Post-Quantum Anonymity of Kyber

Varun Maram
Applied Cryptography Group
ETH Zurich

Joint work with Keita Xagawa
[Full version of paper: https://eprint.iacr.org/2022/1696.pdf]

IND-CCA Security
and

Post-Quantum Anonymity of Kyber

Varun Maram
Applied Cryptography Group
ETH Zurich

APPLIED CRYPTO GROUP

Joint work with Keita Xagawa

[Full version of paper: https://eprint.iacr.org/2022/1696.pdf]

Background

PQC Standardization Process: Third Round Candidate Announcement

NIST is announcing the third round finalists of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process. More details are included in NISTIR 8309.

July 22, 2020

It has been almost a year and a half since the second round of the NIST PQC Standardization Process began. After careful consideration, NIST would like to announce the candidates that will be moving on to the third round.

Third Round Finalists	Alternate Candidates
Public-Key Encryption/KEMs	Public-Key Encryption/KEMs
Classic McEliece	BIKE
CRYSTALS-KYBER	FrodoKEM
NTRU	HQC
SABER	NTRU Prime
	SIKE

ORGANIZATIONS

Information Technology Laboratory

Computer Security Division

Cryptographic Technology Group

Background

PQC Standardization Process: Third Round Candidate Announcement

NIST is announcing the third round finalists of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process. More details are included in NISTIR 8309.

July 22, 2020

It has been almost a year and a half since the second round of the NIST PQC Standardization Process began. After careful consideration, NIST would like to announce the candidates that will be moving on to the third round.

Third Round Finalists	Alternate Candidates
Public-Key Encryption/KEMs	Public-Key Encryption/KEMs
Classic McEliece	BIKE
CRYSTALS-KYBER	FrodoKEM
NTRU	HQC
SABER	NTRU Prime
	SIKE

ORGANIZATIONS

Information Technology Laboratory

Computer Security Division

Cryptographic Technology Group

4.A.2 Security Definition for Encryption/Key-Establishment

NIST intends to standardize one or more schemes that enable "semantically secure" encryption or key encapsulation with respect to adaptive chosen ciphertext attack, for general use. This property is generally denoted *IND-CCA2 security* in academic literature.

Background

Anonymous, Robust Post-quantum Public Key Encryption

Paul Grubbs[1], Varun Maram[2(✉)], and Kenneth G. Paterson[2]

[1] University of Michigan, Ann Arbor, USA
paulgrub@umich.edu
[2] Department of Computer Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland
{vmaram,kenny.paterson}@inf.ethz.ch [Eurocrypt'22]

Anonymity of NIST PQC Round 3 KEMs

Keita Xagawa[(✉)]

NTT Social Informatics Laboratories, Tokyo, Japan
keita.xagawa.zv@hco.ntt.co.jp [Eurocrypt'22]

Background

Anonymous, Robust Post-quantum Public Key Encryption

Paul Grubbs[1], Varun Maram[2(✉)], and Kenneth G. Paterson[2]

[1] University of Michigan, Ann Arbor, USA
paulgrub@umich.edu

[2] Department of Computer Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland
{vmaram,kenny.paterson}@inf.ethz.ch [Eurocrypt'22]

Anonymity of NIST PQC Round 3 KEMs

Keita Xagawa[(✉)]

NTT Social Informatics Laboratories, Tokyo, Japan
keita.xagawa.zv@hco.ntt.co.jp [Eurocrypt'22]

IND-CCA security not sufficient for some modern applications.

Background

Anonymous, Robust Post-quantum Public Key Encryption

Paul Grubbs[1], Varun Maram[2(✉)], and Kenneth G. Paterson[2]

[1] University of Michigan, Ann Arbor, USA
paulgrub@umich.edu
[2] Department of Computer Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland
{vmaram,kenny.paterson}@inf.ethz.ch [Eurocrypt'22]

Anonymity of NIST PQC Round 3 KEMs

Keita Xagawa[(✉)]

NTT Social Informatics Laboratories, Tokyo, Japan
keita.xagawa.zv@hco.ntt.co.jp [Eurocrypt'22]

IND-CCA security not sufficient for some modern applications.

E.g., applications like and

require *anonymity*.

Background

Anonymous, Robust Post-quantum Public Key Encryption

Paul Grubbs[1], Varun Maram[2(✉)], and Kenneth G. Paterson[2]

[1] University of Michigan, Ann Arbor, USA
paulgrub@umich.edu

[2] Department of Computer Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland
{vmaram,kenny.paterson}@inf.ethz.ch [Eurocrypt'22]

Anonymity of NIST PQC Round 3 KEMs

Keita Xagawa[(✉)]

NTT Social Informatics Laboratories, Tokyo, Japan
keita.xagawa.zv@hco.ntt.co.jp [Eurocrypt'22]

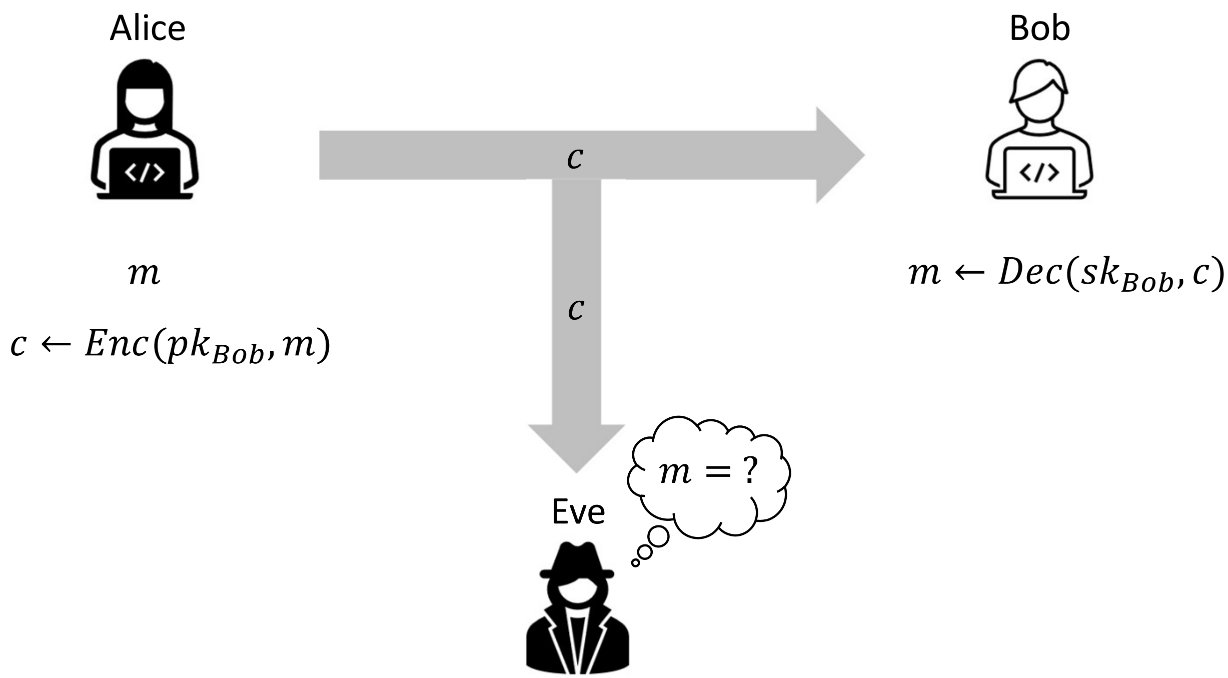
IND-CCA security not sufficient for some modern applications.

E.g., applications like Zcash and

require *anonymity*.

