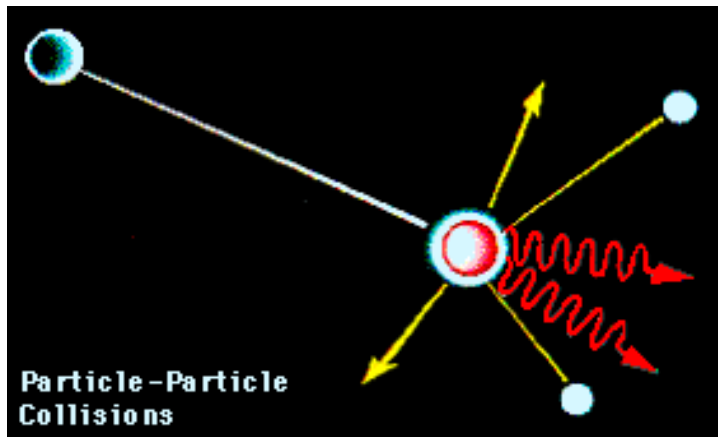


Механизмы излучения

- I Непрерывное излучение: лептонные процессы
Синхротронное. Излучение кривизны.
Обратное комптоновское. Тормозное.
- II Непрерывное излучение: адронные процессы

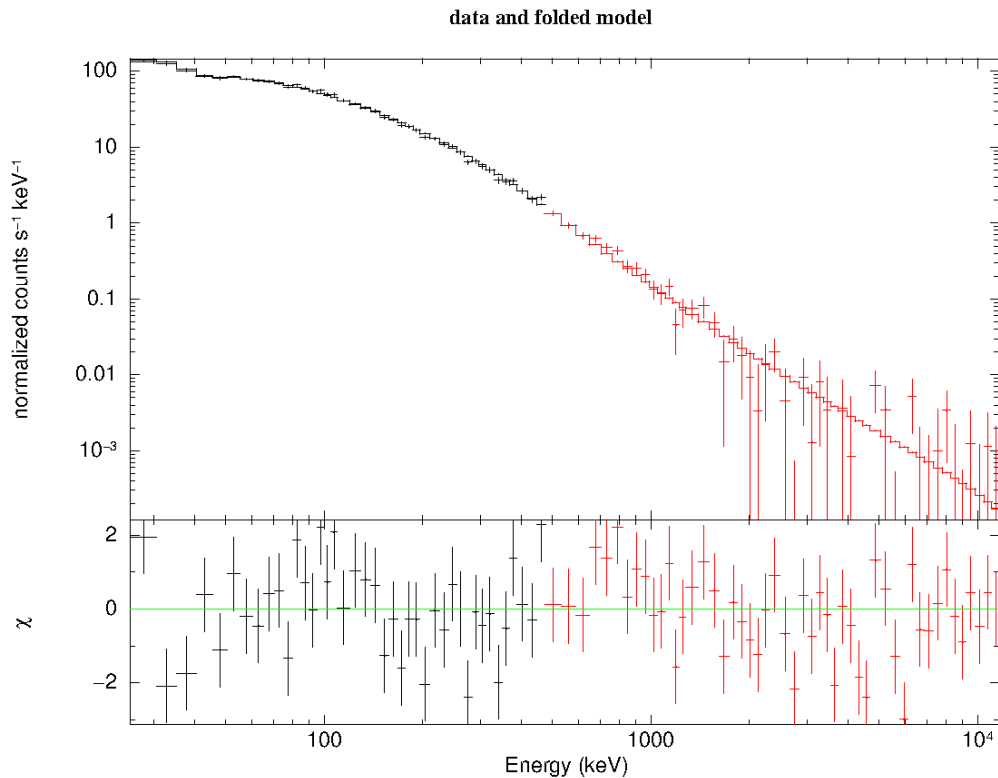


$$\pi_0 \rightarrow 2\gamma$$

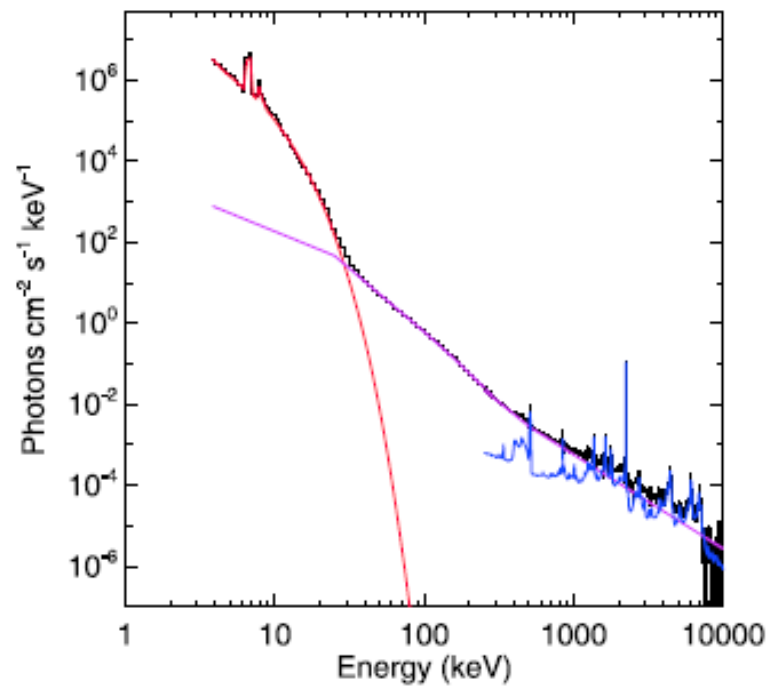
$$[m_\pi c^2 = 135 \text{ МэВ}, \tau \simeq 10^{-16} \text{ с}]$$

- III Излучение в линиях: аннигиляционная линия 511 кэВ,
линия D (2.223 МэВ) и другие солнечные линии,
линия ^{26}Al (1.809 МэВ)

