

2008年度冬学期 学術俯瞰講義

137億年の「物質」の旅
ービッグバンからみどりの地球へー

水曜5限 16:20-17:50

於 駒場キャンパス18号館ホール

「※:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

物理学の世界観

第1回 10月8日

第2回 10月15日

第3回 10月22日

理学系研究科・物理学専攻 須藤靖

物理的世界観： 目的

- 「狭い意味での**理系**」以外の学生が対象
- 断片的な知識の伝達を主目的とはしない
 - 佐藤文隆：「宇宙がビッグバンでできたなどという知識は二束三文の価値しかない。問題はなぜそう考えられているのかだ」
- **物理学の心**を伝える
- **夜空のムコウ**に何があるのか考えてみる

物理的世界観：目次

- I. 物理屋の偏見 (10/8)
- II. 夜空のムコウ (10/8)
- III. 物質の起源と宇宙の歴史 (10/15)
- IV. 宇宙の組成 (10/15)
- V. 自然法則と人間原理 (10/22)
- VI. 世界を科学で俯瞰する (10/22)

参考文献

- 須藤靖: 『ものの大きさ』
(東京大学出版会、2006)
- 須藤靖: 『解析力学・量子論』
(東京大学出版会、2008)
- John D. Barrow & Frank J. Tipler:
"The Anthropic Cosmological Principle"
(Oxford Univ. Press, 1986)
- ジョン・バロウ: 『宇宙に法則はあるのか』
(松浦俊輔訳: 青土社、2004)



Galileo Galilei (1564-1642)

画像出典:フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Galileo.jpg>

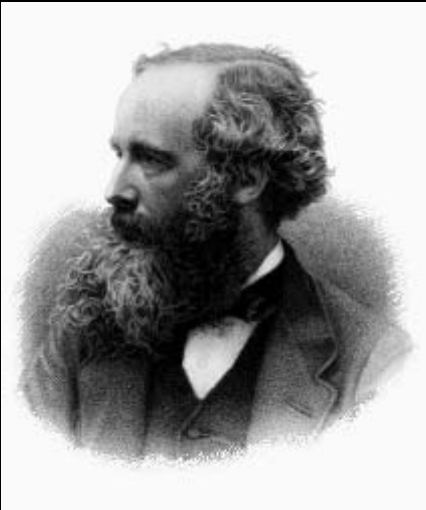


Isaac Newton (1642-1727)

画像出典:フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg>

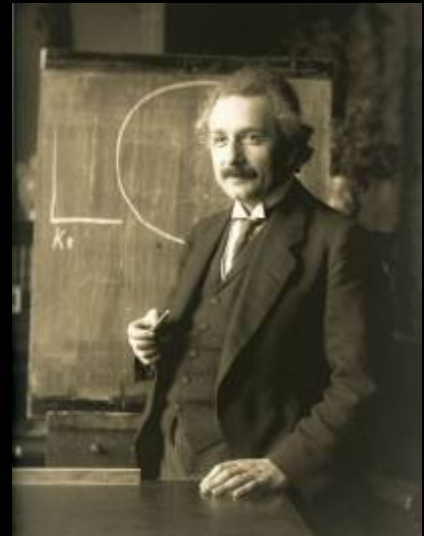
I 物理屋の偏見



James Clerk Maxwell (1831-1879)

画像出典:フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:James_Clerk_Maxwell.png



Albert Einstein (1879-1955)

画像出典:フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Einstein_1921_by_F_Schmutzer.jpg

高校までの「勉強」と大学(院)での「学問」

■ 高校まで

- 学習(学んでくりかえす)、勉強(つとめはげむ)

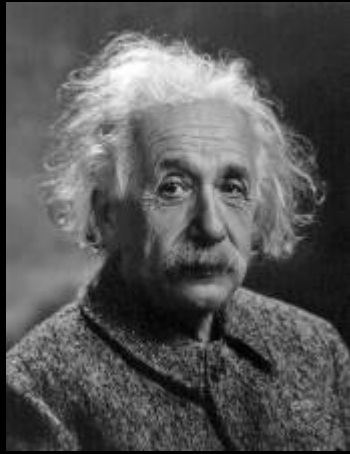
■ 大学(特に大学院)では

- 学問(学びて問う)、研究(みがいてきわめる)
- 受身のままずっと待っていても何も来ない
- 高校までの先生とは違い、大学の教員は親切ではない！
- 自分の適性を知る
- すべてを一人だけでやるのではなく、友人、先輩、後輩と共に学び議論し研究する

高校までに学ぶ物理

- 「何故？」から出発せずに、「このような結果になる」だけを教え込む
 - まだ問題意識がないうちに断片的に式ばかり押し付けられる
 - 出発点たる式が成り立つ理由が必ずしもすっきりとしない(微積分を使わないのも一因?)
 - 自然現象の背後に潜む摂理が伝わらない
 - 高校の物理(教科書、指導要領)は全くイケテナイ。
- 「本当」の物理(=自然界)は面白さに満ちている！

物理教の経典



画像出典:フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d3/Albert_Einstein_Head.jpg

- 世の中の「本質的なこと」はすべて物理法則によって「自然に」説明できるはずである
- むろん、実際にわかっていない現象も多いが
 - 自由度が多く、初期条件を精度よく推定できないために細かいことまではわからないだけ（複雑系）
 - まだ正しい物理法則の理解に至っていないだけ（すべての相互作用の統一⇒究極理論への道）
- つまり、単に我々がまだ未熟者であるだけで、もっと修行を積みればわかるようになるはず
 - 学者という職業の存在意義
- 「神様」を持ち出す必要はない

