

Протоны сверхвысокой энергии от популяции неодинаковых астрофизических источников

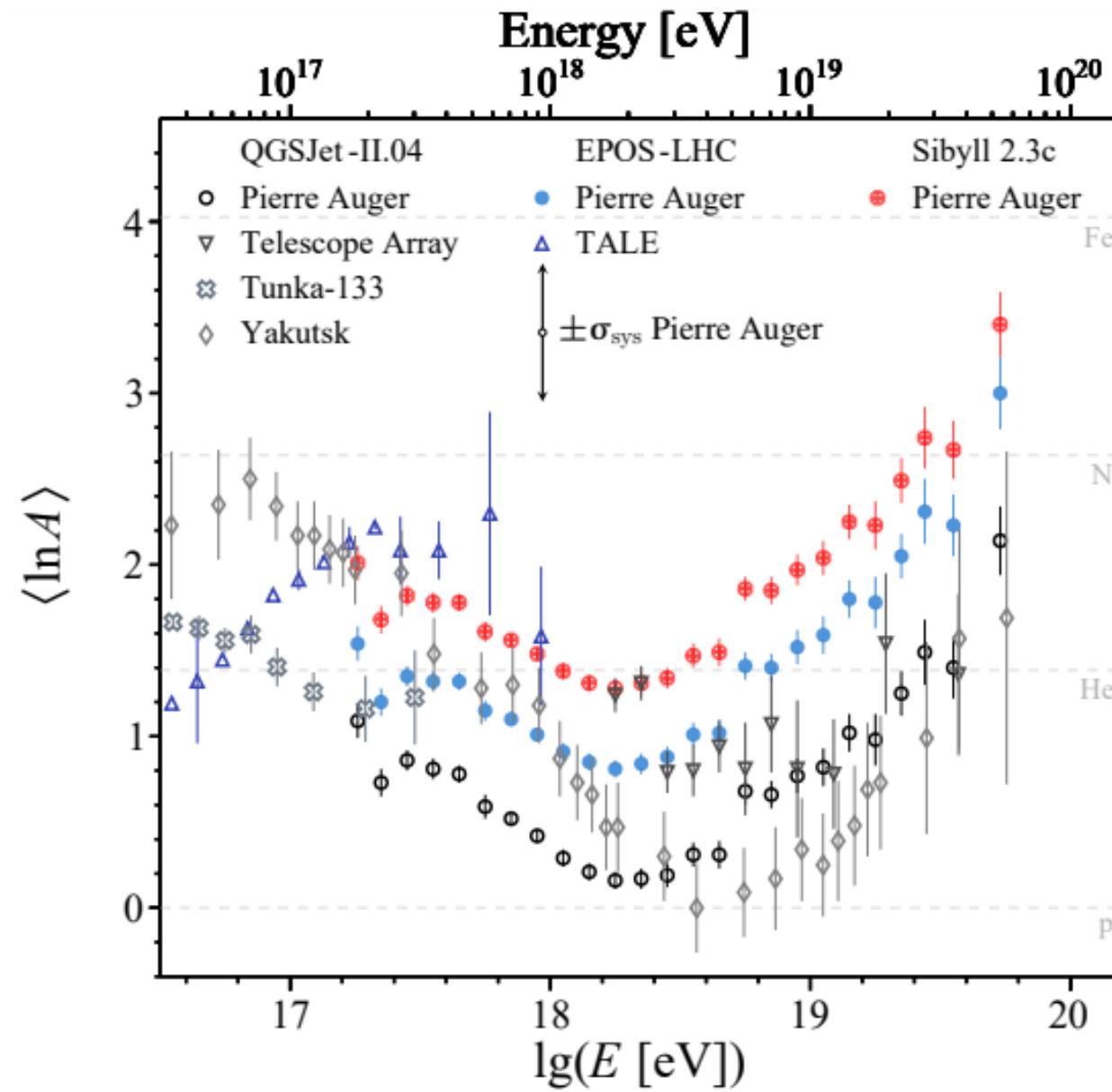
Выполнила: Смирнова Е.А.

Научный руководитель: Троицкий С.В.

