

## Opis badań

Gorące pary metali alkalicznych, w odpowiednich warunkach zachowują się jak zespół spinów, których ustawieniem można manipulować przy pomocy impulsów laserowych. W chwili początkowej wszystkie atomy przeniesione są do określonego stanu struktury nadsubtelnej (poziom b na rys. 1(I)). Jest to stan logiczny  $|0\rangle$  pamięci kwantowej. Stanem logicznym  $|1\rangle$  pamięci jest stan, w którym jeden atom w całej komórce (bądź w obszarze wiązek) przeniesiony jest do innego stanu struktury nadsubtelnej (poziom c na rys. 1(III)).

Wzbudzenie w stanie  $|1\rangle$  jest rozłożone spójnie pomiędzy wszystkie atomy w komórce. Jeśli atomów tych jest  $N$ , to stan kolektywnego wzbudzenia zapiszemy jako:

$$|1\rangle = N^{-1/2} \sum_k |a\rangle_1 \otimes |a\rangle_2 \otimes \dots \otimes |a\rangle_{k-1} \otimes |b\rangle_k \otimes |a\rangle_{k+1} \otimes \dots \otimes |a\rangle_N$$

Dzięki rozłożeniu wzbudzenia stan ten jest bardzo odporny na zanik wzbudzenia, ponieważ dla dużych  $N$  przypadkowa zmiana stanu któregośkolwiek pojedynczego atomu praktycznie nie wpływa na stan logiczny pamięci<sup>1</sup>. Możliwe jest również uzyskanie stanów zawierających więcej niż jedno wzbudzenie atomowe rozłożone kolektywnie na całą komórkę. Dalej będę je określał jako stany logiczne  $|2\rangle, |3\rangle, \dots, |n\rangle$ .

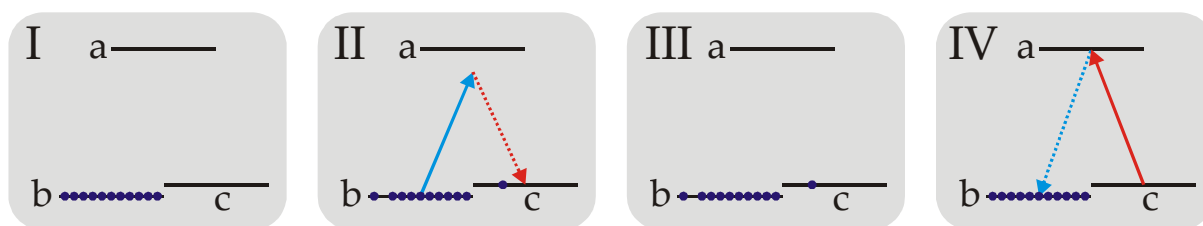
W komórce z atomami można również uzyskać superpozycje poszczególnych stanów logicznych np. postaci qubitów  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ .

Manipulacji stanem pamięci kwantowej można dokonywać na dwa sposoby. Po pierwsze, można wywołać Stokesowskie rozpraszanie Ramana, w wyniku którego pamięć ulega wzbudzeniu do któregoś ze stanów logicznych  $|n\rangle$  i jednocześnie rozpraszanych jest dokładnie tyle samo fotonów Stokesowskich (por. rys. 1(I–II))<sup>1</sup>. Drugim sposobem manipulacji jest wywołanie rozpraszania anty-Stokesowskiego, skutkiem którego stan logiczny pamięci wymienia się ze stanem pola elektromagnetycznego – jeśli przed rozpraszaniem pole zawiera  $n$  fotonów a pamięć jest w stanie  $|m\rangle$ , to po rozpraszaniu jest dokładnie odwrotnie<sup>1</sup>.

