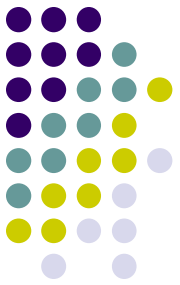


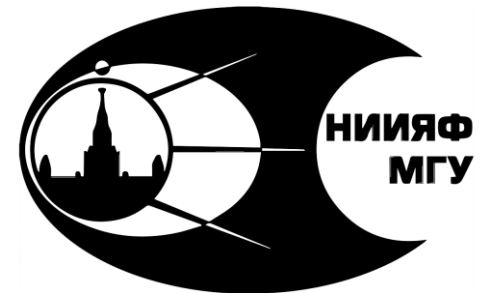
Космогенные изотопы в лунном грунте: солнечная активность и вспышки близких сверхновых



Г.И.Васильев², А.Н.Константинов¹, В.М.Остряков¹,
А.К.Павлов², Д.А.Фролов²

¹ - СПбПУ Петра Великого

² - ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН



ВККЛ, 29.06.2022, МГУ

Спектр ГКЛ и модуляция



E_{\min} на данной широте

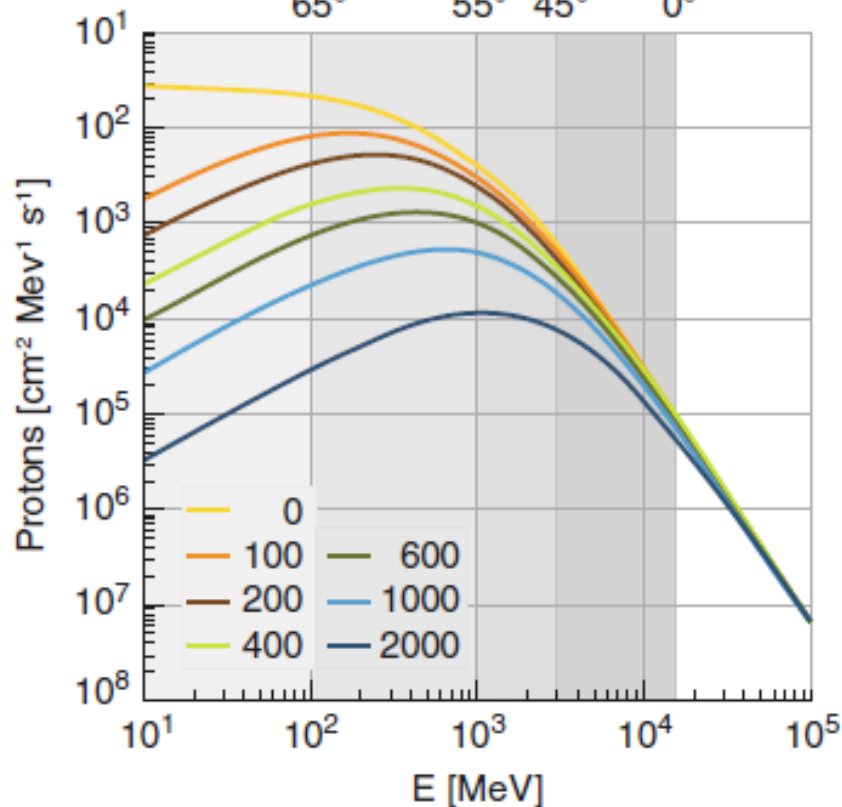
65° 55° 45° 0°

min SA

max SA

Φ →

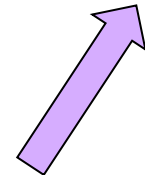
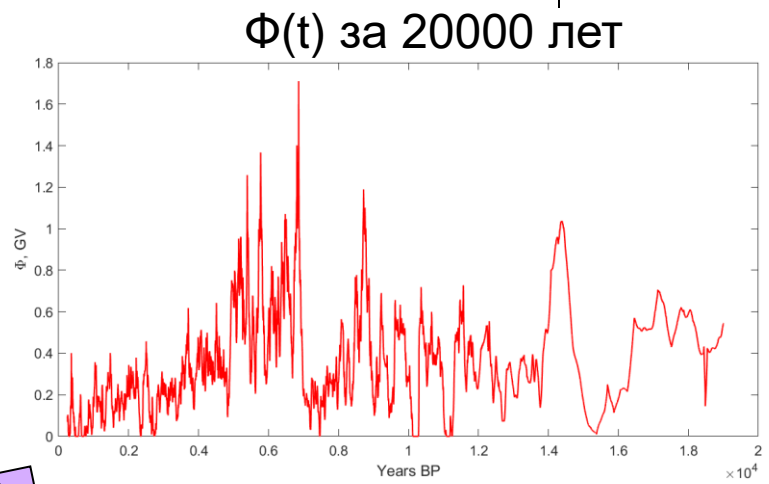
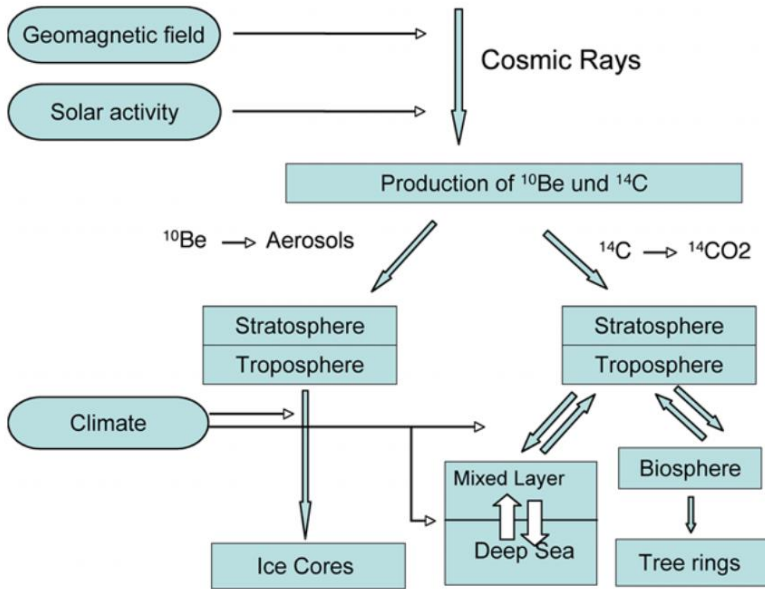
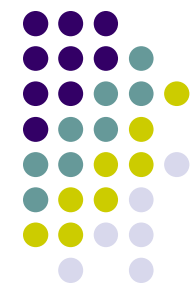
modulation function (MeV),
parameterizing GCR spectra
at different solar activity



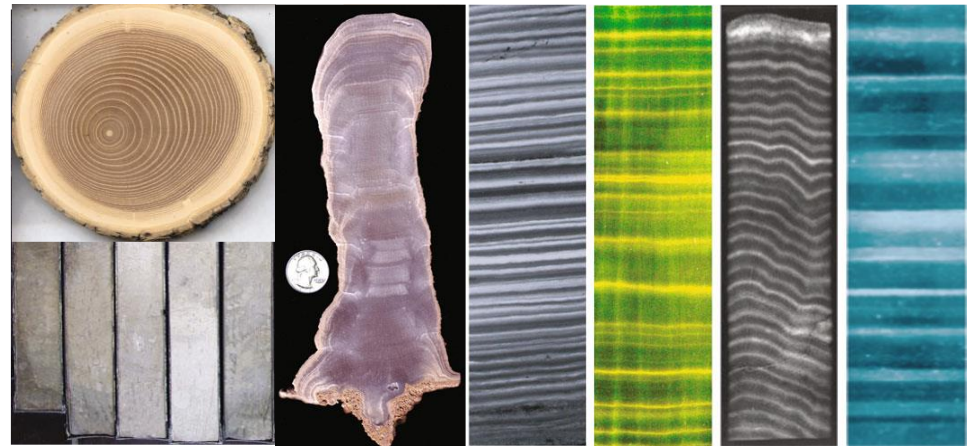
$$\frac{dJ_p}{dE}(E, \Phi) = J_{LIS}(E + \Phi) * \frac{E(E + 2E_0)}{(E + \Phi)(E + \Phi + 2E_0)}$$

