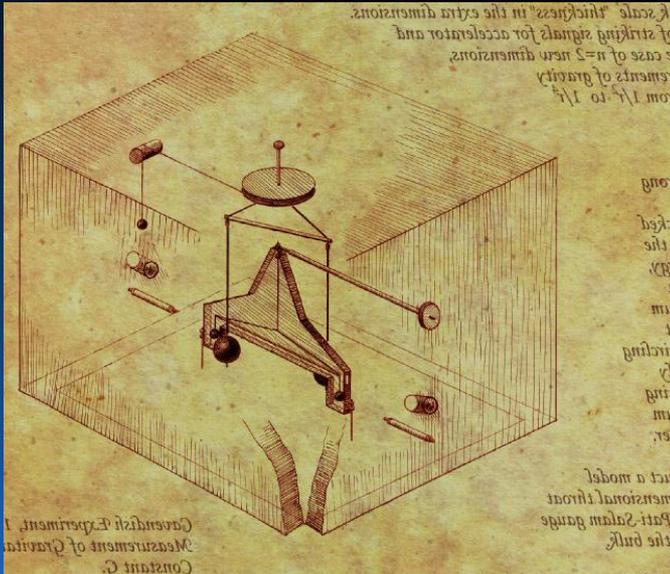


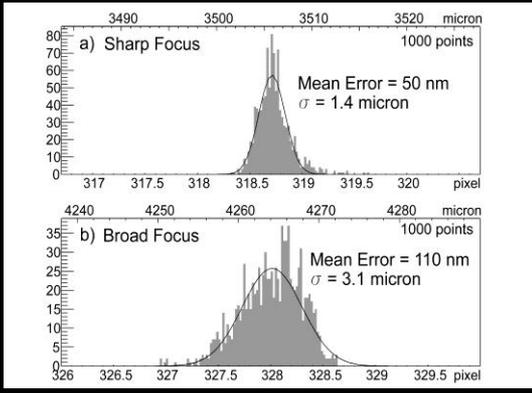
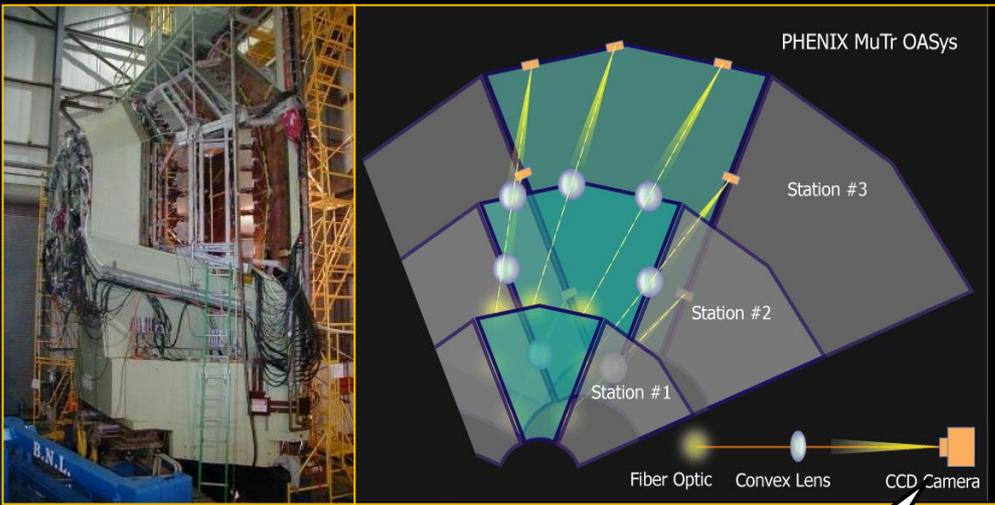
17th ICEPP Symposium

ピコ精度画像処理型変位計を用いた 近距離重力実験



ピコ精度画像処理型変位計

PHENIX-OASys(光学式アラインメントシステム)

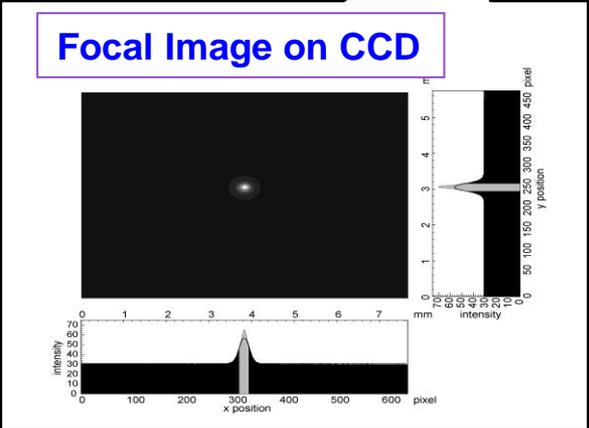


スポット位置測定 of 分解能: 平均値の誤差
~100nm resolution(25um req.)



~100pm 分解能
(Dynamic range 0.5mm)

PHENIX Muon Tracker
 ~ 5m size chambers
 熱膨張などを25 μ m以下の
 精度でモニタリングする必要あり



近距離重力実験へ応用

ピコメートル精度変位計測技術
 (特許:特開P2004-325274A 村田次郎)

余剰次元

重力は他の三つの力より弱い（階層性問題）

重力のみ余剰次元方向へ伝搬

大きな余剰次元モデル(ADD model)
(N. Arkani-Hamwdet et.. al.. PLB429(1998)263)

$$\Lambda \leq r$$

$$V(r) = G_N \frac{mM}{r}$$



$$\Lambda \geq r$$

$$V(r) = G_{4+n} \frac{mM}{r^{1+n}}$$

Λ : 余剰次元の広がり

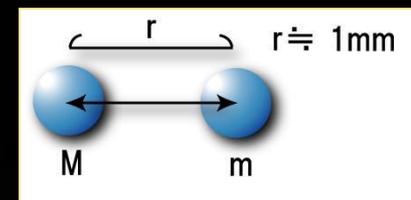
ニュートンの逆二乗則を疑い、高次元空間での
Planck ScaleをEW Scaleに持ってくる

ミリメートル以下でニュートンの逆二乗則からの逸脱が
実験的に観測される可能性

Planck Scale算出

$$m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}}$$

10⁻³⁵m までニュートンの
逆二乗則が正しいと仮定



近距離でニュートンの万有引力の法則が破れる



Table top experiments

近距離で重力が強まることから加速器実験で
ブラックホール生成される



LHC

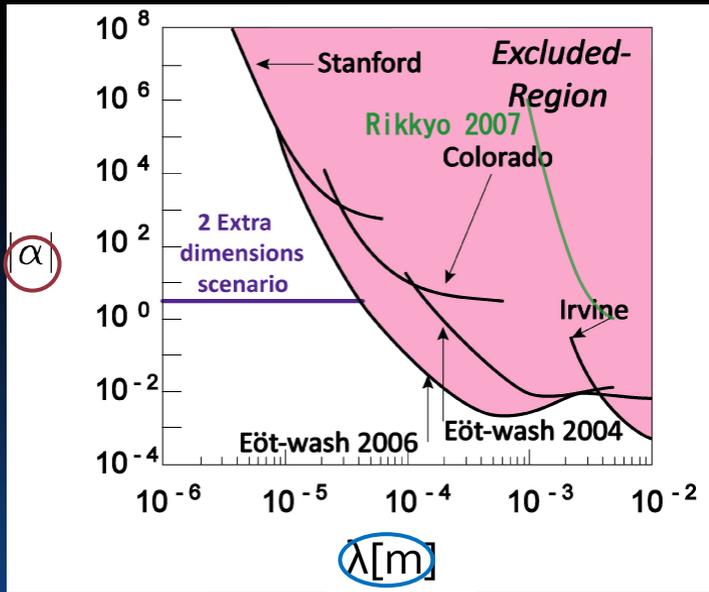
これまでの実験結果

湯川型によるパラメーター化

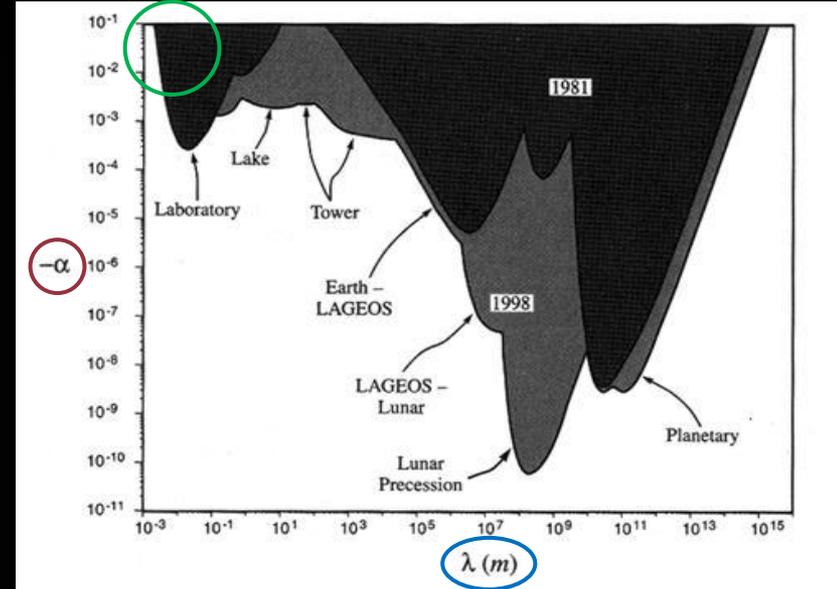
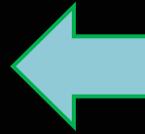
$$V(r) = G \frac{mM}{r} (1 + \alpha e^{-\frac{r}{\lambda}})$$

λ : 余剰次元の広がり
 α : 結合定数

ニュートンの逆二乗則から逸脱する力の制限



近距離



数百ミクロンでは誤差100%

Reference: The Search for Non-Newtonian Gravity
 Ephraim Fischbach Carrick L. Talmadge / 62P