Gorące pary atomowe umożliwiają generowanie stanów o kontrolowanej liczbie fotonów, w sposób przedstawiony na rysunku 1. Najpierw wywołujemy Stokesowskie rozpraszanie Ramana, oświetlając ośrodek odpowiednim impulsem laserowym. Detekcja rozproszonych fotonów daje pełną informację o uzyskanym stanie atomów. Kluczowa jest możliwość powtarzania tego procesu aż do uzyskania pożądanego, z góry określonego stanu. W dalszej kolejności, w dowolnej chwili, przeprowadzamy rozpraszanie anty-Stokesowskie, skutkiem którego następuje wymiana wzbudzeń atomowych na pakiet fotonów. Uzyskujemy w ten sposób na żądanie impulsy światła o zadanym stanie kwantowym.

---

<sup>1</sup> Kozhekin, A. E.; Molmer, K. & Polzik, E., *Quantum memory for light*, Phys. Rev. A, 2000, **62**, 033809



**Rys. 1.** Generowanie pojedynczych fotonów przy pomocy rozpraszania Ramana w parach atomowych. Najpierw przepompowujemy wszystkie atomy do jednego ze stanów podstawowych, konkretnie b (I). Następnie oświetlamy je silnym impulsem laserowym, który może wywołać przejścia stokesowskie: atom przechodzi do stanu c przy jednoczesnym rozproszeniu fotonu o niższej częstotliwości (II). Wykrywając rozproszone fotony, dowiadujemy się o stanie atomów. Tak przygotowany stan atomowy możemy przechowywać przez pewien czas (III), aż nadejdzie stosowna chwila, kiedy to oświetlamy atomy silnym impulsem laserowym wywołującym przejście antystokesowskie ze stanu c do b przy jednoczesnej emisji fotonu o wyższej częstotliwości, którego możemy użyć (IV).

Na przestrzeni ostatnich kilku lat pojawiły się pierwsze doniesienia o obserwacji powyższych efektów<sup>2,3,4</sup>. Udało się także zademonstrować prostą komunikację kwantową pomiędzy pamięciami opartymi na parach atomowych<sup>5,6</sup>.

### Proponowane oryginalne badania

Długofalowym celem proponowanych badań jest wypracowanie zupełnie nowej implementacji liniowo-optycznego komputera kwantowego, czyli układu dającego możliwość produkowania wielu pojedynczych wzbudzeń bozonowych (czyli wzbudzeń atomowych bądź fotonów) i wykonywania na nich dowolnych operacji liniowych.

Warto przypomnieć, że od kilku lat znane są i intensywnie optymalizowane sposoby dokonywania dowolnej operacji kwantowej za pomocą operacji liniowych i detektorów<sup>2</sup>. Badania te mają jak dotąd charakter prawie wyłącznie teoretyczny, ponieważ nie dysponujemy dobrymi układami

<sup>2</sup> Thompson, J. K.; Simon, J.; Loh, H. & Vuletic, V., *A High-Brightness Source of Narrowband, Identical-Photon Pairs*, Science, 2006, **313**, 74.

<sup>3</sup> Chou, C. W.; Polyakov, S. V.; Kuzmich, A. & Kimble, H. J., *Single-Photon Generation from Stored Excitation in an Atomic Ensemble*, Phys. Rev. Lett., 2004, **92**, 213601.

<sup>4</sup> van der Wal, C. H.; Eisaman, M. D.; André, A.; Walsworth, R. L.; Phillips, D. F.; Zibrov, A. S. & Lukin, M. D. *Atomic Memory for Correlated Photon States*, Science, 2003, **301**, 196.

<sup>5</sup> Chou, W., C.; de Riedmatten; H.; Felinto; D.; Polyakov; V., S.; van Enk; J., S.; Kimble & J., H. *Measurement-induced entanglement for excitation stored in remote atomic ensembles*, Nature, 2005, **438**, 828-832.

<sup>6</sup> Eisaman, M. D.; Andre, A.; Massou, F.; Fleischhauer, M.; Zibrov, A. S. & Lukin, M. D., *Electromagnetically induced transparency with tunable single-photon pulses*, Nature, 2005, **438**, 837.

dającymi możliwość prostego wykonania dowolnych operacji tego typu operacji na więcej niż kilku fotonach.

