

## 2. Simulators

Author : [Gwonhak Lee](mailto:gwonhak@gmail.com) (gwonhak@gmail.com)

Qiskit Aer에서는 양자회로의 CPU (또는 GPU) 기반 시뮬레이션 backend를 제공합니다. 대표적으로 Aer에서 제공하는 Simulation Backend는 다음과 같습니다.

이름	설명	결과
qasm_simulator	이상적이거나 노이즈가 있는 양자 프로세서를 emulation하여 <b>measurement count</b> 를 반환합니다.	Counts
statevector_simulator	이상적인 시뮬레이션을 수행하여 <b>최종 양자상태</b> 를 반환합니다.	Final state (Vector)
unitary_simulator	이상적인 양자회로의 최종 <b>Unitary Matrix</b> 를 반환합니다.	Unitary Matrix

(GPU 기반 Aer는 Linux 운영체제에서만 가능하므로 본 튜토리얼에서는 포함하지 않습니다.)

### 0. 필요한 요소 불러오기

```
In [13]: import numpy as np

from qiskit.providers.aer import AerProvider
from qiskit import QuantumRegister, ClassicalRegister, QuantumCircuit
from qiskit.circuit import Parameter
from qiskit.tools.visualization import plot_histogram
import qiskit.providers.aer.noise as noise
from qiskit.quantum_info import hellinger_fidelity
```

#### 1-1. Ideal QASM Simulation

qasm simulator는 양자 프로세서를 emulation하여 measurement count를 반환합니다. 주어진 실험 횟수(shots)에 대해 결과의 빈도수를 확인할 수 있습니다.

이번 실험에서는 3개의 qubit에 대해 다음과 같은 연산을 수행하는 회로를 구현하였습니다.

$$\begin{aligned}
 U(\tau) &= \exp(-i\tau X_0 X_1 X_2) \\
 &= \cos(\tau) I - i \sin(\tau) X_0 X_1 X_2
 \end{aligned}$$

- **Binding Parameters** : 다음과 같이 파라미터 Tau를 선언하고, 이를 회로에 적용시킨 뒤 시뮬레이션 단계에서 tau에 적당한 값을 지정할 수 있습니다.

```
In [14]: qr = QuantumRegister(3)
cr = ClassicalRegister(3)
qc = QuantumCircuit(qr, cr)

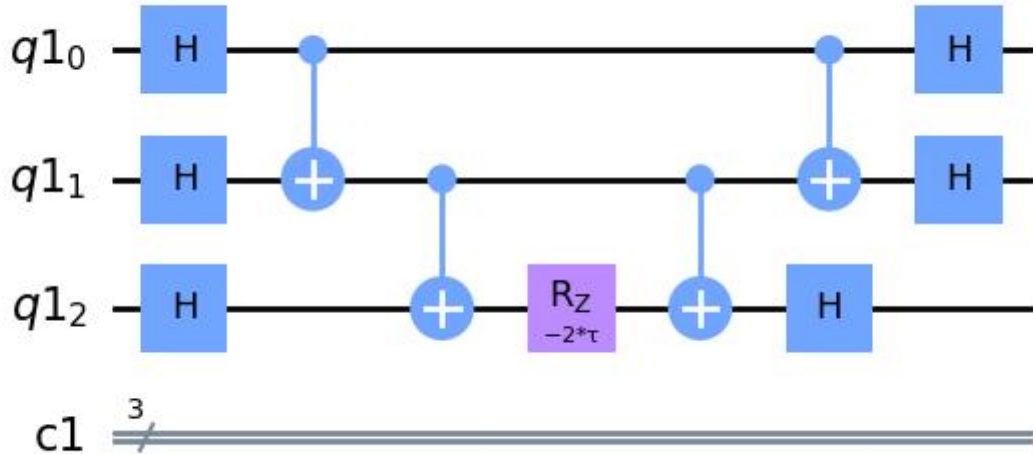
tau = Parameter('τ')

qc.h(qr)
qc.cx(qr[0], qr[1])
qc.cx(qr[1], qr[2])
```

```
qc.rz(-2 * tau, qr[2])

qc.cx(qr[1], qr[2])
qc.cx(qr[0], qr[1])
qc.h(qr)
qc.draw('mpl')
```

