

1. 海洋の雪(マリンスノー)と将来の気候

北海道大学大学院地球環境科学研究科 山中康裕

1. はじめに

1980年代まで、気候と言えば、日々の天気や季節変化などの気象現象の延長として理解されてきたと思います。しかし最近10年間、海洋・陸面と空間的な拡がりと共に、物理的な過程に加えて、生物的・化学的な過程を含めたものとして理解されるようになりました。地球温暖化問題の中で、1990年代は二酸化炭素収支の問題として海洋や陸上植生の役割が議論され、2000年代は温暖化の影響を受けた陸上植生や海洋生態系がさらに温暖化を加速するのではないかという、気候と生態系の相互作用が議論されています。また、最近の気候研究の一つの特徴は、国際的研究が盛んに行われるようになったことです。政府間機関である UNESCO(国連教育科学文化機関)やそれに対応した非政府組織 ICSU(国際学術連合会議)のもとで、物理的な側面としての WCRP(World Climate Research Programme, 世界気候研究計画)とともに、生物化学的な側面として IGBP(International Geosphere-Biosphere Programme, 地球圏-生物圏国際協同研究計画)が1990年から行われています。この IGBP もとで、現在、大気・陸面・海洋について数多くの気候と生物に関する国際計画が行われています。

今日は、気候における学問や新しい見方が生まれていく様子を伝えられたら嬉しく思います。

2. 大気・陸上植生・海洋を巡る炭素循環

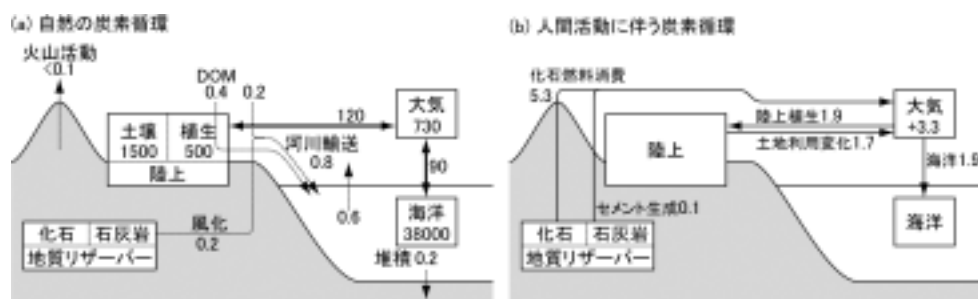


図 1:(a)自然と(b)人間活動に伴う炭素循環。各要素における炭素量(1PgC)とその間のフラックス(年間 PgC) [IPCC,2001 を日本語化]。

まず、大気・陸上植生・海洋に存在する炭素量とその間のやりとりについて見てみましょう(図1)。2003年における二酸化炭素の年平均濃度は約372ppm(1ppmは空気量の100万分の1)であり、炭素量約730PgC(1PgC=10¹⁵gC=1GtC)に相当し、陸上の植生と土壌の炭素量がそれぞれ約500PgC、約1500PgC、海洋の炭素量は約38000PgCと見積もられています。また、大気-海洋-陸上植生間の人為起源のやりとりは、化石燃料の消費に伴う放出量が年間5.4±0.3PgC、大気-海洋間のやりとりが年間-1.9±0.6PgC、土地利用の変化に伴う放出量が年間1.7PgC(年間0.6~2.5PgC)、陸上植生の吸収量が年間-1.9PgC(年間-3.8~0.3PgC)、それらの合計に相当する大気中二酸化炭素の増加量は年間3.3±0.1Pgと見積もられています。人間活動によって放出された二酸化炭素の行方を議論する際に、問題をややこしくする点は、人間活動に伴うやりとりが元々自然あるものに比べて一桁・二桁小さいために、それらの量を観測によって正確に見積もることが難しいということです。例えば、元々の循環の見積もりでは省略してしまうような陸上から海洋への河川による炭素の輸送とそれに伴う海洋から大気へあるいは海底への輸送量(図1a)が、人間活動に伴うやりとりを考えると無視出来ない大きさになることから、想像出来るかと思えます。

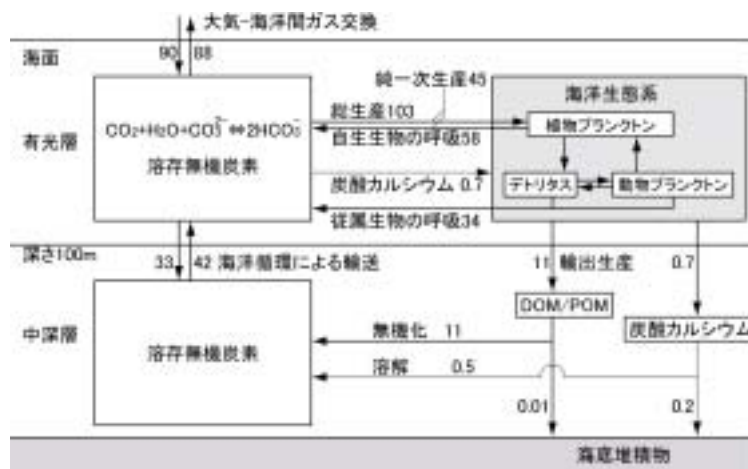


図2: 海洋中の海水と生態系間の詳細なやりとり(年間 PgC) [IPCC,2001 を日本語化]。

海洋中の二酸化炭素循環は、海洋循環による物理過程と海洋生態系による生物化学過程に分けて考えられますが、両者は密接に結びついています(図2)。海洋に吸収された二酸化炭素は、二酸化炭素だけでなく重炭酸イオン(HCO₃⁻)と炭酸イオン(CO₃²⁻)の形で海洋に溶けています。植物プランクトンの光合成により、海水中の二酸化炭素や栄養塩から有機物が作られます(基礎生産, GPP)。その量はおよそ年間100PgCで陸上植生とほぼ同じ程度で、その約1割が、沈降粒子(Particulate Organic Matter, POM)や溶存有機物(Dissolved Organic Matter, DOM)として有光層より深いところへ輸出されます。これらは輸出生産(Export Production)と呼ばれ、およそ年間11PgC程度と見積もられています。

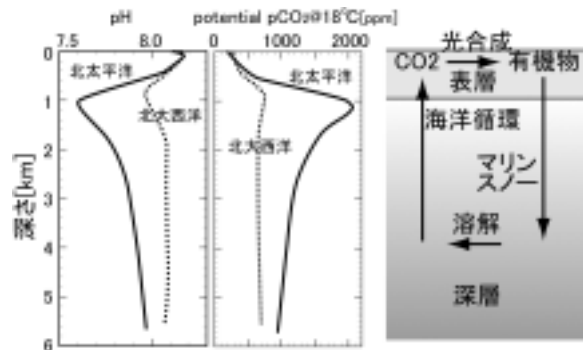


図3: マリン・スノーと海洋循環による炭素循環と pH と二酸化炭素分圧の鉛直分布。

沈降粒子は、プランクトンの死骸や糞がある程度どの大きさに凝集して落ちてゆくもので、潜水艇から窓の外を見てあたかも雪が降るように見えることから、マリン・スノー(海の雪)と呼ばれています。マリン・スノーとして深海に運ばれた有機物は、細菌によって分解され、再び海水中の二酸化炭素や栄養塩の形に戻ります(図3)。そのために、海洋表層では、二酸化炭素分圧は現在の大気中二酸化炭素濃度と同じぐらい、北太平洋の深海ではおよそ 2000ppm にもなっています。正しく言うと、このマリン・スノーのおかげで、海洋表層の二酸化炭素濃度は低くなり、それと同じになるように大気中二酸化炭素濃度が決まっています。もし、海洋に生物が絶滅してしまったらどうなるのでしょうか？マリン・スノーによって作られていた表層で低濃度、深海で高濃度という関係がなくなり、大気中二酸化炭素濃度が 600ppm ぐらいに上昇すると見積もられています。これら生物生産とマリン・スノーの役割は、海洋表層の二酸化炭素を深海へ押し込めているようなものなので、生物ポンプと呼ばれています。

海洋はおよそ pH8 の弱アルカリ性です。海水中から弱酸である二酸化炭素が有機物となって取り除かれる表層ではややアルカリ性側により、有機物が溶ける深海では酸性側によります(図3)。北大西洋と北太平洋を比べてみると、深層水が形成される北大西洋深海では pH や二酸化炭素濃度はあまり表層のものとは変わりませんが、深層水の終着点である北太平洋では、表層のものと大きく異なります。

3. 海洋の生態系

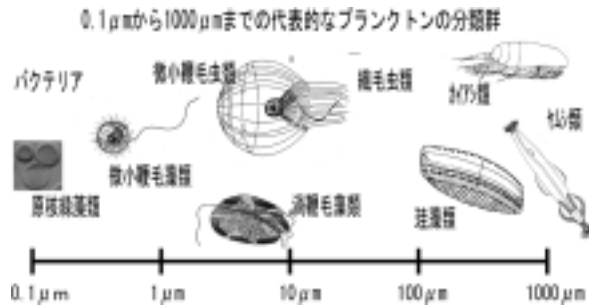


図4: 海洋のプランクトンとその大きさ

海洋中には、数多くのプランクトンが棲んでいます。そのサイズは 1mm 以下で、サイズが 10 倍大きくなると体積は 1000 倍になるので、最も小さい $0.1 \mu\text{m}$ の原核緑藻類・バクテリアが 1 兆匹集まると大きなカイアシ類やヤムシ類 1 匹に相当します(図 4)。これは雲粒と雨滴のサイズのような関係です。基本的に、動物プランクトンは少し大きな植物プランクトンや動物プランクトンを食べていますので、サイズが小さいものから大きなものへの食物連鎖が存在します。栄養塩が豊富な沿岸域・北太平洋亜寒帯域・南極海域では大きな珪藻類が生息し、食物連鎖は太く短くなっていますが、亜熱帯域のような深海からの栄養塩供給が少ない海域では、原核緑藻類・微小鞭毛藻類のような小さなプランクトンから始まる食物連鎖が細長くなっています。食物連鎖の段階が一つ増えるとそれだけ上位に食物が伝わらなくなるので、魚にとっては、元々植物プランクトンによる生物生産が少ないのに加え、餌が減ることになります。従って、沿岸域や湧昇域で魚が多く棲むようになります。逆に、海洋中の物質循環のやりとりを考える際には、魚などの高次レベルの生物に伴う物質循環の量は無視出来ることとなります。

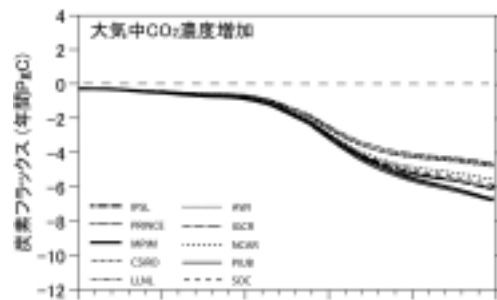


図 5: 海洋炭素循環モデルを用いた海洋による二酸化炭素の吸収量の見積もり[IPCC,2001 を日本語化]。IGCR が私のグループの結果。

全海洋を表現した 3次元の海洋大循環モデル(簡単な説明は 4.で述べます)に生物ポンプの効果を組み込み、海洋による二酸化炭素の吸収量の見積もりをするモデルが 1990 年代に開発されました。私が 1992 年に計算したのが日本で最初になります。その後、国際研究協力として、OCMIP(Ocean Carbon-cycle Model Intercomparison Project, 海洋炭素循環モデル相

互比較研究)が行われ、私のグループを含めて世界10グループが計算を行いました。これらの結果は、5.で述べる IPCC 報告書で、海洋による二酸化炭素の吸収量の見積もりとして採用されています。残念ながら、これらのモデルではまだ海洋生態系を十分に正しく表現しているものではありませんので、現在、より適切な生態系を表現するモデルを開発し、新たな見積もりを行おうとしているところです。

地球温暖化による海洋生態系やその生産のちょっとした変化が重大な影響を及ぼしうる可能性があります。それが、どの程度の量なのか？どれくらいの時間が掛かって変化するのだろうかということが、今研究されています。

4. 地球温暖化の簡単な説明

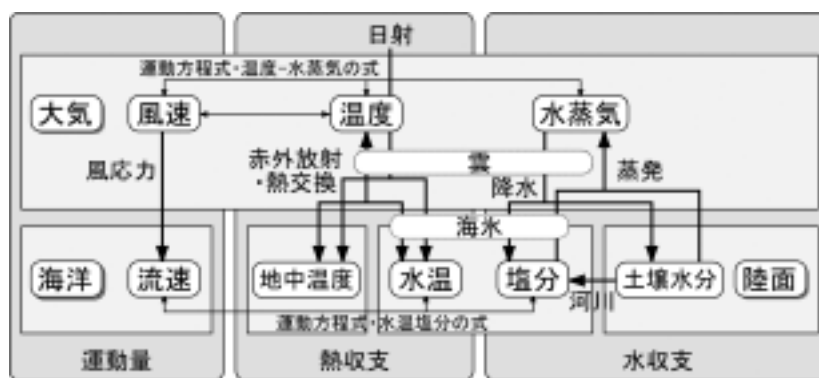


図 6: 大気海洋結合大循環モデルの模式図。

ここでは、大気中二酸化炭素濃度が上昇したときに、気温などの将来の気候がどうなるかを予測するモデルについて説明しましょう。大気の流れも流体力学方程式に従い、スーパーコンピュータを用いて計算します。東西南北に数 100km 程度の粗い格子をとると、高気圧や低気圧、低気圧に伴う前線や降水帯などが大まかに再現できます。基本的には天気予報で用いられているモデルと同じですが、数十年から数百年間ぐらい時間積分する必要から、格子サイズは天気予報のものに比べるとかなり粗いものです。今、横浜にある地球シミュレーターという世界最高速のスーパーコンピュータを使って、天気予報と同じくらいの細かな格子で計算が行われつつあります。図 4 に示すように、大気-海洋間や大気-陸面間の熱や水、運動量のやりとりを計算しながら、大気は大気で運動方程式に従った流れの計算、あるいは、日射や赤外線などによる大気中の加熱や冷却、雲の効果などを格子毎に計算し、海洋は海洋で運動方程式に従った流れの計算や水温、塩分などの分布の計算、陸面は土壌水分や地中温度、さらに積雪や融雪、河川など計算していきます。

天気予報などの短時間の予報では観測された海面水温を境界条件として計算しますが、地球温暖化の問題を考える際には海面水温の昇温がどの程度遅れるかを求める必要があります、大

気や海洋、陸面を同時に解く必要があります。従って、上のような複雑な計算を行う必要があるのです。このモデルを大気大循環モデルと海洋大循環モデルを結合させたということで大気海洋結合大循環モデルと呼ばれていて、最近では気候モデルとも呼ばれています。大気大循環モデルでは観測された海面水温を境界条件として、あるいは、海洋大循環モデルでは観測された海上気温や降水、海上風を境界条件として用います。しかし、大気海洋結合大循環モデルでは、それらの観測値を用いません。そのために、観測できない将来予測が出来る一方、計算結果が実際の気候状態から時間と共に大きくずれてくることが起こりやすく、より確実な予測をするために努力しているのが現状です。

ここでは、世界の温暖化研究のパイオニアである真鍋淑郎先生の論文(Manabe and Stouffer, 1991)に沿って、大気海洋結合大循環モデルの結果を見てみましょう。大気中二酸化炭素濃度を年 1%ずつ増加させる(70 年後に 2 倍の濃度に達する条件)と、地上気温は線形的に上昇し、70 年後には、全球平均気温が約 2.3 上昇し、北半球では約 2.8 、南半球では約 1.9 となりました。彼の別の計算である 2 倍の二酸化炭素濃度にした長時間積分の最終的結果は両半球とも約 4 昇温するため、南半球では、最終的な昇温の程度が小さいのではなく、昇温が遅れていることとなります。また、北大西洋でも昇温が遅れている海域があります。

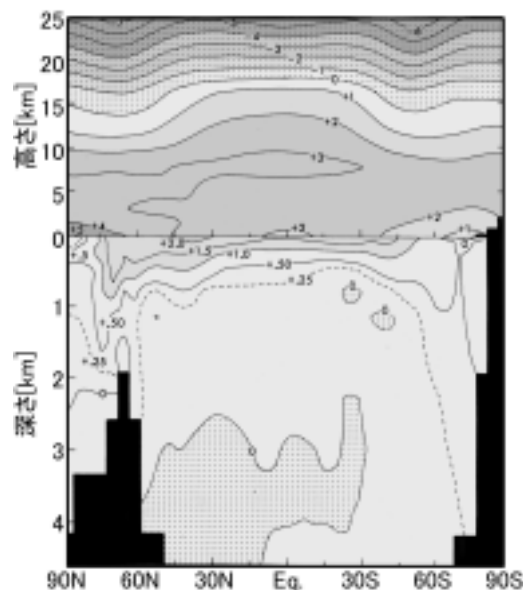


図 7: 大気二酸化炭素濃度が年 1%で漸増し 2 倍になった 70 年後、東西平均した南北-鉛直断面大気中の気温上昇(上側)と海洋中の水温上昇(下側, Manabe and Stouffer, 1991)。単位は $^{\circ}\text{C}$ 。

70 年後の大気中や海洋中の昇温は、大変興味深い緯度-高度分布をしています(図7)。北半球の極域の地表面付近で大きく約 5 $^{\circ}\text{C}$ になっているのは、(アイスアルベド・フィードバックと呼ばれる)日射を反射しやすい積雪や海氷の面積が縮小し、地表面が日射を吸収しより大きく昇温すること、および、大気の成層が強いためにごく大気の下層のみが暖まりやすいためによ

って引き起こされているためです。大気中の高緯度への水輸送の増加に伴い、高緯度では、降水が蒸発に比べ増加し、海洋表面塩分が低下し、北大西洋や南極海で海洋の成層状態が強まります。そして、北大西洋や南極海では、冬の深いところまでの混合が小さくなり、冬に冷えやすくなり、昇温が非常に小さくなっています。対流圏では、二酸化炭素濃度が上がったために、赤外放射が上空の二酸化炭素に吸収されずに地球外へ直接出来る高さが上昇するために(いわゆる温室効果)、対流圏全層にわたって 2 以上昇温しますが、地球外へ直接赤外放射出来る成層圏(高さ 15km 以上)では、二酸化炭素濃度が増えたために積極的に赤外放射が起り、高くなるにつれ気温が低下しています。低緯度の海洋で深さ 500m より浅いところのみが昇温しているのに対して、北緯 70° 付近や南極大陸に沿って、より深いところまで昇温しているのは、北大西洋や南極海おける深層水や底層水の形成に伴って、温かな水がより深いところに運ばれるためです。

ひとつ注意しておきたいことがあります。今から1万年前の氷河期には北大西洋における深層水形成が止まっていたことが知られています。また、今後、地球温暖化に伴い、深層水形成が弱まることも予測されています。この2つのことを結びつけて、温暖化に伴って氷河期が始まるのではないかと主張する人がいますが、すでにサイエンスとしては、今までの大気海洋結合大循環モデルの結果から否定されています。モデルの結果では、深層水形成が弱まることにより、周辺地域に比べて昇温が遅くなり、温暖化を遅らせている効果として現れています。この効果が非現実的に強くなり、温暖化を反転させると考えるのは無理があるということです。「現状のモデルが観測された気候状態を完全には再現していないので、氷河期が始まる可能性は捨てきれない」という論法にも無理があると私は思います。

5. IPCC (気候変動に関する政府間パネル)とその報告書

1985	IPCC設立	
1990	第1次評価報告書	
1992	第1次報告書補遺	条約定例会議UNFCCC採択
1993		50ヵ国UNFCCC批准
1994	放射強制力に関する特別報告書(WG1)	UNFCCC条約発効
1995	第2次評価報告書	COPI(ベルリン)
1996	[[1996発刊]]	COPIII(ジュネーブ)
1997	地域的影響に関する特別報告書(WG2)	COPIII(京都) 京都議定書
1998		COPIII(ブエノスアイレス)
1999	航空と全球大気に関する特別報告書(WG1+WG2)	COPIII(ロンドン)
2000	排出シナリオに関する特別報告書(WG3)	COPIII(ワシントン)
2000	技術転換の方法論(技術編)に関する特別報告書(WG2)	COPIII(ハーグ)
2000	二酸化炭素回収に関する特別報告書(技術)	
2001	第2次評価報告書	COPIII(モントリオール)
2002		COPIII(マラケシュ)
2002		COPIII(ニューデリー)
2003		COPIII(パリ)
2005	CO2回収貯留に関する特別報告書(WG3)	
2007	第4次評価報告書	

COPI(Conference of Parties, 締約国会議)

図 8: IPCC と UNFCCC に関する年表。

地球温暖化に対する2つの国際的枠組みを紹介したいと思います。ひとつは、科学者による研究成果をまとめ、それを政治や一般の人に伝える枠組みで、国連の機関である国連環境

計画 (UNEP, United Nations Environment Programme) と世界気象機関 (WMO, World Meteorological Organization) のもとで作られた IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル) です。もう一つは、政府間交渉を行う UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change, 気候変動に関する国連枠組み条約) です。

IPCC は、「温暖化防ぐために二酸化炭素放出を削減すべき！」というような特定の方向性を持たずに、現在分かっていることやまだ分からないことなどを客観的に整理し科学的知見をまとめもので、1988 年に設立され、第1次報告書(1990 年)、第2次報告書(1995 年)、第3次報告書(2001 年)と特定の話題に対する特別報告が行われています。第4次報告は 2007 年に予定されており、その報告に反映されるように温暖化問題に関する研究が現在行われています。この IPCC 報告をもとに国際政治として行われるのが、UNFCCC 条約締結国による会議(COP, Conference of Parties)です。有名な京都議定書は COP3 で決められたものです。

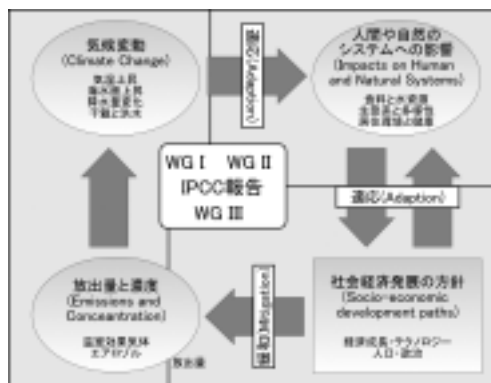


図 9: IPCC の各作業部会 (WG)と温暖化影響と対策の考え方[IPCC,2001 を日本語化].