Спектры: приборный, фотонный, $E F_E$

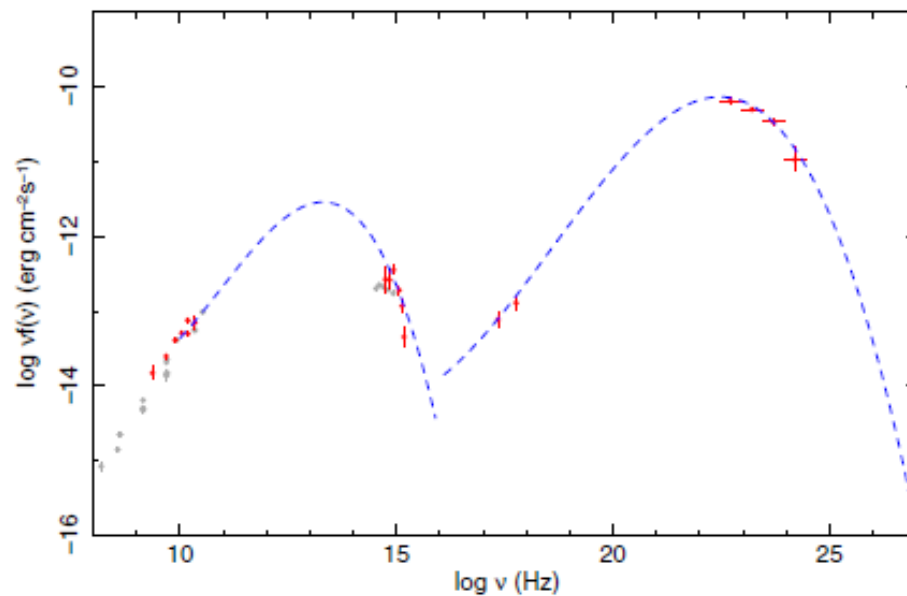
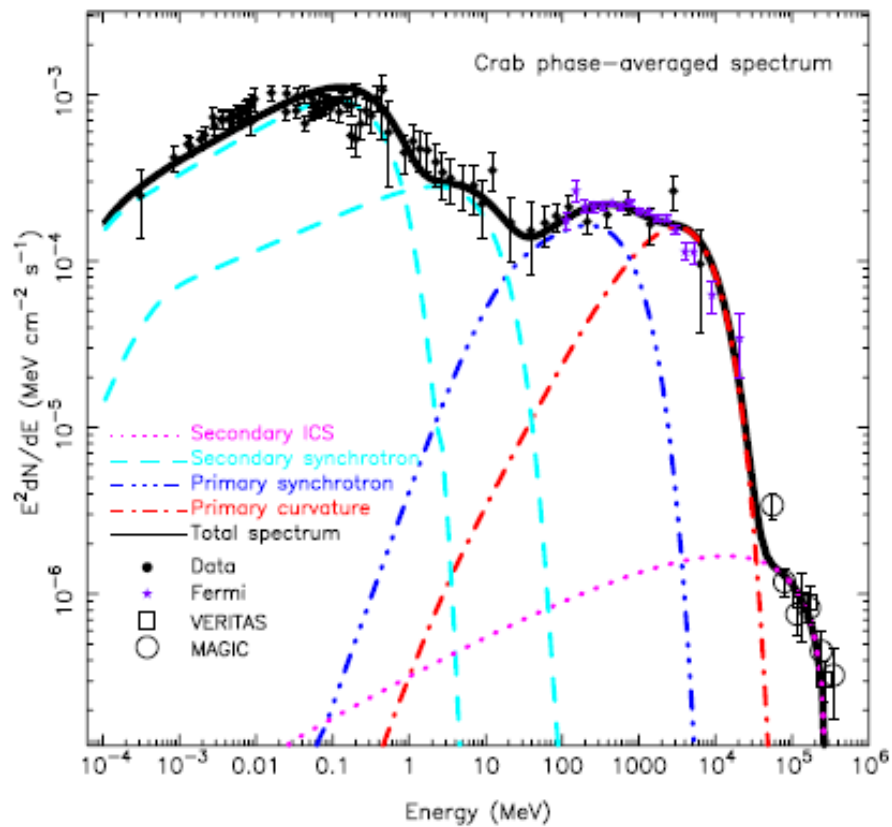


Пример приборного спектра (спектра потерь энергии) – спектр гамма-всплеска GRB 110918A (данные Konus-Wind)



Пример фотонного спектра – спектр солнечной вспышки (данные RHESSI)

Спектр $E F_E (= \nu F_\nu)$



SED блазара B2 1520+31

SED пульсара Краб (SED=Spectral Energy Distribution)

Ускоренно движущийся заряд

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} ; \quad \beta \equiv \frac{v}{c} \quad E_e = \gamma mc^2, \quad \mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}$$

Формула Лармора и ее релятивистское обобщение

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi c^3} a^2 \sin^2 \theta$$

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 a^2}{c^3}$$

Релятивистское обобщение: $a^\mu = (1/m)(dp^\mu/d\tau)$, $p^\mu = (\gamma mc, \gamma m \mathbf{v})$, $d\tau = dt/\gamma$.

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 a^2}{m^2 c^3} \frac{dp_\mu}{d\tau} \frac{dp^\mu}{d\tau}$$

Формула Лиенара:

$$P = \frac{2}{3} \gamma^6 \frac{e^2}{c^2} [\dot{\beta}^2 - (\beta \times \dot{\beta})^2]$$

или

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \gamma^4 \left[a^2 + \gamma^2 \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{a}}{c} \right)^2 \right]$$

$$\mathbf{a} = a_{\perp} \mathbf{e}_{\perp} + a_{\parallel} \mathbf{e}_{\parallel}$$

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \gamma^4 [a_{\perp}^2 + \gamma^2 a_{\parallel}^2]$$

Излучение сосредоточено в угле $\sim 1/\gamma$ вокруг направления скорости.

Синхротронное излучение

Питч-угол α : $\operatorname{tg} \alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$

$$\omega_g = \frac{eB}{\gamma mc}$$

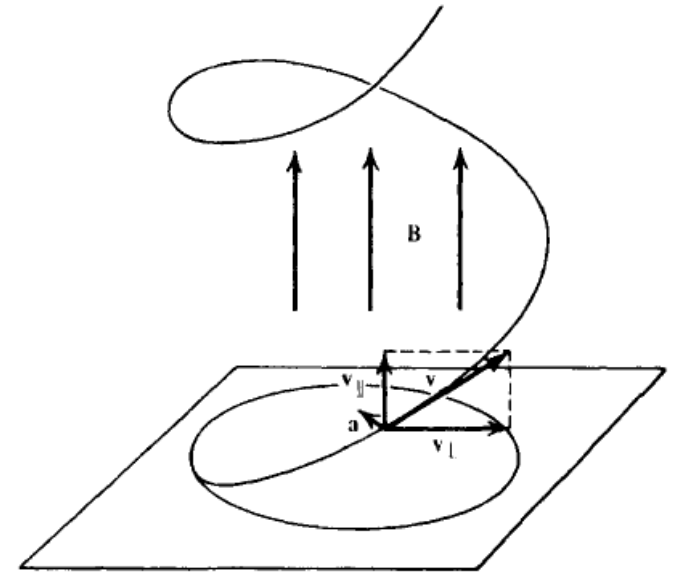
$$r_g = \frac{p_{\perp}}{eB} = \frac{\gamma m v_{\perp}}{eB}$$

$$P = \frac{2}{3} r_e^2 c \beta^2 \sin^2 \alpha \gamma^2 B^2 = 2 \sigma_T c \beta^2 \sin^2 \alpha \gamma^2 U_B$$

