

**Характеристики распределений
заряженных частиц в области максимума
электромагнитных ливней и некоторые
свойства детекторов «максимума ливня»**

В.Н.Горячев, С.П.Денисов

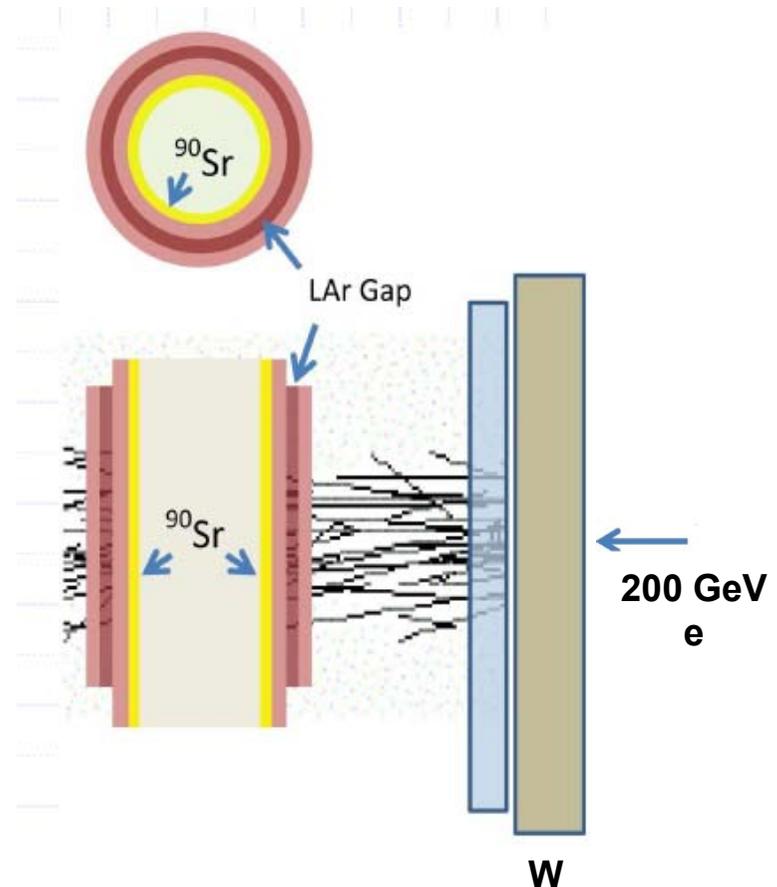
Введение

Первоначально расчёты проводились для проекта **"FcalPulseProject"** в АТЛАС, цель которого - исследовать свойства переднего жидкоаргонового калориметра Fcal в условиях, приближённых к HL-LHC.

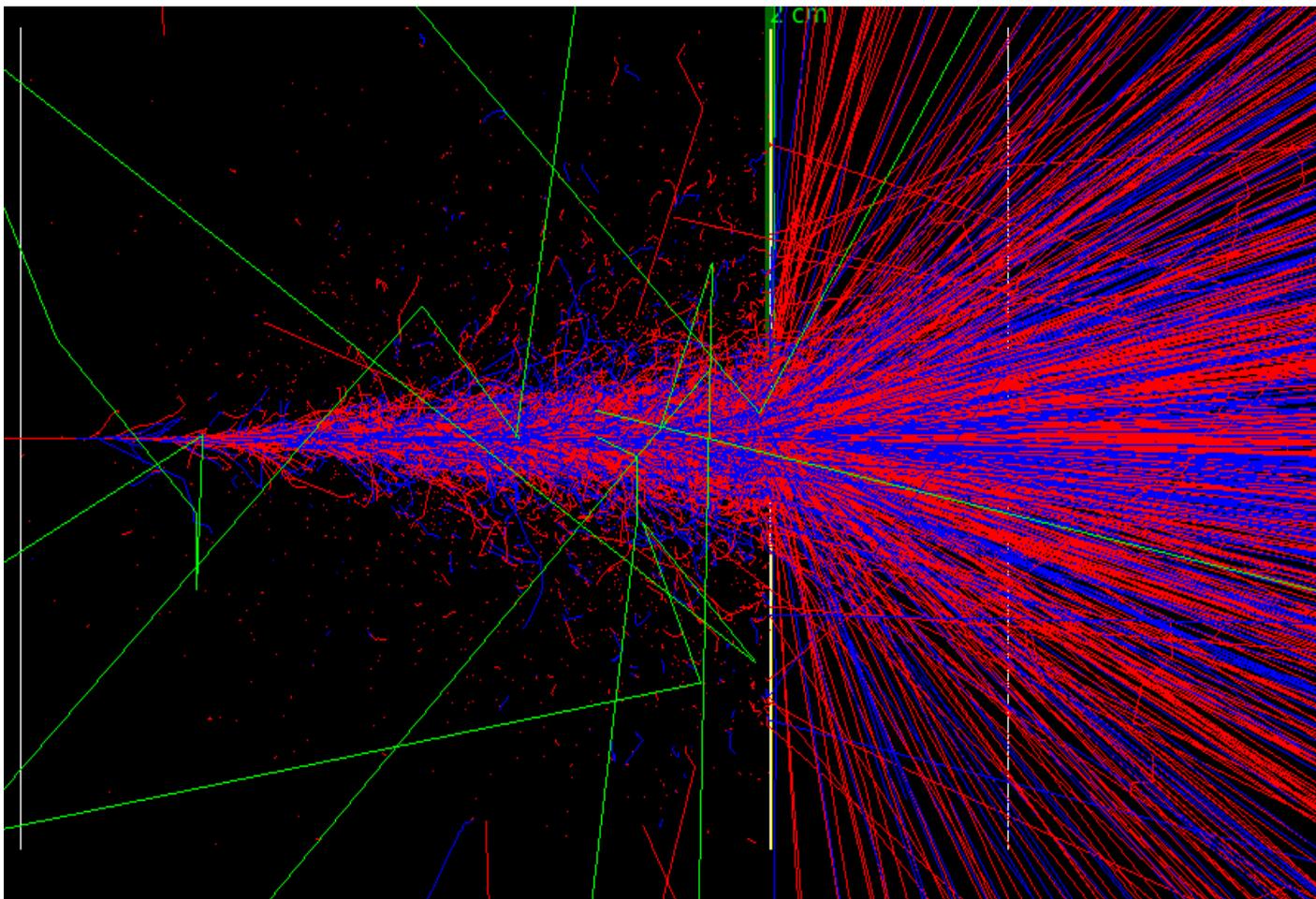
Чтобы оценить отклик детектора необходимо иметь достаточно полную информацию о распределениях электронов и позитронов в области максимума ЭМ ливня в вольфраме.

Для расчётов использовался пакет GEANT4 10.01.p02 (Physical list FTFP_BERT): по умолчанию частицы прослеживались до пробега 700 мкм, что соответствует энергиям фотонов 97.5 кэВ, электронов 1.64 МэВ, позитронов 1.54 МэВ и протонов 70 кэВ. Считалось, что электроны и позитроны с меньшими энергиями теряют энергию только на ионизацию.

S. Incerti, V. Ivanchenko and M. Novak. "Recent progress of GEANT4 electromagnetic physics for calorimeter simulation". JINST 13 C02054, 2018.



Вольфрам: $X_0=6.76 \text{ g/cm}^2$, $\rho=19 \text{ g/cm}^3$,
 $R_M=17.5 \text{ g/cm}^2$, $E_c=8.107 \text{ MeV}$.



Электромагнитный ливень, вызванный электронами с энергией 200 ГэВ в вольфраме толщиной 3.5 см. Красные линии – позитроны, синие – электроны, зелёные – заряженные адроны, светлые вертикальные линии – границы вольфрама.

