

宇宙科学II (電波天文学) 第2回

電磁波と電波

電磁波とは？

- 電場、磁場の振動が波として伝播するもの(媒質不要、真空中でも伝播)
- J. C. Maxwellが電磁波の存在を予言(1864年)
H. Hertz が1888年にその存在を実証
詳しくは「電磁気学」などの講義を参考
- 波長によって様々な電磁波があり(電波、光、X線など)、日常生活でも重要な役割を果たしている

電磁波の特徴

- 電磁波は波であり粒子(光子)である
(electro-magnetic wave / photon)
電磁気学および量子力学的性質を持つ
(詳しくは 電磁気学、量子力学を参照)



電場、磁場の振動としての波



あるエネルギーをもった粒子(光子)

電磁波の特徴(波として)

- 光速度で伝播する(真空中)
 $c=299792458 \text{ m/s}$: 長さの定義数
- 周波数 ν と波長 λ の関係
 $c = \nu \times \lambda$
(ex. $\nu=1 \text{ GHz}$ なら $\lambda=30 \text{ cm}$)
- 横波で2つの偏波が存在する
直交2偏波 または 左右円偏波

2つの偏波を利用した例: 立体映画



電磁波の性質(粒子として)

- 光子のエネルギーと周波数の関係

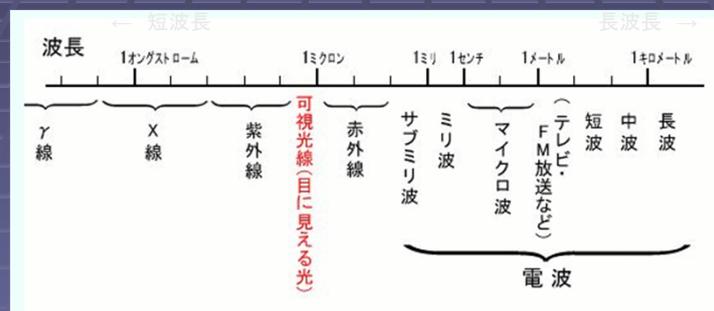
$$E = h \times \nu$$

$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s} \quad (\text{プランク定数})$$

周波数が高いほどエネルギーが高い
(周波数の高い光子(電磁波)を出すには
高いエネルギーを要する)

電磁波と電波

- 電波も光も、電磁波の一種
ただし、波長(周波数)が大きく異なる



人間の目が可視光に感度があり、電波に感度がないのは、太陽が光で最も明るいため、進化の過程でその波長の電磁波に特化した目ができたと考えられる

余談：電磁波と放射線

- 放射線の一種であるガンマ線、X線は電磁波
- それ以外は粒子線

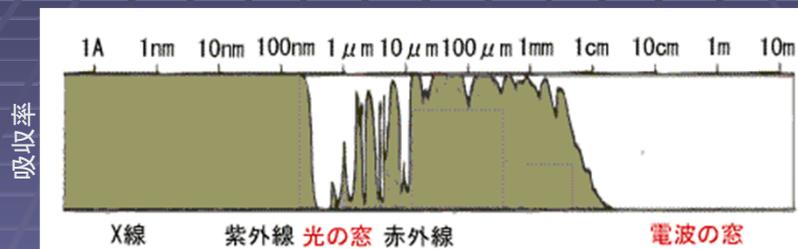
アルファ線	ヘリウム原子核
ベータ線	電子
ガンマ線	電磁波(超短波長)

その他

中性子線、原子核そのもの 等

大気之窗

地表から観測できるのはごく一部の電磁波のみ



地上から観測可能な帯域
光、電波、(赤外の一部)

赤外線、X線、γ線観測は衛星が必要

電波と赤外線の違い

- 周波数的には 1 THz(テラヘルツ= 10^{12} Hz)が大体の目安(波長なら0.3 mm)
- 観測的には、波として受信すると電波、光子として受信すれば赤外線かより短波長

ただし、例外もある。例えば、
電波のボロメーター、光や赤外線の干渉計

電磁波の周波数は何で決まる？

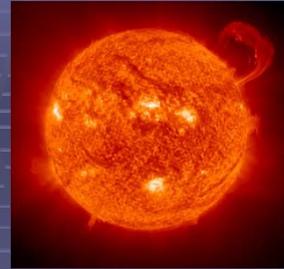
- 熱的な放射の場合、電磁波の周波数は放射の温度に関係(例:黒体放射、後述)
- 周波数と温度の関係(詳しくは次回以降)
 $T \sim h\nu/k \sim hc/\lambda k$
h:プランク定数、k:ボルツマン定数
($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
周波数が高いと温度も高い

