

連載

最新宇宙誌【10】

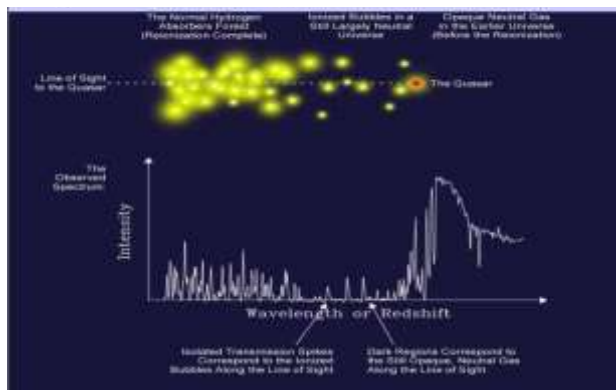
エポックⅢ：宇宙の再電離

～暗黒時代の終わり&天体時代の始まり（中編）～

福江 純（大阪教育大学）

2（承前）

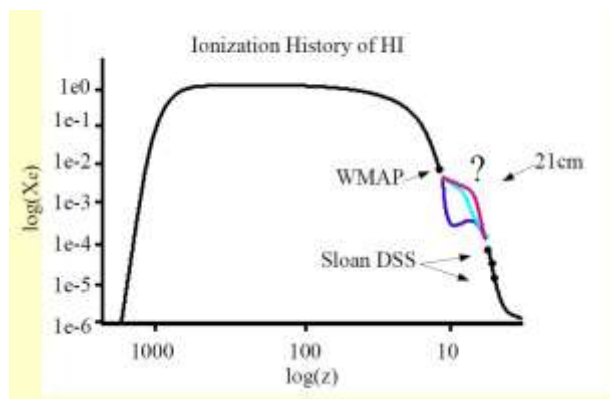
前編（『天文教育』2008年11月号）で、宇宙再電離の観測的証拠としてガン=ピーターズテストを挙げたが、かき集めていた資料の中にそのイメージ図があったので紹介しておく（図A）。キューサー（上図の右端）から発したライマン α 光は手前の中性水素（上図の黒い領域）で吸収されるが（スペクトルの中央付近）、電離した領域（上図の左側で増えている泡）では吸収されない。中性領域にある小さな電離泡が視線にあると、その部分は吸収されないで、スペクトルにスパイクが残る（下図の中央付近の小さなピーク）。



図A ライマン α 光のスペクトル（下）と宇宙の状態進化（上）

もう一つ、わかりやすい絵があった（図B）。図Bの横軸は赤方偏移の対数で、縦軸は中性水素の量の対数だ。赤方偏移が1000ぐらいで中性になり、赤方偏移が10前後で電離している図である。図中のWMAPは3Kの偏光で押さえられている点、SloanDSSはガン=ピーターズテストで押さえられている点だ。21cmとあるのは、中性水素の出す21cm

電波の検出で調べようとしている部分だと思う。すなわち、水素がまだ中性状態だった時期に放射された21cm中性水素輝線を検出して赤方偏移を測定すれば、原理的にはその時期の中性水素ガスの分布がわかるのだ。まだ証拠が出ている話ではないので紹介はしなかったが、中性水素量からダイレクトに電離度を検出する方法だ。



図B 宇宙の電離度の図

余談だが、ハーバード大学のローブ（Abraham Loeb）の言い回しはわかりやすい。宇宙の進化を人間の一生に比したとき、自分の人生のアルバムには、胎児のときの超音波で撮影した画像（後に紹介するが、3Kで得られたバリオン振動のことを指している）と、十代の写真（10億年以降）や大人になってからの写真はあるが、もっとも変化の大きかった子ども時代（40万年から10億年ぐらいまで）が空白だというわけだ。胎児がそのまま大きくなったモノが大人であるわけではないし、大人の小さいものが胎児であるはずもない。宇宙アルバムの空白時代を埋める作業が非常に重要であることがわかるだろう。