窮理学と物理学

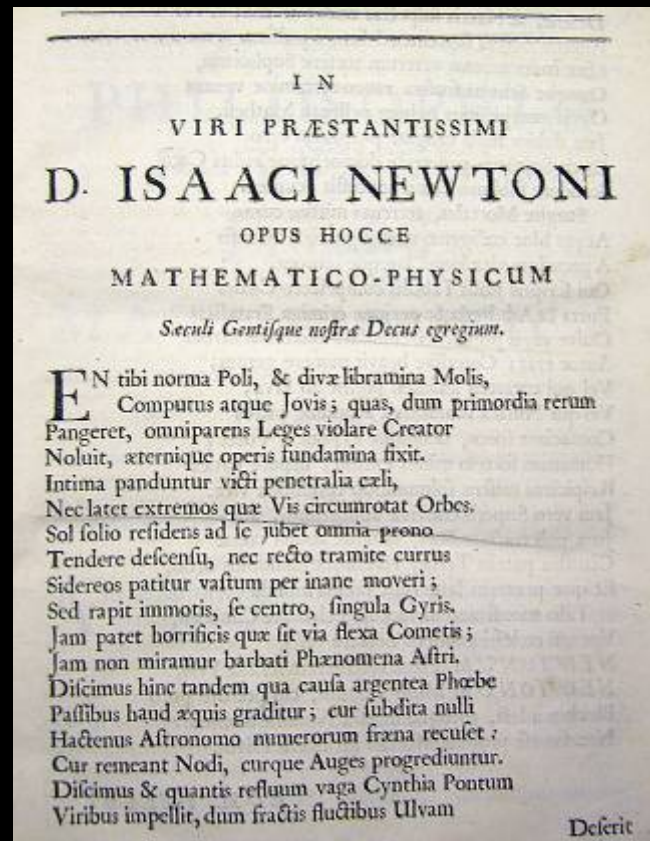
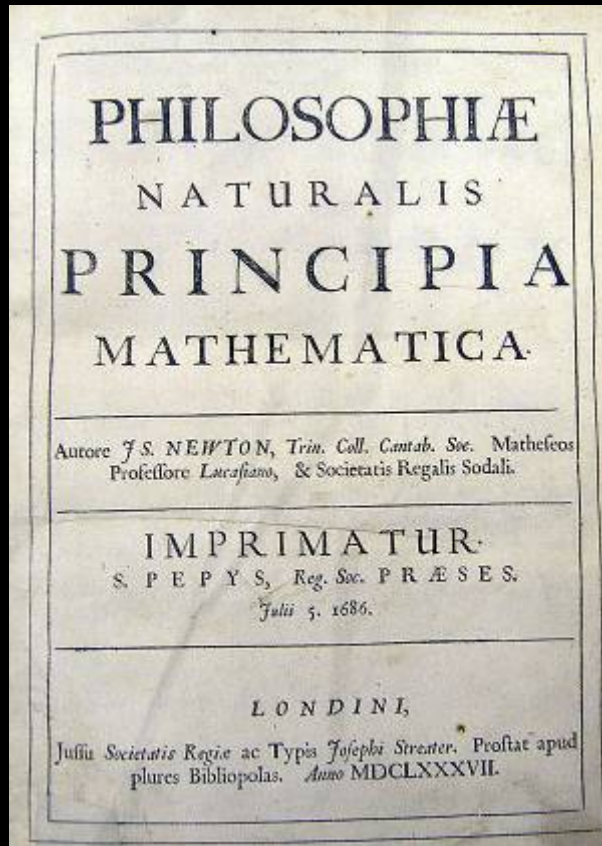
■ 窮理学 = natural philosophy

- 17世紀頃の英国で、思弁的な哲学と区別して人々が教養として身につけるべき「実験的な自然の哲学」を意味した
- 福沢諭吉等はこれを「窮理学」と訳した
- プリンキピア *Philosophiae naturalis principia mathematica*

■ 物理学 = physics

- 19世紀末頃から実用的な知識の重要性を認識し、natural philosophyがphysicsに置き換わる
- 自然学(広義のphysics)
 - = 自然法則の究明 (natural philosophy)
 - + 断片的な事実の集積 (狭義のphysics)

Crawford Collection at Royal Observatory Edinburgh



ニュートンの
デスマスク

プリンキピアの初版本(1687)
2007年10月24日撮影

物理学はあくまで自然界の近似的記述法

- 自然界の記述言語が数学である必然性はない
 - 自然(神様?)が微分方程式を解いて、物体の運動を決定しているとは思えない
 - にもかかわらずこれだけ多くのことが数学によって記述できることは奇跡であるとも言える
 - 現実に「解ける」問題に帰着させるには、本質だけを残した近似が必要
 - 仮にすべての要素を取り込んだ計算が可能だとしても、それでは結局物事の本質を理解できないばかりか、逆に理解から遠ざかるだけ

物理学(自然科学)は常に進化する

説明すべき重要な問題を発見し、 $n=1$ として開始

- n 次近似モデルの構築
- モデルの予言を観測・実験によって検証
- モデルのもつパラメータの値を精密に決定
- パラメータがなぜその値になるかを考察・理解
- このモデルの枠内で説明できないような現象、あるいはモデルの限界をとことん探る

$n \Rightarrow n+1$ として、ステップ1から5を飽きるまで(あるいは、引退するまで)繰り返す(n が大きくなるほど精密化は進むが、だんだんつまらなくなってくることが多い)

自然科学とえせ科学との違い

■ 自然科学の特徴

- 決して「厳密な」自然像構築のみを追求してはいない
- あくまで近似的描像を更新し続ける行為
- 論理自身は問題なくとも、実験が否定することもある

■ 「正しいのか間違っているのか区別できる」ことこそ自然科学の本質的定義

- "falsifiable" (うそであることを示しうる)
- 間違っているか判断できない命題(例えば、神が宇宙を創った)は、自然科学では(まだ)扱えない
- 「説明できない事実が存在する」は自然科学の限界ではなく、むしろ出発点

自然科学は進歩する

- 失敗する(できる)からこそ進歩する
 - 失敗したことが明確に認識でき、その**反省**がフィードバックされた結果としてやがて次の成功を生む
- 「自然」あるいは実験・観測事実と矛盾すれば、どれほど論理的にすばらしい美しい理論であってもそれは(自然が残念ながら採用しなかったという意味で)間違いであり、捨て去らざるを得ない

政治・行政・哲学などは(あまり) 進歩しない(遅い)

■ 失敗から学ぶことが困難

- 失敗したかどうかは解釈に依存する
- 過去を変えることはできないので、現在の判断が正しかったのか間違っていたのか客観的な検証が困難

■ 定量的な予言が困難(検証が常にとづけ)

- 単に都合のよい部分だけをとってきて一見正しそうな論理をでっちあげることが可能
- 論理とは関係ない「権威」が存在する
- したがって、成果を検証する、さらに反省する、という当然の習慣がないまま次から次へと同じ過ちを繰り返す

