Strahlungsprozesse in AGN

Synchrotron-Strahlung

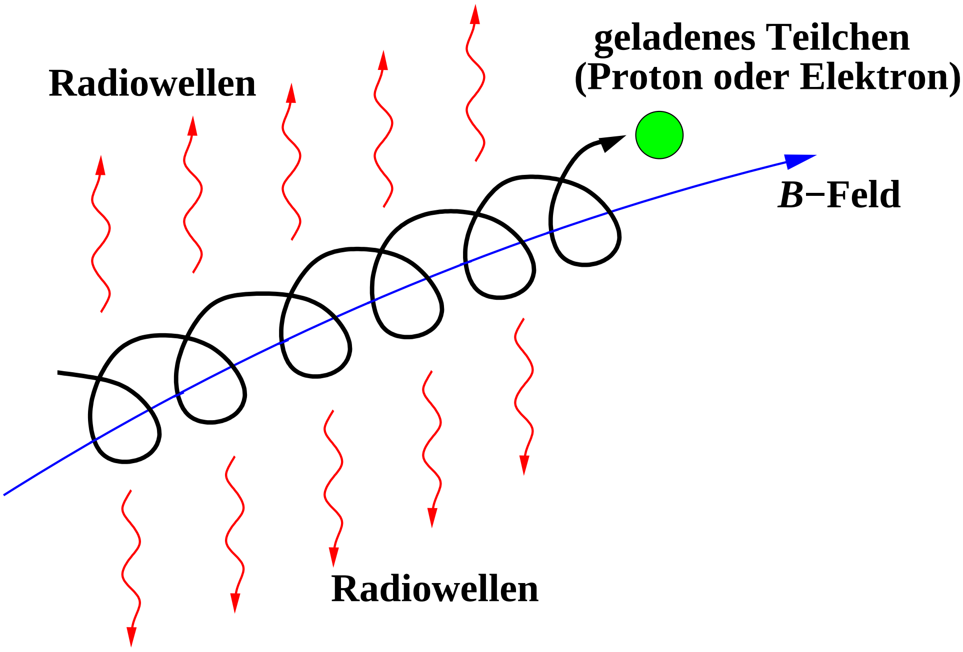
- Einzelnes Elektron
- Elektronenverteilung
- Polarisation
- Synchrotron-Selbstabsorption

Compton-Streuung

- Wirkungsquerschnitt, Streuformel
- Comptonisierung
- Kompaneetsgleichung
- Inverse Comptonstreuung
- Compton-Streuung von Synchrotron-Strahlung

Synchrotron-Strahlung – ein Teilchen

→ Vorhergesagt als physikalischer Prozess (Schwinger 1949)
→ Astrophysikalische Anwendung Radioquellen (Shklovsky 1953)
Synchrotron-Strahlung eines Teilchens:



Relativistisches Elektron im Magnetfeld
–"Relativistisch" ↔ heiß: schnelle thermische Bewegung
–Gyrotation um Magnetfeld:
Nicht-relativistisch: Zyklotron-Strahlung mit
Strahlungsfrequenz = Gyro-Frequenz:

$$\omega_G = \frac{eB}{m_e c} = 1.8 \times 10^7 \frac{B}{1\mathrm{G}} \mathrm{rad\ s^{-1}}$$

Synchrotron-Strahlung: Relativistische Elektronen:

(1) $m_e \to \gamma m_e$ (Lorentzfaktor γ), γ in Jets $\lesssim 2000$
(2) "beaming" in Öffnungswinkel γ^{-1}
(Bündelung/Verstärkung in $\mathbf{v}$-Richtung)
→ Lichtstrahl eines Elektrons überstreicht Beobachter
Zeitskala: Emission: $\Delta t_{\mathrm{em}} \sim \gamma^{-1}(\omega/\gamma^{-1}) = (m_e c/eB)$
Beobachteter Puls: $\Delta t_{\mathrm{obs}} \sim (1 - \mathbf{n} \cdot \beta)\Delta t_{\mathrm{em}} \sim \Delta t_{\mathrm{em}}/2\gamma^2$

