

連載

最新宇宙誌【9】

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（前編）～

福江 純（大阪教育大学）

1. 紫藍の時代—宇宙の再電離

宇宙が無色透明あるいは暗黒だった時代にも、宇宙全体にはおぼろ気な残照と目には見えない水素やヘリウムが充満していた。そのような宇宙のそこかしこに、91.2nmより短波長のブラックライトを放つ無数の光源が出現し始めた。それとともに、宇宙全体に充満したガスは紫に輝き始めた。宇宙開闢から計った時間は約2億年から10億年（赤方偏移で約12から6ぐらい）、宇宙のサイズは約10億光年から20億光年（現在の約10分の1から5分の1ぐらい）である。

火の玉宇宙が膨張して温度が下がり、プラズマガスが“再結合”して中性になって宇宙が晴れ上がったとき、宇宙全体にあまねく存在するガス物質（大部分は水素ガス）は、一部電離していたかも知れないが、大部分は中性状態で電離していなかったはずである。たしかにそういう状態は、一度はあったと考えられている。ずっとそのままであれば宇宙誌は大変にシンプルだったのだが（数十年前はそんなシンプルなシナリオだった）、宇宙というか自然は一筋縄ではいかない。アインシュタインの懸念のごとく老獪である。

というのも、現在、銀河間に存在する希薄ガスは、中性状態ではなくて、ほぼ完全に電離しているからだ。ということは、宇宙の晴れ上がり後のどこかの時点で、宇宙のガスが再び電離するという事態が生じなければならない。実際、赤方偏移が4とか5ぐらいのあたりにあるクェーサーの観測などから、宇宙の晴れ上がり以降、赤方偏移が6以前のどこかで、宇宙中の中性水素ガスがふたたび電離

したことがわかってきた。赤方偏移 z が 1088 ぐらいで宇宙が晴れ上がった後にも宇宙中の水素ガスが中性のままなら、現在の宇宙も澄み渡っているはずだが、実際には、現在の宇宙は遠くの方が霞んでいるのである。

赤方偏移が10から20ぐらいで起こったらしいこの水素ガスの再電離を「宇宙の再電離（re-ionization）」と呼んでいる（図1）。中

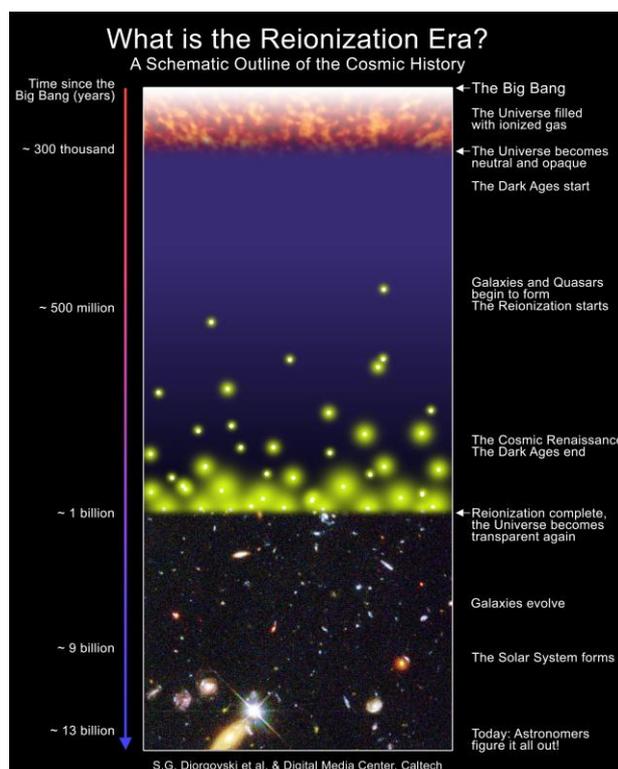


図1 宇宙の再電離（説明は次ページ）

この図は上が過去で下が現在の並び。プラズマ状態だった宇宙（図の上端）が、いったんは晴れ上がり（青い領域）、そして宇宙に出現したエネルギー源（黄色の光）によって、再び電離した（図の真ん中より少し下）。

