

宇宙暗黒物質の謎と未知の素粒子

今井憲一

(理学研究科)

宇宙の暗黒物質 ダークマター

- 宇宙には、見えない物質が、見える物質(星や原子分子)にたいして重さにして約10倍ある!!!
- なぜそんなことがいえるの？
- ダークマターは未知の素粒子かもしれない
その正体をつきとめよう!

エーテルと電磁波と光

- 古典電磁気学(マックスウェル方程式)の完成
1864年
 $B \sim dE/dt$ ($E \sim dB/dt$)
-> 電磁波の存在、光は電磁波
波の媒質 → 宇宙を満たすエーテルの存在

Maxwell



H.Hertz

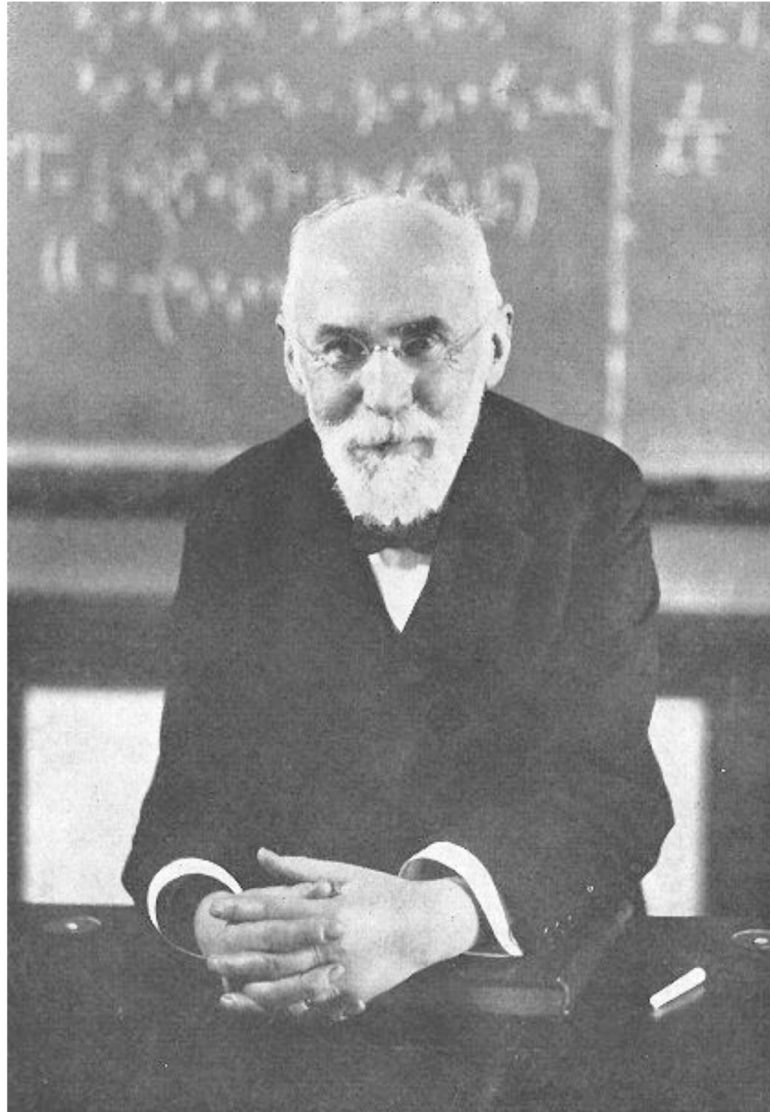
光の速度の精密測定

- エーテルに対する地球の速度を測る
マイケルソン干渉計
- 光の速度はどの方向も(東も北も)同じ！
→ エーテルの証拠は見つからない！



A.Michelson

ローレンツ (*Hendrik A. Lorentz*)



出所 http://en.wikipedia.org/wiki/Hendrik_Lorentz

エーテルと光速度の矛盾

- ローレンツ変換 1904年

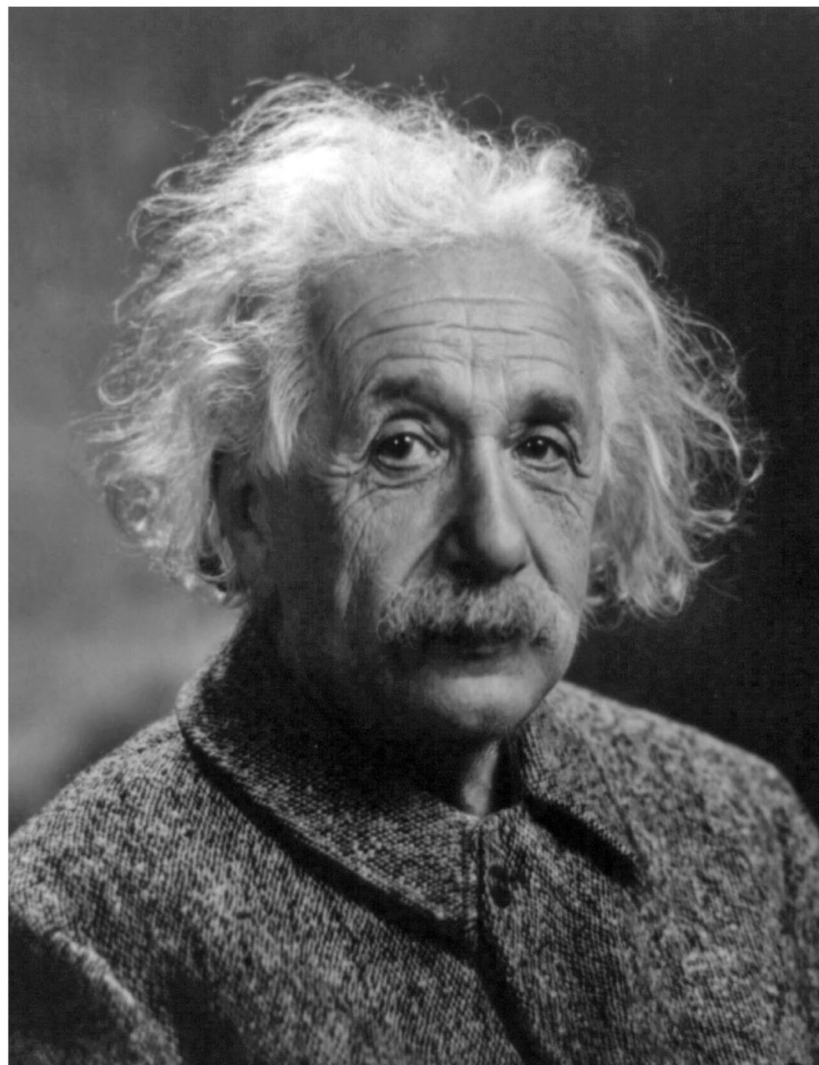
局所時

ローレンツ短縮

- ローレンツの考え

しかしエーテルは絶対空間に静止して存在
ニュートンの力学は正しい(200年の歴史)

アインシュタイン (Albert Einstein)



相対性理論 (1905年)

