

確率共鳴現象の 通信への応用

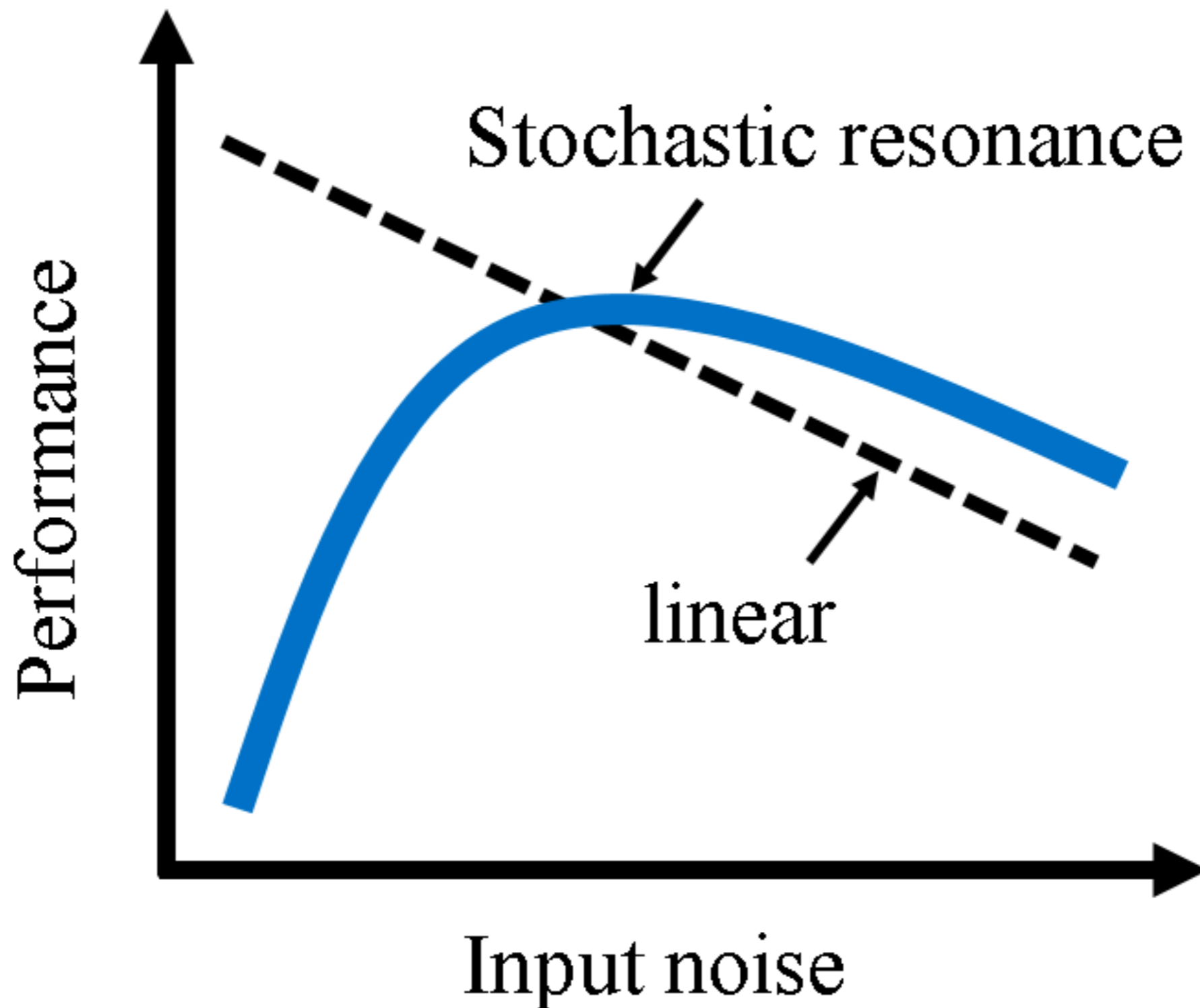
山里敬也 (名大) 田所幸浩 (豊田中研) 田中宏哉 (豊田中研)
田中裕也 (名大) 荒井伸太郎 (岡山理科大)
中島康雄 (名大) 平岡真太郎 (名大)

目次

- 確率共鳴現象に関する検討の俯瞰
- 確率共鳴のメカニズム
 - 二重井戸ポテンシャル系
 - しきい値系
- 確率共鳴現象の通信への応用
 - 仮説検定
 - 確率共鳴受信機

確率共鳴 (Stochastic Resonance)

➤ 雑音強度の増大に対して応答が向上する非線形現象



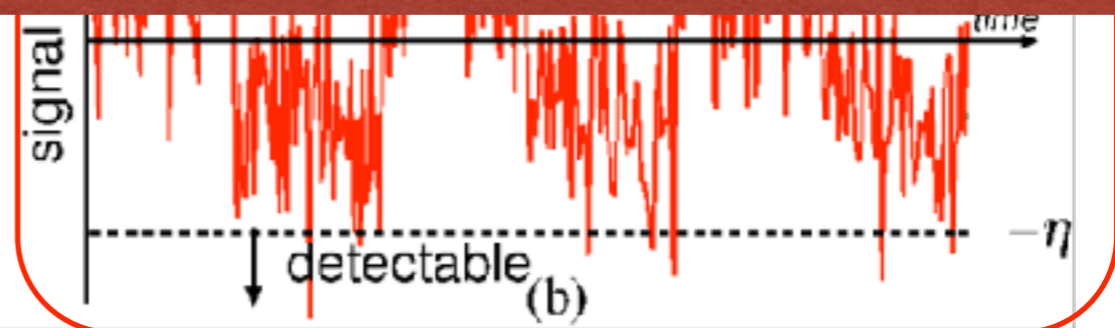
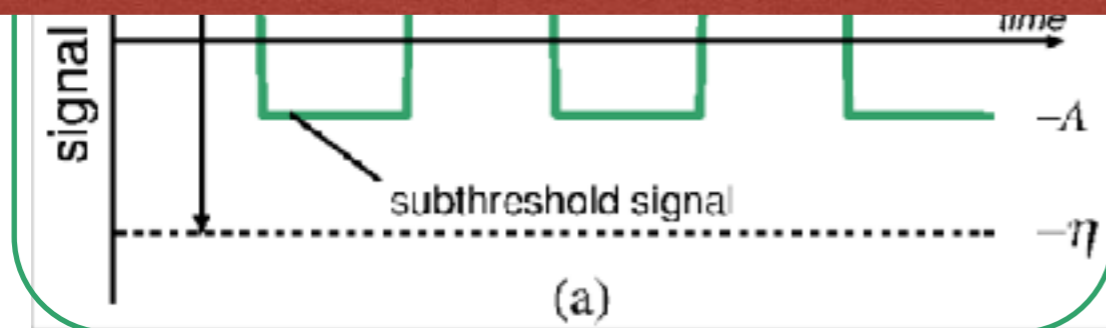
システムが応答できない微弱信号を、適度な雑音を加えて取り出す

SR Receiver



確率共鳴により

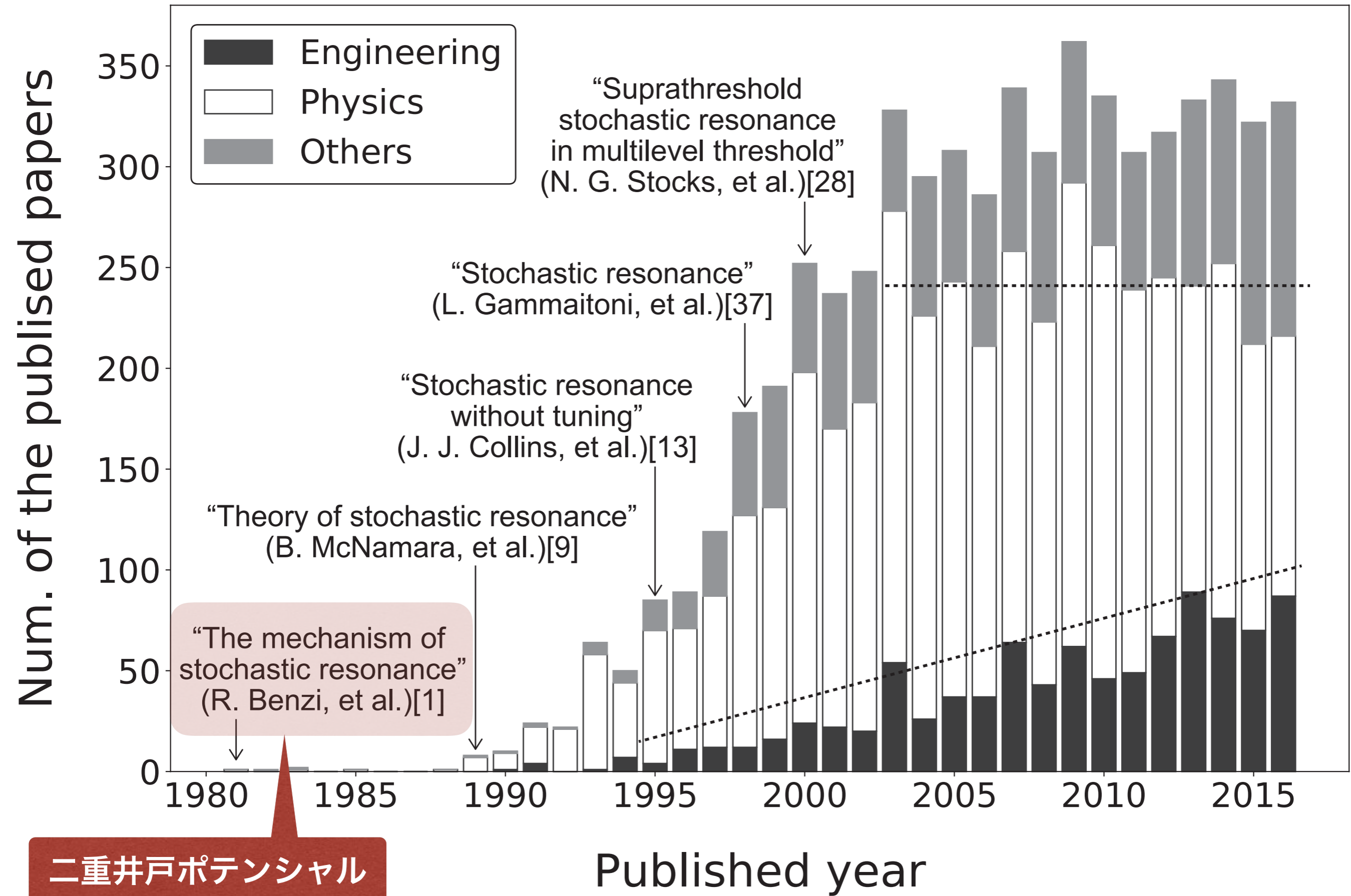
従来は利用できない微弱な信号
を検出できる可能性がある



目次

- 確率共鳴現象に関する検討の俯瞰
- 確率共鳴のメカニズム
 - 二重井戸ポテンシャル系
 - しきい値系
- 確率共鳴現象の通信への応用
 - 仮説検定
 - 確率共鳴受信機

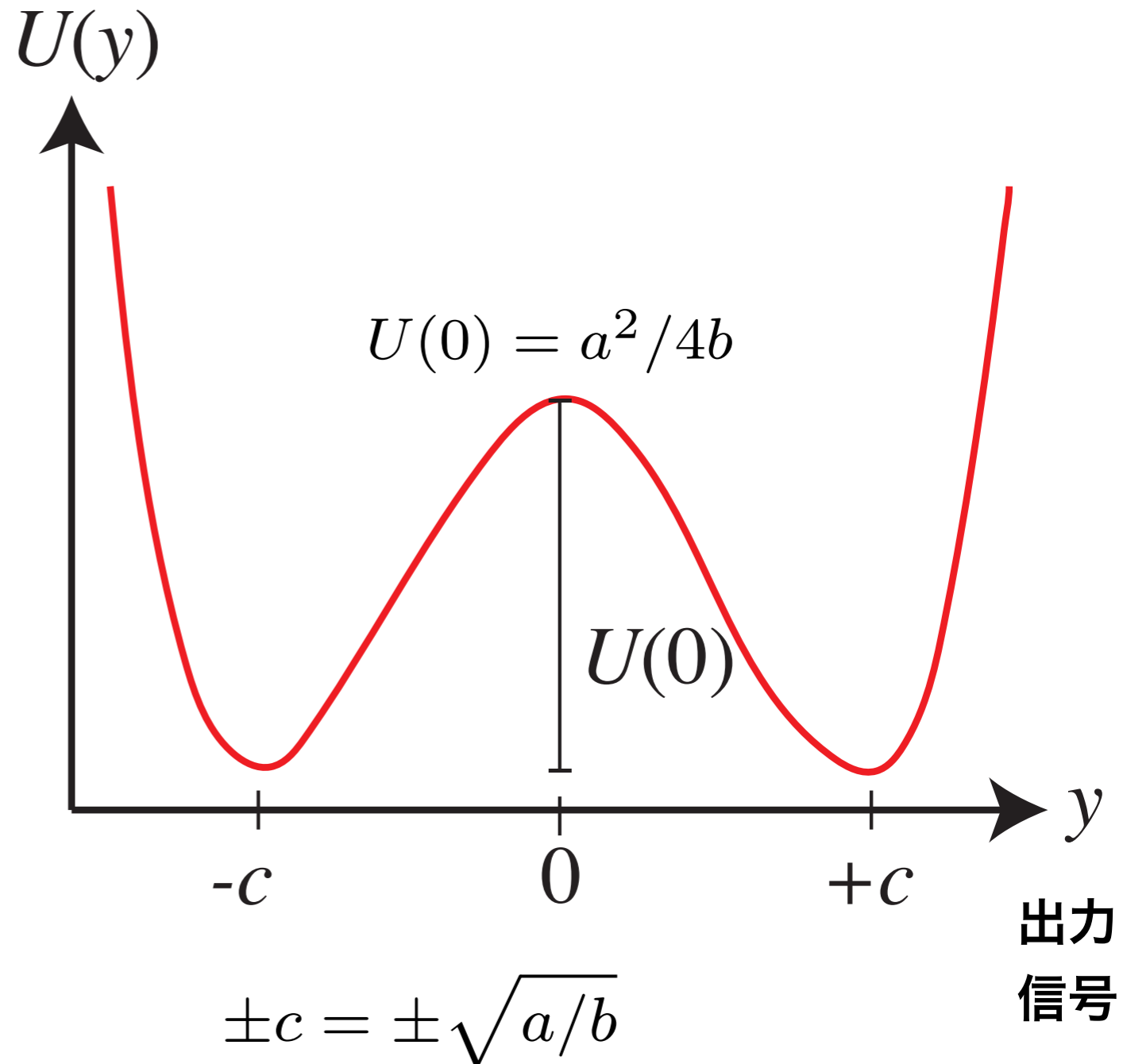
学術論文発行件数 (Web of Science: 6,332件、stochastic resonance, noise-enhanced)

