

第5回 探査ミッション立案スクール・小惑星探査

# 「小惑星と小惑星探査の基礎」



臼井 文彦

神戸大学大学院 理学研究科 惑星科学研究センター

# 「小惑星と小惑星探査の基礎」

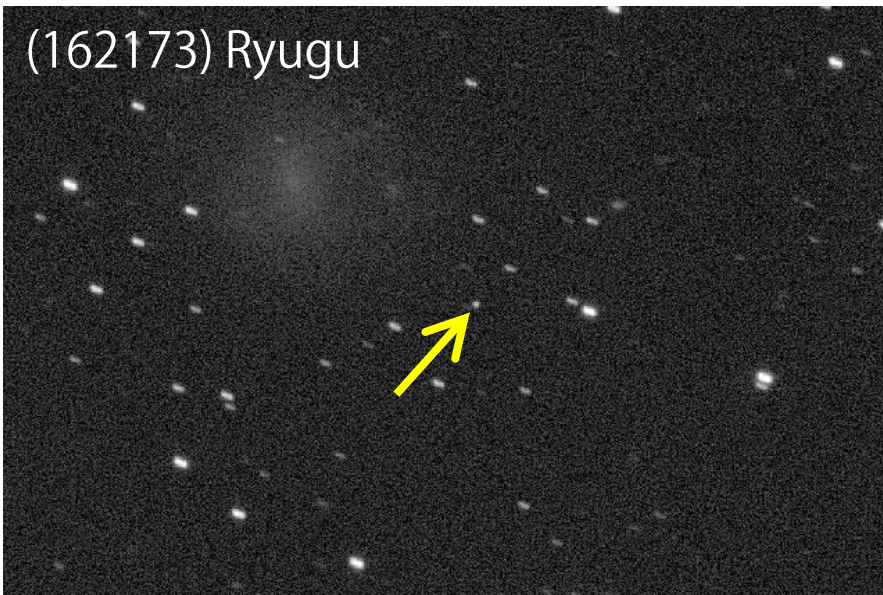
- 小惑星とは
- 天文観測と小惑星
- 小惑星の分布
- 小惑星と隕石
- 小惑星のスペクトル分類
- 小惑星探査
- 小惑星に関するさまざまなデータベース

小惑星とは

# 太陽系の天体

- 太陽 (Sun)
- 惑星 (planets)
  - 水星・金星・地球・火星・木星・土星・天王星・海王星
- 準惑星 (dwarf planets)
  - (1) Ceres
  - 冥王星、(136199) Eris、(136472) Makemake、(136108) Haumea
- 太陽系小天体 (small solar system bodies)
  - 小惑星
  - 彗星
  - 惑星間塵
  - 太陽系外縁天体

# (古典的な) 小惑星と彗星の違い



(c) NAOJ & MITSuMe collaboration



(c) NAOJ

## 小惑星 (asteroid) 「恒星のようなもの」

- 見かけの姿が点状
- 岩石質の天体
- 火星と木星の間に広く分布

## 彗星 (comet) 「長い髪をもったもの」

- コマや尾(彗星活動)が見られる
- 岩石と氷を含んだ天体
- 木星より遠くからやってくる

(望遠鏡を使った)

# 天文観測と小惑星

# 天文観測から得られる小惑星の物理量

## • 小惑星の位置

- ほとんどの小惑星の発見は、天球面上の位置が特定されることと同義。
- 既知の小惑星については、軌道要素(と時刻)で太陽系内の位置を決定できる。
- 小惑星族は、軌道要素の関係性から決められる。

## • 小惑星の大きさ

- あらゆる手法で小惑星の大きさが測られている。
- 直接撮像、探査機観測、レーダーエコー、掩蔽観測、赤外線観測…

## • 小惑星の色

- 可視光～近赤外線の分光観測から、小惑星表面の色についての情報が得られる。
- これをもとに小惑星のスペクトル分類がなされている。
- アルベド(反射率)も表面の「色」を反映したものと考えられる。

## • 小惑星の質量

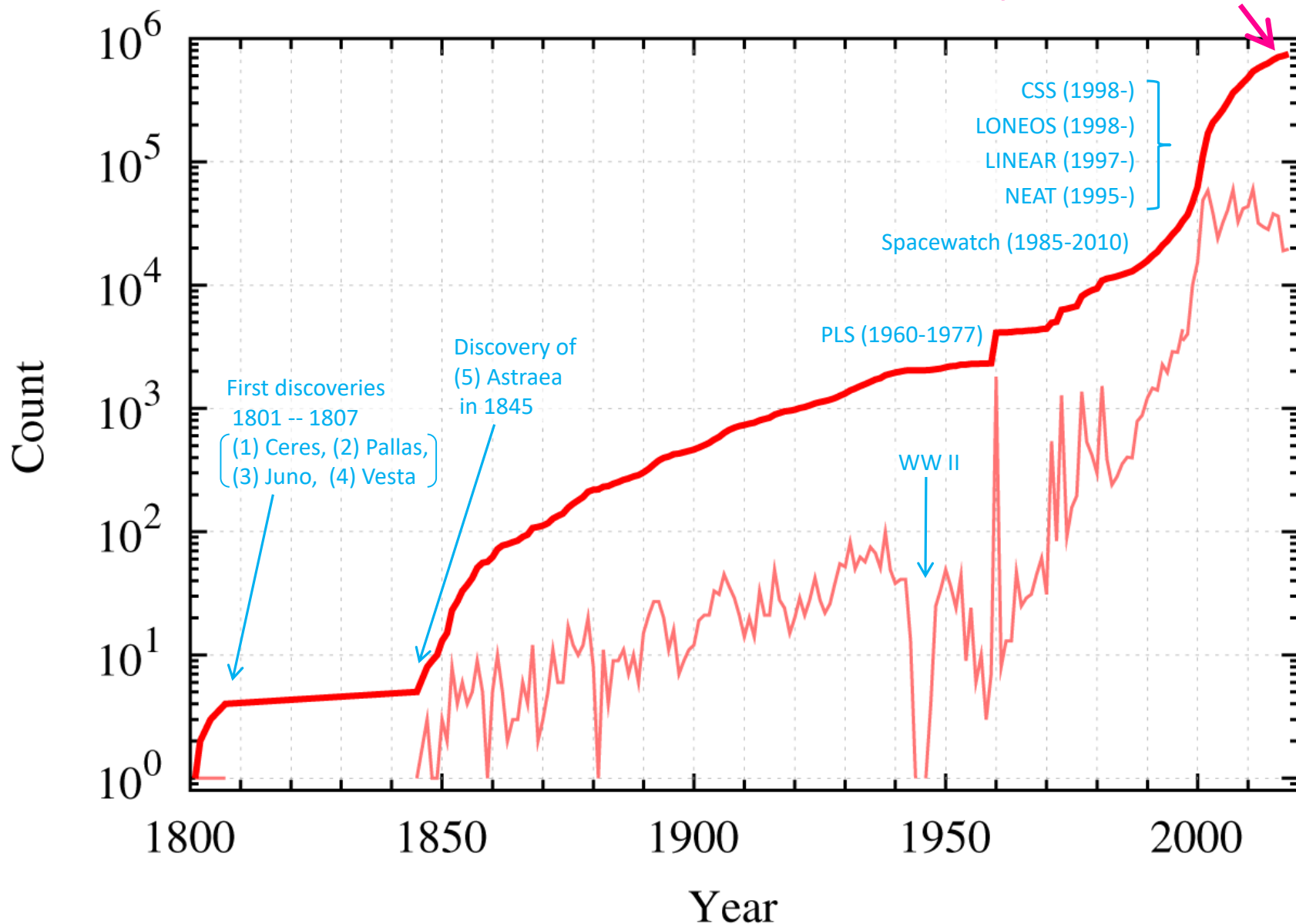
- 精度のよい測定を行うのはきわめて難しい。
- 他の天体に対する重力相互作用(近接遭遇、衛星)や探査機の軌道から求まる。
- 大きさと質量から平均密度がわかり、構成物質や内部構造の推定につながる。