IPCC は3つの作業部会(WG, Working Group)から成り立っています。WG1 では、WG3 で予測された人間活動に伴う二酸化炭素などの温暖化効果気体の放出量のもとで、それらの大気中濃度が将来的にどうなるか？そして、気候がどのように変化してゆくか？などを予測します。WG2 では、WG1 の予測を用いて、農業にどんな影響を及ぼすかなどの社会的影響を予測します。WG3 では、将来の社会発展がどうなるか？その結果として温暖化効果ガスが放出されるか？などをいくつかのシナリオという形でまとめて予測します。

IPCC でよく用いられている2つの用語を紹介しましょう。適応(adaptation)とは、温暖化によって引き起こされた影響や問題に対して対策を取ることで、いわば対処療法と言えます。また、緩和(Mitigation)とは、温暖化しないように対策を取る根本治療と言えます。地球温暖化問題の難しいところは、緩和のための政策をとってもその効果が本当に聞いているかが分からないところです。また、他の環境問題と異なって、国際社会全ての協力が必要となることです。各作業部会の議長やメンバー、執筆したものを査読する人たちなどは、出身国や性別などを慎重に考慮して選ばれています。

6. 大気中 CO₂ 濃度の安定化と CO₂ 放出削減

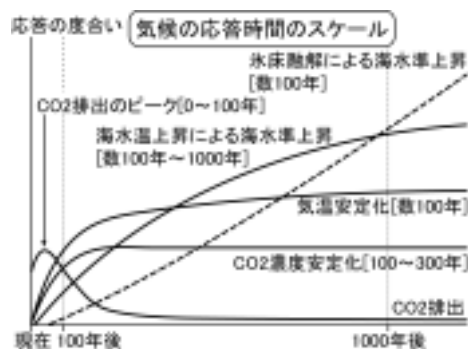


図 10: 気候の応答時間の時間スケールに関する概略[IPCC,2001 を日本語化]。

地球温暖化問題の難しいところは温暖化の影響がゆっくりと現れることです。もし、国際社会が協力して二酸化炭素放出を大幅に削減したとして、その後の変化を見てみたのが図 10 です。放出が年間 1~2Pg まで削減されないと、大気中二酸化炭素濃度は、その増加が止まらず、数 100 年後にようやく一定になります。それに伴って、気温上昇も 100 年程度遅れて収まります。しかし、深海まで暖まるのに 1000 年程度かかるので、海水が膨張することにより海水準上昇が続き、さらに南極大陸やグリーンランドに存在する氷床が融けることによる海水準上昇は、緩やかな場合には 1000 年以上かかり融けるか、あるいは突然と大幅に融けるかすると考えられています。従って、20 世紀後半から大気中二酸化炭素濃度が急速に上昇した現在は、まだまだ地球温暖化の影響が現れ始めたほんの入り口の段階なのです。

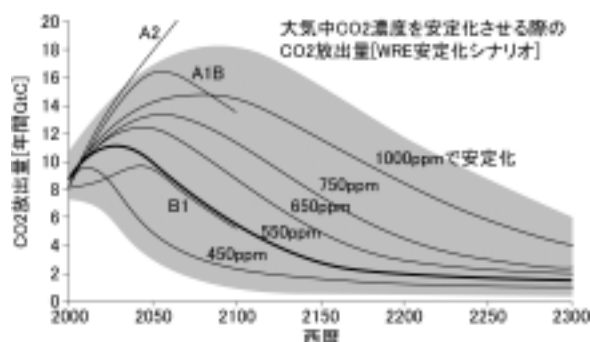


図 11: IPCC 各シナリオ(A2, A1B, B1)と各濃度での安定化シナリオ[IPCC,2001 を日本語化]

では、大気中二酸化炭素濃度の上昇を止めるためには、放出をどの程度削減したらよいのでしょうか？地球温暖化に関する国際的協力が行われない場合(A2)は急速に放出量が増加することが予測されていますが、大気中二酸化炭素濃度は上昇することをやめるためには、B1

のように非常に大幅に削減しなければいけなくなることも予測されています(図11)。5月にパリで行われた温暖化に伴う海洋に関する国際会議では、550ppm で安定化した場合は、それほど温暖化に伴う影響は深刻にはならないが、それを超える場合には問題が生じるだろうという報告がありました。大気中二酸化炭素濃度を 550ppm に抑えようとすると、放出量を現在年間7PgC から約年間2PgC まで削減することが必要と予測されています。

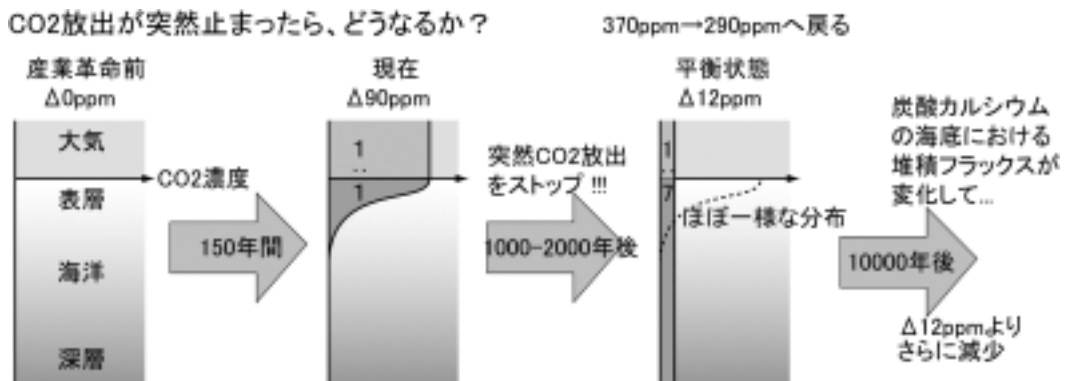


図 12: 海による二酸化炭素吸収量のたまかな見積もり。

現在、海洋は、放出された年間 7PgC のうち年間 2PgC を吸収しています。海洋による吸収はのんびりで行われるので、例えば、いま二酸化炭素の放出が止まったとすると、産業革命前から 90ppm 上昇したうちの約 78ppm までを数 1000 年後には吸収してしまう能力を持つように、数 1000 年程度の時間スケールでは大きく貯留する能力を持っています(図12)。従って、人間活動に伴い年間2GtC 放出していく場合には、海洋がそのまま年間2PgC 吸収することにより、大気中二酸化炭素濃度が安定化する状態を 1000 年以上続けることが出来ます(2000 年ぐらゐると海洋の吸収する能力もなくなり放出量をゼロにしなければいけません)。

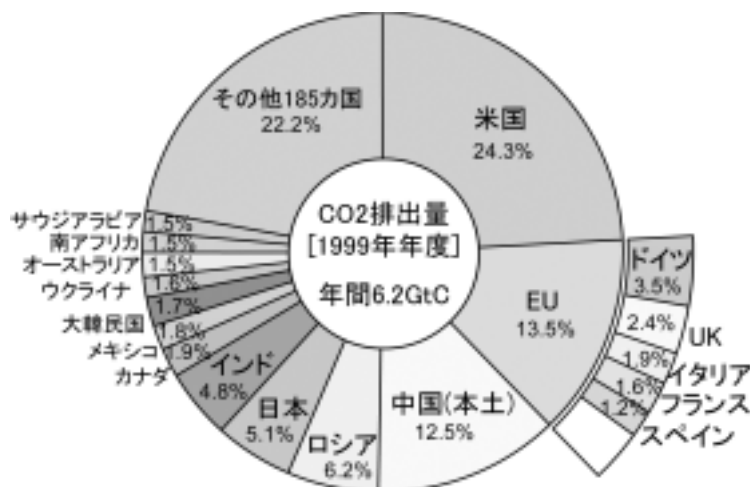


図 13: 1999 年度の二酸化炭素放出量の各国別割合 [オークリッジ研究所提供のデータをグラフ化]。

今見てきたように、大気中二酸化炭素濃度の上昇を止めるためには、放出量を年間 2PgC まで減らす必要があります。1999 年度の各国の放出量(図 13)を見てみると、その削減の難しさが想像されると思います。京都議定書に調印した EU と日本が 1990 年度に対して各々 8%、6% 削減したとしても全体の 1.4%削減にしかすぎません。日本の放出量は、実際には増加してしまい京都議定書の約束を守ることが難しくなったことが、ニュース報道されています。先進国である米国・EU・日本が仮に半減したとしても 21%削減で、年間 1.3PgC 削減で、必要となる年間 4 ~ 5PgC には遙かに及びません。急速に放出量を増加させている中国は、人口一人あたりで見れば放出量は米国の 1/10・日本の 1/4 で、京都議定書の削減対象国にはなっていません。大気中二酸化炭素濃度を安定化させる程度に削減することは、将来的に発展途上国が安いエネルギーである化石燃料を使って経済成長をすることと、大きな矛盾を含んでいることが分かります。先進国における省エネルギーや自然エネルギーの活用だけでは、地球温暖化問題を解決することにつながりません。

現在、使用した化石燃料を大気中に放出するのではなく回収し、回収したものを地中や海洋深部に隔離・貯留することが検討され、IPCC でも来年度その報告書を出す予定になっています。これらは、いわば必要悪として、真剣に検討すべきと個人的には考えています。と同時に、発展途上国も含めた国際的な場で、環境に配慮した経済活動を優先するように、人々の意識を変えていく議論・教育を行っていく必要があると思います。

2 . 身近な天気～キャスターの目を通して～

日本気象協会北海道支社 石掛 貴人

1 . はじめに

天気はよく挨拶の代わりに使われます。みなさん関心があるし、しかも私生活を干渉するわけでもなく無難だからでしょう。「きょうは暑いですね！」「午後から雨が降るそうですよ。」など、道でばったり会ったご婦人が立ち話する光景はよく見かけます。また、しばらく連絡を取っていなかった友人との近況報告にも天気の話は使われたりします。「こっちは暑いけど、そっちはどう？」などとメールが来たり…。

今回の講演では、天気キャスターの目を通して私たちの身近な天気について理解を深めていただければと思い企画いたしました。前半ではキャスターの生活やTVの裏話など普段なかなか伝えられないことを中心に、また天気予報の自由化について感じることもお話ししたいと思います。後半は、生活に身近な天気をいくつか例を挙げてお話し致します。

2 . キャスターとしての成長

キャスターになったきっかけは「天気が好き」ということもありましたが、やはり気象予報士の資格を取れたことが大きいと思います。高校や大学受験の勉強は「しなくてはいけない」「やらされている」といった受け身でしたが、予報士の勉強は好きなことだけあって一生懸命でした。おかげで、第一回（1994年8月）の気象予報士の試験で合格することができ、大学で学んでいることと違う職種ではありましたが、翌年の就職活動では気象関係への会社訪問もなんとかうまくいきました。

1996年（平成8年）に気象協会関西支社に採用になり、日勤や夜勤といった交替勤務（ラジオの解説や放送局向けの原稿作成、局地予報など含む）を1年ほど担当しました。関西は土地柄もあって個性あふれるキャスター（解説者）が多く、解説の基本中の基本「伝える」ことをここで学ぶことができ感謝しています。翌1997年4月には若葉マークがようやく取れかかった頃ではありましたが、たまたまTVの解説の機会が訪れました。NHK大阪放送局のローカル放送「おはよう関西」のオーディションが行われ、採用が決まったのです。それから2000年3月までの3年間、近畿地方の朝の天気予報を担当させて

いただきました。初めての放送では、出ていない注意報を言ってしまうたり、緊張のあまり話す内容を忘れてしまったり、放送終了時間を間違えて話の途中で番組が終わってしまったり…。失敗はこのほかにもたくさんあり、関西の方々には迷惑をかけてしまいました。3年間続けることができたのは局の方が辛抱強く使って下さったのと、多くの方の励ましのおかげです。最後の1年は「天気予報は楽しんで、喜んでもらってなんぼ、サービス業」と感じ、都会で見つける季節の変化を大阪城公園を探し歩いて取り上げました。

降板後は情報伝達システムの構築やメンテナンス、予測業務（特定の事業所向け）をした後、2001年9月に現在の気象協会北海道支社に異動になりました。出身が九州なので、雪は降ることがあっても平野部ではほとんど積もらない地域です。関西でも都心では積もることはめったにありません。大阪には5年間いましたが、記憶に残っている雪は5cm積もった1回だけです。「こんなことで天気の伝え手としてどうなのだろう…。」とずっと思っていたところに異動の話があり、新しい世界に飛び出すことにしました。大阪では真夏の厳しい暑さが続いている8月末に、荷物をまとめて札幌にやってきましたが、秋の涼しい風に全身を包まれ、何より夜がぐっすり眠れることが感激でした。ただ、その後の秋から冬への気温低下は強烈で、関西仕様の汗腺だらけの体には堪えませんでした。

そんな中、移り住んで約半年経った翌年2月にSTV「どさんこサンデー」に出演させていただく機会を得ました。まだ、初めての冬を経験している最中で、雪がさらさらで積もるものであること、吹雪のすごさ、厳冬期の痛いくらいの冷え込みなど…実感し始めた頃で、出演させていただきながら勉強させてもらっていました。月1回程度と出番は少ないですが、季節感の違い、雪や寒さの特有の表現方法など、1回1回解説のギャップを埋める作業を自分の中で繰り返し、放送に臨んでいました。そして約1年後の2003年4月からは同局の「あさ6生ワイド」のキャスターも合わせ持つことになり、今に至っています。

早朝（真夜中？）2時起きが続いていますが、寝坊する夢ももう見ることもなくなり、夜は熟睡できることが多くなりました。就寝は20時頃です。幼稚園の子どもより早いかも知れませんね。でも、よい放送には体力と気力が欠かせません。

3. 天気予報の歴史と自由化

1883年（明治16年）2月にE・クニッピングというドイツ人が日本で初めての地上天気図を作りました（次ページ、放送で使用したため一部に加工あり）。これはクニッピングが海に囲まれた日本には暴風警報が必要だという建白書を明治政府に差し出し、採用されたからです。東京気象台が初めて暴風警報を出したのは同年5月で、天気図には発達中の低気圧が四国沖と島根沖に描かれていました。「2つ玉低気圧」で嵐の前兆であり、最初の暴風警報は見事に成功しました。

翌 1884 年 5 月 9 日以降は一日 3 回天気図が作られるようになり、同年 6 月 1 日に日本で初めての天気予報が発表されました。クニッピングが書いた英文の予報は、日本語に翻訳され東京の派出所に掲示されました。「全国一般風ノ向キハ定リナシ。天気は変リ易シ、但シ雨天勝チ」という予報でした。クニッピングが 1891 年に退職した後は日本人が予報を出すようになり、今日まで 100 年以上に渡って続いています。20 世紀に入り、天気図の内容や見方には大気科学が取り入れられて発展し、低気圧の発生から消滅までのプロセスがモデル化されました。温暖前線、寒冷前線と言った言葉が生まれたのは 1922 年頃で、日本の天気図に導入されたのは第二次大戦後の 1948 年前後です。



1950 年頃からは、上空約 30 キロメートルまでの高層天気図が作られ、大気の立体構造から天気予報を組み立てられるようになり、進歩しました。さらに、気象レーダーが大阪（1953 年）や富士山頂（1965 年）などに設置され、細かな降水分布や強度が観測されるようになり、1974 年には全国約 1300 カ所に展開されたアメダス（自動有線ロボット気象計）が運用を開始し、局地的な降水量、風、気温、日照といったデータをリアルタイム感覚で見ることができるようになりました。そして、1977 年に打ち上げられた静止気象衛星“ひまわり”は予報官を悩ませた台風や前線の位置が正確に分かるようになり、天気予報の精度は一段と向上しました。



また、コンピューターによる数値予報は、日本では 1959 年から始まりましたが、最初は予測精度が悪かったです。予報官の評価が変わったのは 1980 年頃からで、明日の天気予報的中率は 1957 年の約 78% から 1995 年の約 83% に上昇し、台風中心位置の 24 時予想の誤差は、1985 年の約 240 キロメートルから 1995 年の約 180 キロメートルに縮まりました。



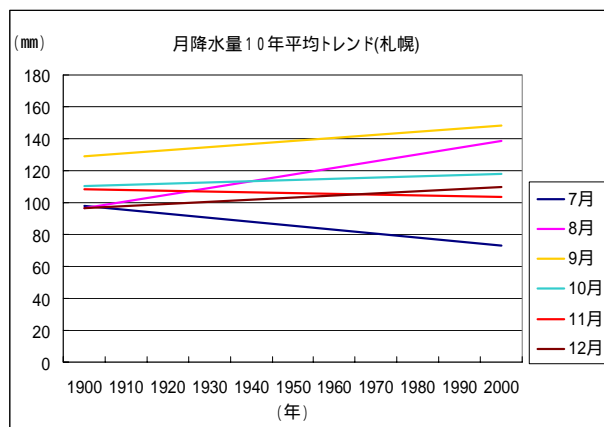
1990 年代は予報自由化の流れが加速しました。気象庁は 1993 年に気象業務法を一部改正し、1994 年には気象予報士制度が始まり、民間でも自由に局地の天気予報を発表できるようになりました。さらに 2000 年からは局地予報だけでなく広域の天気予報（府県予報）も自由化され、2001 年には 1 カ月予報も発表できるようになっています。

2002 年には北海道で初めての気象予報士による 100% 独自予報が始まり（STV どさんこサンデー）、2004 年 4 月には STV で放送される全ての天気予報が気象台の予報を使わない独自予報へと変わっています。

4. 生活に身近な天気

< 北海道にも梅雨出現...? >

札幌では過去 100 年で約 2 度平均気温が上昇しており、年間降水量は約 25% 増加しています。特に降水量に関しては 1 月～3 月、8 月の増加が大きく影響しており、年間の最深積雪量に大きな変化がないことから冬季の増加は湿り雪や雨によるものと考えられます。また、夏季については本州方面から北上した梅雨前線の影響を受ける傾向が強まっています。

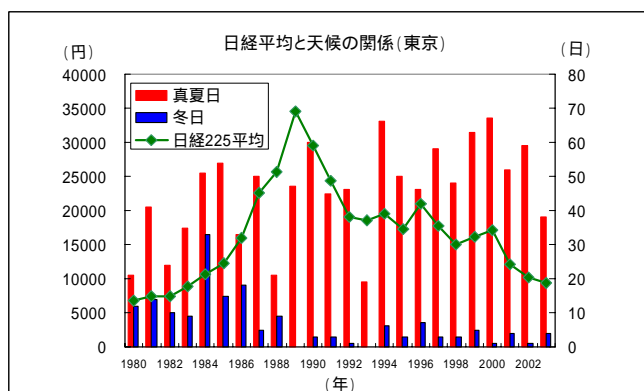


< 経済と天候 >

天気は私たちの生活だけでなく、経済にもさまざまな影響を与えます。長雨は農作物の生育を遅らせたり、冷夏は日照や高温を必要とする穀類を不作にし、クーラーや夏物衣料の売れ行きを落ち込ませます。逆に暑い夏はビールやジュースなど飲料の売れ行きを伸ばし、経済を押し上げる効果があります。

実際に過去の気象データと日経平均株価を付き合わせてみると、景気が拡大している時期はメリハリの利いた季節変化（夏は暑く、冬は寒い）であることが多く、景気が後退している時は冷夏・暖冬傾向が強いことがわかります。バブル景気の株価のピーク（1989 年末～1990 年年初）時は暖冬で東京では一日も冬日がありませんでした。また前年は冷夏に見舞われ、これまで拡大の一途とたどっていた経済の足をひっぱった、あるいは本来あるべき株価へ戻す方向へ気象要素が働いたと言えそうです。

もちろん、経済動向の全てを天候が決めるわけではありませんが、円高不況の 1986 年や平成不況のどん底 1993 年は冷夏、IT バブルの 2000 年前後は暑い夏であり、バブル崩壊後の株価が底値をつけた 2003 年は冷夏でした。



< マラソンと天候 >

今年はオリンピックの年ということもあり、スポーツがいつも以上に注目を浴びることでしょう。オリンピックというとマラソンを思い浮かべる方も多いと思います。ここでは毎回開催地が変わるオリンピックのデータではなく、北海道マラソンの記録を使って天候との兼ね合いを見てみたいと思います。

夏のマラソンは気象条件が厳しく、レース時の平均気温は 25 度前後あるため、熱中症

によるけいれんや疲労、失神など高温が原因による傷害が北海道マラソン全傷害の約半分を占めます。フルマラソンでは、体から 1~3 リットルの水分が失われるため、水分の補給は不可欠です。また、塩分も汗と一緒に体外に排出されるので、こまめに水のほかにスポーツドリンク等も摂取しなければいけません。一般的に体重の3%の水分が失われると、運動能力や体温調整能力が低下するといわれています。夏のマラソンは記録よりも完走重視の姿勢が大事だと思います。

過去の大会結果を見ても、同マラソンで最も速く走った第12回大会（1998年）アンベッセ・トロッサ選手（エチオピア）の2時間10分13秒という記録は気温20度、曇りという好条件の中で出されています。また、この1998年以降で、上位5人（男子）のデータを平均した値で比べてみても、20~25度くらいであれば2時間13~15分程度の記録が出ていますが、30度になると2時間17~18分までタイムが落ちているのがわかります。一般ランナーであれば、暑さ対策をしっかり行い、無理しないことが大切だと思います。

	第12回	第13回	第14回	第15回	第16回	第17回
開催年	1998	1999	2000	2001	2002	2003
開催日	8月30日	8月29日	8月27日	8月26日	8月25日	8月31日
天気	曇り	晴れ	晴れ	曇り	曇り	曇り
気温()	20	25	30	30	21	26
平均タイム (上位5人)	2時間14分04秒	2時間13分02秒	2時間18分02秒	2時間17分05秒	2時間15分32秒	2時間15分00秒

3 . 2 1 世紀の地球温暖化と気象の異変

札幌管区気象台 松尾敬世

私たちは今、地球温暖化という新しい気象に遭遇しつつあります。社会経済活動に伴う二酸化炭素等の排出がこのまま続くと、21世紀は地球温暖化が進行し気象の異変や災害が起きることが予想されます。将来、集中豪雨の増加、海面水位の上昇による高潮被害、産業や生活への悪影響等が心配されています。

地球温暖化は、大気中に二酸化炭素等が蓄積し地球が暖まることにより起きます。地球温暖化を防止するには二酸化炭素等を減らせばいいのですが、これは簡単ではありません。二酸化炭素は私たちの生活の向上に欠かせないエネルギーの消費に伴って発生するからです。

日本は温室効果ガスの排出量を1990年の排出量と比べて2008～2012年の第1約束期間までに6%削減することを京都議定書により国際的に約束しました。日本政府は温室効果ガスの排出削減に向けて地方公共団体、事業者や市民の理解と協力を得て取組みを強化しています。しかし、既に2002年には経済成長に伴い、1990年に比べて排出量が7.6%も増加しています。約束の期間までには結局、今後13%以上も削減しなければならず政府は大変厳しい状況に置かれています。国の対策だけでなく、国民一人ひとりが地球環境保全の大切さを理解し身近なところから排出削減に協力することが大切です。

1 . このままでは21世紀の地球温暖化は進行する

地球温暖化の状況は現在どのようになっているのでしょうか、今後どのように進行するのでしょうか？科学的調査が進められています。それによれば、地球温暖化の影響は既に現れており、このまま二酸化炭素の排出が続くと、21世紀にはこれまでと異なる気象が出現し、気象災害が増加し、社会経済に大きな影響が及ぶことが心配されます。

(1) 地球温暖化の現状

1) 大気中の二酸化炭素の増加

大気中の二酸化炭素の濃度は増え続けています。現在の濃度は産業革命以前の約1.3倍になっています。特に第二次世界大戦以後は世界的な社会経済の拡大により、急激に増えていきます(図1参照)。海洋中の二酸化炭素も増加しています。気象庁は1981年から海洋気象観測船を用いて、北西太平洋の表面海水中の二酸化炭素濃度を測定しています。観測の結果、

約 1ppm/年の割合で増加していることが分かっています。毎年、人間が大気中に排出する二酸化炭素の総量の約 30%を海洋が吸収していることがこれまでの調査で分かっています。約 20%は陸上の植物が吸収しています。残りの 50%は、どこにも吸収されることがないため、毎年大気中に蓄積されます。このまま二酸化炭素の排出が続くと 21 世紀末には大気中の二酸化炭素濃度が産業革命以前の 2 ~ 3 倍になると予想されます。これは、これまで人類が経験したことのない濃度であり、地球温暖化が加速することが心配されます。

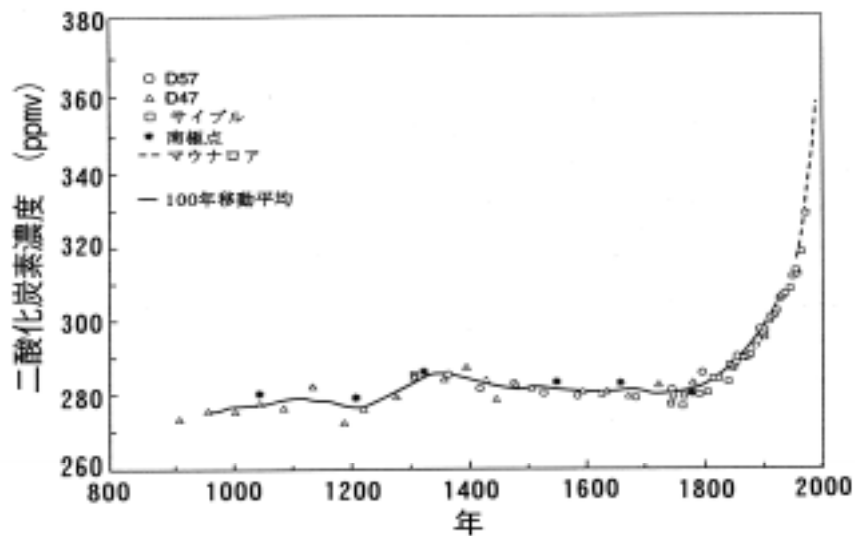


図1 過去 1000 年間の二酸化炭素の大気中濃度の推移。南極の氷床コアの分析から得られた濃度と 1958 年以降はハワイ・マウナロア山における観測による濃度を示す(気象庁異常気象レポート, 1999)

2) 世界と日本の地上気温の上昇

地球温暖化の気象への影響は、気温、降水量、風などに現れますが、まずは、気温に現れます。過去 1000 年間の北半球の地上気温の経年変化を図 2 に示します。20 世紀の気温は過去 1000 年間で最も高くなっており、急激に上昇しています。過去 140 年間の日本の平均気温の経年変化を図 3 に示します。長期的にみると気温は上昇しており、100 年間当たりの上昇率に換算すると約 1℃ 高くなっています。特に最近の 20 年間は大きく上昇しています。

過去1000年間の北半球の気温変化

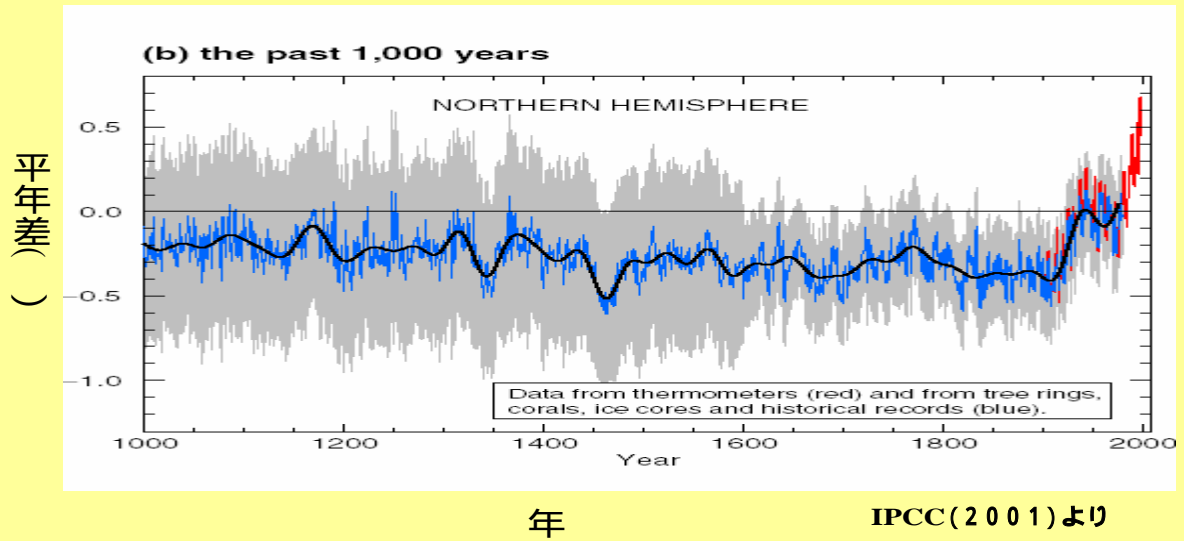


図2 過去1000年の北半球の平均地上気温の推移。1900年以降は温度計の観測による気温、黒い曲線は年輪、珊瑚、氷床等を調べ推定した気温（IPCC 地球温暖化第3次評価報告書，2001）。

