

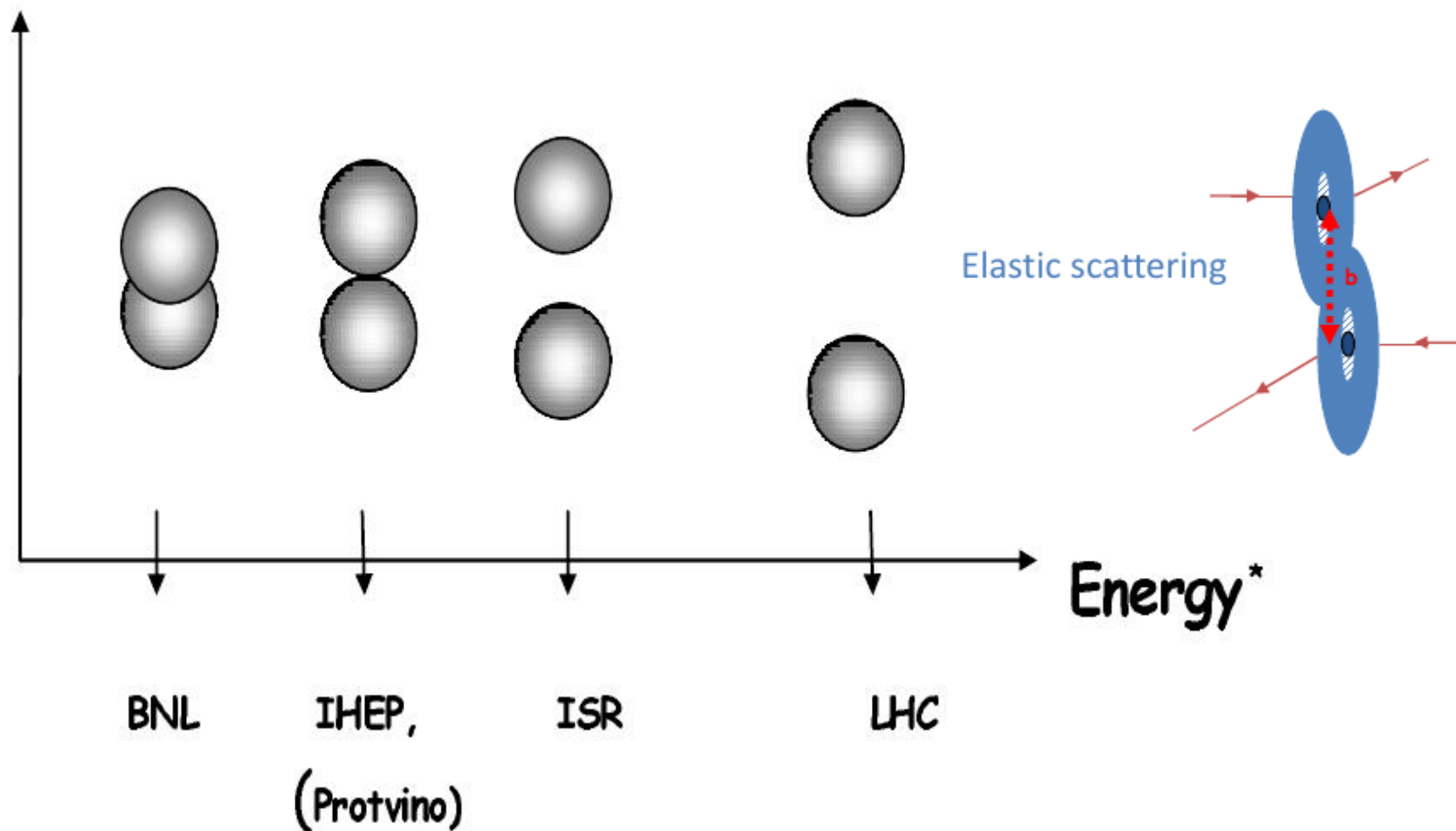
Корреляции между упругим и неупругим сечениями и параметром наклона

А. П. Самохин

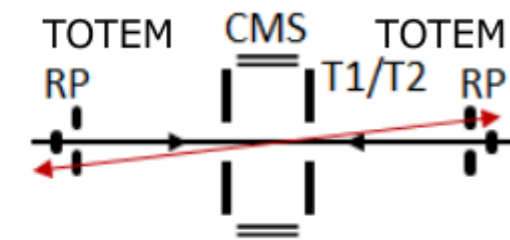
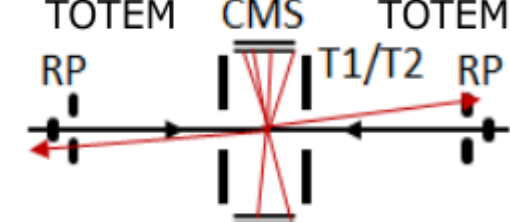
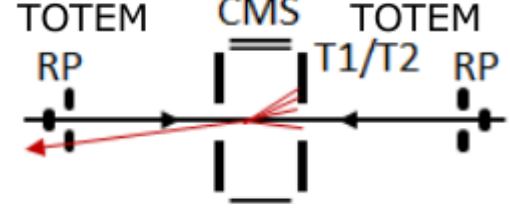
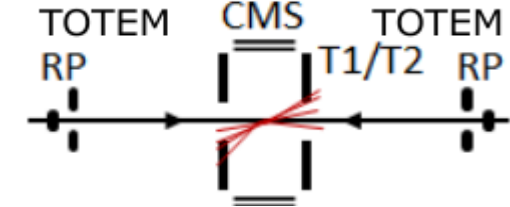
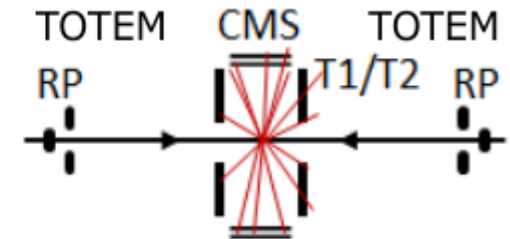
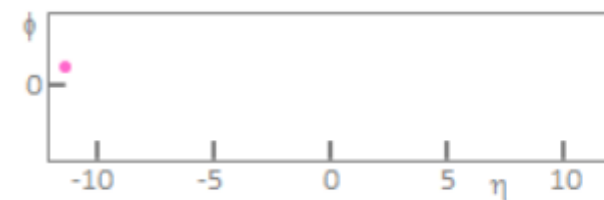
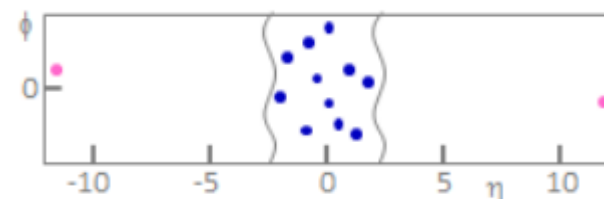
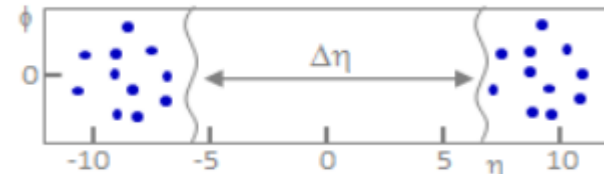
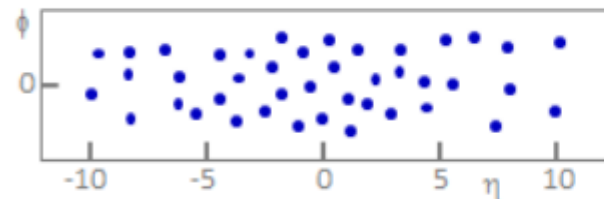
18.09.2018