もちろん、この関係が当てはまらない電磁波もある

天体の例

- 太陽

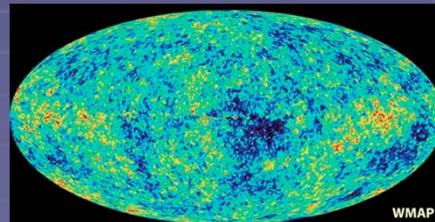
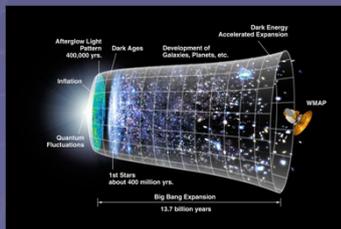
$T \sim 5800 \text{ K} \rightarrow \lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$
(可視光線)



- 宇宙背景放射(ビッグバンの名残)

$T \sim 3 \text{ K} \rightarrow \lambda \sim 2 \text{ mm}$ (ミリ波の電波)

※ “ \sim ”は約の意味。天文学だとfactor 2-3くらいのことも



電磁波と天体のエネルギー

- 一般に、大きなエネルギーを出している天体(温度の高い天体)は、より波長の短い電磁波を出すことができる。
- 逆に温度の低い天体は、波長の長い電波しか出さない → 電波でしか見えない

すなわち、違う波長で観測すると宇宙の異なる側面が見えてくる

電波天文学の特徴

- 特徴1) 観測できる天体種族が多い
極低温の宇宙背景放射や星間分子ガスから超高エネルギー現象(超新星爆発やブラックホールジェット)まで
- 特徴2) 干渉計により極めて高い分解能が得られる (詳しくは次回以降)

光学天文学

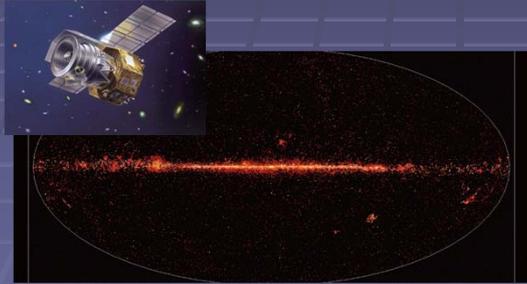
- 太陽のような恒星、あるいは恒星の集まりである銀河などが主な観測対象



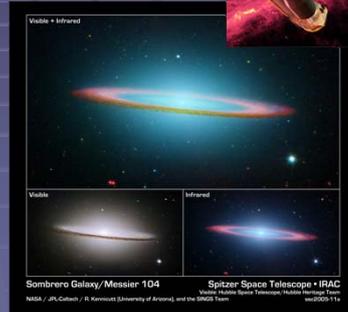
左: 星形成領域 S106、右: 銀河系の隣の銀河M33、いずれもすばる望遠鏡で(上)

赤外線

- 星に加えて、低温のダスト(星間塵)などが見える



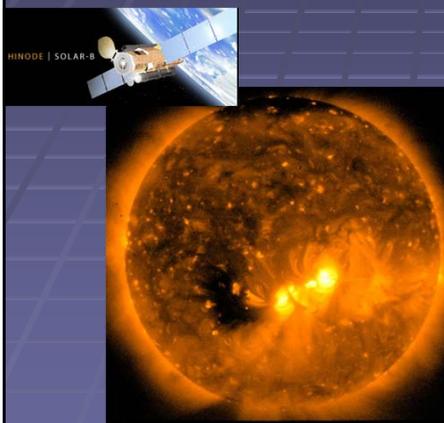
JAXA/ISASの衛星「あかり」が見た
遠赤外線の全天マップ
天の川銀河の塵が明るく輝く



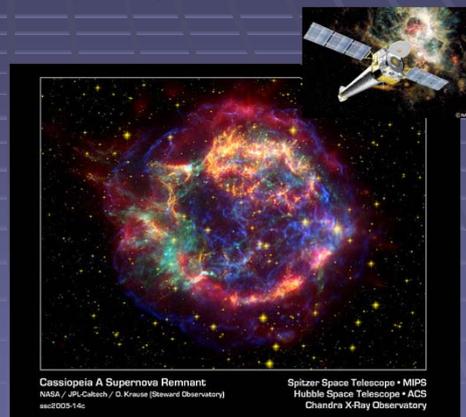
スピッツァー衛星が見たソムブレロ
銀河(左下:可視光、右下:赤外線、
上はその合成)