注意：物理学(自然科学)帝国主義 を主張しているわけではない

- 自然科学以外の学問が自然科学より劣っていると主張しているのではない
 - 『知の技法』(東大出版会、1994)において小林康夫先生は、文科系における反証可能性(falsifiability)の重要性を力説している
- 自然科学の方法論が体系として優れているのは事実であろうが、それは自然科学のほうが優れた学問だという意味ではない
- しかしながら、文科系の学生もまた理系的センスを持ち合わせることは重要(というか必須)

科学を学ぶ意味

- 「試験のために勉強する」わけではない
- 当たり前とされていることでも一度は疑ってみる
 - みんなが言っているからではなく自分で納得する
- 正しいことと間違っていることを見極める
 - 変な人(詐欺師、政治家、官僚、教員)に騙されない
 - 真実を合理的に理解し納得する
 - 善悪を区別する
- 結果が役に立つかどうかは別問題。答えが得られなくてもよい。世の中の不思議さを思い知る

私の考える科学の心

- 謎を解明する(問題に答える)よりも、**新たな謎を発見(世の中の不思議さに感嘆)**するほうが大事
 - **勉強**(つとめはげむ)から **学問**(学びて問う)へ
- **決して競争するな**: 勝ち負けという価値観は科学とは本来相容れない
- **ただし、このような私の価値観は、科学者の間でもあまり受け入れられてはいない**
 - しかし「役に立たない」学問を、その波及効果、あるいは「100年後に役に立つ」学問を生み出すという理由で正当化する論調には賛同しかねる

2008年10月7日 発表 2008年度ノーベル物理学賞



南部陽一郎

画像出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:YoichiroNambu.jpg>



益川敏英

画像出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Masukawa.jpg>



小林誠

画像出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Mkobayashi.jpg>

微視的階層(素粒子)の解明、素粒子の質量の起源

役に立つ学問と役に立たない学問

- 「役に立つ」となぜ良いか
 - 生活を便利に⇒自由な時間が増える⇒人生を楽しむ（趣味=音楽、美術、文学、科学）
 - 技術が「売れる」⇒「儲ける」⇒何でも買える⇒人生を楽しむ（趣味=音楽、美術、文学、科学）
- 人生の究極的目的を突き詰めればやがて「役に立たない」ものに帰着
 - 狭義の「役に立つ」は、結局は広義の「役に立たない」を楽しむという文脈において意味をもつ？
- *C'est une occupation très jolie. C'est véritablement utile puisque c'est joli.*
(Le Petit Prince: Antoine de Saint Exupéry)

Henri Poincaré

(Science et méthode, 1908)

- *Le savant n'étudie pas la nature parce que c'est utile, il l'étudie parce qu'il y prend plaisir et il y prend plaisir parce qu'elle est belle. Si la nature n'était pas belle elle ne vaudrait pas la peine d'être connue, la vie ne vaudrait pas la peine d'être vécue.* (The scientist does not study nature because it is useful to do so. He studies it because he takes pleasure in it, and he takes pleasure in it because it is beautiful. If nature were not beautiful it would not be worth knowing, and life would not be worth living.)

Richard Feynman

(The Feynman lectures on physics, volume III, Feynman's Epilogue)

- Finally, may I add that the main purpose of my teaching has not been to prepare for some examination -- it was not even to prepare you to serve industry or the military. I wanted most to give you some appreciation of the wonderful world and the physicist's way of looking at it, which, I believe, is a major part of the true culture of modern times. *(There are probably professors of other subjects who would object, but I believe that they are completely wrong.)*

研究者に向いている人

- 大学院入学までに行う試験での評価基準
 - 正解が存在することがわかっている問題を
 - 決められた時間内に
 - 一人だけで何も見ず
 - すべての科目を万遍なく
- これらは研究(のみならず一般に人生)と「矛盾する」
 - 試験での秀才 ≠ 優れた研究者
- 人間の才能は1次元の数値(全教科の総合得点)ではなく、多次元空間で表現すべきもの
 - 必ずしも(とびぬけて)優秀である必要はない
 - 何でも良いから余人をもって代えがたい度合いが重要
- ただし研究が好き・楽しめることが大前提

科学教育の目的： 科学的思考法を身につける

- 文系か理系かといった瑣末な問題ではない
- 科学的**知識**を問題としているのでもない
- いわゆる文系と言われている職業（法律家、政治家、官僚）にこそ科学的**思考法**が不可欠
 - 今や司法関係者（⇔文科I類）に最新の科学・技術の理解がなくては問題の正しい判断は不可能
- 残念ながらそれが欠如している（しかもそれを恥じていない）としか思えない人が多いのも事実

自然界の本質を見抜く

ここに挿入されていた、下記の書籍のイラストは、著作権処理の都合上、削除されました。

新訳 星の王子さま (単行本)
アントワーヌ・ド・サン＝テグジュペリ
(著), 倉橋 由美子 (翻訳)
宝島社 p8

見えているものがすべてではない

ここに挿入されていた、下記の書籍のイラストは、著作権処理の都合上、削除されました。

新訳 星の王子さま (単行本)
アントワーヌ・ド・サン＝テグジュペリ (著),
倉橋 由美子 (翻訳)
宝島社 p9, 22

Ⅱ 夜空のムコウ



「※:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

青空しか知らないとこの世界だけが
唯一の存在のように思ってしまう



(すばる観測所、田中壱氏撮影)

夜来たる



6つの太陽をもつ惑星ラガッシュに
二千年に一度の夜が訪れる

「我々は何も知らなかった」

満天の星空を見上げれば、

我々以外の世界がないほうが不自然

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

見えなくともそこにあるもの

- 夜空が暗いからこそ天体が見える、我々の世界を理解できる (Isaac Asimov: *Nightfall*)
- 星や銀河は輝いているから存在がわかる
- 「暗いところには何も無い」ことを証明できるか？
 - 漆黒の粒子が集積した結果、光を隠しているのでは？ (de Selby in Flann O'Brien: *The Third Policeman*)
 - 真の暗闇を撮影できるか(=ダークエネルギーの観測)
 - 完全な静寂を録音できるか(小林康夫と坂本龍一の対談 UP2008年2月号)
- 宇宙を満たしているものは何か？認識しうるか？

天文学・宇宙物理学共通の目標:

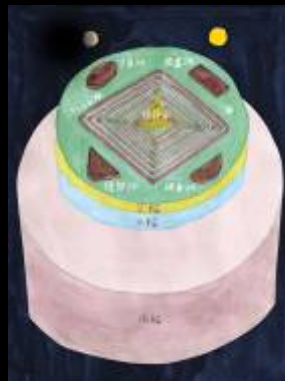
夜空のムコウの世界を探る

- 我々の世界はどうなっているかを解き明かす

古代エジプトの宇宙像



古代中国の宇宙像



古代インドの宇宙像



<http://www.isas.ac.jp/kids/firstlook/index.html>

- 直接役に立つわけではなくとも人生を豊かにしてくれる本質的な疑問に挑戦する

- 宇宙は何からできているか？(宇宙論)
- もう一つの地球はあるか？(太陽系外惑星研究)
- 生命はいかにして誕生したのか？(宇宙生物学)

宇宙を構成しているもの

宇宙の大構造

銀河群



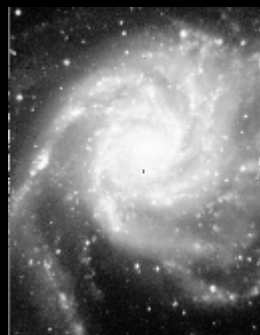
矮小銀河



銀河団



銀河



星団

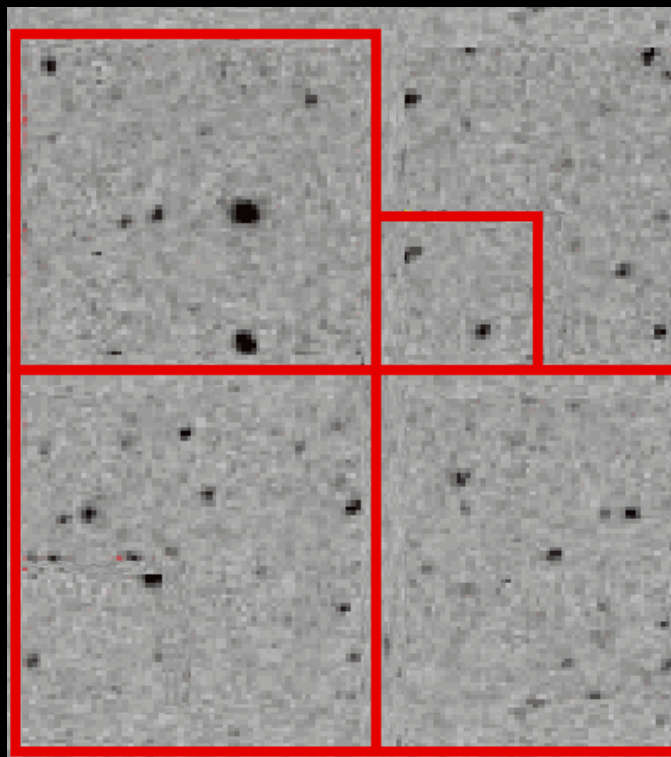


太陽系



天体諸階層の典型的大きさ [光年]

宇宙を見る目 の進歩



地上4m望遠鏡+CCD
100×写真乾板



Hubble Deep Field
ST ScI OPO, January 23, 1996. R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA.

