

7-8 April 2014 Angelicum - Roma

# Física Fondamentale

Tommaso Calarco, Giovanni Carugno, Saverio Pascazio e Gemma Testera

Angelicum, Roma, 7 aprile 2014

## alcune domande

- come cade un atomo di antimateria?
- qual e' il limite della meccanica quantistica?
- a cosa serve un computer?
- che cosa e' il vuoto? il vuoto e' simmetrico?

naturalmente uno puo' fare qualsiasi domanda, ma un problema serio in fisica e' che le domande devono essere "sensate", nel senso di consentire l'individuazione di una strategia che permetta di dare una risposta (magari anche sbagliata argomenti in discussione

- Quantum simulations
- Antimateria
- Simmetrie del vuoto e gravita'
- Atomi freddi ed ottica quantistica





Intuizione (formidabile) di Feynman: un sistema quantistico simula un sistema quantistico (laddove un sistema classico lo simulerebbe con difficolta' esponenziale)

## Simulatori quantistici con atomi ultrafreddi

#### **Quantum simulators:**

*dedicated* quantum computers to solve fundamental problems untractable by a classical hardware

R. P. Feynman, Int. J. Theor. Phys. 21, 467 (1982)



#### Atomi ultrafreddi: quantum Hamiltonians engineering in a table-top setup



Fermions and bosons Optical lattices Interactions Temperature Topology/dimensionality Gauge fields Relativistic dispersion Dynamics

Efficacia gia' provata per numerosi problemi! M. Inguscio and L. Fallani, Atomic Physics (Oxford, 2013) M. Lewenstein et al., Ultracold atoms in optical lattices (Oxford, 2012)

#### **Ultralow-energy simulators of HEP**

SU(N) fermions G. Pagano et al., Nat. Phys. (2014)
Extradimensions O. Boada et al. PRL (2012)
Lattice gauge theories e.g. D. Banerjee et al. PRL (2012, 2013)
Fermionic superfluidity e.g. M. Zwirlein et al., Nature (2005)
Abelian vs non-Abelian (BO-NA-BA)





# from P. Zoller



enforce Gauss law in  $S_{x,x+1}$ quantum símulation of  $\sigma_x$  $\sigma_{x+1}$ lattice gauge theory  $\rho - \Delta \cdot E \quad \Leftrightarrow \quad S_{x-1,x}^z + \sigma_{\mathcal{H}_0}^z = S_{x,\mathcal{J}}^z + \mathcal{I}_{\mathcal{I}_0}^z = S_{x,x+1}^z \sigma_{x+1}^z + h.c.$ enforces Gauss law *large* white noise  $\times (\rho - \Delta \cdot E) \lt$ by quantum Zeno effect  $G_x$ 

## come cade un atomo di antimateria?



### Atomi di anti-idrogeno freddi per verifica di simmetrie fondamentali

- Ricombinazione di antiprotoni e positroni raffreddati e manipolati in trappole elettromagnetiche
- dal 2002: M. Amoretti et al. (ATHENA Collaboration) Nature 419, 456 (2002).
- Antiproton Decelerator (CERN): dedicato a questo programma di fisica
- Unica macchina al mondo che permette cattura antiprotoni in trappola elettromagnetica
- Potenziamento dal 2017-2018: post deceleratore, flusso antiprotoni X 100

#### Spettroscopia per verifica CPT:

- Violazioni invarianza Lorentz
- differenza livelli energetici H e anti-H
- Standard Model Extension (SME)

Lamb



- Verifica validita' WEP per antimateria
- assenza misure dirette per antimateria
- validita' per antimateria e' estrapolazione
- Limiti indiretti (dipendenti da modelli, controversi)



Dirac

Bohr

 $\frac{g_H - g_{\overline{H}}}{g_H} < 10^{-X}$ 

## con X=6,7,8 a seconda delle ipotesi

M. Nieto et al Phys. Rep. 205 (5) 221 (1991)
M. Charlton et al Phys. Rep 241 65 (1994)
R. Hughes Hyp. Int.76 3 (1996)

Ground state Hyperfine Splitting Max sensibilita' a violazioni Invarianza Lorentz