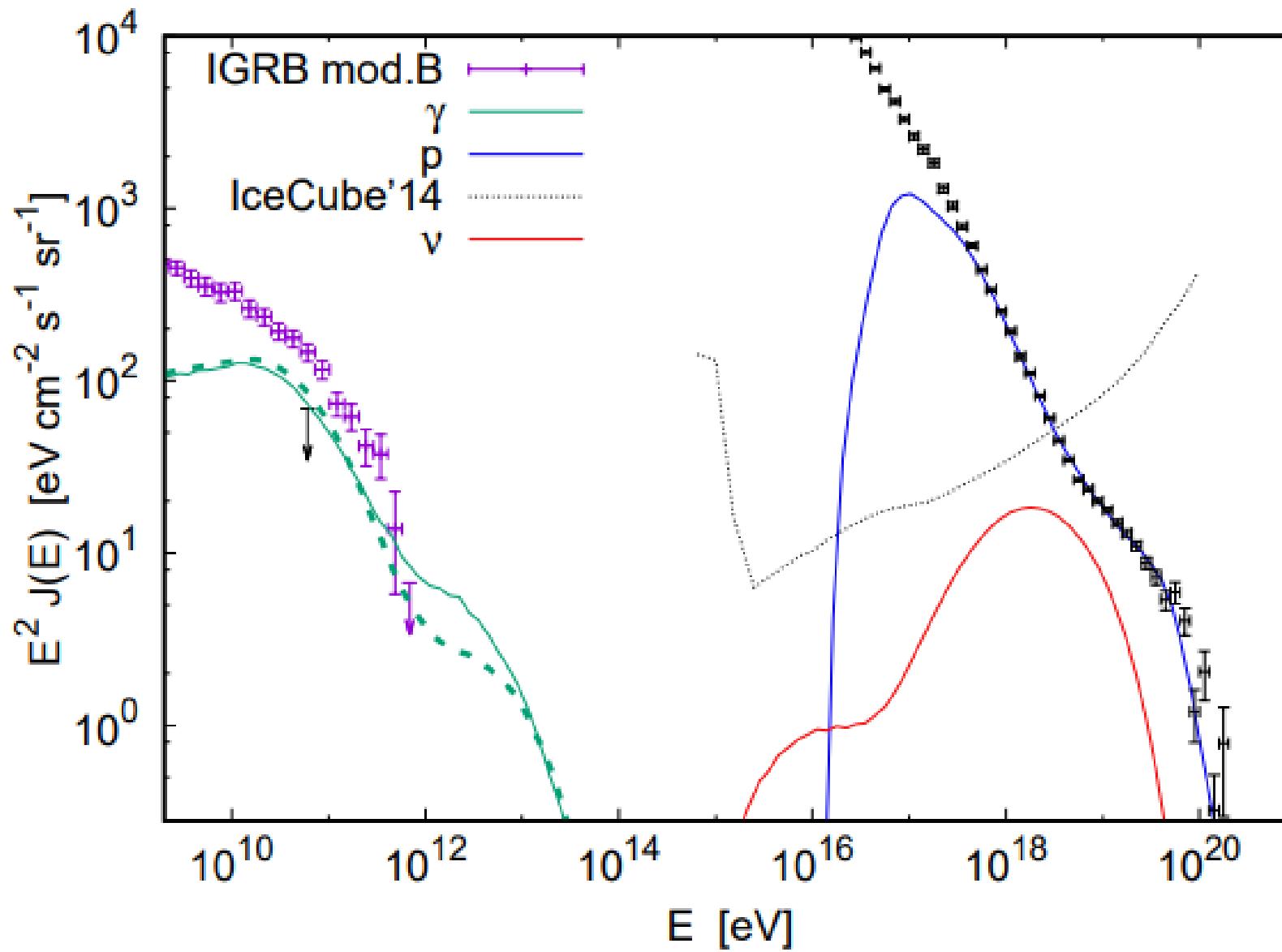
МГУ им. М.В. Ломоносова

2022

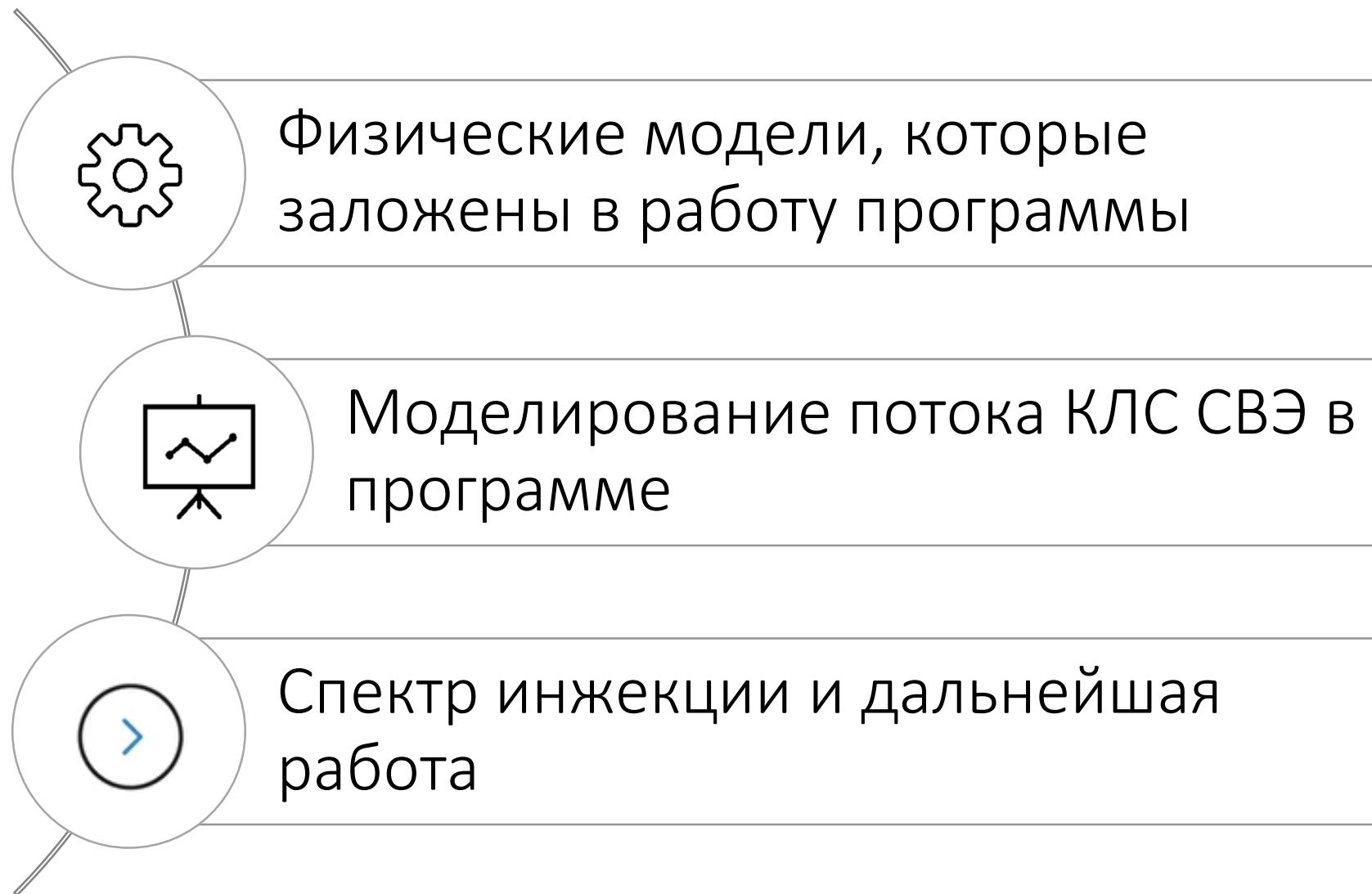
Постановка задачи



Постановка задачи



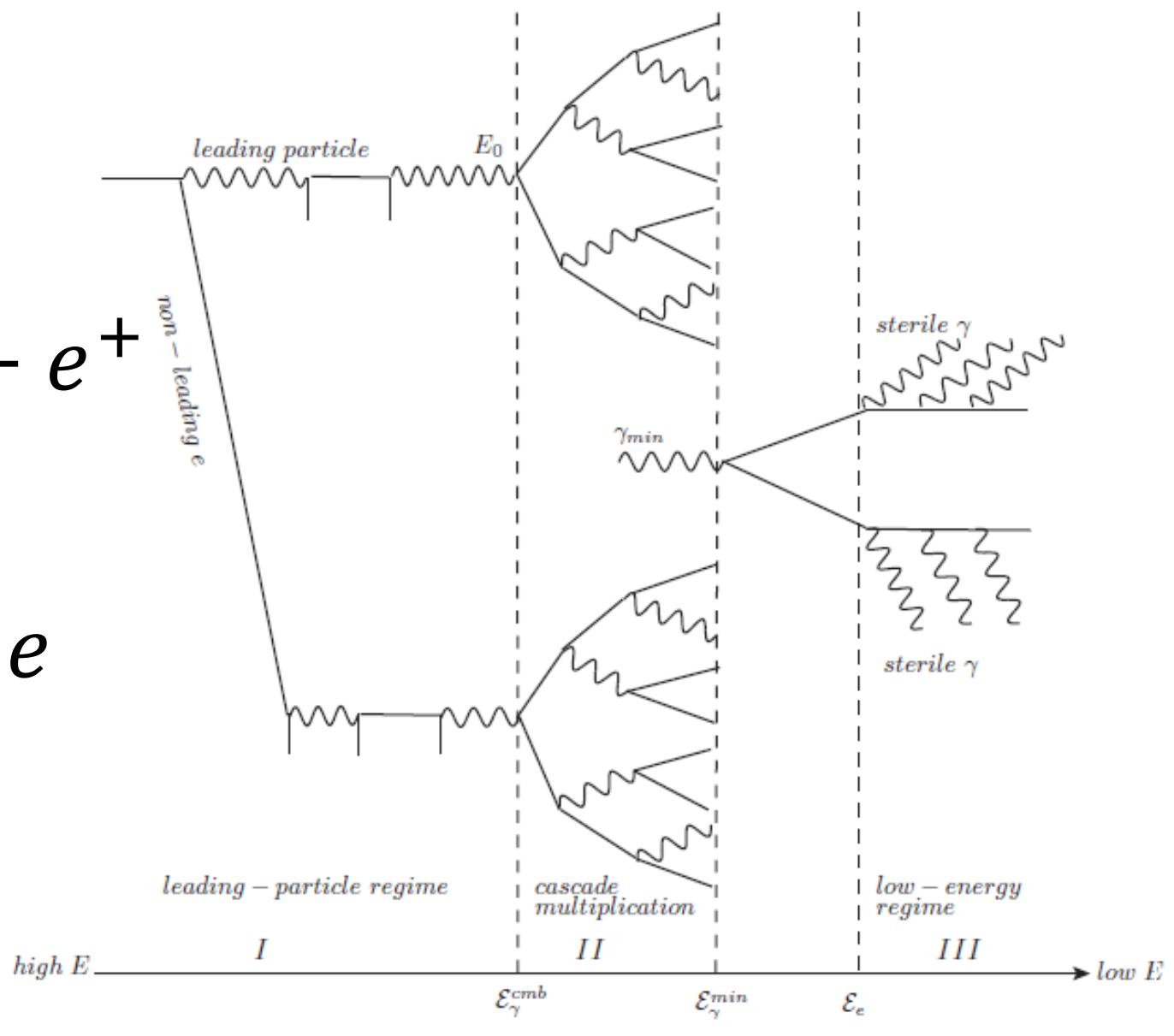
План рассказа



Развития электромагнитного каскада

