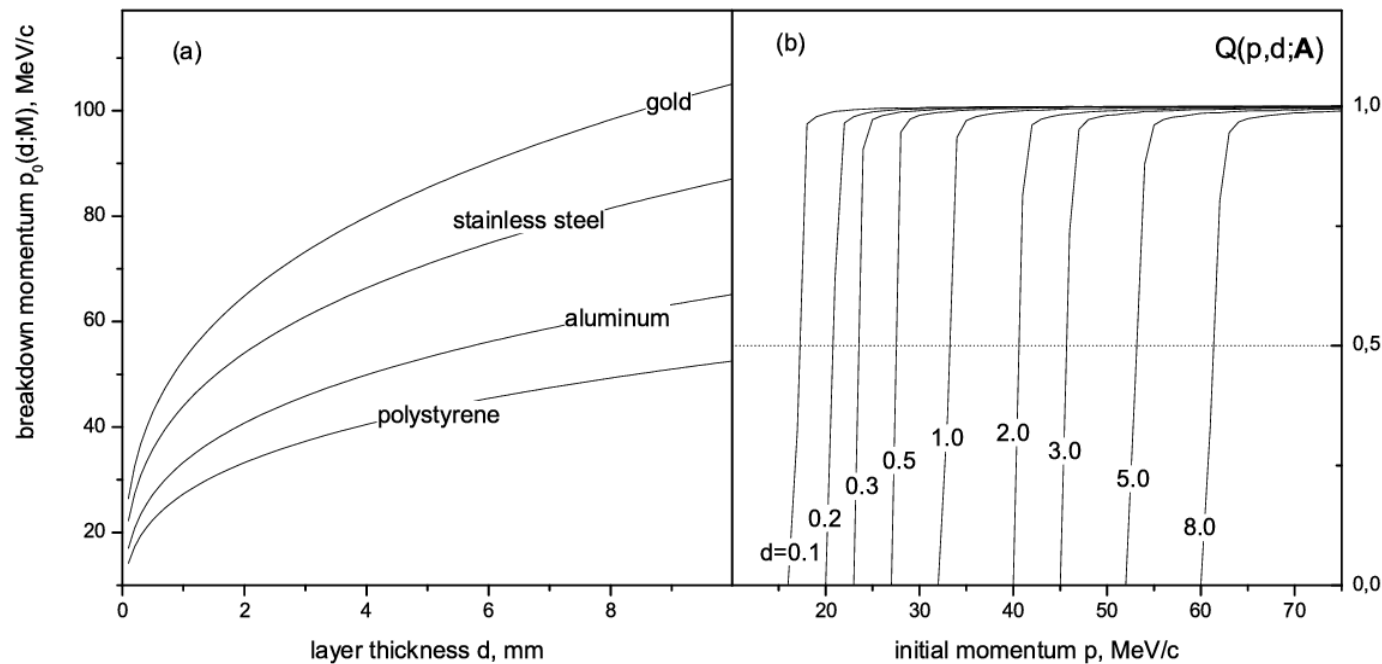
$T = 20 \text{ C}^\circ$

Използване на FLUKA

- Теория на Bethe-Bloch, ефект на Barkas и на Bloch Z^4
- Теория на Moliere за многократно разсейване
- Shell corrections и други

