Devices in superposition

Valerio Scarani

Ongoing work with
Asaph Ho

Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld.

Von **Walther Gerlach** in Frankfurt a. M. und **Otto Stern** in Rostock.

Mit sieben Abbildungen. (Eingegangen am 1. März 1922.)

Vor kurzem[1]) wurde in dieser Zeitschrift eine Möglichkeit angegeben, die Frage der Richtungsquantelung im Magnetfeld experimentell zu entscheiden. In einer zweiten Mitteilung[2]) wurde gezeigt, daß das normale Silberatom ein magnetisches Moment hat. Durch die Fortsetzung dieser Untersuchungen, über die wir uns im folgenden zu berichten erlauben, wurde die *Richtungsquantelung im Magnetfeld als Tatsache erwiesen.*

Versuchsanordnung. Methode und Apparatur waren im allgemeinen die gleichen wie bei unseren früheren Versuchen. Im einzelnen wurden jedoch wesentliche Verbesserungen[3]) vorgenommen, welche wir in Ergänzung unserer früheren Angaben hier mitteilen. Der Silberatomstrahl kommt aus einem elektrisch geheizten Öfchen aus Schamotte mit einem Stahleinsatz, in dessen Deckel zum Austritt des Silberstrahls eine 1 mm² große kreisförmige Öffnung sich befand. Der Abstand zwischen Ofenöffnung und erster Strahlenblende wurde auf 2,5 cm vergrößert, wodurch ein Verkleben der Öffnung durch gelegentlich aus dem Öfchen spritzende Silbertröpfchen wie auch ein zu schnelles Zuwachsen durch das Niederschlagen des Atomstrahls verhindert wurde. Diese erste Blende ist annähernd kreisförmig und hat eine Fläche von $3 \cdot 10^{-3}$ mm². 3,3 cm hinter dieser Lochblende passiert der Silberstrahl eine zweite spaltförmige Blende von 0,8 mm

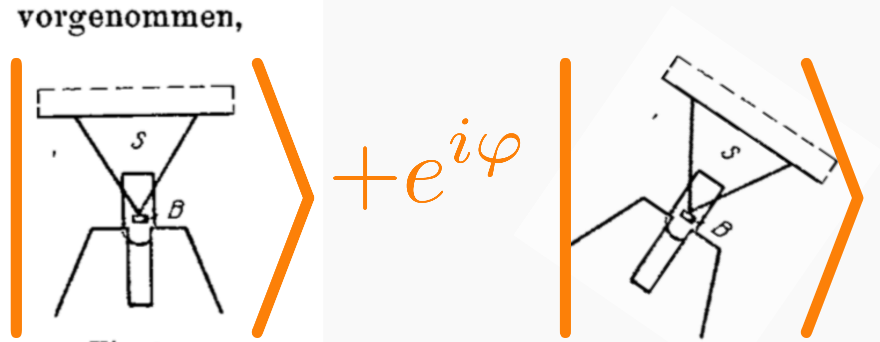
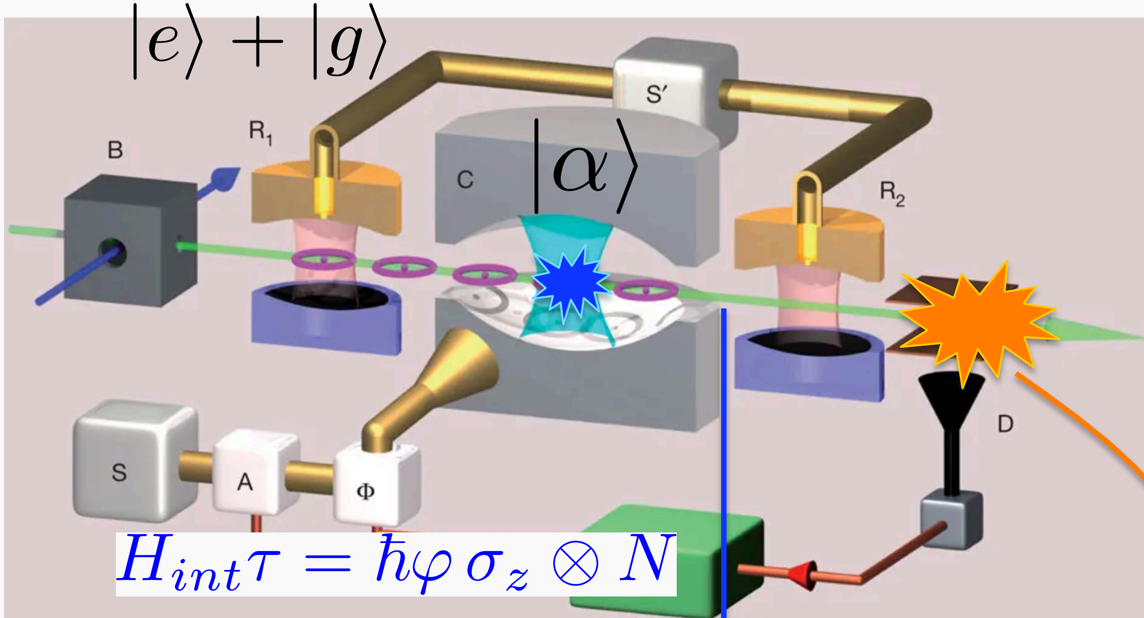


