

ライマン α の森の進化とミニハローモデル

村上 泉

〈国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

クエーサーの吸収線として観測されているライマン α の森と呼ばれる銀河間雲について、ミニハローモデルに基づき2つのメカニズムによる進化過程を調べた。その結果から観測されているライマン α の森の性質を説明することを試みた研究を紹介する。

1. クエーサーの影

銀河よりもけた違いに明るいクエーサーと呼ばれる天体は、その明るさの故に非常に遠方まで観測されている。現在もっとも遠くに観測されている天体はクエーサーで、その赤方偏移は4.9である¹⁾。このクエーサーを使ってクエーサーと我々との間にある遠方の天体を影として観測する事ができるのである。

我々の宇宙はビッグバンから始まって今も膨張し続けている。宇宙膨張によって光の波長は引き伸ばされ、その度合いを表すのが赤方偏移という量である。赤方偏移が大きいかほど光は長い時間宇宙膨張の影響で波長が伸ばされているため、より遠くの、そしてより昔の天体から発せられた光であることがわかる。たとえば、地上では波長1216Åのライマン α 線も赤方偏移が2の天体からくると波長は3648Åになり、赤方偏移が4では6080Åにもなってしまう。元は同じライマン α 線もその赤方偏移が違えば全然違う波長になってしまうのである。そこに目をつけて赤方偏移の異なる天体を観測してみよう。

とは言っても、暗い天体をどう観測するか、である。自分で光らない暗黒星雲の存在がわかるの

は、後ろからくる星の光を遮るからである。遠すぎて暗い天体も後ろからくる光を遮ればその存在を知ることができるだろう。一般に天体の発する光は連続光と物質に固有な輝線によって構成されている。たとえば宇宙で一番多い水素にはライマン α 線という固有の光がある。暗い天体の中の水素は輝線を出すかわりに後ろから照らしている光の中のライマン α 線の部分を遮って吸収してしまうが、都合の良いことに後ろの発光源と吸収を起こす天体は赤方偏移が違うため、ライマン α 線と言っても波長が違うのである。かくして、クエーサーからくる光の各波長ごとの強さを測れば、手前にある暗い天体の存在を吸収線という影として知ることができるのである (図1)。

2. 銀河のなりそこない?

クエーサーの吸収線として観測される天体には、銀河とライマン α の森と呼ばれる銀河間雲がある。銀河と思われる吸収体は水素や炭素、マグネシウムなどによる吸収線で観測されている。それよりも数にして十倍から百倍多い水素の弱い吸収線として観測されているのがライマン α の森である。吸収線の強さ(深さ)は物質の量によって決まり、銀河間雲は銀河よりもずっと質量の小さい天体であることが予想される。質量の小さい、たぶん銀河になれなかった(これからなるかも知