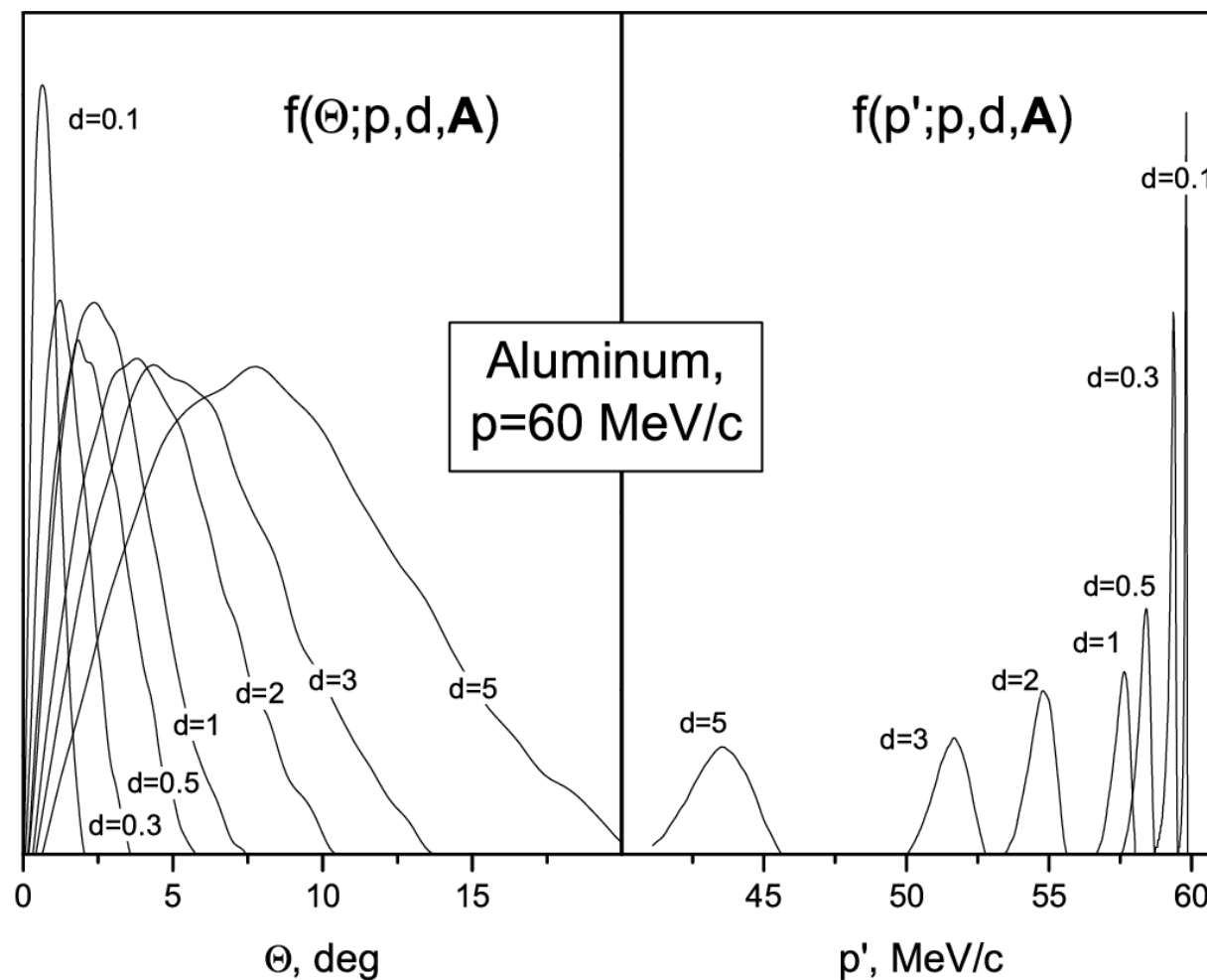
Преминаване на μ^- през тънки пластини

Прагов импулс - $p_0(d, M) = a_1 d^{a_2} \rho_M^{a_3}$,
 $a_1 = 26.6 \text{ MeV/c}$, $a_2 = 0.2969$, and $a_3 = 0.2342$

