

Свободная энергия и интеллект

Интеллект из первых принципов

Новая научная революция

Прозрения



Свидетельства



Теория

Механика
(косная материя)



Н. Коперник



Г. Галилей



И. Ньютон

Интеллект
(мыслящая материя)



А. Тьюринг



Д. Хинтон



К. Фристон

Математика интеллекта

Интеллект, как имманентное свойство сложных адаптивных систем

Что такое интеллект?

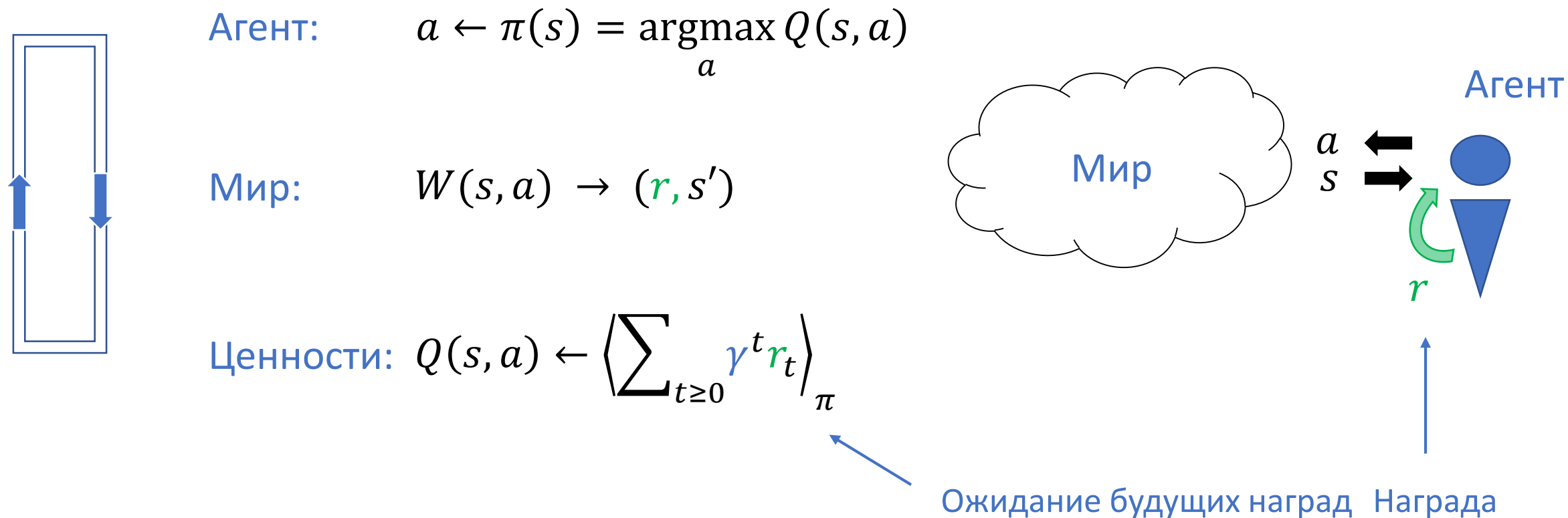
- Внутренняя мотивация поведения
Потребность в достижении целей
- Способность к обучению
Способность достигать разные цели

Творческая
личность



IQ ~ скорость обучения достижения новых целей
(скорость адаптации к новой обстановке)

Модель интеллекта: Reinforcement Learning



План

- Природа целесообразного поведения

Интеллект как имманентное свойство сложных адаптивных систем

Свободная энергия как инструмент моделирования интеллекта

- Моделирование психики

Когнитивные переменные как модель «хорошего регулятора»

Уравнения психодинамики – быстрая минимизация свободной энергии

Уравнения обучения – медленная минимизация свободной энергии (RL)