Fig. 1.

Let's start with familiar animals...

For instance, the kittens of Haroche and Raimond

$|e\rangle + |g\rangle$

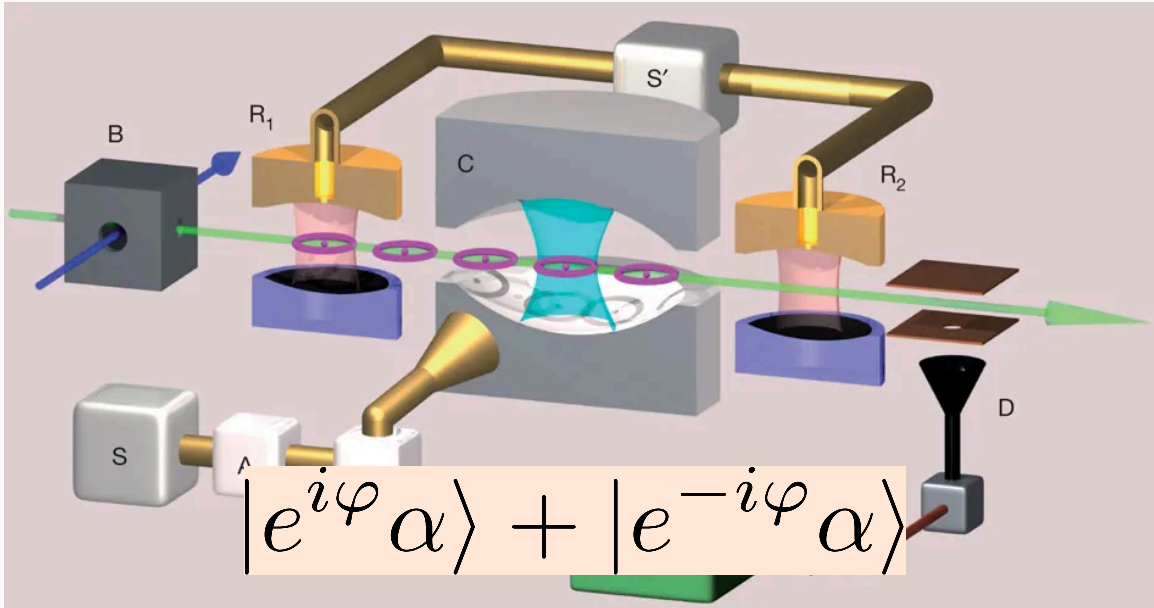


$$|e\rangle|e^{-i\varphi}\alpha\rangle + |g\rangle|e^{i\varphi}\alpha\rangle$$

$$|e^{i\varphi}\alpha\rangle + |e^{-i\varphi}\alpha\rangle$$