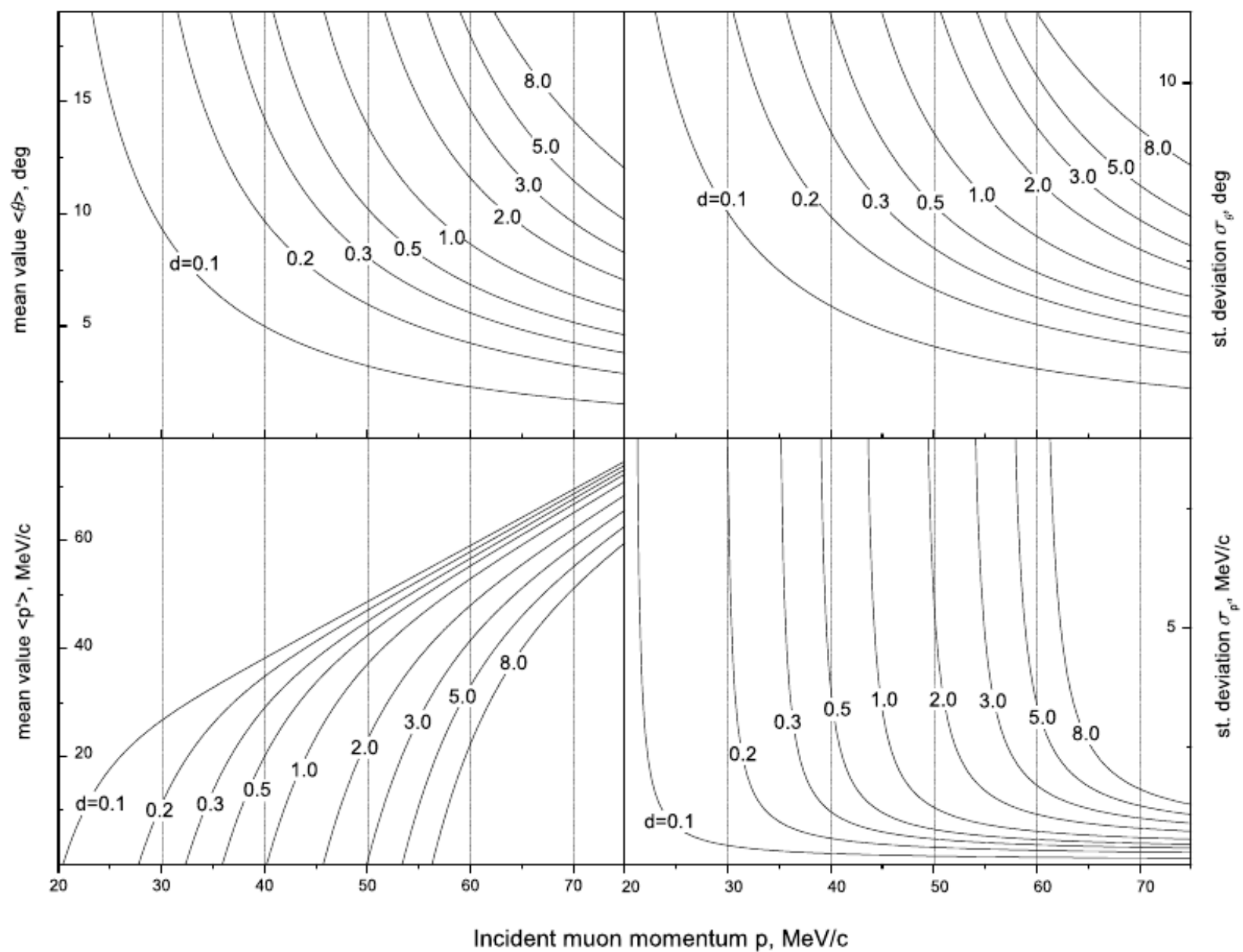


Характеристики на изходните мюони

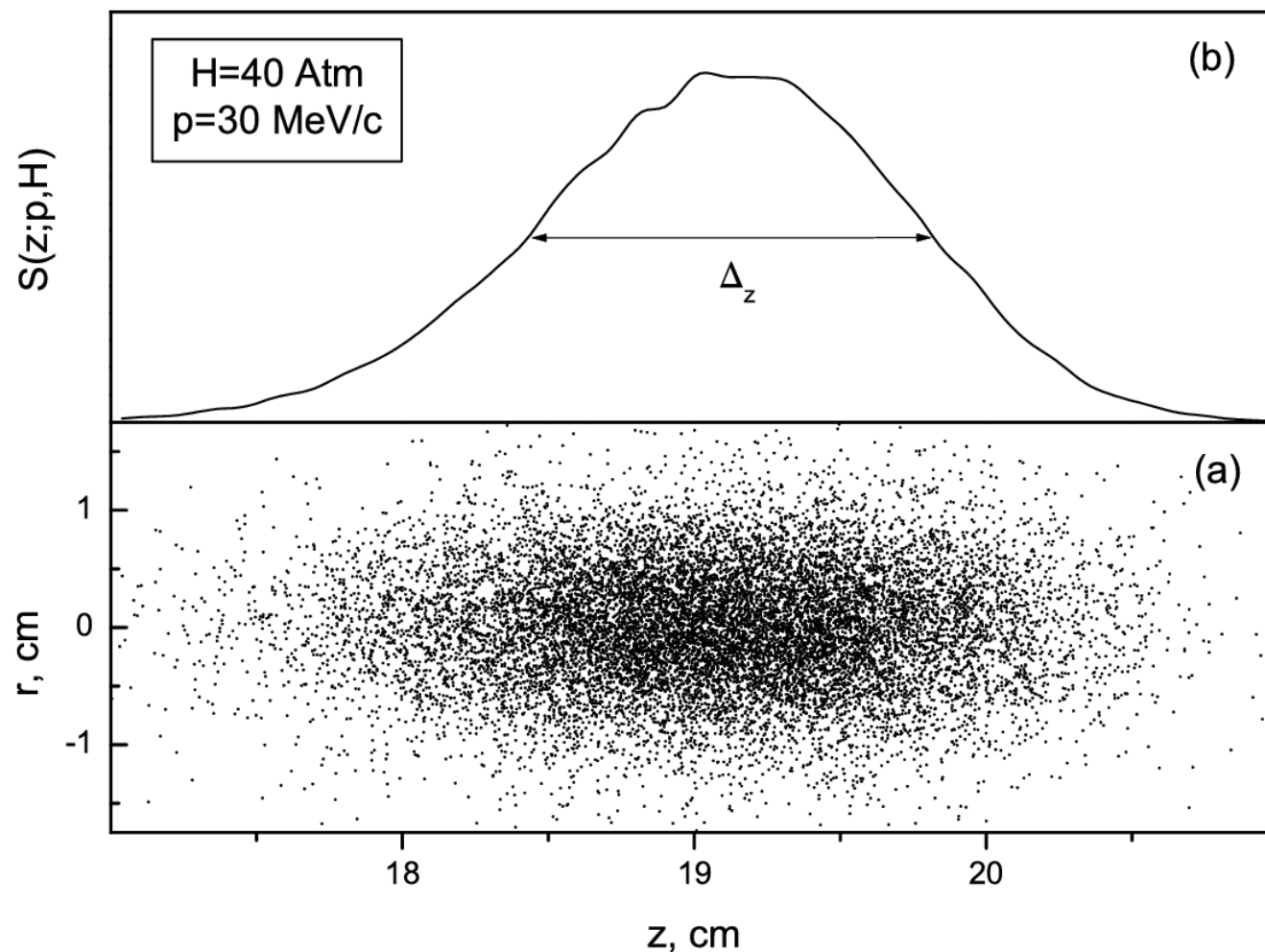
Ъглово разпределение и разпределение по импулси