## • その他

- 自転周期、偏光度、3次元形状、など

# 小惑星の発見数の推移 (1801-2018)

total : 754,829  
(as of 2018/01/31)





# 小惑星の名前

(25143) Itokawa 1998 SF<sub>36</sub> 1998/09/26 にアメリカのリニア計画によって発見

(a) (b) (c)

(a) 発見された年

(b) 発見された月(半月ごとに分けて前半・後半を区別)

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
AB	CD	EF	GH	IJK	LM	NO	PQ	RS	TU	VW	XYZ

(c) その半月で発見された順番

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z

$$6 + 36 \times 25 = 906 \text{ 番目}$$

仮符号

1998年9月下旬で906番目に発見された小惑星

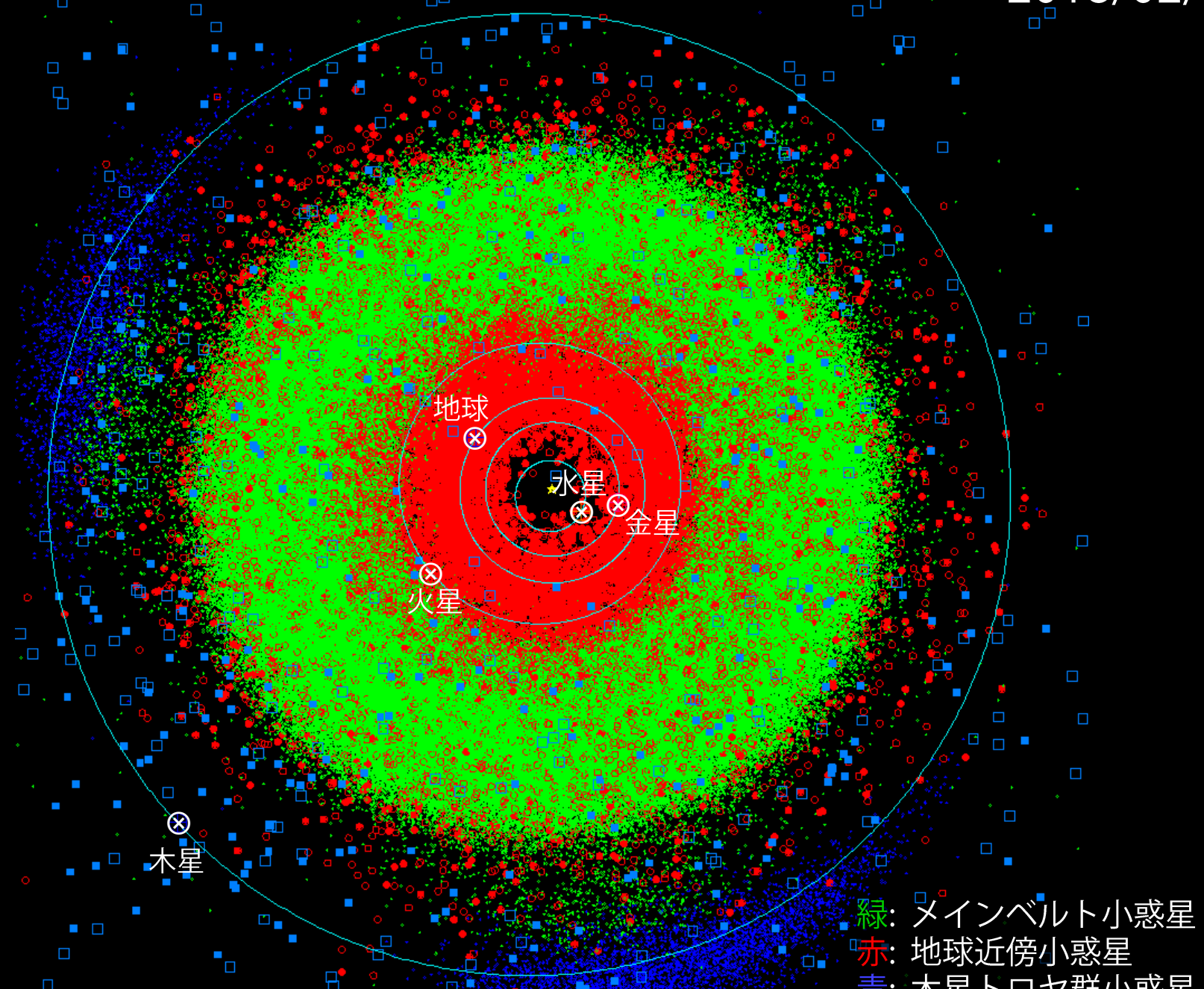
確定番号

追観測の上で軌道が決定されて、未発見の天体であると認定されると、1つの新しい天体として小惑星番号が登録される

命名：イトカワ

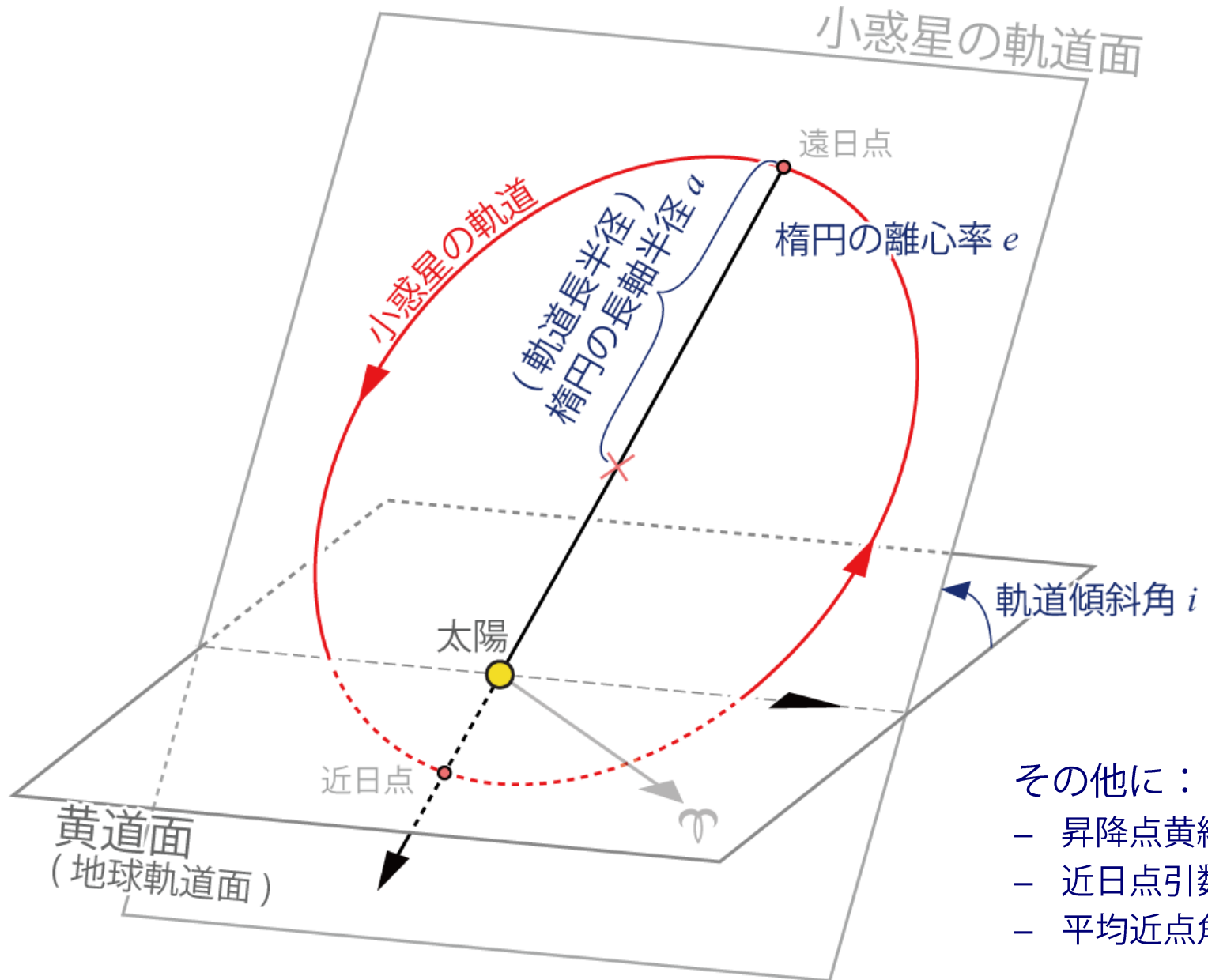
日本のロケット開発の父、糸川英夫博士(1912-1999)にちなんで命名(2003/08/06)

