

Tommaso Tabarelli de Fatis

BE SMART:
BASIC EXPERIMENTS
WITH SMARTPHONES

These slides available at: <http://virgilio.mib.infn.it/~tff/BeSmart>

Prefazione

▪ *Smartphone*

- Telefono cellulare dotato di **sensori ambientali** per facilitare l'uso e migliorare l'interfaccia utente (UI)

▪ **Diffusione degli smartphone** ¹⁾

- In Italia, circa il 60% degli studenti a partire dalla scuola secondaria possiede uno *smartphone*
- Tutti i possessori hanno utilizzato almeno una volta un "App"

▪ **Potenzialità didattiche**

- **'Smartphone = sistema di acquisizione dati portatile'**
 - *Molte applicazioni libere consentono la registrazione dei dati dei sensori con discreta precisione*
- Si possono realizzare semplici esperimenti per consolidare l'apprendimento e le basi sperimentali della fisica

1) [Audiweb, 2012](#)

La percentuale è in continua crescita. Un'indagine simile, svolta in Francia nel 2013, riporta una diffusione superiore al 90%.

Indice

- **Sensori**
 - L'accelerometro in particolare
- **Illustrazione di semplici esperimenti di meccanica con l'accelerometro**
 - Caduta libera di un grave
 - Piano inclinato
 - Moto circolare
 - Pendolo semplice
- **Altri esperimenti**
 - Riferimenti bibliografici
(senza pretesa di completezza)
- **Conclusioni e prospettive**

Sensori

▪ **Gli *smartphone***

- sono dotati di sensori che registrano dati ambientali con precisione adeguata a condurre esperimenti su scala di laboratorio.

▪ **L'accelerometro**

- è disponibile in tutti gli *smartphone* e la misura dell'accelerazione di gravità è impiegata per decidere l'orientamento della schermata (nelle descrizioni dei telefoni si trova indicato: "*accelerometer sensor for UI auto-rotate*")

▪ **Giroscopio, sensore magnetico,**

- *sensori di pressione e temperatura e sensori di prossimità, ...* sono integrati nei modelli più evoluti. *Giroscopio e sensore di campo magnetico* sono impiegati nella misura della rotazione del telefono

▪ **La fotocamera e il microfono**

- possono essere utilizzati come *sensore ottico* e *acustico*, rispettivamente

▪ **I GPS**

- di rilevamento della posizione, presenti in genere su tutti i modelli, non hanno precisioni tali da permettere l'uso su scala di laboratorio.

Accesso ai dati dei sensori

▪ App di lettura dei sensori

- Accelerometer Monitor, Sensor Kinetics, Sensor Logger, Sensor Data Logger, ecc.
- Dati salvabili su *SD card* e trasferibili a PC via *bluetooth* o altra porta.

▪ App con '*real-time data streaming*' verso un PC

▪ Sensor Ex Pro (*)

- Fornisce anche una GUI per PC (Windows) per il controllo dello *streaming* e per rappresentazione grafica
- (*) **Valutazione positiva in Google Play, ma non supporta tutti gli *smartphone* (non il mio per esempio) e la PC GUI ha qualche baco**

▪ Wireless IMU (Inertial Measurement Unit)

- *Streaming* via WiFi in formato CSV
 - Connessione *client/server* con protocollo UDP
- Esempio di codice Python per ricevere i dati sul PC fornito assieme alle istruzioni dell'App
- Oppure esempio di UDP *server* in [linguaggio C](#) o in [Java](#)

- **Non più di 10 min per scaricare l'App, l'esempio di codice e definire una connessione (C, Python o Java)**

- Altre App disponibili, ma non tutte funzionanti (dipende dal modello)

**Awesome
portable DAQ!**

Esempi:

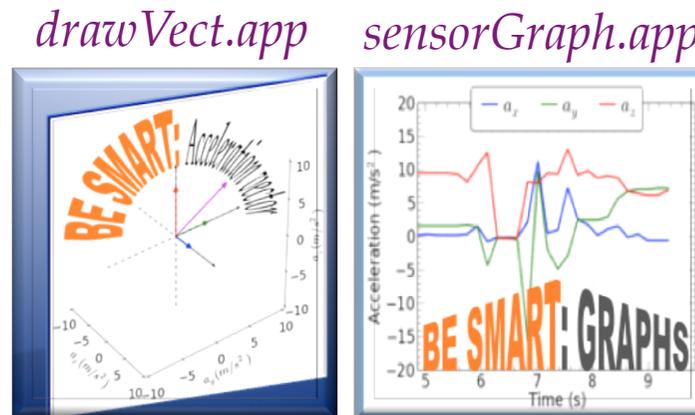
Wireless IMU data format & homemade graphics

■ CSV string:

- 52665.29189, 3, 1.226, 9.194, 3.677, 5, -11.523,-40.625, 5.664
- Sensor data (three components x,y,z)
- Sensor ID 3 = accelerometer (m/s^2); 5 = magnetometer (μT)
- Time stamp (s)

■ Codici di esempio per DAQ su *laptop* (Python):

- [androidSensor123.py](#)
 - (basic UDP server with output to data file)
- [drawVect.py](#)
 - (real-time 3D-display of the acceleration vector)
- [fastPlotSensorData.py](#)
 - (real-time graph of accelerometer data)



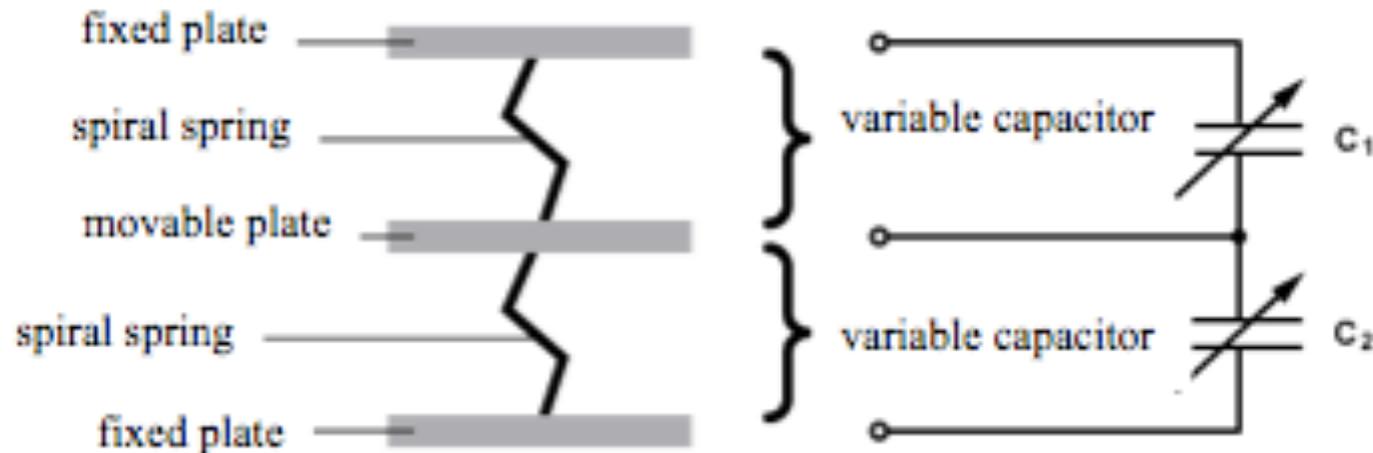
Grazie a
P.Gaiardelli
per la WiFi
di Uni MiB

- [Semplice guida all'installazione di Python e estensioni grafiche](#) e [guida a py2app](#)

L'accelerometro (I)

■ Principio di funzionamento

- Micro-electro-mechanics-systems (MEMS)
 - Condensatore variabile o trasduttore piezoelettrico



- Immagine da: [J. Kuhn and P. Vogt, Eur. J. Phys. Edu. 4 \(2013\), 16](#)
- Le piastre fisse sono solidali con il telefonino, che definisce il sistema di riferimento rispetto a cui sono 'misurate le accelerazioni' del corpo mobile
- [di fatto misura della forza che equilibra l'accelerazione]

L'accelerometro (II)

▪ Sistema di riferimento:

- Misura lungo tre coordinate ortogonali, tramite tre accelerometri, dell' "accelerazione" del corpo mobile del sensore rispetto al telefonino (accelerazioni relative)
- Sperimentatore = Osservatore fisso (OF)
- Smartphone = Osservatore mobile (OM)
- Accelerometro ~ Punto fisso rispetto a OM

$$\vec{a}_{OM} = \vec{a}_{OF} - \vec{a}_{Trascinamento}$$

▪ Precisioni (*)