IND-CCA Security

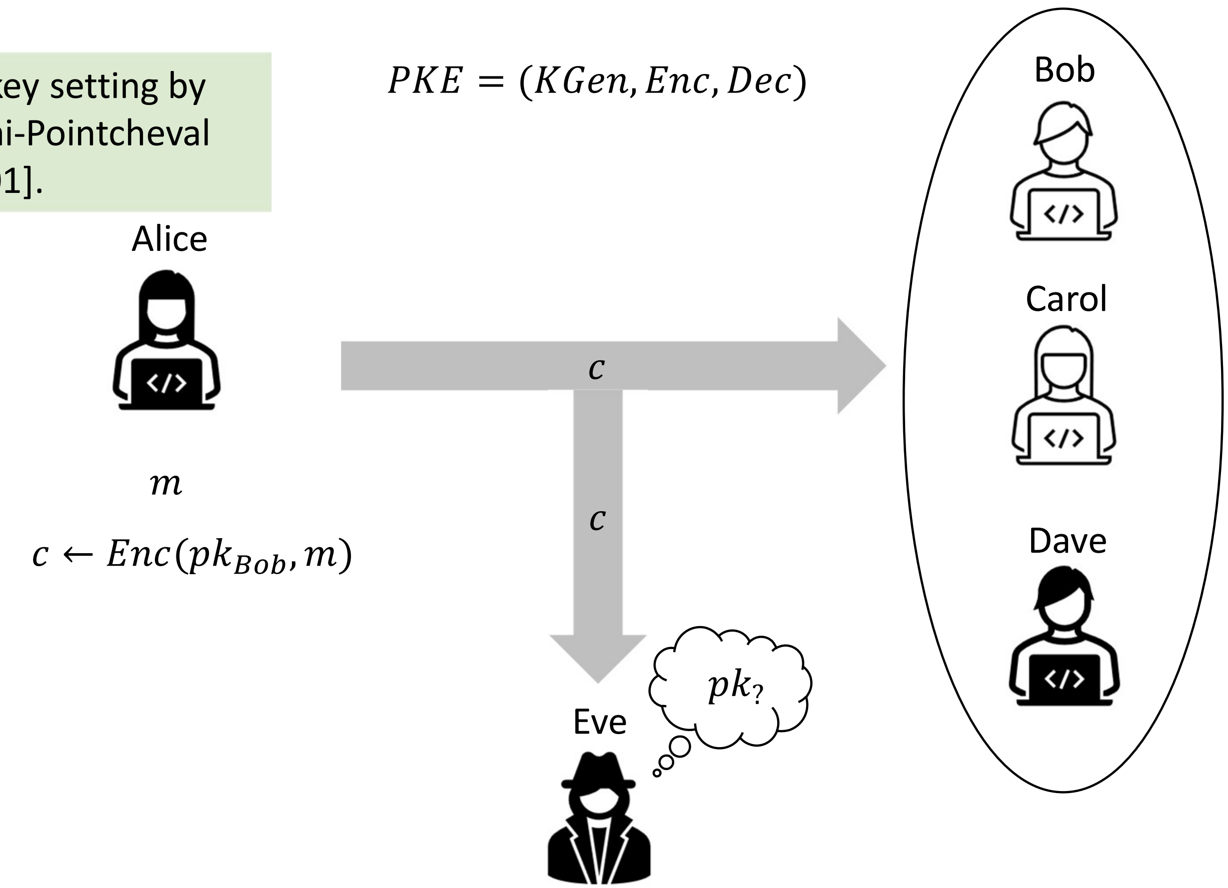
$$PKE = (KGen, Enc, Dec)$$



Anonymity (ANO-CCA Security)

Formalized in a public-key setting by [Bellare-Boldyreva-Desai-Pointcheval @Asiacrypt'01].

$PKE = (KGen, Enc, Dec)$



Background

Anonymous, Robust Post-quantum Public Key Encryption

Paul Grubbs[1], Varun Maram[2(✉)], and Kenneth G. Paterson[2]

[1] University of Michigan, Ann Arbor, USA
paulgrub@umich.edu
[2] Department of Computer Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland
{vmaram,kenny.paterson}@inf.ethz.ch [Eurocrypt'22]

Anonymity of NIST PQC Round 3 KEMs

Keita Xagawa[(✉)]

NTT Social Informatics Laboratories, Tokyo, Japan
keita.xagawa.zv@hco.ntt.co.jp [Eurocrypt'22]

IND-CCA security not sufficient for some modern applications.

E.g., applications like and

require *anonymity*.

Background

Anonymous, Robust Post-quantum Public Key Encryption

Paul Grubbs[1], Varun Maram[2(✉)], and Kenneth G. Paterson[2]

[1] University of Michigan, Ann Arbor, USA
paulgrub@umich.edu
[2] Department of Computer Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland
{vmaram,kenny.paterson}@inf.ethz.ch [Eurocrypt'22]

Anonymity of NIST PQC Round 3 KEMs

Keita Xagawa(✉)

NTT Social Informatics Laboratories, Tokyo, Japan
keita.xagawa.zv@hco.ntt.co.jp [Eurocrypt'22]

	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Fujisaki-Okamoto Transformation

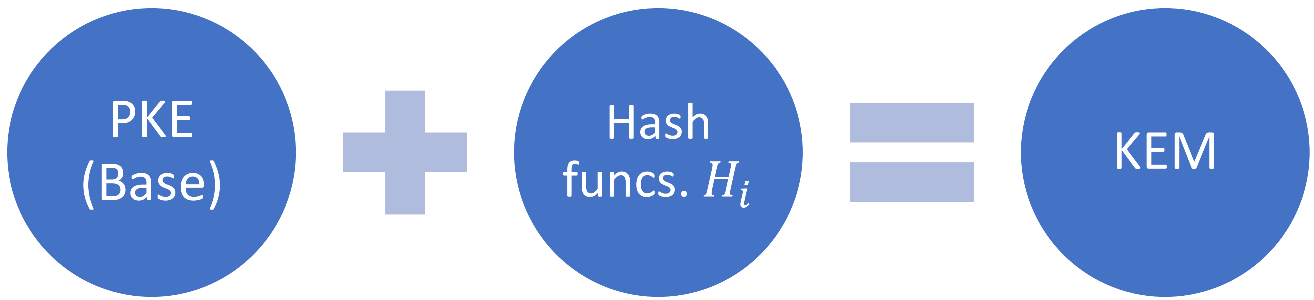
KEM

	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Fujisaki-Okamoto Transformation

	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Fujisaki-Okamoto Transformation



	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

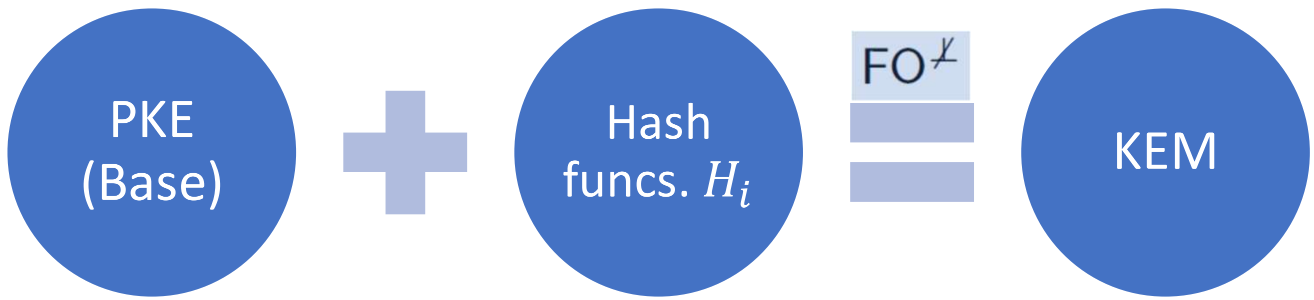
Fujisaki-Okamoto Transformation

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m', c)$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Fujisaki-Okamoto Transformation



	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Fujisaki-Okamoto Transformation

PKE (Base) + Hash funcs. H_i $\overset{\mathrm{FO}^{\not\perp}}{=}$ KEM

{OW/IND}-CPA security

Quantum Random Oracles

IND-CCA security

	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Shown in [Jiang-Zhang-Chen-Wang-Ma@Crypto'18]