исп. спектры
Usoskin 2005 *J. Geophys.
Res*

Радионуклиды и архивы на Земле

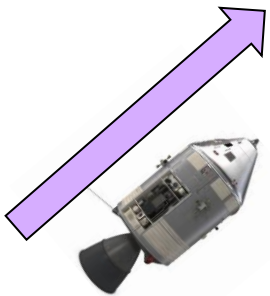
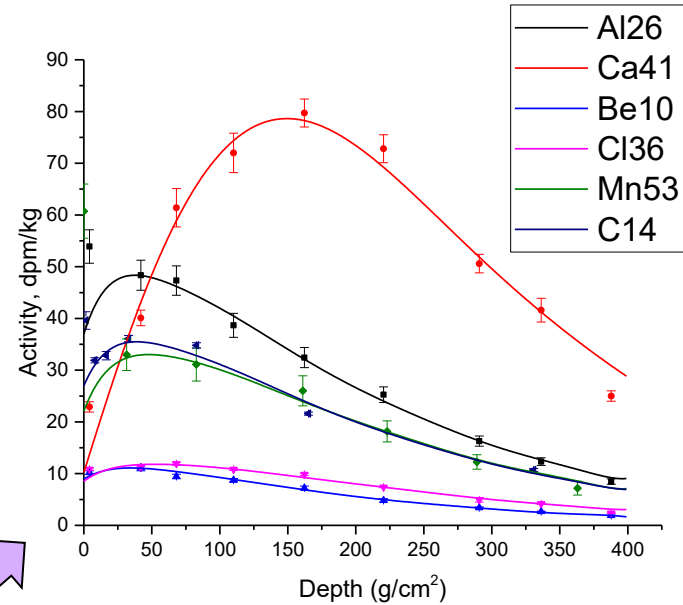
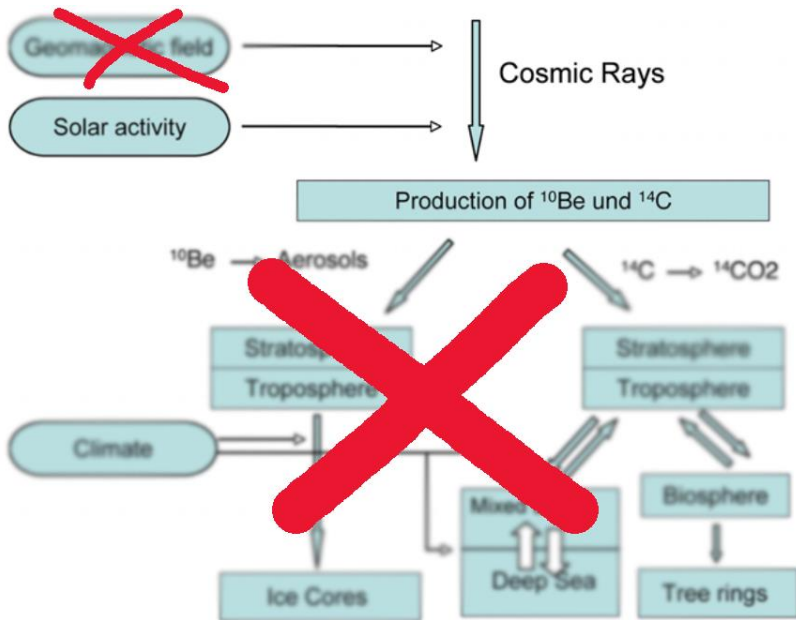
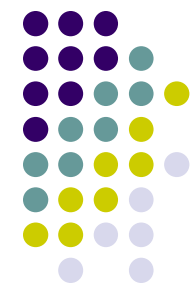


Kudryavtsev, I. V., & Dergachev, V. A. (2019). *Geomagnetism and Aeronomy*, 59(8), 1099-1102; Кудрявцев, И.В., Дергачев, В.А. (2020). Сборник трудов ССЗФ-2020, 185-188;



многообразие архивов!

Но Луна – тоже архив!

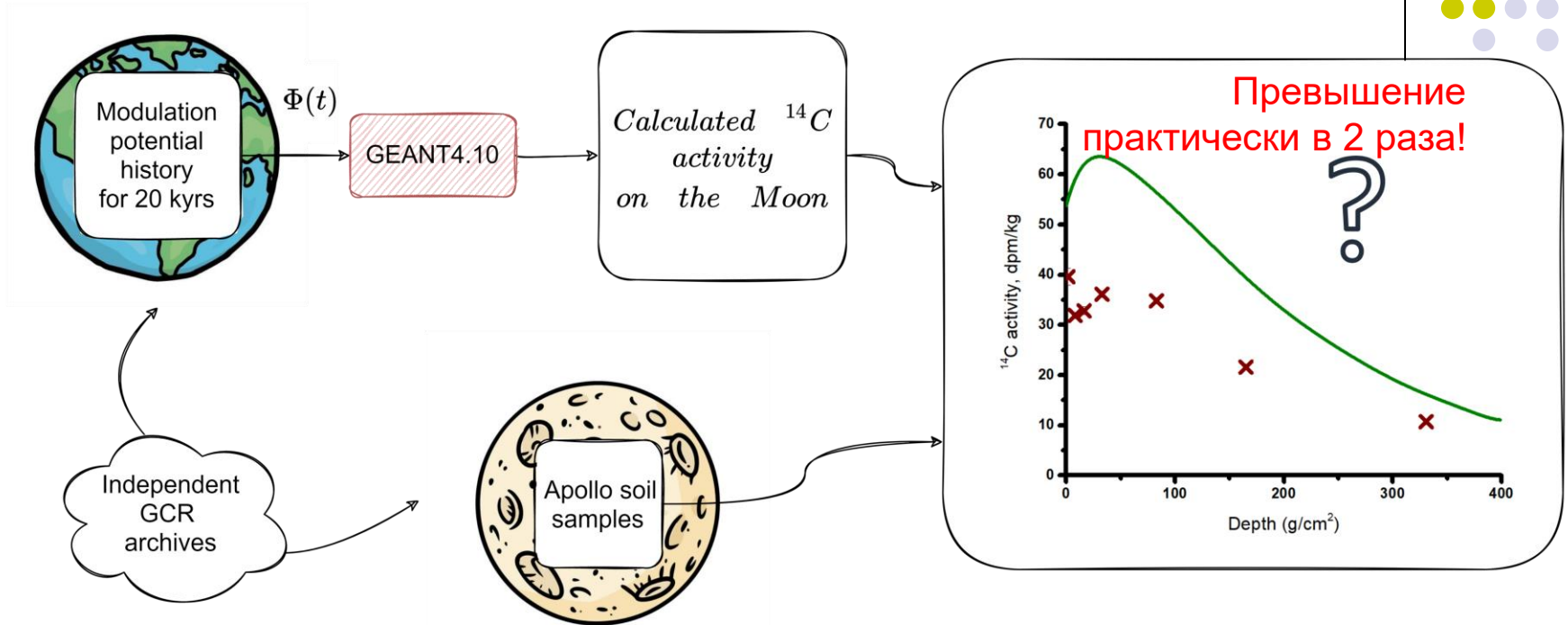
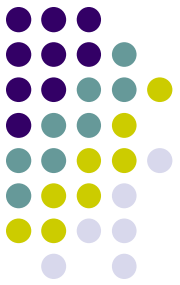


Принципиальное отличие:
Луна – интегральный архив,
равновесная активность за 3τ.

Для ¹⁴C 3τ ~ 20 тыс. лет.

грунт
и камни...