- Nel seguito utilizzerò misure ottenute con Samsung GT-S5570 (Galaxy Next), che monta un accelerometro BOSCH, BMA222
- **Frequenza di campionamento:**
 $f_{max} = 60 \div 100 \text{ Hz}$ ($\sim 1/17 \text{ ms} \div 1/10 \text{ ms}$)
- **Precisione (in ciascuna coordinata):**
 $\delta a = 0.04 \text{ m/s}^2$ ($\sim 0.004g$)
 - **Equivalente all'accelerazione radiale di un corpo in moto circolare con raggio di 40 cm e periodo di ~ 1 min**



(*) Range, bandwidth e sensibilità di lettura del sensore configurabili e definiti dal software del telefonino

Esempi di potenzialità didattiche

SEMPLICI ESPERIMENTI DI MECCANICA

Allestimenti (a mia conoscenza) originali, marcati con



1. Caduta libera



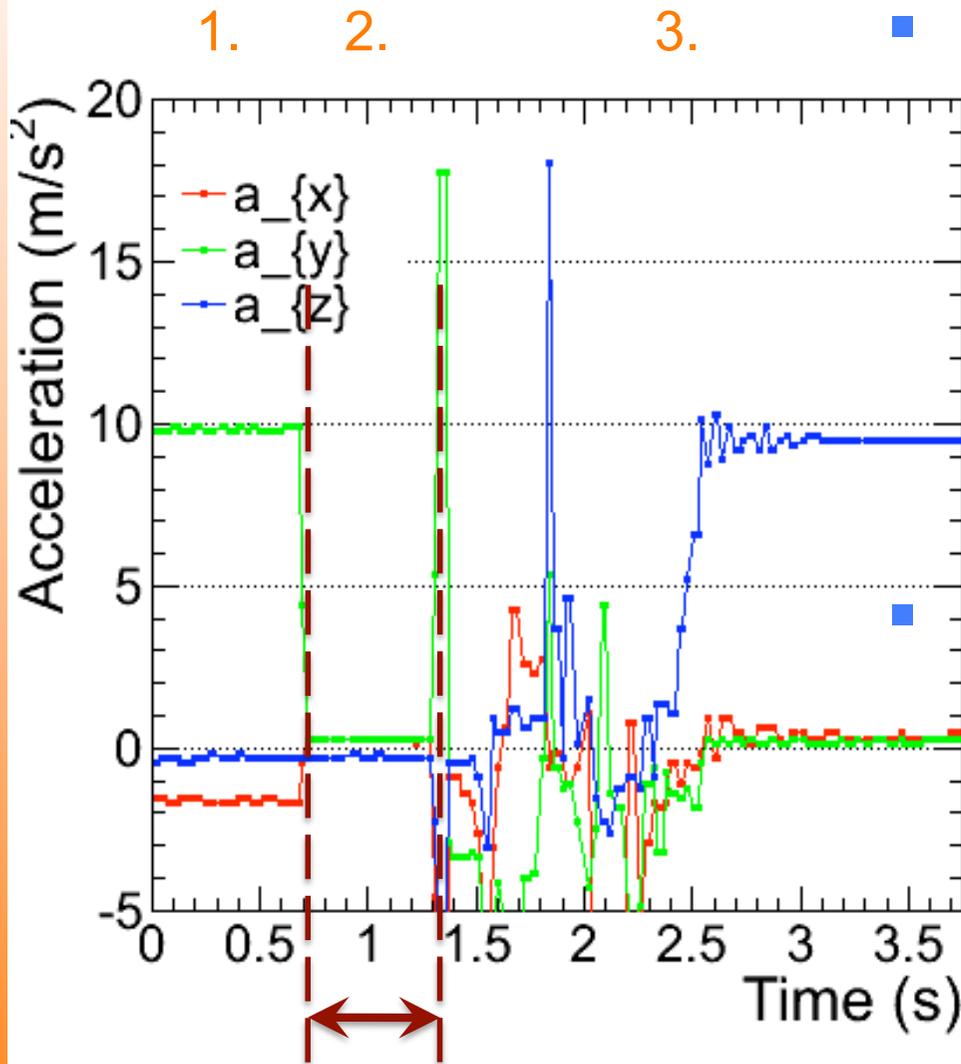
Allestimento proposto da:

[J. Kuhn and P. Vogt, Eur. J. Phys. Edu. 4 \(2013\), 16](#)

Allestimento

- Telefonino appeso al lampadario con uno spago, in modo che l'asse y dell'accelerometro coincida (approssimativamente) con la verticale
- Caduta libera innescata facendo bruciare lo spago, per avere **condizioni iniziali del moto** con
 - $v_y = 0 \text{ m/s}$
 - $y_0 = 0 \text{ m}$
- **Punto di arrivo** (cuscino)
 - $y_f = 2 \text{ m}$
- **Legge del moto (OF):**
 - $y = \frac{1}{2} g \Delta t^2 \quad (1)$
- Dati registrati con [Accelerometer Monitor](#) su Samsung GT-S5570I

Dati di una misura e analisi



(*) Disallineamenti residui rispetto alla verticale ($a_x \neq 0$) senza impatto sulla misura

■ Osservatore mobile:

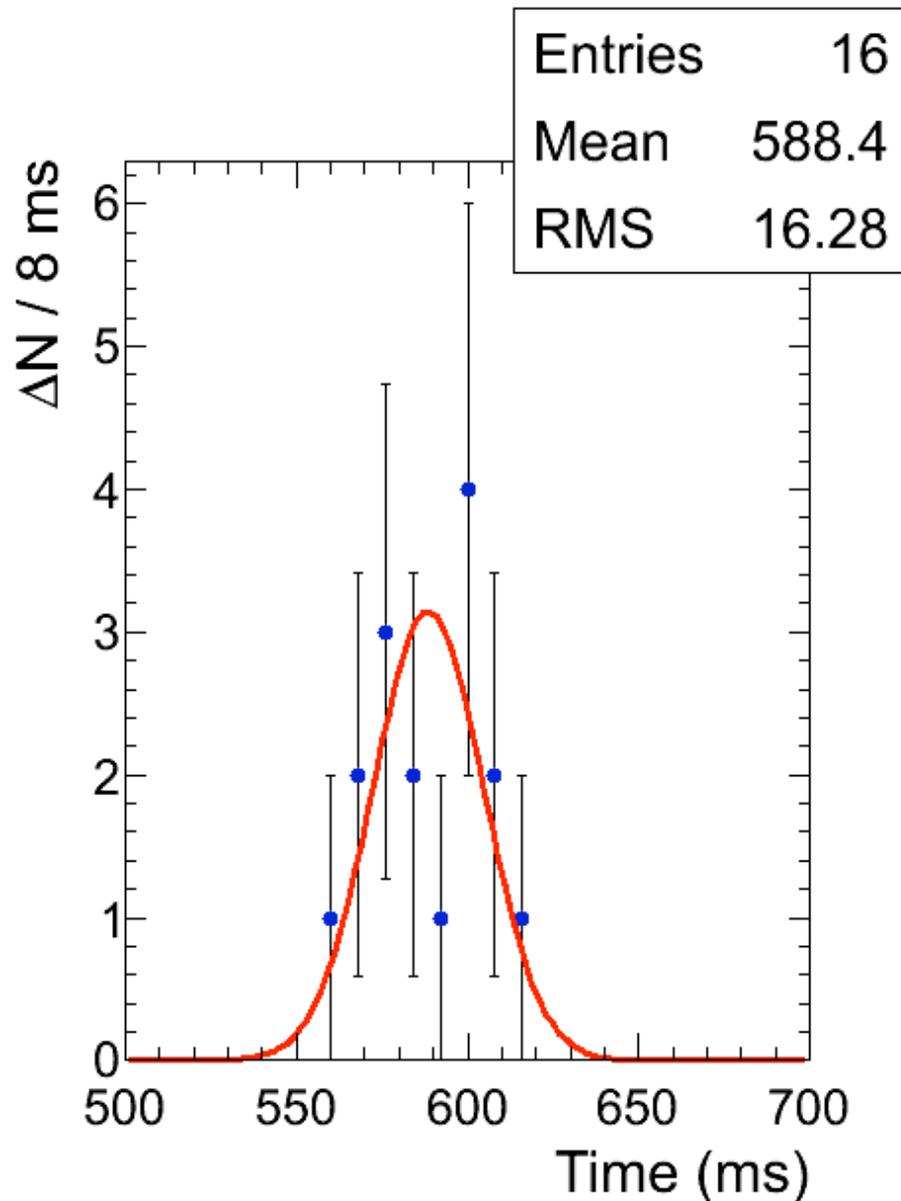
1. Prima della caduta libera:
 - $a_y \sim g$ (*)
2. Durante la caduta libera:
 - $a_y = 0$ [$a_x = a_z = 0$]
3. A fine caduta \mathbf{a} variabile (rimbalzi), e infine $\mathbf{a}_z = g$ (telefono fermo a faccia in su)