Fujisaki-Okamoto Transformation

PKE (Base) + Hash funcs. H_i $\overset{\mathsf{FO}^{\not\perp}}{=}$ KEM

{OW/IND}-CPA security + "mild" properties

Quantum Random Oracles

IND-CCA security + ANO-CCA security

	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Shown in [Grubbs-Maram-Paterson@Eurocrypt'22] and [Xagawa@Eurocrypt'22]

Fujisaki-Okamoto Transformation

PKE (Base) + Hash funcs. H_i $\overset{\mathsf{FO}^{\not\perp}}{=}$ KEM

{OW/IND}-CPA security + "mild" properties

Quantum Random Oracles

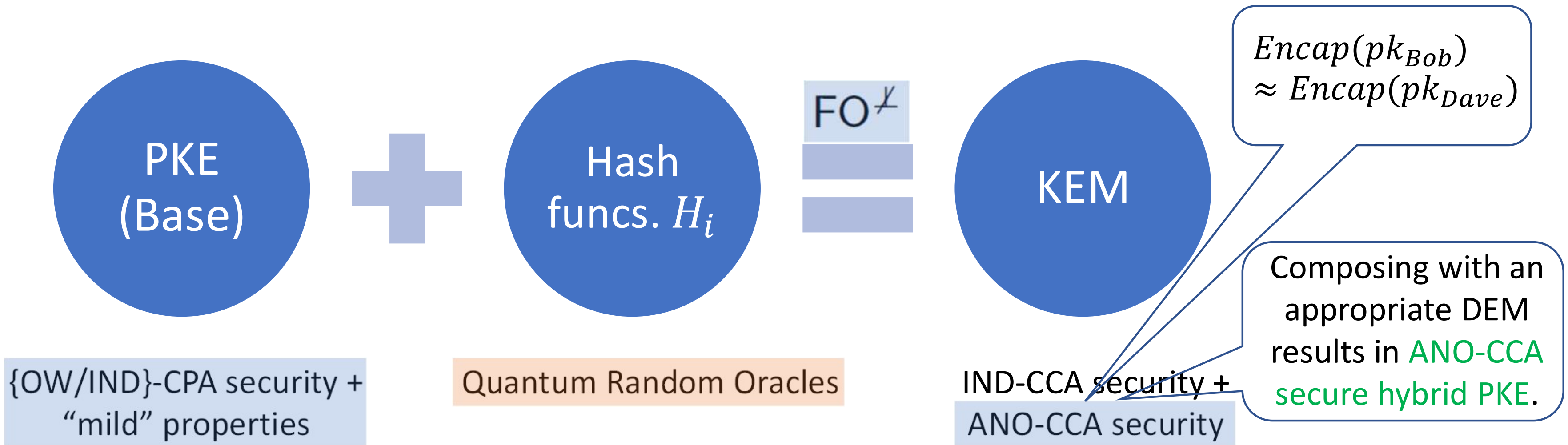
IND-CCA security + ANO-CCA security

$Encap(pk_{Bob})$
$\approx Encap(pk_{Dave})$

	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Shown in [Grubbs-Maram-Paterson@Eurocrypt'22] and [Xagawa@Eurocrypt'22]

Fujisaki-Okamoto Transformation



	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Shown in [Grubbs-Maram-Paterson@Eurocrypt'22] and [Xagawa@Eurocrypt'22]

Fujisaki-Okamoto Transformation

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
1 : $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	1 : $m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	1 : Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
2 : $s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	2 : $r \leftarrow G_r(m)$	2 : $m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
3 : $\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	3 : $c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	3 : $r' \leftarrow G_r(m')$
4 : **return** $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	4 : $\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$	4 : $c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	5 : **return** $(c, \overline{k})$	5 : **if** $c' = c$ **then**
		6 : **return** $G_k(m', c)$
		7 : **else return** $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

	ANO
Classic McEliece	
NTRU	
Kyber	
Saber	

Fujisaki-Okamoto Transformation

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
1 : $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	1 : $m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	1 : Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
2 : $s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	2 : $r \leftarrow G_r(m)$	2 : $m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
3 : $\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	3 : $c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	3 : $r' \leftarrow G_r(m')$
4 : **return** $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	4 : $\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$	4 : $c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	5 : **return** $(c, \overline{k})$	5 : **if** $c' = c$ **then**
		6 : **return** $G_k(m', c)$
		7 : **else return** $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

Uses $\mathsf{FO}^{\not\perp}$ transform, but with an additional plaintext confirmation hash.

	ANO
Classic McEliece	Y
NTRU	
Kyber	
Saber	

Shown in [Xagawa@Eurocrypt'22]

Fujisaki-Okamoto Transformation

“key ← hash(m, c)”

KGen'

$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$

$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$
$r \leftarrow G_r(m)$
$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$
$\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$
return $(c, \overline{k})$

$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$

Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$r' \leftarrow G_r(m')$
$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
if $c' = c$ **then**
  return $G_k(m', c)$
else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

	ANO
Classic McEliece	Y
NTRU	
Kyber	
Saber	

Fujisaki-Okamoto Transformation

“key ← hash(m)”

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
1 : $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	1 : $m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	1 : Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
2 : $s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	2 : $r \leftarrow G_r(m)$	2 : $m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
3 : $\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	3 : $c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	3 : $r' \leftarrow G_r(m')$
4 : **return** $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	4 : $\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	4 : $c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	5 : **return** $(c, \overline{k})$	5 : **if** $c' = c$ **then**
		6 : **return** $G_k(m')$
		7 : **else return** $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

Uses $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ transform, starting with a deterministic base PKE scheme.

	ANO
Classic McEliece	Y
NTRU	Y
Kyber	
Saber	

Shown in [Xagawa@Eurocrypt'22]

Fujisaki-Okamoto Transformation

“key ← hash(m, c)”

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m', c)$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

	ANO
Classic McEliece	Y
NTRU	Y
Kyber	
Saber	

Fujisaki-Okamoto Transformation

“key ← hash(m, c)”

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m', c)$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

“key ← hash(hash(m), hash(c))”

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, \mathsf{pk}, h, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$m \leftarrow H(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{pk}' \leftarrow (\mathsf{pk}, H(\mathsf{pk}))$	$h \leftarrow H(\mathsf{pk})$	$(\overline{k}', r') \leftarrow G_{kr}(m', h)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, \mathsf{pk}', s)$	$(\overline{k}, r) \leftarrow G_{kr}(m, h)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	**if** $c' = c$ **then**
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	**return** $H'(\overline{k}', H(c))$
	return (c, k)	**else return** $H'(s, H(c))$

Kyber, Saber

	ANO
Classic McEliece	Y
NTRU	Y
Kyber	
Saber	

As observed in [Grubbs-Maram-Paterson@Eurocrypt’22] and [Xagawa@Eurocrypt’22]

Fujisaki-Okamoto Transformation

“key ← hash(m, c)”

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\bar{k} \leftarrow G_k(m, c)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \bar{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m', c)$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

“key ← hash(hash(m), hash(c))”

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, \mathsf{pk}, h, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$m \leftarrow H(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{pk}' \leftarrow (\mathsf{pk}, H(\mathsf{pk}))$	$h \leftarrow H(\mathsf{pk})$	$(\bar{k}', r') \leftarrow G_{kr}(m', h)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, \mathsf{pk}', s)$	$(\bar{k}, r) \leftarrow G_{kr}(m, h)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	**if** $c' = c$ **then**
	$k \leftarrow H'(\bar{k}, H(c))$	**return** $H'(\bar{k}', H(c))$
	return (c, k)	**else return** $H'(s, H(c))$

Kyber, Saber

	ANO
Classic McEliece	Y
NTRU	Y
Kyber	?
Saber	?