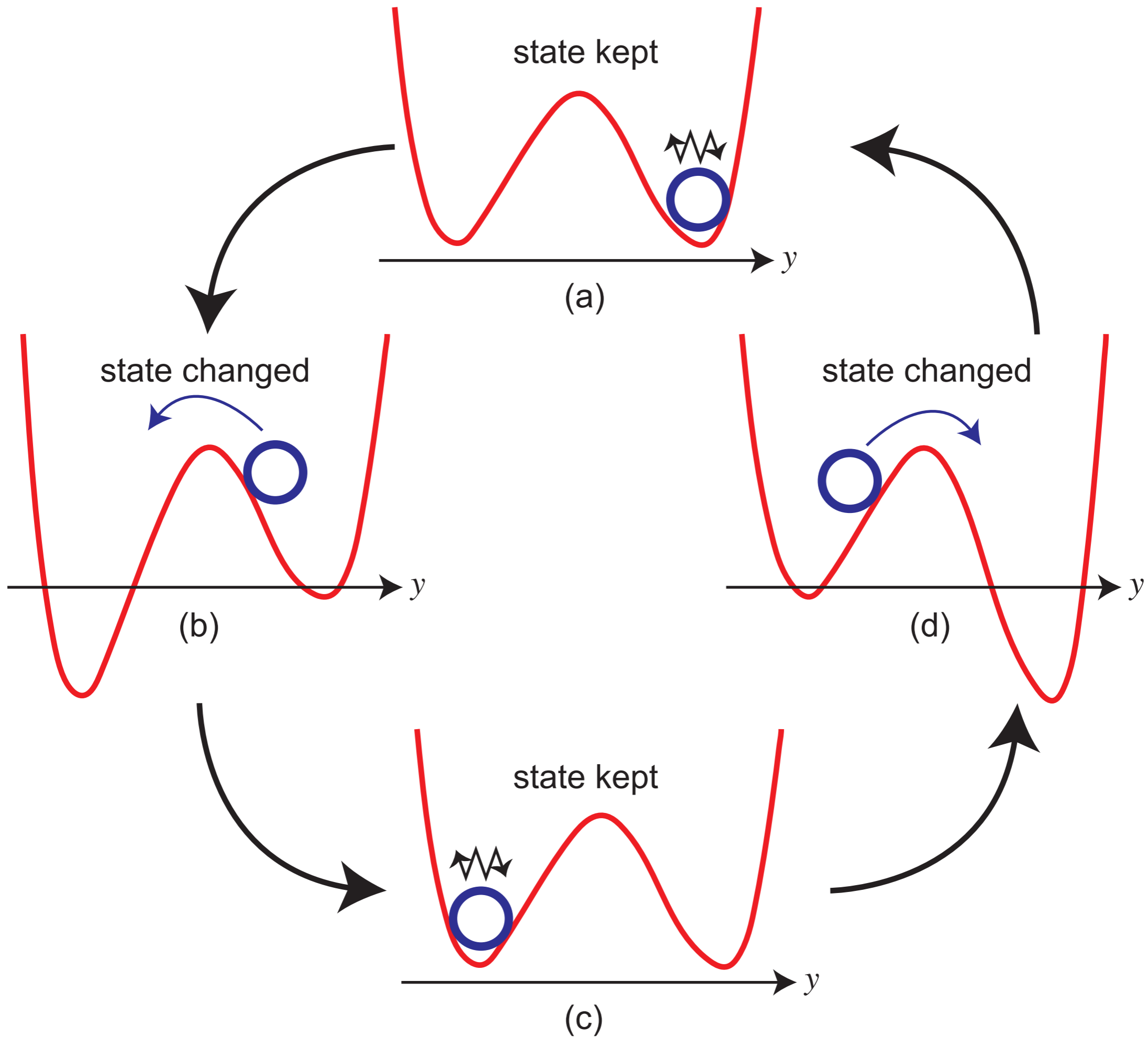


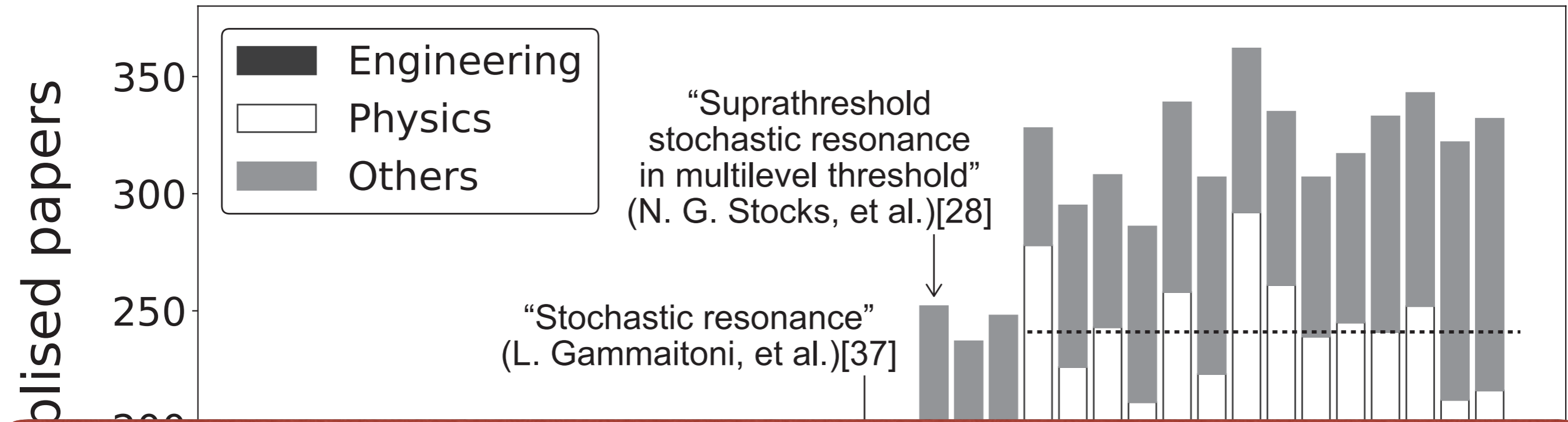
二重井戸ポテンシャル

二重井戸
ポテンシャル

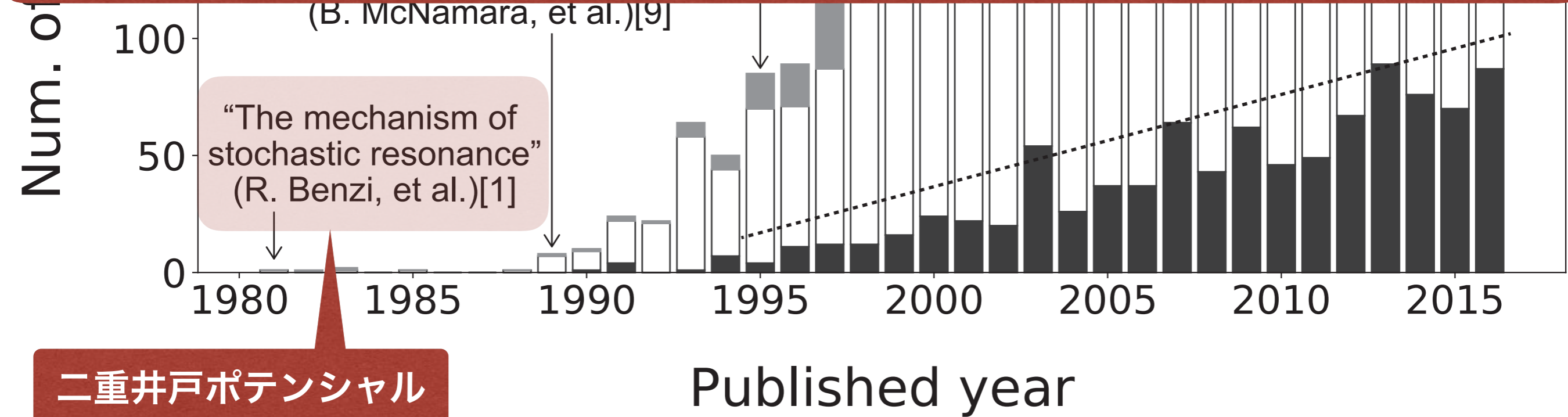
$$\frac{dy}{dt} = -\frac{dU(y)}{dy} + x(t) + n(t).$$
$$U(y) = -\frac{a}{2}y^2 + \frac{b}{4}y^4.$$