Synchrotron-Strahlung – ein Teilchen

(3) Fouriertransformation des Pulses gibt typische Frequenz:

$$\begin{aligned}
\nu_c &\sim \Delta t_{\mathrm{obs}}^{-1} \\
&\sim \gamma^2 \omega_G \\
&\sim \gamma^2 (B/1\mathrm{G})\ \mathrm{MHz} \\
P &\sim \nu^{1/3}, \quad \nu \text{ klein} \\
P &\sim \exp(-\nu/\nu_c), \quad \nu \text{ groß}
\end{aligned}$$

Maximum bei $0.29\nu_c$

Strahlungsleistung:
"Dipolstrahlung" durch beschleunigtes Elektron $\dot{\beta}$:
$\mathbf{E} = (e\dot{\beta}_\perp/rc)$, Strahlungsleistung $\sim |\mathbf{E}|^2$,

Leistung: $\rightarrow P = \frac{2e^2 <|\dot{\beta}|^2>}{3c}$ (LarmorFormel; Newton'sch)

$$P = \frac{2e^2\gamma^6}{3c}\left(|\dot{\beta}|^2 - (\beta \times \dot{\beta})^2\right) = 2\sigma_T c \gamma^2 \beta_\perp^2 \frac{B^2}{3\pi}, \text{ (relativistisch)}$$

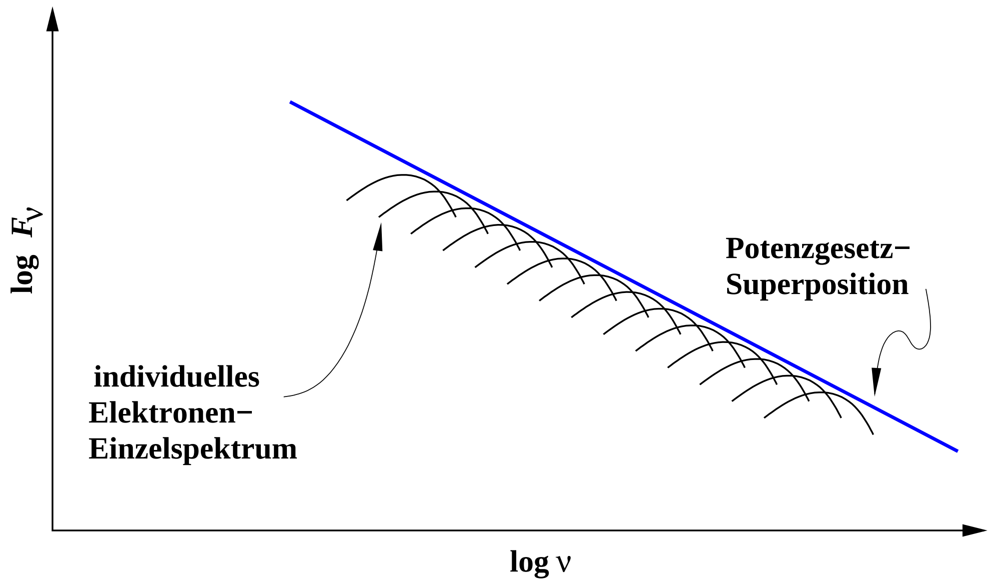
Kühlungszeit durch Synchrotron-Strahlung

$$t_{\mathrm{cool}} = \frac{\gamma m_e c^2}{P} \sim 6 \times 10^8 \left(\frac{B}{1\mathrm{G}}\right)^{-3/2} \left(\frac{\nu}{\mathrm{MHz}}\right)^{-1/2}$$

Zahlenwerte: B, ν_c, γ, t_{cool}, t_{dyn}:
10^{-5}G, 10^9Hz, 10^4, 10^7yr, 10^8yr, Ausgedehnte Radioquelle
10^{-3}G, 10^9Hz, 10^3, 10^4yr, 10^4yr, Radiojet
10^3G, 10^{16}Hz, $10^{3.5}$, 10^8yr, 1yr, Innere Scheibe
Polarisation der Synchrotronstrahlung:
→ Linear polarisiert bis zu ∼70%
(Vgl. mit Zyklotronstrahlung, und zirkularer Polarisation)