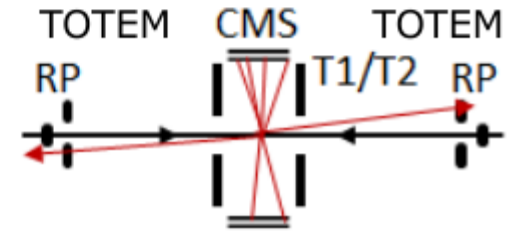
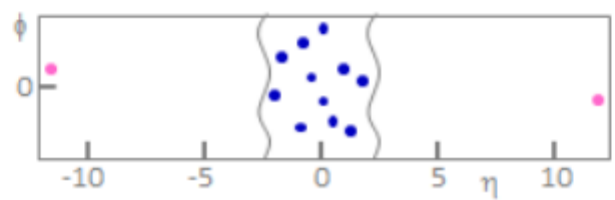
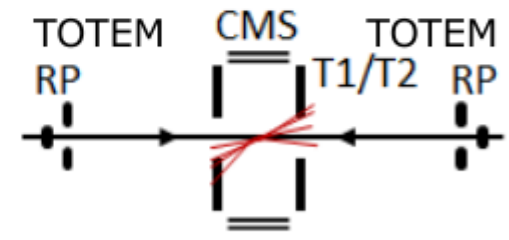
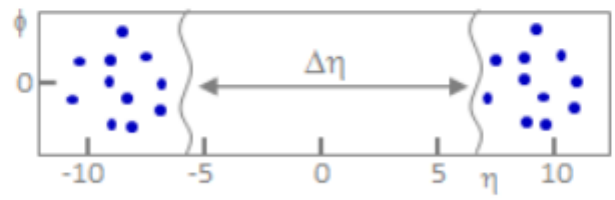
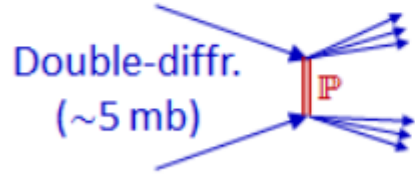
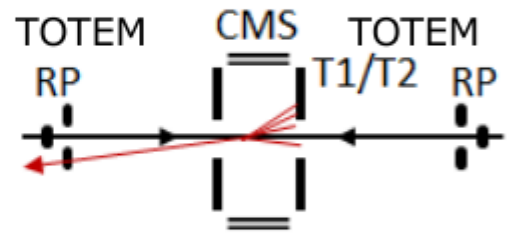
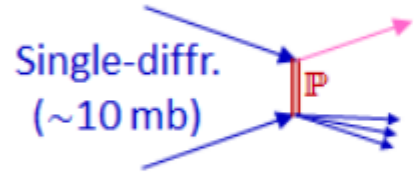
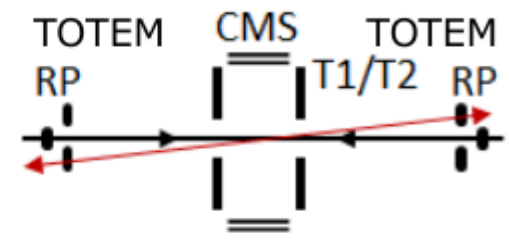
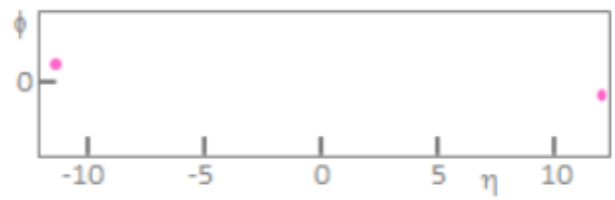
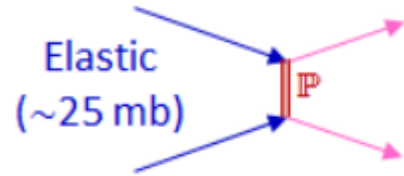
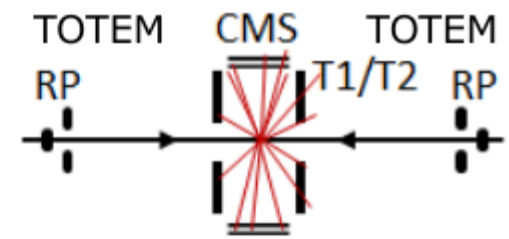
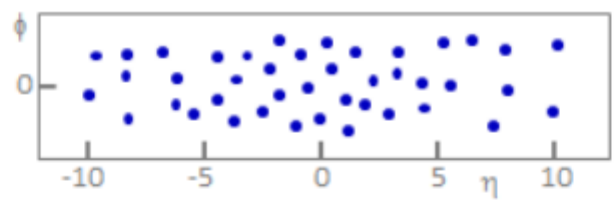
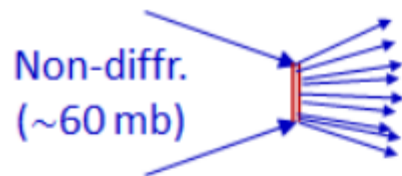
ИФВЭ, Протвино

Эффективная область взаимодействия адронов



Иерархия типов событий





Упругое рассеяние имеет особый статус, прописанный в условии унитарности, которое связывает свойства амплитуды упругого рассеяния со свойствами суммы вкладов всех неупругих каналов

Упругое рассеяние является тенью неупругих процессов
(Л. Ван Хов, 1963)

Условие унитарности дает некоторые соотношения между характеристиками упругого и неупругого рассеяния. Одно из них — ограничение Макдоуэла-Мартена (1964)

$$\sigma_{\text{tot}}^2(s) \leq \tilde{\beta}(s)\sigma_{\text{el}}(s), \quad \tilde{\beta}(s) \equiv 18\pi B_I(s).$$

Это ограничение можно переписать в виде

$$\sigma_{\text{inel}} \leq \sigma_{\text{tot}} \left(1 - \frac{\sigma_{\text{tot}}}{\tilde{\beta}}\right) \leq \frac{\tilde{\beta}}{4}.$$

Это неравенство сильнее, чем абсолютное ограничение Мартена (2009, 2011)

$$\sigma_{\text{inel}} \leq \sigma_{\text{tot}} \left(1 - \frac{\sigma_{\text{tot}}}{\sigma_{\text{max}}}\right) \leq \frac{\sigma_{\text{max}}}{4}, \quad \sigma_{\text{max}} \equiv \frac{4\pi}{t_0} \ln^2\left(\frac{s}{s_0}\right).$$

Нетрудно получить и такие формы записи
ограничения Макдоуэла-Мартена

$$\frac{(\sigma_{\text{inel}} - \sigma_{\text{el}})}{\tilde{\beta}} \leq \frac{\sigma_{\text{el}}}{\sigma_{\text{tot}}} \left(1 - 2 \frac{\sigma_{\text{el}}}{\sigma_{\text{tot}}}\right) \leq \frac{1}{8}$$

$$\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{\sigma_{\text{inel}}}{\tilde{\beta}}}\right) \leq \frac{\sigma_{\text{tot}}}{\tilde{\beta}} \leq \frac{\sigma_{\text{el}}}{\sigma_{\text{tot}}}$$

$$\frac{1}{2} \left[\left(1 - 2 \frac{\sigma_{\text{inel}}}{\tilde{\beta}}\right) - \sqrt{1 - 4 \frac{\sigma_{\text{inel}}}{\tilde{\beta}}}\right] \leq \frac{\sigma_{\text{el}}}{\tilde{\beta}} \leq \frac{\sigma_{\text{el}}^2}{\sigma_{\text{tot}}^2}$$

Это строгие следствия условия унитарности.
Все эти неравенства близки к насыщению.