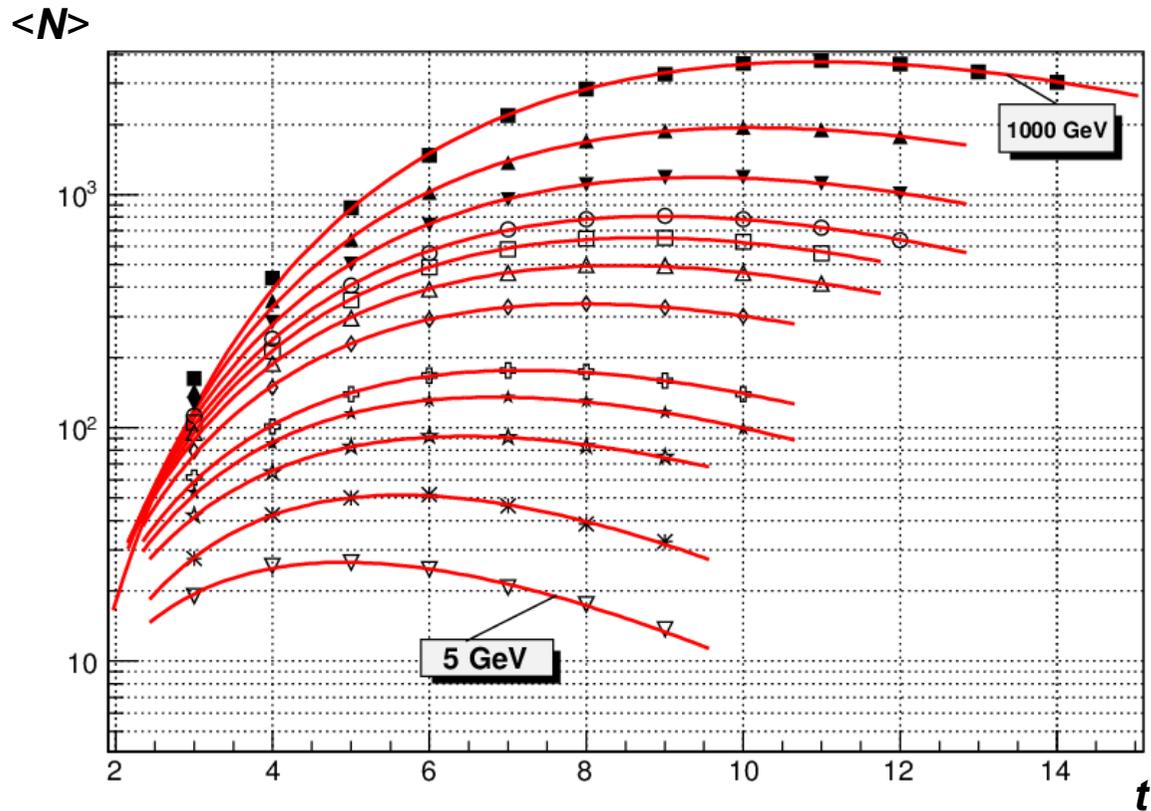


Рис.1 Среднее число $\langle N \rangle$ заряженных частиц на глубине t (рад.ед.) вольфрама для энергии первичного электрона от 5 до 1000 ГэВ (снизу вверх).

E. Longo and I. Sestili, NIM 128, 283 (1975):

$$\langle N_e \rangle = c_0 (bt)^{a-1} e^{-bt}$$

$$t_{\max} = (a-1)/b = 1.0(\ln y - 0.5), \quad y = E_0/E_c$$

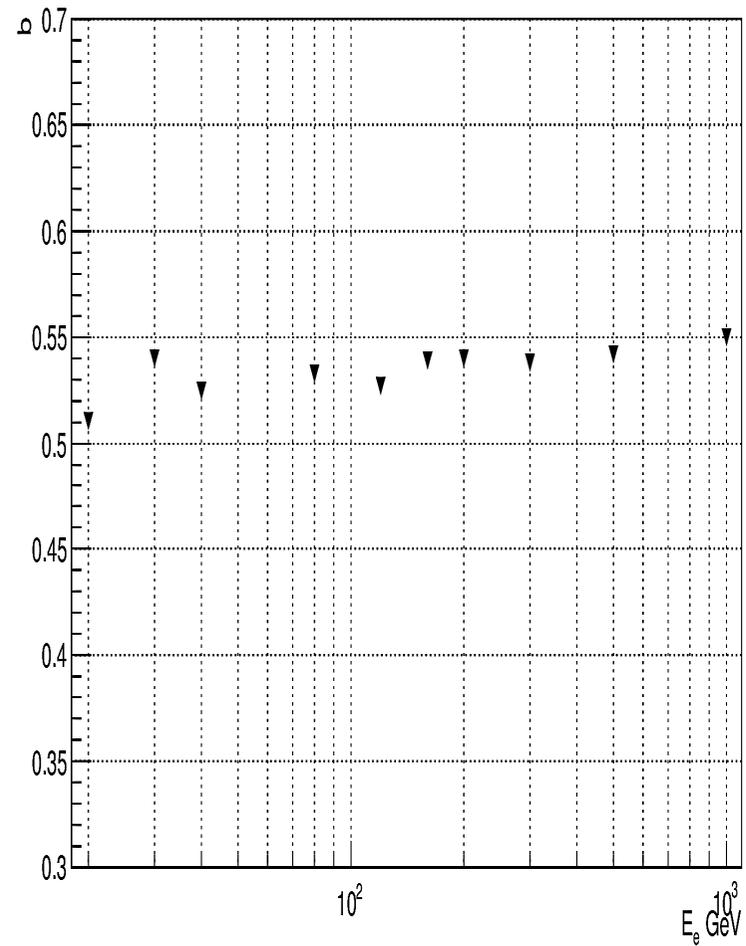
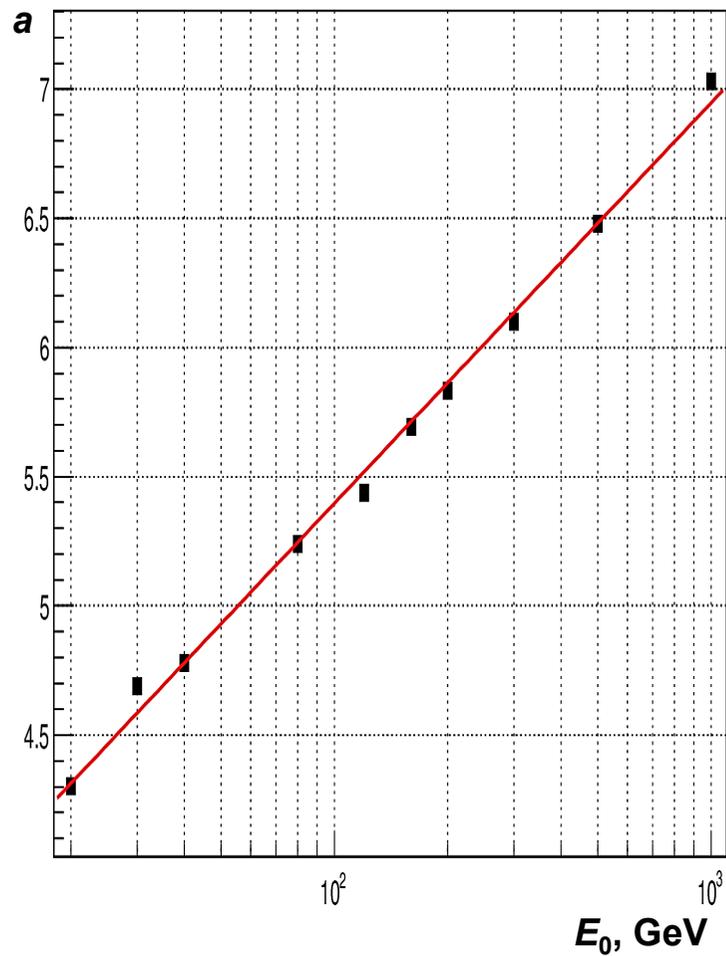
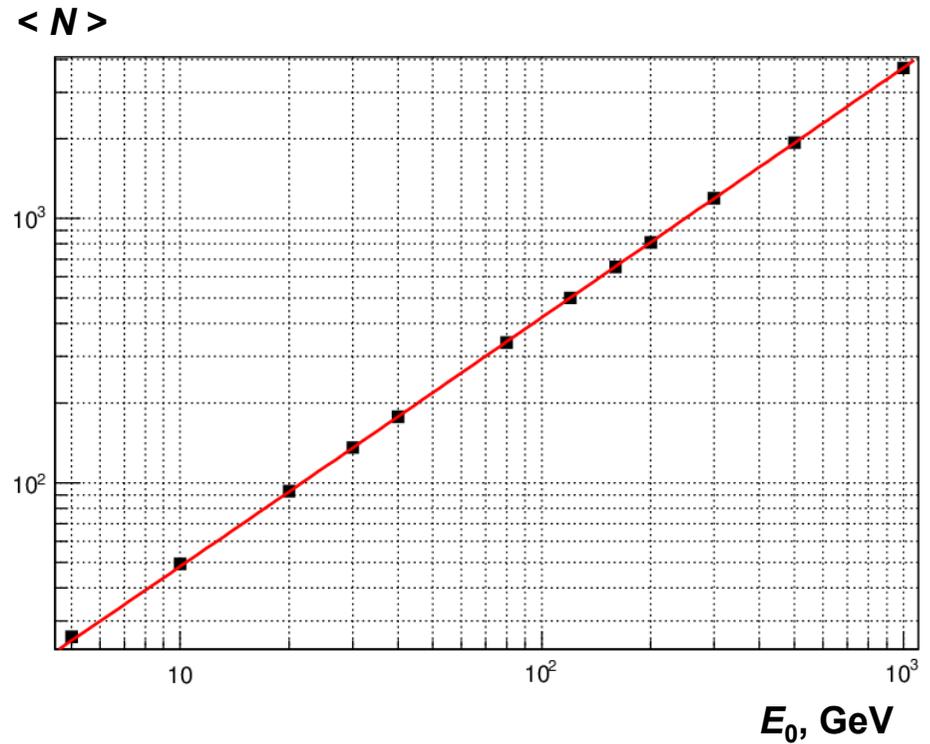
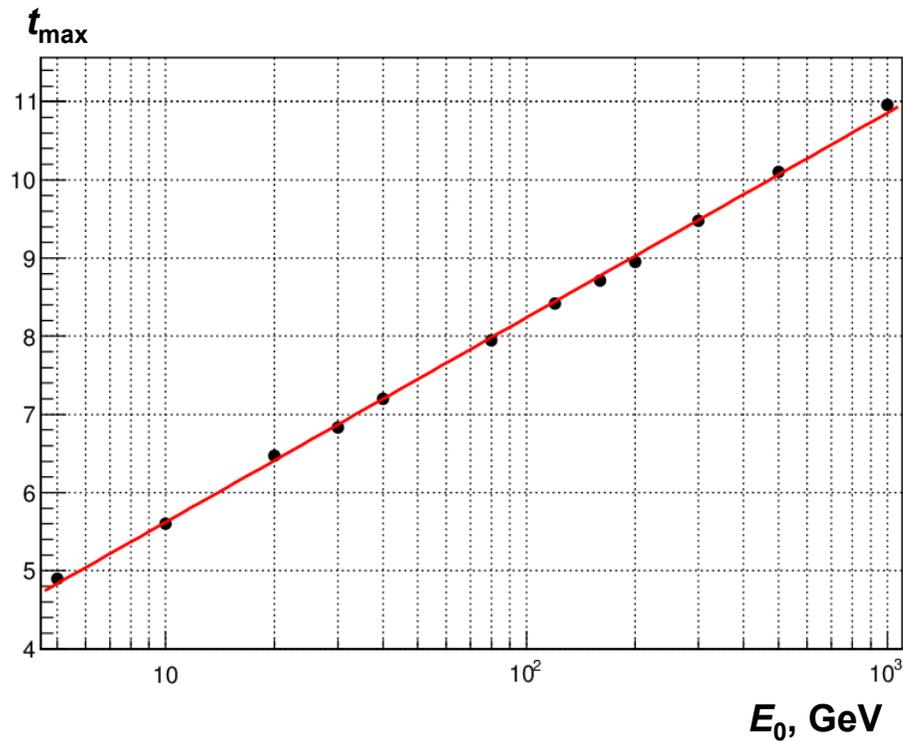