（出典：<http://www.nrao.edu/pr/2003/j1148/reion.diagram.jpg>）

性状態の水素ガスを陽子と電子に電離するためには、外部からエネルギーを与える必要がある。しかも銀河間に存在するすべての水素ガスを電離させようとなると大変な量のエネルギーが必要になる。そのエネルギーが何かよくわかっていない点も大きな謎なのである。

赤方偏移が 10 近くまでの領域は、銀河やクェーサーの観測によって調べられてきている。また、ずっと彼方の赤方偏移が 1000 ぐらいの領域は、3K 宇宙背景放射によって見えている。しかし、赤方偏移が 10 ぐらいから 1000 ぐらいの間の領域は、観測的にも理論的にもよくわかっておらず、宇宙史においては、“宇宙暗黒時代 (cosmic Dark Ages)” と言われている。しかし、宇宙暗黒時代に初代の天体が誕生したと考えられているので、宇宙の歴史においては非常に重要な時代でもある。

宇宙暗黒時代に誕生した初代の天体は、第一世代の星か、あるいはクェーサーか、あるいは他の天体か、まだ確実なところはわかっていない。初代の天体が第一世代の星だった場合、それらは重元素をほとんど含まない、おそらく太陽の 100 倍から 1000 倍ぐらいの質量で、10 万度以上の表面温度をもつ星であり、強い紫外線を放射していて、初期宇宙を再電離したのだろうと推測されている。

2. 宇宙再電離の観測的証拠

宇宙の再電離で対象となる“天体”は、銀河と銀河の間、いやむしろ銀河団と銀河団の間にたゆたう「銀河間ガス物質 (IGM : intergalactic medium)」である。すでに銀河として集まったガスは、星になったり、超新星爆発で汚染されたり、何度も調理を受けてしまって、宇宙初期のものとは異なっている。

一方、銀河間ガスは、宇宙が生まれ元素が合成され、そして一部のガスが銀河や星になった後も、ただの一度も星や銀河として凝集

しなかつただろうと推測される。密度はきわめて希薄だが、銀河 (団) 間の空間はあまりに茫漠と広がっているので、銀河間ガスの量はかなり多いだろう。

銀河間ガスはあまりに希薄でほとんど光らないので、直接に観測することはきわめて難しい。しかし、そのようなガスの状態を調べる方法はある。背後の光源を透かしてみるのである。背後の光源としては、遠方の銀河や 3K 宇宙背景放射が使える。

遠方の銀河のスペクトル中から銀河間ガスの状態を調べる方法として、ガン=ピーターズンテストというものがある。また、3K 宇宙背景放射から銀河間ガスの状態を調べる方法として、3K 宇宙背景放射の偏光状態を調べる方法が知られている。前者の方法では、 $z \sim 6$ ぐらいで銀河間ガスの電離度が急に増加していることが判明している。また後者の方法では、 $z \sim 10$ ぐらいですでに一部のガスは電離していることが判明している。宇宙の再電離は、宇宙全体で一様に進んだわけではなく、宇宙のそこかしこでポツポツと起こり、全体へ「浸透 (percolation)」していったのだろう。

2.1 ガン=ピーターズン効果

まず宇宙再電離の観測的証拠として「ガン=ピーターズン効果 (Gunn-Peterson effect) / ガン=ピーターズンテスト (GP テスト)」というものを紹介しよう。紹介するなど偉そうなことを書いているが、いましがた (2008 年 10 月) までは耳学問として知っていただけで、きちんと勉強するのは実はこれが初めてである。

さて、宇宙が晴れ上がったのは、それ以前の電離状態の水素は光子が真っ直ぐ進むのを邪魔していたが、中性水素は光を素通しするようになったためだと、何度も述べた。しかし、逆説的だが、実は、中性水素は光を吸収

するのである。ただし、ある特定の波長で。また、ついでに書いておけば、電離水素が不透明だといっても、それは宇宙初期のガス密度が高い時期の話で、現在の宇宙では電離水素の密度が非常に低いために、やや霞んではいるが、さすがに不透明ではない。ようは不透明かどうかというのは、光学的厚み（どこかで説明したと思うけど）が1より大きいかわ小さいかで判断する必要がある。その光学的厚みも、波長依存性を考慮しなければ単純だが、波長依存性を考慮するとやや面倒になる（たとえば、地球大気は、可視光や電波に対しては光学的に薄い、X線に対しては光学的に厚いなど）。さらに、ここでは詳細は省略するが、以下述べる問題では線スペクトルに対する光学的厚みを見積もる必要がある。