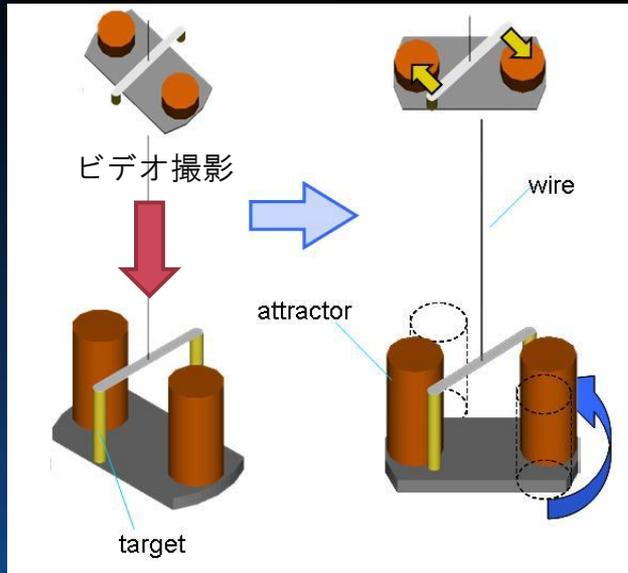
振れ秤による実験

振れ秤の角度変位から重力を測定

$$k\delta\theta = \tau$$

k : 復元定数 $\delta\theta$: 角度変位

角度変位が分かれば重力を求められる。



重力源を近づけると振れ秤が引力方向に振れる。

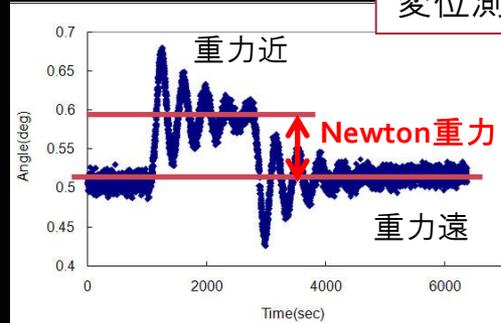
測定原理

変位測定 最も基本的な原理

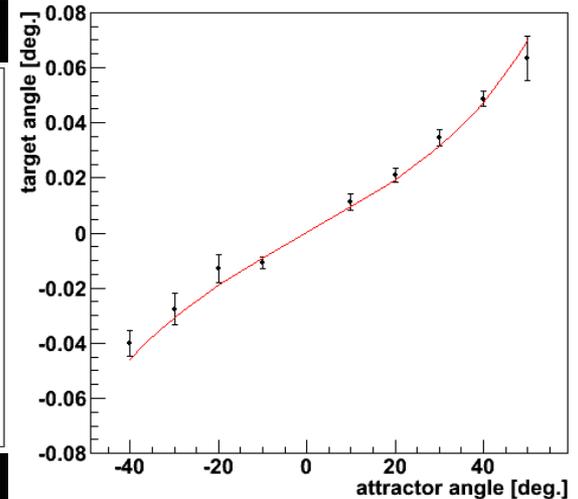
重力源の移動前後での振れ秤の振動中心の変化を測定する

変位測定による結果

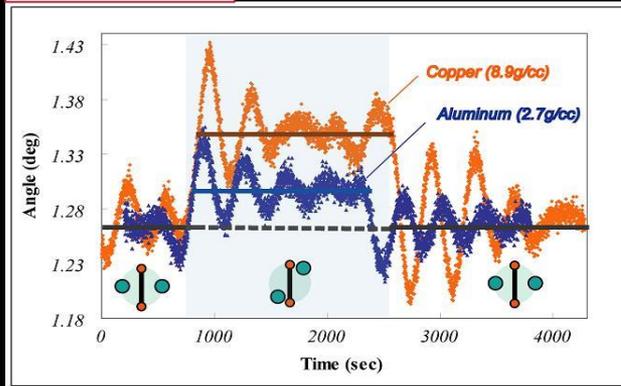
変位測定



ニュートンの逆二乗則



物質依存性



測定原理のつづき

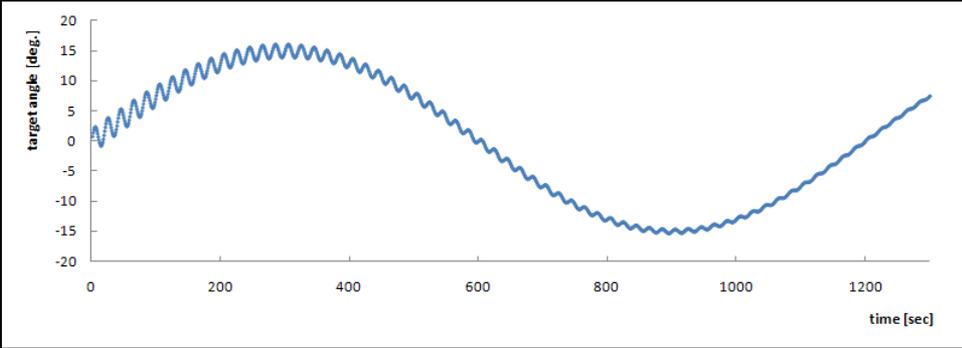
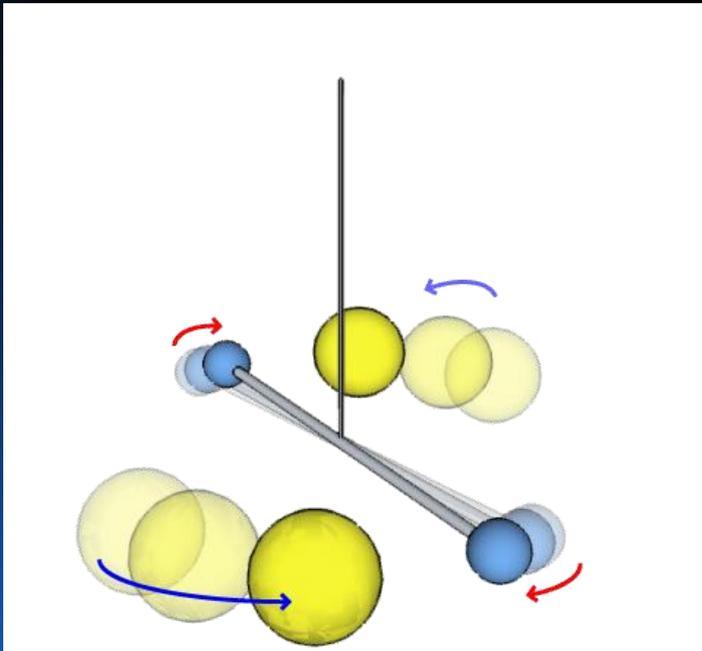
追従測定

重力源をゆっくり移動させる
 重力源の動きに追従する振れ秤の振動中心の変化をみる



振動中心の時間変化を測定する

一度の測定で様々な距離で距離依存性が検証可能



高周波：振れ秤の振れ振動

低周波：重力源の移動によるもの

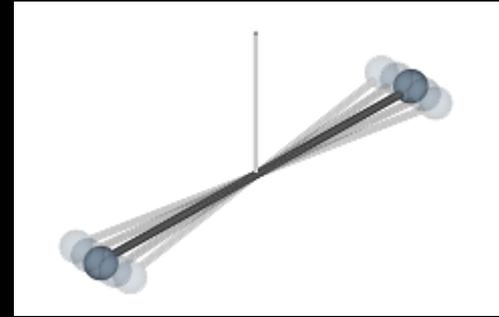
測定原理のつづき

変位測定 & 追従測定
 重力源に衝突すると測定できない。
 衝突しない → 検証可能距離に制限

加速度測定

振り子の振り運動から加速度を求める
 原理的には衝突直前の距離まで測定可能

重力源を動かすことなく振り振動を撮影するだけでいい



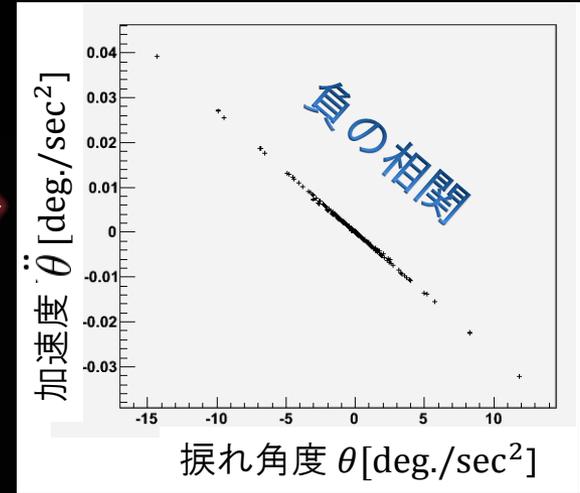
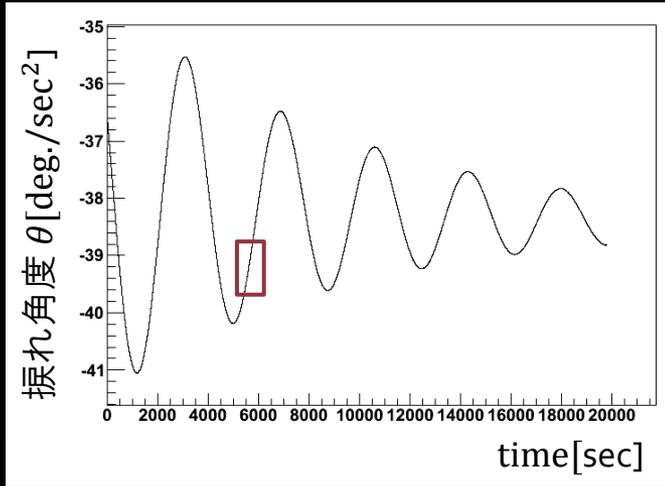
振り子振動 $I\ddot{\theta} = -\kappa\theta$

κ : ねじれ復元定数 I : 慣性モーメント

回転運動の運動方程式

$$I\ddot{\theta}(t) = I \frac{d^2\theta}{dt^2} = \tau$$

I : 慣性モーメント



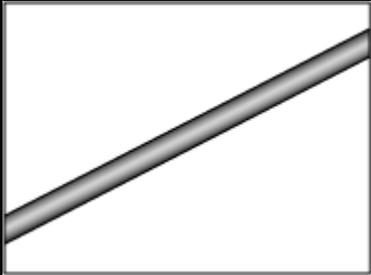
微小領域において2次関数のfitパラメーターとして加速度を求める

$$\theta(t) = \frac{1}{2}at^2 + vt + \theta_0$$

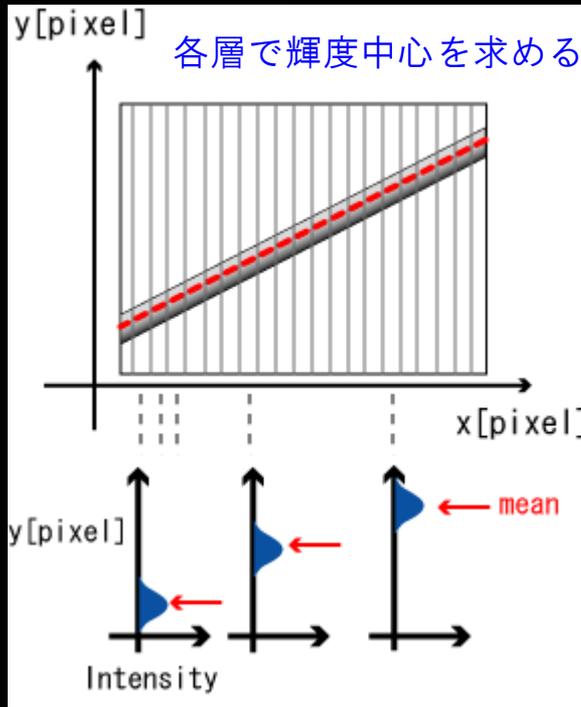
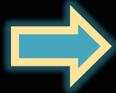
角度変位を求めるには

振り子の動きを上からビデオカメラで撮影し画像解析により輝度情報から角度変位を求める

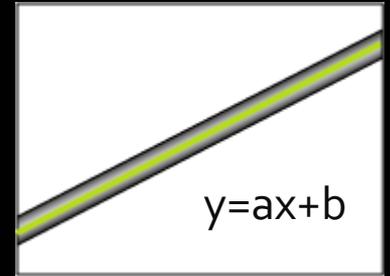
画像解析



静止画



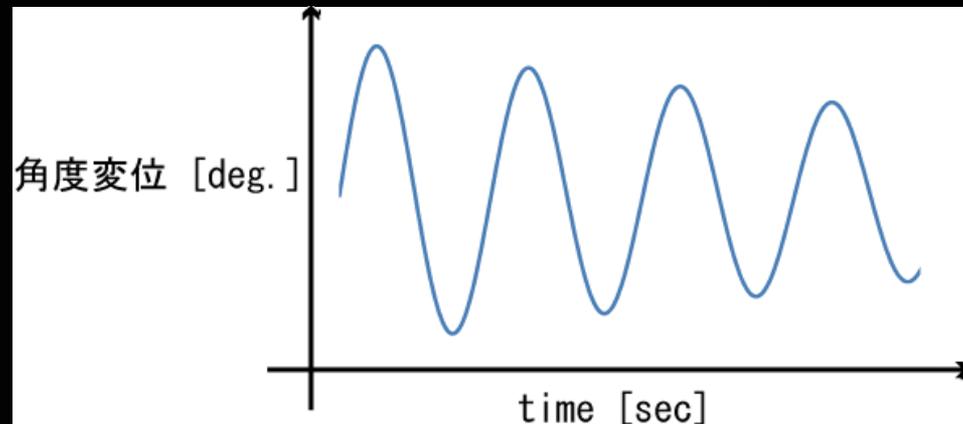
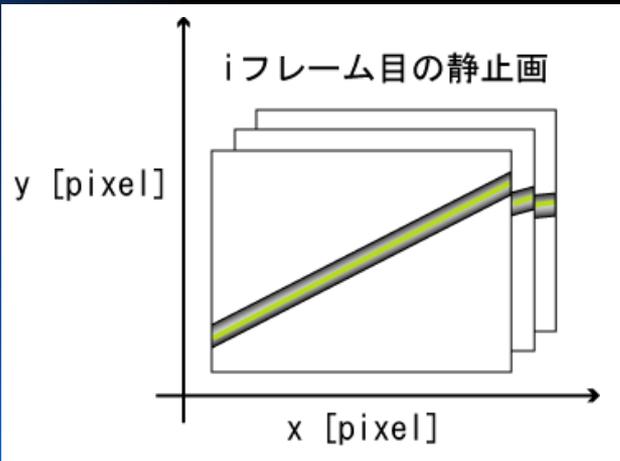
chi square fitting