Izumi Murakami: Evolution of Lyman Alpha Clouds under the Minihalo Model

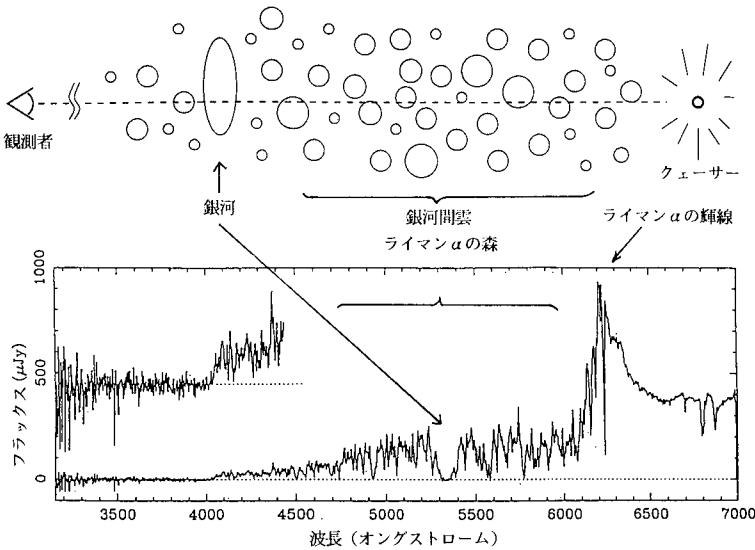


図1 (上) クェーサーとその手前
にある銀河間雲を観測する様
子を示す。視線にある銀河
間雲が吸収線として観測され
る。(下)クェーサーのスペク
トルの例。赤方偏移4.11のク
ェーサー Q0000-263で²⁾、
ライマンαの輝線より短波長
側に多数見える吸収線がライ
マンαの森である。

れないが) 天体と思われる。

この銀河間雲、数が多いため、統計的な性質がいろいろわかっている。水素の量を表す指標となる中性水素柱密度に対して、銀河間雲の数が柱密度のべき関数で表せられるとか³⁾、赤方偏移あたりの数が急激に減少しているとか⁴⁾、空間分布の特徴を示す二体相関を調べるとその相関がほとんど無くてほぼ一様に空間に分布しているようであるとか⁵⁾、銀河とはちょっと違う性質を持つらしい。

ここでは、この銀河間雲について、ミニハーローモデルと呼ばれるモデルに基づいて考えてみよう^{6,7,8)}。ミニハーローモデルでは銀河間雲は冷たい暗黒物質 (CDM) の重力によって支えられているガス雲であるとする。宇宙の天体が CDM によって支配されているとする CDM 宇宙モデルにおいて、銀河よりも質量が小さくて先に形成される天体がこの銀河間雲であるという立場である。ガス雲が CDM の重力場中にあるため、周りからの紫外放射で暖められても宇宙が膨張しても、どんどん膨張して雲散霧消してしまわないのである。しかも、ガス雲は重力場のおかげで密度分布 (中心の密度が高くて端の方は低いような) を持つことができるため、一つのガス雲でもどこを見る

かによって、つまり視線が違うところを通れば柱密度が異なり、それによって、数が柱密度のべき関数として表されるという柱密度分布も楽に説明することができる。では、数の赤方偏移による変化と空間分布は説明できるだろうか。

3. 銀河間雲の進化——輻射編

3.1 紫外放射で照らされて

吸収線の赤方偏移あたりの数は、大きっぱに吸収体の個数密度と断面積の積で見積もることができる。宇宙膨張によっても個数密度は減少するが、その効果以上にライマンα吸収線の数は減少している。この変化を断面積変化によるものと考えて調べてみよう。断面積といっても、単純に銀河間雲の大きさだけではなく中性水素柱密度で見たガス雲の断面積がここでは問題である。

銀河間雲は周りから紫外放射によって照らされ暖められている。この紫外放射というのは遠くのクェーサーなどの天体からでた紫外放射の重ね合せとしてほぼ一様に宇宙を満たしている背景放射であるとする。この放射は、輻射源であるクェーサーの数の変化や個々からの輻射量の変化などによって、その量が赤方偏移によって変化し得る。特に観測されているクェーサーの数は、赤方偏移

が2あたりで最大になり、赤方偏移の小さい方も大きい方も少ない。ただし、赤方偏移が2よりも大きなクエーサーは全部観測されているわけではなく見えていないものがたぶんあると思われる。それでも背景紫外輻射がクエーサーの数の変化に従って変わると思うことはできるだろう。

紫外輻射の変化に伴い銀河間雲の物理状態は変化する。輻射が増えれば、ガスはより多くのエネルギーを受け取って温度が上昇、膨張し、水素のイオン化も進む。そうすると中性水素の密度分布が変わり、同じ視線に対する中性水素柱密度は減少する。言い替えると、ある柱密度に対する視線のガス雲中心からの距離は、輻射が増えることによって減少し、従ってそれに対応する断面積も減少することになる。断面積の減少は観測にかかる数の減少を意味する。すなわち、輻射の増加が観測数の減少を引き起こすことが予想されるのである。