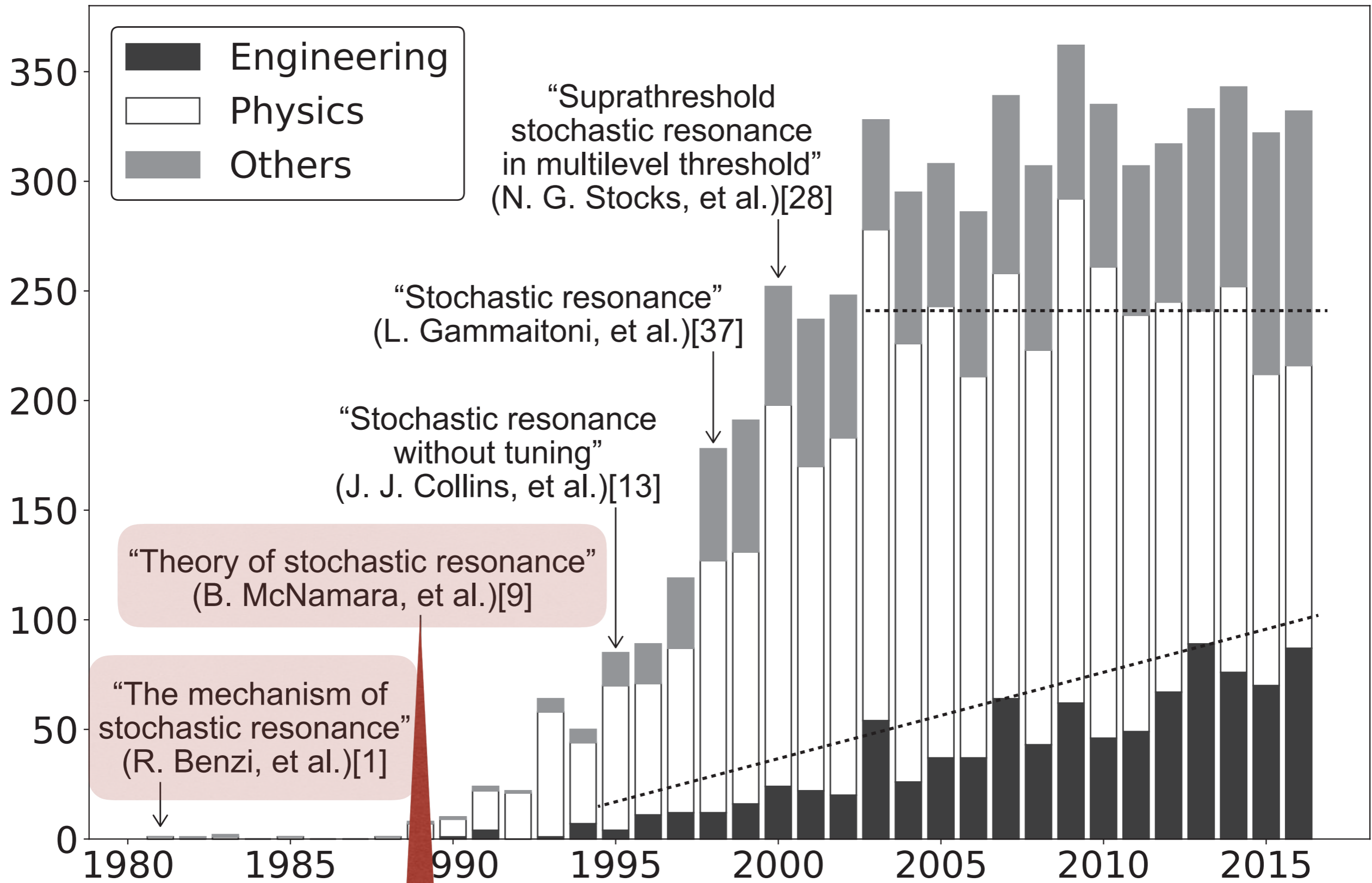


地球の氷河期到来周期(ミランコビッチ・サイクル) を説明する理論モデルとして2重井戸ポテンシャルを利用



二重井戸ポテンシャル

Num. of the published papers

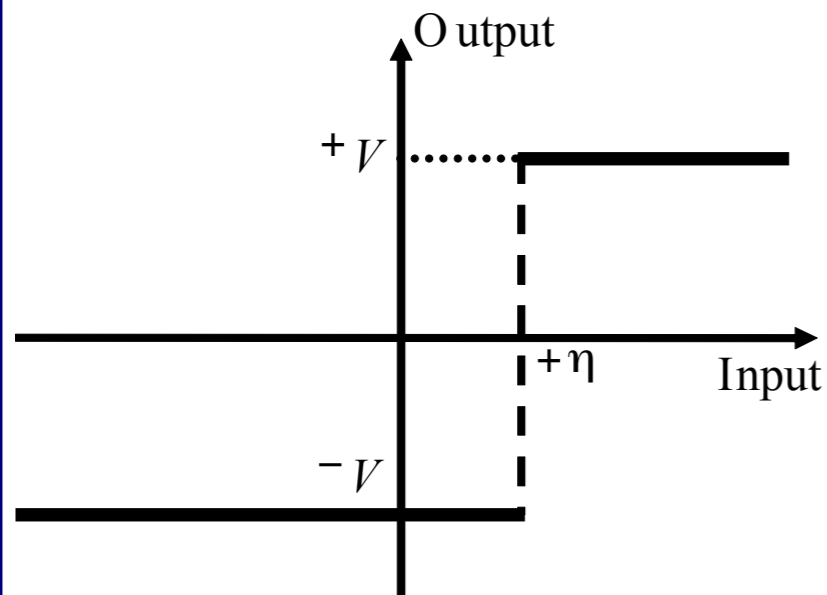


確率共鳴理論をまとめる
hed year

確率共鳴現象の発現素子

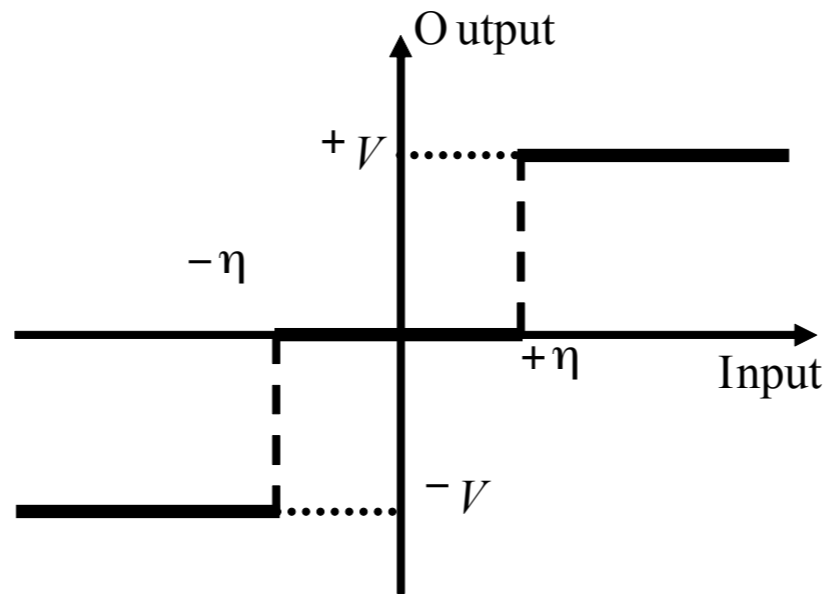
コンパレータ

- 閾値：1
- メモリなし



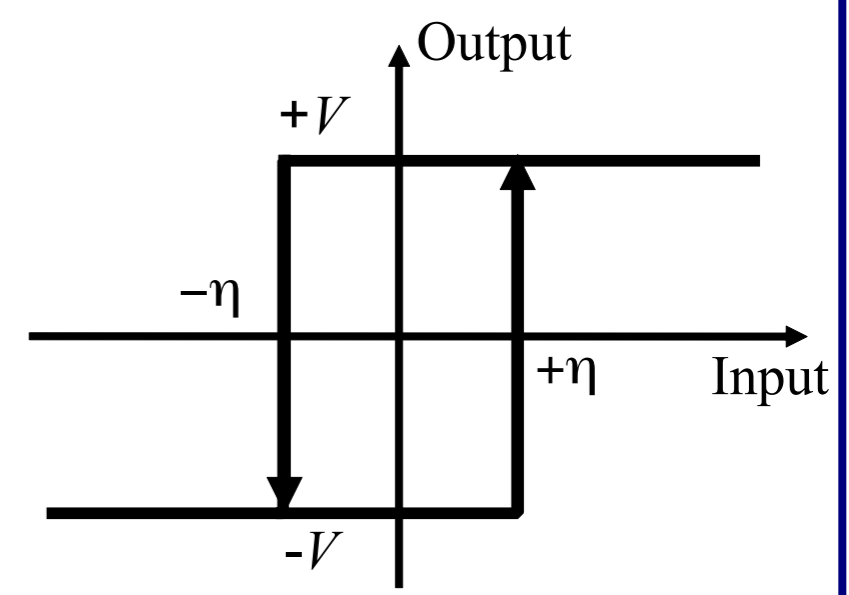
3レベル素子

- 閾値：2
- メモリなし

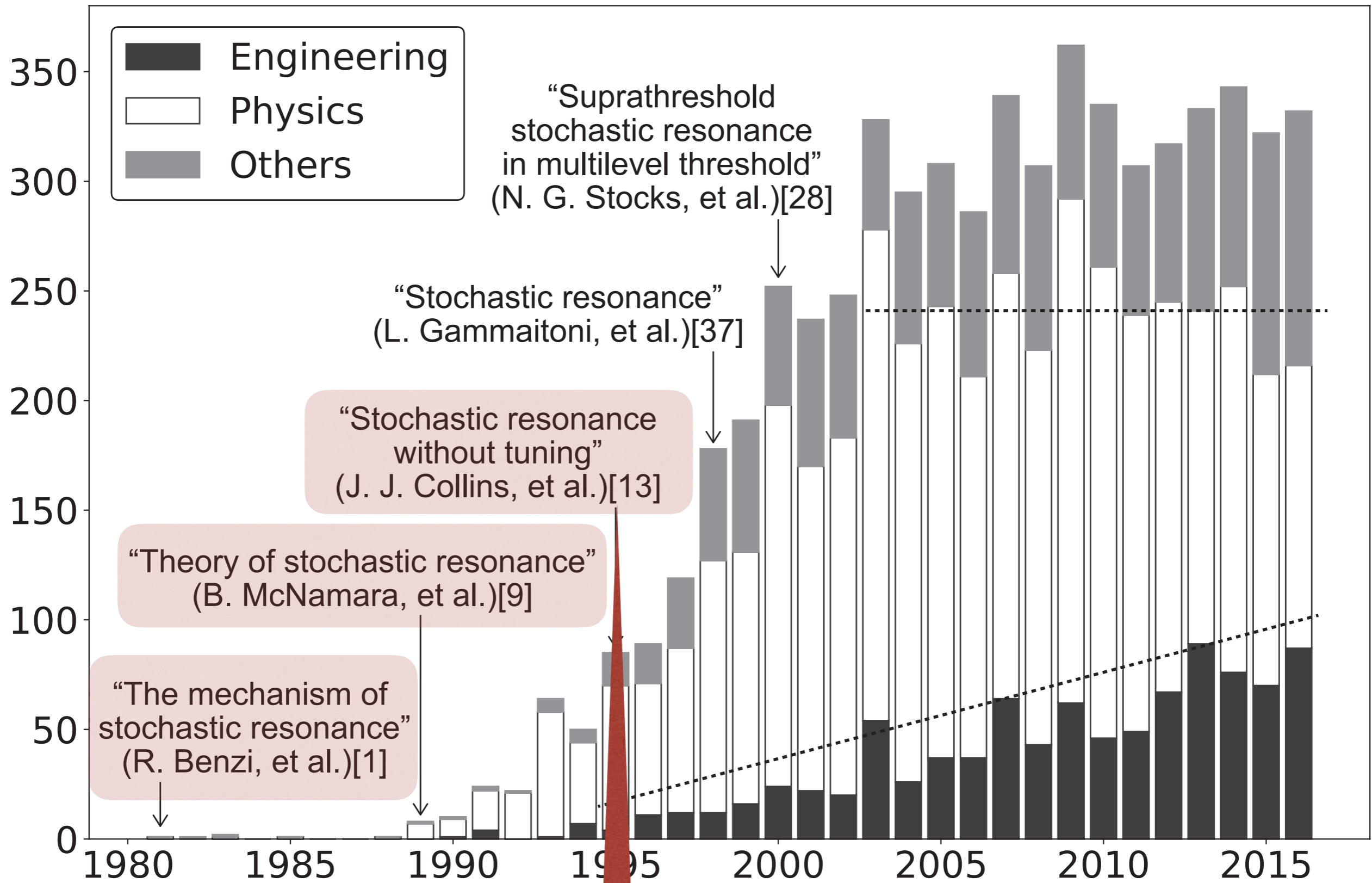


シュミットトリガ

- 閾値：2
- メモリあり

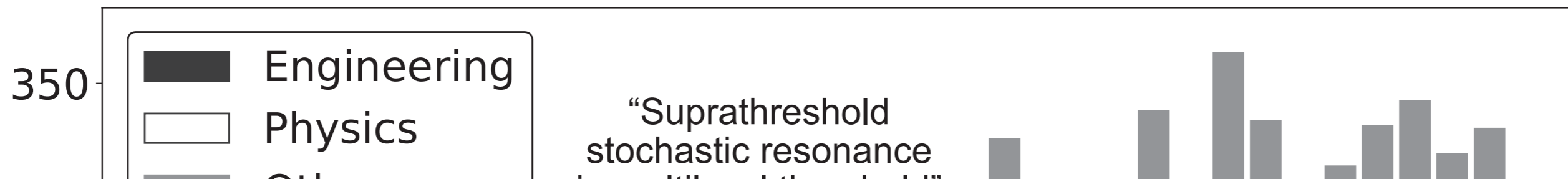


Num. of the published papers



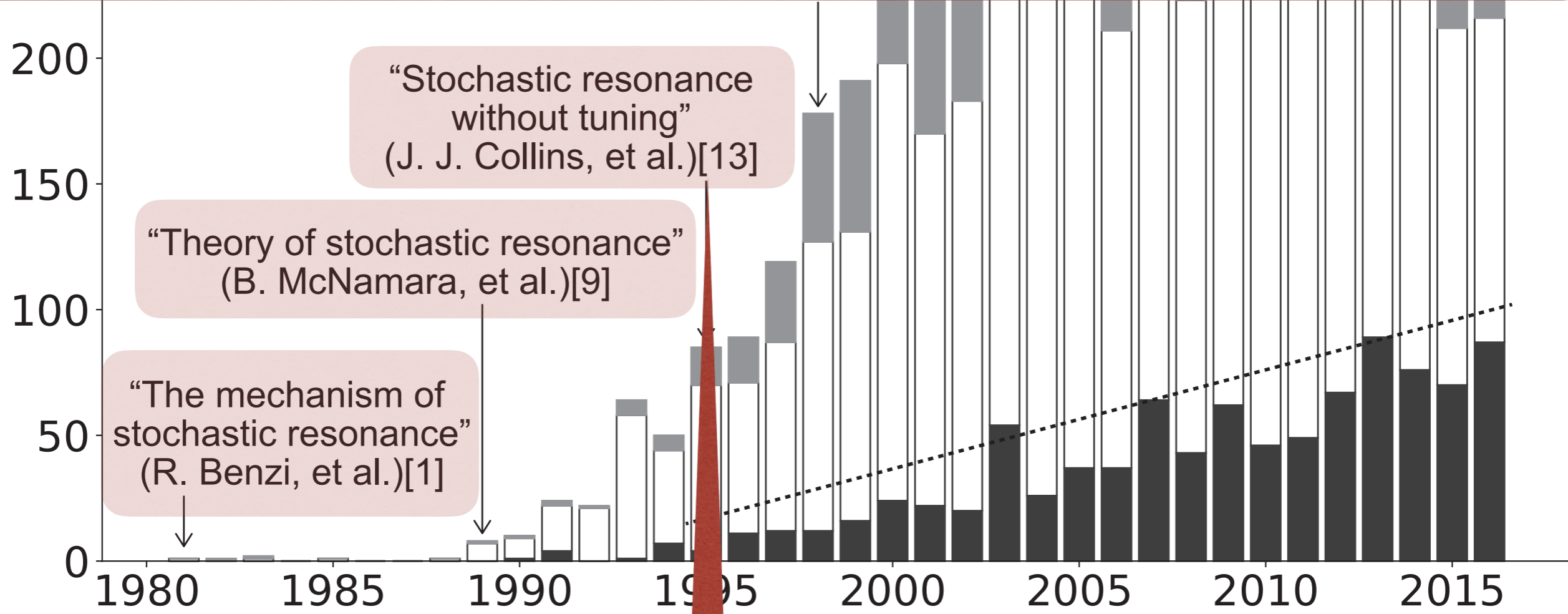
適切な雑音強度を調整できるしくみ

ers



並列加算ネットワークとすることで、並列数が大きくなるほど、最適な雑音強度を与えた場合と同じ特性になる

Num. of the publi



適切な雑音強度を調整できるしくみ

目次

- 確率共鳴現象に関する検討の俯瞰
- 確率共鳴のメカニズム
 - 二重井戸ポテンシャル系
 - しきい値系
- 確率共鳴現象の通信への応用
 - 仮説検定
 - 確率共鳴受信機