$$\gamma + \gamma_{target} \rightarrow e^- + e^+$$

$$e + \gamma_{target} \rightarrow \gamma' + e$$



Сопутствующий сигнал от распространения КЛ

$$N + \gamma' \rightarrow \pi^{\pm, 0} + X$$

$$A + \gamma' \rightarrow e^+ + e^- + A$$

Распространение излучения в расширяющейся Вселенной

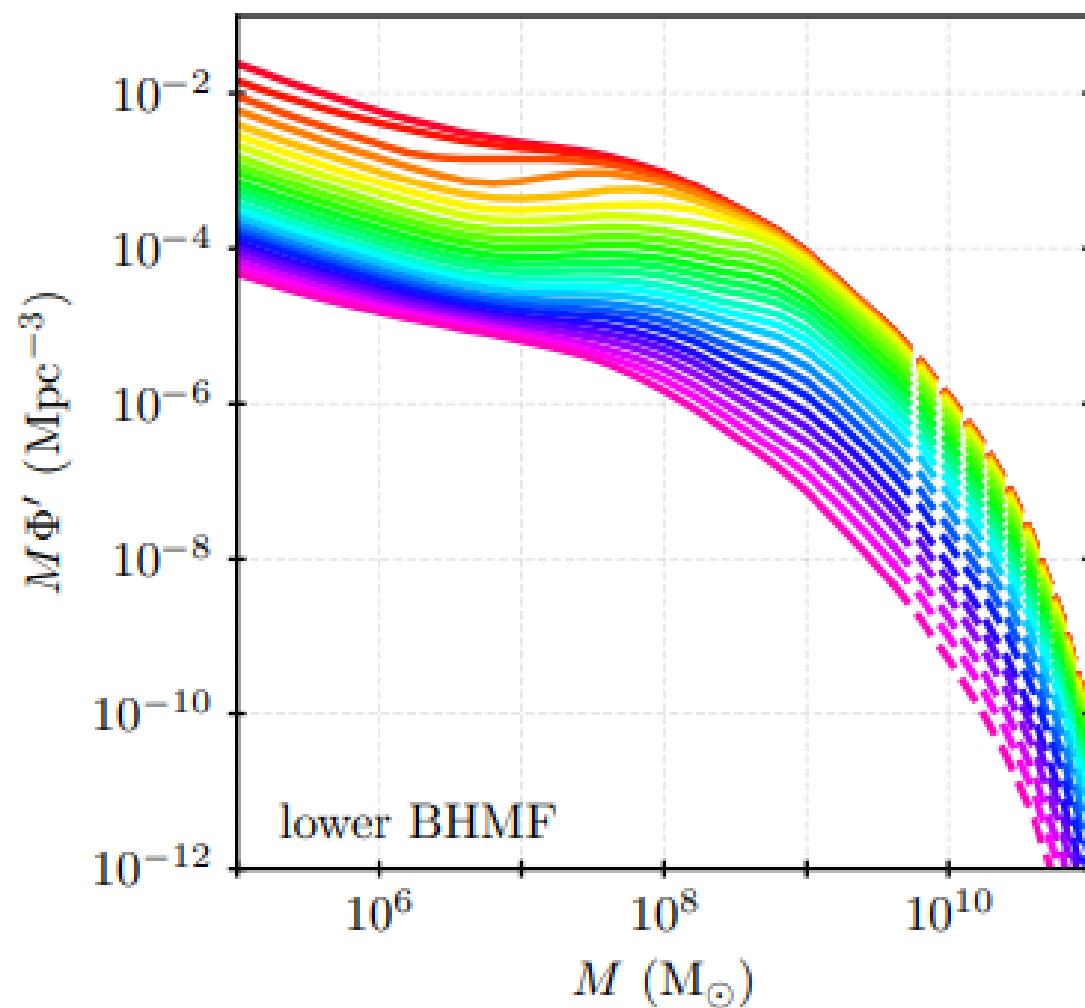
$$\chi(z) = \int_0^z \frac{dz'}{a_0 H_0} \frac{1}{\sqrt{\Omega_M(1+z')^3 + \Omega_\Lambda + \Omega_{curv}(1+z')^2}}$$