■ Osservatore fisso:

- Dai dati del tracciato:
 - $\Delta t = (626 \pm 27) \text{ ms}$
- Dall'equazione (1):
 - $g = 2y/\Delta t^2 = 10.2 \pm 0.8 \text{ m/s}^2$

- Nota: si è assunto Δt indipendente dall'osservatore (limite non relativistico)

Distribuzione, media e dispersione



■ Risultato per 16 *smartphone* “identici”

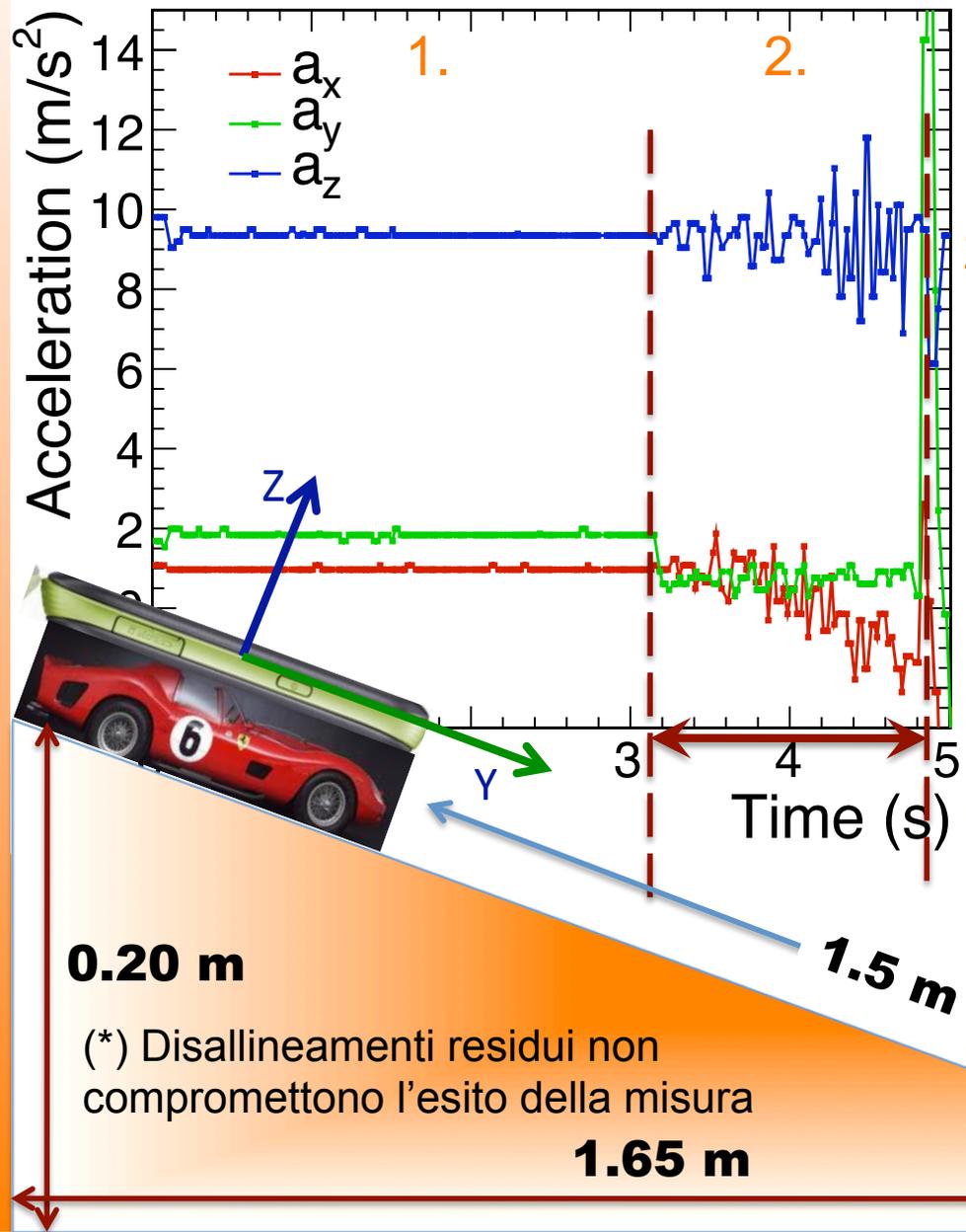
- [27 alunni di cui il 60% con uno *smartphone*]

- N. misure = 16
- h = 1.7 m
- $\langle \Delta t \rangle$ = 588 ms
- $\sigma_{\Delta t}$ = 16 ms
- $\sigma_{\langle \Delta t \rangle} / \sqrt{N}$ = 4 ms

■ $g = 9.81 \pm 0.13 \text{ m/s}^2$

- Nota: in “*Airplane mode*” la maggior parte delle applicazioni sono *off* e’ il campionamento e’ più rapido: $\sim 100 \text{ Hz}$ in queste misure

2. Piano inclinato



1. Prima della caduta (**OM**):
 - $a_y = g \sin\theta$ (*)
 - $a_z = g \cos\theta$
2. Durante la caduta lungo il piano:
 - $a_y = 0$
 - $a_z = g \cos\theta$
 - **Reazione vincolare del piano manifesta nella componente z**
 - Fluttuazioni attorno al valor medio causate dalle asperità del tavolo
- Dai dati del tracciato (**OF**):
 - $\Delta t = (1.636 \pm 27) \text{ ms}$
- Dall'equazione (1):
 - $a_y^{lab} = 2y/\Delta t^2 = 1.12 \pm 0.04 \text{ m/s}^2$
 - $g = a_y^{lab}/\sin\theta = 9.3 \pm 0.3 \text{ m/s}^2$
- Si può ripetere la misura più volte e ricavare distribuzione, media e dispersione

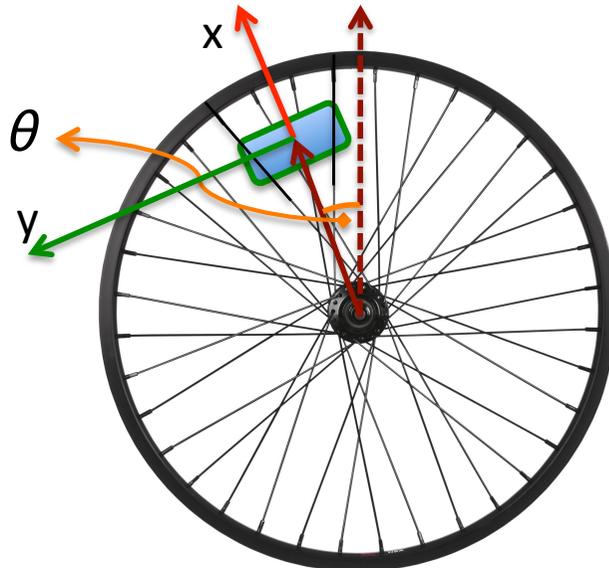
(*) Disallineamenti residui non compromettono l'esito della misura
1.65 m

3. Moto circolare (uniforme)



Apparato

- Telefono incastrato tra i raggi di una ruota di bicicletta, allineata al piano verticale (controllando che $\mathbf{a}_z = \mathbf{0}$, con z asse della ruota)
- **Coordinate radiali (nel lab)**
 - $r = 20 \pm 1 \text{ cm}$ (*)
 - $\theta = \text{angolo rispetto alla verticale}$



(*) Incertezza sulla posizione dell'accelerometro nel telefono, riducibile invertendo la coordinata x

Osservabili del moto

- **Osservatore fisso "inerziale" (sistema del laboratorio):**
 - Posizione: $\mathbf{r} = \text{costante};$
 $\theta = \theta(\mathbf{t})$
 - Velocità: $\boldsymbol{\omega} = d\theta/dt$
 - Accelerazione: $\mathbf{a}_T = r d^2\theta/dt^2;$
 $\mathbf{a}_R = \boldsymbol{\omega}^2 r$ (centripeta)
- **Osservatore mobile (N.I.),**
asse y = direzione tangente;
asse x = direzione radiale:
 - $\mathbf{a}_y = g \sin\theta - r d^2\theta/dt^2$
 - $\mathbf{a}_x = g \cos\theta - \boldsymbol{\omega}^2 r$ (centrifuga)
- **In moto uniforme:**
 - $d^2\theta/dt^2 = 0$
 - $\boldsymbol{\omega} = 2\pi / T$ con T misurabile dal periodo della modulazione di \mathbf{a}_y e \mathbf{a}_x
 - $\mathbf{a}_R (= \boldsymbol{\omega}^2 r)$ misurabile, ad esempio, dallo scostamento di $\langle \mathbf{a}_x \rangle_T$ da $\langle \mathbf{a}_y \rangle_T$

Centrifuga, chi era costei?