過去100年間の日本の気温変化

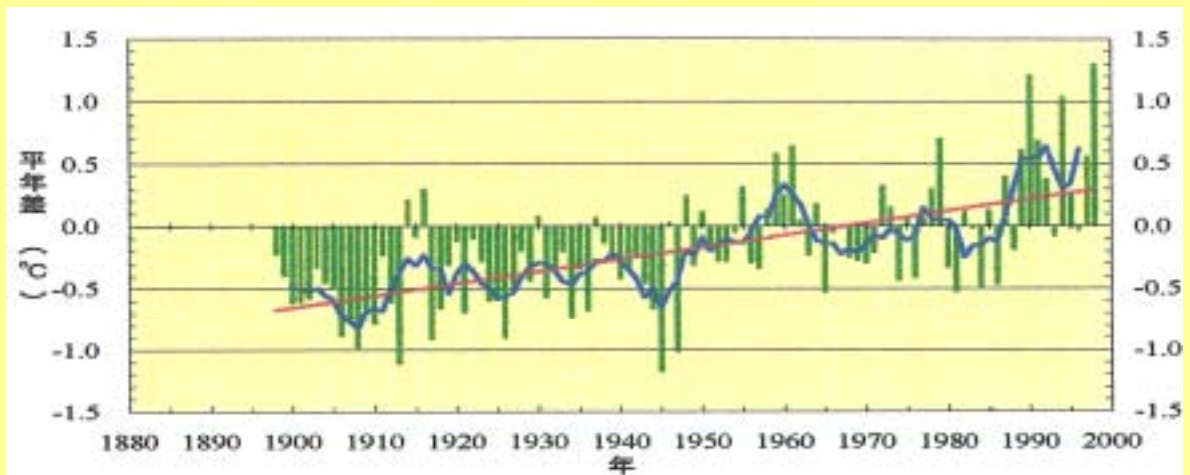


図3 過去100年間の日本の平均地上気温の推移。棒は年平均気温、曲線は毎年の気温を5年移動平均して平滑化したもの、直線は100年間の気温の上昇を直線で近似したもの（気象庁異常気象レポート，1999）。

3) 札幌市の地上気温の上昇等

札幌市の地上気温の経年変化も、世界や国内の変化と同様な傾向を示します。図4に1900年から現在までの年平均気温の経年変化を示します。ただし、年平均気温は平年値からの差で示してあります。気温は上昇してきており、100年間で2.3℃上がっています。世界や国内の平均は100年あたり約1℃上昇していますが、札幌の場合は都市化による影響が含まれているため気温の上昇が大きくなっています。

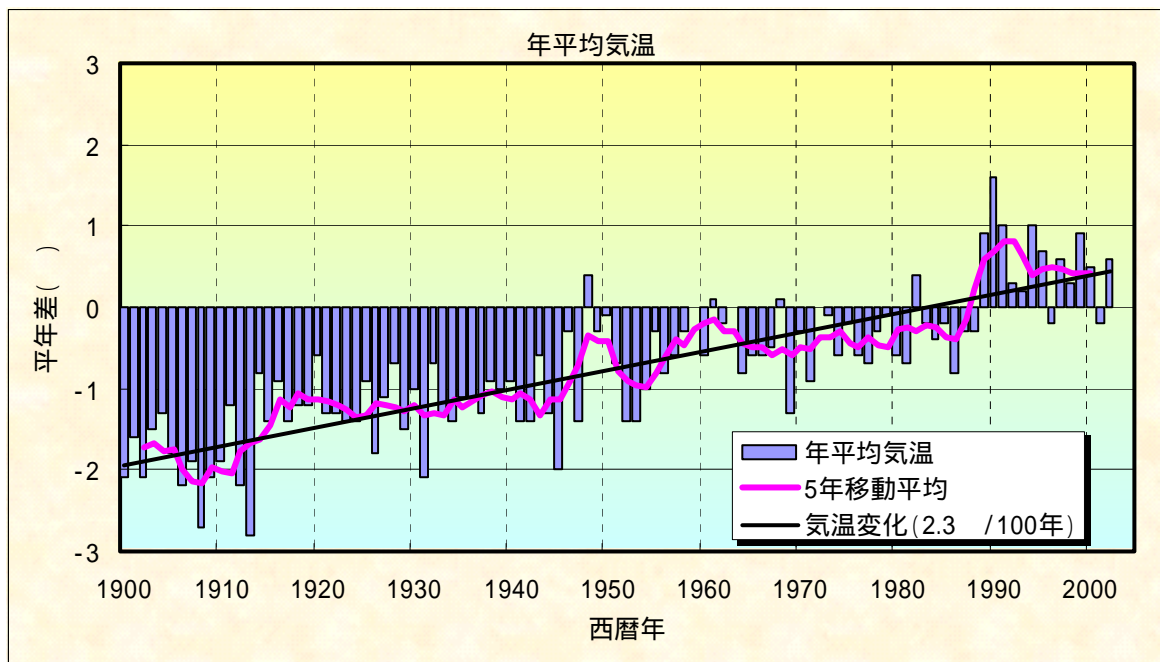


図4 札幌市の過去100年の地上気温の推移(札幌管区気象台の観測データ)。棒は年平均気温、曲線は5年移動平均をして平滑化した経年変化、直線は経年変化を直線で近似したもの。

図5に、札幌市のヨメイヨシノの開花日とヤマモミジの紅葉日の経年変化を示します。いずれの植物も四季の移り変わりを告げてくれます。ソメイヨシノの開花は過去50年間で5日ほど早まり、ヤマモミジの紅葉は14日遅くなっています。地球温暖化により春の訪れが早く秋の訪れが遅くなっています。

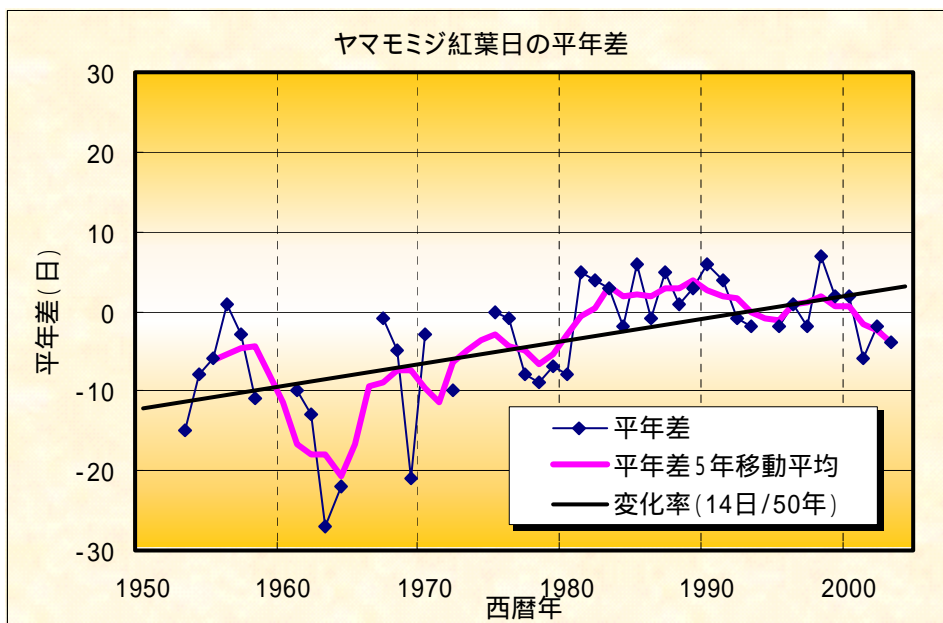
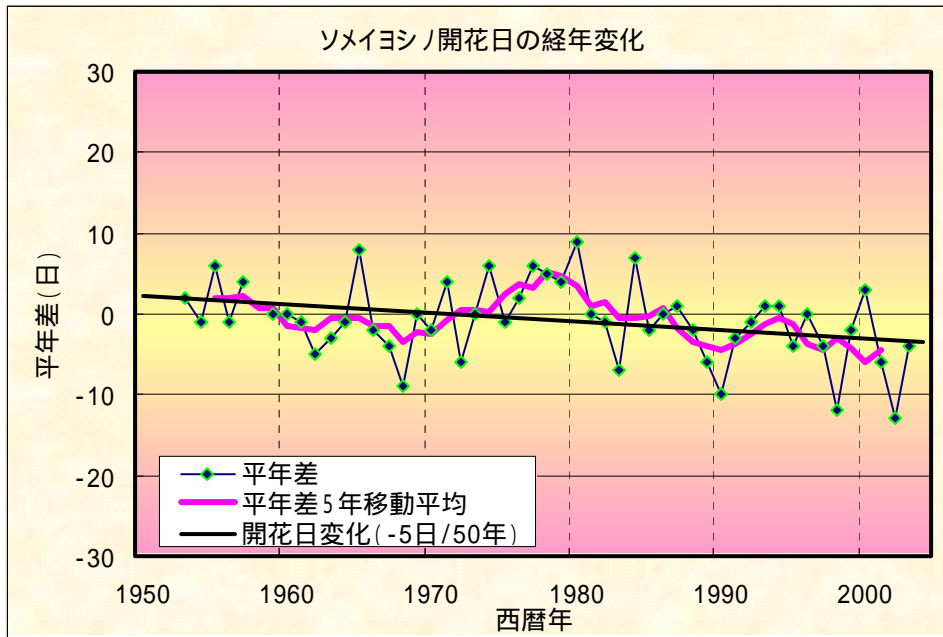


図 5 札幌市のソメイヨシノの開花とヤマモミジ紅葉日の経年変化。点は年の観測値、曲線は5年移動平均をして平滑化した経年変化、直線は経年変化を直線で近似したもの。

札幌市で観測された気候変化をまとめたものを図6に示します。地球温暖化等の影響で年の平均気温が上昇していますが、特に冬や秋の気温の上昇が大きく、このため冬日の減少、霜の初日の遅れ、植物季節の変化等が起きています。

気候変化の内容	変化の程度
年平均気温の上昇	2.3 /100 年
1月の最低気温の上昇	5.2 /100 年
冬日の減少	35 日/70 年
霜の初日の遅れ	26 日/50 年 (終日：19 日/50 年)
サクラ開花の早まり	5 日/50 年
ヤマモミジ紅葉日の遅れ	14 日/50 年

図 6 札幌市の気候変化。気候変化の内容と程度を示す。

(2) 21 世紀の地球温暖化の予測

1) 地球規模の温暖化の将来予測

地球温暖化による気候変化が将来どの程度になるかは、今後の二酸化炭素の大気中への排出の程度によって決まります。排出の程度は今後の世界の社会経済発展の程度に左右されます。地球温暖化の国際的な科学評価機関である「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」は、2001 年に地球温暖化の現状と将来について評価した第 3 次評価報告書を公表しました。評価報告書のなかで、世界の将来の社会経済発展の道筋を想定した種々のシナリオに基づき、大気中の二酸化炭素濃度の増加を予想し、シナリオ毎に世界の平均地上気温とそれに伴う海面水位の上昇を予測しています。社会経済発展のシナリオにより、上昇量の予測は異なりますが、整理すると、21 世紀末には世界の平均地上気温は 1990 年より 1.4 ~ 5.8 上昇し、海面水位は 9 ~ 88cm の幅で上昇すると予想しています。平均的な社会発展のシナリオに基づけば、21 世紀末には世界は平均して気温が 3.6、海面水位は 50cm 程度上昇するとみられます。

2) 北海道への地球温暖化の影響と気象の異変

科学技術の限界から現在のところ、地球温暖化が進行した場合、将来どのような気象の変化が起きるかを都道府県単位で正確に予測することは難しい状況です。現在は、世界規模やアジア地域の地球温暖化による気象変化を予測する研究開発が成功理に進められています。日本の北海道については予測の不確実性はありますが、世界平均と大きく異なることはないものと見ることにします。最近の研究では北海道について 2 ~ 3 の上昇を予想する報告があります。

北海道で仮に気温が現在より年平均で 3 上昇した場合を考えてみましょう。札幌市を例にとると、現在の年平均気温が 8.5 ですから、これが 100 年後には 11.5 になります。これは、札幌市が山形県や宮城県に移動することになり、本州の東北地方の気候に近い状況になることを意味します。気温が上昇して冬が暮らしやすいといって喜んでばかりはいられません。札幌市の気象に大きな変化が起きる可能性があります。地球温暖化が進むと、大気中に水蒸気が増えて集中豪雨の強度や地域性に変化が起きるかもしれません。台風の強度や進路が変化しこれまで以上に被害が発生するかもしれません。また、潮位が現在より上昇した場合、高潮や波浪の被害が増えることが考えられます。海辺の環境も潮位の上昇によって大きく変わり砂浜の多くは消失するでしょう。気候の変化に適應できない生物種は絶滅の危険があります。このまま二酸化炭素の排出が続くと将来、地球温暖化による気象の異変と被害を覚悟しなければなりません。

2 . 地球温暖化防止に向けた取組みが行われている

21世紀の地球温暖化の進行をくいとめるためには、二酸化炭素の排出量を今よりさらに減らさなければなりません。世界各国が排出削減に取り組んでいますが、なかなか実効がありません。二酸化炭素の多くは、私達が生活するために必要なエネルギーを消費することによって発生します。現代は、家庭には電気、ガス等の製品が揃い、暑ければエアコン、寒ければ暖房、仕事やレジャーに車の利用等、生活の快適さを求めてエネルギーを消費する文明となっています。先進国にとっても、開発途上国にとっても二酸化炭素の排出削減は極めて大きな政治的課題です。特に、貧困の根絶と経済成長を最優先にしている開発途上国にとって排出削減は死活問題です。そのため、国際的な努力にもかかわらず二酸化炭素の排出削減は十分には進んでいません。

社会や経済の構造をより環境に優しいものに変えていくこと、また、市民にはこれまでのライフスタイルそのものの見直しを含め環境に優しい生活が求められています。

(1) 我が国の二酸化炭素排出削減の取組み

1) 地球温暖化防止条約

二酸化炭素の排出削減による地球温暖化の防止を目指し、1992年に世界各国は「気候変動に関する国際連合枠組条約(地球温暖化防止条約)」を採択しました。地球温暖化防止条約に基づき、毎年、各国の代表が集まり地球温暖化防止条約締約国会議が開催され、地球温暖化防止に向けた審議が行われています。1997年には日本の京都で第3回締約国会議が開かれ、先進国の二酸化炭素の排出削減等を義務付けた京都議定書が難産の末採択されました。日本は、この会議で主要な役割を演じ京都議定書の採択に貢献しました。議定書により、先進国は、全体で1990年の排出量の5%減らすことを義務づけられ、日本は6%、米国は7%、欧州連合は8%の削減義務を負いました。開発途上国については、開発途上国の反対から、削減義務を負うことが決まりませんでした。米国は、その後2001年に、開発途上国に削減義務が無いこと等を理由として、京都議定書から離脱しました。

2) 地球温暖化対策の推進に関する法律(地球温暖化対策推進法)

第3回締約国会議における京都議定書の採択により、日本は国際的に6%の排出削減義務を負いました。義務を果たすため、国内の法整備の必要性から地球温暖化対策推進法が1998年に公布されました。国の機関、地方公共団体、事業者、国民がそれぞれ役割を分担して、協力して二酸化炭素の排出削減に取り組むための基本方針が打ち出されました。

3) 地方公共団体、事業者、市民の取組み

現在、地方公共団体は国の機関と協力して、事業者や市民と連携して二酸化炭素の排出削減に取り組んでいます。取り組みの成果は地方公共団体の公表する環境白書等で見るができます。環境白書にはエネルギー消費を減らすための、節電、待機電力のチェック等、エネルギー節約型のライフスタイルを目指す種々の取り組みの成果が記載されています。

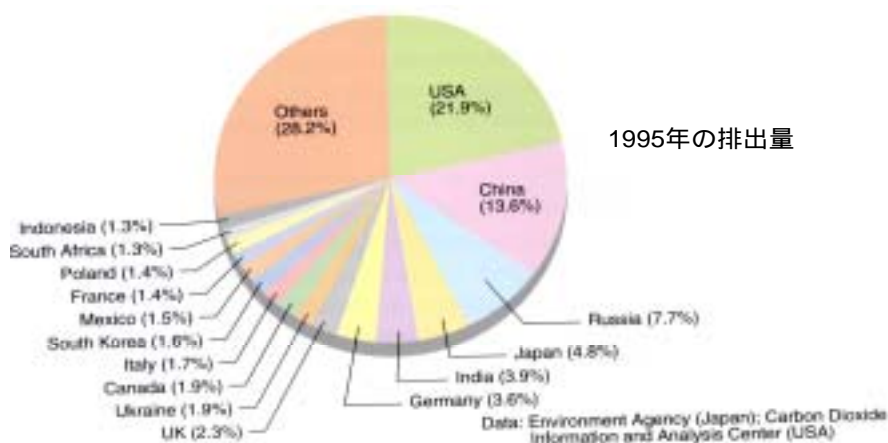
3 . 地球温暖化を防ぐのは私たちの責任です

地球温暖化による気象の異変を防ぐには、二酸化炭素の排出を削減することが最も重要です。必要以上にエネルギーを消費することは避けたいものです。「暑い、寒い」とエアコンをつけることやマイカーの過度の利用には、多少のことは我慢することが必要でしょう。利便

性を追求したライフスタイルを見直し、省エネ生活を志向してはどうでしょうか。日本政府は、エネルギーをさらに効率よく利用する方法、植林等による二酸化炭素の固定、二酸化炭素の排出が少ない太陽電池等の新エネルギーの開発等、様々な取り組みを行っています。しかし、2002年の日本の総排出量は1990年に比べて7.6%も増加しています。さらに、取り組みを進める必要があります。

図7に各国の1995年の二酸化炭素排出量の割合を示します。米国が最も多く世界の排出量の約22%を占め、中国、ロシア、日本、インドと続きます。各国の排出削減の考え方については、特に先進国と開発途上国との間に大きな意見の違いがあります。先進国は、地球温暖化防止には世界全体の総排出量を減らす必要があることから、先進国が法的に削減に努力することを前提に、開発途上国についても、削減することを約束してほしいと要求しています。一方、開発途上国は、現在の地球温暖化のほとんどは先進国の過去の排出によるものであること、また、人類平等の原則から、国民一人当たりの排出量が先進国の一人当たりの排出水準と比べて小さいことをあげて、削減義務は負わないとしています。世界全体の排出量を年間約60億トン（炭素の重量として）として、世界の総人口60億人で割ると、世界の平均の排出量は一人当たり1トンとなります。現在の一人当たりの排出量は先進国の平均が約3トンですが、開発途上国の平均は約0.5トンです。お互いの言い分は、各国の事情や生活の向上を望む国民のことを考えると理解できるものです。しかし、そのような妥協の無い状況が続くうちに、不幸にも、21世紀末には、二酸化炭素をほとんど排出していない中部太平洋のキリバスやインド洋のモルジブ等の珊瑚礁からなる島嶼国が海没してしまう可能性があります。

世界の二酸化炭素排出量の割合



運輸省パンフレットより

図7 1995年の各国の二酸化炭素排出量の割合。総排出量64億トン（運輸省パンフレット：環境と運輸，1999）。

また、地球温暖化による動植物への影響も考えなければなりません。人間は暑ければ服を脱ぎ、エアコンを利用することができます。また、北方へ避暑に出かけることもできます。

しかし、動物や植物はどうでしょうか。全ての動植物が涼しい北方に移動できるとは限りません。移動できない生物種は絶滅の危険があります。

大気中の二酸化炭素の濃度を現在の濃度で安定化させるためには、現在の世界の総排出量を50%以上削減しなければなりません。これが、地球温暖化防止条約の究極の目標です。京都議定書の第一約束期間の5%の削減は、目標に向けた第一歩でしかありません。2012年後の第二約束期間以降には、究極の削減目標である50%以上の削減率を設定していかなければなりません。今後は、これまで以上に難しい国際交渉が続くでしょう。

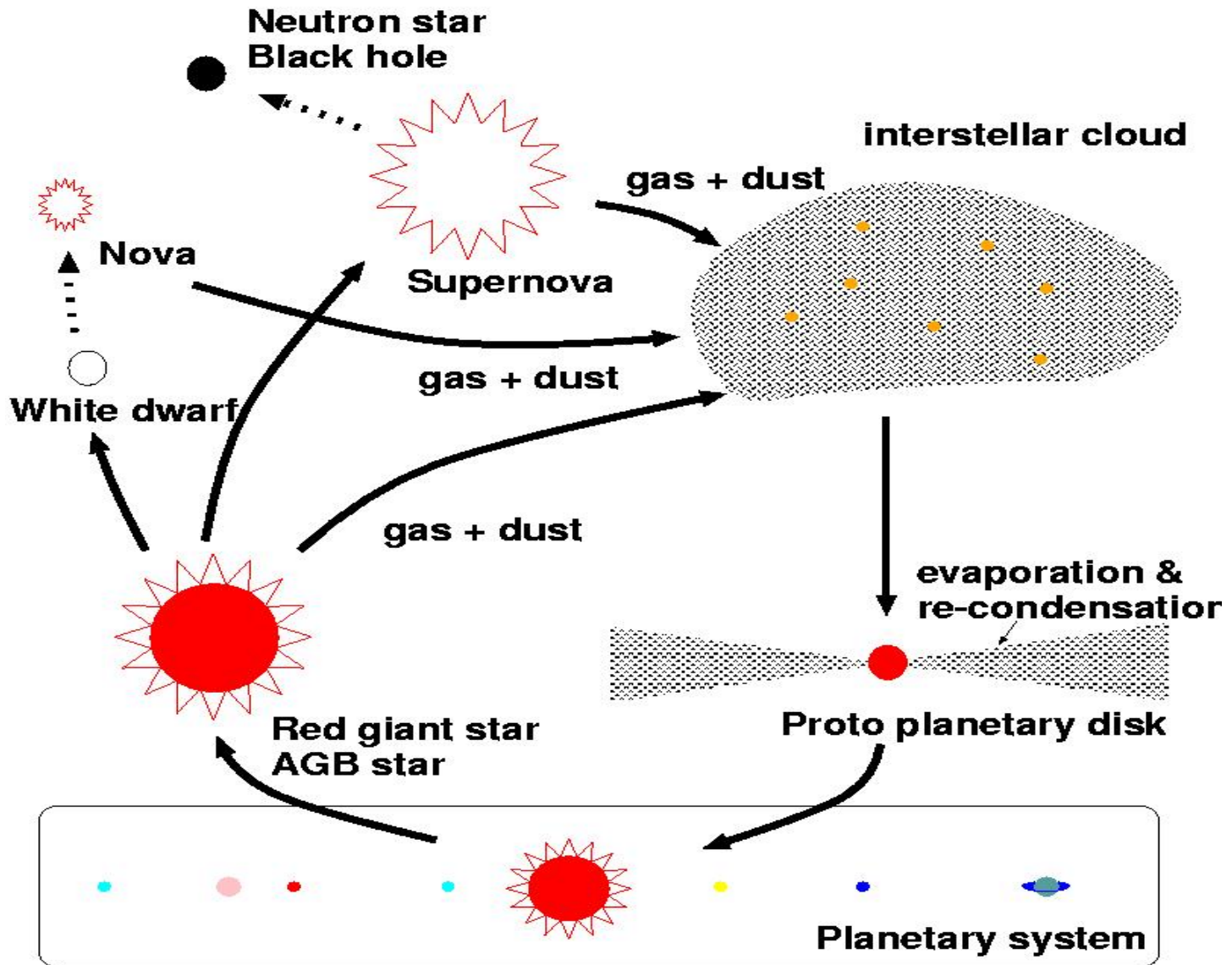
21世紀はまだ始まったところです。21世紀の終わりは遠い未来の話のようでもあります。しかし、将来の子供や孫の時代は確実にやってきます。総ての人が子供や孫の将来に良好な環境を遺産として残すことを放棄してはならないと思います。地球環境の保全には、国民や市民一人ひとりの環境への理解と協力が不可欠です。

