

光と大気の窓 - 「ばね」から「空」のむこうの「宇宙」まで

佐藤修二 March 2 (Mon) 2009

概要

光 可視光 (波長: 400~700nm: 紫~赤) 光合成 (青 450 と赤 680nm)
 光は、地球も宇宙も “窓” = 透明 光あふれる<星>宇宙

バネ振動子 $mx + kx = 0$ 

共鳴 吸収 @ $\omega = \sqrt{k/m}$ $\omega_0 \sim 0.3 \mu m < \text{紫外}>$ と $\omega_1 \sim 3 \mu m < \text{赤外}>$
 ω_0 と ω_1 の間: $0.3 \sim 3 \mu m$ の谷 $\sim 1 \mu m$ 透過窓

透明 まさつ²⁾ と電気³⁾のある強制¹⁾振動⁰⁾子の電磁放射

窓 (屈折) は現世 壁 (共鳴) は宇宙の歴史

電気双極子 (ダイポール p) 放射 強制力 $F = qE_1 = \text{太陽光}$ バネ = 大気分子 **光**

$$mx + \gamma m \dot{x} + kx = F = qE_1 \exp(i\omega t)$$

① 加速度 \ddot{x} => $\partial E / \partial t$: 変位電流 => 電磁**波**!

$$E_2 \propto -q/c^2 r \ddot{x} \quad \omega^2 \sim \lambda^{-2}$$

② 速度 \dot{x} 入射 E_1 + ダイポール放射 $E_2 = > E_2$ と E_1 の間で**位相**が遅れる (進む)

a) 波長が短くなる b) 速度が遅くなる c) 最短時間の原理、屈折 は互いに等価

a) 高校物理 $n = c/v$ ホイヘンスの素元波

b) 大学物理 $v = c/n = c/\sqrt{\epsilon \mu}$ マックスウエルの方程式

c) 光学 nL : 光路長 フェルマーの最短時間の原理

$$\sin \theta_1 = n \cdot \sin \theta_2 \quad \text{屈折の法則} \quad \text{光線追跡法}$$

虹の七色 分散 $n(\omega) \sim \omega^2$ $n(\lambda) \sim \lambda^{-2}$ の青さ レーレイ散乱 強度 $I: \lambda^{-4}$ 青~赤 $(4/7)^4$:

微粒子: 塵: ダスト = <電気双極子>の集合体 $\Sigma p \quad x_0 \sim 0.1 \text{nm} \rightarrow \underline{0.1 \mu m}$ (3 桁)

$$\text{たくさん (N 個) のばねの集合した一つの双極子} \quad I \propto N^2 \omega V^2$$

① 透明 → 青い → 白い → 雲散霧消 水分子 → “塵” → 水滴 → 水分子

② 遠い星の光は <暗く赤く偏る> サイズ 0.1 μm の “塵” が漂う

天文学 光赤外線天文学 Z 研 16 年

星間減光 Absorption、---赤化 Reddening、---偏光 Polarization $A_\lambda \propto E_\lambda \propto P_\lambda$

$$\lambda \quad 0.5 \sim 2.5 \mu m \quad @ \lambda \sim 0.6 \mu m \equiv \text{“光”} = 2\pi \times 0.1 \mu m$$

双極子史 **電子** ダイポール ω_0 → **分子** ダイポール ω_1 → **塵** ω_2 → **地球の晴れ上がり** → 大気と大地

宇宙の晴れ上がり 38 万年一番星 3 億年 星と銀河の時代 45 億年前

はじめに

可視光の窓は、動物や植物にとって、太陽と地上の間で、エネルギーを出し入れする。人間は、この光の窓は、空を眺めて天体の運行を知った。この窓は歴史の中で2回閉ざされたことがある。

今、我々が星を眺める窓は エネルギーとしての太陽星だけでなく、宇宙の星をも見ることができた。星の規則正しい運行の認識が人類の知恵をもたらすことになった。この窓は、宇宙に向かって“可視” visible だからである。不可視の時期から可視への移り変わりは、宇宙の晴れ上がり（ビッグバン後 40 億年）と地球の晴れ上がり（40 億年前）の2回あったであろう。

宇宙物質の電氣的結合、電離や結合という観点で、この「晴れ上がり」を見たい。大学物理において必修する「減衰項をもつ強制電気振動子」と「加速度運動する電荷による電磁波の発生」で記述できる。

入射光の波長 λ 、すなわち強制振動数 $\omega=c/2\pi\lambda$ 、が振動子の固有振動数 ω_0 から離れた時、散乱屈折されながら透過する、大気の“窓”となり、 ω_0 に近づく時、共鳴吸収されて減衰する、大気の“壁”となる。