Согласно оптической теореме

$$\left. \frac{d\sigma}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\sigma_{\text{tot}}^2(s)(1 + \rho^2(s))}{16\pi}, \quad \rho(s) = \frac{\text{Re } T(s, 0)}{\text{Im } T(s, 0)}.$$

Параметр наклона и дифференциальное сечение при $t = 0$ экспериментально определяются экстраполяцией данных при малых значениях t к точке $t = 0$ по формуле

$$\frac{d\sigma}{dt} = \left. \frac{d\sigma}{dt} \right|_{t=0} \exp(Bt).$$

Если локальный параметр наклона внутри существенной для интеграла области заметно не меняется, то полное упругое сечение

$$\sigma_{\text{el}}(s) = \frac{\sigma_{\text{tot}}^2(s)(1 + \rho^2(s))}{16\pi B(s)}.$$

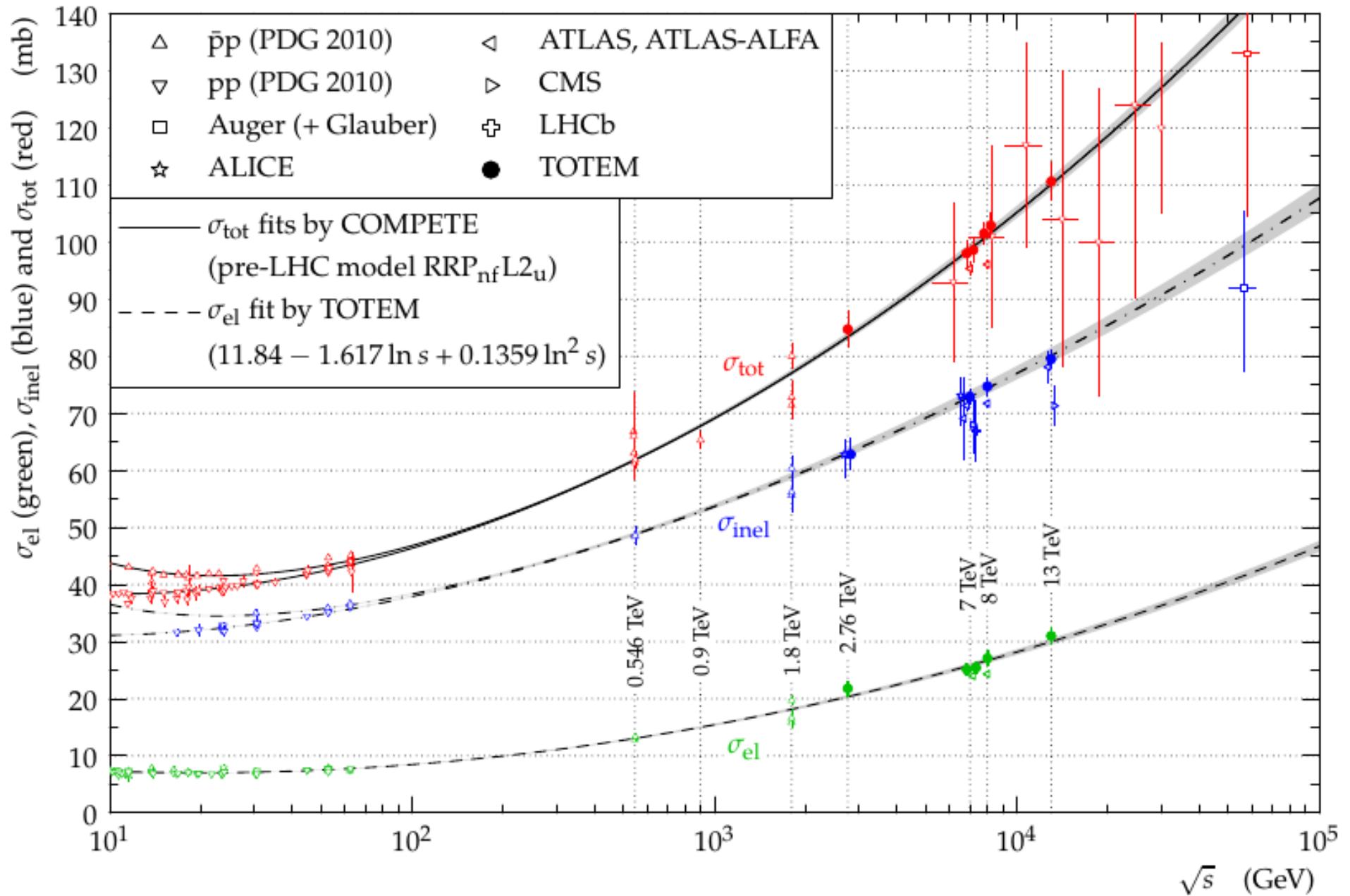
Это практически точное соотношение при энергиях выше ISR. М-М ограничение близко к этой формуле. Мы будем использовать ее, чтобы увидеть связи между упругими и неупругими величинами.

На ISR был открыт рост с энергией упругих и неупругих сечений, причем этот рост

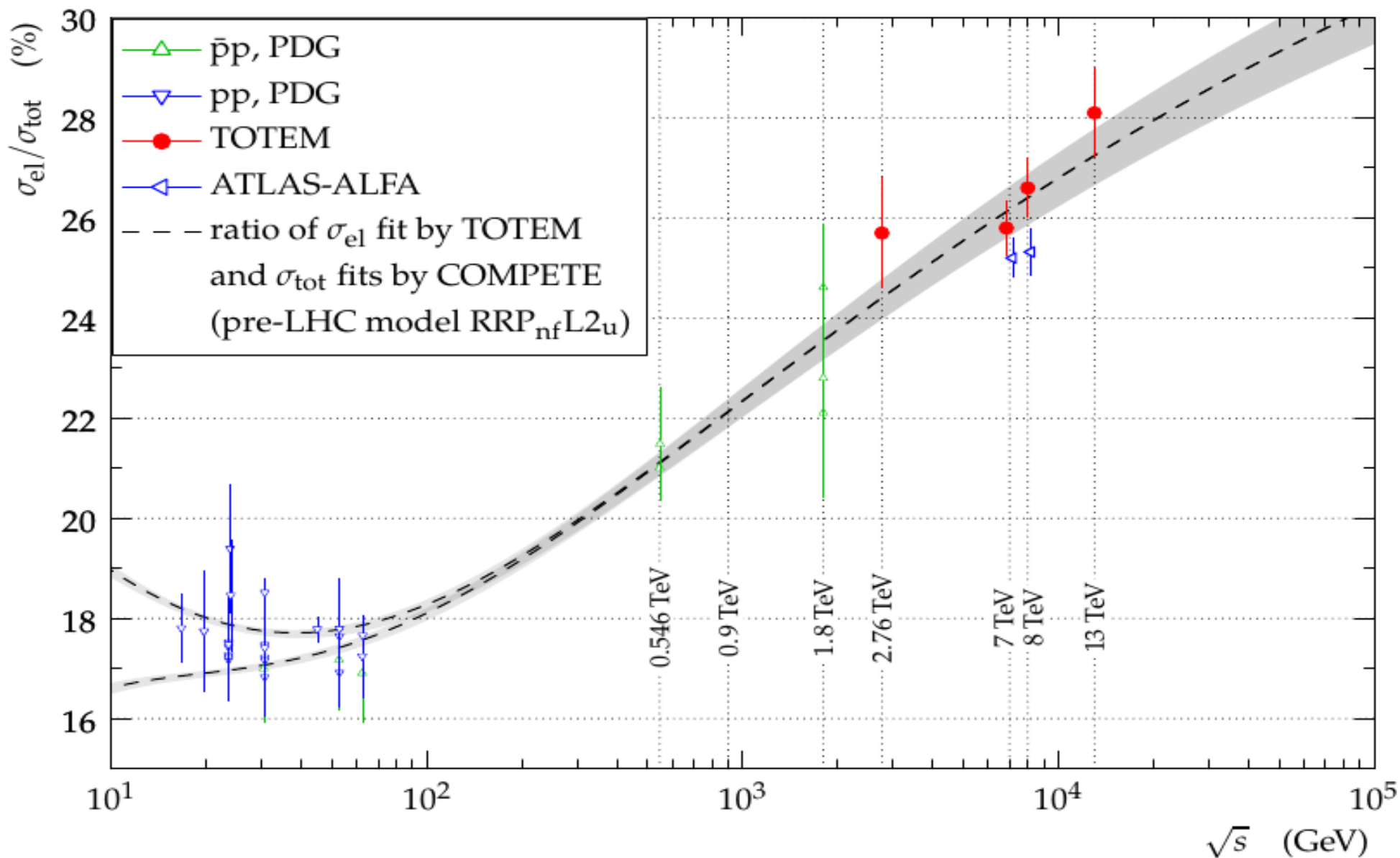
$$\sigma_{el} \sim \sigma_{inel} \sim \sigma_{tot} \sim B = 0.5 R^2(s) \quad (GS)$$

