

2012 年度 第 42 回天文・天体物理若手 夏の学校

光合成生物のアンテナ機構から推測する 系外惑星の biosignature

筑波大学 D1 小松 勇

2012 年 8 月 1～4 日

1 背景

1.1 系外惑星

1995 年の最初に観測された系外惑星はトランジット法、視線速度法、直接撮影など様々な観測手法により発見されており、2012 年 8 月 29 日現在で 778 個発見されている。特に近年では 2009 年に打ち上げられた NASA の Kepler によりにより候補天体を含めその数は大きく更新されている (約 2000 個追加)。

今後十数年で系外惑星の反射スペクトルを観測できることが期待されており、そのスペクトルから生命の痕跡を見つけ出す指標である biomarker (biosignature) が様々に提案されている (O₂、光合成生物など)。本研究ではこれらのうち、光合成生物由来のスペクトルに見られる red edge に着目する。

1.2 red edge

red edge は光合成生物の反射スペクトルにおいて近赤外領域に見られる特徴的な急勾配である。これは地球照の観測で確認することができる (図 1)。観測されたスペクトルは上の黒の線で示されており、計算によって算出されたスペクトルが黄の線で、これは下に示されている大気中の気体や雲などの効果の総和になっている。計算と観測のスペクトルにおいて近赤外領域である 750nm 辺りに red edge と見られる特徴的な勾配を見ることができる。ここで注目すべきは計算で求められたスペクトルと観測で得られた結果が良く一致しているということと、下の図で黄緑で示された植生の効果によって近赤外領域において大きく上昇に転じているということである。

red edge はかなりマイクロなところに由来があり、詳細は不明であるが細胞壁での光の反射及び透過などが寄与していると言われている。例えば図 2 は落葉性の植物の反射スペクトルである。これによると可視光の緑の辺りに色素 (後述) の吸収領域があり、近赤外領域には色素での吸収の効果

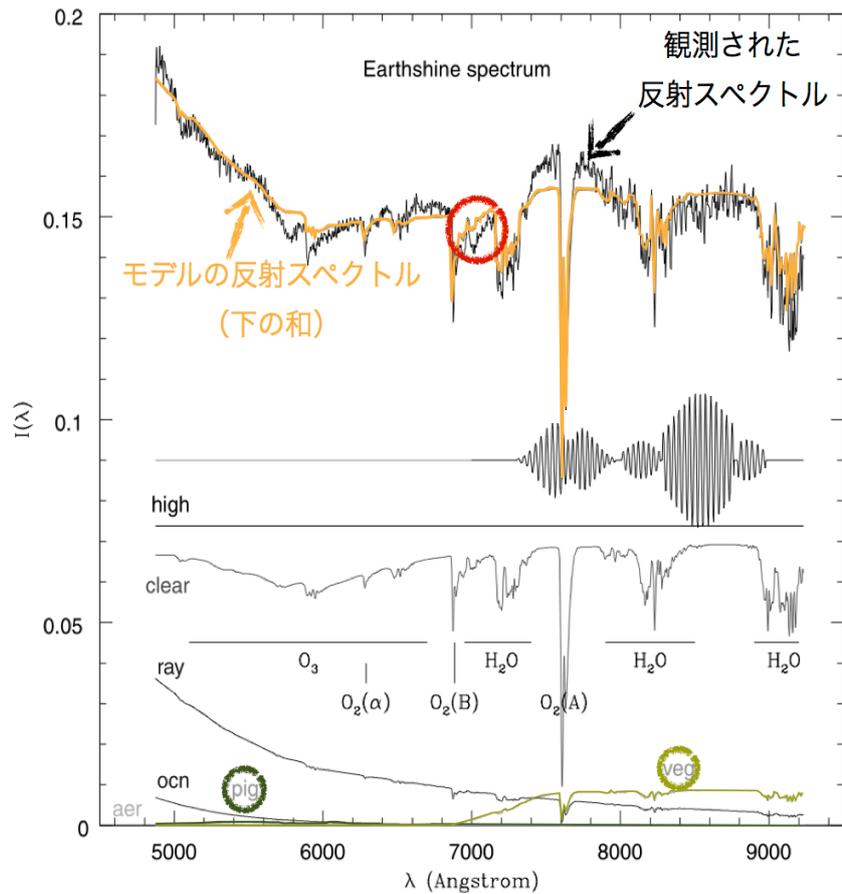


図1 地球照の反射スペクトル

に加えて光の反射と透過によってできた特徴的な急勾配を確認することができる。

地球上での光合成の機構を図3に示す。詳細を省略してあるが、水を分解して酸素ができる過程で、電子という形で様々な物質が媒介しながらエネルギーを伝搬させ二酸化炭素を炭水化物に還元する。図に示されている光化学系の外側はアンテナ系と呼ばれ、ここで光を捕集する。アンテナ系は色素やタンパク質などからなり、色素は下の図に示されているように円状に配置されている。色素(クロロフィルa)の構造は右下に示してある。