Synchrotron-Strahlung – Potenzgesetz

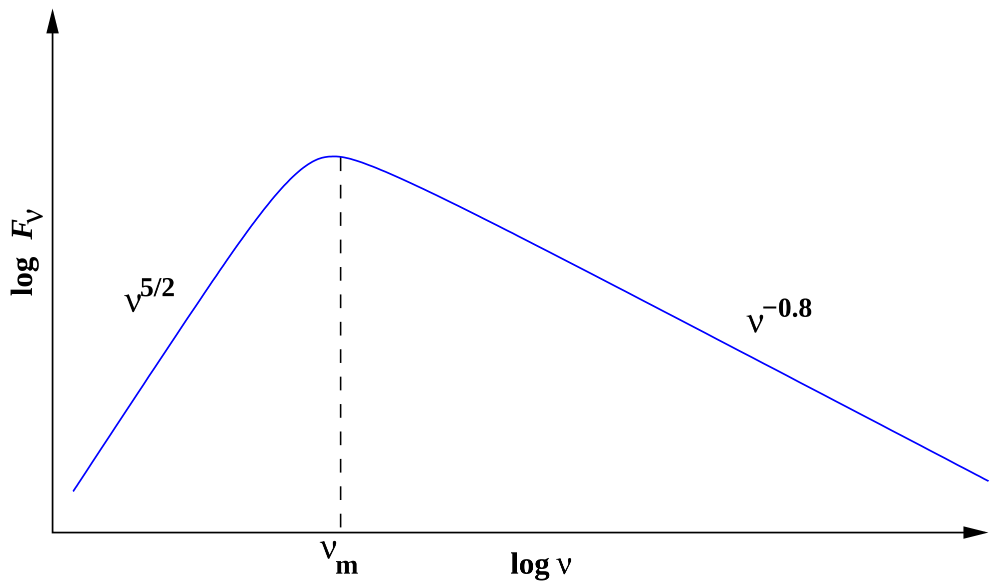
Spektrum einer Elektronenverteilung
Nicht-thermische Synchrotron-Strahlung:
Potenzgesetz für Elektronen-Energieverteilung $N_\gamma = K\gamma^{-s}$
Gültig für begrenzte Energieskala: "cutoff" bei $\gamma_{\rm min}$, $\gamma_{\rm max}$
Maximale Emission des einzelnen Elektrons bei $\nu_c \sim \gamma^2 \nu_G$
$P_\nu \sim P\phi_\nu$; $\phi_\nu(\gamma) = \delta(\nu - \nu_c)$
Integration über alle Elektronen → totales Spektrum:
Spekt. Emissivität/Volumen: $j_\nu \sim \int N_\gamma P_\nu \mathrm{d}\gamma$
→ Strahlungsleistung: $P_\nu \sim KB^{1+\alpha}\nu^{-\alpha}$
Potenzgesetz-Elektronenverteilung → Potenzgesetz-Spektrum:
→ Spektralindex $\alpha = (s-1)/2$



Beispiele:
Ausgedehnte Radioquellen $\alpha \simeq 0.7$, $s \simeq 2.4$
Radiojets $\alpha \simeq 0.5$

Synchrotron-Strahlung – Selbstabsorption

Synchrotron-Selbstabsorption:
Im Falle kompakter Radioquellen:
→ Emittierendes Medium kann abgestrahlte Strahlung wieder selbst absorbieren
→ Strahlungsflußdichte $S_\nu = \int (j_\nu / 4\pi D^2) \mathrm{d}V$
Intensität: erhalten entlang Lichtstrahl: $S_\nu = \int I_\nu \mathrm{d}\Omega$
→ Optisch dick: Intensität → Quellfunktion: $I_\nu = j_\nu / 4\pi\rho\kappa_\nu$
→ Strahlungsfeld in der Quelle anisotrop → "break frequency" ν_b:
→ Quelle optisch dick (dünn) für $\nu \ll \nu_b$ ($\nu \gg \nu_b$)
Definition: "Brightness temperature" $T_B \equiv (c^2 I_\nu / 2k_B\nu^2) \simeq$ Schwarzkörper mit Intensität I_ν im Rayleigh-Jeans-Teil des Planck-Spektrums
Thermodynamisch gilt $T_B(\nu) < \frac{\gamma m_e c^2}{3k_B} \simeq 10^9 \left(\frac{\nu}{\mathrm{MHz}}\right)^{1/2} \left(\frac{B}{\mathrm{G}}\right)^{-1/2}$ K
Strahlungsfluß im Falle von Selbstabsorption: $S_\nu \sim T_B \nu^{2.5}$
(kann nicht durch homogene Quelle erklärt werden)