Najbardziej złożone eksperymenty z pojedynczymi fotonami są w stanie dostarczyć na raz do sześciu cząstek, dodatkowo szybko „uciekających”. Z tego powodu operacje, jakie do tej pory zrealizowano przy wykorzystaniu optyki liniowej są bardzo proste, sprowadzają się do różnych realizacji jednej bramki C-NOT<sup>7</sup>.

Zastosowanie wielomodowej pamięci kwantowej mogłoby radykalnie zmienić sytuację. Wygenerowanie w niej kilku pojedynczych wzbudzeń, a następnie wykonanie na nich szeregu operacji liniowych przeplatanych detekcją otrzymanego za każdym razem stanu pola elektromagnetycznego jest bowiem równoważne liniowo-optycznemu komputerowi kwantowemu.

Nasze niedawne badania teoretyczne<sup>8</sup> wykazały, że w komórce z parami atomowymi można wzbudzić nawet kilkanaście niezależnych konfiguracji spinowych, z których każda może być wykorzystana jako osobna pamięć kwantowa. Dodatkowo, nasze wyniki wskazują na możliwość dokonywania operacji liniowych na zespole uzyskanych wzbudzeń za pomocą odpowiednio ukształtowanych impulsów laserowych.

Co ważne, wzbudzenia żyją na tyle długo, że można łatwo dostosować przebieg dalszych etapów eksperymentu do otrzymanej ich konfiguracji. Wypracowanie schematów umożliwiających dokonywanie na nich dowolnych operacji kwantowych dałoby możliwość przeprowadzenia dużo bardziej złożonych operacji kwantowych niż realizowane dotychczas. W szczególności można by przygotowywać złożone stany kwantowe o specjalnych właściwościach, zoptymalizowanych pod kątem komunikacji kwantowej czy ultraprecyzyjnych pomiarów. Można by także pokusić się o demonstrację kwantowych algorytmów obliczeniowych.

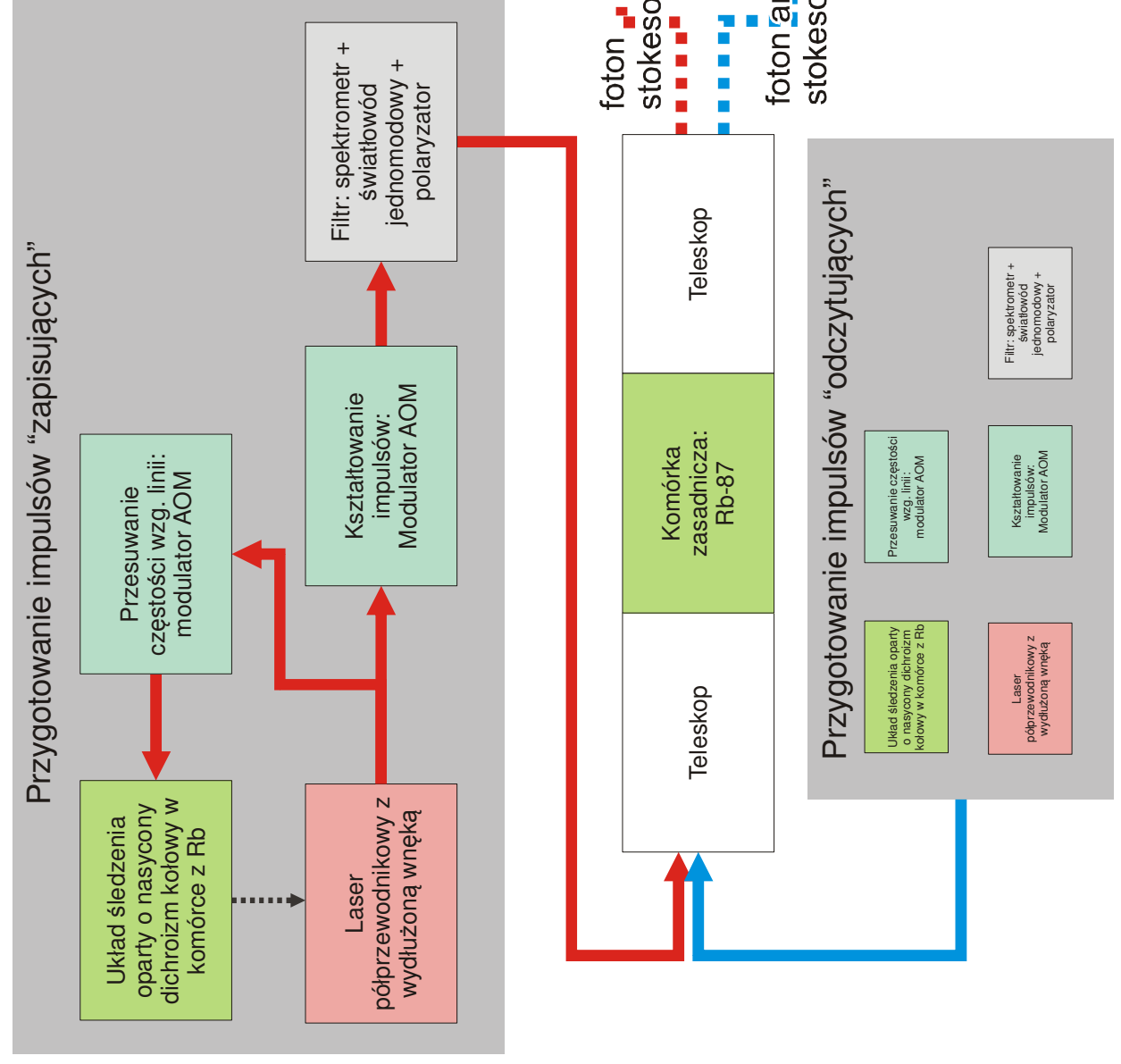
Aparatura, którą chciałbym zakupić z dotacji ma docelowo posłużyć właśnie obserwacji wielodomowego wzbudzenia par atomowych i dokonywaniu na nich operacji liniowych. Nawet realizacja najprostszych tego typu schematów będzie niezwykle ekscytująca.