# 小惑星の分布



# 小惑星の軌道要素

ある時刻 (元期) における値

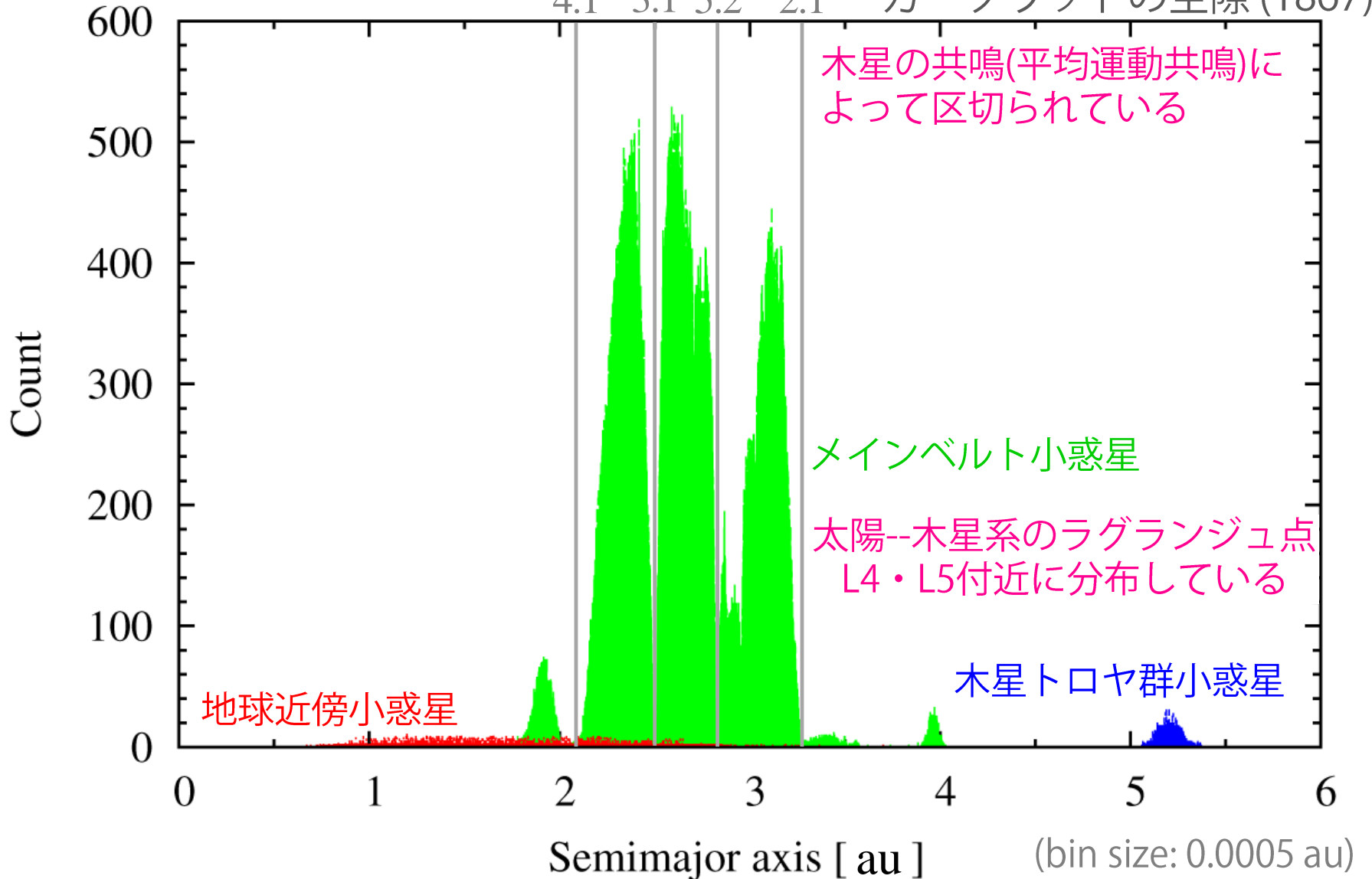


その他に：

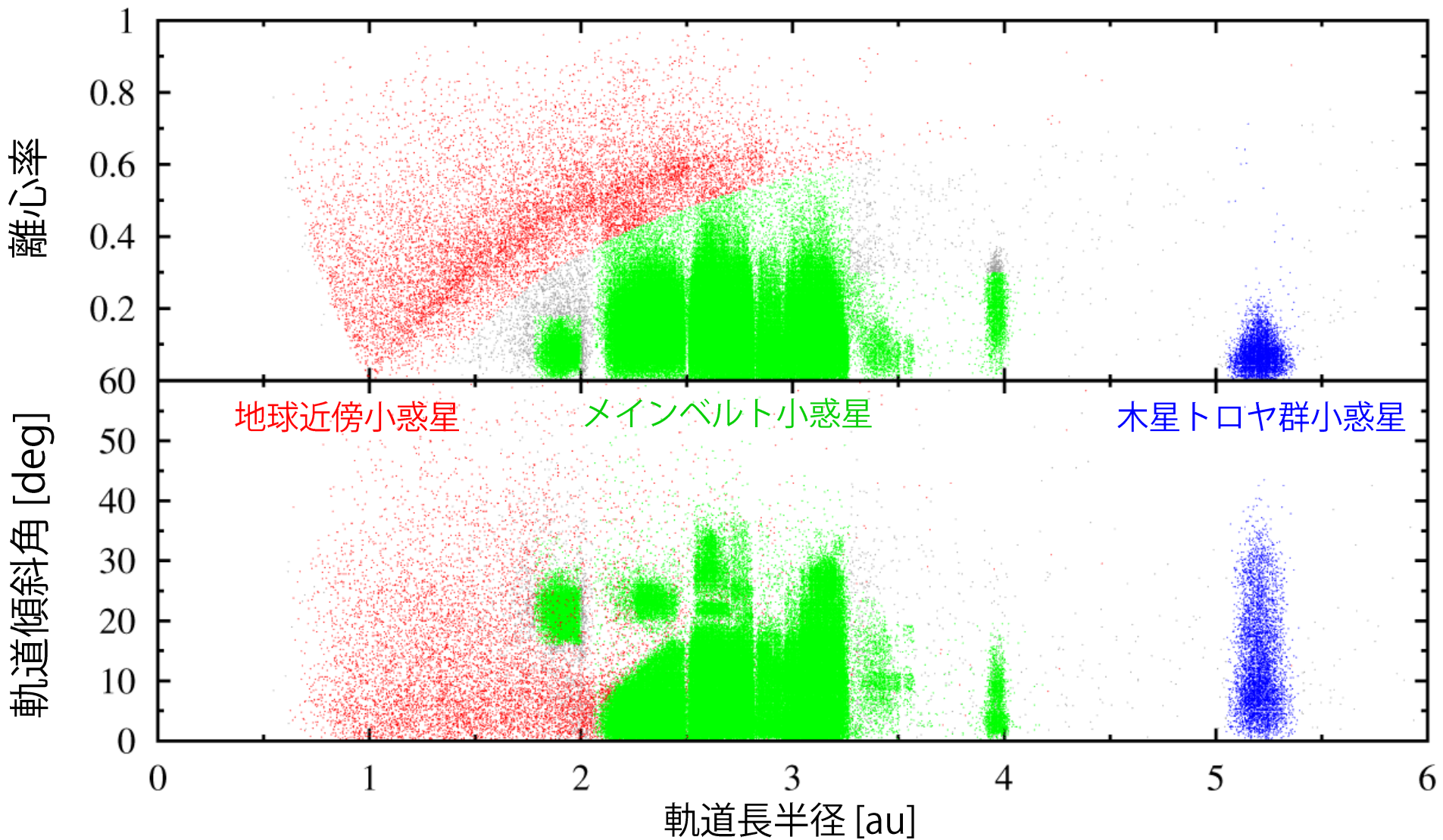
- 昇降点黄経
- 近日点引数
- 平均近点角

# 小惑星の分布 (軌道長半径)

4:1 3:1 5:2 2:1 カークウッドの空隙 (1867)