確率共鳴現象というテクニカルタームは誤解を招きやすい

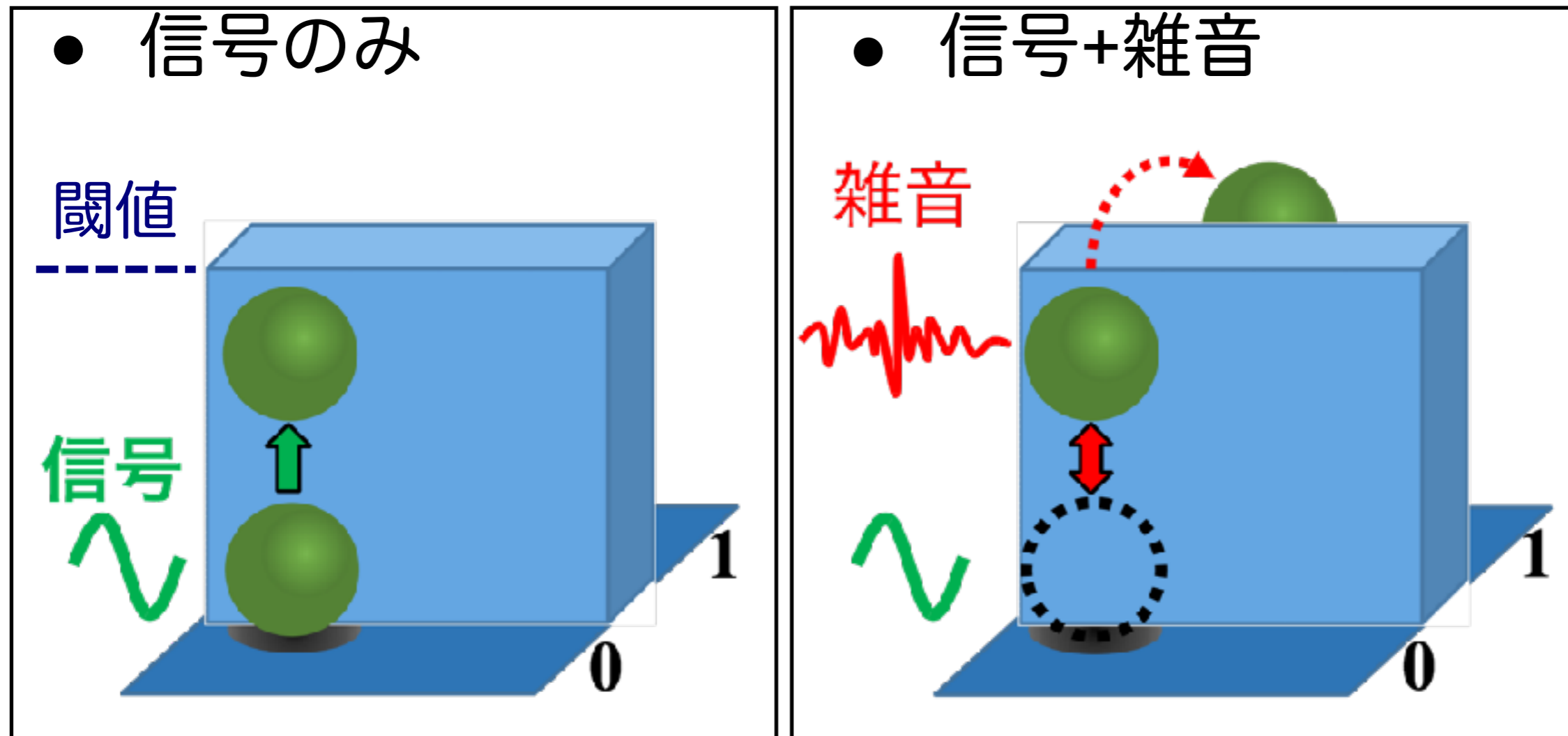
「確率的に共鳴する現象」では無く、

「雑音強調 (noise-enhanced)」あるいは

「雑音支援 (noise-assisted)」が適当

確率共鳴のメカニズム（閾値系）

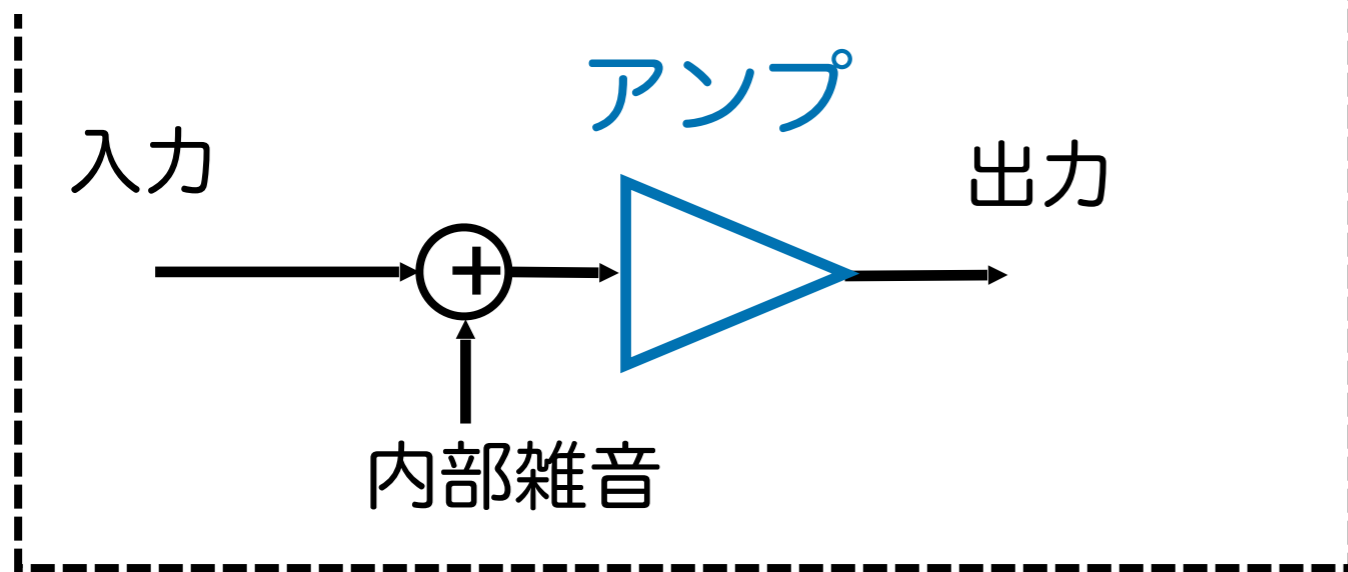
➤ 雑音による状態遷移



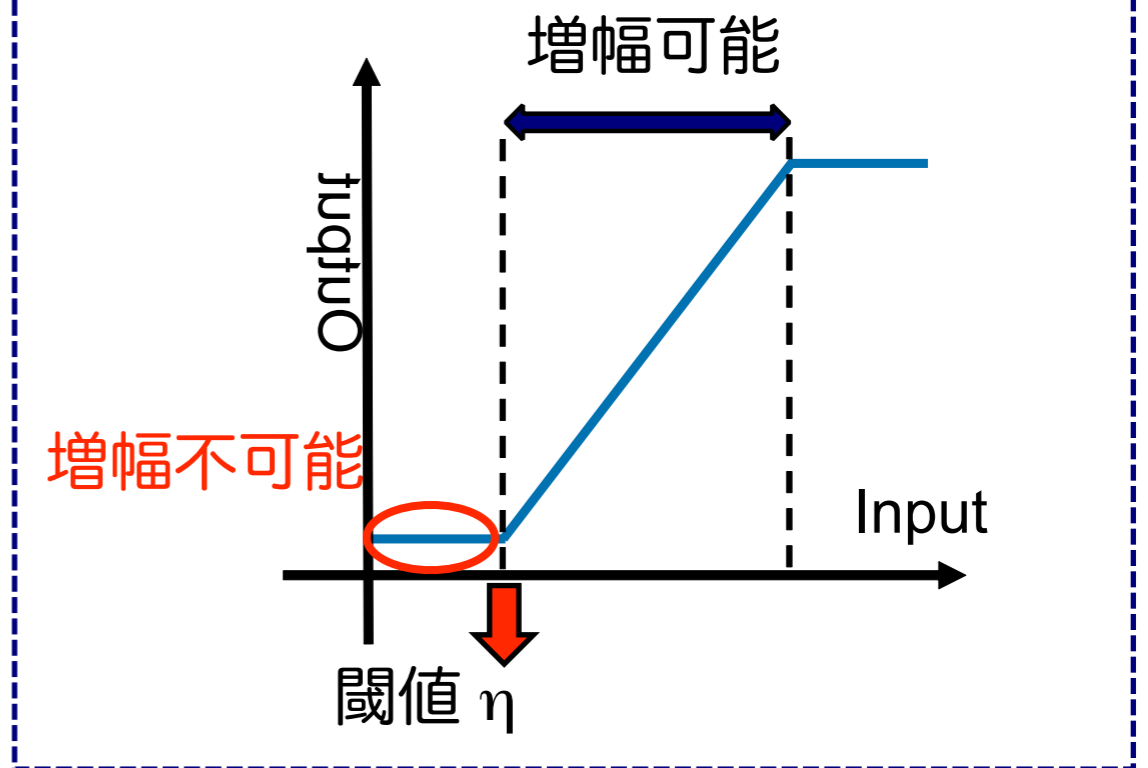
閾値以下の微弱な信号を検出

受信感度以下の信号検出 (1/2)