R. Bluhm, V. A. Kosteleck, and N. Russell, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 2254.

HFS

### Prospettive sperimentali nel prossimo futuro (dal 2018 in poi)

#### WHAT NOW

- Cattura anti-idrogeno in trappola magnetica: dimostrato (esp. ALPHA)
- Formazione di fascio di anti-idrogeno: dimostrato (esp. ASACUSA)
- Temperatura anti-atomi: decine Kelvin o pochi Kelvin a seconda degli schemi sperimentali
- Obiettivo a medio termine esp. AEgIS: fascio anti-H impulsato con 100 mK

#### WHAT NEXT

• misura GSHF con precisione con fascio ASACUSA  $\frac{\Delta v}{m} = 10^{-6} - 10^{-8}$ 

• misura GSHF con fascio AEgIS 
$$\frac{\Delta v}{v} = 10^{-9}$$

• Utilizzo delle metodologie della fisica atomica (laser cooling, interferometria atomica) per anti-atomi

• Formazione di anti-idrogeno ultrafreddo:  
pre-raffreddamento di antiprotoni fino a 1-10 
$$\mu$$
K  
confinamento simultaneo con ioni negativi  
laser cooling ioni negativi:  
• Uso sorgenti laser UV impulsate (Ly  $\alpha$ )  
1-10  $\mu$ K  
anti-H !!!  
 $\frac{\Delta g}{g} = 10^{-8}$ 

• Misura di g con interferometro atomico e fascio impulsato tipo AEgIS:







## Spin Statistics: (VIP) at LNGS



VIP limit on the probability of PEP violation:

$$\beta^2/2 \le 3 \times 10^{-29}$$

VIP-2 (to be installed at LNGS in 2014)

$$\beta^2/2 \le 10^{-31}$$

## Next 10-15 years: go towards 10<sup>-32</sup> – 10<sup>-33</sup>

"Hopefully either violation will be found experimentally or our theoretical efforts will lead to understanding of why only Bose and Fermi statistics occur in Nature" (Greenberg) qual e' il limite della meccanica quantistica?

- Si possono porre domande che i padri fondatori ritenevano accademiche (a volte addirittura "impossibili")
- Si possono esplorare i limiti stessi della teoria
- Si puo' migliorare la precisione delle misure (metrologia quantistica)
- Atomi freddi ed ottica quantistica

## **BOSON SAMPLING (Roma I)**

*n* fotoni che si propagano attraverso un sistema integrato *m* -multiport



distribuzione in uscita?

**OBIETTIVO FINALE:** n=10-20 fotoni e m=100-200 modi

## **Open questions:**

- Come aumentare la complessita' del Boson sampling ?

- Come certificare il corretto funzionamento di un expt di boson sampling?
- Effetti di rumore ed imperfezioni

## Challenges

- Single photon sources
- Photon manipulation on a chip
- Single photon detectors

Photon number quantum correlations: Sub shot noise imaging Nature Photonics 4, 227 (2010).

Detection of an object in preponderant background *Phys. Rev. Lett. 110, 153603 (2013)* 

## **INRIM** Torino

### Space Quantum Communications (PADOVA)

- Test di diseguaglianze di Bell in condizioni mai realizzate: orbite LEO o GEO, moving terminals, campo grav.
- Teleportation and distribuzione di entanglement dalla terra allo spazio
- Applicazioni: comunicazioni sicure per mezzo di Quantum Key Distribution

## Roadmap

- Hub on the ground: ASI-MLRO in Matera
- Encoding in different degrees of freedom entanglement swapping
- Receiving from active orbiters dedicated satellites
- Intermodal links: space terminals to ground labs
- Interdisciplinary Research: QF@UniPD, ASI, space industries, detectors, fast electronics
- Synergy: Quantum measurements for HEP

D. Bacco et al. Nature Comm. 4, 2363 (2013), I. Capraro et al. Phys. Rev. Lett. 109, 200502 (2012) P. Villoresi et al. New J. Phys. 10 033038 (2008), C. Bonato et al. Phys. Rev. Lett. 101, 233603 (2008)





Obiettivo a lungo termine: creare una generazione di strumenti ultrasensibili che siano piu' precisi degli esistenti interferometri classici



## WHAT ELSE?

- nuove domande fondamentali al di la' (o al di qua) delle alte energie
- nuovi approcci sperimentali a questioni aperte (per es: assioni)
- nuovi concetti per esperimenti di altissima precisione
- nuove applicazioni di "calcolo" per lo studio di teorie di campo inaccessibili a calcolatori classici