# 小惑星の軌道要素の分布



# 小惑星の軌道による分類

- 地球近傍小惑星 (Near-Earth Asteroid: NEA)
  - 地球軌道に接近する軌道を持つ小惑星。
  - 特に地球との衝突の可能性が高く、かつ衝突時に地球に与える影響が大きいものは潜在的に危険な小惑星(Potentially Hazardous Asteroid: PHA)と呼ばれる。
- メインベルト小惑星 (Main Belt Asteroid: MBA)
  - 軌道長半径が2.0--3.3auの範囲に広く存在する小惑星。
  - 現在までに発見されている小惑星の9割以上はメインベルト小惑星に属する。
- 木星トロヤ群小惑星
  - 太陽--木星のラグランジュ点L4(前方60° )またはL5(後方60° )の周辺に分布している小惑星。
  - 特に「始原的」な天体が多いと考えられている。
- 木星以遠にも太陽系小天体は存在する
  - ケンタウルス族(木星と海王星のあいだ)、太陽系外縁天体(海王星以遠)
  - これらは氷などの揮発性物質を多く含み、ここでは小惑星とは区別して扱う。

# 小惑星と隕石



# 隕石の分類

- 石質隕石
  - 主にケイ酸塩鉱物からなる。隕石の9割以上を占める。
    - ✓ コンドリュールを含むもの：　　コンドライト
    - ✓ コンドリュールを含まないもの：エコンドライト(コンドリュール：隕石中に見られる およそ数mm以下の小さい球状の微粒子)
- 鉄隕石 (隕鉄)
  - 主に金属鉄(鉄とニッケルの合金)からなる。
- 石鉄隕石
  - 金属鉄(鉄とニッケルの合金)とケイ酸塩鉱物が混在しているもの。

(c) NEMS



石質隕石

(c) NEMS



鉄隕石

(c) : David Darling



石鉄隕石

# 石質隕石の分類

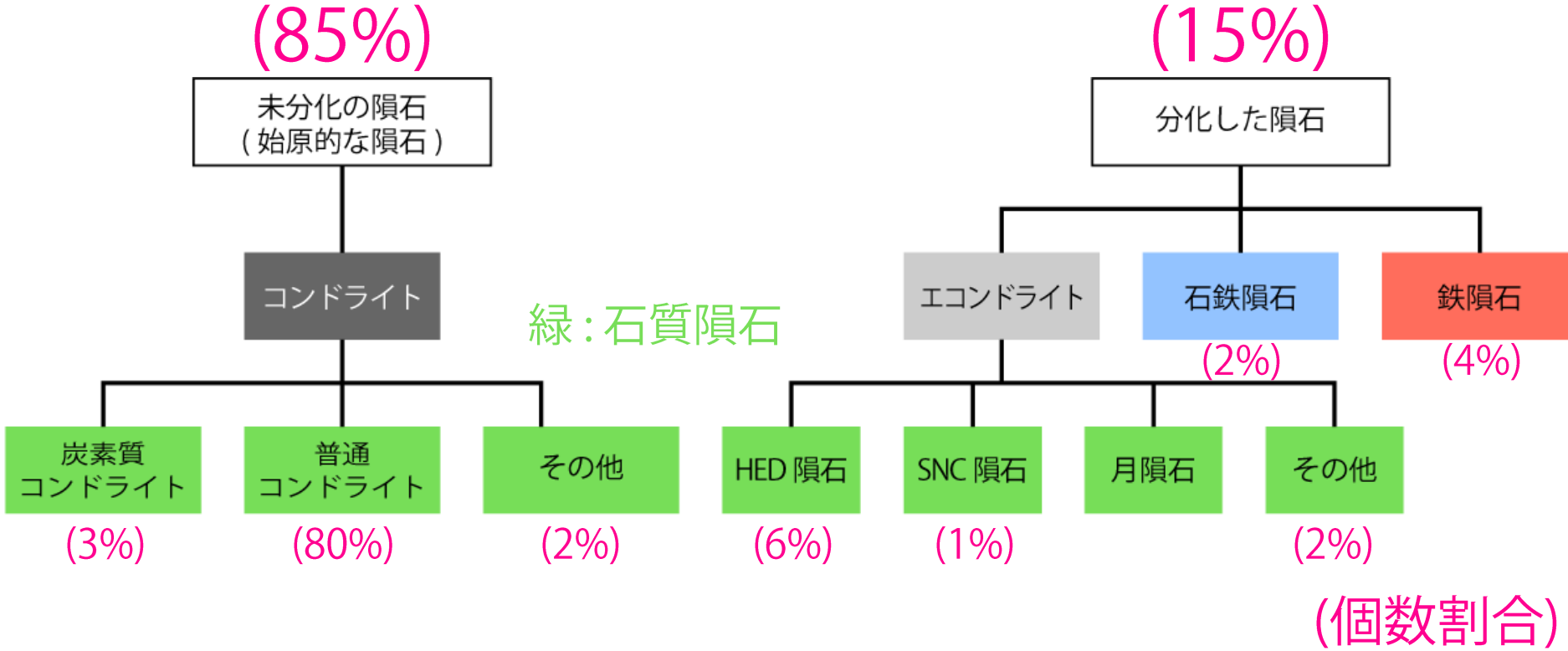
- コンドライト (コンドリュール=球粒を含むもの)
  - 普通コンドライト  
発見された隕石の9割がこの分類に含まれる。  
H (High total iron), L (Low total iron), LL (low total iron, low metallic iron)
  - 炭素質コンドライト  
いろいろな化合物や有機物の形で炭素原子を含む。揮発性元素が少ないことを除くと、太陽の組成に類似している。

## 未分化な隕石

- エコンドライト (コンドリュールを含まないもの)
  - 火星隕石 (SNC隕石)、月隕石
  - HED隕石
    - ✓ ホワルダイト
    - ✓ ユークライト
    - ✓ ダイオジェナイト

これらの隕石は、小惑星 (4) Vesta の地殻に由来すると考えられている。

# 隕石の分類



- 小惑星は隕石の母天体であると考えられる
  - 大部分の小惑星は分化していない天体である。
  - 落下時の軌道から小惑星帯起源がほぼ確定された隕石もある。

# 小惑星のスペクトル分類

# 小惑星のスペクトル分類

- 小惑星のスペクトル分類は、小惑星の反射スペクトルの形・色・アルベドに基づいて行われる。
  - これらの分類は小惑星の表面組成や物性を反映していると考えられている。
- もともとは隕石との対比から3つに分類されていた (Chapman+1975)
  - 炭素質コンドライト → C型小惑星：炭素質(Carbonaceous)で暗い天体
  - 普通コンドライト → S型小惑星：岩石質(Silicaceous)の天体
  - U型小惑星：その他