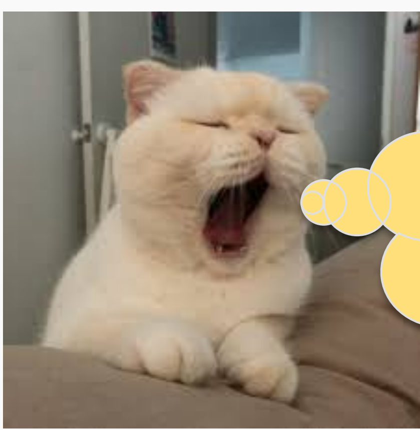

Nature
I'll be first author in follow-up PRLs
Permanent positiooon!!!
For audience below 45:
Marco Tardelli, World Cup final 1982

Our question



$$|e^{i\varphi}\alpha\rangle + |e^{-i\varphi}\alpha\rangle$$

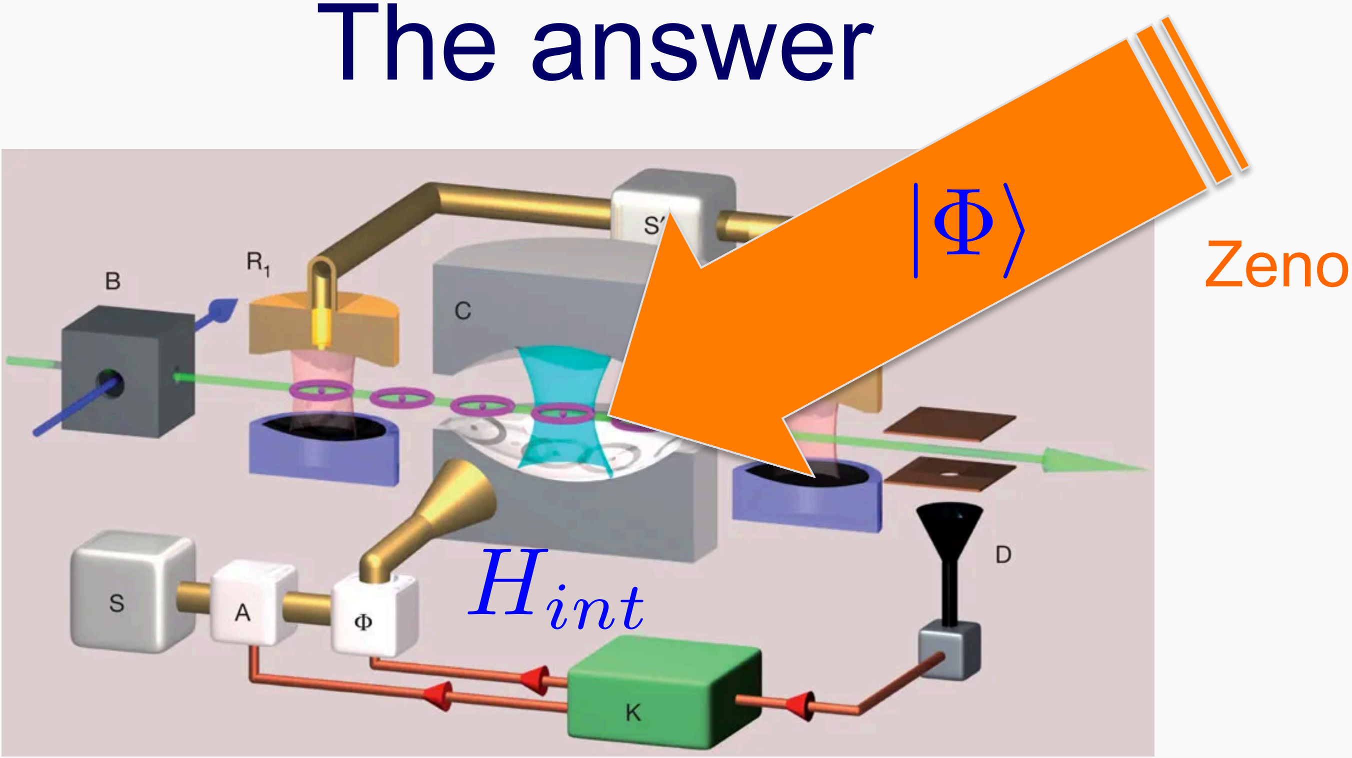
How does the next atom perceive this?