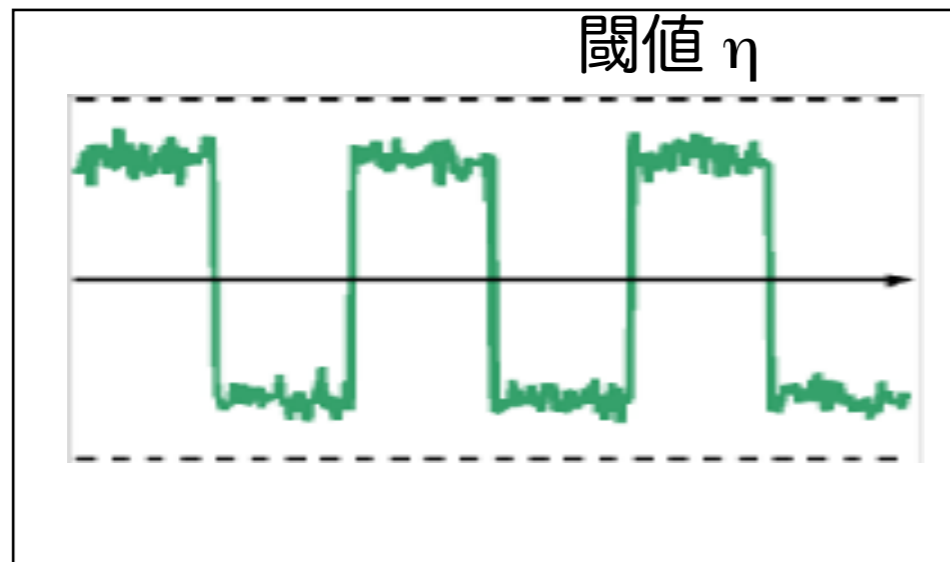
従来系



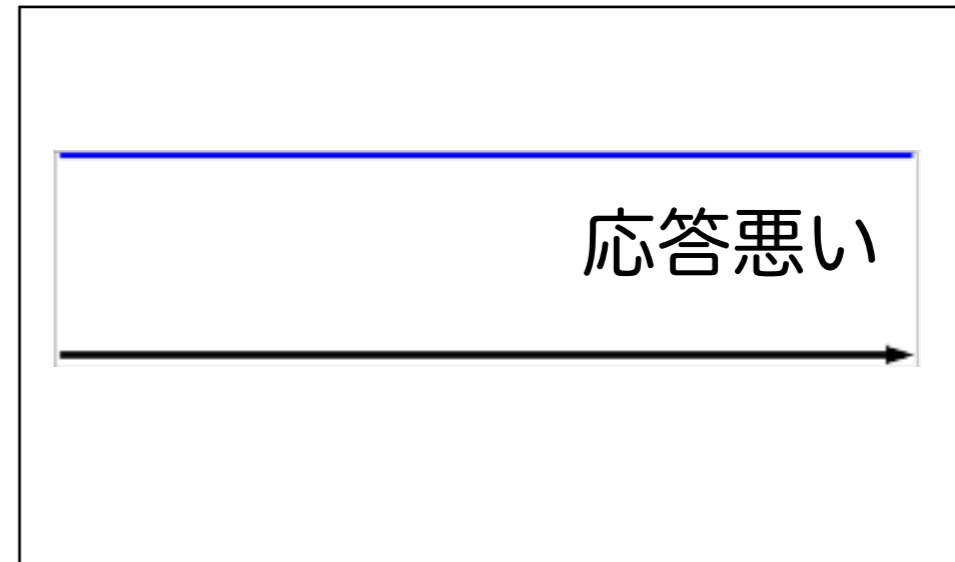
アンプのダイナミックレンジ



入力 + 内部雑音

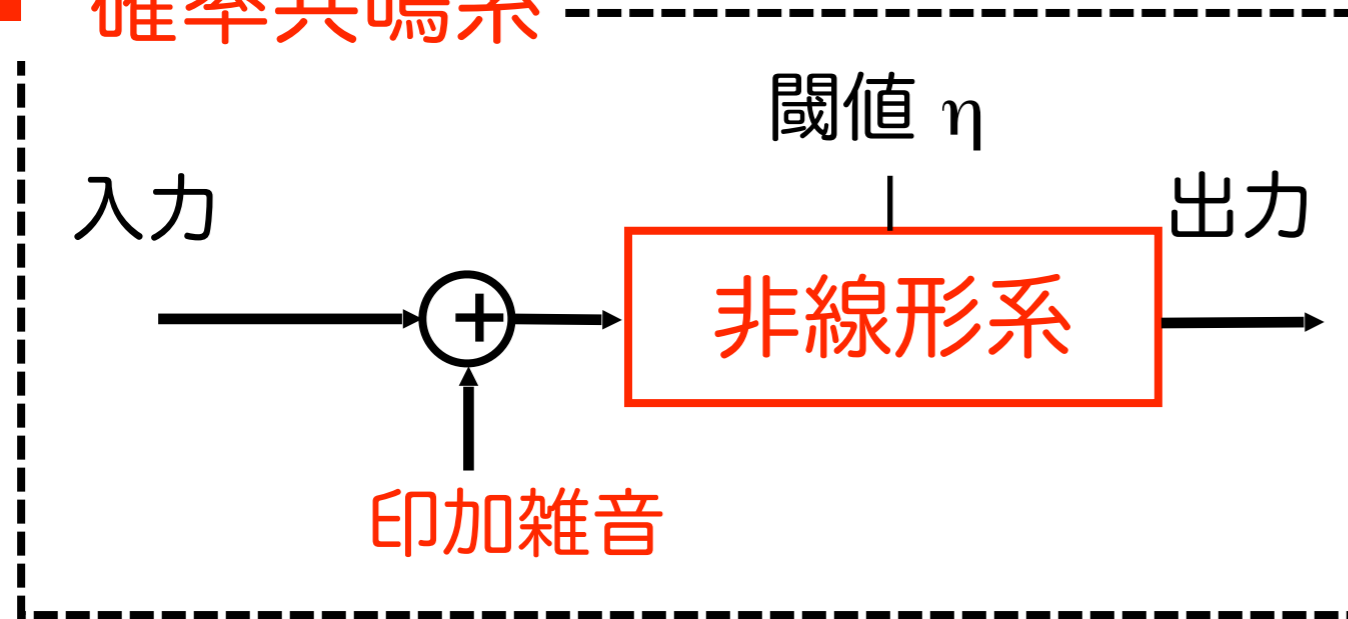


出力

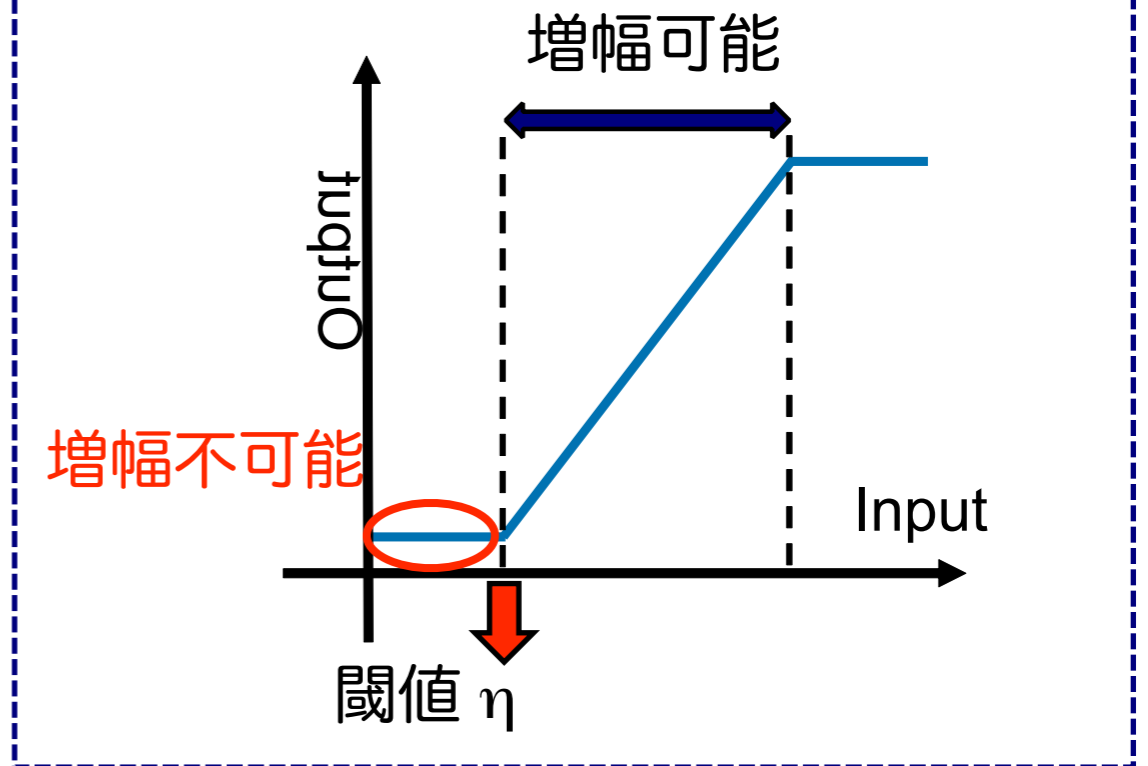


受信感度以下の信号検出 (2/2)

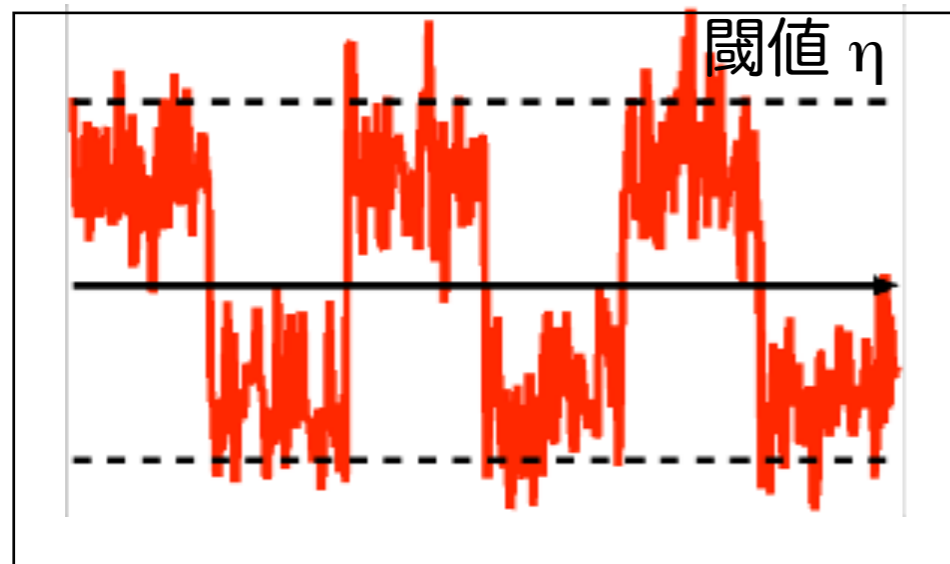
■ 確率共鳴系



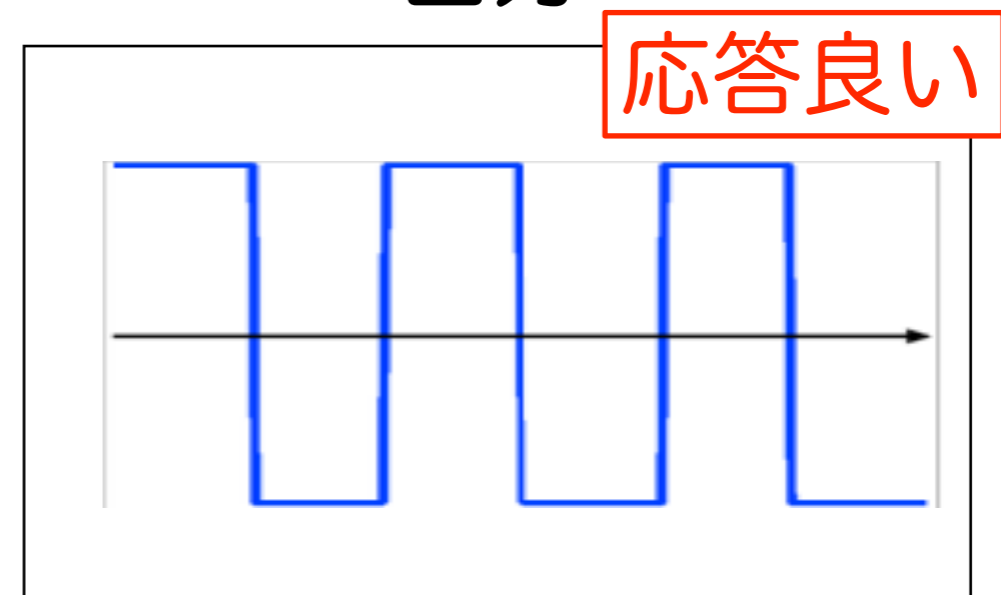
アンプのダイナミックレンジ



入力 + 印加雑音

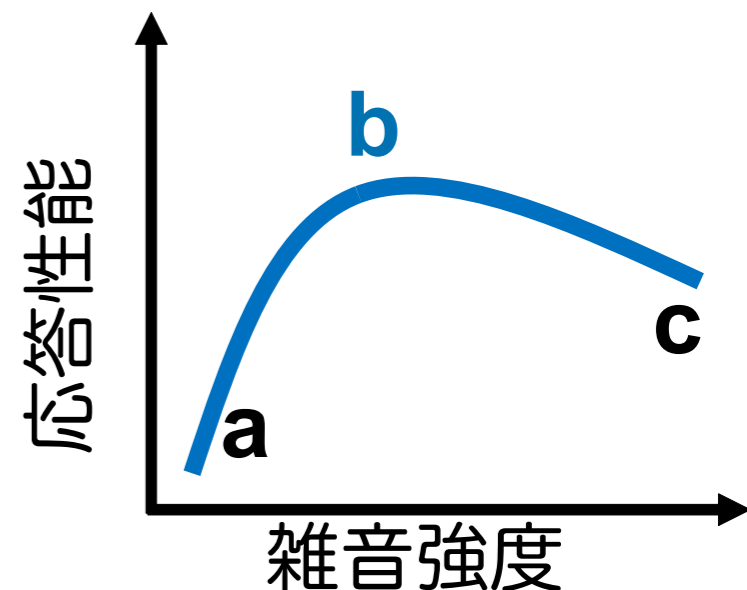


出力



印加雜音 (1/2)

■ 雜音強度

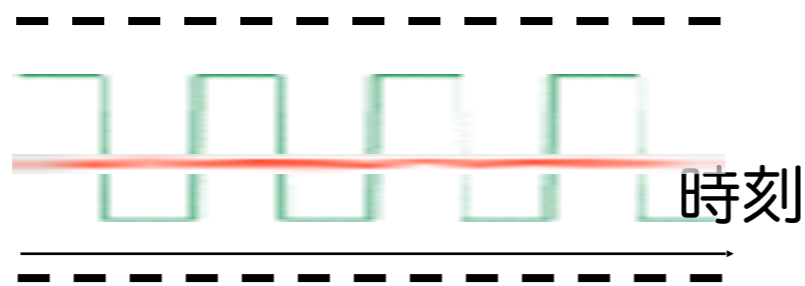


入力

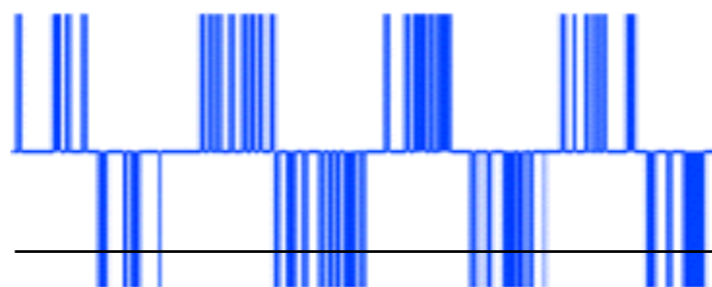
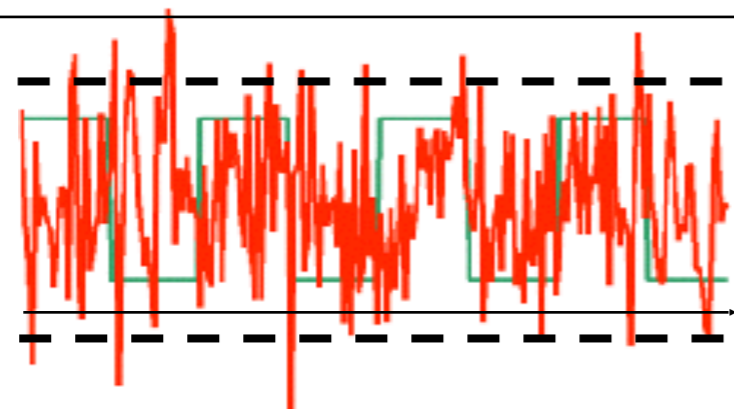
出力