3.2 数の変化

これらをふまえて、ガス雲がCDMの重力場中に捉えられているときの進化の様子を数値計算によって調べた^{9,10}。背景紫外輻射の変化は簡単のため $(1+z)$ のべき関数で表すことにする。 z は赤方偏移である。べき α はある z_c を境に異なる値を採ることにした。これはクエーサーの数の赤方偏移に対する変化に対応して紫外輻射も赤方偏移の大きなところと小さなところでは変化のようすが変わると考えたからである。 α が負の時には輻射は時間とともに増加することを意味する(赤方偏移は大きいほど昔になり、時間の流れと逆方向の変化をする)。初期(ここでは赤方偏移を5とした)にガスとCDMは重力的につりあった密度分布を持っていると仮定する。CDMの密度分布によって重力場を決定し、これは時間変化しないとした。球対称なガス雲が周りから時間変化する背景紫外輻射によって照らされたときに起こるガス雲の物理状態の変化の様子を赤方偏移が5から0まで調べた。

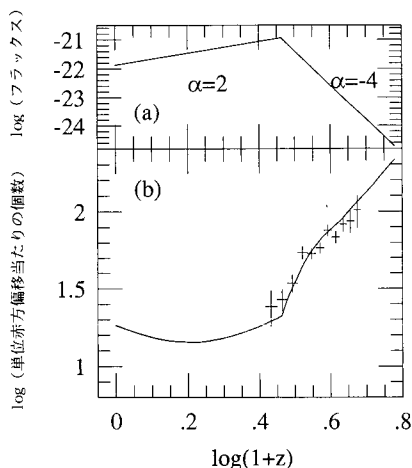


図2 (a)912 Åでの背景紫外輻射の変化の様子。赤方偏移が1.9より大きなところでは、べき指数 $\alpha=-4$ で、小さいところでは $\alpha=2$ で変化するとした。(b)計算によって得られた単位赤方偏移あたりの数の変化(実線)。十字及びハッチは観測から得られている数の変化。

質量の異なるいろいろなガス雲について得られた進化の結果から、観測される数を予想し、それが実際に観測されている数の変化にあうかどうか調べた。その結果、 $z > 1.9$ で $\alpha=-4$ という時間とともに急激に輻射が増加することによって起こるガス雲の膨張と水素イオン密度の変化が、観測にかかる数を急激に減らし、実際のライマン α の森の数の進化($z > 1.7$)を説明できることがわかった⁹(図2)。また、 $z < 1.9$ では $\alpha=2$ のゆっくりした輻射の減少が、ガス雲の進化を膨張から収縮に変え、ハッブル宇宙望遠鏡によって観測された $z < 1$ でゆっくりライマン α 吸収線の数が増加すること^{11,12}も説明できる¹⁰。

従って、背景紫外輻射が変化することによって銀河間雲の状態が変化し、観測される数が変化することがわかった。

4. 銀河間雲の進化——風編

4.1 風に吹きさらされて

前章では、銀河間雲が孤立して周りの物質とは

何の関係も無く、非常に静かな状態にあるような場合を考えていた。では、周りから何らかの力を受けるとどうなるだろうか。ここでは、銀河間雲が超音速の風を受けたときの様子を考えてみよう。

どんな時かと言うと、キューサーから風が吹いてきたり、銀河間雲が動くことによって相対的に風を感じる時（自転車で乗っていて風を感じるのと同じである）などである。たぶん、弱い風なら銀河間雲はびくともしないだろうが、強い風なら重力場から押し出されて壊れてしまうかも知れない。

4.2 風を受ける銀河間雲

前章と同じように球対称のガス雲が CDM の重力場に捉えられているとしよう。この止まったガス雲に対して一様な超音速のガスの流れを連続してあてた時のガス雲の変化を数値シミュレーションで追ってみる。ガスの流れの速度（マッハ数）と密度をいろいろ変えて、いろいろな密度分布、質量のガス雲にあてるとどうなるだろう¹³⁾。