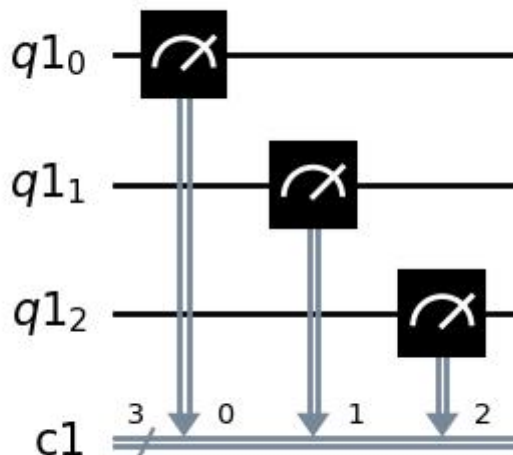
Out[14]:



**composing circuit**: 다음과 같이 compose method를 통해 측정 회로 meas 를 따로 정의하고, 앞서 정의한 회로 qc 와 병합한 회로 qasm\_qc 를 생성 할 수 있습니다.

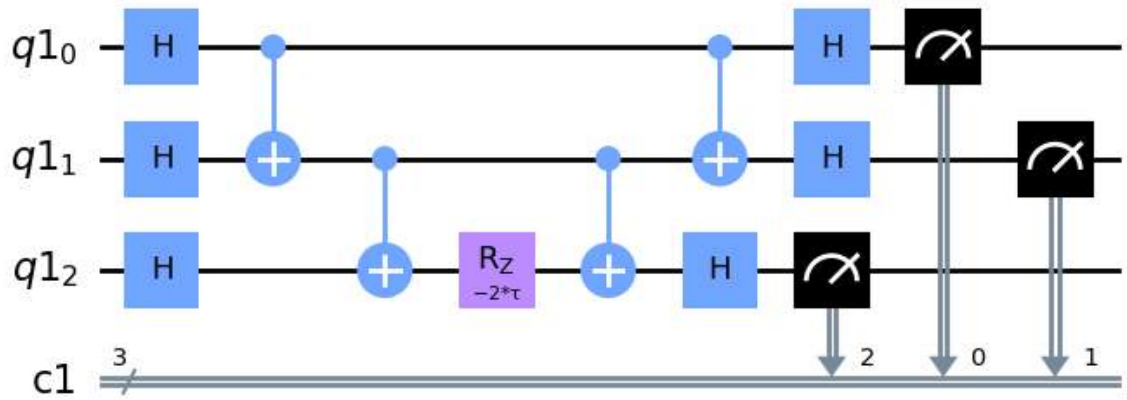
```
In [15]: meas = QuantumCircuit(qr, cr)
meas.measure(qr, cr)
meas.draw('mpl')
```

Out[15]:



```
In [16]: qasm_qc = qc.compose(meas)
qasm_qc.draw('mpl')
```

Out[16]:



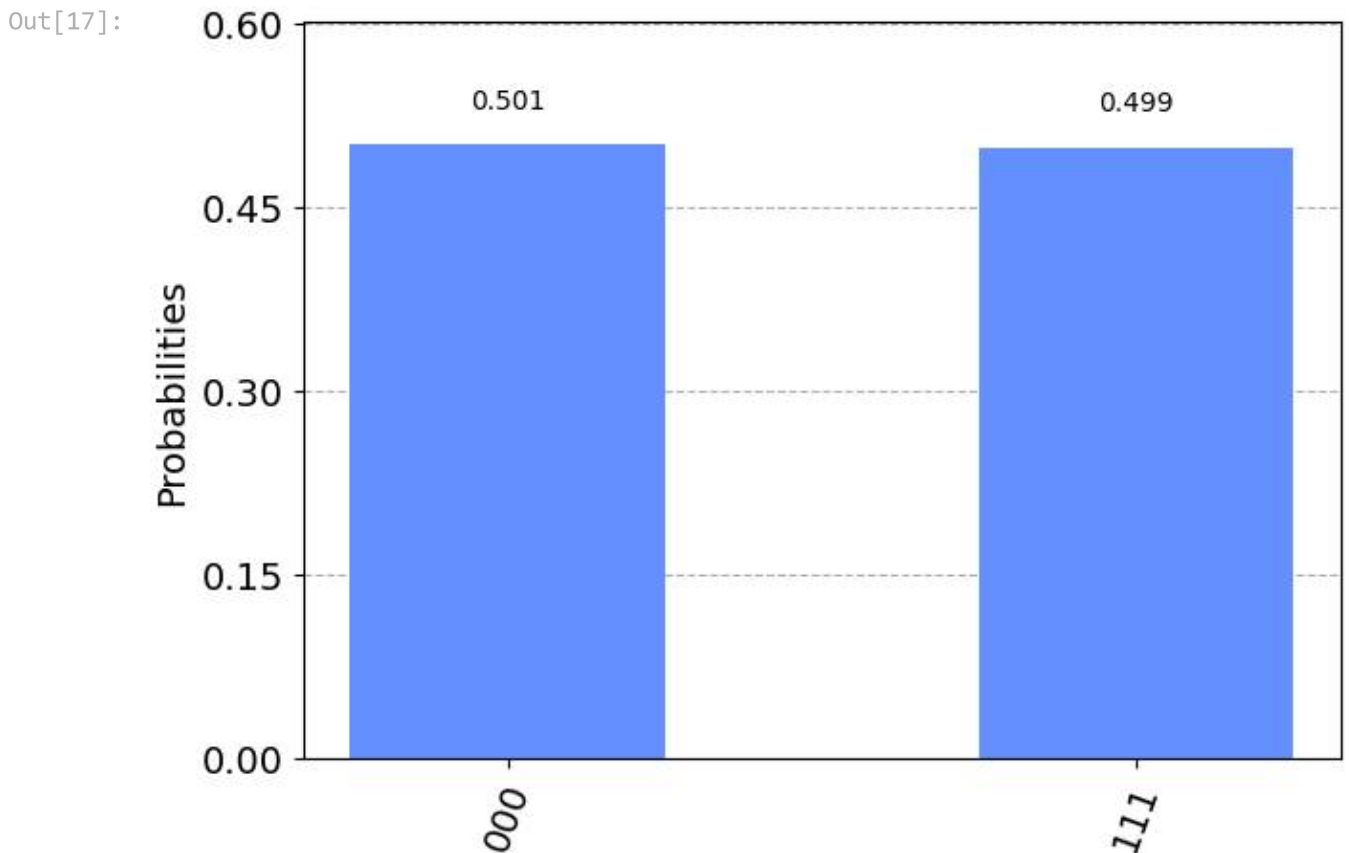
이제 tau에  $\pi/4$  를 대입한 뒤 qasm simulation을 수행합니다.

```
In [17]: bind_qasm_qc = qasm_qc.bind_parameters({tau: np.pi/4})

qasm_backend = AerProvider().get_backend('qasm_simulator')
job_qasm = qasm_backend.run(bind_qasm_qc, shots=4096)
counts_qasm = job_qasm.result().get_counts()

print(counts_qasm)
plot_histogram(counts_qasm)
```

```
{'000': 2054, '111': 2042}
```



## 1-2. Noisy QASM Simulation

다음으로, QASM Simulation에 depolarization error를 추가하는 간단한 예시를 살펴보겠습니다.

### Depolarization Error

$$E(\rho) = (1 - \lambda)\rho + \lambda \text{Tr}[\rho] \frac{I}{2^n}$$

- If  $\lambda = 0$  this is the identity channel.  $E(\rho) = \rho$
- If  $\lambda = 1$  this is a completely depolarizing channel.  $E(\rho) = I / 2^n$
- If  $\lambda = 4^n / (4^n - 1)$  this is a uniform Pauli error channel:

$$E(\rho) = \sum_j P_j \rho P_j / (4^n - 1) \text{ for all } P_j \neq I.$$

In [18]:

```
# Error probabilities
prob_1 = 0.001 # 1-qubit gate
prob_2 = 0.01  # 2-qubit gate

# Depolarizing quantum errors
error_1 = noise.depolarizing_error(prob_1, num_qubits=1)
error_2 = noise.depolarizing_error(prob_2, num_qubits=2)

# Add errors to noise model
noise_model = noise.NoiseModel()
noise_model.add_all_qubit_quantum_error(error_1, ['h', 'rz'])
noise_model.add_all_qubit_quantum_error(error_2, ['cx'])
```

