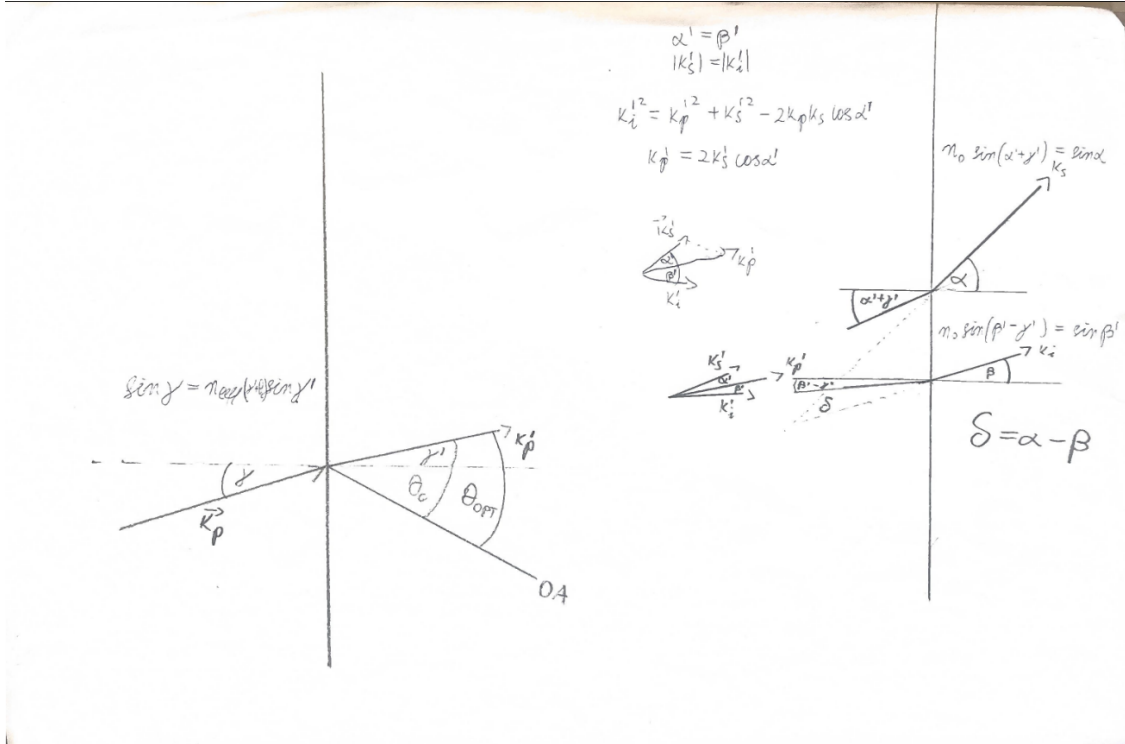


angles2

October 19, 2025



Zmienne nieprimowane są na zewnątrz kryształu ($n = 1$), a primowane wewnątrz

$$f_{in} = f_{out} \Rightarrow \frac{v_{in}}{\lambda_{in}} = \frac{c}{\lambda_{out}} \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{in}} = \frac{c}{v_{in}} \frac{1}{\lambda_{out}} = n \frac{1}{\lambda_{out}}$$

$\lambda_s = \lambda_i$ Po wyjściu z kryształu foton jałowy i sygnałowy mają mieć tę samą długość fali

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \quad \text{Zasada zachowania energii na zewnątrz kryształu}$$

Z powyższych: $\lambda_s = \lambda_i = 2\lambda_p$, a skoro jałowy i sygnałowy są promieniami zwyczajnymi, to $\lambda'_s = \lambda'_i$, więc $k'_i = k'_s$ oraz $\alpha' = \beta'$

$$\vec{k}'_p = \vec{k}'_s + \vec{k}'_i \quad \text{Dopasowanie fazowe w kryształach}$$

$$k'_p = 2k'_s \cos \alpha' \quad \text{Tw. cosinusów}$$

$$\frac{n_{e,eff}(\lambda_p, \gamma' + \theta_c)}{\lambda_p} = 2 \frac{n_o}{\lambda_s} \cos \alpha' \quad (*)$$

$$\sin \gamma = n_{e,eff}(\lambda_p, \gamma' + \theta_c) \sin(\gamma') \quad \text{Prawo Snelliusa} \quad (**)$$

Kąt między fotonem jałowym, a normalną do powierzchni kryształu wynosi $\beta' - \gamma'$, będzie on ujemny gdy foton jałowy będzie miał kierunek do góry, a nie do dołu.