角度変位を求める

$$\text{mean}(x) = \frac{\sum_y I(y)y}{\sum_y I(y)}$$

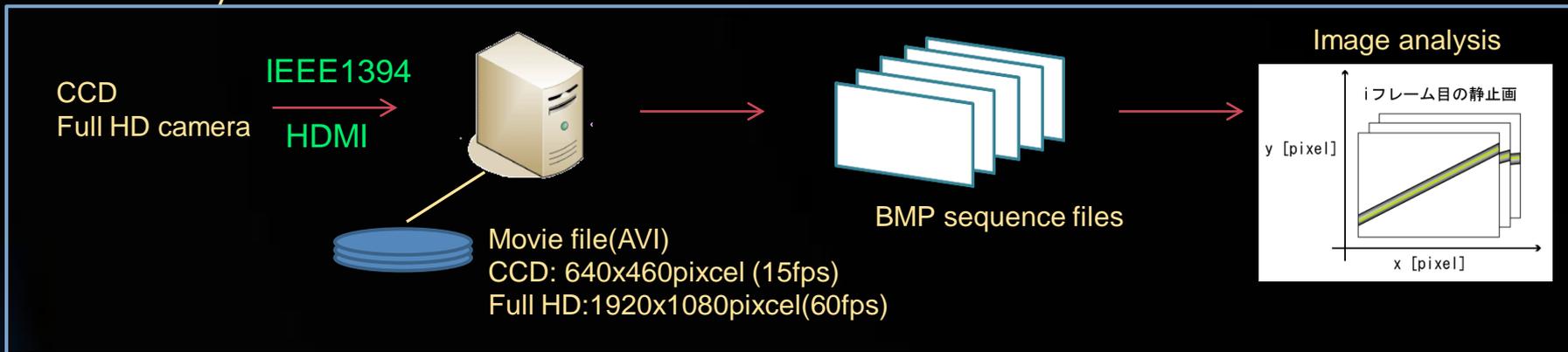
capture image



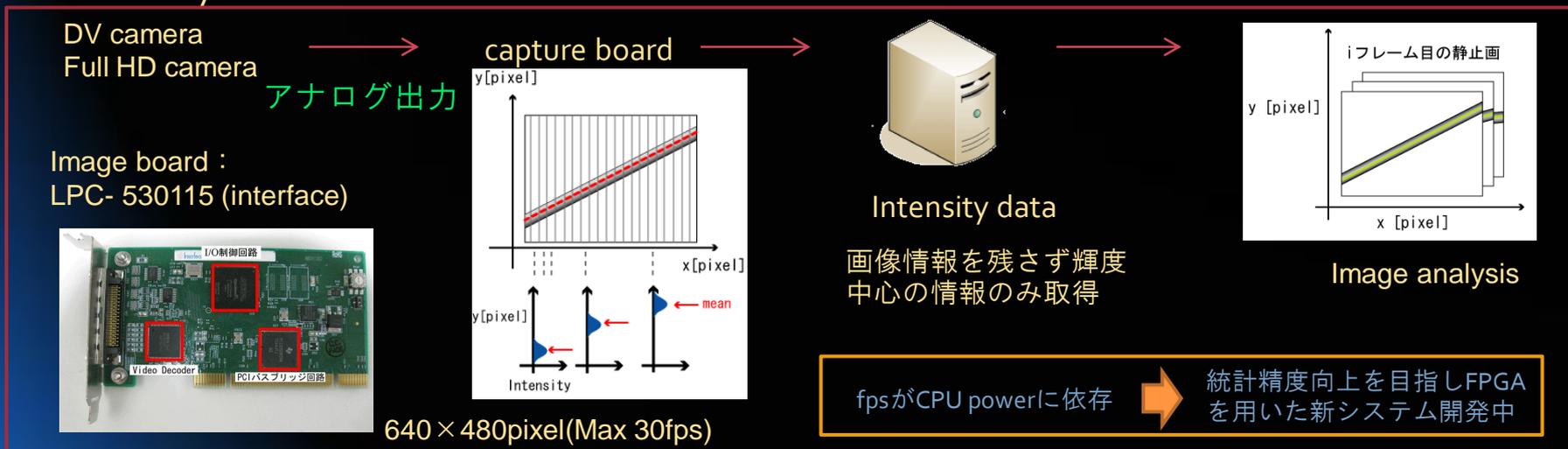
データ取得

カメラにより使い分け

off line analysis



online analysis



Newton SC実験 : 追従測定による距離依存性の検証
 Newton II 実験 : 追従測定による物質依存性の検証
 Newton III実験 : 加速度測定による距離依存性の検証

Newton SC実験

Newton SC 実験

ニュートンの逆二乗則の検証
センチメートル～ミリメートルスケール

元々はKEKサマーチャレンジのために開発した装置を使用

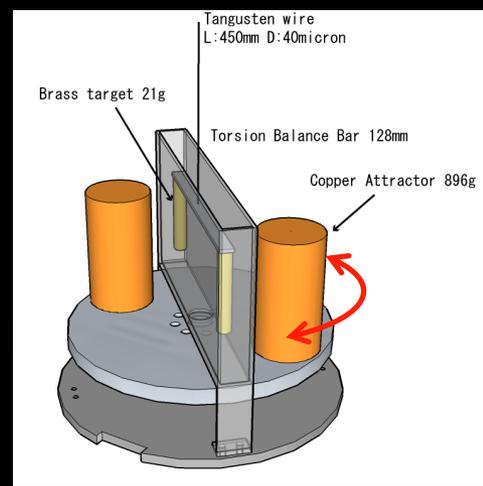
追随測定

重力源の動きに追随する換れ秤の振動中心の変化をみる

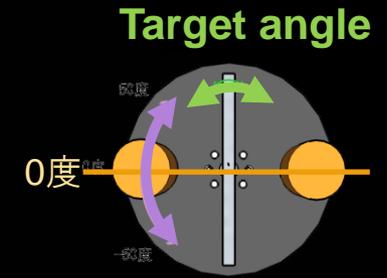


振動中心の**時間変化**を測定する

(時系列データそのものが**距離依存性の検証**になる)

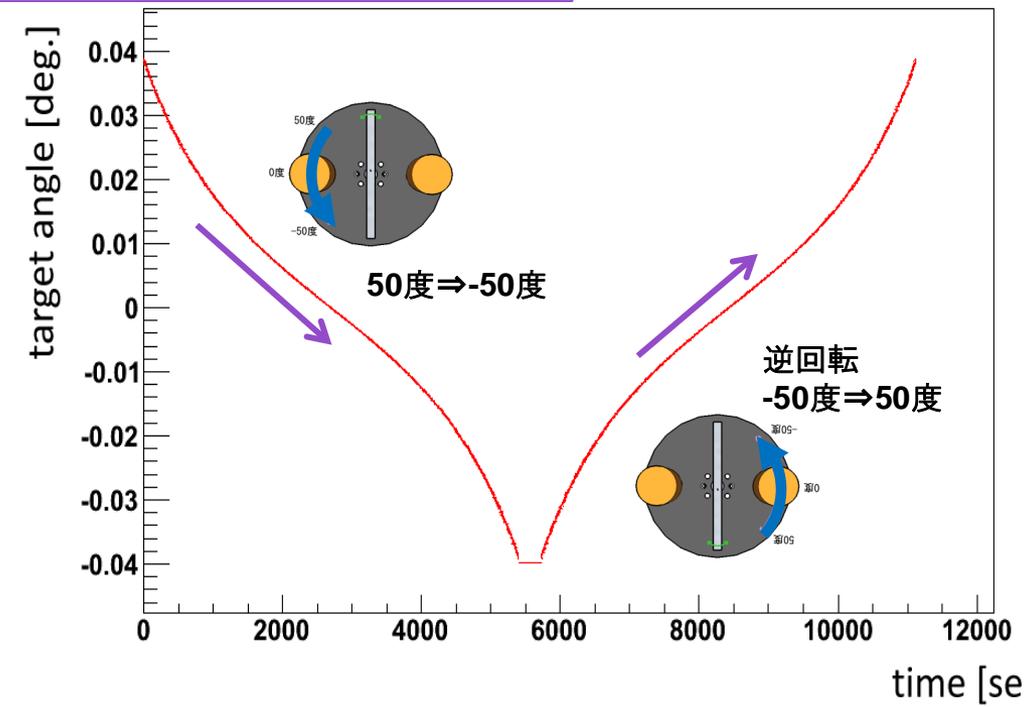


Target : $\phi 8\text{mm}$, L: 50mm 真鍮
Attractor : $\phi 40\text{mm}$, L: 80mm 銅
Wire: $\phi 40\mu\text{m}$, L: 450mm タングステン



ニュートンの法則による計算値

rotational speed : $\sim 0.02\text{deg./sec}$



Newton SC 実験

ニュートンの逆二乗則の検証
センチメートル～ミリメートルスケール

元々はKEKサマーチャレンジのために開発した装置を使用

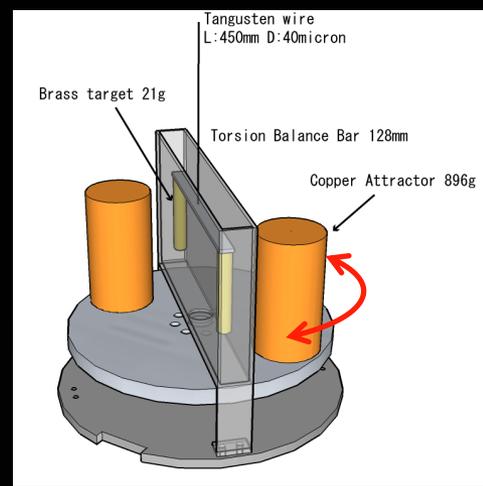
追従測定

重力源の動きに追従する換れ秤の振動中心の変化をみる



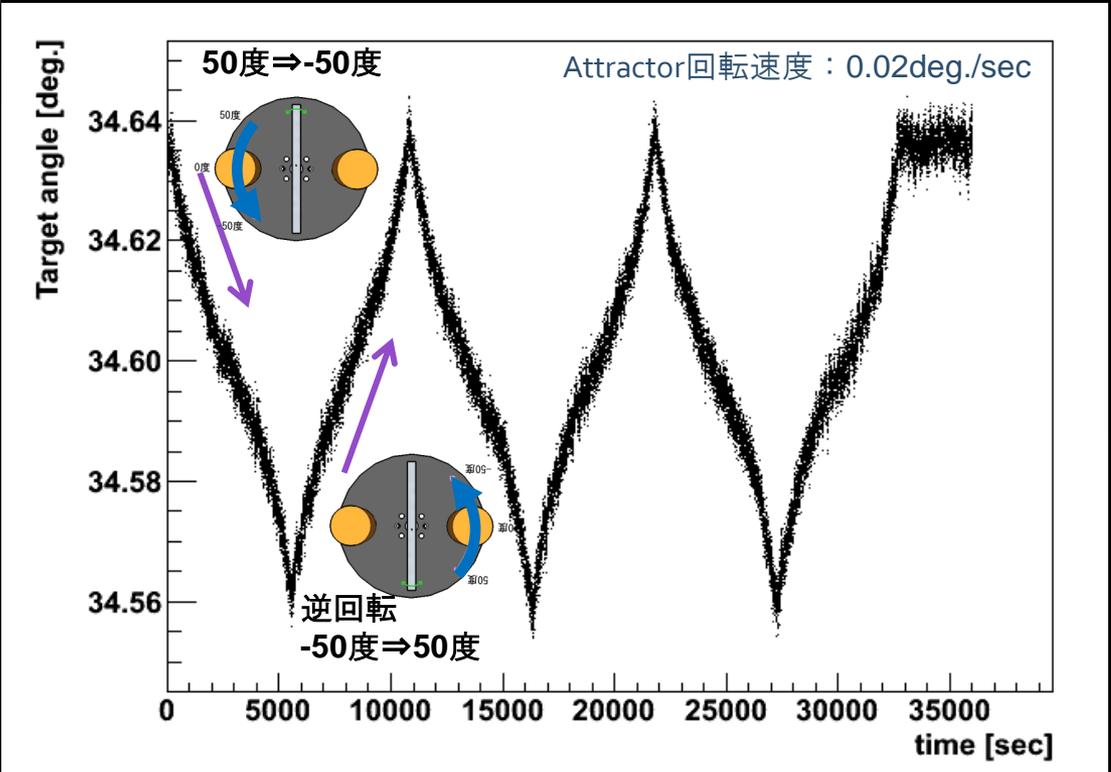
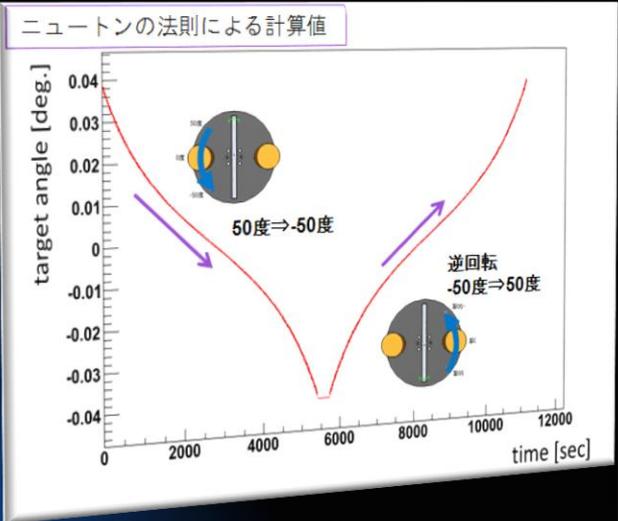
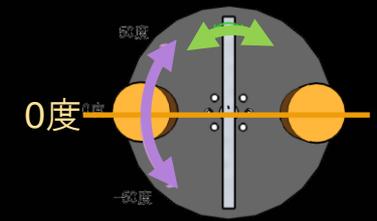
振動中心の**時間変化**を測定する

(時系列データそのものが**距離依存性の検証**になる)



Target : $\phi 8\text{mm}$, L: 50mm 真鍮
Attractor : $\phi 40\text{mm}$, L: 80mm 銅
Wire: $\phi 40\mu\text{m}$, L: 450mm タングステン