- 相対性原理

すべての基本法則はどの慣性系でも成り立つ

マックスウェル方程式は基本法則

光速不変の原理

ニュートン方程式は変更やむなし

- 驚くべき結果

時間と空間が区別できない

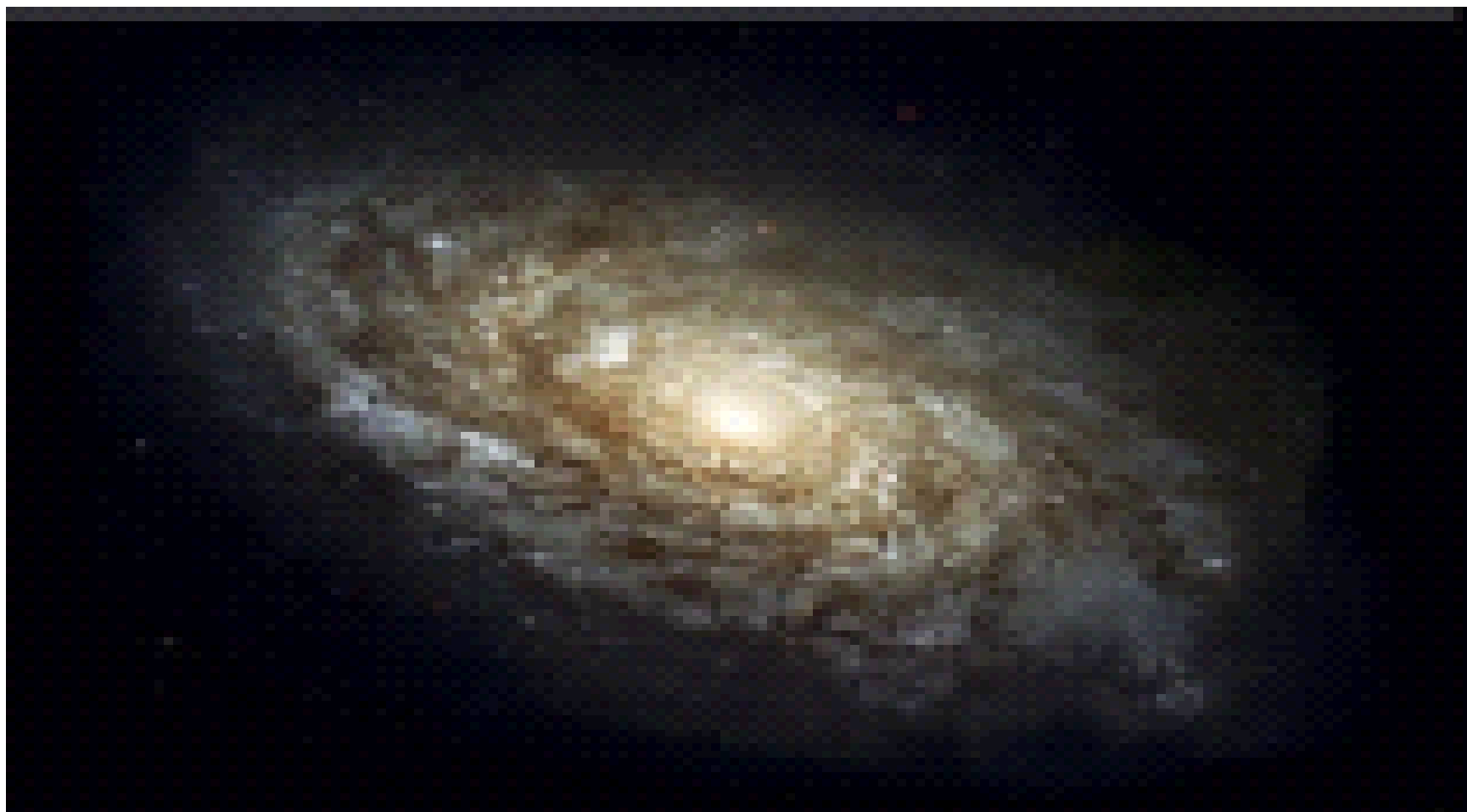
運動エネルギーと質量(エネルギー)も区別できない

$$E=mc^2$$

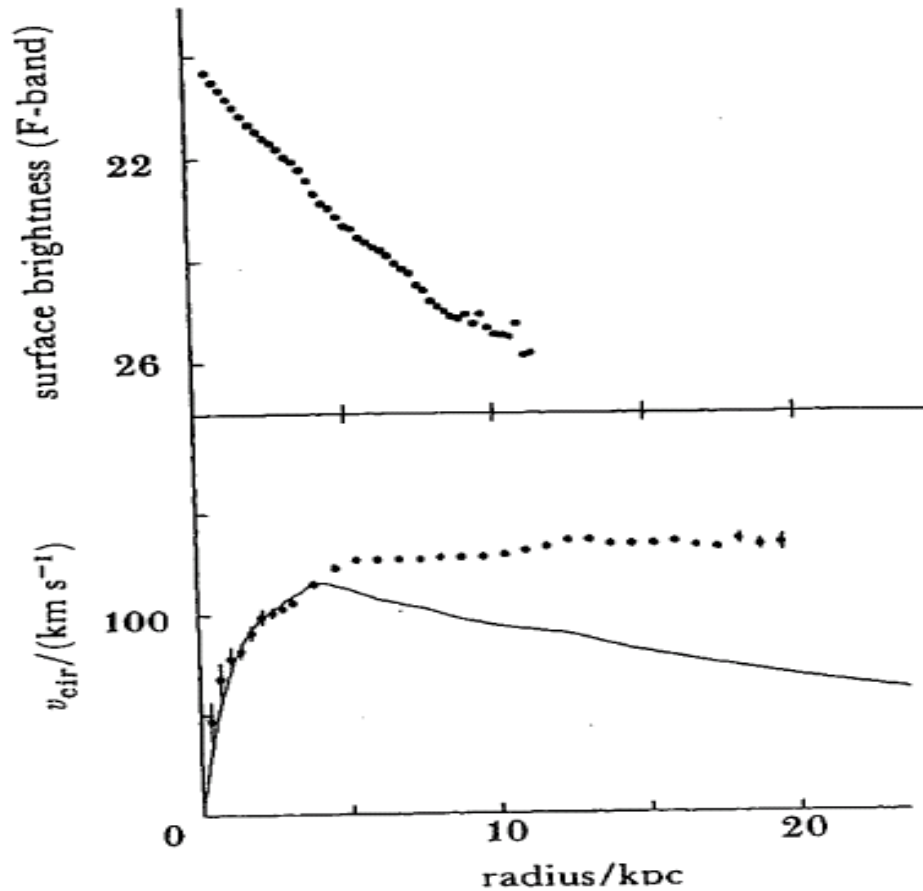
ダークマターの謎

- 宇宙は暗黒物質(ダークマター)で満たされているのか??

銀河の回転速度の謎 (ルービン)



銀河の光度と回転速度



$$F = GMm/r^2 \quad \text{重力}$$
$$= mv^2/r \quad \text{遠心力}$$
$$v = (GM/r)^{1/2}$$

もし $M(r) = kr$ なら
 $V = \text{一定}$

NGC2403

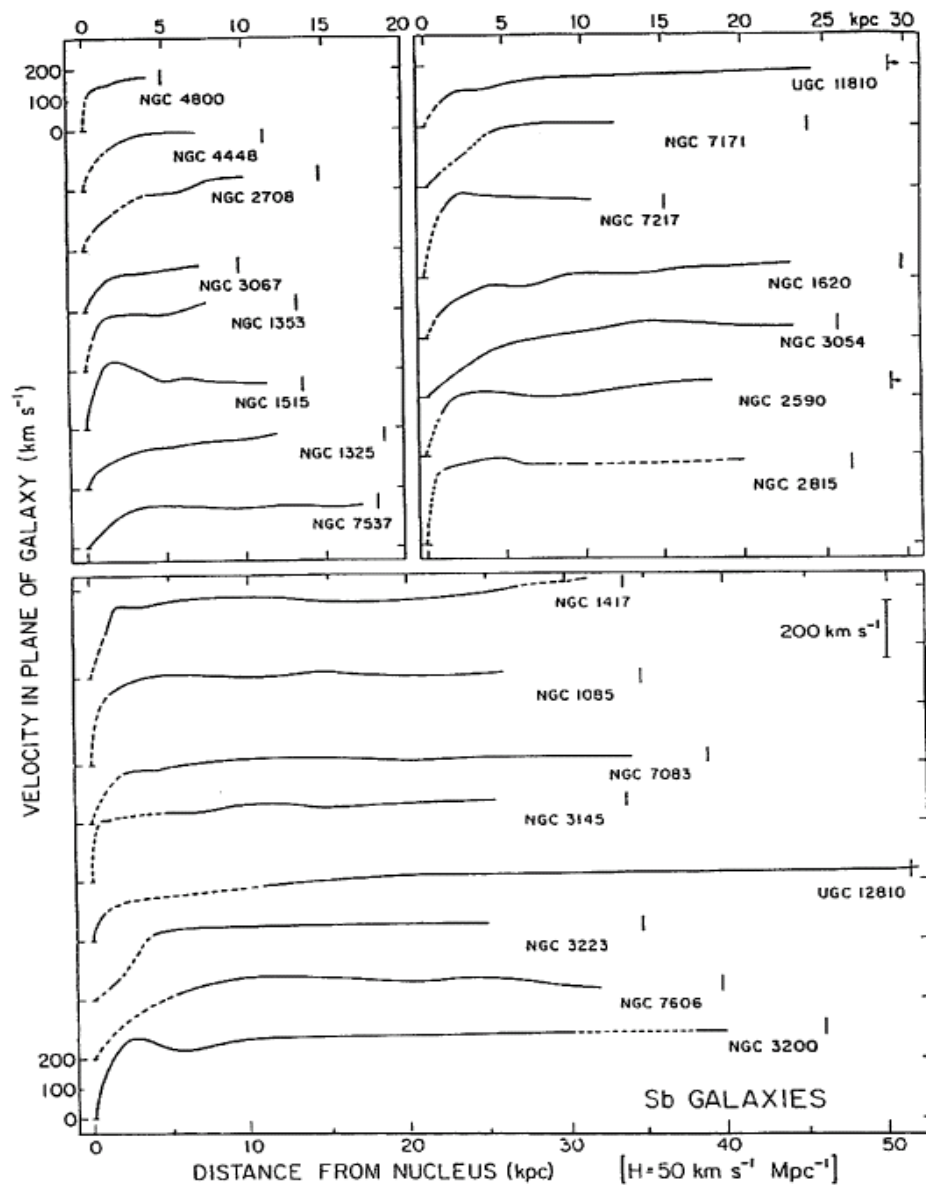


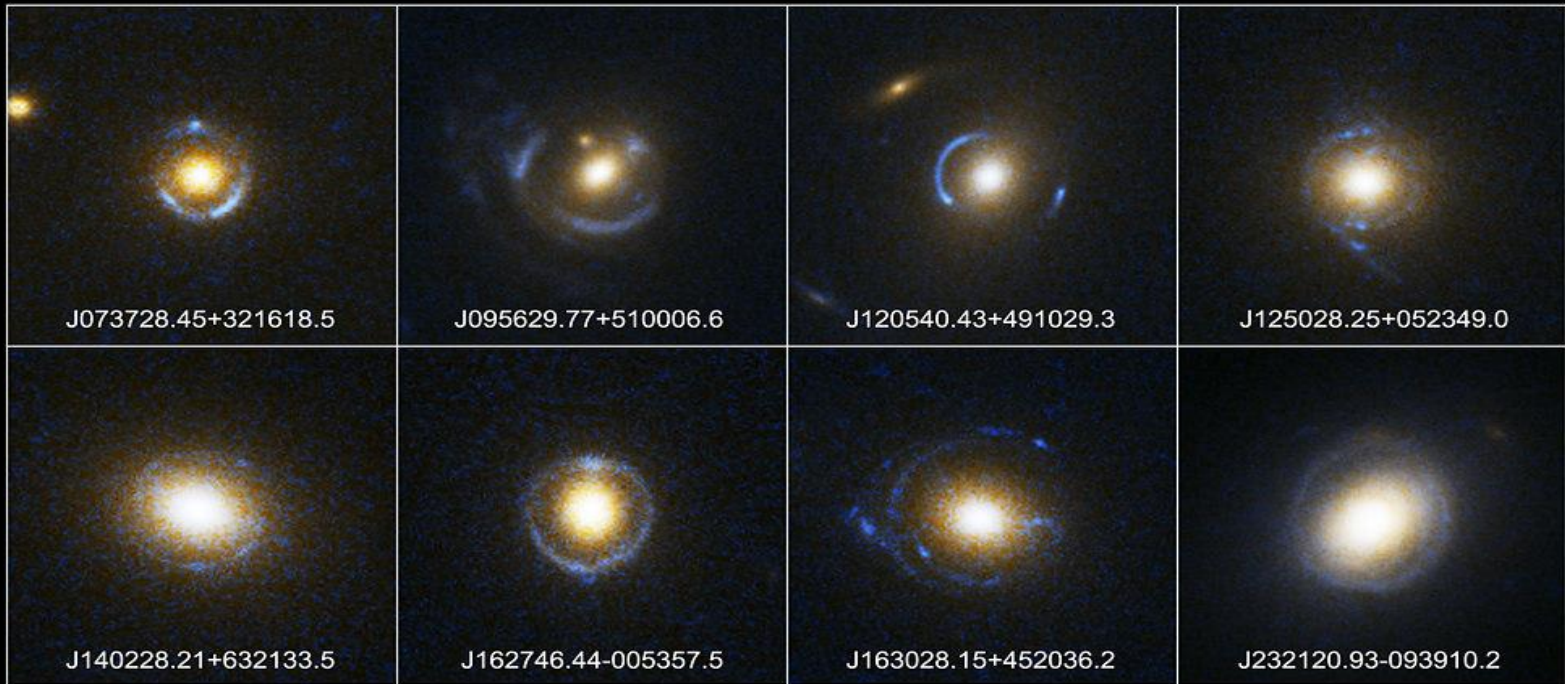
図 44 ルービンらが観測した様々な銀河の回転曲線。縦軸は回転速度(100—200km/秒)、横軸は銀河中心からの距離で kpc 単位。