Но уже на SPS было открыто, что отношение $\sigma_{el} / \sigma_{tot}$ растет с ростом энергии и этот рост продолжается и при энергиях LHC, т. е. сечения растут не только благодаря росту $R(s)$, но и из-за роста интенсивности σ_{tot} / B

Рост сечений с энергией



Рост отношения сечений e/tot



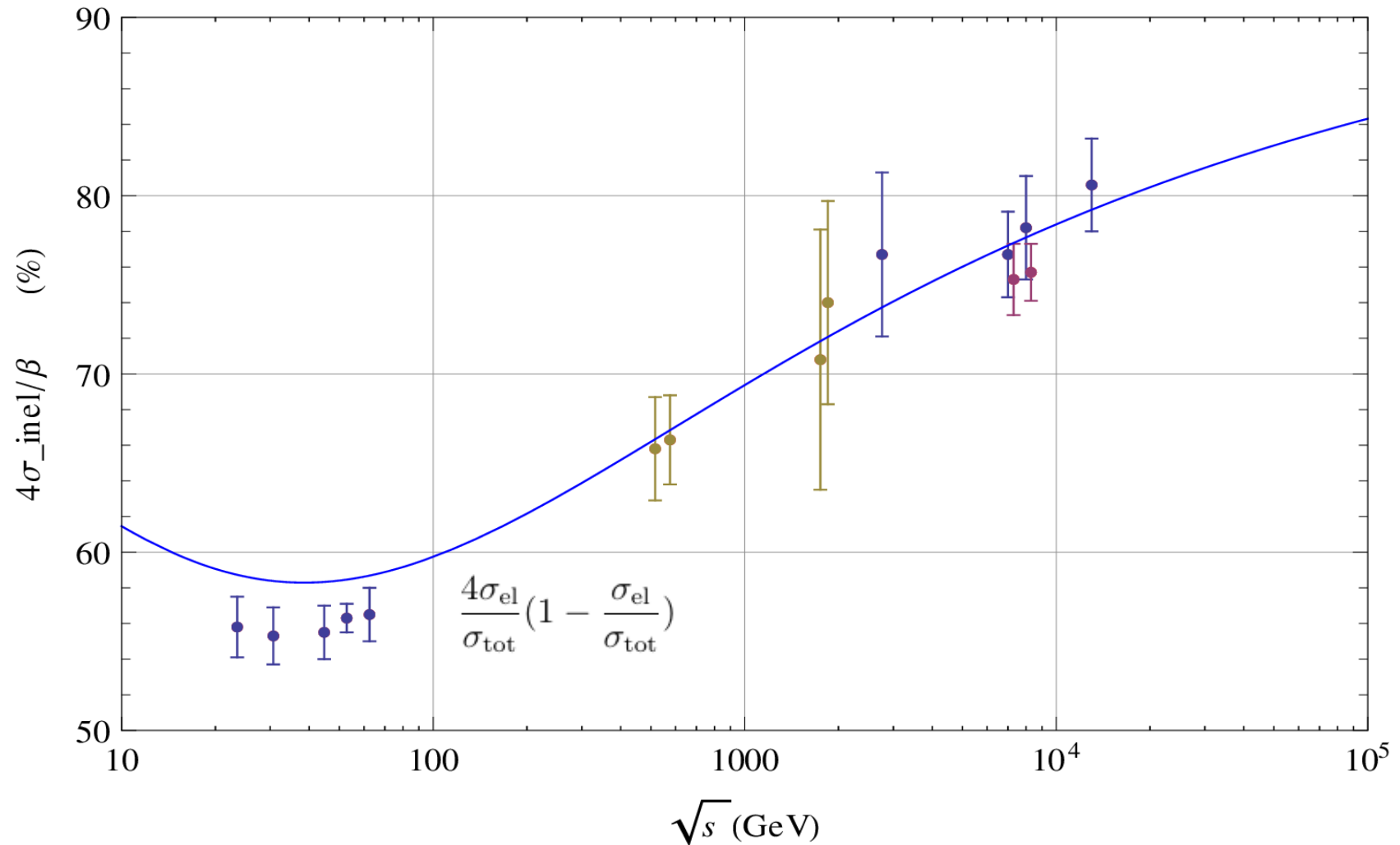
Из $\sigma_{\text{tot}} = (\sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{inel}})$ очевидно, что рост отношения $\sigma_{\text{el}} / \sigma_{\text{tot}}$ эквивалентен убыванию отношений $\sigma_{\text{inel}} / \sigma_{\text{tot}}$ и $\sigma_{\text{inel}} / \sigma_{\text{el}}$ с ростом энергии. Но отношение σ_{inel} / V , т. е. интенсивность неупругого взаимодействия, как показывают exper. данные, с ростом энергии растет. Это видно и из соотношения, о котором мы говорили и которое можно записать так

$$\frac{\sigma_{\text{el}}}{\beta} = \frac{\sigma_{\text{tot}}^2}{\beta^2} = \frac{\sigma_{\text{el}}^2}{\sigma_{\text{tot}}^2}, \quad \beta \equiv \frac{16\pi B}{(1 + \rho^2)} \approx 16\pi B.$$

Отсюда следует, что интенсивность неупругого взаимодействия

$$\frac{\sigma_{\text{inel}}}{\beta} = \frac{\sigma_{\text{el}} \sigma_{\text{inel}}}{\sigma_{\text{tot}}^2} = \frac{\sigma_{\text{tot}}}{\beta} \left(1 - \frac{\sigma_{\text{tot}}}{\beta}\right) = \frac{\sigma_{\text{el}}}{\sigma_{\text{tot}}} \left(1 - \frac{\sigma_{\text{el}}}{\sigma_{\text{tot}}}\right) \leq \frac{1}{4}.$$

Рост интенсивности неупругого взаимодействия с ростом энергии



Можно записать это соотношение в таком виде

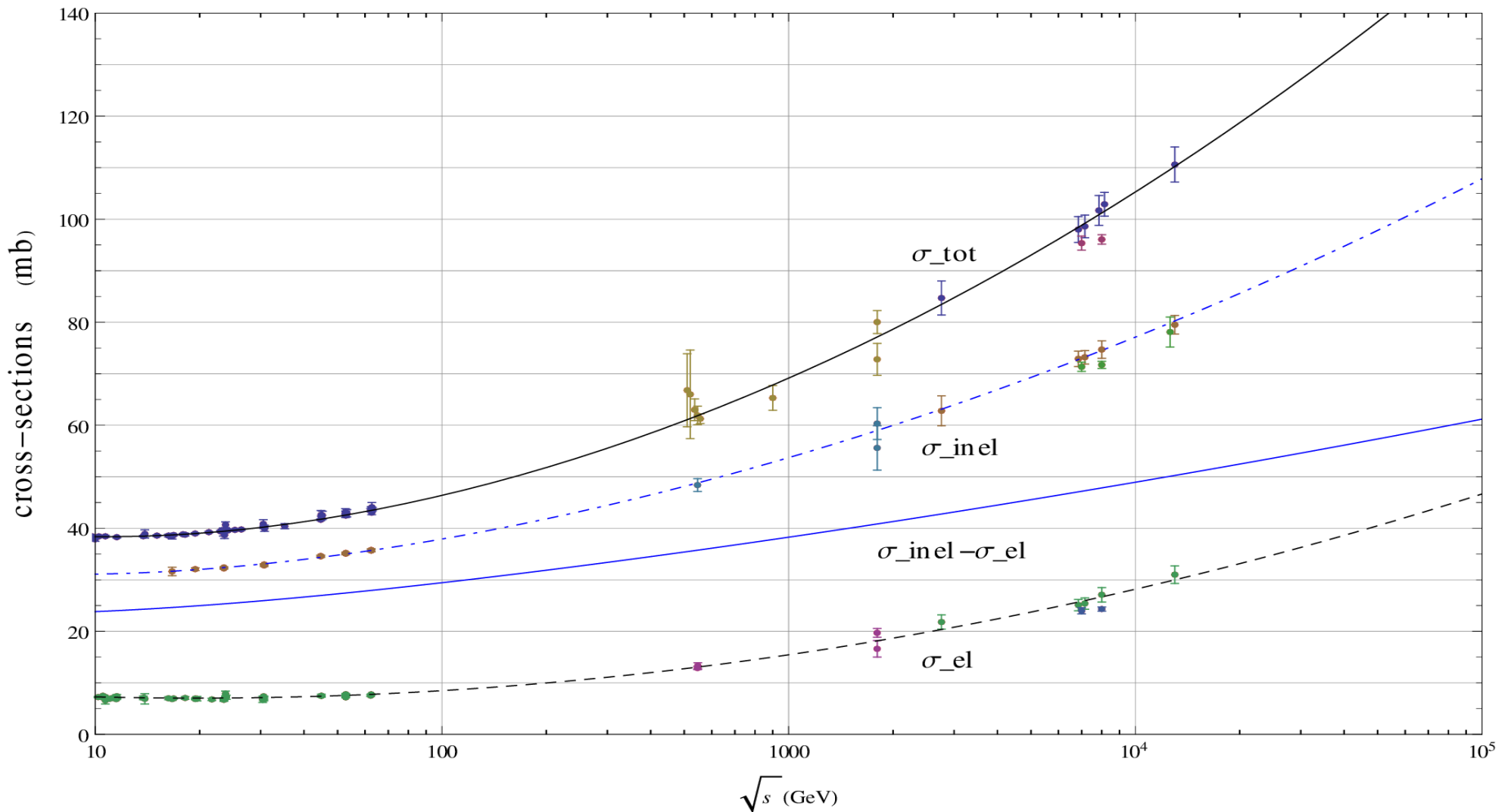
$$\frac{\sigma_{el}}{\sigma_{tot}} = \frac{\sigma_{tot}}{\beta} = \frac{1}{2}(1 - \sqrt{1 - 4x}), \quad x \equiv \frac{\sigma_{inel}}{\beta}.$$