Z prawa Snelliusa,

$$\sin(\alpha' + \gamma') n_o(\lambda_s) = \sin(\alpha) \quad (\dagger)$$

$$\sin(\beta' - \gamma') n_o(\lambda_i) = \sin(\beta) \quad (\ddagger)$$

SNLO podaje że optymalny kąt między osią optyczną, a promieniem pompującym to $\theta_{OPT} = \theta(\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i) = 31.7^\circ$,

skoro oś optyczna kryształu z jego normalną do powierzchni tworzy kąt θ_C , to optymalny kąt między normalną, a promieniem pompującym wynosi

$$\gamma'_{OPT} = \theta_{OPT} - \theta_C$$

Więc optymalny kąt padania promienia pompującego na kryształ wynosi (z **)

$$\gamma_{OPT} = \arcsin(n_{e,eff}(\lambda_p, \gamma'_{OPT} + \theta_c) \sin(\gamma'_{OPT}))$$

```
[1]: import numpy as np
from numpy import *
import matplotlib.pyplot as plt

plt.rcParams["figure.figsize"] = (12, 8)
from engineering_notation import *
from BBO import *
from scipy.optimize import fsolve
import warnings

warnings.filterwarnings("ignore", message="The iteration is not making good_
↳progress")
# warnings.filterwarnings("error")

[22]: # THETA_OPT jest wynikiem SNLO
lp, THETA_C, THETA_OPT = 0.370, np.radians(29.2), radians(31.7) # Nasze
# lp, THETA_C, THETA_OPT = 0.3511, np.radians(49.63), radians(32.9) # Kwiat et_
↳al.,
# ale u nich przechylenie płaszczyzny o 0.72 Deg
# lp, THETA_C, THETA_OPT = 0.4579, np.radians(26.13), radians(25.7) # Galvez_
↳et al.
# lp, THETA_C, THETA_OPT = 0.49, np.radians(28), radians(0) # Zadanie

ls = 2 * lp
li = ls
```

```

# Uzależnić układ równań od gamma
def calculate(vars, gamma):