3. ストリームグレン球

宇宙が再電離したという証拠を挙げたところで、再電離の過程そのものへ進もう。われわれが考えているのは宇宙の(銀河間ガスの)再電離であり、銀河間ガスがほとんど水素であることから、以下も“水素”を中心に考えていこう(ヘリウムの再電離もあるが、物理過程は複雑にはなるが基本は同じである)。

基底状態にある水素が電離するためのエネルギー「電離エネルギー (ionization energy)」は、13.6eV である。光子の波長に換算すると、

$$13.6\text{eV}=91.2\text{nm}$$

の波長になり、紫外線の光子に相当する。

水素は 13.6eV 以上のエネルギーを受けると電離するわけだが、受けるエネルギーの形態は電磁的なもの(放射)でも力学的なもの(衝突)でも何でもよい。たとえば、紫外線の放射する紫外線によって電離する(図 8)。これは「光電離 (photo ionization)」と呼ばれる。一方、超新星爆発によって強い衝撃波が発生すると、粒子同士の衝突によって衝撃波が通過した後のガスは電離してしまう。こちらは「衝突電離 (collisional ionization)」



図 8 バラ星雲 (NASA)

一般に輝線星雲に分類されるが、水素が電離しているという意味では「電離水素領域/HII 領域 (HII region)」とも呼ぶ。

と呼ばれる。宇宙の再電離において、少なくとも最初の段階では、衝撃波を発生させるような超新星爆発を起こす星自体がないだろうから、おそらく重要なのは光電離の方だろう。

3.1 ストリームグレン球の大きさ

さて、星間ガス(あるいは銀河間ガス)の中に電離源(たとえば強い紫外線を放射する高温星や最初の星やクェーサー)が存在していたとして、周辺のガスを無限の遠方まで、どこまでも電離できないだろうことは、何となく想像できるだろう。おおざっぱな言い方としては、電離源から毎秒放射される紫外線光子の数は有限で、その紫外線光子が周囲のガスを電離していくわけだが、紫外線光子が尽きたところで電離領域も終わるわけだ。この強い高温星周辺の水素ガスは、高温星の電離可能領域を、最初に調べたデンマークの天体物理学者ベングト・ストリームグレン (Bengt Georg Daniel Stromgren ; 1908~1987 ; 図 9) にちなんで、「ストリームグレン球 (Stromgren sphere)」と呼ぶ。

実際、輝線星雲/電離水素領域/HII 領域などの天体写真を見ると、しばしば電離領域の境界がはっきりしている(図 8)。これはその領域にのみガス雲が存在している場合もあるが、一方、ガス自体は広範に広がっている



図 9 ストリームグレン

(出典 : <http://www.phys-astro.sonoma.edu/brucedalists/Stromgren/index.html>)

ものの、その領域だけが電離されている場合もあるだろう。

先のおおざっぱな言い方から、ストレームグレン球（電離水素領域）の大きさは、電離源から毎秒放射される紫外線光子（正確には 91.2nm より波長の短い光子）の数、すなわち電離源の紫外線光度と、周辺のガスの量、すなわち星間ガスの密度に依存して決まるだろう。

では具体的に、ストレームグレン球の大きさを見積もってみよう。まず十分に広い範囲で一様に広がった密度一定（個数密度を n とする）の中性水素ガスの中に、電離源、すなわち十分な紫外線を放出する早期型の高温星が一つだけあるとする（図 10）。電離源周辺で水素ガスが電離している領域（対称性から球になる）の半径を R_S 、電離領域における電離水素の個数密度を n_p 、電子密度を n_e とする（完全電離なら、 $n_p = n_e = n$ ）。ところで、ミクロスコピックにみれば、中心星から放射された紫外線光子は周辺の水素ガスを陽子と電子に電離するが、一方で、電離した陽子と電子は再結合して中性水素に戻る。もし必ず基底状態に再結合するなら（あるいは水素に基底状態しかなければ）、再結合時に出たライマン連続光が他の水素を電離するので、電離は燎原の火のごとくどんどん広がっていくだろう。しかし多くの場合、上位の励起状態に再結合して、その後はカスケード的に、