宇宙の氷とダスト

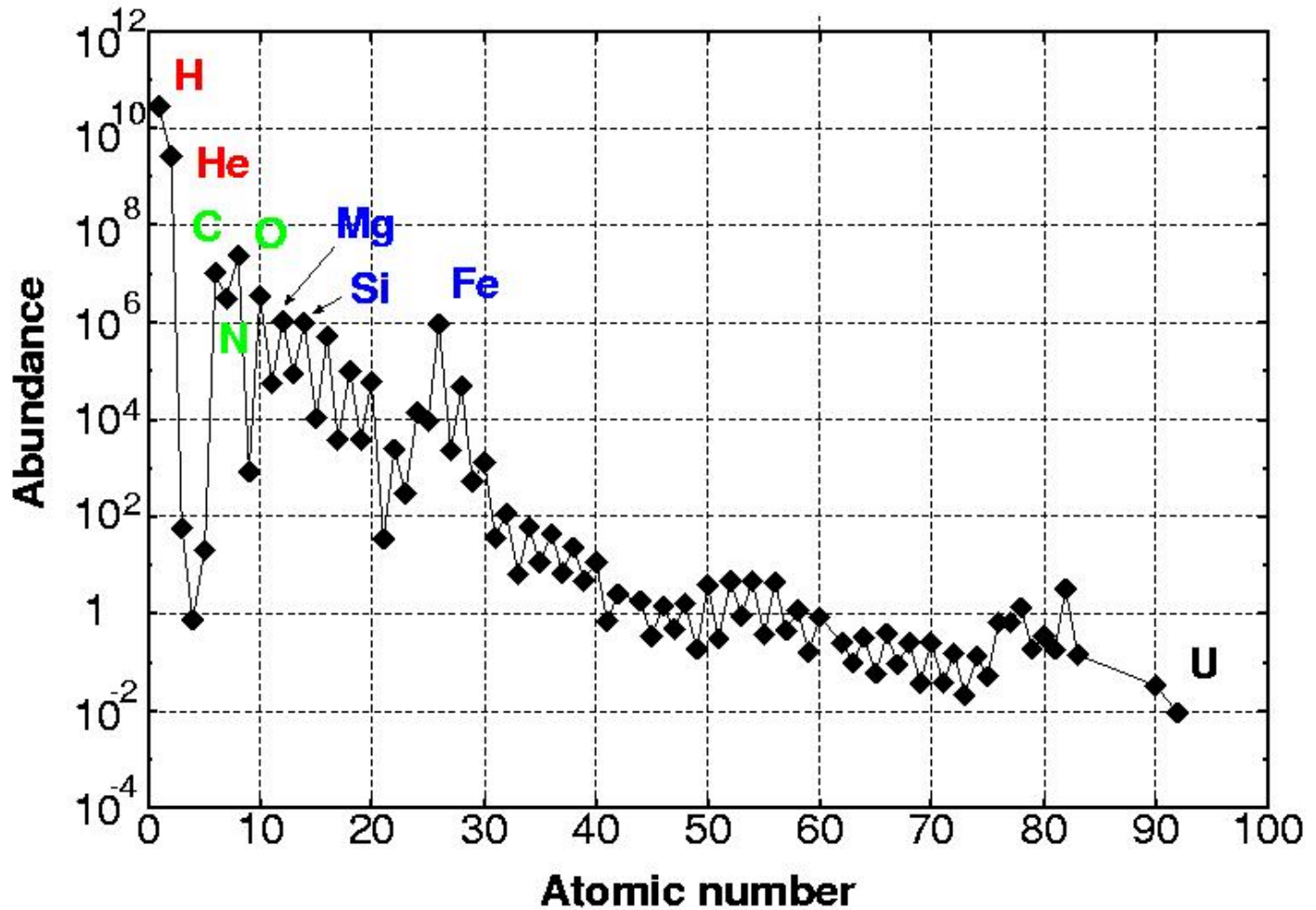
北大低温研・山本哲生

- 宇宙における物質進化
 - 原子 --> ダスト --> 惑星 --> 生命
- 系外惑星系の発見
 - 木星型惑星
 - 第2の地球
 - 宇宙生命

Circulation of Matter in the Galaxy



宇宙の元素組成



$H \gg He \gg O > C > N > Mg \sim Si \sim Fe$

宇宙元素組成の特徴

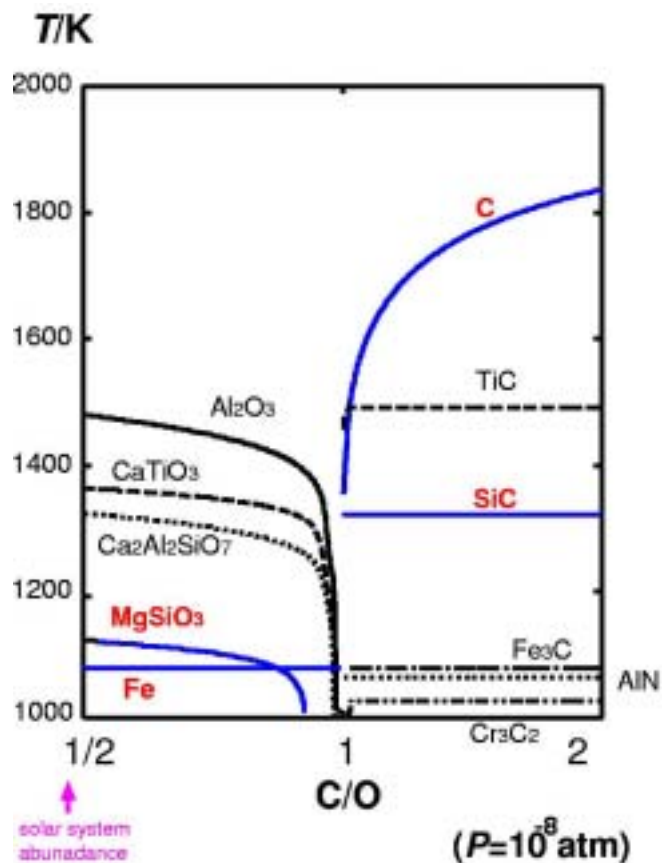
- $H \gg He > O > C > N \sim Mg \sim Si \sim Fe$
- $O > C \Rightarrow$ 地球は石と鉄の惑星
- 原子番号 Z が大きい元素ほど少ない.
- Z とともに単調には減少しない.
- 質量数 $A = 4n$ の元素が多い
- 特に $Fe (A = 56)$ が目立って多い.

主な元素の化学的性質

	揮発度	相*	結合の種類	存在比
H } He }	超揮発性	気体		10 ¹⁰
C } N } O }	超揮発性 揮発性 やや難揮発性	気体 氷 有機物	水素, van der Waals 化学	10 ⁷
Mg } Si }	難揮発性	岩石質	化学	10 ⁶
Fe } Ni }	難揮発性	金属 酸化物, 硫化物	金属 化学	10 ⁶

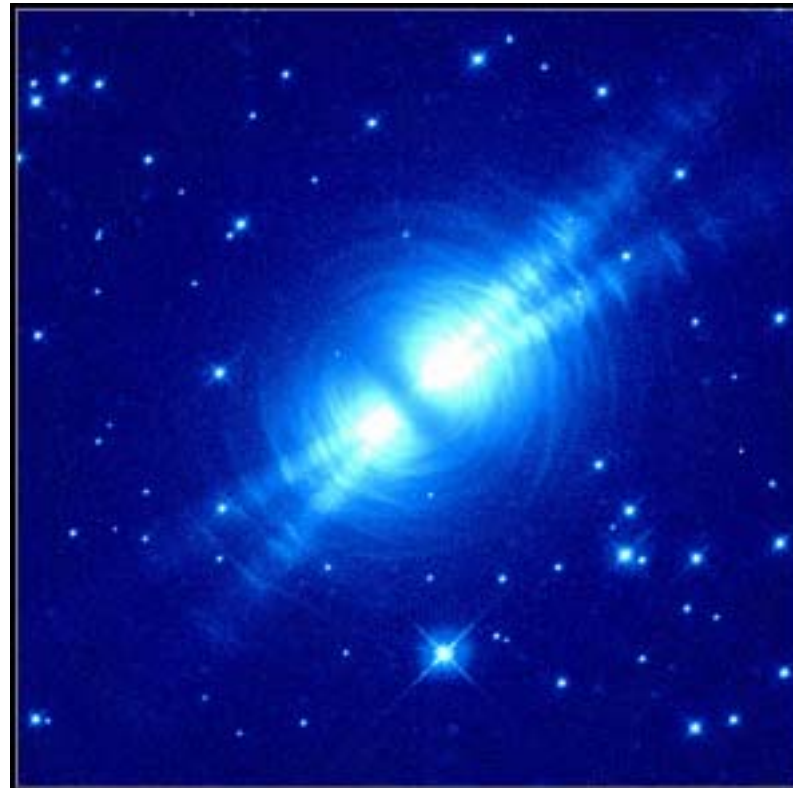
*) 低圧, 温度 = 10 ~ 1000 K での相

星で生成されるダストの組成



- $C < O$: 太陽系
 - シリケート, 鉄
 - 地球の組成
- $C > O$
 - 炭素, SiC

星の死とダストの誕生

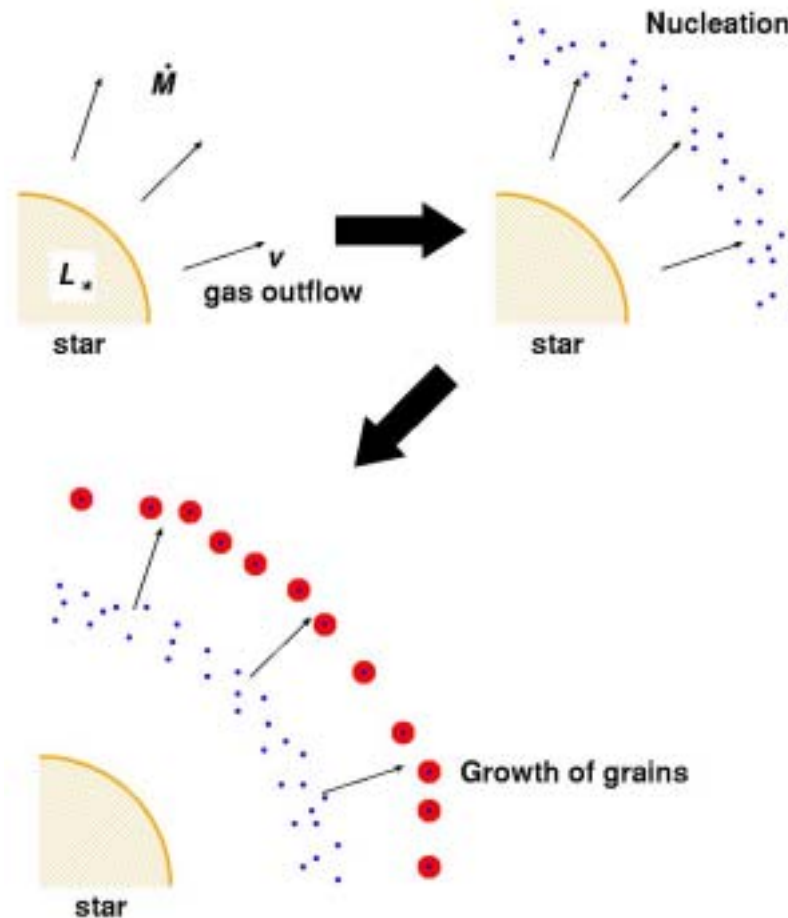


Death of an Ordinary Star · Egg Nebula
Hubble Space Telescope · WFPC2

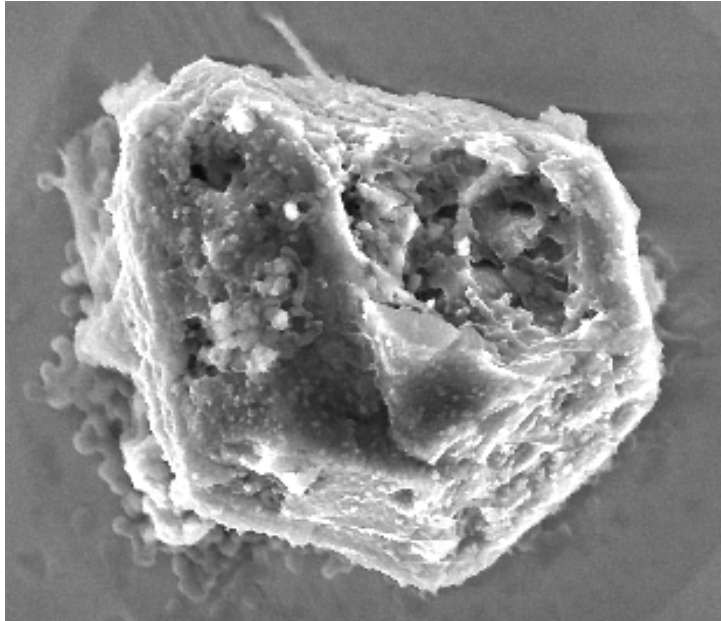
PRC96-03 · ST ScI OPO · January 18, 1996 · R. Sahai and J. Trauger (LPL), WFPC2 Science Team, NASA

星のまわりでのダストの生成

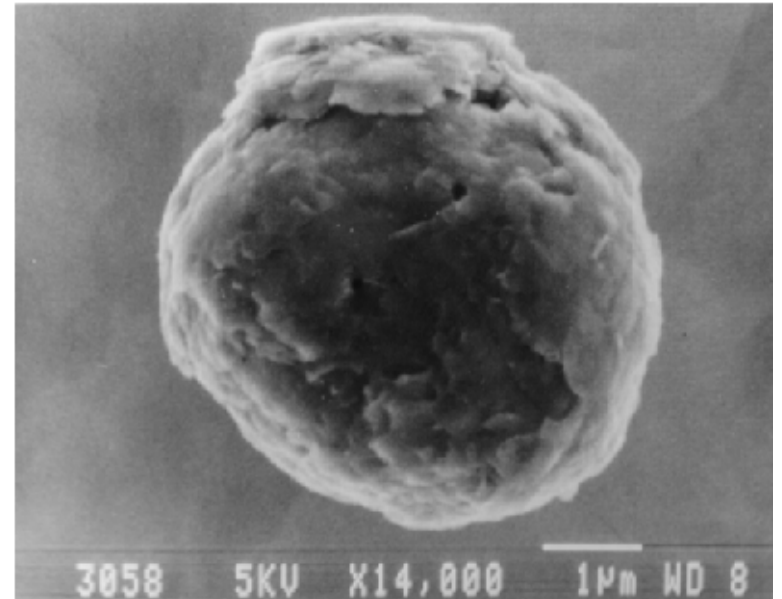
Formation of dust grains around an evolved star



隕石から抽出されたスターダスト

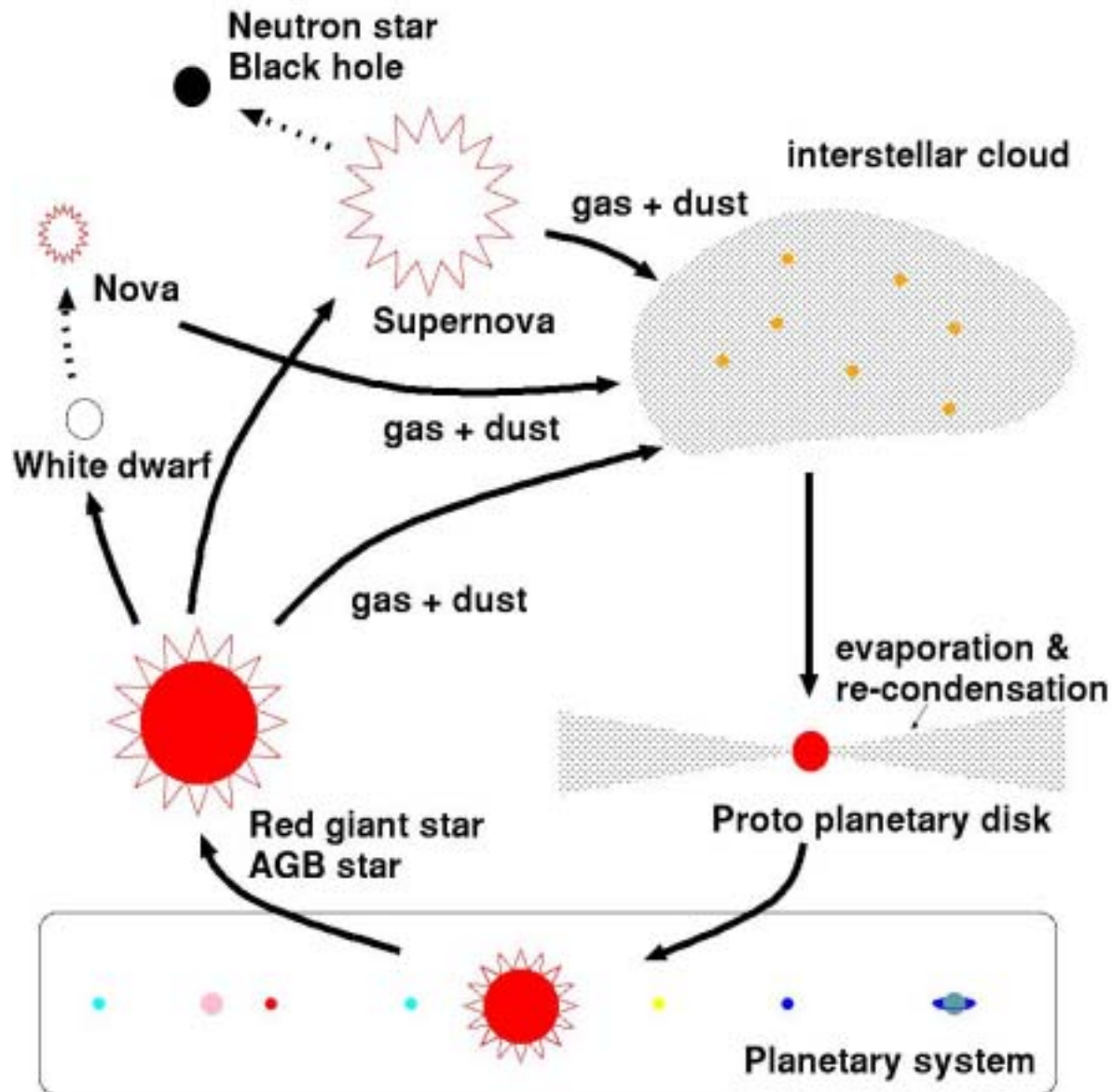


SiC



graphite
(Nittler 1999)

Circulation of Matter in the Galaxy



1. 暗黒星雲

オリオン座の馬頭星雲

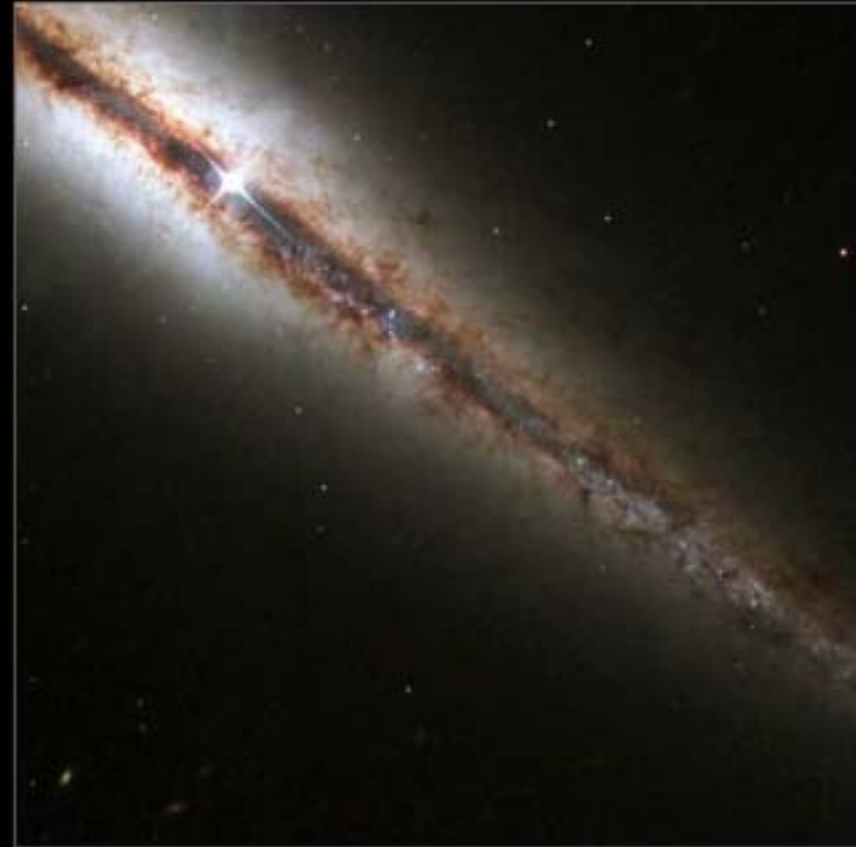


Whirlpool Galaxy • M51



銀河の暗黒星雲

Edge-On Galaxy NGC 4013



Hubble
Heritage

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC01-07

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC01-07

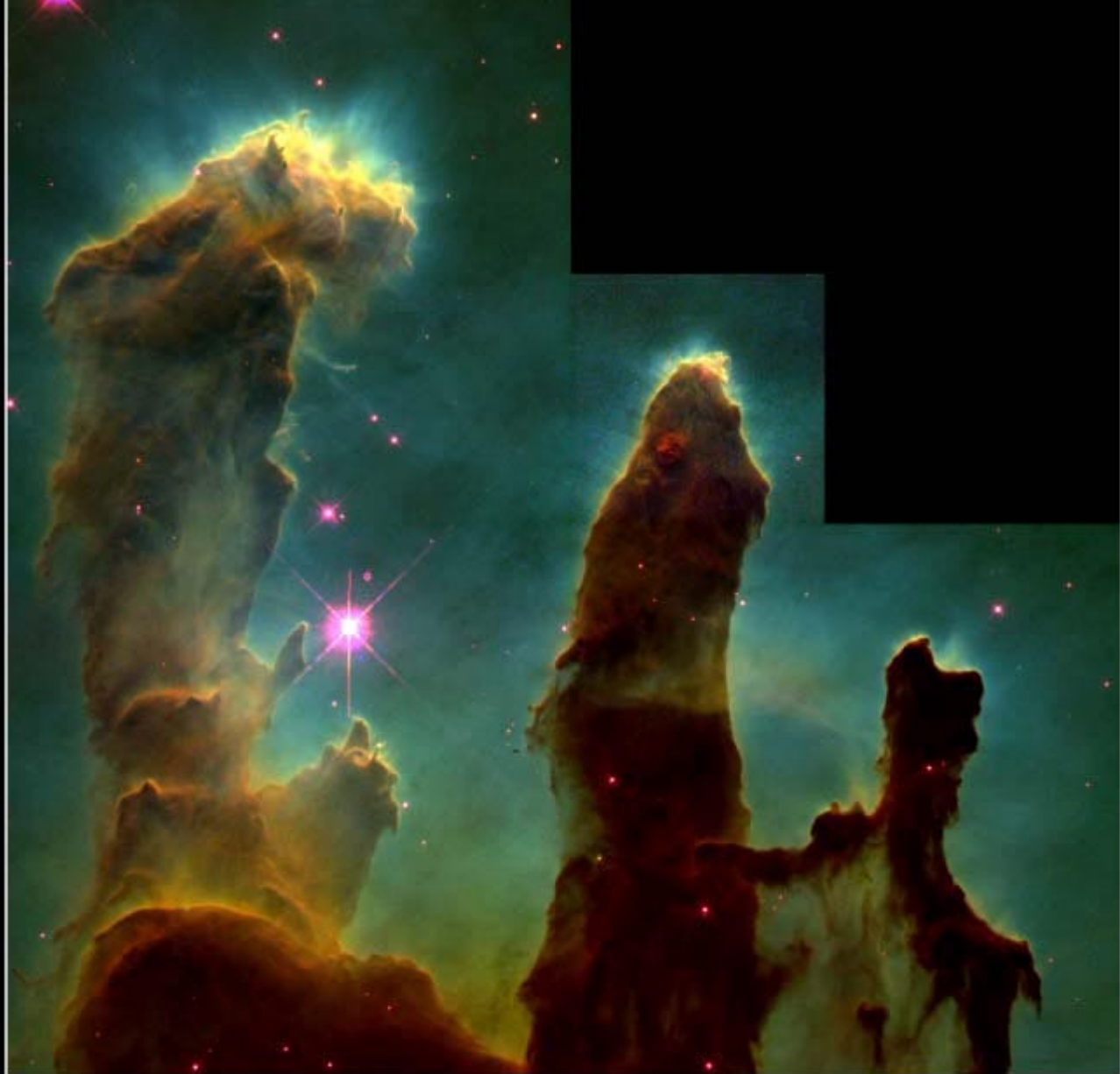
Hubble
Heritage

われわれの 銀河系

宇宙にはいたるところに、暗黒星雲がある

暗黒星雲から星が生まれる



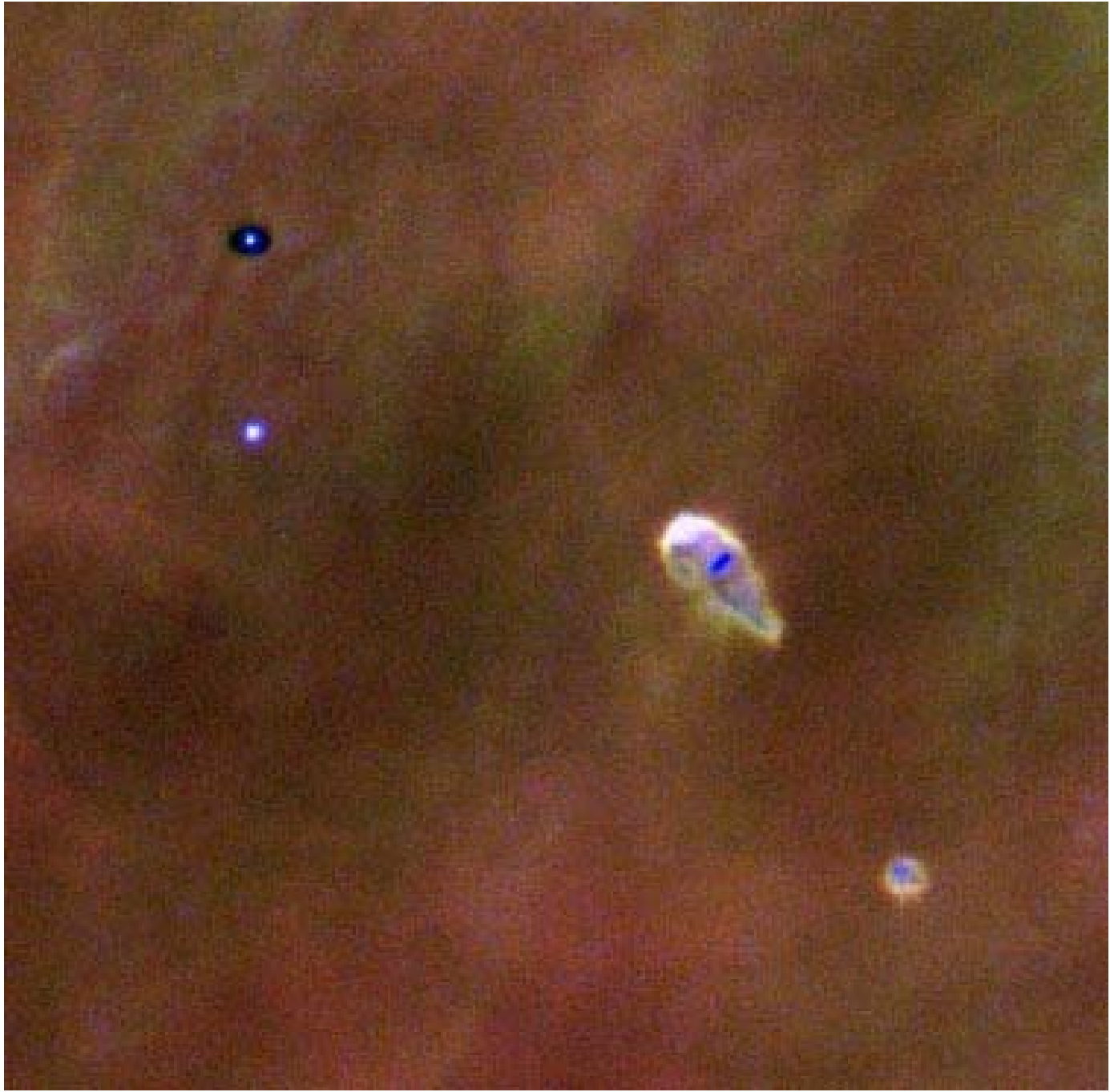


Gaseous Pillars · M16

HST · WFPC2

PRC95-44a · ST Sci OPO · November 2, 1995

J. Hester and B. Seaman (AZ State Univ), NASA



暗黒星雲

- ガスとダストからなる低温巨大雲
- $M = 10^3 - 10^6 M_{\text{sun}}$
- 星と惑星系の誕生場所
- 宇宙の化学工場
 - 原子・分子 --> 氷 --> 有機物