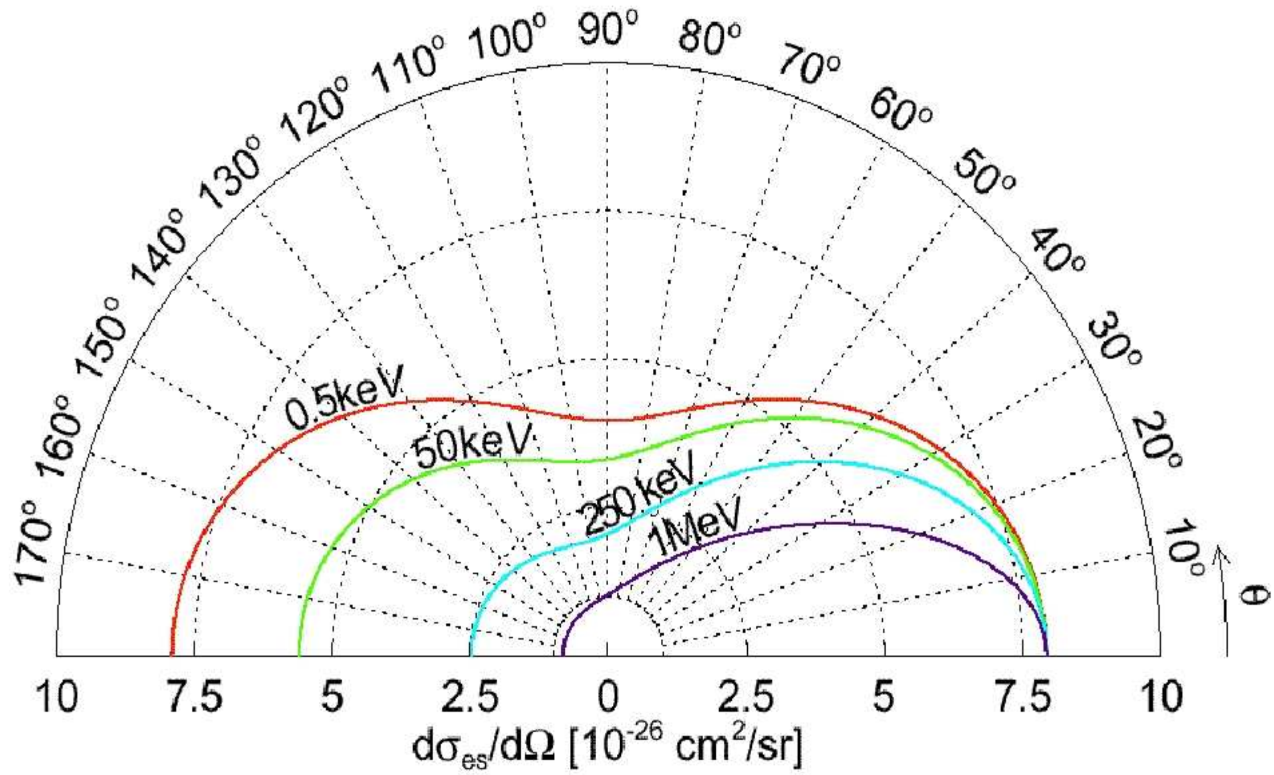
→ Erklärt beobachteten "cutoff" im FIR bei radioleisen Quasaren
zum Vergleich: Radio-Bögen ("radio lobes") sind optisch dünn

Compton-Streuung – Thomson-Streuung

Thomson-Streuung (Wirkungsquerschnitt):
Niederenergetischer Bereich $\simeq$ Rayleigh-Streuung
Streuung von Photonen an Elektronen: Frequenzerhaltung
Beschleunigung des Elektrons durch Lichtwelle: $\mathbf{E} = (e\dot{\beta}_\perp / rc)$
Strahlungsleistung $P \sim |\mathbf{E}|^2$
Differentieller Wirkungsquerschnitt für Streuung der
Lichtwelle in $\mathbf{n}$-Richtung (polarisiert in $\mathbf{e}$-Richtung)
in $\mathbf{n}'$-Richtung (polarisiert in $\mathbf{e}'$-Richtung):