Согласуются ли архивы?



$$Q(h, t) = \pi \int_{E_0}^{E_{max}} \frac{dJ(E, \Phi(t))}{dE} * Y(E, h) dE$$

$$A(h) \propto N(h) = \int_{t=0}^{t=t_{fin}} Q(h, t) * \exp(-\lambda t) dt$$

Y – выход изотопа на частицу (yield function).
 Рассчитывается в GEANT4.10 (ЦЕРН).
 Расчет вз-я излучения с в-вом

Подходы к проблеме

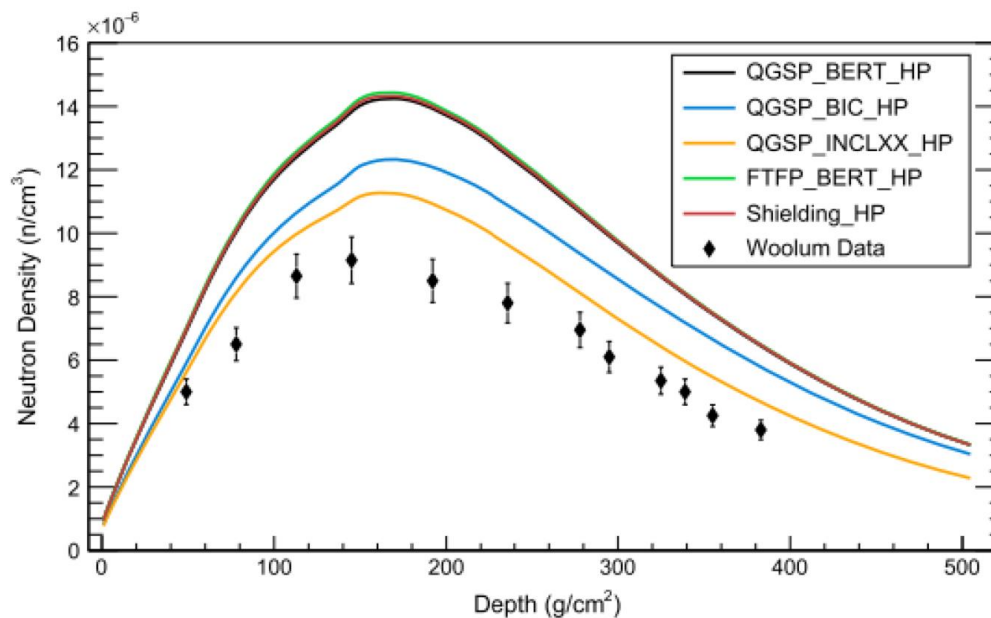


Figure 5. Comparison of the **Geant4** simulations for total neutron density from galactic cosmic ray protons and alphas with the Lunar Neutron Probe Experiment data. The legend indicates the hadron inelastic physics list used; all curves use the INCLXX physics list for ions.

Экспериментально измерен поток вторичных нейтронов на Луне (Apollo 17 Lunar Neutron Probe Experiment).

Сравнение с GEANT4.10 даёт $Y_0=0.6-0.8$.

Подходы к проблеме

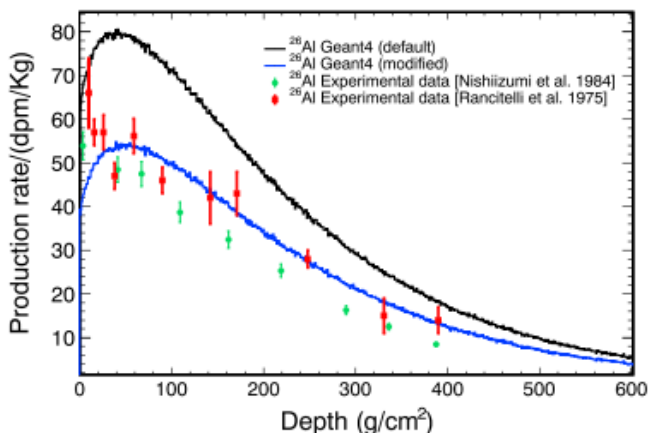


Figure 6. The simulation results and the experimental data of the production rates of ²⁶Al in Apollo 15 Drill Core.

Изменение сечений основных реакций.

Сечения при этом **не измерялись экспериментально**, а решением обратной задачи другими авторами – оценены из образования от ГКЛ на Луне. Т.е. берется решение обратной задачи, и вновь решается прямая.

Y, Zhang et al. 2017 *J. Geophys. Res. Sp. Phys*

Занижение времени облучения:

«The best-fit value of the modulation potential was found to be $\phi = 496 \pm 40$ MV for the last **million** years, which is considered hereafter.»

Poluianov et al. 2018 *Astron. Astrophys.*

$$\frac{dN}{dt} = Q - N/\tau, \quad N(t) = Q \times \tau (1 - e^{-t/\tau})$$

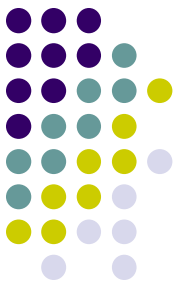
$$\text{За } 3\tau \quad N(t) = 95\% \quad N(\infty).$$

$$1 \text{ млн лет } \sim 1\tau \text{ для } ^{26}\text{Al}.$$

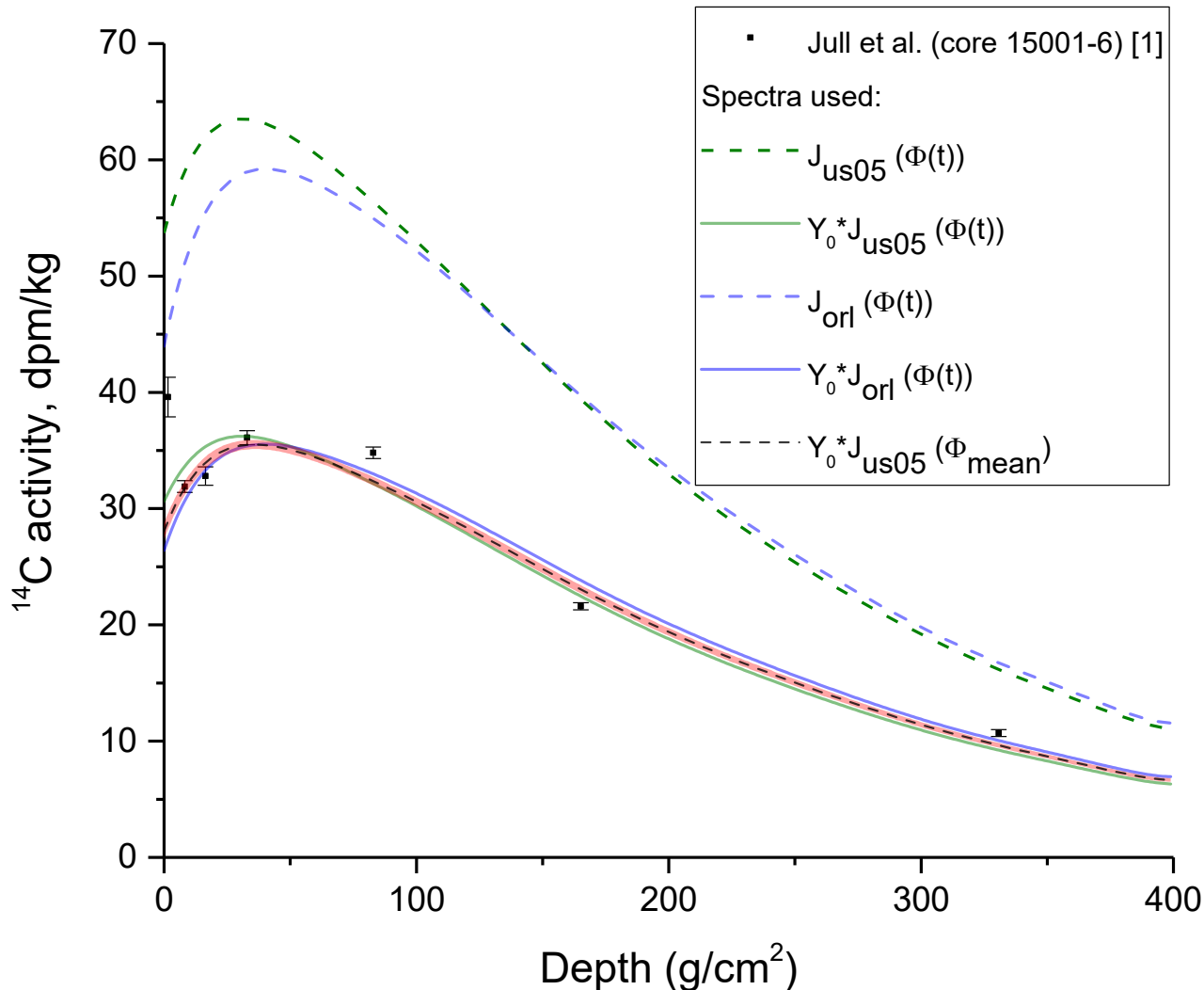
$$\text{За } 1\tau \quad N(t) = 63\% \quad N(\infty).$$

Возраст Apollo 15 drill core – сотни миллионов лет.
NASA Lunar Sample Compendium
<https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/>

Калибровка по ^{14}C для Луны



^{14}C depth profile



Введем линейный коэффициент (практически всё образование идёт на вторичных нейтронах):

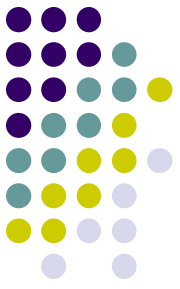
$$Q_{fix} = Y_0 * Q$$
$$Y_0 = 0.57$$

Усредненная активность:

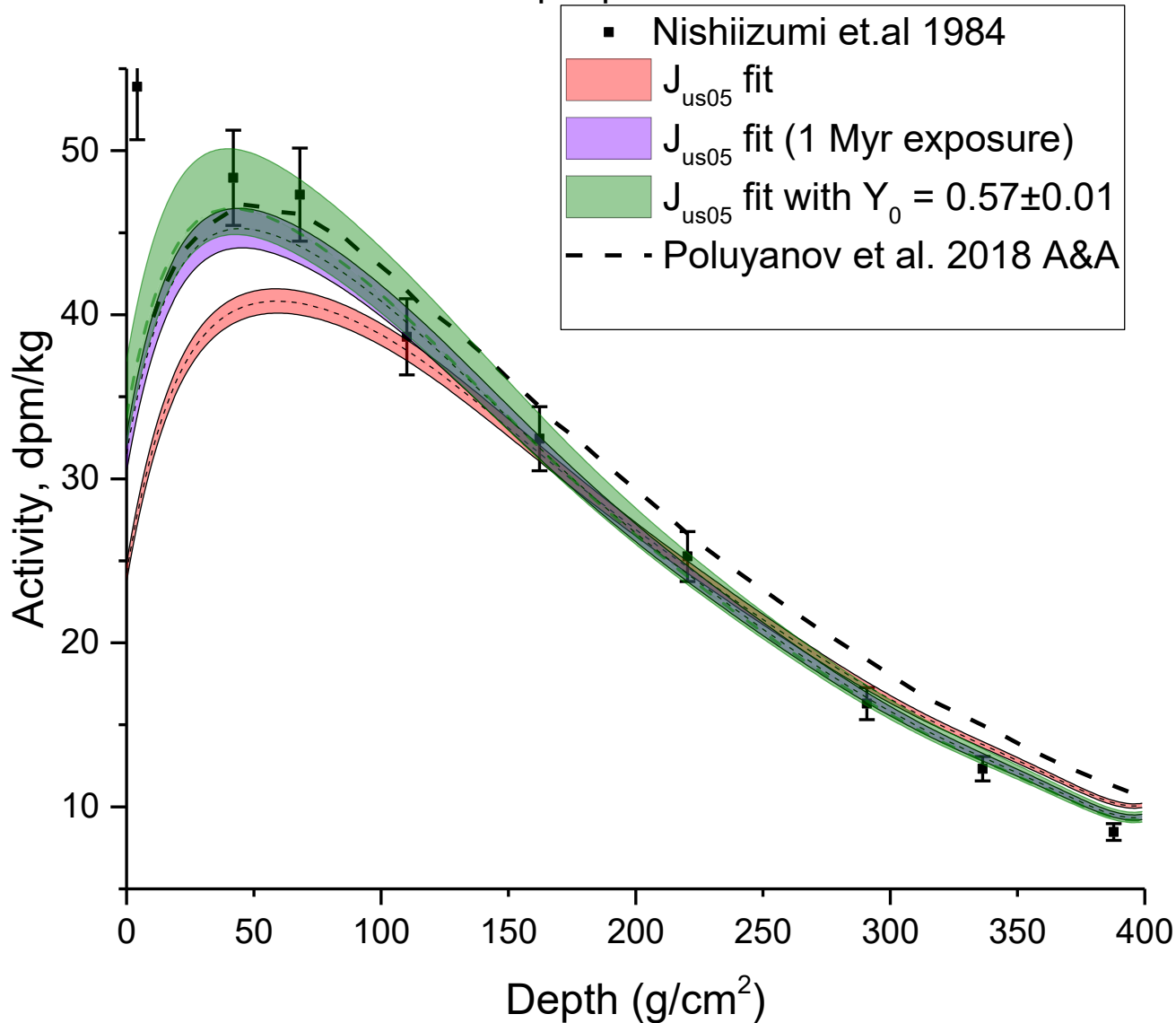
$$\Phi = 360 \text{ MV}$$

(совпадает со средним по временному ряду)

Оценка активности Солнца за ~3 млн лет



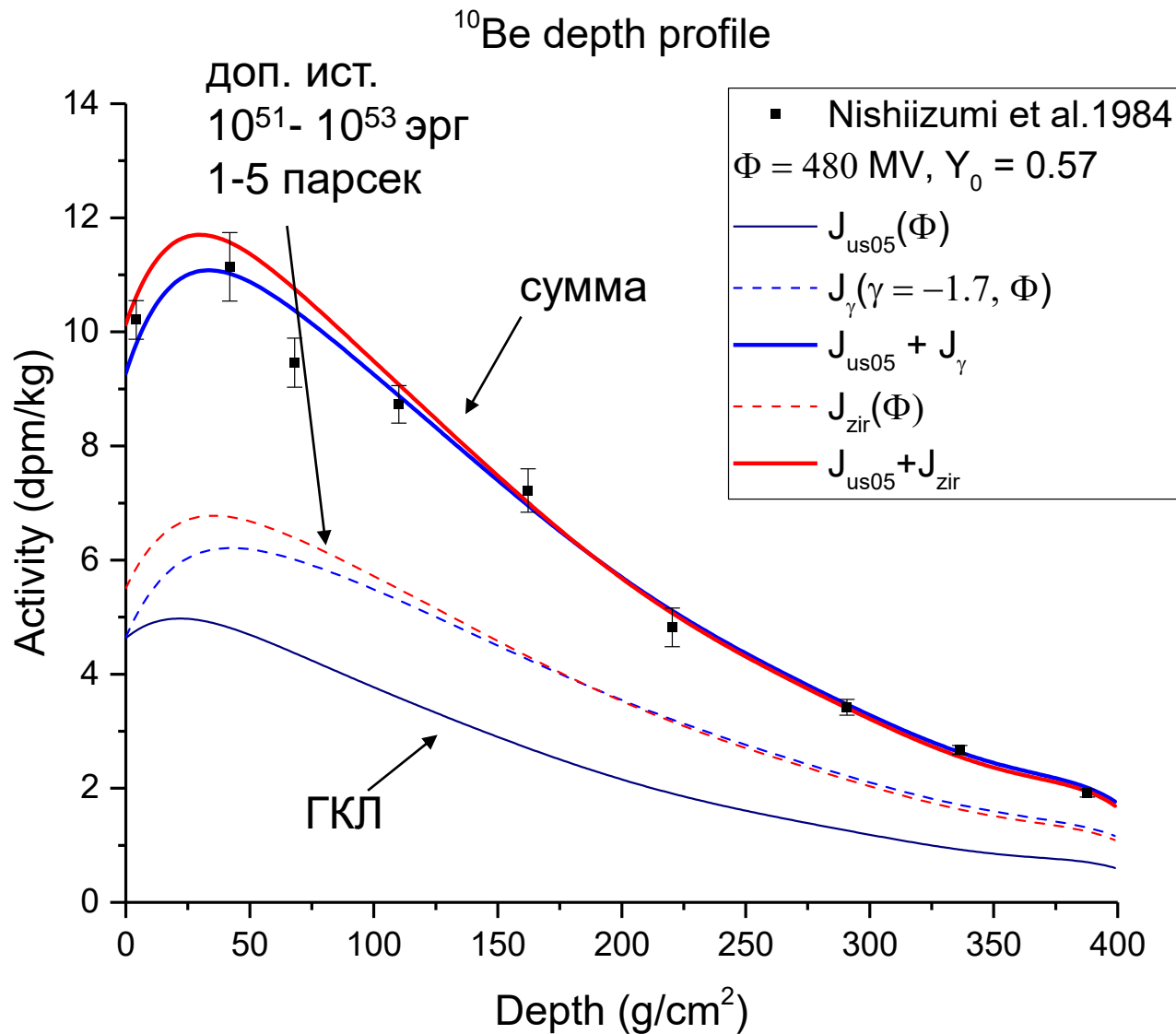
^{26}Al depth profile



$\Phi = 480 \pm 50$ MV.

Poluyanov et al, A&A,
2018:
 $\Phi = 496 \pm 40$ MV.