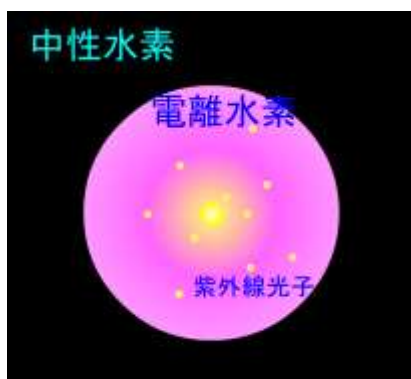


図 10 一様に広がった中性水素ガス中の電離源を取り巻く電離水素領域

バルマー輝線やライマン輝線を出しながら下位の準位そして基底状態へ落ちていく。そしてこれらの輝線はエネルギーが足りない所以他の水素を電離することなく、電離領域から抜けていく。そのため、電離源から離れるにつれて、紫外線光子は消耗し、どこかで尽きてしまうわけだ。

$$\mathcal{N}_{\text{UV}} = \mathcal{N}_{\text{rec}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_{\text{UV}} &= \int \frac{L_\nu}{h\nu} d\nu \\ &\sim \frac{L_{\text{UV}}}{h\nu_{\text{UV}}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_{\text{rec}} &= \frac{4\pi}{3} R_S^3 n_e n_p \alpha \\ &\sim \frac{4\pi}{3} R_S^3 n_e^2 \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_S = \left(\frac{3\mathcal{N}_{\text{UV}}}{4\pi\alpha} \right)^{1/3} n_e^{-2/3} \quad (4)$$

$$R_S n_e^{2/3} = \left(\frac{3\mathcal{N}_{\text{UV}}}{4\pi\alpha} \right)^{1/3} \equiv U(\text{sp}) \quad (5)$$

以上のことを記号的に書くと、(1)式のように、電離領域の大きさは、中心星から毎秒供給される電離光子の個数 $\mathcal{N}_{\text{UV}}$ (個/s) と電離領域内で毎秒再結合する原子の個数 $\mathcal{N}_{\text{rec}}$ (個/s) の釣り合いで決まることになる。まあ、これでは何のことかわからない。中身を示そう。

まず、単位時間あたりの電離光子の個数は、(2)式のように、ある振動数 ν において、中心星の振動数毎の光度 L_ν をその振動数のエネルギー $h\nu$ で割ったもの（これがその振動数における光子の個数）を振動数全域で（正確には電離エネルギー以上で）積分したものになる。紫外線が強い早期型高温星の場合は、オーダーとしては、紫外線光度 L_{UV} を紫外線光子のエネルギー $h\nu_{\text{UV}}$ で割ったぐらいである。具体的な数値は後で計算する。

一方、単位時間あたりの再結合電子の個数

は、(3)式のように、電子数密度と陽子数密度の積（ここまでの単位体積で電子と陽子が出会う頻度）に再結合率 α を掛けたもの（ここまでの単位体積中で電子と陽子が再結合する割合）に電離領域の体積を掛けて得られる。再結合率 α については後述するとして、完全電離していれば電子密度と陽子密度は等しいので、(3)式の後半のようになる。

これらの中身、とくに(3)式の中身を釣り合いの式の(1)式に入れて整理すると、ストレームグレン球の半径として、記号上は(4)式が得られる。あるいは(5)式のように表すことも多いようだ（後述）。