閾値

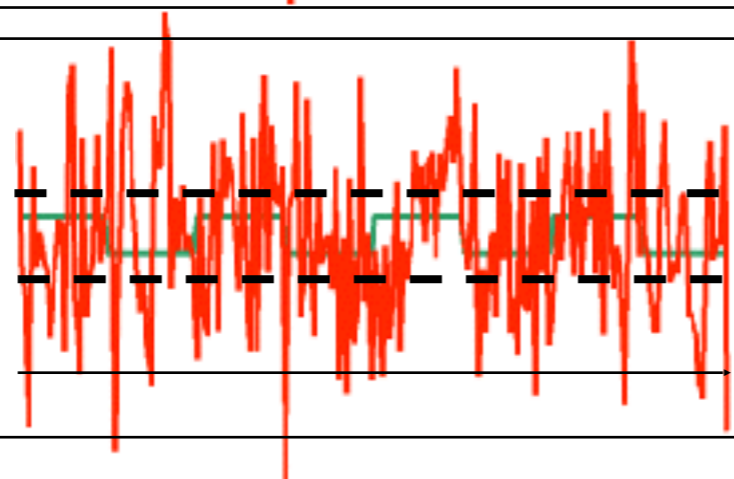
a. 低強度



b. 最適強度



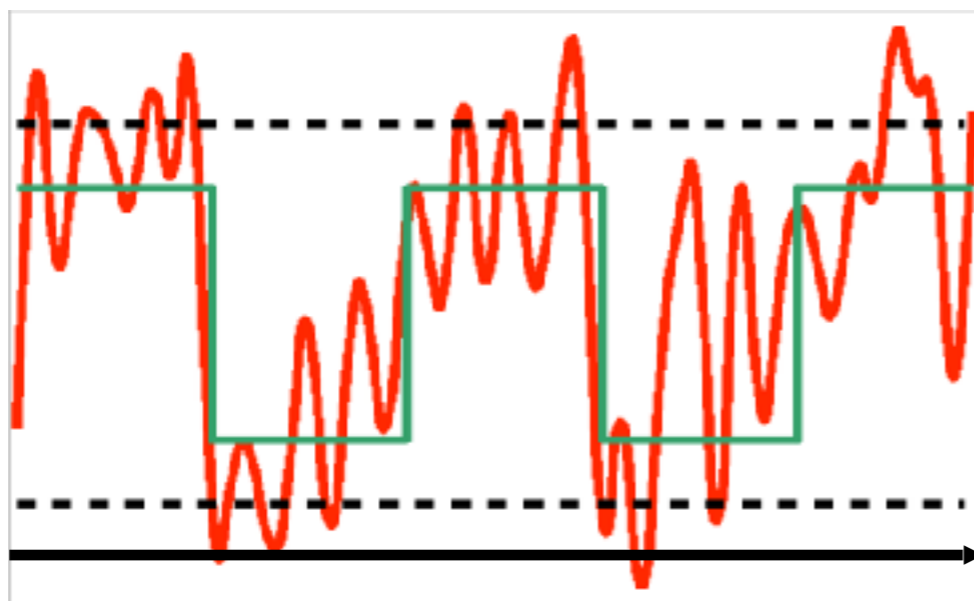
c. 高強度



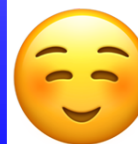
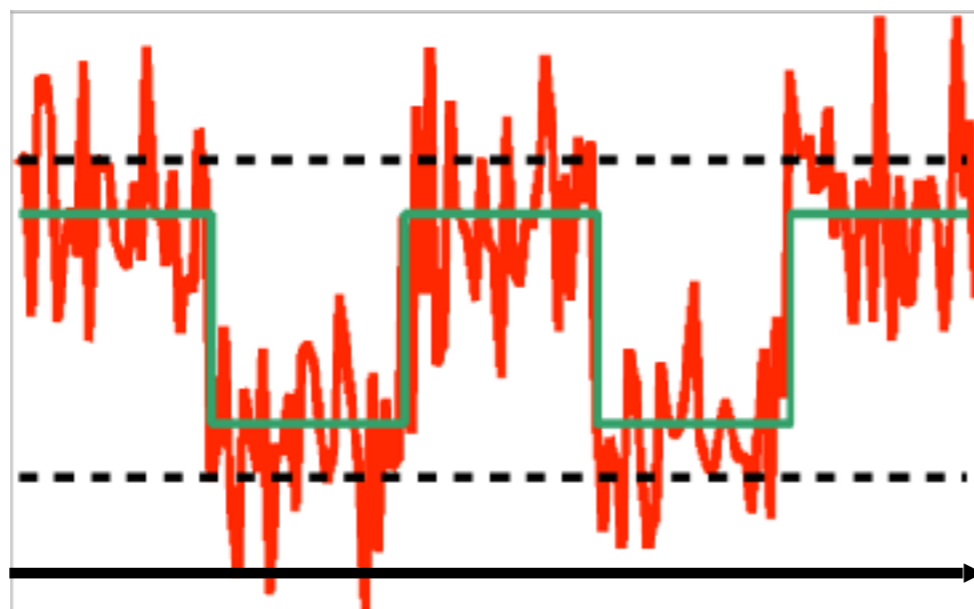
印加雜音 (2/2)

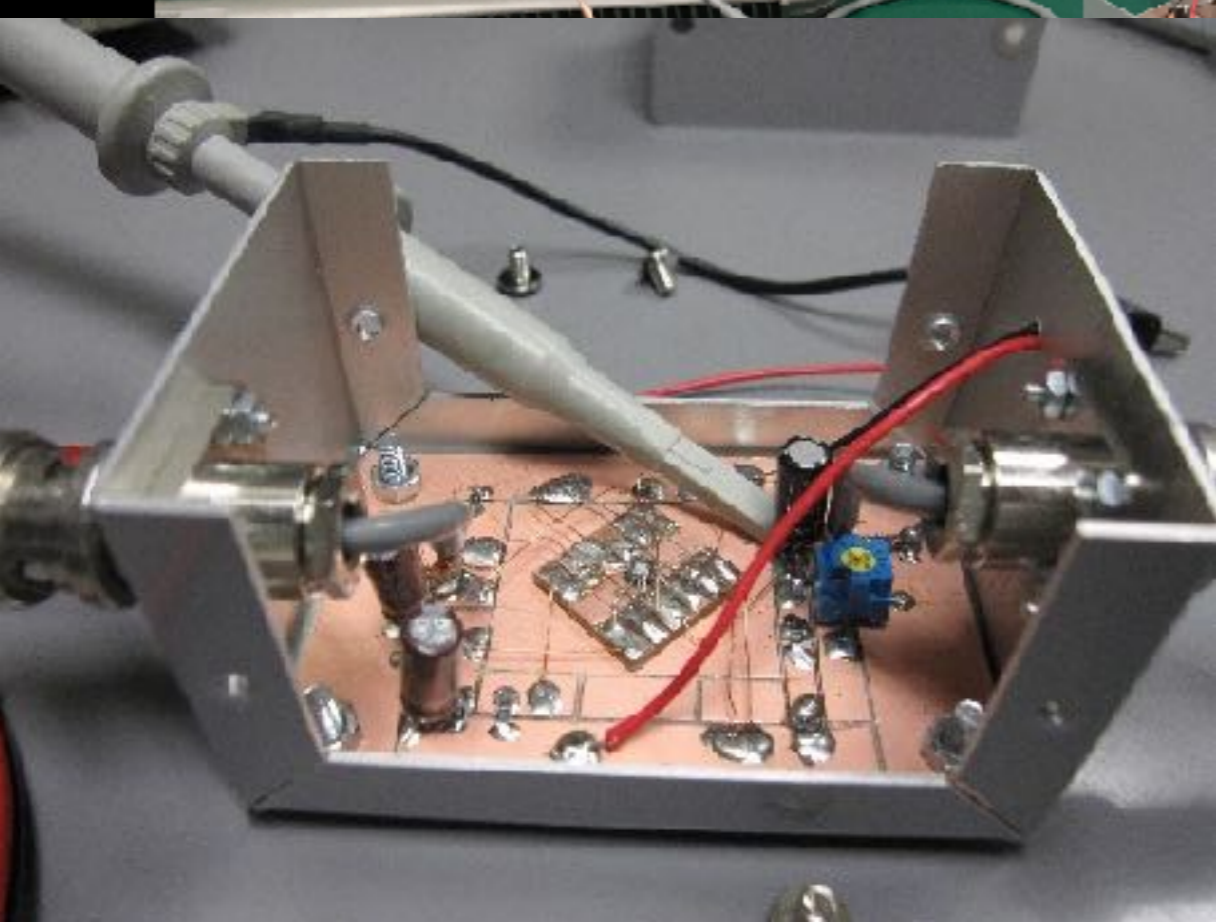
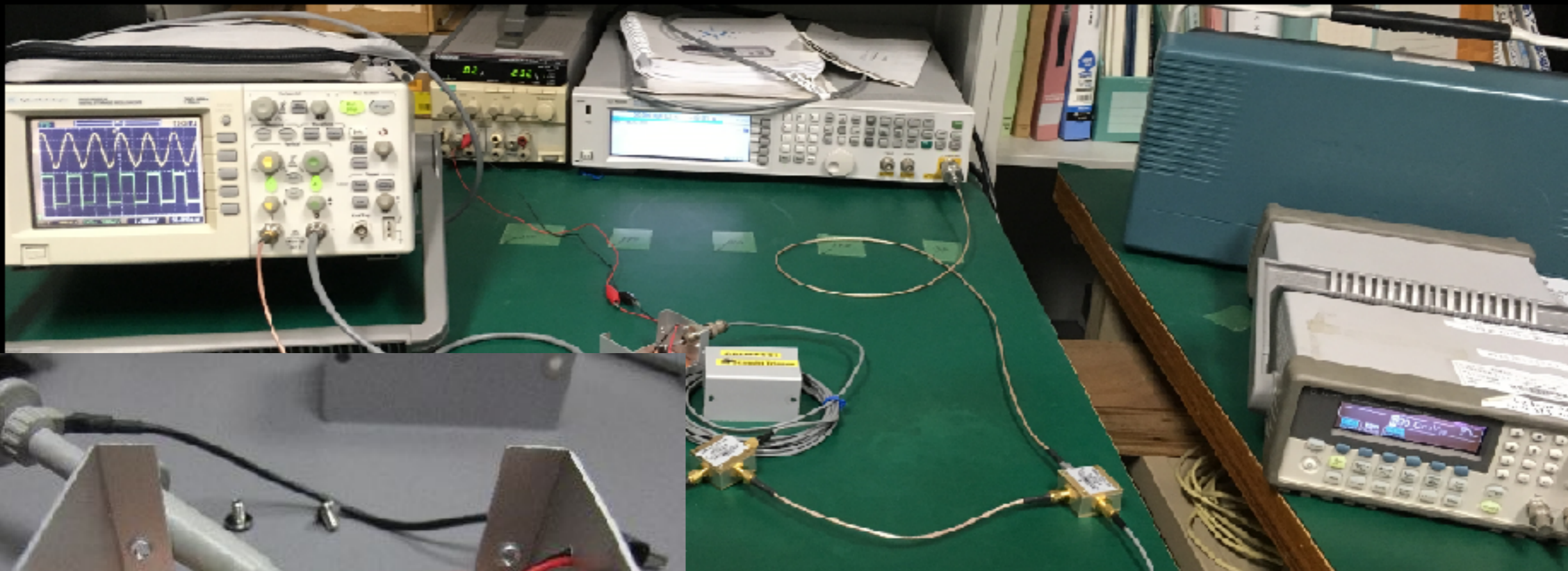
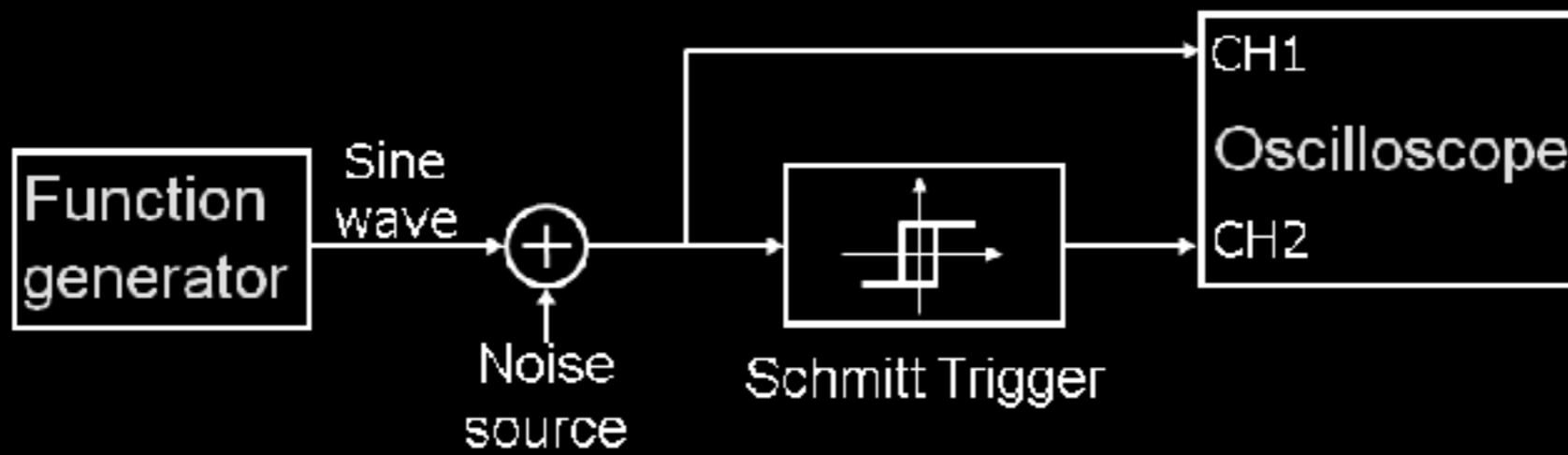
- 雜音帶域幅