Target angle



Newton SC 実験

ニュートンの逆二乗則の検証
センチメートル～ミリメートルスケール

元々はKEKサマーチャレンジのために開発した装置を使用

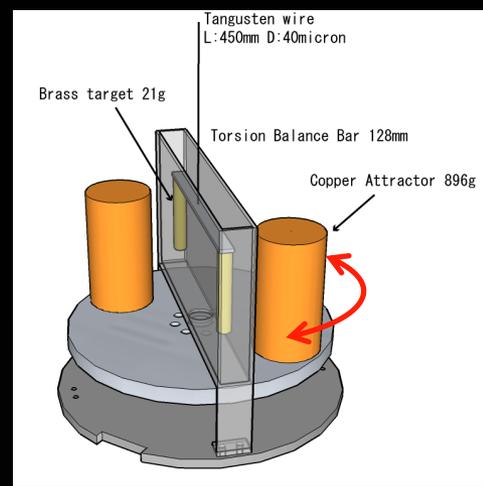
追従測定

重力源の動きに追従する換れ秤の振動中心の変化をみる



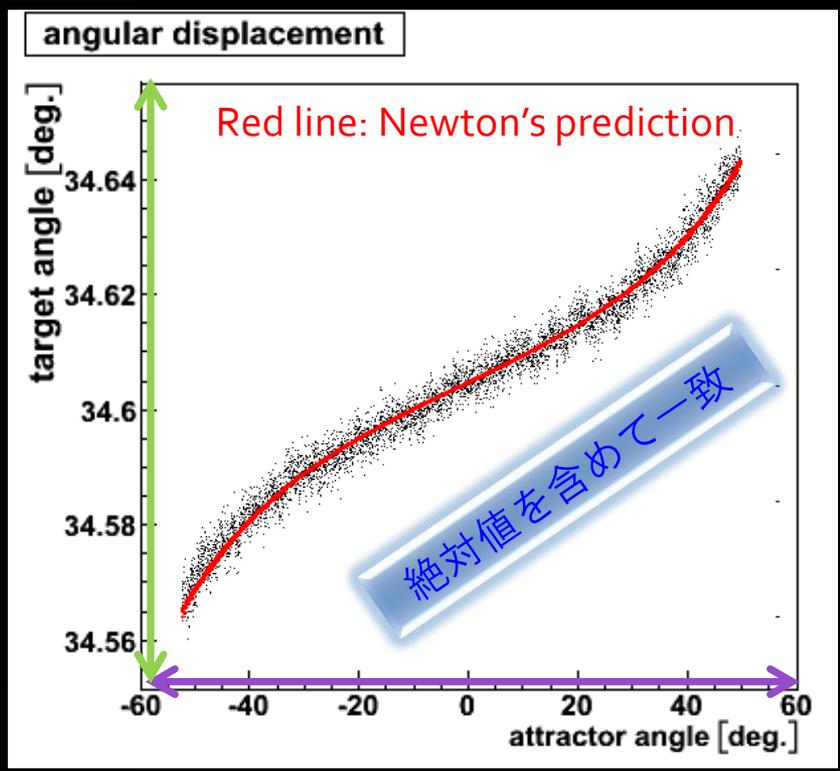
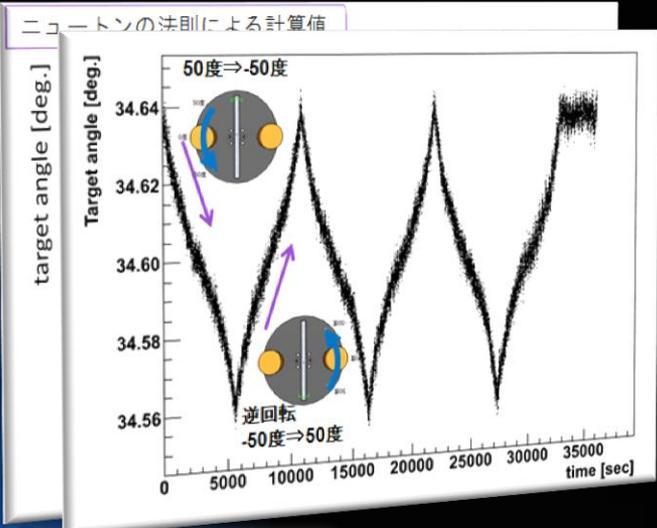
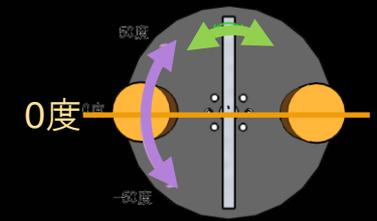
振動中心の**時間変化**を測定する

(時系列データそのものが**距離依存性の検証**になる)



Target : φ8mm, L: 50mm 真鍮
Attractor : φ40mm, L:80mm 銅
Wire: φ40μm, L:450mm タングステン

Target angle



Newton SC 実験

ニュートンの逆二乗則の検証
センチメートル～ミリメートルスケール

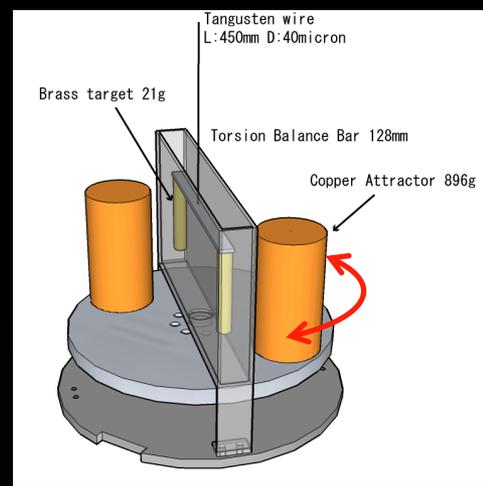
元々はKEKサマーチャレンジのために開発した装置を使用

追従測定

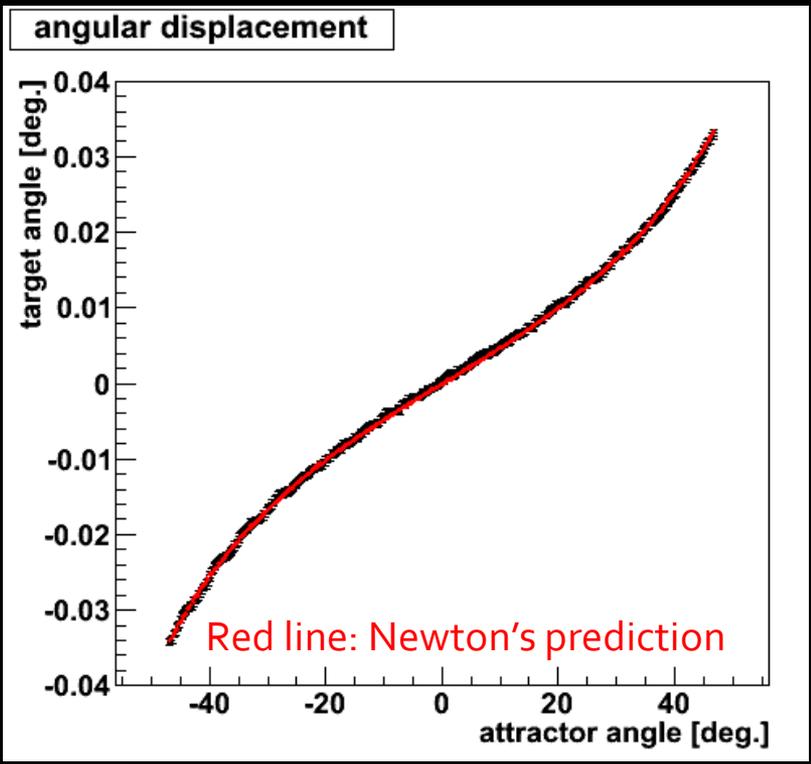
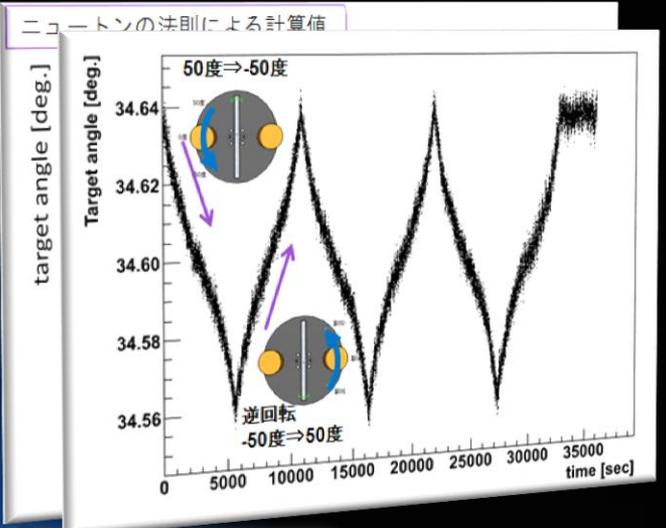
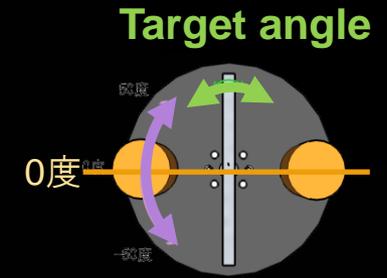
重力源の動きに追従する換れ秤の振動中心の変化をみる



振動中心の**時間変化**を測定する
(時系列データそのものが**距離依存性の検証**になる)



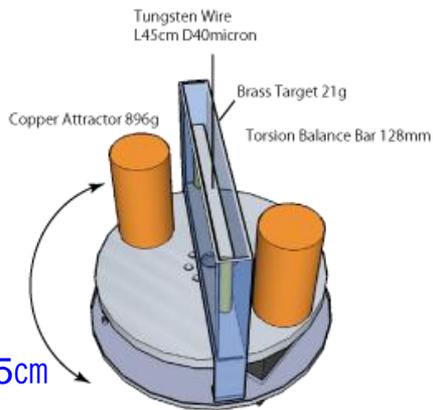
Target : $\phi 8\text{mm}$, L: 50mm 真鍮
Attractor : $\phi 40\text{mm}$, L: 80mm 銅
Wire: $\phi 40\mu\text{m}$, L: 450mm タングステン



Newton SC 実験

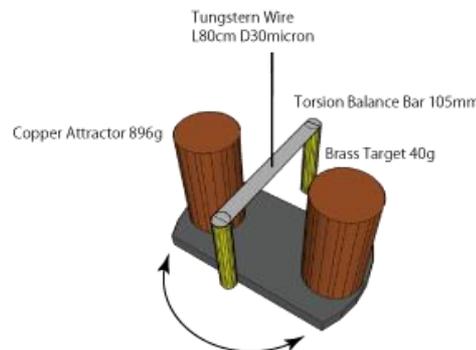
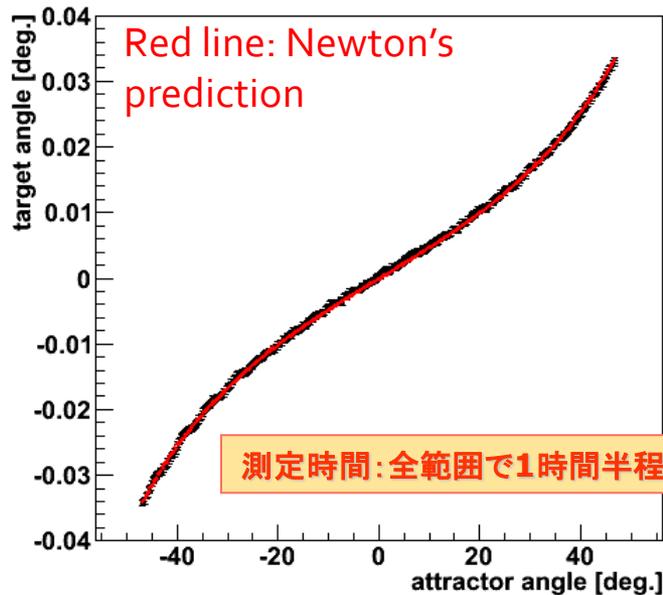
ニュートンの逆二乗則の検証
センチメートル～ミリメートルスケール

Newton I (変位測定) との比較

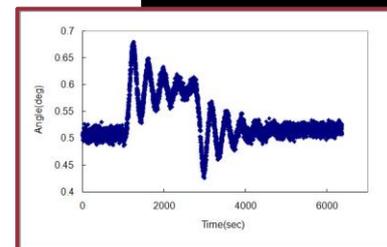
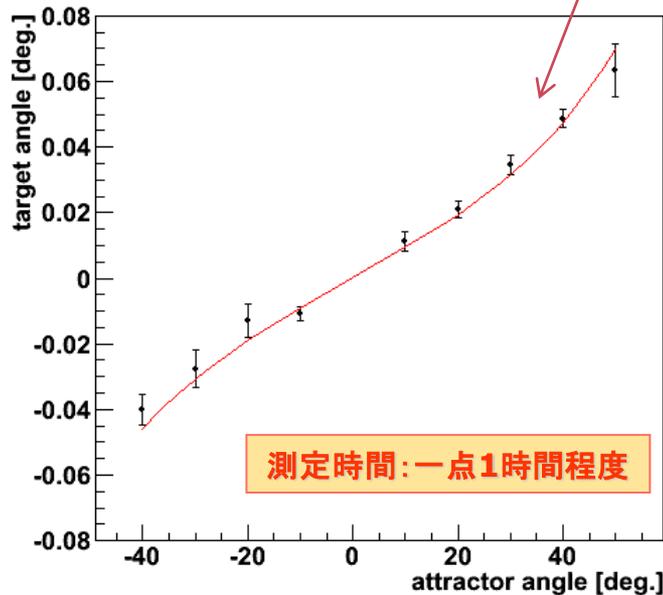