超音速流によって発生した衝撃波が、CDM の重力場にあるガス雲を襲うと、衝撃波の持つ動圧（風の速度の 2 乗と密度の積で評価する）が、ガス雲の各点における圧力よりも大きければ、その動圧によってガスは重力場から押し出されてしまい、ガス雲は壊れ、跡形もなく消えてしまう。ここでは CDM は影響を受けずにそのままであると仮定してガスの変化だけ計算している。ガス雲の圧力（ガス雲の中で密度、圧力とも一番大きいのは中心）が動圧よりも大ききなところでは、とりあえず生き残ることができる。生き残った（でもやせ細った）ガス雲の前には、弓状衝撃波が生じる。弓状衝撃波は残っているガス雲を押し出そうとするが、CDM による重力場があるのでガス雲は完全には押し出されず、重力によって引き戻される。重力場井戸の底で位置を振動させることになる。動圧による押し力が場所によって違うことにより（中心線からずれるに従って弱くなる）振動の際に

ガス雲は変形し、取りこぼしたように端のほうからガスがガス雲から離れて行ってしまふ。そうやって、ガス雲はだんだんとその身を削られて、やがて四散してしまう。その変化の様子の一例を表紙写真に示す。これは質量 5.6×10^6 太陽質量のガス雲が半径 (8.4 kpc) 内に一様な密度で分布する CDM (質量 2×10^{10} 太陽質量) の重力場中にあるとき、マッハ数 8 (274 km/s) の超音速流を受けた時の変化の様子である。風の密度はガス雲の外側の銀河間物質と同じとした（赤方偏移が 3 の時の臨界密度の 100 分の 1）。色が青から赤へ変わるに従い密度が濃くなるとしてある（対数スケール）。風を受けてから 7.6×10^6 年で吹き飛ばされてしまっている。

ガス雲の破壊に対する条件、ガスの削られ方の時間スケールを様々なガス雲の密度分布、CDM 分布と超音速流の速度や密度に対して求め、以下の考察に用いる。

4.3 クューサーからの風

キューサーから強力な風が吹いてきたら、キューサーの近くの銀河間雲は吹き飛ばされて、観測されないことになるだろう。確かにライマン α の森には近接効果と呼ばれる、キューサーから 3~8 Mpc 内では観測される吸収線の数が少ないという報告がある¹⁴⁾。この近接効果に対して、一般にはキューサーの近くではそのキューサーから放射されている強い紫外輻射によって銀河間雲はより多くイオン化され、中性水素柱密度が減って観測されにくくなるとした説明がなされている。ここでは、近接効果に対するほかの物理過程による説明が可能かどうかという立場からの考察を行う。

キューサーで急激なエネルギー解放が起こると、衝撃波を伴った超音速流が外へ向かって伝搬する。エネルギー解放はたとえば急激な星生成とそれに続く超新星爆発によって起こると考えることができる。エネルギー解放にともなう衝撃波の伝搬の様子は、ビシュニアクラによって得られている¹⁵⁾ので、その結果と今回の数値計算から得ら

れたガス雲に対する条件とから、クェーサー近くのガス雲の運命について考えてみよう。

超音速流のガス密度は宇宙膨張によって減少する。宇宙に一樣にあるガス密度を $\Omega_b=0.01$ と固定し、衝撃波の速度についてガス雲の条件と比較することにする。典型的なガス雲の密度をいくつか考え、それに対する破壊の条件と、エネルギー解放による衝撃波の伝搬とを比べると、エネルギーが 10^{63}erg 以上のものによる超音速流でなければ赤方偏移が 1.7 以上にある銀河間雲を破壊することができない。また、クェーサーからの距離で考えると、赤方偏移が 20 という昔にエネルギー解放があったとしても赤方偏移が 1.7 までではクェーサーからせいぜい 4 Mpc までしか伝搬しない