Рис.2 Зависимость параметров a и b от энергии E_0 первичного электрона.

$$a = (0.673 \pm 0.015) [\ln y - (1.4 \pm 0.2)]$$

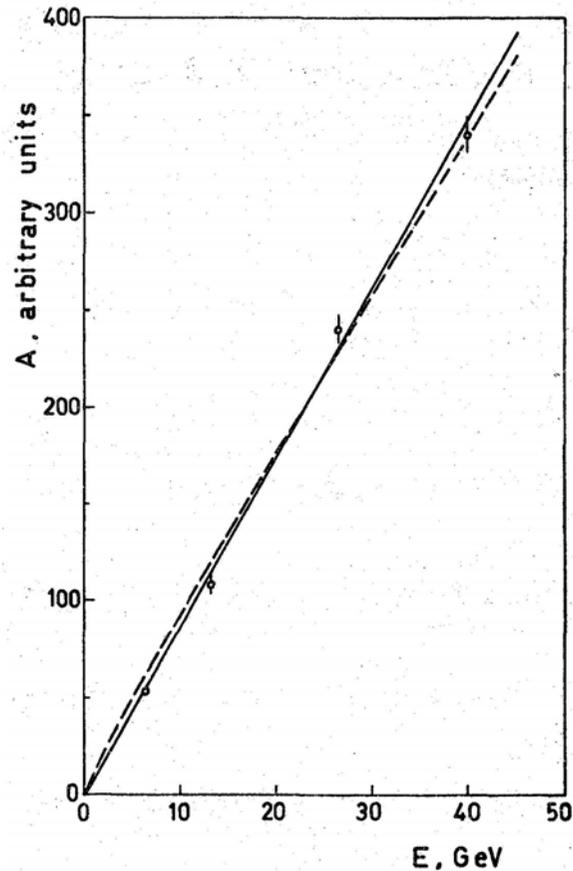


$$t_{max} = (1.12 \pm 0.03) [\ln (E_0/E_c) - (2.1 \pm 0.2)]$$

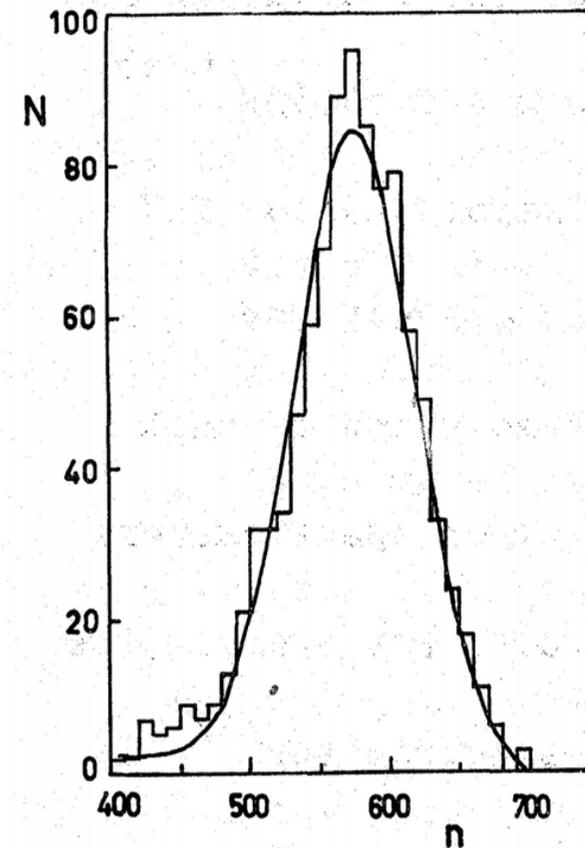
$$\langle N \rangle = (5.52 \pm 0.01) E_0^{0.942 \pm 0.001}$$

Рис.3 Зависимость t_{max} и среднего числа электронов в максимуме ливня от энергии E_0 первичного электрона.

Ts.A.Amatuni, S.P.Denisov, Yu.M.Antipov, A.I.Petrukhin. Energy determination and identification of High Energy electrons by energy deposition measurement near the shower maximum. Preprint IHEP 81-109, Serpukhov, 1981; NIM 203 (1982) 183.



Mean energy deposition in the 8 mm scintillator at the shower maximum vs electron energy. The dashed curve represents the dependencies $A \sim E^{0.935}$ and $A \sim (E/\epsilon) [\ln(E/\epsilon) - 0.37]^{1/2}$, ($\epsilon = 7.2$ MeV is the critical energy). The solid line and the dashed curve are normalized at $E=25$ GeV.



A typical pulse height distribution for 26.6 GeV electrons obtained with an 8 mm scintillator and 35 mm lead convertor (n – ADC channel number). The curve is result of fitting the distribution to a sum of a Gaussian and a second degree polynomial.

Для описания распределения по множественности использовалась обратная сумма двух экспонент:

$$\frac{dP}{dN} = \frac{p_0}{e^{p_1(N-p_3)} + e^{p_2(N-p_3)}}, \quad (1)$$

где p_0 – нормировочный коэффициент, а p_1, p_2, p_3 – свободные параметры. Формально функция определена от $-\infty$ до $+\infty$. Нормировка:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dP}{dN} dN = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p_0 e^{-pN'}}{1 + e^{qN'}} dN' = p_0 \frac{\pi}{q} \operatorname{cosec} \frac{p\pi}{q},$$

где $p = p_1$ и $q = p_1 - p_2$ ($q > p > 0$ или $0 > p > q$) (И.С. Градштейн и И.М. Рыжик).

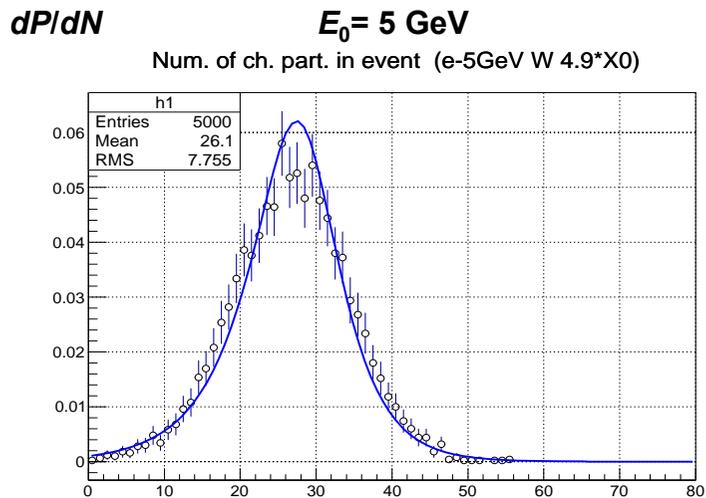
$$p_0 = \frac{p_1 - p_2}{\pi} \sin \frac{\pi p_1}{p_1 - p_2}$$

Наиболее вероятное значение N :

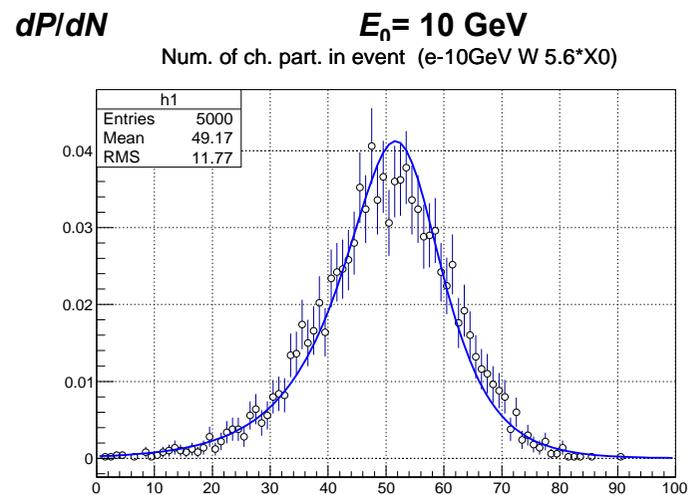
$$N_{mp} = p_3 - \frac{\ln p_1 - \ln (-p_2)}{p_1 - p_2} \approx p_3$$

Параметр p_1 определяет крутизну правого склона распределения ($N > p_3$), параметр p_2 - крутизну левого склона ($N < p_3$).