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = r_e^2(\mathbf{e}\cdot\mathbf{e}') = \frac{1}{2}r_e^2\left(1+(\mathbf{n}\cdot\mathbf{n}')^2\right)$$

Mittelung über $\mathbf{n}\cdot\mathbf{n}'$: Wirkungsquerschnitt $\sigma_T = 6.652\times10^{-25}\mathrm{cm}^2$
$\rightarrow$ Optische Tiefe: $\tau_T = \int \mathrm{d}s n_e \sigma_T$
Für $\tau_T \ll 1$: Streuwahrscheinlichkeit
Für $\tau_T \gg 1$: optisch dick, Entweichzeitskala $\sim c/\tau_T$



(Christian Fendt)

Compton-Streuung – Wirkungsquerschnitt

Compton-Streuung:
Wenn $h\nu$ vergleichbar mit $m_e c^2$: $\rightarrow$ Elektronen-Rückstoß
$\rightarrow$ Streuung mit $h\nu' \rightarrow h\nu$
$\rightarrow$ Compton-Streuformel:

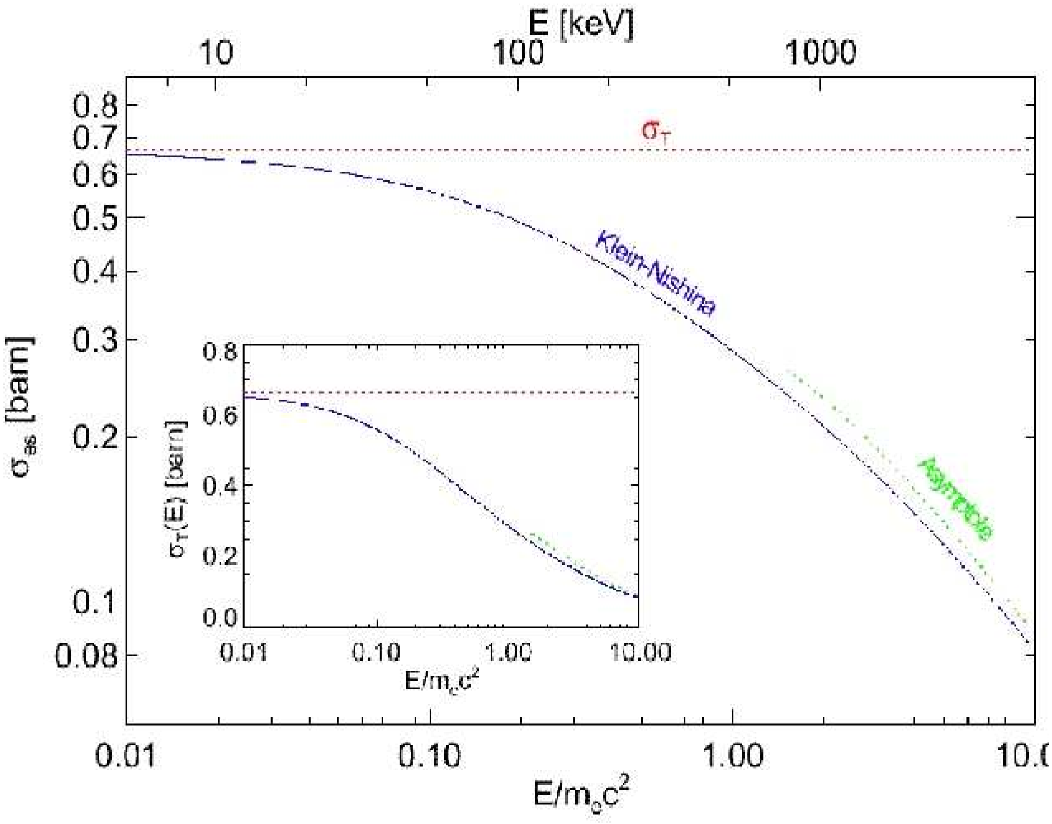
$$\nu = \frac{m_e c^2 \nu'}{m_e c^2 + h\nu'(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}')}$$