Un *“best seller”* ...

... un po' confuso

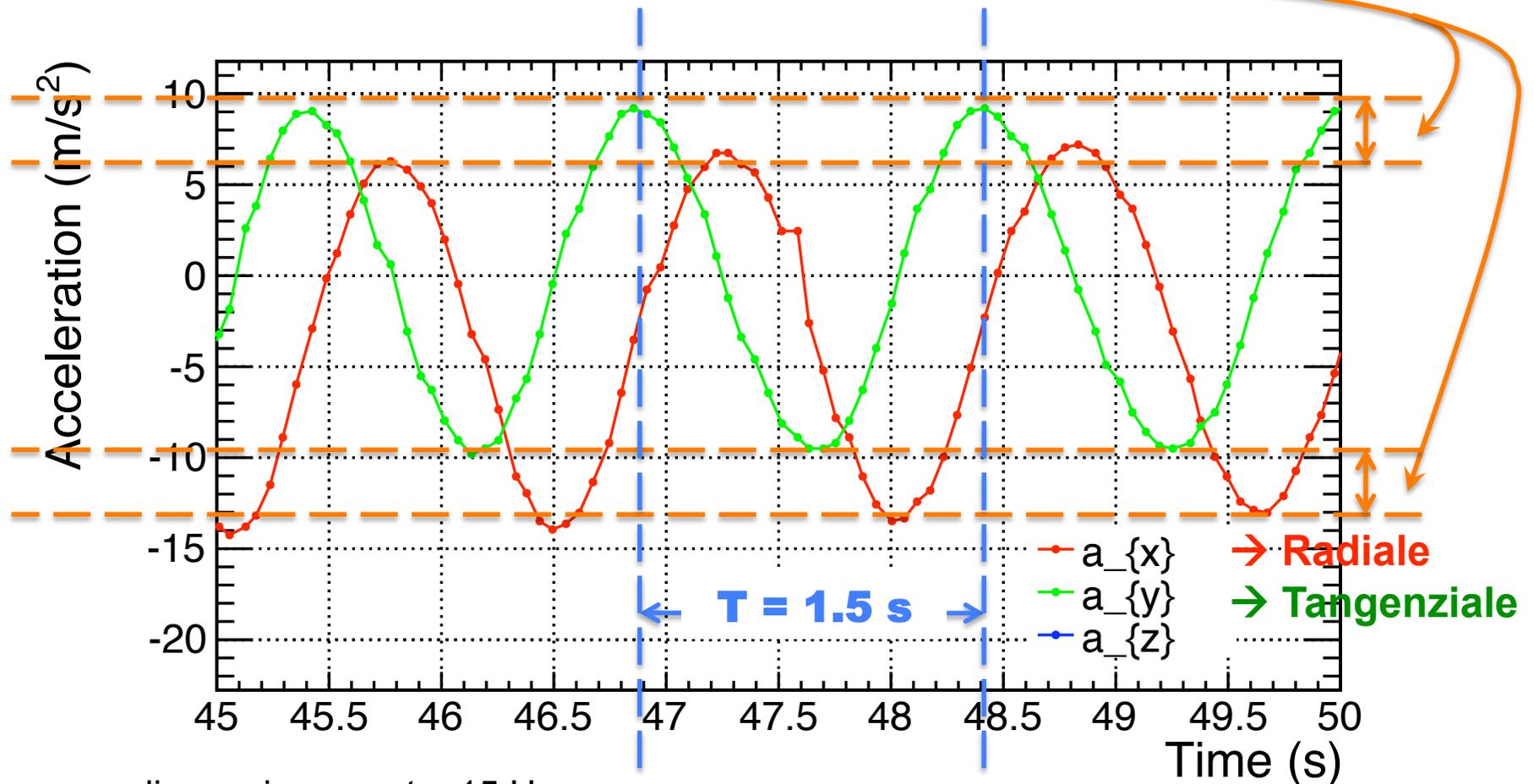


16 Vi racconto l'astronomia

Se immaginiamo, per assurdo, che un pianeta improvvisamente si fermi, esso cadrebbe sul Sole; se, pure per assurdo, immaginiamo che il Sole scompaia, il pianeta seguirebbe a muoversi lungo la tangente all'orbita, nel punto in cui si trovava al momento della scomparsa del Sole. Il pianeta infatti è soggetto a due forze eguali ed opposte che si bilanciano: la forza di gravitazione e la forza centrifuga. Newton espose matematicamente...

Analisi su un periodo:

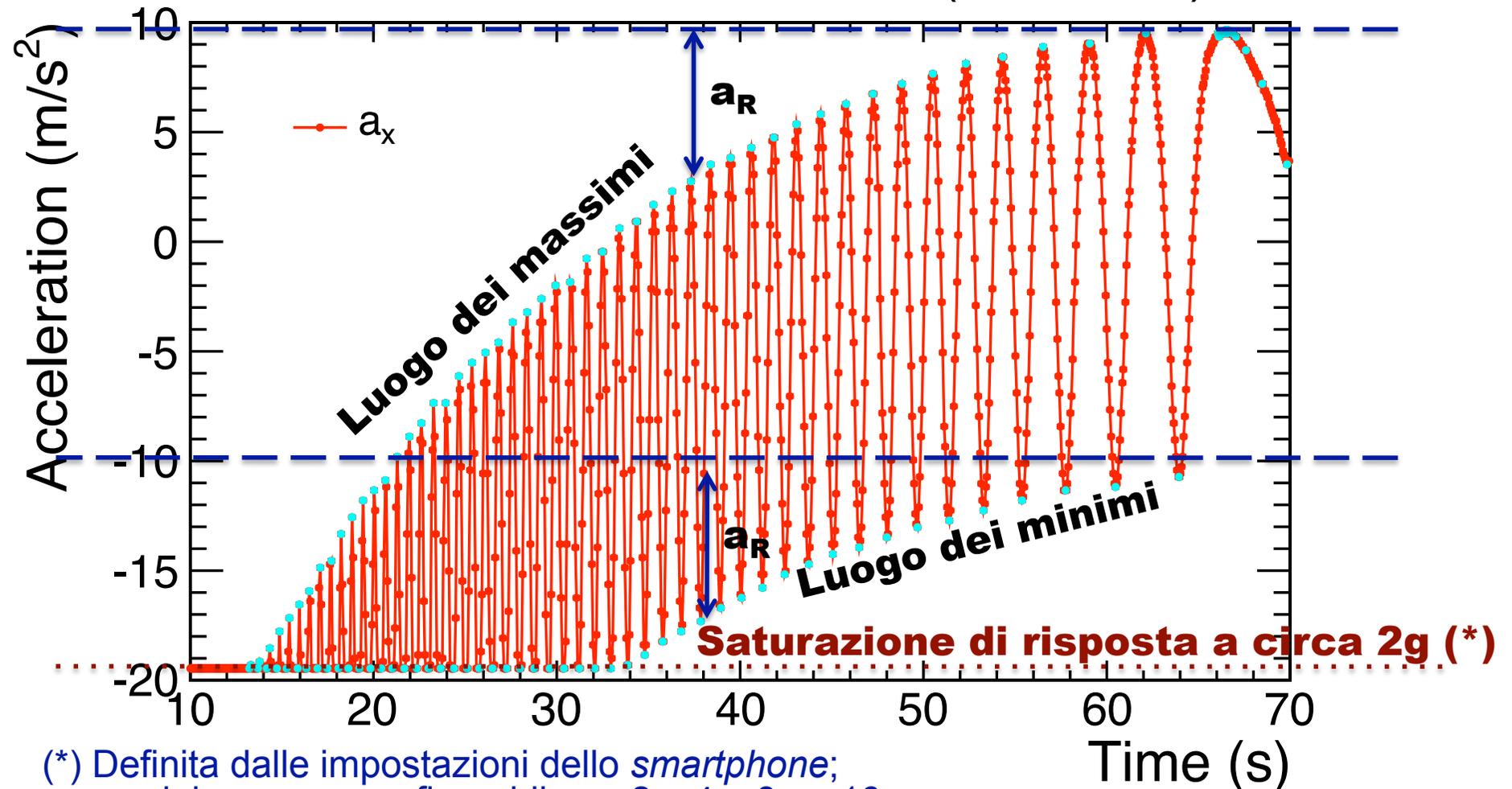
- Dal periodo di a_y : $\langle \omega \rangle = 2\pi/T = 4.2 \text{ s}^{-1}$
- Per $r = 0.20 \pm 0.01 \text{ m}$, $\langle a_R \rangle = \langle \omega \rangle^2 r = 3.5 \pm 0.2 \text{ m/s}^2$
- **Consistente con la misura di a_R dell'accelerometro**