暗黒星雲(分子雲)



低温・低圧の世界

温度: 10 K=-263

圧力: 10^{3-4} 個 H_2/cm^3
= 10^{-15} 気圧

・暗黒 ダストの存在

・電波 分子(H_2 , CO, ...)の存在 分子雲

・赤外線 ダストの組成, 構造

暗黒星雲の観測

- 電波観測
 - 分子
- 赤外線観測
 - ダスト, 分子

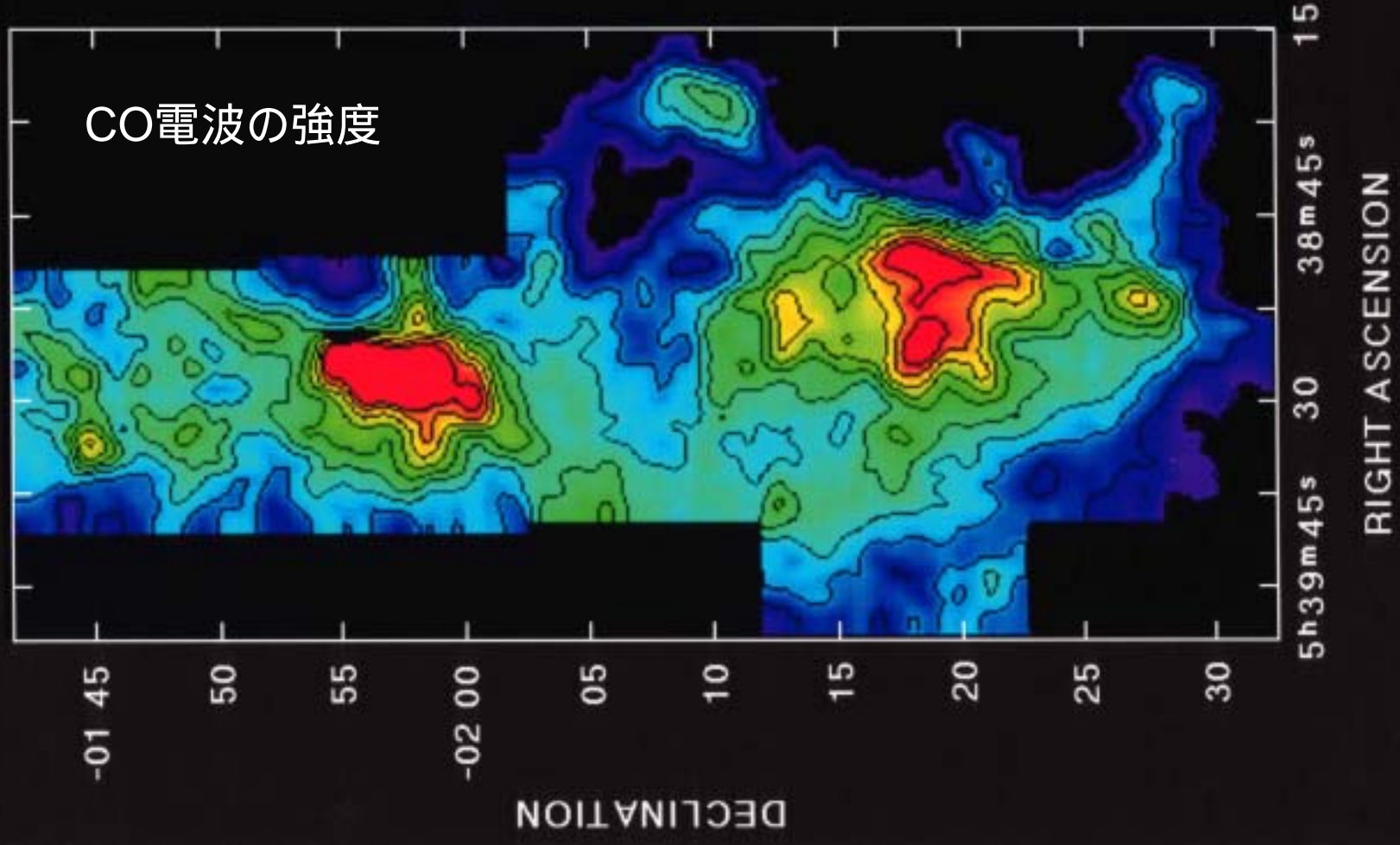
北大苫小牧11m電波望遠鏡

自前の望遠鏡が完成

- ・ 単一鏡として
星形成領域
銀河の構造
- ・ 超長距離基線干渉計として
(野辺山, VERAと組んで)
2ミリ秒角の空間分解能
世界的レベルの研究が可能
- ・ 原始惑星系円盤
- ・ 銀河の微細構造



電波観測の結果



ハッブル宇宙望遠鏡

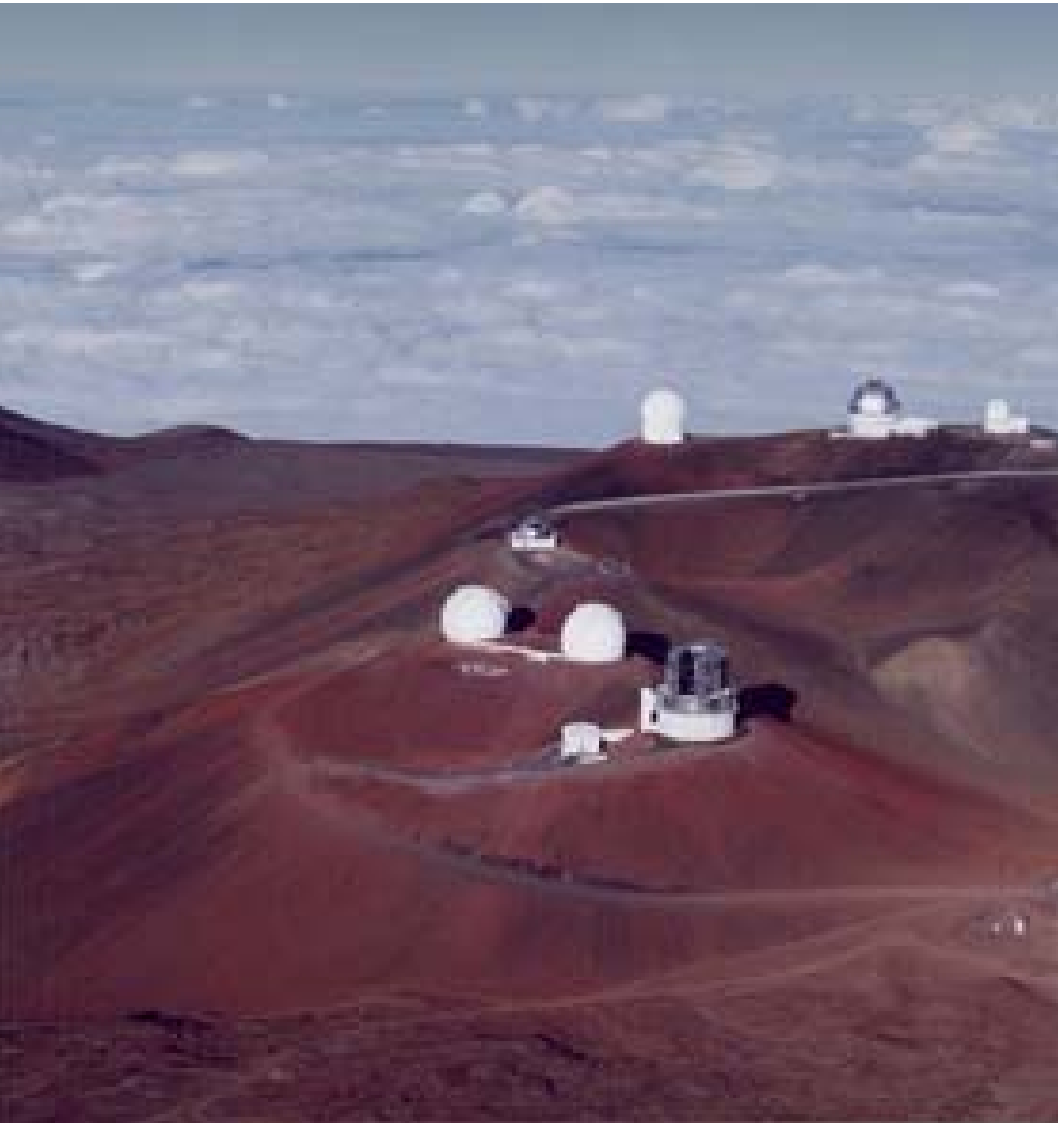


地球大気が観測のじゃまになる 成層圏



Kuiper Airborne Observatory

地球大気が観測のじゃまになる 高山

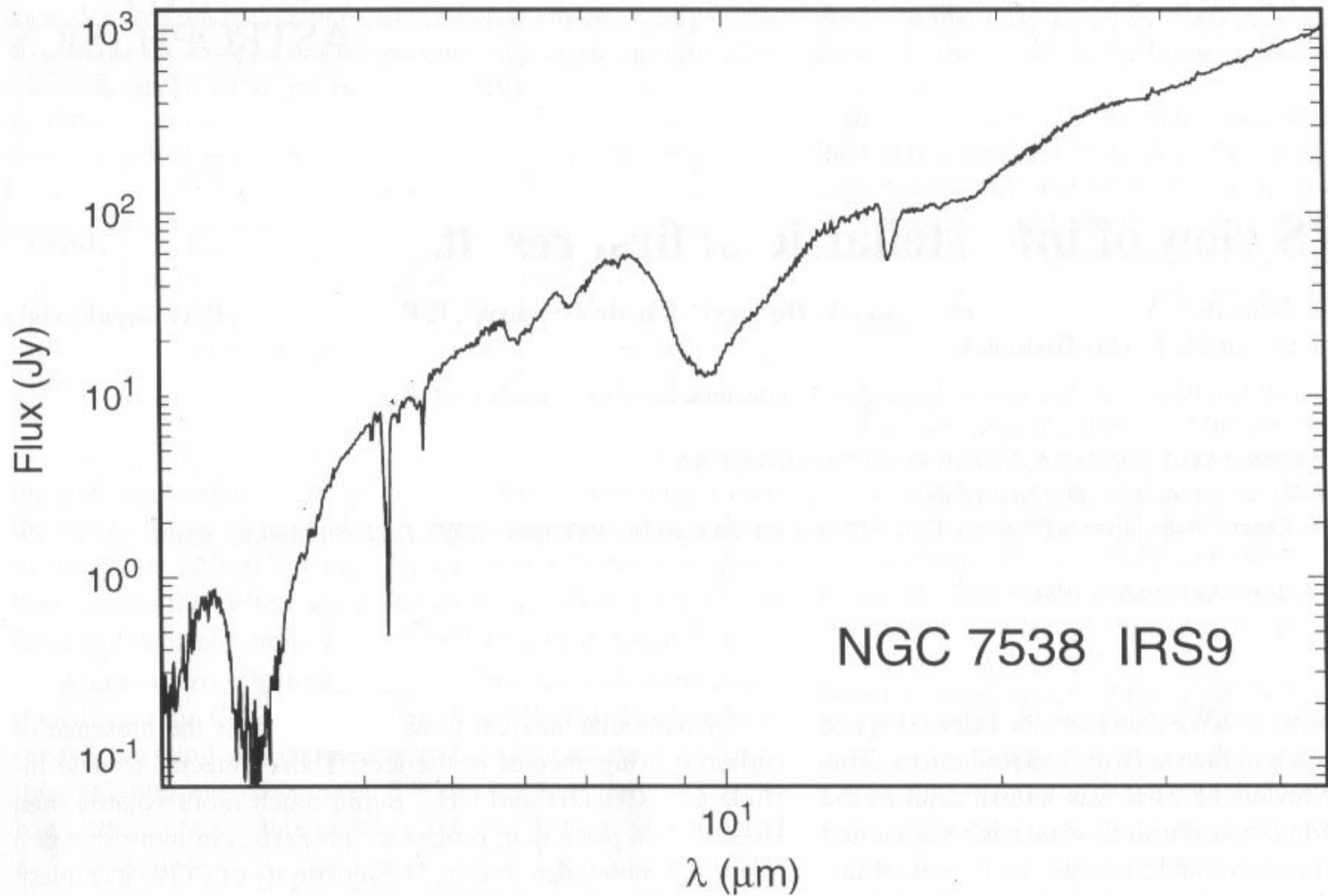


地球大気が観測のじゃまになる 宇宙から

Infrared Space Observatory



ISOによる赤外線観測の結果



これから何を読み取るか？

赤外線観測 (ダストを調べる)

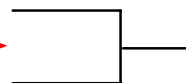
光源

試料

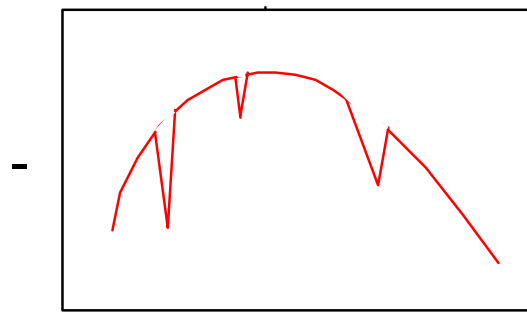
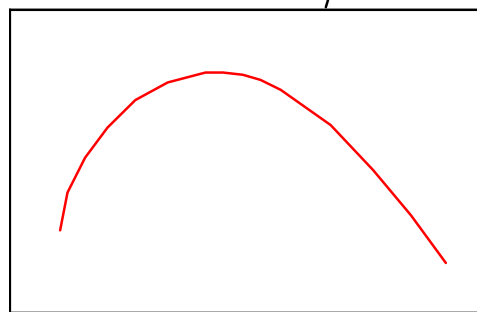
検出器



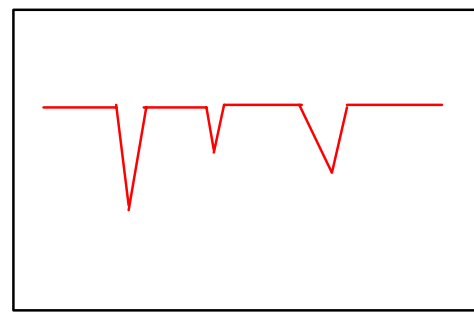
1500 K



赤外線吸収スペクトル



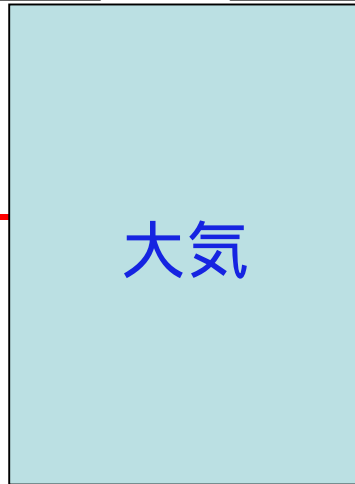
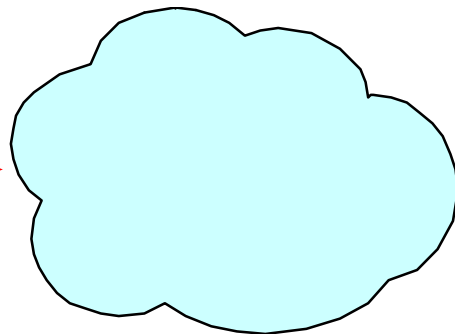
=



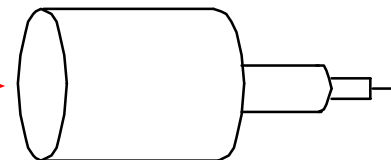
波長

星

500-10000 K



大気

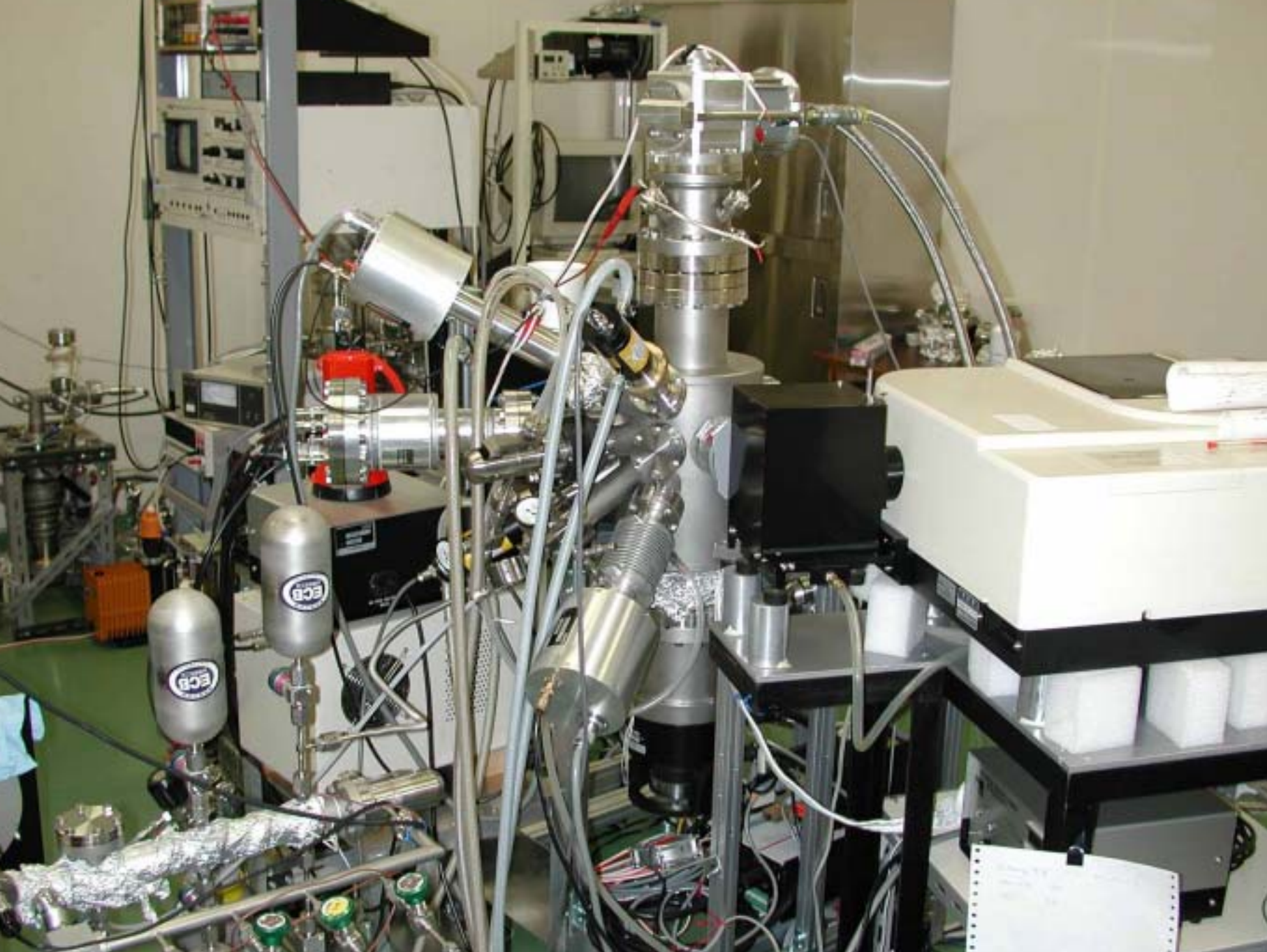


望遠鏡

暗黒星雲

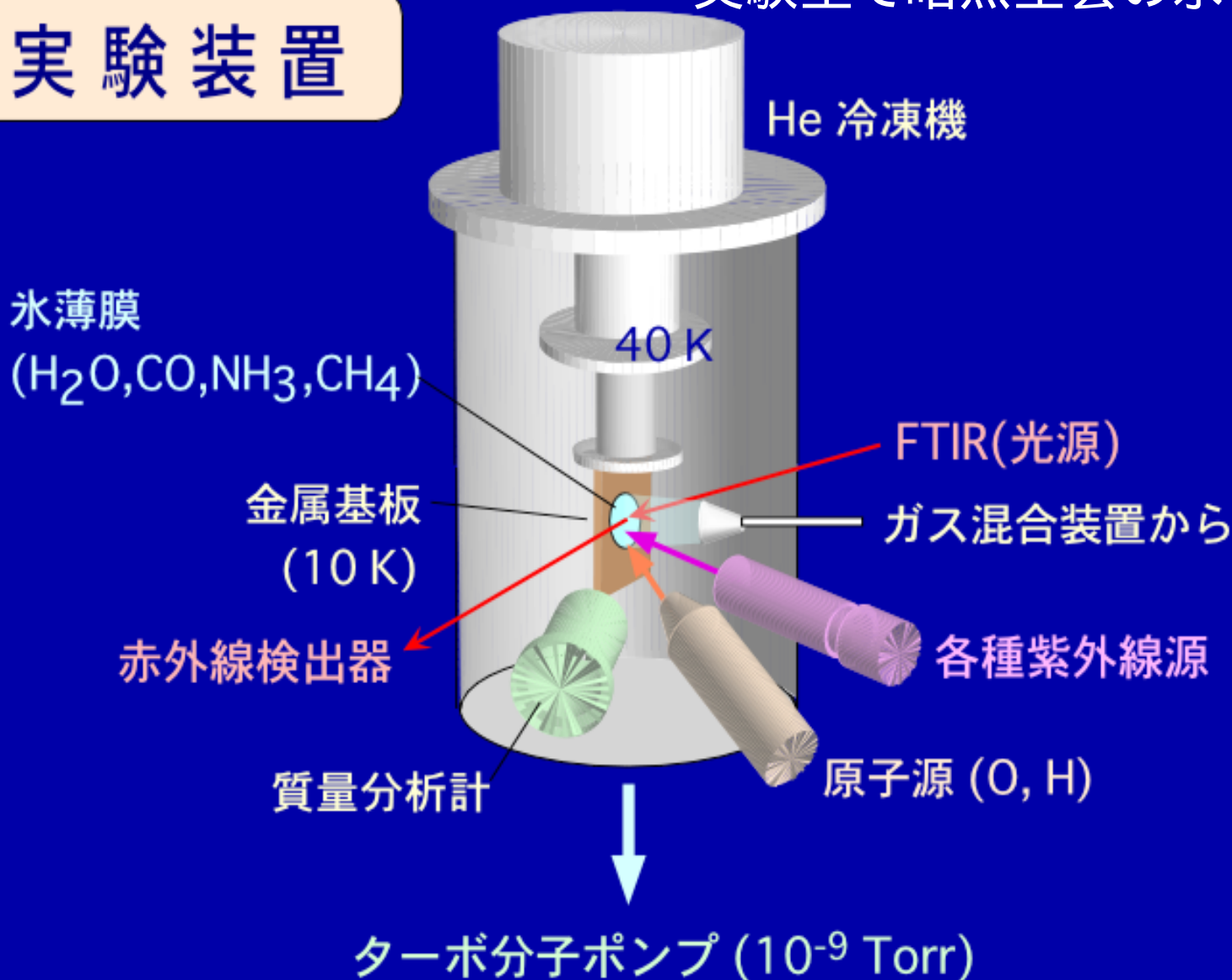
実験室に暗黒星雲をつくる

暗黒星雲内の氷の研究

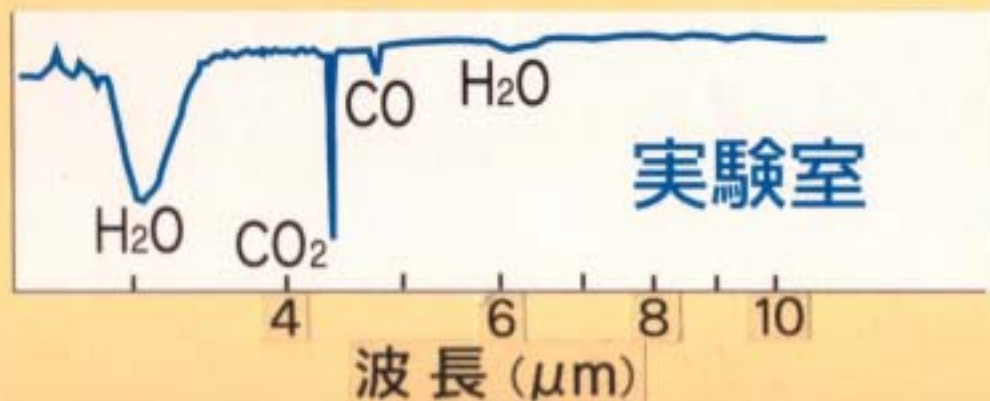
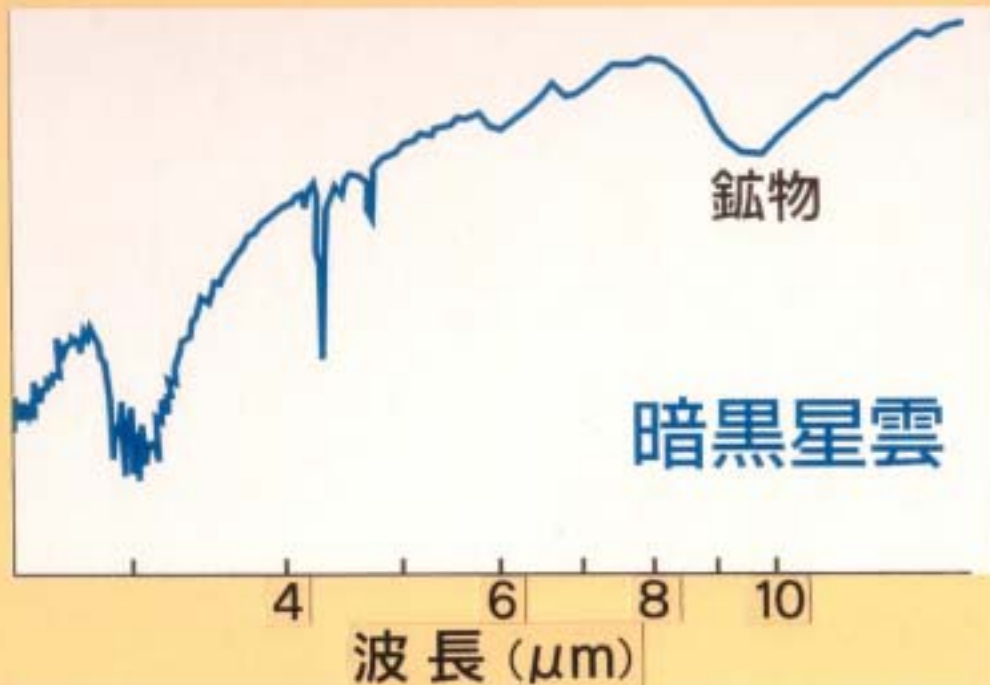