“ダークマター”の重力



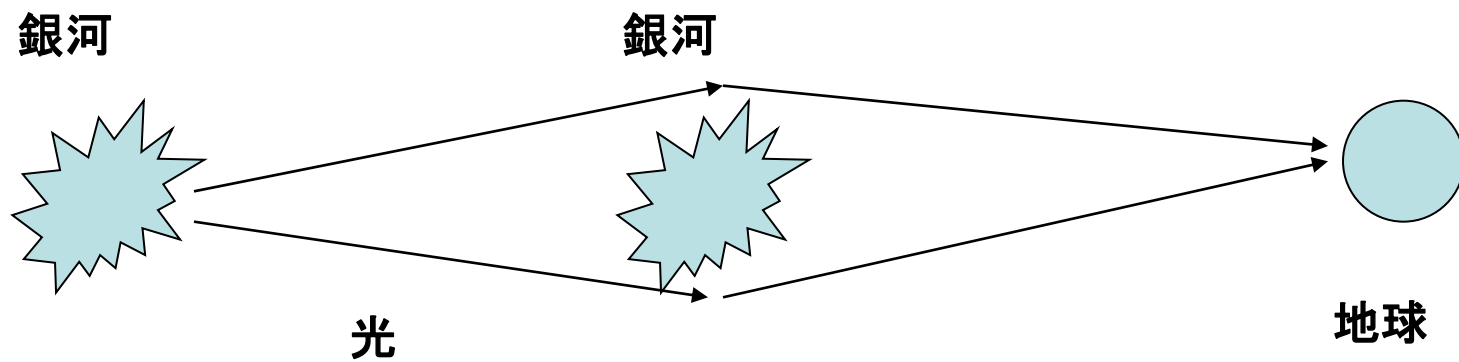
X線(左)と可視光(右)で見た銀河NGC720

重カレンズ (*Einstein Ring*)

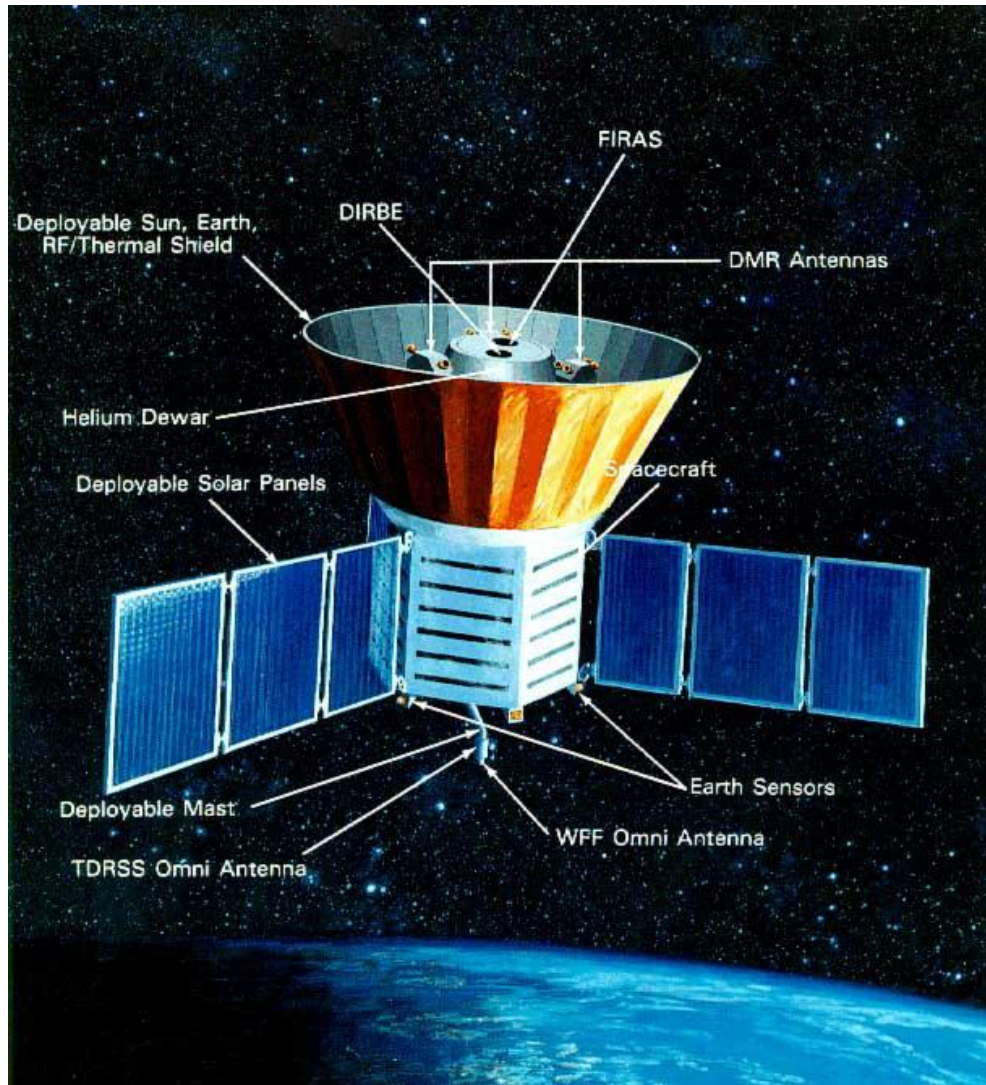


Einstein Ring Gravitational Lenses
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

重力レンズ



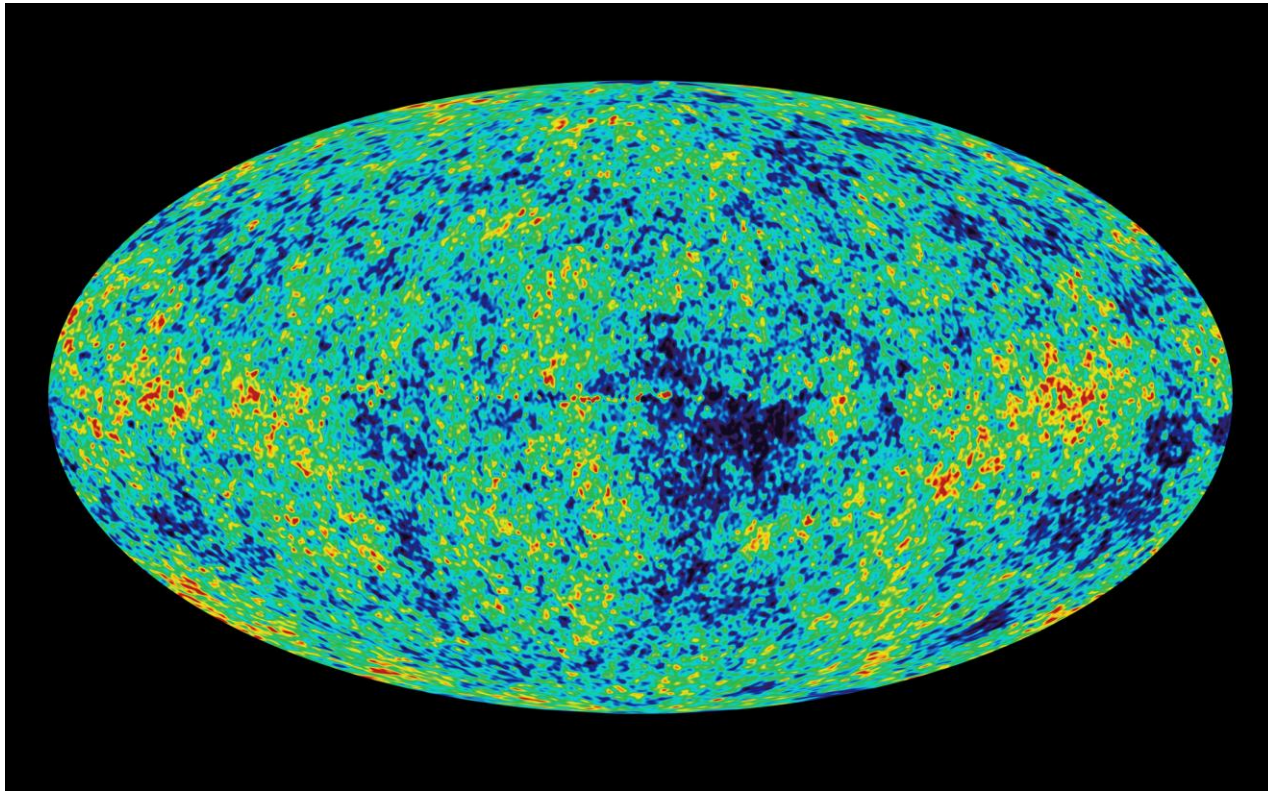
宇宙背景放射のゆらぎの発見



COBE (1989)

**2006年ノーベル賞
マザー、スムート**

宇宙背景放射のゆらぎの精密測定 (WMAP)



宇宙の全エネルギー

見える物質 4% ダークマター 24% ダークエネルギー 72%

ダークマターの候補

- 未知の素粒子

(素粒子理論からの予言)

ニュートラリーノ? <—超対称性

アクシオン? <—Strong CP問題

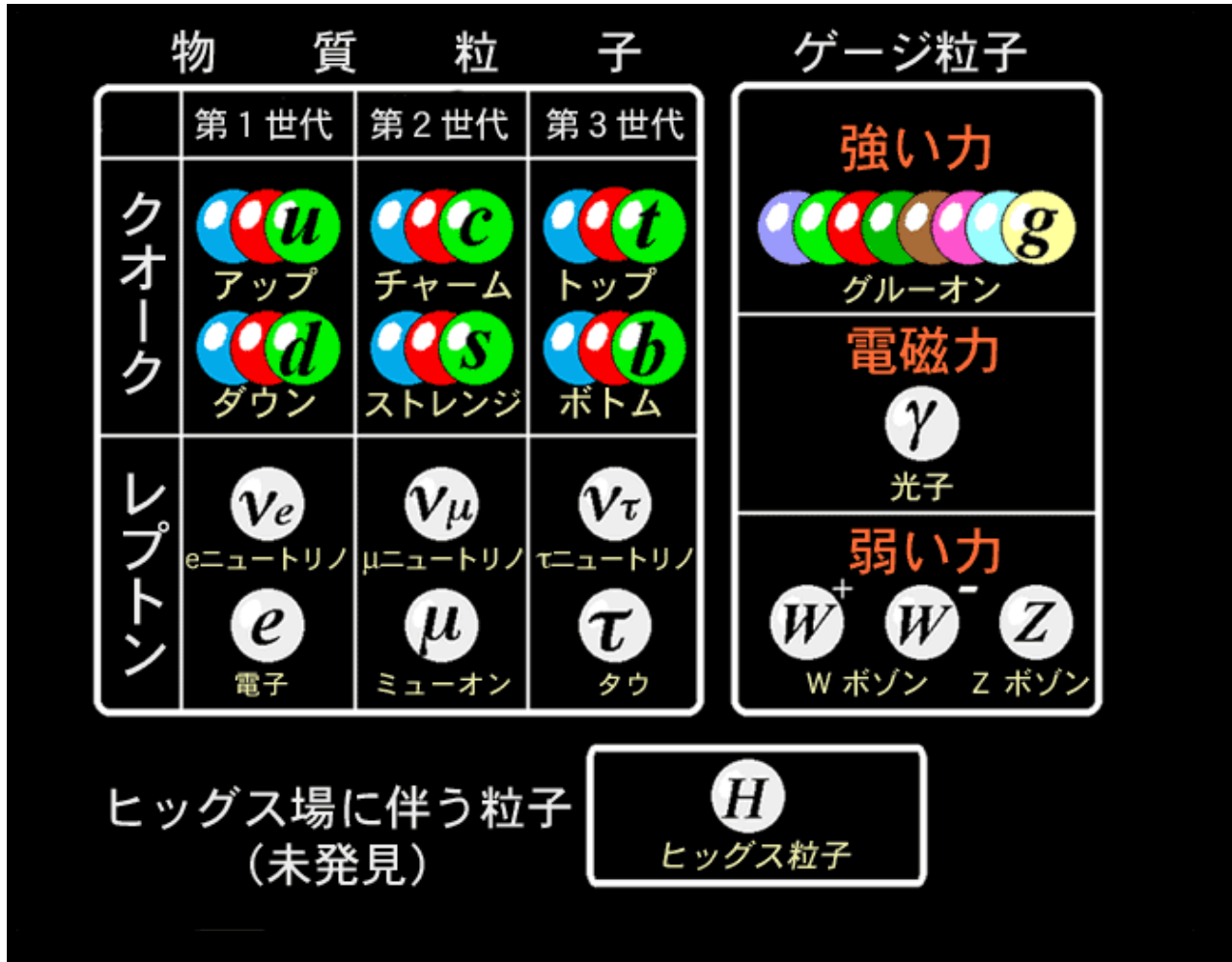
- 見えない“星”