Рост отношения $\sigma_{el} / \sigma_{tot}$ с энергией является следствием роста интенсивности неупругого взаимодействия σ_{inel} / β , т. е. это вынужденное, теневое поведение. То же самое можно сказать и о росте с энергией

$$\frac{\sigma_{el}}{\beta} = \frac{1}{2}(1 - 2x - \sqrt{1 - 4x}), \quad \frac{\sigma_{el}}{\sigma_{inel}} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4x}}{1 + \sqrt{1 - 4x}},$$

т. к. эти функции монотонно растут с ростом x .

Рост с энергией сечений и разности ($\sigma_{inel} - \sigma_{el}$)

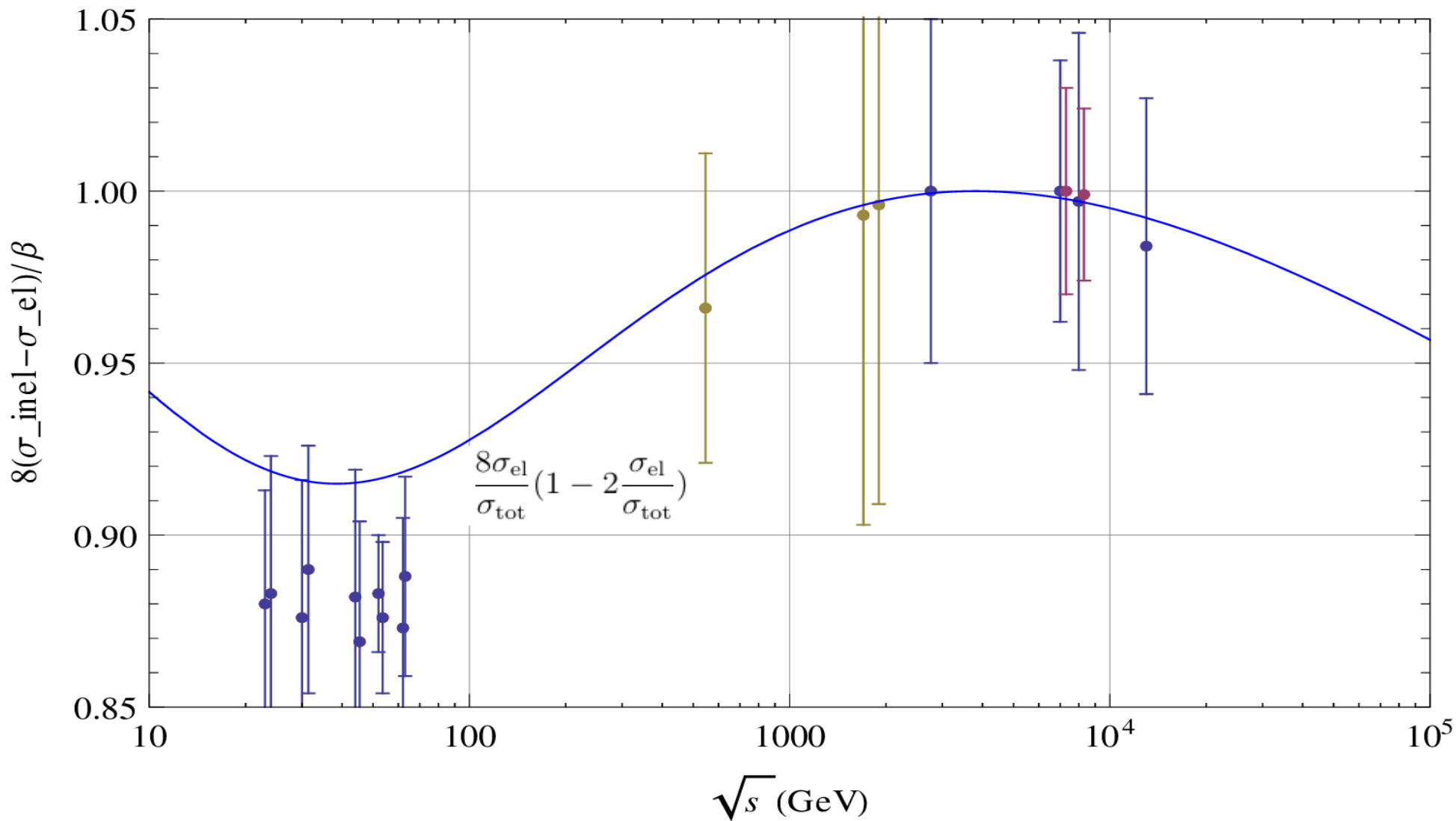


Очевидно, что отношения разности сечений $(\sigma_{inel} - \sigma_{el})$ к σ_{el} , σ_{inel} и к σ_{tot} убывают с ростом энергии, так как $\sigma_{el} / \sigma_{inel}$ растет. Но согласно нашему основному соотношению, величина

$$\frac{\sigma_{inel} - \sigma_{el}}{\beta} = \frac{\sigma_{tot} - 2\sigma_{el}}{\beta} = \frac{\sigma_{el}}{\sigma_{tot}} \left(1 - 2\frac{\sigma_{el}}{\sigma_{tot}}\right) \leq \frac{1}{8}$$

сначала растет, достигает своего максимума при энергии ~ 3 TeV, где $\sigma_{el} / \sigma_{tot} = 0.25$, и затем убывает с ростом энергии, т. е. в Тэвной области энергий она меняет свое поведение.

Поведение с ростом энергии величины $8(\sigma_{inel} - \sigma_{el})/\beta$



Есть экспериментальные указания на то, что в той же Тэвной области энергий наклон $V(s)$ ускоряет свой рост, а отношение $\sigma_{el} / \sigma_{tot}$ свой рост замедляет. Как мы сейчас увидим, все эти три явления обусловлены ростом интенсивности неупругого взаимодействия.

Сечения растут быстрее чем $\ln(s)$, а разность $(\sigma_{inel} - \sigma_{el})$ не медленнее чем $\ln(s)$. Поэтому

$$\sigma_{el} < 0.5 \sigma_{tot} < \sigma_{inel} < \sigma_{tot}, \quad 0 < \sigma'_{el} < 0.5 \sigma'_{tot} < \sigma'_{inel} < \sigma'_{tot},$$

$$\text{and } 0 < \sigma''_{el} \leq 0.5 \sigma''_{tot} \leq \sigma''_{inel} < \sigma''_{tot},$$

где штрих — производная по $\ln(s)$.