最接近距離~5cm
(中心間距離)

angular displacement



angular displacement



Newton III実験

Newton III 実験

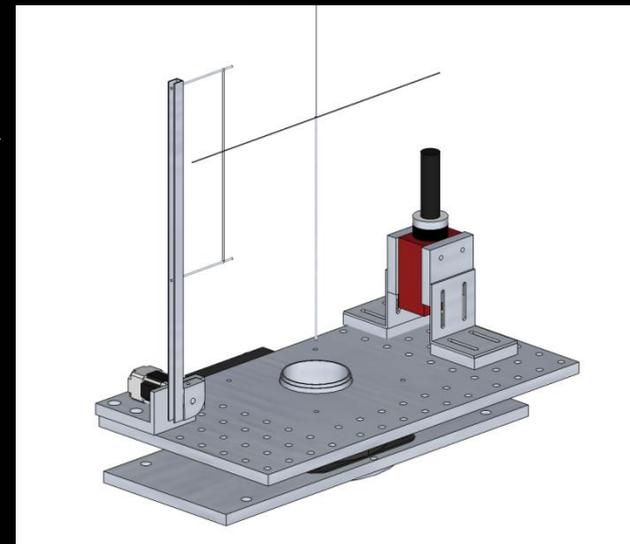
ニュートンの逆二乗則の検証
ミリメートルマイクロン～数百マイクロンスケール

加速度測定

振れ秤の振れ運動から加速度を求める
原理的には衝突直前の距離まで測定可能

振れ運動から加速度を求める

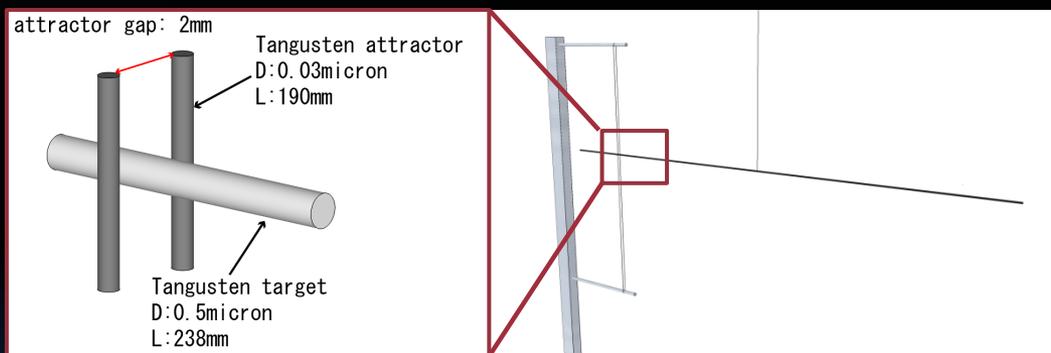
精度を向上のために
内部にCCDを設置し
一部を拡大して測定



NULLタイプ測定

ニュートン重力による効果を小さくし、ニュートン重力から逸脱する力に対して高感度な測定

振れ秤の両端に対称的な重力源を用意し重力の効果を抑制
重力源間中心 : Null条件となる。
中心からずれる : 逆二乗則から逸脱する力が相対的に強くなる



立教大学地下(池袋)→立教大学原子力研究所(横須賀)



Newton III 実験

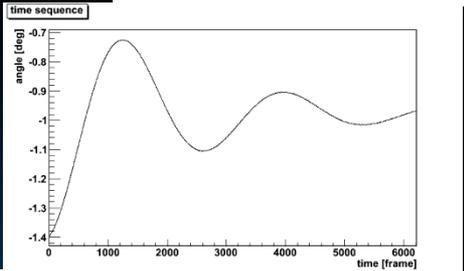
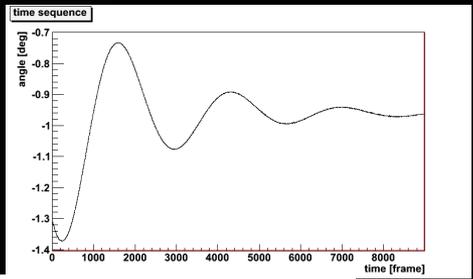
ニュートンの逆二乗則の検証
ミリメートルマイクロン～数百マイクロンスケール

取得データ

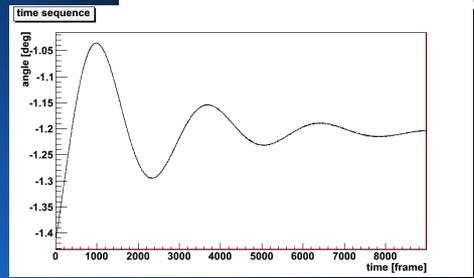
加速度データ = 重力による寄与 + 揺れ振動による寄与
重力源ありのデータから重力源なしのデータを引く

重力源なし(揺れ振動による寄与)

揺れ運動

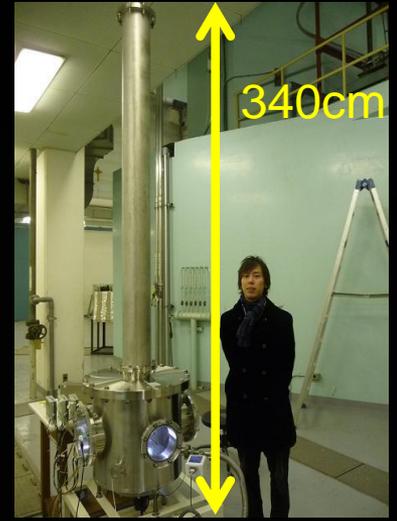
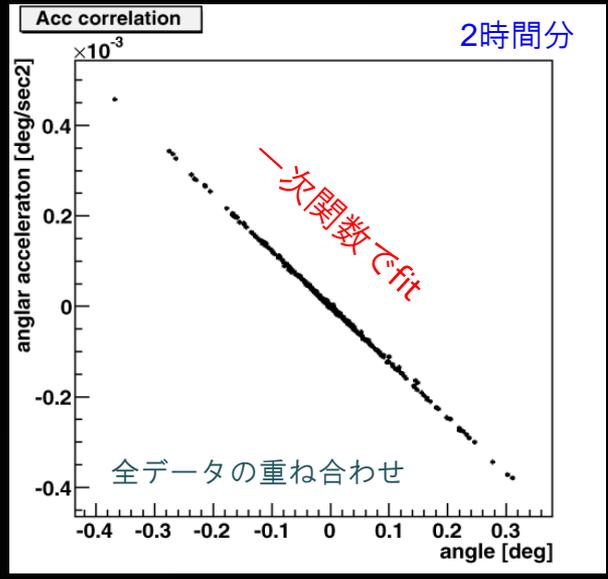
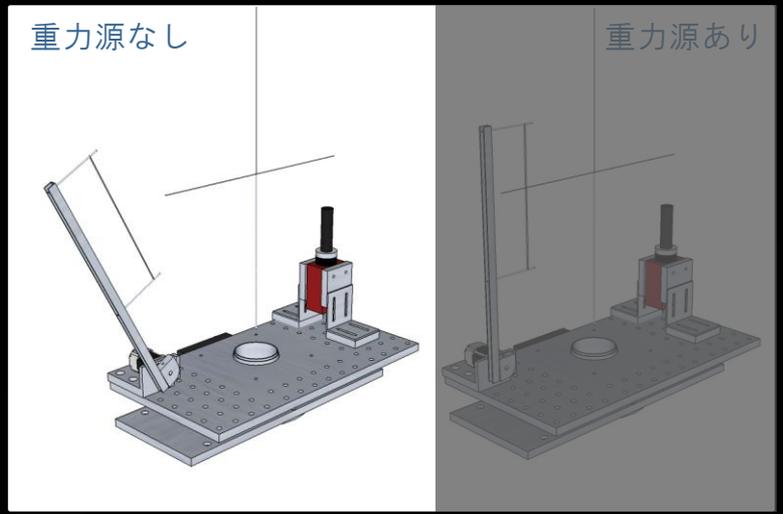


ゼロ点補正を行い
加速度へ変換



揺れ振動による寄与を一次関数として与える

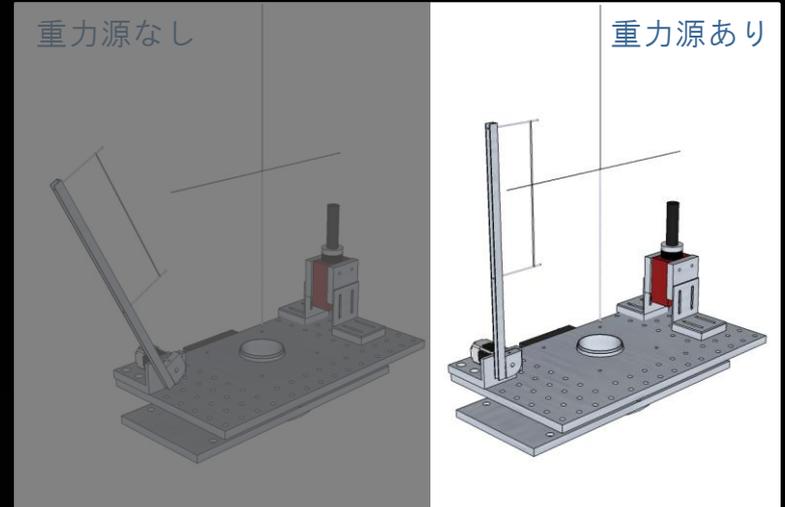
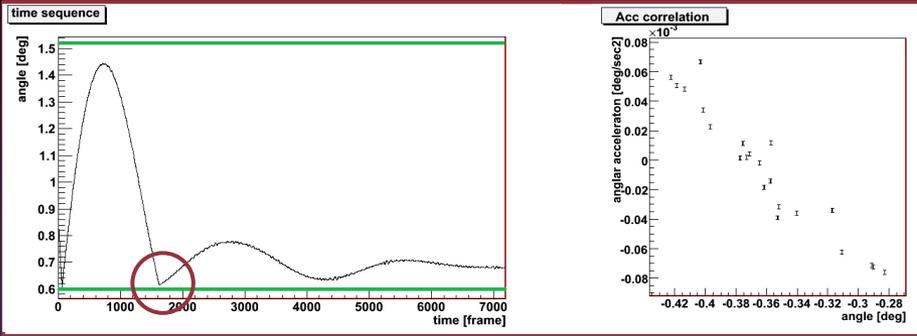
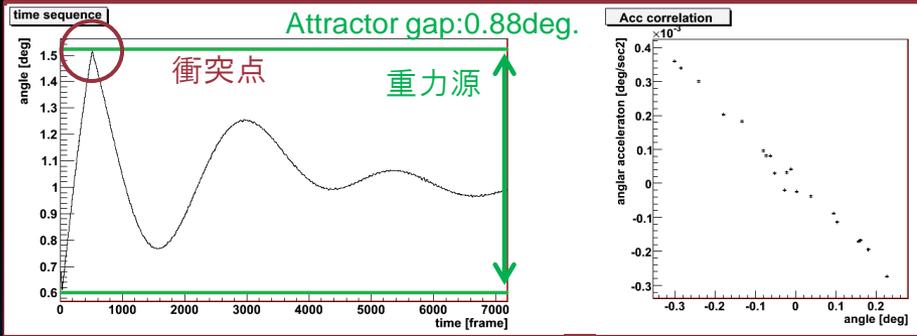
内部にCCDを設置して測定



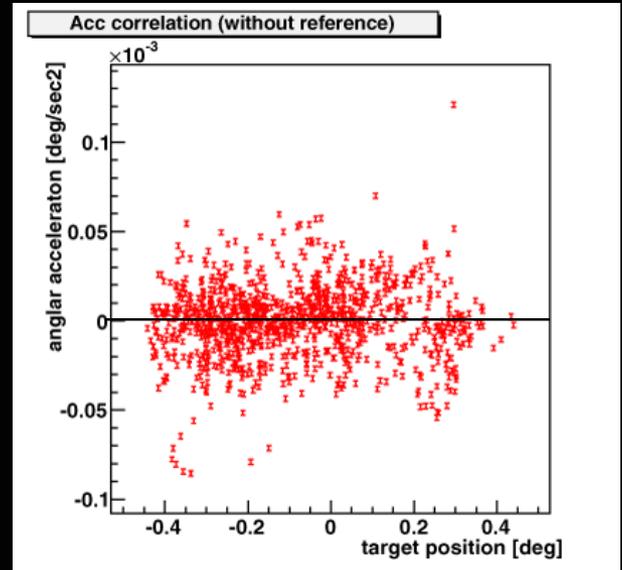
Newton III 実験

ニュートンの逆二乗則の検証
ミリメートルマイクロン～数百マイクロンスケール

重力源あり



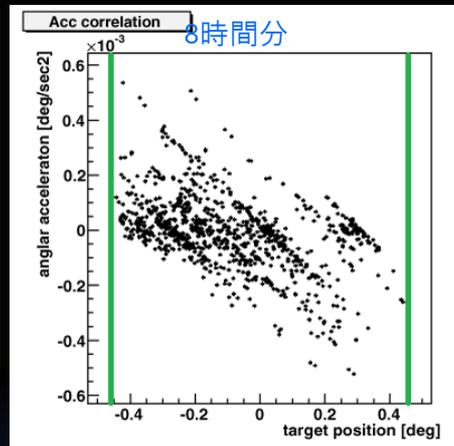
予想シグナル： $\sim 10^{-9}$ [deg./sec²]



多くの距離でデータを得るために重力源の位置を変えて測定



最接近 $\sim 400\mu\text{m}$ で測定(中心間)