This nested hash “$H(c)$” not only acts as a barrier towards establishing anonymity …

As observed in [Grubbs-Maram-Paterson@Eurocrypt’22] and [Xagawa@Eurocrypt’22]

Fujisaki-Okamoto Transformation

"key ← hash(m, c)"

KGen'

$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$

$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$
$r \leftarrow G_r(m)$
$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$
$\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$
return $(c, \overline{k})$

$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$

Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$r' \leftarrow G_r(m')$
$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
if $c' = c$ **then**
  return $G_k(m', c)$
else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

"key ← hash(hash(m), hash(c))"

KGen'

$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$
$\mathsf{pk}' \leftarrow (\mathsf{pk}, H(\mathsf{pk}))$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, \mathsf{pk}', s)$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$

$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$
$m \leftarrow H(m)$
$h \leftarrow H(\mathsf{pk})$
$(\overline{k}, r) \leftarrow G_{kr}(m, h)$
$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$
$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$
return (c, k)

$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$

Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, \mathsf{pk}, h, s)$
$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$(\overline{k}', r') \leftarrow G_{kr}(m', h)$
$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
if $c' = c$ **then**
  return $H'(\overline{k}', H(c))$
else return $H'(s, H(c))$

Kyber, Saber

	ANO	IND
Classic McEliece	Y	Y
NTRU	Y	Y
Kyber	?	?
Saber	?	?

As observed in [Grubbs-Maram-Paterson@Eurocrypt'22] and [Xagawa@Eurocrypt'22]

This nested hash "$H(c)$" not only acts as a barrier towards establishing anonymity …

… but also makes prior IND-CCA security analysis of $\mathsf{FO}^{\not\perp}$ in the QROM inapplicable!

NIST PQC Updates

NIST Announces First Four Quantum-Resistant Cryptographic Algorithms

Federal agency reveals the first group of winners from its six-year competition.

July 05, 2022

For general encryption, used when we access secure websites, NIST has selected the CRYSTALS-Kyber algorithm. Among its advantages are comparatively small encryption keys that two parties can exchange easily, as well as its speed of operation.

NIST PQC Updates

Kyber decisions, part 2: FO transform 692 views

Peter Schwabe

to pqc-forum, aut...@pq-crystals.org

Dear all,

This is the second mail about possible tweaks to Kyber as part of the standardization. Kyber as specified in round-3 (and also previous rounds) uses a tweaked Fujisaki-Okamoto transform to build a CCA-secure KEM from a CPA-secure PKE. Specifically, Kyber hashes the hash of the public key into the random coins and the shared key and Kyber hashes the hash of the ciphertext into the shared key. The reasons for those tweaks are the following:

* Hashing the (hash of the) public key into the final key makes the KEM "contributory", i.e., the shared key depends on inputs from both parties;

* hashing the (hash of the) public key into the random coins gives protection against multi-target attacks exploiting decryption failures; and

* hashing the (hash of the) ciphertext into the shared key ensures that this shared key depends on the full transcript.

Through the course of the NIST PQC project, multiple papers considered the FO transform and also the tweaked version used in Kyber. The question for standardization is if the results of these papers should be incorporated into Kyber, or not:

1.) https://eprint.iacr.org/2021/1351 shows that as a protection against multi-target failure attacks it is not necessary to make random coins dependent on the full public key. It is sufficient to hash in a prefix of the public key, if that prefix has sufficiently high min-entropy. We are not aware of any formal definition of a KEM being "contributory", but intuitively also for this property using such a prefix would be sufficient. Using prefix(pk) instead of H(pk) would require fewer Keccak permutations in Kyber and thus speed up encapsulation. Should the Kyber standard use prefix(pk) rather than H(pk)?

2.) Hashing the (hash of the) ciphertext into the final shared key does not help at all with any formal security property or with proofs. On the contrary, hashing the hash of the ciphertext into the final key complicates QROM proofs as pointed out in https://eprint.iacr.org/2021/708.pdf. Removing this tweak simplifies proofs and speeds up encapsulation. Note that decapsulation will still need to compute a hash over the full ciphertext for implicit rejection and, to avoid timing side channels, needs to do so in every decapsulation, not just after a decryption failure. So, there won't be any performance gain in decapsulation. Should the Kyber standard drop hashing the hash of the ciphertext into the shared key?

The obvious disadvantage with both possible changes is that such changes at such a late stage require very careful evaluation. We may have missed some non-standard property that Kyber achieves with these tweaks, but does not without. Also, the modifications are not completely orthogonal to potential modifications of symmetric crypto (see the previous mail), because they require changes to the hashing inside the FO transform with possible consequences for domain separation.

Again, we're looking forward to hear what everybody thinks!

All the best,

The Kyber team

NIST PQC Updates

Kyber decisions, part 2: FO transform 692 views

Peter Schwabe

to pqc-forum, aut...@pq-crystals.org

Dear all,

This is the second mail about possible tweaks to Kyber as part of the standardization. Kyber as specified in round-3 (and also previous rounds) uses a tweaked Fujisaki-Okamoto transform to build a CCA-secure KEM from a CPA-secure PKE. Specifically, Kyber hashes the hash of the public key into the random coins and the shared key and Kyber hashes the hash of the ciphertext into the shared key. The reasons for those tweaks are the following:

* Hashing the (hash of the) public key into the final key makes the KEM "contributory", i.e., the shared key depends on inputs from both parties;

* hashing the (hash of the) public key into the random coins gives protection against multi-target attacks exploiting decryption failures; and

* hashing the (hash of the) ciphertext into the shared key ensures that this shared key depends on the full transcript.

Through the course of the NIST PQC project, multiple papers considered the FO transform and also the tweaked version used in Kyber. The question for standardization is if the results of these papers should be incorporated into Kyber, or not:

1.) https://eprint.iacr.org/2021/1351 shows that as a protection against multi-target failure attacks it is not necessary to make random coins dependent on the full public key. It is sufficient to hash in a prefix of the public key, if that prefix has sufficiently high min-entropy. We are not aware of any formal definition of a KEM being "contributory", but intuitively also for this property using such a prefix would be sufficient. Using prefix(pk) instead of H(pk) would require fewer Keccak permutations in Kyber and thus speed up encapsulation. Should the Kyber standard use prefix(pk) rather than H(pk)?

2.) Hashing the (hash of the) ciphertext into the final shared key does not help at all with any formal security property or with proofs. On the contrary, hashing the hash of the ciphertext into the final key complicates QROM proofs as pointed out in https://eprint.iacr.org/2021/708.pdf. Removing this tweak simplifies proofs and speeds up encapsulation. Note that decapsulation will still need to compute a hash over the full ciphertext for implicit rejection and, to avoid timing side channels, needs to do so in every decapsulation, not just after a decryption failure. So, there won't be any performance gain in decapsulation. Should the Kyber standard drop hashing the hash of the ciphertext into the shared key?

The obvious disadvantage with both possible changes is that such changes at such a late stage require very careful evaluation. We may have missed some non-standard property that Kyber achieves with these tweaks, but does not without. Also, the modifications are not completely orthogonal to potential modifications of symmetric crypto (see the previous mail), because they require changes to the hashing inside the FO transform with possible consequences for domain separation.

Again, we're looking forward to hear what everybody thinks!

All the best,

The Kyber team

Our Contributions

	ANO	IND
Classic McEliece	Y	Y
NTRU	Y	Y
Kyber	?	?
Saber	?	?

Our Contributions

	ANO	IND
Classic McEliece	Y	Y
NTRU	Y	Y
Kyber	?	Y
Saber	?	?

Provided concrete and tight proof of IND-CCA security for Kyber in the QROM:

Our Contributions

	ANO	IND
Classic McEliece	Y	Y
NTRU	Y	Y
Kyber	?	Y
Saber	?	?

Provided concrete and tight proof of IND-CCA security for Kyber in the QROM:

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + \mathrm{Adv}^{\mathrm{CR}}_{H}$$

Collision-resistance of nested hash "$H(c)$", when modelled as a QRO.

