「多体系量子論と天体」研究会報告

シンクロトロンふく射の負自己吸収

立大理　会津　晃

§1　はしがき　パルサーの電波は，何らかのコヒーレントなふく射機構で出されていることはたしかであるが，具体的にはいろいろの可能性がある。現在はそれらを一つ一つ検討する段階であると思われる。電子のバンチングを利用するものや，プラズマ中のいろいろの波を利用するものがあるが[1]，ここではシンクロトロンふく射における負自己吸収をしらべる。シンクロトロンをおこす高速電子の角分布が等方のとき，負吸収がおきないことはよくしられている[2]。又冷いプラズマが共存する場合，それによる負吸収が条件次第でおこることが指摘され，天体現象に応用されている[3,4]。冷いプラズマがなくとも，高速電子の角分布が異方性を持てば，負吸収のおこる可能性のあることがKai および Takakura[5]によつて指摘された。ここではそれを一層くわしく調べて，少くとも電子が一様磁場と直角方向に山をもち，その山の巾 σ が，高速電子1個からのふく射の巾 W^{-1} （ $W=\varepsilon/m_e C^2$ ，ε は電子のエネルギー）より広い場合は，負吸収が不可能なことを示す。＊逆の場合 $\sigma<W^{-1}$ のときは，まだよくしらべていないが，Takakura によつて指摘されたように負吸収は可能であると思われる。

§2　（負）吸収のある異方性媒質中の電波。負吸収（波の増巾）がおこるかどうかを巨視的な立場から一般的に論ずるために，一般の誘電テンソルをもつMaxwell 方程式を論ずる。平面波の電波がZ軸の＋方向に進むとし，Z軸に垂直な面内での誘電テンソルを $\varepsilon_{\alpha\beta}$ （ $\alpha, \beta=x, y$ ）とする。多くの天体は，固体に比べて密度が小さく，波長に比べてスケールの大きいところで考えるので，

$$\varepsilon_{\alpha\beta}=\delta_{\alpha\beta}+\tilde{\varepsilon}_{\alpha\beta}, \quad |\tilde{\varepsilon}_{\alpha\beta}|\ll 1 \tag{1}$$

＊　研究会のとき，これが可能であるとしたのは，誤りであつたので，ここに訂正する。

のごときを考えれば十分である。さらに$\tilde{\varepsilon}_{\alpha\beta}$をエルミート部分と反エルミート部分に分けて

$$\frac{\omega}{c}\tilde{\varepsilon}_{\alpha\beta}=\begin{pmatrix} h & q+if \\ q-if & -h \end{pmatrix}+i\begin{pmatrix} \mu+\lambda & i\rho \\ -i\rho & \mu-\lambda \end{pmatrix} \tag{2}$$

とかく．ωは電波の角振動数．(2)の形は，$\tilde{\varepsilon}_{\alpha\beta}$として，最も一般的ではないが，シンクロトロンふく射を論ずるには，これで十分である。電波の波数をRとすれば，Maxwell 方程式では

$$\{-k^2\delta_{\alpha\beta}+\varepsilon_{\alpha\beta}(\omega/c)^2\}E_\beta=0 \tag{3}$$

とかかれ，複素屈折率を$n+iK$とおけば，$R=(\omega/c)(n+i\kappa)$である。この媒質中では，二つのモードがあり，上添字（±）で区別すると

$$\begin{aligned}(n^{(\pm)})^2-(\kappa^{(\pm)})^2&=1\mp(\omega/c)\lambda_2\\ n^{(\pm)}\kappa^{(\pm)}&=(c/\omega)(\mu\pm\lambda_1),\end{aligned} \tag{4}$$

ここにλ_1，λ_2は，

$$\begin{aligned}\lambda_1{}^2-\lambda_2{}^2&=\lambda^2+\rho^2-f^2-h^2-q^2\\ \lambda_1\lambda_2&=-(f\rho+\lambda h)\end{aligned} \tag{5}$$

をみたし，$\lambda_1>0$の条件の下にきめられる。負吸収のおこるための条件は(4)式から

$$\lambda_1-\mu>0 \tag{6}$$

である。(1)の近似では(4)式は

$$n^{(\pm)}=1\mp(c\lambda_2/2\omega),\ \kappa^{(\pm)}=(c/\omega)(\mu\pm\lambda_1) \tag{4'}$$

となる。

§3 シンクロトロンふく射

一般のエネルギーおよび角分布をもつ高速電子によるシンクロトロンふく射

の場合，誘電率テンソルのパラメータf，・・・ρはkawabata6)，Sazonov & Tsytovich7)，Sazonov8)によつて計算され，Sazonov9)にまとめられている。Ref. 7，8，9)は，電子のエネルギーεが相対論的で$W=\varepsilon/m_e c^2 \gg 1$で，角分布の巾$\sigma$が，1個の電子からのふく射ビームの巾$W^{-1}$より広い：

$$\sigma > W^{-1} \tag{7}$$

の場合を主に取扱つている。われわれは同じ条件の下で，電子のエネルギー分布，角分布$F(W,\theta)$がつぎのような場合を考える

$$F(W,\theta)=G(W)H(\theta)$$

$G(W)$としてはベキ型をとり

$$\begin{aligned} G(W) &= n(\gamma-1)W_1{}^{\gamma-1}/W^{\gamma-2} & W>W_1 \\ &= 0 & W<W_1 \end{aligned} \tag{8}$$