- Уровни интеллекта

От интуитивного поведения – к рациональному мышлению

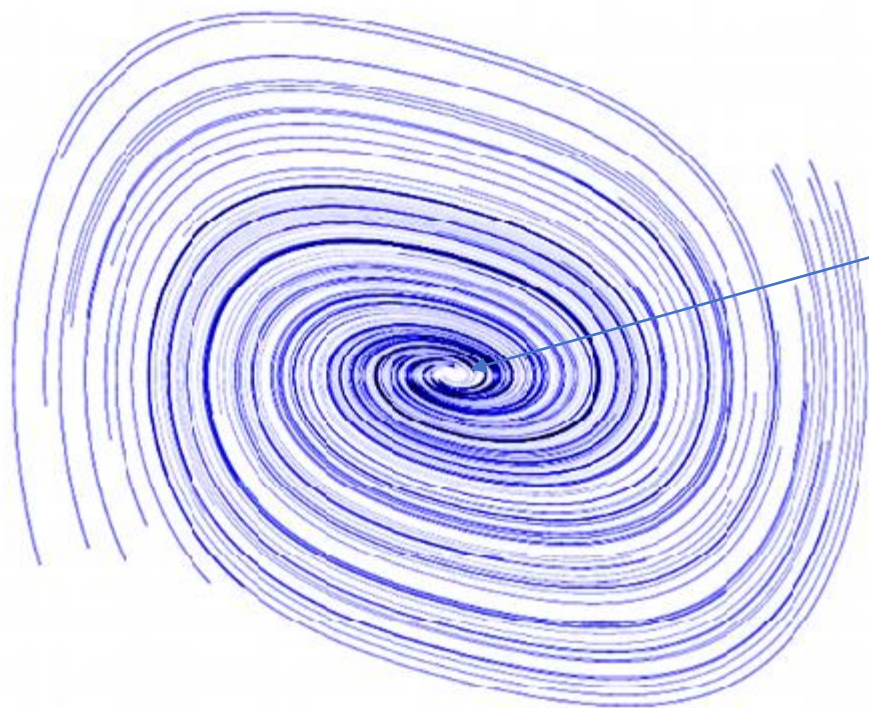
От Model-free – к Model-based RL

Диссипативные системы

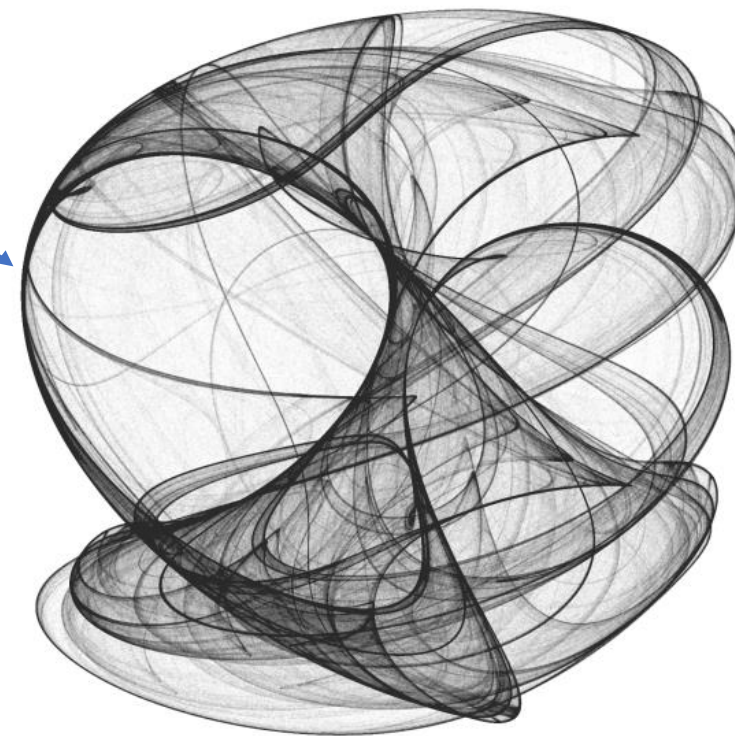
$$\dot{x} = f(x) + \xi(t)$$

Аттракторы – адаптивное поведение

$$f(x) = \Gamma \nabla \ln p(x)$$

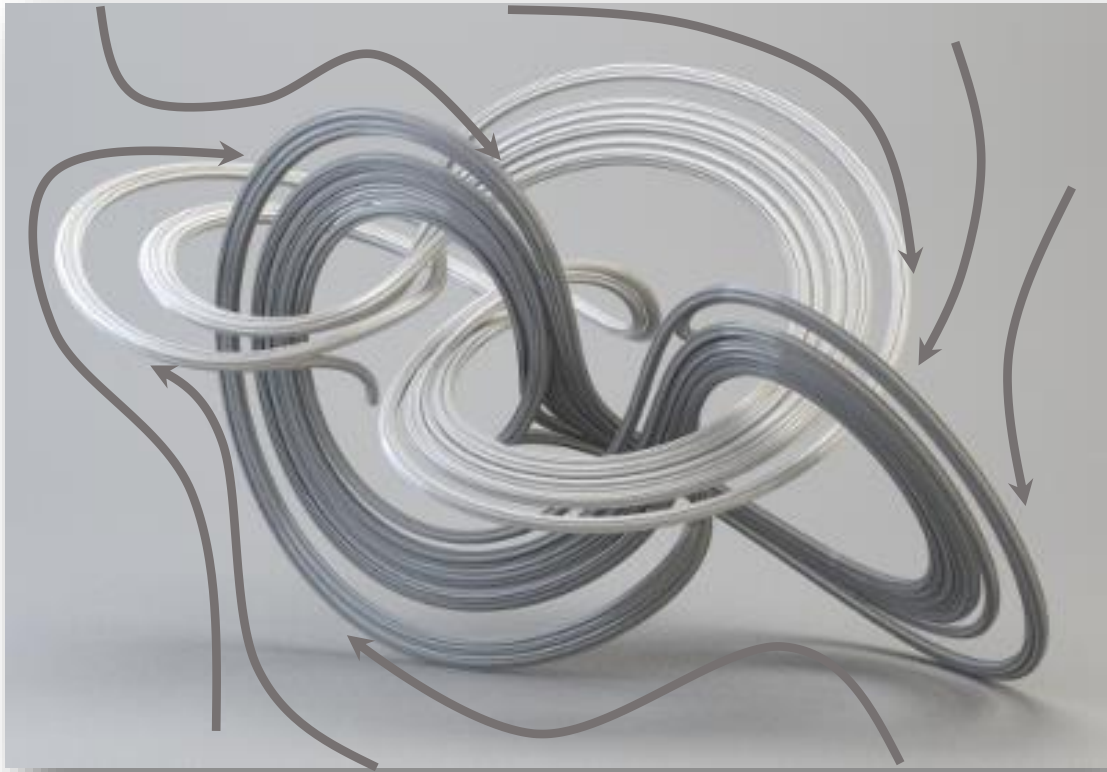


Механика: простое адаптивное поведение



Интеллект: сложное адаптивное поведение

Адаптация как обучение



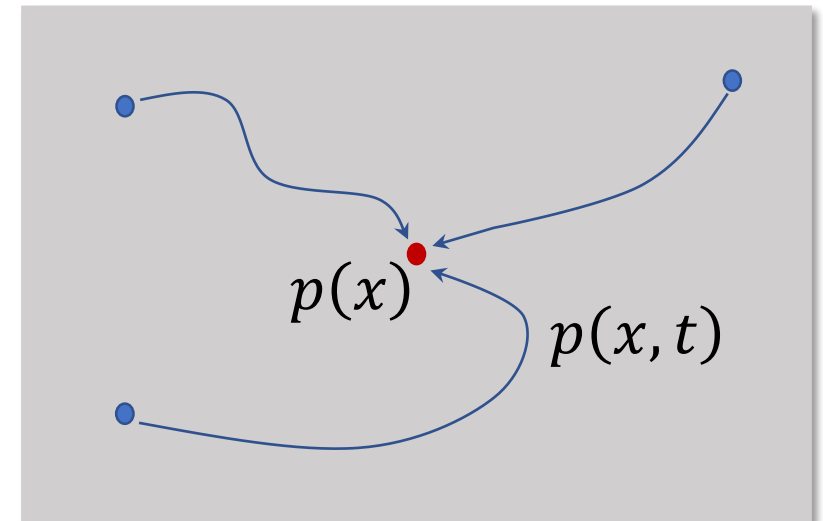
$$\dot{x} = \Gamma \nabla \ln p(x) + \xi(t)$$

↑
Порождающая модель

Знания – информация
необходимая для адаптации

$$\begin{aligned}\mathcal{F}(t) &\equiv \int dx p(x, t) [\ln p(x, t) - \ln p(x)] \\ &= D(p(x, t) || p(x)) \geq 0\end{aligned}$$

$$\dot{\mathcal{F}}(t) \leq 0$$



Обучение – приобретение знаний

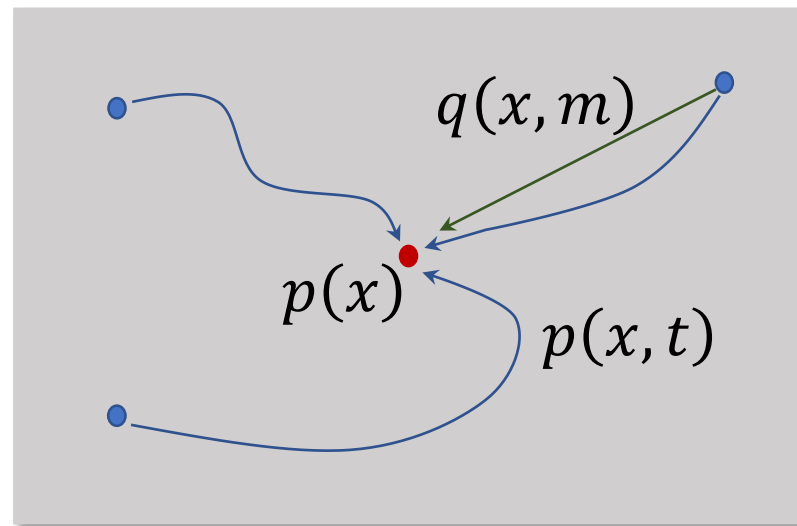
Интеллект – способность к обучению: $IQ = -\dot{\mathcal{F}}(t)$

Моделирование интеллекта

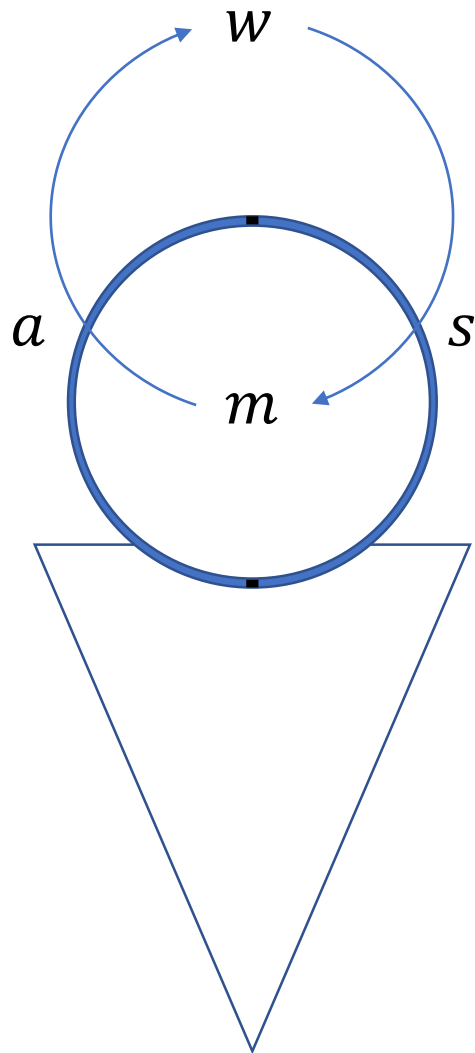
Интеллект (Свободная энергия) $\longrightarrow \mathcal{F}(t) = D(p(x, t) || p(x)) \geq 0 \quad \dot{\mathcal{F}}(t) \leq 0$