    # z *, **, dag, ddag:
    global li, ls, lp, THETA_C
    alpha, beta, alphaP, gammaP = vars
    betaP = alphaP
    return (
        sin(gamma) - neeff(lp, gammaP + THETA_C) * sin(gammaP),
        neeff(lp, gammaP + THETA_C) / lp - 2 * no(ls) / ls * cos(alphaP),
        sin(alphaP + gammaP) * no(ls) - sin(alpha),
        sin(betaP - gammaP) * no(li) - sin(beta),
    )

gs = np.linspace(-np.pi / 12, np.pi / 12, num=4000)
all = []
for g in gs:
    all.append(fsolve(calculate, (0, 0, 0, 0), g))

all = np.array(all)
plt.plot(degrees(gs), degrees(all[:, 0]), label="Kąt wyjściowy  $\alpha$ ")
plt.plot(degrees(gs), degrees(all[:, 1]), label="Kąt wyjściowy  $\beta$ ")
plt.plot(
    degrees(gs),
    abs(degrees(all[:, 0]) - degrees(all[:, 1])),
    label=" $\Delta = |\alpha - \beta|$ ",
)
# Jakie gamma, by theta było jak z SNLO?
GAMMA_OPT = arcsin(neeff(lp, THETA_OPT) * sin(THETA_OPT - THETA_C))
plt.plot(
    [degrees(GAMMA_OPT), degrees(GAMMA_OPT)],
    [-100, 100],
    "r--",
    label="SNLO  $\gamma_{\text{OPT}} = 0.2f^\circ$  % round(degrees(GAMMA_OPT), 2),
)
plt.plot([-15, 15], [0, 0], "k--")
plt.legend()
plt.xlim(0, 15)
plt.ylim(-6, 12)
plt.xlabel("Kąt padania wiązki pompującej na kryształ  $\gamma [^\circ]$ ")
plt.ylabel(" $[^\circ]$ ")
plt.title(
    "Zależność kątów między wychodzącymi wiązkami, a normalną do powierzchni  

    ↪ kryształu od kąta padania wiązki pompującej\n proces SDPC I⊥  

    ↪  $\lambda_s = 2\lambda_p = 0.2f\mu\text{m}$ ,  $\theta_C = 0.2f^\circ$ "
)

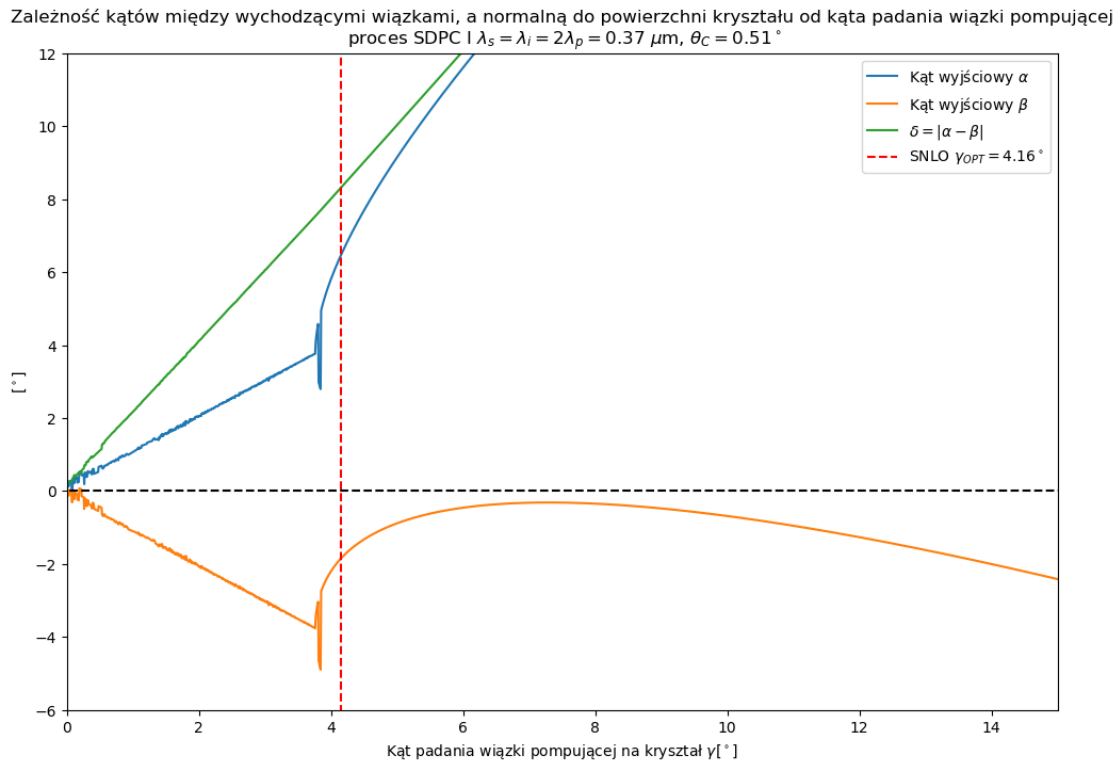
```

```

% (lp, THETA_C)
)