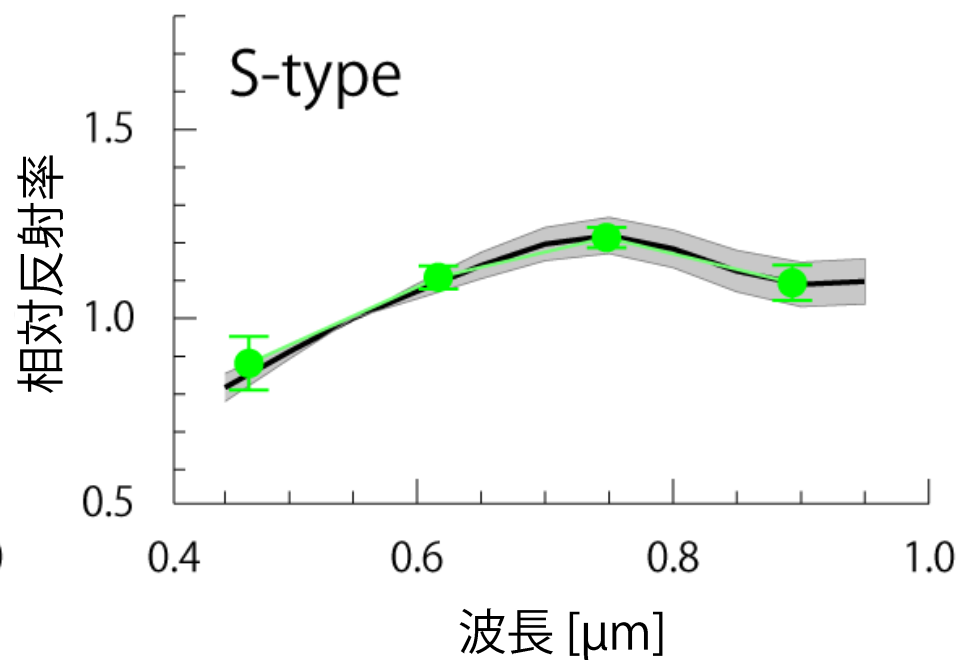
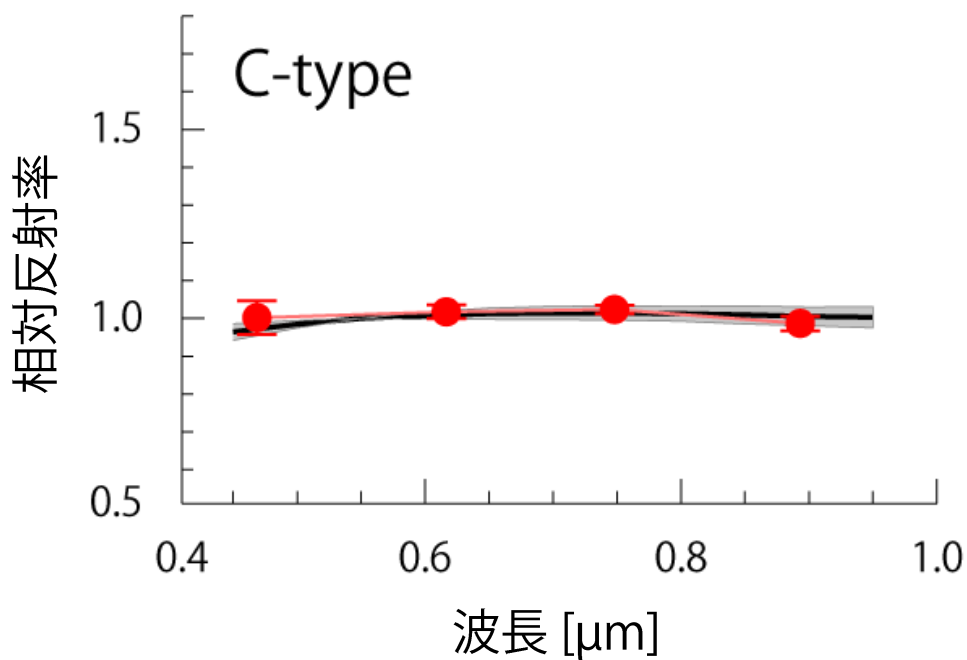


Yamato-82162 (炭素質コンドライト)



Yamato-790528 (普通コンドライト)