Модель интеллекта (Вариационная свободная энергия) $\longrightarrow \mathcal{F}(m) = D(q(x, m) || p(x)) \geq 0$

Алгоритмы обучения $\longrightarrow \dot{\mathcal{F}}(m) \leq 0$



Мозг, как адаптивная система



w – состояние мира

s – показания сенсоров

a – действия актуаторов

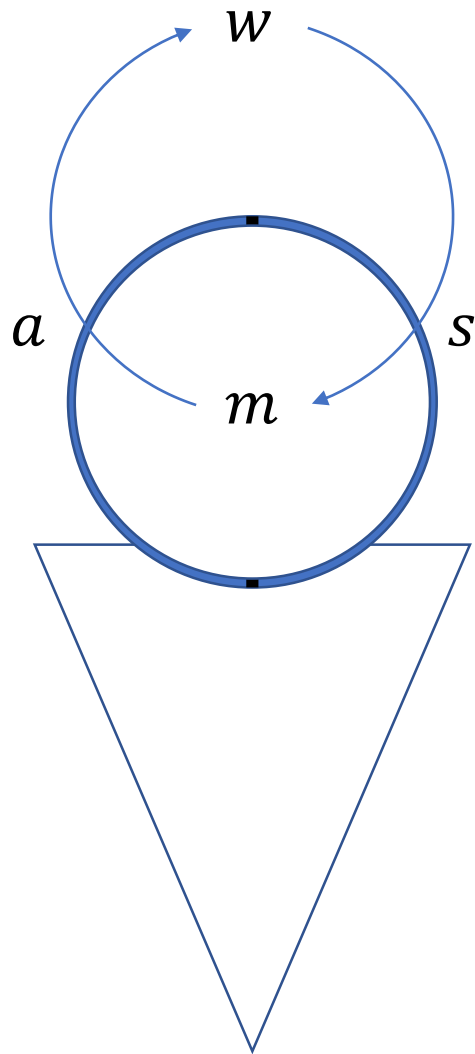
t – состояние мозга

} b – сенсомоторная граница

Тело для мозга – часть мира.

← Главная задача мозга – активное поддержание параметров тела в заданных пределах $p(s)$