Средни стойности и дисперсия на изходните импулс и ъгъл (Al)

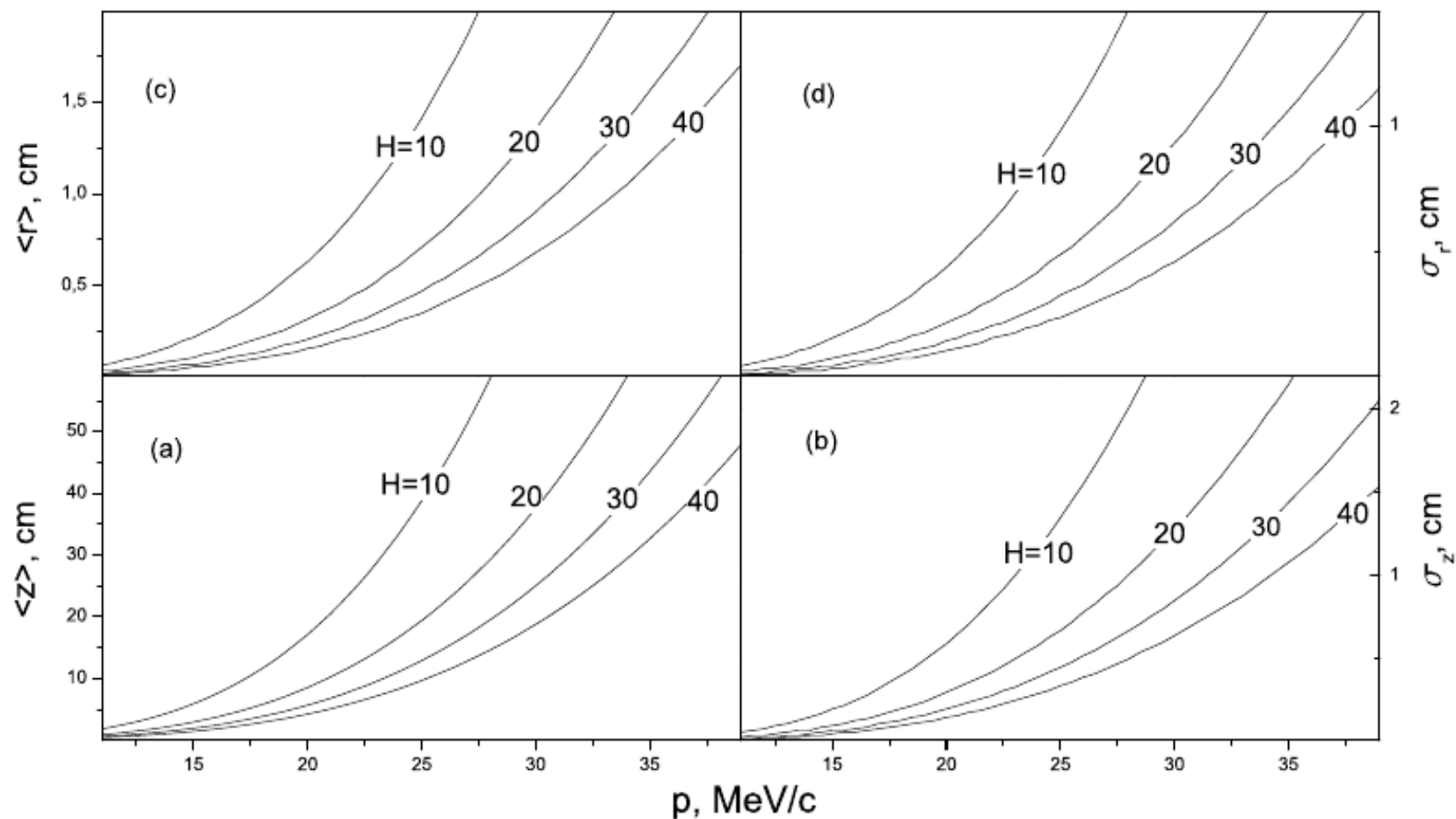


Спиране на мюони във водород



$S(z; p, H) = \int s(z, r; p, H) r dr$ - плътност на разпределението по z

Средни стойности и дисперсия на положението на спрелите в H_2 МЮОНИ