$$S(z) = 4\pi r^2(z) \quad r(z) = a_0 sh \chi(z)$$

$$r(z) = \frac{1}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}}$$

$$J = \frac{L}{(1+z)^2 S(z)}$$

Распределение черных дыр по массам

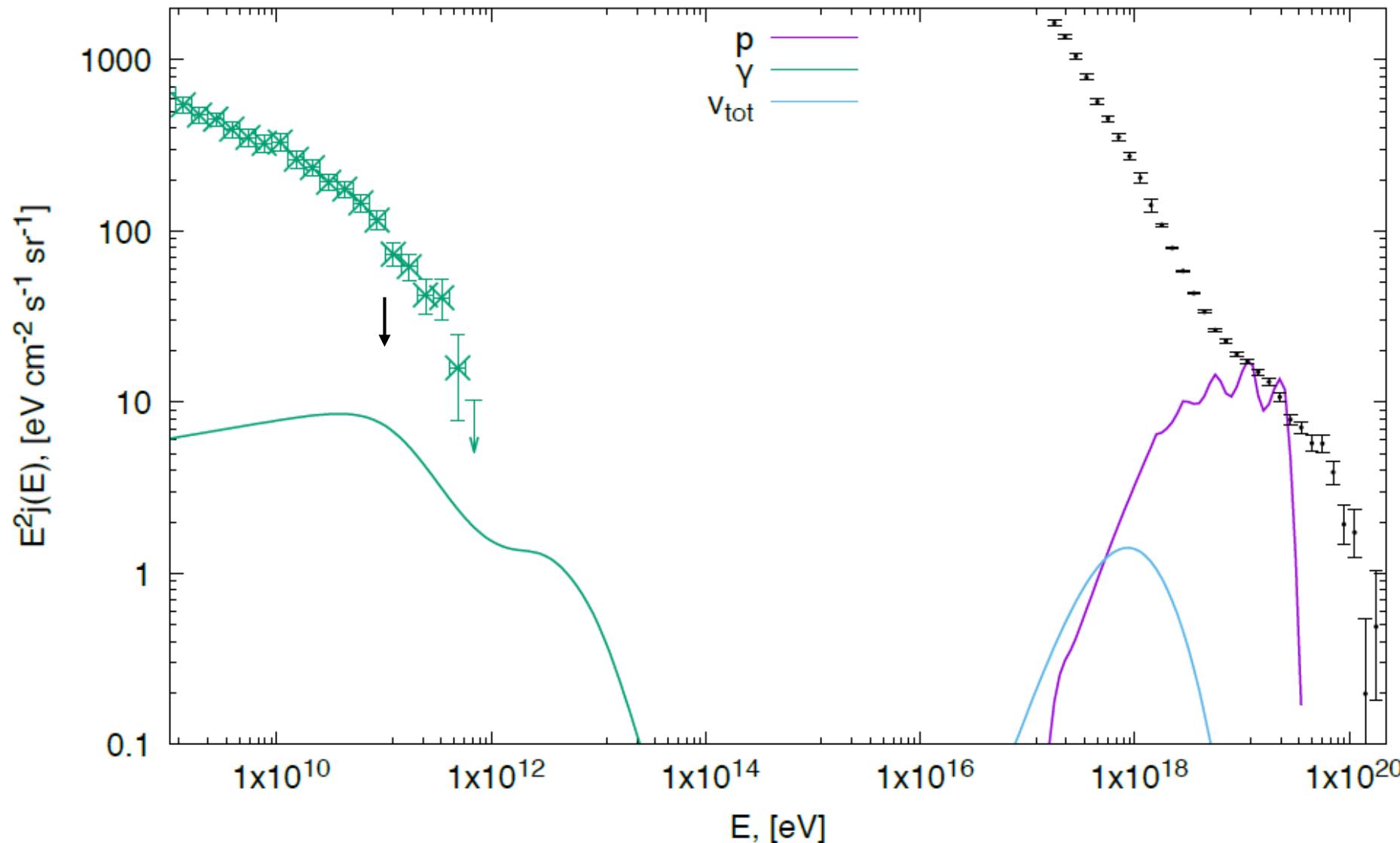