(Streuung unter Energie- und Impulserhaltung)
Frequenzverschiebung:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{h\nu}{m_e c^2}(1 - \cos\theta), \quad \left\langle \frac{\Delta\nu}{\nu} \right\rangle \simeq -\frac{h\nu}{m_e c^2}, \quad (h\nu \ll m_e c^2)$$

Wirkungsquerschnitt durch $\Delta\nu$ verkleinert: Klein-Nishina

$$\begin{aligned} \sigma &\simeq \left(1 - \frac{2h\nu}{m_e c^2}\right), \quad h\nu \ll m_e c^2 \\ \sigma &\simeq \frac{3}{8}\sigma_T \frac{m_e c^2}{h\nu}\left(\ln\left(\frac{2h\nu}{m_e c^2}\right) + \frac{1}{2}\right), \quad h\nu \gg m_e c^2 \end{aligned}$$



(Christian Fendt)

Compton-Streuung – Comptonisierung

Energetisches Gleichgewicht von Elektronen und Photonen

(1) Heizung der Elektronen durch Photonen:
Mittlere Heizrate der Elektronen (U_ν: Strahlungsenergiedichte)

$$W_+ = n_e \sigma_T c \int \mathrm{d}\nu U_\nu \frac{h\nu}{m_e c^2}, \quad h\nu \ll m_e c^2$$

(2) Energieübertrag an Photonen:
mittlere Frequenzverschiebung $\langle \Delta\nu/\nu \rangle = x k_B T / m_e c^2 \rightarrow$ Kühlrate der Elektronen:

$$W_- = n_e \sigma_T c \int \mathrm{d}\nu U_\nu \frac{x k_B T}{m_e c^2}, \quad x = 4$$

In AGN: $U_\nu \gg U_e \rightarrow$ Temperatur durch U_ν bestimmt

$$T_C = \frac{h \langle \nu \rangle}{4 k_B}, \quad \langle \nu \rangle \equiv \frac{\int \mathrm{d}\nu \nu U_\nu}{\int \mathrm{d}\nu U_\nu},$$

Zeitskala für Comptonisierung: $t_C \sim (m_e c^2 / \sigma_T U)$

Beispiel: Gas um "broad line region" in Seyfert-Galaxien
Röntgen-Spektrum folgt Potenzgesetz
$\rightarrow \langle v \rangle \sim (\alpha - 1)/(2 - \alpha)(\nu_{\min}/\nu_{\max})^{\alpha-1} \nu_{\max}$
($\alpha \simeq 0.7$, $\nu_{\max} = 100\mathrm{keV}$, $\nu_{\min} = 1\mathrm{keV}$)
$\rightarrow T_C = 7 \times 10^7 \mathrm{K}$
Aus Temperatur $\rightarrow$ Druckabschätzung $\rightarrow$ Druck des Gases innerhalb der BLR zu klein um die Wolken halten zu können

Compton-Streuung – Kompaneetsgleichung

Energetisches Gleichgewicht von Elektronen und Photonen
→ Detailierte Beschreibung durch Kompaneets-Gleichung
→ Energieverluste/-gewinne der Photonen in kleinen Schritten
→ Beschreibung durch Zustandsgleichung für die Frequenz
"Besetzungszahl" n als mittlere # Photonen pro Volumen und Polarisation
$n \sim 4\pi\nu^2 \mathrm{d}\nu \mathrm{d}V/c^3$

Thermisches GG: Planck-Verteilung: $n = (\exp(h\nu/k_B T) - 1)^{-1}$

Entwicklung des Zustandes: Kompaneets-Gleichung:

$$\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{1}{x^2}\frac{\partial}{\partial x} x^4 \left(n + n^2 + \frac{\partial n}{\partial x} \right) \qquad \text{(Kompaneets 1957)}$$

$x \equiv (h\nu/k_B T)$: Energie der Photonen
$y \equiv (4k_B T/m_e c^2)\sigma_T (N_e c t)$: Comptonisierungs-Parameter
Interpretation:
$(\partial n/\partial x)$: Doppler-Verschiebung
n: "recoil"-Effekt, Rückstoß durch Elektron
n^2: Induzierte/stimulierte Emission