```

[22]: Text(0.5, 1.0, 'Zależność kątów między wychodzącymi wiązkami, a normalną do powierzchni kryształu od kąta padania wiązki pompującej\n proces SDPC I $\lambda_s = \lambda_l = 2\lambda_p = 0.37 \mu\text{m}$, $\theta_C = 0.51^\circ$ ')



```

[3]: # możeby obliczyć THETA_OPT samodzielnie?
def getOptimalTheta(lp, ls):
    return arcsin(
        sqrt((no(ls) ** -2 - no(lp) ** -2) / (ne(lp) ** -2 - no(lp) ** -2))
    ) # eq 2.7.11 Boyd "Nonlinear optics"

L = np.array(np.linspace(0.280, 0.500))
plt.title(
    "Optimal Pump-OA angle in BBO vs. pump wavelength, when_
    ↪  $\lambda_s = \lambda_l = 2\lambda_p$ "
)
plt.ylabel(" $\theta_{OPT} [^\circ]$ ")
plt.xlabel(" $\lambda_{pump} [nm]$ ")
plt.plot(

```

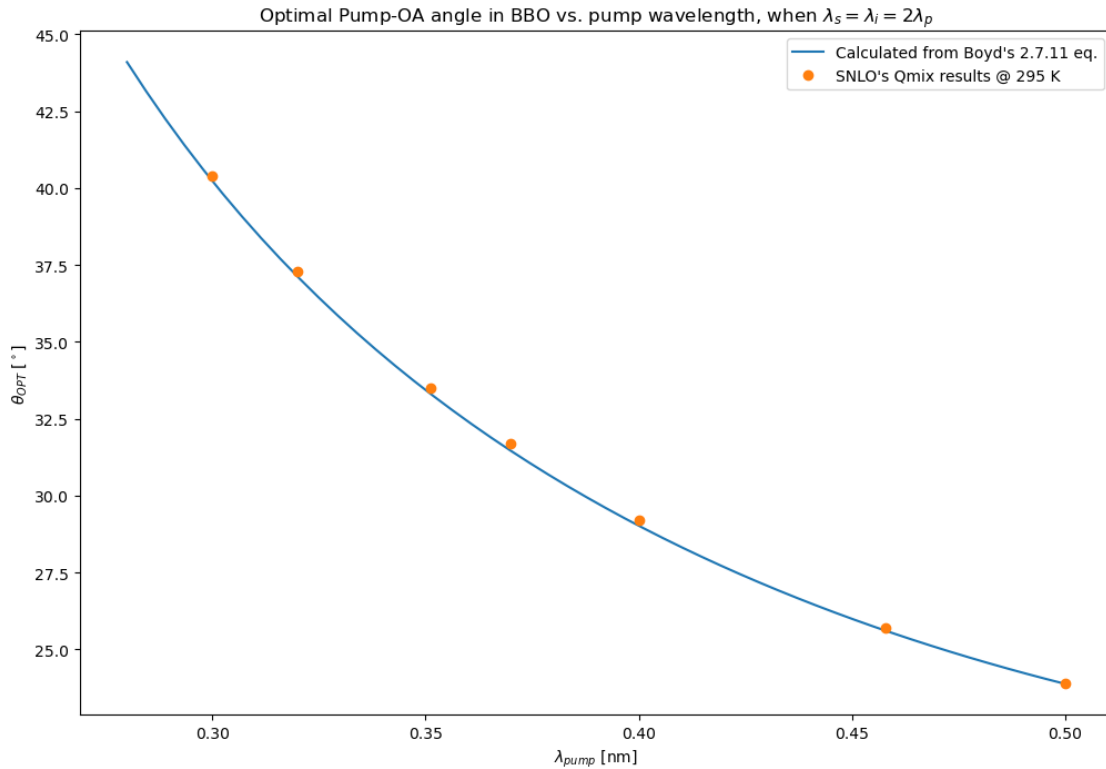
```

L,
[degrees(getOptimalTheta(1, 2 * 1)) for 1 in L],
label="Calculated from Boyd's 2.7.11 eq.",
)
plt.plot(
[0.300, 0.320, 0.3511, 0.370, 0.400, 0.4579, 0.5],
[40.4, 37.3, 33.5, 31.7, 29.2, 25.7, 23.9],
"o",
label="SNLO's Qmix results @ 295 K",
)

plt.legend()

```

[3]: <matplotlib.legend.Legend at 0x7196a2253c70>



0.1 Tolerancja kątowa

Tolerancja kątowa θ_{tol} , zależy od **grubości** kryształu L :

$$\theta_{tol} = \frac{0.31 \text{ mrad cm}}{L}$$

Dla kryształu o grubości 0.1 cm, jest to:

```
[89]: degrees(0.31e-3) / (0.1e-2)
```

```
[89]: 17.76169164905552
```

0.2 Wyniki z SNLO - nieistotne, brudnopis

“ 740.0(o)+ 740.0(o)= 370.0(e) Walkoff [mrad] = 0.00 0.00 71.86 Phase velocities = c/ 1.662 1.662 1.662 Group velocities = c/ 1.689 1.689 1.760 GrpDelDisp(fs²/mm) = 85.0 85.0 218.6 At theta = 31.7 deg. Deff = 1.98E0 pm/V S_o × L² = 2.15E7 Watt Crystal ang. tol.×L = 0.31 mrad°cm Temperature range×L = 18.04 K°cm Mix accept ang×L = 0.62 0.62 mrad°cm Mix accept bw×L = 425.23 425.23 GHz°cm