6 млн. лет – ^{10}Be

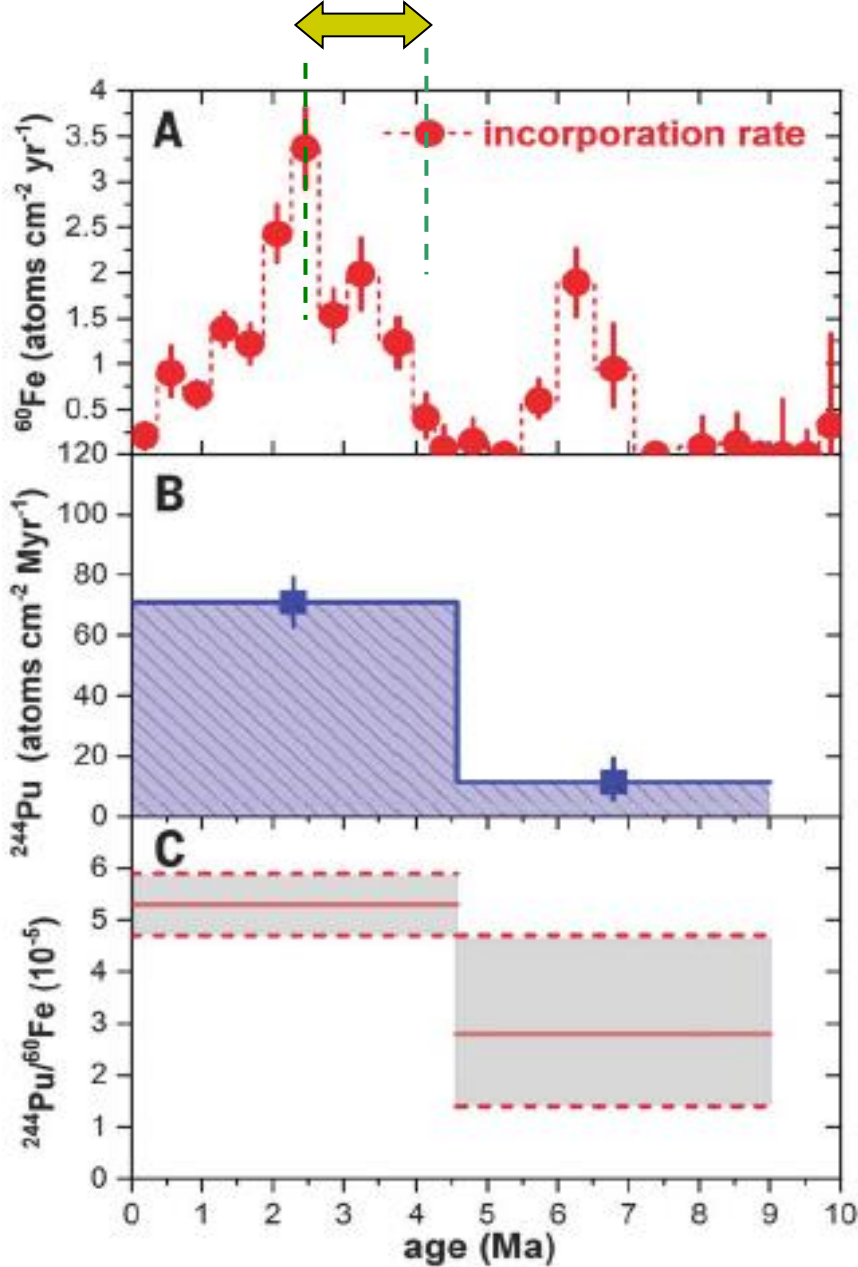


Экспериментальные данные
нельзя объяснить ГКЛ.
Требуется **дополнительный**
источник с жестким
спектром.

2 модели спектра
источника:

- $F \propto E^{-\gamma}, \gamma = 1.7$
- Спектр остатка
сверхновой за 10^5
лет. (симуляция)

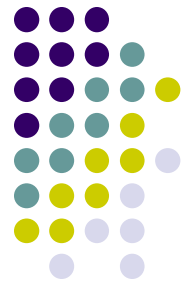
**Zirakashvili V.N.,
Ptuskin V.S.
// Astropart. Phys.
2012**



SN $M \sim 11-25 M_{\odot}$

$T_{1/2} = 80.6 \text{ Myr} - ^{244}\text{Pu}$

$T_{1/2} = 2.6 \text{ Myr} - ^{60}\text{Fe}$



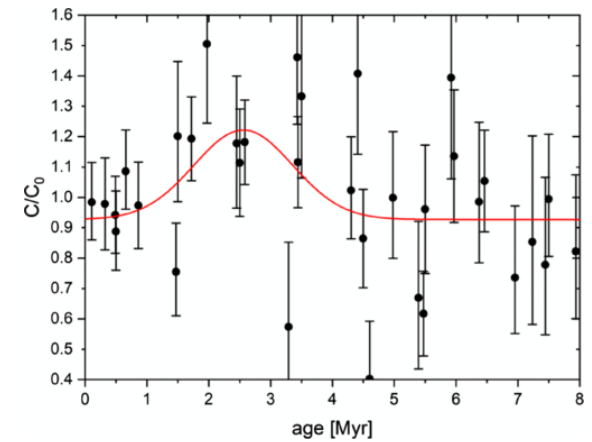
SN expl. or NS merges

r - process exclusively

\longleftrightarrow wide peak(s)
(~ 2 Myr)

distance to the A-association

$\sim 40 \text{ pc}$ (CENTER ! - Lower Centaurus Crux)

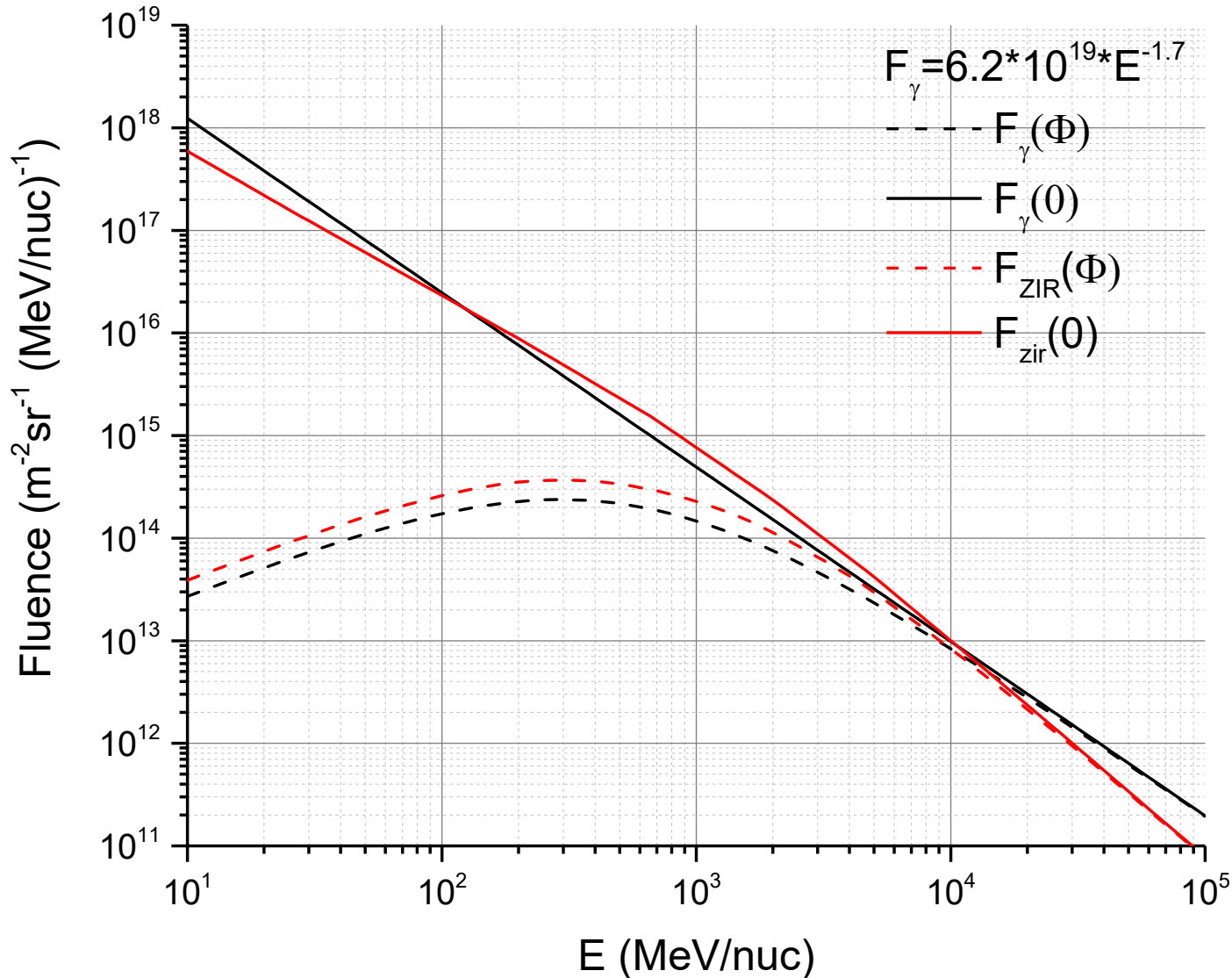
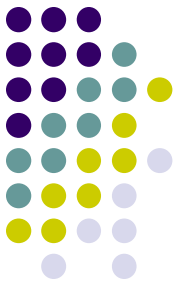