窓は屈折的（散乱、分散と同義である）であり、電磁波動の位相成分の変化である、他方、壁-吸収は、電磁波動の振幅成分の変化である。窓は、現世の<可視>世界、空や陸や海の景色であり、レンズや顕微鏡、望遠鏡、等、有用な「光学」の世界である。他方、壁は吸収（共鳴的、連続的の2様式がある-後述）であり、宇宙の歴史の中で生じた出来事である。宇宙進化の中で、水素が中性化した時と地球ができた時、の2度、可視域は晴れ上がりを経験した。

ビッグバンの中で

はじめにビッグバンがあった。0.1秒後、に陽子と中性子が、続く3分間で、重陽子、ヘリウム、リチウム、のような軽い元素がつくられた。炭素より重い元素はできなかった。40万年の間、膨張を続けた。原子核と電子とがとびかうプラズマであった。電磁波は散乱をくりかえすために遠くまで見透すことができなかった。膨張とともに冷却して3000Kになった頃、電子は陽子やヘリウムの原子核に束縛されて水素原子 H^0 やヘリウムの原子となる。水素の束縛のエネルギー E は13.6 eVであった。この光子のエネルギーを波長に換算すれば、91.2nm、紫外域である。紫外域の壁は、 c （光速度） h （プランク定数） e （素電荷）そして m_e （電子の質量）で決まる。

宇宙膨張の中で、取り残されたわずかの電子 e は、 $H^0+e\rightarrow H^-$ ：水素負イオンを経て水素分子 H_2 を形成する。この分子は赤外域にあらたな共鳴をもたらす。分子のバネ定数は、電子バネと同じ程度の強さであるが、振動体は電子に代わって陽子である。固有

周波数は、質量の二乗根に反比例する、すなわち $\sqrt{m_e/M_p} \sim 1/40$ 紫外の 40 倍の波長、すなわち赤外域に共鳴吸収をもつ。このように、ビッグバン後の宇宙膨張のなかで、可視域の両サイド；紫外と赤外は自然に閉ざされる。

この水素分子は、等核分子のために、電気四重極をなす。この吸収および放射能率はきわめて悪い。後の世代<星銀河の時代>に、多種多様な元素からなる分子種ができて、赤外域が本曇りとなる。

星の形成

現在は、星と銀河の世界である。星は、ガス（主に水素）が重力収縮してできる。その過程で、熱エネルギーがガス圧となり収縮を妨げる。この熱を逃がしつつ重力収縮を続けるために、塵というラジエータが不可欠となる。軽元素 水素ヘリウムでも微粒子はできなくもないが、しかし、極低温と高圧が必要であろう。できたとしても、透明か白の物質で、広い波長域にわたるラジエータになりえない。一定の密度と温度の重元素があれば、微粒子は、宇宙で簡単に形成できる。重元素からなる塵は、多くの自由度をもつ-赤や黒や汚い色-ことができる。光を“連続的”に吸収放射する。

ビッグバンから星銀河への遷移

水素とヘリウムだけの物質から、星銀河を形成するには、自由度が足りない。重力収縮の際に生ずる熱を逃がすことができないからである。現在のような星形成のプロセスはおこりようがない。

しかし、水素分子が微弱ながらも存在する。中性水素は、玄妙なプロセス ($H^0 + e \rightarrow H^- : H^+ + H^- \rightarrow H_2$) を経て分子を形成する。水素分子は、きわめて効率は低い、電気四重極放射を行う。水素分子の振動の自由度を使って最初の星-水素とヘリウムのみからなる星天体-太陽の 100 倍の天体<最初の星>が、ビッグバン後 10 億年でできる。

この星は、質量が大きいために、星の中心部で核融合反応が盛んにおこり炭素 C の障害をのり超えることができさえすれば、後は次々に重い元素を合成する。最期には爆発して合成した重元素を拡散する。C N O Si Mg Ca -----Fe 等の重元素は、多様な分子種さらには微粒子まで形成できる。

微粒子 塵の形成

微粒子塵の大きさには、特徴的なスケールがあるだろうか？

十分な原材料があり、一定の温度条件化では、過飽和をへて微粒子ができる。したがって、宇宙最初の星の中で合成された重元素は、星最期の爆風の中で、微粒子となるであ

ろう。様々なサイズの微粒子ができてはいるはずである。

宇宙の観測では、可視域の天体観測から 微粒子の存在が知られ、赤化と偏光からサイズが可視波長 λ 程度であることが知られる。このこと-星間の微粒子が可視域の波長である-は、意味のあることであろうか？ それとも偶然であろうか？

それは、今の見えている星銀河宇宙が、まさしくここ $<0.1\sim 1\mu\text{m}>$ に同調させたのであろうと思う。様々なサイズまで塵は成長できるはずである。