Our Contributions

	ANO	IND
Classic McEliece	Y	Y
NTRU	Y	Y
Kyber	Y	Y
Saber	?	?

Established ANO-CCA security of Kyber and associated “KEM-DEM” hybrid PKE schemes in the QROM.

Provided concrete and tight proof of IND-CCA security for Kyber in the QROM:

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathrm{FO}^{\not\perp}_{m}} + \mathrm{Adv}^{\mathrm{CR}}_{H}$$

Our Contributions

Established ANO-CCA security of Kyber and associated "KEM-DEM" hybrid PKE schemes in the QROM.

	ANO	IND
Classic McEliece	Y	Y
NTRU	Y	Y
Kyber	Y	Y
Saber	Y	Y

Provided concrete and tight proof of IND-CCA security for Kyber in the QROM:

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + \mathrm{Adv}^{\mathrm{CR}}_{H}$$

Our above IND-CCA and ANO-CCA security analyses also extends to Saber in the QROM.

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	$r \leftarrow G_r(m)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $\overline{k'}$
		else return $\perp$

$\mathsf{FO}_m^{\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ outputs $G_k(s, c)$.

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	$r \leftarrow G_r(m)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\mathbf{return}\ (c, \overline{k})$	$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
		$\quad \mathbf{return}\ \overline{k'}$
		$\mathbf{else\ return}\ \perp$

$\mathsf{FO}_m^{\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	$r \leftarrow G_r(m)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\mathbf{return}\ (c, \overline{k})$	$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
		$\quad \mathbf{return}\ \overline{k'}$
		$\mathbf{else\ return}\ \perp$

$\mathsf{FO}_m^{\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$\text{Parse } \mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\mathbf{return}\ (c, k)$	$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
		$\quad \mathbf{return}\ H'(\overline{k'}, H(c))$
		$\mathbf{else\ return}\ H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

Ignoring initial hashes "$H(m)$" and "$H(pk)$" in Encap.

Technical Overview

KGen'

$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$
$\textbf{return } (\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$

$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$
$r \leftarrow G_r(m)$
$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$
$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$
$\textbf{return } (c, \overline{k})$

$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$

$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$r' \leftarrow G_r(m')$
$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
$\textbf{if } c' = c \textbf{ then}$
$\quad \textbf{return } \overline{k'}$
$\textbf{else return } \perp$

$\mathsf{FO}_m^{\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'

$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$
$\textbf{return } (\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$

$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$
$r \leftarrow G_r(m)$
$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$
$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$
$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$
$\textbf{return } (c, k)$

$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$

$\text{Parse } \mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$r' \leftarrow G_r(m')$
$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
$\textbf{if } c' = c \textbf{ then}$
$\quad \textbf{return } H'(\overline{k'}, H(c))$
$\textbf{else return } H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	$r \leftarrow G_r(m)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\mathbf{return}\ (c, \overline{k})$	$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
		$\quad \mathbf{return}\ \overline{k'}$
		$\mathbf{else\ return}\ \perp$

$\mathsf{FO}_m^\perp$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\mathbf{return}\ (c, k)$	$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
		$\quad \mathbf{return}\ H'(\overline{k'}, H(c))$
		$\mathbf{else\ return}\ H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\textbf{return } (\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	$r \leftarrow G_r(m)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\textbf{return } (c, \overline{k})$	$\textbf{if } c' = c \textbf{ then}$
		$\quad \textbf{return } \overline{k'}$
		$\textbf{else return } \perp$

$\mathsf{FO}_m^{\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$\text{Parse } \mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
$\textbf{return } (\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\textbf{return } (c, k)$	$\textbf{if } c' = c \textbf{ then}$
		$\quad \textbf{return } H'(\overline{k'}, H(c))$
		$\textbf{else return } H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

(pk, sk)

$s \leftarrow_{\$} M$
$sk' \leftarrow (sk, s)$

(pk, sk')

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	$r \leftarrow G_r(m)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\mathbf{return}\ (c, \overline{k})$	$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
		$\quad \mathbf{return}\ \overline{k'}$
		$\mathbf{else\ return}\ \perp$

$\mathsf{FO}_m^{\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\mathbf{return}\ (c, k)$	$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
		$\quad \mathbf{return}\ H'(\overline{k'}, H(c))$
		$\mathbf{else\ return}\ H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

$(c, \overline{k})$

(c, k)

H, H'

$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	$r \leftarrow G_r(m)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $\overline{k'}$
		else return $\perp$

$\mathsf{FO}_m^{\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

$\overline{k'}$

$\perp$

$H'(\overline{k'}, H(c))$

$H'(s, H(c))$

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
1 : $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	1 : $m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	1 : $m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
2 : **return** $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	2 : $r \leftarrow G_r(m)$	2 : $r' \leftarrow G_r(m')$
	3 : $c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	3 : $c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	4 : $\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	4 : $\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	5 : **return** $(c, \overline{k})$	5 : **if** $c' = c$ **then**
		6 : **return** $\overline{k'}$
		7 : **else return** $\perp$

$\mathsf{FO}_m^{\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
1 : $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	1 : $m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	1 : Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
2 : $s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	2 : $r \leftarrow G_r(m)$	2 : $m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
3 : $\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	3 : $c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	3 : $r' \leftarrow G_r(m')$
4 : **return** $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	4 : $\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	4 : $c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	5 : $k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	5 : $\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	6 : **return** (c, k)	6 : **if** $c' = c$ **then**
		7 : **return** $H'(\overline{k'}, H(c))$
		8 : **else return** $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

$\overline{k}'$

$\perp$

$H'(\overline{k}', H(c))$

$H'(s, H(c))$

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

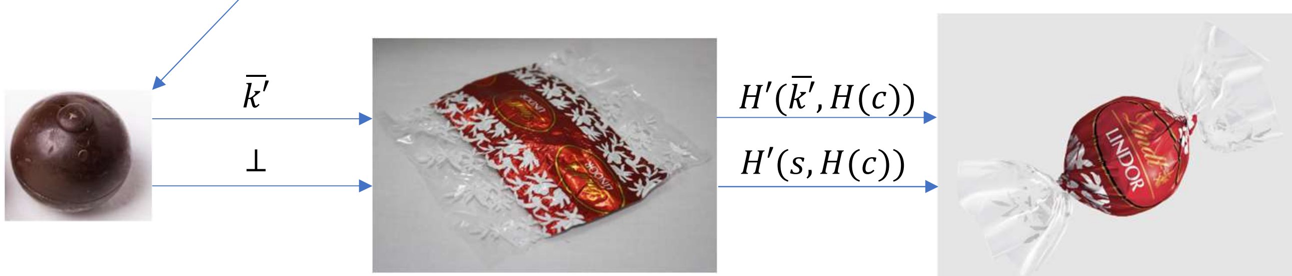
Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	$r \leftarrow G_r(m)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\mathbf{return}\ (c, \overline{k})$	$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
		$\quad \mathbf{return}\ \overline{k'}$
		$\mathbf{else\ return}\ \perp$

$\mathsf{FO}_m^{\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	$\mathbf{return}\ (c, k)$	$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
		$\quad \mathbf{return}\ H'(\overline{k'}, H(c))$
		$\mathbf{else\ return}\ H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)



IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\perp}$ KEMs in the QROM	$\Rightarrow$	IND-CCA security of Kyber in the QROM

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

Non-tight proofs, compared to $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$.

Tighter Proofs of CCA Security in the Quantum Random Oracle Model

Nina

[4] Eir

Measure-Rewind-Measure: Tighter Quantum Random Oracle Model Proofs for One-Way to Hiding and CCA Security

Veronika Kuchta[1], Amin Sakzad[1(✉)], Damien Stehlé[2,3], Ron Steinfeld[1(✉)] and Shi-Feng Sun[1,4]

[1] Faculty of Information Technology, Monash University, Melbourne, Australia
{amin.sakzad,ron.steinfeld}@monash.edu
[2] Univ. Lyon, EnsL, UCBL, CNRS, Inria, LIP, 69342 Lyon Cedex 07, France
[3] Institut Universitaire de France, Paris, France
[4] Data61, CSIRO, Canberra, Australia

[Eurocrypt'20]

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

Non-tight proofs, compared to $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$.