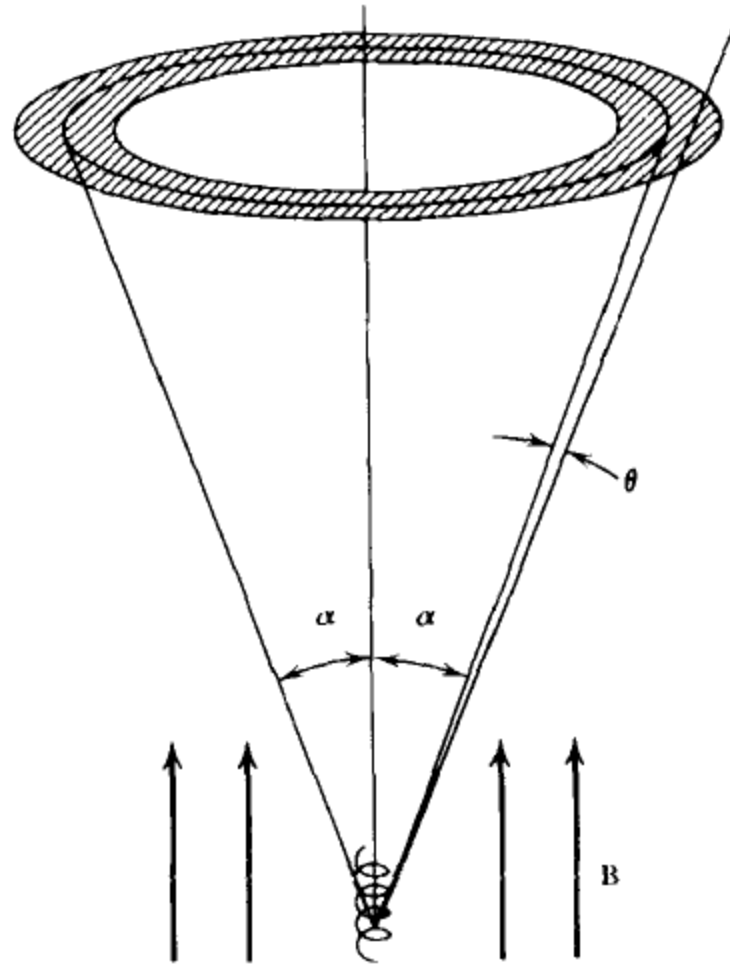
$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_e^2 \quad U_B = \frac{B^2}{8\pi}$$

Для изотропного распределения излучающих частиц по скоростям:

$$P = \frac{4}{9} r_e^2 c \beta^2 \gamma^2 B^2 = \frac{4}{3} \sigma_T c \beta^2 \gamma^2 U_B$$



Синхротронное излучение (угловое распределение)



Синхротронное излучение (спектр)

Спектральное распределение мощности излучения:

$$\omega_c = \frac{3}{2} \gamma^3 \omega_g \sin \alpha = \frac{3}{2} \gamma^2 \frac{eB}{mc} \sin \alpha$$

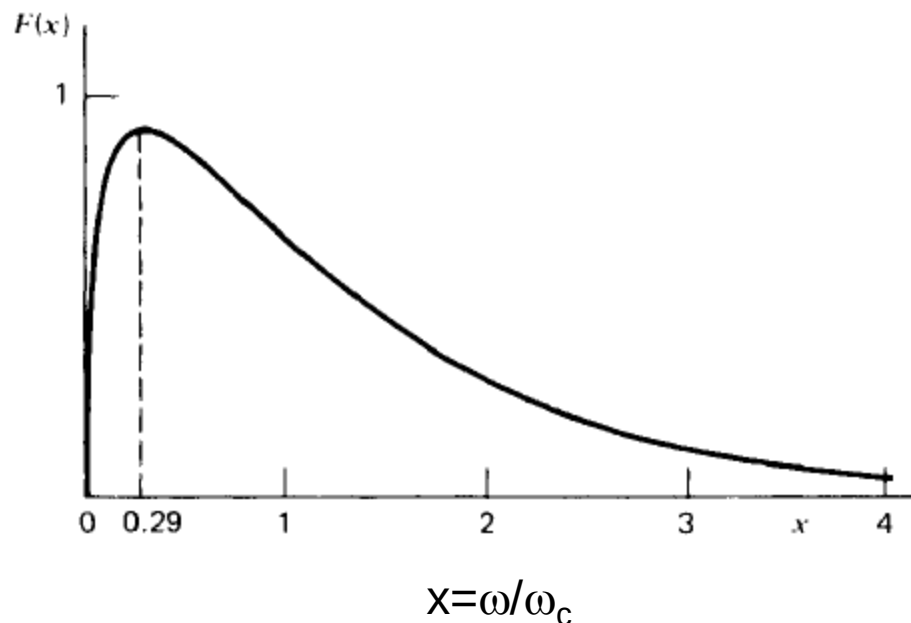
$$F(x) \sim \frac{4\pi}{\sqrt{3} \Gamma(\frac{1}{3})} \left(\frac{x}{2}\right)^{1/3}, \quad x \ll 1,$$

$$\frac{\hbar \omega_c}{mc^2} = \frac{3}{2} \gamma^2 \frac{B}{B_c} \sin \alpha; \quad B_c = \frac{m^2 c^3}{e \hbar} = 4.4 \times 10^{13} \text{ Гс}$$

$$F(x) \sim \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} e^{-x} x^{1/2}, \quad x \gg 1.$$

$$P(\omega) = \frac{\sqrt{3} e^3 B}{2\pi mc^2} \sin \alpha F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$$

$$F(x) = x \int_x^\infty K_{5/3}(z) dz$$



Синхротронное излучение ансамбля заряженных частиц

Для степенного распределения частиц по энергиям:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-p} \quad E_1 < E < E_2$$

$$P(\omega) \propto \omega^{-(p-1)/2}$$

Условия применимости:

$$B \ll \frac{B_c}{\gamma}$$

$$\hbar\omega \ll E$$

Излучение кривизны (curvature radiation)

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} a_\mu a^\mu$$

$$a_\mu a^\mu = \gamma^4 [a^2 + \gamma^2 (\vec{v} \cdot \vec{a})^2 / c^2]$$

$$a = v^2 / R_c, \quad \vec{v} \cdot \vec{a} = 0$$

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{R_c^2} \gamma^4$$

$$P(\omega) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{e^2}{R_c} \gamma F(\omega/\omega_c), \quad \omega_c = \frac{3}{2} \frac{c}{R_c} \gamma^3 \quad \left(\frac{\hbar \omega_c}{mc^2} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_c}{R_c} \gamma^3 \simeq 5.8 \frac{\gamma_6^3}{R_{c,7}} \right)$$

$$P = \frac{2}{3} r_e^2 c \beta^2 \sin^2 \alpha \gamma^2 B^2 = 2 \sigma_T c \beta^2 \sin^2 \alpha \gamma^2 U_B \quad - \text{ для синхротронного излучения}$$

$$P(\omega) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{e^3 B}{mc^2} \sin \alpha F(\omega/\omega_c) \quad \frac{\hbar \omega_c}{mc^2} = \frac{3}{2} \gamma^2 \frac{B}{B_c} \sin \alpha$$