X線

- よりエネルギーの高い世界が見える



ひのでがX線でみた太陽



チャンドラが見た超新星残骸カシオペアA
(光赤外との合成)

— 余談 —
電磁波以外の天文観測

様々な天体観測の手法

- 光子(電磁波)
最も古典的な手法。無数の天体で観測される
- ニュートリノ
現在、3天体で検出
太陽、地球、SN1987A
- 重力波
現在未検出
超新星爆発やブラックホール合体

カミオカンデ

- カミオカンデ: 岐阜県の神岡鉱山に設置されたニュートリノ検出装置(チェレンコフ光を利用)

カミオカンデの純水タンク



1987年にマゼラン雲で発生した超新星
1987Aのニュートリノを検出し、ニュートリノ
天文学の第一歩を記した

The Nobel Prize in Physics 2002

"For pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

"For pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"

		
Raymond Davis Jr.	Masatoshi Koshiba	Riccardo Giacconi
① 1/4 of the prize	① 1/4 of the prize	② 1/2 of the prize
USA	Japan	USA
University of Pennsylvania Philadelphia, PA, USA	University of Tokyo Tokyo, Japan	Associated Universities Inc. Washington, DC, USA
b. 1914 d. 2006	b. 1926	b. 1931 (in Genoa, Italy)

2002年のノーベル賞受賞者

重力波探査

- 2011年現在、重力波は未検出
- 世界中で探査が続けられている



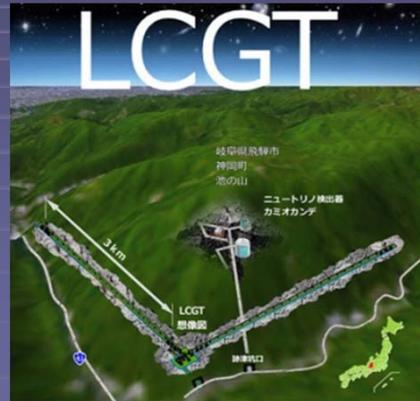
TAMA300 (国立天文台 他)



LIGO (米国 Caltech & MIT)

日本における新計画 LCGT

- Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope = 大型低温重力波望遠鏡
- 東大宇宙線研他のチームで神岡鉱山に3kmの冷却型の重力波望遠鏡を建設
- 2015年頃観測開始



電波天文の歴史

天文学の歴史

- 光学天文学の歴史
人類の誕生と同時!?
月の満ち欠け、惑星の運動→暦（紀元前から）
- 望遠鏡による最初の宇宙の観測
ガリレオ・ガリレイ（1609年）
- 電波天文学の誕生は1931年（およそ80年前）

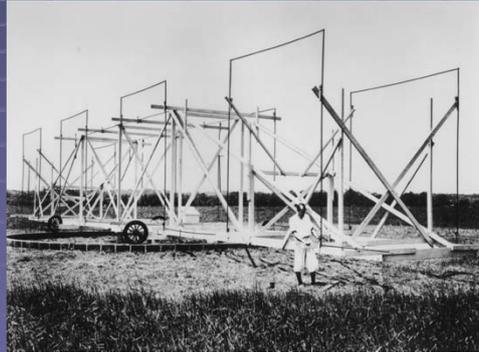
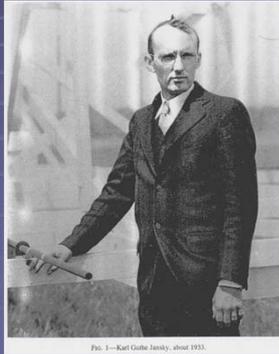
観測天文学の歴史のほとんどは光学天文学

電波技術の歴史

- クーロンの法則 1785年
- ファラデーの電磁誘導の法則 1831年
- マクスウェル方程式 1864年
- ヘルツによる電磁波の確認 1888年
- マルコーニの大西洋横断無線通信
1901年
- 最初のラジオ放送 1906年

電波天文学の誕生

- カール ジャンスキー
(1905-1950)
米国ベル研究所の電波技師
雷による電波雑音を研究中に宇宙電波を(偶然)発見 (1931年)