$$\Phi(M, z) = \frac{dN}{dM dz}$$

$$\Phi(M, z) = \frac{4\pi c D^2 \Phi'(M, z)}{H_0 E(z)}$$

$$\Phi'(M, z) \propto M^{-\alpha} \exp\left(-\frac{M}{M_{cutoff}}\right)$$

Моделирование потока КЛ СВЭ



Спектр инжекции для данного Z

$$dN_{protons} \sim dN_{BH}$$

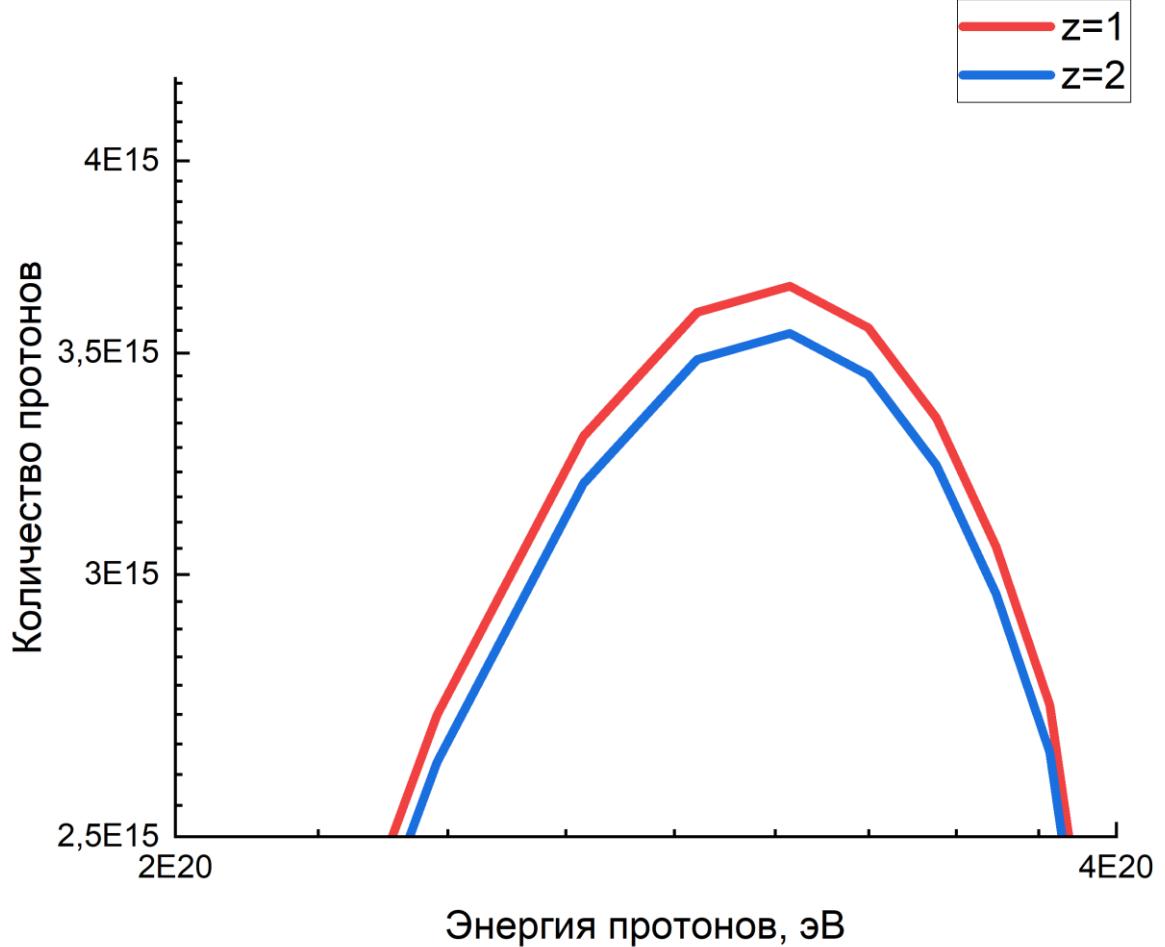
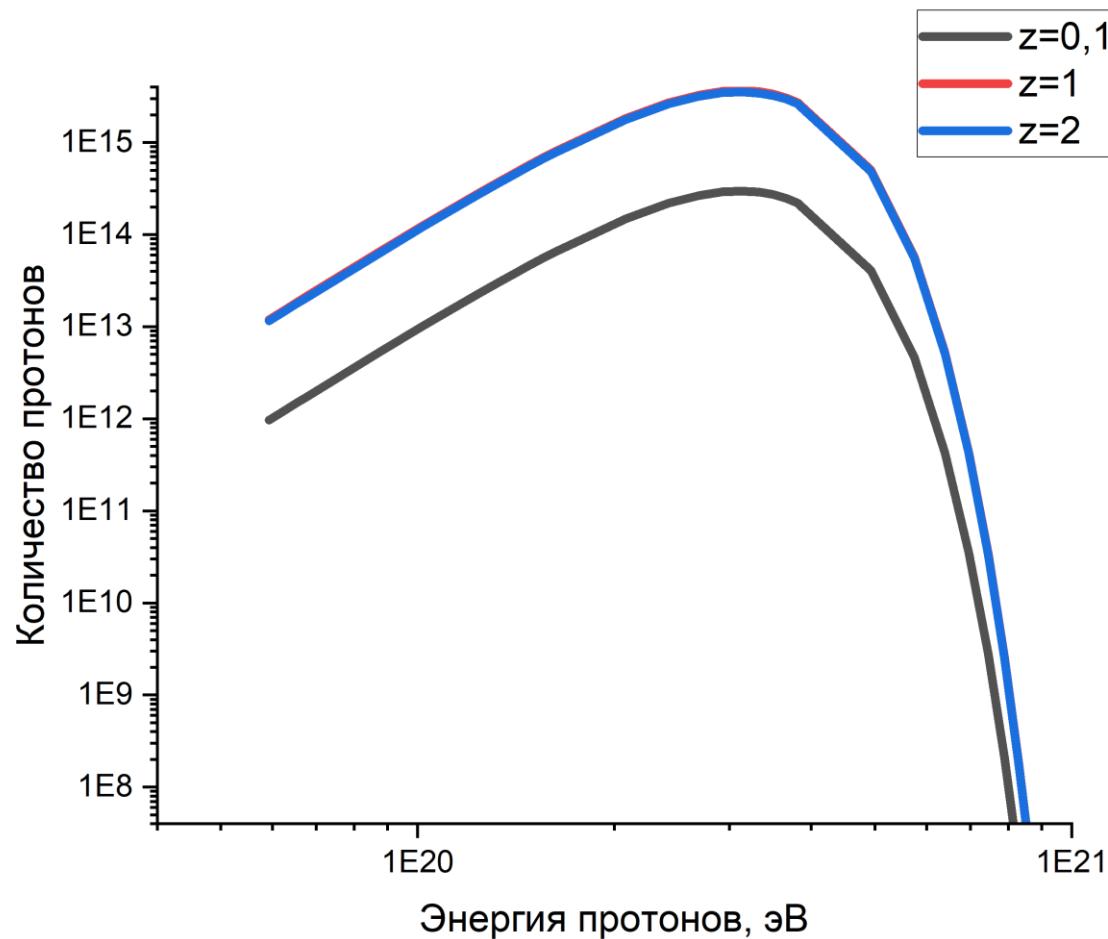
$$E = 2,9 \cdot 10^{20} eV \frac{A}{Z^{\frac{1}{4}}} \left(\frac{M}{10^9 M_{\odot}} \right)^{\frac{3}{8} + \frac{\alpha}{4}} \chi^{-\frac{1}{2}} (k\kappa)^{\frac{1}{4}}$$