HST WFPC2

ハッブル宇宙望遠鏡+CCD: 1000×地上望遠鏡

http://hubblesite.org/gallery/album/the_universe_collection/pr1996001c/

SDSS (スローンデジタルスカイサーベイ) 米国ニューメキシコ州アパッチポイント天文台

ここに挿入されていた映像は著作権処理の都合上、
削除されました。

NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映



史上最大の銀河の3次元地図作り： 国際共同スローンデジタルスカイサーベイ

8千万個の銀河を観測、そのなかの80万個の銀河の3次元地図作り

ここに挿入されていた映像は著作権処理の都合上、削除されました。

<http://www.sdss.org/dr1/>

ここに挿入されていた著作物（ロゴ）は著作権処理の都合上、削除されました。



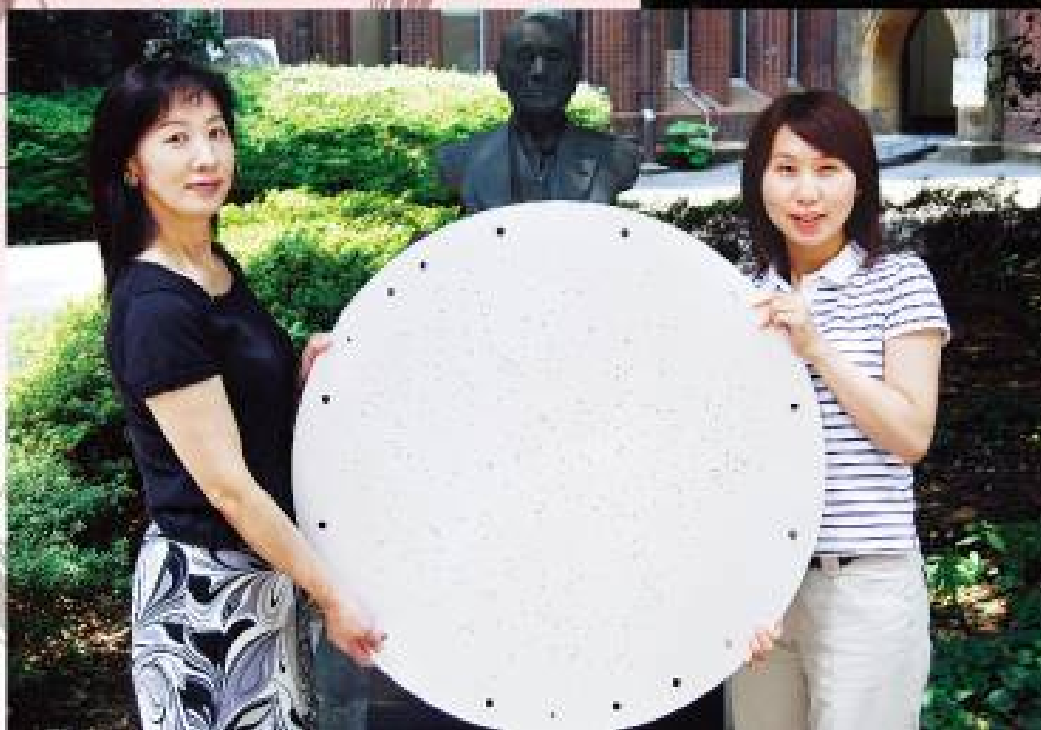
ここに挿入されていた著作物（ロゴ）は著作権処理の都合上、削除されました。

東京大学理学系研究科・理学部ニュース

2008年9月号 40巻3号

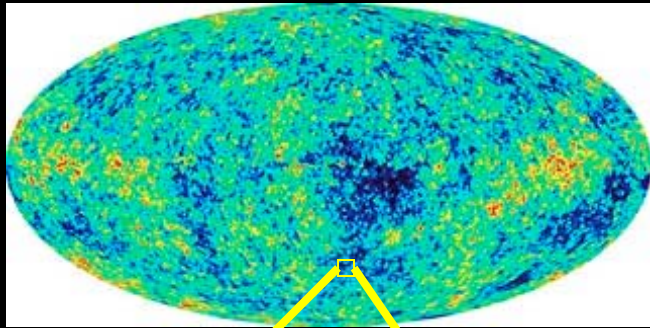
<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/>