Frequenza di campionamento: 15 Hz

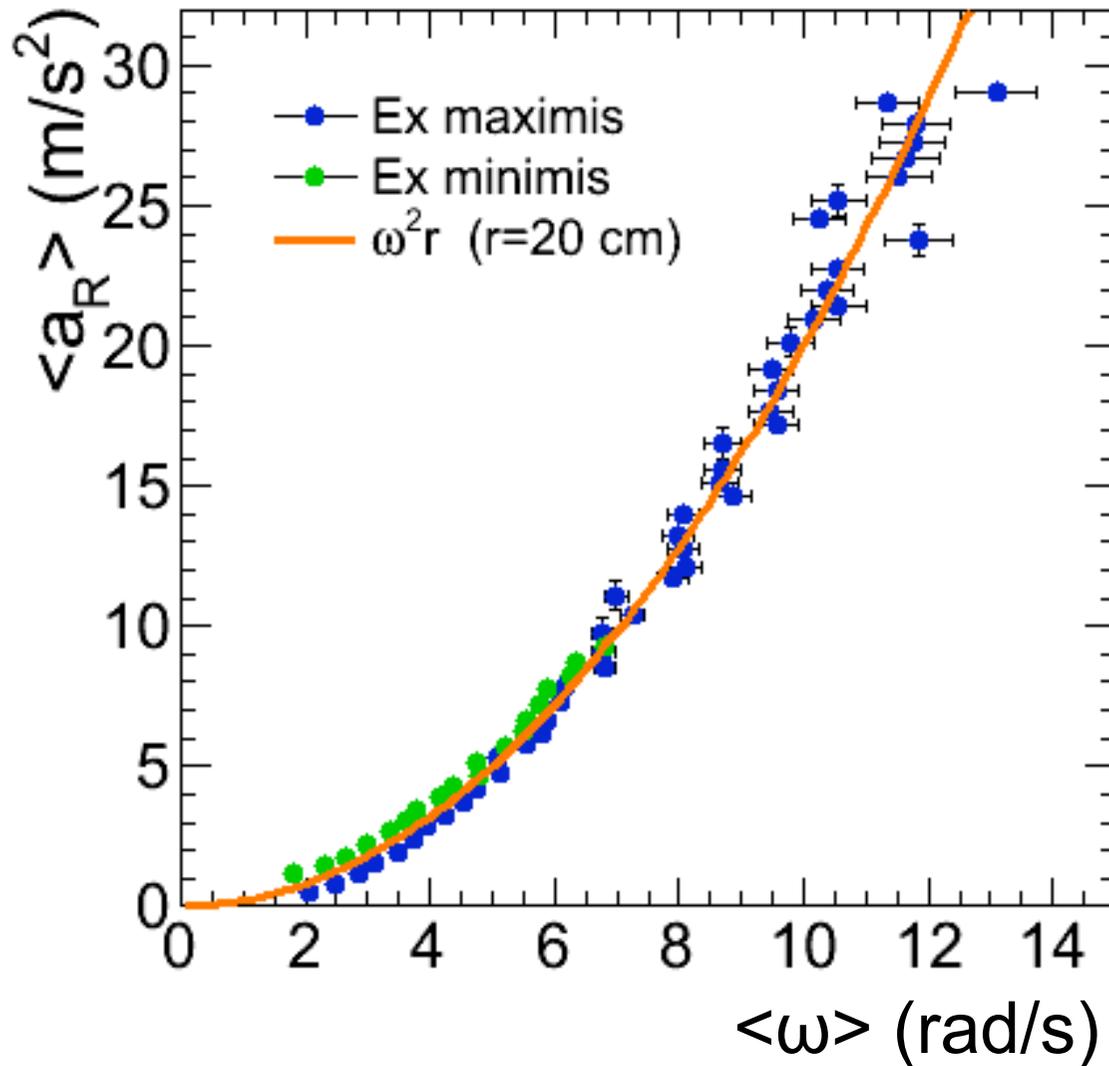
La curva dei dati completa

- **Il moto circolare non è uniforme (attriti)**
 - Il periodo aumenta
 - L'accelerazione radiale diminuisce (in modulo)



(*) Definita dalle impostazioni dello *smartphone*;
range del sensore configurabile a ± 2 , ± 4 , ± 8 e $\pm 16g$

Accelerazione vs velocità angolare



← Risposta lineare anche vicino alla saturazione dell'accelerometro

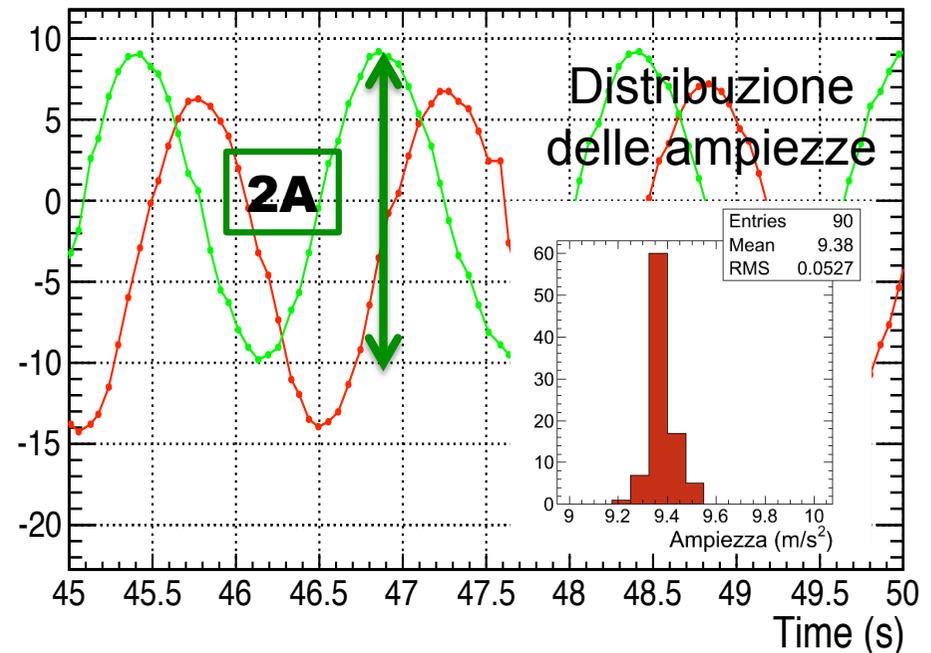
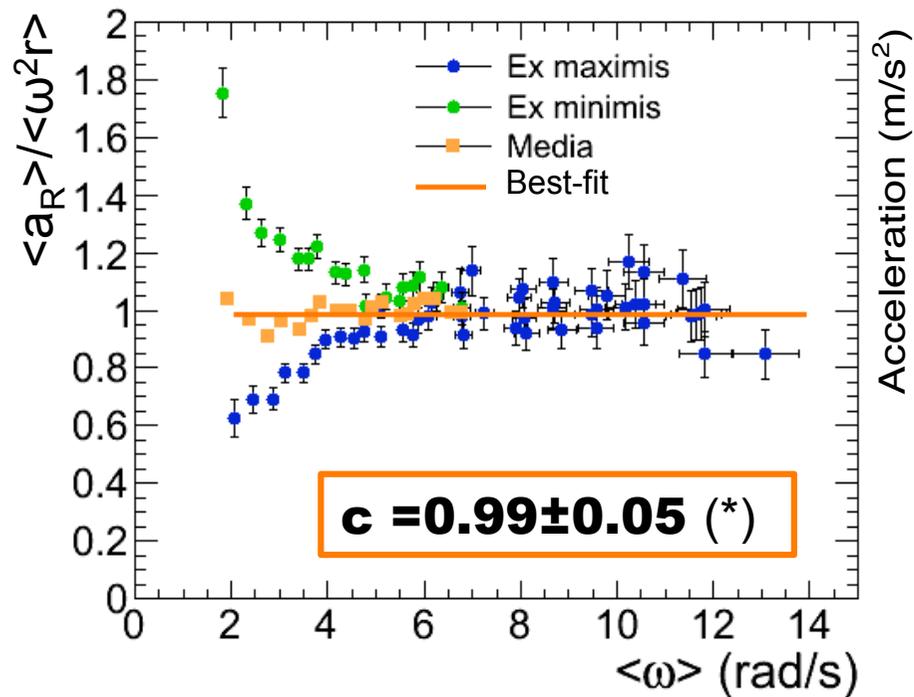
- Per ω piccoli, effetto dell'asimmetria della distribuzione di massa nell'apparato :