$^{53}\text{Mn}/\text{Mn}$

PhysRevLett, 2020

Wallner et al. 2016 Nature

Модель спектра локального источника

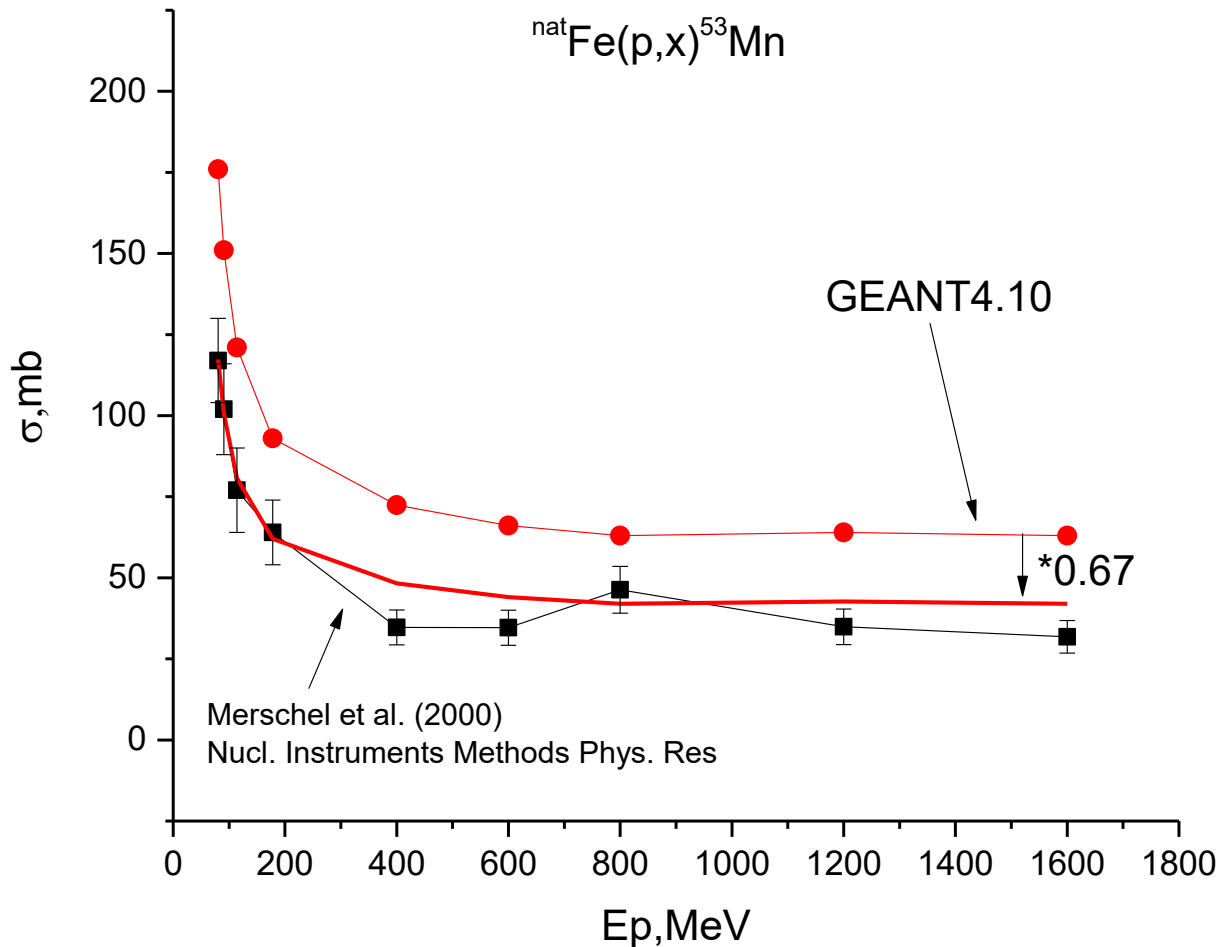


2 модели

- $F \propto E^{-\gamma}, \gamma = 1.7$
- F_{ZIR} - спектр остатка сверхновой за 10^5 лет. (симуляция)

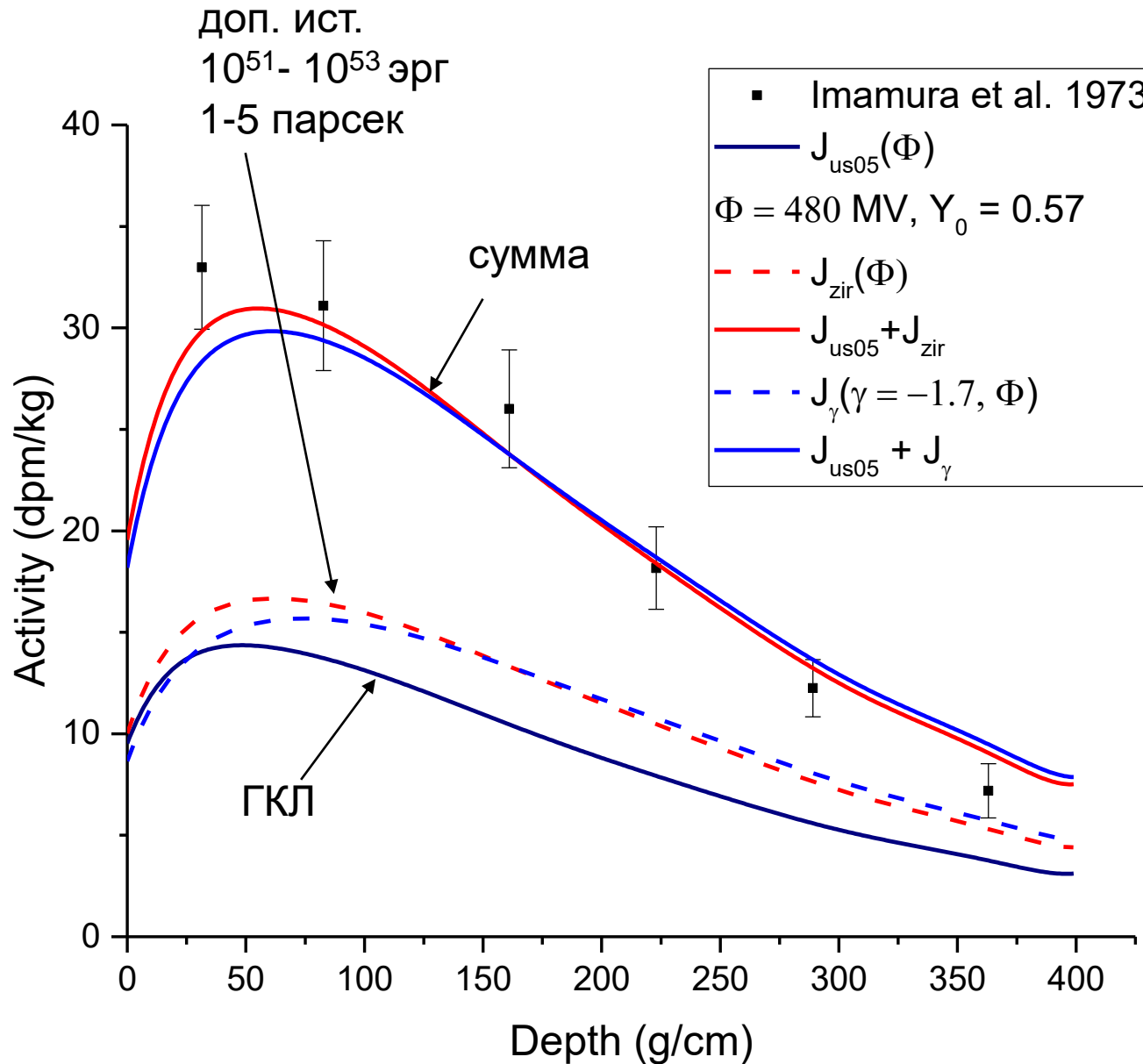
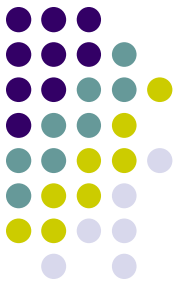
Zirakashvili V.N.,
 Ptuskin V.S.
 // Astropart. Phys.
 2012