穴あきアルミ板から夜空のムコウをみる

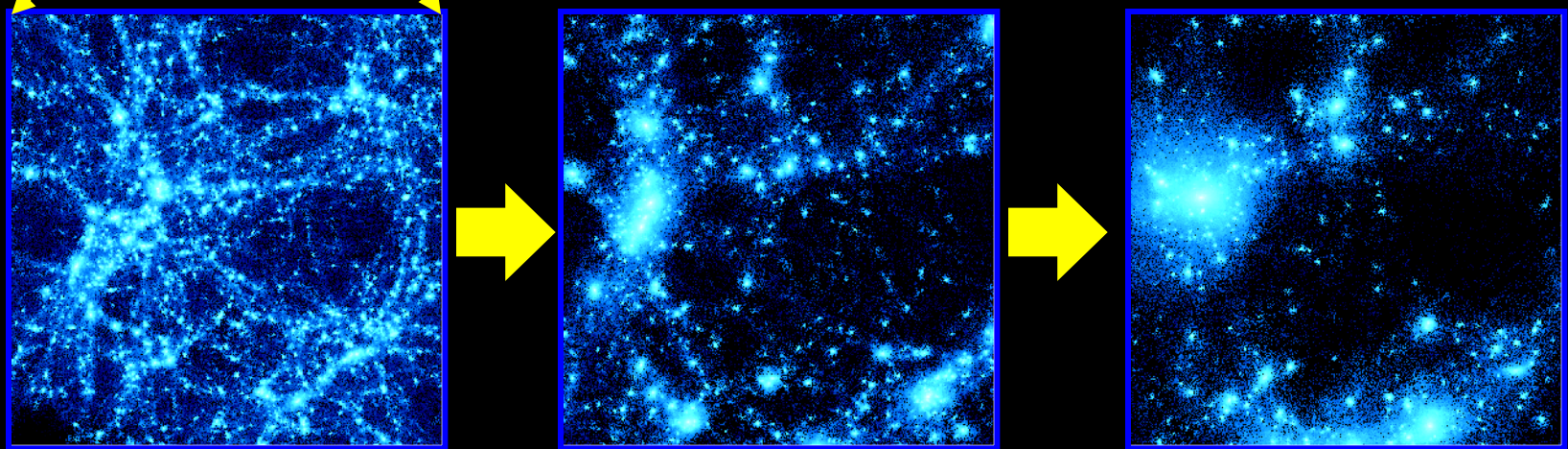


宇宙の構造形成標準理論

宇宙初期の空間ゆらぎ

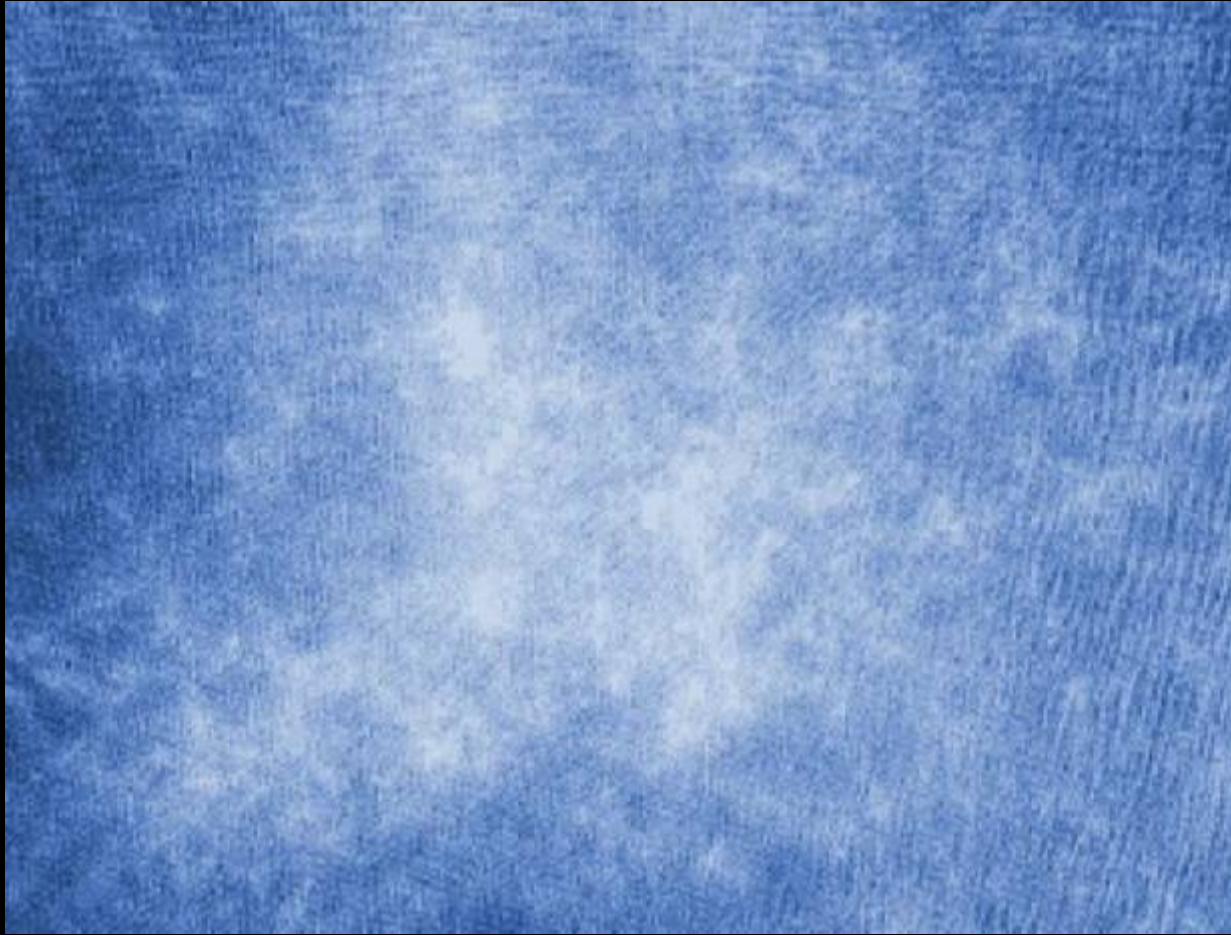


- 小さなスケールの構造ほど初期に形成される
- いったんできた構造が重力的に合体あるいは集団化することで、より大きなスケールの構造へと進化する



万有引力(重力)によってでこぼこ度合いがどんどん成長する

宇宙構造進化シミュレーションの例



吉川 耕司、
樽家 篤史、
景 益鵬、
須藤 靖
(2001)

ダークマター分布の進化
⇒ X線で見える現在の高温ガス分布
⇒ 可視光で見える現在の宇宙の銀河分布

もうひとつの宇宙の果て： 銀河系のどこかに生命を宿した惑星はあるのか？

- 宇宙の果てと太陽系外惑星
- 大望遠鏡は「暗い」天体を観測できる
 - 本当は明るいのだが遠くにあり暗く見える天体
 - ⇒ 宇宙の果てにある銀河
 - すぐ近くにあるのだが本当に暗い天体
 - ⇒ 銀河内にある系外惑星

太陽系外惑星発見の歴史

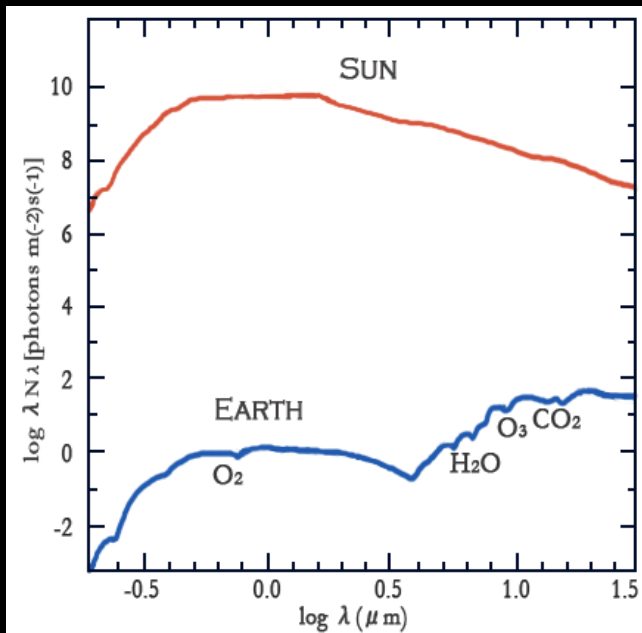
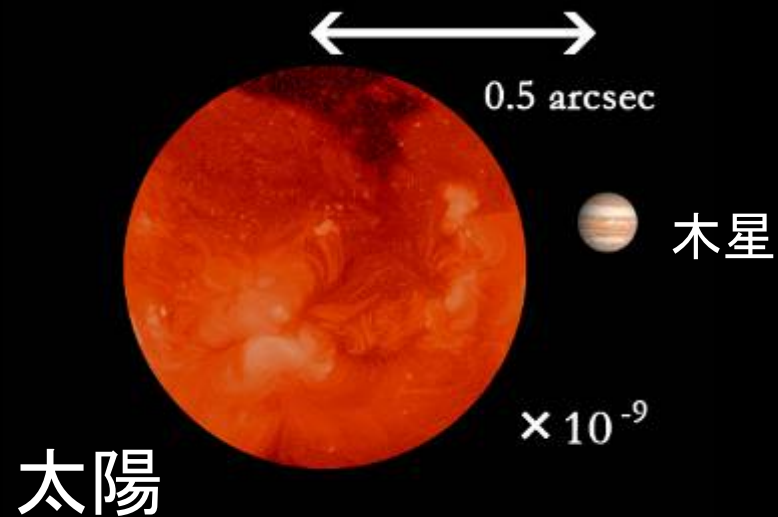
- 1995年：初めての太陽系外惑星
- 1999年：トランジット惑星（影；可視光）
- 2001年：惑星大気初の検出（ナトリウム）
- 2005年：トランジット惑星（光：赤外線）
- 2005年：惑星公転軸の傾きの発見
- 2008年10月7日時点で312個の系外惑星
（複数の惑星を持つ系が30個）

惑星は直接見えるか？

30光年先から観測した木星

明るさ: 27等級 (可視域)

主星との角距離: 0.5秒角

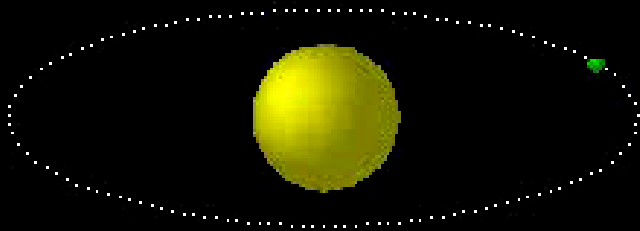


地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能！

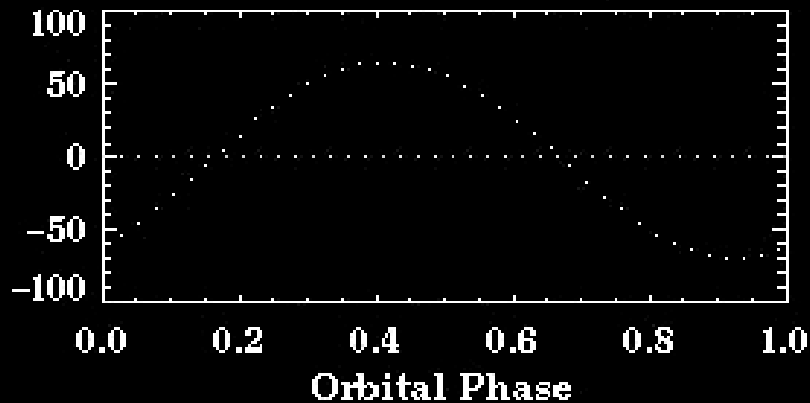
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