← $\mathbf{a_R^{\min} > \omega^2 r > a_R^{\max}}$

- Riducibile tramite contrappeso

Nota sull'analisi: calibrazione del sensore e misura di g

- Il confronto di \mathbf{a}_R con $\boldsymbol{\omega}^2 \mathbf{r}$, ricavabile in modo **indipendente dal sensore**, dà la calibrazione dell'accelerometro
 - (a meno dell'incertezza sulla posizione del sensore)
- **La misura dell'ampiezza di oscillazione è una misura di g !**



$$\underline{g = c \langle A \rangle = 9.3 \pm 0.5 \text{ m/s}^2}$$

(*) Incertezza dominante: posizione del sensore

Ulteriori possibilità sul moto circolare

1. Misura di a_T molto delicata!

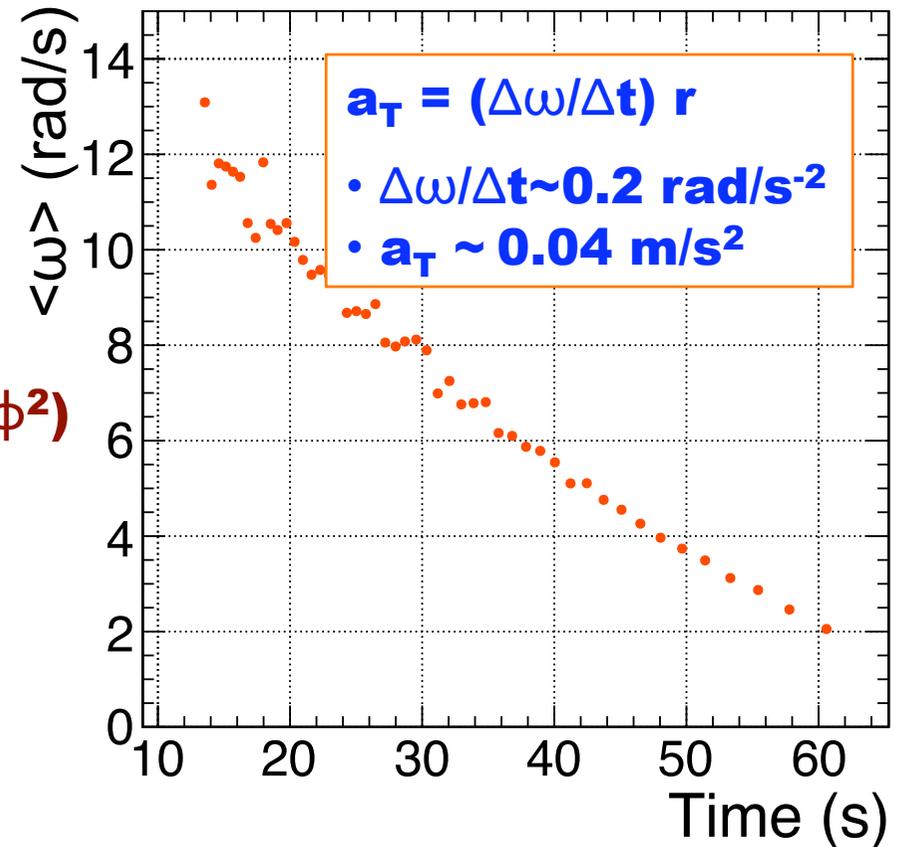
- Accelerazioni tangenziali al limite della sensibilità!
(a meno di freni o raggi maggiori)
- In caso di disallineamento $\delta\phi$ tra l'asse \mathbf{x} del telefono e la direzione radiale del moto, una componente di \mathbf{a}_R si manifesta su \mathbf{y}
 - $\mathbf{a}_{Rx} = \mathbf{a}_R \cos \delta\phi \sim \mathbf{a}_R (1 - \frac{1}{2}\delta\phi^2)$
 - $\mathbf{a}_{Ry} = \mathbf{a}_R \sin \delta\phi \sim \mathbf{a}_R \delta\phi$
- L'impatto del disallineamento è del primo ordine su \mathbf{y} e del secondo ordine su \mathbf{x} :

2. Dissipazione dell'energia

- $E_K \sim \omega^2 \rightarrow \Delta E_K / E_K = 2 \Delta\omega / \omega$

3. Più distanze radiali

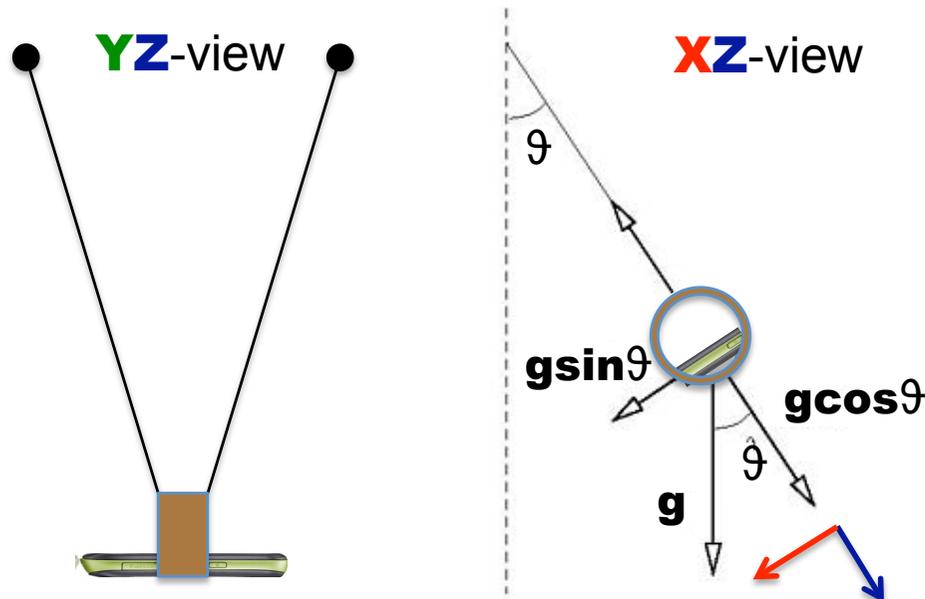
- La ripetizione dell'esercizio a diverse distanze radiali, o l'impiego di più telefoni nella stessa ruota, permette di verificare la relazione di linearità tra \mathbf{a}_R e raggio



4. Pendolo semplice

Allestimento

- Telefono appeso con due fili ad una porta, in modo da vincolare le oscillazioni nel piano XZ
- **Coordinate radiali (nel lab)**
 - $L = 1.50 \pm 0.01 \text{ m}$
 - $\theta = \text{angolo rispetto alla verticale}$



Osservabili del moto

▪ Osservatore “inerziale” (sistema del laboratorio):