Томпсоновское рассеяние

$$\hbar\omega_0 \ll mc^2$$

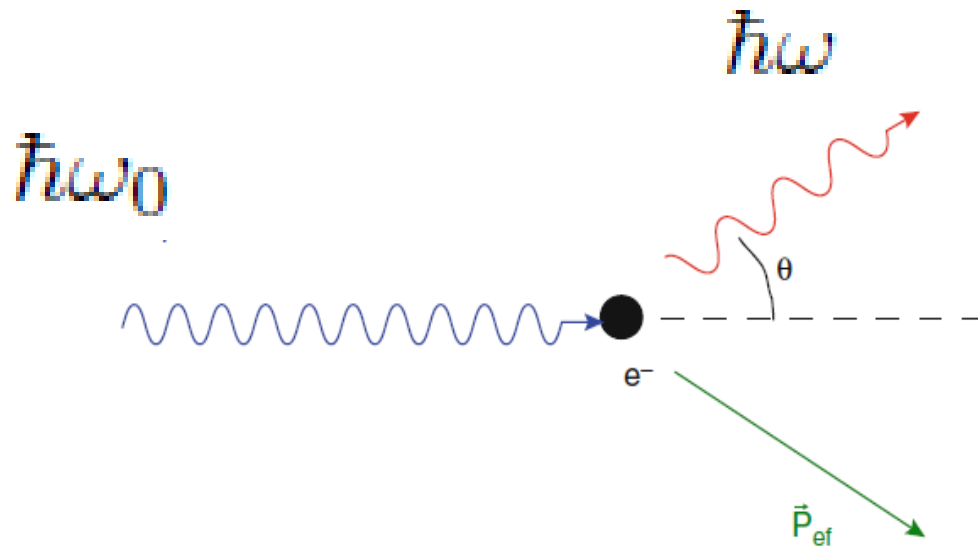
$$\hbar\omega = \hbar\omega_0$$

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} = \frac{1}{2}r_e^2(1 + \cos^2 \theta)$$

$$r_e = \frac{e^2}{mc^2} = 2.8 \times 10^{-13} \text{ см}$$

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3}r_e^2 = 6.65 \times 10^{-25} \text{ см}^2 = 0.665 \text{ барн}$$

Комптовское рассеяние



$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) = \lambda_c(1 - \cos \theta)$$

$$\hbar\omega = \frac{\hbar\omega_0}{1 + \frac{\hbar\omega_0}{mc^2}(1 - \cos \theta)}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \left(\frac{\omega_0}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_0} - \sin^2 \theta \right)$$

Комптовское рассеяние (сечение)

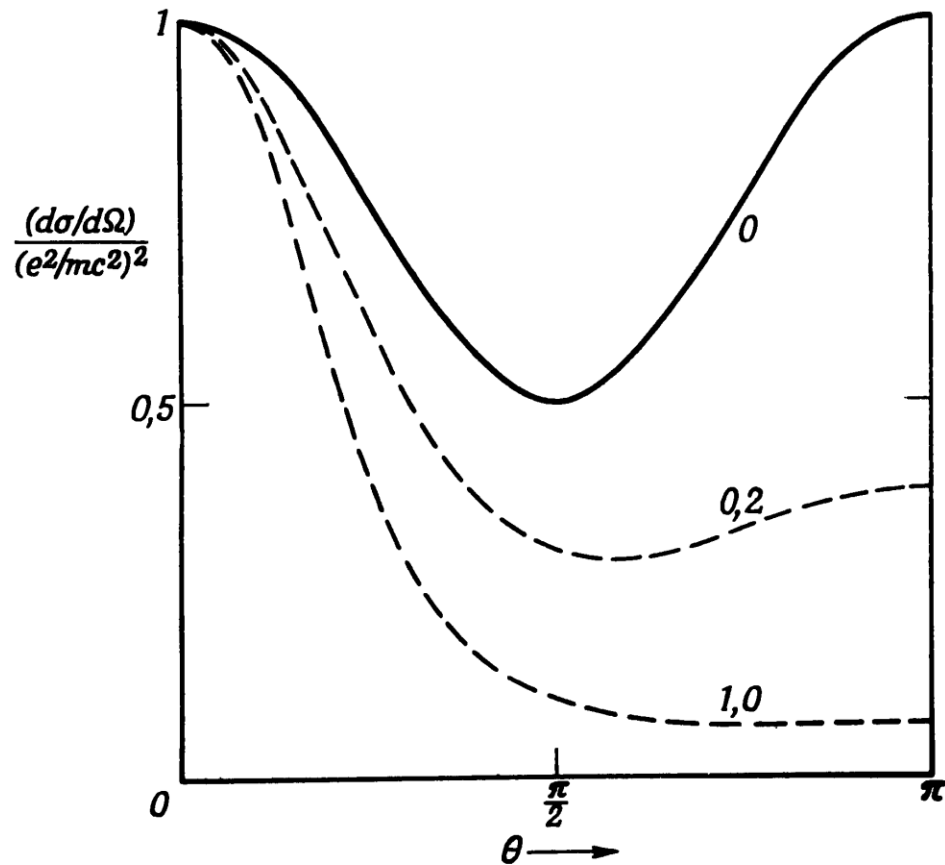
$$x \equiv \frac{\hbar\omega_0}{mc^2}$$

$$\sigma = \sigma_T \cdot \frac{3}{4} \left[\frac{1+x}{x^3} \left\{ \frac{2x(1+x)}{1+2x} - \ln(1+2x) \right\} + \frac{1}{2x} \ln(1+2x) - \frac{1+3x}{(1+2x)^2} \right]$$

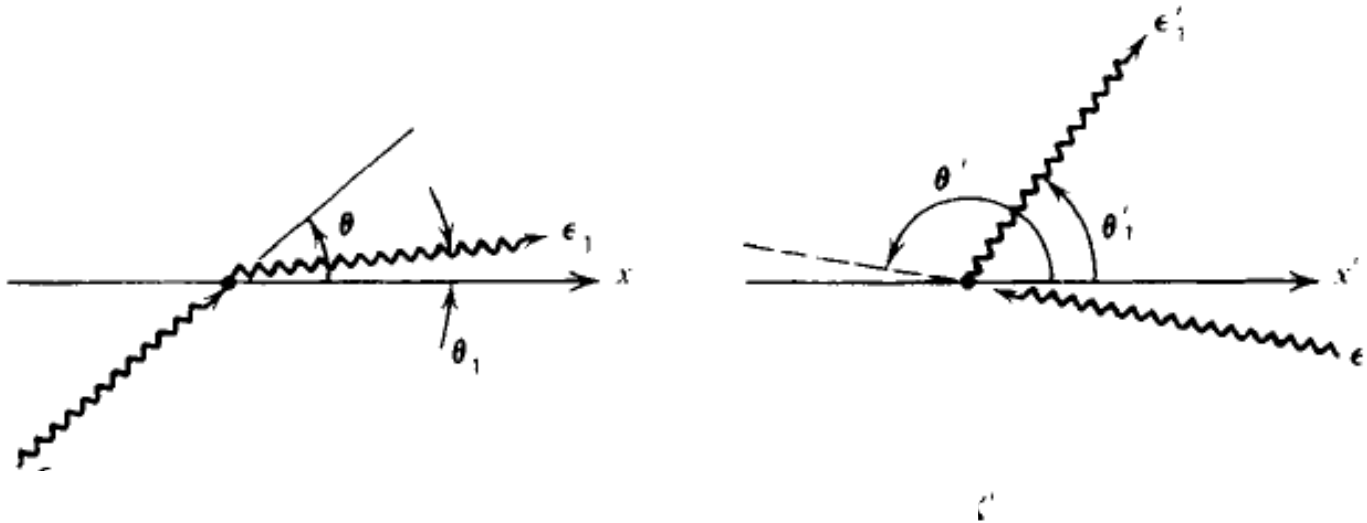
$$\sigma \approx \sigma_T \left(1 - 2x + \frac{26x^2}{5} + \dots \right), \quad x \ll 1,$$

$$\sigma = \frac{3}{8} \sigma_T x^{-1} \left(\ln 2x + \frac{1}{2} \right), \quad x \gg 1.$$

Комптоновское рассеяние (угловое распределение)



Обратное комптоновское рассеяние



В системе покоя электрона:

$$\hbar\omega' = \gamma\hbar\omega_0(1 - \beta \cos \theta)$$

$$\gamma \gg 1$$

$$\hbar\omega \simeq \gamma^2 \hbar\omega_0$$

Обратное комптоновское рассеяние

Для изотропного поля фотонов.