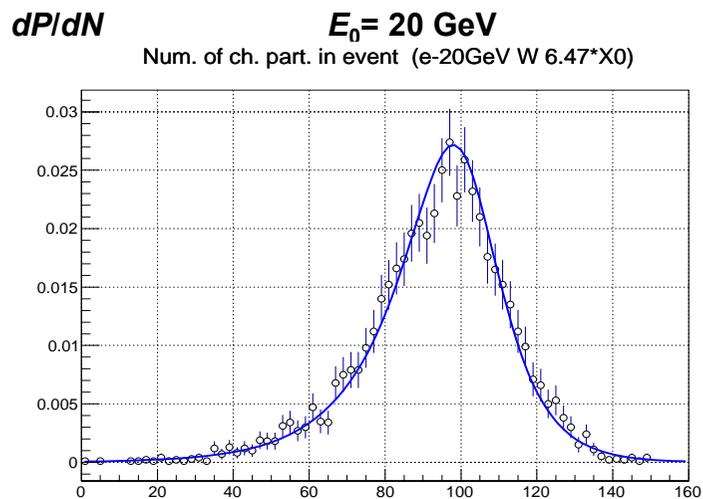
Формула (1) неверна при малых N ($N < 20?$).



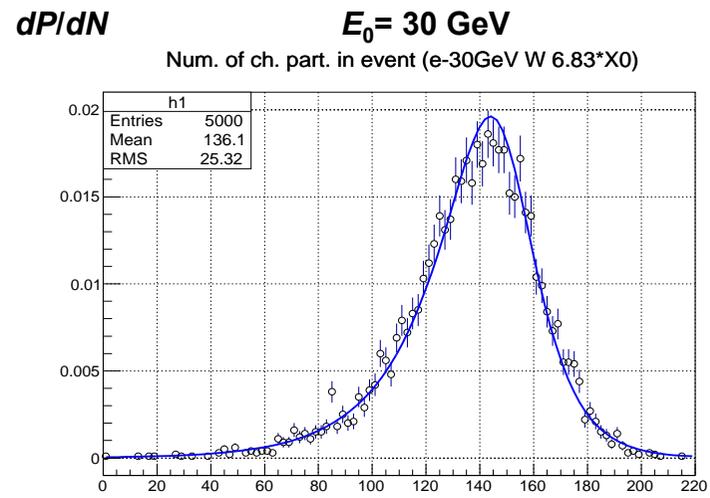
N



N



N



N

Рис.4 Распределение по множественности заряженных частиц в максимуме ливня для энергии E_0 первичного электрона от 5 до 30 GeV.

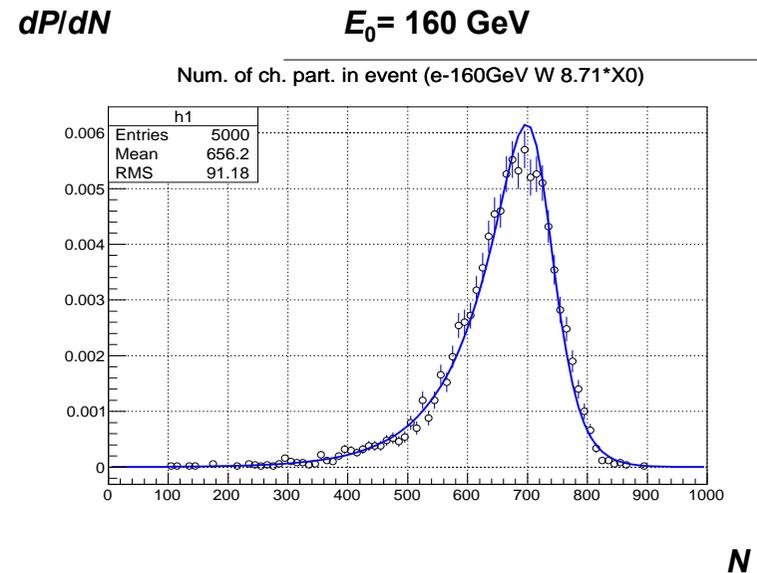
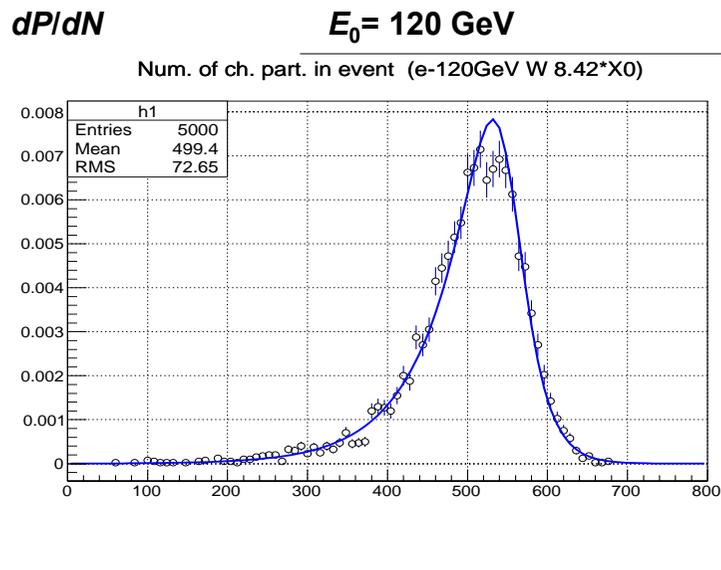
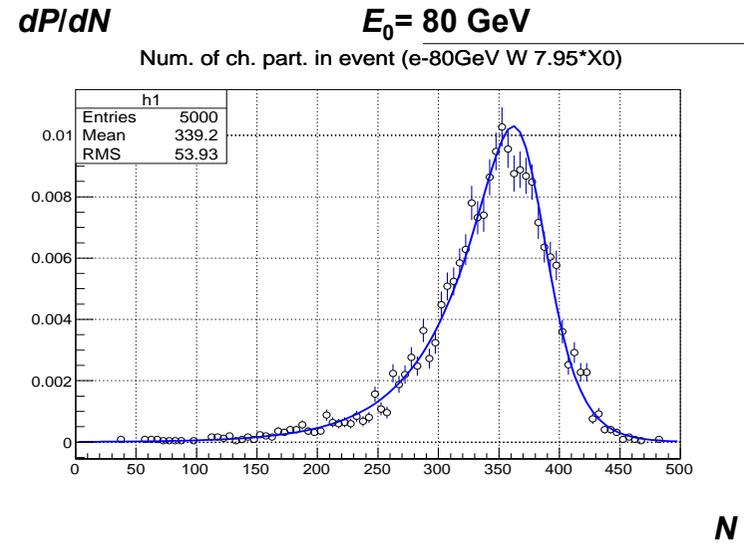
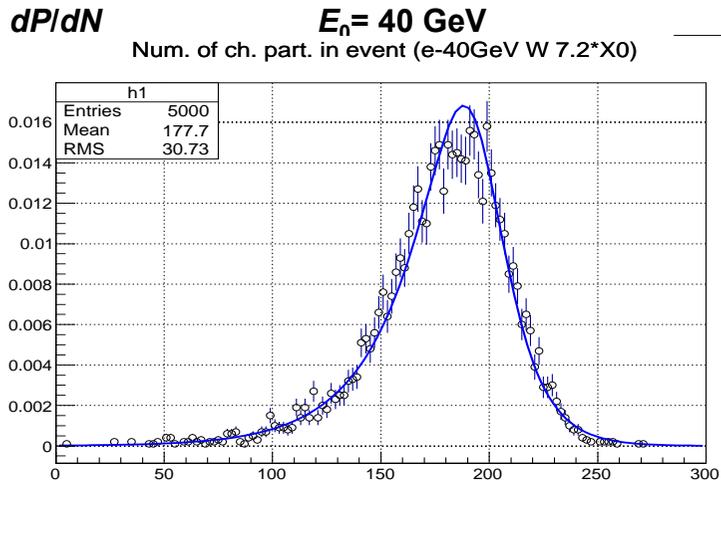
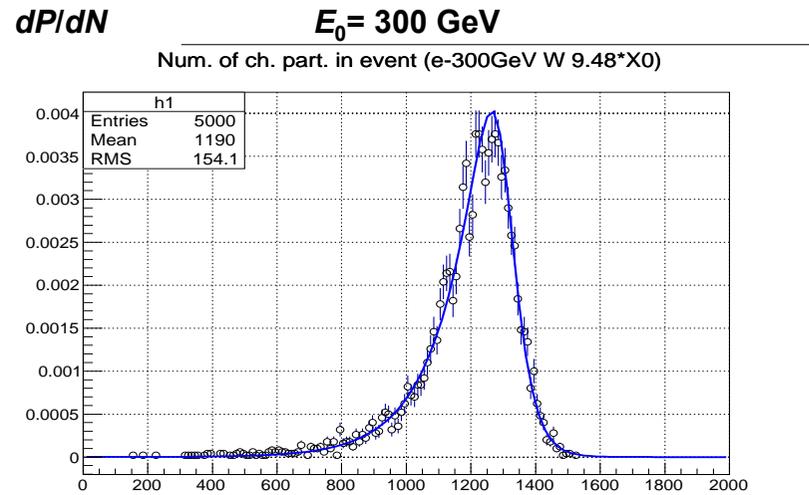
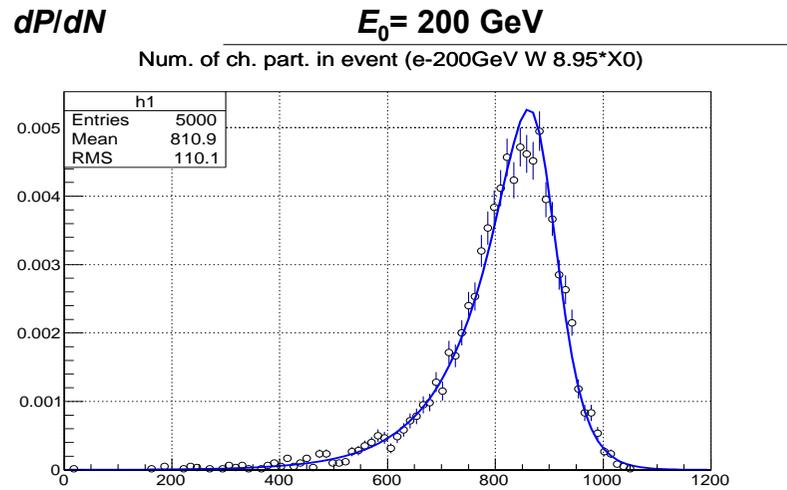
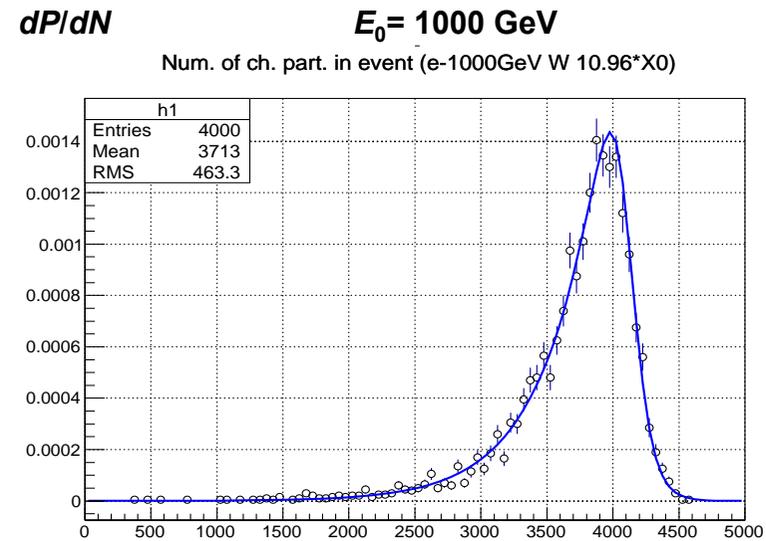
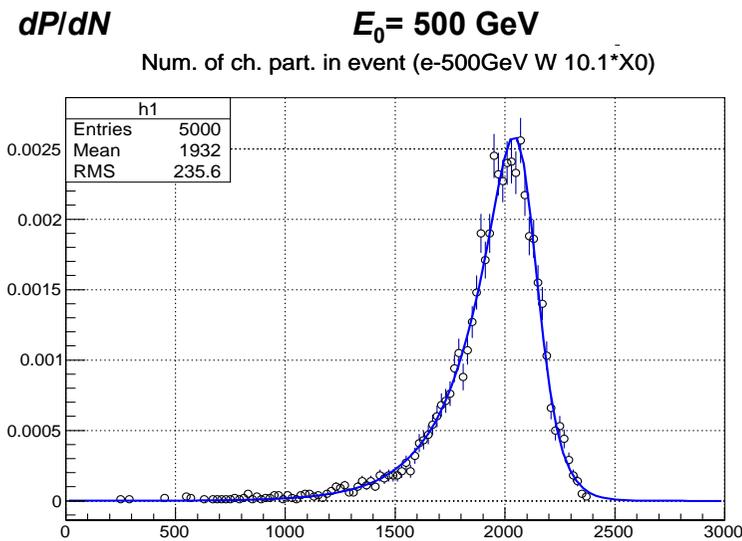