実験室で暗黒星雲の氷を作る

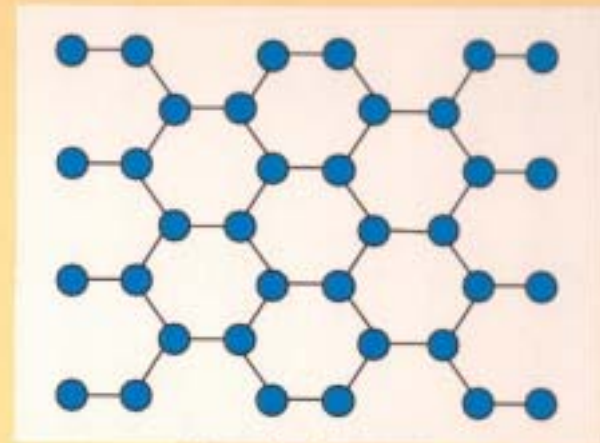
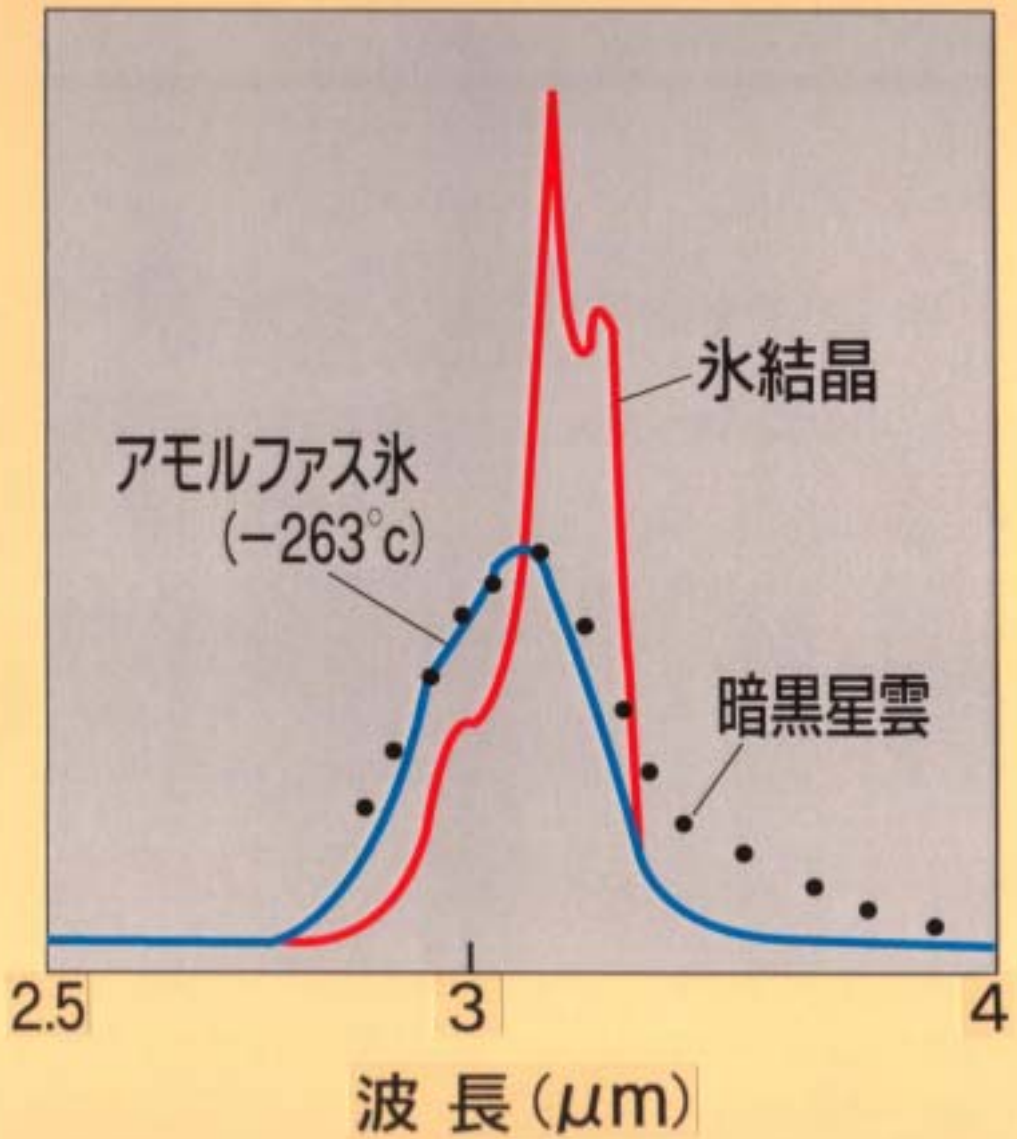
実験装置