$$Q(k) = b1(k)/H p^{b2(k)} (1 + b3(k) p^2 \exp(-b4(k)p)), k = 1, \dots, 4$$

Сравнение на получените резултати с експериментални данни и други пресмятания

Сравнение с таблични данни

Groom et al. 2001, 2012 (PDG); NPL Database

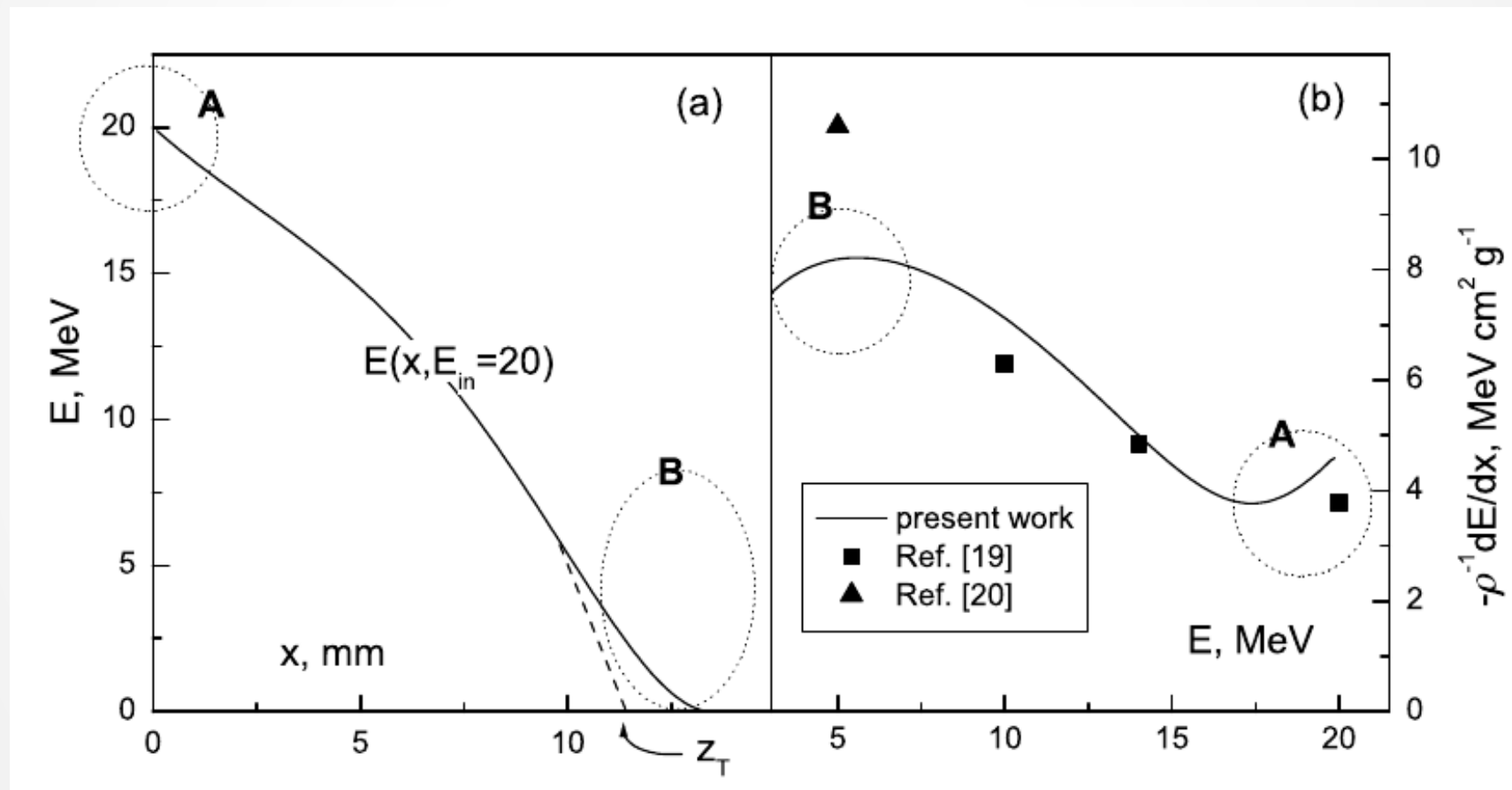
$$R(E) = \int_{E_0}^E < -dE'(E', x, \mathbf{M})/dx >^{-1} dE'$$