惑星、中性子星、ブラックホール

超対称性

- フェルミオンとボゾンの対称性
統一理論の最有力理論
- 宇宙のはじめには超対称の世界だった！
- いまある素粒子の倍の素粒子があった！
- 現在は、最も安定な超対称粒子だけが残っている。
neutralino 中性の粒子
重い！（今までの加速器では作れなかった）
相互作用が弱い（今まで見つからなかった）

素粒子の世界

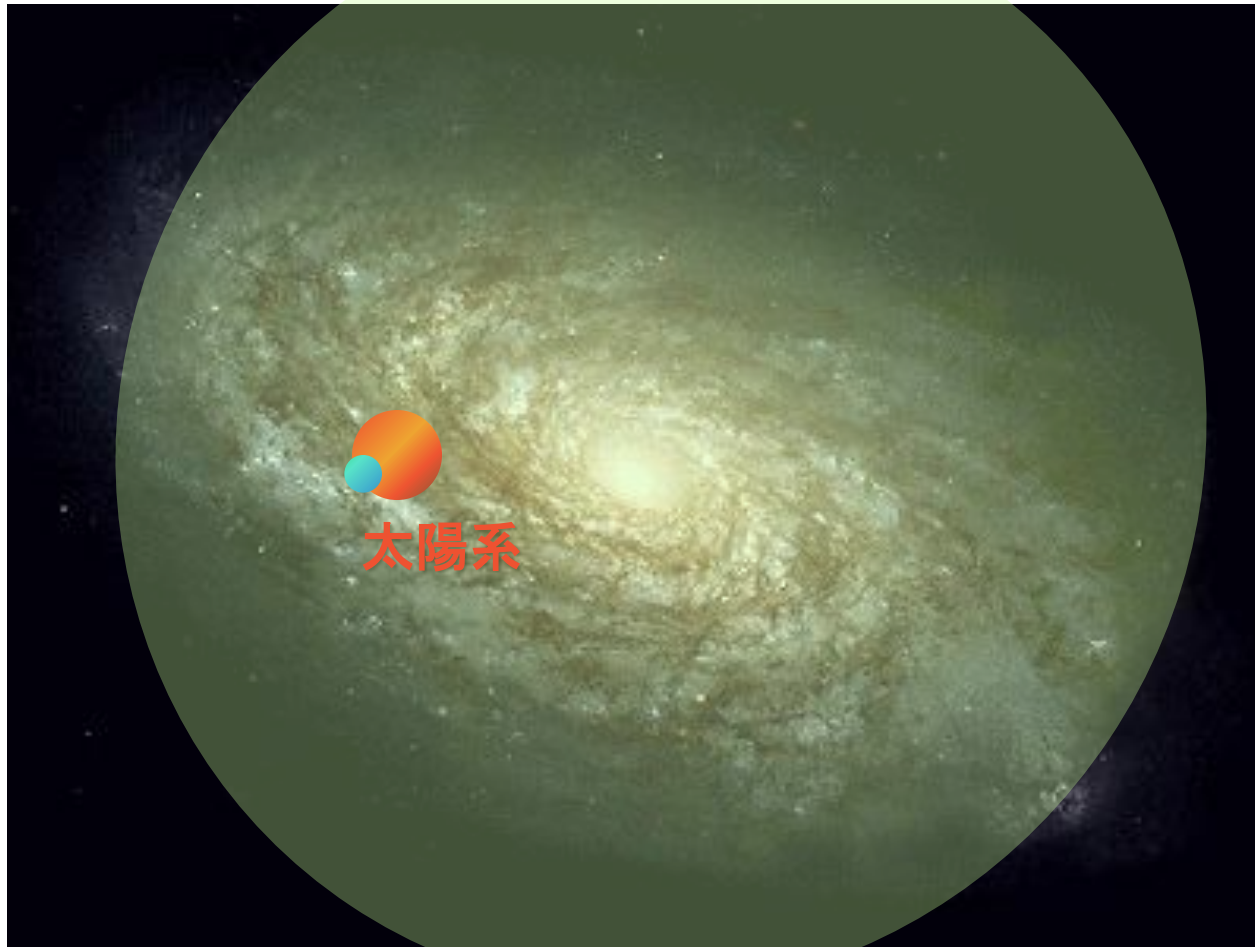


LHC@CERN



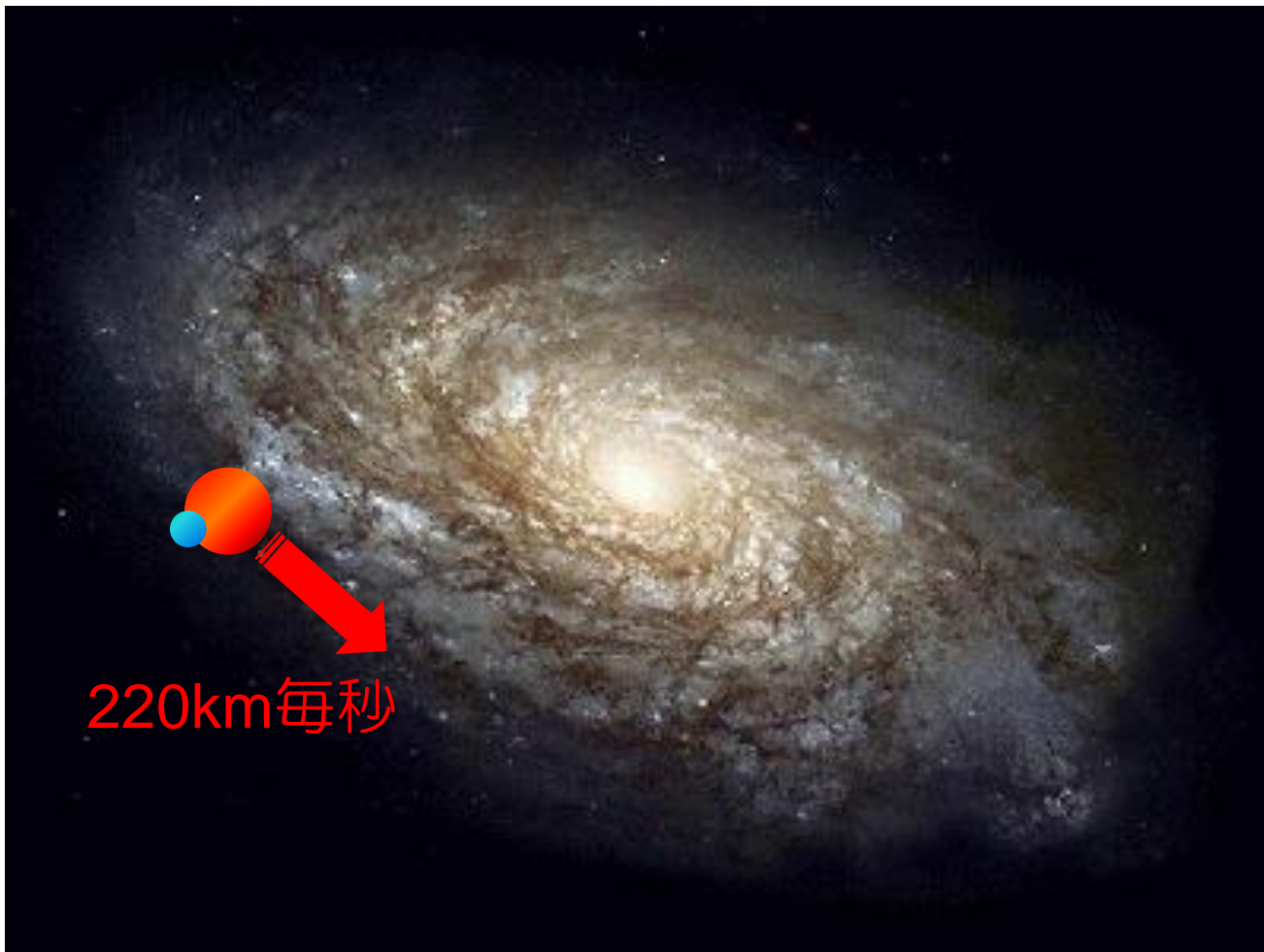
暗黒物質

- 天の川銀河は目に見えない「暗黒物質」に包まれています。



暗黒物質の風

- 太陽系は銀河の中を回転運動している。
- 地球の私達には「暗黒物質の風」が吹き付けています。



- 小柴先生のノーベル賞の絵にも太陽からの「ニュートリノの風」の絵が。

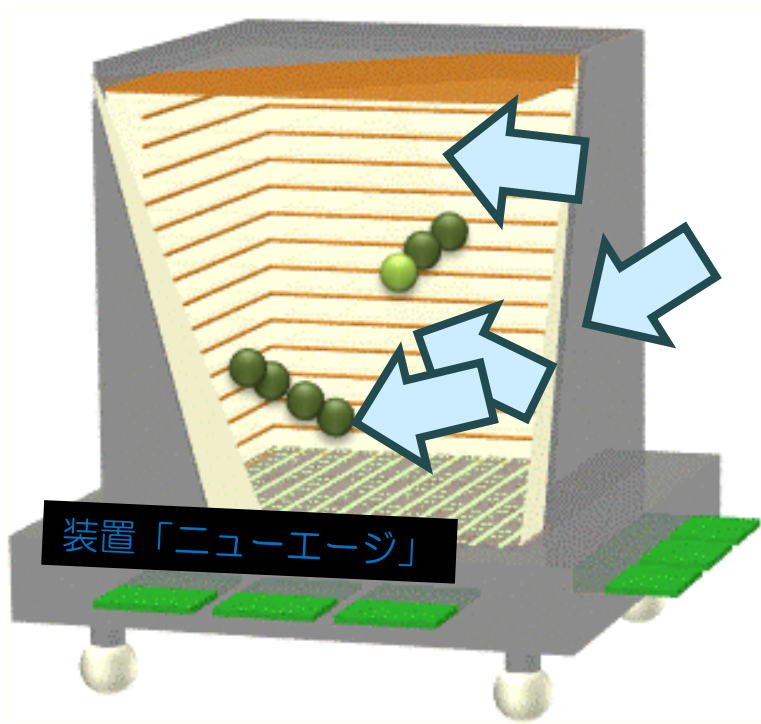