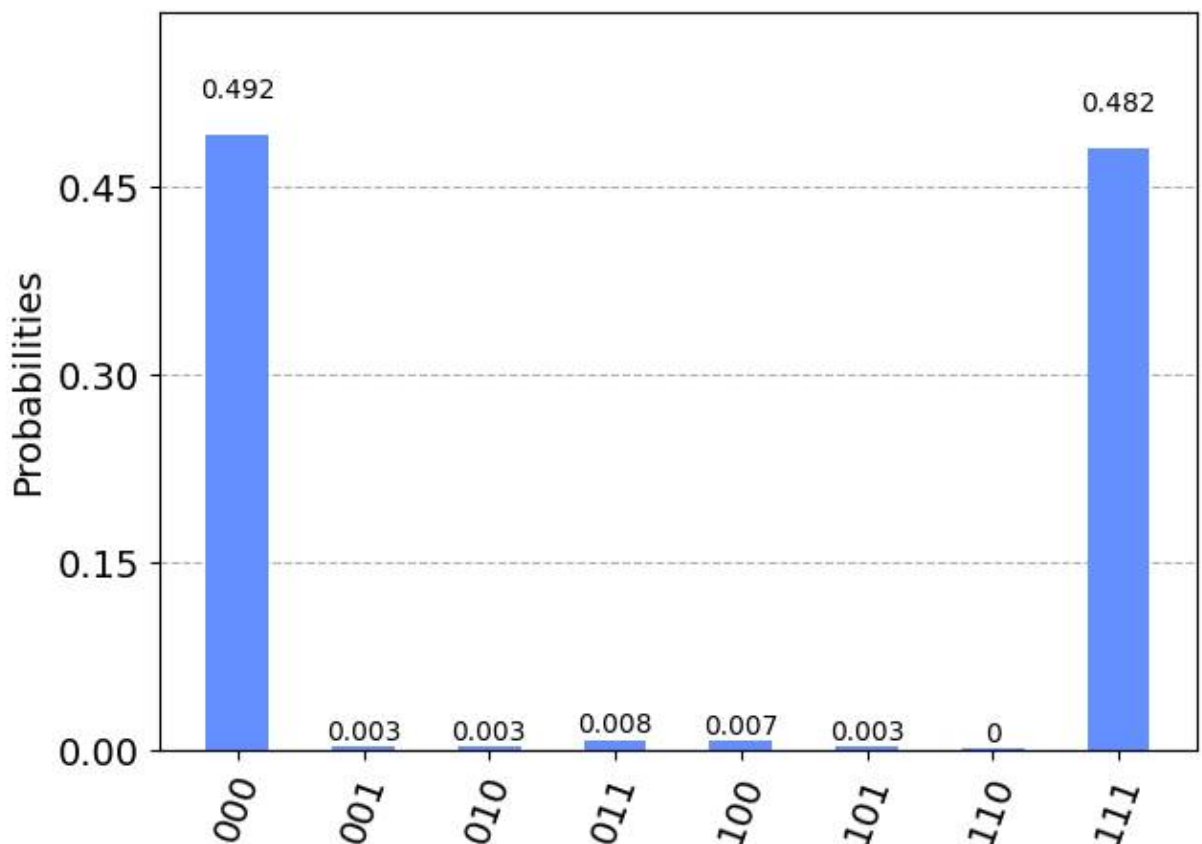
생성한 노이즈모델과 함께 qasm simulation을 수행합니다.

In [19]:

```
job_qasm_noisy = qasm_backend.run(bind_qasm_qc, shots=4096, noise_model=noise_model)
counts_qasm_noisy = job_qasm_noisy.result().get_counts()
print(counts_qasm_noisy)
plot_histogram(counts_qasm_noisy)
```

```
{'000': 2015, '111': 1974, '100': 29, '010': 14, '011': 33, '001': 14, '101': 13, '110': 4}
```

Out[19]:



Depolarization noise model을 적용하였을때 Ideal한 case에서 관측되지 않는 결과들과 함께 오차가 발생했음을 확인할 수 있습니다.

Ideal case와 비교하기 위해 fidelity를 계산합니다.

$$H(P, Q) = \left( \sum_i \sqrt{p_i q_i} \right)^2$$

```
In [20]: print(hellinger_fidelity(counts_qasm, counts_qasm_noisy))
```

0.9738638048244478

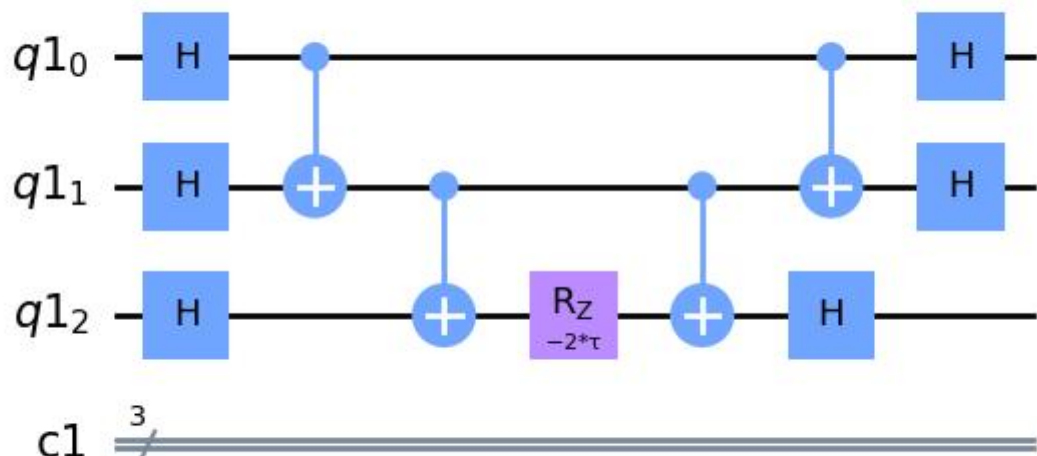
## 2. Statevector Simulation

다음으로, 최종 양자상태를 확인할 수 있는 statevector simulation을 수행합니다.