		hydrogen		polystyrene		aluminum		steel		gold	
E_T	p_T	z_T	$\langle z \rangle$	d_T	$p_0(d_T)$	d_T	$p_0(d_T)$	d_T	$p_0(d_T)$	d_T	$p_0(d_T)$
1	14.6	58.4	53.4			0.057	14.4				
10	47.0	390.	369.	6.68	46.8	3.34	47.3	1.30	47.6	0.48	48.7
14	56.2	717.	676.	12.2	55.6	6.08	56.4	2.36	56.7	1.37	57.9
20	68.0	1350.	1279.	22.9	66.4	11.3	67.5	4.36	68.1	2.49	69.3

Сравнение на получените резултати с експериментални данни и други пресмятания

Спирачна сила

$$S(E) = -\rho^{-1} dE(E, x, \mathbf{A})/dx$$



Сравнение на получените резултати с експериментални данни и други пресмятания

Сравнение с експериментални данни

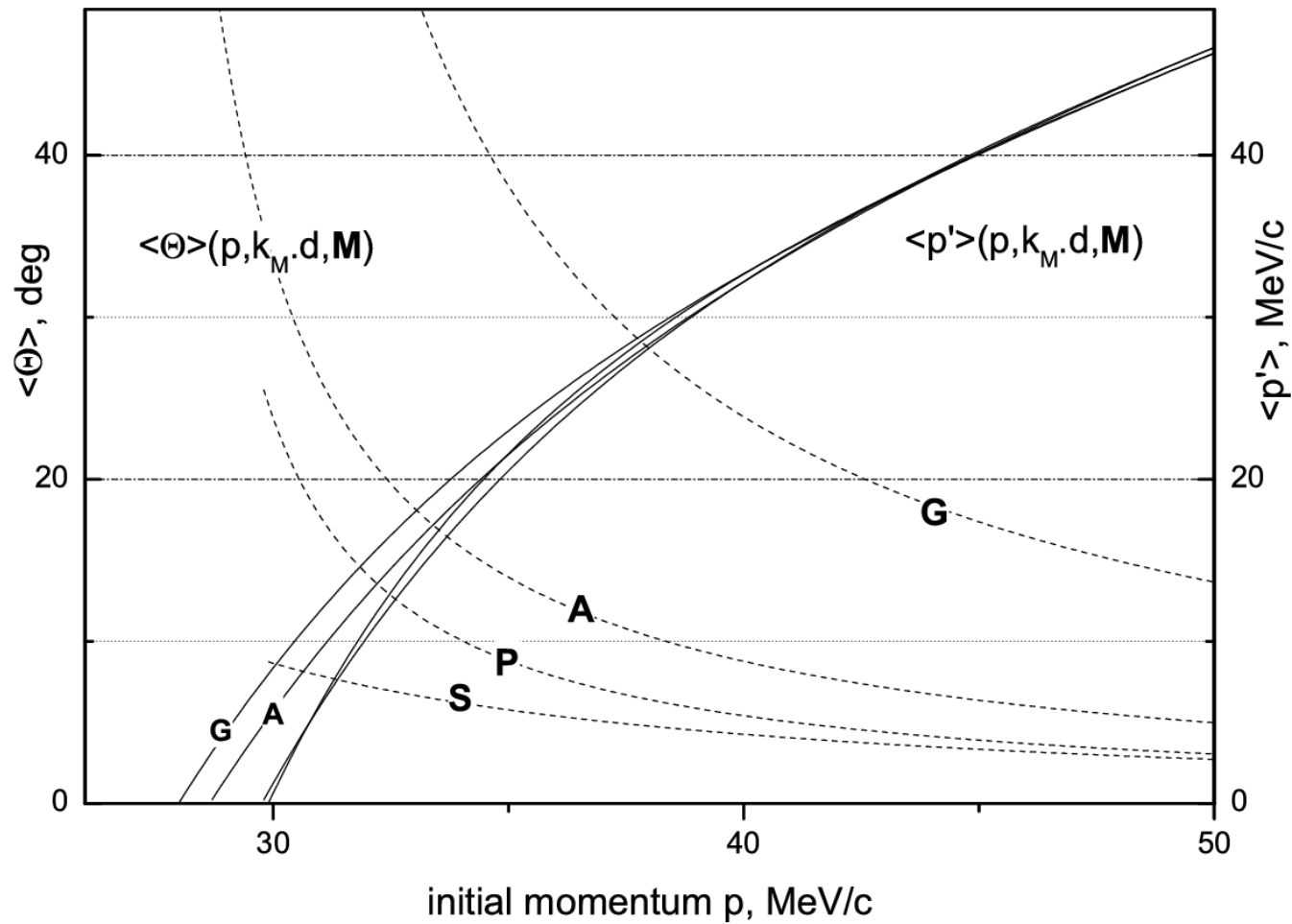
1. $\mu^- + Al$ (0,81 mg,cm⁻²); $p_0(\text{exp}) = 6.86 \text{ MeV/c}$