S
lu

som a
fysi
u
mä
R
för
fy
•
Jau

「風」の捉え方

特殊なガスを詰めた装置を用意します。
暗黒物質の風で原子核が散乱されます。

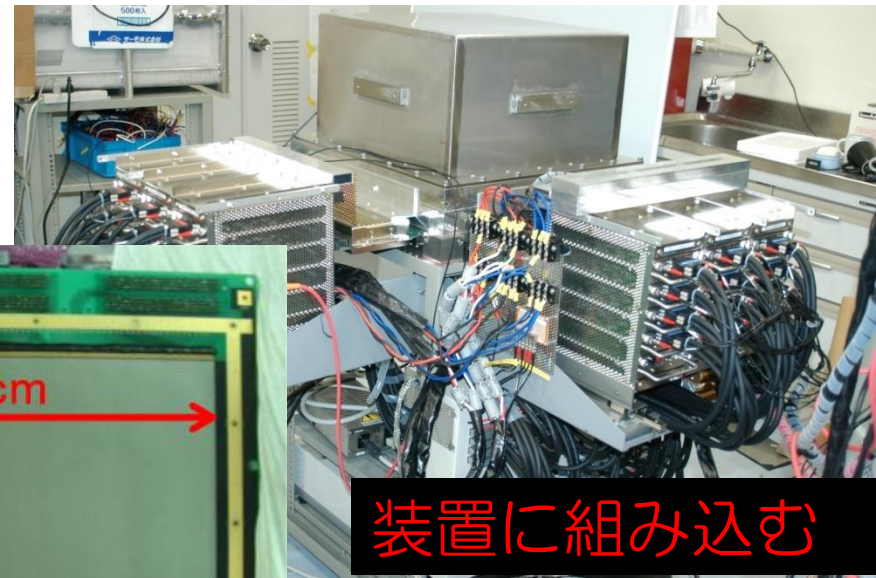
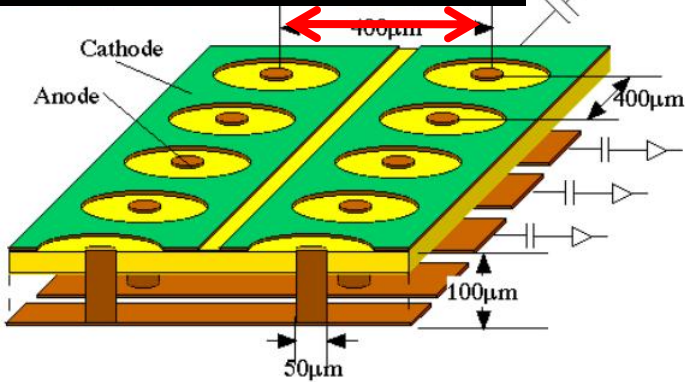


●●●●● : 原子核の飛跡 1~5ミリメートルの長さ

微細な「飛跡」捉えるために

- 京大独自の装置：ミュピック（谷森、身内）
 - 日本の微細加工技術を使った最新装置

0.4mm間隔で
髪の毛より細い
センサーが並び

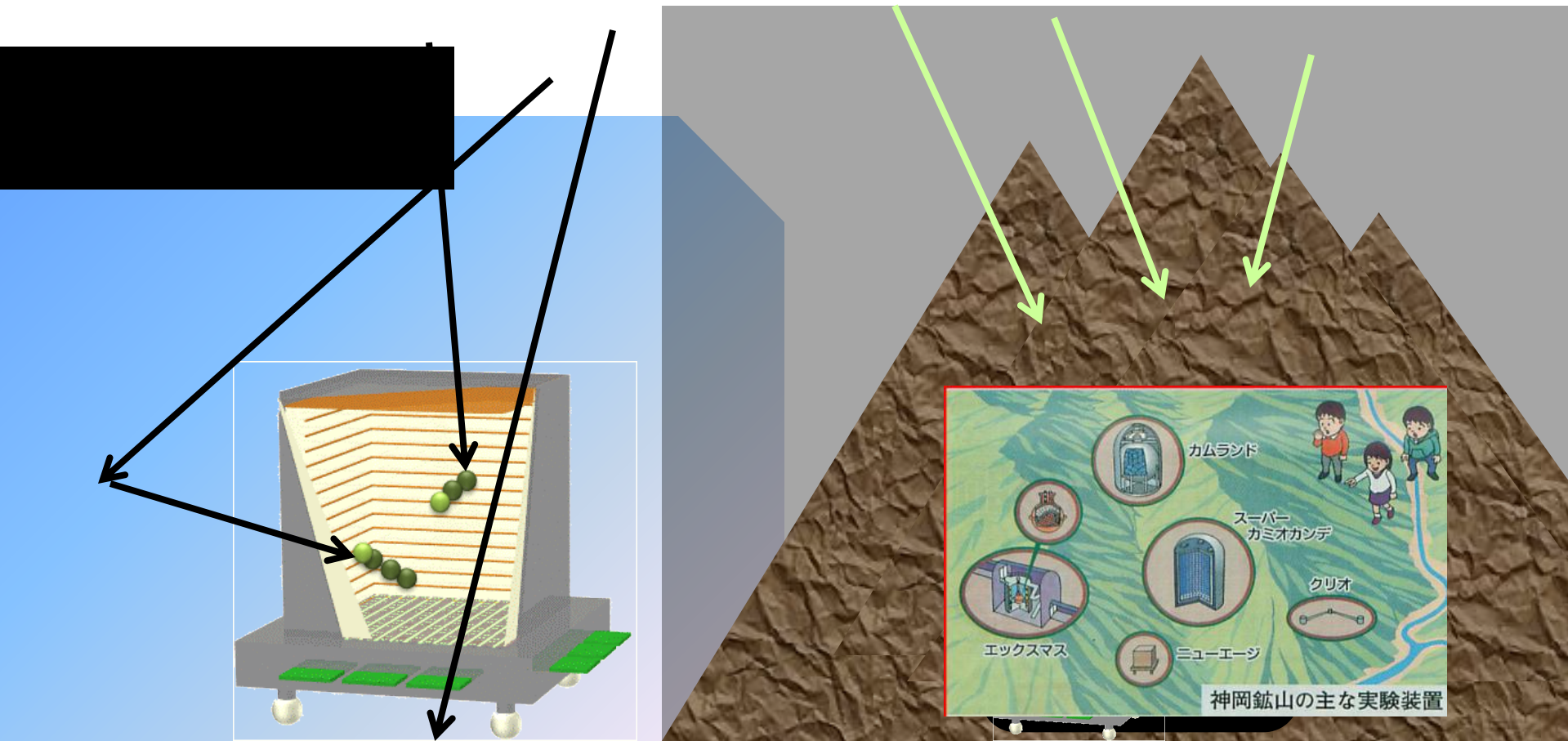


装置に組み込む

30cm角に
約60万個のセンサー

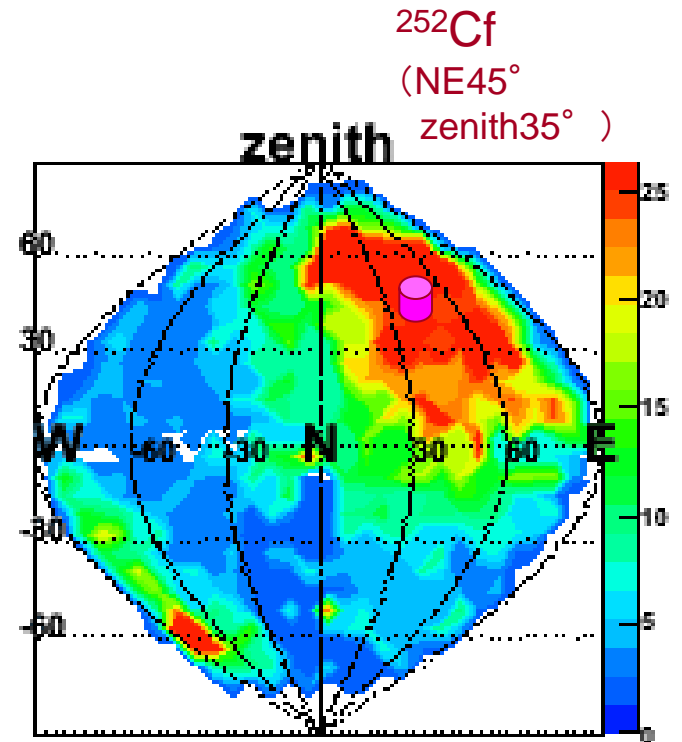
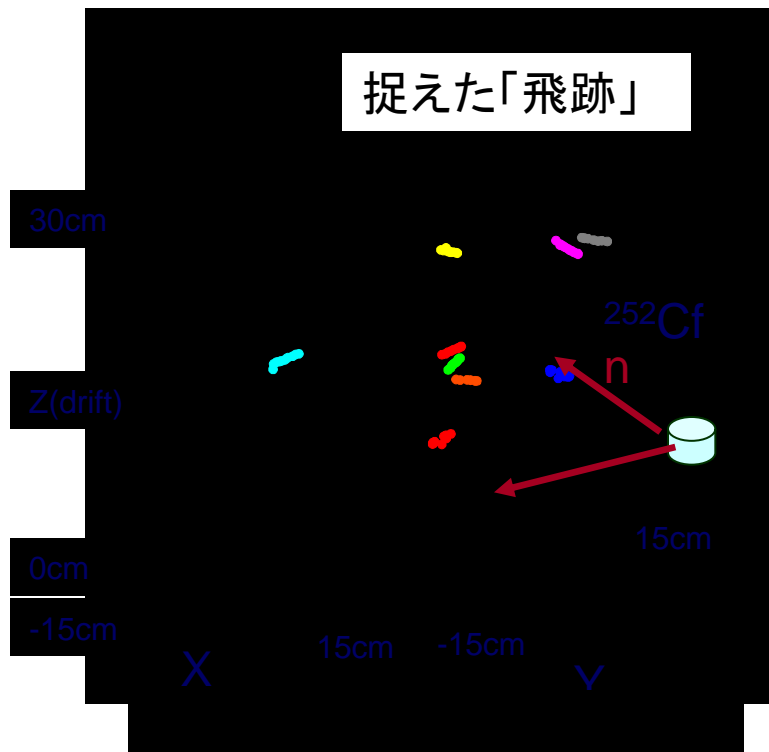
京都大学の挑戦 ~ニューエージ~