ことがわかった (図 3)。

とは言うものの、このクェーサーからの風は近接効果を説明するもう一つの物理過程として考えられることがわかった。

4.4 銀河間雲の集団化

ここで考えている銀河間雲は CDM の重力によって支配されているガス雲である。それぞれが重力場を持つということは、お互いに重力を及ぼしあい、銀河などと同じように集まって集団を形成すると考えることができる。銀河は集まって銀河団を形成し、集まり方はべき関数として表される二体相関関数によって特徴付けられる。しかし、ライマン α の森には弱い二体相関しか観測されず、ほぼ一様に空間に存在しているらしい。

銀河団の中の銀河が熱い銀河団内物質の中を走り回っているように、銀河間雲も、その集団によって作られる重力場中をその重力場の強さによって決まる速さで動き回ることが考えられる。動き回ると相対的に銀河間雲は風を感じ、動圧によるガスのはぎ取りがおこるだろう。

銀河間雲が集まった集団が、銀河ぐらゐの質量を持つだろうとして、典型的な銀河の質量と形成時期から、銀河間雲の集団における銀河間雲の速度、周りにあるガスの密度を評価する。その条件下でのガス雲の質量損失の時間スケールをシミュレーションで得たものから類推すると、十分短い時間で銀河間雲はそのガスを失い壊れてしまうことが予想される (図 4)。つまり、集団化した銀河間雲は強い空間相関を示すはずだが、あつという間に壊れてしまってほとんど観測にかからないことになると考えられる。そうすると結局観測された銀河間雲には集団化のかけらも見えないことになる。

5. バラ色の人生、でもなく!?

以上の数値計算による研究で、ミニハーローモデルという、銀河間雲が CDM の重力によって支えられているという考え方で、ライマン α の森に

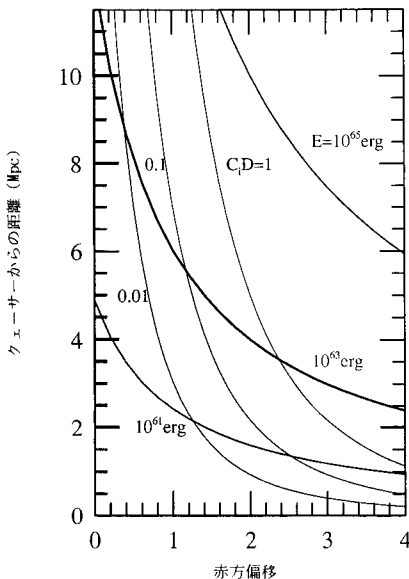


図 3 エネルギー解放にともなう衝撃波のクェーサーからの伝搬距離 (青線) の赤方偏移に対する変化。典型的なガス雲に対する破壊の条件を示す線 (黒線、密度を表すパラメーター C_1D が大きいほど質量の大きなガス雲になる) と比較し、この線が青線で示す衝撃波の線より下側にあると、この衝撃波によって破壊されることを示す。たとえば、エネルギーが 10^{63}erg の衝撃波では、ハッチをつけた領域内に条件の線のあるガス雲を破壊する。