$$p_0(\text{theor}) = 6.12 \text{ MeV/c}$$

2. $\mu^- + Au$ (10 μg ,cm⁻²); $p_0(\text{exp}) = 1.75 \text{ MeV/c}$

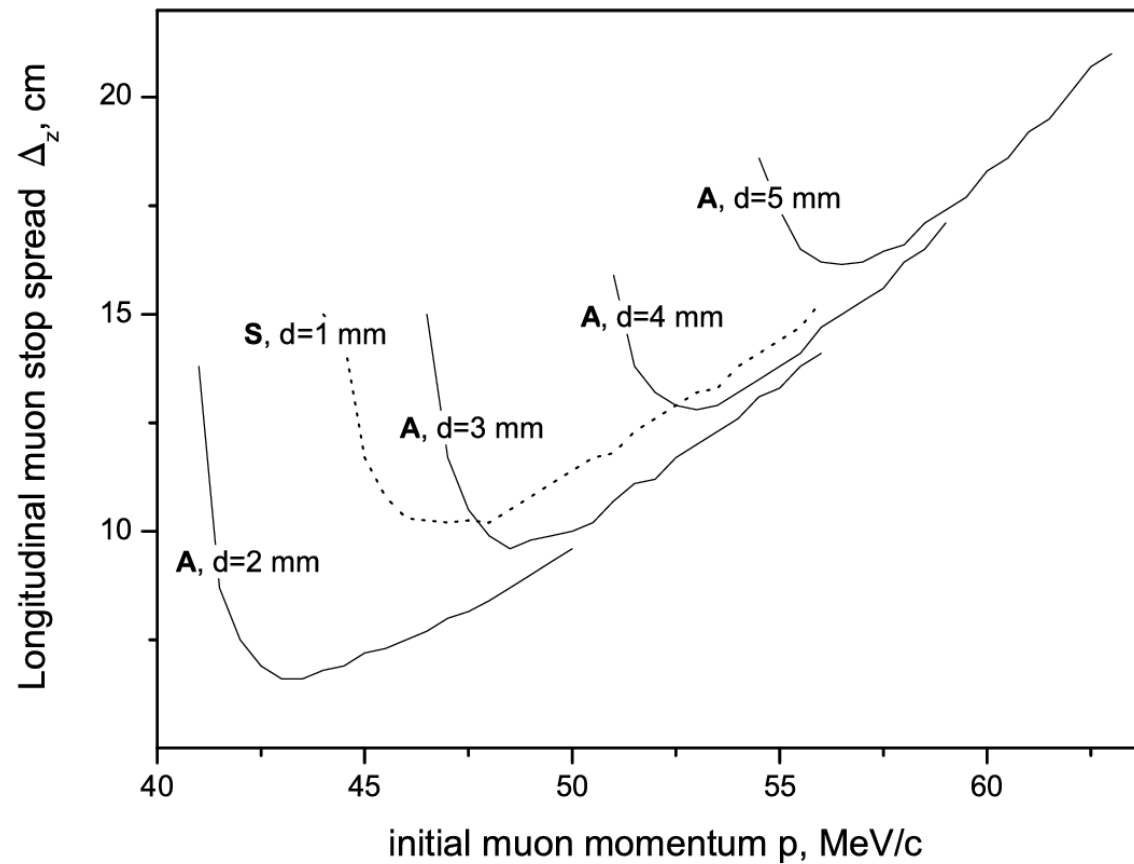
$$p_0(\text{theor}) = 1.79 \text{ MeV/c}$$