$K = 67.4 \text{ m/s}$ $e = 0.03$
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$ $\sin(i) = 0.3$ (*)

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



■ ドップラー法

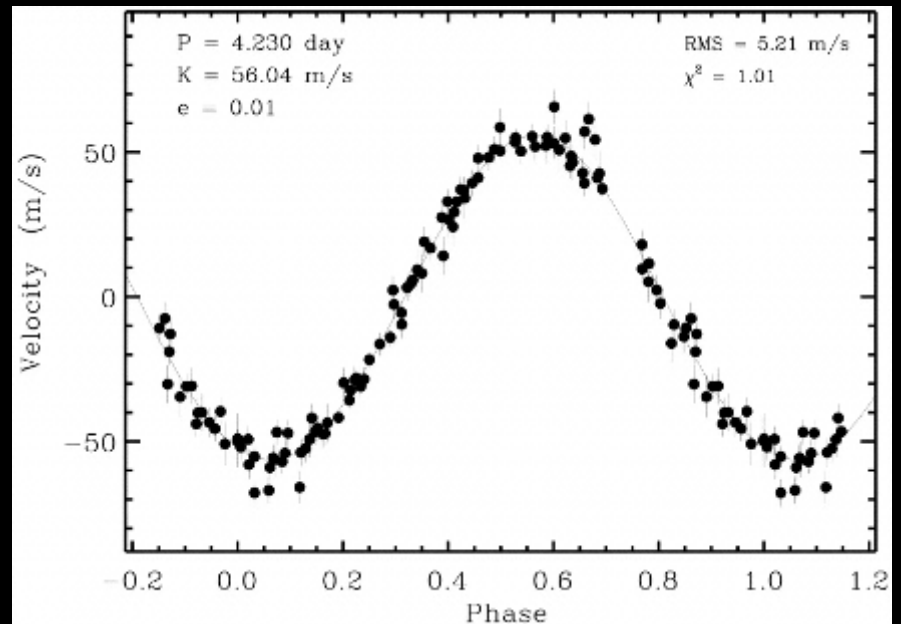
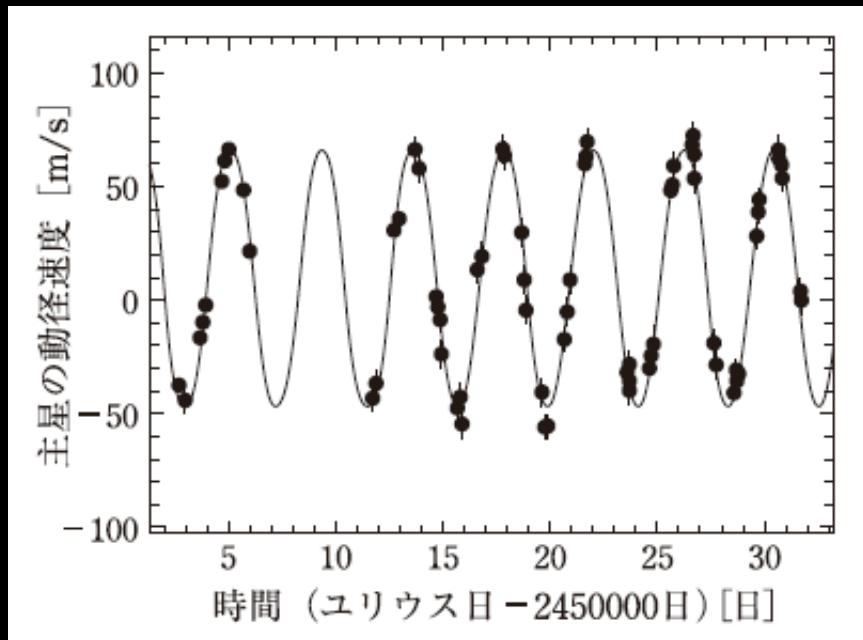
- 中心星の速度が毎秒数十メートル周期的に変動

■ トランジット法

- (運がよければ) 中心星の正面を惑星が横切ることで星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

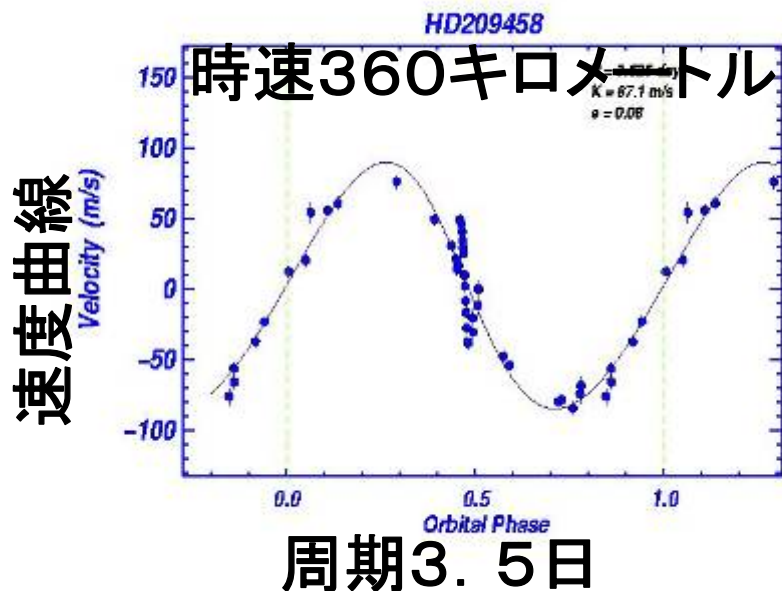
わずか4.2日で一周！



†Reproduced by permission of the AAS

初めてのトランジット惑星HD209458b (2000年発表)