- 暗黒物質を探すには地下実験室
 - 宇宙から邪魔もの(バックグラウンド)が沢山
 - 地下に潜るとバックグラウンドは1/1000以下に



暗黒物質はまだだけれど。。。。

- ▶ テストではきれいに「風」を検出
下の天球図で赤く見えた。
- ▶ 暗黒物質の風でもこれを見たい！



天球図に描いた「風向」

-アクシオン-

- Strong CP 問題
(中性子の電気双極子モーメント $< 10^{-26}$ ecm)
- なぜ強い相互作用では厳密にCP対称性がなりたつのか？

-> アクシオンを導入すれば説明できる。

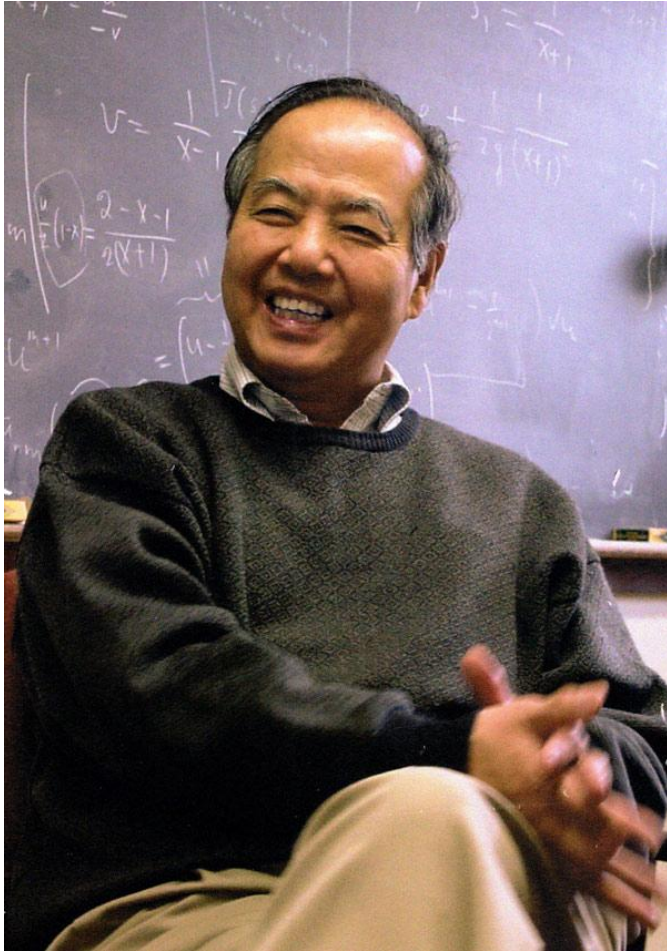
Peccei-Quinn 1977

CP対称性の破れ

- C対称性 荷電共役
粒子反粒子の対称性 電子と陽電子
- P対称性 パリティ変換
左右の変換に対する対称性
- 弱い相互作用ではC,Pそれぞれ対称性が破れている
Lee, Yang 1956年
コバルト核の β 崩壊で確認

しかしCP連続変換の対称性は破れていないと思われていた。

T.D.Lee



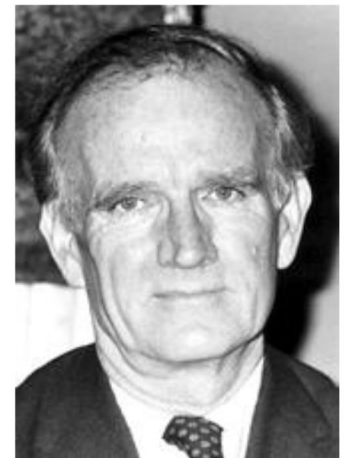
C.N.Yang



CP対称性の破れ

- 中性K中間子の崩壊
 $K_L \rightarrow 3\pi$ に崩壊する
 (CP=-1)のが普通だが
 ほんのわずかに(0.2%)
- $K_L \rightarrow 2\pi$ に崩壊した
 (CP=+1)

1964年 Croninと Fitch が
発見



弱い相互作用と粒子の崩壊

- 中性子の β 崩壊 $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$
(原子核の崩壊 = 内部の中性子の崩壊)
- クォークレベルでは $d \rightarrow u + e^- + \nu_e$
- K中間子 (s反dクォーク) の崩壊
- クォークレベルでは $s \rightarrow u + e^- + \nu_e$
- この崩壊でCPが破れているのは何故?
→ 小林益川理論

The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"



Photo: University of Chicago

Yoichiro Nambu

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"



Photo: KEK

Makoto Kobayashi



Photo: Kyoto University

Toshihide Maskawa

Progress of Theoretical Physics, Vol. 49, No. 2, February 1973

***CP*-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction**

Makoto KOBAYASHI and Toshihide MASKAWA

Department of Physics, Kyoto University, Kyoto

(Received September 1, 1972)

In a framework of the renormalizable theory of weak interaction, problems of *CP*-violation are studied. It is concluded that no realistic models of *CP*-violation exist in the quartet scheme without introducing any other new fields. Some possible models of *CP*-violation are also discussed.

Next we consider a 6-plet model, another interesting model of *CP*-violation. Suppose that 6-plet with charges $(Q, Q, Q, Q-1, Q-1, Q-1)$ is decomposed into $SU_{\text{weak}}(2)$ multiplets as $2+2+2$ and $1+1+1+1+1+1$ for left and right components, respectively. Just as the case of (A, C) , we have a similar expression for the charged weak current with a 3×3 instead of 2×2 unitary matrix in Eq. (5). As was pointed out, in this case we cannot absorb all phases of matrix elements into the phase convention and can take, for example, the following expression:

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos \theta_3 & -\sin \theta_1 \sin \theta_3 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \cos \theta_3 e^{i\delta} \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_3 e^{i\delta} \end{pmatrix}. \tag{13}$$

Then, we have *CP*-violating effects through the interference among these different current components. An interesting feature of this model is that the *CP*-violating

簡単な解説

弱い相互作用をするクォークは(強い相互作用もするので)実は混合している。

$$(d,u) (s,c) (b,t) \leftrightarrow (d',u')(s',c')(b',t')$$

現実のクォーク 弱い世界のクォーク

第二世代までしかないとき混合は2行2列の混合行列で記述でき、変数は実数でCPは保存

第三世代(6つのクォーク)があれば、3行3列となり3つの実変数と1つの複素数が存在するのでCPを破ることが可能となる。

アクシオンの探索

$a \rightarrow \gamma\gamma$ に崩壊しうる

- 加速器を使った探索では見つからなかった。
- 太陽からふってくるアクシオンの探索でも見つからない。
- うんと軽いアクシオンしか可能性はない。

高エネルギー研 (KEK)

つくば市

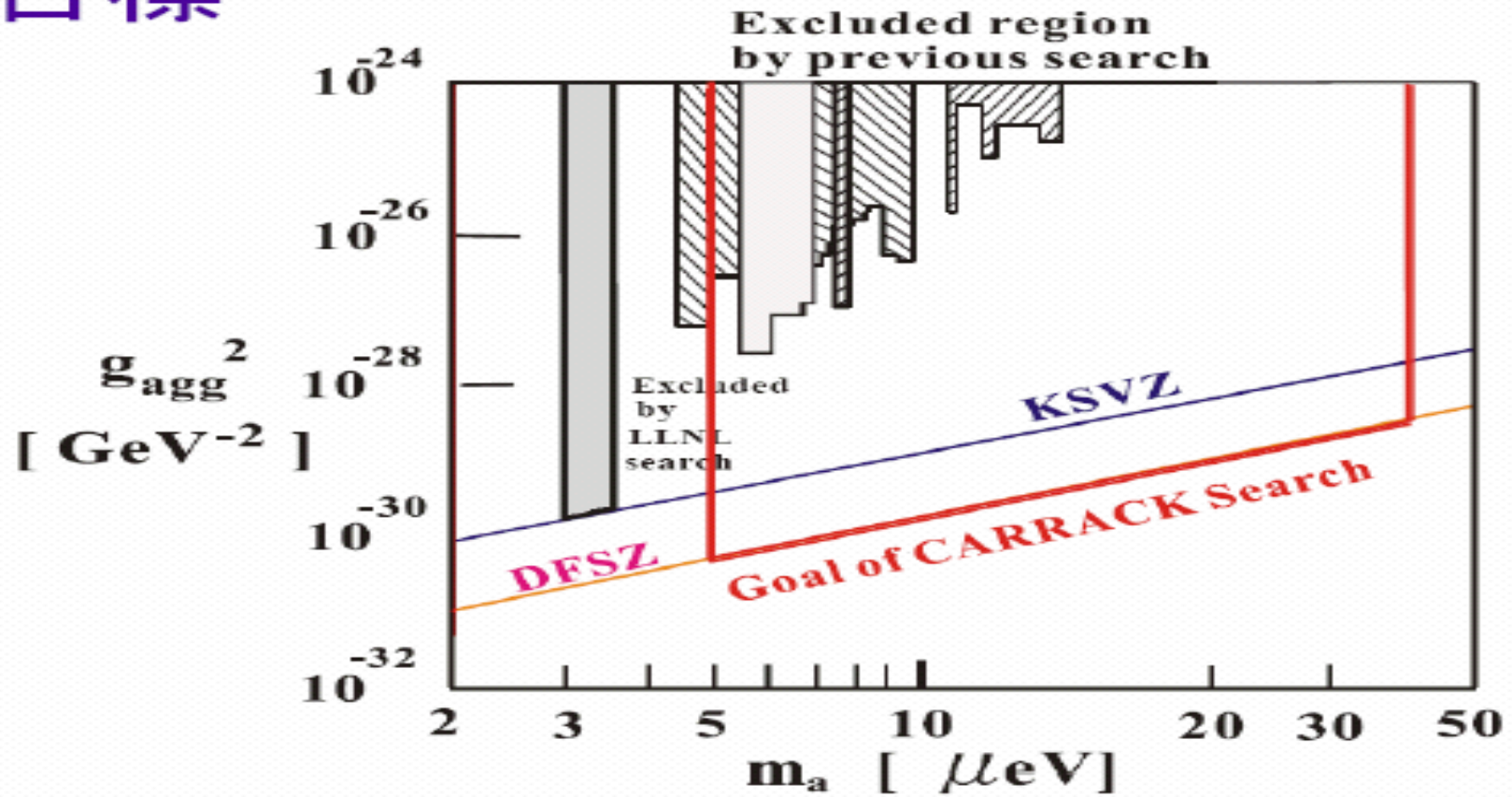


宇宙論からの制限

- 相互作用(電磁場との)が強すぎると超新星の冷却に影響が大きすぎる。
- 弱すぎると初期宇宙のアクシオンの量が多すぎてダークマターが多すぎることになる。
 - > upper bound of $f \sim 10^{12}$ GeV
 - > $10^9 < f < 10^{12}$ GeV
($10^{-3} > m_a > 10^{-6}$ eV)
($5 > m_a > 100$ μ eV M.Turner PRD(86))