Мозг, как адаптивная система



w – состояние мира

s – показания сенсоров

a – действия актуаторов

m – состояние мозга

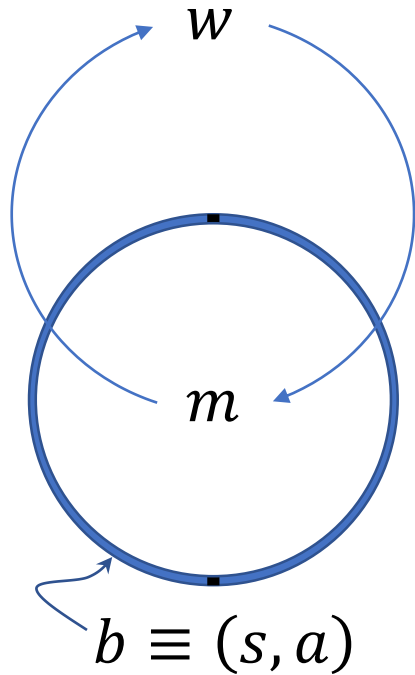
} b – сенсомоторная граница

$$\dot{x} = f(x) + \xi(t) \quad \Rightarrow$$

$$\dot{m} = f_m(m, s) + \xi(t) \quad \leftarrow \text{Восприятие}$$

$$\dot{a} = f_a(m, a) + \xi(t) \quad \leftarrow \text{Действия}$$

Два способа описания мозга



$$p(x) = p(w, b, m) = p(w, b)p(m, b)$$

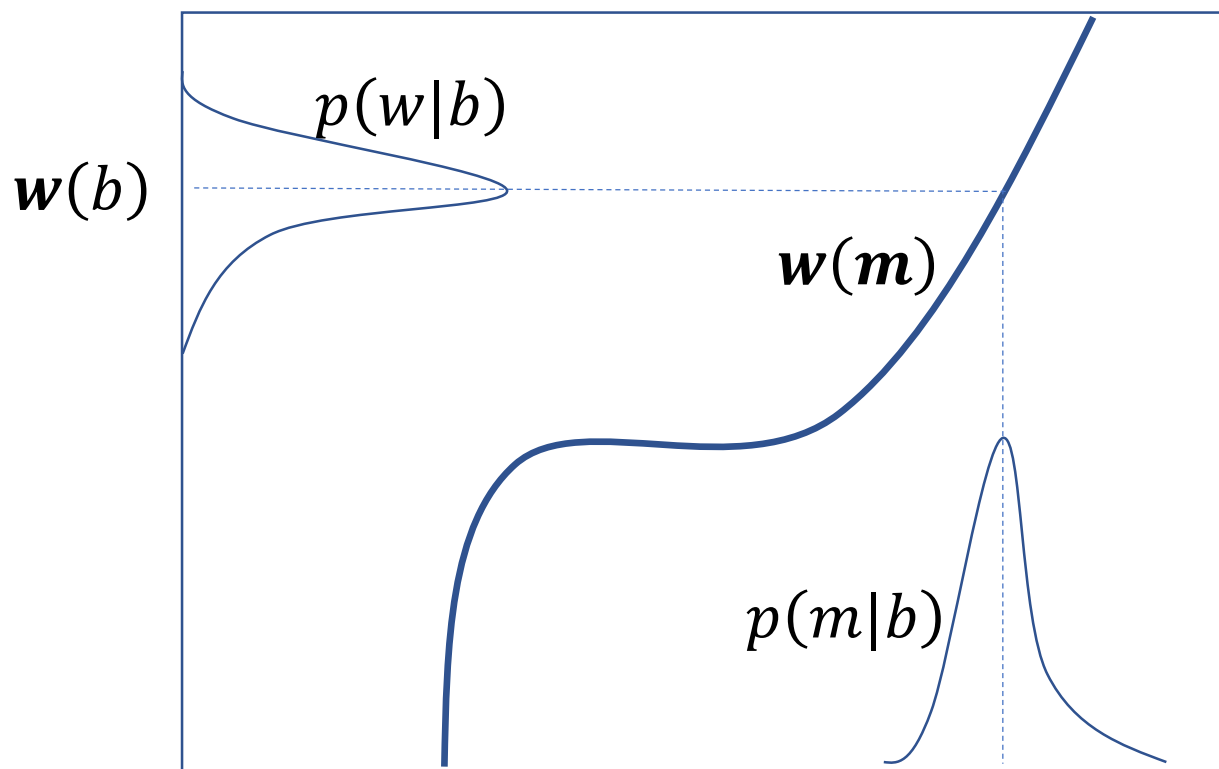
← Физика – граничная задача

$$\frac{p(w, \cancel{b}, m)}{p(w, \cancel{b})}$$

← Психика – отношение между мозгом и миром

Когнитивные переменные m

$$p(x) = p(w, b, m) = p(w|b)p(m|b)p(b)$$



$$m(b) \equiv \arg\max_m p(m|b)$$

Сложность сознания определяется
сенсомоторным аппаратом

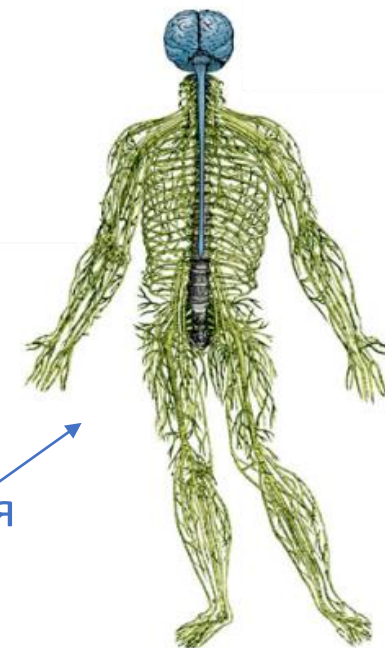
$$\dim(M) = \dim(b) \ll \dim(m)$$

$$M: m \leftrightarrow w$$

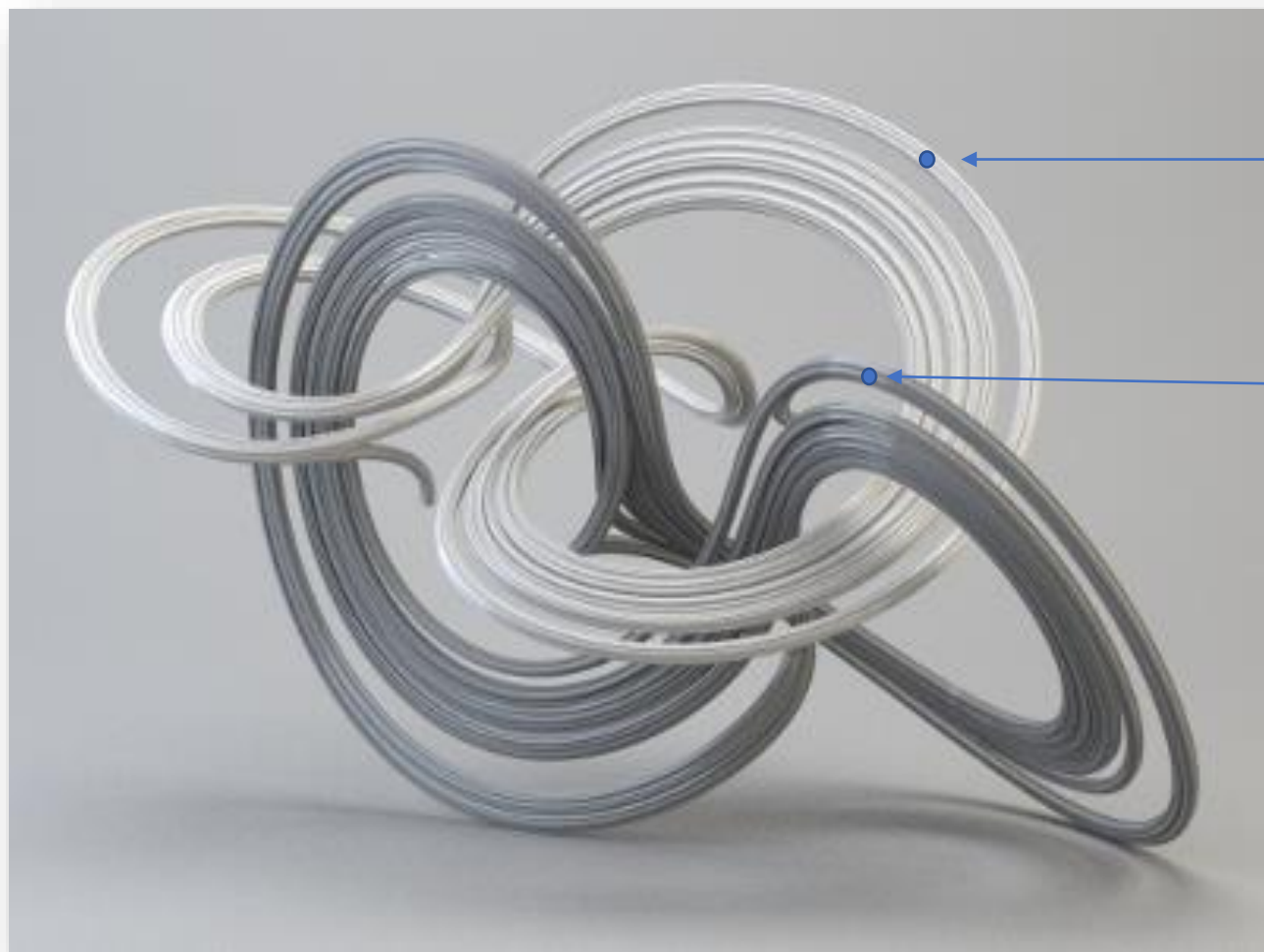
Сознание – модель мира
в мозге

Преодоление границы

Формирование сознания
(бессознательно)