740.0(e)+ 740.0(o)= 370.0(e)

Walkoff [mrad] = 71.73 0.00 77.29 Phase velocities = c/ 1.599 1.662 1.631 Group velocities = c/ 1.621 1.689 1.720 GrpDelDisp(fs²/mm) = 73.4 85.0 200.0 At theta = 46.1 deg. Deff = 9.63E-1 pm/V S_o × L² = 8.60E7 Watt Crystal ang. tol.×L = 0.54 mrad°cm Temperature range×L = 15.29 K°cm Mix accept ang×L = 8.31 0.58 mrad°cm Mix accept bw×L = 301.59 966.97 GHz°cm“

1 Poniżej inne metody rozwiązywania

```
[54]: def ap(gp):
    return arccos(neeff(lp, THETA_C + gp) * ls / (2 * no(ls) * lp))

gps = np.linspace(-np.pi, np.pi, num=80000)

aps = []
tmpgps = []
for gp in gps:
    try:
        tmp1 = ap(gp)
    except Exception:
        pass
    else:
        aps.append(tmp1)
        tmpgps.append(gp)

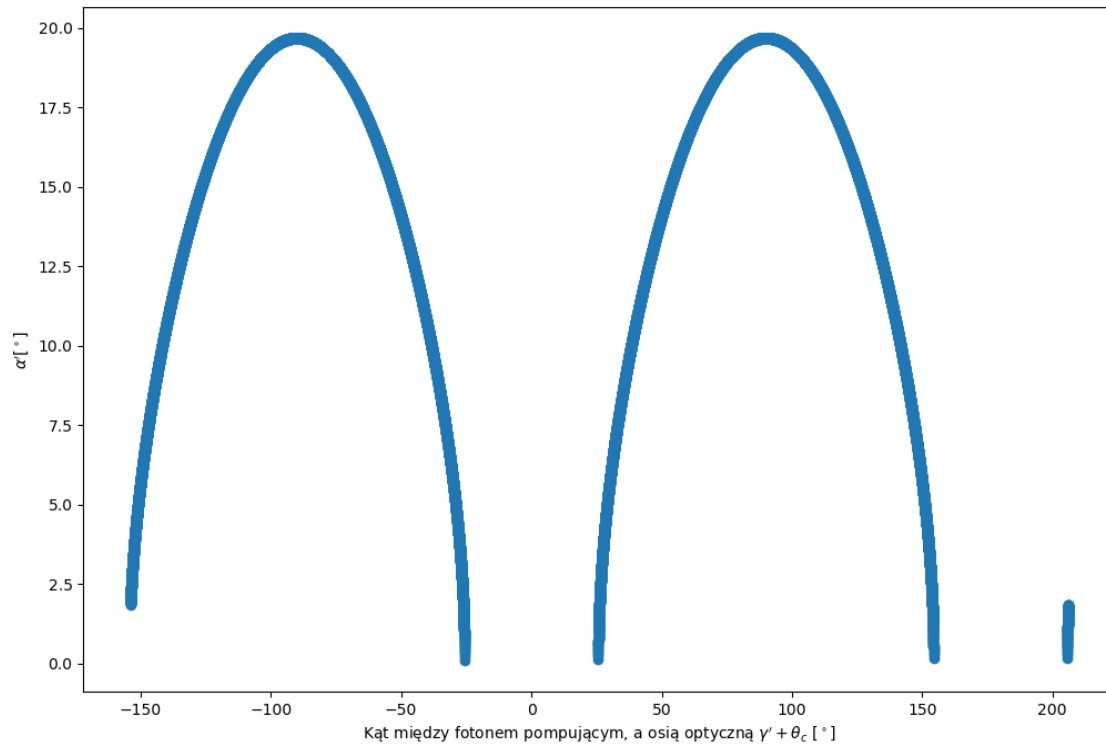
gps = np.array(tmpgps)
bps = aps
plt.scatter(np.degrees(gps + THETA_C), np.degrees(aps),
    ↪label="$\\alpha^\\prime$")
plt.xlabel(
    "Kąt między fotonem pompującym, a osią optyczną
    ↪$\\gamma^\\prime+\\theta_c[\\circ]$"
)
plt.ylabel("$\\alpha^\\prime[\\circ]$")
```

```
# plt.legend()
```

```
/tmp/ipykernel_4856/478489733.py:2: RuntimeWarning: invalid value encountered in arccos
```

```
    return arccos(neeff(lp, THETA_C + gp) * ls / (2 * no(ls) * lp))
```

```
[54]: Text(0, 0.5, '$\\alpha^{\\prime}[^\\circ]$')
```



```
[55]: gs = []
      gps2 = []
      aps = []
      for gp in gps:
          try:
              tmp1 = arcsin(neeff(lp, gp + THETA_C) * np.sin(gp))
              tmp2 = ap(gp)
          except RuntimeError:
              pass
          else:
              gs.append(tmp1)
              aps.append(tmp2)
              gps2.append(gp)

      gs, gps2, aps = np.array(gs), np.array(gps2), np.array(aps)
```

```

plt.xlim(0, 80)
plt.ylim(0, 30)

plt.scatter(np.degrees(gs), np.degrees(aps), marker=1,
            ↪label="$\\alpha^{\\prime}$")
plt.scatter(np.degrees(gs), np.degrees(gps2), marker=1,
            ↪label="$\\gamma^{\\prime}$")

plt.xlabel("$\\gamma^{\\circ}$")
plt.ylabel("$^{\\circ}$")
plt.legend()