Рост же отношений σ_{el}/σ_{tot} , $\sigma_{tot}/\sigma_{inel}$, σ_{inel}/B
и рост наклона

$$B(s) = \frac{\sigma_{tot}^2(s)}{16\pi\sigma_{el}(s)}$$

дают такую цепочку неравенств

$$0 < \left(2 \frac{\sigma'_{tot}}{\sigma_{tot}} - \frac{\sigma'_{el}}{\sigma_{el}}\right) = \frac{B'}{B} < \frac{\sigma'_{inel}}{\sigma_{inel}} < \frac{\sigma'_{tot}}{\sigma_{tot}} < \frac{\sigma'_{el}}{\sigma_{el}} < 2 \frac{\sigma'_{tot}}{\sigma_{tot}}.$$

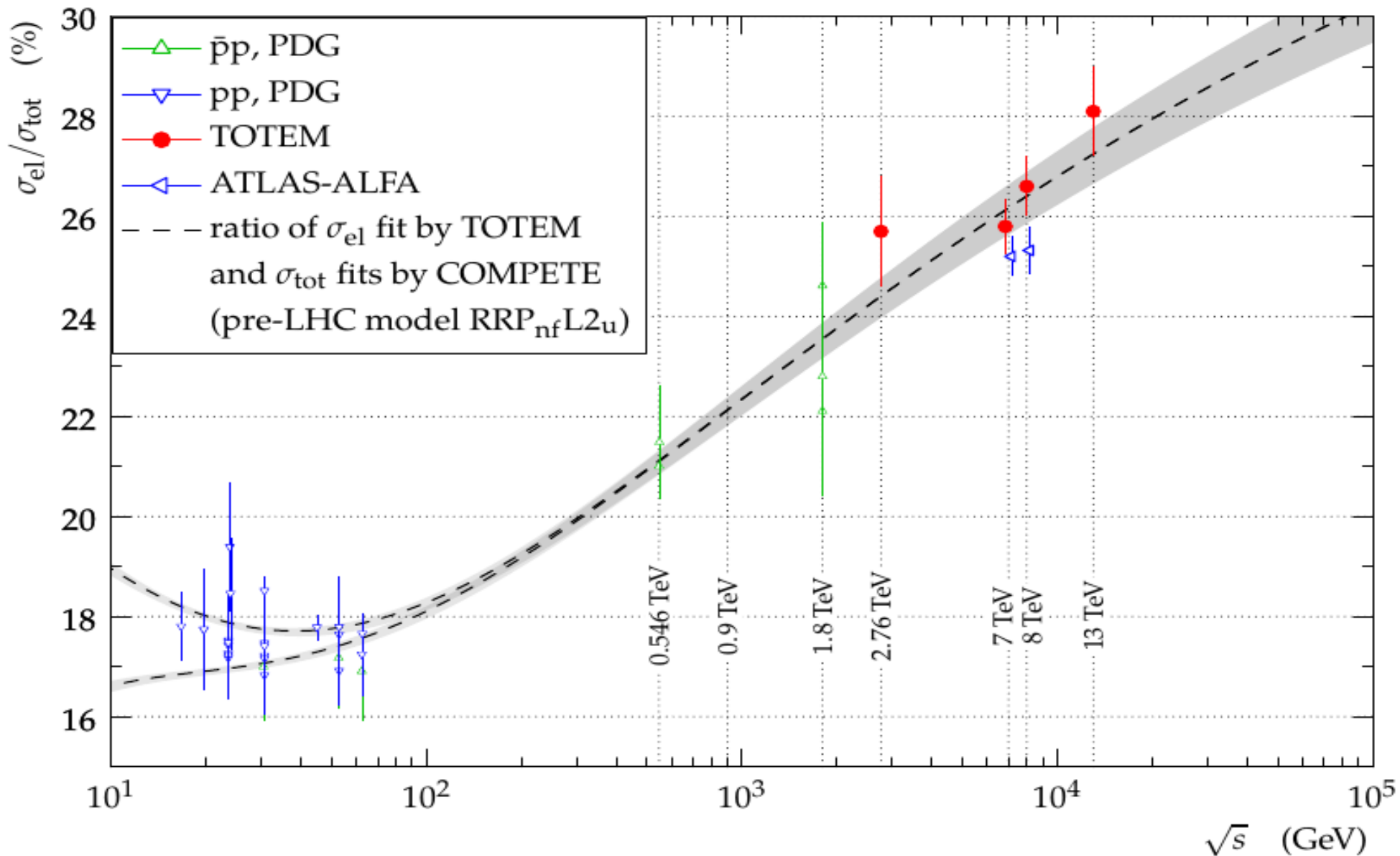
Вторая производная от отношения σ_{el}/σ_{tot}

$$\left(\frac{\sigma_{el}}{\sigma_{tot}}\right)'' = \frac{\sigma_{el}}{\sigma_{tot}} \left[\frac{1}{\sigma_{el}} (\sigma_{el}'' - \frac{\sigma_{el}}{\sigma_{tot}} \sigma_{tot}'') - 2 \frac{\sigma'_{tot}}{\sigma_{tot}} \left(\frac{\sigma'_{el}}{\sigma_{el}} - \frac{\sigma'_{tot}}{\sigma_{tot}} \right) \right]$$

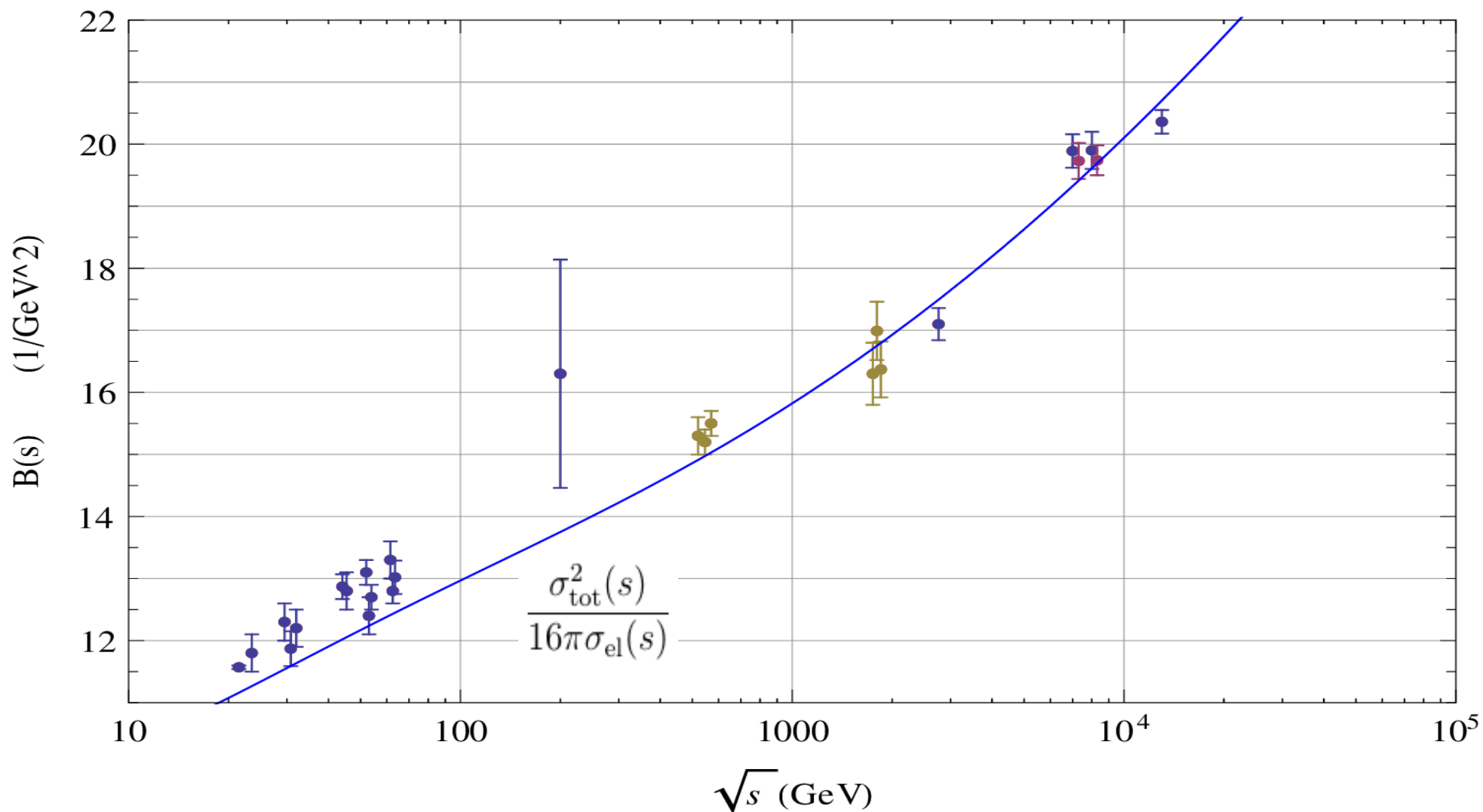
меняет свой знак с положительного на отрицательный в Тэвной области энергий и рост отношения σ_{el}/σ_{tot} замедляется. Аналогично