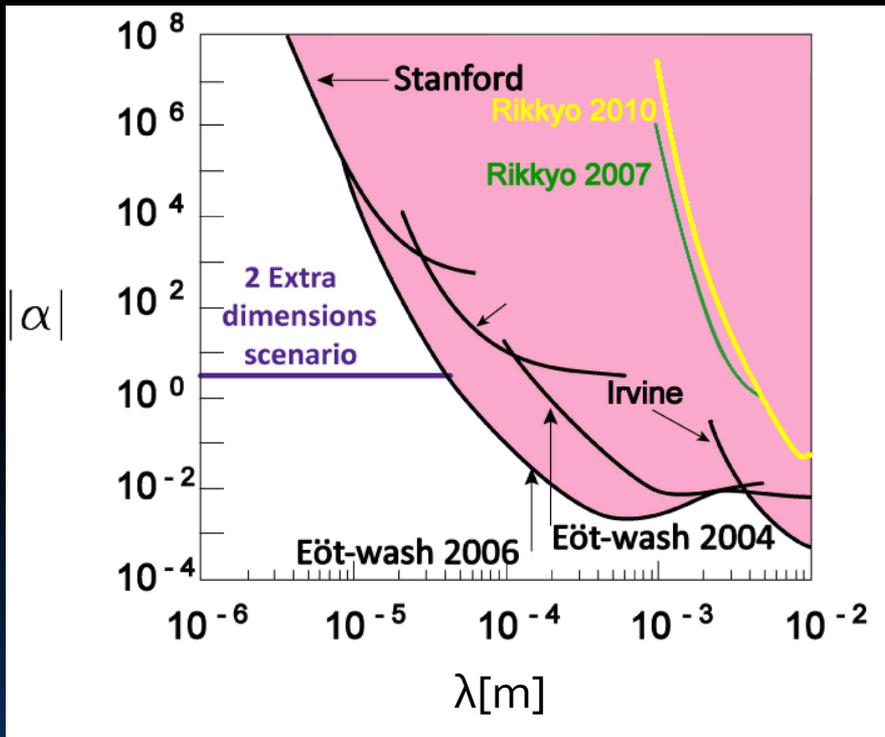


揺れ振動の寄与を引く



距離依存性のまとめ

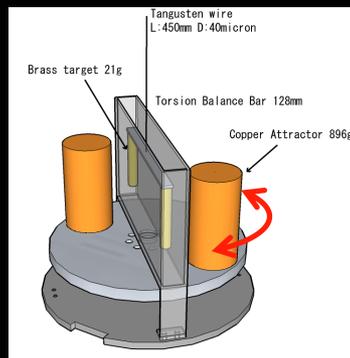
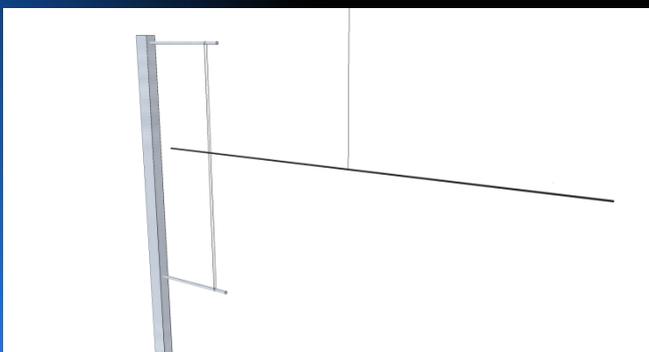
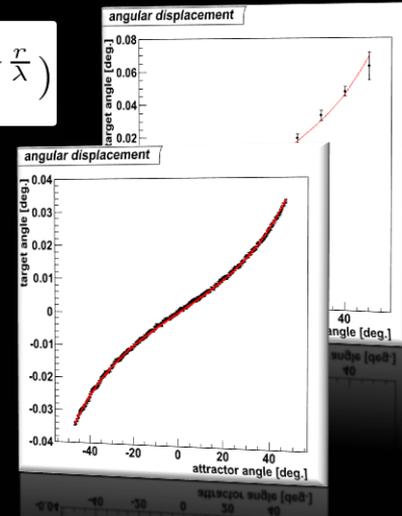
ニュートンの逆二乗則から逸脱する力の制限



$$V(r) = G \frac{mM}{r} (1 + \alpha e^{-\frac{r}{\lambda}})$$

λ : 余剰次元の広がり
 α : 結合定数

Rikkyo 2007 : 変位測定
 Rikkyo 2010 : 追従測定



Newton II実験

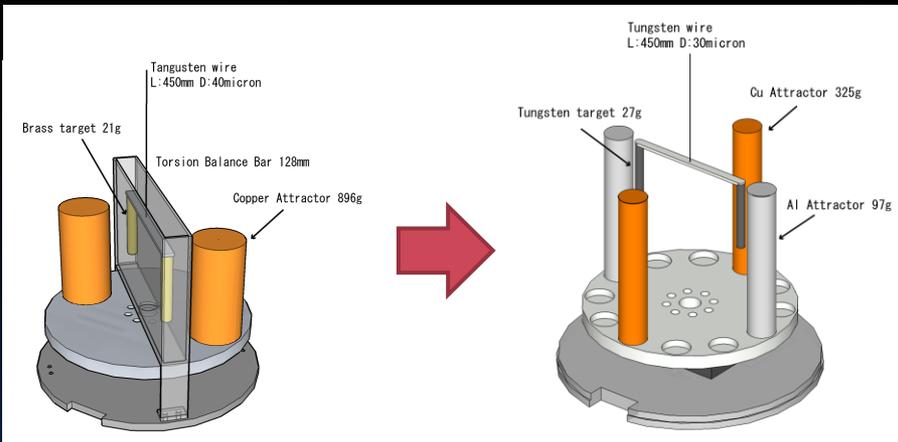
Newton II 実験

万有引力定数の物質依存性の検証 (等価原理の検証)
センチメートル～ミリメートルスケール

番外編

Newton II 特徴

対称性と再現性が向上 (系統誤差を抑制)
複数の物質の寄与を同時に測定できる



背景

弱い等価原理(WEP)

物質の種類やエネルギーの形態によらず重力質量と慣性質量の比が一定。

$$\frac{m_g}{m_I} = 1 + \kappa \quad (\kappa = const.)$$

WEPが破れると物質によって重力加速度が変わる (UFFが破れる)



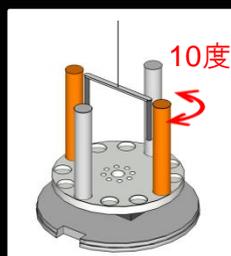
万有引力定数の物質依存性を調べる

これまでの検証実験

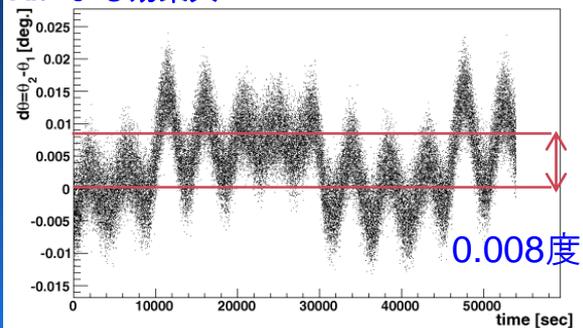
遠距離(10⁹m)では高精度で検証されている
cmスケールでの検証はない



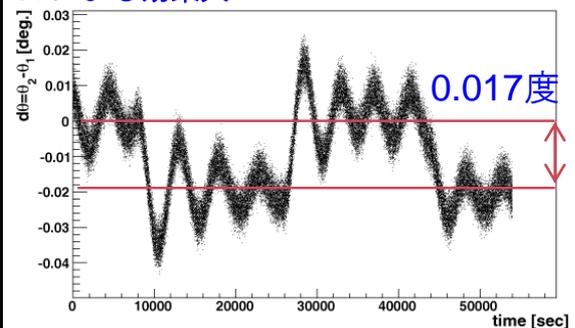
90度回転



Alによる効果大



Cuによる効果大

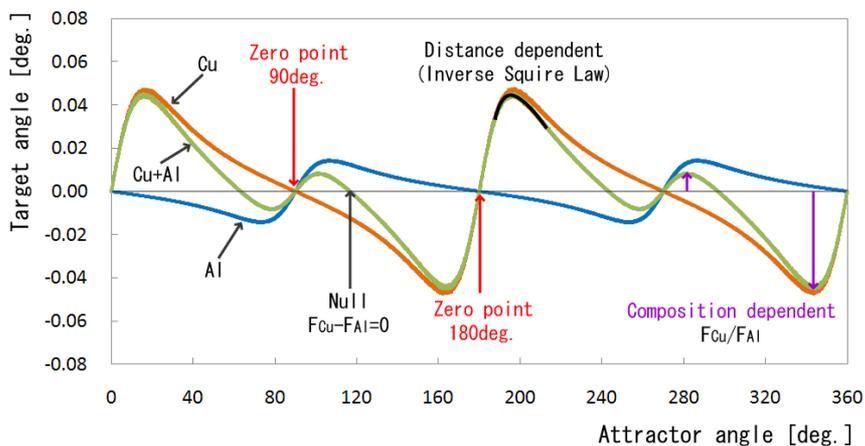


Newton II 実験

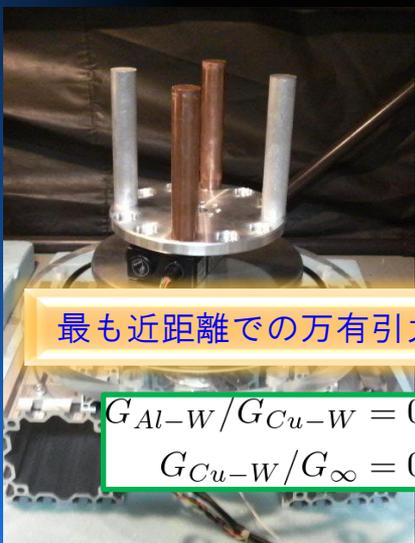
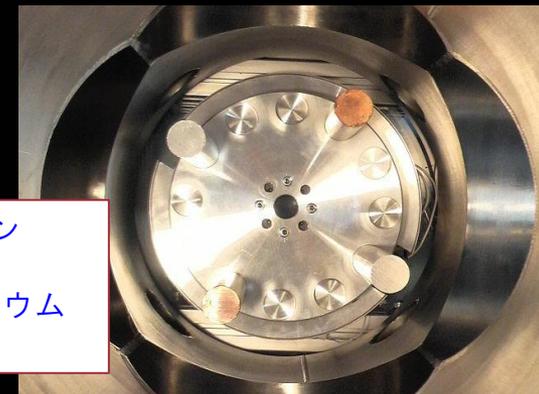
万有引力定数の物質依存性の検証 (等価原理の検証)
センチメートル～マイクロスケール

追従測定による検証

予想シグナル



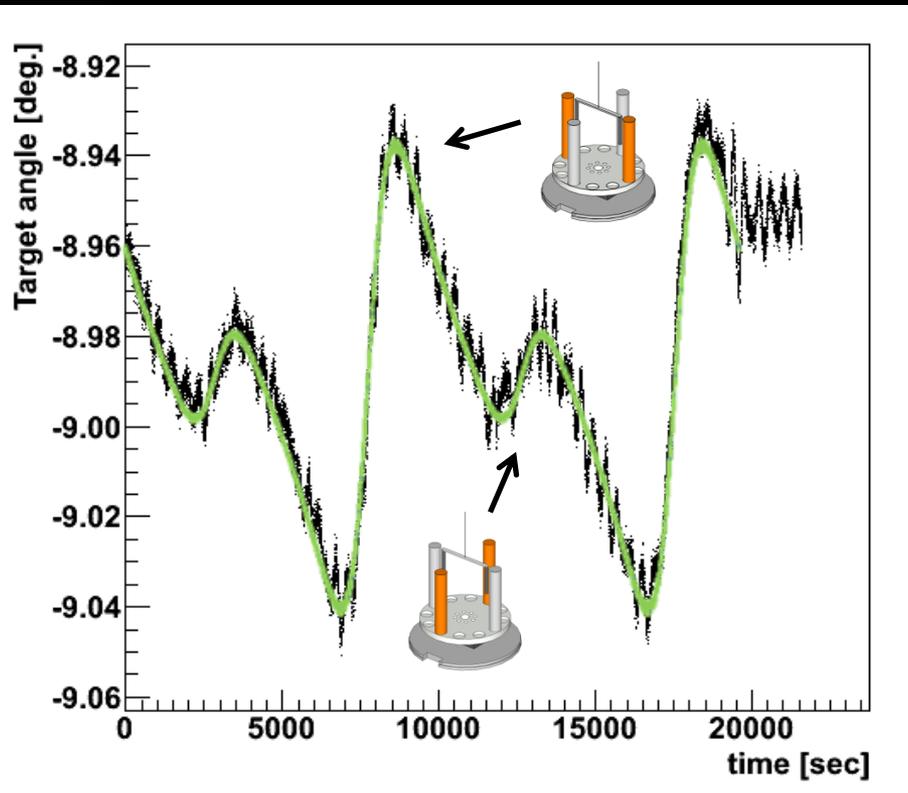
Target: $\phi 6\text{mm}$ タングステン
 Attractor: $\phi 20\text{mm}$ 銅
 Attractor: $\phi 20\text{mm}$ アルミニウム
 Wire: $\phi 30\mu\text{m}$ タングステ