Согласование оценок по ^{10}Fe и ^{53}Mn

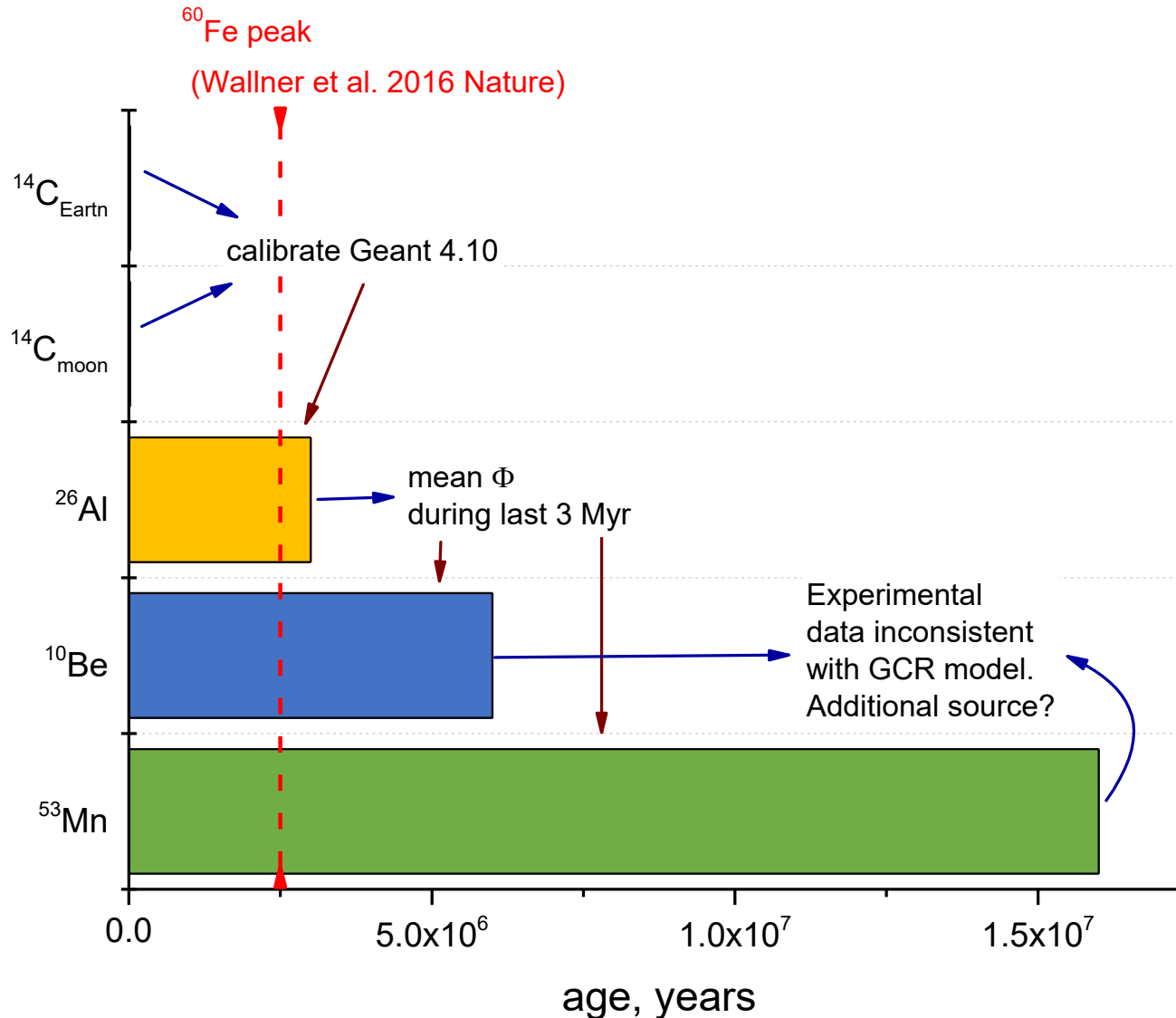
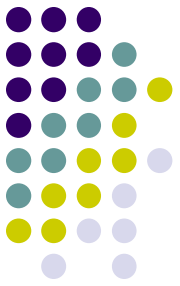


Для ^{53}Mn есть эксп. сечение на железе (основной канал). Поправка на **экспериментальные данные** позволила согласовать оценки требуемого флюенса по двум изотопам (иначе требуемый флюенс для Mn ~ в 2 раза меньше).

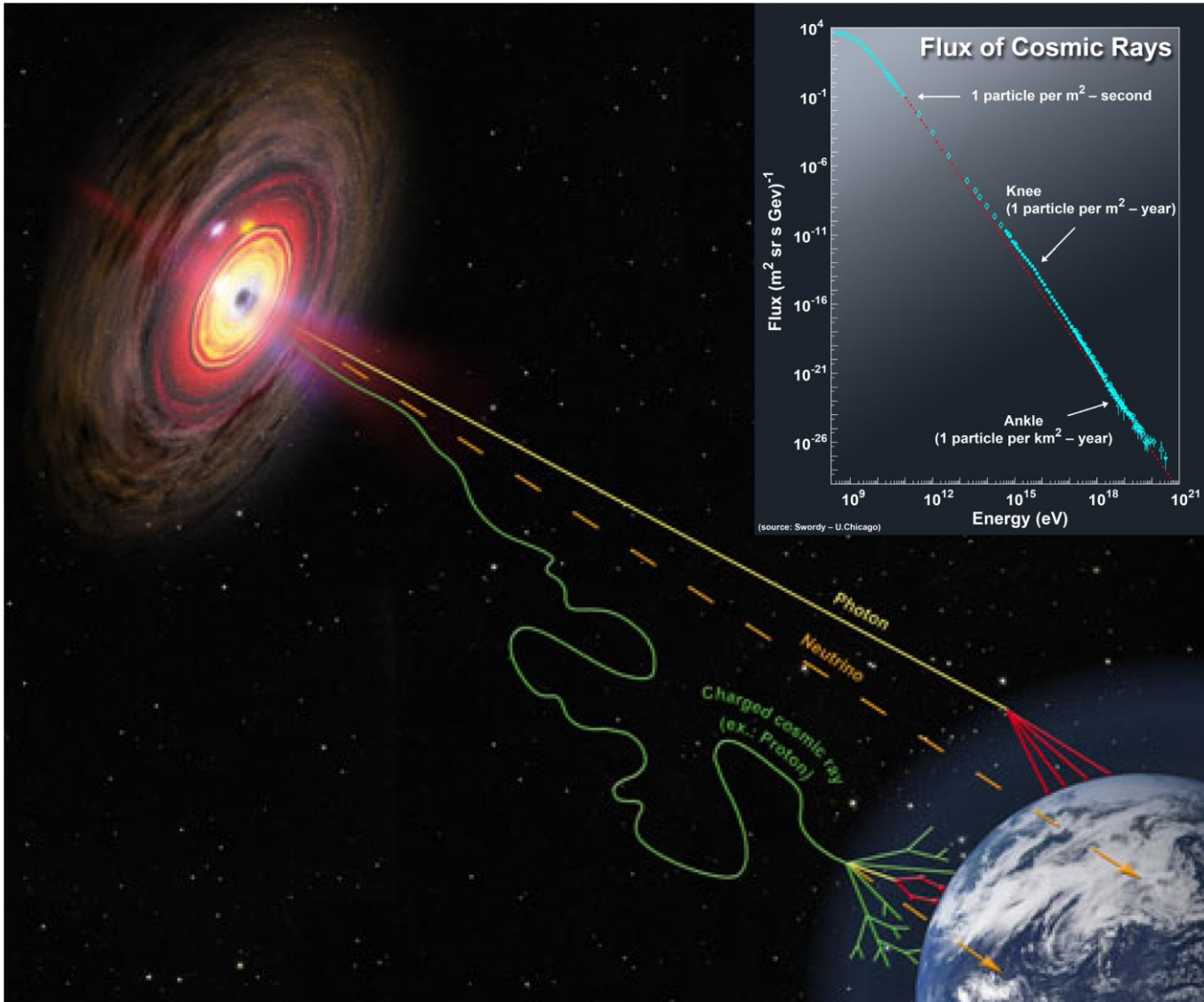
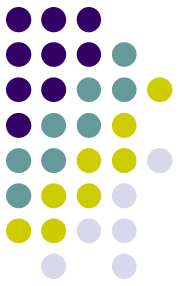
15 млн. лет – ^{53}Mn