2 手法

本研究においては、光を捕集する光化学系のアンテナ系に注目してその電子状態を計算する。ただし、光化学系の電子状態を全て計算するのは計算コストが膨大になってしまうので、近似計算する。本研究では Light harvesting model を構築した。光化学系のアンテナ系の色素1つ1つを1つの点と近似し、双極子-双極子相互作用により他の色素(ここでは点に相当)に移動するのを追う。

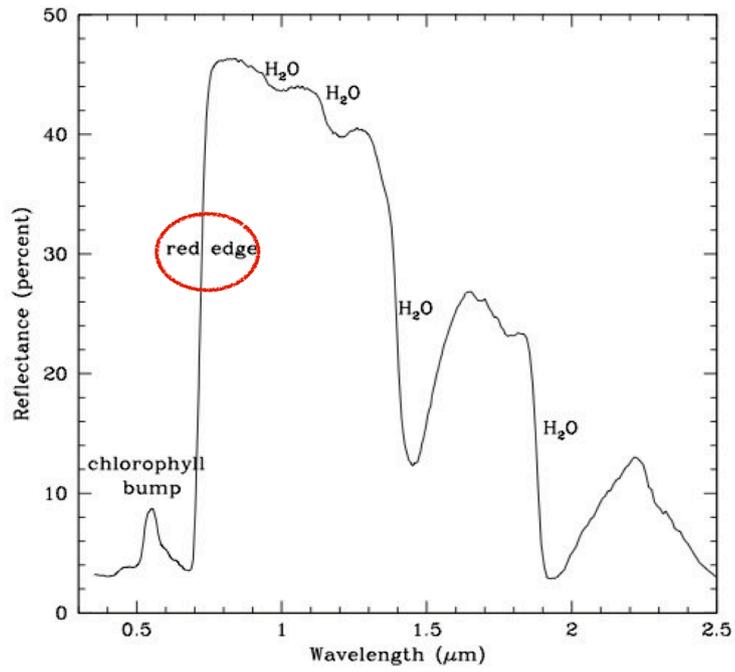


図2 落葉性の植物の反射スペクトル

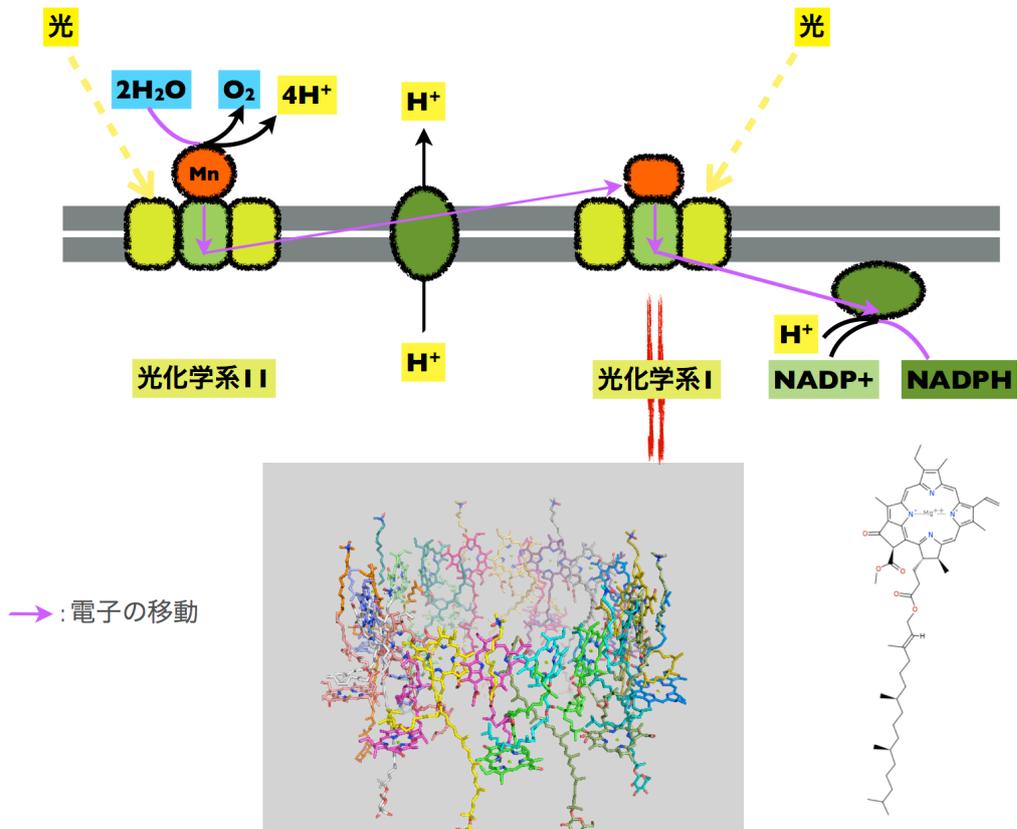


図3 地球の光合成機構 (光化学系)