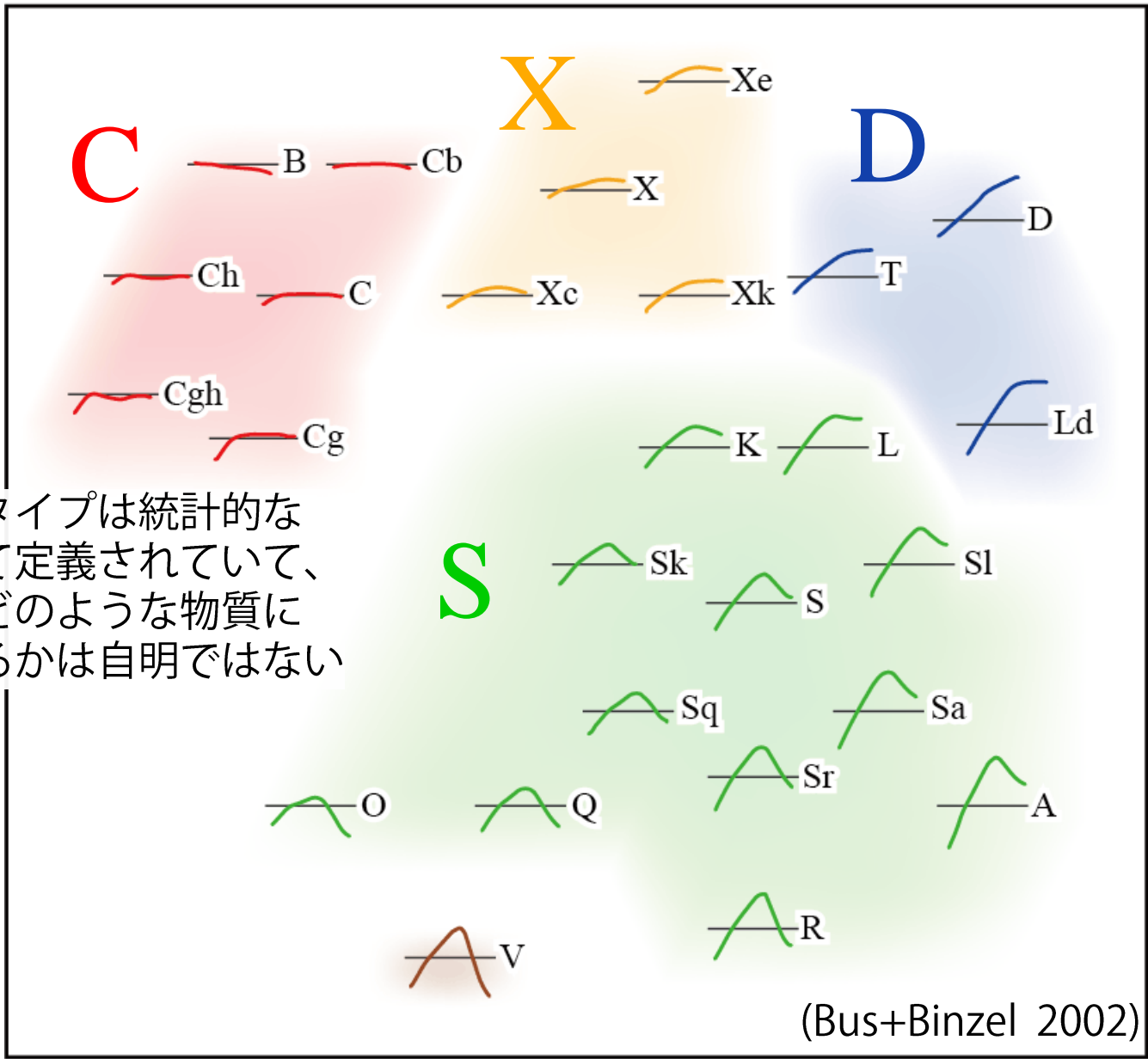
# 小惑星の反射スペクトルの傾向 (可視光-近赤外線)



- のっぺりとして目立った特徴がない
- 暗い (アルベドが0.01から0.1)

- ケイ酸塩鉱物特有の吸収を持つ
- 比較的明るい (アルベドが0.1以上)

# 小惑星の反射スペクトル(可視光-近赤外線)の傾向



スペクトルタイプは統計的な処理によって定義されていて、各タイプがどのような物質に対応しているかは自明ではない

(Bus+Binzel 2002)

# 小惑星探査



## 天文観測

(地上・地球周回軌道から)

- ほとんどの場合、空間分解して見ることができない。
- 表面特性が平均化されてしまい、地域差はわからないことが多い。
- 多くの天体を網羅的に観測できる。
- 幅広い範囲の物質分布を研究する手がかりになる。

## 小惑星探査

(探査機)

- 1つの天体に対して、全球にわたり詳細な観測ができる。
- 表面状態の地域差や地質学的な観測を行うこともできる。
- その場で分析を行うこともできる。
- 1つ(場合によっては数個)の限られた天体にしか行くことができない。
- 詳細な軌道制御が必須で、たまたま小惑星に出会うことはない。
- 最新の計測機器は搭載できない。

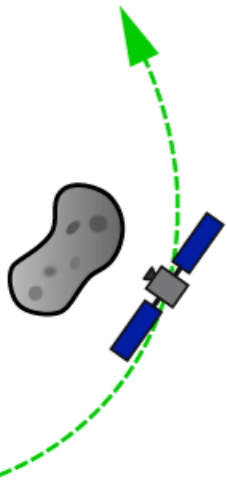
- 持ち帰ったサンプルを実験室で詳細に分析することができる。

—— サンプルリターン ——

観測や探査で得られた結果の解釈には理論計算や室内実験の知見も必要

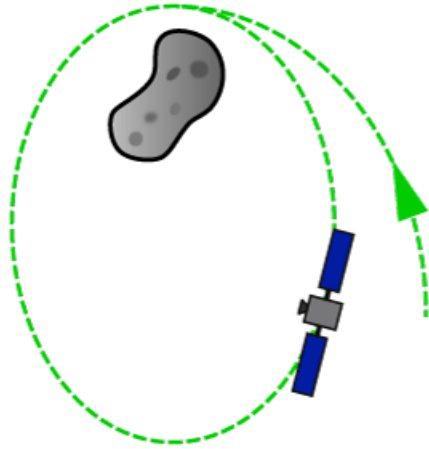
# 惑星・小惑星探査の手段

フライバイ  
(F/B)



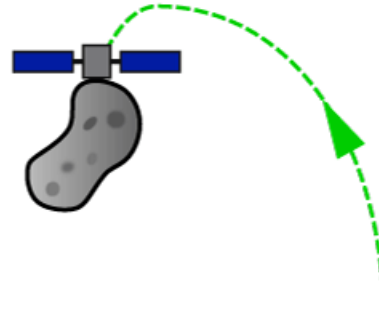
1回目の発見的  
探査

周回探査  
(RV)



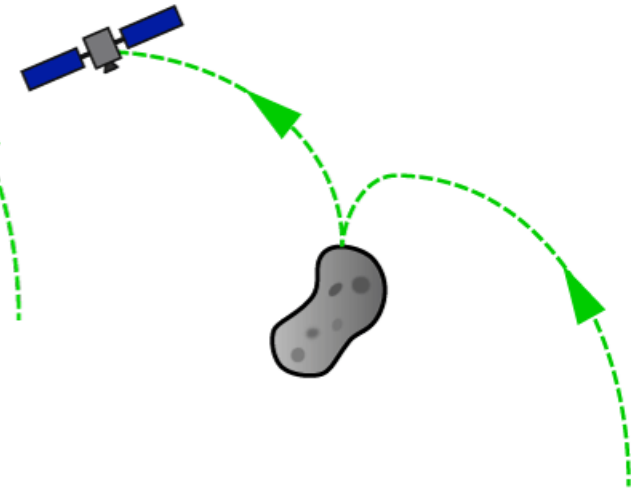
直接マッピング  
重力測定  
磁場測定

着陸探査  
(LND)



ランダー  
ローバー  
ペネトレーター

サンプルリターン  
(S/R)