Приложимост на резултатите



$$\langle p' \rangle(p, k_M d, \mathbf{M}) \approx \langle p' \rangle(p, k_{M'} d, \mathbf{M}')$$

Приложимост на резултатите II



$$\tilde{S}(z; p, H) \equiv \tilde{S}(z; p, H, d, \mathbf{M}) = \int f(p'; p, d, \mathbf{M}) S(z; p', H) dp'$$

Обобщение на резултатите

- Изследвано е преминаването на μ^- през тънки слоеве. Намерени са емпирични изрази за $p_0(d;M)$, $\langle p' \rangle(p,d;M)$, $\sigma_p(p,d;M)$, $\langle \Theta \rangle(p,d;M)$ и $\sigma_\Theta(p,d;M)$;
- Симулации на спиране на μ^- в H_2 . Получени изрази за $\langle z \rangle(p,H)$, $\sigma_z(p,H)$, $\langle r \rangle(p,H)$, and $\sigma_r(p,H)$;
- Получените резултати са сравнени с експериментални и таблични данни;
- Дадените в представената работа изрази са подходящи за първоначалните етапи от проектирането на експерименти, в който обект на изследване са мюони или екзотични мюонни атоми;

Резултати по темата на докторантурата до момента

- 1 статия, дадена за печат в списанието Journal of Instrumentation (IOP) с импакт фактор, излязла в arXiv: 1511.05005;
- Изнесен доклад на XVIII-ти Зимен Семинар по Интердисциплинарна Физика на младите учени и докторанти, декември 2015 г.;
- Участие в анализа на експерименталните данни на FAMU от 2015 г. На база резултатите от анализа ще бъде публикувана статия;
- По време на командировката ми в ОИЯИ през 2015 г. бяха пресметнати матричните елементи на квадруполните E2 преходи при H_2^+ и D_2^+ . Работата ще бъде довършена тази година. Подготвя се статия, която да бъде изпратена за печат.

Планове за следващи изследвания

1. FAMU

- Оптимизиране на мишената за следващите етапи от експеримента:
 - включване в симулациите на multipass cavity;
 - отчитане на външното лазерно поле;
 - оптимизиране положението на детекторите,...
- Анализ и интерпретация на получените от експеримента данни:
 - анализ на резултатите от междинните фази на FAMU;
 - определяне радиуса на Земах на протона.

2. Прецизна спектроскопия при H_2^+ и D_2^+

Задачи:

- Пресмятане на спектъра на квадруполните E2 и забранените E1 преходи в молекулите H_2^+ и D_2^+
- Намиране интензивността на посочените спектрални линии с висока точност – вариационен метод на Коробов.

Приложение: Атомни часовници

- Множество подтиснати преходи;
- Тесни спектрални линии.

Благодаря за Вниманието!

$$\begin{aligned}\langle p' \rangle(p, d; \mathbf{M}) &= c_1^{(1)} d(1 - d^2) + p(c_2^{(1)} d^2 + c_3^{(1)} d + 1) + \\ &\quad (c_4^{(1)} d^2 + c_5^{(1)} d + c_6^{(1)})(d^6 \exp(-(p - 48)))^{(c_7^{(1)} + c_8^{(1)})/d} \\ \sigma_{p'}(p, d; \mathbf{M}) &= c_1^{(2)} \sqrt{d} + (c_2^{(2)} + c_3^{(2)} \sqrt{d}) / (p - c_4^{(2)} - c_5^{(2)} d^{c_6^{(2)}})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\langle \Theta \rangle(p, d; \mathbf{M}) &= \\ &\quad \left(\underbrace{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^2 c_{ij}^{(3)} d^i p^j}_{i+j \leq 3} + \bar{c}_1^{(3)} p^2 / d^2 + \bar{c}_2^{(3)} \sqrt{d} p^2 + \bar{c}_3^{(3)} d^3 / \sqrt{p} \right)^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\Theta}(p, d; \mathbf{M}) &= \\ &\quad \left(\underbrace{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^2 c_{ij}^{(4)} d^i p^j}_{i+j \leq 3} + \bar{c}_1^{(4)} p^2 / d^2 + \bar{c}_2^{(4)} \sqrt{d} p^2 + \bar{c}_3^{(4)} d^3 / \sqrt{p} \right)^{-1}\end{aligned}$$

$$\delta = \left(K^{-1} \sum_{k=1}^K (V_k / F(p_k, d_k) - 1)^2 \right)^{1/2}$$

$$-\frac{dE}{dx} = K \cdot z^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \delta/2 \right]$$