```

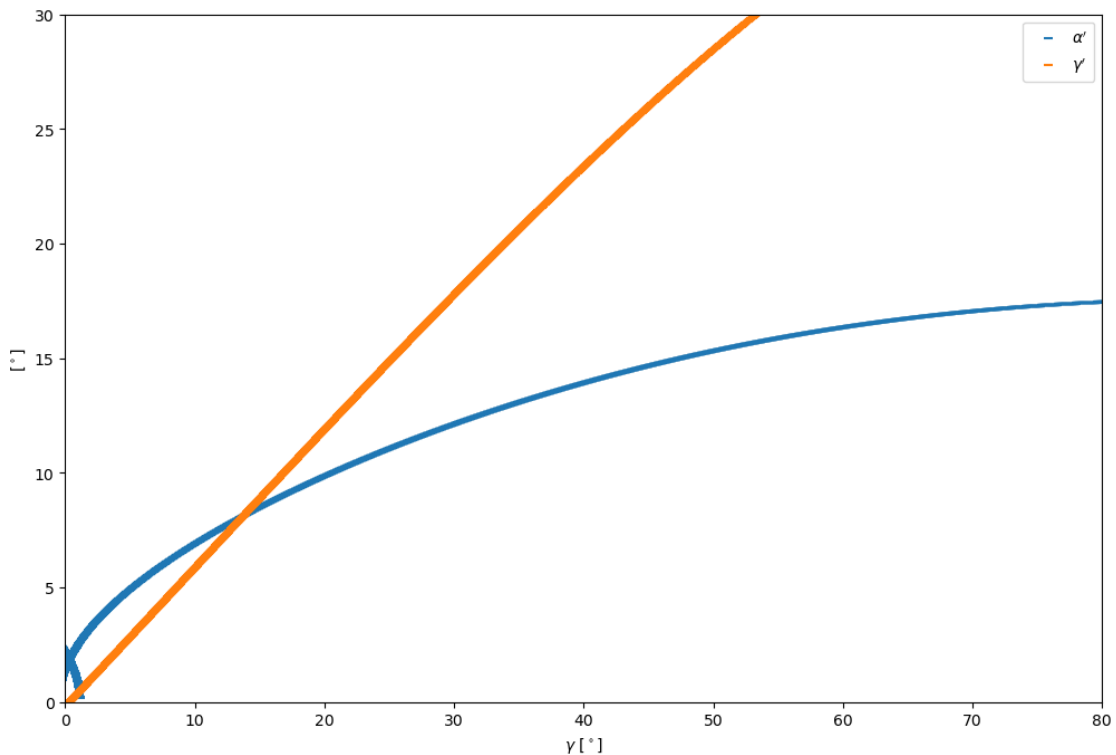
/tmp/ipykernel_4856/2179524880.py:6: RuntimeWarning: invalid value encountered in arcsin

```
tmp1 = arcsin(neeff(lp, gp + THETA_C) * np.sin(gp))
```

/tmp/ipykernel_4856/478489733.py:2: RuntimeWarning: invalid value encountered in arccos

```
return arccos(neeff(lp, THETA_C + gp) * ls / (2 * no(ls) * lp))
```