Just keep going by linearity lah [yawn]

What if we freeze it with a Zeno effect?

The answer



In the limit of strong Zeno freezing, the atom undergoes unitary evolution generated by the effective Hamiltonian

$$H_\Phi = \langle\Phi|H_{int}|\Phi\rangle$$

Sketch of proof

$$e^{-i(H_{int}+Z)\tau} \approx \left(e^{-iZ\frac{\tau}{N}} e^{-iH_{int}\frac{\tau}{N}}\right)^N$$

instantaneous $|\Phi\rangle\langle\Phi|\,,\ \mathbb{I}-|\Phi\rangle\langle\Phi|$

$$\approx \mathbb{I} - iH_{int}\frac{\tau}{N}$$

Unsuccessful freezing:

$$\mathrm{Prob}(\mathbb{I}-|\Phi\rangle\langle\Phi|) = O[(\tau/N)^2]$$

Is this going to be *interesting*?

For the example used so far, probably not:

$$H_{int}\tau = \hbar\varphi\,\sigma_z \otimes N$$

$$H_{\Phi}\tau = \hbar(\varphi\bar{n}_{\Phi})\,\sigma_z$$

Effective coupling determined only by the average photon number: no need to prepare a kitten for that.

But there are **other Hamiltonians**!

Next: examples where Zeno freezing gives something *qualitatively different*

[1] Toy Stern-Gerlach interaction

$$H_{int} = \hbar g \int d\hat{n}\, (\hat{n}\cdot\vec{p})(\hat{n}\cdot\vec{\sigma}) \otimes |\hat{n}\rangle\langle\hat{n}|$$

The eigenstate + (−) of σ_n gets a momentum kick in the direction +n (-n).

Gradient in direction n

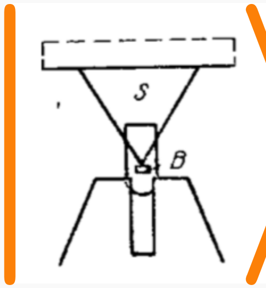
$$|\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\hat{x}\rangle + |\hat{y}\rangle)$$

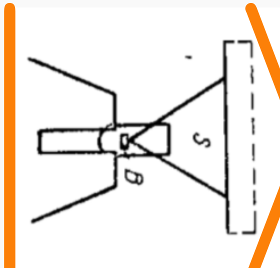
Of course, many other choices are possible

$$H_\Phi = \frac{\hbar g}{2}\left(p_x\sigma_x + p_y\sigma_y\right)$$

- Same as Φ = uniform superposition of all n
- Invariant by rotation in the x-y plane
- Already seen in: simultaneous pointer measurement of σ_x and σ_y [Barnea et al, PRA 96, 012111 (2017)]

