

10 銀河間のガスによる吸収 (Intergalactic absorption)(途中の 21 cm 遷移の とこまで)

最初の銀河および銀河団の元となった原子核や電子ガスの一部は、全て銀河になったわけではなく、銀河間の空間に残っている。では、この節この銀河間にある原子核や電子からなるガスについて考える。ガス中の原子や分子は観測可能で、より遠方にある銀河やクエーサー (quasar)^{*1}からやってくる光または電波の共鳴吸収によって観測できるであろう。しかし、ガスの大部分は (今はもうない) 高温で質量の大きい第一世代の星 (first generation of hot massive stars) の光で電離してしまったと信じられている。なお、その星は、とうの昔に寿命が尽きて無くなっており、時々、種族 III(Population III) の星と呼ばれている。現在のところ、一部のクエーサーは宇宙の宇宙の電離が完了する前に形成されたと思われるっており、非常に遠方からの光の共鳴吸収を用いれば、銀河間ガスを測定できる可能性がある。

原子の遷移によって、遠方の光源が光線を放射して、時刻 t_1 に周波数 ν_1 で放射され、時刻 t_0 に周波数 ν_0 で地球に届いたとする。この光が到達するまでに、ある時刻 $t(t_1 < t < t_0)$ における周波数は、赤方偏移の因子が $a(t)$ になって、 $\nu_1 a(t_1)/a(t)$ となっている。^{*2}もし、銀河間ガスが周波数 ν の光を単位時間あたりに $\Lambda(\nu, t)$ ので、割合で吸収し、かつ光を放出しないとすれば、この光線の光の強度は次の方程式：

$$\dot{I}(t) = -\Lambda\left(\nu_1 \frac{a(t_1)}{a(t)}, t\right) I(t)$$

もし銀河間ガスが温度 $T(t)$ を持っていれば、誘導放射によってこの光線に同じ周波数で、同じ位相で、同じ偏光を持った光子が加えられる。この光子一個当たりの誘導放射率は、アインシュタインの公式： $\exp(-h\nu/k_B T)$ の因子で与えられて、この修正を方程式に施せば、

$$\dot{I}(t) = -\left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu_1 a(t_1)}{k_B T(t) a(t)}\right)\right] \Lambda\left(\nu_1 \frac{a(t_1)}{a(t)}, t\right) I(t)$$

となる。これより、地球で観測される周波数は、

$$I(t_0) = \exp(-\tau) I(t_1)$$

となる。ここで、 τ は光学的厚さ (optical depth) と呼ばれている。

$$\tau = \int_{t_1}^{t_0} dt \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu_1 a(t_1)}{k_B T(t) a(t)}\right)\right] \Lambda\left(\nu_1 \frac{a(t_1)}{a(t)}, t\right)$$

吸収率は、

$$\Lambda(\nu, t) = n(t) \sigma(\nu)$$

^{*1} これは、94 ページで出てきた新しい単語で、Wikipedia によると、「クエーサー (英: Quasar) は、非常に離れた距離に存在し極めて明るく輝いているために、光学望遠鏡では内部構造が見えず、恒星のような点光源に見える天体のこと。クエーサーという語は準恒星状 (quasi-stellar) の短縮形である。日本語ではかつて準星などと呼ばれていた。」とのこと。いろいろと面白い話がありそう。この節で関係ありそうなところを書いておくと、「 $0.16 < z < 7$ 付近に発見されている。観測されるクエーサーは非常に暗いが、これだけ大きな赤方偏移を生じるほど遠方にあることから、実際にはクエーサーは宇宙に存在する天体の中で最も明るいと考えられている。一般的にクエーサーの明るさは 10^{38} W (最も明るい電波銀河の光度) から 10^{42} W に達」するとある。

^{*2} 式 (1.2.3) を思い出すと、 $\delta t_1/a(t_1) = \delta t_2/a(t_2)$ から出せるのだった。

で与えられる。ここで、 $\sigma(\nu)$ は周波数 ν における吸収断面積で、 $n(t)$ は単位体積あたりの吸収をになう原子の数密度である。多くの場合、 $\sigma(\nu)$ はある ν_R で鋭いピークを持つ。したがって、吸収は、周波数 ν_R に対応する時刻 t_R に近い時のみにおこり、その t_R は、

$$a(t_R) = \nu_1 a(t_1) / \nu_R$$

と与えられる。ゆえに、光学的厚さ τ は、

$$\tau \simeq n(t_R) [1 - \exp(-h\nu_R/k_B T(t_R))] \int \sigma(\nu_1 a(t_1)/a(t)) dt$$