話を戻すと、中性水素は、たいいていの波長の光は素通しだが、以前にも書いた量子力学の性質にしたがって、とびとびで特定の波長の光を吸収したり放出したりする。いわゆる線スペクトルというやつで、基底状態と上位の励起状態との間をライマン系列、第一励起状態と上位がバルマー系列、第二と上位がパ

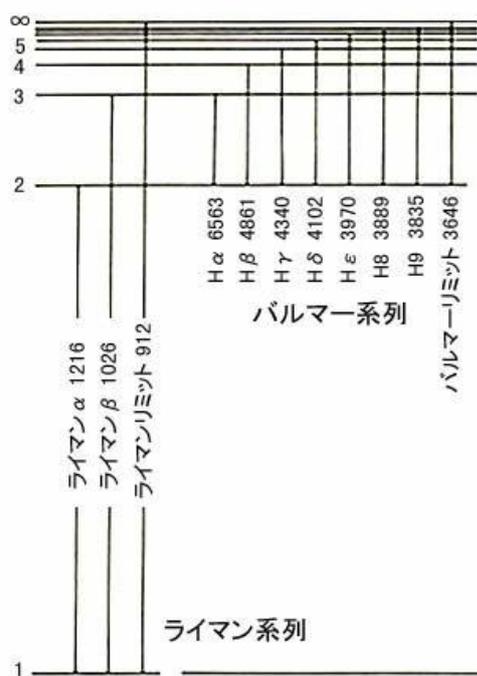


図2 水素原子のエネルギー準位

ッシュン系列などと呼ばれる（図2）。さらにライマン系列のうち、基底状態（図2の1）と第一励起状態（図2の2）の間をライマン α ($\text{Ly}\alpha$)、基底状態と第二励起状態（図2の3）の間をライマン β などと呼ぶ。

バルマー系列の吸収放出は可視光で起こるために、古くからバルマー系列の線スペクトルがよく調べられている。それに対して、ライマン系列は紫外線領域なので、観測はしにくい、基底状態の水素が多ければ（多くなくても）、基底状態とのやりとりで起こるライマン系列は一般にはもっとも強く重要である。そして、ガン=ピーターズテストは、（たぶん多くの場合は）このライマン系列のライマン α 光を使う。

GPテストの考え方はとてもシンプルなものだ。非常に遠方の光源（たとえばクェーサー）からライマン α 光が発したとしよう。最初は強い輝線である。もし銀河間空間の水素がないかあっても電離していれば、その強い輝線はそのまま（ただし赤方偏移して）地球まで届くだろう。しかし、銀河間空間に中性水素が存在すれば、その多寡に応じてライマン α 光は吸収され、強い輝線の一部が吸収されてプロファイルが変わってしまうだろう（図3）。その様子を赤方偏移とともに調べれば、どれぐらいの赤方偏移でどれぐらいの中性水素が存在しているか見積もれるというものだ。ガンとピーターズがGPテストを提案したのは1965年という昔である。

さらに、ここがもう一つ重要な点だが、図3を見てもらうとわかるように、吸収はライマン α 輝線の短波長側だけで起こるのだ。図3は、スローンデジタルスカイサーベイで発見されたSDSSクェーサー1044-0125（赤方偏移 $z=5.80$ ）の可視域から赤外のスペクトルだ。ライマン α 線は静止系では紫外線領域だが（121nm）、大きな赤方偏移のために波長が $(1+5.80=)$ 6.8倍も延びて、赤外線

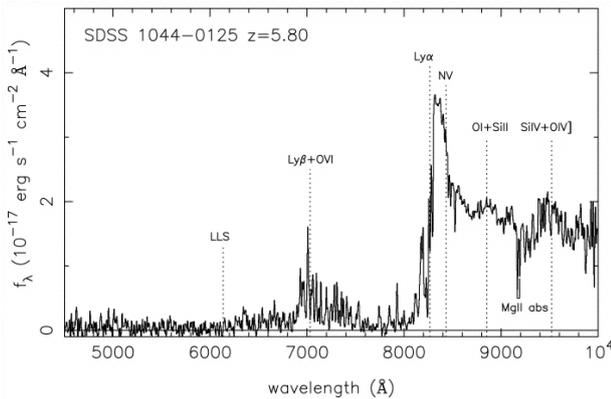


図3 SDSS クェーサー1044-0125 (赤方偏移 $z=5.80$) の可視域から赤外のスペクトル
ライマン α 線は静止系では紫外線領域だが、大きな赤方偏移のために波長が7倍くらい伸びて赤外線になっている。