リーバーの研究

- グロート リーバー
シカゴの電波技師

ジャンスキーの発見に影響を受け、
望遠鏡を自作して観測を開始。



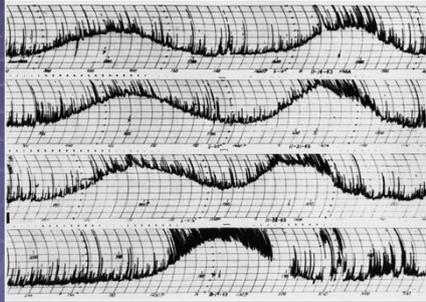
Grote Reber (1911 - 2002)



リーバーの望遠鏡(直径10m)

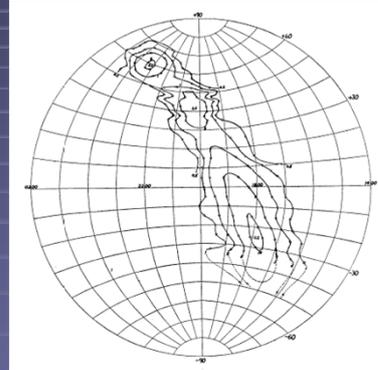
リーバーの電波地図

- 望遠鏡をいろいろな方向に向け、電波強度を測定



リーバーの望遠鏡で記録されたチャート

リーバーの観測で得られた初めての電波宇宙地図



天の川と、Sgr Aなどの明るい天体も見えている (1944年)

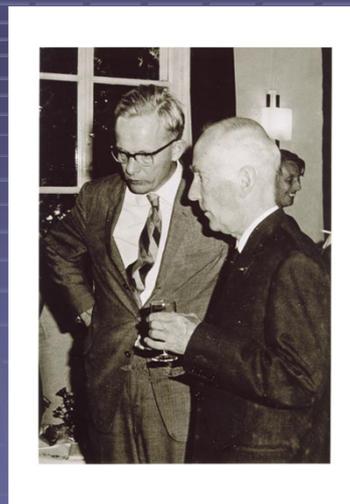
中性水素21cmの発見

- オールト (Jan Oort 1900-1992)
ライデン大学教授

宇宙で一番多い物質である水素から、電波が出るかを弟子のファンデフルストと計算

1944年、中性水素(HI)の21cm線が観測可能なことを予言

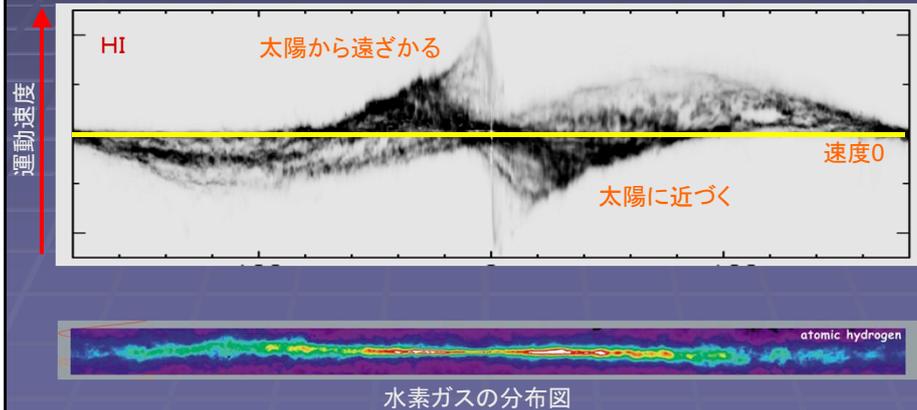
1951年、米国、オランダ、オーストラリアの3グループがそれぞれ検出



Jan Oort (1900 – 1992)
Hendrik van de Hulst (1918-2000)

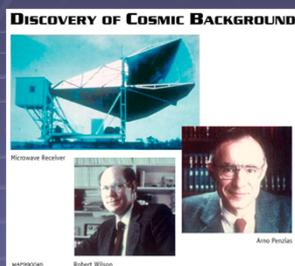
銀河系の回転

- 中性水素で見た銀河系のガスの運動速度
ドップラー効果により回転がわかる



宇宙背景放射の発見

- 宇宙背景放射の発見 (1965年)
ペンジャス、ウィルソン



宇宙の温度は絶対温度3度 (マイナス270度)

宇宙が過去に火の玉だった証拠

> ビッグバン宇宙は正しかった!