Средняя энергия рассеянного фотона:

$$\langle \hbar\omega \rangle = \frac{4}{3}\gamma^2\beta^2\hbar\omega_0 \simeq \frac{4}{3}\gamma^2\hbar\omega_0$$

Максимальная энергия рассеянного фотона

$$\hbar\omega_{max} \simeq 4\gamma^2\hbar\omega_0$$

Мощность потерь энергии электрона ($\gamma\hbar\omega_0 \ll mc^2$):

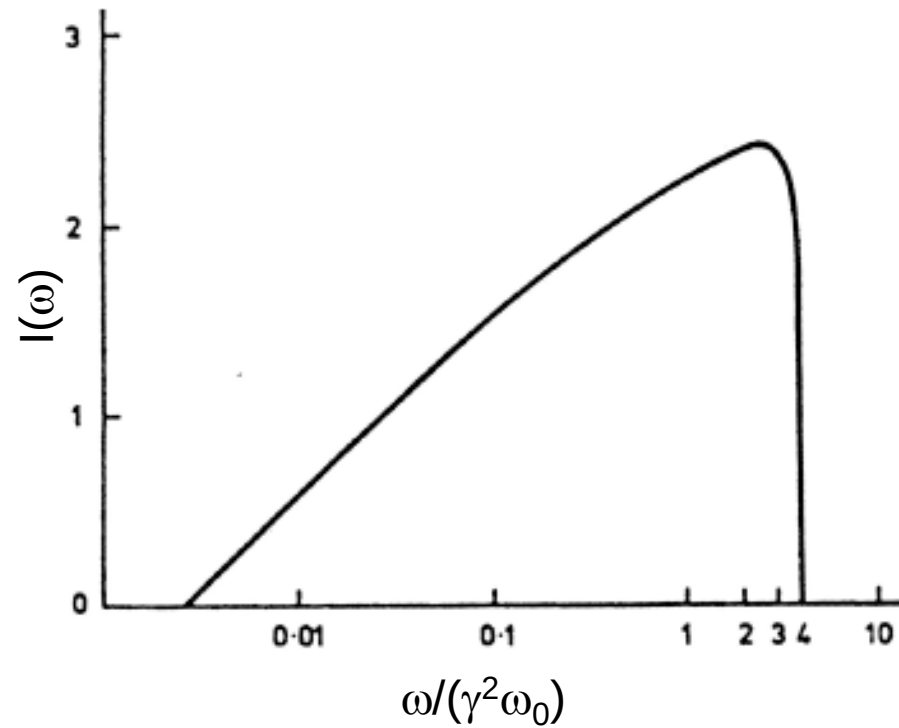
$$P_{Comp} = \frac{4}{3}\sigma_T c \gamma^2 \beta^2 U_{ph}$$

$$P_{sync} = \frac{4}{3}\sigma_T c \beta^2 \gamma^2 U_B$$

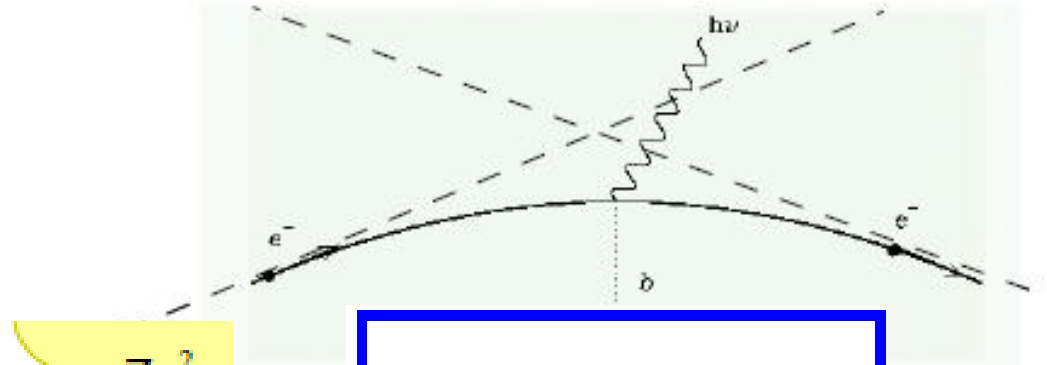
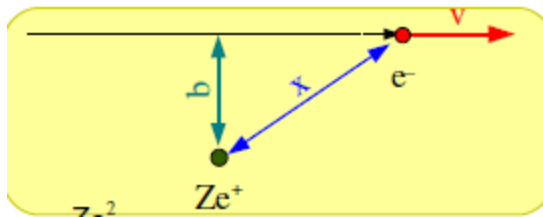
$$\gamma = 1000$$

<i>Waveband</i>	<i>Frequency (Hz)</i> ν_0	<i>Scattered Frequency (Hz)</i> <i>and Waveband</i>
Radio	10^9	$10^{15} = \text{UV}$
Far-infrared	3×10^{12}	$3 \times 10^{18} = \text{X-rays}$
Optical	4×10^{14}	$4 \times 10^{21} \equiv 1.6\text{MeV} = \gamma\text{-rays}$

Обратное комптоновское рассеяние (спектр)



Тормозное излучение (Bremsstrahlung)