Lacking formal verification, in contrast to $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$.

Tighter Proofs of CCA Security in the Quantum Random Oracle Model

Nina

Measure-Rewind-Measure: Tighter Quantum Random Oracle Model Proofs for One-Way to Hiding and CCA Security

Veronika Kuchta[1], Amin Sakzad[1(✉)], Damien Stehlé[2,3], Ron Steinfeld[1(✉)] and Shi-Feng Sun[1,4]

[4] Eir

[1] Faculty of Information Technology, Monash University, Melbourne, Australia
{amin.sakzad,ron.steinfeld}@monash.edu
[2] Univ. Lyon, EnsL, UCBL, CNRS, Inria, LIP, 69342 Lyon Cedex 07, France
[3] Institut Universitaire de France, Paris, France
[4] Data61, CSIRO, Canberra, Australia

[Eurocrypt'20]

Post-Quantum Verification of Fujisaki-Okamoto

Dominique Unruh(✉)

University of Tartu, Tartu, Estonia
unruh@ut.ee

Abstract. We present a computer-verified formalization of the post-quantum security proof of the Fujisaki-Okamoto transform (as analyzed by Hövelmanns, Kiltz, Schäge, and Unruh, PKC 2020). The formalization is done in quantum relational Hoare logic and checked in the `qrhl-tool` (Unruh, POPL 2019).

[Asiacrypt'20]

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

Non-tight proofs, compared to $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$.

Lacking formal verification, in contrast to $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$.

Anonymity enhancing properties not studied, in contrast to $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$.

Tighter Proofs of CCA Security in the Quantum Random Oracle Model

Measure-Rewind-Measure: Tighter Quantum Random Oracle Model Proofs for One-Way to Hiding and CCA Security

Nina

Veronika Kuchta[1], Amin Sakzad[1(✉)], Damien Stehlé[2,3], Ron Steinfeld[1(✉)] and Shi-Feng Sun[1,4]

[4] Eir

[1] Faculty of Information Technology, Monash University, Melbourne, Australia
{amin.sakzad,ron.steinfeld}@monash.edu
[2] Univ. Lyon, EnsL, UCBL, CNRS, Inria, LIP, 69342 Lyon Cedex 07, France
[3] Institut Universitaire de France, Paris, France
[4] Data61, CSIRO, Canberra, Australia

[Eurocrypt'20]

Post-Quantum Verification of Fujisaki-Okamoto

Dominique Unruh(✉)

University of Tartu, Tartu, Estonia
unruh@ut.ee

Abstract. We present a computer-verified formalization of the post-quantum security proof of the Fujisaki-Okamoto transform (as analyzed by Hövelmanns, Kiltz, Schäge, and Unruh, PKC 2020). The formalization is done in quantum relational Hoare logic and checked in the `qrhl-tool` (Unruh, POPL 2019).

[Asiacrypt'20]

Anonymous, Robust Post-quantum Public Key Encryption

Anonymity of NIST PQC Round 3 KEMs

Keita Xagawa(✉)

NTT Social Informatics Laboratories, Tokyo, Japan
keita.xagawa.zv@hco.ntt.co.jp

[Eurocrypt'22]

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\perp}$ KEMs in the QROM	$\Rightarrow$	IND-CCA security of Kyber in the QROM

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM	$\Rightarrow$	?

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$	$r \leftarrow G_r(m)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	**if** $c' = c$ **then**
	return $(c, \overline{k})$	**return** $G_k(m')$
		else return $\perp$

$\mathsf{FO}^{\perp}_m$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

IND-CCA security of $\mathsf{FO}^{\not\perp}_m$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

$\overline{k}'$

?

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
$(\mathsf{pk},\mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
$(\mathsf{pk},\mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

$\overline{k}' = G_k(m')$?
or
$\overline{k}' = G_k(s,c)$?

$\overline{k}'$

?

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}_m$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

IND-CCA security of $\mathsf{FO}^{\not\perp}_m$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Maram-Xagawa @PKC'23]

modified

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

Kyber (simplified)

modified

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen'

$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$

$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$
$r \leftarrow G_r(m)$
$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$
$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$
$\mathbf{return}\ (c, \overline{k})$

$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$

$\text{Parse } \mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$r' \leftarrow G_r(m')$
$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
$\quad \mathbf{return}\ G_k(m')$
$\mathbf{else\ return}\ \overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Maram-Xagawa @PKC'23]
modified

KGen'

$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$
$\mathbf{return}\ (\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$

$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$
$r \leftarrow G_r(m)$
$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$
$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$
$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$
$\mathbf{return}\ (c, k)$

$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$

$\text{Parse } \mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$r' \leftarrow G_r(m')$
$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
$\mathbf{if}\ c' = c\ \mathbf{then}$
$\quad \mathbf{return}\ H'(\overline{k'}, H(c))$
$\mathbf{else\ return}\ H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

Kyber (simplified)
modified

$\overline{k}'$

$H'(\overline{k}', H(c))$

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Maram-Xagawa @PKC'23]

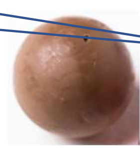
modified

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

Kyber (simplified)

modified

$\bar{k}' = G_k(m')$



$\bar{k}'$

$H'(\bar{k}', H(c))$

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen'

$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$

$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$
$r \leftarrow G_r(m)$
$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$
$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$
return $(c, \overline{k})$

$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$

Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$r' \leftarrow G_r(m')$
$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
if $c' = c$ **then**
  return $G_k(m')$
else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Maram-Xagawa @PKC'23]
modified

KGen'

$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$

$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

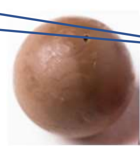
$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$
$r \leftarrow G_r(m)$
$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$
$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$
$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$
return (c, k)

$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$

Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$r' \leftarrow G_r(m')$
$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
if $c' = c$ **then**
  return $H'(\overline{k'}, H(c))$
else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

Kyber (simplified)
modified

$\bar{k}' = \bar{H}(H(c))$



$\bar{k}'$

$H'(\bar{k}', H(c))$

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Maram-Xagawa @PKC'23]

modified

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

Kyber (simplified)

modified

$\overline{k}'$

$H'(\overline{k}', H(c))$

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Maram-Xagawa @PKC'23]

modified

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

Kyber (simplified)

modified

$\approx$

$\overline{k}'$

$H'(\overline{k}', H(c))$

$\approx$

IND-CCA security of both KEMs computationally equivalent.

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$?

IND-CCA security of both KEMs computationally equivalent.

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}_m$ modified [Maram-Xagawa @PKC'23]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

Kyber (simplified) modified

$\approx$

$\overline{k}'$

$H'(\overline{k}', H(c))$

$\approx$

IND-CCA security of both KEMs computationally equivalent.

IND-CCA security of $\mathsf{FO}^{\not\perp}_m$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

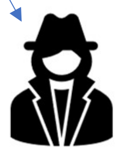
IND-CCA security of both KEMs computationally equivalent.

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$\text{Parse } \mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
$\textbf{return } (\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$\textbf{return } (c, \overline{k})$	$\textbf{if } c' = c \textbf{ then}$
		$\quad \textbf{return } G_k(m')$
		$\textbf{else return } G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\bot}$

IND-CCA
adversary

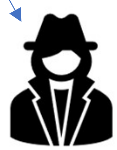


Technical Overview

KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$

IND-CCA adversary



KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ modified

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$

IND-CCA adversary

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $H''(c)$

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ modified

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$

... pseudorandomness of QRO "$G_k(s,\cdot)$".