The Nobel Prize in Physics 1978

"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"

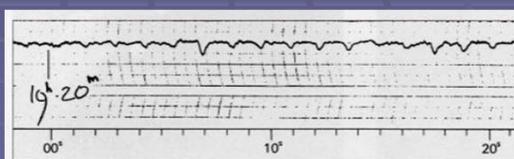
"for their discovery of cosmic microwave background radiation"

Pyotr Leonidovich Kapitsa	Arno Allan Penzias	Robert Woodrow Wilson
1/2 of the prize USSR	1/4 of the prize USA	1/4 of the prize USA
Academy of Sciences Moscow, USSR	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA	Bell Laboratories Holmdel, NJ, USA
b. 1894 d. 1984	b. 1933 (in Munich, Germany)	b. 1936

パルサーの発見

- パルサーの発見(1967年)
ヒューイッシュ、ベル

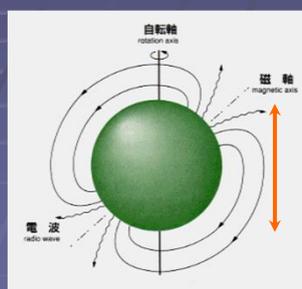
使用した望遠鏡



観測された周期パルス

パルサーの正体

- 最初は宇宙人の信号説も！？
パルサー第一号は当時 LGM-1 と命名された。
LGM1は宇宙人を意味する”Little Green Men”。
- 結局は 中性子星 と判明



パルサー(中性子星)の模式図



かに星雲 : 1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つかった

1974年度ノーベル物理学賞

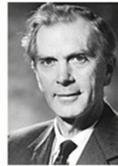
- Ryle (干渉計の開発)
- Hewish (パルサーの発見)

第一発見者のベルが
選からもれたことに対
して異議が、、



The Nobel Prize in Physics 1974

"for their pioneering research in radio astrophysics: Ryle for his observations and inventions, in particular of the aperture synthesis technique, and Hewish for his decisive role in the discovery of pulsars"



Sir Martin Ryle
 1/2 of the prize
 United Kingdom

University of Cambridge
 Cambridge, United Kingdom
 b. 1918
 d. 1984



Antony Hewish
 1/2 of the prize
 United Kingdom

University of Cambridge
 Cambridge, United Kingdom
 b. 1924

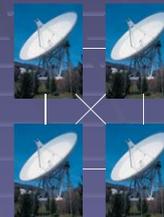
干渉計の発明

- 望遠鏡の分解能
 $\theta = \lambda / D$
- 100m鏡でも分解能は
 1分角程度(人間の目と
 同程度)
- 小さい望遠鏡を組み合わ
 せて巨大望遠鏡以上の口
 径と分解能を得る手法
 = 電波干渉計

単一鏡



干渉計



重力波放射の間接的証明

- 連星パルサーの発見と重力波存在の確認
ハルス、テイラー

PSR 1913+16の模式図



公転周期はたったの7.7時間
2天体間は70万~350万km

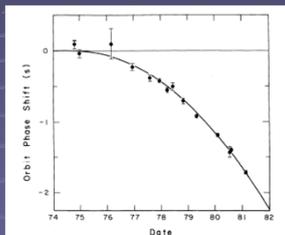


FIG. 6.—Orbital phase residuals, obtained from the data listed in Table 4. If the orbital period had remained constant, the points would be expected to lie on a straight line. The curvature of the parabola drawn through the points corresponds to the general relativistic prediction for loss of energy to gravitational radiation, or $\dot{P}_b = -2.40 \times 10^{-12}$.

公転周期が現象する様子。一般相対論の重力波放出による予言とぴったり一致

The Nobel Prize in Physics 1993

"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"



Russell A. Hulse
1/2 of the prize
USA
Princeton University
Princeton, NJ, USA
b. 1950



Joseph H. Taylor Jr.
1/2 of the prize
USA
Princeton University
Princeton, NJ, USA
b. 1941

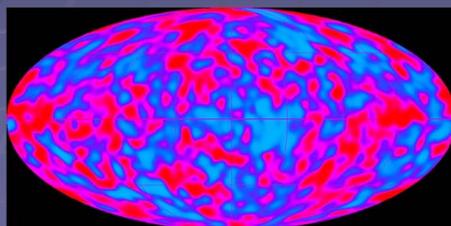
1993年度
ノーベル賞受賞

宇宙背景放射のゆらぎの検出

- COBE (1989年打ち上げ)

宇宙の構造形成や幾何学的構造が
わかってきた

COBEがみた宇宙
背景放射の揺らぎ



The Nobel Prize in Physics 2006

"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"



Photo: NASA

John C. Mather
1/2 of the prize
USA
NASA Goddard Space
Flight Center
Greenbelt, MD, USA
b. 1946