近似できる。これを、 $\nu(t) = \nu_1 a(t_1)/a(t)$ を用いて、積分変数を時間から周波数に書き換えて、主な寄与がピーク付近 $\nu_R (\leftrightarrow t_R)$ であることを考慮すれば、次の公式：

$$\tau \simeq n(t_R) [1 - \exp(-h\nu_R/k_B T(t_R))] [a(t_R)/\dot{a}(t_R)] \mathcal{J}_R, \quad (\mathcal{J}_R \equiv \frac{1}{\nu_R} \int \sigma(\nu) d\nu) \quad (9)$$

が得られる。積分範囲は、ピークを含む狭い周波数領域。この τ の式を眺めてみると、唯一、宇宙論モデルに依存するのは、吸収の時刻における宇宙膨張率 (ハッブル定数) $\dot{a}(t_R)/a(t_R)$ であり、それは、

$$\frac{\dot{a}(t_R)}{a(t_R)} = H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_K(1+z_R)^2 + \Omega_M(1+z_R)^3 + \Omega_R(1+z_R)^4}$$

で与えられる。(式 (1.5.41) で、時刻 $t \rightarrow t_R$ とすればでる。) ここで、 $z_R (= a(t_0)/a(t_R) - 1 = \nu_R/\nu_0 - 1)$ は、共鳴吸収が起こる場所での赤方偏移である。ある赤方偏移 z に対して、吸収は観測される周波数 $\nu_0 = \nu_1/(1+z)$ のうちある決まった領域に渡って起こり、その領域は、 t_R が t_1 と t_0 の間にあるという条件と $a(t)$ が増加関数であることから求まる。^{*3}

$$\nu_R/(1+z) \leq \nu_0 \leq \nu_R \quad (12)$$

次に、歴史 (例) を見てみる。1959 年、Field は、水素原子の 21 cm 線の遷移による電波の吸収の効果を観測することを提案した。このスペクトル線は、水素の 1s 状態における超微細構造がスピン 0 からスピン 1 のエネルギー分裂によるものである。^{*4} この場合、 $\lambda \approx 21$ cm であるから、1420 MHz で、赤方偏移 $z = 0.056$ にある銀河、白鳥座 A の電波スペクトルは、 $1420/(1+0.056) \sim 1345$ なので、1342 MHz から 1420 MHz の間に式 (12) から与えられる吸収線の谷を示すはずである。残念ながら、銀河間の空間の中性水素^{*5} の温度は、 $h\nu_R/k_B = 0.068$ K よりもはるかに大きいために、式 (9) で与えられる光学的厚さは $0.068 \text{ K}/T(t_R)$ の因子だけ小さくなってしまふ。この吸収線の谷の兆候は未だに発見されていない。将来、高角度分解能を持つ新世代の低周波電波望遠鏡を用いることで、高赤方偏移における 21 cm 放射の輝線と吸収線を観測して、構造の進化、および構造の種となった原始密度揺らぎを研究できると期待されている。^{*6} 例えば、2010 年までには低周波干渉計 (LOW Frequency ARray (LOFAR)) によって、赤方偏移 5 から 15 の間にある光源からの 21 cm 照射を高感度、高角度分解能で研究できるはずである、とのこと。調べてみると、例えば、[arXiv:1809.06661](https://arxiv.org/abs/1809.06661) によると、 $z = 20 - 25$ の領域で、14 時間ほど測定すれば、21-cm の temperature fluctuations の power spectrum の上限が得られるとのこと。ここまで。ライマン・アルファ遷移は次にする。

^{*3} $t_1 \leq t_R$ から $a(t_1)/a(t_R) \leq 1$ で両辺に ν_0 をかけたら $\nu_R/(1+z) \leq \nu_0$ が出て、もう一方は $a(t_R) \leq a(t)$ を、直前と同様に逆数とればでる。

^{*4} 21 cm 吸収線は、Secondary distance の Tally-Fisher 関係でも活躍した。

^{*5} 21 cm 吸収線を見ている時点で、中性水素を見ていると仮定している。

^{*6} 大事な動機。