---

<sup>7</sup> O'Brien, J. L.; Pryde, G. J.; White, A. G.; Ralph, T. C. & Branning, D.; *Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate*, Nature, 2003, **426**, 264-267

<sup>8</sup> Wasilewski, W. & Raymer, M. G., *Pairwise entanglement and readout of atomic-ensemble and optical wave-packet modes in traveling-wave Raman interactions* Phys. Rev. A, 2006, **73**, 063816.

**Rys. 2.** Schemat układu doświadczalnego do badania generacji pojedynczych fotonów w parach atomowych



**I. Informacje zadaniach badawczych planowanych do realizacji w pierwszej kolejności, przewidywanym terminie ich zakończenia, spodziewanych wynikach, osobach odpowiedzialnych za prowadzenie badań.**

**1. Zadanie badawcze:** Budowa układu generacji impulsów zapisujących i odczytujących

**Przewidywany termin ukończenia:** Październik 2008.

Schemat układu doświadczalnego, jaki zamierzam zbudować przedstawia rysunek 2. Składa się on z 3 zasadniczych bloków: generacji impulsów pompujących, komórki z układem dopasowania optycznego i bloku detekcji.

Pierwszym etapem będzie budowa układu generacji impulsów zapisujących (pobudzających rozpraszanie Stokesowskie) i odczytujących (pobudzających rozpraszanie anty-Stokesowskie).

Wymaga to dobudowania do fabrycznych laserów półprzewodnikowych układów śledzenia częstości opartych o obserwację nasyconego dichroizmu kołowego w komórkach z parami rubidu. Dodatkowo, wiązka trafiająca do układu śledzenia będzie przesunięta w częstościach za pomocą modulatora akustooptycznego, żeby zapewnić odpowiednie odstrojenie impulsów zapisujących/odczytujących. Wiązka z ustabilizowanego lasera będzie modulowana, aby uzyskać odpowiedni kształt impulsu, a następnie filtrowana przestrzennie (światłowodem jednodomowym) i spektralnie (spektrometrem).