Рис.5 Распределение по множественности заряженных частиц в максимуме ливня для энергии E_0 первичного электрона от 40 до 160 GeV.



N

N



N

N

Рис.6 Распределение по множественности заряженных частиц в максимуме ливня для энергии E_0 первичного электрона от 200 до 1000 GeV.

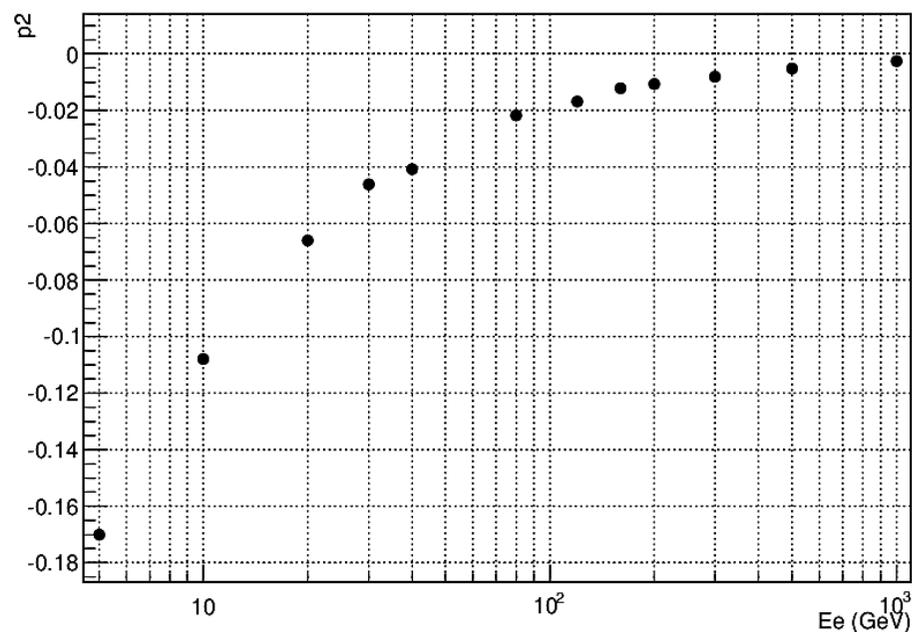
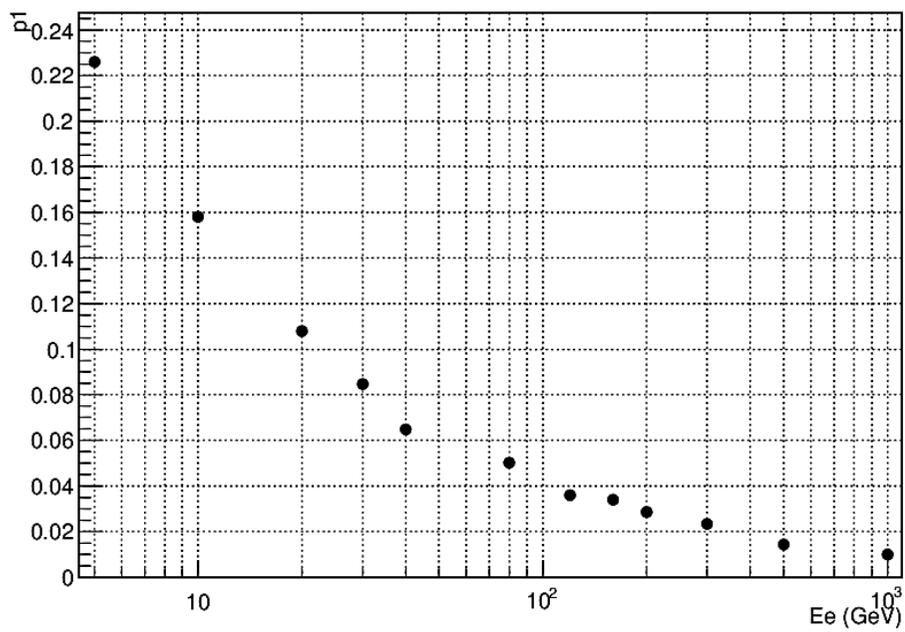


Рис.7 Зависимость параметров p_1 и p_2 от энергии первичного электрона.