[55]: <matplotlib.legend.Legend at 0x7e74e04602e0>

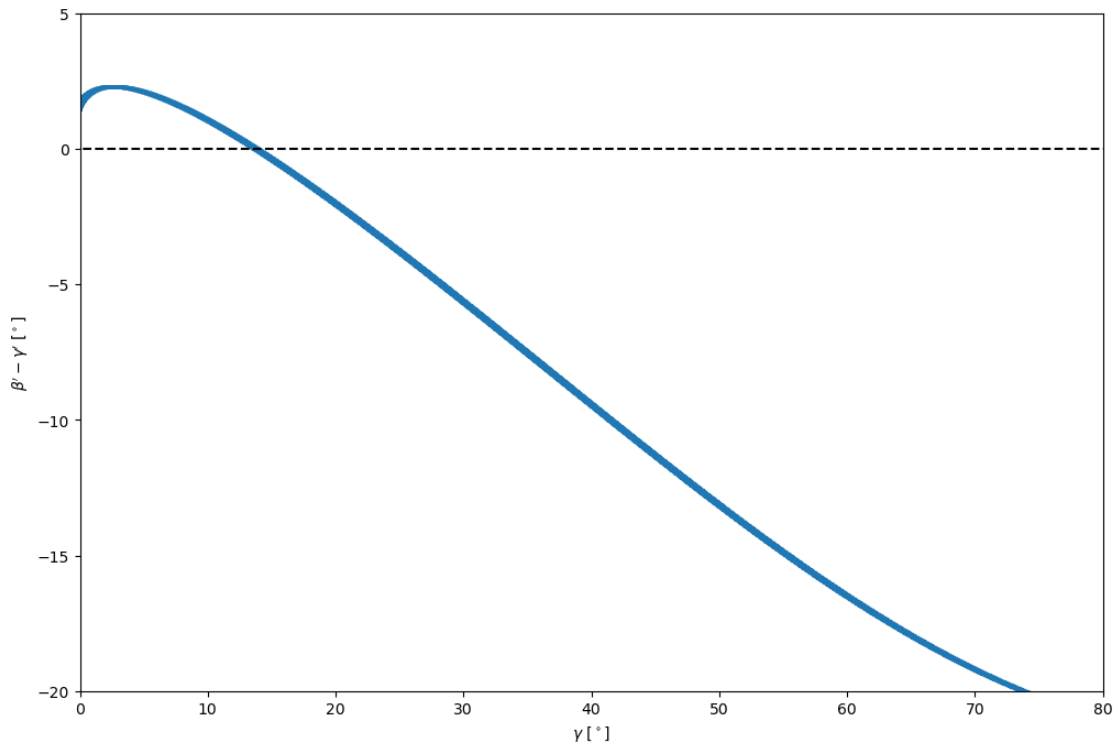


```
[56]: plt.xlim(0, 80)
plt.ylim(-20, 5)
plt.plot([-180, 180], [0, 0], "k--")

plt.scatter(np.degrees(gs), np.degrees(aps) - np.degrees(gps2), marker=1)

plt.xlabel("$\\gamma^{\\circ}$")
plt.ylabel("$\\beta^{\\prime}-\\gamma^{\\prime}\\circ$")
```

```
[56]: Text(0, 0.5, '$\\beta^{\\prime}-\\gamma^{\\prime}\\circ$')
```



```
[57]: plt.scatter(
    np.degrees(gs),
    np.degrees(arcsin(np.sin(gps2 - aps) * no(ls))),
    label="$\\beta$",
    marker=1,
)
plt.scatter(
    np.degrees(gs),
    np.degrees(arcsin(np.sin(aps + gps2)) * no(li)),
    label="$\\alpha$",
    marker=1,
)
```

```
plt.xlim(-6, 5)
plt.ylim(-10, 10)

plt.xlabel("$\\gamma~[^\\circ]$")
plt.ylabel("$[^\\circ]$")
plt.legend()
```

/tmp/ipykernel_4856/2573486240.py:3: RuntimeWarning: invalid value encountered
in arcsin

```
np.degrees(arcsin(np.sin(gps2 - aps) * no(ls))),
```

[57]: <matplotlib.legend.Legend at 0x7e74e0408d00>