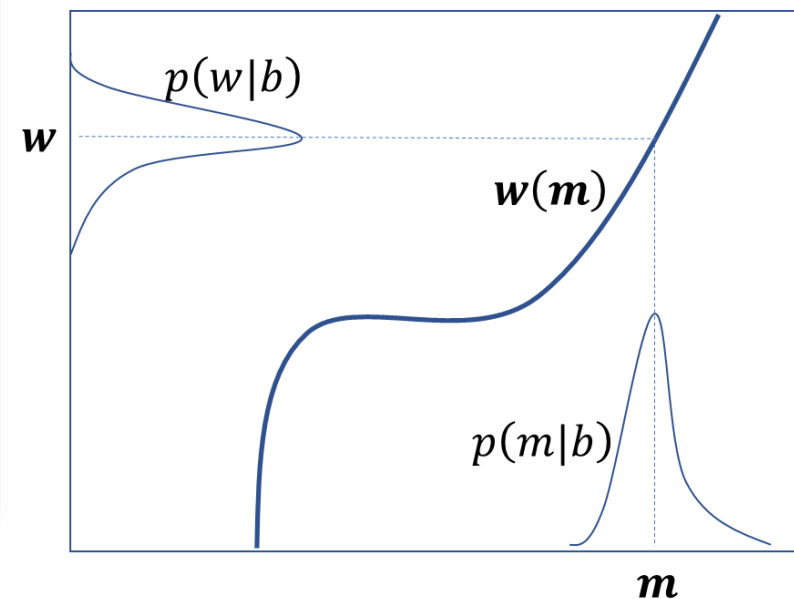
Отражение мира в сознании



Когнитивное состояние мозга m

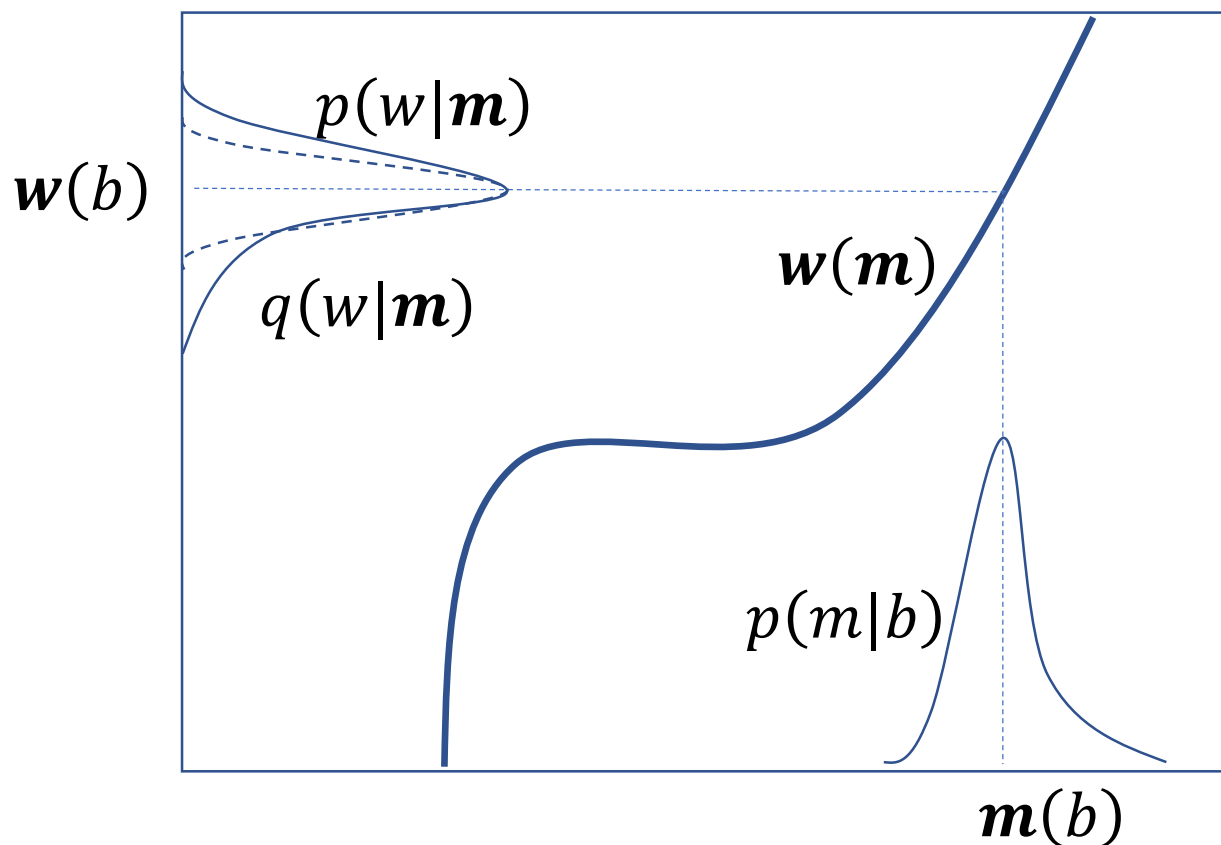
$$M: m \leftrightarrow w$$

Воспринимаемое состояние мира w



Психодинамика

$$\dot{\mathbf{m}} = -\Gamma_{mm} \nabla_{\mathbf{m}} \mathcal{F}(\mathbf{m}, b)$$



Оптимальная модель
мира



Свободная энергия

$$\mathcal{F}(\mathbf{m}, b) = D(p(w|\mathbf{m}) || p(w, b, \mathbf{m}))$$

Вариационная свободная энергия

$$\mathcal{F}(\mathbf{m}, b) = D(q(w|\mathbf{m}) || p(w, b, \mathbf{m}))$$

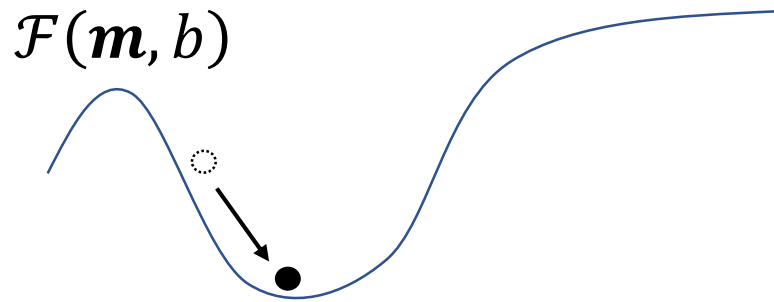


Вариационная модель
мира

$$\min_q \mathcal{F}(\mathbf{m}, b) \Rightarrow q(w|\mathbf{m}) = p(w|\mathbf{m})$$

Психодинамика как байесовский вывод

$$\dot{\mathbf{m}} = -\Gamma_{mm} \nabla_{\mathbf{m}} \mathcal{F}(\mathbf{m}, b)$$



$$\mathcal{F}(\mathbf{m}, b) = D(q(w|\mathbf{m})||p(w, b, \mathbf{m}))$$

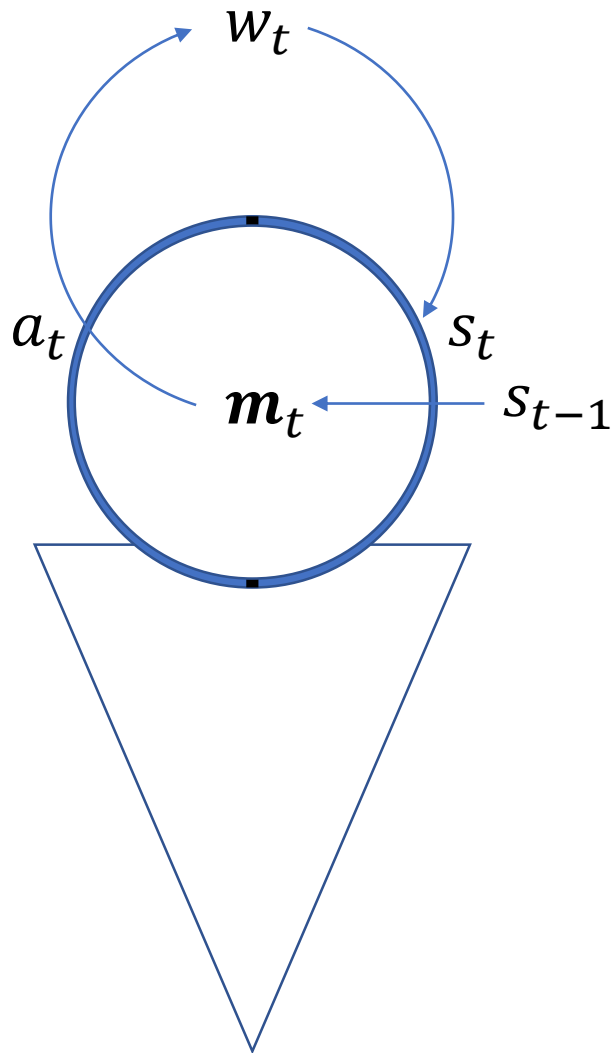
$$= D(q(w|\mathbf{m})||p(w|b, \mathbf{m})p(b, \mathbf{m}))$$

$$= D(q(w|\mathbf{m})||p(w|b, \mathbf{m})) - \ln p(b, \mathbf{m})$$

$$\min_q \mathcal{F}(\mathbf{m}, b) \Rightarrow \mathcal{F}(\mathbf{m}, b) \rightarrow -\ln p(b, \mathbf{m}) \quad \leftarrow \text{Evidence}$$

$$\min_q \mathcal{F}(\mathbf{m}, b) \Rightarrow q(w|\mathbf{m}) \rightarrow p(w|b, \mathbf{m}) \quad \leftarrow \text{Posterior}$$

