

超光速運動

Synchrotron 放射の代表例である AGN jet を観測すると、jet の天球面上での見かけの速度が光速 c を越えて観測されることがある。これは AGN jet の運動速度が光速に十分近く、また速度方向が観測者の視線方向に対して適度な角度をなしているときに起こる現象である。

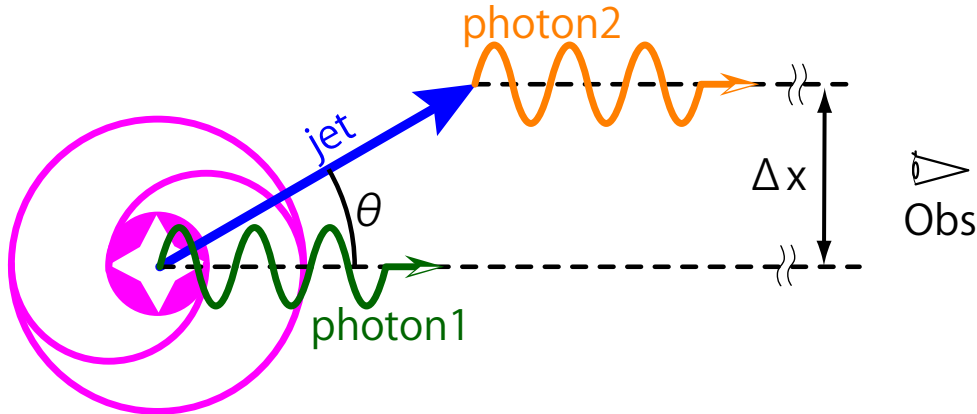


fig 1: AGN と jet, 観測者との位置関係。

fig1 のように、天体から観測者方向へ時刻 t_0 に photon1 が放射され、同時刻に jet が速度 v で視線方向に対してなす角 θ 方向に飛び出したとする。 Δt だけ時間が経過すると photon1 は観測者に対して

$$\ell_1 = c\Delta t \quad (1)$$

近づく。 jet は

$$\ell_{\text{jet}} = v\Delta t \cos \theta \quad (2)$$

だけ観測者の視線方向に近づく。そして時刻 $t_0 + \Delta t$ に jet から観測者方向に photon2 が放射されたとしよう。 photon1 が観測者に届いてから photon2 が観測者に届くまでの時間差 $\Delta t'$ は

$$\Delta t' = \frac{\ell_1 - \ell_{\text{jet}}}{c} = (1 - \beta \cos \theta)\Delta t \quad (3)$$

と書ける。ここで $\beta \equiv v/c$ とした。一方で jet は天球面上を

$$\Delta x = v\Delta t \sin \theta \quad (4)$$

だけ動く。よって天球面上での jet の見かけの運動速度 $\beta_{\text{app}} = v_{\text{app}}/c$ は

$$\beta_{\text{app}} = \frac{v_{\text{app}}}{c} = \frac{1}{c} \frac{\Delta x}{\Delta t'} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \quad (5)$$

となる。この式より適当な $\beta \sim 1$ と θ を選ぶと見かけの速度 $\beta_{\text{app}} > 1$ となることがわかる。 β_{app} と θ は観測量なので、この式から jet の本当の速度 β を見積もることができる。

β_{app} が極大となる θ を求めてみよう。

$$\frac{d\beta_{\text{app}}}{d\theta} = \frac{\beta \cos \theta (1 - \beta \cos \theta) - \beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2} = \frac{\beta(\cos \theta - \beta)}{(1 - \beta \cos \theta)^2} = 0 \quad (6)$$

のとき極大となるので、

$$\cos \theta - \beta = 0 \implies \beta = \cos \theta \implies \therefore \theta = \cos^{-1} \beta \quad (7)$$

のとき、 β_{app} は極大 (最大) となる。その極大値は

$$\beta_{\text{app}} = \frac{\cos \theta \sin \theta}{1 - \cos^2 \theta} = \frac{\cos \theta}{\sin \theta} = \cot \theta \quad (8)$$

である。この極大値が 1 を越える (超光速運動として観測される) ために必要な β の下限値は

$$\beta_{\text{app}}(\beta = \cos \theta) = \frac{\cos \theta}{\sin \theta} = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} > 1 \implies \beta^2 > 1 - \beta^2 \implies \beta > \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

である。

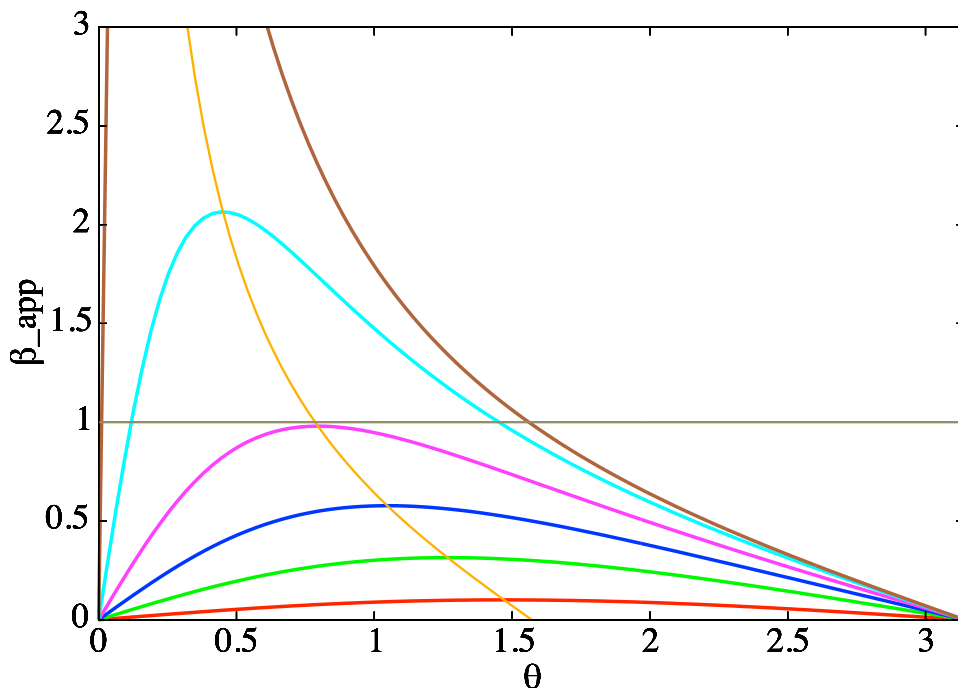


fig 2: 見かけの速度。red: $\beta = 0.1$, green: $\beta = 0.3$, blue: $\beta = 0.5$, magenda: $\beta = 0.7$, cian: $\beta = 0.9$, blown: $\beta = 0.99$ 。黄色は $\beta_{\text{app}} = \cot \theta$ (β_{app} が極大となる線)。

Bibliography

[1] 東北大学理学部宇宙地球物理学科天文学コース, 天体測定学 II, 2008, 本間希樹先生講義ノート