Lösungsbeispiel: ohne recoil und induzierte Streuung:
→ stationäres Spektrum einer monoenergetischen Photonenquelle mit $\nu = \nu_0$
→ Potenzgesetz für $n(\nu) \sim \nu^{-(3+\alpha)}$; $\nu_0 < \nu < \nu_{\mathrm{rec}}$ mit exponentiellem "cutoff" bei $\nu_{\mathrm{rec}} = (3+\alpha) k_B T/h$
Spektralindex aus $(\alpha + 3)\alpha = 4/y$
Beispiel: Seyfert-Galaxien: Röntgen-Spektralindex $\alpha = 0.7 \rightarrow y = 1.5$

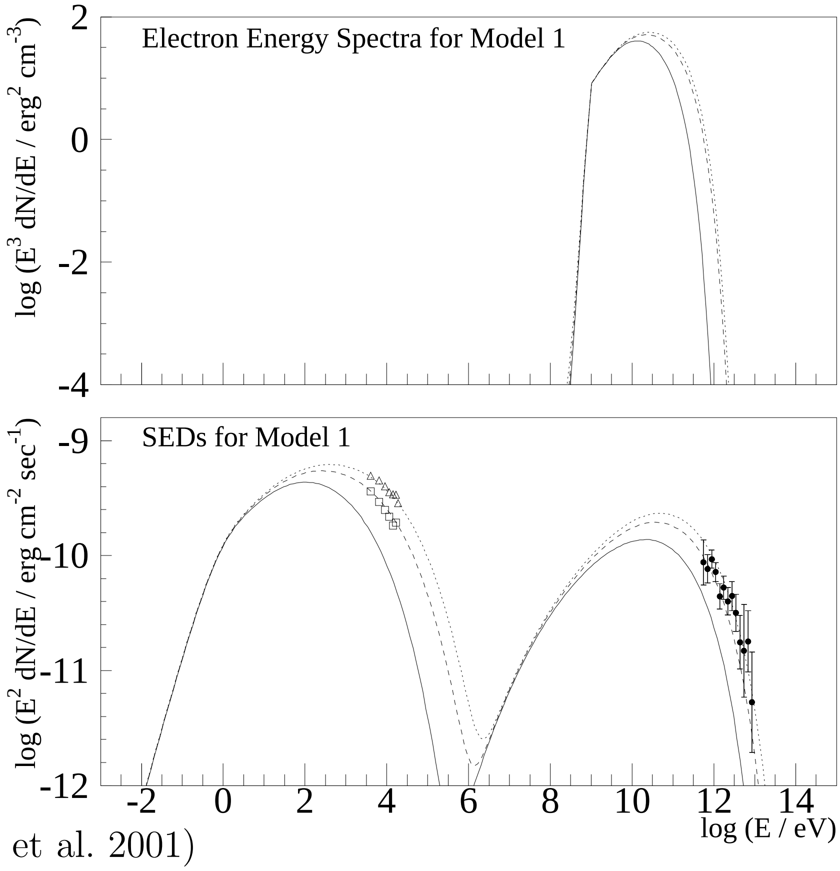
Compton-Streuung – Inverse C-S, SSC

Inverse Compton-Streuung:
Compton-Streuung an relativistischen Elektronen
$\rightarrow P = (4/3)\gamma^2 \sigma_T c U_{\mathrm{rad}}$
(U_{rad}: Strahlungsenergiedichte; $\gamma \gg 1$)
Mittlere gestreute Photonenfrequenz: $\langle\nu\rangle = (4/3)\gamma^2\nu'$
(γ^2: zweimal relativistische Dopplerverschiebung: Transformation der Streuprozesse zwischen Photonen und Elektronen-Bezugssystem)

Synchrotron-selbst Compton Strahlung:
Kompakte Radioquelle $\rightarrow$ Synchrotron-Strahlung wird an relativistischen Elektronen invers Compton-gestreut
Gestreuter Strahlungsfluß aus Integration über Synchrotron- Spektrum und Elektronenverteilung mit δ-Funktion

$$S_c(\nu) = \int \mathrm{d}\nu' \nu'^{-\alpha} \int \mathrm{d}\gamma \gamma^{-s} \delta(\nu - 4\gamma^2\nu'/3) \sim \int \mathrm{d}\nu' \nu'^{-\alpha-1}$$

Spektralindex bleibt ungefähr erhalten, $(\alpha) = (s-1)/2)$



(Krawczynski et al. 2001)