(出典: <http://www.ast.cam.ac.uk/~regan/reion.gif>)

(823nm) になっている (図中の縦線)。そして、クェーサーから発したときには、この823nmの波線を中心として少し左右に広がりをもった強い輝線だったはずなのだ。しかし、図ではそのライマン α 輝線の左側、すなわち短波長側がごっそり抉れていることが明瞭である。これをライマン α の「吸収トラフ (absorption trough)」と呼んでいる (トラフは、飼い葉桶とか海底トラフなどで使うが、吸収溝ぐらいの意である)。

このようなトラフが生じるのは、このクェーサーより赤方偏移が小さな、すなわち手前にあるガスによって、クェーサーから発したライマン α 光が吸収されていることを意味する。すなわち、クェーサーから発したライマン α 光は、クェーサーと地球の間にある、それぞれ異なる赤方偏移をもった銀河間中性ガスで吸収されるのだが、それらはすべて、クェーサーより手前側、すなわち短波長側でしか起こらない。

さらに、図4のように、多くの高赤方偏移クェーサーのスペクトルを並べてみると、そ

れらの吸収トラフの移り変わりがよくわかる。すなわち、遠方のクェーサー (図4の上のもの) では吸収トラフは明瞭で絶壁のようだが、もう少し近いもの (図4の下) では比較的なだらかになっている。

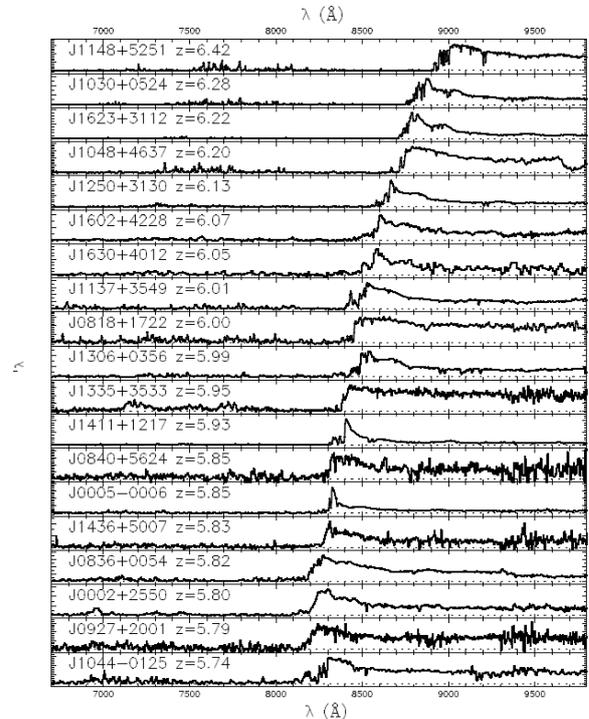


図4 SDSS クェーサーでスペクトルが得られた例 (Fan *et al.* 2006)

赤方偏移が 5.74 (下) から 6.42 (上) にかけての 19 個の SDSS クェーサーが並べてある。

このようなライマン α 光の吸収トラフを詳細に測定した結果、赤方偏移が 5.5 から 6 ぐらいで急激にトラフが深くなる、すなわちライマン α 光の透過率が低下することがわかった (図5)。

このことから換算すると、IGM の中性水素の割合は、 $z < 5.5$ では 1 万分の 1 ほど (ほとんど電離しているのでライマン α 光を透過する) だが、 $z \sim 6$ ぐらいで 1000 分の 1 から 0.1 に跳ね上がる (中性水素が増えてライマン α 光を吸収する) というような状態になっていることがわかってきたのだ (図6)。