最も近距離での万有引力定数の物質依存性の検証

$$G_{Al-W}/G_{Cu-W} = 0.965 \pm 0.051_{\text{stat}} \pm 0.013_{\text{syst}}$$

$$G_{Cu-W}/G_{\infty} = 0.999 \pm 0.038_{\text{stat}} \pm 0.009_{\text{syst}}$$



conclusion

追従測定による実験

ニュートンの逆二乗則の検証	センチメートルスケールでは5%の精度で検証
等価原理の検証	最も近距離(mmスケール)で万有引力定数の物質依存性の検証に成功

加速度測定による実験

ニュートンの逆二乗則の検証	センチメートル～数百マイクロメートルスケールでニュートンの逆二乗則の検証に成功
---------------	---

今後

ミリメートル～数十マイクロメートルスケールで高精度なニュートンの逆二乗則の検証をめざし装置開発

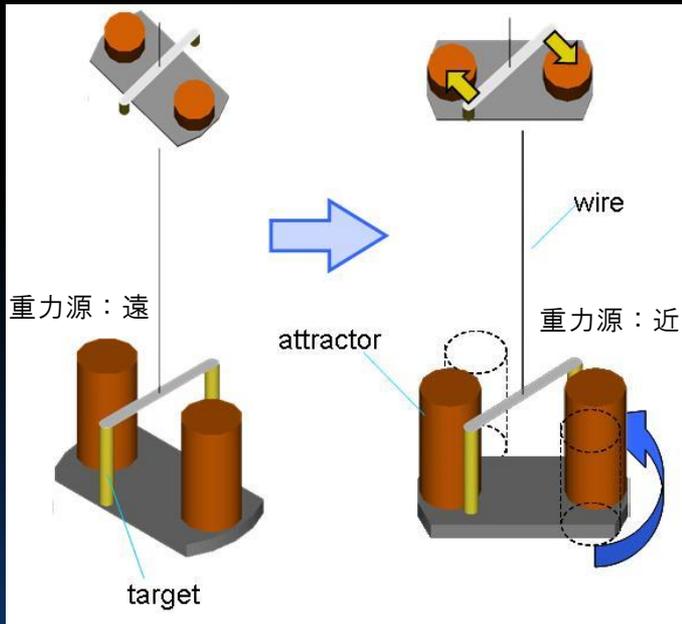


Back up

測定原理

振れ秤を用いた実験

ねじれ秤の**角度変位**（振動中心のずれ）から**重力の大きさ**を測定



重力源を近づけると振れ秤が引力方向に振れる。

角度変位を求めるには

振れ秤の動きを上部からビデオカメラで撮影し
画像解析により輝度情報から角度変位を求める

これまで

変位測定 Newton I, Newton II, Newton SC

重力源の**移動前後**で振れ秤の振動中心の変化をみる
重力源を瞬間的に動かす

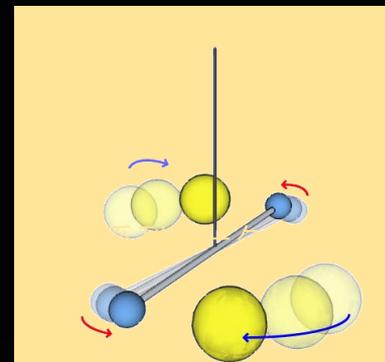
加速度計測 Newton III

振れ秤の運動の様子から加速度を求める
物体が**衝突する直前**まで測定可能
重力源は静止

新たな測定原理

追従測定

振れ秤の振動中心の**時間変化**を測定する
重力源をゆっくり動かす

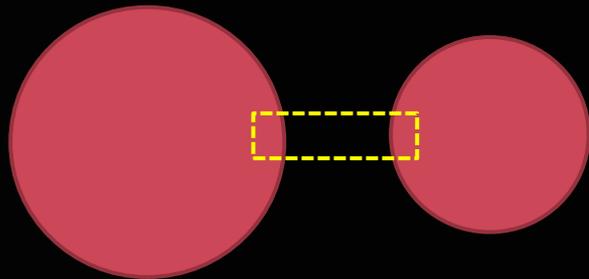


振動中心の**時間変化**
を測定する



が**距離依存性の検証**になる

中心間距離と最接近距離の比が大きいと近距離の感度が悪い



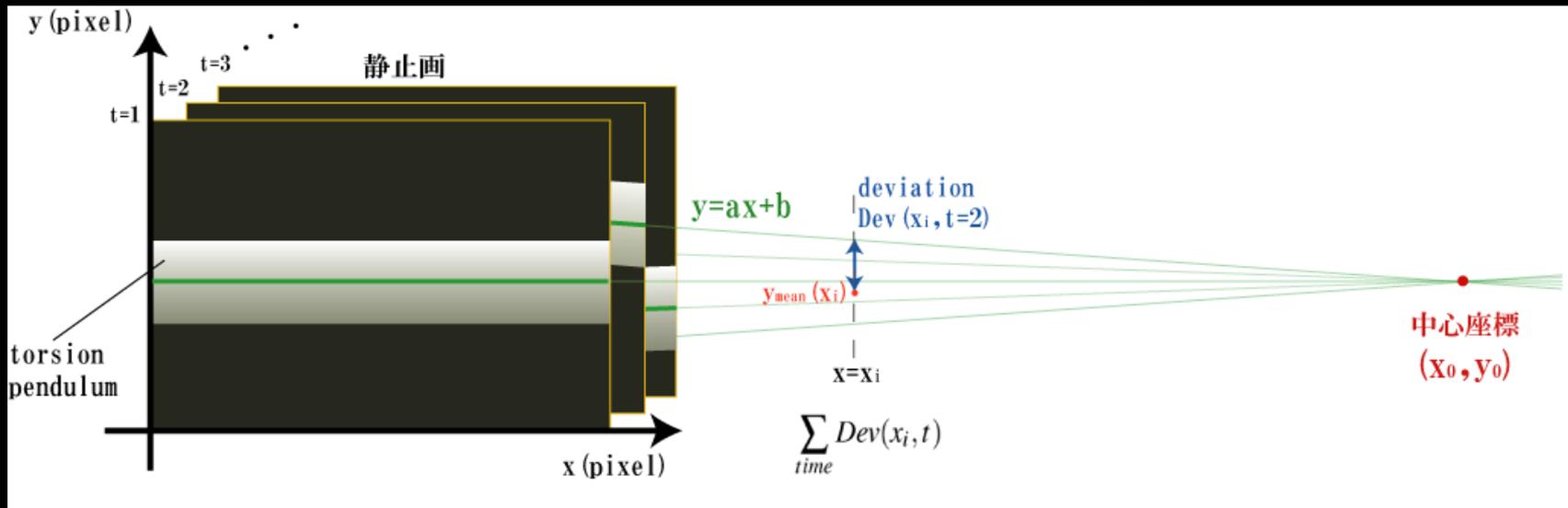
最近距離の寄与よりもほかの部分の寄与が大きいため
近距離に対する感度が悪い



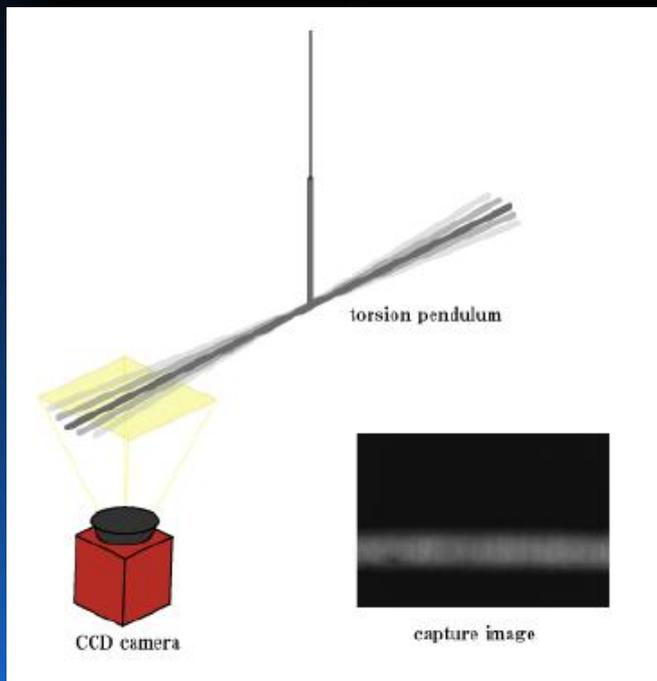
最近距離の寄与よりもほかの部分の寄与の比が近くなるので近距離に対する感度がよくなる

中心間距離と最接近距離が近いと近距離の感度がよくなる

中心間距離と最接近距離の比が1に近いほど(形状が質点に近づくほど)近距離に対して感度がよくなる

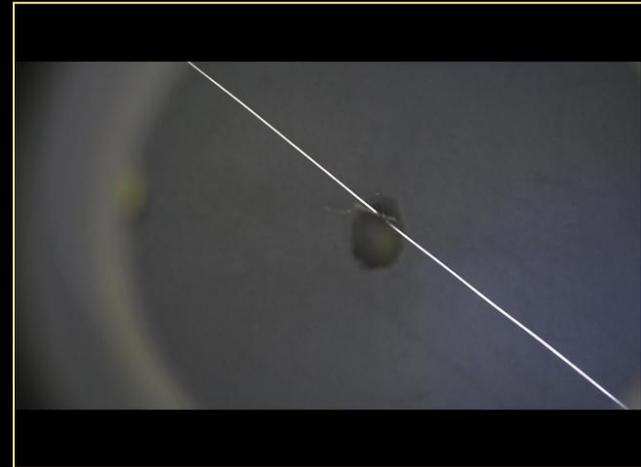


画像情報と画像範囲外にある中心点を参加させて傾きを決める

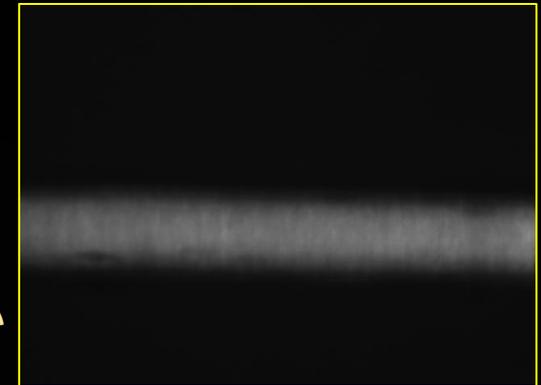
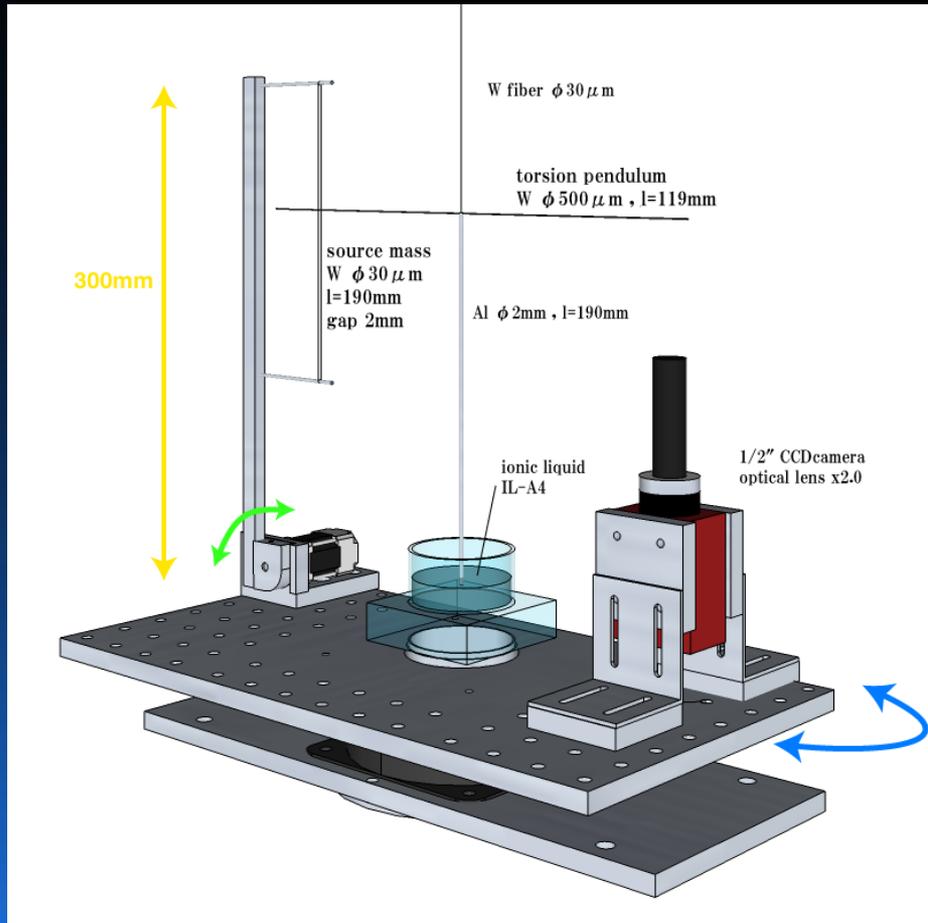


	角度分解能 [deg.]
旧システム	$7.2 \times 10^{-3} \text{deg.}$
新システム	$3.5 \times 10^{-6} \text{deg.}$