- statevector simulation을 수행하는 회로에는 측정 gate를 배제한 다음 회로를 사용합니다.

```
In [21]: qc.draw('mpl')
```

Out[21]:



```
In [22]: bind_qc = qc.bind_parameters({tau: np.pi/4})
sv_backend = AerProvider().get_backend('statevector_simulator')
job_sv = sv_backend.run(bind_qc)
final_sv = job_sv.result().get_statevector()

np.set_printoptions(suppress=True)
print(final_sv)
```

```
[ 0.70710678-0.j      -0.      +0.j      -0.      +0.j
 -0.      +0.j      -0.      +0.j      -0.      -0.j
 -0.      -0.j       0.      +0.70710678j]
```

양자상태가 numpy vector 형태로 주어진 것을 확인할 수 있습니다.

## 2. Statevector Simulation

다음으로, 회로의 unitary 행렬을 확인할 수 있는 unitary simulation을 수행합니다.

- unitary simulation을 수행하는 회로에는 측정 gate를 배제한 회로를 사용합니다.

In [23]:

```
unitary_backend = AerProvider().get_backend('unitary_simulator')
job_unitary = unitary_backend.run(bind_qc)
unitary = job_unitary.result().get_unitary()
print(unitary)
```

```
[[ 0.70710678-0.j          0.          +0.j          -0.          +0.j
  -0.          +0.j          -0.          +0.j          -0.          -0.j
  -0.          +0.j          0.          +0.70710678j]
 [-0.          +0.j          0.70710678-0.j          -0.          +0.j
  -0.          +0.j          -0.          -0.j          -0.          +0.j
   0.          +0.70710678j -0.          -0.j          ]
 [-0.          +0.j          -0.          +0.j          0.70710678-0.j
   0.          +0.j          -0.          +0.j          0.          +0.70710678j
  -0.          +0.j          -0.          -0.j          ]
 [-0.          +0.j          -0.          +0.j          0.          +0.j
   0.70710678-0.j          0.          +0.70710678j -0.          +0.j
  -0.          -0.j          0.          +0.j          ]
 [-0.          +0.j          -0.          -0.j          -0.          +0.j
   0.          +0.70710678j 0.70710678-0.j          0.          +0.j
  -0.          +0.j          -0.          +0.j          ]
 [-0.          -0.j          -0.          +0.j          0.          +0.70710678j
  -0.          +0.j          0.          +0.j          0.70710678-0.j
  -0.          +0.j          -0.          +0.j          ]
 [-0.          -0.j          0.          +0.70710678j -0.          +0.j
  -0.          -0.j          -0.          +0.j          -0.          +0.j
   0.70710678-0.j          -0.          +0.j          ]
 [ 0.          +0.70710678j -0.          +0.j          -0.          -0.j
  -0.          +0.j          -0.          +0.j          -0.          +0.j
   0.          +0.j          0.70710678-0.j          ]]
```

In [24]:

```
for idx, x in np.ndenumerate(unitary):
    if abs(x) > 1e-7:
        print(f"{idx}, {x.real if abs(x.real) > 1e-7 else 0.0} {' + j' + str(x.imag)}
```

```
(0, 0), 0.7071067811865477 0.0
(0, 7), 0.0 + j0.7071067811865479
(1, 1), 0.7071067811865477 0.0
(1, 6), 0.0 + j0.7071067811865479
(2, 2), 0.7071067811865477 0.0
(2, 5), 0.0 + j0.7071067811865479
(3, 3), 0.7071067811865477 0.0
(3, 4), 0.0 + j0.7071067811865479
(4, 3), 0.0 + j0.7071067811865479
(4, 4), 0.7071067811865477 0.0
(5, 2), 0.0 + j0.7071067811865479
(5, 5), 0.7071067811865477 0.0
(6, 1), 0.0 + j0.7071067811865479
(6, 6), 0.7071067811865477 0.0
(7, 0), 0.0 + j0.7071067811865479
(7, 7), 0.7071067811865479 0.0
```