$$F = ma \simeq -\frac{Ze^2}{x^2} \rightarrow a = \frac{Ze^2}{mx^2}$$

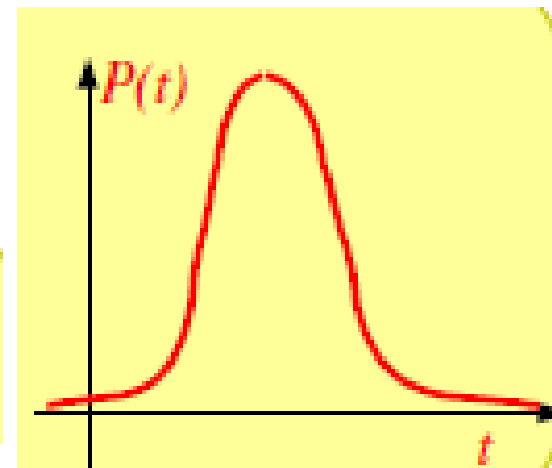
$$\Delta t \sim 2b/v$$

$$1. \quad a \sim m^{-1} \rightarrow P \sim m^{-2}$$

$$2. \quad a \sim x^{-2} \rightarrow P \sim x^{-4}$$

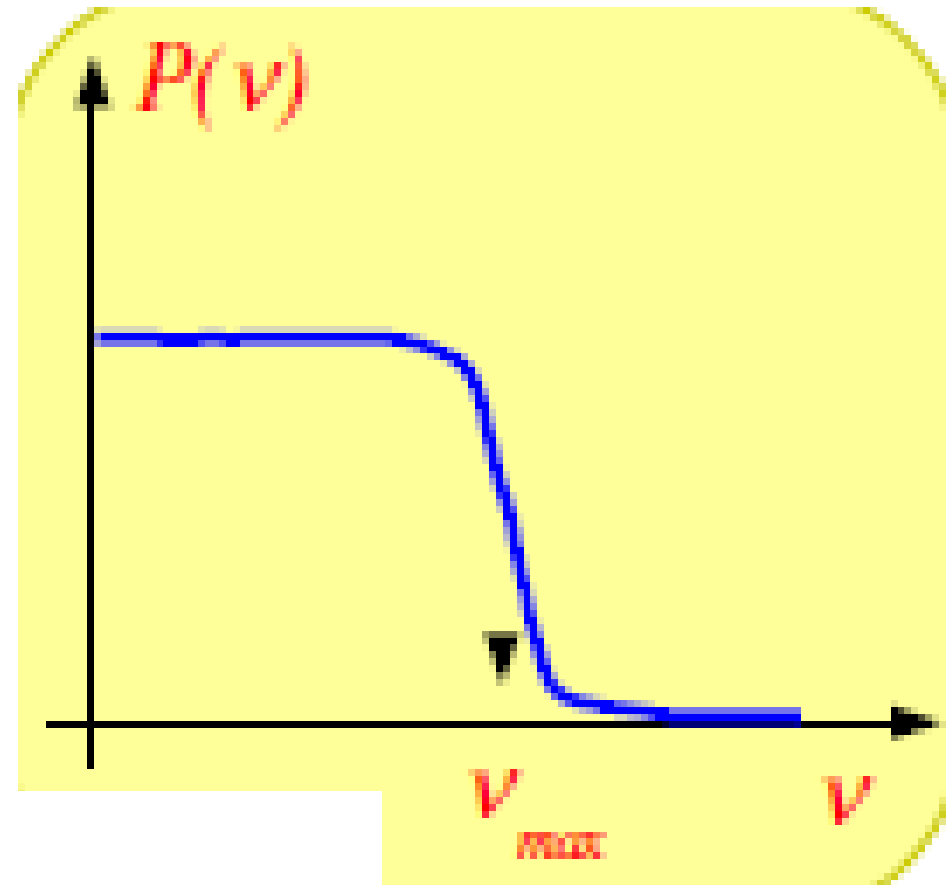
$$P_{\Delta t} = \frac{2e^2}{3c^3} \left(\frac{Ze^2}{mx^2} \right)^2 \frac{2b}{v} = \frac{4}{3} \frac{Z^2 e^6}{c^3 m^2} \frac{1}{b^3 v}$$

$$x \simeq b$$



Тормозное излучение (спектр)

$$\nu_{\max} \approx \frac{1}{2\Delta t} \approx \frac{v}{4b}$$



$$\frac{dE}{d\omega} = \begin{cases} \frac{8}{3} \frac{Z^2 e^6}{\pi c^3 m^2 b^2 v^2}, & \text{if } b \ll \frac{v}{\omega} \\ 0 & \text{if } b \gg \frac{v}{\omega} \end{cases}$$

Тормозное излучение (ансамбль частиц)

$$\frac{dE}{d\omega dV dt} = \text{ion density} \cdot \int 2\pi b db \cdot \underbrace{\text{electron flux}}_{n_e v} \cdot \frac{dE(b)}{d\omega}$$

$$= n_i n_e v 2\pi \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} db \cdot b \frac{dE}{d\omega} = \frac{16}{3} \frac{Z^2 e^6 n_i n_e}{c^3 m^2 v} \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{db}{b}$$

$$= \frac{16e^6 Z^2}{3c^3 m^2 v} n_e n_i \ln \left(\frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right)$$

$$\frac{dE}{d\omega dV dt} = \frac{16\pi e^6}{3\sqrt{3}c^3 m^2 v} n_e n_i Z^2 g_{\text{ff}}(v, \omega) \quad g_{\text{ff}}(v, \omega) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left(\frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right)$$

Тепловое тормозное излучение

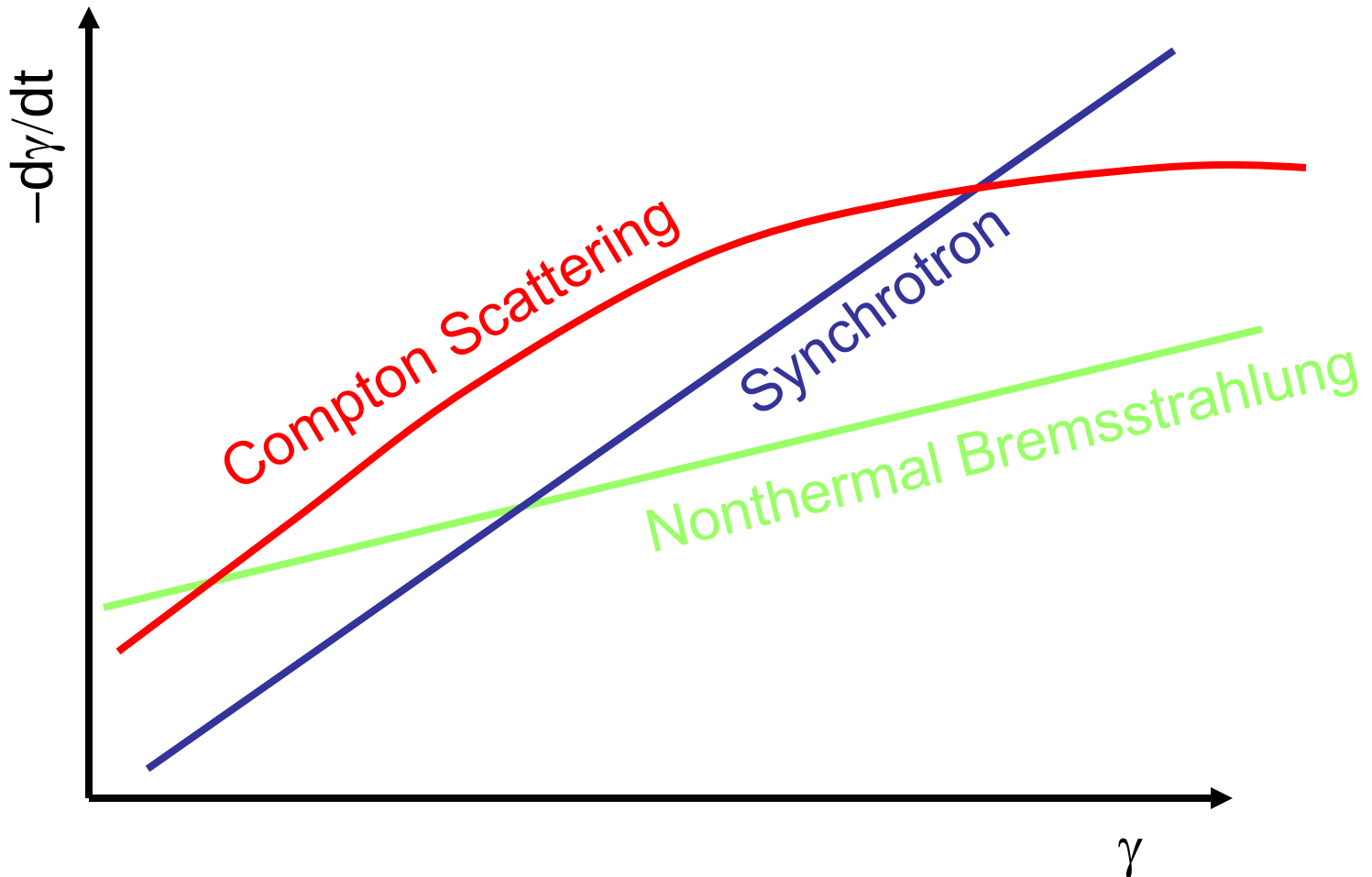
$$\frac{dE}{dV dt d\nu} = \frac{2^5 \pi e^6}{3 m c^2} \left(\frac{2 \pi}{3 k m} \right)^{-1/2} T^{1/2} Z^2 n_e n_i e^{-h\nu/kT} \bar{g}_{ff},$$