**2. Zadanie badawcze:** Obserwacja emisji skorelowanych kątowno par fotonów za pomocą kamery CCD

**Przewidywany termin ukończenia:** Styczeń 2009.

Po zakończeniu pierwszego etapu będzie możliwe przeprowadzenie testów polegających na obserwacji makroskopowego sygnału rozpraszania Ramana za pomocą kamery CCD. W szczególności planuję dokonać pomiaru korelacji przestrzennych i fluktuacji natężeniowych wiązek rozproszonego promieniowania, który potwierdzi wielodomowy charakter rozpraszania w komórce.

Wykonanie tego zadania będzie wymagało modelowania numerycznego procesu rozpraszania w komórce z uwzględnieniem strat. Wynikiem modelowania będą wielkości mierzone doświadczalnie.

**Przewidywane wyniki:** oryginalna publikacja nt. korelacji przestrzennych w rozpraszaniu Ramana.

**3. Zadanie badawcze:** Pomiary opóźnionego mieszania czterech fal w parach atomowych w reżimie generacji pojedynczych fotonów

**Przewidywany termin ukończenia:** Czerwiec 2009.

Drugim etapem będzie obserwacja pojedynczych fotonów Stokesowskich i anty-Stokesowskich, co wymagać będzie budowy bardzo dokładnego układu odfiltrowania tych fotonów od impulsów zapisujących i odczytujących. Wykorzystuje się do tego trzy środki: polaryzatory, komórki z izotopowo czystym rubidem Rb-85 oraz filtry interferencyjne Fabrego-Perota.

Ze względu na efekt interferencji pomiędzy przejściami Ramanowskimi startującymi z różnych składowych magnetycznych struktury nadsubtelnej, przy liniowo spolaryzowanych impulsach wymuszających fotony rozproszone mają prostopadłą do nich polaryzację. Umożliwia to stłumienie wiązek wymuszających o czynnik rzędu  $10^5$ .

Zazwyczaj staramy się dobrać częstotliwości impulsów pompujących i odczytujących w ten sposób, aby były one w rezonansie z przejściami w Rb-85. Ze względu na odmienną strukturę nadsubtelną tego izotopu rozproszone fotony, których częstość różni się o 6.8 GHz od impulsów wymuszających, nie są wówczas w rezonansie z przejściami Rb-87. W takim przypadku wystarczy za komórką zasadniczą umieścić komórkę z Rb-85, która zaabsorbuje impulsy wymuszające.

Niekiedy używanie tak określonych częstotliwości impulsów wymuszających nie jest pożądane, ponieważ ustala to jednocześnie różnicę prędkości grupowych pomiędzy impulsami wymuszającymi a fotonami rozproszonymi. Tymczasem różnica ta wpływa istotnie na wielodomowy charakter rozpraszania. Z tego powodu stosuje się mniej wygodny, zaś bardziej uniwersalny środek stłumienia impulsów wymuszających, jakim są konfokalne interferometry F-P dostrojone do fotonów rozproszonych.

Odfiltrowanie pojedynczych fotonów rozproszonych od impulsów wymuszających wymaga osiągnięcia tłumienia rzędu  $10^{12}$ . Jest to zadanie trudne, ale z pewnością wykonalne, w gruncie rzeczy stanowi powtórzenie opublikowanej pracy<sup>9</sup>.

**4. Zadanie badawcze:** Pomiary czasoprzestrzenne wygenerowanych pojedynczych fotonów

**Przewidywany termin ukończenia:** Październik 2009.

---

<sup>9</sup> Eisaman, M. D.; Childress, L.; André, A.; Massou, F.; Zibrov, A. S. & Lukin, M. D., *Shaping Quantum Pulses of Light Via Coherent Atomic Memory*, Phys. Rev. Lett., 2004, **93**, 233602.

Trzecim etapem będzie weryfikacja korelacji przestrzennych i wielomodowego charakteru rozpraszania na poziomie pojedynczych fotonów.