New CARRACK

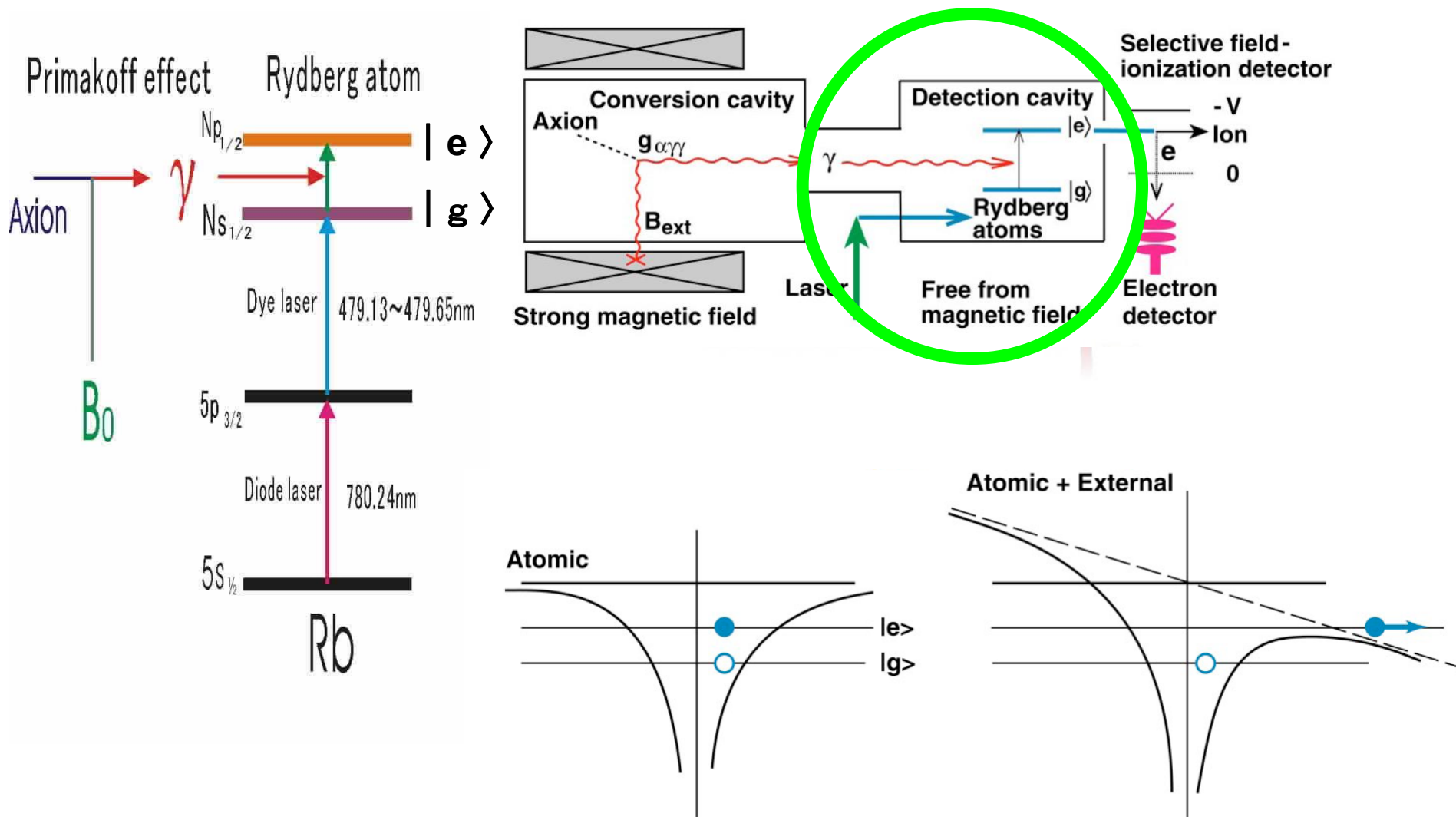
目標



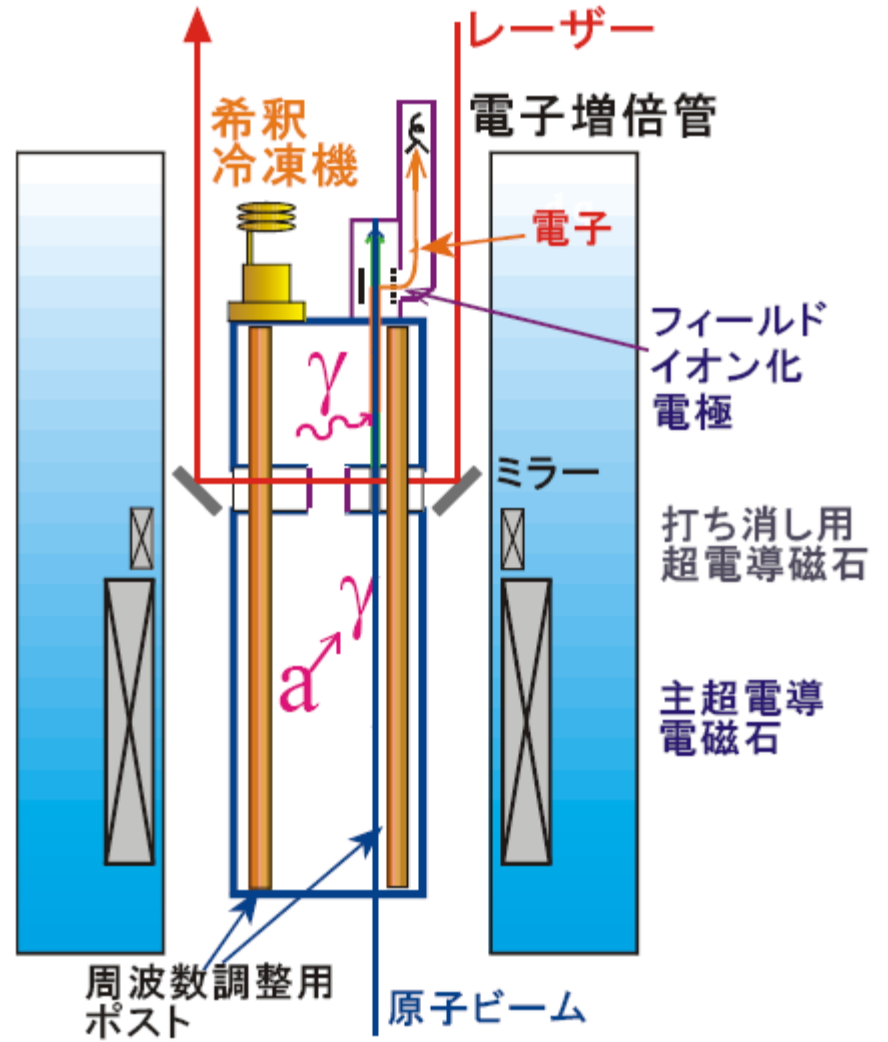
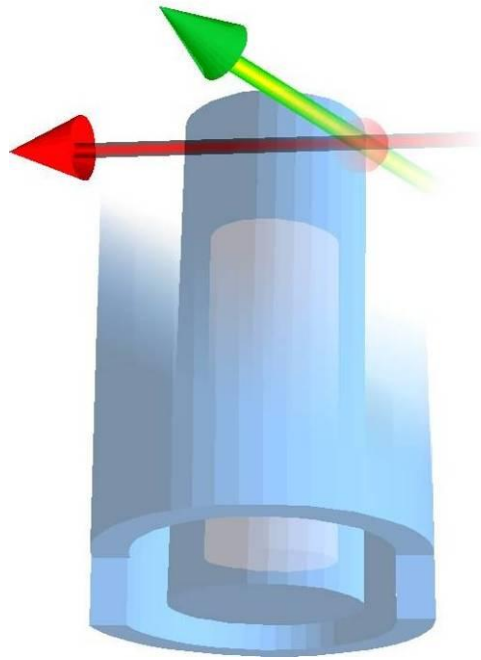
ダークマター実験棟