ここで具体的な数値の見積もりに入ろう。

まず単位時間あたりの電離光子の数だが、中心星が O6 から O7 あたりで、簡単のため、

表面温度 $T=40000\text{K}$

半径 $R=10$ 太陽半径

とすると、(紫外域) 光度は、

$$L_{\text{UV}}=4\pi R^2\sigma T^4=9\times 10^{38}\text{ erg/s}$$

となる。これを電離エネルギー

$$13.6\text{eV}=2.2\times 10^{-11}\text{ erg}$$

で割ると、電離光子数として、

$$N_{\text{UV}}=4\times 10^{49}\text{ 個/s}$$

が得られる。多いといえば多いが、無限ほど多くはない。

一方、再結合原子数の中身の方だが、電子数密度は、周囲の星間ガスの状況に依存するが、典型的には、

$$n_e=10\sim 1000/\text{cm}^3$$

程度だろう（星間空間は 1 ぐらい、銀河間はまだもっと少ない）。

数値が抑えにくいのが再結合率 α の方だった。電子と陽子が衝突した際にどれくらい再結合するかという割合は、電子ガスの温度 T_e に依存するのだが、その依存性や係数が文献によって異なるのだ。アインシュタインの係数にまで遡って導出し直すのもシンドイ（無理っぽい；笑）ので、ここでは、

$$\alpha=2\times 10^{-11}/T_e^{1/2}\text{ cm}^3/\text{s}$$

としよう。なお、電子ガスの温度は、

$$T_e=10000\text{K}$$

ぐらいである。

以上の数値を(4)式に入れると、ストレームグレン球の半径として、具体的に、

$$R_S=25\text{pc} \quad (n_e=10/\text{cm}^3)$$

$$R_S=1\text{pc} \quad (n_e=1000/\text{cm}^3)$$

などが得られる。

また、これらの具体的数値を一つひとつ計算するのは面倒なので、天文業界では一般的に、定数や係数は数値を入れ、変数は代表的な値を基準にして、(4)式の一般形を(6)式のように表現しておくことも多い。

$$R_S = 25\text{ pc} \left(\frac{N_{\text{UV}}}{4\times 10^{49}\text{ /s}} \right)^{1/3} \times \left(\frac{T_e}{10^4\text{ K}} \right)^{1/6} \times \left(\frac{n_e}{10/\text{cm}^3} \right)^{-2/3} \quad (6)$$

最後に、ストレームグレン球の半径を陽に書いた(4)式と、電子数密度を合わせた(5)式の違いだが、後者は観測的観点からのまとめ書きといえる。すなわち、(5)式の左側の等号の両辺で、左辺は未知の量だが、右辺は中心星の種類などでだいたい決まる量である。そこで右辺を「励起パラメータ (excitation parameter)」 $U(\text{sp})$ と定義し、中心星のタイプに対して計算しておけば楽である。たとえば、O6 型の星だと、

光度階級	励起パラメータ $U(\text{pc}/\text{cm}^3)$
V 主系列星	66
III 巨星	87
I 超巨星	108

などとなる（詳しくは、参考文献参照）。

3.2 ストレームグレン球内の電離度分布

ストレームグレン球について、もう一つ触

れておきたいことは、内部の電離度の分布である。中心星のすぐ近くでは水素はほとんど完全電離しているだろうし、ストレームグレン球の外側では中性状態だが、その間で、電離度がゆるやかに減少するののか否かという問題だ。電離式の計算は面倒なので省略するが、具体的な計算結果の一例を図 11 に示す。

図 11 からすぐわかるように、電離度はだんだら減っているのではなく、ストレームグレン球の境界近くで急激に減少している。すなわち、ストレームグレン球内部では水素はほとんど完全電離しており、幅の狭い遷移層を挟んで、球外の中性水素領域につながっていることになる。

物理的には、光学的厚みという観点からは、電離光子に対して、典型的な星間ガスの光学的厚みが十分に大きいとめだといえる。実際、典型的な星間ガス密度（1 個/cm³）のとき