$$\varepsilon_v^{ff} = 6.8 \cdot 10^{-38} Z^2 n_e n_i T^{-1/2} e^{-h\nu/kT} \bar{g}_{ff} \left[\frac{\text{erg}}{\text{s cm}^3 \text{ Hz}} \right].$$

$$1 < \bar{g}_{ff} < 5 \text{ for } 10^{-4} < \frac{h\nu}{kT} < 1$$

$$\varepsilon_{ff} = 1.4 \cdot 10^{-27} T^{1/2} n_e n_i Z^2 \bar{g}_B \left[\frac{\text{erg}}{\text{s cm}^3} \right], \quad \bar{g}_B = 1-1.5$$

Total Energy Loss Rate of Relativistic Electrons



Непрерывное излучение: адронные процессы

Сечение взаимодействия протонов высоких энергий ($> \text{ТэВ}$) с водородом практически не зависит от энергии:

$$\sigma_{pp,inel} \simeq 35 \text{ мбарн}$$

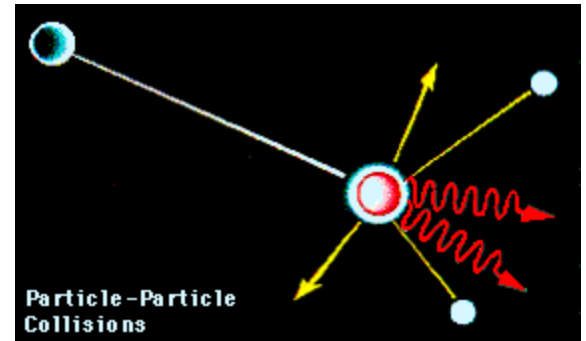
Соответствующее время пробега протона

$$\tau = \frac{3 \times 10^7}{n} \text{ лет}$$

n – концентрация водорода [см^{-3}]

Примерно $1/6$ энергии протона E_p переходит в гамма-кванты, образующиеся при распаде π_0 ($m_\pi c^2 = 135 \text{ МэВ}$, $\tau \simeq 10^{-16} \text{ с}$):

$$\pi_0 \rightarrow 2\gamma \tag{3}$$



Для $E_p \gg m_\pi c^2$ распределение гамма-квантов по энергиям масштабно-инвариантно, т.е.

$$\frac{dN_\gamma}{dE_\gamma}(E_\gamma, E_p) = D_\gamma(x = E_\gamma/E_p) \quad (4)$$

Для степенного распределения протонов по энергиям:

$$\frac{dN_p}{dE_p} \propto E^{-\Gamma} \quad (5)$$

$$\frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} \propto E^{-\Gamma} \quad (6)$$

Излучение в линиях:
аннигиляционная линия 511 кэВ,
линия D (2.223 МэВ), линия ^{26}Al (1.809 МэВ)

Аннигиляционная линия 511 кэВ

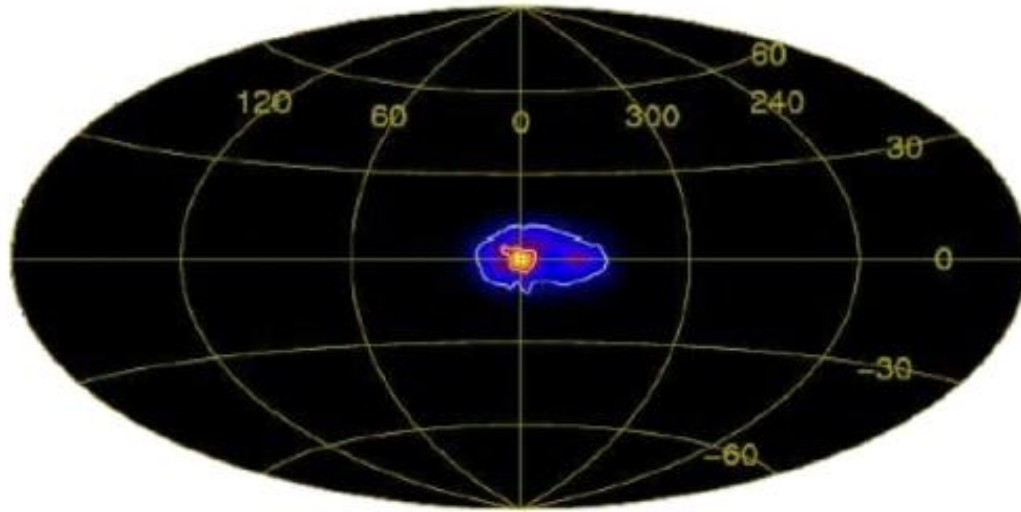
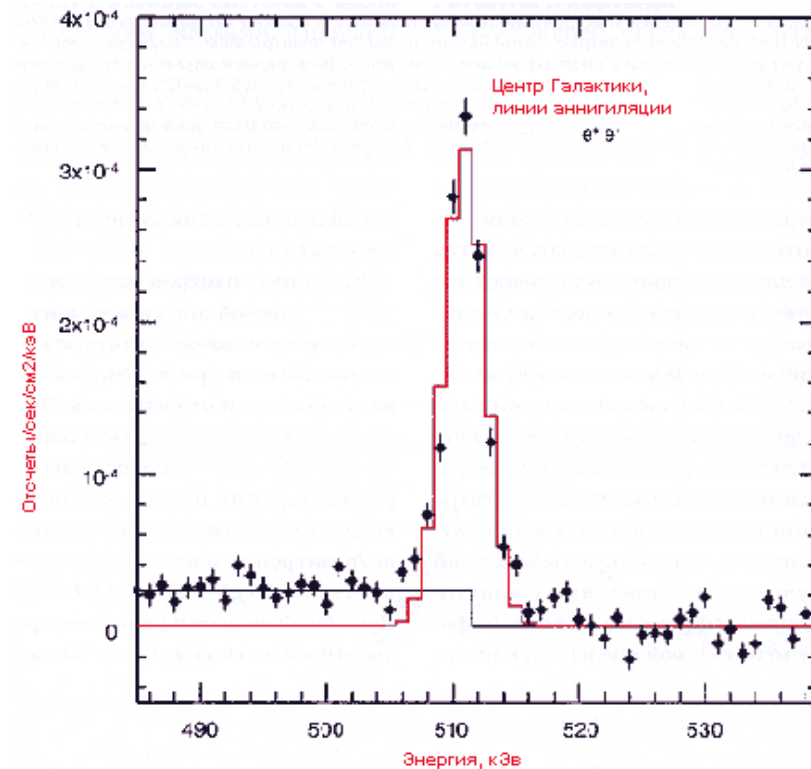
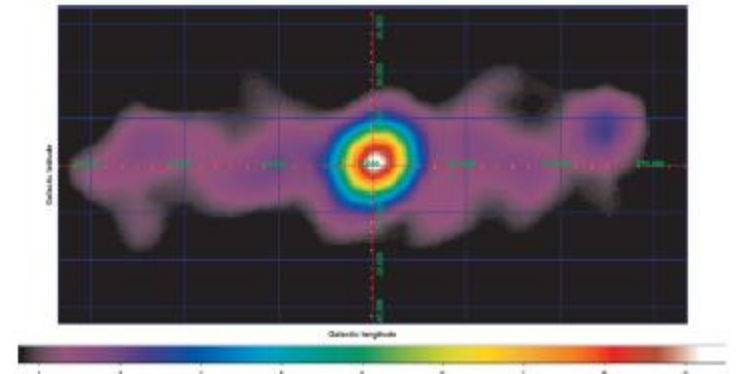


FIG. 4 (color online). 511 keV line map derived from 5 years of INTEGRAL/SPI data. From Weidenspointner *et al.*, 2008a.