Proces rozpraszania Stokesowskiego i następującego po nim rozpraszania anty-Stokesowskiego w sumie składają się na doskonale znane z optyki nieliniowej mieszanie czterech fal. Podobnie jak w klasycznym przypadku, kiedy wszystkie 4 fale mieszają się równocześnie, tak i w przypadku opóźnionego wykonania rozpraszania anty-Stokesowskiego, konieczne jest zachowanie całkowitego pędu w tym procesie. Wektory falowe impulsów wymuszających muszą się zsumować do wektorów falowych rozproszonych pojedynczych fotonów.

Po procesie rozpraszania Stokesowskiego możemy zarejestrować pęd rozproszonego fotonu i zależnie od jego wartości komórkę oświetlić różnymi impulsami odczytującymi. Dzięki temu byłoby możliwe np. uzyskanie zawsze identycznych fotonów anty-Stokesowskich niezależnie od losowego charakteru rozpraszania. Jest to istotne novum w porównaniu z generacją par fotonów w kryształach nieliniowych. Wykluczenie możliwości uzyskania w jednym impulsie więcej niż jednego fotonu wymusza ograniczenie natężenia impulsów zapisujących tak, aby prawdopodobieństwo rozproszenia fotonu Stokesowskiego było dużo mniejsze od jedności. Wykorzystanie różnych możliwych kierunków tego rozproszenia równoważne jest zastosowaniu wielu źródeł i podniesieniu sprawności generacji fotonów.

**Przewidywane wyniki:** Obserwacja i przykładowe wykorzystanie efektów równoległego rozpraszania do wielu modów. Oryginalna publikacja na ten temat.

**5. Zadanie badawcze:** Generacja wielomodowych, kontrolowanych stanów pojedynczych fotonów

**Przewidywany termin ukończenia:** Styczeń 2010.

Najdalszym etapem badań, jaki można obecnie zaplanować, jest demonstracja możliwości wygenerowania kontrolowanych wielomodowych stanów pola elektromagnetycznego i wykonywania operacji liniowych wewnątrz komórki przez odpowiednie czasoprzestrzenne ukształtowanie impulsów odczytujących.

Stanowi to w istocie rozwinięcie idei prezentowanych w poprzednim zadaniu badawczym na przykład, kiedy po etapie rozpraszania Stokesowskiego w komórce powstaną dwa lub więcej wzbudzenia w różnych modach. Z jednej strony można by wówczas wyprodukować z takiej komórki dwa lub więcej pojedynczych fotonów, które można by

wykorzystać do liniowych operacji kwantowych, tj. wysłać na sieć płytek światłodziących i detektorów. Niemniej jednak możliwe jest również takie dobranie impulsów odczytujących, aby wywoływały one przeniesienie jedynie części polaryzacji atomowej, po „kawałku” z różnych wzbudzonych modów, do jednego modu pola optycznego. Odpowiada to skierowaniu pojedynczych fotonów na płytkę światłodziącą, tyle że realizowaną w odmienny sposób. Podejście to ma szereg zalet, mni. możliwość zastosowania różnych konfiguracji płytek „w locie” zależnie od poprzednich wyników eksperymentu. Skądinąd wiadomo, że umożliwia to uzyskanie praktycznie dowolnych stanów kwantowych a także wykonywanie operacji kwantowych. Wnioskodawca projektował i optymalizował przykładowe sieci optyczne tego typu<sup>10</sup>.

Uzyskanie w zasadzie jakichkolwiek wyników na tym etapie oznacza otwarcie nowych możliwości wykonywania operacji kwantowych i samo w sobie będzie niezwykle ekscytujące.

**Przewidywane wyniki:** publikacja nt. możliwości wykorzystania wielomodowego charakteru procesu rozpraszania do równoległego przetwarzania wielu modów za pomocą operacji liniowych.

---

<sup>10</sup> Wasilewski, W. & Banaszek, K., *Protecting an optical qubit against photon loss*, Phys. Rev. A, 2007, **75**, 042316.