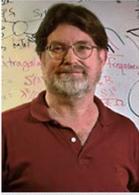
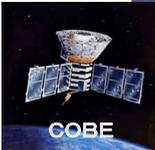


Photo: R. Kaltschmidt/LBNL

George F. Smoot
1/2 of the prize
USA
University of California
Berkeley, CA, USA
b. 1945



COBE

まとめ

- 電波天文学はたった80年の歴史で、宇宙に対する理解を飛躍的に高めてきた

身近な電波技術

身近な電波

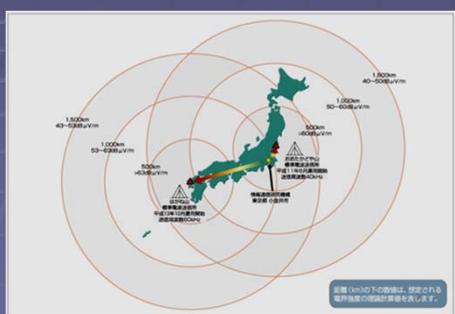
- 電波時計 40, 60 KHz
- AMラジオ 500 – 1600 KHz
- FMラジオ 70 – 100 MHz (VHF)
- アナログテレビ 100 – 200 MHz (VHF)
- 地デジ 470 – 770 MHz (UHF)
- 携帯電話 800 – 2000 MHz
- GPS衛星 1.2 – 1.5 GHz
- 衛星放送 12 GHz

c.f. 電波天文

100 MHz ~ 1 THz

電波時計

- 情報通信研究機構(NICT, 小金井市)が管理する日本標準時を電波に乗せて放送
- 電波時計はこれを受信して、正しい時刻にあわせる



送信所の位置(福島、佐賀)



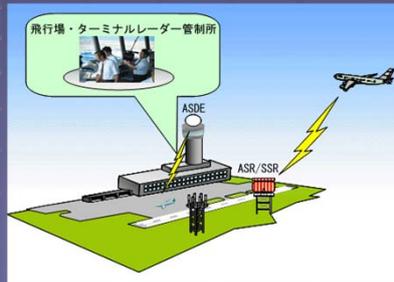
おおたかどや標準電波送信所(福島)
現在停波中

レーダー

- レーダー: RAdio Detection And Ranging
送信波の反射を捕らえることで、物体の存在および距離を求める。
- 距離は送信から反射波受信までの時間を使う



空港監視レーダー



衛星放送

- 静止衛星からの放送を配信
- 各地にテレビ局を設置する必要がない
(離島でも受信可能)



BS衛星

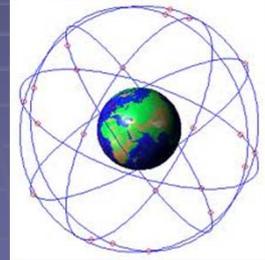
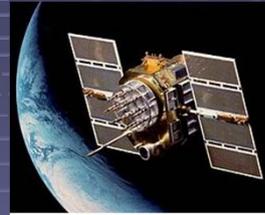


衛星放送受信システム
(アンテナ、受信機 etc)

GPS(Global Positioning System)

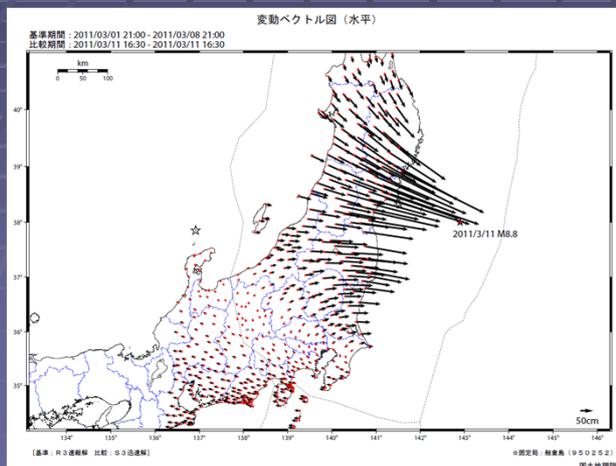
- 米国の軍事衛星システム。
- 地球上での位置を計測可能。
- ~30機の衛星で”GPS星座“を形成
- 測位の原理は次回以降
(電波干渉計と同じ原理)

- もっとも身近な利用例:カーナビ



3月11日の地震による地殻変動

- 国土地理院のGPSネットワークGEONETによる観測
- 1200点のGPS電子基準点で観測(2004年~)



東北地方の太平洋沿岸を中心に最大5m程度東へ移動