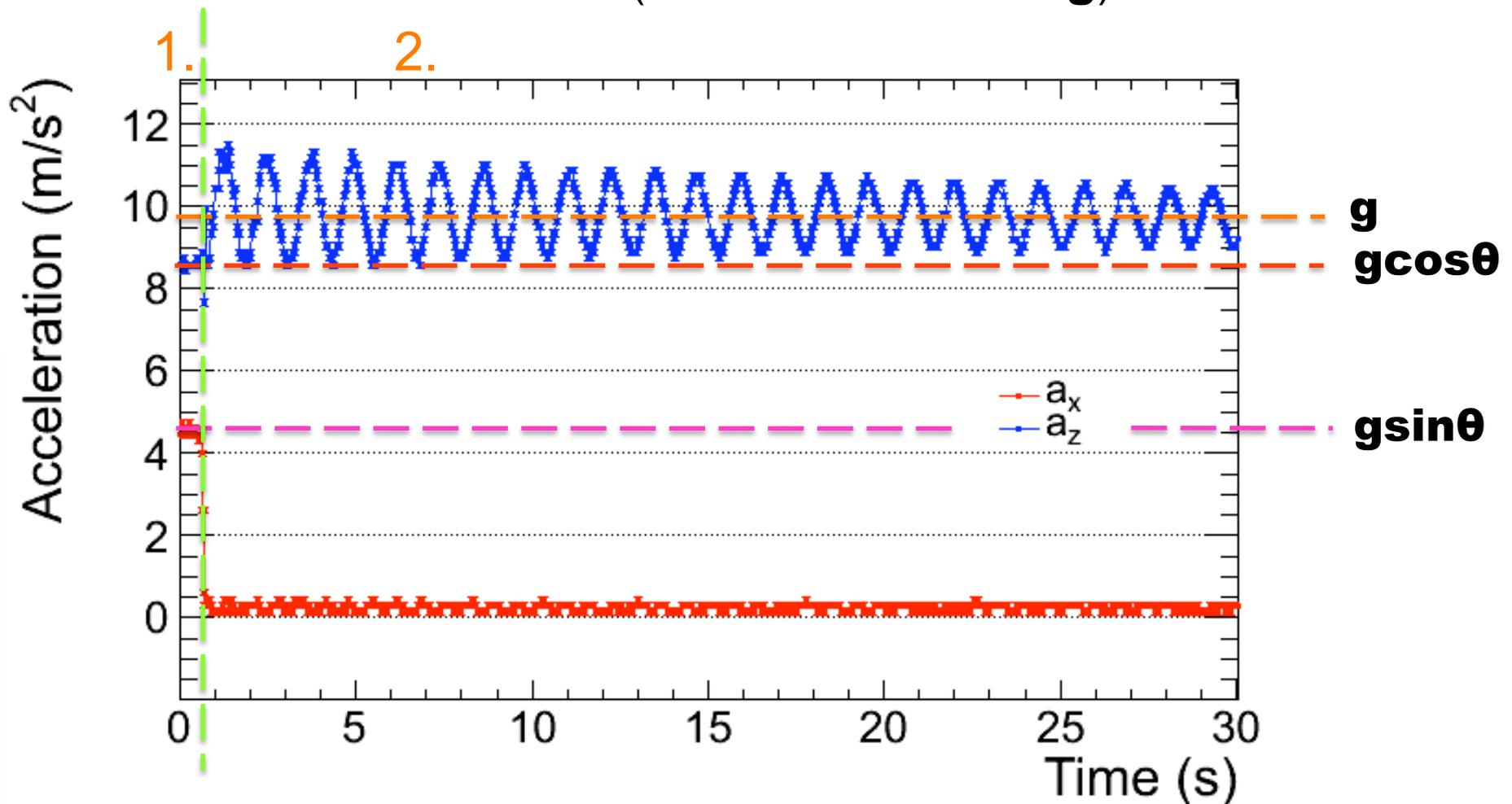
- Posizione: $L = \text{costante};$
 $\theta = \theta(t)$
- Velocità: $v = L d\theta/dt$
- Accelerazione: $a_T = L d^2\theta/dt^2$
 $a_R = - (d\theta/dt)^2 L$
(centripeta)

▪ Grandezze misurate dall'accelerometro:

- Il moto è libero in x e vincolato in z
- $a_x = -L d^2\theta/dt^2$
- $a_z = g \cos\theta + (d\theta/dt)^2 L$
(centrifuga)
- La presenza di un **giroscopio** con misura diretta di $\theta = \theta(t)$, o l'uso del magnetometro, permette l'analisi completa della legge del moto [Ref.]

Tracciato delle misure

1. Condizioni iniziali: $\theta = \text{atan}(a_x/a_z) \sim 28^\circ$
2. Oscillazioni (smorzate):
 - Moto libero in x (oscillazioni attorno a ~ 0);
 - Moto vincolato in z (oscillazioni attorno a \mathbf{g})

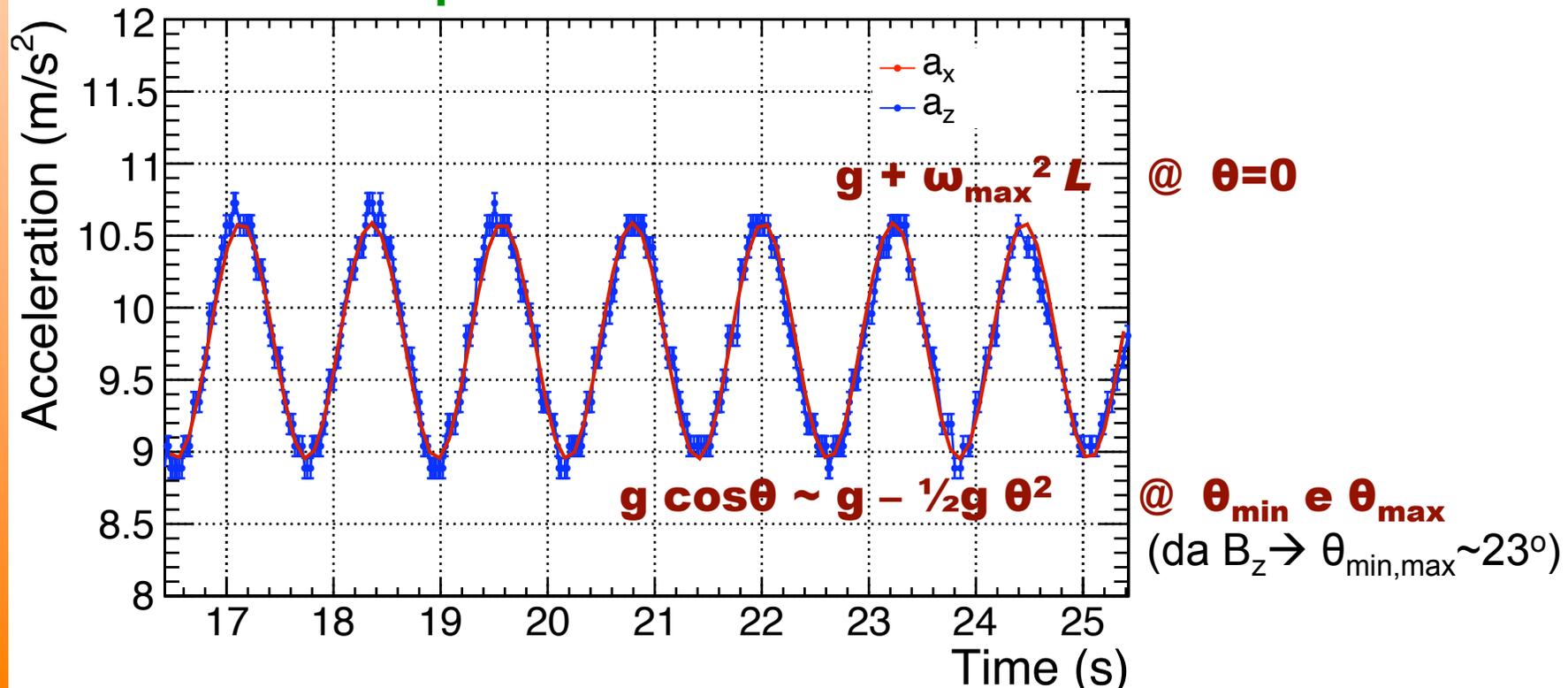


Accelerazione radiale

■ Interpolazione: $a_z = A_z + B_z \cos(\omega_z t + \varphi)$

- $A_z = 9.770 \pm 0.003 \text{ m/s}^2$ ($\approx g$)
- $B_z = 0.819 \pm 0.004 \text{ m/s}^2$
- $\omega_z = 5.155 \pm 0.002 \text{ s}^{-1}$ pulsazione di energia cinetica e potenziale
- $\omega_p = \frac{1}{2} \omega_z$ pulsazione propria del pendolo