[1] Toy S-G: remarks

$\Big|$ 

$\Big\rangle + e^{i\varphi} \Big|$ 

$\Big\rangle$

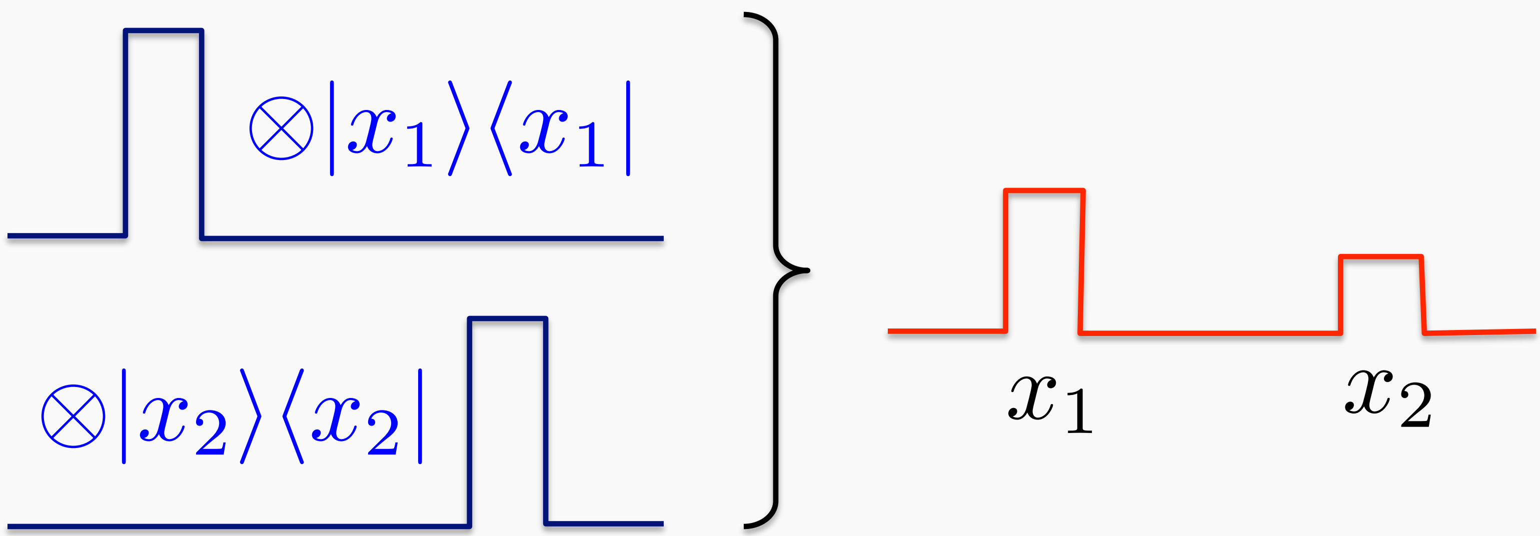
- H_Φ is the same for all φ: you don't see the phase between "classical" states (not restricted to SG).

- No preferred axis: any advantage in determining an unknown spin?
  Unfortunately, the scattered wave-function gives the same fidelity with the true direction as the trivial protocol:
  1. Choose an axis uniformly at random;
  2. Give the output as guess.

[2] One scatterer in superposition ("single-slit interference")

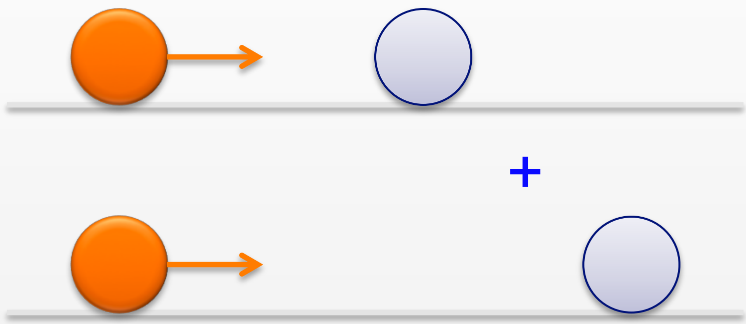
$$V_{int}(x) = \sum_j V(x - x_j) \otimes |x_j\rangle\langle x_j|$$

$$V_\Phi(x) = \sum_j |c_j|^2 V(x - x_j) \neq V(x - \bar{x}_j)$$

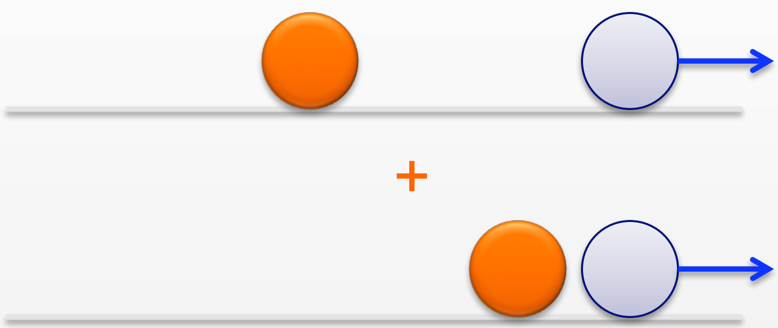


Parenthesis: What is known about scatterers in superposition (without Zeno)