$\approx$

IND-CCA adversary

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $H''(c)$

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ modified

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$

IND-CCA adversary

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $H''(c)$

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ modified

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$

IND-CCA adversary

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $H''(c)$

$\approx$

... collision-resistance of QRO "$H(\cdot)$".

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ modified

Technical Overview

KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
(pk, sk) $\leftarrow$ KGen	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse sk′ $=$ (sk, s)
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow$ Dec(sk, c)
sk′ $\leftarrow$ (sk, s)	$c \leftarrow$ Enc(pk, $m; r$)	$r' \leftarrow G_r(m')$
return (pk, sk′)	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow$ Enc(pk, $m'; r'$)
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$

... pseudorandomness of QRO "$G_k(s,\cdot)$".

$\approx$

$\approx$

IND-CCA adversary

KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
(pk, sk) $\leftarrow$ KGen	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse sk′ $=$ (sk, s)
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow$ Dec(sk, c)
sk′ $\leftarrow$ (sk, s)	$c \leftarrow$ Enc(pk, $m; r$)	$r' \leftarrow G_r(m')$
return (pk, sk′)	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow$ Enc(pk, $m'; r'$)
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $H''(c)$

$\approx$

... collision-resistance of QRO "$H(\cdot)$".

KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
(pk, sk) $\leftarrow$ KGen	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse sk′ $=$ (sk, s)
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow$ Dec(sk, c)
sk′ $\leftarrow$ (sk, s)	$c \leftarrow$ Enc(pk, $m; r$)	$r' \leftarrow G_r(m')$
return (pk, sk′)	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow$ Enc(pk, $m'; r'$)
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $\overline{H}(H(c))$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ modified

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

(simplified)

Kyber

IND-CCA adversary

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

(simplified)

Kyber

IND-CCA adversary

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

(simplified)

Kyber modified

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

(simplified)
Kyber

IND-CCA
adversary

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H''(H(c))$

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

(simplified)
Kyber modified

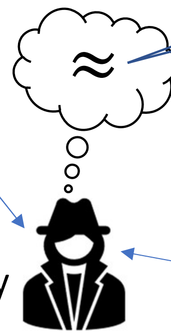
Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

(simplified)

Kyber

... pseudorandomness of QRO “$H'(s,\cdot)$”.



IND-CCA adversary

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H''(H(c))$

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

(simplified)

Kyber modified

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

(simplified)
Kyber

IND-CCA adversary

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

(simplified)
Kyber modified

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H''(H(c))$

Technical Overview

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

(simplified)
Kyber

IND-CCA adversary

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H''(H(c))$

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

(simplified)
Kyber modified

$\approx$

… generalized "One-Way To Hiding (OW2H)" lemma in the QROM [Ambainis-Hamburg-Unruh@Crypto'19].

Technical Overview

KGen$'$	Encap(pk)	Decap(sk$'$, c)
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

(simplified)
Kyber

$\approx$

IND-CCA
adversary

$\approx$

... pseudorandomness of QRO "$H'(s,\cdot)$".

KGen$'$	Encap(pk)	Decap(sk$'$, c)
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H''(H(c))$

$\approx$

... generalized "One-Way To Hiding (OW2H)" lemma in the QROM [Ambainis-Hamburg-Unruh@Crypto'19].

KGen$'$	Encap(pk)	Decap(sk$'$, c)
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(\overline{H}(H(c)), H(c))$

(simplified)
Kyber modified

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM	$\Rightarrow$	IND-CCA security of Kyber in the QROM

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

As shown in [Xagawa@Eurocrypt'22].

ANO-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ ANO-CCA security of Kyber in the QROM

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM	$\Rightarrow$	IND-CCA security of Kyber in the QROM

ANO-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM	ANO-CCA security of Kyber in the QROM

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

SPR-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM

As shown in [Xagawa@Eurocrypt'22].

ANO-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM

ANO-CCA security of Kyber in the QROM

Technical Overview

$(c, k) \leftarrow Encap(pk_{Bob})$, then k indistinguishable from a random key.

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM	$\Rightarrow$	IND-CCA security of Kyber in the QROM

$(c, k) \leftarrow Encap(pk_{Bob})$, then k and c indistinguishable from a random key and random ciphertext, i.e., strong pseudorandomness.

SPR-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM

As shown in [Xagawa@Eurocrypt'22].

ANO-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM	ANO-CCA security of Kyber in the QROM

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

Shown in [Maram-Xagawa @PKC'23], adapting the IND-CCA security reduction.

SPR-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ SPR-CCA security of Kyber in the QROM

ANO-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM

ANO-CCA security of Kyber in the QROM

Technical Overview

IND-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ IND-CCA security of Kyber in the QROM

SPR-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM $\Rightarrow$ SPR-CCA security of Kyber in the QROM

$\Downarrow$

Shown in [Xagawa@Eurocrypt'22].

ANO-CCA security of $\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ KEMs in the QROM

ANO-CCA security of Kyber in the QROM

Discussion

$$\boxed{\mathrm{Adv}_{\mathrm{Kyber}}^{\mathrm{IND-CCA}} \leq \mathrm{Adv}_{\mathsf{FO}_m^{\not\perp}}^{\mathrm{IND-CCA}} + \mathrm{Adv}_{H}^{\mathrm{CR}}}$$

Discussion

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + \mathrm{Adv}^{\mathrm{CR}}_{H}$$

Discussion

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathrm{FO}^{\not\perp}_{m}} \quad + \mathrm{Adv}^{\mathrm{CR}}_{H}$$

Collision-resistance of nested hash "$H(c)$", when modelled as a QRO.

Discussion

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + \mathrm{Adv}^{\mathrm{CR}}_{H}$$

Collision-resistance of nested hash “$H(c)$”, when modelled as a QRO.

$\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}$ modified

$\approx$

IND-CCA security of both KEMs computationally equivalent.

Discussion

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} \quad + \mathrm{Adv}^{\mathrm{CR}}_{H} + \cdots$$

Collision-resistance of nested hash "$H(c)$", when modelled as a QRO.

$\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}$ modified

$\approx$

IND-CCA security of both KEMs computationally equivalent.

$\approx$

Kyber modified

IND-CCA security of both KEMs computationally equivalent.

Discussion

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Bound on number of QRO queries by the IND-CCA adversary.

Collision-resistance of QROs, as proven in [Zhandry@QIC'15]

Discussion

[Maram-Xagawa @PKC’23]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Bound on number of QRO queries by the IND-CCA adversary.

[Zhandry @Crypto’19]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^2}{2^{128}}$$

“Indifferentiability loss”.

$\approx$

“key $\leftarrow$ hash(m)” “key $\leftarrow$ hash(hash(m), hash(c))”

Discussion

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_m} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Bound on number of QRO queries by the IND-CCA adversary.

[Zhandry @Crypto'19]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_m} + k_1 \frac{q^2}{2^{128}}$$

"Indifferentiability loss".

[Chen-Lu-Jia-Li @Inscrypt'22]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_m} + k_1 \sqrt{\frac{q^3}{2^{128}}} + k_2 \frac{q^3}{2^{256}}$$

Loss incurred w.r.t. simulating <u>random invertible permutations</u> in the QROM.

Discussion

Bound on number of QRO queries by the IND-CCA adversary.

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}_{\mathrm{Kyber}}^{\mathrm{IND-C}} \le \mathrm{Adv}_{\mathsf{FO}_m^{\not\perp}}^{\mathrm{IND-CCA}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Collision-resistance of QROs.

[Zhandry @Crypto'19]

$$\mathrm{Adv}_{\mathrm{Kyber}}^{\mathrm{IND-C}} \le \mathrm{Adv}_{\mathsf{FO}_m^{\not\perp}}^{\mathrm{IND-CCA}} + k_1 \frac{q^2}{2^{128}}$$

"Indifferentiability loss".