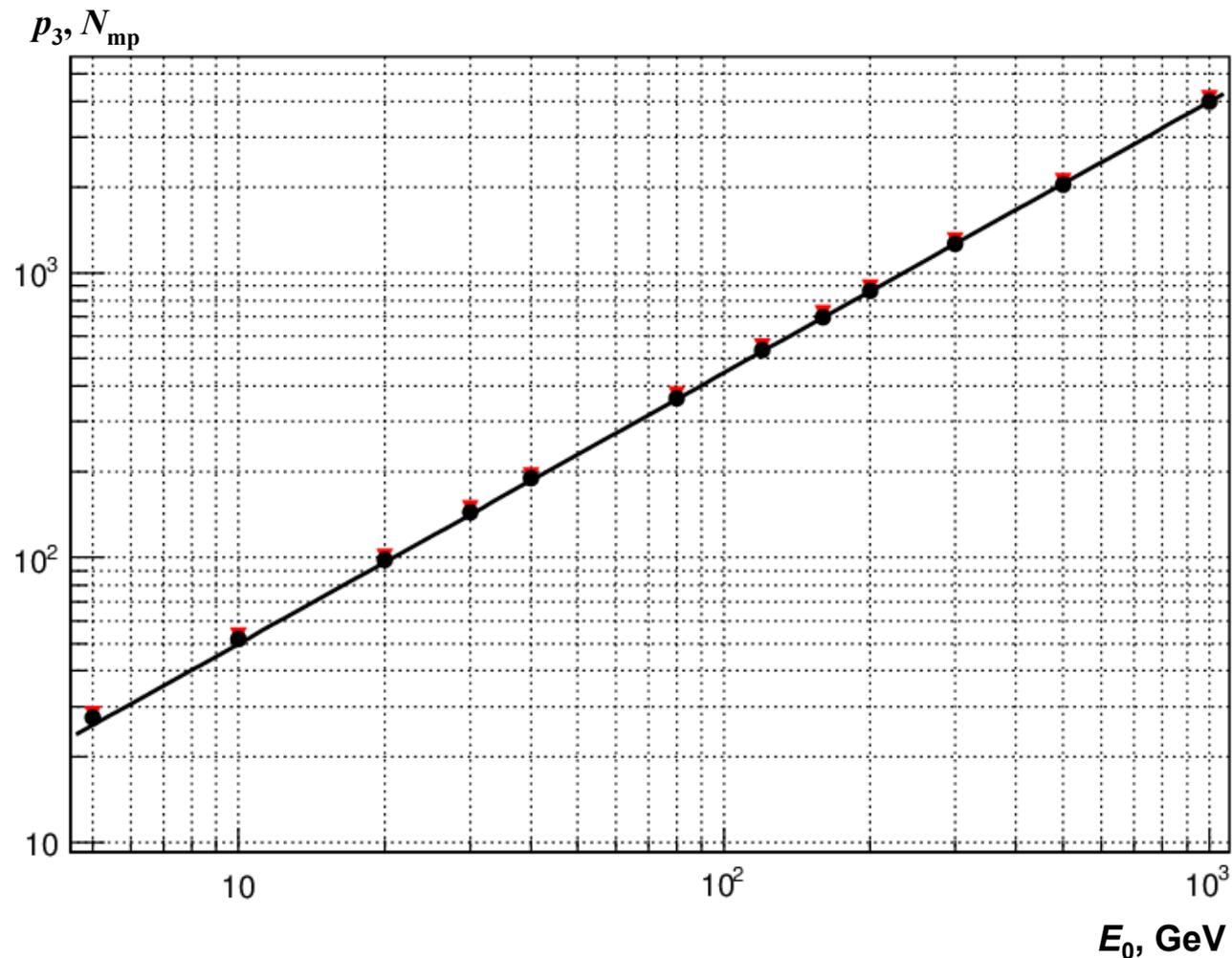


Рис.8 Зависимость параметра p_3 (красные значки) и наиболее вероятного значения N_{mp} числа заряженных частиц от энергии первичного электрона.

$$N_{mp} = (5.56 \pm 0.07) E_0^{0.951 \pm 0.002}$$

$$\langle N \rangle = (5.52 \pm 0.01) E_0^{0.942 \pm 0.001}$$

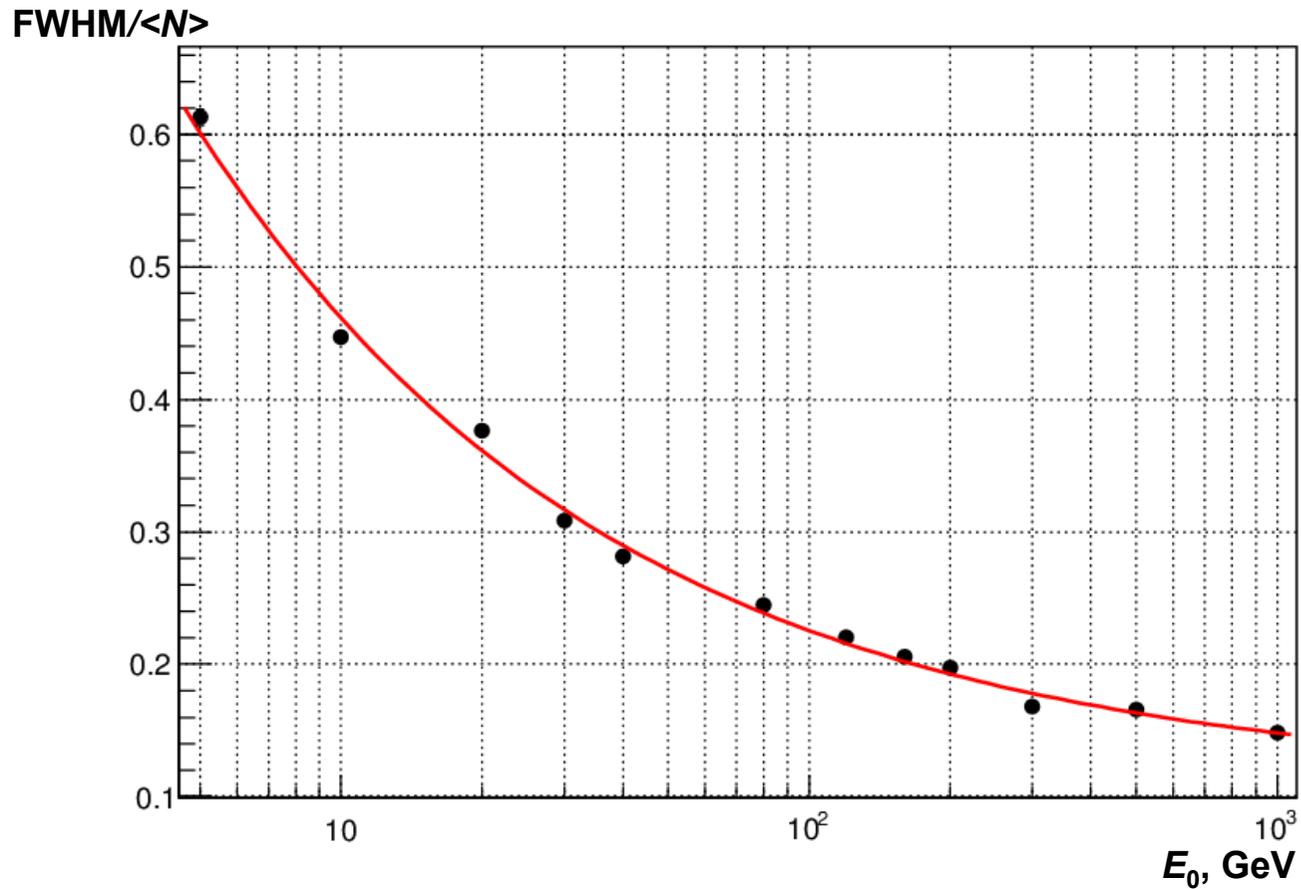


Рис.10 Зависимость отношения полной ширины на полувысоте распределения по множественности к среднему числу заряженных частиц от энергии первичного электрона.

$$\text{FWHM}/\langle N \rangle = (0.110 \pm 0.003) + (1.07 \pm 0.02)E_0^{-0.484 \pm 0.010}, \quad (E_0 \text{ в GeV})$$