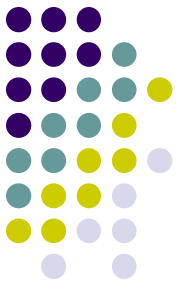


Общий подход к проблеме и временной масштаб



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ





mass percentage

Moon (Mars) composition

O = 43.344 %

Si = 21.70 %

Fe = 14.53 %

Mg = 6.96 %

Ca = 6.1 %

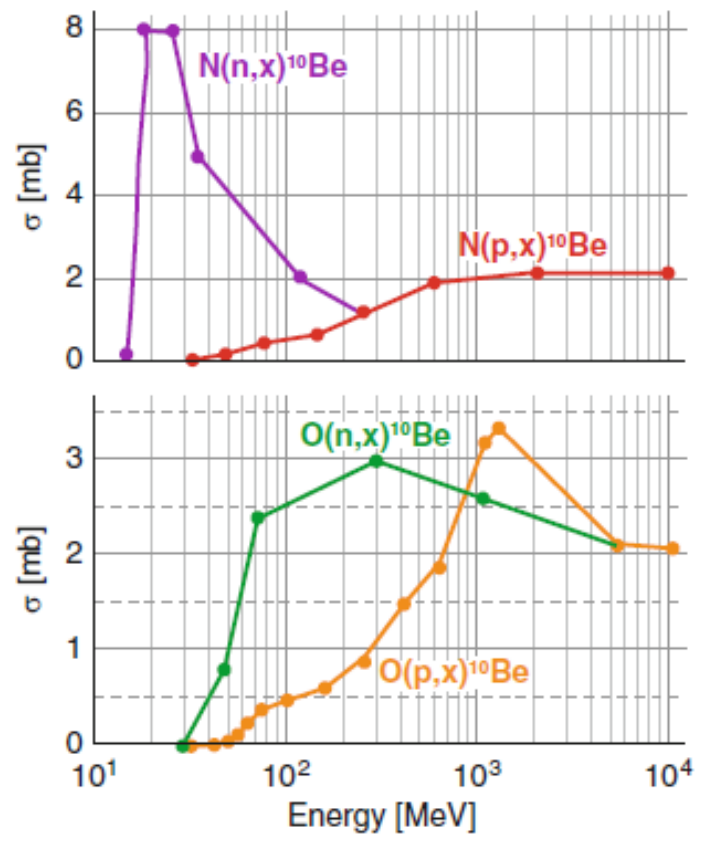
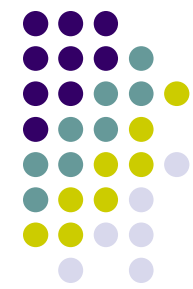
Al = 5.72 %

Ti = 1.1 %

Na = 0.296 %

K = 0.25 %

Cl is important but not measured
(cross sections are extremely high for sec. n capture)



$T_{1/2} = 5730$ лет — ^{14}C
 $T_{1/2} = 720\,000$ лет — ^{26}Al
 $T_{1/2} = 1\,387\,000$ лет — ^{10}Be
 (Beer et al., 2012)

в атмосфере

- $^{14}\text{N}(n,2n3p)^{10}\text{Be}$
- $^{14}\text{N}(p,1n4p)^{10}\text{Be}$
- $^{16}\text{O}(n,3n4p)^{10}\text{Be}$
- $^{16}\text{O}(p,2n5p)^{10}\text{Be}$

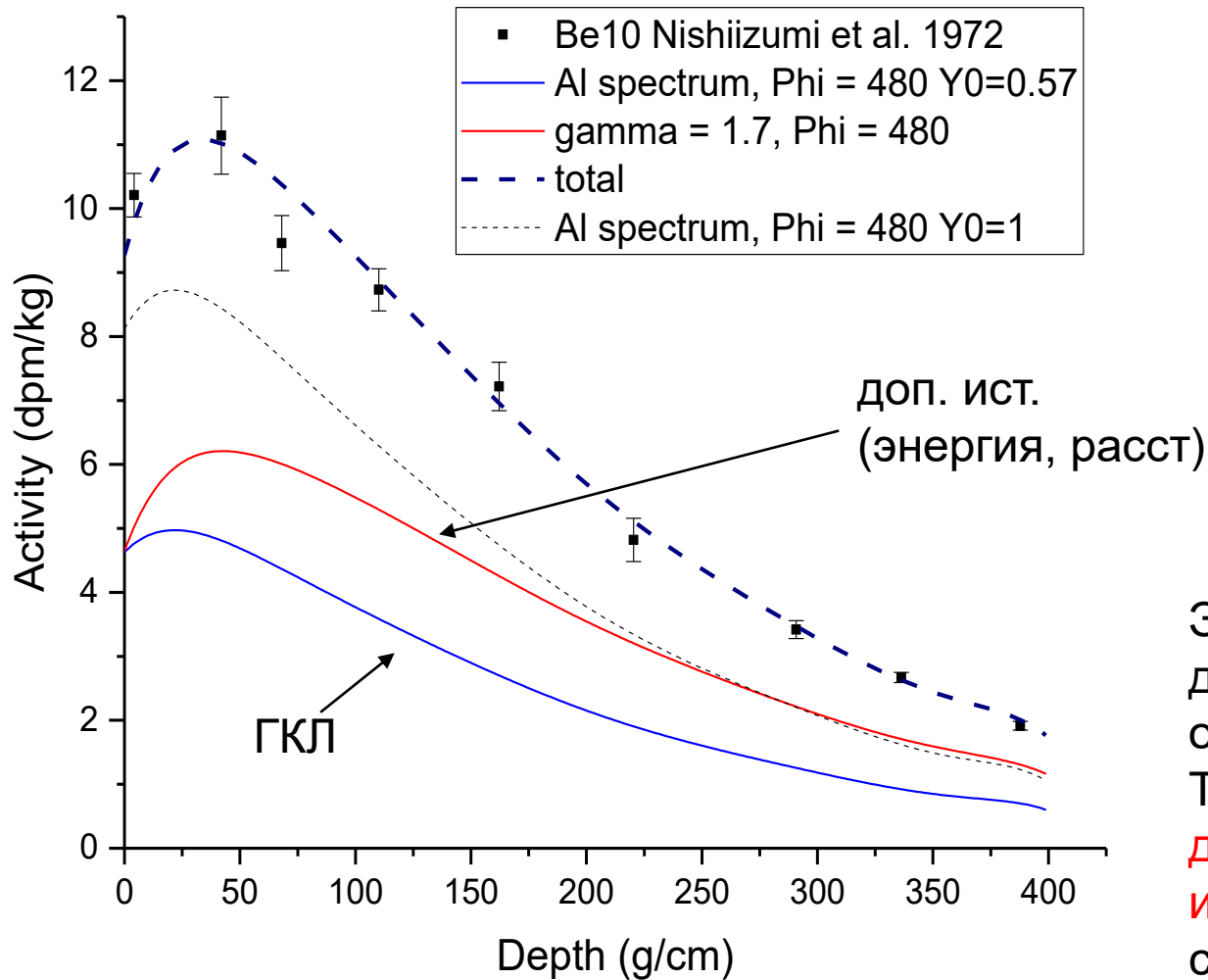
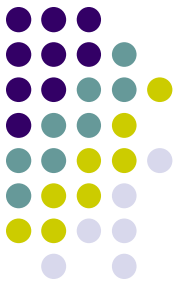
в грунте

- ^{14}C на O
- ^{26}Al на Al, Si, Fe
- ^{10}Be на O

реакции скалывания, кроме

- $^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$
- $^{27}\text{Al}(p,pn)^{26}\text{Al}$

6 млн. лет – ^{10}Be



Экспериментальные данные нельзя объяснить ГКЛ. Требуется **дополнительный источник** с жестким спектром.