Rohrlich, Neiman, Japha, Folman, PRL 96, 173601 (2006)
Schomerus, Noat, Dalibard, Beenakker, EPL 57, 651 (2002)



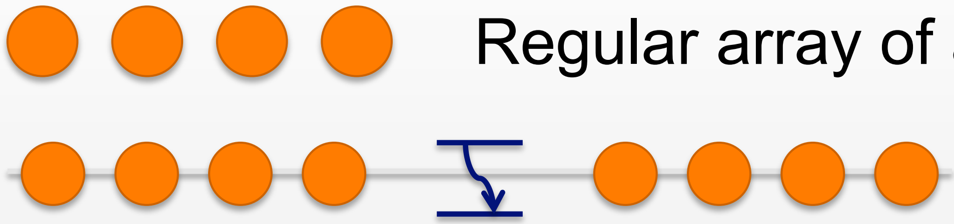
$$|p\rangle \qquad |a\rangle + |a'\rangle$$



$$|a\rangle + |a'\rangle \qquad |p\rangle$$

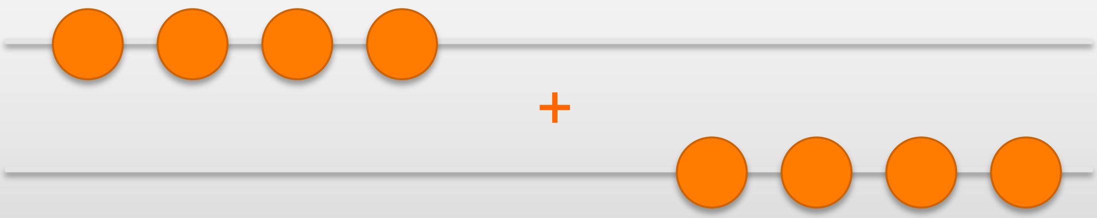
Same mass: coherence swapping.
Different mass: entanglement

[3] Cavity with quantum mirrors



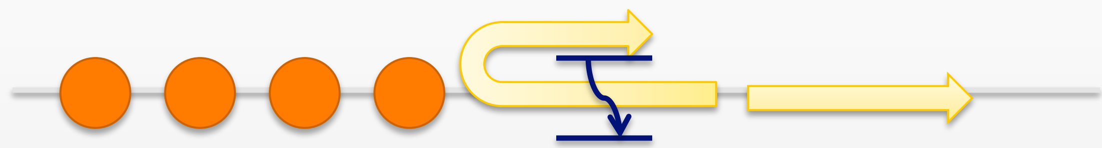
Regular array of atoms = Bragg mirror for light

Two arrays: cavity QED [Guimond et al. PRA 2015]



= cavity for QED?

Evolution and post-selection: NO



When you post-select, the photon is long gone

Zeno freezing: YES

… and you could play with asymmetries etc

Wrapping up

H_α

α = parameter, classical

- Haroche-Brune: intensity of light
- Stern-Gerlach: direction of the gradient
- Position of the scatterer, of the mirror

Treat α as a quantum state of the apparatus

$$H_{int} = \int d\alpha H_\alpha \otimes |\alpha\rangle\langle\alpha|$$

Zeno-freeze the apparatus in the state $|\Phi\rangle$

$$\boxed{H_\Phi} = \int d\alpha \, |\langle\alpha|\Phi\rangle|^2 \, H_\alpha$$

In general, H_Φ may be very different from any H_α

Not interesting case: $H_\alpha = \alpha^n K \implies H_\Phi = H_{\alpha(\Phi)}$

$$\alpha(\Phi) = [\langle\alpha^n\rangle_\Phi]^{1/n}$$

Also wanted:
Comments
Suggestions
Postdoc