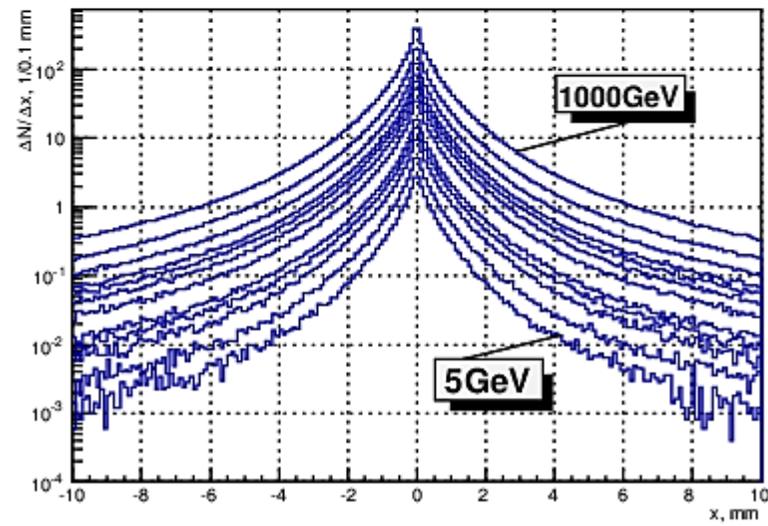
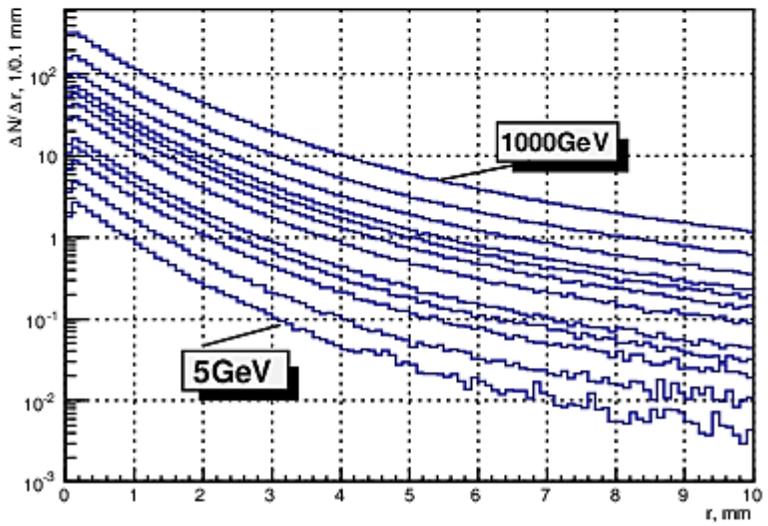
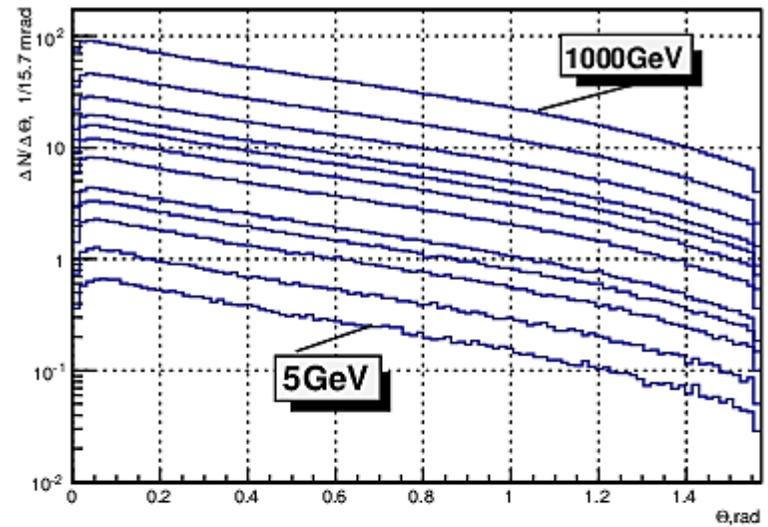
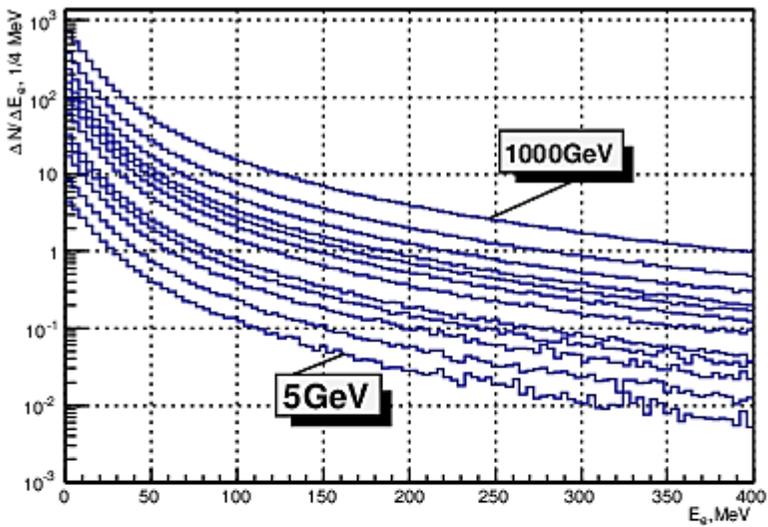


Рис.11 Распределение частиц в максимуме ливня по энергии, полярному углу, радиусу и поперечной координате.

Таблица 1. Интегральное распределение заряженных частиц по кинетической энергии в максимуме ливня.

E_0 , GeV	E, MeV									
	5	10	20	30	50	100	200	300	500	1000
5	0.210	0.364	0.561	0.673	0.792	0.901	0.959	0.978	0.991	0.998
10	0.214	0.371	0.568	0.679	0.794	0.900	0.957	0.976	0.989	0.997
20	0.222	0.381	0.577	0.688	0.801	0.903	0.958	0.976	0.988	0.996
30	0.222	0.381	0.576	0.686	0.799	0.901	0.956	0.974	0.987	0.995
40	0.224	0.384	0.580	0.689	0.801	0.902	0.956	0.974	0.987	0.995
80	0.229	0.388	0.584	0.691	0.802	0.901	0.955	0.973	0.986	0.995
120	0.230	0.390	0.586	0.694	0.804	0.902	0.955	0.972	0.986	0.994
160	0.231	0.391	0.586	0.693	0.803	0.901	0.954	0.972	0.985	0.994
200	0.231	0.391	0.586	0.693	0.803	0.901	0.954	0.972	0.985	0.994
300	0.234	0.395	0.590	0.697	0.805	0.902	0.955	0.972	0.985	0.994
500	0.236	0.397	0.592	0.698	0.806	0.902	0.954	0.972	0.985	0.994
1000	0.234	0.395	0.588	0.694	0.802	0.899	0.952	0.970	0.983	0.993