→ $g = \omega_p^2 L = 9.96 \pm 0.10 \text{ m/s}^2$

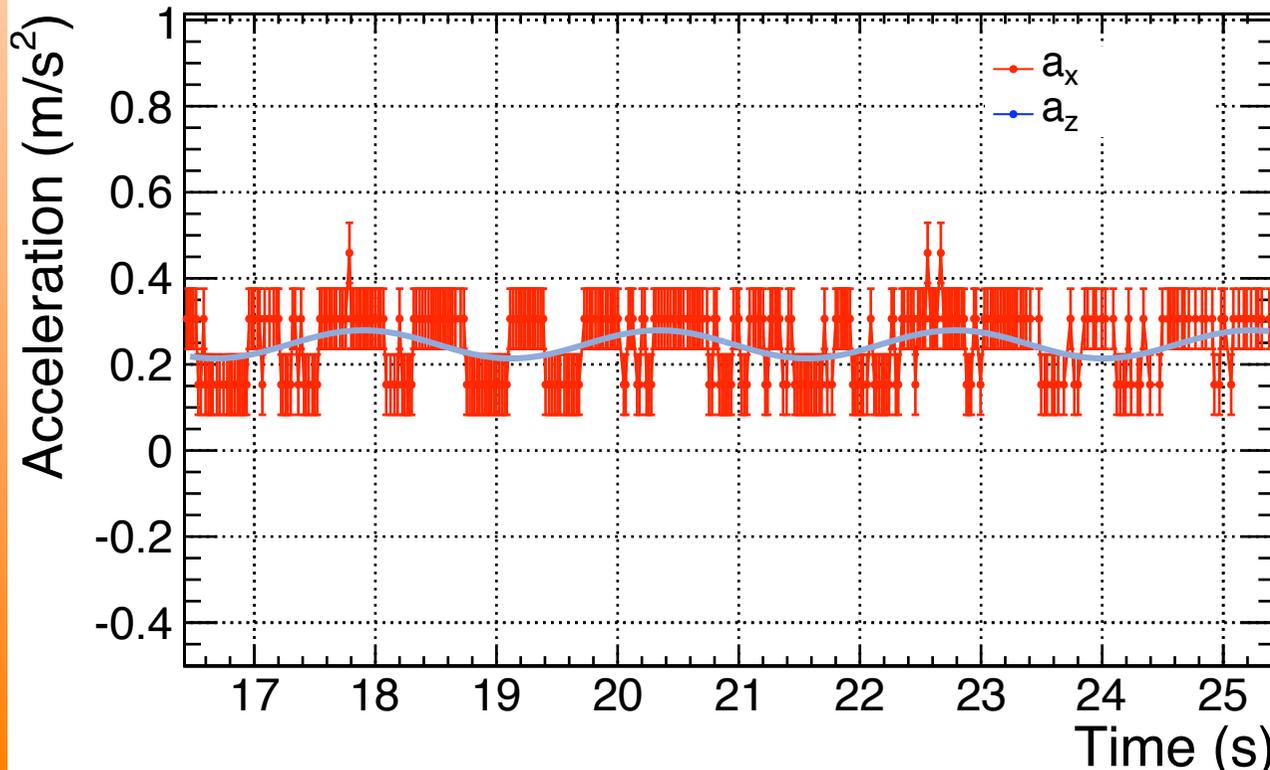


Accelerazione tangenziale

▪ Interpolazione: $a_x = A_x + B_x \cos(\omega_x t + \varphi)$

- $A_x = 0.247 \pm 0.003 \text{ m/s}^2$ (disallineamento residuo senza impatto)
- $B_x = 0.033 \pm 0.004 \text{ m/s}^2$ (*)
- $\omega_x = 2.57 \pm 0.05 \text{ s}^{-1}$
- $\omega_p = \omega_x$ pulsazione propria del pendolo

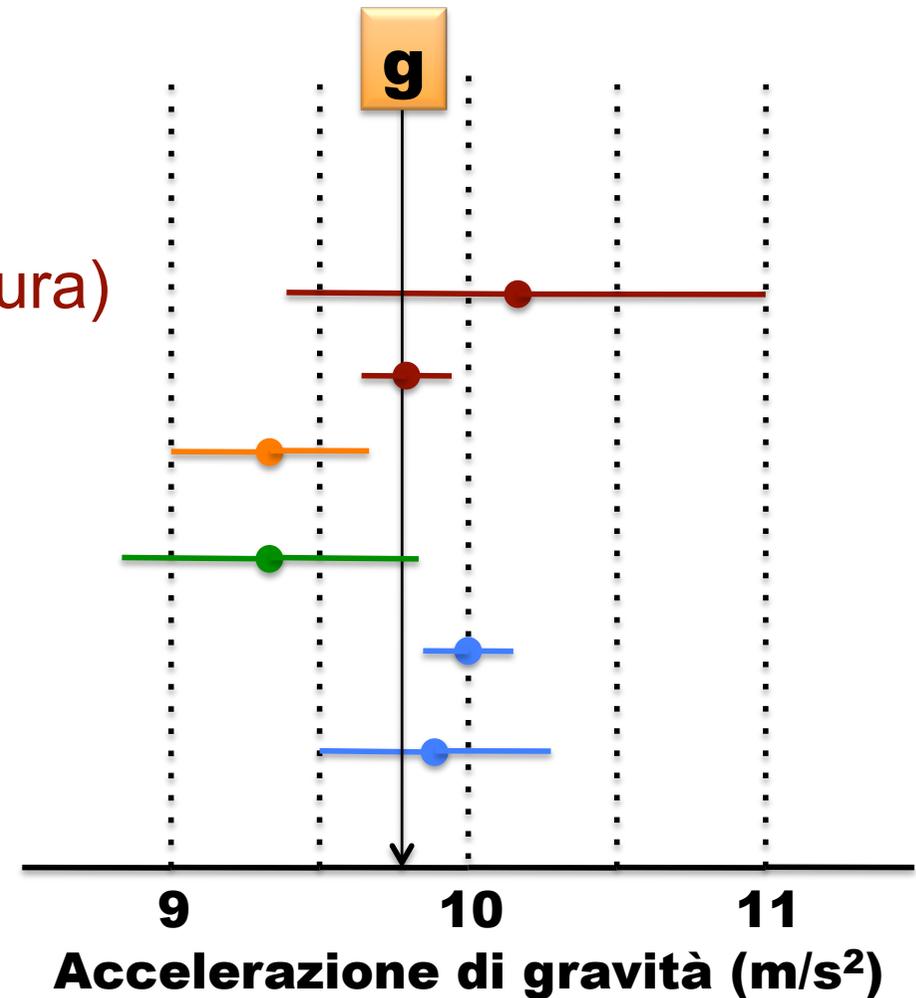
→ $g = \omega_p^2 L = 9.9 \pm 0.4 \text{ m/s}^2$



(*) Ampiezza di oscillazione al limite della sensibilità della singola misura (0.04 m/s²). Sensibilità sull'ampiezza circa 10 volte migliore (media di molte misure)

Quadro sinottico dei risultati

- Caduta libera (singola misura)
 - Caduta libera (media)
 - Piano inclinato
 - Moto circolare
 - Pendolo: a_R
 - Pendolo: a_T
- } Misure non indipendenti



Quattro gruppi di lavoro, uno per ciascun metodo?

Altri esperimenti

- **Impiego di smartphone nella didattica ‘culturalmente maturo’:**
 - Settore vivace, con alcune pubblicazioni negli ultimi anni
 - Applicazione di *back-end* per iPhone molto evoluta [[Ref.iMecaprof](#)]
 - Pubblicazioni sull’uso di Wii (che è però meno portatile e meno diffusa)
- **Varianti di meccanica:**
 - Moto nel circolare piano orizzontale: ma si perde la possibilità di misurare la velocità angolare dalla pulsazione [[Ref.](#)],
 - Oscillazioni accoppiate con due sensori [[Ref.](#)]
 - Molla [?]
- **Magnetismo**
 - Mappatura del campo magnetico di una calamita
 - *Distorsioni di campo locale dovute alla distribuzione di sorgenti e materiali, e attività elettromagnetica* [[Ref.](#)] (si veda anche progetto di [Indoor Atlas Ltd.](#))
- **Acustica e Ottica**
 - Rumore e analisi in frequenza:
 - ad esempio andamento con $1/r^2$ dell’intensità sonora, ...
 - Ottica ...
- **Altro...**
 - Invito alla fantasia... ma con una proposta specifica → segue

BE SMART:

Bicocca Experiments with SMARTphones

- Le App disponibili in rete sono notevoli e mature
- Impossibile competere con $O(10^9)$ sviluppatori
- Le conoscenze di fisica e l'abitudine a sperimentare e compiere misure possono essere il valore aggiunto di un Dipartimento di Fisica
- **Mantenere un database di esperimenti semplici da proporre come esperienze didattiche innovative**
 - Impiego per corsi introduttivi universitari
 - Applicazioni per scuole secondarie
 - Interazioni con Scienza della Formazione
 - Seminari e supporto scientifico
 - Pubblicazioni (per applicazioni originali)

Conclusioni e prospettive

- **Gli *smartphone* offrono notevoli possibilità didattiche che sarebbe un peccato non cogliere**
- **A seconda degli obiettivi è possibile**
 1. Illustrare alcune leggi fondamentali “in atto”
 - Imparare a interpretare i fenomeni, dissipare confusione
 2. Consolidare I fondamenti sperimentali della fisica
 - Pianificare e condurre esperimenti, imparando a classificare elementi decisivi, effetti spuri ed effetti irrilevanti
 3. Insegnare i rudimenti dell’analisi dati
 - Gestire una messe di dati importante
 - Costruire e analizzare distribuzioni, medie, interpolazioni, ...
 4. Insegnare i rudimenti della programmazione, la sensoristica, il controllo del flusso di dati ...

Stay hungry. Stay foolish...
and BE SMART!