Axionの検出原理

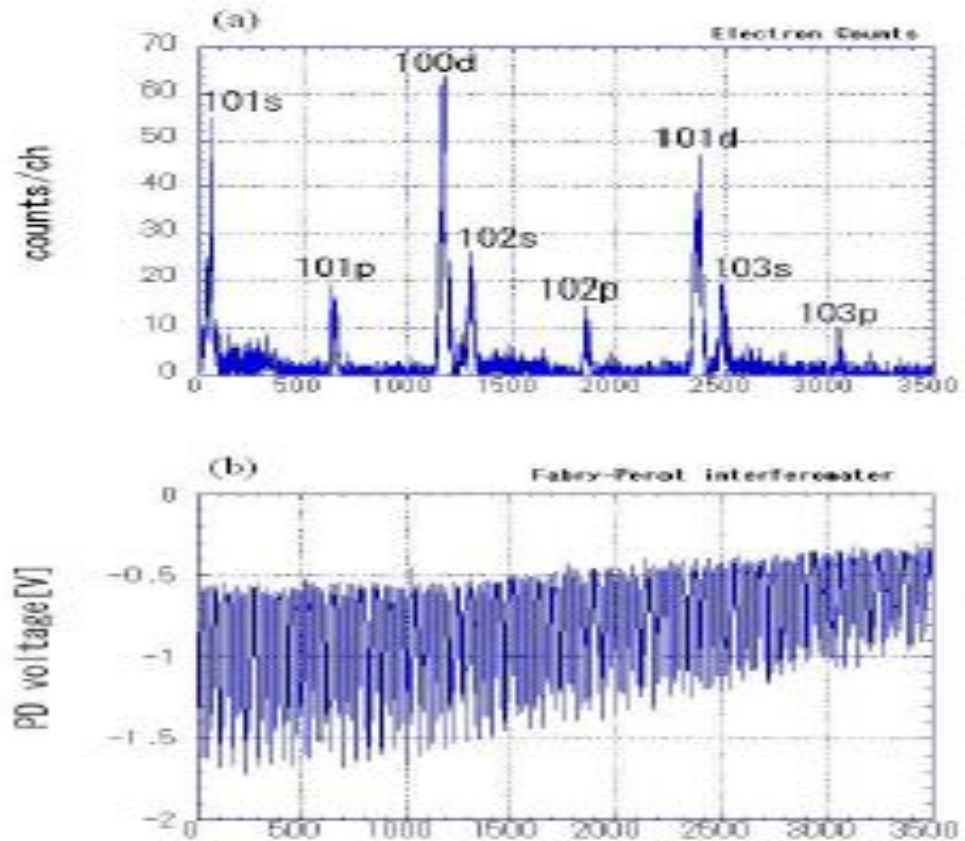


装置概念図

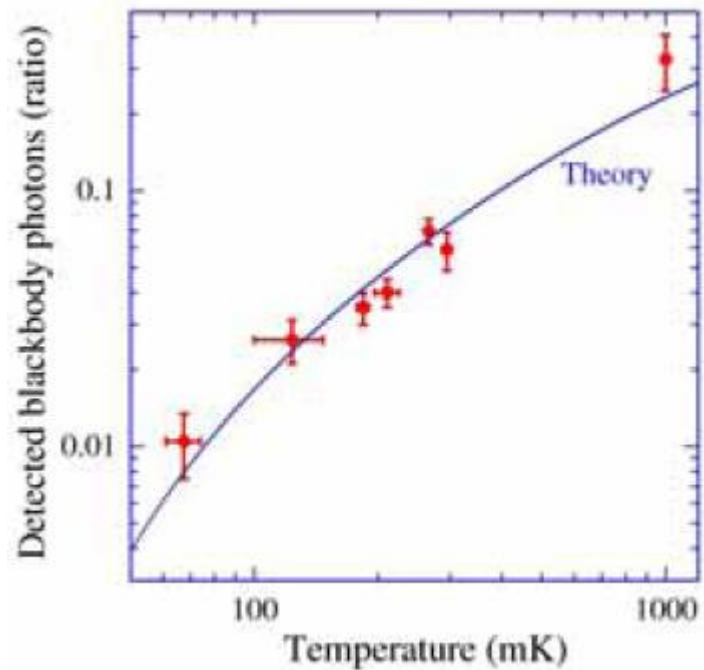
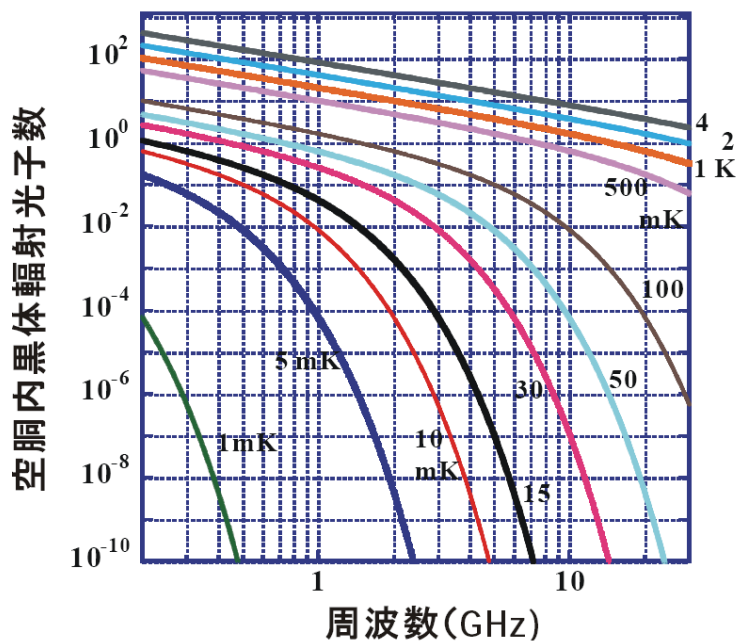


Rydberg原子スペクトル

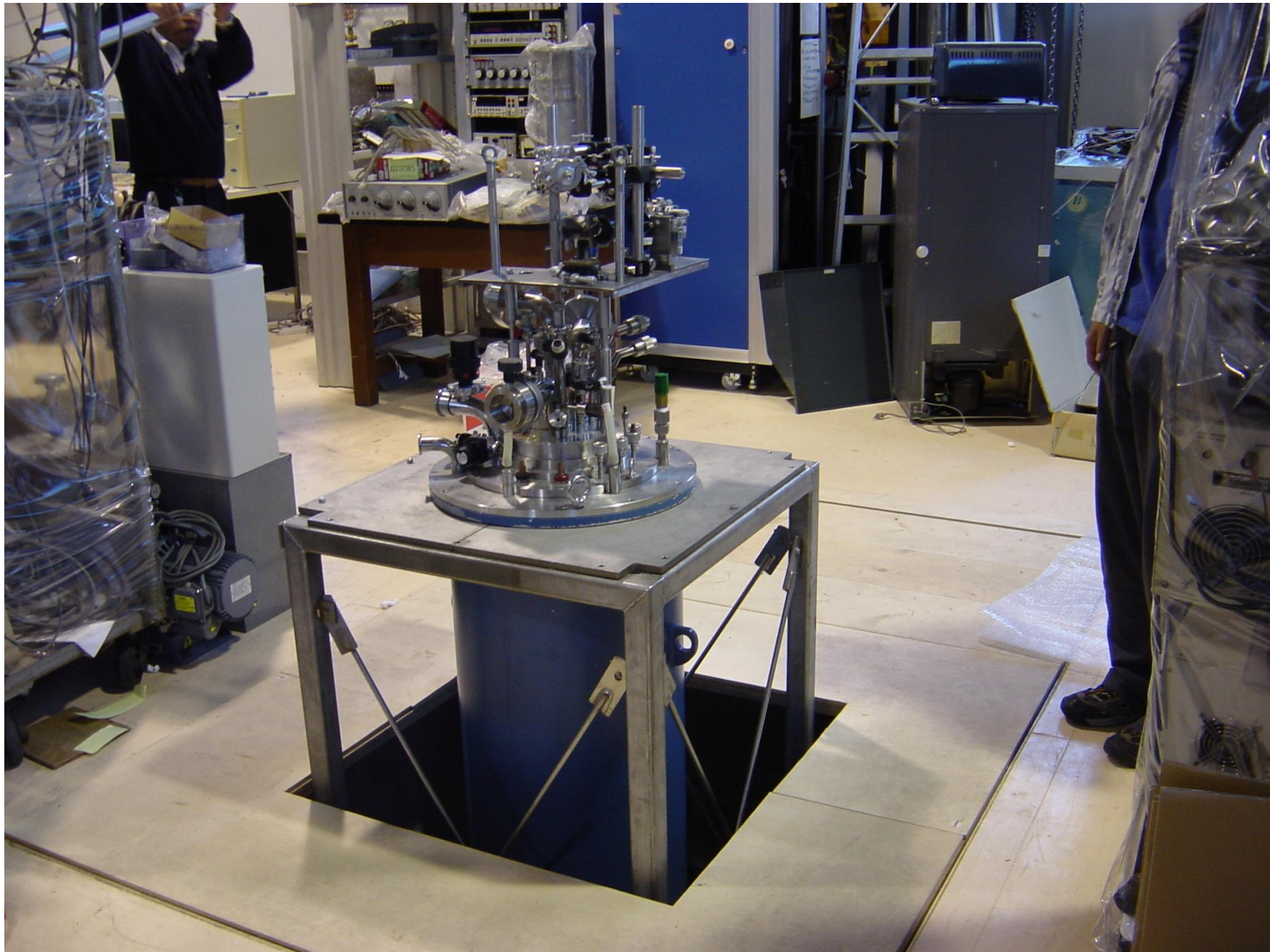
Fabry-Perot
Interferometer



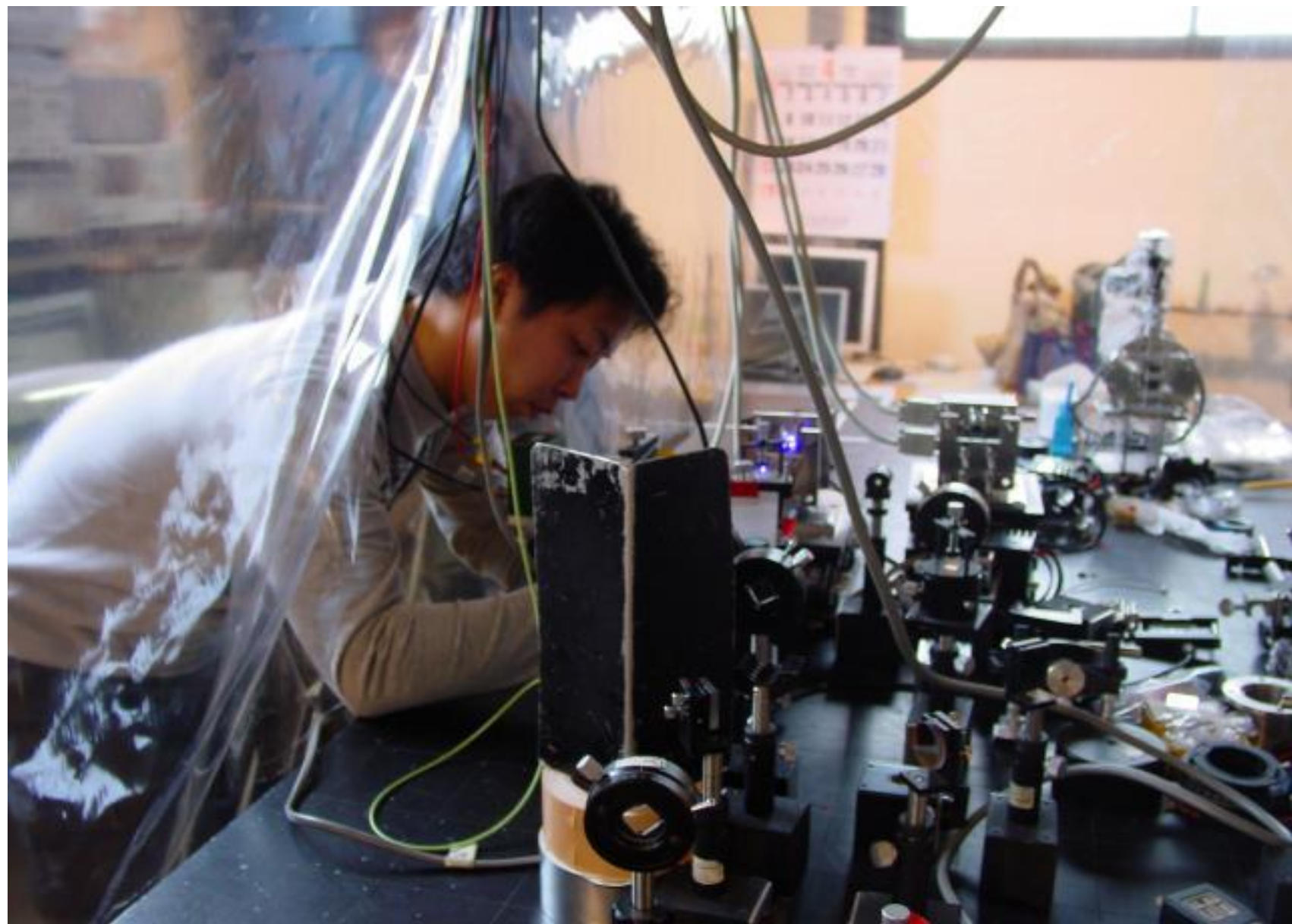
黒体輻射からの光子



M. Tada et al., *Physics Letters A* 349 (2006) 488–493







闇夜の烏

極低温の暗闇に目を凝らして暗黒物質の煌めきを探す

まとめ

- 宇宙暗黒物質は存在しないと困る。
銀河の重力 背景放射のゆらぎ
- 素粒子論からの候補
重い超対称性粒子
軽いアクシオン

京都大学では両方を探索している。

- もし暗黒物質が存在しないと、エーテルと相対論のように物理の革命的発展につながる