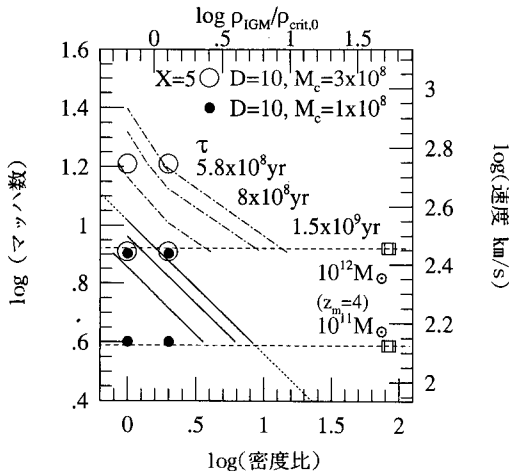


図4 風の密度パラメーター (f は赤方偏移が3の臨界密度の100分の1に対する密度の比) と速度に対するガス雲の破壊のタイムスケールの依存性。二つのガス雲(CDMが5万度の音速と同じ速度分散を持つ等温分布をしていた場合) に対し、異なる質量のガス雲) についてのタイムスケールを実線と破線で、シミュレーションを行った速度、密度を黒丸、青丸でそれぞれ示す。銀河間雲の集団のパラメーターとして 10^{11} 、 10^{12} 太陽質量のものが赤方偏移4で最大膨張した後宇宙膨張からはなれて収縮して出来る天体と同様の速度、密度パラメーターを適用するものとする(長い破線、四角)。四角の場所におけるガス雲の破壊のタイムスケールは十分短いものと予想できる。

ついて様々な観測的性質を説明できることがわかった。でも、それで万々歳、というわけでもない。ライマン α の森をやはり説明できる圧力平衡モデルという強力なライバルが世の中にはいる¹⁶⁾。圧力平衡モデルではガス雲には重力はほとんど効かなく、周りにある熱くて薄いガスとの圧力のつりあいによってガス雲が存在していると考えている。このモデルとの観測できそうな違いは、ガス雲に密度構造があるか無いかだけであろう。それを調べるには重力レンズクエーサーを観測するとか、なかなか一筋縄ではいかない観測が必要となるが、望遠鏡技術の進歩などでやがて結果がでてくると思われる。

また、ライマン α の森の数の進化を説明するの

に紫外輻射の変化による断面積の変化だけで話をすすめたが(3章)、4章で考えた過程によっても数は変わるのである。しかし、実際にその変化量を評価するのはむずかしい。それはすなわち銀河形成の問題とも結びついて、ある赤方偏移において形成された天体のうちいくつが集まってより大きな天体を作ることになっているのか、いろいろな人がいろいろな方法で解決しようと試みてはいるが、まだ決定打はない。

モデルの善し悪しはさておき、ライマン α の森は遙か遠くの赤方偏移が4から現在まで存在し多数観測されている貴重な天体である。この銀河間雲を観測からも理論からも詳しく調べることによって、この悠久の時の中の宇宙の歴史、それも銀河が形成されだそう頃を知ることができるはずである。そう、そしていつか、バラ色の人生を。

参考文献

- 1) Schneider et al. 1991, *Astron. J.*, **102**, 837.
- 2) Sargent et al. 1989, *Astrophys. J. Suppl.*, **69**, 703.
- 3) Hunstead 1988, 'QSO Absorption Lines: Probing the Universe', ed. Blades et al. (Cambridge University Press), p.71.
- 4) Lu et al. 1991, *Astrophys. J.*, **367**, 19.
- 5) Webb 1987, 'Observational Cosmology', ed. Hewitt et al. (Reidel), p.803.
- 6) Rees 1986, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **218**, 25p.
- 7) Ikeuchi 1986, *Astrophys. Space Sci.*, **118**, 509.
- 8) Ikeuchi et al. 1988, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **236**, 21p.
- 9) Murakami & Ikeuchi 1993, to be published in *Astrophys. J.* May 20.
- 10) Murakami & Ikeuchi 1992, submitted to *Astrophys. J.*
- 11) 村上泉, 1992, 天文月報, **85**, 27.
- 12) Bahcall et al. 1992, preprint.
- 13) Murakami and Ikeuchi 1993, in preparation.
- 14) Bajtlik et al. 1988, *Astrophys. J.*, **327**, 570.
- 15) Vishniac et al. 1985, *Astrophys. J.*, **291**, 399.
- 16) Ikeuchi and Turner 1991, *Astrophys. J. Letter*, **381**, L1.