Когнитивный акт



$$p(x_t) = p(s_t|w_t)p(w_t|a_t)p(a_t|\mathbf{m}_t)p(\mathbf{m}_t|s_{t-1})$$

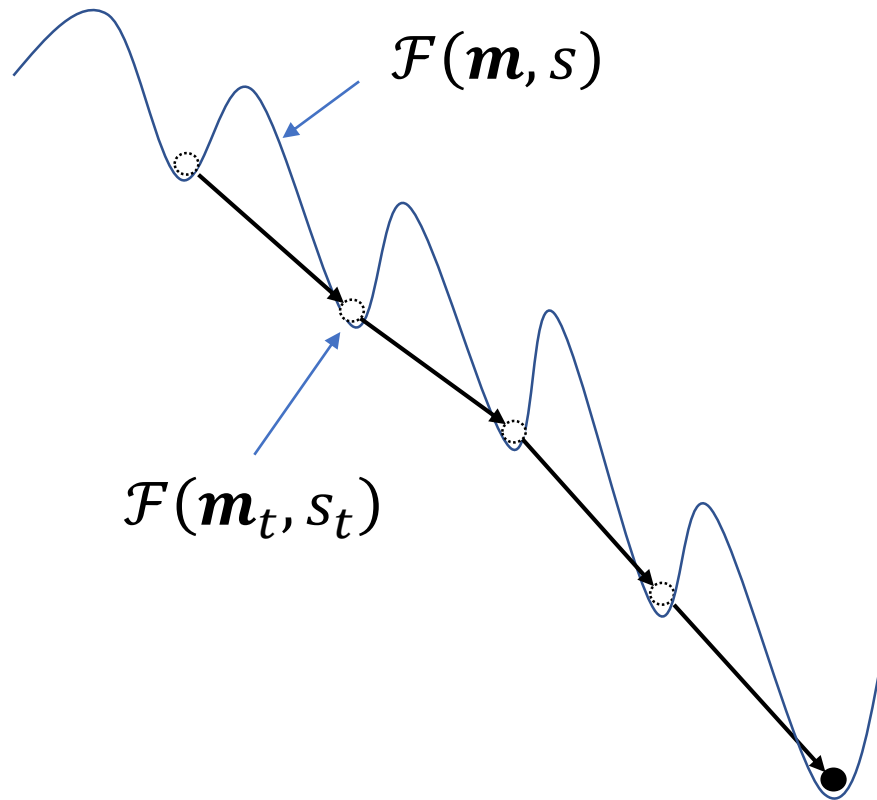
Мир
Мозг

Модель поведения
(сознание)
Модель восприятия
(подсознание)

$\tau \sim 0.3 \text{ c}$

$$p(x_t) = p(s_t, w_t|\mathbf{m}_t) \quad \mathbf{m}_t = \underset{m}{\operatorname{argmax}} p(m|s_{t-1})$$

Обучение



$$\mathcal{F}(\mathbf{m}, s) = D(q(w|\mathbf{m})||p(s, w|\mathbf{m}))$$

$$\approx p(w|s, \mathbf{m})$$

$$\mathcal{F}(\mathbf{m}_t, s_t) = \int dw q(w, s_t|\mathbf{m}) \ln \frac{q(w, s_t|\mathbf{m})}{p(w, s_t|\mathbf{m})}$$

$$\mathcal{F}(\mathbf{m}_t) = D(q(s, w|\mathbf{m}_t)||p(s, w|\mathbf{m}_t))$$

Чему учится мозг?

Вариационная и Порождающая модели

$$\mathcal{F}(\mathbf{m}) = \int ds dw q(s, w | \mathbf{m}) [\ln q(s, w | \mathbf{m}) - \ln p(s, w | \mathbf{m})]$$

$$= \int ds dw q(s, w | \mathbf{m}) \left[\ln \frac{q(s | w, \mathbf{m})}{p(s)} + \ln \frac{q(w | \mathbf{m})}{p(w | s, \mathbf{m})} \right]$$

$$\min_q \mathcal{F}(\mathbf{m})$$

Приобретение знаний
с минимальным риском
(для достижения целей)

$$\xrightarrow{q \rightarrow p} \langle D(q(s | w, \mathbf{m}) || p(s)) \rangle - \langle D(q(w | s, \mathbf{m}) || q(w | \mathbf{m})) \rangle = -r(\mathbf{m}) - u(\mathbf{m})$$

Риск отклонения от
нормативных параметров
(– Награда за достижение
целевых параметров)

Новое знание при
взаимодействии с миром

Подкрепление
(reinforcement)

Полезность
(utility)

Эмоции – оценка
качества адаптации

Чему учится мозг?



Новое знание при
взаимодействии с миром

Риск отклонения от
нормативных параметров

$$\min_q \sum_{t=0}^T \mathcal{F}(\mathbf{m}_t)$$



Приобретение знаний
с минимальным риском

Reinforcement Learning

$$\max_q Q(\pi)$$

Приобретение знаний
для достижения целей

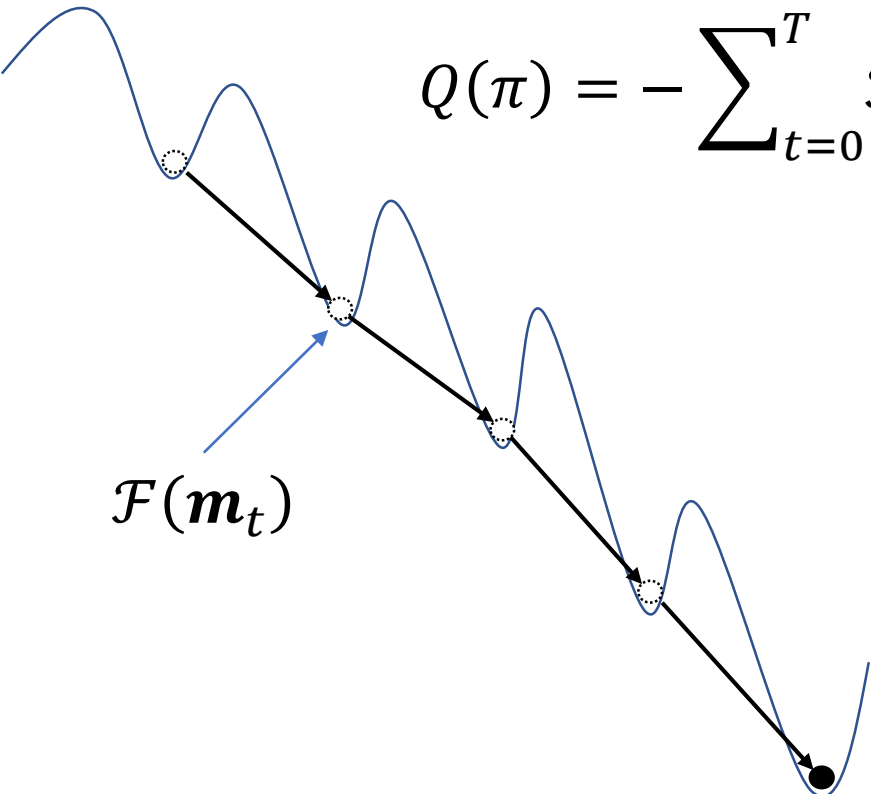
Exploitation *Exploration*

$$Q(\pi) = - \sum_{t=0}^T \mathcal{F}(\mathbf{m}_t) = \sum_{t=0}^T (r(\mathbf{m}_t) + u(\mathbf{m}_t))$$