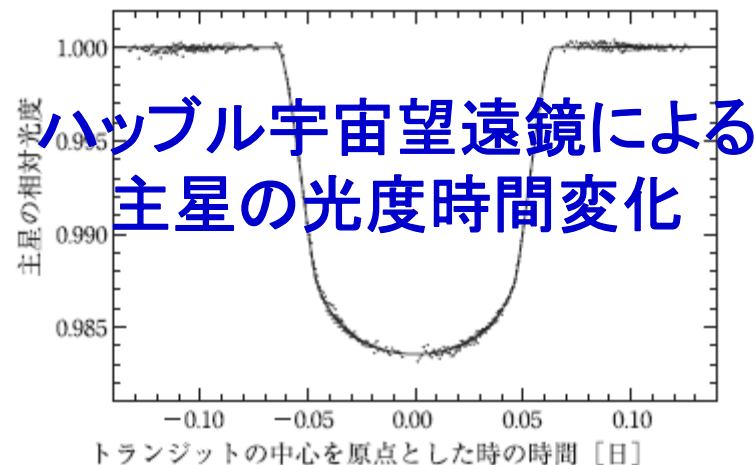
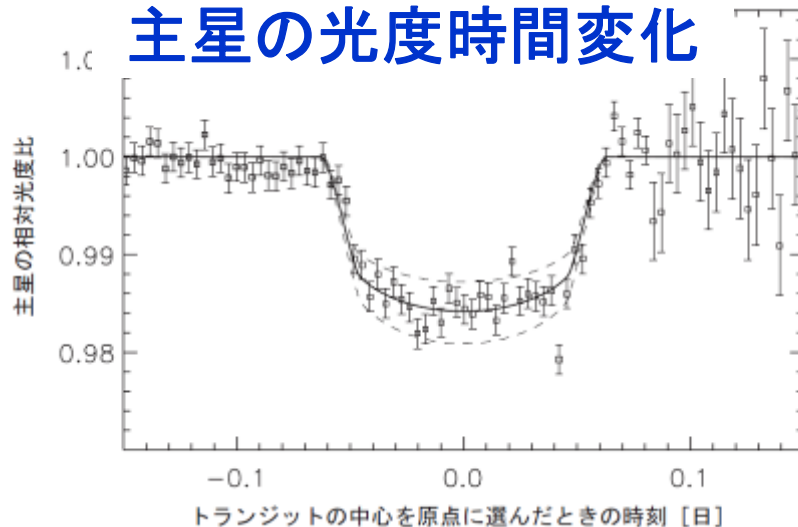
- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



http://astro.berkeley.edu/~gmarcy/hd/hd209458_vel.jpg

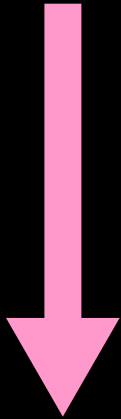
地上望遠鏡による
主星の速度時間変化

地上望遠鏡による
主星の光度時間変化

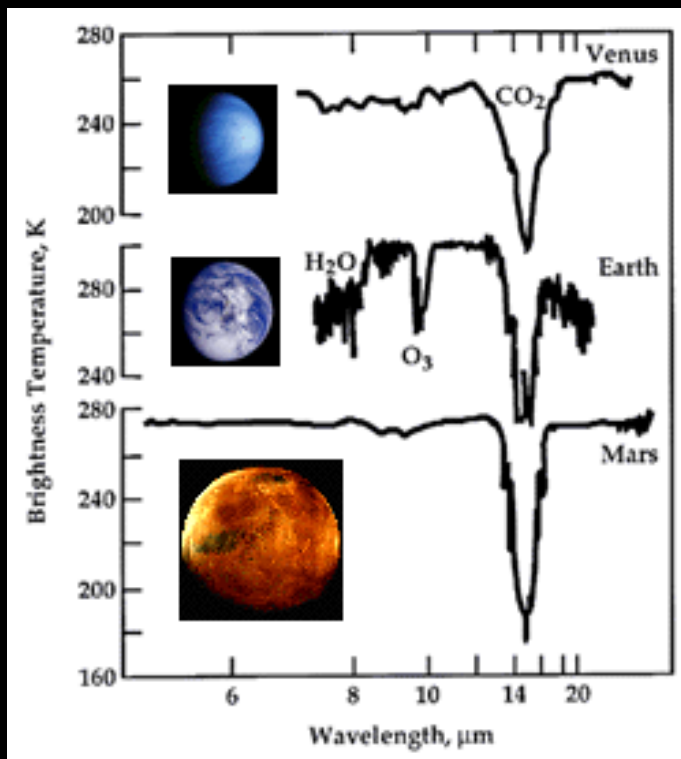


今後の展望

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995~)
 - 惑星大気の実見 (2002)
 - 惑星大気の高精密分光観測による組成決定
 - 惑星赤外線輻射の検出 (2005)
-
- 惑星可視域反射光の検出
 - 系外惑星リング、衛星の実見
 - **地球型惑星、居住可能惑星の実見**
-
- **惑星の直接検出(分光)**
 - **バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定**
 - **地球外生命の実見**



太陽系外惑星： そのさきにあるもの “天文学から宇宙生物学へ”



- 地球型惑星の発見
- 居住可能(ハビタブル)惑星の発見
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- バイオマーカーの提案と検出
 - 酸素、水、オゾン、核爆発、、
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する

直接見てくることができない距離にある惑星に
生物が存在するかどうかを天文観測だけで説得
できるか？ Biomarker を特定できるか？

予想もできない展開が待っている

■ 最初に起こるのはどれだろう

- 地球外生物の痕跡の天文学的検出
- 実験室での人工生物の誕生
- 地球外文明からの交信の検出
- 地球文明の破滅（いったん発達した文明は、疫病、核戦争、資源の枯渇などの要因で不安定）

■ 交信できるレベルまで安定に持続した地球外文明の有無を知ることは、我々の未来を知ることに等しい

「夜空のムコウ」の意味 ～見えなくともそこにあるもの～

■ 宇宙の果てを観測する

■ 宇宙論

■ 宇宙を満たしている物質を探る

■ 素粒子論

■ 第二の地球を探す

■ 惑星形成論、宇宙生物学

■ 地球外文明はあるか

■ 人間原理、宇宙社会学、宇宙比較文化論

L'essentiel est invisible pour les yeux

大切なものは目にはみえない

ここに挿入されていた「新訳 星の王子さま
(単行本) アントワーヌ・ド・サン＝テグジュペ
リ(著), 倉橋 由美子(翻訳) 宝島社P104」
は著作権処理の都合上、削除されました。

*Le Petit Prince:
Antoine de Saint Exupéry*