- $e^+ + e^- = \gamma + \gamma$
- $e^+ + e^- = \text{позитроний} \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma$
- Основные источники позитронов все еще не идентифицированы!



Позитроний

- Синглетное ($s=0$: пара-позитроний) и триплетное ($s=1$: орто-позитроний) состояния
- 3/4 всех «атомов» позитрония в триплетном состоянии)
- Триплетное состояние – 3 гамма-кванта (сохранение момента импульса!)
- $\tau=1.2 \times 10^{-10}$ s (p-Ps), 1.4×10^{-7} s (o-Ps)

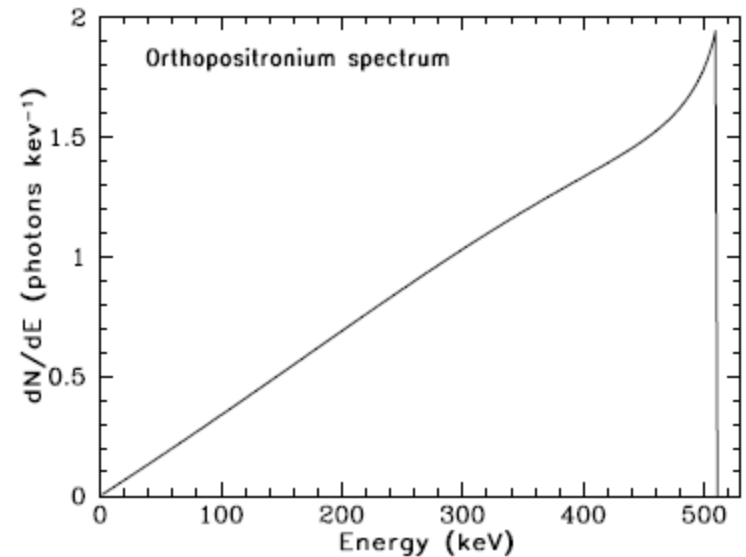


FIG. 1 Spectrum of ortho-positronium annihilation with the three-photon continuum (from Ore and Powell, 1949).

^{26}Al (1808.63 кэВ)

- $\tau = 1.05 \times 10^6$ лет
- ^{26}Al ($Z=13$) (β^+ decay)
 $\rightarrow ^{26}\text{Mg}^* (Z=12)$
- Производится в
 массивных звездах ($t \approx 10^6$ лет)

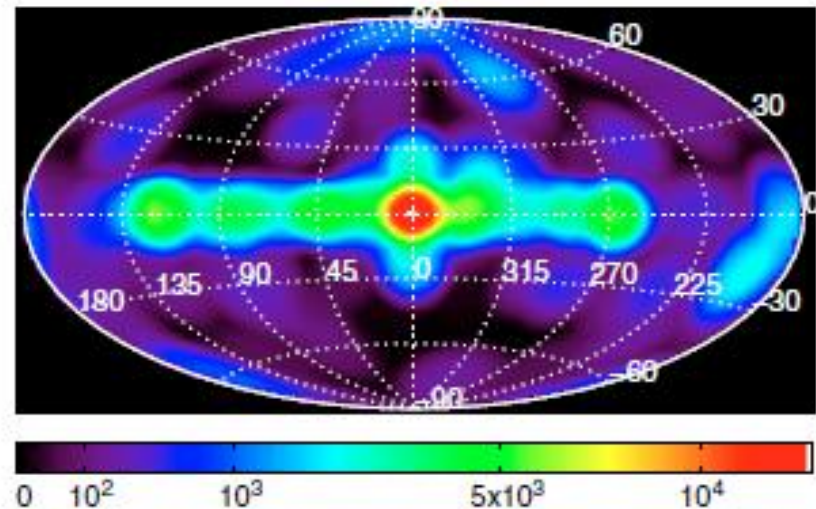
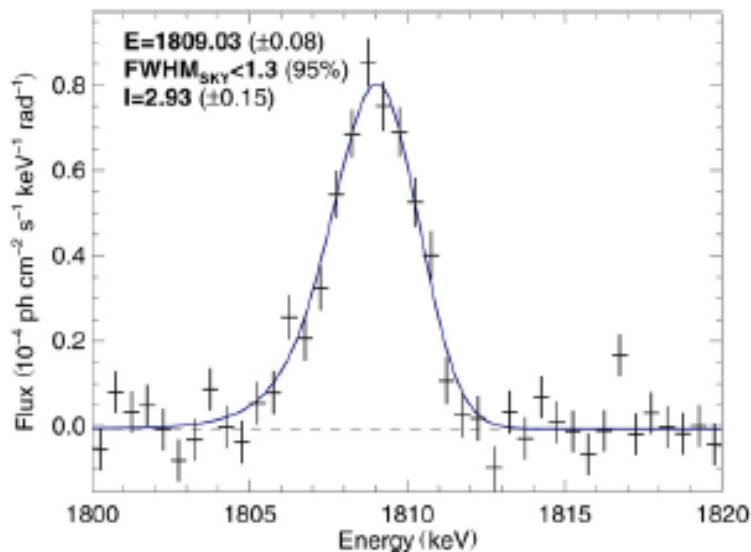
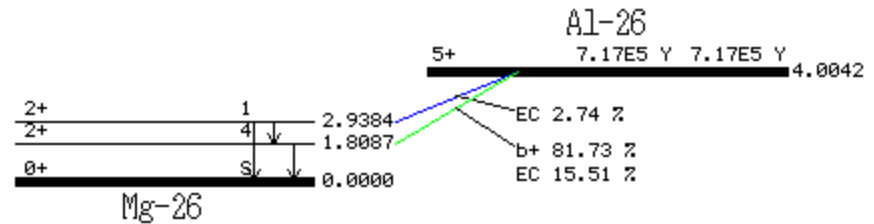


Fig. 1. Exposure of the sky in Galactic coordinates (the number at the color bar in units of ks) for the data selected from 5-year SPI observations for our ^{26}Al study (INTEGRAL orbits 43–650). The database covers the whole sky, with 29 736 individual pointings, equivalent to a total (deadtime-corrected) exposure time of 61 Ms. Observations emphasize the Galactic plane, specially in the inner Galaxy region, but also specific regions of interest such as Cas A, Cygnus, Carina-Vela, Orion, Virgo, and the Crab pulsar and nebula.