現在の宇宙は中小質量の星が圧倒的に多い世界である。これら通常の星は、およそ100億年後、赤色巨星となる。赤色巨星枝を数回 上り下りした後、不安定になって、さらに膨らんでそれらが大量の塵の雲となる。塵に取り囲まれる状態:AGB段階である。

そこでは、塵は星の放射圧を受ける。塵のサイズは、ちょうど赤色巨星や白色矮星の放射するフォトンのピークで、光の圧力を受けるであろう。これは、今、太陽の下で、物が見える ということと同じことである。ちょうど波長の大きさの“もの”が見えている。机や顔のような大きなものも見えているではないか！ いやそれは違う。内部は見えていない、表面の、見ている $<$ 可視 $>$ 波長の範囲しか見えていない。そこで位相や振幅が変調される、それが見えるということである。変調されなければ、光は直進する。平らな鏡でものを写すと、光は変調されないから、ものがいったいどこにあるのか、知りようがない。鏡の上に落書きすれば、そこからの光 $<$ ホイヘンスの素元波 $>$ が見える。

さて、星の周りに成長していく塵は、小さいときは a のマイナス6乗（体積の2乗）で、ちょうど波長程度になると a の2乗（面積）で、散乱される。つまり、もっともよく光圧を受けるのは、波長のサイズなのである。そして、今、星宇宙すなわち可視域の放射が卓越する時代である。それが、星間塵が $0.1\mu\text{m}$ のオーダーである理由である。

電波では、電波の大きさの物しか見えない、しかし、現在 $<$ 星宇宙 $>$ は、電波にピークをもつ天体はない。X線でも同じことであろう。この世 $<$ 星宇宙 $>$ はそんな時代や領域ではないのである。

銀河系においては、重元素は可視波長 λ に成長した“塵”の段階で重力圏外に放出される。重元素は平凡な星の中で、幾世代かくり返した末、重元素の大半は、星間塵として、可視域サイズに落ち着いたのであろう。観測量；減光 A_λ 、赤化 E_λ 、偏光 P_λ ともに、星間塵のサイズが $0.1\sim 1\mu\text{m}$ で説明できる理由である。ちょうど可視光波長 $\lambda = 550\text{nm}$ と同じである。あるいはサイズパラメータ $x = 2\pi a/\lambda \sim 1$ と等価である。

$a \sim 0.1\mu\text{m}$ は、不思議なサイズ “マジック” サイズともいえる。光圧が最大となることは述べたが、 2) 表面積と体積比（電気力の飽和？）、3) 自己重力ゼロ、4) 圧力ゼロ) とい

う理由も加わるかもしれない。ともかく、このサイズが、現在の星銀河時代のフォトンの可視光波長 λ ともっとも相互作用するのであろう。

この $x=2\pi a/\lambda \sim 1$ では 複素屈折率が、散乱的 (実数的) であれ吸収的 (虚数的) であれ、成立する。波が変調されたこと、進行方向が変化したり<屈折>、色が着いたり<吸収>、を知るためには、その波長程度の変調が測定されることが必要だからである。

宇宙の歴史と領域で、このサイズを超えて、砂粒や石ころを作ることは、多分不可能であろう。そのような条件は、太陽系のような天体種を経ずして可能とは思えない。前述してきたように太陽は作るのはたやすい。むずかしさは 地球の形成にある。

太陽<星>形成は 重力とその熱を逃がす塵があればよい、それは星の輪廻で可能である。しかし、 $a \sim 0.1 \mu m$ のままでは、重力も電気力も働かない。

中心の華やかな星形成の過程で、角運動量保存法則で、辺境に取り残されたガスと塵の物語を形成しなければならない。太陽系形成の標準理論という物語がある。ともあれ、地球は、塵がガスから分離して大地を作り、ガスの残滓が大気となって宇宙への窓を空けたのである。わずか、10km か 100km かの青いはかない層である。

そこを通して、太陽星からエネルギーを受け取り物質と生命を営み、宇宙星から、法則性を学び取ったのであろう。

星の老化 主系列 100 億年後 赤色巨星 $\sim 3000K$ 外層部では $<1800K$ (グラファイト、シリケイトの凝固点) になり、塵が生まれる。

塵は 中心の星の放射 $\sim 3000K$ (10000K?) の光圧を受けて外へ押し出される。この効率ももっとも良いのは、サイズ $a \sim 0.1 \mu m$ であろう。このサイズに成長した塵のみが光圧を受けて、ガスを引きつけて星風となって重力圏外に出ていく。

ここは、レーレイ散乱からミー散乱に移り変わる境界 a のべき乗が 6 から 2 (断面積) になる。

$a \sim 0.1 \mu m$ は、不思議なサイズ “マジック” サイズ

1) 光圧が最大 2) 表面積と体積比 (電気力の飽和?) (3) 自己重力ゼロ 4) 圧力ゼロ)