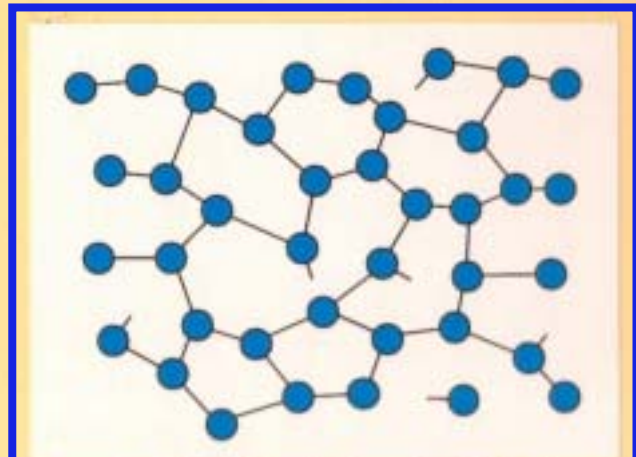
赤外線スペクトル



赤外線吸収スペクトル

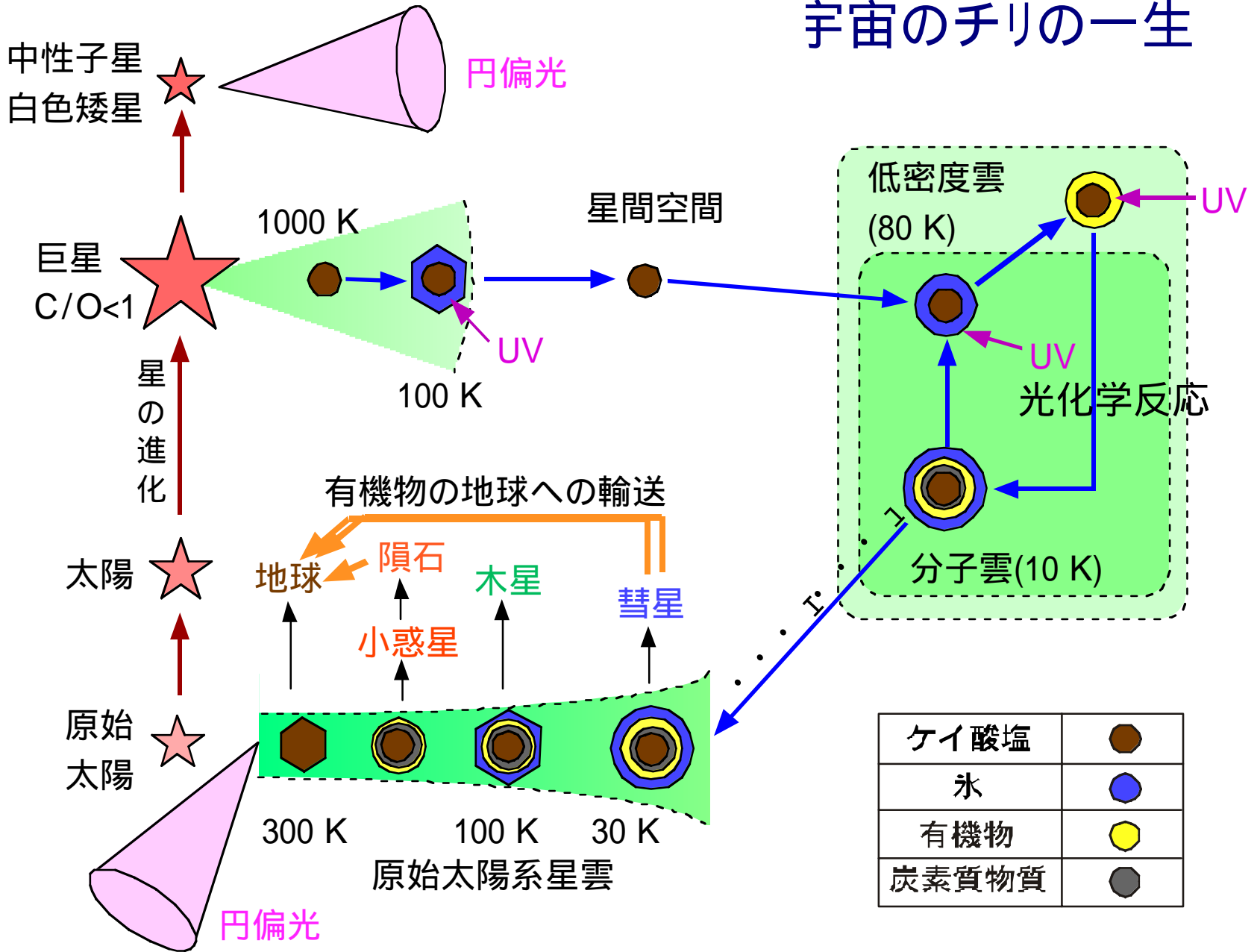


氷結晶

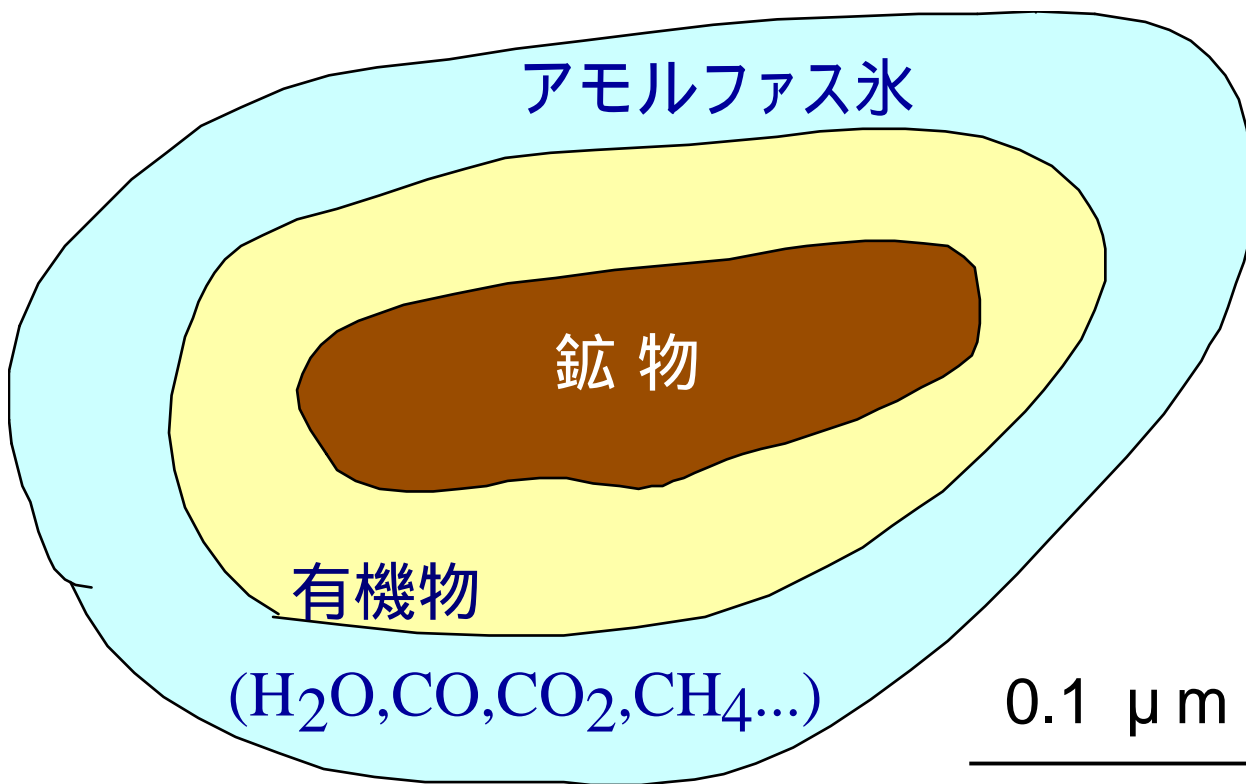


アモルファス氷

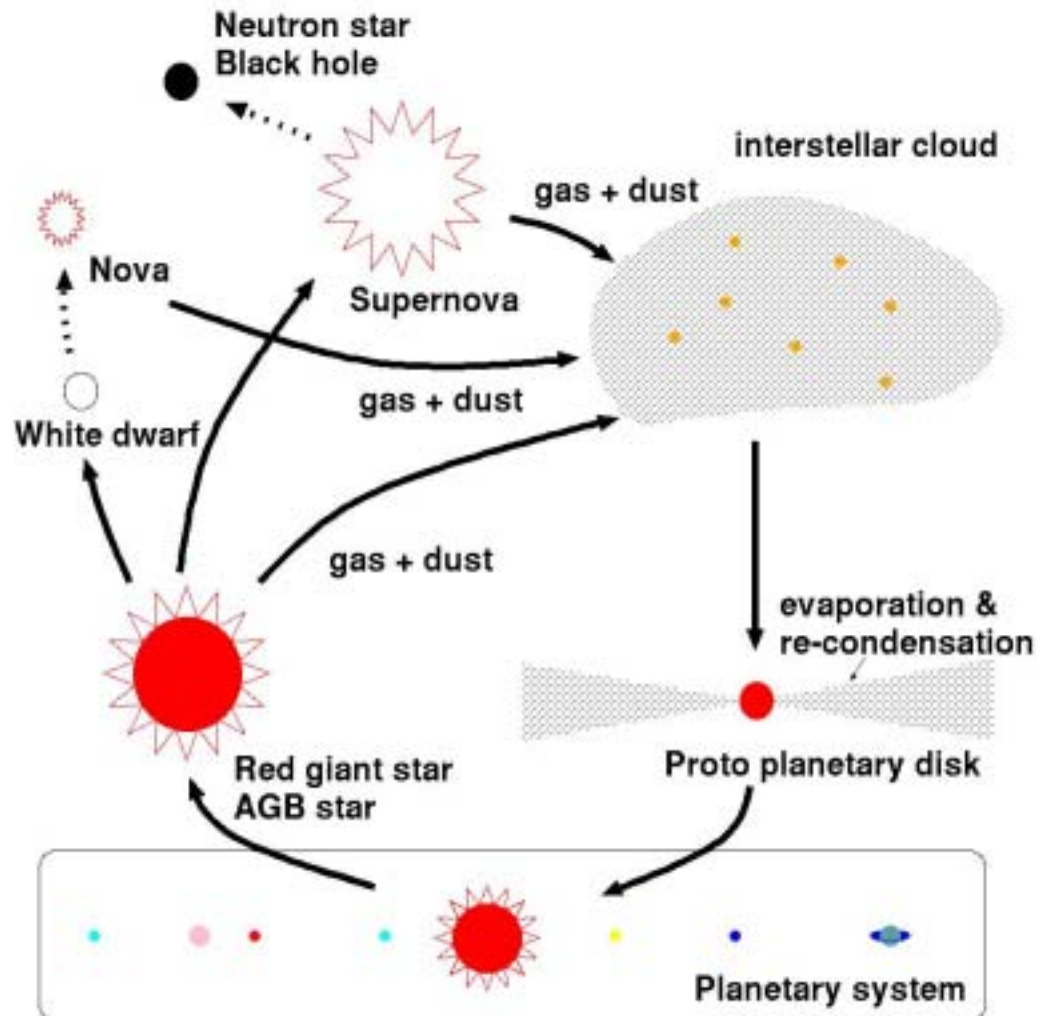
宇宙のチリの一生



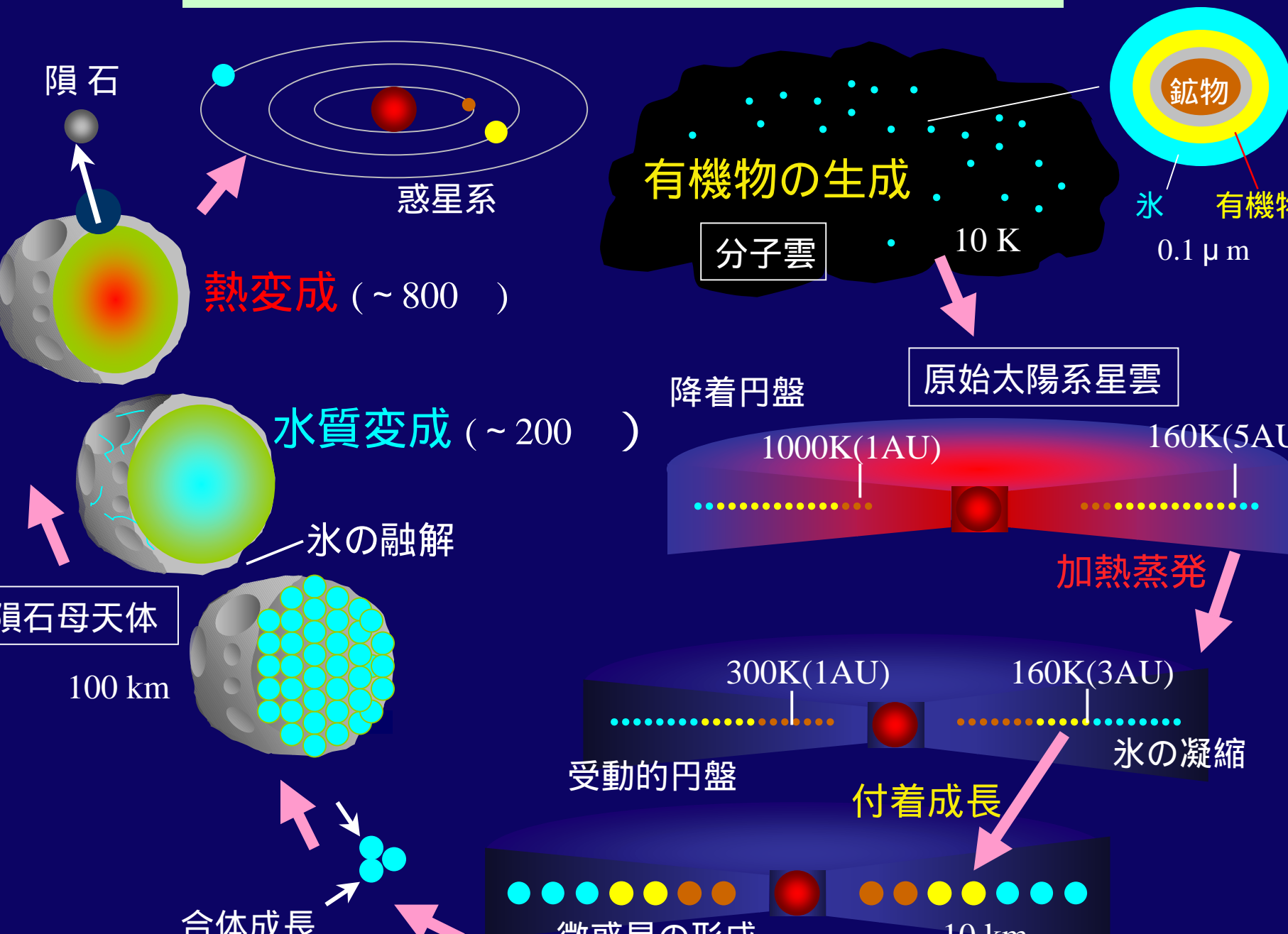
暗黒星雲の微粒子 = 太陽系の原料物質



Circulation of Matter in the Galaxy

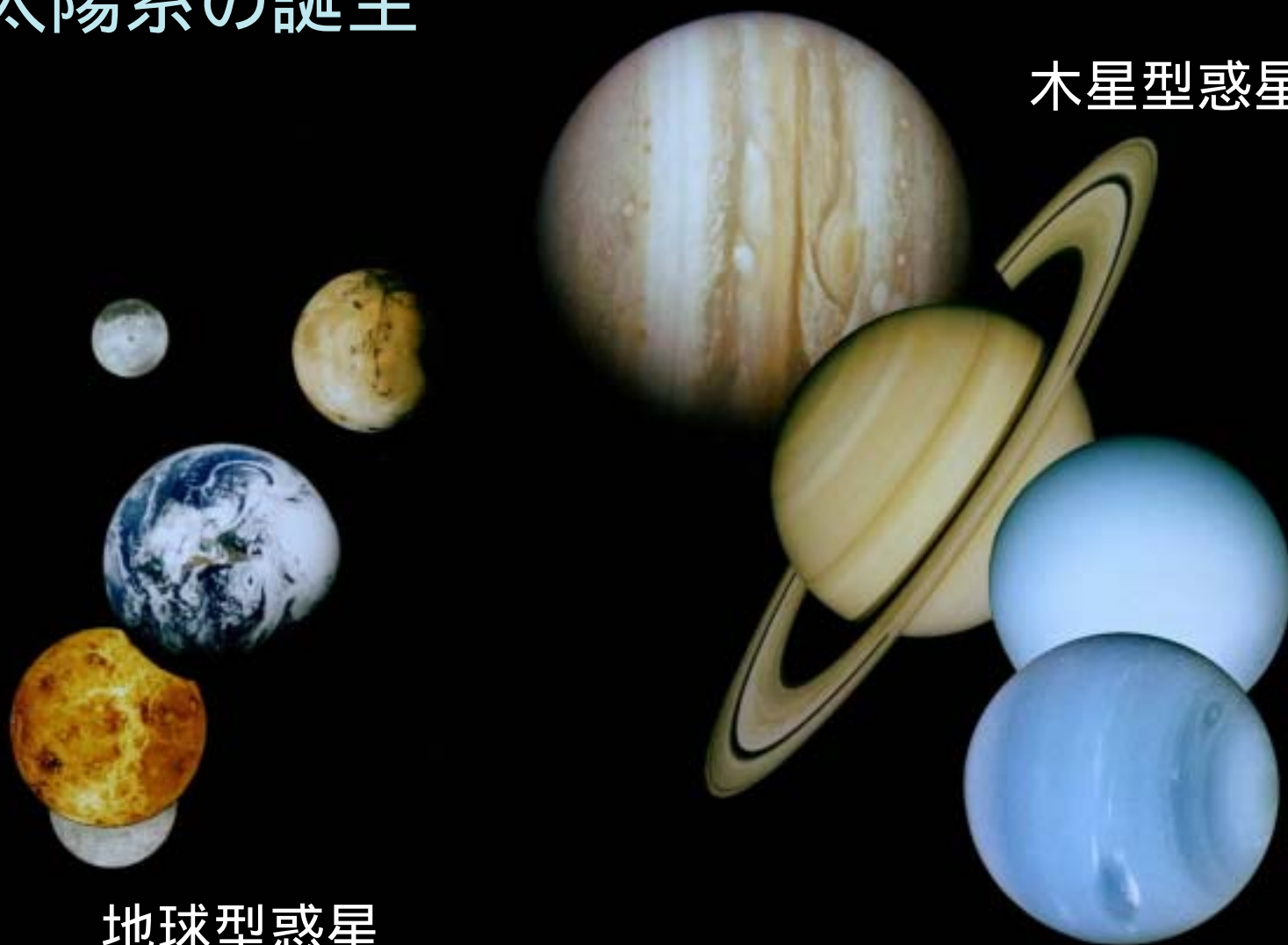


惑星系への過程でのダストの物質進化



太陽系の誕生

木星型惑星



地球型惑星

惑星はどのように形成されたのか？

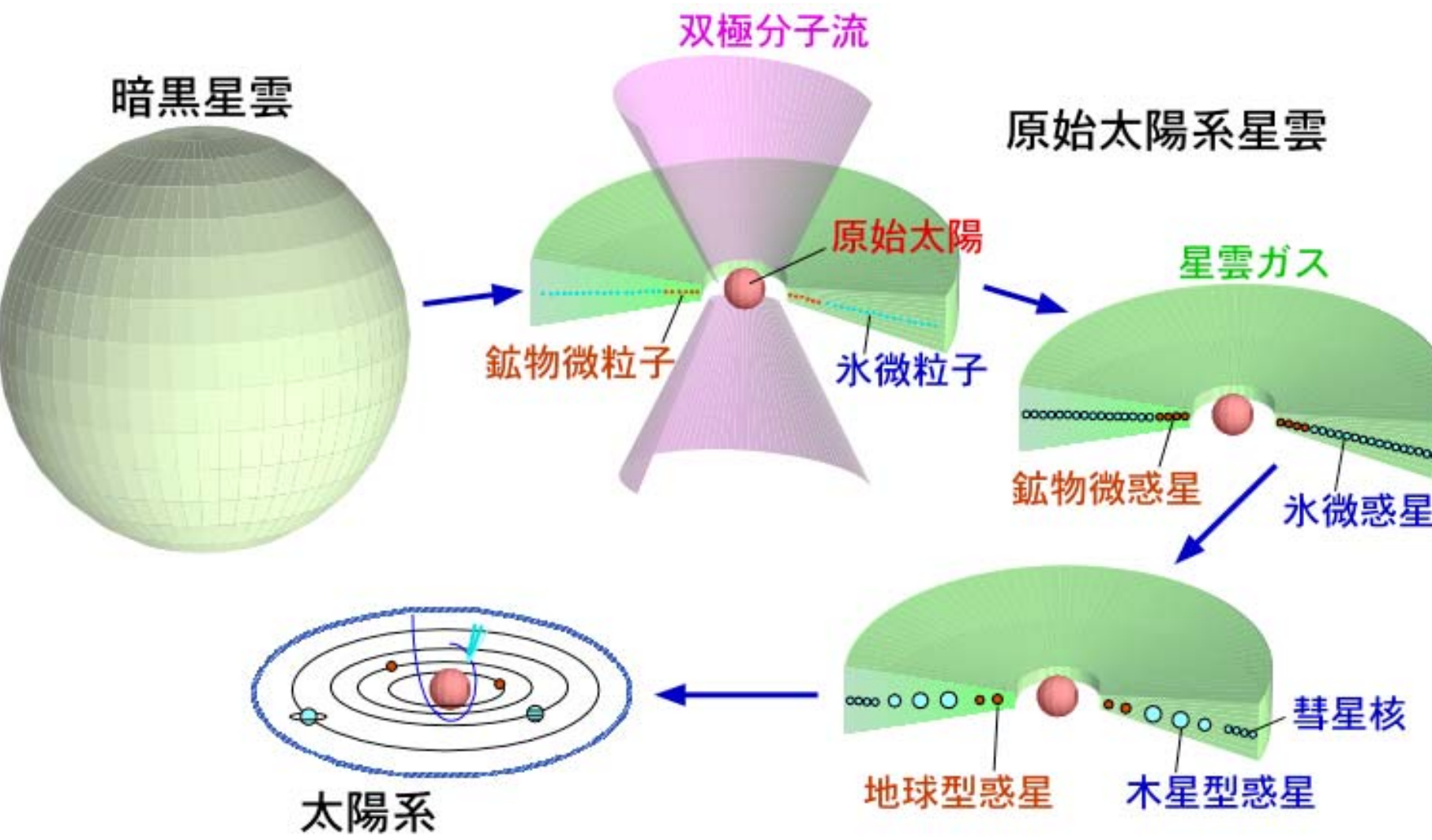
原始惑星系円盤

惑星の母体となるガスとダストからなる円盤

ダストから惑星へ

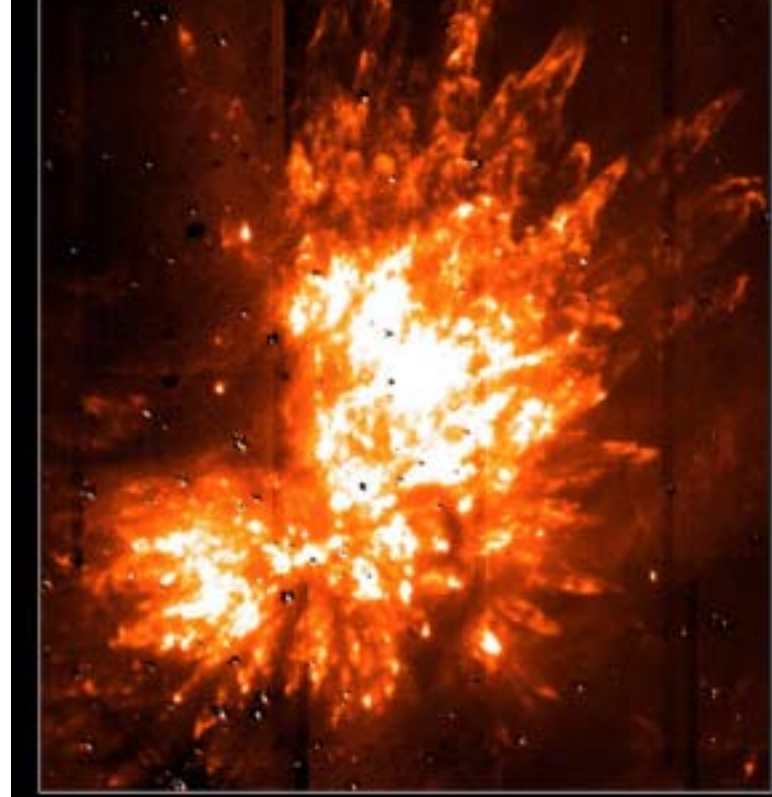
塵も積もれば...

太陽系の形成過程

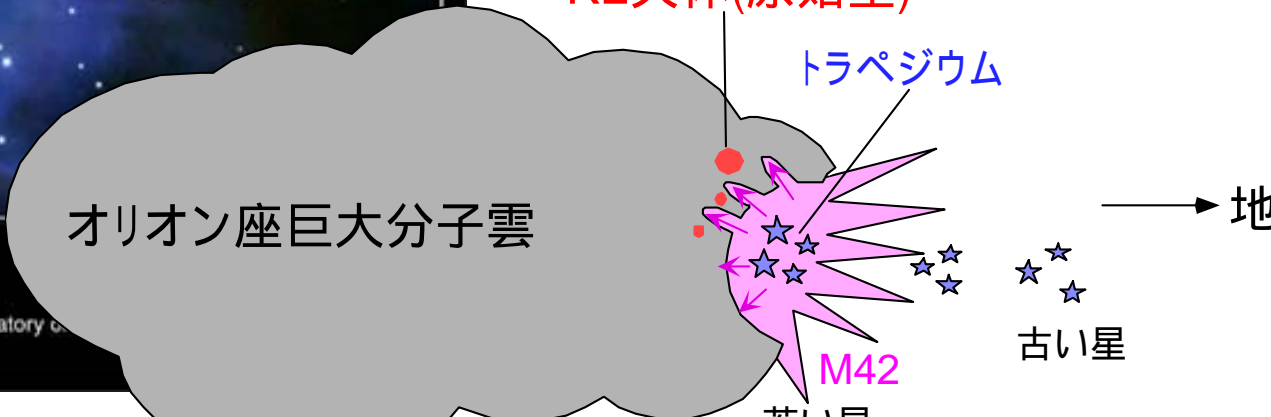


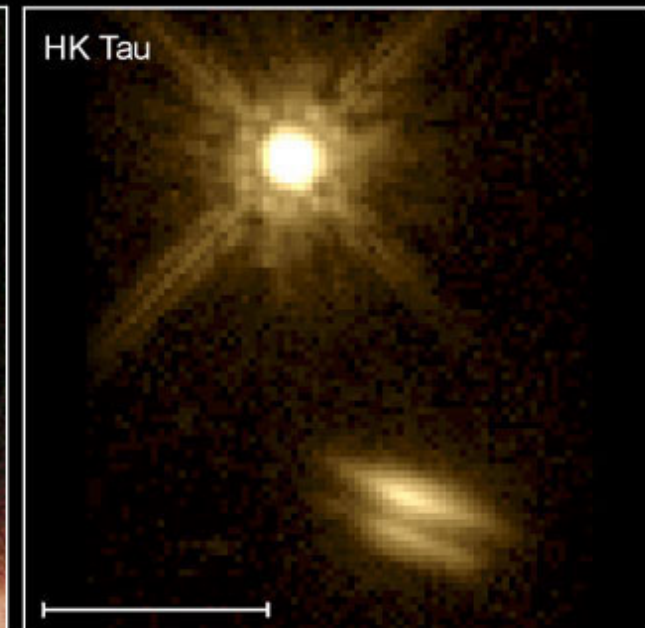
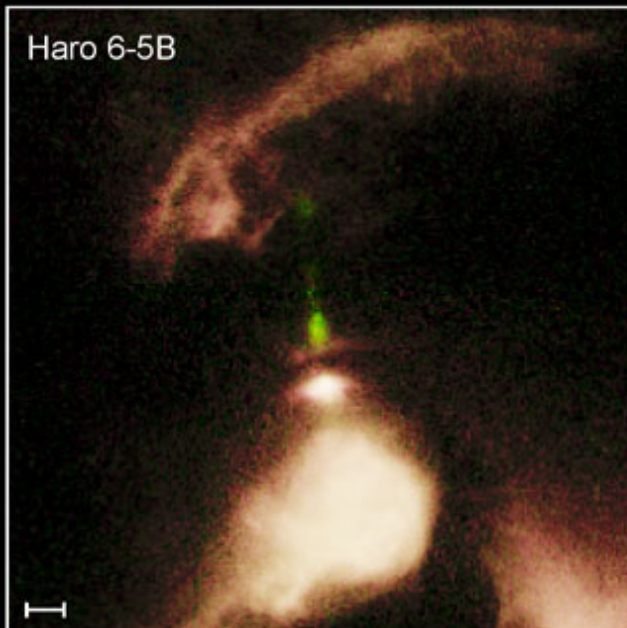
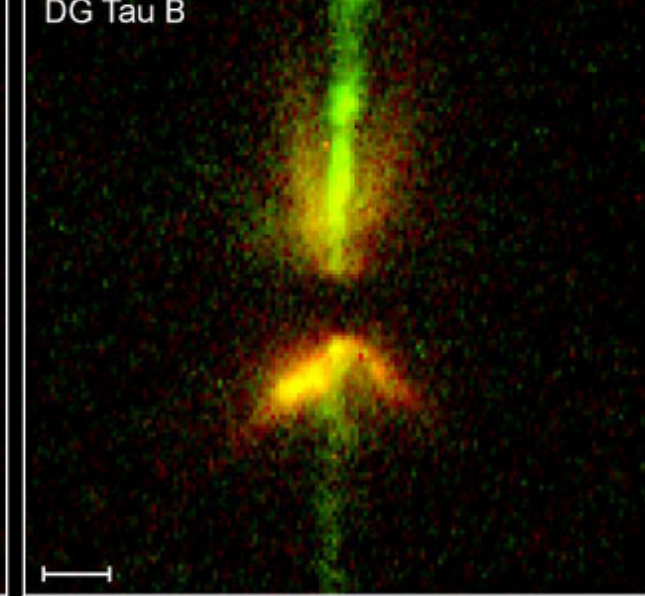
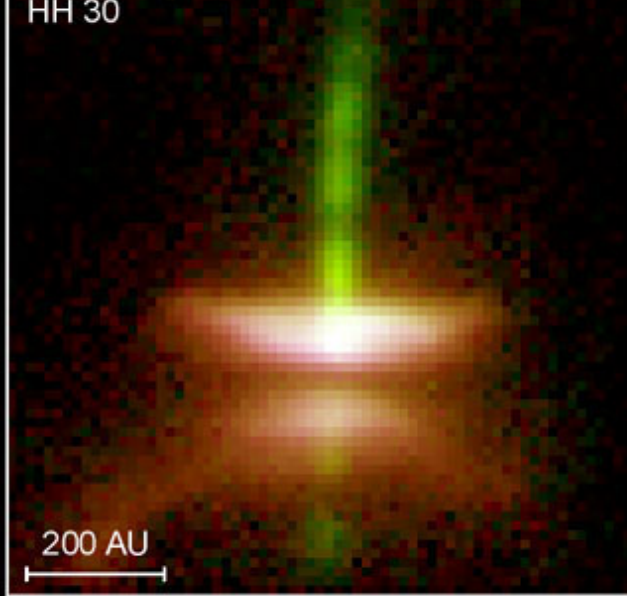


Orion Nebula
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan



Orion KL
CISCO (H α (v=1-0 S(1)) - Cont)
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan
January 28, 1999





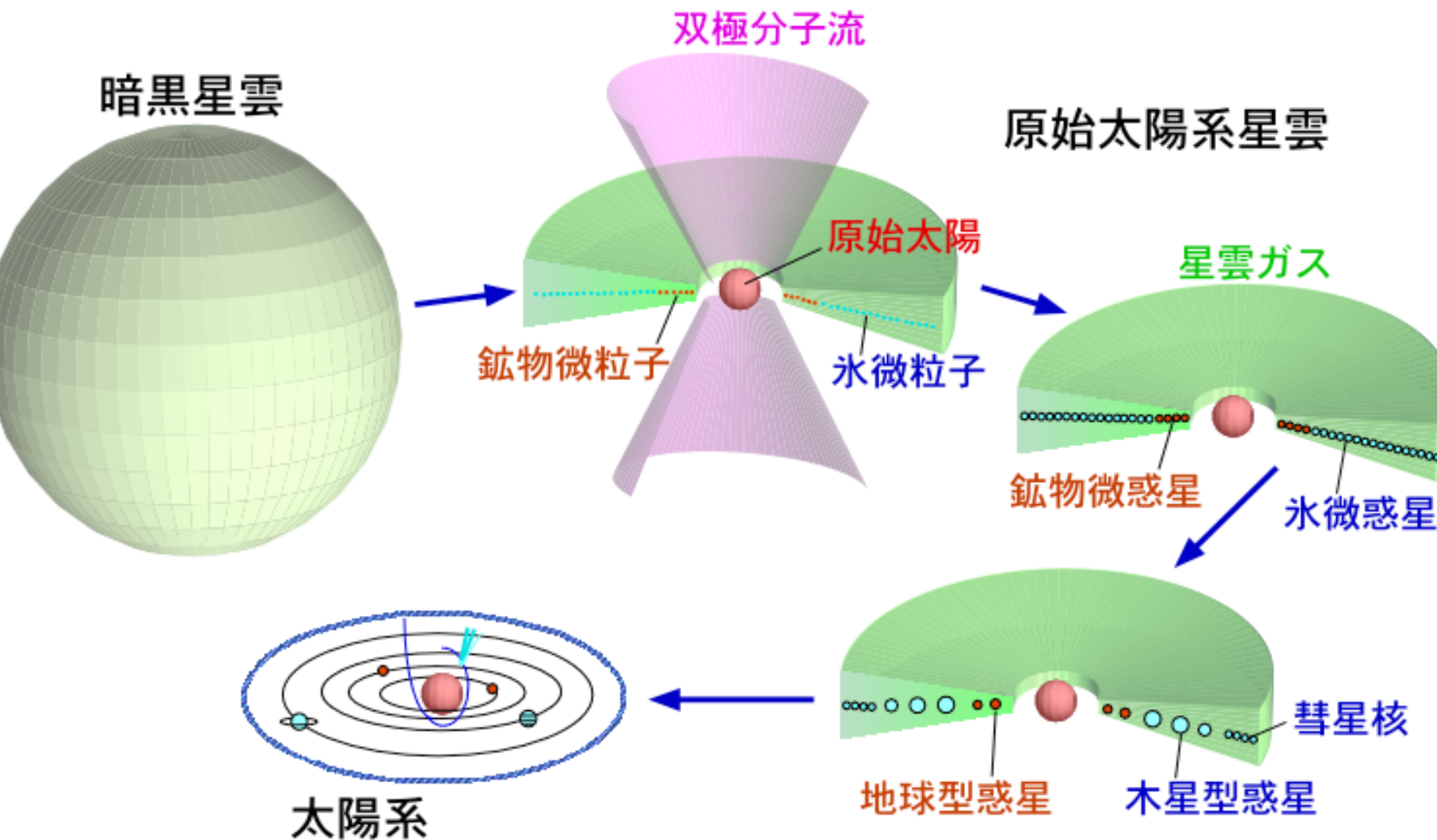
Disks around Young Stars

HST • WFPC2

PRC99-05b • STScI OPO

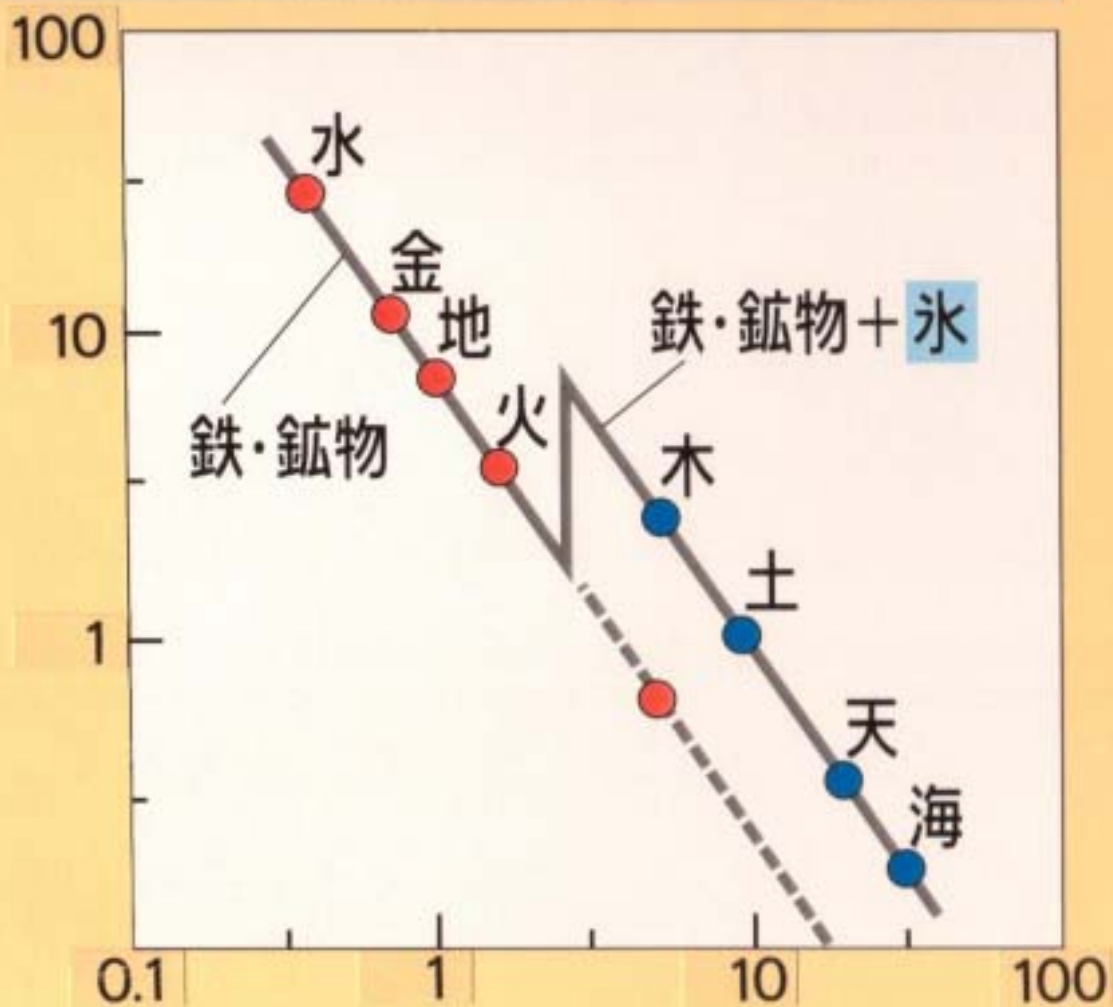
C. Burrows and J. Krist (STScI), K. Stapelfeldt (JPL) and NASA

太陽系の形成過程



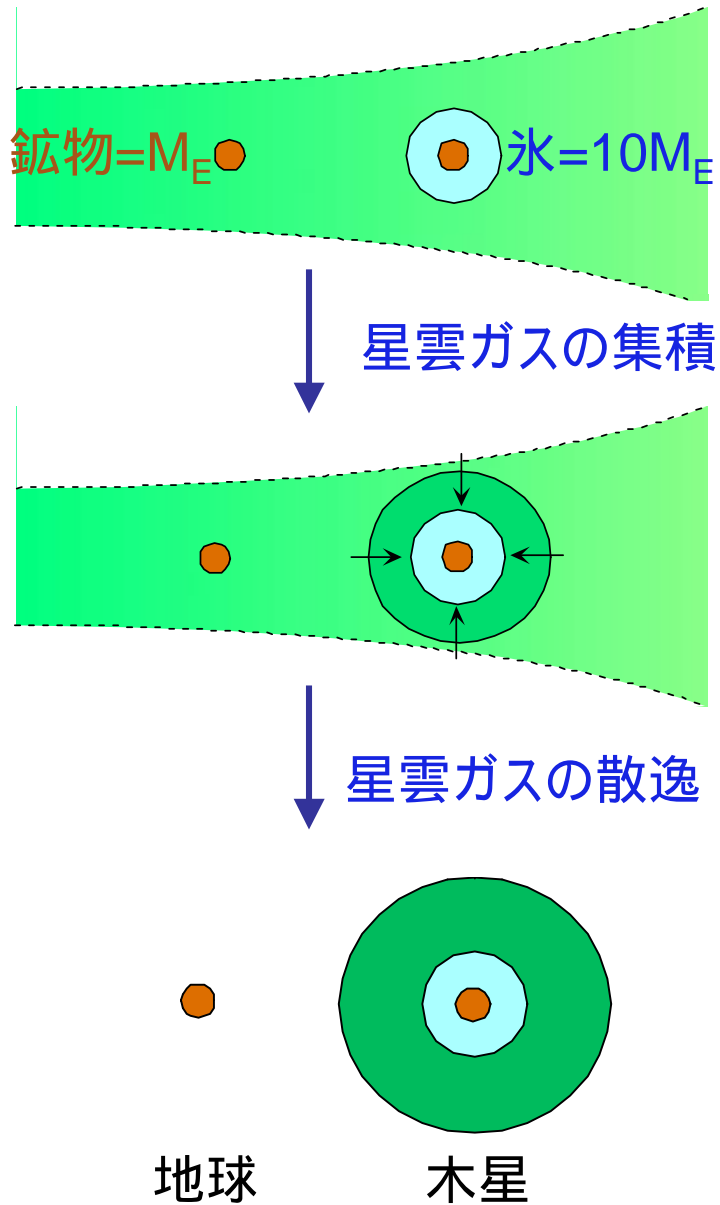
惑星原料物質の分布

チリの量
(g/cm^2)