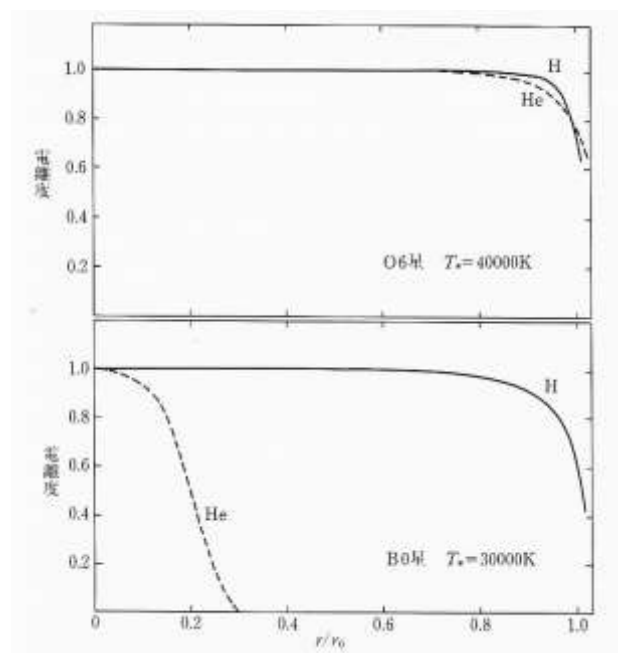


図 11 ストレームグレン球内の電離度分布
（小暮智一『星間物理学』より）

横軸は水素のストレームグレン球の半径を単位として中心星からの距離で、縦軸は水素の電離度（実線）とヘリウムの電離度（波線）。上は O6 星（40000K）で、下は B0 星（30000K）。星間ガスの密度は 100/cm³。

の、紫外線光子の平均自由行程は、0.1pc 程度しかない。そのため、完全電離から中性状態に移行する遷移層も 1pc 以下ぐらいになってしまうのだ。

紫外線のみでみれば、中心星の周辺、たとえば 60pc ぐらいは澄み渡っているが、その外部は急激に不透明な雲に取り囲まれているようにみえているだろう。ただし、バルマー輝線など可視光に対しては全域が半透明なので、輝線星雲も透けて見えているのである。

なお、“現在の” 星間空間におけるストレームグレン球については、ダストの影響なども重要らしいが、初期宇宙はダストがないので、そこらへんは省略する。

4. 宇宙再電離の物理

現在のところ、宇宙の再電離は、観測的な事実および理論シミュレーションなどから、おおむね、以下のように起こったのだろうと推測されている（図 12）。

宇宙誕生後 2 億年ぐらいまでは、宇宙全体には中性水素ガスとビッグバンの残照である低エネルギー光子（数十 K ぐらい）が満ちている。そのころに、中性水素ガスの密度の高い領域で、最初の星やクエーサーが誕生したはずだ。

電離源（星・原始クエーサー／原始銀河）が宇宙のそこかしこに形成されると、それらから放射される紫外線によって、電離源の周辺が電離されはじめ、数億年の間に宇宙のあちこちで「宇宙的ストレームグレン球（cosmic Stromgren sphere）」が点在的に形成されていっただろう（図 12 上）。その間も、星やクエーサーは引き続き形成され、つぎつぎと新たな電離泡を作っていっただろう。

電離源が増えるにつれ宇宙的ストレームグレン球の泡は、泡同士が次第に重なり合うようになる（図 12 中）。この状態を「パーコレーション・浸透（percolation）」と呼んでい