なお、 z が 6 より大きい遠方で、完全に中

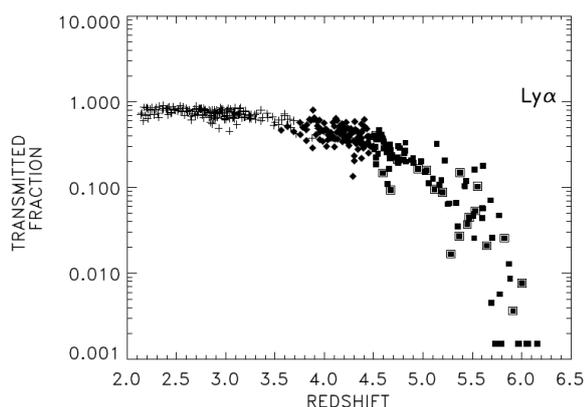


図5 ライマン α 光の透過率(Songaila 2004) 赤方偏移が5より手前では大部分が透過しているが(水素が電離しているため)、6ぐらいではほとんど透過していない(中性水素が増えているため)。

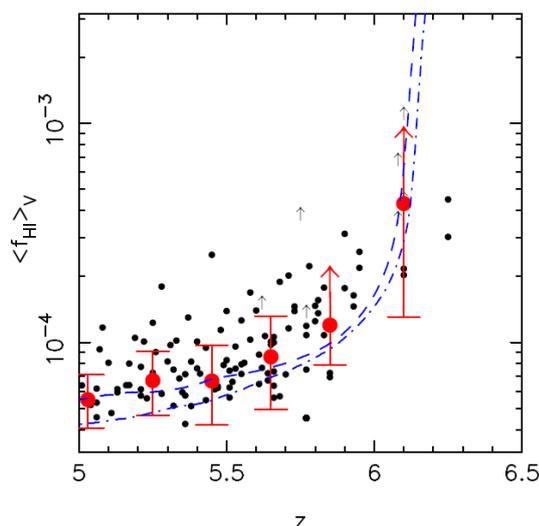


図6 GPテストから見積もった中性水素の割合(Fan *et al.* 2006)。

性である必要はない。ライマン α 光がわれわれに届くまでの“ライマン α 光に対する”光学的厚みが1より大きくなる程度の量があればいいからだ。

2.2 3K宇宙背景放射の偏光

宇宙再電離の観測的証拠は多々あるが、もう一つの大きな証拠が3K宇宙背景放射の偏光から得られている。ただ、ここは挫けた。昔から電磁波の偏光は鬼門で(他にも鬼門だ

らけだが)、論文を読んでもどうにもプロセスが頭に入ってこないで、詳しく紹介するのは断念したい。非常に大づかみに言えば、以下のようなこと、だと思う。

ビッグバン火の玉宇宙の残照である3K宇宙背景放射についてはすでに述べたとおりだ。その発生時に数千度のほぼ純粋な黒体放射だったものが、宇宙膨張によって温度が下がり、現在は約3Kのマイクロ波放射として宇宙全体に遍く満ちている。また、発生時のバリオン物質のムラムラを反映して、方向によってわずかなゆらぎ(異方性)があることも知られている。

ただし、ここまでは、晴れた日の太陽を見るように、宇宙が完全に透明だと考えての話だった。しかし、宇宙(銀河間空間)は完全に晴れているわけではない。そして、宇宙開闢後、ほんの40万年ぐらいに発生した3K光子は、その後はるばると、ほぼ137億光年の宇宙空間を旅してきたものである。春霞などがあると太陽が煙って見えるように、銀河間空間に存在するプラズマガスによって、3K宇宙背景放射のスペクトルが影響を受けることは想像に難くない。

たとえば、本論とは関係ないが(いや、書いてみると、深い関係があった)、有名なものに銀河団における「スニアエフ=ゼルドビッチ効果(Sunyaev-Zeldovich effect)」がある。

3K宇宙背景放射の光子が、銀河団を通り抜けるとき、銀河団の中には高温ガスが満ちているので、その高温ガスによって影響を受ける。具体的には、高温ガス中の電子によって3K光子が逆コンプトン散乱を受け、長波長領域の光子がエネルギーをもらって短波長領域に移るのだ。その結果、銀河団方向での3K宇宙背景放射のスペクトルは、長波長領域(レイリー-ジーンズ領域; 3K宇宙背景放射の場合は波長1mm以上)において、銀河団の周囲より強度が減少してしまうのだ。こ