このサイズが、現在の星銀河時代のフォトンの可視光波長 λ ともっとも相互作用するのである。

観測量; 減光 A_λ 、赤化 E_λ 、偏光 P_λ ともに、このサイズであることを強く示唆する。ちょうど可視光波長 $\lambda = 550nm$ と同じである。あるいはサイズパラメータ $x=2\pi a/\lambda \sim 1$ と等価。

この $x=2\pi a/\lambda \sim 1$ では 複素屈折率が、散乱的 (実数的) であれ吸収的 (虚数的) であれ、成立する。

相互作用には、散乱と吸収がある。散乱では系の内外にエネルギーの出し入れはない。吸収では系の中

にエネルギーは取り込まれる。共鳴と吸収は、星間塵では区別して考える方がよい。共鳴は、フォトンエネルギーが、電子や分子のバネと「共振」して、内部に取り込まれて格子に移るが、吸収は、自由電子（バネではない： $\omega=0$ ）の「電流」になってジュール損として格子に移る。その結果、吸収のバンド幅（Q値）がまったく異なるのである。共鳴は狭く選択的であるが、吸収は広く連続的である。元来 透明であった可視の窓を吸収的に-散乱的でなく-閉ざすのである。雲的でなく塵的である。観測的にいえば、散乱と吸収は 半々程度～アルベド 0.5（ ± 0.2 ）である。

すなわち、ダイポールの単なる集合では不十分な吸収しかできない、塵は、重元素が必要であろう。単に不純物程度では、可視の広い吸収帯をもたらさうか？ やはり自由電子を供給できる金属的なものが必要ではないか？ それがバネの吸収帯を広げて黒体的にする。折衷案は、金属的なコアに誘電体的なマントルの塵の二重構造である。=>コア物質としては、炭素系か、シリケート系か、金属系か？

わずかな量の重元素が、吸収と放射の間の平衡、熱平衡 を保証している。光赤外フォトン吸収して遠赤外フォトンに変えて、放射することが星銀河の物質輪廻にとって不可欠である。宇宙の塵は吸収的、黒体的でなければならない。興味あることに、複素屈折率の虚数項を入れても、サイズは、 $a \sim 0.1 \mu m$ で、レーレイ（体積の2乗 $\sim a^6$ ）からミー（面積 a^2 ）に代わることである（要、証明）。可視（赤外）全域を吸収するためには、サイズと重元素を含む塵が必要である。

電子バネ周波数は紫外域に、分子バネ周波数は、赤外域になる。この間の可視域は 窓=透明帯なのである。電子バネ定数は、 e, h, c , と m_e で、分子バネ定数はそれに加えて、 M_p で決まる。塵のサイズ、バネ定数は、星の表面温度 $T \sim 6000K(3000 \sim 30000K)$ できまる。電子バネは、38 万年、分子バネは 3 億年、塵バネは、それから現在にいたる星形成進化、すなわち収縮と膨張のサイクル、の中で生じる。

塵ダイポールから 太陽系へ

星は重力さえあれば、収縮して塵によって重力エネルギーを逃がしてさらに収縮する。塵は、重力が効かないので、そのままでは収縮できない。ガスの質量も一緒にすれば（キャメロンモデル）

木星のような巨大惑星は、自己重力で形成できる。しかし、地球のような小さな天体を作るのはむずかしい。いろんな考えがある。さらに、宇宙で石ころや砂粒をつくることは不可能であろう。

ともかく、微塵から砂粒を作るのは大変手間暇のいるしごとである。宇宙では、星やブラックホールは、割と簡単にできるが、道ばたの石ころを作るのはとてつもなく手間がかかる。地球のような 10000km のサイズをとマグマを経て、それが冷えてから、割れて砕けて裂けて散る必要があるらしい。

黒体 1) CMB 2) 星 (F型/G型矮星) 3) 塵 を保証する “もの/こと/素過程” は何か？

フォトンと物質との間の多数回の相互作用※

初期の情報が失われる、もっともありうるフォトンのエネルギー分布を実現する。

※ 相互作用：1) コンプトン／トムソン散乱、2) 水素負イオン H^- 、3) 格子中の自由電子

2) G型F型矮星大気中で、金属電子から出された電子が、水素原子や水素分子と負イオン (H^- ・ H_2^-) を形成する結果、0.75 eV 以上 $\sim 1.65 \sim 0.4 \mu m$ の波長のフォトン吸収放射する。水素負イオンは3体問題なので、連続吸収をひき起こして、黒体スペクトルに近似する。

3)

自由電子がフォトンと熱平衡-粒子の運動や格子の振動-を仲介して、熱放射に導く。