振れ秤の全体を測定しているため横揺れに強い → 分解能向上が難しい



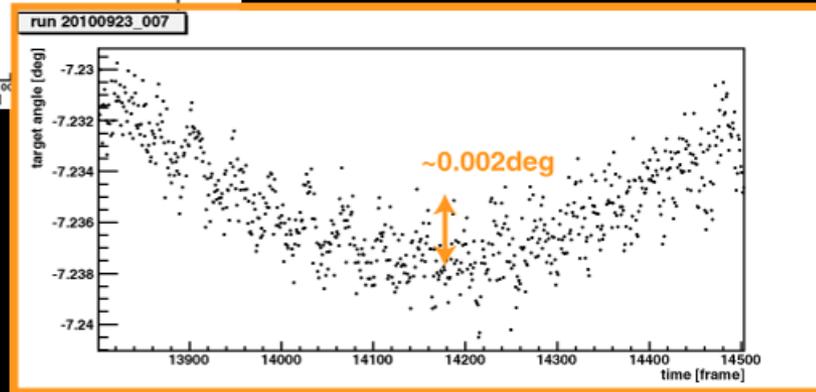
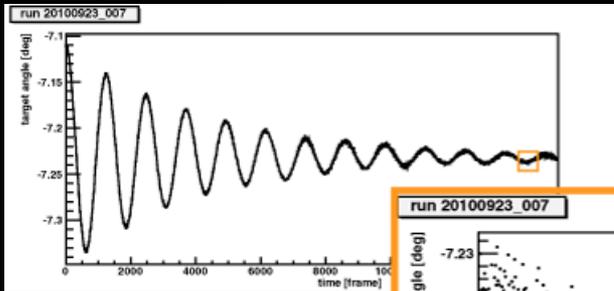
振れ秤の一部を拡大して測定



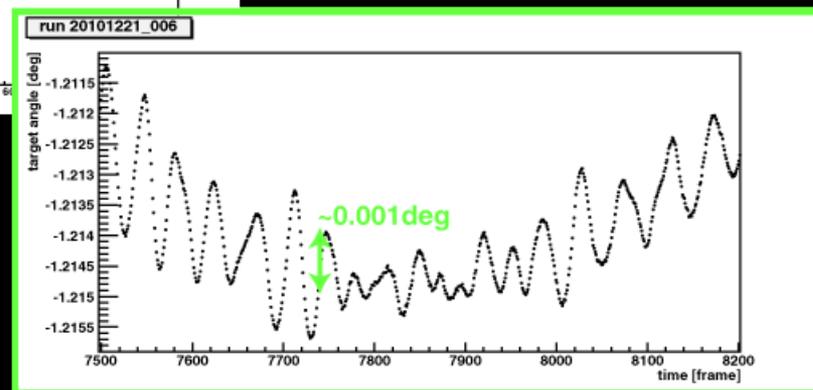
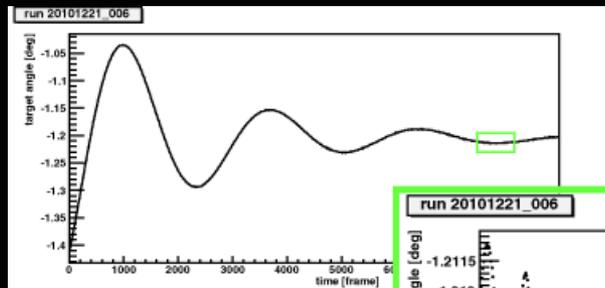
横揺れに弱い

ダンピング

ダンピング前



ダンピング後



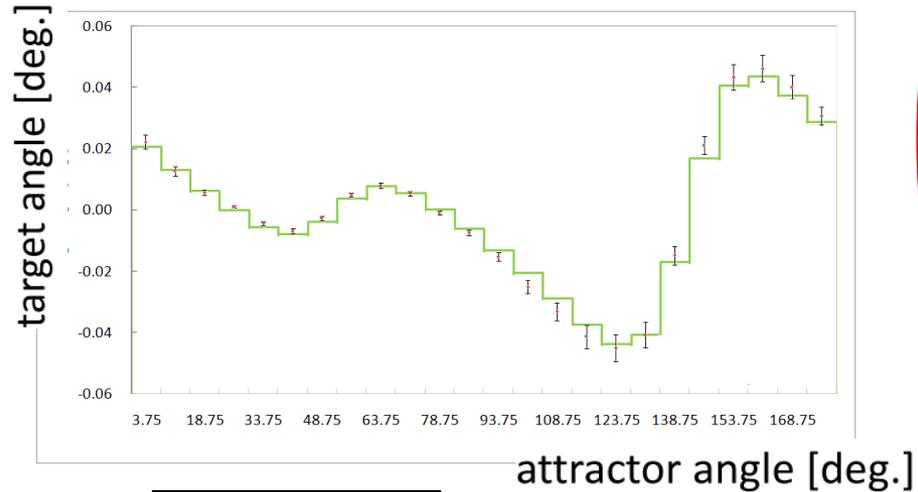
Newton II in SC実験 (物質依存性の検証)

解析

全データ(48時間)



Attractor angle 180度で区切る

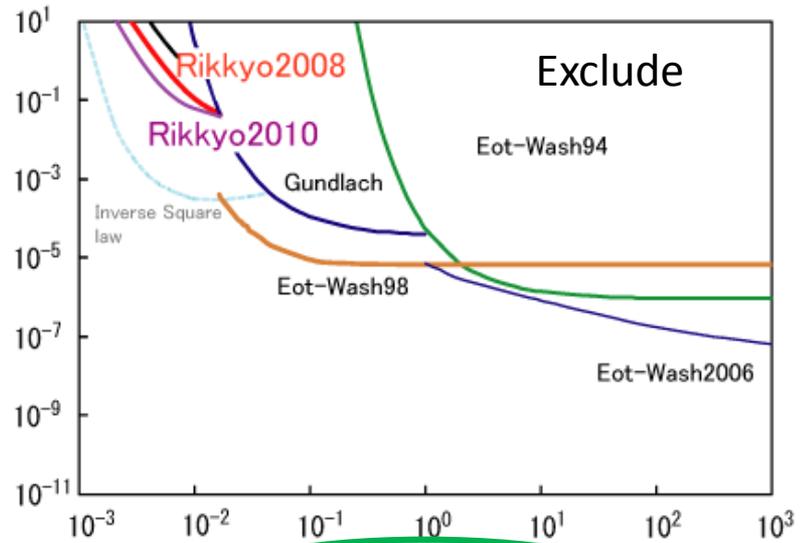


— 予想値
■ 測定値

バリオン数に結合する新たな相互作用の制限

$\xi - \lambda$

バリオン数に結合する項
の結合定数 ξ



力の到達距離 λ [m]

$$V(r) = G \frac{mM}{r} \left(1 + \xi \frac{B_A}{\mu_A} \frac{B_B}{\mu_B} e^{-\frac{r}{\lambda}} \right)$$

motivation

弱い等価原理(WEP)

物質、エネルギーの形態によらず**慣性質量**と**重力質量**の比が一定



自由落下の一様性(UFF)



全ての物質は重力場中で**同じ加速度**を持つ

UFFを調べる



WEPの検証

WEPの実験的検証

遠距離($r \sim 10^7 m$)においては、エトバッシュなどの実験により**10⁻⁹の精度**で検証されている

↳ **地球の重力場、自転による慣性力**の比が物質によらない

近距離($r \sim 10 mm$)においては2006年立教大村田研で初めて検証

↳ 近距離重力の測定による万有引力定数の物質依存性の検証

万有引力定数の物質依存性

$$\frac{G_{N_{AC}}}{G_{N_{BC}}} (\text{近距離}) \stackrel{?}{=} \frac{G_{N_{A-Earth}}}{G_{N_{B-Earth}}} (\text{遠距離}) = 1$$

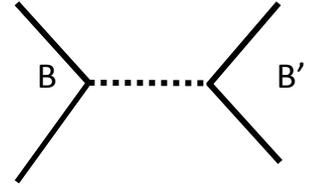
近距離でも万有引力定数は物質によらないか？

WEPが破れるモデル

... バリオン数に結合する相互作用 (Lee and Yang Phys. Rev.98(1955))

「バリオン数保存則」の存在理由を与えるため

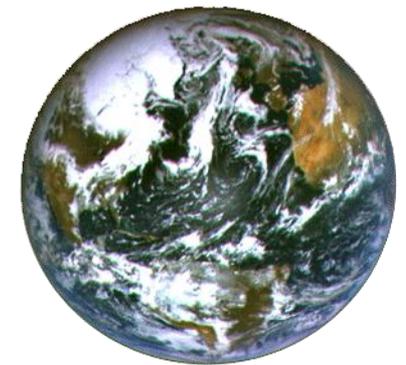
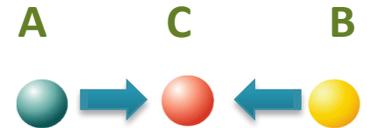
$$F_{N+B} = G_N \frac{m_i m_j}{r^2} \left(1 - \xi \frac{B_i B_j}{\mu_i \mu_j} e^{-r/\lambda} \right) \quad (\text{湯川型})$$



物質によって重力加速度が変わる(UFFが破れる)



物質依存性を調べればよい



▶ 従来の解析システム

デジタルビデオカメラで動画撮影

↓
オフライン解析

1fpsで動画を静止画に変換



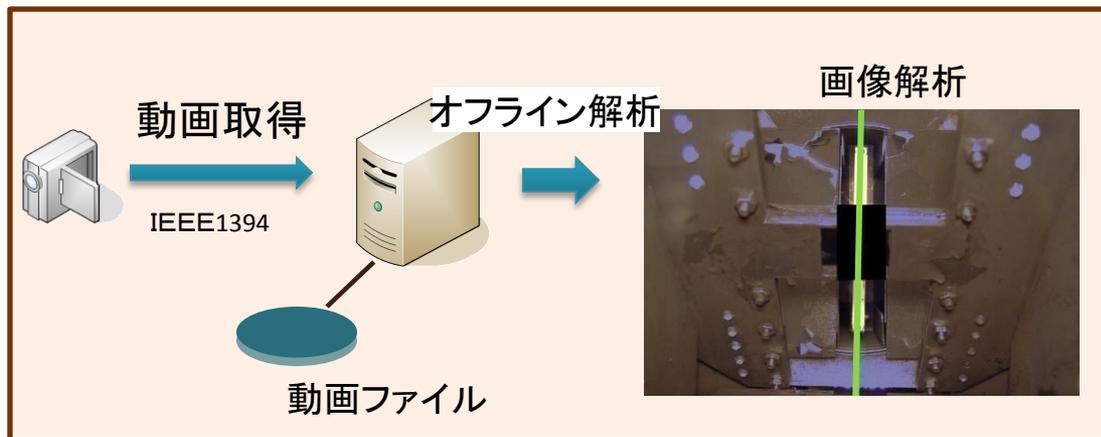
画像から輝度情報を読み取る



各ピクセルの輝度の値から重心を決定



最小二乗法で直線の傾きを決定する
(角度分解能 1.2×10^{-6} 度)



問題点

- ・動画をやり終えなければ解析ができない
- ・1時間分のデータを解析するのに**2時間**かかる
- ・動画と静止画ファイルを合わせるとデータ量が1時間で**16GB**
(今回**252時間**測定のためデータ量は**4TB**になり解析時間は**504時間**となる)



長時間測定するためにデータ量を削減し、実験効率を上げる新たなシステムの開発が必要

• 新解析システム

キャプチャーボード上のメモリに直接アクセスし、1枚の画像から各ピクセルの輝度情報のみを読み取る

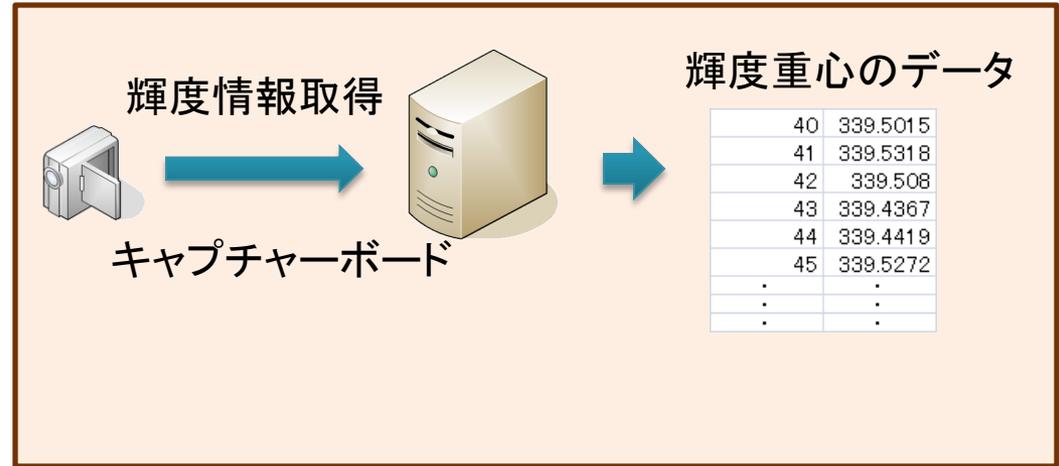


各ピクセルの輝度の値から重心を決定する



オフライン解析

最小二乗法で直線の傾きを決定する



改良点

- ・一定時間おきにデータを吐き出させ測定途中でも解析可能
- ・動画を取得せずオンラインで直接に輝度情報を取得して解析する



- ・データ量を1/570に削減(4TBが7GBになる)
- ・1時間分のデータを20秒で解析完了(従来システムでは2時間)

Laboratory Test v.s Collider Search