の現象は、旧ソ連の理論家スニアエフとゼルドビッチによって理論的に予測されていたが、実際の観測で裏付けられている (図 7)。

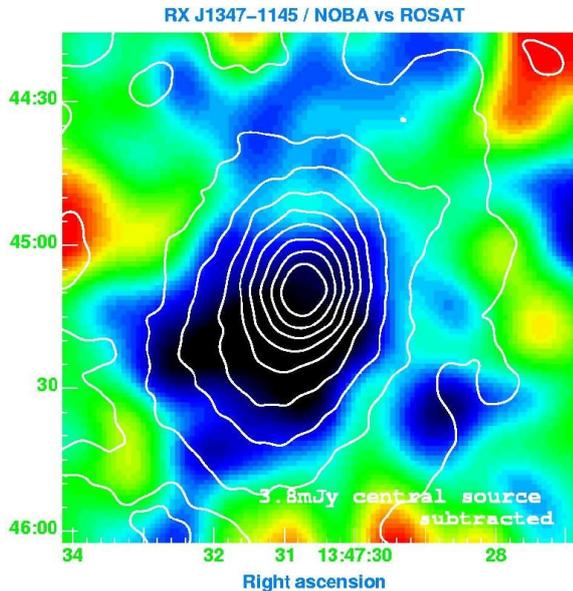


図 7 銀河団 RX J1347-1145 周辺における 3K 宇宙背景放射の電波強度分布
白抜きの等高線は X 線の強度分布で、銀河団に含まれる高温ガスの分布を反映している。銀河団の方向で 3K の電波強度が弱まっていることが明瞭に見て取れる。(画像提供: 松尾 宏, 栗野諭美ほか『宇宙スペクトル博物館』より)

宇宙再電離の場合はどうかというと、宇宙が中性状態だと、地球大気が電波に対して透明なように、3K 光子は影響を受けない。しかし、宇宙が再電離して自由電子が生じると、この自由電子は 3K 光子と衝突して影響を与えることになる。

さきの銀河団におけるスニアエフ=ゼルドビッチ効果でも、実は、銀河団の高温プラズマ中に含まれる自由電子が影響を与えたのである。銀河団の場合は、高温プラズマの温度が非常に高いため、自由電子のエネルギーも高く、3K 光子に衝突して叩き上げ、3K 光子のエネルギーを変えるぐらいの大きな影響を与える。エネルギーを交換するぐらいの衝突を「逆コンプトン散乱 (inverse Compton

scattering)」と呼んでいる。

一方、宇宙再電離で生じた自由電子のエネルギーはそれほどには高くないので、3K 光子と衝突はするが、エネルギーを変えるほどではない。したがって、3K 宇宙背景放射のスペクトルなどが変わることはない。このような低エネルギーの衝突は「トムソン散乱 (Thomson scattering)」と呼ぶ。

しかし、何も起こらないわけではなく、トムソン散乱によって 3K 光子の偏光状態が影響されるのである。具体的にといわれると、そこで説明に窮するわけだが、水面で反射した光が偏光したり (ポラロイド板を回すと見え方が違う)、青空のレイリー散乱光が偏光したりするような類のことが起こるのだろう、ぐらいにしておきたい。

ともあれ、WMAP 衛星などで得られた 3K 宇宙背景放射の詳細データについて偏光などを調べた結果、赤方偏移が $z \sim 11 \pm 3$ ぐらいまでかなり電離していたことがわかってきたらしい。

これらやその他の証拠から、現在では、宇宙再電離は $z \sim 14$ ぐらいに始まり、全体への浸透が終わったのが $z \sim 6$ ないし 8 ぐらいだと考えられている。

～つづく～

文献

- [1] Fan, X. *et al.* (2006) *AJ*, in press (astro-ph/0512082).
- [2] Fan, X., Carilli, C. L., Keating, B. (2006) *ARA&Ap*, **44**, 415.
- [3] Loeb, A. (2007) astro-ph 0711.3463v1.
- [4] Songalia, A. (2004) *AJ*, **127**, 2598.

福江 純 (大阪教育大学)