$$\Phi(M, z) = \tilde{\Phi}(M, z) \frac{dE}{dM} \quad dN_{BH} = \tilde{\Phi}(M, z) dEdz$$

$$\frac{dN_{BH}}{dE} = \tilde{\Phi}(E, z) M^{\beta} dz = \frac{\Phi(M(E), z)}{E'_M} M^{\beta} dz$$

$$\boxed{\frac{dN_{BH}}{dE} = C_2 \left(\frac{E(M)}{C_1} \right)^{\frac{1-\alpha-\gamma}{\gamma}} \exp \left(- \frac{\left(\frac{E(M)}{C_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}}}{M_{cutoff}} \right)}$$

Спектр инжекции для данного z



Научные результаты

Мною было изучено



- Зависимость между наблюдаемым и излучаемым потоком источника на космологически большом расстоянии;
- Механизм появления космических лучей СВЭ и развития ЭК;
- Какие существуют модели КЛ и распределение масс ЧД.

Мною было сделано



- Освоена программа для моделирования потока КЛ
- Построен график, описывающий наблюдаемый поток гамма-излучения
- Построен график спектра инжекции

Научные результаты

Основным научным результатом является то, что протонный сценарий хорошо описывает наблюдаемый поток космических лучей сверхвысокой энергии.

Предположение о неодинаковости источников сильно меняет наблюдаемые характеристики предсказываемых потоков КЛ. Учет еще более точной модели распределения ЧД позволит в дальнейшем полностью описать внегалактическую составляющую потока КЛ СВЭ.