狭帯域



広帯域



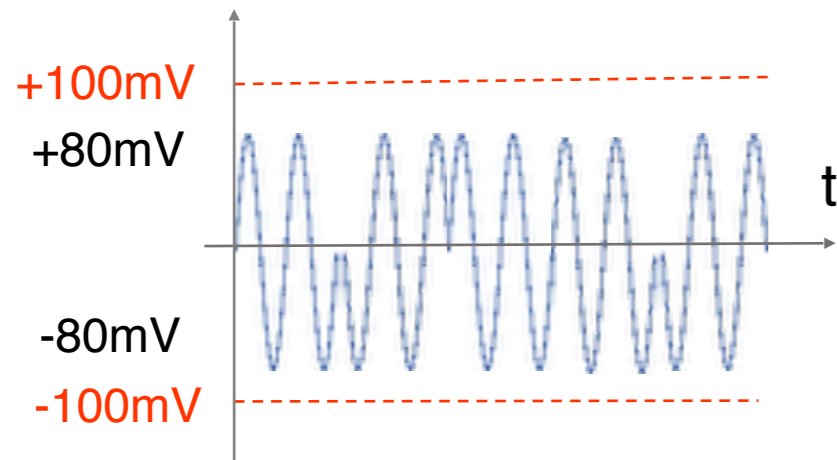


試作したSchmitt Trigger

K. Chiga, et al, *NOLTA'14*, pp.197-200, Sep. 2014.

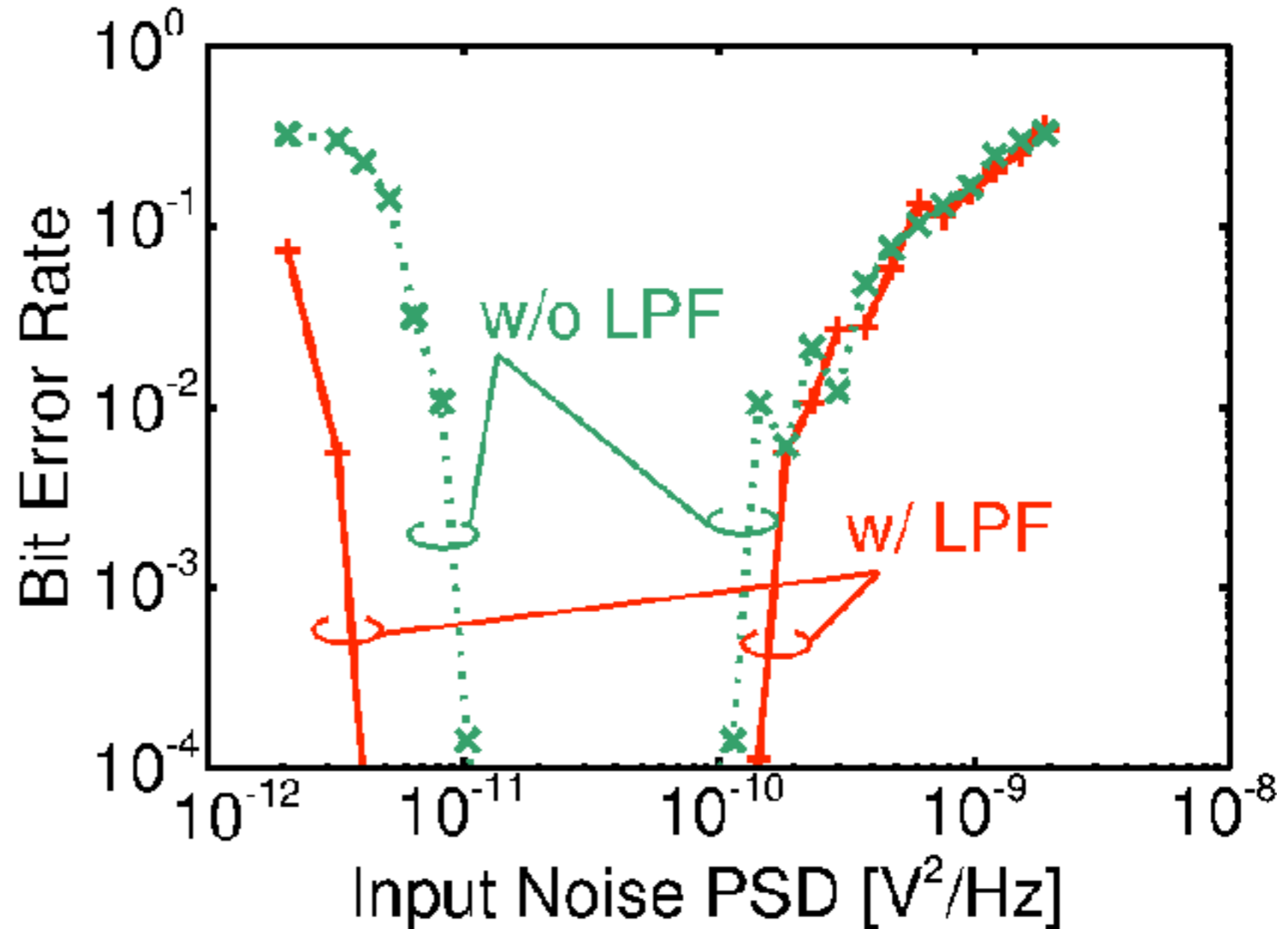
実験結果

受信信号レベル: $A < \text{受信感度} : \eta$



実験諸元

キャリア周波数	50MHz
信号振幅	80mV
Schmitt Trigger のしきい値	100mV
送信データ レート	62.5kbps
試行回数	100
フレームあたり のデータビット 数	1000
送信総データ ビット数	10^5



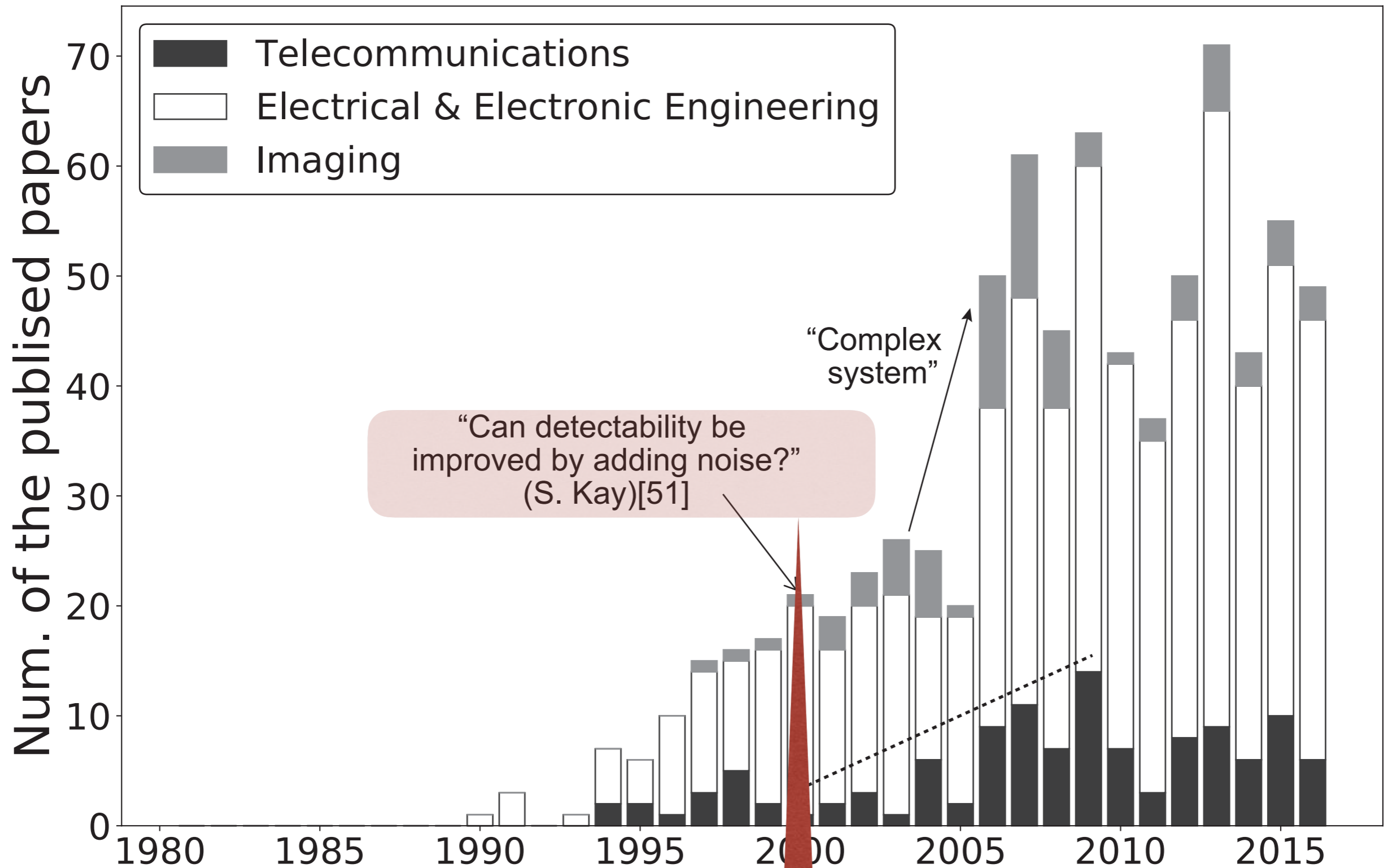
確率共鳴BPSK受信機における入力雑音PSD-BER特性

K. Chiga, et al, *NOLTA'14*, pp.197-200, Sep. 2014.

目次

- 確率共鳴現象に関する検討の俯瞰
- 確率共鳴のメカニズム
 - 二重井戸ポテンシャル系
 - しきい値系
- 確率共鳴現象の通信への応用
 - 仮説検定
 - 確率共鳴受信機

情報通信分野に関連する学術論文発行件数



Pub 確率共鳴現象の信号処理への応用

仮説検定

信号成分なし $H_0 : x[n] = w[n].$

ガウス雑音

信号成分あり $H_1 : x[n] = A_{\text{DC}} + w[n].$

信号の DC レベル

$$p(w) = \frac{1}{2} \phi(w; \mu, 1) + \frac{1}{2} \phi(w; -\mu, 1).$$

$$\phi(w; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(w - \mu)^2\right].$$

検出確率

$$\begin{aligned} P_x &= P[A_{\text{DC}} + w[n] > 0] \\ &= \frac{1}{2} Q(-A_{\text{DC}} - \mu) + \frac{1}{2} Q(-A_{\text{DC}} + \mu), \end{aligned}$$