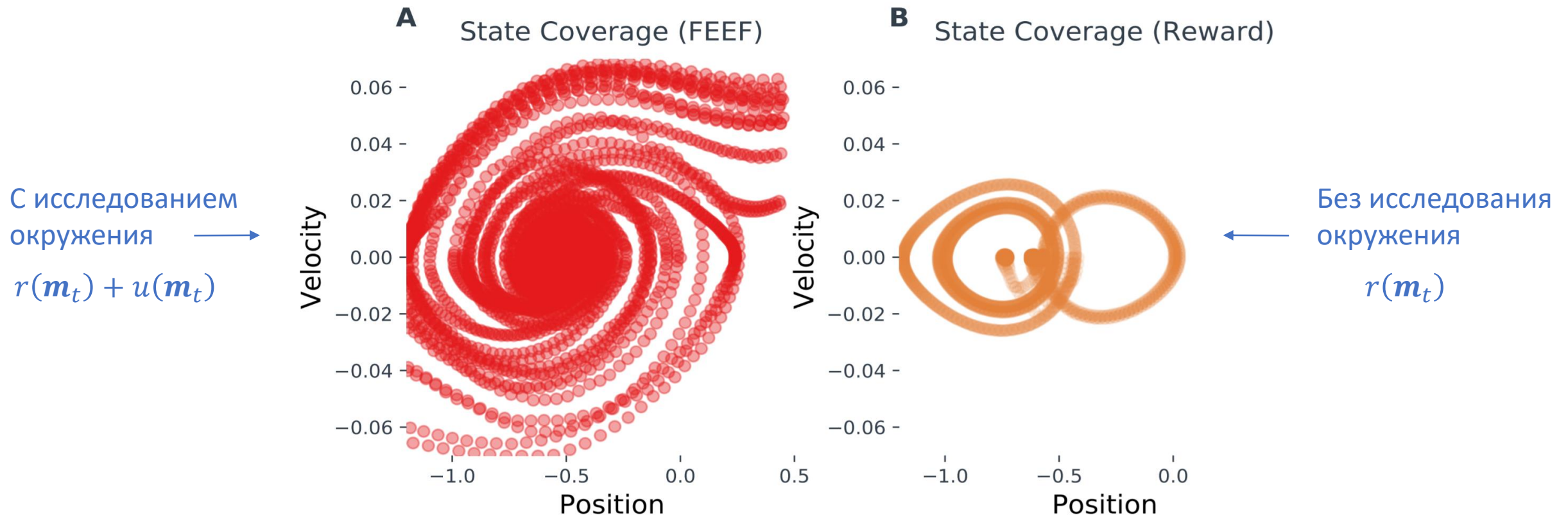
Reinforcement
Learning

Creative Reinforcement Learning

$\mathcal{F}(\mathbf{m}_t)$



Пример: MountainCar (reward + exploration)



Ожидаемая свободная энергия – модель мышления

Интуитивное поведение
(когнитивный акт)



$$\mathcal{F}(\mathbf{m}) = D(q(s, w | \mathbf{m}) || p(s, w | \mathbf{m}))$$

← Обучение на
реальных ошибках

$$\tilde{\mathcal{F}}(\mathbf{m}_{0:T}) = D(q(s_{0:T}, w_{0:T} | \mathbf{m}_{0:T}) || p(s_{0:T}, w_{0:T} | \mathbf{m}_{0:T}))$$

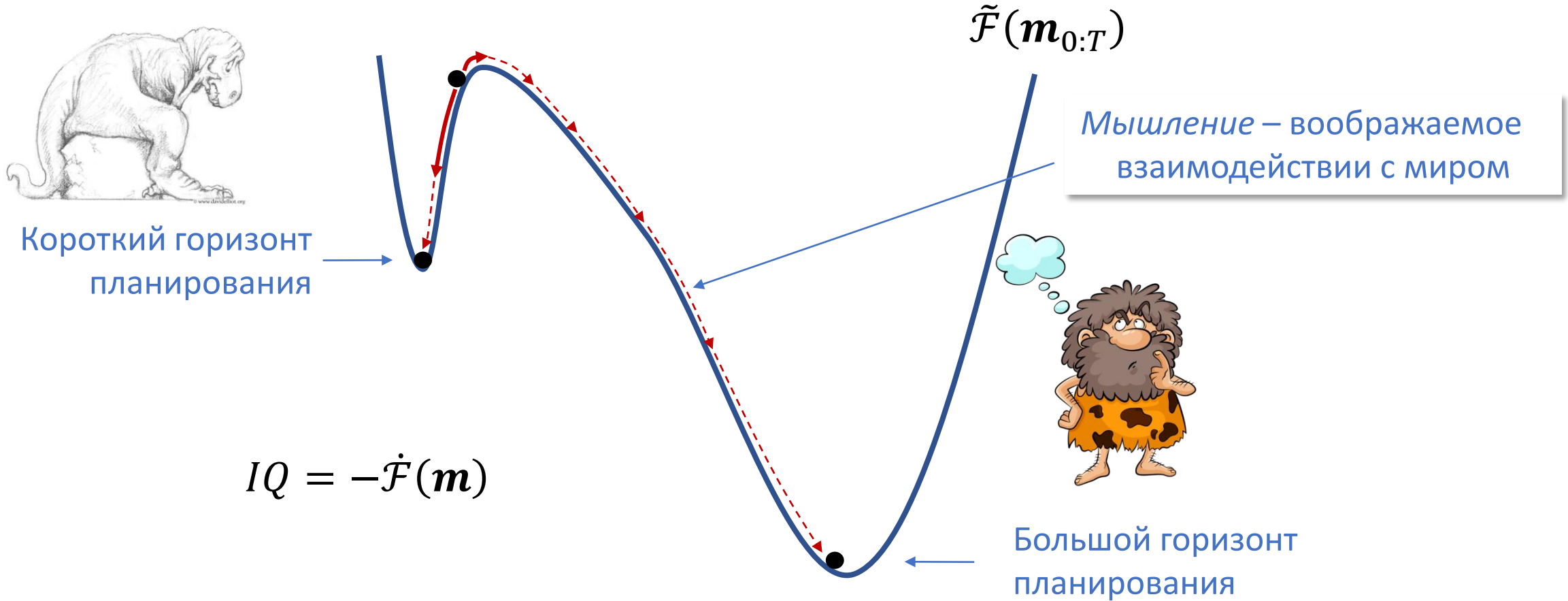
← Обучение на
воображаемых ошибках



Рациональное поведение
(цепочки воображаемых когнитивных актов)

Мышление – воображаемое
взаимодействие с миром

Усиление интеллекта за счет воображения



Мышление – планирование поведения

$$\tilde{\mathcal{F}}(\pi) = \sum_{t=0}^T \int dw_t ds_t q(w_t, s_t | \pi) [\ln q(w_t, s_t | \pi) - \ln p(w_t, s_t | \pi)]$$

Воображаемая цепочка
КОГНИТИВНЫХ СОСТОЯНИЙ

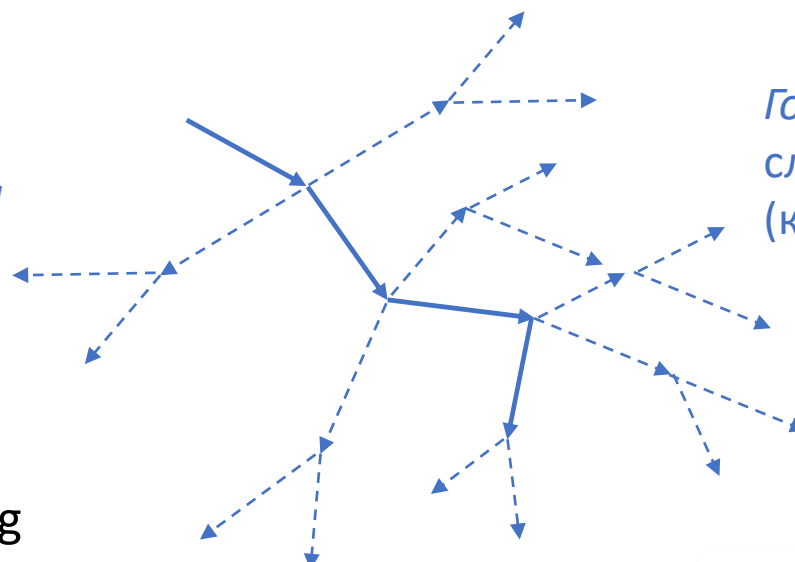
$$= -\sum_{t=0}^T [\tilde{r}_t(\pi) + \tilde{u}_t(\pi)] = -Q(\pi) \quad \leftarrow \text{Ценность стратегии } \pi = \mathbf{m}_{0:T}$$