$$\frac{B''}{B} = \frac{1}{\sigma_{el}} \left(2 \frac{\sigma_{el}}{\sigma_{tot}} \sigma_{tot}'' - \sigma_{el}'' \right) + 2 \left(\frac{\sigma'_{el}}{\sigma_{el}} - \frac{\sigma'_{tot}}{\sigma_{tot}} \right)^2.$$

Рост отношения сечений e/tot



Ускорение роста параметра наклона $B(s)$

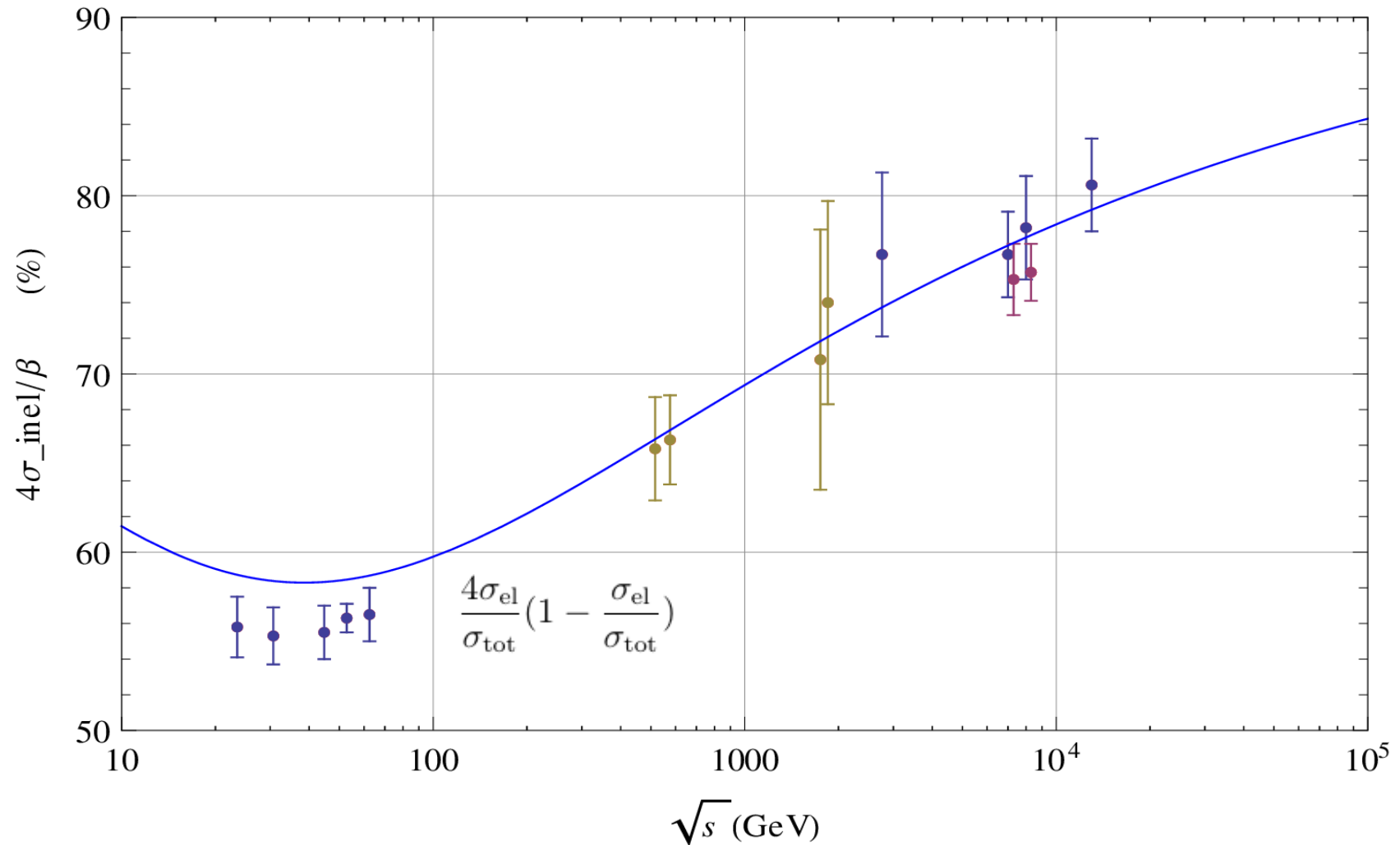


Выводы: соотношение $\frac{\sigma_{el}}{\beta} = \frac{\sigma_{tot}^2}{\beta^2} = \frac{\sigma_{el}^2}{\sigma_{tot}^2}$, $\beta \equiv \frac{16\pi B}{(1 + \rho^2)} \approx 16\pi B$

позволяет заключить, что рост с энергией отношений σ_{el}/β , $\sigma_{el}/\sigma_{inel}$, σ_{el}/σ_{tot} , σ_{tot}/β , а также изменения в поведении $B(s)$, σ_{el}/σ_{tot} и величины $(\sigma_{inel} - \sigma_{el})/\beta$ в Тэвной области энергий, обусловлены одной и той же причиной- ростом интенсивности неупругого взаимодействия σ_{inel}/β .

Теневая интерпретация упругого рассеяния позволяет понять все эти явления с единой точки зрения и выдвигает на первый план изучение роста с энергией интенсивности неупругого взаимодействия.

Рост интенсивности неупругого взаимодействия с ростом энергии



Феноменология М.М. Блока и К (2015):

$$\frac{\sigma_{\text{inel}} - \sigma_{\text{el}}}{\sqrt{\pi\sigma_{\text{tot}}/2}} = \frac{\sigma_{\text{tot}} - 2\sigma_{\text{el}}}{\sqrt{\pi\sigma_{\text{tot}}/2}} = t_{\text{edge}} \approx 1.1\text{fm}$$

Это эквивалентно соотношениям

$$\sigma_{\text{el}}(s) = \sigma_{\text{inel}}(s) + c - \sqrt{c(4\sigma_{\text{inel}}(s) + c)},$$

$$\sigma_{\text{inel}}(s) = \sigma_{\text{el}}(s) + c + \sqrt{c(4\sigma_{\text{el}}(s) + c)}, \quad c \approx 9.5\text{mb}$$

Рост σ_{el} является следствием роста σ_{inel} .