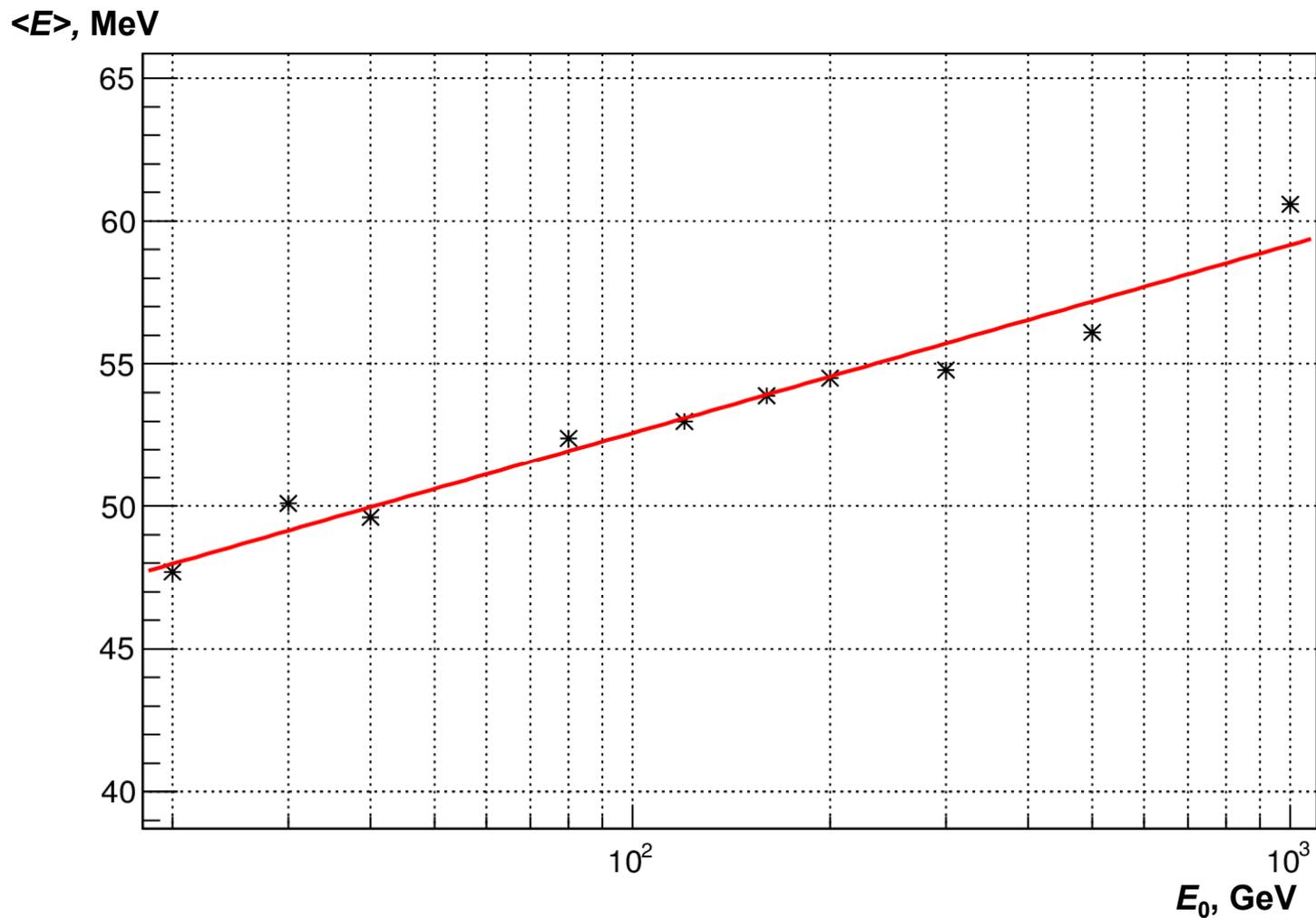


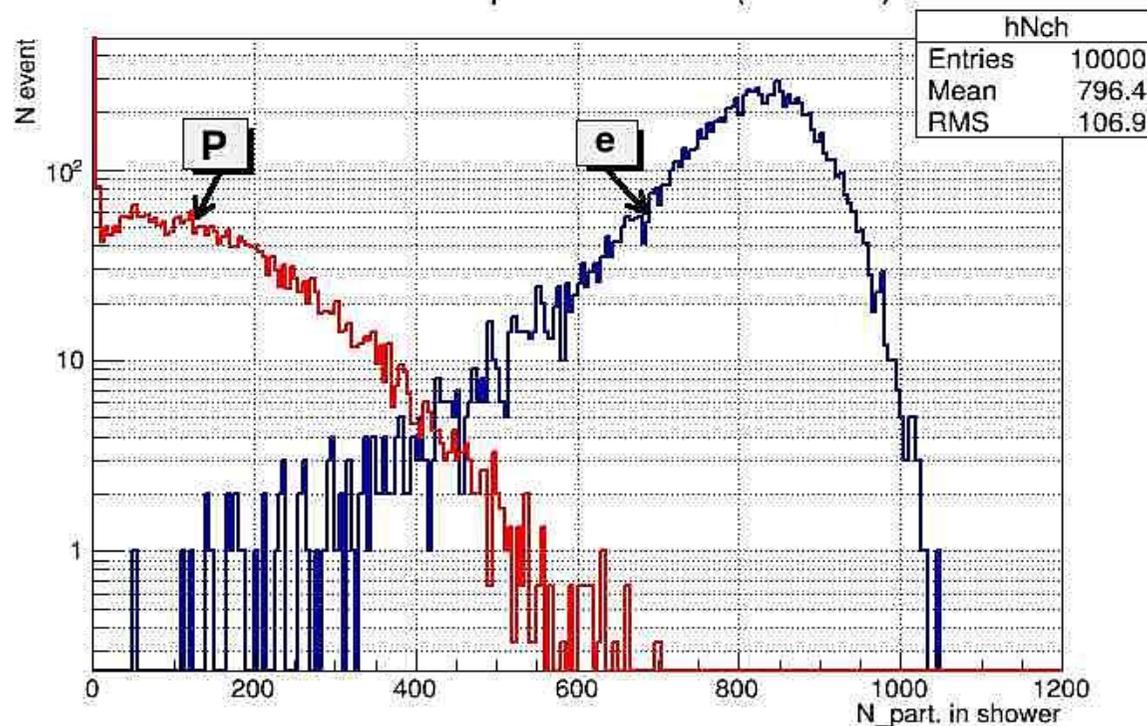
Рис.12 Зависимость средней энергии заряженных частиц в максимуме ливня от энергии первичного электрона.

$$\langle E \rangle (\text{MeV}) = (39.4 \pm 1.1) + (2.86 \pm 0.22) \ln E_0 (\text{GeV})$$

Таблица 2. Интегральное распределение заряженных частиц по радиусу в максимуме ливня.

E_0 , GeV	r, mm								
	1	2	3	5	10	20	30	50	100
5	0.655	0.851	0.919	0.961	0.982	0.990	0.992	0.995	0.998
10	0.641	0.841	0.912	0.957	0.981	0.989	0.992	0.994	0.997
20	0.620	0.823	0.899	0.951	0.978	0.988	0.991	0.994	0.997
30	0.620	0.822	0.898	0.950	0.978	0.988	0.991	0.993	0.997
40	0.614	0.817	0.894	0.948	0.977	0.988	0.991	0.993	0.997
80	0.606	0.809	0.888	0.944	0.975	0.987	0.990	0.993	0.996
120	0.601	0.804	0.885	0.942	0.974	0.986	0.990	0.993	0.996
160	0.601	0.803	0.883	0.941	0.974	0.986	0.989	0.992	0.996
200	0.600	0.802	0.882	0.940	0.974	0.986	0.989	0.992	0.996
300	0.593	0.796	0.878	0.937	0.972	0.986	0.989	0.992	0.996
500	0.589	0.792	0.874	0.935	0.972	0.985	0.989	0.992	0.996
1000	0.594	0.794	0.875	0.935	0.971	0.985	0.989	0.992	0.996

Num. of ch. part. in event (W 9*X0)



N_0	550	600	650	700	750
$N_p (N > N_0)$	28	17	4	1	0
$P_p (x10^4)$	9.3	5.7	1.3	0.3	0
$N_e (N > N_0)$	9675	9486	9162	8603	7561
P_e	0.97	0.95	0.92	0.86	0.76

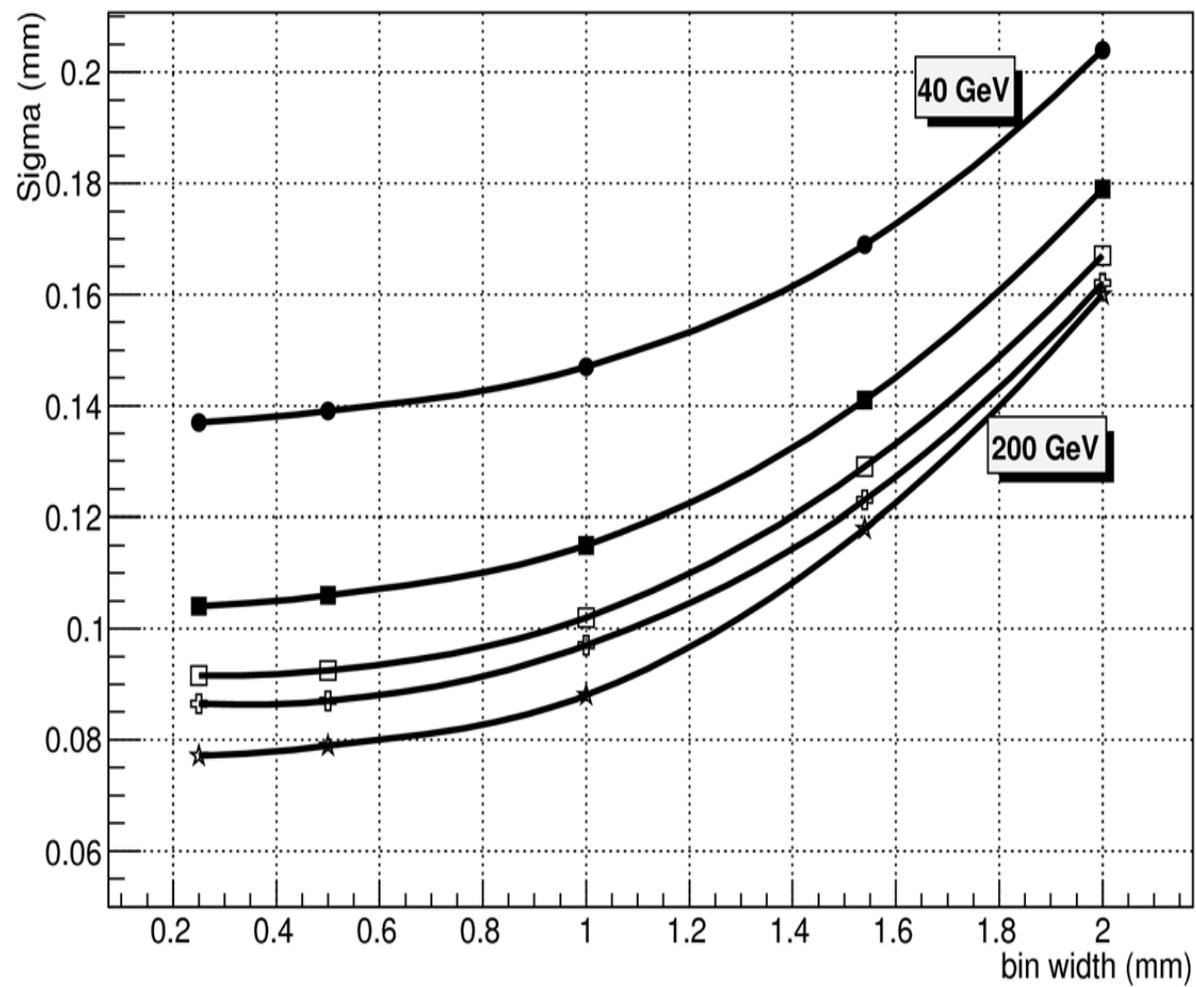


Рис.13 Зависимость координатного разрешения от размера стрипа детектора.

Основные результаты

1. Проведены детальные расчёты распределения заряженных частиц в области максимума электромагнитных ливней в вольфраме в широком диапазоне энергий до 1 ТэВ.
2. Показано, что распределения частиц по множественности хорошо описываются обратной суммой экспонент с тремя свободными параметрами. Получена зависимость параметров экспонент от энергии.
3. Найдено, что распределения частиц по энергии, углу, радиусу и координате с высокой степенью подобны и их форма слабо зависит от энергии.
4. Средняя энергия частиц составляет около 50 МэВ и практически не зависит от энергии начального электрона.
5. 60% частиц сосредоточены в круге радиусом 1 мм независимо от энергии.
6. Коэффициент режекции адронов составляет $\sim 10^3$ при эффективности регистрации 200 ГэВ электронов 95%, если использовать только данные по множественности частиц. Если учесть распределения частиц по радиусу, то коэффициент режекции возрастает до $\sim 10^4$.
7. Точность определения координаты оси ливня может составлять ~ 100 мкм при ширине стрипа детектора 1 мм.

Планы

1. Провести расчёты распределений заряженных частиц в области максимума электромагнитных ливней в железе и свинце.
2. Исследовать корреляцию между энергией и радиусом частиц.
3. Определить коэффициент режекции адронов с учётом распределения частиц по множественности и радиусу.
4. Провести расчёты для первичных фотонов.