– Ожидаемый
риск

Ожидаемые
новые знания

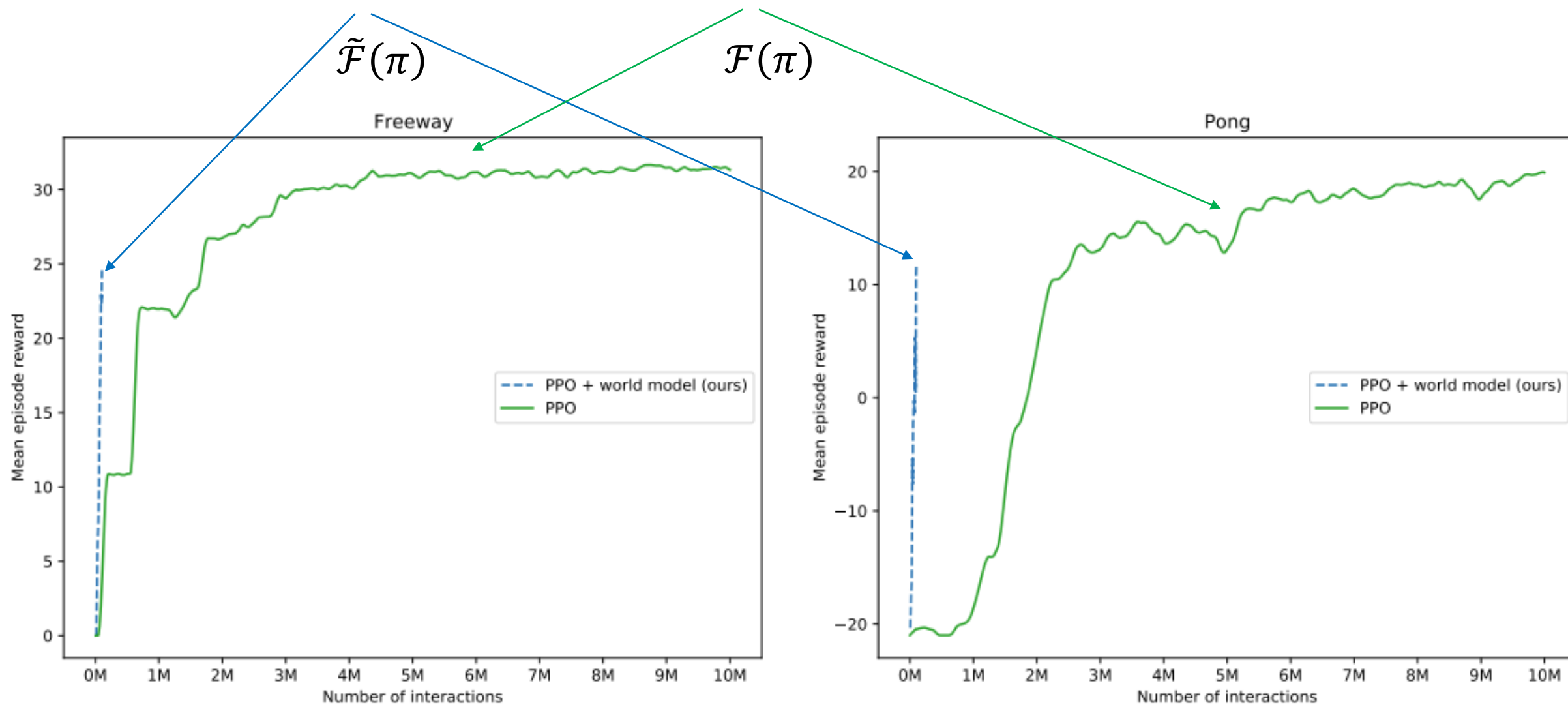
Горизонт планирования –
сложность мышления
(комбинаторный взрыв)

Model-based Reinforcement Learning



Сильный интеллект: $T \rightarrow \infty$

Model-based vs model-free RL: Atari



Robine (2020) Discrete Latent Space World Models for Reinforcement Learning

Лестница Перла



Модели, основанные на:

- Наблюдениях (*see* models)
Как коррелируют между собой наблюдаемые параметры?
- Интервенциях (*do* models)
Что будет, если изменить условия эксперимента?
- Воображении (*counterfactuals* models)
Что было бы, если бы мы поступили по-другому?



Statistics



Model-free RL

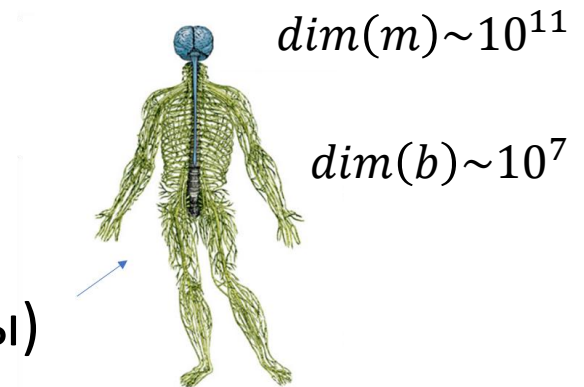


Model-based RL

Модели разных уровней несводимы друг к другу!

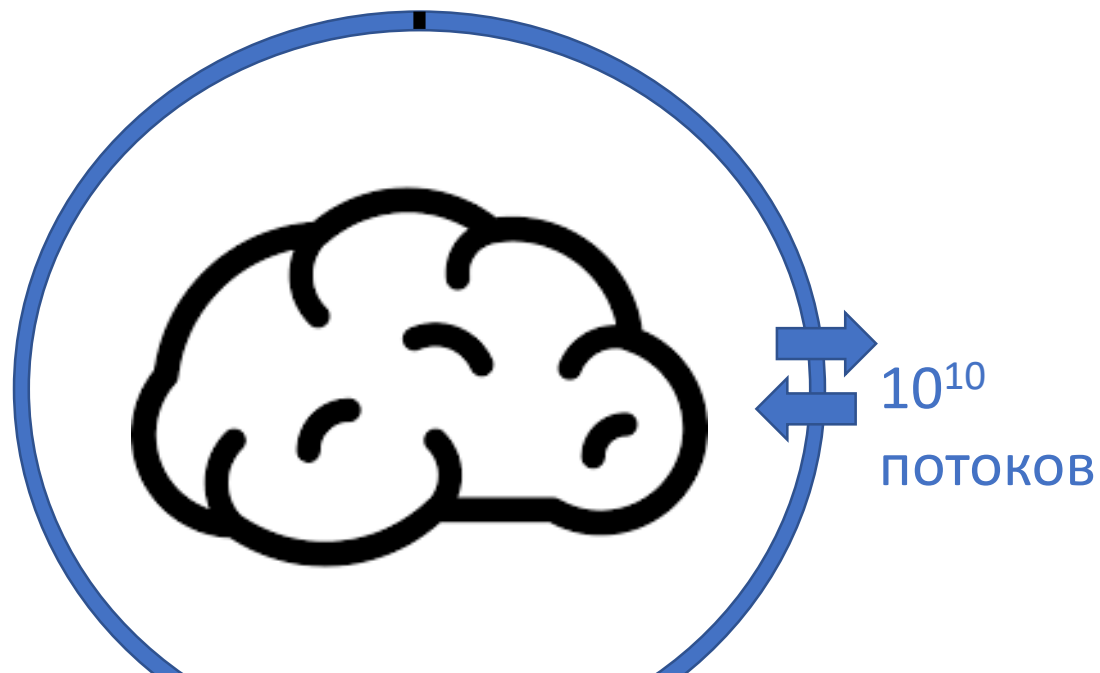
Выводы

- Теория интеллекта выводится из первых принципов
 - *Знания* – информация, необходимая для адаптации (выживания)
 - *Обучение* – накопление знаний
 - *Интеллект* – присущая адаптивным системам способность к обучению
 - *Любопытство* – присущее интеллекту стремление к обучению
 - *Эмоции* – субъективная оценка качества адаптации
 - *Мышление* – усиление интеллекта за счет воображения
- Искусственный интеллект
 - Будет обладать *психикой* со всеми ее атрибутами
 - Не похожей на нашу (сенсоры и актуаторы другой природы)



Глобальный интеллект

$$10^{10} \text{ чел} \times 10^{11} \text{ FLOPS} = \underline{10^{21} \text{ FLOPS}}$$



$$10^{18} \text{ FLOPS} \rightarrow \underline{10^{21} \text{ FLOPS}} \\ \times 1000 \text{ каждые 10 лет}$$