とおく，$n=\int G(W)W^2\,dW$は電子の数密度である。$H(\theta)$としては，磁場と垂直な方向$\theta=\pi/2$に山をもつ分布函数，例えばGauss型

$$\begin{aligned} &H(\theta)=(2\pi\sigma^2)^{-1/2}\ \exp(-\varphi^2/2\sigma^2) \\ &\quad \varphi=\pi/2-\theta,\quad |\varphi|\ll 1 \end{aligned} \tag{9}$$

をとる。又観測される電波の振動数は

$$\omega/(\omega_H \sin\theta W_1{}^2) \gg 1 \tag{10}$$

をみたしているとする。ここにω_HはLarmanの角振動数$\omega_H=eH/(m_e c)$である。

このような条件の下で，誘電率のパラメータ(f，・・・・，ρ)を計算する。n，μ，λは角分布が等方の場合(例えばref.(8))に比べて，角分布の因子$H(\theta)$がわかるだけである。

あとのため，μとの比をつくると

$$n/\mu \sim b_n \qquad (\alpha>2) \tag{11}$$

で，b_nは$\alpha\sim2.5\sim5$による1の程度の数である。又

$$\lambda/\mu=\left(\gamma+\frac{10}{3}\right)/(\gamma+2)=b_\lambda \tag{12}$$

で，この比も1の程度の数である。

fはμとの比をとれば

$$f/\mu = b_f(\omega/(\omega_H W_1{}^2))^{\gamma/2}(\ln W_1/W_1)$$
$$\times\varphi\{2(\gamma+2)/(\gamma+3) \quad + \varphi\sigma^{-2}\}$$

こゝでb_fはγによるが～1の数，(10)の条件，$|\varphi| << 1$，$W_1 \gg 1$を考えれば，$|f/\mu| \ll 1$ である。つぎにρは

$$\rho/\mu = -b_\rho(\omega_H/\omega)^{1/2}\ \varphi(\gamma+2+\sigma+2) \tag{13}$$

であり，b_ρもγをふくむ1程度の数である。

さて負吸収をおこすための条件(6)は，

$q=0$，$|f/\mu| \ll 1$ のとき

$$\rho^2 > (\mu^2 - \lambda^2)(n^2+\mu^2)/\mu^2$$

となる。(11),(12)を考慮すれば，これは

$$|\rho/\mu| \gtrsim 1$$

となる。(13)で $\sigma \lesssim 0.1$　$\gamma \sim 2.5 \sim 5$ とすれば，

$$(\omega_H/\omega)^{1/2}|\varphi|/\sigma^2 \gtrsim 1 \tag{14}$$

がその条件となる。負吸収がおきるときの吸収係数は$\lambda_1 - \mu \approx |\varsigma|$であつて，角度について$|\varphi|\exp(-\varphi^2/2\sigma^2)$の依存性をもち，したがつて$|\varphi| \sim \sigma$で$|\rho| = \max.$になる。(14)の条件は

$$\omega_H/\omega \gtrsim \sigma^2$$

となる。一方(10)から$\theta \sim \pi/2$のとき$W_1{}^{-2} \gtrsim \omega_H/\omega$であり，したがつて$W_1{}^{-1} > \sigma$となる。これは(7)に反する。したがつて負吸収をおこす解はないことになる。

電子の角分布は同じく(9)のような形をしているが，エネルギー分布が(8)のようなベキ型でなく，δ函数型のとき，

$$G(W) = n W_1^{-2} \delta(W - W_1)$$

も，W_1 について(10)の条件があるかぎり負吸収はおこらないことが，同じようにして示される。又角分布が(9)式のように $\theta = \pi/2$ に山をもたず，それと離れたところ α（α は 0°に余り近くない）に(9)のような山（$\varphi = \alpha - \theta$）のときも負吸収はおこらないことが同じように示される。

References

1) See, for example, V. L. Ginzburg, V. V. Zheleznyakov and V. V. Zaitsev, Astrophys. & Space Science 4 (1969), 464.
2) J. P. Wild, S. F. Smerd and A. A. Weiss, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1 (1963), 291.
3) V. V. Zheleznyakov, J. Exptl. Theor. Phys. 51 (1966), 570; Astron. Zh. 44 (1967), 42.
4) R. McCray, Science 154 (1966), 1320.
5) K. Kai, Publ. Astron. Soc. Japan 17 (1965), 309; T. Takakura, Nature 224 (1969), 252: V. L. Ginzburg and S. I. Syrovatsky, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 7 (1969), 375, especially in footnote 8.
6) K. Kawabata, Publ. Jap. Astron. Soc. 16 (1964), 30.
7) V. N. Sazonov and V. N. Tsytovich, Radio fizika 11 (1968), 1287.
8) V. N. Sazonov. J. Exptl. Theor. phys. 56 (1969), 1075.
9) V. N. Sazonov. Astron. Zh, 46 (1969), 502.