地球でサンプル  
の詳細分析

# これまでに小惑星を観測・探査した探査機

探査機	機関	重量	ミッション 期間	主目的	小惑星探査			天体名
					年	対象	手段	
Galileo	NASA	2564 kg	1989-2003	木星	1991 1993	MBA MBA	F/B F/B	(951) Gaspra (243) Ida/Dactyl
NEAR Shoemaker	NASA	805 kg	1996-2001	小惑星	1997 2000-2001	MBA NEA	F/B LND	(253) Mathilde (433) Eros
Cassini-Huygens	NASA ESA	5712 kg	1997-2017	土星	2000	MBA	F/B	(2685) Masursky
Deep Space 1	NASA	490 kg	1998-2001	彗星	1999	MBA	F/B	(9969) Braille
Stardust-NEXT	NASA	390 kg	1999-2011	彗星	2002	MBA	F/B	(5535) Annefrank
はやぶさ	ISAS	510 kg	2003-2010	小惑星	2005	NEA	S/R	(25143) Itokawa
Rosetta	ESA	3000 kg	2004-2016	彗星	2008 2010	MBA MBA	F/B F/B	(2867) Steins (21) Lutetia
New Horizons	NASA	478 kg	2006-	冥王星	2006	MBA	F/B	(132524) APL
Dawn	NASA	1218 kg	2007-	小惑星	2011-2012 2015-	MBA MBA	RV RV	(4) Vesta (1) Ceres
嫦娥2号	CNSA	2480 kg	2010-	月	2012	NEA	F/B	(4179) Toutatis
はやぶさ2	JAXA	600 kg	2014-	小惑星	(2018-)	NEA	S/R	(162173) Ryugu
OSIRIS-REx	NASA	1529 kg	2016-	小惑星	(2018-)	NEA	S/R	(101955) Bennu

# これまでに小惑星を観測・探査した探査機

探査機	URL
Galileo	<a href="https://solarsystem.nasa.gov/missions/galileo/in-depth/">https://solarsystem.nasa.gov/missions/galileo/in-depth/</a>
NEAR Shoemaker	<a href="https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/near.html">https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/near.html</a>
Cassini-Huygens	<a href="https://saturn.jpl.nasa.gov/">https://saturn.jpl.nasa.gov/</a>
Deep Space 1	<a href="https://www.jpl.nasa.gov/nmp/ds1/index.php">https://www.jpl.nasa.gov/nmp/ds1/index.php</a>
Stardust-NExT	<a href="https://stardust.jpl.nasa.gov/home/index.html">https://stardust.jpl.nasa.gov/home/index.html</a>
はやぶさ	<a href="http://www.hayabusa.isas.jaxa.jp/j/outline/index.html">http://www.hayabusa.isas.jaxa.jp/j/outline/index.html</a>
Rosetta	<a href="http://sci.esa.int/rosetta/">http://sci.esa.int/rosetta/</a>
New Horizons	<a href="http://pluto.jhuapl.edu/Mission/index.php">http://pluto.jhuapl.edu/Mission/index.php</a>
Dawn	<a href="https://dawn.jpl.nasa.gov/">https://dawn.jpl.nasa.gov/</a>
嫦娥2号	<a href="https://www.lpi.usra.edu/sbag/meetings/jan2013/presentations/sbag8_presentations/TUES_0930_CE_T_outatis.pdf">https://www.lpi.usra.edu/sbag/meetings/jan2013/presentations/sbag8_presentations/TUES_0930_CE_T_outatis.pdf</a>
はやぶさ2	<a href="http://www.hayabusa2.jaxa.jp/">http://www.hayabusa2.jaxa.jp/</a>
OSIRIS-REx	<a href="https://www.nasa.gov/osiris-rex">https://www.nasa.gov/osiris-rex</a>

# 現在計画中・検討中の小惑星探査の例

(情報の精度、確度には注意)

探査機	機関	ミッション 期間	主目的
Lucy	NASA	(2021-)	木星トロヤ群小惑星(複数)のフライバイ探査
	<a href="https://www.nasa.gov/content/goddard/lucy-the-first-mission-to-jupiter-s-trojans">https://www.nasa.gov/content/goddard/lucy-the-first-mission-to-jupiter-s-trojans</a> <a href="https://www.lpi.usra.edu/sbag/meetings/jan2016/presentations/Levison.pdf">https://www.lpi.usra.edu/sbag/meetings/jan2016/presentations/Levison.pdf</a>		
Psyche	NASA	(2023-)	M型小惑星 (16) Psycheの周回探査
	<a href="https://www.nasa.gov/psyche">https://www.nasa.gov/psyche</a> <a href="https://www.lpi.usra.edu/sbag/meetings/jan2016/presentations/Elkins-Tanton.pdf">https://www.lpi.usra.edu/sbag/meetings/jan2016/presentations/Elkins-Tanton.pdf</a>		
DESTINY+	JAXA	(2022-)	地球近傍小惑星 (3200) Phaethonのフライバイ探査
	<a href="http://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20170920_dlr_j.pdf">http://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20170920_dlr_j.pdf</a>		
MMX	JAXA	(2024-)	火星衛星(Phobos, Deimos)の周回探査、サンプルリターン
	<a href="http://mmx.isas.jaxa.jp/">http://mmx.isas.jaxa.jp/</a>		

小惑星に関する  
さまざまなデータベース

# 小惑星に関するさまざまなデータベース (他にもいろいろ…)

- Minor Planet Center  
<http://www.minorplanetcenter.net/>
  - JPL Small-Body Database Browser  
<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>
  - NASA Planetary Data System  
<http://sbn.psi.edu/pds/>
  - Near-Earth Asteroids Data Base  
<http://earn.dlr.de/nea/>
  - JPL HORIZONS  
<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>
  - Lowell ASTFINDER  
<http://asteroid.lowell.edu/cgi-bin/astfinder>
  - Lowell ASTPLOT  
<http://asteroid.lowell.edu/cgi-bin/astplot>
  - Asteroid Lightcurve Database  
<http://www.minorplanet.info/lightcurvedatabase.html>
  - DAMIT (Database of Asteroid Models from Inversion Techniques)  
<http://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/asteroids3D/>
- 小惑星の全般的なデータ
- 観測の際に役立つデータ
- 形状に関連したデータ