[Chen-Lu-Jia-Li @Inscrypt'22]

$$\mathrm{Adv}_{\mathrm{Kyber}}^{\mathrm{IND-C}} \le \mathrm{Adv}_{\mathsf{FO}_m^{\not\perp}}^{\mathrm{IND-C}} + k_1 \sqrt{\frac{q^3}{2^{128}}} + k_2 \frac{q^3}{2^{256}}$$

Loss incurred w.r.t. simulating <u>random invertible permutations</u> in the QROM.

Discussion

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Bound on number of QRO queries by the IND-CCA adversary.

$q \leq 2^{86}$

[Zhandry @Crypto'19]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^2}{2^{128}}$$

"Indifferentiability loss".

$q \leq 2^{64}$

[Chen-Lu-Jia-Li @Inscrypt'22]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \sqrt{\frac{q^3}{2^{128}}} + k_2 \frac{q^3}{2^{256}}$$

$q \leq 2^{43}$

Loss incurred w.r.t. simulating <u>random invertible permutations</u> in the QROM.

Discussion

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Bound on number of QRO queries by the IND-CCA adversary.

$q \leq 2^{86}$

[Zhandry @Crypto'19]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^2}{2^{128}}$$

$q \leq 2^{64}$

"Indifferentiability loss".

Use the "compressed oracle technique" of [Zhandry @Crypto'19].

[Chen-Lu-Jia-Li @Inscrypt'22]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \sqrt{\frac{q^3}{2^{128}}} + k_2 \frac{q^3}{2^{256}}$$

$q \leq 2^{43}$

Loss incurred w.r.t. simulating <u>random invertible permutations</u> in the QROM.

Discussion

Uses the "One-Way To Hiding (OW2H) lemma" of [Ambainis-Hamburg-Unruh@Crypto'19].

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \le \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_m} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Bound on number of QRO queries by the IND-CCA adversary.

$q \le 2^{86}$

[Zhandry @Crypto'19]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathrm{Kyber}} \le \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_m} + k_1 \frac{q^2}{2^{128}}$$

$q \le 2^{64}$

"Indifferentiability loss".

Use the "compressed oracle technique" of [Zhandry @Crypto'19].

[Chen-Lu-Jia-Li @Inscrypt'22]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \le \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_m} + k_1 \sqrt{\frac{q^3}{2^{128}}} + k_2 \frac{q^3}{2^{256}}$$

$q \le 2^{43}$

Loss incurred w.r.t. simulating <u>random invertible permutations</u> in the QROM.

Discussion

Amenable to formal verification! [Unruh@Asiacrypt'20]

Uses the "One-Way To Hiding (OW2H) lemma" of [Ambainis-Hamburg-Unruh@Crypto'19].

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Bound on number of QRO queries by the IND-CCA adversary.

$q \leq 2^{86}$

Use the "compressed oracle technique" of [Zhandry @Crypto'19].

[Zhandry @Crypto'19]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^2}{2^{128}}$$

$q \leq 2^{64}$

"Indifferentiability loss".

[Chen-Lu-Jia-Li @Inscrypt'22]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \sqrt{\frac{q^3}{2^{128}}} + k_2 \frac{q^3}{2^{256}}$$

$q \leq 2^{43}$

Loss incurred w.r.t. simulating <u>random invertible permutations</u> in the QROM.

Discussion

Amenable to formal verification! [Unruh@Asiacrypt'20]

Uses the "One-Way To Hiding (OW2H) lemma" of [Ambainis-Hamburg-Unruh@Crypto'19].

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-C}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

- Formal verification?

Discussion

Amenable to formal verification! [Unruh@Asiacrypt'20]

Uses the "One-Way To Hiding (OW2H) lemma" of [Ambainis-Hamburg-Unruh@Crypto'19].

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}_{\mathrm{Kyber}}^{\mathrm{IND-C}} \le \mathrm{Adv}_{\mathsf{FO}_m^{\not\perp}}^{\mathrm{IND-CCA}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

- Formal verification?
- Optimality of our above bounds?

Discussion

Amenable to formal verification! [Unruh@Asiacrypt'20]

Uses the "One-Way To Hiding (OW2H) lemma" of [Ambainis-Hamburg-Unruh@Crypto'19].

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathrm{Kyber}} \leq \mathrm{Adv}^{\mathrm{IND-CCA}}_{\mathsf{FO}^{\not\perp}_{m}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Collision-resistance of QROs.

- Formal verification?
- Optimality of our above bounds?
    - Tighter proof of IND-CCA security for Kyber <u>without</u> relying on collision-resistance of QROs?

Amenable to formal verification! [Unruh@Asiacrypt'20]

Discussion

Uses the "One-Way To Hiding (OW2H) lemma" of [Ambainis-Hamburg-Unruh@Crypto'19].

[Maram-Xagawa @PKC'23]

$$\mathrm{Adv}_{\mathrm{Kyber}}^{\mathrm{IND-CCA}} \leq \mathrm{Adv}_{\mathsf{FO}_m^{\not\perp}}^{\mathrm{IND-CCA}} + k_1 \frac{q^3}{2^{256}} + k_2 \frac{q}{2^{128}}$$

Collision-resistance of QROs.

- Formal verification?
- Optimality of our above bounds?
  - Tighter proof of IND-CCA security for Kyber without relying on collision-resistance of QROs?
  - Matching attack on IND-CCA security of Kyber in the QROM by finding collisions in the nested hash "$H(c)$"?

Extra Slides

Discussion

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

Discussion

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

$H'(\bar{k}, H(c))$ "quantum indifferentiable" from $H''(\bar{k}, c)$, as proven in [Zhandry@Crypto'19].

Discussion

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

$H'(\bar{k}, H(c))$ "quantum indifferentiable" from $H''(\bar{k}, c)$, as proven in [Zhandry@Crypto'19].

≈

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_\$ \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m', c)$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

Discussion

KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

Kyber (simplified)

$\approx$

KGen′	Encap(pk)	Decap(sk′, c)
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m', c)$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

IND-CCA security equivalent upto "<u>indifferentiability loss</u>", as implied by [Grubbs-Maram-Paterson@Eurocrypt'22].

$H'(\overline{k}, H(c))$ "quantum indifferentiable" from $H''(\overline{k}, c)$, as proven in [Zhandry@Crypto'19].

Discussion

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m')$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}_m^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz@TCC'17]

$\approx$

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	$k \leftarrow H'(\overline{k}, H(c))$	$\overline{k'} \leftarrow G_k(m')$
	return (c, k)	**if** $c' = c$ **then**
		return $H'(\overline{k'}, H(c))$
		else return $H'(s, H(c))$

$\approx$ Kyber (simplified)

KGen'	$\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$	$\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}', c)$
$(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}) \leftarrow \mathsf{KGen}$	$m \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	Parse $\mathsf{sk}' = (\mathsf{sk}, s)$
$s \leftarrow_{\$} \mathcal{M}$	$r \leftarrow G_r(m)$	$m' \leftarrow \mathsf{Dec}(\mathsf{sk}, c)$
$\mathsf{sk}' \leftarrow (\mathsf{sk}, s)$	$c \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m; r)$	$r' \leftarrow G_r(m')$
return $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk}')$	$\overline{k} \leftarrow G_k(m, c)$	$c' \leftarrow \mathsf{Enc}(\mathsf{pk}, m'; r')$
	return $(c, \overline{k})$	**if** $c' = c$ **then**
		return $G_k(m', c)$
		else return $G_k(s, c)$

$\mathsf{FO}^{\not\perp}$ [Hofheinz-Hövelmanns-Kiltz @TCC'17]

IND-CCA security equivalent, as shown in [Bindel-Hamburg-Hövelmanns-Hülsing-Persichetti@TCC'19].

IND-CCA security equivalent upto "<u>indifferentiability loss</u>", as implied by [Grubbs-Maram-Paterson@Eurocrypt'22].

$H'(\overline{k}, H(c))$ "quantum indifferentiable" from $H''(\overline{k}, c)$, as proven in [Zhandry@Crypto'19].