Есть и такая чисто эмпирическая ~ связь

$$\sigma_{\text{el}}(s) \approx 0.5\sigma_{\text{inel}}(s) - 10\text{mb} \quad \text{or} \quad \sigma_{\text{tot}}(s) \approx 3\sigma_{\text{el}}(s) + 20\text{mb}$$

Относительная точность этих формул ~10-15%

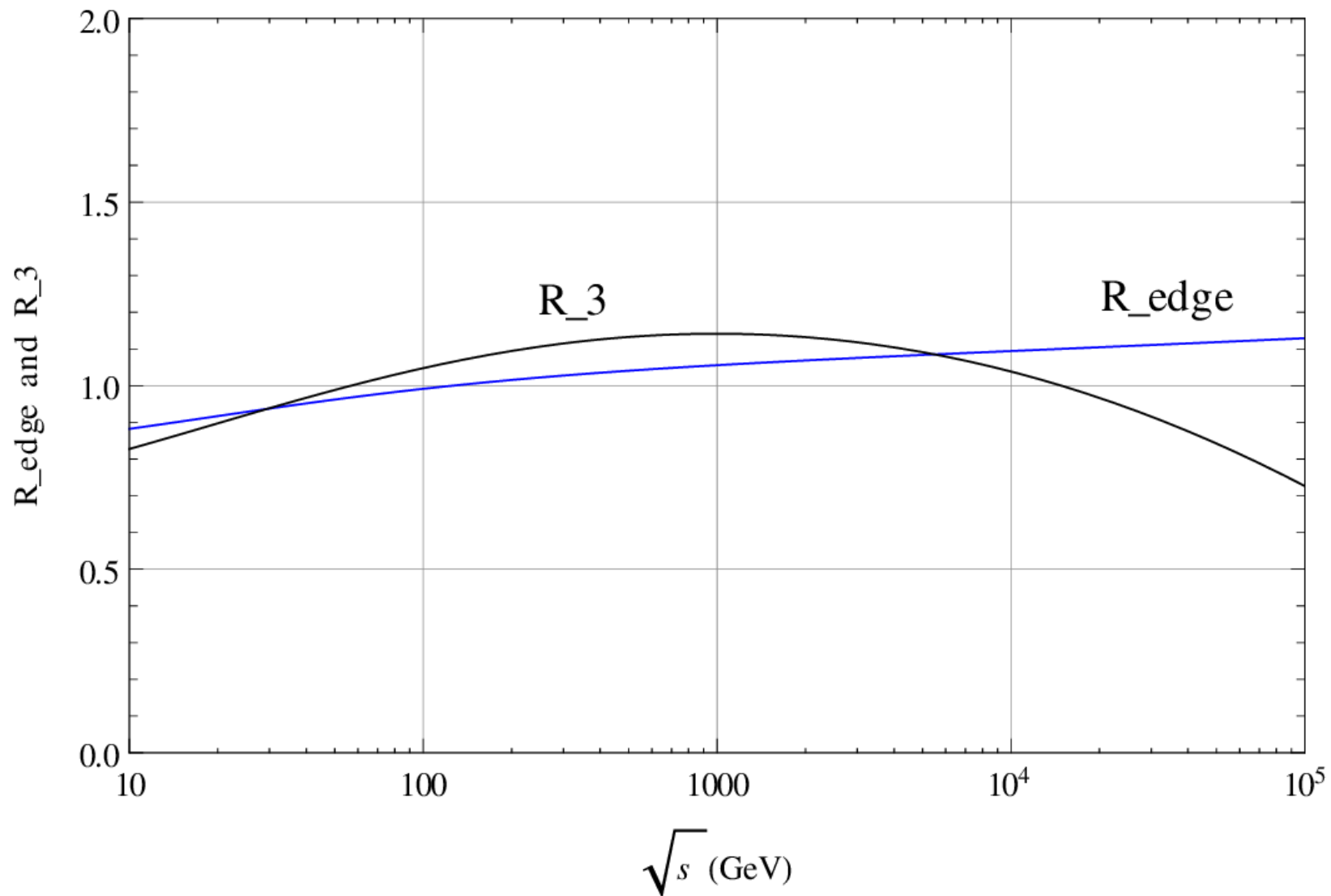
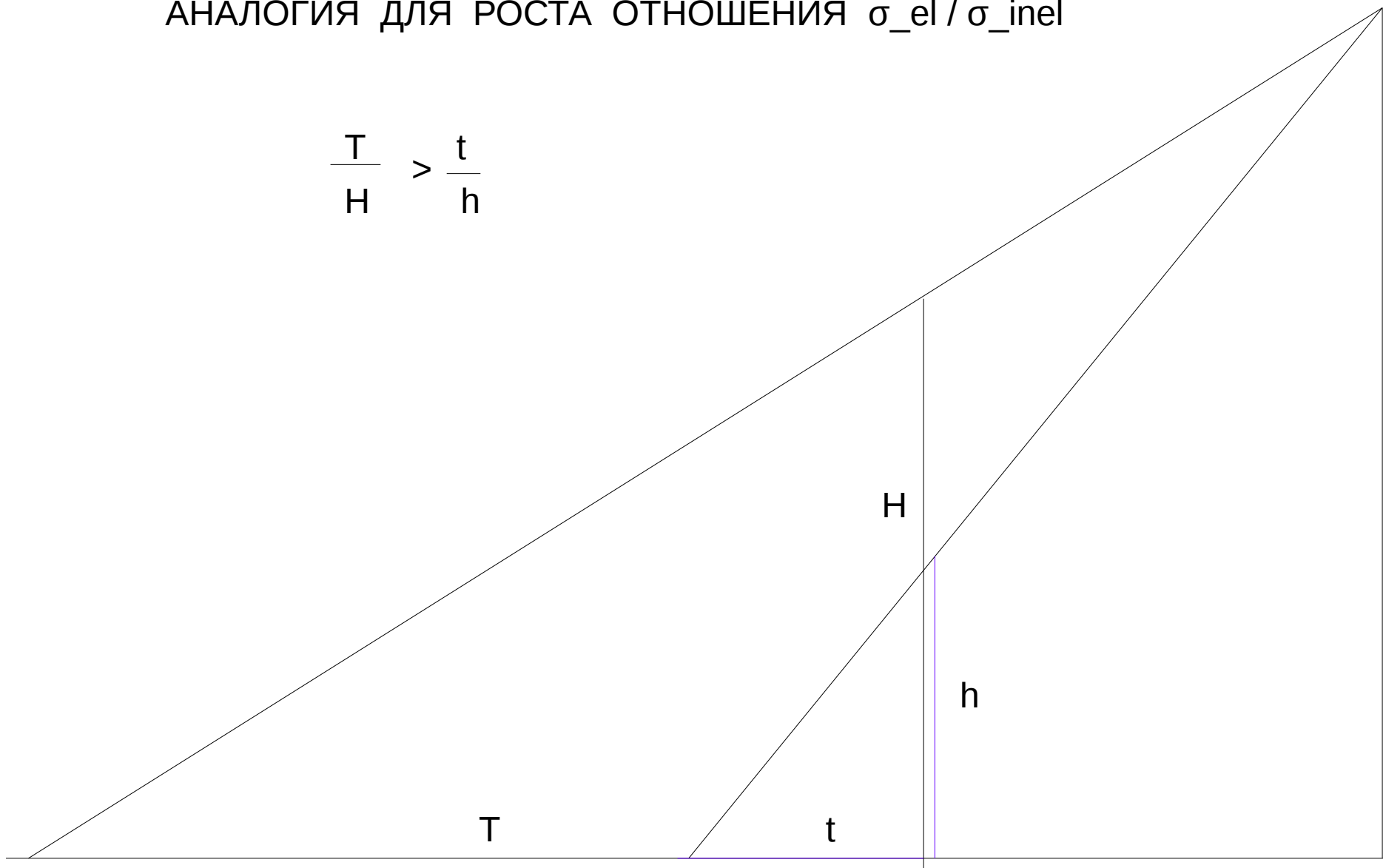


Figure 6: The ratio $R_{\text{edge}} = (\sigma_{\text{inel}} - \sigma_{\text{el}})/\sqrt{(19 \text{ mb})\sigma_{\text{tot}}}$, $R_3 = (\sigma_{\text{tot}} - 3\sigma_{\text{el}})/20 \text{ mb}$ for pp collisions as a function of energy \sqrt{s} . Here the fits by the COMPETE collaboration [33] and TOTEM collaboration [7] are used for σ_{tot} and σ_{el} respectively.

АНАЛОГИЯ ДЛЯ РОСТА ОТНОШЕНИЯ $\sigma_{el} / \sigma_{inel}$

$$\frac{T}{H} > \frac{t}{h}$$



СПАСИБО !