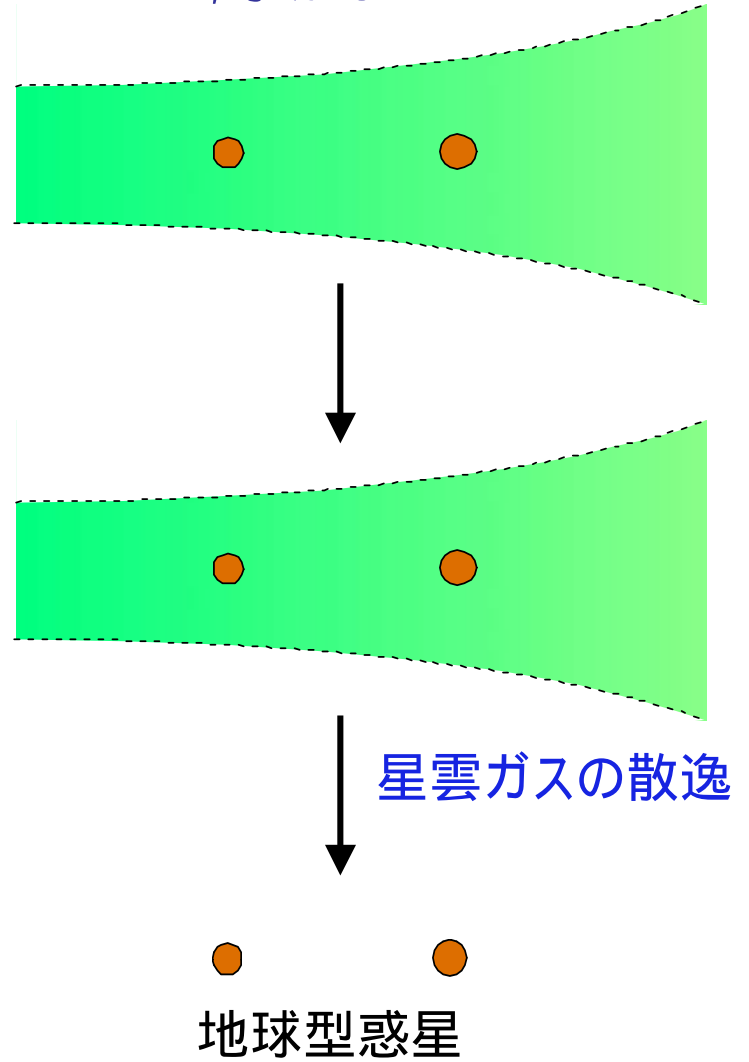


太陽からの距離 (天文単位)

違いの原因



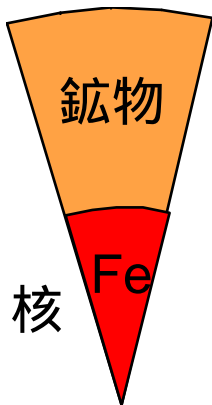
もし、氷がないと



内部構造の違い

地球

マントル



質量 = M_E

木星

H+He

外層部 = $304M_E$

氷
鉍物

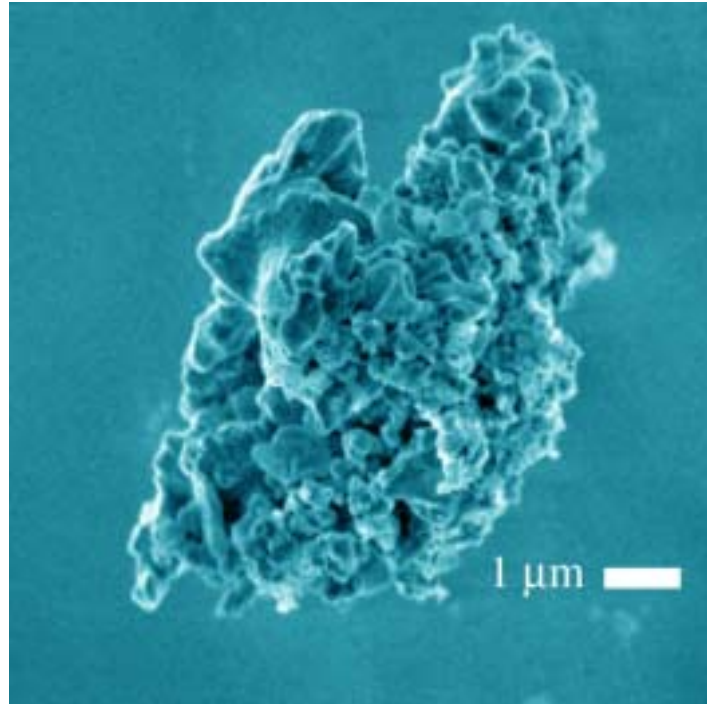
核 = $14M_E$



ダストから惑星へ

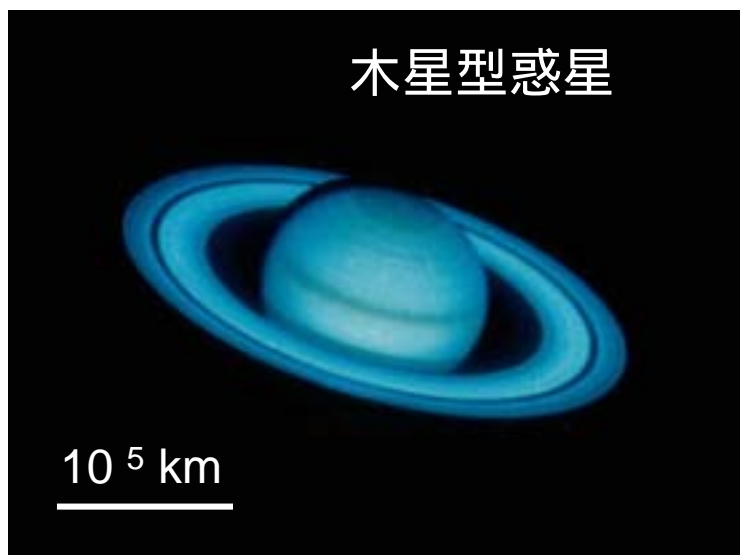
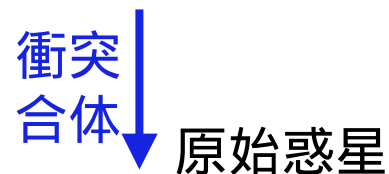
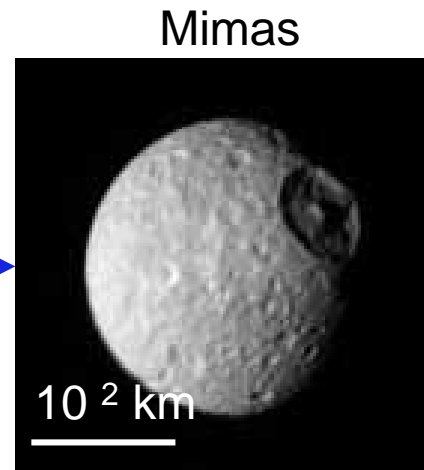
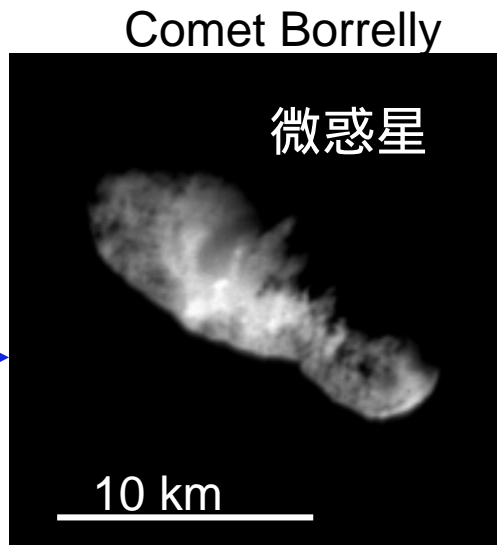
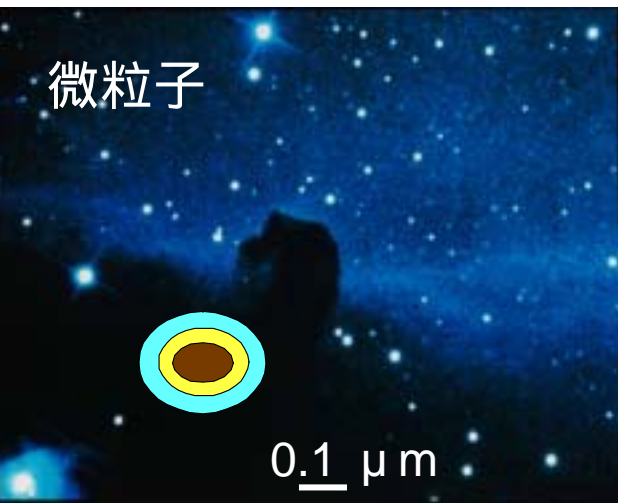
- 「塵が積もって惑星となる」
- ダスト粒子が衝突して本当にくっつくのか？
 - 衝突付着 or 破壊
 - その条件は？
 - 理論的に惑星が形成できるか？
 - 惑星形成論の未解決問題

宇宙塵



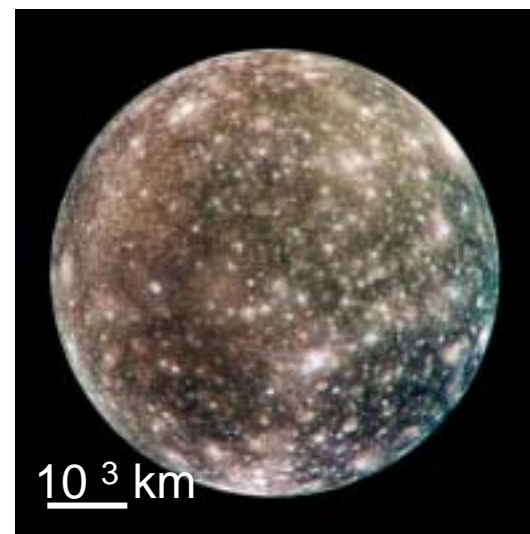
成層圏で採取された惑星間塵

惑星の成長過程



高速衝突

星雲ガス
の集積
($M > 10M_E$)



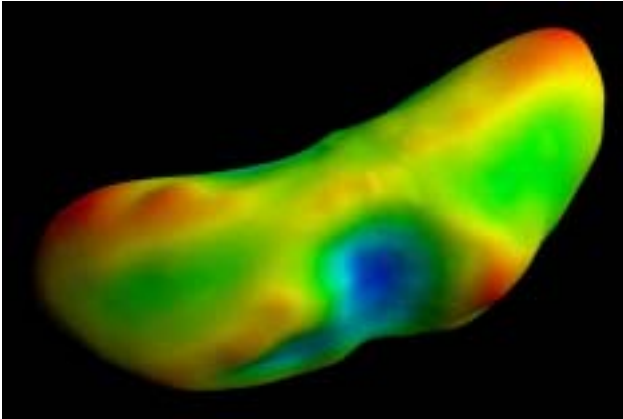
高速衝突現象

星雲ガス存在時

$< 1 \text{ km/s}$

星雲ガス散逸後

$10\text{-}30 \text{ km/s}$



衝突破片の速度 $>$ 天体の脱出速度

破片は飛び出す (成長しない)

低速 ~ 高速での氷の衝突実験

衝突実験装置

1段式加速装置

1段 Heガス
1 km/sまで加速

高速度カメラ
100 ns 間隔の撮影

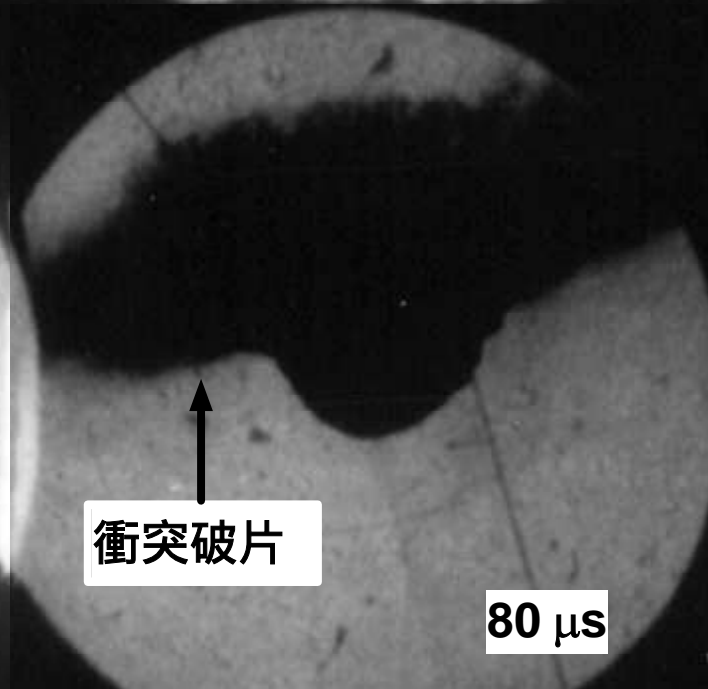
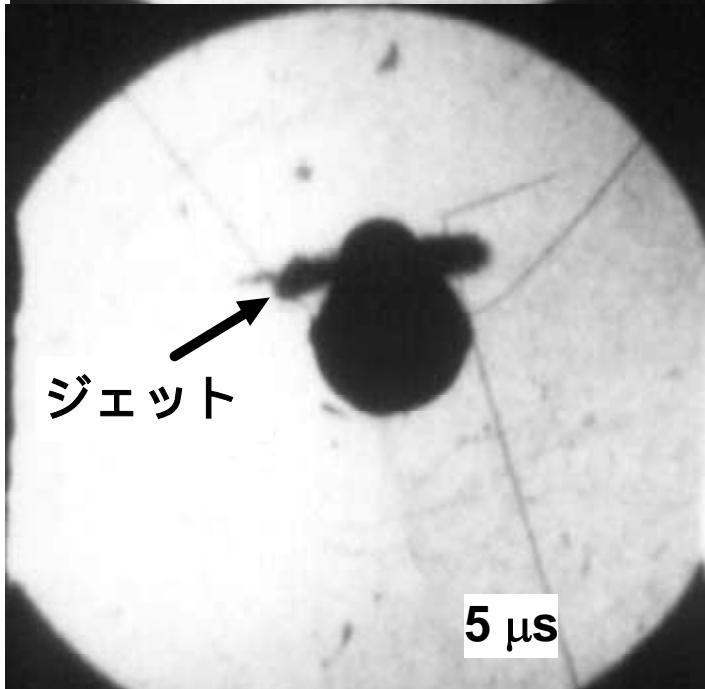
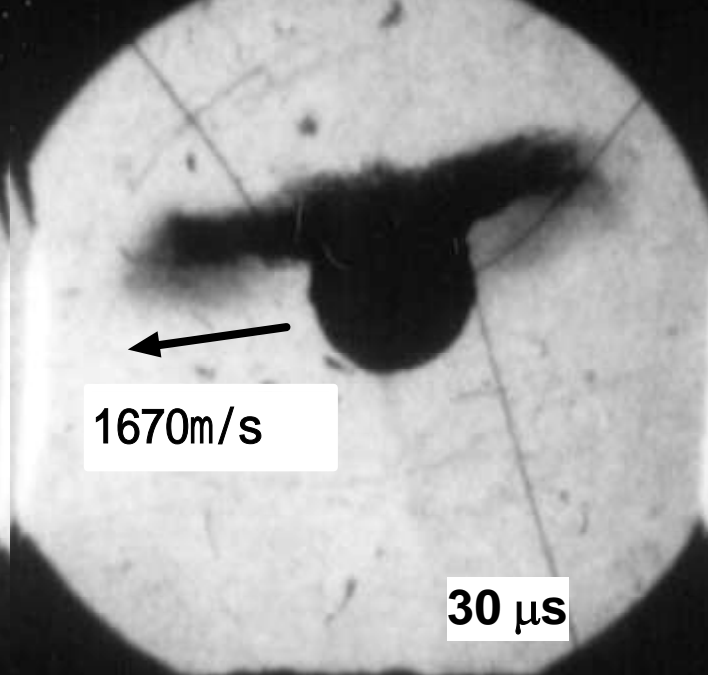
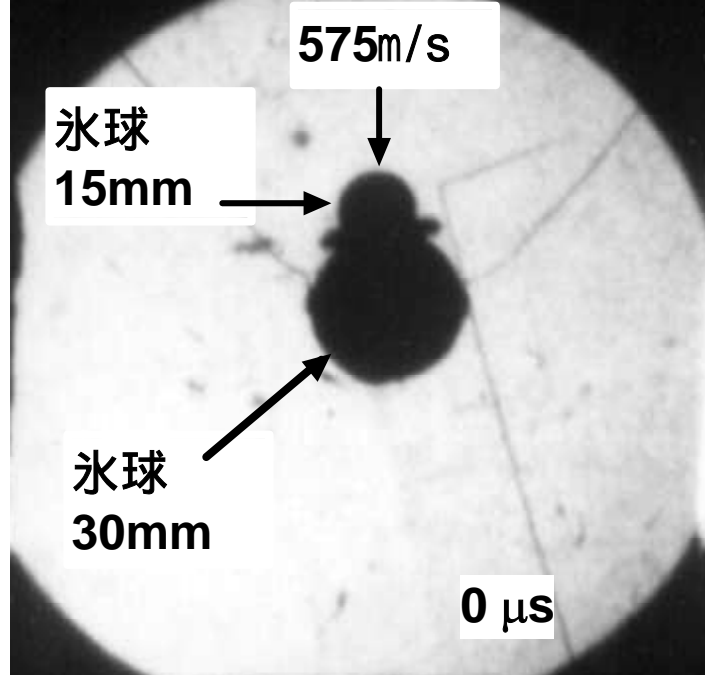
低温室(常温 ~ -30)



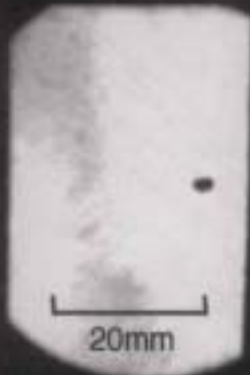
2段式加速装置

1段 火薬, 2段 Heガス 5 km/sまで加速

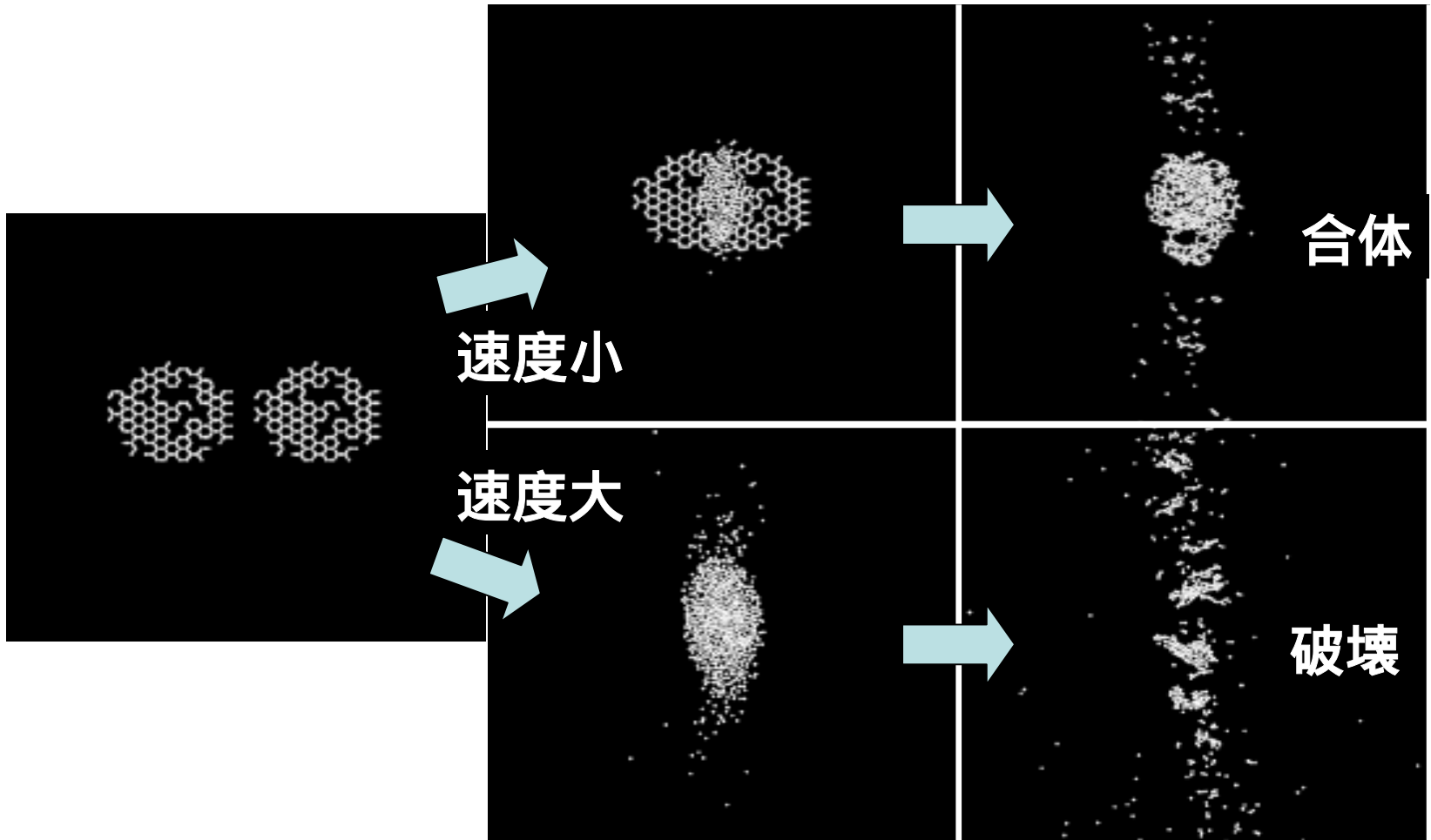




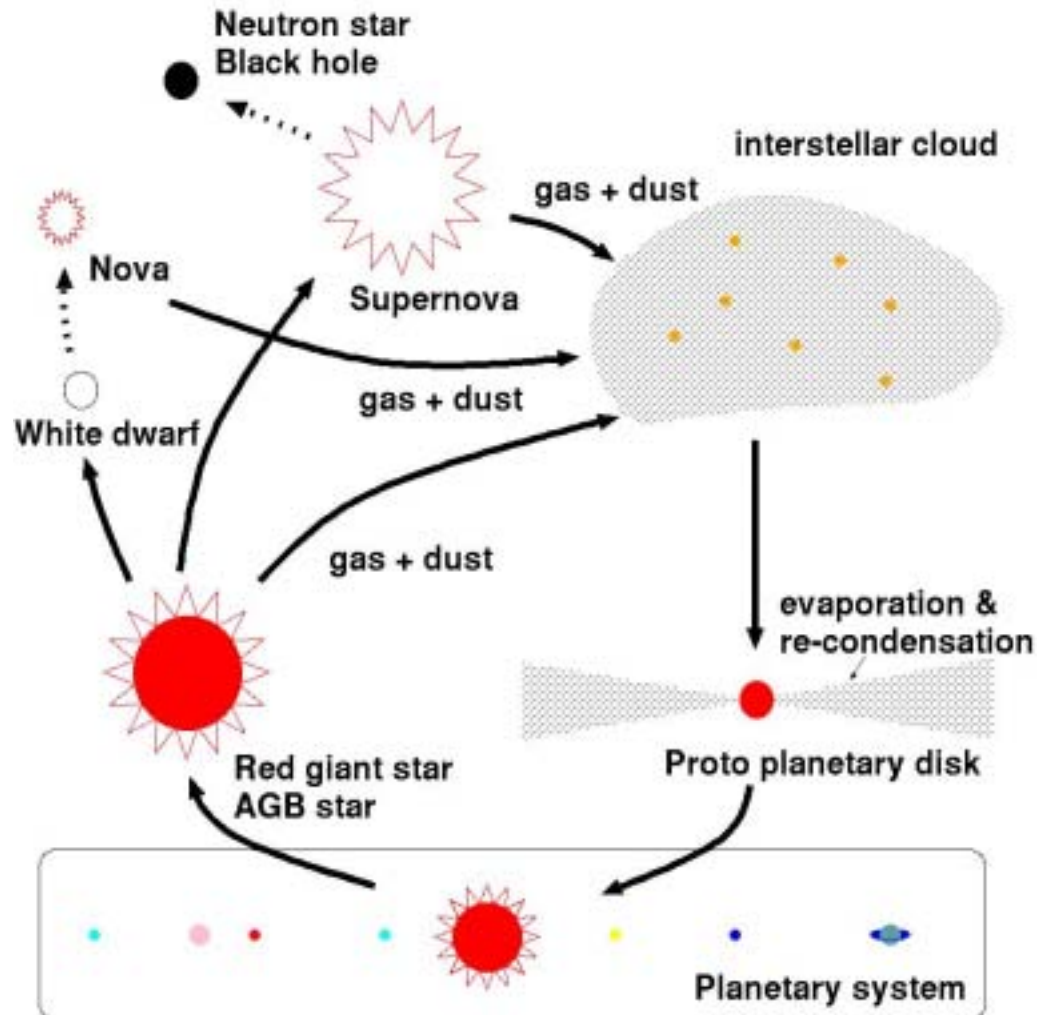
標的: 氷
弾丸:
プラスチック
温度: -20
速度: 5 km/s



ダスト・アグリゲートの衝突シミュレーション



Circulation of Matter in the Galaxy



宇宙物質進化

私は誰？
ここはどこ？
私はどこへ？

宇宙における人間の位置づけと進化のシナリオ

素粒子 / 核 / 原子 / ダスト / 星・惑星 / 生命

第2の地球，宇宙生命
原子が思考力をもつに至った過程