仮説検定（確率共鳴）

信号成分なし $H_0 : x[n] = w[n].$

信号成分あり $H_1 : x[n] = A_{\text{DC}} + w[n].$

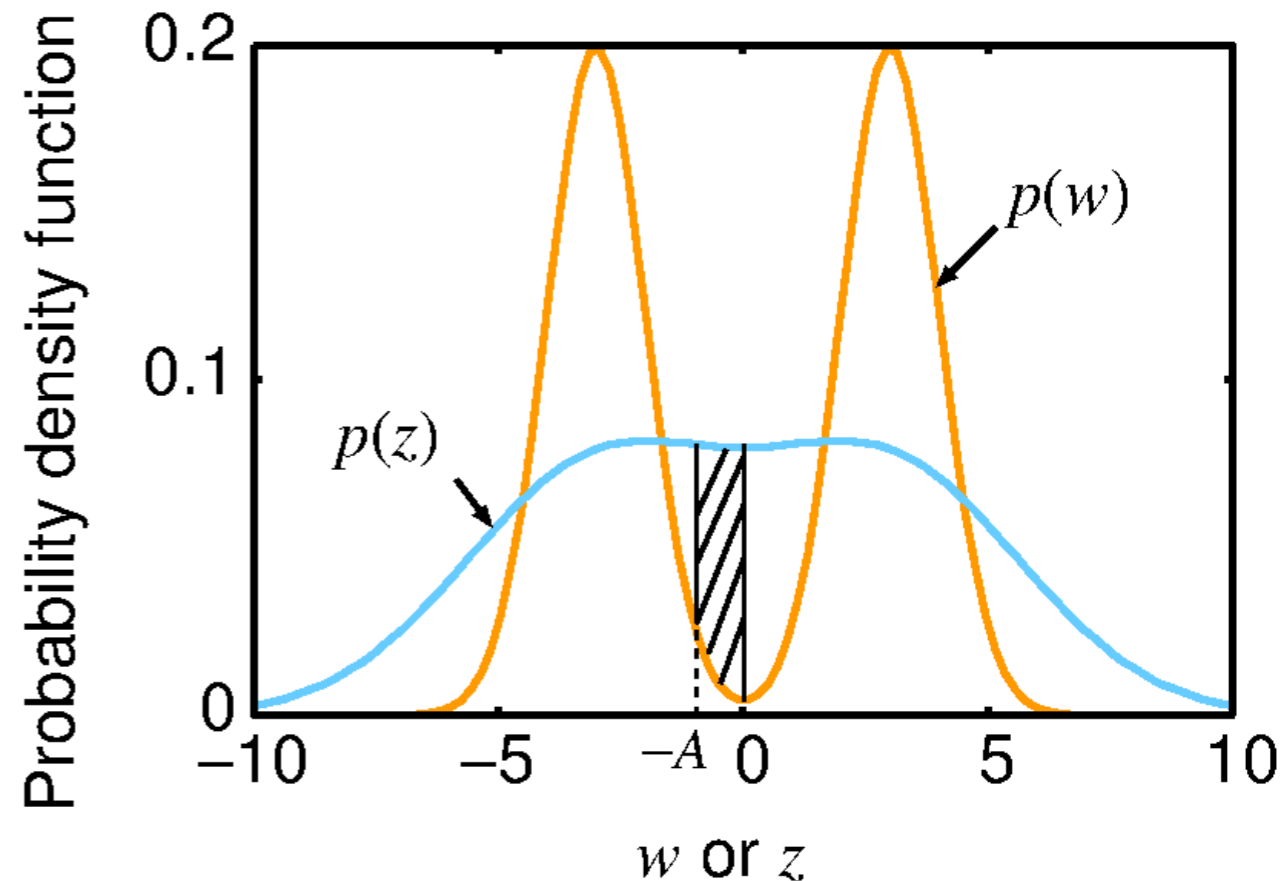
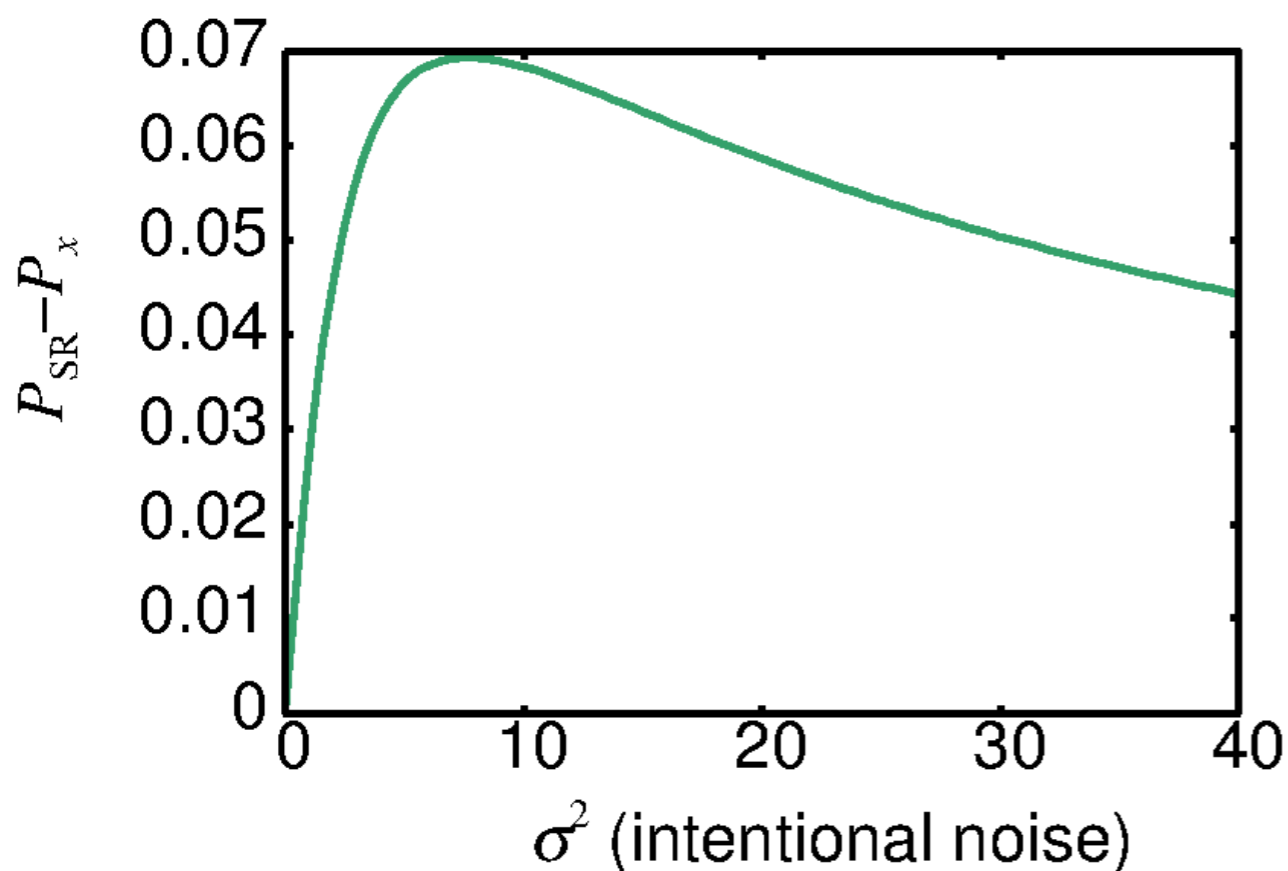
$x[n]$ に雑音を印加

$$x_{\text{SR}}[n] = x[n] + n_{\text{SR}}[n],$$

検出確率

$$\begin{aligned} P_{\text{SR}} &= P[A_{\text{DC}} + w[n] + n_{\text{SR}}[n] > 0] \\ &= \frac{1}{2} Q\left(\frac{-A_{\text{DC}} - \mu}{\sqrt{1 + \sigma^2}}\right) + \frac{1}{2} Q\left(\frac{-A_{\text{DC}} + \mu}{\sqrt{1 + \sigma^2}}\right), \end{aligned}$$

雑音を印加することによって検出確率を改善



印加雑音による検出確率の改善は
雑音の確率分布が変化したことに起因

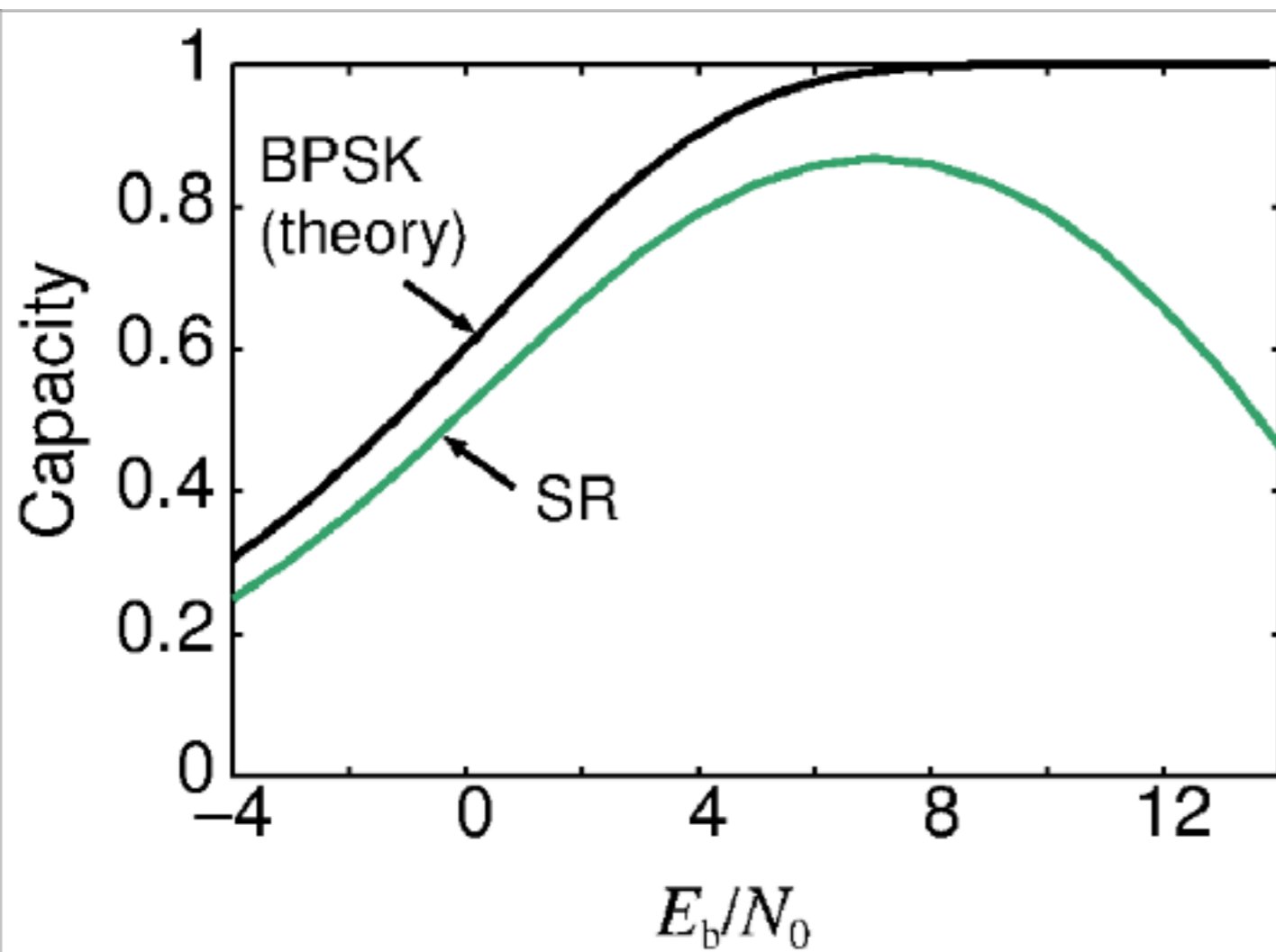
従来方式との比較

	誤り訂正技術+低ノイズ アンプ (従来方式)	確率共鳴受信機
誤り率	シャノン限界に迫る特性 😊	印加雑音・非線形系 により劣化 😞
受信感度	内部雑音に依存 😞	閾値以下の信号を 検出可能 😊
消費電力	高い 😞	雑音により 低減可能 😊

受信感度, 消費電力に関しては優位

通信路容量

	誤り訂正技術+低ノイズ アンプ (従来方式)	確率共鳴受信機
誤り率	シャノン限界に迫る特性 😊	印加雑音・非線形系 により劣化 😞



通信路容量比較

BPSK
(theory)



SR



受信感度

	誤り訂正技術+低ノイズ アンプ (従来方式)	確率共鳴受信機
誤り率	シャノン限界に迫る特性 😊	印加雑音・非線形系 により劣化 😞
受信感度	内部雑音に依存 😞	しきい値以下の信号を 検出可能 😊

雑音

受信信号 (1μV) → 内部雑音 (熱雑音) (0.9μV) → 低ノイズアンプ → 雑音電圧例(rms)

$$\sqrt{4kT_0BR}$$

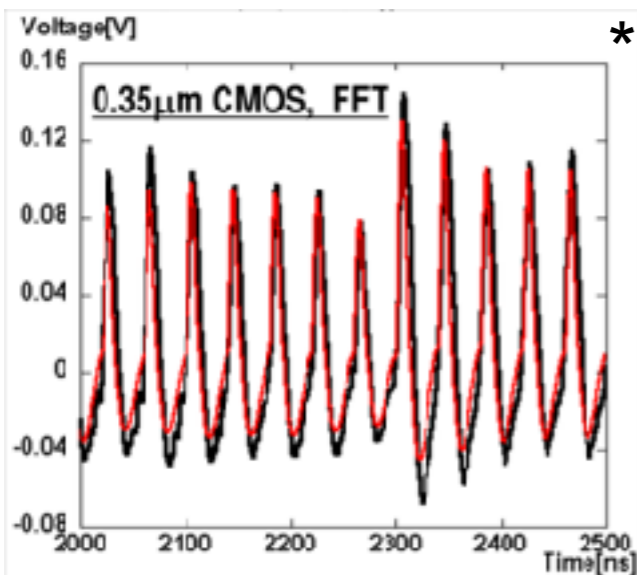
$$\sim 0.9 [\mu V]$$

k : ボルツマン定数
 T_0 : 絶対温度 (300K)
 B : 帯域幅(1MHz)
 R : 抵抗(50Ω)

増幅不可能

消費電力

	誤り訂正技術+低ノイズ アンプ (従来方式)	確率共鳴受信機
誤り率	シャノン限界に迫る特性 😊	印加雑音・非線形系 により劣化 😞
受信感度	内部雑音に依存 😞	閾値以下の信号を 検出可能 😊
消費電力	高い 😞	雑音により 低減可能 😊



*集積回路における電源雑音波形例

電源雑音等を再利用可能*

*<http://www.a-r-tec.jp/AwardNagata.pdf>

まとめ

- 確率共鳴現象と通信への応用について概説
- 確率共鳴現象を利用することで、従来は関知することすらできなかつた微小信号も受信できる
- 一定の条件下で信号検出の確率を改善
- 確率共鳴系では雑音印加による特性劣化が必ず生じる
- 線形系が利用できる状況では利用すべきでない
- 劣化をポジティブに受け入れ、線形系では扱うことができない環境での利用を検討すべき