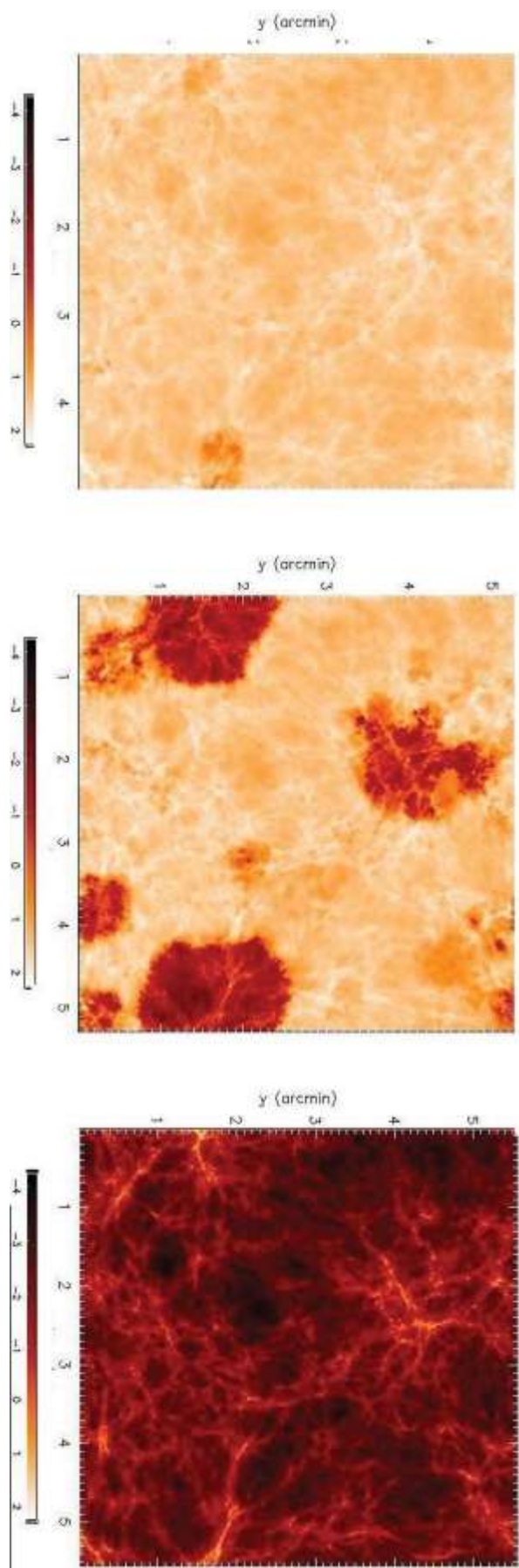


図 12 宇宙が再電離していく様子

(出典: <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/lofar/images/reionization.jpg>)

この図は、正確には、中性水素ガスの放射する 21cm の電波強度がどのように変遷するかを理論的シミュレーションで示したものである。なお、時間とともに空間は膨張しているが、図は空間の膨張率で割ったスケール（共動座標）で表示してある。

る。パーコレーション以前は一つひとつの電離泡は独立だったが、パーコレーションが起これば、一挙に電離領域が広がることになる。5 億年前後のことだろう。

やがて宇宙全体が泡で覆われ尽くし、残った中性水素は銀河に集まって。宇宙全体の再電離が終了する（図 12 下）。

文 献

- Bromm, V. (2005) *ARA&Ap*, **42**, 79.
 Bromm, V. (2006) *Sky & Tel*, **5**, 30.
 Bromm, V., Larson, R. B. (2004) *ARA&Ap*, **42**, 79.
 Fan, X., *et al.* (2006) *AJ*, *in press* (astro-ph/0512082)
 Fan, X., Carilli, C. L., Keating, B. (2006) *ARA&Ap*, **44**, 415.
 Heger, A., Woosley, S. E. (2002) *ApJ*, **567**, 532.
 Larson, R. B., Bromm, V. (2001) *Sci Ame*, **12**, 64.
 Loeb, A. (2007) astro-ph 0711.3463v1.
 Nakamura, F., Umemura, M. (2001) *ApJ*, **548**, 19.
 Omukai, K., Palla, F. (2003) *ApJ*, **589**, 677.
 Songalia, A. (2004) *AJ*, **127**, 2598.
 Tumlinson, J., Shull, J. M. (2000) *ApJ*, **528**, L65.
 Yoshida, N., Abel, T., Hernquist, L., Sugiyama, N. (2003) *ApJ*, **592**, 645.
 Yoshida, N., Omukai, K., Hernquist, L., Abel, T. (2006) *ApJ*, **652**, 6
 ライマン・シュピッツァー・Jr (1980) 『星間物理学』, 共立出版.
 小暮智一 (1994) 『星間物理学』, ごとう書房.

福江 純