アンテナ系のハミルトニアンを

$$H = H_0 + H_{int} \quad (1)$$

のように表す。双極子-双極子相互作用を考慮しない場合のハミルトニアンは、

$$H_0 = \sum_{k=0}^N E_k a_k^+ a_k \quad (2)$$

と表すことができる。ここで E_k は k 番目の色素における遷移エネルギー、 a_k^+ は生成演算子、 a_k は消滅演算子である。双極子-双極子相互作用のハミルトニアンは

$$H_{int} = \sum_{k<l}^N \mu_k \mu_l \frac{\cos(\theta_{kl} - \theta_{lk}) - 3 \cos \theta_{kl} \cos \theta_{lk}}{4\pi \epsilon_0 R_{kl}^3} a_k^+ a_l \quad (3)$$

と表すことができる。 μ_k は k 番目の色素における遷移双極子モーメント、 R_{kl} は k 番目と l 番目の色素の距離、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

3 結果

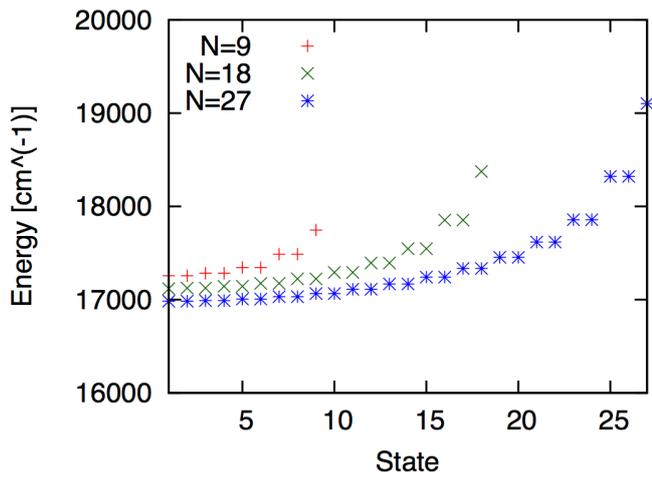
ここでは色素としてクロロフィル a を用いた。まずは円状に配置されているアンテナ系の直径や色素の数を変えて固有エネルギーを算出した。(図 4)。横軸の State は色素の数に相当している。(a) 直径を固定して色素の数を変える計算と、(b) 色素の数を固定して直径を変える計算をする。(a) では同じ直径で色素の数を大きく、色素間の距離が詰まっている程他の色素にエネルギーが伝搬されていることがわかる。(b) においては同じ色素の数で直径を大きくすると、State が大きい程エネルギーが大きい他の色素に伝搬されにくい様子がわかる。これはバクテリオクロロフィル a のような他の色素においても同様の傾向があることがわかった。これらによりモデルの妥当性を確認することができた。

4 今後の課題

現在のモデルでは地球上にはない色素の配置などから遷移双極子モーメントを算出することができる。これによりどの波長域に吸収する部分があるかを見る。さらに、周りにあるタンパク質の効果も取り入れて計算することができる。

今後は長波長側に optimize された光化学系の機構に focus を当てて考えて行くつもりである。これは地球上の光合成生物の光化学系は最大 2 つであるが、低温の主系列星を公転する惑星において 3 つ以上光化学系を持つ光合成生物も考えられる。その場合 red edge が長波長側にずれることが考えられ、そのときのアンテナ機構の状態やどこまで長波長側にずれるかについて議論していく予定である。

(a) 直径 5.230 nm



(b) 色素数 18

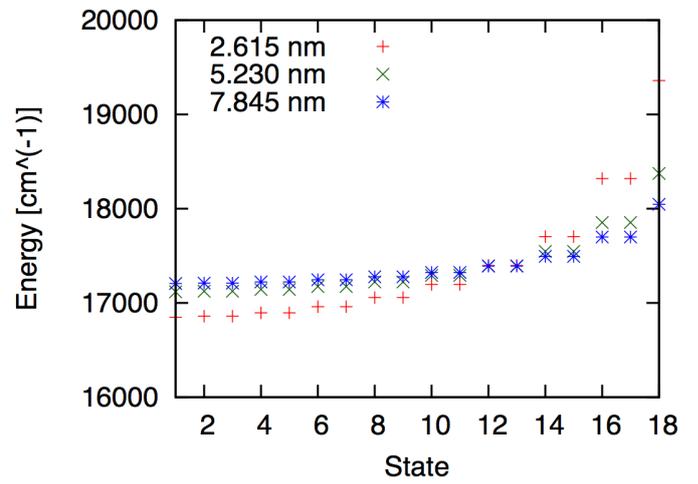


図4 遷移エネルギーの固有値